

**СЕРИЯ «УЧЕНЫЕ СССР.  
ОЧЕРКИ, ВОСПОМИНАНИЯ, МАТЕРИАЛЫ»**

*Серия основана в 1986 году*

**РЕДКОЛЛЕГИЯ СЕРИИ:**

**Член-корреспондент АН СССР С. Р. МИКУЛИНСКИЙ**  
(председатель),

**Член-корреспондент АН СССР Г. Б. СТАРУШЕНКО**  
(зам. председателя),

**академик А. М. БАЛДИН, академик О. Г. ГАЗЕНКО,**  
**академик И. А. ГЛЕБОВ, академик В. И. ГОЛЬДАНСКИЙ,**

**кандидат исторических наук В. Д. ЕСАКОВ,**

**академик А. Ю. ИШЛИНСКИЙ,**

**кандидат технических наук Э. П. КАРПЕЕВ,**

**доктор исторических наук Б. В. ЛЕВШИН, академик М. А. МАРКОВ,**  
**академик И. В. ПЕТРЯНОВ-СОКОЛОВ, академик Б. Б. ПИОТРОВСКИЙ,**

**академик А. М. РУМЯНЦЕВ, академик Б. С. СОКОЛОВ,**

**академик А. Л. ЯНШИН**

**Воспоминания  
о И. Я. ПОМЕРАНЧУКЕ**

**Ответственный редактор**  
**член-корреспондент АН СССР**  
**Л. Б. ОКУНЬ**

**МОСКВА**

**«НАУКА»**

**1988**

Воспоминания о И. Я. Померанчуке. — М.: Наука, 1988. — 320 с. — (Серия «Ученые СССР. Очерки, воспоминания, материалы»).

ISBN 5-02-000656-4

Выдающийся физик-теоретик академик И. Я. Померанчук (1913—1966) внес фундаментальный вклад в развитие физики низких температур, твердого тела, ядерных реакторов и ускорителей и особенно в физику элементарных частиц. «Воспоминания» охватывают годы его учебы в Ленинграде и Харькове (в аспирантуре у Л. Д. Ландау), работы в ФИАНе, ИАЭ, ОИЯИ и ИТЭФе, преподавания в МИФИ. Авторы статей — ведущие советские и иностранные ученые.

В книгу включены также научные обзоры, рассказывающие о работах И. Я. Померанчука по теории элементарных частиц и квантовой теории поля, физике твердого тела и квантовых жидкостей, теории ядерных реакторов и синхротронного излучения. В этих обзорах прослеживается развитие научных идей, высказанных И. Я. Померанчуком.

Для специалистов, работающих в различных областях физики, аспирантов, студентов, преподавателей, историков физики.

Рецензенты:

Ю. Д. ПРОКОШКИН, А. М. ПЕРЕЛОМОВ,  
Л. И. ПОНОМАРЕВ

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Этот сборник выходит к 75-летию со дня рождения выдающегося физика-теоретика академика Исаака Яковлевича Померанчука (1913—1966). Необходимость создания сборника воспоминаний об Исааке Яковлевиче не раз обсуждалась его учениками и друзьями. Но каждый раз отпугивало сознание невозможности воссоздать правдивый и полный портрет этого замечательного человека. Переломным моментом явилась подготовка осенью 1985 г. к 40-летию юбилею Института теоретической и экспериментальной физики. И. Я. Померанчук был одним из основателей института. Он создал в нем теоретический отдел и руководил им в течение 20 лет — до конца своей жизни.

При подготовке на юбилейной выставке ИТЭФа стенда, посвященного Исааку Яковлевичу, было решено попросить тех, кто его знал, написать краткие воспоминания о нем. Отклик был поразительным по единодушию и искренности. В течение одного месяца (октябрь 1985 г.) написали и прислали свои воспоминания свыше 50 человек. Вскоре после этого Президиум АН СССР по ходатайству Отделения ядерной физики принял решение об издании сборника, посвященного И. Я. Померанчуку. Для готовящейся книги воспоминания прислали еще более 20 человек, примерно половина из которых — известные зарубежные физики. Кроме того, специально для сборника были написаны шесть научных обзоров, рассказывающих о воздействии работ И. Я. Померанчука на развитие различных областей физики.

Большинство авторов этого сборника ранее воспоминаний не писали и испытывали большие трудности в необычной для себя роли мемуаристов. Но потребность рассказать о том неизгладимом впечатлении, которое произвел на них И. Я. Померанчук, оказалась сильнее. Это относится не только к тем, кто тесно общался с И. Я. Померанчуком в течение длительного времени, но и к тем, чьи встречи с ним были эпизодическими.

Воспоминания почти не подвергались редактированию. Некоторые из них не вполне согласуются друг с другом, особенно когда упоминаются даты. Это неудивительно: ведь зачастую речь идет о событиях полувековой давности, а память человеческая зыбка. В ряде случаев имеются некоторые перекрытия, даже почти тождественные формулировки. Но в целом этот мозаичный портрет убедителен и достоверен. Вместе с тем сборник воссоздает

как бы групповой портрет тех, кто соприкасался с Исааком Яковлевичем. Печально сознавать, что многих из них уже нет среди нас. Не увидят своих воспоминаний в опубликованном виде и некоторые из авторов сборника: в 1986 г. скончались Михаил Силыч Козодаев, Лев Иосифович Лapidус, Александр Иосифович Шальников. 2 декабря 1987 г. не стало одного из самых ярких и многогранных физиков-теоретиков — Якова Борисовича Зельдовича.

\* \* \*

Несколько слов о плане книги.

За редким исключением воспоминания расположены в хронологическом порядке в соответствии с тем, когда состоялась первая встреча автора с Исааком Яковлевичем.

Сборник состоит из двух больших разделов и Приложения. Собственно воспоминания составляют первый раздел книги, который разбит на четыре части. Часть I содержит воспоминания тех, кто познакомился с И. Я. Померанчуком, когда он был еще студентом. Разумеется, авторы рассказывают не только о студенческих годах, но и о последующих встречах с Исааком Яковлевичем. В соответствии с этим часть I озаглавлена «1932—1966». Аналогичным образом озаглавлены три последующие части, охватывающие 30 лет научной деятельности Исаака Яковлевича: II — «1936—1966», III — «1946—1966» и IV — «1956—1966».

Второй раздел содержит научные обзоры, написанные в 1986 г. и посвященные развитию различных научных направлений, у истоков которых стоял И. Я. Померанчук. В Приложение вошли, в частности, список научных трудов И. Я. Померанчука, основные даты его жизни и краткие сведения об авторах сборника.

Большую работу по подготовке рукописи сборника провели Н. В. Рожнова и Э. Г. Гуляева.

*Л. Б. Окунь*

## ВОСПОМИНАНИЯ

Подражать такой жизни невозможно. Но сам факт существования такой жизни долго будет служить реальной силой развития науки.

В. В. БЕРЕСТЕЦКИЙ

— Юзик, а не теоретик ли Вы?  
А. И. ШАЛЬНИКОВ

А. К. Кикоин

## ПАМЯТИ ТОВАРИЩА

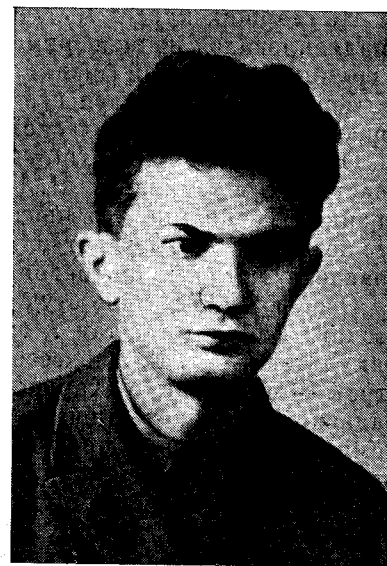
С И. Я. Померанчуком я познакомился осенью 1932 г., когда мы оба стали студентами второго курса физико-механического факультета Ленинградского политехнического института (он тогда именовался Физико-механическим институтом). Группа наша была необычной. Она была укомплектована из студентов, окончивших первый курс различных институтов. (Если мне не изменяет память, Померанчук окончил первый курс в каком-то химическом институте.) Группа имела целевое назначение: через год мы должны были переехать в Свердловск, чтобы учиться на третьем курсе физико-механического факультета. Это было связано с организацией в 1932 г. Уральского физико-технического института, которому нужны были кадры молодых физиков. По каким-то причинам перевод группы в Свердловск не состоялся, и мы заканчивали свое обучение в Ленинграде. Занятия по физике и математике велись в нашей группе по особой программе, чтобы сгладить разницу в подготовке на первом курсе.

Поначалу Померанчук был в группе малозаметен. Маленького роста, очень худой, в очках в простой металлической оправе, со всегда сжатыми губами, он был не очень общителен. Звали мы его Юзиком (для нас, его товарищей, он Юзиком и остается). Очень скоро выяснилось, что то, что казалось необщительностью, в действительности было серьезностью, необычной для юноши. Стало ясно, что Юзик — один из способнейших студентов группы. Это было видно и по вопросам на лекциях и особенно на упражнениях. Было также ясно, что это будущий теоретик. К занятиям и ко всему, что связано с ними, он действительно относился необычайно серьезно. Когда стало известно, что высшую математику (на факультете был единый курс высшей математики, не делившийся на отдельные курсы) нам будет читать Е. В. Вороновская, Юзик активно выражал свое недовольство. Он считал, что математику для физиков должен читать кто-нибудь из светила ленинградской математики. Вместо этого в расписании занятий значится никому не известное имя, к тому же женское. Однако Е. В. Вороновская читала свой курс блестяще, и мне запомнилось, что, когда через некоторое время в разговоре зашла речь о ближайших целях, которые каждый ставит перед собой,

Юзик в числе других ставил себе и такую: «знать математику в объеме Вороновской». Это подлинные его слова, я их почему-то запомнил, может быть потому, что при его слегка окаявшем говоре фамилия Вороновская звучала как-то по-особому.

Аналитическую механику — первый из курсов теоретической физики — читал у нас Я. И. Френкель. Здесь Юзику обижаться было не на что, поскольку Я. И. Френкель, несомненно, был требуемым светилом. Скоро, однако, мы перестали понимать нашего прославленного лектора. Лично я даже не мог понять, о чем идет речь. И каким-то утешением для меня было то, что не понимал лекции и «сам» Юзик. Он уходил с лекций мрачным. Его угнетало то, что он, будущий физик-теоретик, не в состоянии понимать лекции по теоретической физике. Его озабоченность передалась и мне при всей моей тогдашней беспечности. Моя озабоченность была, правда, другого характера: ведь по окончании курса будет экзамен. И я принял свои «меры». Я «пожаловался» старшему брату и объяснил ему ситуацию, сославшись именно на то, что лекции не понимает Юзик. Брат его уже знал, поскольку «подгонял» нашу группу по общей физике. Сам бывший студент Я. И. Френкеля, он высказал предположение, что Яков Ильич читает нам что-то из того, что он в данный момент переводит. На другой день я узнал, что Яков Ильич в то время переводил книгу М. Борна «Atommechanik».

В тот же день книга была у меня в руках. Первая глава называлась «Klassische Physik». Я показал книгу Юзику, мы перевели первую главу на русский язык, и он сразу понял, что наш профессор читает нам именно эту главу, но приводит все выкладки, естественно опущенные Борном в краткой вступительной главе. По-видимому, Яков Ильич выполнял эти выкладки прямо при нас на лекциях и не все у него шло гладко. Юзик не только быстро разобрался в курсе, но объяснил и мне, и объяснил удивительно ясно. По всей вероятности, он помог не только мне, потому что экзамен группа благополучно сдала.



И. Я. Померанчук. Копия с фотографии 1929 г., хранящейся в музее Рубежанского химического комбината

Любезно предоставлена хранителем музея И. Д. Виленским и прислана Я. И. Грановским

На старших курсах мы учились уже в разных группах. Я специализировался по экспериментальной физике, Юзик же перешел в группу химической физики. Возможно, что этот выбор в какой-то мере был обусловлен его «первокурсным прошлым». Специализации же по теоретической физике на факультете не было.

Обучаясь в группе химической физики, Юзик, по-видимому, участвовал в семинарах Н. Н. Семенова в Институте химической физики. Точно мне это неизвестно, и сужу я об этом потому, что позже часто слышал от него восторженные отзывы о Я. Б. Зельдовиче, с которым он, вероятно, встречался на этих семинарах.

Осенью 1935 г. трое студентов пятого курса инженерно-физического факультета (так к этому времени стал называться наш факультет) — Н. Е. Алексеевский, С. С. Шалыт и автор этих строк — приехали в Харьков, в криогенную лабораторию Украинского физико-технического института, для прохождения дипломной практики у профессора Л. В. Шубникова. По приезду мы не без удовольствия узнали, что в Харьков еще до нас приехал и Юзик, тоже на дипломную практику, но в отдел теоретической физики института, к Л. Д. Ландау. Поселили нас в частном доме на окраине Харькова, в комнате, где уже жил Юзик. В комнатке было не более десяти квадратных метров. Вдоль стен стояли четыре кровати, по две у каждой стены, с промежутком в полшага. Рядом была другая комната еще меньших размеров. В ней стояли стол и четыре стула. Здесь по вечерам можно было пить чай из большого хозяйского чайника. В этом доме мы прожили до весны 1936 г. — до отъезда в Ленинград на защиту дипломных работ. Наше жилье, впрочем, было только местом ночлега, так как приходили мы домой поздно вечером.

После первых разговоров выяснилось, что Юзик к дипломной работе еще не приступал. Он, оказывается, сдает теорминимум. Это новое для нас слово было нетрудно понять, потому что в те годы словосочетание «технический минимум» было очень модным, оно встречалось ежедневно во всех газетах. Но когда Юзик нам рассказал, что сдать теорминимум — значит сдать шесть труднейших экзаменов, и притом самому Ландау и, конечно, не на студенческом уровне, мы забеспокоились о судьбе его дипломной работы. Ведь дипломная практика длится всего шесть месяцев! Однако сам он никакого беспокойства не выражал. Вместо этого осыпал нас самыми восторженными рассказами о Ландау. Видно было, что он находится под очень сильным впечатлением от общения с этим выдающимся человеком, именно человеком, а не только физиком.

Здесь, в Харькове, я впервые увидел, как умеет работать Юзик. Каждый вечер, когда мы возвращались домой, уставшие после 12-часового рабочего дня, Юзик непременно делился с нами тем, что он в этот день узнал нового. Это мог быть рассказ о не известной ему (и, разумеется, нам) математической теореме, и о

квантовой теории теплоемкости, и о мультипольном излучении — все зависело от того, к сдаче какой части теорминимума он в данное время готовился. У него была потребность делиться с нами радостью узнавания, радостью понимания. Теоретической физикой он был одержим. Я, далеко не всегда понимая суть его рассказов, поражался невероятной работоспособности этого, такого хилого, слабого на вид человека. Но в его голосе не было усталости, чувствовалась восторженность.

Когда случалось так (очень редко), что Юзик не имел возможности работать в библиотеке столько, сколько бы ему хотелось, и поэтому он, по его мнению, ничего нового не узнал, он совершенно серьезно говорил, что нынче у него был пропащий день. И конечно, постоянной темой наших вечерних разговоров был Ландау, которым он не уставал восхищаться. У наших коллег-экспериментаторов мнения о Ландау были далеко не столь однозначными. Но от своего руководителя Л. В. Шубникова, близкого друга Ландау, я слышал отзывы, подобные тем, что высказывал Юзик. Многие молодые сотрудники УФТИ говорили нам, что Ландау плохой научный руководитель, что он мало помогает своим ученикам и т. д. Когда мы передавали эти высказывания Юзику, он с возмущением их отвергал. По его мнению, научный руководитель должен толкнуть своего ученика в воду, но в подходящем месте, а «плыть» он должен сам. Он считал, что Ландау, предложив ему тему и с помощью теорминимума предоставив возможность общения с ним, сделал все, что должен сделать для своего ученика учитель.

Иногда он приходил домой и говорил, что в этот день ему не удалось как следует поработать, что он написал значительно меньше десяти тысяч знаков. Я уже не помню, кто установил такую «норму» для теоретиков — он сам или Ландау. Он неизменно интересовался тем, как идут дела у нас, дипломников-экспериментаторов. Но нам обычно не о чем было рассказывать. Мы либо проводили дни с паяльником в руках, либо вели борьбу за устранение течи в наших приборах. Занимались мы: один — сверхпроводимостью сплавов, другой — криомагнитными аномалиями, третий — жидким Не II. Все это его интересовало. Он сокрушался, что не удастся создать теорию сверхпроводимости, и считал, что Ландау должен «сильно подумать» и такую теорию создать.

Дипломные работы мы успешно выполнили и защитили (но Юзик, кроме того, и теорминимум сдал!) и получили приглашение на постоянную работу в УФТИ.

Осенью 1936 г. мы все вернулись в Харьков, став штатными сотрудниками института; и мне снова довелось в течение нескольких месяцев жить с Юзиком в одной квартире. На этот раз вдвоем, в жилом доме на территории института и на более обширной площади. Не было привычной тесноты, но собирались мы дома по-

прежнему только поздно вечером. Оба мы были ассистентами кафедры общей физики Харьковского университета, которой заведовал, как это ни странно, Ландау. Кафедра почти сплошь была укомплектована теоретиками — учениками Ландау. На кафедре был нужен ассистент для занятий в студенческом практикуме, и Ландау попросил Шубникова выделить ему для этой цели одного из своих сотрудников. Выбор Шубникова пал на меня.

Педагогическая деятельность наша на кафедре Ландау длилась недолго. В самом конце 1936 г. Ландау был уволен со своего поста. Все его сотрудники подали заявление об уходе. Это тогда надделало немало шума и в университете и в институте. Дело дошло до того, что все подавшие заявления были вызваны в Киев к наркому просвещения УССР В. П. Затонскому. Померанчук первым из нас давал объяснения наркому о причинах, побудивших его подать заявление об уходе после увольнения Ландау. Нам оставалось только повторить, с небольшими вариациями, его доводы.

Работал Юзик по-прежнему неистово, одержимо. Но вечером он находил и время и силы, чтобы говорить со мной о физике, помогая понять попадавшиеся мне трудные теоретические статьи по моей специальности. Я, может быть, даже злоупотреблял возможностью пользоваться помощью моего, так сказать, персонального теоретика. Я чувствовал, что он относится ко мне с некоторой снисходительностью. Но она не была обидной. Он хорошо знал, сколь ограниченны мои познания в теоретической физике, и говорил со мной на удобном для меня языке.

То было время бурного развития ядерной физики. Но курса ядерной физики на факультете, конечно, не было, и, пожалуй, единственное, что я знал, — это то, что протонно-электронная модель ядра сменилась протонно-нейтронной. Чтобы как-то ликвидировать свою неграмотность, я посещал семинары лабораторий, занимавшихся в нашем институте ядерной физикой. Но так как поначалу я мало что понимал на этих семинарах, то вечером обращался к Юзику со множеством вопросов, которые не решался задавать на семинарах. Перед товарищем я не стеснялся обнаружить свое невежество, о котором он и без того знал. Сам Юзик оказался вполне компетентным как в этих, так и в других вопросах. Он особенно подчеркивал важность изучения космических лучей, чрезвычайно «модных» в то время. Я видел, что мой товарищ по обширности познаний, по широте научных интересов становится похожим на своего учителя. Мне нравилось думать, что и по таланту он приближается к нему.

Спокойная жизнь и увлекательная работа скоро были нарушены важными для нас событиями. Летом 1937 г. я остался без научного руководителя, вскоре Харьков покинул Ландау, и почти сразу вслед за ним уехал, чтобы не расставаться с учителем, и Померанчук... Правда, Харьков Юзик не любил и расстался с ним без всякого сожаления. А за Ландау он, по его словам,

последовал бы «хоть на остров Диксон». Со студенческих лет он очень любил Ленинград. Однажды, когда разговор шел не о физике, а о личном (что случалось не слишком часто), он сказал, что хотел бы когда-нибудь вернуться в Ленинград и что хорошо бы закончить жизнь профессором теоретической физики Ленинградского университета.

Память сохранила еще одну встречу с И. Я. Померанчуком. В октябре 1943 г. я был вызван из далекой Алма-Аты в Москву к И. В. Курчатову. К моему удивлению, на вокзале меня встретил Померанчук, с которым я давно не виделся. Я не знал, где он живет и работает, но, конечно, видел его статьи по взаимодействию электронов проводимости в металлах и по рассеянию медленных нейтронов. Однако это были еще довоенные публикации.

Юзик отвез меня в какое-то незнакомое мне здание, где и «передал» Курчатову. После беседы с Игорем Васильевичем и получения назначения я снова встретился с Юзиком, и мы поехали к нему домой. Здесь я прослушал замечательную лекцию о проблеме, которой занимались физики, собранные Курчатовым. Ведь я уже три года занимался не столько физикой, сколько альпинизмом, участвуя по распоряжению штаба Среднеазиатского военного округа в подготовке горных стрелков в качестве инструктора альпинизма. Все эти годы я не видел свежего номера физического журнала. То, что мне рассказал Юзик, было очень интересно, тем более что рассказано это было мастерски.

После 1945 г. у нас были лишь случайные короткие встречи во время моих редких приездов в Москву. Я издали следил за успехами моего товарища в науке и радовался за него.

*Л. Н. Курбатов*

## И. Я. ПОМЕРАНЧУК В СТУДЕНЧЕСКИЕ ГОДЫ

Мне выпало счастье учиться в Ленинградском физико-механическом институте в одной группе с И. Я. Померанчуком. В 1932 г., когда началось наше знакомство, Физмех, организованный по инициативе академика А. Ф. Иоффе, был центром притяжения для молодых людей, стремившихся посвятить свою жизнь физике и ее техническим применениям. Профессорский состав включал многих выдающихся физиков и математиков того времени. Среди них в первую очередь необходимо назвать Я. И. Френкеля, И. К. Кикоина, Л. Э. Гуревича и Н. М. Гюнтера. Система обучения предусматривала как можно более раннее привлечение

студентов к исследовательской работе. Следует заметить, что современный Физтех в какой-то степени использовал опыт старого Физмеха, существенно развив и дополнив его.

В августе 1932 г. я впервые встретился с И. Я. Померанчуком в канцелярии приемной комиссии. Далее я буду называть его, как в те далекие времена, просто Юзик. Не буду описывать его внешность — она многим хорошо известна. Меня сразу привлекли одухотворенность его глаз за стеклами очков и приятная манера разговаривать, способствующая сближению. Мы вскоре перешли на «ты». Оказалось, что у нас общая забота — быть принятыми на второй курс, так как первый мы прошли в других, провинциальных вузах. Нам предложили учиться в так называемой свердловской группе, предназначенной для подготовки кадров будущего Института физики металлов в Свердловске, организации которого занимался И. К. Кикоин. Не будучи связанными с Ленинградом, мы с радостью подписались, что согласны уехать в Свердловск, когда это станет необходимо. Все это, как оказалось, не имело значения, так как отъезд наш так и не состоялся. После перехода на третий курс нашу группу расформировали и мы оба попали в группу по кафедре химической физики, возглавляемой С. З. Рогинским. Интересно, что в то же время комплектовалась группа теоретической физики, но Юзик почему-то туда не был зачислен. Среди студентов свердловской группы было много горевших желанием заниматься физикой. Кроме Померанчука к ним относились Н. Е. Алексеевский, П. Е. Спивак, В. С. Розинг<sup>1</sup> и другие. Все они быстро компенсировали пробелы в образовании, связанные с обучением на первом курсе в вузах нефизического профиля, и учились очень хорошо.

В первые же дни общение с Юзиком произвело на всех нас неизгладимое впечатление. Он схватывал материал лекций так быстро, как будто заранее все знал. Лучше Юзика никто не мог разъяснить непонятные вопросы. Это проявилось особенно ярко, когда мы приступили к изучению теоретической физики. Личное общение с Юзиком было чрезвычайно важно, так как учебников было мало и многие вопросы приходилось изучать только по записям лекций. Все преподаватели выделяли Юзика как лидера нашей группы. Я сам слышал слова Я. И. Френкеля, что вопросы, которые задает Померанчук, по сути дела, относятся к нерешенным или подлежащим решению теорфизикой 30-х годов. Общее мнение сводилось к тому, что Померанчука ждет блестящее научное будущее. К счастью, так и случилось.

Кроме очевидных признаков таланта Юзика отличала удивительная трудоспособность. Он считал, что продолжительность рабочего дня должна быть не менее 14 часов. Юзик жил в общении, где не было условий для занятий, поэтому он каждый

<sup>1</sup> В. С. Розинг погиб на фронте в 1943 г.

вечер сидел в читальном зале библиотеки до ее закрытия. Попытки пригласить его развлечься Юзик обычно отвергал, но был склонен к серьезным разговорам о физике и музыке, при этом становился очень оживленным и интересным собеседником. Иногда бывали и разговоры на личные темы. Однажды я слишком активно пытался позвать Юзика в кино. Он мне сказал тогда, что судьба и наследственность отвели ему очень мало времени для жизни, а сделать надо много, терять время нельзя.

Увы, его прогноз отчасти сбывся, хотя он и прожил значительно больше, чем предполагал тогда.

Должен сказать, что разговоры с Юзиком в студенческие времена дали мне и другим очень много. Его энтузиазм захватывал окружающих. Я навсегда запомнил его горящие глаза, когда он рассказывал о чем-нибудь новом и поразившем его воображение. Кроме таланта физика, у него был талант учителя в самом высшем смысле этого слова. Однажды во время короткой прогулки в Сосновке он с воодушевлением рассказывал мне об одной из своих первых работ, выполненной на пятом курсе под руководством Л. Д. Ландау. Хотя я был очень далек от проблемы рассеяния света на свете, в его изложении все казалось понятным.

После окончания института наши пути разошлись, но время от времени мы встречались. Запомнилась встреча 1939 г., когда Померанчук буквально прибежал ко мне в лабораторию, чтобы рассказать об открытии деления ядра урана. Многие его мысли оказались пророческими. Следующая встреча была весной 1944 г., когда Померанчук уже был признан во всем мире как один из ведущих физиков-теоретиков. Это обстоятельство несколько не повлияло на его душевные качества, и мы провели прекрасный вечер, полный воспоминаний.

В последние годы Померанчук стал проявлять инициативу в организации встреч со старыми друзьями. Несколько раз мы встречались у Н. Е. Алексеевского и у меня дома. Чувствовалось, что он часто углубляется в воспоминания о далеких временах, но основной темой оставалась столь любимая им Физика.

Безвременная смерть в 1966 г. унесла одного из наиболее ярких советских ученых, но в наших сердцах он остался навсегда как пример благородного и плодотворного служения науке и как человек с прекрасной и доброй душой.

## Н. Е. Алексеевский

## И. Я. ПОМЕРАНЧУК В ЮНОСТИ

С Исааком Яковлевичем Померанчуком я познакомился в 1932 г. В то время мы учились на втором курсе Ленинградского физико-механического института, были студентами так называемой свердловской группы (предполагалось, что весь выпуск этой группы поедет в Свердловск для работы в создававшемся там новом институте). Это был небольшой, очень худенький юноша с копной курчавых волос, в старомодных очках в железной оправе. Вел он (как, впрочем, не только он в то время) очень аскетический образ жизни, был совершенно равнодушен к вопросам быта. Многие из нас увлекались спортом, ходили на лекции по искусству, в музеи и т. д., он же был полностью поглощен занятиями. Нас всех тогда поражали в нем прежде всего его исключительная целеустремленность и работоспособность. В свободное от лекций время он с самого утра и до закрытия занимался в институтской библиотеке. Это было место, где его всегда можно было найти. Казалось, что для него, кроме занятий физикой, ничего другого не существует. Своими знаниями он уже на младших курсах выделялся на общем студенческом фоне. Знакомство с Л. Д. Ландау (в 1934—1935 гг.) в значительной мере определило дальнейшее направление его деятельности — он посвятил себя теоретической физике.

Уже первые работы И. Я. Померанчука имели существенное значение для развития физики. Так, его дипломная работа, которую он делал в Харьковском физико-техническом институте под руководством Л. Д. Ландау, и по сей день не утратила своего значения, хотя с тех пор прошло более полувека. Работа эта была посвящена взаимодействию электронов проводимости друг с другом. В ней было показано, что в чистых металлах при низких температурах взаимодействие между электронами приводит к квадратичной зависимости электросопротивления от температуры.

Круг научных интересов Исаака Яковлевича был очень широк. Он успешно работал в различных областях теоретической физики. В последние годы жизни он, как известно, много занимался физикой элементарных частиц. В то же время он иногда отвлекался от основной своей тематики и, заинтересовавшись вопросами из несколько иной области, проводил весьма интересные исследования.

Так, однажды, в то время, когда он занимался в основном вопросами ядерной физики, он как бы случайно в разговоре рассказал об интересных свойствах  $^3\text{He}$ . Проведенное им тогда исследование свойств  $^3\text{He}$  привело к открытию так называемого

померанчук-эффекта — понижения температуры при адиабатическом затвердевании  $^3\text{He}$  под давлением. На этой работе Исаака Яковлевича стоит остановиться подробнее. Заинтересовавшись тем, что из экспериментальных данных следовало отсутствие сверхтекучести у жидкого  $^3\text{He}$  вплоть до 1,05 К, Исаак Яковлевич рассмотрел возможные причины различия между жидким  $^3\text{He}$  и жидким  $^4\text{He}$ , который, как это следовало из опытов П. Л. Капицы, переходил в сверхтекучее состояние при  $T = 2,19$  К. Отметив, что в случае  $^4\text{He}$  сверхтекучести способствует статистика Бозе—Эйнштейна, И. Я. Померанчук рассмотрел свойства  $^3\text{He}$ , который, имея полуполный спин, должен подчиняться статистике Ферми—Дирака. Применяя методы теории возмущений к разреженному ферми-газу, Исаак Яковлевич пришел к заключению, что жидкий  $^3\text{He}$  может остаться несверхтекучим. Он определил температурные зависимости для теплоемкости, вязкости и теплопроводности жидкого  $^3\text{He}$ ; при этом он, например, получил, что теплоемкость жидкого  $^3\text{He}$ , подобно электронной теплоемкости металла, должна быть линейной функцией температуры:  $C = aT$  при  $T < T_0$ , где  $T_0$  — температура вырождения. Исаак Яковлевич рассмотрел влияние обменных эффектов на фазовый переход жидкого  $^3\text{He}$  в твердый. Он показал, что в области температур  $T, T_m \ll T \ll T_1$ , энтропия твердого  $^3\text{He}$  оказывается больше энтропии жидкости. Поэтому при изотермическом затвердевании тепло должно поглощаться, т. е. теплота плавления оказывается отрицательной. Здесь  $T_m$  — температура, ниже которой начинается магнитное взаимодействие ядерных спинов  $^3\text{He}$  друг с другом. (По мнению Исаака Яковлевича,  $T_m \approx 10^{-7}$  К, а  $T_1 \approx 1$  К.) Меньшее значение энтропии в жидкой фазе следует из того, что в жидком состоянии между атомами  $^3\text{He}$  существуют обменные эффекты, приводящие к корреляции между ориентациями спинов соседних ядер  $^3\text{He}$ . Вследствие этого энтропия  $S \sim T$  при уменьшении  $T$  будет стремиться к нулю. В твердом  $^3\text{He}$  существование кристаллической решетки должно приводить либо к значительному уменьшению обменных эффектов, либо к их полному исчезновению. Поэтому ядерные спины в твердом  $^3\text{He}$  будут при  $T > T_m$  свободно ориентироваться и энтропия твердого  $^3\text{He}$  при  $T_m \ll T \ll T_1$  будет постоянной.

Использование предложенного И. Я. Померанчуком адиабатического сжатия жидкого  $^3\text{He}$  для понижения температуры долгое время не реализовывалось. Возможно, это было связано с тем, что сжатие жидкого  $^3\text{He}$  без нагрева, вызванного трением, казалось весьма трудной задачей. Лишь через пятнадцать лет после опубликования работы И. Я. Померанчука<sup>1</sup> Ю. Д. Ануфриев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Померанчук И. Я. К теории жидкого  $^3\text{He}$  // ЖЭТФ. 1950. Т. 20, вып. 10. С. 919.

<sup>2</sup> Ануфриев Ю. Д. Использование эффекта Померанчука для получения сверхнизких температур // Письма в ЖЭТФ. 1965. Т. 1, вып. 6, С. 1.



реализовал метод Померанчука, охладив  ${}^3\text{He}$  до 18 мК. В настоящее время метод Померанчука является одним из основных методов получения сверхнизких температур и широко используется в различных лабораториях мира. Если сравнить рефрижератор, использующий теплоту раствора  ${}^3\text{He}$  в  ${}^4\text{He}$  и работающий в однопоразовом режиме, с рефрижератором, основанным на эффекте Померанчука, то можно убедиться в том, что при температуре  $T = 5$  мК холодопроизводительность рефрижератора, использующего померанчук-эффект, оказывается примерно на порядок выше.

Наука была основным содержанием всей его жизни. И вместе с тем он был широкообразованным и высококультурным человеком, с ним интересно было беседовать на любую тему. Например, он очень любил и хорошо знал литературу, поэзию, знал наизусть и любил цитировать стихи, особенно Пушкина.

Несмотря на то что Исаак Яковлевич Померанчук пользовался в науке огромным авторитетом, он был совершенно лишен какого бы то ни было высокомерия. Ему в высокой степени было присуще чувство товарищества. В общении с людьми, в частности со своими однокашниками, он до последних дней жизни сохранял простоту отношений, характерную для студенческих лет. Случалось, что мы подолгу не виделись, но при встрече сразу же возникала прежняя теплота отношений. Обычно, придя к нам и поздоровавшись подчеркнуто любезно с моей матерью и женой, он с первых же слов переходил на какую-нибудь научную тему, словно мы виделись только вчера и он продолжает не оконченный накануне разговор. Слушать его всегда было крайне интересно. Рассказывая последние научные новости, он был настолько сосредоточен, что, казалось, полностью отключался от всего окружающего. Не менее интересно было его слушать, когда разговор переходил с научных на какие-либо иные темы. Будучи весьма образованным человеком, он был к тому же прекрасным рассказчиком, речь его была очень красочна и афористична.

Я уже говорил о том, что Исаак Яковлевич был совершенно безразличен к своему внешнему виду; как известно, он не злоупотреблял бритьем и очень часто ходил с трехдневной щетиной. Поэтому мы были поражены, когда однажды он пришел к нам чисто выбритый и элегантно одетый. Мы уже знали, что он серьезно болен. Но в этот вечер он был так оживлен, так оптимистически настроен, с таким увлечением рассказывал разные забавные истории, что у всех зародилась надежда на то, что в его состоянии наступило улучшение.

К сожалению, этой надежде не суждено было сбыться.

М. А. Ельяшевич

## ИЗ ВОСПОМИНАНИЙ О ПЕРИОДЕ 1931—1935 гг.

В этот период группа молодых сотрудников организованного осенью 1931 г. Ленинградского института химической физики (ЛИХФ) работала под руководством Я. И. Френкеля. В нее входили семь человек — Л. Э. Гуревич, С. В. Измайлов, О. М. Тодес, В. С. Сорокин, А. Г. Самойлович, Т. А. Конторова и я. Всех нас (кроме А. Г. Самойловича) Я. И. Френкель привлек к преподаванию на возглавляемой им кафедре теоретической физики физико-механического факультета ЛПИ (как раз в тот период это был идеальный физико-механический институт). Занятия проводились по групповому методу, и нам, аспирантам, приходилось не только вести семинары, но и читать лекции, в частности я читал лекции по статистической физике. Было много талантливых студентов среди тех, с которыми я занимался. Я помню В. Б. Берестецкого, Г. Ю. Джанелидзе, И. М. Шмушкевича. Берестецкий посещал мои лекции по курсу статистической физики. Он был самым способным студентом в группе. Я помню, как он всегда сидел на первой скамейке и внимательно слушал, записывая лекции, и был активен на семинарских занятиях. Среди других студентов факультета, помимо тех, с которыми я проводил занятия, я запомнил лишь одного — это был И. Я. Померанчук, который уже тогда особо выделялся среди лучших студентов-теоретиков. Я хорошо запомнил тот единственный раз, когда он пришел ко мне на консультацию, которую я проводил по расписанию в полуподвальном помещении одного из небольших учебных зданий ЛПИ. Это был худощавый студент, небольшого роста, в очках, и задавал он очень трудные вопросы; какие именно, я не запомнил, но хорошо помню общее впечатление, которое он производил своей серьезностью и вдумчивостью. Вероятно, я не мог ответить на его вопросы достаточно хорошо, и больше он ко мне не приходил. А эта консультация очень запомнилась мне.

А. И. Шальников

## 50 ЛЕТ СПУСТЯ ПОСЛЕ МОЕГО ЗНАКОМСТВА С ЮЗИКОМ ПОМЕРАНЧУКОМ

Не так легко вернуться к событиям, которые происходили более пятидесяти лет назад.

В 1934 г. я начал работать в Ленинградском институте химической физики (ЛИХФ) на Приютской улице в Лесном, в лаборатории Н. Н. Семенова; тогда мне было 29 лет.

В то время я еще толком ничего не понимал, но уже общался с целой оравой молодежи: дипломантов и практикантов — студентов двух последних курсов физико-механического факультета Ленинградского политехнического института, их было человек семь.

Приходилось поворачиваться, чтобы не навлечь на себя гнев начальства, которое тоже ничего не знало и не понимало, в особенности в эксперименте. А тут еще на преддипломную практику факультет прислал новую группу студентов, которые, как голодные галчата, требовали свежей научной пищи.

Ко мне явился кудлатый, нечесаный, голодный мальчик с умными блестящими глазами. У меня не было времени с ним возиться, и я привел его в комнату на четвертом этаже, забитую старыми стеклянными вакуумными установками. Потратив несколько минут, я попытался объяснить мальчику, что ему следовало бы среди этого складахлама делать.

Спустя две-три недели, встретив Юзика в коридоре, я привел его к рабочему месту и обнаружил, что все, что только могло бы быть разрушено и уничтожено, уже разрушено и уничтожено.

Я задал Юзику только один вопрос: «Юзик, а не теоретик ли Вы?» Он мне ответил: «Я, собственно, не знаю, а что?»

Раздобыв денег на дорогу и кое-какой еды с помощью моей жены (было голодно), я отправил Юзика в Харьков к Ландау. Юзик всегда вспоминал эту короткую историю.

П. Е. Спивак

ВЕСНОЙ 35-го

Студенческая пора кончалась. Оставались распределение и дипломная работа. В это время я редко встречался с Юзиком. Неожиданно он пришел в бывшую (и заброшенную в то время) рентгеновскую лабораторию главного здания Политехнического института, где моей задачей было показать А. И. Алиханову, что он может рискнуть взять меня в Физико-технический институт в свою лабораторию. Рассказав, каких трудов стоило ему разыскать меня, и держась подальше от трещавшего форвакуумного насоса, Юзик стал расспрашивать о моих занятиях, об устройстве счетчика Гейгера и других не очень многочисленных приборов. Он расспрашивал так детально, как будто хотел сам немедленно заняться чем-либо подобным. Когда он спросил меня, что я думаю о возможности создания униполярной динамо-машины, то до меня наконец дошло, что Юзик находится в совсем несвойственном ему растерянном состоянии. Оказалось, что он не знает, подходит ли ему экспериментальная физика или, может быть, электроника. Было чему удивиться, так как сокурсники его давно поняли, что Юзик по природе своей физик-теоретик. Я думаю, что Исаак Яковлевич, может быть, и неосознанно хотел лишний раз убедиться, что работа с «железками» не может его вдохновить. Так или иначе, но, к счастью, сомнения Исаака Яковлевича о своем соответствии тем высоким требованиям, которые он всегда предъявлял себе, продолжались недолго и через несколько месяцев он уехал в Харьков к Ландау.

Мне запомнились еще два эпизода. Один из них — поход на «консультацию» к академику В. Ф. Миткевичу, предпринятый в связи с дискуссией между ним и Яковом Ильичем Френкелем, которая вызвала тогда большие споры. Мы должны были быть приняты академиком в его квартире в профессорском доме Политехнического института. Встретила нас молодая дама, которая сказала, что Владимир Федорович должен был уехать по срочному делу, но она — его дочь — может его заменить. Она прочла нам небольшую лекцию об эфире и с помощью нанесенных на листок бумаги линий и увеличительного стекла продемонстрировала некоторые его свойства. Исаак Яковлевич был очень серьезен, изредка хмыкал и внимательно глядел в лупу. Кажется, мы разошлись в этот вечер без обсуждений и споров.

...Мы идем через город июньской белой ночью. Сперва Выборгская сторона, потом Петроградская, где белые ночи особенно колдовские. Эта прогулка с Исааком Яковлевичем особенно запомнилась мне. Превосходство знаний позволяло ему доходчиво объяснить то, что осталось непонятым из лекций и учебников,

но не препятствовало общению с ним как с товарищем-сокурсником, с которым легко говорить, не встречая равнодушия или пренебрежения. Мы обсуждали то интерпретацию законов квантовой механики, то мое еретическое представление о пространстве как о субстанции. Помню, что Исаак Яковлевич горестно вопрошал: «Что это за пример — время, от которого нельзя избавиться?» — а также выражал кровожадное желание, чтобы какие-нибудь законы сохранения нарушались в элементарных процессах, дабы дать теоретикам большую свободу.

Я припомнил совсем короткий период — весну и лето 35-го года, несколько эпизодов, которые могла сохранить память о молодом Померанчуке, пока он еще не стал Чуком, а был Юзиком.

Конечно, я встречался изредка с Исааком Яковлевичем все последующие годы. Иногда при этих встречах он гневно корил меня: «Тебе надо немедленно переключиться на физику высоких энергий, а не заниматься пополнением табличных данных». Впрочем, его атака могла быть быстро отражена упоминанием фундаментальных открытий, сделанных в области низких энергий.

В моем представлении Исаак Яковлевич вовсе не был тщедушным или тем более хилым. Просто он был невысок и худощав, но обладал весьма крепкой конституцией, которая позволяла ему переносить всякие лишения, редко болеть и никогда не терять ни профессиональной работоспособности, ни присущего ему жизнелюбия.

Я. Б. Зельдович

## И. Я. ПОМЕРАНЧУК — ЧЕЛОВЕК И УЧЕНЫЙ

Академик Исаак Яковлевич Померанчук, Юзик, Чук — это навсегда запомнившийся образ, с которым у меня, да и у очень многих других людей, связаны дорогие воспоминания, волнующие встречи, крутые повороты в судьбе. Самое главное, что остается в памяти, — это вечный, высокий пример научного подвига при человеческой цельности и чистоте.

Мы познакомились в 1935 г. в стенах Института химической физики, находившегося тогда в Лесном — пригороде Ленинграда, рядом с Физико-техническим институтом. Померанчук заканчивал физико-механический факультет Политехника и пришел в 1935 г. дипломником в Химфизику в лабораторию А. И. Шальникова. Я трудился в соседней комнате; после нескольких лет работы по адсорбции и катализу я попытался (в одиночку!) за-

няться созданием топливного элемента, позволяющего — в принципе — 100% или больше химической энергии топлива превратить в электрическую.

О работе Чука в лаборатории рассказал Шальников; кое-что могли бы рассказать и уборщицы, выметавшие стеклянные осколки из его лаборатории.

Мы были почти одного возраста (Чук на год старше) и в тот момент оба довольно одиноки, фактически вне крепких научных коллективов, неженатые. Естественно, мы очень скоро подружились.

Невысокий, худощавый, с вьющимися черными волосами Чук сразу поразил меня своей внутренней собранностью, целеустремленностью и — я не побоюсь этого слова — фанатичной преданностью науке, физике.

Понятно, что это впечатление создавалось не сразу, а сейчас к тому же прошло через фильтр полувека, минувшего со времени нашего знакомства. И все же я отчетливо помню, как еще до всех разговоров горящие глаза, жестикуляция, весь облик Чука дали мне почувствовать его незаурядность и увлеченность.

Со мной Чук говорил о квантовой механике, об атоме водорода — тема неисчерпаемая, как электрон, и о другой очень разной физике. Запомнилась одна деталь. Чук говорил, что изобрел динамо-машину без скользящих контактов, дающую постоянный ток. Я засомневался в этом. Тогда Чук сказал мне, что он эту машину построил и, когда он ее вертел, подсоединенная лампочка горела. «Но ведь лампочка горит и на переменном токе», — сказал я. До сих пор не знаю, была ли эта машина и что стало с ней в дальнейшем...

Навсегда запомнилась далекая прогулка с девушкой и с Чуком ранней весной 1936 г. между Пулковом и Детским Селом (пригороды Ленинграда: в Пулкове — обсерватория, в Детском Селе — теперь Пушкине — знаменитые дворцы и парки). Солнце, синее небо, пятна снега, мокрые ноги и горячие головы. Как молоды мы тогда были! Вся жизнь еще была впереди... Теперь мы не сможем встретиться втроем и вспомнить всё вместе — Чука уже нет с нами...

К этому времени я уже знал Ландау, который периодически приезжал из Харькова в Ленинград и общался, в частности, с теоретиками Химфизики. Как младший среди них, я часто бывал «приставлен» к Дау, добывал ему машину, водил в бухгалтерию и в кассу и впитывал все его суждения, его подход к физике<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Один только раз мне показалось, что я нашел у Дау противоречие. Он учил нас считать все по порядку величины, а у кассы стал аккуратно пересчитывать деньги. «Дау, но ведь здесь не в 10 раз больше и не в 10 раз меньше положенной суммы!» Но Дау, чуть помедлив, достойно ответил: «Деньги стоят в экспоненте».

Простите мне отвлечение. Я не хвастаюсь, я хочу хоть как-то дать почувствовать стиль общения и объяснить, почему Дау позвал меня к себе в Харьков. Признаюсь, я никогда не достигал уровня цельности Чука. В Ленинграде у меня была семья, квартира и т. п., в институте меня привлекли к большой коллективной работе по окислению азота и горению, мое научное одиночество кончилось. Кажется, я оправдываюсь, что не поехал к Ландау? Нет, я только объясняю, почему так естественно было именно мне посоветовать Чуку ехать к Дау. Насколько помню, я написал и Дау об очень способном парне. К той же мысли независимо пришел и Шальников. Вместе нам удалось отправить Чука в Харьков. Но когда Чук приехал в Харьков и за два месяца сдал весь теорминимум, никакие дальнейшие рекомендации ему уже не были нужны. Он занял достойное место в школе Дау.

К сожалению, ничего не помню и не знаю о том, как развивались события дальше, знаю только результат.

Перед войной, в конце 30-х годов, Дау оказался в Москве, в Институте физических проблем у Капицы (и это спасло ему жизнь), а Чук оказался в Ленинграде, в Физико-техническом институте. Теперь это уже был не застенчиво-настойчивый юноша, а зрелый известный теоретик.

Помню повестку семинара, в которой (явно) обыгрывались инициалы докладчиков и (скрыто) различие научных школ:

1. Я и Френкель — «О твердости газов».
2. И я, Померанчук, — «О газообразности твердых тел».

Чуку я обязан едва ли не важнейшим поворотом в моей судьбе. Абсолютно отчетливо помню автобус № 13, в давке Чук рассказывает мне о статье Перрена во французских «Отчетах Академии наук». По мнению автора, извержения вулканов — это следствия природных ядерных взрывов (деления урана) в глубине Земли. Я бросился в библиотеку, на завтра предстал перед Юлием Борисовичем Харитоном, и мы с огромным увлечением занялись детальным анализом вопроса. Появились наши статьи в ЖЭТФе и УФН, возникла связь с Курчатовым и его лабораторией, все это предопределило главное дело последующих двадцати лет. А вначале — для нас, по крайней мере, — был короткий рассказ Чука. Атомная проблема не обошла и самого Чука. Открытие им вместе с И. И. Гуревичем «блок-эффекта» сделало возможным создание реакторов на природном (необогащенном) уране. Об этом, несомненно, лучше напишет Исай Исидорович Гуревич.

Точно так же другие лучше меня, по непосредственным впечатлениям, знают о Чуке в Армении, о его связях с братьями Алихановыми, о его участии в становлении ИТЭФа.

При новой, послевоенной встрече с Чуком в Москве меня поразила одна черта, о которой я не знал раньше. Чук оказался ве-

ликотепным знатоком русской прозы XIX века. Особенно близка ему была острая бичующая сатира Салтыкова-Щедрина.

Сказку «Орел-меценат» я впервые услышал в исполнении Чука. Разумеется, читал он ее наизусть, а не по книге. Как сейчас помню его голос, его интонации: «...тем не менее дело просвещения все-таки не было покинуто... Ученые — свет, а неученые — тьма... „Что же, я не прочь от наук!“ — цыкнул орел... Начался „золотой век“. Скворцы разучивали гимн „Науки юношей питают“... Ястребят и соколята продолжали ходить в гимназии; академия наук принялась издавать словарь и одолела половину буквы А; дятел дописывал 10-й том „Истории леших“... Когда у орлов кровь закипает, то они педагогические приемы от крамолы отличать не умеют... „Шабаш!“ — вдруг раздалось в вышине. Это крикнул орел. Просвещение прекратило течение свое...»

Нельзя, да и незачем переписывать всю сказку. Как живой встает перед моими глазами Чук, слышу язвительные интонации его голоса, вижу его руку с поднятым указательным пальцем, которым он назидательно помахивает перед моим носом.

Везет же мне на назидательно-указательный палец. Почему-то и Лев Давидович Ландау не раз и не два, выслушав мои, вероятно незрелые или недозрелые, идеи, поднимал палец и, помахивая им, говорил прокурорско-следовательским тоном: «Не выйдет, гражданин Зельдович!» Представьте себе, как трудно было послать статью в ЖЭТФ после такого указания Дау...

С Салтыковым-Щедриным мне еще пришлось встретиться уже в 70-х годах, когда я всерьез занялся астрономией. В истории города Глухова я нашел упоминание «об учителе каллиграфии, который, выйдя за пределы своей компетенции, занялся космографией». Горожане и власти указанного города не одобрили эти занятия учителя и побили его камнями. Намек достаточно ясный, поскольку первоначальная моя компетенция — химическая и теоретическая физика, но не астрономия.

Но вернемся к воспоминаниям о Чуке.

Я вспоминаю приезд Чука в наше логово. Тут и комический эпизод: зима, в снегу Чук теряет одну галошу. Мы начинаем розыск; наутро в теоротделе было 12 левых галош разного размера. Но было и серьезное. Чук дал нам новый научный импульс: он ставил вопрос о предельных законах при стремлении тех или иных параметров к бесконечности — там, где мы ограничивались численными расчетами с конечными значениями всех величин. Рассказывал Чук и о своей работе, о положении в теоретической физике и о том, что он обязательно поедет к Паули...

Прошло несколько лет. У меня появилась возможность заниматься физикой элементарных частиц. Чук и ИТЭФ в целом были и прибежищем и консультантами. Счастливые времена, когда, находясь в Москве, я по многу часов просиживал в ИТЭФе; и до сих пор жалею, что не в ИТЭФ пошел после полного перехода

моего в Москву. Самое страшное в ИТЭФе было неспешное начало речи Чука: «Яков Борисович, я Вас очень люблю и уважаю...», за которым всегда следовал беспощадный научный разнос, как правило заслуженный по существу и непередаваемый по форме.

Помню эпизод, когда, разойдясь во мнениях с А. И. Алихановым, Чук решил уйти из ИТЭФа. Наверное, часа два я уговаривал его не делать этого. Не сомневаюсь, впрочем, что он остался бы и без моих уговоров.

Вспоминаю, как взволнованный Чук разбудил меня ночью и мы доставляли врачей к попавшей в аварию его приемной дочери.

Последние воспоминания: Чук, смертельно больной, лежит дома, при мне звонит врач и хочет прийти. Чук: «Нет, сегодня я плохо себя чувствую, приходите на днях, когда мне будет лучше». Здесь не только остроумие Чука, но и отношение к медицине. И еще его слова: «Знаете, я, наверное, скоро или помру, или выздоровлю — так мучиться долго невозможно».

И все это время, до последних дней, он настойчиво работал! Какой ужас — умереть в 53 года, в полном сознании, сохраняя работоспособность, талант, опыт...

А ведь Чук предвидел, что ему не удастся прожить долгую жизнь: есть рассказы его сокурсников о таких его высказываниях. Было, к сожалению, и реальное основание — отец Чука рано умер от рака. Было, наверное, и недостаточное внимание и самого Чука, и его друзей (включая и меня) к его здоровью.

Но отвлечемся от всего бытового. Что отличало Чука, почему так дорога нам память о нем? Много, и все-таки не все, физик поймет из его работ. Хорошо, что они собраны и изданы. И все-таки было и есть нечто человеческое, отличавшее Чука, поднимавшее его над всеми нами. Это его предельная страстность и бескомпромиссность.

Во всем мне хочется дойти  
До самой сути.  
В работе, в поисках пути,  
В сердечной смуте.

Эти строки Пастернака, наверное, лучше всего характеризуют душевный облик Померанчука.

Обращаясь к содержанию научной деятельности Чука, вспомним следующие строки:

До сущности протекших дней,  
До их причины,  
До оснований, до корней,  
До сердцевины.

Не сомневаюсь, что в других статьях будут подробно описаны замечательные работы Чука в теории твердого тела, его

открытие получения сверхнизкой температуры при затвердевании гелия-3 и другие.

Чук стал одним из лучших, а может быть, и просто лучшим советским теоретиком-ядерщиком. По книге Ахиезера и Померанчука учились поколения студентов. Сейчас это звучит как черный юмор: студенты кратко называли книгу «Ах, и Помер».

Тем не менее, мне кажется, главная работа Чука — его вклад в теорию элементарных частиц. Упомянутые раньше работы (гелий, ядерная физика) были для самого Померанчука в какой-то мере подготовкой, пробой сил, трамплином для главной задачи его жизни. Достижения Чука связаны с его сущностью, с его максимализмом — достаточно вспомнить постановку вопроса о сечениях рассеяния и реакций в пределе при энергии частиц, стремящейся к бесконечности.

Но тот, кто захочет последовать примеру Чука, должен осознавать и ту опасность, которая скрыта в максимализме, в сосредоточении всех душевных сил на одном направлении.

Физика — наука о природе, об объективно существующем. Меняются с годами наши представления, растет объем знаний, экспериментальных и теоретических, но не меняется сама природа.

Сосредоточение на одном научном направлении может помешать вовремя разглядеть новые (а иногда и старые) перспективные пути.

То, о чем я пишу, ни в коей мере не является ни упреком Чуку, ни продолжением споров двадцатилетней давности с ним.

Небольшое отступление: в 1945 г. очень торжественно праздновалось 220-летие Академии наук. Приехал и знаменитый француз — математик Адамар, несмотря на свои восемьдесят с лишним лет.

Но именно благодаря своему возрасту он мог позволить себе сделать доклад не о своих достижениях и даже не о прямых ошибках, а о том, как и почему он не сделал работы, очень близкие ему по духу.

Он говорил о том, что стрелять по дичи из дробовика надо с оптимальной шириной рассеяния. Нельзя стрелять ни в телесный угол  $4\pi$  (себя застрелишь), ни даже в  $2\pi$  — мала концентрация дробинки. Но нельзя и чрезмерно суживать конус рассеяния — велика вероятность не попасть.

Возвращаясь к работам Померанчука.

Он был чрезвычайно увлечен «реджистикой» — поведением сечений при очень больших энергиях. На него глубокое впечатление произвел «московский нуль заряда». Казалось, что электродинамику невозможно *всю*, вплоть до любых энергий, описать с помощью лагранжиана. Не знаю, есть ли письменные свидетельства таких взглядов Чука, но есть статья Ландау в сборнике памяти Паули, есть доклад Ландау на киевском Рочестере, и я думаю, что Чук был с ним солидарен.

На словах Чук бывал, может быть, слишком категоричен. Я помню его слова о том, что все явления при низких энергиях, соотношения между массами и т. п. — это кухня, а вот высокие энергии — это настоящая физика. Однако было бы неправильно и однобоко судить о работе Чука по такого рода нарочито хлестким высказываниям.

Он был слишком хорошим физиком (а также и хорошим и доброжелательным человеком), чтобы не увидеть красоту несохранения четности и особых свойств нейтрино, красоту симметрий, восьмеричного пути и теории кварков. Своих сотрудников он всячески поощрял и подталкивал к самому широкому поиску.

Будущий историк науки лучше меня напишет о том, как, то отставая, то опережая, развивались два несовпадающих явления: сама теоретическая физика и физико-философские прогнозы.

Меньше чем за 30 лет — от открытия постоянной Планка через специальную и общую теории относительности, старую и полную квантовую механику и теорию античастиц — произошла огромная перестройка самых фундаментальных понятий пространства, времени, детерминированности.

После этого в состоянии эйфории естественно было ждать столь же фундаментальной дальнейшей идейной перестройки. Лучшее всего эти ожидания выразил Бор (конкретный повод не помню): «Эта теория недостаточно сумасшедшая, чтобы быть правильной». Но кто отличит эйфорию от энтузиазма? На самом деле 40 или 50 лет после открытия позитрона прошли под знаком все более уточненного применения ранее созданных основ. Только теперь, в конце 70-х и в 80-х годах, начинается принципиально новый этап. В физику вошли пространства большего числа размерностей, суперсимметрия, хокинговская непредсказуемость. Намечается трагический разрыв между «планковским квантом энергии»  $10^{19}$  ГэВ и самыми смелыми проектами ускорителей. Предстоит опаснейшая охота за явлениями при сверхвысоких энергиях и косвенными их следами в низкоэнергетической области.

Как хочется хоть одним глазом заглянуть в физику XXI века! Как запутанна и трудна физика тех лет, когда творил Померанчук. Как жаль, что его нет с нами сегодня. Он достойно и талантливо делал свою работу.

На здании ИТЭФа — мемориальная доска Померанчуку. Он создал здесь научную школу с талантливой молодежью. Его работа, его школа — вечный памятник ему.

Мы, знавшие лично Померанчука, приходим к этому памятнику, склоняя голову перед замечательным ученым и человеком, перед его волей и чистотой!

\* \* \*

В те дни, когда я заканчиваю свои воспоминания о Померанчуке, умер Евгений Михайлович Лифшиц (29 октября 1985 года).

Я вполне понимаю, что книга о Померанчуке выйдет через два-три года и это совпадение покажется не имеющей значения случайностью. Однако поймите меня: Ландау, Померанчук, Лифшиц в моем сознании связаны неразрывно.

В теоретической физике есть свои сложившиеся школы, сближающие людей между собой, притом совсем не обязательно за счет недооценки работы других школ.

Смерть Лифшица подводит какую-то черту после катастрофы, случившейся с Ландау, и смерти Померанчука. Вспоминаются годы, когда молодой Ландау с еще более молодыми Лифшицем и Померанчуком штурмовали теорию. Вспоминаются дежурства Померанчука и бешеная активность Лифшица в дни борьбы за жизнь Ландау.

Сегодня у всех есть ощущение принципиально нового периода в теоретической физике, беспощадно смелого вторжения в область планковской массы ( $10^{19}$  ГэВ). И бесконечно жаль, что в это время нет с нами Ландау, Лифшица и Померанчука. Тем более жаль потому, что именно Померанчук во всем и всегда стремился дойти до предела, до глубочайших основ.

А за Ландау он, по его словам, последовал бы «хоть на остров Диксон».

А. К. КИКОИН

А. И. Ахизер

## ВОСПОМИНАНИЯ ОБ ИСААКЕ ЯКОВЛЕВИЧЕ ПОМЕРАНЧУКЕ

Я познакомился с Исааком Яковлевичем ранней осенью 1935 г., когда он приехал в Харьков, чтобы работать у Л. Д. Ландау в Украинском физико-техническом институте (УФТИ). Ландау в то время горел желанием расширить свой теоретический отдел за счет привлечения талантливых молодых людей — отовсюду, лишь бы люди были стоящие. К тому же стремился Лев Васильевич Шубников, руководитель криогенной лаборатории УФТИ, близкий друг Льва Давидовича. В результате их совместных поисков из Ленинграда приехали в УФТИ четверо студентов-дипломников, одним из которых был Померанчук.

Дипломника Померанчука я увидел впервые в библиотеке УФТИ. Это была едва ли не первая в нашей стране библиотека со свободным доступом к книгам. У книжной полки мы и познакомились. Мне сразу он очень понравился — всем своим видом, манерой держаться, даже сильная близорукость придавала его облику характерное своеобразие. Я ему тоже, видимо, понравился. Тогда и началась наша дружба — с первого взгляда и на всю жизнь, до самой его смерти. Я его полюбил и вскоре понял, что он особенный, выдающийся человек, для которого главное в жизни — это наука, работа.

Ландау сразу оценил Померанчука, или — как он начал его называть — Чука. Да и как было его не оценить, когда сделавшийся в дальнейшем знаменитым теоретический минимум Ландау был им сдан за пару месяцев (рекорд, так и оставшийся непобитым!).

После сдачи теорминимума Ландау, во-первых, переходил со сдавшими на «ты» и, во-вторых, давал тему для самостоятельной научной работы. У Чука такой темой было изучение электропроводности металлов и определение их термо-ЭДС при очень низких температурах. Суть дела заключалась в учете взаимодействия между электронами (наряду с традиционным учетом взаимодействия электронов с колебаниями решеткой) с произвольным законом дисперсии. Позже понятие электрона с произвольным законом дисперсии вроде бы переоткрыли заново. А на самом

деле даже в те далекие времена боже упаси было появиться у Дау с расчетами, в которых электрон обладал бы квадратичной зависимостью энергии от квазиимпульса.

Померанчук прекрасно справился с поставленной задачей, эта работа (впоследствии опубликованная) стала его дипломной. Защитив ее в Ленинграде, он окончательно вернулся в Харьков, в УФТИ к Ландау.

Нас тогда у Ландау было пятеро. Влияние Ландау было огромным, мы его буквально боготворили, боялись упустить хотя бы одно сказанное им слово. Мы с Чуком ходили даже на лекции Дау по общей физике, которые он читал в университете. Назад в УФТИ возвращались строем; по дороге Дау покупал большой кекс, который мы потом съедали в его кабинете. Мы обожали Ландау, были преданы ему безгранично. Чука как-то сказал, что за Ландау пошел бы на каторгу.

С теории металлов Чука был «переброшен» на квантовую электродинамику: нам обоим была поручена задача о рассеянии света светом. Для Ландау было неважно, что мы были несильны в квантовой электродинамике (того времени). Вопрос ставился просто: «Уравнение Дирака знаете? В чем же дело! Давайте — решайте свою задачу!»

История усугублялась тем, что у Ландау половину задачи, и притом лучшую, «увели» Гейзенберг и Эйлер. Они раньше Ландау очень оригинально исследовали рассеяние света светом в области низких частот и даже нашли лагранжиан поля с учетом нелинейных эффектов. Ландау оставалось рассмотреть высокочастотную область. Это тоже была очень хитрая задача. Дело в том, что в то время не было подходящей теории возмущений, подобной нынешней, и расчеты не могли быть градиентно инвариантными. Между тем Ландау во что бы то ни стало требовал градиентной инвариантности на всех этапах расчета. Это оказалось невозможным; возникали даже конфликты с Дау, задерживалась работа. В конце концов Дау плюнул на градиентную инвариантность на промежуточных этапах и сказал: «Делайте расчеты, как хотите, — в конце концов она (инвариантность) обязательно проявится».



И. Я. Померанчук.  
Фотография 40-х гг.

И вот мы получили первый результат: часть амплитуды рассеяния, не содержащая 4-импульсов фотонов, обращалась в нуль. 144 члена полностью сократились. Это значило, что мы не потеряли градиентной инвариантности. Ландау был страшно доволен. После этого мы скоро нашли амплитуду при больших импульсах и малых углах рассеяния. Ландау работа понравилась. Направили совместно с Ландау статью в «Nature».

По завершении работы немного отдыхали: гуляли в городском парке, заходили в душ и обязательно отправлялись на бесплатные концерты классической музыки, которую Чук очень любил. Чук прекрасно декламировал; как сейчас, помню, как он читал о «неверной де» — пушкинскую «Черную шаль». Изредка ходили в кино — помню, что мы вместе были на «Огнях большого города» Чаплина. А из душа в парке нас грозным стуком выгоняла собравшаяся очередь: оказывается, мы затевали научную дискуссию, забывали о времени и «задерживали движение».

Я все больше восхищался Чуком, неповторимым своеобразием этого человека. И тем, как он в уме находил натуральные логарифмы, и тем, как он точно определял время по своим часам, в которых была только одна часовая стрелка.

После рассеяния света светом мы с Чуком начали работать над когерентным рассеянием  $\gamma$ -лучей атомными ядрами. Мы сразу поняли, что третье приближение не должно давать вклад в амплитуду рассеяния, так как она не может зависеть от выбора знака заряда вакуумного электрона. Это есть проявление общеизвестной теперь, но еще неизвестной тогда теоремы Фарри. Закончив расчеты в четвертом приближении, мы написали статью, которую одобрил Дау. Впоследствии на Московской ядерной конференции Ландау представил нас самих и наши работы самому Вольфгангу Паули, который отнесся к нам одобрительно. Эти работы интересны не только новизной физических результатов, но и методическим результатом — бесконечности могут однозначно исключаться на основе требования градиентной инвариантности. Наши расчеты понравились также Виктору Вайскопфу, работавшему одно время в УФТИ.

В 1937 г. Ландау переехал в Москву, к П. Л. Капице в Институт физических проблем. Чук также уехал — в Москву, в Ленинград, снова в Москву. Встречаться нам стало сложнее, но общение продолжалось все время.

Разлучила нас война. Но в конце войны я был уже в Москве и работал в МЭИ. Чук связал меня с Курчатовым и всячески хлопотал, чтобы я работал у Игоря Васильевича; после оформления (довольно канительного) я был зачислен по совместительству в сектор Померанчука. Я очень был доволен и тем, что я снова с Чуком, и тем, что с нами Дау и мой брат, Наум Ильич, большой математик, и тем, что наша работа нужна И. В. Курчатову, а значит, важна для страны.

Курчатов относился к нам превосходно. Часто мы вечерами работали в его кабинете. Потом он уезжал в город и по пути подвозил нас до Кремля.

Круг интересов Померанчука был огромен. Нет ни одной области теоретической физики, кроме общей теории относительности, в которой бы он не работал. Удивительным было его умение вникать в суть каждой физической теории, в которой он с успехом получал новые результаты. Поэтому огромно и его литературное наследие. Если взять три тома его научных статей, то в них вы найдете и физику низких температур, и нейтронную физику, и физику элементарных частиц, и физику фундаментальных взаимодействий. Он занимался и физикой металлов, и физикой диэлектриков, и проблемами квантовых жидкостей, и общей теорией рассеяния, и квантовой электродинамикой, и прохождением заряженных частиц через вещество, и космическими лучами, и магнитотормозным излучением, и теорией поля, и физикой странных частиц, и резонансами, и слабым взаимодействием, и периферическими взаимодействиями, и дифракционными процессами, и асимптотической физикой высоких энергий.

Померанчук всегда знал, что важно на том или ином этапе развития физической науки. Его можно было бы даже назвать своего рода лакмусом физической теории. Это качество его было поразительным. В моем очерке о Померанчуке было бы невозможно и неразумно давать сколько-нибудь подробную картину научного творчества Померанчука, тем более что это уже сделано в прекрасной статье В. Б. Берестецкого, помещенной в первом томе «Собрания научных трудов Померанчука». По этой причине я и хочу, и могу поставить перед собой более легкую задачу — описать только то, что мы делали вместе с ним в московский период жизни Померанчука.

Курчатова очень интересовала проблема рассеяния медленных нейтронов. Мы серьезно занялись рассеянием медленных нейтронов в кристаллах — как упругим, так и неупругим, с поглощением и испусканием одного и многих фотонов. Был изучен захват медленных нейтронов в кристаллах. Была установлена (независимо от Ферми) возможность появления «холодных» нейтронов. Мы показали также, как происходит переход к рассеянию свободными ядрами, нашли функцию распределения нейтронов в кристаллах, дали теорию рефракции нейтронов.

Большое внимание было уделено проблеме замедления нейтронов — была найдена функция распределения нейтронов по энергиям, детально изучен переход от кинетического к диффузионному приближению.

Вместе с Померанчуком мы построили теорию резонансного поглощения нейтронов в однородных средах. Как выяснилось в настоящее время, результаты, полученные нами, совпадают с полученными после нас результатами Вигнера.



Вместе с И. И. Гуревичем Померанчук построил также теорию резонансного поглощения нейтронов в гетерогенных средах. Все эти расчеты оказались необходимыми при построении ядерных реакторов.

В 1947 г. мы написали довольно большую книгу (более 500 страниц) «Теория нейтронных мультиплицирующих сред». К сожалению, эта книга не могла быть издана. Небольшая часть материала вошла в другую нашу книгу — «Некоторые вопросы теории ядра» (М.: Гостехиздат, 1948). Эта книга сыграла большую роль в деле подготовки теоретиков-ядерщиков.

Наши работы в области рассеяния медленных нейтронов фактически явились отправной точкой для более поздних исследований, в которых выяснилась возможность восстановления фонов спектра кристаллов по данным о рассеянии нейтронов.

Книга «Некоторые вопросы теории ядра» была удостоена премии АН СССР им. Л. И. Мандельштама.

Нас интересовала также область больших энергий нейтронов. В этой области, как было показано Бором, Плачеком и Пайерлсом, происходит явление дифракции нейтронов поглощающими тяжелыми ядрами. Это явление аналогично дифракции света от поглощающего шарика.

Нам удалось обобщить эту теорию на случай быстрых протонов. Возникающая картина дифракции может быть названа дифракцией заряженных лучей.

Метод, который был развит нами, широко использовался во многих работах и получил название приближения Ахиезера—Померанчука—Блейера. Можно смело сказать, что роль Померанчука в создании теории ядерных реакторов была очень велика.

Дифракционным и вообще периферическим взаимодействиям в дальнейшем был посвящен ряд работ Померанчука с Е. Л. Фейнбергом, а также работа, выполненная с Ландау, об излучении фотонов при столкновении быстрых пионов с нуклонами.

В тот — курчатовский — период мы выполнили работу, в которой впервые, исходя из очень общих предположений об аналитических свойствах амплитуды рассеяния, нашли возможные законы рассеяния медленных нейтронов ядрами.

Незабываемое время... Сейчас, когда все это встает у меня перед глазами, становится очень грустно. Как в Посвящении к Гетевскому «Фаусту»:

Насущное отходит вдаль, а давность,  
Приблизившись, приобретает явность.

Чук называл меня братом, сына моего — племянником, и статьи свои (через много лет) дарил ему с надписью «дорогому племяннику».

Был недолгий период, когда Ландау «отлучил» Чука. Я тогда с семинаров Ландау ездил сразу к Чуку, в проезд Серова, расска-

зывал все, что было на семинаре, и только потом возвращался к себе в Лефортово. Оба — и Чук, и Дау — тяжело переживали разрыв. Слава богу, разрыв был недолгим, вскоре все закончилось «мирным урегулированием».

После перехода Чука от Курчатова к Алиханову я, оставаясь по совместительству на работе у Курчатова, возвратился в Харьков, в УФТИ к К. Д. Синельникову. Об этом просил меня сам Курчатов.

Начались мои систематические поездки в Москву; в Москве с Чуком я проводил почти столько же времени, сколько в Харькове. Тут, в Москве, мы вместе пережили тяжелые минуты — смерть Игоря Васильевича. Вместе с Чуком я стоял в Колонном зале в почетном карауле у гроба Курчатова.

Каждый мой приезд в Москву — и тогда, и позже — начинался с посещения Чука, и он был всегда рад мне. Мне очень нравилось здание института, деревянная лестница, ведущая к Чуку. Появлялся Володя Берестецкий, и Чук учинял нам экзамен по «газетному материалу». Часто строгий экзаменатор ставил меня в пример Володе. Затем Чук поил меня чаем, очень крепким и очень горячим, который он заваривал каким-то ему одному известным способом. При этом он каждый раз шутил: «Смотри, стакан я тщательно продезинфицировал».

Начинались научные обсуждения, работа — и обязательная поездка к Ландау, чтобы «пробить» через него результаты, получить его одобрение.

Померанчук был истинным рыцарем Науки, и имя его останется в храме Науки, о котором в свое время писал Эйнштейн: из этого храма можно многих изгнать без вреда для науки и только некоторые должны в нем остаться. Одним из этих некоторых является И. Я. Померанчук.

*Р. Э. Пайерлс*

## ГЛУБОКОЕ ВПЕЧАТЛЕНИЕ

Впервые я встретился с Померанчуком в 30-х годах во время нескольких моих визитов в Советский Союз. Наши встречи всегда происходили в присутствии Ландау, который доминировал во всякой беседе, так что у меня нет четких воспоминаний о том, что говорил Померанчук. Что осталось в моей памяти — это глубокое впечатление от силы его интеллекта и от его необыкновенного обаяния.

Я помню также о связанной с ним загадке, приводившей в недоумение коллег: он всегда появлялся с бородой трехдневной



Ф. Дайсон, И. Я. Померанчук, Л. Д. Ландау и др.  
в Институте физических проблем. Вторая половина 50-х гг.  
Фотография прислана Р. Э. Пайерлсом

давности. Как ему удавалось поддерживать ее в этом состоянии? Он никуда надолго не отлучался и не мог бриться тайком; поверить же, что ему известен какой-то хитрый способ укорачивать бороду до этой промежуточной стадии, мы не могли. Это явление все еще имело место при нашей следующей встрече в 1956 г. на конференции в Москве, но, если отгадка и была найдена, я так ее и не узнал.

Среди его разнообразных интересов была и проблема фононной теплопроводности, которой была посвящена моя диссертация в 1929 г. Он написал на эту тему две работы, которые я пропустил в условиях военного времени, но обнаружил позднее. В одной из них указывалось, что экспоненциальный рост теплопроводности при низких температурах, предсказанный мной для чистых кристаллов, должен отсутствовать в случае неоднородного изотопного состава, поскольку с точки зрения их влияния на динамику решетки изотопы ведут себя как примеси. Но к тому времени, когда статья попала ко мне, тот же факт был обнаружен Берманом в экспериментах по проверке предсказанного эффекта.

В другой статье Померанчук показывал, что мой вывод закона  $1/T$  для теплопроводности при высоких температурах неверен, поскольку уравнение, чье решение «с очевидностью» пропорционально  $1/T$ , на самом деле не имеет решений вовсе, так что необходим учет членов высшего порядка. Конечно, я чувствовал себя

задетым этими исправлениями, но в некоторой степени утешался тем, что поймал меня за руку очень умный Померанчук, а не кто-нибудь другой.

Я пытался сказать ему об этом при встрече на конференции в 1956 г., но к этому времени он совсем забыл о фононной проводимости. Я не буду говорить о проблемах теории поля, которыми он тогда занимался, поскольку эта сторона его деятельности хорошо известна и имеются более квалифицированные люди, чтобы ее прокомментировать.

И. Е. Нахугин

## ВОСПОМИНАНИЯ О И. Я. ПОМЕРАНЧУКЕ

С Исааком Яковлевичем Померанчуком мне довелось познакомиться в конце 1936 или в начале 1937 г., в период его работы в Украинском физико-техническом институте в Харькове. Исаак Яковлевич работал в теоретическом отделе под руководством Л. Д. Ландау.

В те времена характер научной работы был совсем другим, чем сейчас. Достаточно сказать, например, что в институте не было планового отдела, отдела кадров и многих других отделов, составляющих сейчас неотъемлемую принадлежность управления наукой. Л. Д. Ландау был яростным врагом всякого рода формальностей. Его общение с учениками происходило не только на почве служебных отношений, тем более что по возрасту ученики не намного отличались от совсем еще молодого учителя.

Своим поведением Л. Д. Ландау всячески старался разрушить образ «жреца науки», каким он сложился в глазах обывателей, и подчеркнуть в резкой форме свое пренебрежительное отношение к общепринятым шаблонам. Так, например, при чтении лекций в университете Ландау иногда присаживался на стол, что очень возмущало некоторых студентов. Крайне резкое отношение к людям, которых он считал малоспособными, создавало ему многочисленных врагов. В то же время научный авторитет Ландау в институте был очень высок. Помню, что для сотрудников института Ландау читал курс лекций по теоретической физике и на его лекции в числе прочих приходили известные ученые с тетрадами для конспектирования.

В целом в институте существовала высокая творческая атмосфера. В этой атмосфере Исаак Яковлевич, пришедший со студенческой скамьи, начал работать с огромным энтузиазмом. В развлечениях, обычных для молодежи, он почти не участвовал. Его

образ жизни смело можно было назвать аскетическим. Все свое время с утра до позднего вечера он посвящал работе. При его большом таланте результаты не замедлили сказаться.

Мне запомнилась его работа по критическим полям тонких сверхпроводящих проволок; кажется, это была его первая работа. В тот же период была выполнена работа по теплопроводности твердых тел — он докладывал ее на семинаре.

Позднее Исаак Яковлевич перешел к вопросам ядерной физики, к которой тогда относили и физику элементарных частиц. Я помню, как он рассказывал об обсуждениях интересовавших его вопросов с А. И. Лейпунским.

После войны мои встречи с Исааком Яковлевичем были случайными и кратковременными. Насколько мне известно, он до конца своей жизни сохранил свой горячий энтузиазм и увлеченность наукой. Его большой вклад в физику является общеизвестным, и к тому, что было сказано об этом в печати, мало что можно добавить.

В. С. Шпинель

## ВОСПОМИНАНИЯ О ХАРЬКОВСКОМ ПЕРИОДЕ ЖИЗНИ И. Я. ПОМЕРАНЧУКА

Первая встреча с И. Я. Померанчуком мне хорошо запомнилась. Она состоялась в конце 1935 г., в первый день моего приезда в Харьков, куда я был направлен для выполнения дипломной работы у Л. Д. Ландау. С вокзала я сразу поехал в Физико-технический институт, находившийся в Юмовском тупике. Ландау меня встретил очень приветливо и у себя в кабинете тут же неожиданно устроил мне экзамен по математике. После этого он сказал, что для работы с ним мне необходимо предварительно сдать экзамен по теоретическому минимуму, на что может уйти около полугодика, если я буду работать по 12 часов в день. Такой срок на подготовку к экзаменам ушел у его сотрудников, работающих в теоретическом отделе; правда, один из них, приехавший недавно из Ленинграда, о котором Ландау отозвался с восхищением, установил рекорд, сдав экзамен за два месяца. После окончания беседы мы вышли в коридор. На стене висела табличка с надписью Rue de Dau (улица Ландау). На эту «улицу» из соседней комнаты вышел молодой человек. «Знакомьтесь, это Чук» — так сокращенно называли И. Я. Померанчука. Мне протянул руку хрупкого телосложения человек с большой темной шевелюрой.

Он мягко улыбался и казался очень скромным. Потом, когда мы остались вдвоем, Чук сказал, что изучать теоретическую физику он советует только у Ландау.

В то время Физико-технический институт снимал на окраине города, в районе, называвшемся Рашкина дача, домики, куда с большой плотностью поселяли молодежь, приезжавшую на дипломную работу или на практику. В таком домике по соседству со мной некоторое время жил Исаак Яковлевич. Потом всех нас постепенно переселили в институтские дома, расположенные на территории института. Много лет спустя Исаак Яковлевич иногда при встрече, улыбаясь, весело произносил запомнившееся на всю жизнь это название — Рашкина дача, созвучное с «шарашкина контора».

Сотрудники Харьковского физико-технического института в основном жили на территории института и тесно общались друг с другом. Работали с большим увлечением. Особенно увлечен наукой был Исаак Яковлевич. Он часто делился научными новостями или рассказывал о волновавших его вопросах квантовой механики. Помню, как-то мы пошли с ним обедать в расположенную недалеко от института столовую большого студенческого общежития, носившего название «Гигант». За столом Исаак Яковлевич с большим увлечением и энтузиазмом рассказывал мне об удивительных свойствах волновых функций электронов, о четности состояний и т. д. Сидевший за нашим столом какой-то студент внимательно слушал и, по-видимому, вообще не мог понять, о чем говорит этот человек. Наконец он не выдержал и, обращаясь к Померанчуку, спросил: «Это что, высшая электроника?» Исаак Яковлевич громко и заразительно смеялся.

Как ученый Исаак Яковлевич сформировался очень рано. На 2-й Всесоюзной конференции по физике ядра, проходившей в Москве в 1937 г., в которой приняло участие много известных ученых, в том числе зарубежных — Паули, Оже и др., он сделал интересный доклад. В дискуссии он очень аргументированно ответил на вопросы председателя заседания А. Ф. Иоффе.

Исаак Яковлевич был человеком очень принципиальным. На одном из заседаний Ученого совета Харьковского физико-технического института резкой критике подвергся Л. Д. Ландау, которого к тому времени уже не было в Харькове (в начале 1937 г. он переехал в Москву). Исаак Яковлевич на этом заседании смело выступил в защиту Ландау. Вскоре он сам тоже переехал в Москву.

Товарищи Исаака Яковлевича относились к нему с большим уважением и всегда готовы были оказать ему услугу. Я был свидетелем такого случая. Как-то вечером я проходил по территории института мимо дома, в котором жил приехавший на короткое время из Москвы Исаак Яковлевич. Вдруг из парадного выбегает Исаак Яковлевич с охапкой каких-то книг и бумаг, за ним бегут его ленинградские однокашники. У одного в руках чемодан

у другого какие-то вещи. Я даже не успел спросить, в чем дело. Потом я узнал, что Померанчук в этот вечер читал своим товарищам Пушкина и, увлекшись, чуть было не опоздал на московский поезд.

А. Б. Мигдал

## НАСЛЕДСТВО ЧУКА

Померанчук—Чук, как мы все, начиная с Ландау, его называли, — навсегда остался частью моей души. Я продолжаю наши разговоры и мысленно спрашиваю его советов.

Это был человек, который радовался чужому успеху больше, чем своему; его неистребимая любовь к науке и жажда познавать были такими, что даже при смерти, приходя в сознание, он расспрашивал о работе друзей, сидевших у постели, и радовался каждому новому событию. Он сохранил ясность мысли до последних своих минут.

Пожалуй, одно из самых ранних воспоминаний — наш разговор в Ленинграде в Радиевом институте между двумя заседаниями семинара, когда Чук рассказал мне о своей идее торможения быстрых электронов магнитным полем Земли. Я был убежден, что такое ничтожное поле не может повлиять на движение частиц сверхбольшой энергии, но, разумеется, мои возражения не остановили Чука, его интуиция оказалась верной. Результатом была замечательная работа о верхнем пределе энергии электронов, попадающих на Землю. Это хороший пример безупречной чисто электродинамической задачи, взяться за которую можно было, только заранее почувствовав результат.

Вспоминается еще один спор — о падении энергетического спектра космических электронов при больших энергиях. Чук со своим обычным увлечением обсуждал вопрос о том, с каким показателем степени входит в этот закон энергия: 1,73 или 1,75. Я имел неосторожность сказать, что, по-моему, эта разница не имеет отношения к науке. Это страшно возмутило Чука, который воспринимал сомнение в научной важности даже малейшей детали как личное оскорбление, и в течение долгого времени он был со мной очень сух. Впрочем, и в этот период размолвки, услышав в столовой Дома ученых какое-то неслестное замечание в мой адрес, Чук пересел за другой столик, заявив: «А. Б. — мой брат, и я не хочу этого слышать!»

Мы много общались с Чуком в 50-х годах, когда вместе ездили в Дубну на семинар. Однажды он даже проделал часть этого пути на заднем сиденье моего мотоцикла со скоростью 100 км/час, хотя знал, что мотоциклист я неопытный и поэтому неосторожный.

Когда он пересаживался в машину, по его спокойному лицу я понял, что чувство страха ему несвойственно.

На одном из семинаров после доклада об экспериментах по рождению пионов вблизи порога мы подробно обсуждали причины резкого пика на кривой зависимости сечения от энергии. Через несколько дней была сделана работа о влиянии «взаимодействия в конечном состоянии». Я рассказал Чуку по телефону о моих результатах, он немедленно приехал, чтобы их обсудить, и пришел в восторг, как всегда с ним бывало при любой научной удаче. В это время у меня — не помню почему — были натянутые отношения с Ландау, я не приходил на его семинар, и это очень огорчало Чука. Он решил использовать мою работу как повод для примирения с Дау; несмотря на мои протесты, позвонил ему тут же и заявил: «А. Б. сделал хорошую работу, нужно, чтобы он доложил ее на семинаре».

Был и обратный случай, когда Чук на некоторое время был, по выражению Дау, «отлучен от церкви» за работу с «нежелательным» соавтором. И тогда я сделал все возможное, чтобы примирить Чука с Дау.

Все мои друзья, и в первую очередь Чук, знали, что задолго до открытия изотопического эффекта в сверхпроводимости я был убежден, что причина сверхпроводимости кроется в колебаниях решетки. Я мотивировал это тем, что без внешнего воздействия электроны достаточно классичны и не могут привести к аномальному диамагнетизму. Мы встретились с Чуком на улице сразу после сообщения об открытии изотопического эффекта. Несмотря на сорокаградусный мороз, Чук молча снял шляпу.

Вокруг него возник своеобразный фольклор, отражавший его замечательное свойство — полную поглощенность идеями, которые занимали его в то или иное время. Однажды в восемь утра Померанчук позвонил в дверь А. И. Алиханяна и заявил полупроснувшемуся хозяину: «Артем Исаакович, все дело в вакууме. Покупайте насосы!» Это очень характерная для него форма шутки — он всегда говорил о волнованных его вещах с некоторой долей иронии, боясь излишней торжественности.

В период, когда его очень беспокоили расходимости квантовой электродинамики, он с взъерошенными волосами пришел к М. Корнфельду и с порога сказал: «Марк, вы понимаете, они расходятся!» Это было в те времена, когда физики не имели ни машин, ни квартир и Чук жил в коммуналке без ванны и телефона. Когда И. В. Курчатову нужно было вызвать его, он звонил Корнфельду, жившему в том же доме, и просил сбежать через двор за Чуком.

Во время борьбы за жизнь Ландау, когда все физики поочередно дежурили в больнице, мы с Чуком часто после дежурств приезжали ночью ко мне домой и согревались не только крепким чаем, да простит нас «за давностью» председатель общества трезвости. Чтобы как-то снять напряжение, в котором все мы нахо-

дились в это время, мои домашние просили Чука что-нибудь рассказать — он был очаровательным рассказчиком. Пересказывать его истории невозможно, они неотделимы от его выразительной и точной мимики. В них не было драматических событий, один меткий штрих создавал образ. «Я вышел на улицу, — рассказывал Чук, — купить газеты. Возле киоска немолодая гражданка рылась в сумочке в поисках мелочи. Я не стал ждать, когда она перестанет копаться, и протянул продавцу монету. В сущности, я ее не задержал, но поступил, безусловно, невежливо. Она посмотрела на меня и сказала: „Лезет без очереди, рожа противная, небритая...“»

Кстати, я никогда не мог понять, как Чуку удавалось поддерживать себя в полубритом состоянии: его могучая густая щетина всегда была длиной 1—2 мм. Он рассказывал, что однажды на улице повстречал молодого человека, который прошел мимо, потом вернулся, догнал Чука и сказал: «Дядя, на трешку, побрейся!»

Во всем, что он делал и говорил, полностью отсутствовали поза, желание блеснуть. Он высказывал остроумные или мудрые мысли естественно, без нажима. Помню его замечательное высказывание в мастерской скульптора, когда, внимательно все осмотрев, Чук сказал: «Я вижу, что в искусстве, как и в науке, нужно знать, чем можно пренебречь».

Как оживлял он своим присутствием любой семинар, любое заседание! И дело было не только в глубине его замечаний, но, главное, в неповторимом чуковском энтузиазме и темпераменте, которыми он заражал всех. Многие работы не только учеников, но и его учителя, Дау, были вызваны к жизни идеями Чука, его неуемной любознательностью.

Значительность человеческой личности определяется не только тем, что сделано при жизни, но и той доброй памятью, которая остается в наследство...

*И. И. Гуревич*

## ИСААК ЯКОВЛЕВИЧ ПОМЕРАНЧУК

(Ленинград, 1937—1940 гг.; Москва, 1943—1945 гг.)

Мне необычайно трудно передать словами те чувства, которые я испытываю, думая об Исааке Яковлевиче Померанчуке. Исаак Яковлевич был личностью в высшей степени замечательной и своеобразной.

Но прежде всего он был физик!

Общение с ним производило на всех очень сильное впечатление, заставляло как-то по-другому смотреть на вещи, находя в них иной смысл, не видимый ранее.

В чем должно состоять истинное стремление человека, посвятившего себя науке о наиболее общих законах природы?

Прежде всего во внесении максимально посильного вклада в познание окружающего мира.

В житейской суете этот простой принцип у многих ученых застилается разного рода наслоениями. Исаак Яковлевич был свободен и от суеты, и от наслоений. Он, будучи по натуре человеком добрым, был совершенно нетерпим к малейшим отклонениям от кодекса научной морали и в этом отношении еще более строг к себе, чем к своим коллегам. У него имелись свои жесткие правила, которыми, по его мнению, должен руководствоваться каждый настоящий ученый при любых обстоятельствах.

Хочу привести один случай из моей жизни. В 1938 г. мне удалось установить немонотонную зависимость плотности ядерных уровней от атомного веса. Я много думал о причинах этого явления и обсуждал возможные варианты объяснения с Исааком Яковлевичем и другими физиками. Наконец, наиболее вероятным объяснением мне показалось предположение о фазовых переходах ядерной материи (более тяжелые ядра имеют более низкую температуру и находятся в другом фазовом состоянии по сравнению с более легкими). Сделав простейшие модельные вычисления, я пришел к Исааку Яковлевичу и рассказал ему об этой гипотезе. К моей большой радости, он сказал, что тоже пришел к тому же заключению. Я тут же предложил ему написать соответствующую статью. К моему глубокому огорчению, он ответил решительным отказом, мотивируя, что я придумал это несколько раньше и полнее. Никакие мои уговоры на него не действовали, и мне пришлось опубликовать эту гипотезу только от себя, сославшись в конце статьи, что независимо эта идея была высказана И. Я. Померанчуком.

Исаак Яковлевич был человеком науки. Сказав так, сразу хочется наполнить эти слова особым содержанием. Такой степени поглощенности физикой, такого страстного желания познать устройство мира я больше не встречал ни в одном человеке при всем моем уважении к другим выдающимся ученым, которых мне посчастливилось знать. Причем речь идет, конечно, не об узости кругозора — Исаак Яковлевич был человеком, одаренным во многих отношениях, — а именно о всепоглощающей страсти.

Впервые о И. Я. Померанчуке я услышал в Ленинграде от Матвея Петровича Бронштейна, замечательного физика и большого друга Ландау. Матвей Петрович, у которого я часто бывал, сказал как-то в начале 1937 г., что у Ландау появился удивительно талантливый ученик. Оппонентом кандидатской диссертации этого ученика дал согласие стать (но, увы, не стал) М. П. Бронштейн. Речь шла об основополагающей работе о взаимодействии

нейтронов с кристаллической решеткой. Сейчас этой проблемой, или, говоря точнее, проблемами, занимаются большие коллективы физиков во многих лабораториях мира. А в основе всего стоит кандидатская диссертация Исаака Яковлевича.

Говоря об основополагающих работах И. Я., положивших начало новым направлениям физики и их приложениям в смежных науках, не могу не вспомнить о его работе по магнитотормозному излучению, опубликованной в 1940 г. Это явление, открытое И. Я. Померанчуком, вначале рассматривалось как досадное обстоятельство, ограничивающее энергию электронов в ускорителях. Сейчас магнитотормозное излучение является одним из самых эффективных инструментов изучения вещества и носит название синхротронного излучения. Было бы правильным называть его излучением Померанчука. Хотя историю в отличие от физики нельзя переиграть, но я убежден, что открытие Померанчуком синхротронного излучения, а также предложенный им метод получения подкельвиновых температур методом адиабатического сжатия  $^3\text{He}$  (1950 г.) (называемый теперь «охлаждение по методу Померанчука») должны были быть увенчаны Нобелевской премией, любое из них, по выбору.

В 1937 г. Исаак Яковлевич переехал из Харькова в Ленинград и поступил на работу в ЛФТИ. Он часто бывал на нейтронных семинарах И. В. Курчатова. На этих семинарах мы и познакомились. Если чисто по-человечески Исаак Яковлевич был мне очень симпатичен, то глубина его увлеченности научными проблемами просто поражала. Все его помыслы были отданы физике.

О редких способностях Исаака Яковлевича я лично могу судить по единственной нашей совместной работе в Лаборатории № 2 Академии наук СССР, куда я был вызван Игорем Васильевичем Курчатовым в сентябре 1943 г. Исаак Яковлевич еще раньше (с весны 1943 г.) был привлечен к урановой проблеме и работал в этой Лаборатории вплоть до осени 1945 г., когда он перешел к А. И. Алиханову в Лабораторию № 3 — ныне ИТЭФ. В это же время в Лаборатории № 2 широко обсуждался вопрос о том, как увеличить коэффициент размножения нейтронов в системе «уран плюс замедлитель». Были отдельные качественные соображения по этому поводу, теории же как таковой не существовало. Ключом ко всему было гетерогенное (блочное) размещение урана и замедлителя, и главной проблемой, стоявшей перед физиками, было доказательство уменьшения вредного резонансного поглощения нейтронов в блочных системах с ураном.

Я также начал заниматься этой проблемой. Мы очень часто встречались с Исааком Яковлевичем и обсуждали разного рода аспекты этой интригующей проблемы. В одну из таких встреч мы наконец поняли, что все дело в сосуществовании двух эффектов: самоэкранирования ураном сильных резонансных уровней и прохождения замедляющимся нейтроном опасной энергетиче-

ской зоны поглощения в замедлителе далеко от уранового блока. После того как основные принципы были сформулированы, мы разошлись и принялись за вычисления. Буквально через неделю мы, работая различными методами, получили окончательные выражения для резонансного поглощения, совпадающие с точностью до числового коэффициента. Точнее, в методе Померанчука коэффициент был получен, а у меня его не было. В нашем совместном докладе на I Женевской конференции по мирному использованию атомной энергии был использован метод Померанчука. Я до сих пор помню радостное чувство восхищения ясным, чисто физическим складом ума Исаака Яковлевича и его виртуозной техникой вычисления.

Не могу не добавить, что, когда, уже в 50-х годах, мы узнали об американской версии теории резонансного поглощения в гетерогенных системах, построенной таким большим физиком, как Е. Вигнер, мы обнаружили, что в этой теории оба эффекта, обуславливающих выгоду блочного расположения, рассматривались независимо, а не совместно (см.: *Вейнберг А., Вигнер Е. Физическая теория ядерных реакторов*. М.: Изд-во иностр. лит., 1961).

Исаак Яковлевич бесспорно являлся самым замечательным и любимым учеником Л. Д. Ландау — последнего великого универсала в физике. Ландау, со свойственной ему любовью давать своим ученикам краткие имена, называл Исаака Яковлевича Чуком. Это имя сразу же было принято близкими ему физиками.

Ландау и Померанчук были людьми совершенно разными по складу и темпераменту. Можно было бы думать, что взаимоотношения этих выдающихся людей были взаимоотношениями непогрешимого мэтра и его необычайно талантливого ученика. Это было так, но не всегда. В поисках истины ученик не признавал ничьих авторитетов, так что иногда они в психологическом плане даже менялись местами. Это обстоятельство требует более подробного объяснения.

Исаак Яковлевич, сам создавший школу физиков-теоретиков, очень любил своего учителя и искренне им восхищался. Как и Ландау, обладавший поистине энциклопедическим кругозором научных интересов, Исаак Яковлевич внес весомый вклад во многие области физики. Широко известны работы Исаака Яковлевича по ядерной физике, теории реакторов, физике твердого тела, квантовой теории жидкости, электродинамике и квантовой теории поля. Но главным интересом и страстью Исаака Яковлевича, несомненно, была физика элементарных частиц — наука о наиболее глубоких законах природы. Изучению этой проблемы Исаак Яковлевич был предан совершенно фанатично. Все прочие физические задачи он в шутку, и не только в шутку, называл «пузырьками». (Кажется, в ИТЭФе был второй ярлык — «квасцы».)

Хорошо помню, как Исаак Яковлевич негодовал из-за того,

что его гениальный учитель тратит свое драгоценное время на нестоящие «пузырьки». Тогда из преданного ученика он превращался в грозного пророка, обличающего своего учителя в ереси.

До сих пор мои воспоминания об Исааке Яковлевиче Померанчуке касались физики, и это было правильно, так как Померанчук прежде всего был физиком. Но не следует думать, да это было бы и невозможно в таком большом человеке, что весь мир для Исаака Яковлевича ограничивался только физикой. Он был необычайно интересным человеком и собеседником с очень определенными вкусами и симпатиями. Речь его была крайне афористична, и слушать его было огромное удовольствие. Его литературные вкусы были своеобразны и неординарны и в чем-то неожиданны. Так, например, он очень любил Анатоля Франса, особенно «Харчевню королевы Гусиные лапы» и «Суждения господина Жерома Куаньяра». Но вот писатель совсем иной — Достоевский! Его также глубоко ценил и понимал Исаак Яковлевич.

Помню, до войны, в 1939 или 1940 г., мы долго бродили по ночному Ленинграду в ту особую ленинградскую белую ночь... Вначале мы говорили о физике, и Чук, в частности, высказал мне свое убеждение в том, что система фермионов может иметь в энергетическом спектре некоторые — он не объяснил какие — черты, характерные для бозонов. Я сейчас помню, что Чук назвал это свойство «бозизацией спектра». Быть может, это было интуитивное ощущение им спаривания электронов, приводящего к сверхпроводимости.

Потом наш разговор перешел на другие темы, в частности мы говорили о Достоевском. И, естественно, Чук вспомнил «Белые ночи», сказал, как он любит эту повесть и что ленинградские белые ночи оказывают на него двойственное действие: вызывают удивительное волнение и нежность и одновременно чувство щемящей тоски. Еще, помню, он называл Петербург Достоевского, Петербург «Белых ночей» городом большой души.

В последний раз я видел Исаака Яковлевича летом 1966 г. в больнице. Такого сплава человеческого мужества и преданности науке я больше не встречал никогда. До самого последнего дня он был физиком, рыцарем Физики без страха и упрека. Таким он остался навсегда в моей памяти.

Л. Ван Хове

## ДАТЬ УВАЖЕНИЯ РАННЕЙ РАБОТЕ И. ПОМЕРАНЧУКА

У меня сохранились лишь смутные воспоминания о немногих личных встречах с Исааком Померанчуком, однако на протяжении моей исследовательской карьеры я трижды встречался с его работами. Один раз при изучении процессов, проходящих при очень низких энергиях (рассеяние медленных нейтронов в кристаллах), и дважды в физике высоких энергий (множественное рождение частиц и асимптотика упругого рассеяния). В качестве скромной дани памяти Померанчука я хотел бы напомнить о некоторых деталях его работы по медленным нейтронам.

С появлением в 40-х годах ядерных реакторов медленные нейтроны стали новым инструментом изучения конденсированной материи. Это вызвало быстро растущую активность в области теоретических исследований, в которых принимал участие и я с 1949 по 1955 г. Так, я узнал, что Померанчук был вторым теоретиком, который написал о рассеянии медленных нейтронов в кристаллических решетках<sup>1</sup>. Первым был Джан Карло Вик, который написал о них годом раньше<sup>2</sup> и который, кстати, позднее, так же как Померанчук, обратился к физике высоких энергий. Померанчук вернулся к этому вопросу в 1947 г. и своей совместной работой с Ахизером внес существенный вклад в развитие проблемы<sup>3</sup>. Сегодня интересно перечитывать эти классические статьи и проследивать, как некоторые фундаментальные утверждения, общеизвестные ныне в физике конденсированных сред, в то время должны были проясниться шаг за шагом.

Каким образом нейтрон, распространяющийся в идеальном кристалле, теряет свою энергию? Очевидный ответ — в результате испускания фононов. Однако ранние работы Вика и Померанчука приводили к выводу о том, что испускание фононов запрещено сохранением энергии-импульса, когда скорость нейтрона меньше скорости звука в кристалле. Может ли так быть, что эти «дозвуковые» нейтроны не будут терять энергию в холодном кристалле? Отрицательный ответ на этот вопрос появился лишь после войны. Вначале на основании численного рассмотрения в работе Вайнстока, где рассматривался частный

<sup>1</sup> *Pomeranchuk I. Ya.* On the scattering of slow neutrons in the crystal lattice // *Phys. Z. der Sowjetunion.* 1938. Bd. 13. S. 65.

<sup>2</sup> *Wick G. C.* Über die Streuung langsamer Neutronen in Atomgittern // *Physik Z.* 1937. Bd. 38. S. 403, 689.

<sup>3</sup> *Akhiezer A. I., Pomeranchuk I. Ya.* On the scattering of slow neutrons in crystals // *J. Phys. (USSR).* 1947. Vol. 11. P. 167.

случай<sup>4</sup>, а затем в общей форме в работе Ахиезера и Померанчука. Основная идея, оставшаяся незамеченной в ранних работах, состояла в следующем: сохранение импульса при испускании нейтронами фоонов должно учитывать тот факт, что кристаллическая решетка поглощает импульс квантами, причем энергия отдачи незначительна. Таковы знаменитые «процессы переброса» в физике кристаллов, ныне абсолютно банальные, но новые для 30-х годов. В этом случае, как и в других, Померанчук смог увидеть основную проблему и довести ее до полной ясности.

Мне очень жаль, что не довелось узнать И. Померанчука ближе.

С. Я. Никитин

## И. Я. ПОМЕРАНЧУК В ЛФТИ И ИТЭФе

Первая встреча с Исааком Яковлевичем состоялась в ЛФТИ на одном из заседаний ядерного семинара в 1938 г. В 1938—1939 гг. он работал в Ленинграде. Его особенно привлекала возможность общения с сотрудниками ядерных лабораторий (лабораторий А. И. Алиханова, Л. А. Арцимовича и И. В. Курчатова) и теоретиками отдела полупроводников (Б. И. Давыдовым, И. М. Шмушкевичем и Н. Л. Писаренко).

Весной 1939 г. происходили бурные дебаты о природе только что открытых ливней Оже (широких атмосферных ливней). Преобладала точка зрения, согласно которой ливни Оже — электронно-фотонные лавины, обусловленные первичными электронами высоких энергий.

Большой интерес вызвала тогда работа И. Я. Померанчука о максимальной энергии электронов, достигающих верхних слоев атмосферы, определяемой излучением в магнитном поле. Результаты этой работы И. Я. стимулировали исследование ливней, обусловленных ультраэнергичными частицами, что в существенной степени способствовало установлению природы этого явления.

Здесь уместно вспомнить об одном эпизоде, характеризующем отношение И. Я. Померанчука к своему учителю — Л. Д. Ландау.

В 1938—1939 гг. Дау переживал свою первую катастрофу — пребывание, как он говорил, на «отрицательном уровне». Весной 1939 г. пришло известие о переводе Дау на «положительный уровень» и И. Я. отправился в Москву. Естественно, он очень радовался предстоящей встрече, но при этом выражал большие опасения, насколько хорошо «доктор» воспримет его последние работы. Судя по заключительной фразе статьи о магнитном торможении, где И. Я. выразил благодарность Дау, все обошлось

благополучно. Результаты работы по синхротронному излучению в магнитном поле имели далеко идущие последствия.

В конце 1943 г. Д. Д. Иваненко организовал общемосковский ядерный семинар. Заседания происходили в одной из аудиторий Отделения общественных наук на Волхонке и привлекали большое число участников. На втором (и последнем) заседании семинара был заслушан реферативный доклад о работе бетатрона на 20 МэВ, запущенного Керстом. При обсуждении доклада Иваненко спросил И. Я., не может ли излучение в магнитном поле сказаться на процессе ускорения электронов в бетатроне? Ответ И. Я. на этот вопрос был затем опубликован в виде совместной заметки (с Иваненко) в «Докладах Академии наук».

Вторично к задаче об излучении быстрых электронов в магнитном поле Исаак Яковлевич вернулся (совместно с Л. А. Арцимовичем) в 1944 г. В работе была рассмотрена задача о движении электронов в магнитном поле, вычислен спектр синхротронного излучения и т. д. Результаты работы И. Я. Померанчука и Л. А. Арцимовича, а также открытие В. И. Векслером автофазировки однозначно определили выбор типа проектировавшегося то время электронного ускорителя.

Начиная с осени 1940 г. в лаборатории А. И. Алиханова велась подготовка экспедиции на Памир для исследования природы частиц космического излучения. Исаак Яковлевич регулярно принимал участие в обсуждении постановки тех или иных опытов, которые предполагалось проводить на Памире. В одном из обсуждений И. Я. предложил попытаться определить спин мезотрона (мюона, по современной терминологии) путем измерения интенсивности  $\delta$ -электронов, образуемых энергичными мезотронами. В конечном счете опыт сводился к определению мягкой компоненты, сопровождающей мезотроны на большой глубине. И. Я. снабдил нас всеми необходимыми теоретическими оценками. Такой опыт был поставлен. В качестве места проведения была выбрана станция метро Кировская, и в конце марта 1941 г. установка была перевезена из Ленинграда в Москву и установлена в одном из подземных залов станции (во время войны в этом зале размещалась Ставка). Нам удалось получить самые предварительные данные, говорившие скорее о работоспособности установки.

Однажды мы провели обсуждение предварительных данных с И. Я. прямо в нашей подземной лаборатории. Я с гордостью демонстрировал И. Я. телескоп из счетчиков и электронику. Он внимательно смотрел и слушал, хотя было очевидно, что его мало интересовали технические детали. При своей высочайшей физической интуиции И. Я. был полностью лишен каких-либо технических навыков. Например, он предложил водителю, везшему его, свою помощь в смене колеса с поврежденной шиной. Когда водитель (это был А. Г. Самойлов) отказался от его помощи,

<sup>4</sup> Weinstock R. Inelastic scattering of slow neutrons // Phys. Rev. 1944. Vol. 65. P. 1.



И. Я. с удивлением спросил, неужели ему удастся одному перевернуть автомобиль колесами вверх.

В 1942 г. И. Я. Померанчук принимал участие в работах экспедиции на Алагез. Это был сокращенный вариант Памирской экспедиции. За время пребывания в Армении И. Я. выполнил ряд работ по лавинной теории ливней, инициированных непосредственными запросами экспериментаторов.

В период 1943—1945 гг. Исаак Яковлевич возглавлял работы по теории ядерных реакторов в Институте атомной энергии. В конце 1945 г. И. Я. Померанчук принял предложение А. И. Алиханова вместе с Л. Д. Ландау возглавить работы по теоретической физике в только что организованном Институте теоретической и экспериментальной физики (Лаборатория № 3). В тематику нового института входили прикладные работы (разработка тяжеловодного реактора) и фундаментальные исследования атомного ядра, элементарных частиц и космического излучения.

В течение всего времени работы в ИТЭФе Исаак Яковлевич постоянно был связан с экспериментаторами института. В первые годы И. Я. тесно общался с экспериментаторами и инженерами, занятыми разработкой тяжеловодного реактора. На многочисленные обсуждения физических аспектов проекта И. Я. обязательно приводил своих сотрудников, на первых порах — А. Д. Галанина, в более позднее время — Б. Л. Иоффе и А. П. Рудика. Постепенно он отошел от этой тематики, поручив ее полностью А. Д. Галанину, Б. Л. Иоффе и А. П. Рудику.

В связи с пуском опытного реактора небезынтересно вспомнить следующий эпизод. Измеренный критический объем реактора оказался в полном согласии с теоретическим (совпадение в пределах 1%). Утром после пуска (который производился ночью) мы (Владимирский, Гаврилов, Никитин) вместе с Абрамом Исааковичем зашли в маленький кабинет Померанчука. Не говоря о состоявшемся пуске реактора, Абрам Исаакович задал Исааку Яковлевичу явно провокационный вопрос — за какое значение критического объема И. Я. может поручиться. После некоторого раздумья И. Я. подтвердил правильность данной ранее неопределенности в критическом объеме. В результате настойчивого нажима со стороны Абрама Исааковича Исаак Яковлевич увеличил эту неопределенность раза в полтора, ссылаясь на возможные корреляции погрешностей в константах. Далее под сильнейшим нажимом Абрама Исааковича, настаивавшего на реалистической оценке возможной погрешности, И. Я. увеличил эту цифру вдвое против первоначальной погрешности. Дальнейший нажим Абрама Исааковича приводил только к раздражению Исаака Яковлевича, утверждавшего, что ему нечего добавить, если оставаться в рамках расчетов и полагать, что нет больших погрешностей в константах. Эту «перепалку» прекратил сотрудник, проговорившийся о благополучном пуске реактора. И. Я. воспринял как само собой

разумеющееся близкое согласие (в пределах погрешности) расчетного уровня с измеренным.

Основные работы Исаака Яковлевича по теоретическому исследованию сечений упругого рассеяния при больших энергиях были закончены в 1962 г. По одной из них И. Я. выступил в качестве приглашенного докладчика на конференции 1962 г. в Женеве.

Появление Померанчука на конференции рассматривалось всеми как научная сенсация. Хочется отметить, что разрешение на поездку Исаака Яковлевича в Женеву было получено в результате огромных усилий, проявленных Абрамом Исааковичем.

Ранней весной 1963 г. в Москве распространились слухи, что Линденбаум и Юань наблюдали сужение дифракционного конуса в протон-протонном рассеянии. (Кто-то из сотрудников ОИЯИ, вернувшийся из США и «допрошенный» И. Я., сообщил ему обрывочные сведения на уровне слухов.) Эти слухи привели И. Я. в весьма возбужденное состояние. Через несколько дней институт посетил Рамзей (с кем-то из сотрудников). И. Я. буквально выпотрошил его, пытаясь получить подробные сведения об опытах Линденбаума и Юаня. Рамзей смог в известной степени удовлетворить любопытство И. Я. («...только качественно, кри-вых я не видел...»). При каждой беседе с Рамзеем в течение всего пребывания его в ИТЭФе И. Я. снова возвращался к допросу по поводу интересовавших его опытов. Во время обеда в день отъезда Рамзея, когда было ясно, что ничего нового больше выяснить не удастся, И. Я., принимавший вялое участие в общем разговоре, время от времени поднимал палец и произносил: «Линденбаум и Юань...»

И. Я. Померанчук всегда заботился о поддержании в институте благоприятной научной атмосферы. В 1963 г. в институте возникли опасные тенденции, поставившие под угрозу вообще существование института как работоспособного научного учреждения. Ряд сотрудников, работа которых была подвергнута справедливой критике, выступили с демагогическими заявлениями о вреде критики для приоритета советской науки. И. Я. ответил резкой отповедью одному из носителей таких тенденций на открытом партийном собрании (где рассматривался вопрос о приеме этого субъекта в члены партии). Среди прочего Исаак Яковлевич сказал: «Успехи института в существенной степени определялись и определяются наличием в нем атмосферы абсолютно ничем не ограниченных научных дискуссий. Наличие таких условий совершенно необходимо для нормальной жизни и развития научного учреждения. Я глубоко убежден, что научное учреждение, в котором принцип свободы научных дискуссий нарушается, перестает быть научным учреждением. Это положение не допускает никаких дискуссий и кривотолков. Здесь проходит граница между людьми, реально любящими науку и преданными ей, и

людьми, случайно попавшими на работу в научное учреждение, которые примазываются время от времени к науке, исходя из целей, ничего общего с наукой не имеющих...»

В обыденной жизни Исаак Яковлевич был очень скромным, нетребовательным и малоприспособленным человеком. Он всегда ограничивался самыми минимальными удобствами. Так, в Ленинграде (1939 г.) он выходил в полночь послушать последние известия, стоя у уличного громкоговорителя. Завести себе приемник или хотя бы радиотрансляционную точку было бы для него связано с лишними хлопотами.

Я. А. Смородинский

## НЕСКОЛЬКО СЛОВ ОБ ИСААКЕ ЯКОВЛЕВИЧЕ

Первое мое воспоминание об Исааке Яковлевиче хорошо было бы назвать «Как оживают формулы»... Это происходило на физфаке Ленинградского университета. Недавно появившегося доцента Померанчука очень волновало излучение релятивистского электрона. В учебниках этой формулы не было. Как это ни странно, никто не знал, как надо записывать ускорение в релятивистской форме. Электродинамика Ландау—Лифшица появилась на физфаке в рукописи в конце учебного года. В ней была и нужная формула. Формула стала предметом дискуссии, и ее вывод был для многих первым примером записи релятивистски инвариантных выражений. Но Исаак Яковлевич волновался не из-за этого — формула ему сразу подсказала, что электрон в магнитном поле Земли будет сильно излучать и электроны очень больших энергий не смогут пройти через магнитное поле Земли. Для всех нас это был поразительный результат. Магнитным полем Земли занимались геофизики, а электроны в космических лучах таких энергий были неизвестны. В общем, никому формула ничего не сообщила, кроме Исаака Яковлевича.

Другое воспоминание относится уже к Москве, год 1940-й. Исаак Яковлевич предложил мне проверить, что происходит с границей нестабильности дираковского атома, если учесть размеры ядра. Для точечного центра критический заряд равен 137. А что будет, если заряд ядра размазан по конечному объему? Когда обсуждался результат, то Исаак Яковлевич с восторгом заметил: «Хорошо бы ударить ураном по урану!» Замечание было встречено общим смехом — такая возможность лежала за пределами реальности. Но Исаак Яковлевич считал, что задача стоит того, чтобы ее решить. Сейчас в этом никто не сомневается, но Исаак Яковлевич видел будущее лучше других.

Мне всегда казалось, что с Исааком Яковлевичем формулы говорят на одном языке, что он владеет каким-то «кольцом Соломона», одаряющим владельца умением понимать «птичий» язык формул.

Исаак Яковлевич был предан своим друзьям. Когда в 1939 г. Ландау вновь появился в Институте физических проблем, Померанчук немедленно поехал к нему и вскоре переехал из Ленинграда, где все его любили, в Москву. Так начался новый этап его работы с Л. Д. Ландау.

У каждого крупного ученого есть свой подход к изучению природы, свой стиль в науке. Померанчука интересовало, что происходит в предельных условиях, когда энергия частиц уходит в бесконечность или температура системы становится очень низкой.

Делая доклад на семинаре или на конференции, он захватывал внимание слушателей своим умением находить простые истины там, где никто их не видел. Когда рождалась теорема Померанчука, то казалось (во всяком случае, мне) невозможным понять связь между поведением частиц и античастиц при больших энергиях, почти не делая никаких предположений о механизме взаимодействия. Тем не менее родилась знаменитая теперь теорема Померанчука, утверждающая, что сечения взаимодействия частицы и античастицы с одной и той же мишенью сравняются с ростом энергии.

Сейчас, думая об Исааке Яковлевиче, вспоминаешь о нем как о физике, жившем только в одном мире своей науки и обладавшем волшебной способностью извлекать темы своих работ из ничего. Такая способность основывалась на особом понимании природы, на никогда не прекращающихся размышлениях и непрерывном упорном труде. Этому он учил своих друзей и учеников. Блестящая плеяда учеников — лучшая демонстрация величия этого скромного человека.

М. С. Козодаев

## ЛЕКЦИИ ДЛЯ ДВОИХ

В Ленинградский физико-технический институт Исаак Яковлевич Померанчук пришел в середине 30-х годов. Вначале я его видел лишь на семинарах, но позднее (1938—1941 гг.) он стал заходить в лабораторию А. И. Алиханова побеседовать с Абрамом Исааковичем, мною, П. Е. Спиваком, С. Я. Никитиным об экспериментах, которые готовились на Памире. Экспедиция на Памир не состоялась, началась война. ЛФТИ был эвакуирован

в Казань. Жили и работали в очень стесненных условиях, но это в то же время способствовало укреплению дружеских отношений между всеми сотрудниками Физтеха. Я в то время в лаборатории Ю. Б. Кобзарева занимался разработкой радиолокационной аппаратуры. В Казани мы нередко встречались с Исааком Яковлевичем. Он обычно заводил разговор о физике, высказывал свои соображения об экспериментах, которые нужно поставить сразу же после окончания войны.

В начале 1943 г. небольшая группа физиков из Физтеха (в которую входил и я) была переведена в Москву, чтобы организовать работы, необходимые для решения проблемы использования ядерной энергии. В это время И. Я. Померанчук находился в Армении на высокогорной станции Арагац, где А. И. Алиханов с небольшой группой физиков занимался изучением космического излучения. Однако уже в мае 1943 г. Исаак Яковлевич приехал в Москву и энергично включился в работу нашей группы.

Первое время в Москве мы испытывали трудности с помещениями для развертывания лабораторий и с жильем. Но уже в 1944 г. Лаборатория, которую возглавлял И. В. Курчатов, получила трехэтажный корпус на Октябрьском поле. В полученном здании для лабораторий было отведено около 3/4 комнат, остальные комнаты были оборудованы под жилье сотрудников с семьями. Исаак Яковлевич поселился в той же части лабораторного корпуса, где уже жили И. В. Курчатов, Л. А. Арцимович, Г. Н. Флеров, Н. Е. Спивак, я и др.

Экспериментальные работы в лабораториях разворачивались быстро. Группа сотрудников Физтеха была дружна и сплоченна. Нередко заходил ко мне Исаак Яковлевич, и, если в это время я обсуждал с сотрудниками сектора текущие дела или планы будущих экспериментов, он энергично, со свойственным ему темпераментом включался в дискуссию. Мы, экспериментаторы, в беседах с Исааком Яковлевичем часто пользовались наглядными классическими модельными представлениями о процессах и реакциях, которые предполагали изучать. При этом Исаак Яковлевич начинал страшно возмущаться и говорить в наш адрес разные неместные слова, которые нас никак не обижали — мы были хорошими друзьями. Бурная реакция Исаака Яковлевича была естественна: у него было твердое убеждение, что привлечение классических моделей для рассмотрения процессов в микромире — это строго запрещенное «влезание» в область квантовой механики. И вот на одной из таких дискуссий (1944 г.), в которой участвовали В. Т. Осипенков, я и Исаак Яковлевич, он категорически нам заявил: «Хватит, со следующей недели я начинаю вам читать курс квантовой механики». После этого Исаак Яковлевич систематически в назначенный час приходил в мою комнату, где я и В. Т. Осипенков ждали его, и читал нам двух-

часовые лекции. Исаак Яковлевич был прекрасным лектором. Прослушать курс лекций по квантовой механике Исаака Яковлевича мне и В. Т. Осипенкову, конечно, было очень полезно. После завершения курса мы при обсуждении физических задач с Исааком Яковлевичем уже не пользовались модельными представлениями о процессах в микромире, но, нужно признаться, полностью так и не избавились от этого греха.

*Е. Л. Фейнберг*

## СТРАСТНОСТЬ

Когда вспоминаешь Чука (иначе его называть невозможно), то сразу приходит в голову ключевое слово — страстность, если его понимать как высокий накал чувств. Да, этот вежливый, неторопливый, раздумчивый человек был обуреваем страстями.

Было бы тривиальностью говорить о его преданности науке. Но дело в том, что это была страстная преданность (я чуть было не сказал «всепоглощающая» — это было бы неверно), такая же, как страстная преданность людям, которых он действительно любил, и как страстное неприятие тех, кого он отчетливо не любил. Мне кажется, и тех и других было немного. Вообще он был доброжелателен и терпим.

Но страстность была внутренним миром, пламя полыхало внутри. Только негодование могло выпустить его наружу. Вдруг совершенно неожиданно из этого хрупкого, маленького тела вырывался громовой негодующий бас. Часто начиналось с бешеного: «Но, черт меня побери, Вы что же, считаете, что...» Или вдруг он взрывался непредсказуемо громовым хохотом. Впрочем, взрыв в большинстве случаев был в значительной степени наигранным. Он вполне умел себя сдерживать. Отнюдь неверно было бы думать, что он страстно реагировал на других людей. Обычно, если собеседник был ему неинтересен или сказанное им было явно неправильным или просто глупым, он мягко уклонялся от продолжения разговора, произнося вежливо и тихо: «Может быть, может быть». Если же собеседник настаивал на большей определенности, говорил: «Не знаю... Я, Вы знаете, м-м-м... не уверен, что это правильно». Принцип «и не оспаривай глупца», видимо, был из числа основных в его взаимоотношениях с людьми.

\* \* \*

Чук впервые появился в Москве на семинаре в ФИАНе, если не ошибаюсь, в 1938 г. с докладом о рассеянии нейтронов в кристаллической решетке. Так же, как и всегда потом, когда

он читал лекцию или выступал с докладом, он рассказывал вдоль доски равномерно и медленно, туда и обратно, как бы раздумывая у нас на глазах. И говорил столь же неторопливо, полусклонив голову и почти дотрагиваясь до подбородка согнутым указательным пальцем — в его характерной позе, как он изображен на фотографии, висящей в конференц-зале ИТЭФа. Иногда он останавливался, глядя на аудиторию, и столь же характерным движением вытянутого вверх пальца поправлял на переносице сползающие очки. Спокойная уверенность была в нем уже тогда. Эта так свойственная ему спокойная уверенность, никогда ни в малейшей степени не переходившая в самоуверенность или тем более в самодовольство, производила сильное впечатление.

Когда он на время остался без Учителя, как он всерьез и — лишь по форме — чуть-чуть иронически называл Ландау (обычно, когда оспаривал его мнение), Чук переехал в Ленинград, но с его возвращением вернулся в Москву и на несколько лет поступил в теоретический отдел ФИАН.

Дискутировать с ним было всегда удовольствием. Дело не только в его пронизательности, физическом чутье, поучительности того, что он говорил. Подкупала полнейшая научная честность и добросовестность. Иногда во время обсуждения он возбуждался и, когда собеседник высказывал какой-либо довод, который ему нравился, уже отнюдь не спокойно, а быстро и даже радостно говорил: «Да-да-да! Вот именно, вот именно!» Его можно было переубедить — в нем совершенно не было тупого упрямства и мелкого честолюбивого желания во что бы то ни стало остаться правым. Но для этого требовалось действительно убедить его.

Перед войной ему не понравилась одна моя работа, он не верил выводам. Это было очень полезно для меня — пришлось основательно попотеть над дополнительными вычислениями и доводами. И все-таки, хотя после этого он формально не возражал, я видел, что у него остаются сомнения. Прошло немало лет, прежде чем было достигнуто взаимопонимание.

\* \* \*

В 50-х годах мы делали с ним вместе одну работу. В силу семейных обстоятельств он предпочитал встречаться для работы у меня дома. Когда подходило время обеда, он собирался уходить. Я тщетно упрашивал его поесть что-нибудь — до дома ему предстояла еще долгая дорога. Сначала он отшучивался («Ты знаешь, я вообще мало ем, некоторые даже считают, что я не животное, а растение»). Но на второй или третий раз признался: «Видишь ли, Ирина Никаноровна (так звали бабушку в их семье) очень огорчается, если я не съедаю то, что она приготовила на обед».

Однажды мы шли, еще из старого ФИАН, по Миусской улице, обсуждая что-то. Внезапно он остановился и таким же серьезным тоном, как говорил о физике, произнес: «У меня к тебе есть небольшая просьба. Не мог ли бы ты одолжить мне один рубль?» Немного удивленный, я дал ему этот рубль. Он вернулся на несколько шагов назад и столь же серьезно вручил (именно вручил) его нищей, мимо которой мы прошли.

\* \* \*

В ФИАНе в 1955 г. проходила Всесоюзная конференция по квантовой электродинамике. Впервые после пятнадцатилетнего перерыва в Москву на эту конференцию приехали несколько иностранцев, среди них — Челлен, находившийся тогда в зените своей известности. Как-то Чук застал его в пустующую комнату и у доски стал атаковать вопросами. Многодневно небритый, серьезный, маленький Чук наступал на высокого, элегантного, розовощекого и сероглазого, какого-то особенно ухоженного Челлена. Знание английского языка тогда у Чука было еще на уровне «Две табл» (здесь нет преувеличения). Челлен отбивался весело и шикарно (через девять лет, в Дубне на Рочестерской конференции, он был уже сильно поседевшим и заметным потухшим, хотя по-прежнему симпатичным и улыбчивым). Все эти различия не мешали ни спору, ни уважению, которым уже тогда пользовался Чук у западных теоретиков.

В силе этого уважения я смог убедиться через год после смерти Чука, когда был в ЦЕРНе. Моррисон обратился ко мне в связи со спорами, которые шли между черновскими теоретиками, — как лучше называть вакуумный полюс: «помероном» или «померанчуконом» (как он сам считал более правильным). Я сказал, что для меня «померон» звучал бы погребальным колоколом: «померон», но так как для западных теоретиков этого смысла здесь нет, а «померанчукон» слишком длинно и может не удержаться, то лучше уж применять «померон».

Учреждением этого термина Чуку была оказана особая почесть. Ведь не он ввел в теорию вакуумный полюс. И хотя его роль в развитии теории процессов при асимптотически высоких энергиях была, конечно, очень значительна, все же в этом акте следует видеть подчеркнутое выражение симпатии и уважения в гораздо более широком плане.

\* \* \*

Его взаимоотношения с Ландау — идеал взаимоотношений учителя и ученика: независимость мышления, сочетавшаяся с глубоким уважением к авторитету учителя со стороны Чука; восхищение талантом ученика со стороны Ландау. Решусь сказать, взаимная любовь.

В самые первые послевоенные годы, еще до появления ковариантной перенормируемой квантовой электродинамики, Чук совершил резкий поворот в своих научных интересах. Он занялся фундаментальными вопросами квантовополевой теории. Это противоречило взглядам Ландау, который все еще отказывался пользоваться вторичным квантованием и т. п. Но Чук был непоколебим и делал то, что считал нужным. Прошло 5—8 лет, и их интересы полностью слились.

Слишком рано оба они ушли из жизни.

*С. С. Алиханова*

## И. Я. ПОМЕРАНЧУК И А. И. АЛИХАНОВ

Впервые я увидела Исаака Яковлевича Померанчука в 1941 г. зимой в Казани, куда был эвакуирован Ленинградский физико-технический институт. Там же, в Казанском университете, нашли приют многие попавшие туда ленинградские физики. А. И. Алиханов с братом и несколькими сотрудниками тоже оказались там. Всеми способами старались они найти возможность для работы. Места было мало, быт устраивался с трудом, но физики делали все, что могли, чтобы принести пользу в это грозное время.

Как-то, когда в нашей крошечной комнате, в которой мы жили с Абрамом Исааковичем, собрались сотрудники (в те времена все были молоды), пришел Померанчук. Выглядел он очень необычно. Мне показалось, что у него была аскетическая внешность. Поверх потрепанного пальто висела на веревочке в мешочке маленькая пайка — не то хлеб, не то бутерброд, взятый из дома. Уж очень это обращало на себя внимание.

Абрам Исаакович и Артем Исаакович ценили, уважали Чука как талантливого и фанатически преданного науке физика, всегда советовались с ним и обычно, уже в дальнейшем, очень подробно обсуждали с ним каждую новую работу. В мае 1942 г. Исаак Яковлевич одним из последних пароходов по Волге и Каспию отправился с нами в Армению, в Ереван, где он по просьбе Абрама Исааковича прочел несколько лекций будущим физикам, тогда студентам Ереванского университета, после чего отправился на Алагез.

Вскоре я подружилась с Исааком Яковлевичем. Человек он был очень непростой. Меня привлекали в нем порядочность и, конечно, преданность науке, которая прошла красной нитью через всю его жизнь и вызывала большое к нему уважение. Мне казалось, что в этом сказывалось влияние его гениального учи-

теля Л. Д. Ландау, перед которым он преклонялся и с которым Абрама Исааковича связывала тесная дружба.

Со стороны Чука на протяжении многих лет их совместной работы я видела всегда уважение к Абраму Исааковичу как к ученому, несмотря на появившиеся временные разногласия по отдельным вопросам. В дальнейшем все это успокаивалось и опять продолжалась активная совместная деятельность. Абрам Исаакович очень ценил, что у него в институте такой человек, как Чук, с большим научным авторитетом, заведовал теоретическим отделом, где собрал вокруг себя талантливую молодежь, которая постепенно стала сильным ядром, и теоретический отдел института вызывал к себе среди физиков интерес и уважение.

По вечерам, проходя по территории института, глядя на освещенные окна лабораторий, где внизу допоздна работал В. А. Любимов, а наверху — Чук со своими сотрудниками, Абрам Исаакович говорил, что только так можно добиться настоящих успехов, когда ученого не интересует регламент часов работы, а целиком захватывает проблема, над которой работаешь.

Исаак Яковлевич довольно часто бывал у нас дома, иногда бесконечно развивая какую-либо научную гипотезу либо советуясь с нами о своих житейских делах, так как наши отношения были очень простыми и сердечными; обращался иногда с просьбами, которые Абрам Исаакович старался выполнить. Кстати, я вспоминаю забавный случай, когда Чук очень просил Абрама Исааковича принять его дома по срочному делу. Договорившись с Абрамом Исааковичем о времени, я спросила Исаака Яковлевича, куда ему позвонить, чтобы пригласить его к назначенному часу и вместе победать. Чук, который строил витиеватые фразы, сказал, что он будет «на государственной службе» (которая находилась в 100 метрах от нашего дома). Когда же он пришел к нам, мы сели за стол и Абрам Исаакович спросил, какое у него срочное дело, Чук совершенно серьезно сказал, что он просит совета, нанять ли ему домработницу или нет. Вспоминаю, как у Абрама Исааковича ложка упала на стол и он покатился со смеху, Чук же был невозмутим.

Довольно часто Исаак Яковлевич приезжал к нам на дачу в Мозжинку. Помню лето 1961 г., когда Исаак Яковлевич, отдыхая в пансионате Академии наук, фактически проводил все время у нас, увлеченно беседуя с Абрамом Исааковичем и Дау. (В то последнее для него лето, когда он был здоров, перед ужасной автомобильной катастрофой, Дау тоже жил в Мозжинке.)

Исаак Яковлевич в конце своей жизни был очень тяжело болен и понимал свое состояние. Как-то Абрам Исаакович пришел из института домой потрясенный. Когда я спросила, что могло его так взволновать, он ответил: «Сегодня ко мне приходил Чук прощаться, говорил, что он хотел мне сказать, что очень ценил и уважал меня и что больше он уже никогда не придет».

М. К. Павлова

## ОТРЫВОК ИЗ ПОЭМЫ

С Исааком Яковлевичем Померанчуком я познакомилась в 1942 г. в Казани — он был участником экспедиции на гору Алагез по изучению космических лучей, куда я поехала с моим мужем А. И. Алиханьяном, одним из организаторов экспедиции.

В то лето почти все участники экспедиции были на горе, в Ереване оставались только мы с Исааком Яковлевичем. Вероятно, это обстоятельство и сблизило нас — я не могу сказать, что мы подружились, но виделись мы в то время ежедневно. Мы жили в одной гостинице, днем каждый из нас был занят своим делом: И. Я., как всегда, много работал, я увлекалась переводами стихов армянского поэта Егише Чаренца и тоже все дни проводила за письменным столом. Но каждый вечер раздавался легкий стук в дверь — это был И. Я. Разговор почти всегда начинался со слов: «Какие новости с Алагеза?» Если новости были, я рассказывала их. Следующий его вопрос был: «Есть ли новые стихи?» И тут И. Я. усаживался в кресло, а я читала ему свои стихи или переводы из Чаренца и Исаакяна. Визит длился обычно минут двадцать, не более. Темой наших разговоров почти всегда была литература. И вот теперь, спустя сорок с лишним лет, не помня ни одного слова из наших бесед, я помню, как живого, И. Я., невысокого, худощавого, с чуть наклоненной головой, помню его тихий разговор и негромкий смех, помню то радостное чувство, которое я испытывала при встречах с ним.

Те, кому посчастливилось знать этого замечательного человека, не могли не испытывать на себе его обаяния и, конечно, не забудут его.

Несколько лет спустя, уже в Москве, я написала поэму о днях войны «В тылу у друга», один из фрагментов которой посвятила И. Я. Померанчуку. Вот это стихотворение:

А в старинном городе Казани,	Да чесал мечтательно в затылке,
Раздобыв чернила да перо,	Мысли погрузив в бета-распад.
Человек с усталыми глазами	Так, тцетой не втянут повседневной,
Изучал атомное ядро.	Приоткрыв природу, человек
Он сидел часами у контилки,	Как за спящей наблюдал царевной,
Вспоминал котлеты невпопад,	С формулой в беседе задумевной
Хлеб жевал, выплевывал опилки,	Обгоняя свой угрюмый век.

Н. А. Бургов

ЗАМЕЧАТЕЛЬНЫЙ УЧЕНЫЙ И ЧЕЛОВЕК  
АКАДЕМИК  
ИСААК ЯКОВЛЕВИЧ ПОМЕРАНЧУК

С Исааком Яковлевичем Померанчуком я познакомился в 1938 г., когда он сравнительно недолгое время был сотрудником кафедры теоретической физики физфака Ленинградского университета. В это время я кончил четвертый курс и мне предстоял выбор темы курсовой работы, обязательной на пятом курсе. Меня влекло и к экспериментальным, и к теоретическим задачам, особенно в области бурно развивавшейся тогда ядерной физики. И вот И. Я. Померанчук предложил мне теоретическую тему о взаимодействии нейтронов с ядрами орто- и параводорода. В процессе работы над темой мне приходилось часто с ним встречаться, и всегда эти встречи производили на меня неизменно благоприятное впечатление. Он был предельно прост и благожелателен, без малейшего налета превосходства, неправильные пути расчетов отвергал, убеждая, и искренне радовался при использовании правильных путей, которые он сам часто намечал, заставляя размышлять, как их можно применить. Сделанная работа по его настоянию была опубликована в «Ученых записках ЛГУ», она и стала моей первой научной статьей.

Далее мы встретились уже после моей демобилизации из армии в 1946 г. Мне стало известно, что И. Я. Померанчук и Б. С. Желлепов дали обо мне хороший отзыв А. И. Лейпунскому, благодаря чему я поступил работать в марте 1946 г. в ИТЭФ. Здесь после длительного перерыва (1939—1946 гг.) я опять встретился с Исааком Яковлевичем, и мне стали понятны его широчайший научный кругозор и его замечательные успехи в решении глубоких теоретических задач ядерной физики и физики элементарных частиц.

Уже в 1946 г. мы использовали результаты Померанчука в теории ядерных реакторов при сооружении реактора ИТЭФа. Я не буду писать о его огромных достижениях в физике элементарных частиц, лучше меня это сделают его соратники в этой области. Мне только хочется отметить огромную помощь, которую он всегда охотно оказывал экспериментаторам в решении теоретических вопросов. Еще хочется отметить его предельную простоту, отзывчивость и отсутствие у него при всяких обсуждениях каких-либо ненаучных интересов.

Роль Исаака Яковлевича Померанчука в создании теоретического отдела ИТЭФа трудно переоценить. Только перечисление имен крупных физиков-теоретиков отдела займет несколько строк.

Э. Л. Андроникашвили

## И. Я. ПОМЕРАНЧУК В МОЕМ ПРЕДСТАВЛЕНИИ

Про Исаака Яковлевича Померанчука принято говорить, что он до конца был предан науке, что у него не было других интересов. И меня это всегда возмущало. Кто из крупных ученых не предан науке до конца? Но, вероятно, никому наука не помешала иметь сокровенные глубины души, куда редко заглядывал глаз посторонних людей. К счастью, в конце концов я оказался прав.

Шапочное знакомство у нас было еще в 1940 г., когда я находился в докторантуре Института физических проблем.

По коридору первого этажа рядом с высоким и тощим Дау ходил взад и вперед тщедушный человек небольшого роста, с большой головой, фантастически небритый. Ну, настолько небритый, что его голова казалась еще больше. Их разговор непрерывно вращался вокруг проблем, связанных с физикой твердого тела.

Некий диссонанс в их общении был связан с тем, что Дау часто говорил в шутовском тоне, называя своего собеседника Чук, а Чук называл Дау Учитель и в его тоне слышалась библейская почтительность.

Когда он проезжал из Казани через Тбилиси в Ереван на станцию по изучению космических лучей к братьям Алихановым, он, по-видимому из вежливости, спросил меня, чем я занимался в Институте физических проблем. И, услышав, что в мою задачу входило проведение опыта типа Штерна и Герлаха по определению диамагнитного момента мельчайших частиц сверхпроводника, который я так и не выполнил, очень заинтересовался и возвращался к этому разговору неоднократно.

«Вот это класс! — повторял он каждый раз. — Такие экспериментальные задачи могут ставиться только у Петра Леонидовича». И он проницая ко мне интересом, уже не обращая внимания на то, что Великая Отечественная война прекратила эти мои экзерсисы, а после войны вместо сверхпроводимости я сразу бросился в пучину ротонов, т. е. в сверхтекучесть по Ландау.

Обсуждая в 1947—1948 гг. с Дау влияние примесей на сверхтекучесть гелия (примеси  $^3\text{He}$  в  $^4\text{He}$ ), мы часто обращались к Померанчуку, который, работая в ИТЭФе, знакомился с «физревами» значительно раньше нас. И тут снова возникли между нами тесные контакты уже на почве сверхтекучести.

Потом я уехал в Тбилиси, а когда наезжал в Москву, то часто посещал ИТЭФ в тот период, когда конструировались низкотемпературные пузырьковые камеры, а Исаак Яковлевич работал над своим замечательным «эффектом Померанчука», вошедшим в историю науки о конденсированном состоянии вещества. Несколько раз Померанчук приглашал меня к себе в кабинет для консульта-

ций по физике низких температур. Мне приятно думать, что он ценил мое мнение и доверял моим суждениям.

Но я пишу эти строки не для разговора о физике.

В 1966 г. Исаак Яковлевич был уже неизлечимо болен, когда мы с ним встретились в санатории «Узкое». Он был одинок и нелюдим. Вдруг он постучал в дверь моей комнаты. Мы разговорились. Его тревожила судьба семьи. Он был отчимом двух девочек, которых любил беспредельно. Говоря о них, он излучал тепло. Помнится, с младшей из его падчериц произошел какой-то несчастный случай. Ее здоровье было главной заботой Исаака Яковлевича. Будущее девочек было лейтмотивом наших бесед. О его болезни мы не говорили. Подразумевалось, что дети останутся без его попечения. Вот так мне удалось заглянуть в глубину его души.

В следующий раз мы встретились у него в комнате. Я увидел в его руках «Деревушку» Фолкнера. Оказывается, и это было совершенно неожиданно для меня, Фолкнер был его любимым писателем. И моим тоже. Я изложил ему свою «концепцию» фолкнеровского творчества, которого я считал продолжателем толстовской традиции, поэтом подсознательного мышления, «ненаблюдаемых» процессов в душе человека. «Юла» — это предельное выражение фолкнеровской сущности.

К Фолкнеру мы возвращались много раз, проникая в мысли друг друга. Исаак Яковлевич был знатоком литературы, в том числе западной.

Так открывались мне все новые и новые стороны его личности вне всякой связи с наукой. О науке мы с ним даже не пытались говорить.

Я был глубоко травмирован, услышав вскоре о его кончине.

Г. Н. Флеров

## «ЛИБО СТРОЙТЕ УСКОРИТЕЛЬ, ЛИБО ИДИТЕ В УПРАВДОМЫ»

Непосредственно с Исааком Яковлевичем Померанчуком мне работать не пришлось, но те ситуации, в которых мы сталкивались (в хорошем смысле этого слова), запомнились навсегда.

Исаак Яковлевич окончил Ленинградский политехнический институт в 1936 г., за два года до меня. Но уже тогда среди нас, студентов, шла о нем молва как о теоретике, который не просто хорошо считает, но и в понимании многих вопросов продвинулся гораздо дальше своих учителей.

Пути наши пересеклись, когда в Москве стали заниматься атомной проблемой, начались поиски способов осуществления цепной ядерной реакции. Предстояло решить множество проблем, среди них — как бороться с резонансным поглощением нейтронов, препятствующим цепной реакции.

Еще до войны резонансное поглощение нейтронов было темой моей дипломной работы. Хотя и очень плохими методами, но мы все-таки пытались узнать, каковы особенности поглощения нейтронов различными веществами, в частности кадмием, ртутью, золотом, серебром. Самое главное, надо было понять, как же поглощает уран, что с ним при этом делается. Но урана у нас тогда не было.

Для борьбы с резонансным поглощением нейтронов — явлением, которое может застопорить развитие цепной реакции, мы с В. А. Давиденко предложили использовать блоки, составленные из кусочков металла, а за неимением урана решили провести опыты с вольфрамом. Но и с ним были большие трудности. Был 1943 г., шла война. Тем не менее на ламповом заводе нам удалось раздобыть остатки палочек вольфрама. Из их кусочков, парафина и вольфрамовой пыли мы изготовили образцы и на опыте убедились, что такое «кусочное» применение металлов позволяет значительно эффективнее использовать нейтроны.

На основании наших опытов Исаак Яковлевич Померанчук и Исая Исидорович Гуревич создали теорию так называемого блочного эффекта резонансного поглощения, с помощью которой можно было рассчитать оптимальные размеры блоков атомных реакторов (которыми и по сей день пользуются на атомных электростанциях).

Тут-то я и столкнулся, пожалуй впервые, с искусством настоящих теоретиков применять все свое аналитическое мышление и математический аппарат к задачам, казалось бы совсем далеким от тех, которыми они до сих пор занимались. Это умение переключаться, видеть общее в частности было очень характерно для Исаака Яковлевича.

Вторая встреча с Исааком Яковлевичем произошла, когда у нас на семинарах обсуждались работы Д. Керста, построившего небольшой бетатрон (ускоритель электронов). Естественно, возник вопрос: а можно ли построить большие электронные ускорители?

Создав теорию тормозных потерь, Исаак Яковлевич показал, что потери электронов в очень сильной степени (в четвертой!) зависят от энергии, поэтому этот метод ускорения заряженных частиц имеет свой «потолок». Эту работу Исаак Яковлевич опубликовал совместно с Д. Д. Иваненко, поскольку на семинаре однажды обсуждал с ним этот вопрос. Подобная щепетильность даже вызвала резкую реакцию Л. Д. Ландау.

В третий раз жизнь свела нас с Исааком Яковлевичем в связи

с работами М. Дейча, который наблюдал аннигиляцию электронов с позитронами с образованием двух гамма-квантов. Исходя из общих соображений, Исаак Яковлевич пришел к выводу, что иногда такая аннигиляция может привести к вылету трех гамма-квантов. В. К. Войтовецкий решил проверить это предположение на опыте. Источники позитронов у нас были. Трудности представляла индикация гамма-квантов. В то время появились работы Х. Кальмана, который обнаружил, что в кристаллах нафталина под действием гамма-квантов возникают вспышки света (он их видел в темноте). И вот третий этаж, где находился наш сектор (и, кстати, кабинет Игоря Васильевича Курчатова), начал пропитываться едким запахом нафталина.

Мы скупали нафталин в аптеках, ставили трубчатые печи на попа и, давая соответствующую затравку, изготавливали в них прозрачные кристаллы нафталина. Запах стоял очень сильный. Исаак Яковлевич приходил и говорил по этому поводу: «Да, чувствуется, работаете вы интенсивно». Сделав кристаллы, мы начали заниматься фотоумножителями, но, к сожалению, нас все-таки опередили и экспериментальную проверку теория прошла в США.

В этот период Исаак Яковлевич часто заходил ко мне, живо интересуясь, чем я занимаюсь. Я рассказывал о текущих делах, небольших опытах (подобных опытам с нафталином), которые нас тогда очень занимали и доставляли большое удовольствие уже тем, что давали быстрый результат. Исаак Яковлевич очень опекал нас и сам демонстрировал чудеса изобретательства. Но вот однажды, когда я познакомил его с планом очередного эксперимента, Исаак Яковлевич (как сейчас, помню, он сидел на столе и размахивал ногами), пристально посмотрев на меня, сказал: «Ну вот, Георгий Николаевич, либо Вы строите ускоритель и занимаетесь настоящей наукой, либо Вам лучше уйти в управдомы и заняться общественно полезным делом».

Вспомнив, что известный советский математик И. А. Лаппо-Данилевский работал когда-то в Петрограде управдомом, я сказал Исааку Яковлевичу на следующий день: «Ну что ж, уйду в управдомы, но науку все равно не брошу». На что он примирительно ответил: «Ладно, ладно, но все же подумайте еще».

И вот надо признаться, что именно слова Исаака Яковлевича послужили толчком к тому, что через несколько лет, оставив текущие мелкие задачи, я занялся проектированием и строительством ускорителя тяжелых ионов. Дело это было очень сложное, требующее решения множества далеко не научных проблем: мне приходилось заниматься бетоном, определять, сколько уборщиц должно быть в штате на данной площади, и т. п. Как-то в один из тяжелых моментов я позвонил Исааку Яковлевичу и сказал: «Вы вот говорили — либо управдом, либо ускоритель. И вот я строю ускоритель, а на самом деле работаю при нем управдомом». Ко-



нечно, Исаак Яковлевич меня успокоил, сказав, что в конце концов все утрясется и я получу настоящее удовлетворение.

Действительно, кончились хозяйственные и организационные дела и началась настоящая наука. Не раз потом я вспоминал жесткие и неприятные для меня в тот момент слова Исаака Яковлевича, которые дали столь необходимый для всей моей дальнейшей деятельности импульс.

На самом деле, несмотря на некоторую внешнюю суровость, Исаак Яковлевич был удивительно добрым и чутким человеком. Интересовался чужими делами, старался помочь, чем мог. При этом ему абсолютно был чужд покровительственный тон, этакое «поучительство» с высоты своих знаний и положения.

Наука — Наука с большой буквы — была главным в жизни Исаака Яковлевича Померанчука. Не возникало даже мысли, что он может заняться какими-то отвлеченными делами, какими-то хобби, которыми сейчас так принято гордиться. Наука была его жизнью, и он отдал ей себя без остатка.

*М. Г. Мещеряков*

## ВСТРЕЧИ С И. Я. ПОМЕРАНЧУКОМ

Познакомились мы зимой 1937 г. в ленинградском Физтехе на семинаре И. В. Курчатова. В предвоенные годы несколько раз встречались на всесоюзных совещаниях по ядерной физике, но мимоходом, без особых научных контактов. Летом 1943 г. у нас был долгий разговор о новинке тех лет — бетатроне, сооружением которого многие из нас тогда мечтали заняться.

В январе 1946 г. Отделение физико-математических наук Академии наук проводило свое первое послевоенное собрание. Проходило оно в старом ФИАНе на Миусской площади и было довольно многолюдным. Тогда И. Я. Померанчук после моего доклада о работах на восстановленном циклотроне Радиевого института обратил мое внимание на перспективность изучения дифракционного рассеяния ядрами быстрых заряженных частиц, подарив при этом мне оттиск недавно опубликованной им совместно с А. И. Ахизером статьи на эту тему. Его зародившийся еще в военные годы интерес к таким, казалось бы, разным проблемам, как ускорение электронов и дифракционное рассеяние частиц, впоследствии завершился получением фундаментальных результатов, выявив особенность почерка И. Я. Померанчука — его способность упорно и долго обдумывать захватывающие его проблемы, добиваясь в конце концов их решения.

После запуска в конце 1949 г. на берегу Верхней Волги протонного синхротронного ускорителя и организации при нем Физической лаборатории, ставшей впоследствии Институтом ядерных проблем АН СССР, И. В. Курчатова призвал физиков Москвы и Ленинграда включиться в работы на этом самом крупном в то время ускорителе. Несколько групп экспериментаторов, проявив завидную оперативность, приехали со своими установками, как тогда говорились, «на объект». Но еще раньше новую лабораторию стали навещать теоретики. И одним из первых был И. Я. Померанчук.

С 1950 по 1956 г. он приезжал регулярно, обычно один-два раза в месяц, в те дни, когда в лаборатории проводился семинар. Некоторые из приезжавших теоретиков отмалчивались, присматриваясь к тому, что делается на ускорителе; кое-кто занялся полезной просветительской деятельностью — беседами с экспериментаторами о релятивистской кинематике, коэффициентах Клебша—Гордана, методах статистической обработки результатов измерений и т. п. И. Я. Померанчук же смотрел в суть дела. Он обладал исключительной способностью завязывать контакты с экспериментаторами, нацеливать их на постановку ключевых опытов, которые могли бы дать существенно важную информацию. Участвуя в обсуждении новых результатов, он всегда настоятельно требовал давать им исчерпывающую теоретическую интерпретацию, идти от непосредственного факта в глубь явления.

Как-то, услышав на семинаре заключение незадачливого экспериментатора, что полученные им результаты можно представить в виде «корытообразной кривой», И. Я. Померанчук с сарказмом бросил до сих пор бытующие в Дубне слова: «Не в корытообразных кривых счастье».

Пятидесятые годы были у И. Я. Померанчука особенно продуктивными, и он систематически на семинарах доходчиво рассказывал и свои работы, и работы других теоретиков, группировавшихся вокруг Л. Д. Ландау. Иногда он появлялся со свежим номером «Physical Review» и прямо с листа рассказывал последние научные новости. Его выступления на семинарах всегда несли большой заряд оптимизма, вселяли веру в то, что в физике высоких энергий вот-вот что-то должно произойти, важное и значительное. Все это сыграло большую роль в воспитании и становлении молодых физиков недавно возникшего научного центра.

После организации в 1956 г. Объединенного института ядерных исследований регулярные приезды И. Я. Померанчука в Дубну стали более редкими. Позднее он бывал здесь только изредка на конференциях и на заседаниях Ученого совета Лаборатории высоких энергий, членом которого он был длительное время.

Последний раз я общался с И. Я. Померанчуком в конце мая 1965 г. в Ереване, где проводилась весенняя школа теоретической и экспериментальной физики с участием ряда крупных зарубежных ученых. Среди них был и Гелл-Манн. Лекции читались в мрамор-

ном конференц-зале президиума Академии наук Армянской ССР, напротив которого через улицу, в глубине небольшого сквера, находилось полюбившееся кое-кому из лекторов кафе. В дневное время в нем под тенистыми деревьями было уютно, тихо, малоллюдно — все это располагало к размышлениям. Как-то после лекции Гелл-Манна «Приближенные симметрии адронов», взбудоражившей по-южному эмоциональную аудиторию словами, что «кварки, по-видимому, фиктивны», мы оказались случайно в кафе вдвоем с И. Я. Померанчуком. Он непрерывно курил и сухо покашливал. Я спросил его: «Что ты думаешь об этих кварках?» Вскинув резко вверх голову, помедлив, он ответил: «В них есть какой-то глубокий смысл, но проживем — увидим».

Тепло, низвергаемое белесым армянским небом, располагало к неторопливой беседе.

— Какой представляется тебе физика в области асимптотически высоких энергий, где станет выполняться твоя теорема?

В ответ он спросил меня:

— Что ты думаешь о Библии?

— Я нахожу очаровательными мифы и легенды, собранные в этой древней книге.

— Вот именно, в древней книге! Она сложилась в те далекие времена, когда было привычным, что полчища грабителей везде все уничтожали, сжигали на своем пути. Тогда родилась удивительная по своей утешительной силе идея, что все эти горести и напасти временны и преходящи, что скоро появится спаситель и избавит народ от страданий.

Блеснув глазами под толстыми линзами очков, он с воодушевлением продолжал:

— Так и сейчас с физикой высоких энергий. Много в ней непонятно и таинственно: отсутствие каких-либо регулярностей в появлении резонансов, к тому же с разными ширинами; загадочное поведение сечений процессов перезарядки; усложняющаяся структура дифракционных конусов и многое другое. С достижением предельно высоких энергий картина должна упроститься, сечения взаимодействия частиц и античастиц с нуклоном станут равными...

Вскоре после возвращения И. Я. Померанчука из Еревана врач вынесли ему зловещий приговор — запущенный рак пищевода. Поздней весной 1966 г. я узнал, что, уже находясь в больнице, И. Я. Померанчук поставил вопрос об использовании интенсивных протонных пучков на существующих в нашей стране ускорителях для лечения раковых опухолей. В столь ярко выраженном намерении вступить в борьбу со страшным недугом, опираясь на достижения физики, — весь И. Я. Померанчук. Этот совсем не богатырского сложения человек обладал неукротимой силой духа, не один раз в своей далеко не безоблачной жизни бросал вызов судьбе, шел своей дорогой к только ему ведомым горизонтам. Таким он остался в моей памяти.

1946—1966

Уже не раз говорили и писали об удивительной атмосфере, царившей в ИТЭФе в первые годы его существования. Как она создавалась, как возникла?

Ю. Г. АВОВ

А. Д. Галанин

## О ПЕРВЫХ ГОДАХ РАБОТЫ В ИТЭФе С И. Я. ПОМЕРАНЧУКОМ

В мае 1946 г. на семинаре в ФИАНе И. Е. Тамм познакомил меня с И. Я. Померанчуком. Через несколько дней Исаак Яковлевич вручил мне несколько больших листов бумаги с формулами, написанными слегка криво разборчивым, но несколько детским почерком. Это было изложение теории экспоненциальных опытов, которые имели своей целью измерение нейтронных характеристик веществ, служивших замедлителями в ядерных реакторах. Предполагалось, что в ИТЭФе (тогда Лаборатория № 3 АН СССР) будет поставлен такой опыт с тяжелой водой. В скором времени выяснилось, что нет необходимости в этих опытах, и я начал осваивать другие разделы теории ядерных реакторов. И. Я. принимал активное участие в создании основ теории ядерных реакторов. Наибольшее его внимание привлекала теория резонансного поглощения в гетерогенных реакторах. Хорошо помню, как И. Я., стоя у доски в комнате № 9, обсуждал с А. Б. Мигдалом теорию резонансного поглощения. В конце дискуссии Аркадий Бенедиктович удовлетворенно сказал: «Ну вот, теперь я понял».

После того как принципиальные вопросы теории были решены, надо было проводить конкретные расчеты, которые в большинстве случаев были численными, а Исаак Яковлевич умел вычислять только в уме (у него никогда не было логарифмической линейки — основного вычислительного инструмента того времени). Эти расчеты были поручены мне, но всегда основные моменты и результаты обсуждались с И. Я. К сожалению, подготовленная И. Я. Померанчуком совместно с А. И. Ахизером рукопись по теории реакторов не была напечатана. Поэтому современными специалистами по теории ядерных реакторов имя И. Я. Померанчука говорит меньше, чем оно того заслуживает.

Вспоминаю, что в те годы Исаак Яковлевич много возился с предельным  $\lambda$ -процессом — таким изменением перестановочных соотношений, которое позволило бы устранить бесконечности из квантовой теории поля. Последовательно выполнить это не удавалось. Как-то И. Я. написал по этому поводу письмо Паули и получил ответ, в котором была фраза о том, что хорошо бы учесть



И. Я. Померанчук.  
Конец 40-х гг.

«дрожание» светового конуса в результате квантования метрики — задача, которая в полной мере не решена и сегодня, спустя почти 40 лет.

Тем временем стали известны результаты опытов по радиационному сдвигу уровней в атоме водорода. Чувствовалось, что приближается новая эпоха, которая впоследствии стала называться «эпохой перенормировок». Исаак Яковлевич внимательно следил за литературой, обсуждал различные попытки, но сам активного участия в разработке теории некоторое время не принимал. Тем не менее он рекомендовал мне произвести вычисление радиационного сдвига уровней, используя стандартную теорию возмущений. Через некоторое время появились основные ра-

боты по теории перенормировок, и с этого момента И. Я. считал своей основной темой квантовую теорию поля и теорию элементарных частиц.

В 1948 г. В. Б. Берестецкий защитил докторскую диссертацию, а я — кандидатскую. Через некоторое время как-то утром И. Я. входит в комнату № 9 и говорит: «Что же получается — в нашем отделе два доктора и один кандидат. Кто же будет работать?» Вскоре появились Б. Л. Иоффе и А. П. Рудик. Началось превращение карликового отдела в современный большой теоретический отдел.

Вспоминая последующие годы работы с Исааком Яковлевичем, хотел бы отметить его исключительно деликатное отношение ко всем сотрудникам независимо от их рангов. С наибольшим удовольствием вспоминаю о работе с И. Я. по вычислению спектра  $\mu$ -мезоводорода (1952 г.). Вся работа — от формулировки идеи, написания формул, выполнения численного интегрирования до написания статьи, доклада на семинаре и направления в печать — заняла не более недели. Такие темпы работы приносили большое удовлетворение. Хотя основная идея принадлежала И. Я., а я выполнял достаточно тривиальные вычисления, он предоставил мне возможность выступить с докладом на семинаре. Такое отношение к сотрудникам было характерно для Померанчука.

Прошло много лет с того дня, как Исаак Яковлевич ушел от нас, но до сих пор его лицо, манера разговаривать, здороваться, близко подходить и внимательно разглядывать собеседника своими близорукими глазами живо встают в моей памяти.

Л. Л. Гольдин

## ПАМЯТИ И. Я. ПОМЕРАНЧУКА

Судьба свела меня с Исааком Яковлевичем в 1946 г. В то время нынешний ИТЭФ был маленькой лабораторией, в которой работали полтора десятка научных сотрудников. Я работал в институте каждый день и нередко засиживался до ночи. Исаак Яковлевич тоже проводил в своем кабинете большую часть рабочего дня. Мы часто встречались и вели беседы обо всем — о науке, институте, последних событиях внутренней и международной жизни. Исаак Яковлевич всем интересовался, умел говорить и слушать и всегда относился к собеседнику как к равному независимо от того, беседовал он с академиком или с младшим научным сотрудником. Наша беседа иногда кончалась тем, что он шел говорить с директором — академиком Алихановым — и, насколько я знаю, говорил с ним, как и со мной, прямо, иногда резко, не уходя в сторону от острых вопросов и не боясь испортить отношения.

Хорошо помню многочисленные выступления Исаака Яковлевича на институтском семинаре. Он считал своей обязанностью держать всех нас — экспериментаторов — в курсе последних идей и всегда умел находить простые способы рассуждений. Он считал также, что всякое высказанное на семинаре ошибочное суждение должно быть исправлено, чтобы не сбить с толку слушателей. Присутствие и выступления на семинаре он считал своей служебной и человеческой обязанностью. К сожалению, его ученики этой точки зрения не разделяют...

Исаак Яковлевич любил истину, как ее мало кто любил и любит. Если он чего-либо не знал, то всегда об этом говорил прямо, просто и открыто признавал свои заблуждения и ошибки.

Памятная встреча с Померанчуком произошла у меня в палате Онкологического центра, где он лежал, уже будучи безнадежно больным. Он пригласил тогда к себе своих учеников, лучевого терапевта профессора А. И. Рудермана, меня и еще нескольких человек. Его облучали тогда на  $\gamma$ -аппарате. С характерной для него ясностью, не упоминая о собственной болезни, он спросил, почему не применять для радиационной терапии протоны, ионизирующее действие которых с глубиной не падает, как у  $\gamma$ -лучей, а возрастает. Всем было ясно, что он поставил важнейшую проблему (лишь

впоследствии я узнал, что эту мысль до него высказывал Р. Вильсон, с работой которого И. Я. Померанчук не был знаком). Это замечание Исаака Яковлевича меня увлекло и определило мои интересы на много лет вперед. Техника оказалась сложной и помочь самому Исааку Яковлевичу уже не могла.

Много лет назад состоялась наша первая и, увы, уже давно — наша последняя встреча с Исааком Яковлевичем Померанчуком. Но перестать думать о нем невозможно: судьба не часто сводит нас с учеными такого класса, со столь яркими личностями, с такими достойными и — не боюсь этого слова — подлинно благородными людьми.

Ю. Г. Абов

## НАДО ЧАЩЕ ВСПОМИНАТЬ УЧИТЕЛЕЙ

Лежат под стеклом на столе три портрета: А. И. Алиханов, И. Я. Померанчук, В. Б. Берестецкий. Этих людей больше нет. Но странное дело: они не только продолжают жить в нашей памяти, но и влияют на нас еще сильнее, чем при жизни, потому что каждый свой шаг, каждое решение сверяешь с их позицией: не осудят? Они наши учителя, они и судьи, от суда их теперь никуда не скроешься, ничего не утаишь, они внутри нас, они стали нашей собственной совестью. И сейчас же возникает казнящая мысль: а будешь ли ты совестью своих учеников? Если в твоих учениках нет тебя и твоих учителей, значит, ты пустоцвет. Жизнь дается один раз, и она коротка, если не получилось — не справишься.

... Исаак Яковлевич обращается к Абраму Исааковичу:

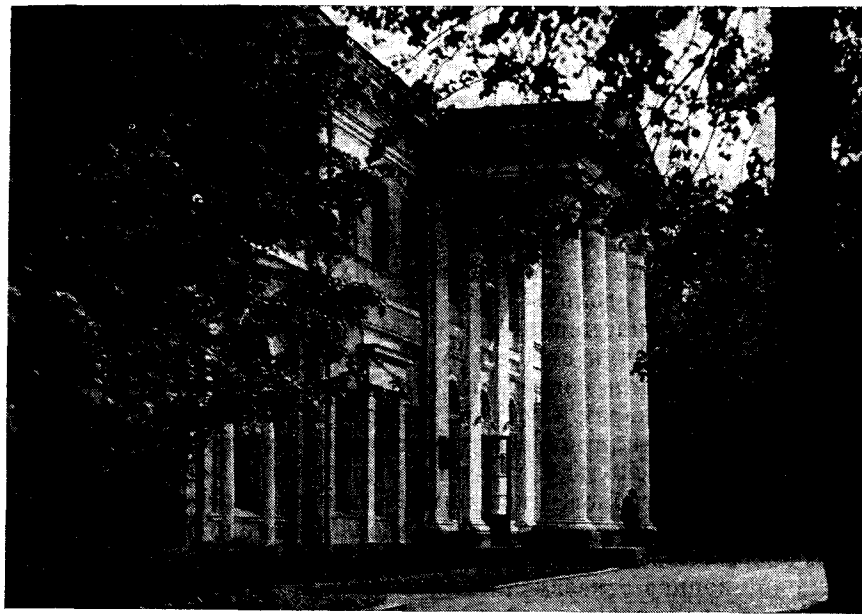
— Когда же вступит в строй ускоритель?

— Но это же невозможно так быстро!

— Да, но жизнь так коротка!

Институт фактически начал функционировать в 1946 г. В апреле 1949 г. был пущен реактор, в 1950 г. — циклотрон. Нужно ли напоминать о роли И. Я. Померанчука? Когда после первого пуска реактора над теоретиками решили подшутить, выяснилось, что сбить их с толку невозможно, свои расчеты они сомнениям не подвергали.

Уже не раз говорили и писали об удивительной атмосфере, царившей в ИТЭФе в первые годы его существования. Как она создавалась, как возникла? Так и хочется сказать, что она пришла к нам из прошлого века, от тех, у кого учились наши учителя. И описать, и передать ее словами трудно, так как нет таких слов, которые выражают не материальную (формально-бюрократиче-



*Здание Института теоретической и экспериментальной физики, в котором работал И. Я. Померанчук*

Фото А. М. Козодаева

скую), а духовную сущность. Воистину всякое слово — ложь! И все-таки самое главное из того, что было, живо и сейчас в нашем коллективе — это высокие требования к ученому как к человеку, высокие моральные нормы. Давайте вспомним Исаака Яковлевича. Человек высочайшей культуры, скромный, обязательный, удивительная обходительность, уважение к собеседнику и вместе с тем полная бескомпромиссность к любому проявлению коммерческого духа в науке, к саморекламе, подчеркиванию собственных заслуг. Ведь все это передавалось и его сотрудникам.

Однажды я что-то спросил у И. Я. Померанчука, меня заинтересовала статья теперь уже покойного, очень мною уважаемого профессора, я любил слушать его лекции в университете. Ответ оказался неожиданным, Исаак Яковлевич даже рассердился. Смысл ответа заключался в том, что проблемы этой автор статьи, в силу отсутствия у него таких способностей, все равно не решит, а тогда зачем об этом пишет? Исаак Яковлевич усматривал здесь элемент саморекламы.

Рассказывают, что когда один из известных физиков, которого даже Л. Д. Ландау называл талантливым, опубликовал популярную статью и в ней не забыл отметить собственные заслуги,

то Исаак Яковлевич не захотел отвечать ему по телефону. А вот другой анекдотический пример. Исаак Яковлевич узнает, что один из физиков, которого он при мне называл физиком высшей квалификации, соглашается стать директором института. Реакция И. Я. Померанчука: «Понимаю... хочет иметь „дело“. Конечно, лучше бы магазин, но ведь это невозможно». А вот совершенно другая и неожиданная для меня реакция. Абрам Исаакович с присущей ему эмоциональностью говорит про известного академика, что он подлец, на что Исаак Яковлевич совершенно спокойно отвечает, что физик он настоящий. Алиханов вспыхивает:

— Он просто сволочь!

— Физик он настоящий!

И. Я. Померанчук вместе с А. И. Ахиезером (это тоже не случайно: у них была совместная статья в ЖЭТФе, а Исаак Яковлевич и на семинарах выступал только в присутствии своих соавторов) предложили мне заняться поиском нулевого звука в жидком гелии-3. Поскольку у гелия-3 невероятно высокое сечение поглощения нейтронов, эксперимент, мягко выражаясь, непростой. Я долго думал, считал, даже сделал специальный механический прерыватель нейтронов, который так и не стал испытывать, и в конце концов отказался. Знаю, что одновременно А. И. Ахиезер уговаривал заняться этим делом экспериментаторов в Киеве, где в то время уже работал хороший реактор, превосходивший наш по мощности в 6 раз, но и они не решились. Много лет спустя этот опыт поставили французы — нам бы их возможности — и хотя эксперимент был не очень высокого класса, но эффект они нашли. Может быть, вернуться к этой идее? Но не в этом суть, я хочу сказать, что в это же время обратился ко мне И. С. Шапиро и предложил искать несохранение четности в процессе радиационного захвата нейтронов ядрами. Это предложение мы с П. А. Крупчицким приняли. Исаак Яковлевич не обиделся. Более того, будучи уже тяжело больным, буквально накануне своих последних дней, он позвонил мне, кажется, домой и просил иметь в виду, что надо заботиться о том, чтобы полученные у нас результаты — обнаружение слабого взаимодействия нуклонов в ядрах, опыты группы В. Г. Фирсова — не забывали, чтобы люди помнили о том, что эти открытия сделаны в ИТЭФе, это надо всегда подчеркивать, и, наконец, сказал, что руководство институтом должно быть коллегиальным. Какое мужество, ведь он, находясь в больнице, сам предложил организовать в ИТЭФе протонный пучок для терапии раковых опухолей, более того, будучи пациентом радиологического отделения, сам присутствовал на совещаниях по этому поводу. О чем говорить, если свою последнюю работу он закончил за два дня до смерти!

В период острого конфликта, который был в институте в начале 60-х годов и который не хочется вспоминать, Исаак Яковлевич занял исключительно принципиальную и бескомпромиссную по-

зицию. Его главный тезис заключался в том, что если свобода критики научных работ не соблюдается или вообще отвергается, то наука перестает существовать.

Наши учителя были нетерпимы к некомпетентности, формализму и бюрократизму. Однажды пришел к А. И. Алиханову в кабинет начальник пожарной охраны и сказал, что в кабинете нужно убрать паркет, это горючий материал. Абрам Исаакович задумался, а потом сказал, что ему проще убрать начальника пожарной охраны, что и было сделано. Надо чаще вспоминать учителей!

Г. М. Кукавадзе

## ВСТРЕЧИ С И. Я. ПОМЕРАНЧУКОМ

До позднего вечера горел свет в окне кабинета Исаака Яковлевича на втором этаже первого, дворцового, корпуса института. Сейчас под этим окном на стене здания висит мемориальная доска с надписью: «Здесь работал И. Я. Померанчук с 1946 по 1966 год».

Исаак Яковлевич так напряженно работал, так углублялся в свои мысли, что часто забывал обедать и до глубокой ночи занимался в своем кабинете. У него в кабинете в шкафу стоял чайник, стаканы, и бывало, что чай заменял Исааку Яковлевичу обед. К сожалению, он очень много, почти постоянно, курил.

Однажды, примерно в 1947 г., Исаак Яковлевич вместе с Сергеем Яковлевичем Никитиным подъехали к подъезду корпуса в одной машине, вошли в вестибюль, сняли пальто и головные уборы и тут вдруг Исаак Яковлевич устремился к С. Я. Никитину и стал с ним энергично здороваться. С. Я. Никитин напомнил Исааку Яковлевичу, что они только что приехали в одной машине. По-видимому, Чук — так его ласково называл его учитель Лев Давидович Ландау — был постоянно поглощен новыми идеями, новыми мыслями.

Несколько раз в 1946—1952 гг. я встречал Исаака Яковлевича в Московской консерватории на концертах: он любил классическую музыку.

Исаак Яковлевич был предельно вежлив и доброжелателен в отношениях с людьми. Я много раз встречался с ним как по служебным делам, так и для того, чтобы посоветоваться по житейским вопросам, и всегда он внимательно выслушивал меня и давал хорошие советы и разъяснения.

Он ненавидел и пресекал фальшь как в науке, так и в жизни. Исаак Яковлевич был прекрасным лектором, его выступления на научных семинарах и по содержанию, и по форме всегда были

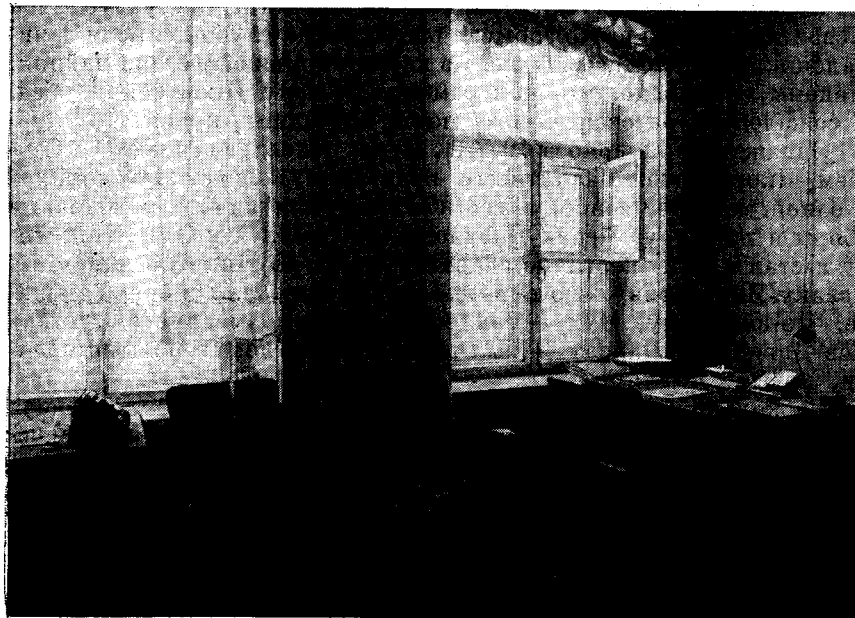
образцом мастерства и ясности. Однажды общественные организации ИТЭФа попросили Исаака Яковлевича прочитать популярную лекцию о современной атомной физике. Он сделал это с блеском. Зал был переполнен: академика пришли послушать и научные работники, и служащие, и рабочие мастерских.

И. П. Семенов

## ТАКИМ Я ЗАПОМНИЛ ИСААКА ЯКОВЛЕВИЧА

По долгу службы я отвечал за исправность телефонной сети ИТЭФа. Исаак Яковлевич неоднократно обращался ко мне с просьбой отремонтировать телефон в его кабинете. Когда я приходил к нему, он был очень вежлив, корректен, спокоен и никогда не выражал малейшего недовольства. Несмотря на большую занятость, создавал мне все условия для работы. Пока я ремонтировал телефон, он обычно уходил из кабинета.

Исаак Яковлевич обращался ко мне и в связи с ремонтом телефона в его квартире, куда мы приезжали с шофером Андреем



Рабочий кабинет И. Я. Померанчука в ИТЭФе  
Фото А. М. Козодаева, 1987 г.

Георгиевичем Самойловым, который обычно возил Исаака Яковлевича по Москве и в Дубну. Андрей Георгиевич отзывался об Исааке Яковлевиче с большим уважением.

Незадолго до смерти Исаака Яковлевича я был на его квартире. Мы вместе с А. Я. Диамантом сделали и установили усилитель к телефонному аппарату. Я слышал и видел, как трудно было ему разговаривать по телефону, но говорил он спокойно. Лицо его было утомленным, но спокойным.

Таким я запомнил крупнейшего ученого и обаятельнейшего человека — Исаака Яковлевича Померанчука.

В. И. Коган

## ШТРИХИ К ПОРТРЕТУ

Незабываемые дни начала 1946 г. в Московском механическом институте (бывшем Институте боеприпасов, созданном в 1942 г., в разгар Сталинградской битвы), в самом центре Москвы, напротив Почтамта, открылся новый, инженерно-физический факультет. Его декан А. И. Лейпунский собрал на ведущих кафедрах великолепный преподавательский состав. В частности, кафедру теоретической физики возглавил И. Е. Тамм, профессорами кафедры стали М. А. Леонтович, И. Я. Померанчук, Е. Л. Фейнберг, причем первые двое читали лекции, а остальные поначалу вели только семинарские занятия (!) со старшекурсниками. (Студенты нового факультета были набраны одновременно на все пять курсов — в основном в порядке перевода из различных московских вузов.)

И. Я. Померанчук (в то время ему было немногим более 30 лет) решал с нами задачи по статистической физике. Из предлагавшихся им задач запомнились вычисление скорости «барьерной» химической реакции (роль максвелловского хвоста относительных скоростей) и статистика отсчетов при регистрации редких космических ливней (пуассоновские флуктуации). Думаю, даже эти простейшие примеры отражают характерное для всего творчества Исаака Яковлевича неповторимое сочетание блестящей теорфизической «аналитики» с практической конкретностью материала. (Ведь примерно к тому же времени относятся его широко известные работы по теории синхротронного излучения и дифракционного рассеяния частиц на ядрах, не говоря уже об основах теории ядерных реакторов.)

Немалое впечатление на нас, студентов, производила и сама внешность Померанчука — его физическая хрупкость, даже тщедушность, густая копна черных волос, лицо, едва ли не за время

семинара успевавшее зарости щетиной, характерный наклон головы, милая улыбка...

Поражали деловая увлеченность и «актуализм» Исаака Яковлевича. Уже в 1950 или 1951 г., т. е. практически одновременно с созданием квантовой электродинамики, он прочел в МИФИ большой одноименный курс для студентов и уже работающих молодых теоретиков (слушателей было человек 30—40, в их числе ряд прямых учеников И. Я.). «Кажется, именно там, — вспоминает В. С. Кудрявцев, — Померанчук употребил образное выражение „кипящая операторная жидкость“». Об увлеченности И. Я. Померанчука, доходившей до отрешенности, я вспомнил спустя много лет после его кончины, прочтя книгу С. Снегова «Творцы», в которой тепло и, думаю, достаточно достоверно описаны главные действующие лица нашей ядерной физики довоенной (и отчасти военной) поры.

С 1948 г. мне посчастливилось продолжить общение с Исааком Яковлевичем на кафедре теоретической физики ММИ (впоследствии МИФИ), где я также начал работать по совместительству. Из разговоров с ним запомнилась его неподдельная доброжелательность к людям («А все-таки обаятельный человек А. Б.!» — это о Мигдале, «Сильный мужик» — об одном из молодых сотрудников). Запомнилась и такая черта И. Я., как уважительное отношение к чужому мнению — порой и тогда, когда оно этого вовсе не заслуживало. Так, при обсуждении на кафедре вопроса о подготовке задачника по теоретической физике я заявил, что в целом таких задач наберется примерно 800. Вскоре я и сам осознал легковесность этого высказывания (очевидное «превышение точности», причем в любую сторону!), но Померанчук тогда воспринял его вполне серьезно, как нечто действительно продуманное.

Нечего и говорить, как все мы, теоретики ИАЭ им. И. В. Курчатова и МИФИ, радовались в 1964 г. избранию Померанчука в академики. Никто из нас тогда и подумать не мог, что всего через два года настанет горький миг прощания с ним в Доме ученых, что жизнь этого выдающегося физика и человека, общего любимца, оборвется так же несправедливо рано, как и жизнь его учителя.

В. Я. Файнберг

## ВСТРЕЧИ С И. Я. ПОМЕРАНЧУКОМ

На протяжении многих лет я неоднократно встречался с Исааком Яковлевичем, слушал его лекции, доклады. Из множества впечатлений, отложившихся в моей памяти, я расскажу о наиболее ярких.

В 1946 г. я перешел из МАИ в МИФИ (тогда Московский механический институт — ММИ) на третий курс вновь открытого там инженерно-физического факультета. Из нас готовили физиков-атомщиков. Тогда этому придавалось большое значение. Для чтения лекций по физике были приглашены известные крупные ученые: Л. А. Арцимович, В. С. Емельянов, М. А. Леонтович, А. Б. Мигдал, И. Я. Померанчук, Я. А. Смородинский, И. Е. Тамм, Е. Л. Фейнберг, Э. В. Шпольский и др. Трудности тех лет скрапивались для нас научной и творческой атмосферой, которая была создана на факультете благодаря такому созвездию талантов. Я не знаю другого случая из истории страны (может быть, Царскосельский лицей?), когда бы в одном институте или университете сосредоточивались ведущие научные силы. Сейчас, по прошествии почти сорока лет, даже поверхностный взгляд на роль этого эксперимента говорит о его несомненной удаче.

Буквально каждая лекция по физике собирала полную аудиторию. К этому стоит добавить, что обстановка в МИФИ тех лет отличалась особым колоритом и своеобразием: от архитектурного института, на базе которого был создан ММИ—МИФИ, остались действующие мастерские, где еще в конце 40-х годов работали художники и позировали натурщицы; от Института боеприпасов, организованного во время войны и переименованного в ММИ, сохранились в аудиториях гильзы от снарядов диаметром до 50 см. Студенты с успехом использовали их для спортивных соревнований — кто кого стокнет руками с движущихся гильз. Победителем неизменно выходил Саша Балдин, ныне академик. Часто участвовал в соревнованиях и А. Б. Мигдал.

И. Я. Померанчук был настроен более серьезно и в наших развлечениях участия не принимал. В 1948 г. он начал читать курс квантовой механики. На первой лекции в аудитории появился небольшой очень подвижный человек в очках. Склонив голову набок и заложив руки за спину, он, казалось бы, с любопытством и недоумением наблюдал, как в течение 3—5 минут после звонка в аудиторию продолжали входить студенты и невозмутимо рассаживаться по своим местам. Это ему явно не понравилось. Большинство из нас к тому времени уже успели познакомиться с азами квантовой механики — в основном по учебнику Д. И. Блохинцева — и собрались главным образом для того, чтобы оценить, стоит ли слушать Померанчука, и с присутщим молодости самомнением считали, что вряд ли услышат что-то новое. С самого начала Померанчук полностью завладел нашим вниманием, начав лекцию словами: «Мы вступаем в новый мир, где законы совершенно не похожи на те, с которыми мы сталкиваемся в обыденной, домашней обстановке, всеми явлениями в этом мире микроявлений управляет квант действия...»<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Я не поручусь за точность воспроизведения слов И. Я., но смысл был именно таков.

Вторая лекция началась точно в 8 часов утра. Всех опоздавших И. Я. вежливо попросил остаться до следующего перерыва за дверью. Впредь больше никто на лекции Померанчука не опаздывал. Помню, как расставлялись посты «наблюдения» и без пяти минут восемь, когда И. Я. входил в институт, по эстафете передавали: «Чук идет!» — и все быстро устремлялись из коридоров в аудиторию. Читал лекции И. Я. Померанчук без записей, очень четко и ясно, без всякого ораторского пафоса, но убедительно. Формулировал утверждения и приводил доказательство. Особенно поражала воображение и послужила хорошей школой его способность проделывать на доске сложнейшие выкладки, не запутывая себя и слушателей; считал он великолепно, часто использовал размерные и общие соображения, чтобы предвосхитить результат.

Трудно сейчас себе представить, что, читая отдельные главы электродинамики, Исаак Яковлевич вывел формулу для сечения тормозного излучения фотонов при столкновении электронов и показал, в частности, как устраняется инфракрасная расходимость при малой частоте излучаемого кванта<sup>2</sup>. Однако он с юмором говорил, что не всегда надо считать «в лоб», особенно, если ответ можно вывести из общих положений теории. В качестве курьеза он рассказал на одной из лекций, как они вдвоем с А. И. Ахиезером в 1936 г. рассчитывали амплитуду распада фотона на два фотона и в результате «шпурсы с шумом сократились», дав нулевой результат. В основе этого ответа, как выяснилось, лежит теорема Фарри о сохранении зарядовой четности в квантовой электродинамике, запрещающая чисто фотонные процессы с нечетным суммарным числом фотонов. Исаак Яковлевич всегда спешил. Это проявлялось также в том, что консультации работавшим под его руководством студентам он, как правило, давал в небольшом служебном автобусе по дороге в институт или на обратном пути. Он дорожил каждой минутой, но если ему задавали на лекции или после «разумный и интересный» вопрос, он не жалел времени на его обсуждение. Его дипломником с нашего курса был В. Мямлин (к сожалению, рано умерший). Он рассказывал, что несколько раз И. Я. приглашал его для обсуждения к себе домой к 7 часам утра. Когда Мямлин приходил к нему, он заставлял, по его словам, такую картину: большая полупустая комната, в глубине стол, вокруг стола и на нем — горы книг, а за столом сидит и работает «маленький Чук». Этот образ надолго запечатлелся в моей памяти.

Померанчук читал нам также курс квантовой статистики. За месяц до окончания курса я попросил у И. Я. разрешения сдать экзамен досрочно. По выражению его лица я понял, что он не

<sup>2</sup> В то время еще не было диаграммной техники Фейнмана и расчеты велись с помощью громоздкой нековариантной теории возмущений.

благоволит к «досрочникам». Подумав, он согласился, но предупредил, что будет спрашивать весь курс. Пришлось проделать большую работу, чтобы выяснить, что он будет читать (программы не было) и что он любит спрашивать. Экзамен я сдал благополучно. После экзамена я спросил, что бы он порекомендовал для более углубленного изучения квантовой механики. Он с восторгом отозвался о только что вышедшем учебнике Ландау и Лифшица по этому предмету и посоветовал его изучить.

Следующая памятная встреча с Померанчуком произошла в 1949 г. Я готовился к защите диплома. Тема дипломной работы — электромагнитное излучение при столкновении быстрых протонов с нейтронами<sup>3</sup> — была навеяна статьей И. Я. Померанчука и И. М. Шмушкевича<sup>4</sup>, где они исследовали аналогичное излучение за счет обменных сил. Целью моего диплома было рассчитать излучение, обусловленное магнитными моментами нуклонов<sup>5</sup>.

И. Я. Померанчук согласился выступить рецензентом на моей защите. Но за неделю до защиты в июне 1949 г. он неожиданно исчез и не появился даже в субботу, накануне защиты. Я начал волноваться. С трудом удалось узнать загородный адрес, где И. Я. в это время отдыхал. В воскресенье, набравшись храбрости, я отправился на поиски. В небольшой подмосковной деревушке разыскал избу, в которой он жил, и постучался. Дверь открыла интересная женщина — жена И. Я. «Исаак! К тебе гость», — сказала она. «Пусть войдет», — прозвучал ответ. Я вошел и, когда мои глаза привыкли к полумраку, обнаружил И. Я., сидящего в одних трусах на большой деревенской кровати. Меня это смутило, я хотел ретироваться, но И. Я. быстро оделся и извинился, что запамятовал о защите. Мы обсуждали содержание диплома минут 15—20. И. Я. очень скоро оценил, что сечение излучения должно быть пропорционально квадрату разности магнитных моментов протона и нейтрона, и, убедившись, что это совпадает с моими расчетами, написал хорошую рецензию. Защита состоялась в срок.

Эта встреча и беседа с Исааком Яковлевичем произвели на меня сильное впечатление: в то время умение предвидеть результат расчета из физических качественных соображений представлялось мне большим искусством. Но еще большее восхищение вызвал у меня И. Я. своей простотой и естественностью в быденной, житейской обстановке; я понял тогда, что не надо слишком

<sup>3</sup> Я выполнил эту работу под руководством моего первого учителя Е. Л. Фейнберга.

<sup>4</sup> См.: Померанчук И. Я., Шмушкевич И. М. Излучение при столкновении быстрых нейтронов с протонами // Собр. науч. тр. Т. 3. С. 5—8. — То же // ДАН СССР. 1949. Т. 64. С. 499.

<sup>5</sup> См.: Фейнберг В. Я., Фейнберг Е. Л. Электромагнитное излучение при столкновениях протон—нейтрон // ДАН СССР. 1949. Т. 68. С. 45.



доверять ходячим легендам об аскетизме Померанчука. «Ничто человеческое ему не чуждо», — обрадовался я в душе.

В 1950—1960 гг. я часто встречался с И. Я. Померанчуком на семинарах Л. Д. Ландау в «Капичнике» по четвергам. Он неизменно интересовался научными новостями в ФИАНе. И. Я. был организатором многих докладов на этом семинаре. Однажды в 1952 г., узнав, что я подготовил диссертацию по высшим спинам, И. Я. попросил сделать обзор по этому вопросу на семинаре Ландау. В то время к уравнениям для частиц с высшими спинами проявляли интерес многие физики-теоретики. После моего доклада отношение ко мне Ландау и Померанчука стало дружелюбным. По-видимому, им понравились некоторые мои ответы. Так, на просьбу Померанчука напомнить, что такое частицы с высшими спинами, я сказал, что «напомнить можно то, что проходили». Это вызвало оживление в зале.

Целая серия встреч и обсуждений с И. Я. Померанчуком в 1954—1955 гг. связана с проблемой «нуль-заряда», или «московского нуля». Научная сторона вопроса довольно полно отражена в обзоре В. Б. Берестецкого<sup>6</sup>. Вклад И. Я. Померанчука и Л. Д. Ландау, безусловно, является важным. Но хотелось бы здесь подчеркнуть, что идея о «заряде нуля» была независимо высказана Е. С. Фрадким.

В 1956 г. Е. С. Фрадкин и я получили дисперсионные соотношения для рассеяния нуклонов<sup>7</sup>. На нашем докладе в ФИАНе присутствовал И. Я. Померанчук. После семинара он спросил меня: «Нельзя ли обосновать необходимость *одного* вычитания в полученных дисперсионных соотношениях?» Я тогда не придал особого значения этому вопросу, хотя хорошо понимал, что он связан с ограничениями на высокоэнергетическое поведение сечений процесса. Через некоторое время появилась широко известная теперь работа И. Я. Померанчука, в которой он, опираясь на дисперсионные соотношения для рассеяния нуклонов, вывел носящую его имя теорему об асимптотическом равенстве сечений рассеяния частицы на частице и частицы на античастице. Так еще раз проявились его глубокая физическая интуиция, стремление извлечь из теории фундаментальные физические следствия.

Еще одна характерная встреча произошла с И. Я. Померанчуком в 1962 г. Тогда они совместно с В. Н. Грибовым успешно разрабатывали теорию рассеяния релятивистских частиц, основанную на так называемом приближении «полюсов Редже». Сейчас со все большей полнотой раскрывается значение этого метода.

<sup>6</sup> Берестецкий В. Б. Нуль-заряд и асимптотическая свобода // УФН. 1976. Т. 120. С. 440.

<sup>7</sup> Файнберг В. Я., Фрадкин Е. С. Дисперсионное соотношение для ферми-частиц // ДАН СССР. 1956. Т. 109. С. 507. Независимо эти соотношения были получены Б. Л. Иоффе (ЖЭТФ. 1956. Т. 31. С. 583) и Ф. М. Куни (Вестн. ЛГУ. Физика. Химия. 1957. № 10. С. 21).

Он породил обобщенную модель Венециано для амплитуды рассеяния, которая получила определенное обоснование в струнном подходе, ставшем, в свою очередь, весьма перспективным в современной теории элементарных частиц.

Как-то после семинара в ИТЭФе весной 1962 г. я спросил В. Н. Грибова, собирается ли он поехать на конференцию по элементарным частицам в Ужгород. Случайно проходивший мимо Померанчук услышал мой вопрос, подошел, лукаво посмотрел на меня и В. Н. и сказал, что сейчас у В. Н. только одна задача: «Работать, работать и работать! Ни о каком отдыхе на конференции и речи быть не может!» В. Н. Грибов только развел руками и, естественно, в Ужгород не поехал...

Исаак Яковлевич был не простой человек. Общение с ним не всегда доставляло положительные эмоции. Он мог выступить с резкой критикой научной идеи или работы, если она ему не импонировала, но эта резкость не распространялась на отношение к автору: нередко после разноса на семинаре он подходил к потерпевшему и извинялся за, «может быть, слишком резкие формулировки».

Судьба уготовила этому замечательному ученому и человеку незаслуженно тяжкие испытания неизлечимой болезнью. Мне невольно вспоминается тяжелая болезнь, поразившая в конце жизни моего учителя И. Е. Тамма. Игорь Евгеньевич и Исаак Яковлевич до последних дней своих являли пример человеческого мужества перед лицом неоправданных страданий. Более того, они находили в себе силы, будучи приговоренными болезнью к смерти, поднимать дух у окружающих их людей.

А. П. Рудик

## В МОСКОВСКОМ МЕХАНИЧЕСКОМ ИНСТИТУТЕ И ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОЙ ЛАБОРАТОРИИ

Промышленное решение атомной проблемы требовало специалистов. В конце 1945 г. в Московском механическом институте Наркомата боеприпасов был создан инженерно-физический факультет. Статус этого факультета был необычен для московских вузов как тех времен, так тем более и теперешних: уже на третьем курсе практически не было штатных преподавателей, а работали одни совместители. Но какие! Курсы по физике читали: И. Е. Тамм, М. А. Леонтович, Л. А. Арцимович, А. И. Лейпунский, А. И. Алиханян, И. К. Кикоин, А. Б. Мигдал, И. И. Гуревич, Е. Л. Фейнберг, Я. А. Смородинский, Э. В. Шпольский, С. Я. Никитин...

Среди них был и Исаак Яковлевич Померанчук.

Исаак Яковлевич в 1946—1947 гг. в качестве основного курса читал квантовую механику. Лекции его поражали двумя особенностями. С одной стороны, необычайной четкостью и конкретностью: решение уравнения Шредингера для простейших случаев проводилось со всеми дифференцированиями — хотя бы они и были тривиальными — полностью на доске. А с другой стороны, лекции были насыщены многочисленными качественными оценками: так, из соотношения неопределенности Гейзенберга моментально выводился ряд заключений, дающих разумные оценки для широкого класса ядерных явлений. На экзаменах основным требованием было знать значения фундаментальных физических постоянных и уметь оценивать порядок рассматриваемого физического эффекта. Ответ на вопросы билета Исаак Яковлевич не слушал: он на бумажке проводил какие-то вычисления с роторами и дивергенциями (кажется, в это время он занимался проблемой гелия). Когда отвечающий замолкал, то через некоторое время слышался вопрос: «Все?» И после этого несколько вопросов: «Значение боровского радиуса? Постоянной Планка?» — и тому подобное.

В то время понятие о теоретической физике — что это такое — было четким. Должна быть получена аналитическая формула изучаемого эффекта и исследованы всевозможные предельные случаи. Никаких результатов численных вычислений. Никаких логарифмических линеек — основного инструмента тогдашнего инженера. Для дискуссий — только доска, мел и «устный счет»...

Как-то в начале 50-х годов, когда в помещении Института физических проблем в дополнение к семинарам Л. Д. Ландау Исаак Яковлевич организовал свой семинар, посвященный каждодневным проблемам квантовой электродинамики, произошел следующий случай. Два молодых и способных физика рассказывали о своих расчетах взаимодействия мезонов и приводили бесконечные графики, заранее начерченные на ватманских листах. Исаак Яковлевич «взорвался» и не дал им кончить: «Графики — это не теоретическая физика!» За этой краткой формулировкой крылось основное требование: понимание, понимание и еще раз понимание рассматриваемого физического явления.

Существенно, что этот взрыв относился не столько к молодым людям, сколько к их научному руководителю, бывшему в то время уже членом-корреспондентом Академии наук.

Кроме основного курса, Исаак Яковлевич вел и факультативный курс, посвященный современным проблемам квантовой электродинамики. Этот курс был уникален, и на лекции Исаака Яковлевича приходили не только студенты из других институтов, но и зрелые научные работники. Среди излагаемых вопросов был и  $\lambda$ -предельный процесс, изучавшийся Исааком Яковлевичем. Статью по этому вопросу он направил в начале 40-х годов в «Phy-

sical Review», но опубликована там она была лишь в начале 50-х и не очень вовремя.

Исаак Яковлевич был беспредельно предан науке и этого же требовал от других. Когда студенты просили его быть руководителем их дипломной работы, с тем чтобы потом заниматься теоретической физикой, то в конце 40-х годов он их от этого отговаривал: «Но ведь теоретическая физика практически себя исчерпала. Остались один-два мелких вопроса — и все. Занялись бы Вы чем-нибудь другим». Конечно, в этих словах крылась в первую очередь наивная проверка искренности дипломника. Но интересно было бы понять, был ли здесь элемент и внутренней оценки состояния теоретической физики в то время.

Тогда сообщение с Лабораторией № 3 (теперешний ИТЭФ) было очень плохое и за Исааком Яковлевичем приезжал в Механический институт автобус. Не городского типа, но и не совсем «микро» (таких тогда и в помине не было) — так, человек на двадцать. В него садился Исаак Яковлевич с дипломником, и основные вопросы решались во время езды.

Требования преданности науке возрастали еще больше, когда студент превращался в сотрудника. Ох, уж как бушевал Исаак Яковлевич, когда один из совсем молодых сотрудников задумал поехать преподавать в какое-то молодое африканское государство! И хотя по каким-то причинам эта поездка не состоялась, но отношение Исаака Яковлевича к этому молодому человеку было определено навсегда.

Исаак Яковлевич обращался к студентам и молодым сотрудникам предельно корректно и поэтому несколько холодновато. Никаких «Боря», «Володя», «Лева», только на «вы»: Борис Лазаревич, Владимир Васильевич, Лев Борисович. Работа — это работа. И никаких лабораторных чаепитий или пикников, никаких «капустников», даже под видом юбилейных стендов. Но это отнюдь не значит, что Исаак Яковлевич не интересовался жизнью сотрудников. Напротив, это был исключительно отзывчивый человек, но степень этой отзывчивости не была независима от деловых качеств того или иного сотрудника.

Исаак Яковлевич был предельно честен в науке. Где-то в 40-х годах известный ленинградский физик открыл тонкую структуру  $\gamma$ -спектров и получил за это Сталинскую премию. Но через некоторое время выяснилось, что работа неправильная и наблюдавшийся эффект является результатом приборных ошибок. Физик вернул полученные деньги, хотя никто их с него не требовал... К сожалению, присуждение премий за неправильные работы являлось не единичным. И вот как-то, подойдя вплотную к собеседнику, Исаак Яковлевич крайне горячо, предельно сверкая глазами, спрашивал уже о другом лауреате: «Ну вот, он сделал работу и получил Сталинскую премию. А работа-то оказалась неправильной! Так я Вас спрашиваю, а где деньги?!»

Но однажды судьба сыграла злую шутку с безупречной честностью Исаака Яковлевича. Как только был организован научный центр в Дубне, Исаак Яковлевич стал туда систематически ездить. Его оформили там сотрудником по совместительству и определили какую-то зарплату. От зарплаты Исаак Яковлевич отказался, но ему ее продолжали начислять. А он ее не получал. Ни разу. И вот в начале 50-х годов Теплотехническую лабораторию (тогда уже так именовался ИТЭФ) инспектировала очень высокая и целенаправленная комиссия. И Исаак Яковлевич был обвинен в «злостном совместительстве в Дубне». Кстати, это примерно совпало с опубликованием статьи в «Physical Review» — насколько помнится, эта публикация в то время скорее огорчила Исаака Яковлевича, чем обрадовала.

Сам Исаак Яковлевич всю жизнь беззаветно работал. Быт его был неустроен и тяжел. Долгое время болела жена, и временами на врачей-консультантов не хватало денег. Но он работал и работал...

Это был удивительно талантливый человек, отличавшийся необычайным умением ставить физические задачи. Эта стихия постановки задач над ним как бы неотвратимо тяготела. Сколько раз в начале 50-х годов Исаак Яковлевич говорил: «Ну вот, только сосчитаю до конца этот эффект — и все: перехожу на решение фундаментальных задач!» Но проходил день-другой, первый эффект уже был практически досчитан, но уже появлялся следующий — и так все повторялось сначала.

Однако со второй половины 50-х годов ему наконец-то удалось переключиться на решение общих задач. И тогда были созданы его знаменитая теорема о равенстве асимптотических сечений, серия работ по «нуль-заряду» (только теперь, наверное, становится ясна вся глубина этих работ — тогда они были встречены с недоверием; но еще в свое время кто-то правильно и квалифицированно утверждал, что у Исаака Яковлевича не было ни одной неправильной работы), классические работы по аналитическим свойствам амплитуд квантовой теории поля.

Работал Исаак Яковлевич с упоением, которое после появления какой-нибудь очень интересной статьи в журналах переходило в экстаз. После этого следовало знаменитое: «Объявляется военное положение! Всем надеть гимнастерки! Вводится казарменный режим!»

Как-то Исаак Яковлевич лукавил: «Вот посмотрите, весь стол завален выкладками — листов сто. А потом это уместилось на двух страницах! Как бы научиться сразу писать только две последние страницы?!»

Как достойный ученик Л. Д. Ландау, Исаак Яковлевич не брезговал решением прикладных задач. В середине 40-х годов им была создана практически законченная теория ядерных реакторов и совместно с А. И. Ахиезером написана рукопись «Теория ней-

тронных мультиплицирующих систем». По тем временам издать рукопись не представлялось возможным, и поэтому сейчас опубликованы лишь немногие извлечения из нее: к тому времени, как появилась возможность публикации, авторы уже давно занимались другими вопросами. То, что эта рукопись до сих пор не опубликована, крайне грустно — она являлась классическим примером использования аппарата и мышления теоретической физики в физике реакторов. Все последующие теоретические работы в этой области носили существенно более мелкий и эпигонский характер.

Как-то Исаак Яковлевич рассказывал, как им была сделана одна из наиболее красивых работ в этой области: «Однажды Игорь Васильевич спросил меня, а как подсчитать резонансное поглощение? Поехал я в Ленинскую библиотеку (тогда еще у теоретиков не было рабочих мест и кабинетов, по которым позже при дискуссиях Исаак Яковлевич всегда быстро ходил и автоматически говорил: „Извините“, натываясь на столы.— А. Р.), сел за стол и за полчаса написал формулу». Эта формула вошла в общую теорию резонансного поглощения, созданную Исааком Яковлевичем совместно с И. И. Гуревичем, и называется формулой Гуревича — Померанчука.

Последняя его работа по физике ядерных реакторов также была связана с резонансным поглощением: один из сотрудников ИТЭФа обратился к Исааку Яковлевичу в конце 50-х годов с вопросом о том, как пространственно будет распределен плутоний, образующийся за счет резонансного поглощения. Тогда Исаак Яковлевич уже не поехал в Ленинскую библиотеку, а просто поднялся в свой кабинет, который им именовался «конторой», и через сорок минут формула была написана. Без малейшего палета снобизма была написана и соответствующая бумага по этому поводу.

Не надо думать, что Исаак Яковлевич был как-то оторван от повседневной жизни. Утро на работе начиналось с того, что приходил Исаак Яковлевич и спрашивал: «Газеты читали?» — «Да, Исаак Яковлевич». — «Ну, и что?» — «Да вроде ничего...» — «Как ничего?!» И после этого следовали разнос и разъяснение, как на самом деле — логически развивая — следует интерпретировать ту или иную информацию. И очень большое внимание уделялось взаимоотношениям СССР и КНР, и строились различные прогнозы.

Одной из специфических сторон науки является то, что она создает очень непростые отношения между учеными. Нередко можно встретить зависть к хорошему работам других теоретиков. Это полностью отсутствовало у Исаака Яковлевича. Он всегда бескорыстно радовался получению кем угодно новых интересных результатов. И эта радость была такой искренней, что в ней не было сомнения. Но все же, наверное, нельзя творить в науке при полном отсутствии честолюбия: требуется, чтобы твои успехи признавались другими. Последнее проскользнуло и у Исаака Яковлевича. Пе-

ред тем как его выбрали в академики, он говорил: «Посмотрю я на „них“, как они теперь попробуют не выбрать меня академиком!»

Об ученых он целиком и полностью судил по их научным результатам. Это не всегда находило поддержку у Л. Д. Ландау. Так, как-то, вернувшись из длительной командировки, где он был с одним известным физиком, Исаак Яковлевич, захлебываясь, его расхваливал (конечно, как физика). Но это встретило противодействие Л. Д. Ландау, и через некоторое время Исаак Яковлевич перестал обсуждать с ним этот вопрос. Вообще у Исаака Яковлевича была твердая и правильная установка: если человек в чем-то ненаучном не соглашался, то убеждать его не следовало — бесполезно.

А еще у Исаака Яковлевича был постоянный, неменяющийся запас едких притч и кратких украинских поговорок. Они четко отражали все экстремальные отношения людей. Но приводить их здесь было бы слишком рискованно — рассчитаны они были на устное эмоциональное исполнение.

Исаак Яковлевич умер очень молодым. С самого начала — еще до первого рентгеновского снимка — он четко понимал неизбежный характер течения болезни. Продолжая заниматься наукой, он позаботился о том, чтобы двое его учеников успели защитить докторские диссертации и чтобы в Академии наук СССР был у него преемник. Тяжело больной, он инициировал использование ускоренных частиц в онкологических целях. Но мечтал он при этом не о протонном, а о пи-мезонном пучке.

Последний раз он был в ИТЭФе примерно месяца за полтора до смерти. Когда мы остались одни в его кабинете, он обнял меня за плечи (что было совершенно необычно) и прошептал: «Если бы Вы знали, Алексей Петрович, как тяжело».

Рассказывают, что перестал он работать за три дня до смерти, когда впал в коматозное состояние...

*Б. Л. Иоффе*

## ПЕРВЫЕ ГОДЫ ОБЩЕНИЯ С И. Я. ПОМЕРАНЧУКОМ

Впервые я встретился с И. Я. Померанчуком зимой 1947/48 г. Дело было так. Я учился в университете на кафедре строения вещества на четвертом курсе. Надо было оформляться на дипломную работу, подыскивать себе руководителя. Я хотел выбрать себе руководителя из школы Л. Д. Ландау. (Такое допускалось на кафедре строения вещества в отличие от других кафедр физфака.) Мой выбор пал на И. Я. Померанчука просто по той причине, что

к тому времени другие возможные кандидатуры (В. Л. Гинзбург, А. С. Компанеев) были уже разобраны. До этого я Исаака Яковлевича не знал, никогда не видел и не знал даже его работ. Я позвонил ему, представился и сказал, что сдал три курса из минимума Ландау. Этого оказалось достаточно, и И. Я. пригласил меня прийти к нему домой для разговора. Жил И. Я. тогда на Житной. Была зима, страшный мороз. Меня поразило, что в квартире И. Я. почти не было мебели: в одной комнате стоял письменный стол, а в другой раскладушка, застланная серым солдатским одеялом, поверх которого лежала книжка Ф. Блоха «Теория магнетизма». Разговор был недолгим. И. Я. каждые 3—5 минут посматривал на часы, близоруко поднося их к самым глазам. В конце разговора И. Я. сказал, что берет меня в дипломники, но сначала я должен досдать минимум Ландау. (Впоследствии, много лет спустя, И. Я. говорил, что самое сильное впечатление на него произвело то, что в такой мороз я пришел в легкой летной курточке.)

Так я стал дипломником Померанчука. (Кроме меня, у него были три дипломника из МИФИ — А. Рудик, М. Казарновский и А. Ривин.) Надо было сдать минимум Ландау, и в первую очередь «Квантовую механику». Большую часть курса я изучил сравнительно легко, хотя для этого приходилось много времени проводить в библиотеке (ГНБ) — основная часть курса шла по оригинальным статьям. Запнулся я на теории двухатомной молекулы. В статьях она была изложена невнятно, а, с другой стороны, было известно, что Ландау любит давать задачи на эту тему. Я потратил много времени на изучение этого предмета, но уверенности в своих знаниях так и не приобрел. Тогда я пожаловался И. Я., и он сказал, что может мне помочь — он даст мне гранки соответствующего раздела «Квантовой механики» Ландау и Лифшица, как раз тогда шла верстка. Однако давать их он сможет маленькими порциями, и мне надо будет быстро их возвращать. Поскольку, добавил И. Я., он уходит из дома рано, а приходит очень поздно, я должен буду заезжать к нему домой до 7 утра. Так я и стал делать. В 6.30 или 6.45 я звонил в дверь его квартиры (он жил тогда у мамы в коммунальной квартире на Брестской улице). И. Я. выходил в трусах — видно было, что он только что встал, — и выносил гранки. Это продолжалось несколько раз. Как-то я предложил приезжать несколько позже, но И. Я. ответил, что 6.30 — это самое подходящее время. У меня даже возникло подозрение, что И. Я. использует меня в качестве будильника, но на самом деле, по-видимому, он опасался, что, если вдруг он встанет раньше, ему придется из-за меня задержаться.

Зимой 1948/49 г. И. Я. Померанчук читал в МИФИ курс «Квантовая теория поля». В него входили: квантование электромагнитного поля, метод функционалов Фока, теория излучения, метод Блоха—Нордсика, многовременной формализм и т. д. Курс этот был уникальным во всех отношениях: ничего подобного ни

услышать, ни в столь законченной форме прочитать нигде было нельзя. Мне удалось быть лишь на части этих лекций, и, хотя я понимал далеко не все, я до сих пор помню, как возникло ощущение ясности и восторга перед красотой теории.

Одновременно в том же 1949 г. Исаак Яковлевич читал в МГУ курс физики нейтронов и теории ядерных реакторов. Такое смешение высоких и низких «штилей», абстрактной теории и конкретной, даже прикладной, физики было характерно для И. Я. всегда, и он старался привить этот стиль работы своим ученикам. Так, уже во время дипломной работы И. Я. дал мне совершенно разные задачи: первая называлась «Получение поляризованных нейтронов и деполяризация их при замедлении», вторая — «Зависимость сечений тормозного излучения и аннигиляции пар от поляризации фотона».

С 1950 г. я стал работать в теоретическом отделе ИТЭФа. Очень скоро я узнал те принципы, которые И. Я. положил в основу работы сотрудников отдела. Эти принципы были следующие.

1. «Дирекцию надо уважать». Это означало, что все задачи, которые ставит дирекция по решению прикладных проблем, должны делаться в первую очередь с полной ответственностью и гарантией безошибочности.

2. «Экспериментаторов надо уважать». Это означало, что если в теоретический отдел приходил экспериментатор с вопросом или просьбой помочь, то надо было на вопрос ответить, просьбу выполнить и, если нужно, провести даже сложные расчеты.

3. «У нас нет черной и белой кости». Это означало, что между сотрудниками отдела нет различия в решении интересных или неинтересных задач. (Увы, как бывает со многими хорошими принципами, этот принцип выполнялся не столь строго, как два предыдущих.)

4. «Наукой Вы можете заниматься от 8 до 12 вечера». Это означало, что при всей загрузке по пунктам 1 и 2 сотрудники, особенно молодые, должны находить время для занятий высокой наукой.

Я покажу на двух примерах, как Исаак Яковлевич сам претворял в жизнь эти принципы.

Однажды (в 1951 г.) Исаак Яковлевич пришел и сказал: «М. И. Подгорецкий говорит, что при захвате отрицательных  $\mu$ -мезонов легкими ядрами в фотопластинках не видно оже-электронов. Это удивительно, поскольку, попадая на уровень  $2s$ ,  $\mu$ -мезон может перейти на уровень  $1s$ , только испуская оже-электрон: вероятность радиационного перехода очень мала. Подгорецкий сильно смущен этим обстоятельством: ведь если не найти объяснения этому факту, то придется принять, что у  $\mu$ -мезона есть какие-то аномальные взаимодействия». И Исаак Яковлевич тут же предложил простое и красивое объяснение: за счет конечных размеров ядра уровни  $2s_{1/2}$  и  $2p_{1/2}$  расщепляются, причем  $2s_{1/2}$  оказывается

выше  $2p_{1/2}$ , так что появляется возможность перехода мюона с  $2s_{1/2}$  на  $2p_{1/2}$  с вылетом оже-электрона малой энергии, не наблюдаемого в эксперименте. Дальнейшее, как говорится, было делом техники. Оже-переход с вылетом мягкого электрона действительно оказался доминирующим, и М. И. Подгорецкий был полностью удовлетворен.

В известных опытах А. И. Алиханова и А. И. Алиханяна массы частиц космических лучей определялись путем измерения кривизны их траектории в магнитном поле и пробега. Кривизна, в свою очередь, определялась тем, что частица при прохождении магнитного поля пересекала ряды счетчиков. Возникал вопрос: насколько многократное рассеяние в стенках счетчиков может исказить траекторию и тем самым дать ошибку в импульсе? Как-то И. Я. сказал: «Надо помочь экспериментаторам разобраться в этом вопросе». Было создано нечто вроде механического Монте-Карло: на планшет, изборождавший зором магнита с рядами счетчиков, бросались круги из плекса, имитирующие траектории частиц; находилась проходимость частицей толщина счетчиков, вычислялся угол многократного рассеяния и возникающая отсюда ошибка в импульсе. Было показано, что ошибка в массах частиц из-за многократного рассеяния в счетчиках невелика. (К сожалению, неточность этих опытов была обусловлена другими причинами.)

Вместе с тем Исаак Яковлевич не был рабом своих принципов и, когда было нужно, отступал от них. В 1952 г. мы с А. П. Рудиком должны были сдавать кандидатский экзамен по философии. В то время сдача этого экзамена была серьезнейшим делом: надо было дословно знать массу цитат, за малейшее искажение оценка снижалась, а получить на экзамене тройку было равносильно катастрофе. И Померанчук распорядился: в течение двух недель перед экзаменом нам всякую работу прекратить, в своей комнате не появляться, чтобы никто нас не мог найти, а сидеть в другом корпусе и изучать философию. После этого философия была сдана успешно.

На первом месте для Исаака Яковлевича всегда оставалась теория поля. Всевозможные «эффекты Померанчука», которые он с таким блеском придумывал, он сам считал своей слабостью и неоднократно корил себя за это. В 1949—1950 гг. в Москве мало занимались теорией поля и редко кто понимал, что с работами Швингера, Фейнмана и Дайсона пришла новая эра в физике частиц. И. Я. одним из первых почувствовал это и осенью 1951 г. организовал семинар по теории поля и физике элементарных частиц, поскольку он говорил, что на семинаре Ландау «слишком много квасцов», а этой проблеме не уделяется должного внимания. Семинар Померанчука проходил в конференц-зале Института физических проблем в четверг перед семинаром Ландау. Иногда Ландау заглядывал в зал, И. Я. приглашал его: «Заходи, Дау, мы обсуж-

даем то-то и то-то». Но Ландау лишь снисходительно улыбался: мол, «молодые люди хотят заниматься глупостями, пусть занимаются, если никому от этого нет вреда». Постепенно число участников семинара Померанчука росло, росли энтузиазм и возбуждение по поводу обсуждавшихся проблем, и это возбуждение стало проникать на следующий за ним семинар Ландау и мешать спокойному его проведению. И тогда Ландау распорядился проводить семинар Померанчука после его семинара. Но ввести развитие теории элементарных частиц в спокойное русло уже было нельзя, и скоро сам Ландау выступил в роли возмутителя спокойствия.

Я хочу привести еще один эпизод, показывающий, с какой страстью Исаак Яковлевич относился к проблемам теории поля. В 1950—1951 гг. А. П. Рудик и я изучали работы Фейнмана, Дайсона, теорию перенормировок, делали об этом доклады на семинарах и т. д. Однажды утром И. Я. ворвался в комнату № 9, где мы работали, в ужасном гневе. В таком гневе я не видал его никогда — ни до того, ни после. Он кричал: «Фейнмана читали, Дайсона читали — ничего не поняли». Не сразу удалось выяснить, в чем дело. Оказалось, И. Я. понял, что при вычислении фейнмановских интегралов нужно брать вычеты в полюсах пропагаторов, так что некоторые из  $p^2$  равны  $m^2$ . Отсюда он пришел к выводу, что метод Дайсона вычисления степени расходимости диаграмм путем счета степеней импульсов неправилен, а мы этого не заметили. Лишь к вечеру, после того как И. Я. несколько остыл, его удалось убедить, что Дайсон все-таки прав. С тех пор больше таких вспышек по отношению к нам И. Я. себе не позволял.

Как я уже отмечал, в начале 50-х годов многие московские физики-теоретики недооценивали важность теории перенормировок. «Поскольку бесконечности в теории остались, — утверждали они, — то теория перенормировок есть не что иное, как заметание пыли под ковер». И. Я. так не думал. Он считал, что хотя перенормированная квантовая электродинамика (или мезонная теория) не есть еще новая теория, но это очень важный шаг на пути к ней. И Исаак Яковлевич с нетерпением ждал прихода новой теории. «Когда наступит новая теория, — говорил он, — мы все перейдем на казарменное положение и наденем сапоги. Борис Лазаревич, — строгим голосом спрашивал Исаак Яковлевич, — у Вас есть сапоги?» Пришлось признаться, что у меня нет сапог, есть только оставшиеся с военного времени солдатские ботинки с обмотками. И. Я. был согласен и на это, лишь бы наступила новая теория.

В начале 50-х годов внимание И. Я. Померанчука привлекали приближенные, а также численные методы решения уравнений квантовой теории поля. После того как выяснилось (1951 г.), что константа взаимодействия пионов с нуклонами не мала, И. Я. стала нравиться идея записать бесконечную систему зацепляющихся уравнений для функций Грина, в которую входили бы только ко-

нечные перенормированные величины и которую можно было бы решать приближенно, обрывая ряд и используя вычислительную технику (в те времена клавишные счетные машины). Наша попытка в этом направлении (работа И. Я. Померанчука, А. Д. Галанина и моя) имела лишь ограниченный успех: расходимости отсутствовали только в бесконечной системе уравнений, при попытке ее обрыва они возникали вновь.

Поэтому с таким энтузиазмом встретил И. Я. Померанчук работу Л. Д. Ландау, А. А. Абрикосова и И. М. Халатникова. В ней, как известно, было впервые введено понятие эффективного заряда электрона в квантовой электродинамике и определено его поведение на малых расстояниях. Радость Исаака Яковлевича усиливалась еще и тем, что наконец-то, как он говорил, «мэтр взялся за достойную его задачу». До сих пор, как полагал И. Я., Ландау слишком часто разменивался на мелочи, вместо того чтобы заниматься задачей, соответствующей его масштабу, — решением уравнений квантовой теории поля.

Короткое время после того, как Ландау в одну из сред впервые рассказал об этой работе, всем нам действительно казалось, что вот свершилось желаемое: путь вперед открыт и нужно только работать и работать. Дело в том, что первоначально в работе Ландау, Абрикосова и Халатникова была ошибка в знаке и эффективный заряд убывал на малых расстояниях. Отсюда Ландау сделал заключение, что квантовая электродинамика самосогласована на малых расстояниях, и даже выражал надежду, что на таком пути из теории удастся устранить бесконечности. В этом духе и была написана первая из серий статей Ландау, Абрикосова и Халатникова. Вскоре, однако, стало ясно, что знак неправилен (ошибку нашел А. Д. Галанин), эффективный заряд растет с уменьшением  $r$  и при некотором значении  $r$  обращается в бесконечность. Таким образом, окончательно в работах Ландау, Абрикосова и Халатникова был получен крайне важный, но, увы, пессимистический вывод о внутренней противоречивости квантовой электродинамики на малых расстояниях. Сам Ландау сформулировал его как обращение в нуль физического заряда электрона (т. е. заряда на больших расстояниях) в квантовой электродинамике. В последующей работе Ландау и Померанчук показали, что этот вывод не есть следствие использованных приближений, а носит общий характер, что свидетельствует о кардинальном пороке теории. (Аналогичное заключение независимо было сделано Е. С. Фрадкиным.)

Но и после того, как это было установлено, Исаак Яковлевич считал, что нужно обязательно продолжать работать в том же направлении, чтобы до конца выяснить ситуацию: получить результат Ландау, Абрикосова и Халатникова другим методом, исследовать другие теории и т. д. Сам И. Я. потратил много сил на решение этих задач и пришел к неутешительному выводу о противоречивости не только квантовой электродинамики, но и мезонных теорий.

Такой отрицательный результат не соответствовал всему духу научных устремлений Исаака Яковлевича, потребовал перестройки его научных интересов и даже, может быть, затронул его психологию. Поэтому с середины 50-х годов начался новый период в его научном творчестве.

*И. С. Шапиро*

## ИЗ ВОСПОМИНАНИЙ О И. Я. ПОМЕРАНЧУКЕ

Померанчук первый указал на невозможность двухфотонной аннигиляции ортопозитрония (1948 г.). Этот результат был неожиданным (в те годы о зарядовой четности почему-то не знали или, во всяком случае, не говорили).

Я присутствовал на тогдашних докладах (их было два) Исаака Яковлевича в ФИАНе.

Меня поразило то, каким образом Исаак Яковлевич пришел к своему результату. В усредненном (по спинам) сечении двухфотонной аннигиляции медленных позитронов он обратил внимание на численный множитель  $1/4$ . Чтобы выяснить его происхождение, он провел вычисления раздельно для суммарного спина аннигилирующих частиц 0 и 1 и убедился, что «единица в два фотона не идет». Между первым и вторым докладом состоялась беседа Исаака Яковлевича с Л. Д. Ландау. По словам Исаака Яковлевича, он «обратился к мэтру» с вопросом: в чем может быть «глубинная» природа обнаруженного факта? Из ответа на этот вопрос родилась известная работа Л. Д. Ландау об угловом моменте системы двух фотонов.

В то время ряд теоретиков (у нас и за рубежом) занимались позитронием. Формула для сечения двухфотонной аннигиляции была давным давно известна. Но никто не заметил, что четверка в знаменателе «подозрительна». Для Померанчука же такое наблюдение, по-моему, характерно: в нем проявилось свойственное ему особое сочетание аналитического и физического мышления.

*А. А. Абрикосов*

## НА ДУШЕ ТЕПЛЕЕ

Чук был удивительным человеком: добрым и одновременно непримиримым к лженауке и проходимцам, почти аскетически преданным физике и в то же время любителем анекдотических историй и неплохим знатоком литературы, но главное — очень ис-

кренним. Я помню, как Чук плакал на лестнице в 50-й больнице, когда мы все стояли там в ожидании смертного приговора нашему «великому Учителю», как Чук называл Дау. И, наверное, именно его проявления радости, когда мы узнали, что Дау будет жить, были самыми непосредственными.

Я познакомился с Чуком, когда стал ходить на семинары Ландау в 1947 г. Мы все тогда умчались за одним овальным столом. Семинар был в основном дискуссией между Дау и докладчиком по поводу работы, которую докладчик тщетно пытался изложить. Дау не нравилось в работе буквально все: и постановка задачи, и метод, и формулировка результата. Не случайно на юбилее Дау в «словаре», помещенном в стенгазете, был такой термин: «Докладчик — человек, несущий персональную ответственность за все ошибки в „Physical Review“». По убеждению Дау, докладчик должен был «разобраться», т. е. полностью переделать работу в стиле, привычном для Дау. Единственный человек, который как-то пытался урезонить Дау на семинаре и которого Дау, как это ни странно, слушался, был Чук. Доклады самого Чука я не очень ясно помню. Единственное, что я вспоминаю, — это их «корявость». Чук не гнался за внешними эффектами и рассказывал почти сырые идеи. Если бы такое сделал кто-нибудь другой, то Дау немедленно начал бы кричать, что докладчик хочет «нарушить закон Ломоносова», который, по его мнению, заключался в том, что «из ничего ничего и не выйдет», но Чука он слушал внимательно и сам начинал как-то размышлять вслух, чего он обычно не делал.

То ли дело Мигдал. Если уж он что-нибудь рассказывал, то это было блестяще в своей завершенности. Все восхищались, но больше всех Чук, который искренне любил Кадю (Мигдала) и, как мне тогда казалось, ставил его значительно выше себя. Вообще надо сказать, что Чук как-то не интересовался тем, какое место он сам занимает в науке. Чужие результаты вызывали у него гораздо больший восторг, чем его собственные.

Один раз это сослужило мне неплохую службу. После работ по квантовой электродинамике, начатых мною вместе с Л. Д. Ландау и И. М. Халатниковым, мне можно было подумать о докторской диссертации. Но я знал, что об этом ни в коем случае нельзя заговаривать с Дау. У того было правило, что «в народе должно созреть мнение о том, что человеку пора защищать докторскую». Но я был очень молод и понимал, что мнение будет «зреть» еще очень долго. Подумавши, я спросил у Чука, считает ли он, что мне пора защищаться. Он отвечал, что в этом нет никаких сомнений. Не буду приводить здесь его явно преувеличенную оценку моих достижений, которую я (правда, без большого усердия) пытался отрицать. Так или иначе я попросил его высказать свое мнение Дау. Он воскликнул: «Как я сам не догадался!» — и обещал. Через пару дней Дау сказал мне: «Ну, народ считает, что Вам пора защищаться. Так что пишите». Значит, сработало. Конечно, Чук был и на

защите. Что при этом он говорил, я не помню, но было здорово! Происходило все это в 1954—1955 гг.

Какое-то особое бескорыстие Чука очень привлекало к нему людей. Его по-настоящему любили. Я помню, был у меня период, когда с наукой как-то «загерло». Ничего не получалось, и я, будучи тогда еще весьма неискушенным, впал в некоторую депрессию. Мне казалось, что у меня никогда ничего больше не получится. А тут подвернулась возможность переключиться на преподавательскую и административную работу. Заведующий кафедрой теоретической физики МИФИ В. М. Галицкий переехал в Сибирь и усердно уговаривал меня взять его кафедру. А на кафедре преподавали И. Я. Померанчук, Л. Б. Мигдал, Ю. М. Каган и многие другие прекрасные теоретики. Я начал колебаться. Чук прослышал об этом и, отозвав меня в сторонку, спросил, правда ли это. Я ответил, что не знаю, как быть; на что он сказал: «Вы понимаете, что для нас всех Вы были бы идеальным заведующим кафедрой, но Вам-то это зачем?» Я изложил ему свои печальные соображения, на что он рассмеялся и успокоил меня. Я остался у Дау и был потом чрезвычайно благодарен Чуку за то, что он меня удержал.

Наверное, и у него бывали неприятности, но я его всегда видел улыбающимся, готовым пошутить. Помню, нас переселили в комнату, оставшуюся от математического отдела. В ту пору никаких компьютеров не было, а вместо этого сидели 15 девиц и щелкали на «мерседесах» — механических счетных машинках. Грохот стоял ужасный, несмотря на специальные звукопоглощающие стены. Чук, зайдя к нам в эту комнату (уже без девиц), усмехнулся и сказал: «У вас как в гробу».

Все, наверное, помнят, как Гейзенберг решил составить все элементарные частицы из фермионов и даже получил 1/137 из геометрических соотношений. Дау был очень заинтересован, а Чук с восторгом встретил новую концепцию. Когда я обратил его внимание на шаткость предположений новой теории и удивился его необычной доверчивости, он достал паспорт, где было написано «Померанчук Юзик (именно так!) Яковлевич». Он обратил мое внимание на год рождения — 1913 — и сказал: «Если это не теория элементарных частиц, то я вряд ли доживу до такой теории. Приходится верить!»

Однако в действительности интуиция у Чука была исключительной. Помню, как он, уже давно на занимаясь физикой твердого тела, вдруг заинтересовался влиянием изотопического состава металла на его сопротивление. Он построил теорию, которая хорошо соответствовала эксперименту. Удивительно то, что он рассматривал при этом часть кинетической энергии колебаний как возмущение, чего никто до него никогда не делал.

Другой случай — знаменитый «нуль заряда». Чук очень интересовался нашими работами по квантовой электродинамике, часто бывал в Физпроблемах, активно обсуждал эти работы.

А потом вдруг высказал убеждение, что истинный заряд точечной частицы должен равняться нулю независимо от величины затравочного заряда. Мы все сначала не поверили. Но потом они с Дау разобрались во всем детально и напечатали статью на эту тему. Тут подоспела «двухпредельная техника», которую придумали мы с И. М. Халатниковым. Исходя из идеи о разных пределах интегрирования по импульсам фермионов и бозонов, она давала возможность пренебречь поправками к вершинам. Чук сразу пустил ее в дело и доказал нуль заряда в мезонных теориях. Многие ему не верили и называли это явление «московский нуль», подчеркивая, что никто, кроме нас, его не признает. Многие пытались обойти проблему нуля заряда, не вводя затравочный заряд и перенормировки, а пользуясь только физическим зарядом и унитарностью. История поставила все на свои места. Когда в квантовой хромодинамике обнаружилась обратная ситуация, т. е. усиление взаимодействия с увеличением расстояния, то «московский нуль» Чука был признан всеми.

Вспоминаются разные другие эпизоды, серьезные и смешные, которые вряд ли подойдут для книги воспоминаний. В заключение я расскажу о работе Чука в обувном институте. Часть рассказывал он сам, а часть — кто-то другой (не могу вспомнить кто именно). Чук преподавал там физику, и в один прекрасный день ему надо было рассказать про термодинамику. По тогдашней программе все выводилось не из статистической физики, а «по Каратеодори», т. е. весьма формально и непонятно. Чук бодро начал вывод, но в середине перестал сам понимать, что к чему. Он распустил студентов и сказал, что выведет все в следующий раз. Но на следующей лекции, дойдя до того же места, он опять застрял. На третью лекцию пришел один студент, но результат был тот же. После этого Чука вызвали в деканат.

А другой случай в том же институте был вот какой. Чук должен был защищать диссертацию. Одним из оппонентов был Капица. Диссертация была посвящена теплопроводности диэлектриков. Но перед защитой члены Ученого совета взбунтовались. Они говорили, что тема диссертации не имеет отношения к изготовлению обуви и они в ней не разбираются. Тогда встал заведующий кафедрой марксизма-ленинизма и сказал, что диссертация посвящена материалистической теории мироздания и в этих вопросах должны разбираться все. Обувщики были посрамлены. Диссертация прошла единогласно.

Недавно в Чехословакии я встретил теоретика, специалиста в совсем другой области. Он поразил меня тем, что безвыходно сидел в своем отделе, участвовал во всех без исключения работах, причем не в качестве фамилии в статье, а как главный исполнитель. Он знал страшно много и был готов говорить о науке без конца. По его словам, у него были жена и две дочери, но не было ни машины, ни телевизора. Когда я упомянул о нем в компании



его коллег, то они сказали: «Это что! А знаете ли Вы, что он брился только для Вас? Обычно он это делает раз в две недели». Я тут же вспомнил Чука.

Значит, такие люди изредка появляются и в наши дни! И от этого на душе как-то теплее...

*И. М. Халатников*

## ИСААК ЯКОВЛЕВИЧ И ЛЕВ ДАВИДОВИЧ

В первые послевоенные годы с Исааком Яковлевичем мы встречались регулярно на семинарах Ландау. В то время участников семинаров было немного, максимум 10—12 человек, которые все умещались за одним столом, покрытым зеленым сукном. Этот стол можно еще сейчас увидеть в конференц-зале ИФП. В «табели о рангах» Исаак Яковлевич уже тогда стоял на первом месте среди учеников Льва Давидовича.

В начале 1948 г. я защищал кандидатскую диссертацию по теории сверхтекучести. Моими официальными оппонентами были И. Я. Померанчук и В. Б. Берестецкий. Как видно из выбора оппонентов, в те годы среди теоретиков не было узкой специализации, характерной для современного поколения.

В 1954 г., когда мы с Л. Д. Ландау и А. А. Абрикосовым занялись исследованием асимптотического поведения функций Грина в квантовой электродинамике, Исаак Яковлевич активно следил за всеми перипетиями этой работы. Он первый обратил внимание на то, что из наших результатов следует «нуллификация» заряда. Это явление, получившее название «московского нуля», до сих пор не потеряло своей актуальности.

Следует сказать, что до того, как мы с Абрикосовым по предложению Ландау занялись суммированием наиболее существенных диаграмм в уравнениях Дайсона, мы пытались использовать эти уравнения, записанные в форме функциональных производных ( $\Gamma_\mu \rightarrow \frac{\delta}{\delta A_\mu} G^{-1}$ ). Идея состояла в том, чтобы искать общие их решения, предполагая, что все функции зависят только от разности  $\hat{p} - (e/c)\hat{A}$ . Мы довели эту задачу до конца, но затем сообразили, что при таком подходе теряются члены, обязанные собственному магнитному моменту электрона. Однако позже И. Я. Померанчук использовал эту идею для выяснения вида вершин в скалярной электродинамике, где такого эффекта нет.

В 1963—1964 гг. мне пришлось часто обсуждать с Исааком Яковлевичем наш проект образования собственного института теоретической физики. С самого начала Исаак Яковлевич с боль-

шим энтузиазмом поддержал эту идею. Он и сам подумывал к нам присоединиться. В связи с этим он хотел, чтобы В. Н. Грибов переехал из Ленинграда и образовал в ИТФ зародыш будущего Московского филиала.

Вопрос о переезде В. Н. Грибова в Москву в 1965 г. был практически решен. Однако дальнейшая судьба Исаака Яковлевича сложилась так, что этим планам не было суждено осуществиться. А ведь идея, как говорил Ландау в аналогичных случаях, была «богатая». Лев Давидович всегда выделял Исаака Яковлевича из всех своих учеников, относился к нему особенно тепло. Это выражалось и в том, как он его обычно называл в разговорах со мной, несколько даже нежно: вместо общепринятого Чук, Дау говорил Чуца.

*М. А. Иванова-Померанчук*

## ИСААК ЯКОВЛЕВИЧ И СЕМЬЯ

Прошло около 20 лет, как ушел из нашего дома Исаак Яковлевич, а мне трудно думать, писать слова «был», «жил», «говорил», «умер», так как для меня он остался живым, энергичным и прошлое во всех подробностях заполняет мое сердце и мучительно мешает четко излагать свои воспоминания.

Начну с детства. Исаак Яковлевич при всей своей занятости, замкнутости характера очень любил веселиться и играть с нами, детьми, сам становясь ребенком. Он веселился, бегал, играл, смеялся всегда громче всех, неизменно называя себя Котом Мордоном. Почти до конца своих дней, когда Исаак Яковлевич звонил в дом, на вопрос: «Кто?» — отвечал: «Кот Мордон». Игры были шумные, мама иногда сердилась и, конечно, призывала образумиться, прежде всего Исаака Яковлевича, как старшего, но он всегда, улыбаясь, отвечал: «Я не доиграл в детстве, и самый маленький и счастливый здесь — я».

Действительно, у Исаака Яковлевича было довольно трудное детство, родители много переезжали, у него не было товарищей по играм. Самым нудным и неприятным занятием для него была игра на скрипке. И эти «мучения», по его словам, продолжались до тех пор, пока маленькая дворняжка, слушая его игру, вдруг грустно завывала и «пустила большую лужу». В 10 лет он, чувствуя себя взрослым, потребовал купить себе длинные брюки, сказав, что в школу больше в коротких штанишках не пойдет, и не пошел. Родителям пришлось уступить. Вот, собственно, и все, что у него осталось в памяти от детства. Дефицит детского веселья он ощущал всю жизнь. Исаак Яковлевич часто шутил, что самым убедитель-

ным подтверждением этого явилось его заболевание детской болезнью — свинкой — в 38 лет. Сначала заболела моя младшая сестра Лида, ей было тогда 5 лет; затем высокая температура и головная боль появились у Исаака Яковлевича. Врачи меняли один страшный диагноз на другой, а через пять дней диагноз определился сам собой. Как называл его Исаак Яковлевич: «Свинья была налицо».

Мы учились хорошо, проблем у родителей с нами не было. Но вот когда я поступила в институт, появившаяся свобода вскружила мне голову и я совсем забросила лекции. А когда прошел первый семестр и началась сессия, я открыла учебник по высшей математике и поняла, что ничего не знаю. И это было мое первое и единственное обращение за деловой помощью к Исааку Яковлевичу. Сколько терпения и выдержки проявил он! Многие знают его вспыльчивость, нетерпимость к глупости и непониманию элементарных вещей, а я все это проявляла, да и трудно было пройти семестр за два дня. Когда у него не хватало нервов, он выходил покурить на улицу и говорил: «Мороз охлаждает голову» — и занятия продолжались. Этот урок я запомнила на всю жизнь. Математику я сдала на «отлично», и тут его радости не было конца.

Я упомянула о курении; действительно, была у него эта дурная привычка курить много и часто, но никогда — дома! Характерный факт ненавязчивой, но постоянной заботы о нас. Только теперь я понимаю, как это было ему непросто. У нас в доме даже не было пепельницы. И только в 1966 г. она появилась, когда мы ждали Н. Н. Боголюбова. Исаак Яковлевич долго смеялся над мной и говорил, что для этого вполне подошел бы бумажный кулечек. А в это время он уже сам был сильно болен и давно не мог курить.

Исаак Яковлевич был очень предупредительным и внимательным в семье. Особенно душевные отношения у него были с моей бабушкой Ириной Никаноровной. Они вели долгие беседы, как говорил Исаак Яковлевич, «за обильной трапезой». Бабушка была мастерицей печь пироги, варить борщи, делать разные соленья, особенно грибы, — это была для него «пища богов». Его мать не любила готовить, а студенческие годы у него ассоциировались с супом из кислой капусты. У Исаака Яковлевича вошло в привычку, входя в дом, по запаху определять, что на обед, и его не смущало, что обед всегда был в 8 часов вечера. Раньше он никогда не приходил с работы, а уходил в 8.30 утра, и так каждый день.

Отношение к работе Исаака Яковлевича вызывает преклонение. Он отдавал ей огромную часть своего времени. Рабочий день начинался у него с 5 часов утра. Под подушкой всегда лежал зелененький физический журнал; если была весна или лето — свет был естественный, а если зима или осень — Исаак Яковлевич пользовался, как он говорил, «ночной лампой». Работоспособность его, как мне теперь кажется, была безграничной, причем Исаак

Яковлевич был способен работать в любых условиях: в лесу, в телефонной будке, среди гостей и т. д. У него была своеобразная, может быть не очень красивая, привычка: думая, тереть указательный палец на левой руке. И как только он это делал, значит, отключался от всего, работал, обдумывал очередное решение своих бесконечных проблем. Он мог писать свои «пси со шляпкой» за обеденным столом, в трамвае, везде!

Исаак Яковлевич очень любил работать с молодежью. Теперь, когда я примерно в его возрасте, особенно уважительно пишу об этой черте его характера. Молодежь всегда ярче, творчески активнее, быстрее в восприятии. К сожалению, многие ученые предпочитают общаться со своими сверстниками — вероятно, это проще, спокойнее, легче обеспечить взаимопонимание. Но Исаак Яковлевич понимал, что это автоматически приводит к застою, самозащитности, эти свойства были абсолютно ему не присущи.

Любимыми его учениками были Л. Б. Окунь, Б. Л. Иоффе, И. Ю. Кобзарев и Володя Грибов. Общение с этими талантливыми учеными Исаак Яковлевич очень ценил и всегда говорил, что учится у них. Постоянное стремление познать новое, одержимость, всегда неудовлетворенность своими успехами (а это была не рисовка, а факт, нередко омрачавший и нашу жизнь), видимо, и позволили ему в «пожилом» для физика возрасте всегда интересоваться передовыми достижениями в области физики элементарных частиц и самому работать на должном уровне.

Характерной чертой Исаака Яковлевича была оценка людей по их деловым качествам, невзирая на «регалии». Он резко высказывался в адрес своих друзей-физиков, которые, как он говорил, «стали больше любить говорить, чем работать».

Очень уважительно, внимательно он относился к шоферу, кассиру, медсестре, уборщице. Он не позволял себе заставлять шофера ждать лишние пять минут, первым спешил поздороваться с уборщицей, узнать, как идут дела, не нужна ли помощь. До сих пор тетя Маша — санитарка института хирургии — очень тепло и трогательно вспоминает его.

В нашей семье всегда были покой, взаимоуважение, доброжелательность. Единственной причиной, вызывавшей раздражение и брань у Исаака Яковлевича и обиду у нас, было его нетерпимое отношение к красивым вещам. Помню случай, купила ему красивые белые туфли, а в 50-е годы это было непросто, однако он наотрез отказался носить их, так же было в разное время с модными галстуками, рубашками, кожаным пиджаком.

Исаак Яковлевич говорил, что он очень счастливый человек и что редко у кого в жизни бывает и любимая работа, и любимая жена. Действительно, чувство Исаака Яковлевича к моей маме, человеку очень интересному, яркой индивидуальности в сочетании с красивой одухотворенной внешностью (о чем он мне очень часто говорил), было очень сильным и непростым. Я слышала, как

он говорил молодым людям, что любовь прекрасное чувство, но дважды он бы его пережить не хотел.

Мама была искренним и прямым человеком, за что ее бесконечно уважал Исаак Яковлевич. Он говорил, что узнает на свете двух людей, которые могут себе позволить всегда говорить правду, — это Анна Ивановна (моя мама) и Л. Д. Ландау.

Двух самых близких для меня людей — маму и Исаака Яковлевича — объединяла любовь к музыке, живописи, природе.

Исаак Яковлевич с одинаковым интересом относился и к симфонической музыке (его любимые композиторы — Бетховен и Шостакович), и к опере, очень любил оперетту, с удовольствием слушал Вергинского и Шульженко, не чужда ему была и рок-музыка, под которую он подтанцовывал вместе с Лидушкой.

С особой теплотой вспоминал Исаак Яковлевич свои «походы» с мамой на различные выставки. По его признанию, он довольно слабо разбирался в живописи, поэтому художников видел и «открывал для себя» глазами мамы, хотя часто спорил о современных тенденциях.

Отдыхал Исаак Яковлевич мало, отпуск использовал не всегда даже наполовину, поэтому особенно ценил поездки за город. Живя на даче, собирал шишки, разводил самовар и был в восторге, когда ему это удавалось. Любил купаться, хотя плавать не умел, но гордился тем, что подолгу держится на спине.

Наша счастливая жизнь кончилась с болезнью мамы, тяжелой, продолжительной. Уважительность, преданность и правдивость сохранились у нас и после смерти мамы. Она умерла рано, ей только исполнилось 50 лет. Переживания объединили нас, и... вдруг через год я первая узнала о неизлечимой болезни Исаака Яковлевича. Врачи сразу не оставили никакой надежды. Сейчас, вспоминая это трагическое время, длившееся более двух лет, когда медленно, капля за каплей, уходили силы, энергия, жизнь, не перестаешь удивляться его желанию работать в самые трудные для себя дни, его оптимизму, жажде жизни.

Исаак Яковлевич, несмотря на то что лечился в институте онкологии, прошел курс облучения, изучил массу литературы по вопросам онкологии, чтобы помочь А. И. Рудерману (заведующему отделением лучевой терапии) в использовании лучевой энергии в борьбе со злокачественными опухолями, часто спрашивал у меня: «Может быть, и у меня рак?» И я, глядя ему в глаза, спокойно отвечала: «Нет». «Я тебе бесконечно верю», — говорил Исаак Яковлевич. — Если ты говоришь нет, так нет». Именно эта, заложенная мамой, правдивость давала ему опору, а мне была мучительна. Моя ложь, я думаю, его поддерживала, продлевала жизнь, отвлекала от мучительных мыслей.

Его вера в жизнь, желание работать особенно потрясли профессора А. А. Вишневского, который после проведенной Исааку Яковлевичу операции, услышав его первые слова: «Марина, до-

говорись с Александром Александровичем, чтобы мне разрешили работать», сказал: «За сорок лет всякое слышал: кто благодарит бога после операции, что выжил, кто меня, но чтобы требовали работы — слышу впервые».

Во время болезни Исаака Яковлевича мы всячески старались его порадовать, отвлечь от боли; последним нашим походом в театр был, как ни странно, цыганский концерт, а наутро мы отвезли его на операцию в Институт им. А. В. Вишневского. За три недели до его смерти Лида вышла замуж. Как же он радовался! Как хотел быть дедом, ждал внука! Наше чуткое к нему отношение, оптимистический настрой на жизнь через слезы поддерживали в нем огромную любовь к его трудной в это время жизни. Приведу два случая из последних дней его жизни, которые его потрясли и подтверждают сказанное. Первый — наш сосед, юноша семнадцати лет, покончил самоубийством из-за неразделенной любви. Исаак Яковлевич в это время был дома, он был потрясен этой смертью, не понимал, как мог мальчик лишиться себя самого дорогого — жизни, воспринял это как собственное горе.

Второй случай произошел во время его очередной вечерней прогулки по Овчинниковской набережной, где он на одном из мостиков встретил человека, пытавшегося покончить с собой. Исаак Яковлевич не отличался контактностью, особенно с незнакомыми людьми. Но здесь он кинулся к нему, схватил за пиворот (а сил уже не было), долго убеждал на собственном примере, что, несмотря ни на что, надо жить, что лучше этого ничего нет, и в доказательство на морозе расстегнул пальто, пиджак, рубаху, показал ему резиновую трубку — «стому», как он ее называл, единственный способ получения пищи для поддержания жизни. Самоубийца был потрясен тем, что обреченный человек имеет такую силу воли и веру в жизнь. Он сказал, что никогда не забудет этой встречи, никогда больше не посягнет на свою жизнь. Исаак Яковлевич пришел домой возбужденный, удовлетворенный своей духовной победой, радостью, что он спас человека.

Но главным повседневным его занятием была, конечно, работа. Во время болезни оптимальным условием для себя он считал работу дома. В институтах онкологии и хирургии ему создавали все условия для творчества. Однако больше двух недель в общей сложности он не мог находиться в больнице. Тянуло домой. И все изнурительные процедуры, имея высокую температуру, проводил амбулаторно. Даже заболев желтухой, когда врачи категорически настаивали на его госпитализации, он очень не хотел ложиться в больницу, но, зная серьезные последствия болезни, сказал мне: «Как ты скажешь, так я и сделаю». Как я могла, зная его любовь и привязанность к дому, разрешить врачам увезти его? Он остался дома, продолжал работать.

Исаак Яковлевич вместе со своими коллегами-друзьями Л. Окунем и В. Грибовым работал до последнего часа, пока не

потерял сознания, и той же ночью — 14 декабря 1966 года — он скончался.

Крепость семейных уз сказалась и в выборе места его захоронения, показавшемся некоторым странным. Похороны в Болшеве, где покоятся мои мама и бабушка, — это тоже выполнение его желания «не расставаться с родными и дорогими людьми даже после смерти».

В. П. Джелепов

## ВЫДАЮЩИЙСЯ ТЕОРЕТИК — УЧИТЕЛЬ ЭКСПЕРИМЕНТАТОРОВ

История развития ядерной физики в Советском Союзе в послевоенный период богата многими замечательными событиями. Одно из таких событий — ввод в действие 14 декабря 1949 г. в небольшом подмосковном поселке Ново-Иваньково (ныне г. Дубна), расположенном на берегу Волги, первого в СССР мощного ускорителя частиц — 5-метрового синхротрофона. Это произошло в организованном здесь в 1948 г. филиале Лаборатории № 2, директором которой был И. В. Курчатов. (Впоследствии эта Лаборатория была преобразована в Институт атомной энергии (ИАЭ) и носит имя И. В. Курчатова.) Запуск самого крупного в то время в мире ускорителя частиц и получение на нем сначала дейтронов, альфа-частиц и протонов с энергиями соответственно 280, 560 и 480 МэВ, а вскоре (в 1953 г., после увеличения диаметра полюсов магнита до 6 м) протонов с энергией 680 МэВ знаменовали собой рождение в нашей стране новой области ядерной физики — физики частиц высоких энергий.

Именно в те годы здесь, на волжской земле, мне выпало счастье более близко познакомиться с Исааком Яковлевичем Померанчуком, наиболее полно познать силу таланта этого выдающегося ученого и не раз ощутить его большую щедрость в передаче своих богатых знаний другим людям.

Так случилось, что, хотя мы оба учились в Ленинградском политехническом институте и почти одновременно закончили знаменитый физико-механический факультет этого института (он — в 1936 г., а я — в 1937 г.), мы практически остались незнакомы: он специализировался по теоретической физике, я — по экспериментальной ядерной физике. По окончании института я ушел в Красную Армию, и наши пути с Исааком Яковлевичем разошлись надолго. Снова мы встретились с ним в Москве в 1943 г., работая в Институте И. В. Курчатова. Некоторое время мы даже жили в одной квартире на Можайском шоссе. Но работали над разными



И. Я. Померанчук и В. П. Джелепов в ОИЯИ (Дубна).  
Конец 50-х гг.

Фото П. И. Зольникова

задачами, приходили домой поздно, и встречи и беседы по вечерам были редки и быстротечны.

Исаак Яковлевич в то время очень много и напряженно работал над созданием теории так называемых экспоненциальных экспериментов, проводившихся И. В. Курчатовым на графитовой призме в связи с решением общей задачи осуществления незатухающей цепной реакции деления урана. Поражали огромная работоспособность и буквально одержимость Исаака Яковлевича. Часто он, придя поздно вечером домой и попив чая, снова садился за вычисления и работал далеко за полночь.

Работы по урановой проблеме на значительное время стали для Исаака Яковлевича основными. Широко известен внесенный им фундаментальный вклад в диффузионную теорию реакторов, теорию критических размеров, температурных эффектов и в другие

разделы реакторной науки. Многие из нас, сотрудников ИАЭ, помнят замечательные доклады Исаака Яковлевича по этим вопросам на семинарах.

После выполнения ряда работ по урановой проблеме в 1948 г. по предложению И. В. Курчатова я был назначен заместителем руководителя филиала ИАЭ в Дубне. Следует заметить, что в те годы и руководитель филиала М. Г. Мещеряков, и я, и основной теоретик ИАЭ по ускорителям А. М. Будкер, и теоретик филиала по этим вопросам В. С. Катышев были только кандидатами наук, а больше в штате филиала вообще не было ни одного кандидата. Но был у всех нас, включая наших совсем молодых сотрудников — выпускников ЛПИ, МГУ, ЛГУ, МИФИ и других вузов страны, огромный энтузиазм.

Сооружение ускорителя подходило к завершению, приближалось время его пуска, и подготовка к исследованиям на его пучках становилась все более интенсивной. Создавалась экспериментальная аппаратура, проходили обсуждения программы первоочередных исследований и развития их на перспективу. И в этот ответственный момент нам, руководителям Лаборатории, являвшимся одновременно и руководителями основных направлений исследований, неоценимую помощь оказала группа высококвалифицированных физиков-теоретиков ИАЭ и ИТЭДа во главе с Исааком Яковлевичем Померанчуком. В нее входили А. Б. Мигдал, Я. А. Смородинский и Б. Т. Гейликман. Они регулярно, каждую неделю, в погоду и непогоду, в стужу и жару приезжали на старенькой «эмке» в Дубну, читали физикам лекции по современным проблемам новой науки и выступали на семинарах с докладами о своих, часто только что выполненных, и иностранных теоретических работах в области физики высоких энергий. Если говорить точнее, то буквально учили нас и весь наш коллектив физиков, включая и нескольких молодых теоретиков, новой ядерной физике. В 1950 г. в нашей Лаборатории начал работать (и работает по сей день) известный ученый профессор Б. М. Понтекорво, а несколько позднее — М. С. Козодаев. Оба — прекрасные экспериментаторы, а Б. М. Понтекорво прошел еще и теоретическую школу Э. Ферми.

Семинары, лекции и дискуссии проходили оживленно. На них царил атмосфера тесного контакта и непосредственности между докладчиками и слушателями, так как число физиков в Лаборатории было невелико (не превышало 30 человек). Лекции теоретиков, и в особенности курс лекций И. Я. Померанчука, были исключительно полезны и предельно важны для всех нас. Они вооружали нас остро необходимыми знаниями.

Генеральным направлением работ в первый период деятельности Лаборатории являлись сильные взаимодействия элементарных частиц — нуклонов и пионов. На семинарах и лекциях обсуждались научные проблемы, относящиеся не только к решаемым

на нашем ускорителе. Их горизонт уходил далеко, охватывал гораздо более высокие энергии. Ведь в Беркли (США) строился Бэватрон на 6,3 ГэВ, а здесь, в Дубне, под руководством В. И. Векслера начинались работы по сооружению синхрофазотрона на 10 ГэВ.

Руководимая мною группа, основными сотрудниками которой являлись Ю. М. Казаринов, Б. М. Головин, В. Б. Флягин, В. И. Сатаров, занималась тогда исследованием упругого рассеяния нейтронов высоких энергий протонами и нейтронами. Измерялись как дифференциальные, так и полные сечения этих процессов в области энергий 300—590 МэВ. Исследовалась также спиновая зависимость ядерных сил. Получавшиеся результаты были новыми и единственными в мире при столь высоких энергиях. Это вдохновляло. Был установлен целый ряд очень важных фактов. Доказана идентичность упругого рассеяния двух нейтронов и двух протонов (если не учитывать кулоновского взаимодействия, играющего существенную роль для протонов лишь в области малых углов). Это позволило сделать заключение о справедливости гипотезы зарядовой симметрии ядерных сил и при высоких энергиях.

В опытах по исследованию упругого рассеяния неодинаковых нуклонов (*np*-рассеяния) при высоких энергиях было установлено, что это рассеяние происходит в системе центра масс преимущественно вперед и назад, что, в свою очередь, свидетельствовало о существовании наряду с обычными силами интенсивных сил обменного характера, связанных с обменом зарядом. Мне приятно вспомнить, с каким большим интересом Исаак Яковлевич отнесся к этим результатам. Но что замечательно. Он тут же поставил интересный вопрос: не происходит ли при обменном *np*-рассеянии наряду с передачей заряда от протона к нейтрону одновременно и обмен спинами? И вскоре развил соответствующую теорию, которая свидетельствовала о существовании такого эффекта. Результаты поставленного нами опыта по рассеянию нейтронов дейтронами подтвердили выводы теории Исаака Яковлевича и показали, что вклад спиново-обменных сил в обменное взаимодействие существен.

С наименьшим интересом он обсуждал полученные в Лаборатории данные по полным сечениям упругого взаимодействия двух нуклонов, первые результаты по рождению пионов в *np*- и *pp*-взаимодействиях и данные о энергетической зависимости полных сечений рассеяния  $\pi^+$ - и  $\pi^-$ -мезонов на водороде.

И. Я. Померанчук сыграл большую роль в формировании программы исследований на нашем синхроциклотроне в годы становления Лаборатории и начального ее развития. Он привил нашему коллективу вкус к исследованию наиболее фундаментальных процессов взаимодействия элементарных частиц, их рождения и распада — таких процессов, опытные данные о которых

отвечают на наиболее жгучие вопросы теории и зачастую стимулируют ее дальнейшее развитие. Все мы глубоко благодарны ему за это. Его огромная эрудиция и авторитет выдающегося теоретика, вдохновенный труд, граничащий с самопожертвованием, железная самодисциплина, редкий дар излагать самые сложные вопросы теории в понятной для большинства аудитории форме, доступность для людей и искренняя доброжелательность снискали глубочайшее уважение к нему среди физиков нашей страны и за ее пределами.

Сотрудники старшего поколения первой ядерной Лаборатории Дубны — Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ, кому выпало счастье пройти школу или учиться у Исаака Яковлевича Померанчука, работать по экспериментальной проверке его теоретических идей, общаться с ним, всегда с глубокой благодарностью вспоминают этого замечательного ученого и человека.

*Н. Н. Боголюбов*

## ОБ ИСААКЕ ЯКОВЛЕВИЧЕ

Я с особым чувством вспоминаю Исаака Яковлевича Померанчука, с которым имел удовольствие быть лично знакомым.

Исаак Яковлевич, выдающийся физик, чьи труды признаны во всем мире, был обаятельным человеком.

Контакты с ним у меня усилились, когда мы оба оказались в одной командировке (в начале 50-х годов). Надо сказать, что тогда у Исаака Яковлевича настроение было неважным — он очень переживал разлуку с женой, которую горячо любил. Как мог, я пытался его утешить. Впрочем, скоро он возвратился к себе домой.

Последний раз мне пришлось увидеть Исаака Яковлевича у него дома уже после безвременной кончины его жены. Исаак Яковлевич обладал большим мужеством. Будучи болен тяжелой онкологической болезнью и полностью сознавая это, он спокойно продолжал свою работу и не переставал интересоваться вопросами развития физики.

На этом последнем этапе своей жизни Исаак Яковлевич проявлял большую заботу об организации в Дубне в Лаборатории ядерных проблем использования пучков ускорителя для лечения онкологических заболеваний, зная, конечно, что это может принести пользу уже не ему, а другим больным.



*И. Я. Померанчук и Н. Н. Боголюбов  
на 12-й Рочестерской конференции в Дубне, 1964 г.*

*Б. М. Понтекорво*

## И. Я. ПОМЕРАНЧУК И НАЧАЛО ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ \*

Впервые я встретился с Исааком Яковлевичем Померанчуком в конце 1950 г. Тогда я не знал ни одного слова по-русски и мы говорили на английском языке. Английский язык Исаак Яковлевич знал достаточно хорошо, чтобы понимать в совершенстве любую статью в области физики и излагать, пусть с грамматическими ошибками, свои научные мысли. В это время раз в неделю он приезжал в Дубну и каждый раз выступал на семинаре. Тогда в Дубне работал самый мощный в мире ускоритель, ускоряющий протоны до энергии в несколько сот МэВ. И. Я. Померанчука приглашали для воспитания молодого поколения экспериментаторов, которые делали первые исследовательские шаги в области физики высоких энергий. С дубненскими теоретиками он также проводил несколько

\* Выступление в Центральной лектории Политехнического музея 31 мая 1973 г. на вечере памяти И. Я. Померанчука.

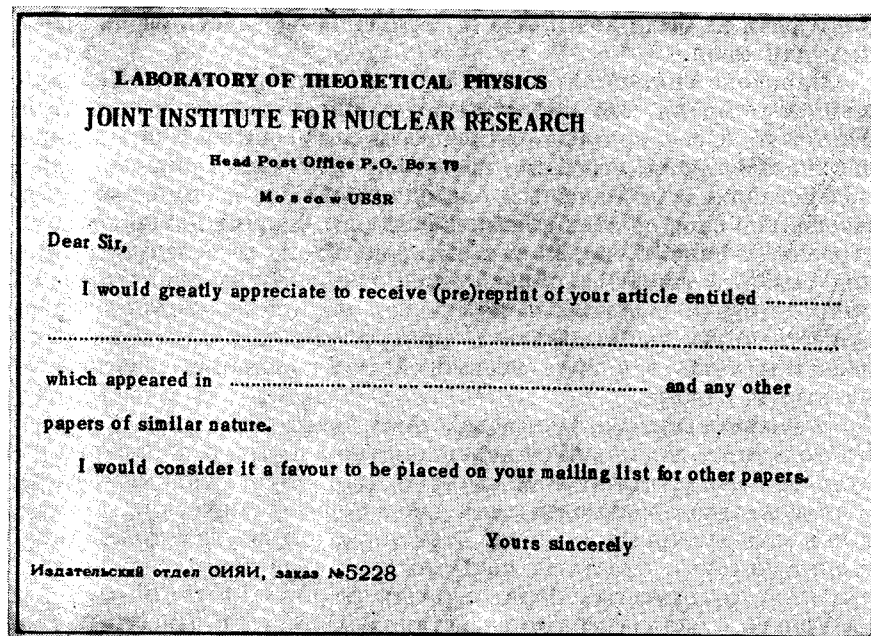


*И. Я. Померанчук и А. И. Алиханов  
перед зданием Лаборатории теоретической физики в Дубне.  
Фотография начала 60-х гг.; была выпущена в виде открытки ОИЯИ.  
На обороте открытки — бланк запроса о присылке репринта*

часов. Одним словом, он был официальным «просветителем» дубненского института.

Его выступления были *всегда* удачными и увлекательными. Он обладал даром быть понятным слушателями самой различной подготовки. Он мог рассказать экспериментаторам об интересной работе, которая только что была опубликована. В этом случае он всегда подчеркивал главные физические идеи, но мало останавливался на математических деталях и вообще на вопросах математического аппарата. Конечно, иной была ситуация, когда он выступал на теоретическом семинаре. Кстати, в оригинальных научных работах И. Я. Померанчука аппарат всегда был адекватным исследуемой задаче.

Если же в промежутке между двумя его поездками в Дубну появлялась яркая по своим результатам экспериментальная работа, то он консультировался с экспериментаторами, суждение которых высоко ценил, и, если, по мнению последних, работа была серьезной, обязательно комментировал ее. При этом он совершенно не касался экспериментальной части и обсуждал теоретические следствия экспериментальных результатов независимо от того, что было написано по этому поводу в оригинальной работе. Таким образом, его выступления приобретали оригинальный характер и были в высшей степени интересными.



Я очень признателен Исааку Яковлевичу за то, чему научился у него тогда, и уверен, что все без исключения физики, работавшие в то время в Дубне, ему очень обязаны.

Я хочу рассказать об одном эпизоде, который хорошо иллюстрирует его функцию «просветителя». Я расскажу довольно подробно, так как это даст мне возможность остановиться на некоторых вопросах физики элементарных частиц. Главные действующие лица в рассказе — это гипероны и каоны — частицы, которые сегодня называются странными частицами. Необходимо учесть, что слово «странность» — это сегодня технический термин, но когда-то давным-давно эти частицы назывались странными потому, что они имеют удивительные свойства. Чем они были удивительны? Они удивительны тем, что рождаются в столкновениях при высоких энергиях с очень большой вероятностью, а распадаются самопроизвольно с очень большим временем жизни (т. е. с малой вероятностью).

Этот кажущийся парадокс — большая вероятность рождения и большое время жизни — был замечен мною независимо от американских физиков Гелл-Манна и Пайса в 1951 г., и я очень кратко рассказал о моих суждениях Исааку Яковлевичу, когда он приехал в Дубну на семинар. Он сразу же выступил на семинаре и сказал, что ему понравились мои замечания и он хотел бы рассказать о них. Он говорил не менее часа, и при этом

в его речи не было воды. Его выступление оказалось очень полезным для меня.

Парадокс снимается, если допустить вопреки мнению, царившему в то время, что процессы рождения странных частиц отличаются по своей природе от процессов их распада. Как мы хорошо знаем сегодня, странные частицы рождаются в сильных взаимодействиях, а распадаются благодаря слабым взаимодействиям. Несколько слов об этих взаимодействиях. Физики давно знакомы с разными силами, но, может быть, не все из них задумывались над тем, что типов взаимодействий, глубоко различающихся по природе, очень мало. Если не считать тяготения, которое играет существенную роль только в присутствии огромных масс, то известны лишь три вида взаимодействий: сильные, электромагнитные и слабые.

Электромагнитные взаимодействия известны в физике давно. Благодаря им движущийся неравномерно электрический заряд испускает электромагнитные волны (например, видимый свет). С этим классом взаимодействия связаны все химические, атомарные и молекулярные явления. Электромагнитные взаимодействия, теория которых блестяще подтверждается опытом, глубоко связаны с электрическим зарядом элементарных частиц.

Теперь о сильных взаимодействиях. Они стали известны только после раскрытия внутренней структуры атомного ядра. В 1932 г. было найдено, что атомное ядро состоит из нуклонов (нейтронов и протонов). И именно сильные взаимодействия соединяют нуклоны в ядре, т. е. отвечают за ядерные силы, которые в отличие от электромагнитных характеризуются очень малым радиусом действия (около  $10^{-13}$  см) и большой интенсивностью.

Кроме того, сильным взаимодействием обусловлены столкновения частиц высоких энергий, в частности столкновение, в котором рождаются каоны и гипероны, т. е. странные частицы. Поэтому странные частицы и рождаются с большой вероятностью.

Интенсивность взаимодействий удобно оценивать по так называемой длине свободного пробега частиц в некотором веществе, т. е. по средней величине пути, который частица может пройти в этом веществе до разрушающего или отклоняющего столкновения. Ясно, что, чем больше длина свободного пробега, тем менее интенсивно взаимодействие.

Если рассматривать частицы очень высокой энергии, то соударения, обусловленные сильными взаимодействиями, характеризуются длиной свободного пробега частиц, равной по порядку величины десяткам сантиметров в меди или железе.

Иначе обстоит дело при слабых взаимодействиях. Нейтрино, например испытывающее только слабые взаимодействия, обладает колоссальной проникающей способностью. Длина его свободного пробега в плотном веществе, скажем в железе, измеряется

в астрономических единицах, например толщиной чугунной плиты, в  $10^9$  раз превышающей расстояние от Земли до Солнца.

Мне остается привести некоторые примеры процессов, обусловленных слабыми взаимодействиями. Это, конечно, редчайшие соударения нейтрино с нуклонами при его прохождении через вещество. Зарегистрировать такие события необычайно трудно, но возможно. Но имеется ряд «слабых» процессов, более доступных исследованию. Речь идет о многочисленных самопроизвольных превращениях элементарных частиц, например о бета-распаде ядер. Оказывается, что такие превращения обусловлены слабыми взаимодействиями. Самопроизвольные распады странных частиц маловероятны, как я уже сказал, как раз потому, что они обусловлены слабым взаимодействием.

Все, что я вам сказал, сегодня представляет тривиальную истину. Но утверждение о существовании четырех типов взаимодействия было четко сформулировано только в 1953 г. благодаря работам советских и зарубежных ученых, и особенно американского физика Гелл-Манна.

Еще один пример просветительской деятельности Исаака Яковлевича Померанчука в Дубне. В начале 50-х годов появилась очень интересная работа польского физика Даныша о наблюдении гипер-ядер. Что такое гипер-ядро? Как вы знаете, атомное ядро состоит из нуклонов — нейтронов и протонов. Например,  $Li_3^6$  состоит из трех протонов и трех нейтронов. Гипер-ядро — это квазоядро и состоит из нуклонов и одной странной частицы — лямбда-частицы. Например,  $Li_3^6$  состоит из трех протонов, двух нейтронов и одной лямбда-частицы.

Во время поездки в Дубну Исаак Яковлевич узнал о наблюдении Даныша и сразу рассказал об этом на семинаре. Учтите, что в работе Даныша была дана правильная интерпретация наблюдения, т. е. была сформулирована гипотеза о существовании гипер-ядра как системы из нуклонов и одной лямбда-частицы, но практически не обсуждались проблемы физики гипер-ядер. Померанчук тут же указал на особенность гипер-ядер. Принцип Паули, который так важен для систем, содержащих ряд одинаковых нуклонов, не играет роли для лямбда-частиц в гипер-ядре, так как таких частиц только одна. Померанчук исходил из наблюдения Даныша и прочел в течение часа прекрасную лекцию о том, чем гипер-ядра отличаются от обычных ядер, о том, какие сведения будут получены с помощью исследования гипер-ядер, о разных каналах их распадов, о силах между гиперонами и нуклонами и вообще сформулировал программу теоретических и экспериментальных исследований гипер-ядер, которая и сегодня звучала бы очень актуально. Очень жаль, что нет магнитофонной записи этого доклада. Теперь физика гипер-ядер — важный раздел фи-



зики элементарных частиц. Она развивается именно по пути, указанному Исааком Яковлевичем Померанчуком в этом неопубликованном докладе. Кстати, интересно, что Даныш не так давно уже нашел случай с гипер-ядром, в котором находится уже не одна, а две лямбда-частицы.

Человеческие качества Исаака Яковлевича проявились отчетливо в его научных выступлениях. Он был энтузиастом и как ученый, и как воспитатель, был нетерпим к халтуре в науке и к непринципиальности вообще. Он был смелым человеком, бесконечно преданным науке, обладал тонким юмором и умел заражать других своей бодростью.

С. М. Биленький

## ИСААК ЯКОВЛЕВИЧ ПОМЕРАНЧУК

Вклад Исаака Яковлевича Померанчука в физику общеизвестен. Я хотел бы поделиться некоторыми отрывочными воспоминаниями о нем.

Я познакомился с Исааком Яковлевичем в 1951 г. После некоторого перерыва он в то время возобновил чтение лекций в МИФИ. Я очень обрадовался (и испугался), когда декан нашего факультета Л. П. Бахметьев предложил мне делать диплом у И. Я. Померанчука. Вначале были, конечно, экзамены (механика, классическая электродинамика, квантовая механика). Потом я получил тему диплома. Довольно быстро мне стал понятен один из принципов работы И. Я. — он требовал хорошего знания основных экспериментальных фактов. По-моему, Исаак Яковлевич просто не мог понять людей, занимающихся элементарными частицами и не знающих всего, что известно о частицах из опыта (как сейчас мы бы сказали, основных сведений, содержащихся в «Таблицах Розенфельда»). В то время, когда началась моя работа над дипломом (вычисление сечения фоторождения пары пионов на нуклоне), все физики обсуждали известный опыт по определению четности пиона. Я еще этих статей в журналах не читал и ничего не знал об этом эксперименте. Когда я спросил И. Я., какой считать четность пиона, то последовал такой серьезный разговор (с извинениями на следующий день), после которого я прочно усвоил это очень существенное требование Померанчука.

Однажды после лекции в МИФИ Исаак Яковлевич рассказал нам о том, что под Москвой создается ускорительный центр и что ему поручено возглавить в этом центре группу теоретиков. Он предложил желающим попасть в эту группу обратиться к нему. Так я попал в теперешнюю Дубну. Еженедельно на один

день в Дубну приезжал И. Я. Померанчук. Вместе с ним часто приезжали И. М. Шмушкевич, А. Б. Мигдал, Б. Т. Гейликман, Я. А. Смородинский. Приезд в Дубну И. Я. был радостным событием для всего института (теперешней Лаборатории ядерных проблем — ЛЯП). В этот день устраивался семинар, на котором И. Я. часто выступал: докладывал свои работы, делился новостями, комментировал то, что он услышал от физиков Дубны. Это были очень яркие, исключительно содержательные, незабываемые выступления. Мы учились на этих семинарах не только понимать, но и любить физику. И. Я. не терпел недостаточно подготовленных выступлений на семинарах. Однажды меня подтолкнули на такое выступление. Разговор после семинара был для меня очень хорошим уроком.

Исаак Яковлевич ценил каждую минуту в Дубне. Как правило, он не ходил даже обедать («... я сюда приехал не для того, чтобы обедать. Вы в столовую? Купите мне, пожалуйста, 100 граммов сыра и хлеба»). Все время уходило на разговоры с экспериментаторами и теоретиками. Очень он любил говорить с Б. М. Понтекорво. И. Я. Померанчук сыграл исключительно важную роль в определении программы исследований на синхрофазотроне ЛЯП в 50-е годы.

Исаак Яковлевич любил физику, был беззаветно ей предан. Он не позволял себе тратить время ни на что другое. Я помню, он говорил мне, дипломнику: чтобы стать физиком, нужно, во-первых, любить физику, во-вторых, нужна внутренняя дисциплина.

Последний раз я видел Исаака Яковлевича в больнице. В то время обсуждался вопрос о том, можно ли провести облучение И. Я. пучком протонов или пионов в Дубне. Группа физиков из Дубны приехала в больницу. Никогда не забуду мягкой, застенчивой и, как мне показалось, несколько виноватой улыбки, с которой нас встретил Чук. Он присутствовал на совещании, в котором участвовали физики и врачи. Мужество, с которым вел себя Исаак Яковлевич, не укладывается в рамки обычных человеческих представлений. Он с энтузиазмом обсуждал физические аспекты проблемы. Это совещание было похоже на семинар. Я ушел из больницы совершенно потрясенный. Через несколько месяцев Исаака Яковлевича не стало.

В памяти всех, кто был знаком с И. Я. Померанчуком, он навсегда останется подлинным рыцарем Науки, человеком исключительной скромности и мужества.

Л. И. Липидус

## И. Я. ПОМЕРАНЧУК В ДУБНЕ, КОТОРАЯ ТОГДА ТАК НЕ НАЗЫВАЛАСЬ

Многие люди могли бы сказать что-то о «волжском периоде» деятельности И. Я. Померанчука, которую каждый, конечно, видел несколько со своей точки зрения. Одна из них излагается фрагментарно ниже.

Исаака Яковлевича привели в Дубну его научные интересы. Его занимала в то время физика нуклон-нуклонных соударений, физика пионов и многое другое. Однажды с докладом о своей работе, как помнится осенью 1950 г., он приехал к нам. Поскольку институт на Волге был тогда совсем небольшим, приезд И. Я. Померанчука превратился в большое событие. Помнится, И. Я. въехал на территорию Лаборатории на совсем старом «москвиче», очень похожем на «оппель-кадет».

В то время дирекция Лаборатории на Волге искала руководителя группы теоретиков. И. Я. Померанчука интересовала физика, которая начала изучаться на Волге. Он «посвятил» к нам И. М. Шмушкевича. Но дирекция Лаборатории на Волге хотела бы большего и без ведома Исаака Яковлевича и А. И. Алиханова санкционировала приказ самого высокого тогда начальства о назначении И. Я. Померанчука руководителем работ по теоретической физике на Волге. И хотя работы эти были в русле научных интересов И. Я., он с самого первого дня отказался получать здесь зарплату. Помнится, что первое время после грозного приказа, которого нельзя было ослушаться, он проводил у нас половину своего времени. Но постепенно и неуклонно И. Я. уменьшал продолжительность своего пребывания у нас. Дирекция на Волге поняла, что удержать И. Я. невозможно. Поиск руководителя продолжался. На короткое время появился у нас В. А. Фок, но он был связан только с Ю. А. Яппой.

Около 1952 г. неожиданно для И. Я. Померанчука, который вместе с Я. А. Смородинским, В. Б. Берестецким, А. Б. Мигдалом, Б. Т. Гейликманом, иногда с другими московскими физиками продолжал систематически бывать на Волге, влиял на программу экспериментов, руководил нами — теоретиками, на Волге появились сначала Д. Д. Иваненко и А. А. Соколов, а затем Я. П. Терлецкий, который стал нашим официальным руководителем. И. Я. Померанчук перестал посещать нас, хотя на семинарах Л. Д. Ландау продолжал руководить некоторыми из нас.

И. Я. Померанчук был очень высокого мнения о Б. Понтекорво. Считал «оскорблением» избрание его вначале членом-корреспондентом АН СССР, а не сразу академиком. И. Я. решающим образом повлиял на направление в Дубну С. М. Биленького.



И. Я. Померанчук и Л. И. Липидус  
в конференц-зале Лаборатории ядерных проблем. Начало 60-х гг.

Остальные теоретики Дубны первого поколения достались И. Я. Померанчуку от отдела кадров.

Исаак Яковлевич хорошо отзывался о тех наших работах, которые ему нравились. Помню, что он не видел никаких оснований для изотопической инвариантности. Когда я заинтересовался этим и предложил некоторые экспериментальные следствия, И. Я. сказал: «Я не верю в это. Но разберитесь». Позже он очень радовался четким экспериментальным следствиям сохранения изоспина.

Теоретические работы И. Я. Померанчука того времени хорошо известны, и нет необходимости их комментировать. Остановлюсь на некоторых примерах работы И. Я. на Волге, как я их помню, на его влиянии на других.

Вероятно, Б. Понтекорво и С. М. Биленький уже описали в своих записках (как это они делали, когда мы отмечали в Дубне годовщину кончины И. Я. Померанчука) то мощное впечатление, которое произвел на всех на Волге доклад-импровизация Исаака Яковлевича о гипер-ядрах. Б. Понтекорво рассказал ему о первых сообщениях о работах Даныша и Пневского. И сразу же Исаак Яковлевич вышел на семинаре к доске и прочитал лекцию; нет, он просто при нас думал вслух о том, как должна выглядеть таблица ядер, в которых один из нейтронов заменен на гиперон.

Другой пример: на семинаре М. И. Подгорецкий сделал доклад, в котором изложил результаты своего анализа первых данных о взаимодействии медленных пионов с атомными ядрами. Кажется, И. Я. что-то уже знал об этой работе М. И. Из анализа Подгорецкого следовало, что пионы с нуклонами взаимодействуют слабо. Первые опыты по изучению пион-нуклонного взаимодействия приводили к заключению о сильном пион-нуклонном взаимодействии. После доклада Подгорецкого Померанчук сказал: «Мы выслушали очень интересный доклад, но я думаю, что вывод из него неправилен». Позднее И. Я. «организовал» проведение анализа проблемы, как помнится, Б. Л. Иоффе, а может быть, А. П. Рудиком. Анализ показал, что впечатление И. Я. было совершенно правильным. По реакции на доклад М. И. Подгорецкого было видно, что Исаак Яковлевич относился к докладчику внимательно и хорошо.

Как знают все, кому посчастливилось общаться с Исааком Яковлевичем, он с большим интересом относился к вопросам (не только к своему докладу) на семинарах. Для этого он постоянно и делал доклады о своих работах в разных местах. Помнится, он был очень доволен вопросом А. А. Тяпкина, который после доклада И. Я. о периферических столкновениях спросил его, нельзя ли применить подобные идеи к связанным состояниям. Однако существовал некоторый уровень знаний, который И. Я. считал обязательным. Ниже этого уровня в вопросах опускаться было нельзя. Здесь И. Я. начинал ругаться, иногда публично. Мне попало, когда, предложив в 1950 г. использовать в физике адронов свечение Вавилова—Черенкова (чему И. Я. был очень рад; для того чтобы экспериментаторы поверили молодому теоретику, И. Я. организовал мою консультацию у И. М. Франка), я рассматривал показатель преломления далеко за пределами частот, где это можно делать. Публично И. Я. ругался, когда задававший вопрос не понимал того, что спрашивал.

Помню, как в комнату, где мы работали вместе, пришел один из экспериментаторов. Это было вскоре после работы А. Б. Мигдала об эффектах взаимодействия в конечном состоянии. Пришедший экспериментатор спросил что-то вроде: «Угловое распределение  $\pi^+$ -мезонов от  $pp$ -соударения понять можно: один протон ударяет другой в затылок и у того из глаз сыплются искры. А вот как быть с угловым распределением родившихся нейтральных мезонов?» И. Я. несколько мгновений «овладевал» сказанным. Потом начал резко выговаривать пришедшему. Пока я потихоньку не вышел из комнаты, я слышал: «Можно обвинять теоретиков, что они недостаточно объяснили это экспериментаторам. Можно требовать, чтобы они это сделали еще и еще раз, но как можно после работы Мигдала задавать такие несуразные вопросы?..»

Помнится также, как И. Я. Померанчук повлиял на работы А. Б. Мигдала по теории взаимодействия в конечном состоянии.

Инициатором этой работы А. Б. Мигдала был Л. М. Сороко, который обратил внимание А. Б. на свежие экспериментальные данные о спектрах пионов, родившихся в  $pp$ -соударениях. Первый вариант теоретической разработки, проведенной А. Б., был И. Я. забракован, поскольку в нем использовались волновые функции на больших расстояниях, а в задачу входили малые расстояния. Очень быстро А. Б. перестроился, и возникло то, что сейчас известно.

Когда по инициативе И. Я. Померанчука Ю. М. Казаринов, В. П. Джелепов и другие провели опыты по изучению обменных нейтрон-дейтронных столкновений с малыми передачами импульса и получили согласие с расчетами И. Я., они были удивлены тем, что Исаак Яковлевич говорил не о своей работе, а о силе теоретической физики вообще.

Однажды, желая похвалить первый на Волге эксперимент по проверке изотопической инвариантности, Исаак Яковлевич сказал на семинаре, что «ради этого эксперимента стоило строить Лабораторию». Не все, естественно, были довольны этой оценкой одной работы. («А мои работы хуже?») По-видимому, дирекция что-то сказала об этом Исааку Яковлевичу. Очень смущенный, он пытался потом говорить и о других работах, но это было позже.

К теоретикам он относился заботливо, но вполне по-деловому, строго. Приезжая каждую неделю, он требовал отчета о том, что сделано со времени его последнего приезда. Сотрудникам попадало по первое число, если им мало что было сказать, тем самым И. Я. предостерегал их от «отвлечений» от работы.

В значительной мере благодаря И. Я. Померанчуку (и Я. А. Смородинскому) мы могли еженедельно посещать семинар Л. Д. Ландау. Для этого нам постоянно при отсутствии тогда поезда выделяли автобус для поездки в Москву. Время начала работы семинара Л. Д. Ландау было перенесено на полчаса, чтобы нам не надо было выезжать слишком рано.

Значительно позже, до конца своих дней, Исаак Яковлевич продолжал интересоваться нашими делами. Его суждение было определяющим, когда мне предложили организационно-административную деятельность в Дубне.

И на всю жизнь я сохраняю в памяти его «спасибо» за наши интенсивные действия по организации исследования возможности лечения онкологических больных с помощью ускоренных у нас протонов в последний год жизни И. Я. Померанчука. Его внимание и личный контакт по этому поводу с В. А. Кириллиным (тогда председателем ГКНТ) были очень важны для развития работ этого направления в нашей стране. Мне помнится одно заседание ГКНТ, где И. Я. Померанчук, кажется, не сказал ни слова, но все собрано было иницировано им.

Д. В. Ширков

## ВСТРЕЧИ

### С ИСААКОМ ЯКОВЛЕВИЧЕМ ПОМЕРАНЧУКОМ

Первые наши встречи относятся к самому началу 50-х годов, когда я еще только вступал в физику. Осталось в памяти умение Исаака Яковлевича слушать. Слушать серьезно и доброжелательно независимо от научного ранга и возраста собеседника. Слушать терпеливо, и если возражать, то мягко и тактично, так, что и возражением не выглядит, а скорее добрым советом. Из ненаучных впечатлений — поразительная деликатность.

Сценка: входим вдвоем в вестибюль большого здания. И вот заслуженный профессор, лауреат, автор книг не соглашается пройти первым в дверь, придерживаемую начинающим научным сотрудником, который почти вдвое моложе профессора: «Только после Вас!» После долгих препирательств уступаю. Вторая дверь — начало сцены повторяется. Нахожу логический довод — соглашаюсь проходить первым лишь в нечетные двери. После некоторого обсуждения Исаак Яковлевич соглашается. На следующий день жить уже легче, стоит лишь напомнить о «Вашем, Исаак Яковлевич, праве на четные двери».

Следующий яркий эпизод. Семинар по теоретической физике осенью 1957 г. в Дубне. Исаак Яковлевич рассказывает свою знаменитую теорему о равенстве полных сечений. После доклада оживленная дискуссия. Борис Валентинович Медведев, поддерживаемый мною, дает более простой, как нам кажется, вариант рассуждений. Исаак Яковлевич слушает, вникает и настоятельно советует опубликовать наш вариант. Через несколько дней после семинара спрашивается, послали ли статью, и огорчается, услышав отрицательный ответ, а затем, как выяснилось впоследствии, делает примечание к тексту своей работы.

Начало 60-х. В один из приездов из Новосибирска случайно встречаю Исаака Яковлевича в троллейбусе, идущем по Ленинскому проспекту. И вот все три или четыре остановки, которые едем вместе, заполнены монологом Исаака Яковлевича о реджистике и методе угловых моментов и вновь и вновь повторяемым советом заняться этим перспективным направлением.

К. А. Тер-Мартirosян

И. Я. ПОМЕРАНЧУК —

### ВСТРЕЧИ И ГОДЫ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ

С Исааком Яковлевичем Померанчуком судьба меня свела очень давно, в конце 40-х годов. Я был тогда молодым аспирантом (а потом сотрудником) ЛФТИ, жил в Ленинграде, сдал экзамены теорминимума Льву Давидовичу Ландау и приезжал в Москву в командировки, на семинары Ландау в Институте физических проблем, изредка выступал на них. Там среди сотрудников Ландау я увидел, сначала боковым зрением, а потом и очень ясно, живого, небольшого роста, худого человека лет тридцати. Волосы у него были черные, короткие и обращали на себя внимание тем, что торчали вверх, как иглы у ежа. Часто он бывал небрит, появлялся в институте с буйной, жесткой растительностью на лице, подбородке и шее, причём пучки волос росли в разные стороны, так что Исаак Яковлевич в это время своим своим обликом еще больше походил на ежа. Для многих это сходство еще усиливалось тем, что он был иногда колюч и на словах — не боялся говорить правду в лицо, даже если она была неприятной для собеседника, и, экономя постоянно время, обрывал разговор, если чувствовал, что ничего нового разговор (или собеседник) не сулит. Исаак Яковлевич был одним из наиболее активных и старших по стажу работы членов школы Ландау. Первое, что обращало на себя внимание при встрече с ним, — это некоторая его жизненная наивность и живая, непосредственная заинтересованность в науке.

Во время семинаров в ИФП, на которых собиралось 30—40 физиков-теоретиков очень высокого класса, он был всегда серьезен, не боялся задавать вопросы, даже самые наивные, если они проясняли физику, которая обсуждалась. Получив ответ, разъясняющий суть дела, даже в самом простом случае, он словами и всем своим видом демонстрировал благодарность за разъяснение и долго после этого — большое уважение к автору этого пояснения. Часто этим автором был Ландау, который насмешливо добавлял к своему пояснению что-либо ехидное насчет непонятности или навязчивых мыслей в данной области физики, бытующих, по его мнению, у Чука, как он называл Исаака Яковлевича. Это, однако, никак последнего не трогало, для него всегда было главным, что в результате был понят какой-то новый вопрос. Если было нужно, он опять через несколько минут самоотверженно поднимал, как казалось, еще более наивный вопрос, всячески извиняясь и громко осуждая как свое непонимание, так и вообще свою вину перед лицом семинара, рискуя, как он говорил, «опять получить по голове». Часто потом выяснялось, что фактически эти вопросы были

очень важны и таили в себе за простой формулировкой серьезные следствия.

Во время перерыва и после семинаров в ИФП (и в других институтах) Исаак Яковлевич, несмотря на большую занятость, часто подолгу не уходил, обсуждая с теоретиками разного возраста и стажа новые физические идеи или новые эксперименты. Глаза его загорались, если он узнавал что-либо новое, — казалось, ничего не могло быть для него интересней. Но Исаак Яковлевич не был абстрактным ученым, не интересующимся жизненно важными вопросами. Свежие газеты он просматривал с утра, горячо обсуждал политические и международные новости, вопросы институтской жизни, хранил в памяти самые точные сведения о важных современных и исторических событиях.

Шли годы. Колючая шевелюра Исаака Яковлевича стала немногим седеть, его избрали членом Академии наук, и заслуги его получили признание физиков всего мира, но он по-прежнему посещал все интересные семинары — не только теоретический в ИФП, но обязательно и общие семинары с участием физиков-экспериментаторов в ИТЭФе, ФИАНе, ИФП — и так же активно выяснял на них все непонятные вопросы. Невозможно было представить себе, чтобы Исаак Яковлевич не явился на семинар, где обсуждалась какая-либо новая интересная работа, особенно если он лично имел к ней какое-либо отношение.

Помню одну из первых моих встреч с Исааком Яковлевичем вне рамок семинара Ландау еще в конце 40-х годов. Проездом с юга в Ленинград я оказался в Москве и рано утром (около 8 часов) зашел к нему домой, кажется по его просьбе; что-то ему надо было передать в ЛФТИ. Был теплый день начала сентября, он сидел дома почти одетый, был весь обложен рукописями книги по физике ядра, над изданием которой работал тогда вместе с Александром Ильичем Ахиезером. Помню, он встретил меня очень приветливо (хотя появился я для него неожиданно) и вдруг стал очень твердо настаивать (с «железом» в голосе) на том, что больше в жизни ни одну книгу не напишет. Это меня удивило, так как книга «Некоторые вопросы теории ядра», о которой шла речь, казалась очень удачной — многие главы в ней до сих пор являются лучшим изложением теории ядерных реакций. Но Исаак Яковлевич твердо говорил, что писание книг — это не его дело и что оно мешает научной работе. Так это и получилось — больше книг он не издавал.

Мне всегда казалось, что в Исааке Яковлевиче жили одновременно два человека. Один вел аскетическую, замкнутую жизнь, весь уклад которой был подчинен требованиям работы, а другой — общительный, открытый, просто и темпераментно интересующийся наукой человек — был мне близок и четко выступал в нем, особенно на обсуждениях и научных семинарах, существенно влияя на его жизнь и привязанности.

По семейным обстоятельствам Исаак Яковлевич неожиданно появился в Ленинграде летом 1948 г., переведясь на работу в ЛФТИ и, получив комнату, поселился в самом конце Васильевского острова. Там он пробыл недолго, кажется около полугода, за это время я один раз был у него по его приглашению. Помню, мы целый день в воскресенье обсуждали очень актуальные тогда вопросы ядерной физики, в частности возможность излучения  $\gamma$ -кванта ядром атома (связанного в кристалле) без сопровождения отдачи ядра. Исаак Яковлевич был очень заинтересован этой идеей, но, к сожалению, мы так в вопросе и не разобрались, и через десятилетие это явление было обнаружено Мессбауэром и стало широко известно. Комнатка на Васильевском острове была меблирована очень скромно: стол, стулья и топчан. Померанчук вел там, как сам говорил, «спартанский» образ жизни. Потом он женился и привез в Москву жену с двумя дочерьми, получив большую квартиру, но болезни в семье заботили его постоянно.

В 50-е годы и позже я был связан по работе с Ландау и, хотя учеником Исаака Яковлевича не был, судьба нас постоянно сближала из-за общности научных интересов. В результате в 1956 г. я перевелся из ЛФТИ, где был хорошо устроен и имел сильную группу физиков, активно работавших со мной, на работу в Москву в Теплотехническую лабораторию (как тогда назывался ИТЭФ) в теоретический отдел Померанчука.

После моего переезда виделись мы с Исааком Яковлевичем и имели контакты по работе почти ежедневно. Утром, до 9 часов, он приезжал в свой кабинет и работал там часто до самого вечера. Из ЛФТИ ко мне часто приезжали сотрудники: Володя Грибов, Алеша Ансельм, Игорь Дятлов и другие. Было время развития квантовой теории поля и начало развития теории взаимодействия частиц при очень высокой энергии (той, которой тогда еще не было в распоряжении у экспериментаторов); скоро стала широко известной теорема Померанчука о равенстве сечений при высоких энергиях. Первые выступления Володи (Владимира Наумовича) Грибова на семинарах у нас в ИТЭФе и в Математическом институте им. Стеклова были не вполне удачными. Он стеснялся, не все говорил ясно, хотя к этому времени был уже сформировавшимся и, как я считал, очень способным теоретиком. Исаак Яковлевич также увидел в нем сильного физика, что быстро подтвердилось появлением серии важных работ Грибова по физике частиц высоких энергий.

Несколько лет мы тесно работали вместе, причем в какое-то время, в конце 1964 г., Исаак Яковлевич высказал очень простую мысль, развитие которой, как тогда представлялось, могло бы привести к полной феноменологической теории взаимодействия элементарных частиц при высокой энергии. Мы втроем (Померанчук, Грибов и я) пытались развить эту идею, значительно продвинулись вперед, сформулировав так называемые реджеонные условия

унитарности, причем главный вклад в работу внес Грибов. Мой вклад был важен на первых этапах работы, следующие несколько лет были для меня очень трудными (отчасти из-за болезни в семье), и от работы я был практически отключен. К сожалению, в этот же период обнаружилось смертельное заболевание Исаака Яковлевича. Он героически работал до последних часов жизни, но занимался не этой работой, а принял участие в другом интересном исследовании, которое и довел в последние дни жизни до конца. Наша совместная работа так и не была окончена при его жизни и уже после смерти Исаака Яковлевича была блестяще завершена одним Володей Грибовым, создавшим в 1967 г. на ее основе технику реджеонных графиков. Дальнейшее развитие этого направления — физики померонов (померон — от фамилии Померанчука) — было проведено мною совместно с физиками МФТИ и Дубны в 70-х годах и завершено уже после создания кварковой теории в 80-х годах нашими же работами (моими и А. Б. Кайдалова) по померонно-фруассаронной теории рождения частиц при сверхвысоких энергиях.

Всякое дело Исаак Яковлевич старался доводить до конца, особенно если это касалось физики. В какой-то период болезни (за несколько месяцев до смерти) состояние его здоровья улучшилось и ему захотелось узнать не просто научные новости (он и так за ними следил во все время болезни), но и то, как идет работа у каждого из нас — теперь уже теоретиков старшего поколения ИТЭФа. Помню, как мы приехали в Онкологический центр на Каширском шоссе проводить его и для этого научного разговора. Он был очень рад встрече, особенно своему большому другу Владимиру Борисовичу Берестецкому, был очень оживлен и с большим интересом говорил об интересовавшем в то время физиков процессе рождения адронов при  $e^+e^-$ -аннигиляции. Говорил он об этом больше всего с Борисом Лазаревичем Иоффе — его соавтором по работе, обсуждал свойства этого процесса. Мне лично было вдвойне тяжело и тоскливо — не только от сознания, что это последний научный разговор, но и оттого, что я тогда не мог ничем порадовать Исаака Яковлевича: мои дела в то время не клеились.

Исаака Яковлевича уже давно нет, но далекие 50-е и 60-е годы невольно напоминают мне о тех захватывающе интересных обсуждениях, которые возникали у нас в период совместной (и, увы, не очень для меня тогда продуктивной) работы. Исаак Яковлевич раскалялся сам и раскалял окружающих своим темпераментом. Его чистое, честное отношение к науке не оставалось безответным: проходили недели тяжелого труда, после чего у него появлялись простые ясные результаты, заметно углубляющие наши представления о природе.

Л. Б. Окунь

## И. Я. ПОМЕРАНЧУК — КАКИМ Я ЗНАЛ ЕГО (1950—1966 гг.)

*В Механическом институте*

Впервые я увидел его в 1950 г. Он шел по полутемному коридору старинного здания на Кировской, где находился в то время Московский механический институт. В одной руке он нес плотно набитый портфель, другой прижимал к боку толстую стопку темно-зеленых журналов. Взгляд был строгий, походка быстрая. Несмотря на тяжелую ношу, он был прям, строен. Что-то в его облике притягивало, останавливало. Я спросил у товарища, кто это, и услышал: «Померанчук».

А с начала 1951 г. Исаак Яковлевич Померанчук читал нашему четвертому курсу инженерно-физического факультета лекции по квантовой механике. Потом были лекции по релятивистской квантовой механике для небольшой группы теоретиков.

Его лекции были необычны, как он сам. Он ставил задачу и шел к ней напролом, как танк, продельвая на доске все выкладки. Если запутывался, то начинал все сначала, от нуля. Выявлял ошибку и доходил до окончательного выражения со всеми коэффициентами. После этого он обязательно объяснял физический смысл результата и тщательно обсуждал все предельные случаи, устремляя в нуль (или в бесконечность) тот или иной параметр.

Рассмотрению предельных случаев он придавал очень большое значение. Для него это был не педагогический прием, а один из основных методов работы, позволявший выделять самое существенное.

Много лет спустя в мастерской скульпторов Лемпорта, Силиса и Сидура я услышал его замечание: «В искусстве как в науке: главное — это знать, чем можно пренебречь». Пренебрежение несущественным было его кредо. Но в том, что он считал существенным, он не пренебрегал ни одной деталью.

*Журналы*

Летом 1951 г. Исаак Яковлевич руководил учебной практикой небольшой группы студентов, в которую попал и я. Он дал мне задание: изучить работу Ферми, незадолго до того опубликованную в японском журнале «Прогресс теоретической физики». Работа была посвящена множественному рождению мезонов при очень высоких энергиях. Кроме того, нужно было знать все известные к тому времени экспериментальные данные, относящиеся к мезонам. Самые свежие данные надо было извлекать из «Бюллетеня американского физического общества». Самостоятельная

работа студента с журналами была важным элементом системы воспитания.

Сам Исаак Яковлевич с журналами не расставался. Журналы, которые бросились мне в глаза, когда я впервые увидел его, были выпуски «Физикл Ревью». Портфель его был обычно набит номерами журнала «Нуово Чименто», который в то время печатал много хороших статей по новым частицам. Исаак Яковлевич читал их при любом удобном случае. На оглавлениях журналов рядом с заинтересовавшей его статьей он ставил инициалы кого-либо из своих учеников или коллег и обсуждал с ними статью. Журналы с его пометками хранятся в мемориальной библиотеке Померанчука в ИТЭФе. Многие из этих пометок послужили началом научных работ.

### *Встреча в ВИНТИ*

После окончания Механического института я работал во Всесоюзном институте научно-технической информации. Однажды в 1954 г. что-то произошло с доставкой «Физикл Ревью». В течение месяца или двух журнал поступал только в ВИНТИ. И вот Исаак Яковлевич позвонил и сказал, что приедет посмотреть новые поступления. Он приехал в ВИНТИ вместе с Владимиром Борисовичем Берестецким. Они сели вдвоем за стол и стали читать и обсуждать одну из статей по суммированию бесконечной последовательности диаграмм, которую я незадолго до этого тщательно проработал. В какой-то момент я вставил в их спор замечание, после которого Исаак Яковлевич стал расспрашивать меня о моих занятиях и предложил поступить к нему в аспирантуру в Теплотехническую лабораторию (ТТЛ).

### *«Московский нуль»*

Когда в конце 1954 г. я попал в теоретический отдел ТТЛ, Исаак Яковлевич был поглощен исследованиями принципиальных вопросов квантовой электродинамики и теории псевдоскалярных мезонов. Речь шла о явлении, которое тогда называли «московским нулем», а сегодня называют «бегущими зарядами». Исаак Яковлевич доказывал, что псевдоскалярная мезонная теория, как лагранжева теория сильного взаимодействия, внутренне противоречива из-за явления экранировки заряда.

Явление антиэкранировки, играющее столь важную роль в современных теориях Янга—Миллса (в квантовой хромодинамике и моделях великого объединения), в то время было неизвестно. Хотя работа Янга—Миллса вышла как раз в 1954 г., но из-за безмассовости калибровочных полей никто не увидел в ней реалистической теории. Даже позднее, в 1964 г., когда М. В. Терентьев обнаружил отрицательный знак в поляризации вакуума заряженных векторных бозонов с гиромангнитным отношением, равным двум, ни он сам, ни кто-либо другой не сопоставил этот результат с тео-

рией Янга—Миллса и с проблемой «московского нуля». По-видимому, расчеты в рамках неперенормируемой теории массивных векторных бозонов считались очень ненадежными, чтобы придавать им значение.

### *Новые частицы и слабые взаимодействия*

Хотя сам Исаак Яковлевич занимался более глубокими проблемами, меня он окунул в самую гущу феноменологии частиц и слабых взаимодействий.

Первая задача была посвящена мюону. Надо было рассчитать распад поляризованного мюона и придумать, как поляризовать его. Параллельно с этим он поставил перед И. Ю. Кобзаревым и мной задачу о распаде  $\Lambda$ -ядра. Тогда еще не была полностью исключена возможность того, что стабильность гиперонов обусловлена их очень высоким спином. Исаак Яковлевич понял, что в ядре центробежный барьер снимается, и предложил нам расчетом подтвердить эту мысль. От соавторства в статье он отказался.

Когда в 1956—1957 гг. «разразилось» несохранение четности, Исаак Яковлевич участвовал во всех обсуждениях. С ним делились Б. Л. Иоффе, И. Ю. Кобзарев, А. П. Рудик и я всеми новыми мыслями и всеми сомнениями. Он был инициатором и активным участником наших обсуждений с Л. Д. Ландау, которые происходили по средам в аспирантской комнате ИТЭФа (комната № 9) и по четвергам в Институте физических проблем. Но всерьез Исаак Яковлевич в эту деятельность не включился. Его всегда больше интересовала динамика, аналитические вычисления и, как он выражался, «обнюхивание формул», чем симметрии.

### *Асимптотические энергии*

Исаак Яковлевич был убежден, что предельный случай асимптотически больших энергий сыграет в физике сильных взаимодействий роль, аналогичную той, которую сыграл атом водорода при создании квантовой механики.

В 1956 г. у него возникла мысль о том, что перезарядки при асимптотически высоких энергиях должны вымирать. Он проследил следствия этого вымирания для рассеяния антинуклонов на нуклонах и предложил мне повторить это же для нуклон-нуклонного и мезон-нуклонного рассеяний. Так появились заметки-близнецы на эту тему.

В 1957 г., рассматривая дисперсионные соотношения в пределе асимптотически высоких энергий, Исаак Яковлевич сформулировал свою знаменитую теорему о равенстве сечений частиц и античастиц. Его «асимптотический» энтузиазм еще более возрос, когда в 1961 г. появились первые работы по реджистике, особенно работа В. Н. Грибова по сужению дифракционного конуса.

Недавно мы с Володей Грибовым вспоминали тот период и он сказал, что эта его работа, где, по существу, впервые был введен

вакуумный полюс, не возникла бы без обсуждений с Исааком Яковлевичем, без идей последнего о связи его теоремы с возможностью роста радиуса взаимодействия.

Исаак Яковлевич занялся реджистикой со всей присущей ему страстью. Грибов часто приезжал к нему в ИТЭФ из Ленинграда, и в густом табачном дыму они работали до глубокой ночи. Несколько раз Исаак Яковлевич ездил к Володе в Ленинград. Он с нетерпением ожидал результатов измерений дифракционного конуса, которые проводились Линденбаумом и Юанем в Брукхевене, и, подымая указательный палец, повторял, как заклинание: «Линденбаум и Юань!»

В мировой литературе вакуумный полюс получил название полюса Померанчука или померона. Это название удачно не только потому, что вакуумный полюс приводит к автоматическому выполнению теоремы Померанчука, но и потому, что в этом термине выразилось мировое признание И. Я. Померанчука как родоначальника физики асимптотик.

### Кварки

Гипотезу о кварках Исаак Яковлевич встретил с большим интересом. Однако необъяснимое (до появления квантовой хромодинамики) поведение кварков вызывало в нем настороженность. Когда в 1965 г. он вместе с А. Д. Долговым, В. В. Соловьевым и мной вычислил на основе  $SU(6)$ -симметричной кварковой модели электромагнитные разности масс барионов, то сказал об этой работе так: «Сходил с молодыми людьми в бардак».

### Публикации и доклады

Сделанную работу, если он считал ее важной, Исаак Яковлевич старался с максимальной полнотой довести до сведения научного сообщества: публиковал препринт, статью (иногда параллельно в русском и английском журналах), докладывал на семинарах в различных институтах, на конференциях. Этого же он требовал от своих учеников. Если результат правильный, он должен как можно скорее стать известным специалистам, должен быть вплетен в ткань науки. Если же в работе есть какие-либо слабые пункты, они должны быть как можно скорее вскрыты.

Вместе с тем он никогда не писал о своих достижениях в газетах или научно-популярных изданиях, рассматривая это как саморекламу. А к рекламе, и особенно саморекламе, в науке он относился с отвращением и очень резко высказывался о подобных публикациях.

Тщеславие было чуждо ему. На моей памяти ни разу не было, чтобы в статьях с участием Исаака Яковлевича его фамилия, нарушая алфавитный порядок, стояла впереди других, даже если его вклад был основным.

### Наступит ли конец физики?

Исаак Яковлевич считал, что фундаментальная физика довольно быстро закончится, что в течение нескольких десятилетий могут быть установлены основные физические законы. Другое дело — практические приложения этих законов, которые будут неисчерпаемы. Он сравнивал физику с географией, основные открытия которой лежат в далеком прошлом, а многочисленные конкретные исследования будут продолжаться. Другой пример — химия, где основные законы нам известны (их описывает квантовая механика), а конкретные химические исследования, имеющие важнейшее прикладное значение, неисчислимы.

Когда я впервые услышал это от него, оснований для такой точки зрения было несравнимо меньше (И. Я. сказал бы «в  $e$  в степени раз меньше»), чем сегодня, когда скорый конец фундаментальной физики обещают энтузиасты суперструнных моделей.

Я придерживался общепринятой точки зрения и придумывал возражения. Один из таких споров в зимний вечер затянулся и закончился тем, что Исаак Яковлевич взял лист бумаги и написал на нем: «Лев Борисович говорит, что мне этого не дожидаться» — и поставил под этими словами свою подпись и дату.

### «Правило Померанчука»

Исаак Яковлевич всегда стремился пропустить спутника в дверь первым. При этом он использовал различные невинные хитрости. Например, говорил в зависимости от обстановки: «Вы справа» или «Вы слева» — и добавлял: «Надо подчиняться правилу: тот, кто справа (слева), проходит первым».

По четвергам вечером в «голубятне», венчающей Черемушкинский дворец, происходили просмотр и обсуждение новых журналов. Когда спускались по крутой деревянной лестнице, Исаак Яковлевич (он уходил одним из последних) всегда предупреждал: «Осторожно, здесь опасная ступенька». Так же предупреждал он всех, с кем у доски разговаривал в своем кабинете, чтобы береглись опасно выступающего края доски.

### Во время дежурства в больнице

В январе 1962 г. Л. Д. Ландау после автомобильной аварии был привезен в критическом состоянии в 50-ю больницу и там были установлены дежурства физиков. В один из поздних вечеров, когда дежурили И. Я. Померанчук, В. Н. Грибов и я, в конце темного коридора на первом этаже раздался какой-то шум, грохот и звон стекла. Мы бросились туда и увидели, что сестра безуспешно пытается остановить какого-то пьяного верзилу. И вдруг вперед вышел Исаак Яковлевич и, решительно толкнув пьяного в грудь несколько раз, повелительно сказал: «Уходите!» Тот внезапно



как-то присмирел, повернулся и, подталкиваемый в спину, покорно ушел. Он мог смести Исаака Яковлевича одной рукой, но безропотно подчинился.

### Последний год

У него было здоровое сердце. Как-то весенним вечером 1965 г. после работы я привел несколько человек включая Исаака Яковлевича к себе домой. Исаак Яковлевич не захотел ждать лифта и бегом бросился на пятый этаж. Когда лифт поднялся, он уже ждал нас.

Вообще, несмотря на кажущуюся хрупкость, он обладал крепким здоровьем, позволявшим ему работать по 14 часов в сутки. И вдруг болезнь. Осенью 1965 г. за ужином он не смог проглотить кусочек черного хлеба, пожаловался, что мешает «какая-то царапина в пищеводе». Последовали рентгеновские снимки, разговоры с врачами и страшный диагноз: рак пищевода. Исаак Яковлевич лег в Онкологический институт на Каширском шоссе, где его стали облучать  $\gamma$ -лучами. После облучения его выписали. Позднее он некоторое время находился в Институте Вишневского, но большую часть болезни провел дома, приходя, когда это было возможно, на работу в ИТЭФ.

Основную тяжесть ухода за больным взяла на себя старшая дочь его покойной жены — Марина Алексеевна. Даже когда у Исаака Яковлевича началась инфекционная желтуха, Марина Алексеевна не отпустила его в больницу, а выхаживала дома. Она заботилась о его питании и лекарствах, организовывала консилиумы (с А. А. Вишневским, Н. Н. Блохиным, А. И. Кассирским и другими).

Повышенный интерес знакомых к состоянию его здоровья раздражал его. «Я никогда не жил и не буду жить в аквариуме», — говорил он с металлом в голосе.

Болезнь не прервала работы Исаака Яковлевича. Он продолжал работать и между сеансами облучения, и позднее, когда ему была сделана гастростома.

Осенью 1965 г. он вместе с И. Ю. Кобзаревым и мною сделал работу о возможном существовании зеркального мира, частицы которого связаны с нашими частицами лишь гравитационно. Вместе с В. Н. Грибовым и Б. Л. Иоффе он показал в 1966 г., что полное сечение аннигиляции электронов и позитронов в адроны должно быть обратно пропорционально квадрату энергии. Тогда же он начал новое направление: дисперсионную теорию слабого взаимодействия лептонов при асимптотически высоких энергиях. (Его статья об этом, написанная В. Н. Грибовым и В. М. Шехтером, была опубликована в 1970 г.)

Когда у Исаака Яковлевича пропал голос и он мог говорить только шепотом, он стал пользоваться специальным электромегафоном, как у экскурсоводов. Мне запомнилось одно из занятий

студенческого кружка в МИФИ, которое он проводил, пользуясь электромегафоном (меня он попросил поехать с ним, чтобы сделать «затравочный» доклад на этом занятии).

Рассказывая о последнем годе жизни Исаака Яковлевича, нельзя не сказать о той роли, которую он сыграл в создании в нашей стране медицинских протонных пучков.

Узнав в Онкологическом институте, что раковые опухоли повсеместно облучают  $\gamma$ -квантами и электронами, и как физик понимая все преимущества протонов, Исаак Яковлевич сразу же поставил перед медиками и физиками вопрос о необходимости создания медицинских протонных пучков в нашей стране. Разумеется, физики немедленно откликнулись, надеясь, в частности, использовать протонные ускорители ИТЭФа и ОИЯИ для помощи самому Исааку Яковлевичу. Помню, как я изучал в Ленинке немногие имевшиеся в то время статьи о протонном облучении пациентов в Уппсале (Швеция), как по просьбе Исаака Яковлевича привез к нему Л. Л. Гольдина, как ездил с заведующим радиологическим отделением Онкологического института профессором А. И. Рудерманом в Дубну.

Исаак Яковлевич связал А. И. Рудермана с председателем Госкомитета по науке и технике В. А. Кириллиным. Он собирал у себя медиков и физиков, помогая им найти общий язык, участвовал в заседаниях Ученого совета Онкологического института.

Обсуждением протонных пучков он занимался так, как если бы к его болезни они не имели абсолютно никакого отношения. Да по существу так оно и было, поскольку с первых дней всем стало ясно, что создание пучков со всем необходимым оборудованием — дело столь долгое, что в лечении самого Исаака Яковлевича их использовать не удастся. Медицинский пучок в ИТЭФе начал действовать в 1969 г.

### Силовое поле

Исаак Яковлевич занимал совершенно особое место в советской теоретической физике — и не только советской, и не только теоретической. Его можно было назвать хранителем огня физики.

Он создавал вокруг себя силовое поле, которое было столь же реальным, как обычные физические поля. Это поле нельзя было не почувствовать с первой же минуты общения с ним. Это поле усиливало лучшие свойства человеческого ума и души и ослабляло все то мелкое и суетное, что мешает серьезной научной работе. Я не встречал никого другого, в ком с такой предельной чистотой и силой выразилось бы стремление к познанию основных сущностей мира.

И. С. Цукерман

## И. Я. ПОМЕРАНЧУК В ММИ

В студенческие годы в Московском механическом институте (ныне МИФИ) мне посчастливилось слушать лекции трех замечательных физиков, личности которых не могли не привлекать внимания окружающих также и их глубокими человеческими качествами. Это были Игорь Евгеньевич Тамм, Михаил Александрович Леонтович и Исаак Яковлевич Померанчук.

На восьмом и девятом семестрах (в 1951 г.) Исаак Яковлевич читал нашему потоку квантовую механику. Некоторые из нас слышали об известном профессоре Померанчуке еще раньше, говорили о его строгости на экзаменах. Так что образ его рисовался нам хотя и не очень конкретным, но достаточно внушительным.

Настоящий же Чук оказался постоянно погруженным в себя скромным человеком в очках, небольшого роста, с курчавой черной шевелюрой, густой и жесткой. Лекции он читал размеренно, несколько педантично и сухо, к студентам относился требовательно. Но вне аудитории, в темноватых коридорах института, Исаак Яковлевич выглядел незаметным и даже потеряннным. Чтобы добраться до деканата инженерно-физического факультета, находившегося на четвертом этаже в самой дальней части пристройки к зданию ВХУТЕМАСа (которое практически целиком занимал ММИ), нужно было пройти от проходной, выходящей на улицу Кирова против входа в Центральный почтамт, по целой системе лестниц, коридоров и переходов. На всем этом пути Исаак Яковлевич двигался несколько опасливо, держась поближе к стенам. Я вспоминаю случай, когда отпущенные с лекции до звонка студенты младшего курса, еще не знакомые с Исааком Яковлевичем, высыпали толпой из большой 433-й аудитории в узенький коридор и буквально прижали к стене растерянного Чука, шедшего из деканата.

В конце 1951 г. Исаак Яковлевич начал читать группе теоретиков релятивистскую квантовую теорию. Занятия проходили в небольшой 576-й аудитории, находившейся над деканатом, на последнем этаже пристройки. В комнате стояло три ряда длинных столов (по два-три стола в ряду), сваренных из толстой арматуры и накрытых фанерой, которая была покрашена черной краской. Было нас всего 10—12 человек, за столами мы сидели на круглых табуретках, совсем рядом с лектором. Обстановка была неформальной, иногда Исаак Яковлевич отвлекался от формул и говорил о физике вообще. В том, как он это делал, какое сильное внутреннее эмоциональное отношение вкладывал в свои сдержанные жесты и неторопливые фразы, проявлялся весь темперамент Чука.

Когда говорят о безграничной увлеченности Исаака Яковлевича наукой, передо мной сразу же встает картина одного из тех

дней тридцать с лишним лет назад, я вижу эту 576-ю аудиторию и маленькую фигуру в темно-синем костюме. Если не ошибаюсь, все происходит перед началом лекции. Чук явно взволнован и воодушевлен. Он говорит о последних работах по квантовой электродинамике, о надеждах на создание настоящей теории элементарных частиц. Исаак Яковлевич медленно прохаживается вдоль досок перед столами, за которыми мы сидим. Голова его, как обычно, наклонена вниз и набок, к левому плечу. Он заинтересованно поглядывает на нас поверх очков, осторожно оценивая, как мы воспринимаем его слова. В левой руке, согнутой в локте, он держит, прижимая к себе, небольшую книжку в темном переплете. Мне кажется даже, что его правая рука иногда ласково поглаживает книгу. Это — недавно появившийся сборник переводных статей по лэмбовскому сдвигу (Сдвиг уровней атомных электронов. М.: Изд-во иностр. лит., 1951).

И. Ю. Кобзарев

## ПЕРВЫЕ ВСТРЕЧИ С И. Я. ПОМЕРАНЧУКОМ

Я познакомился с Исааком Яковлевичем весной 1954 г. Это было в МИФИ, где я тогда учился, в его старом здании, в котором когда-то прежде помещался ВХУТЕМАС. Я учился на четвертом курсе и занимался гидродинамикой и теорией растворов у моего тогдашнего руководителя УИРом (учебно-исследовательской работой; названия УИР, впрочем, еще не было). Одновременно я вместе с А. И. Ларкиным по совету Владимира Ильича Когана, который вел с нашей группой занятия по теоретической физике, изучал классическую книгу Гайтлера «Квантовая теория излучения». В этой книге меня почему-то очень заинтересовал метод Вайцзеккера—Вильямса, и я в Ленинской библиотеке прилежно изучил статью Вайцзеккера. В результате у меня возникла идея применить метод Вайцзеккера—Вильямса для вычисления рождения пар  $e^+e^-$  электронами. Я сделал несложный расчет и показал его моему руководителю. В ответ я услышал, что мне нужно идти работать к Померанчуку.

Где-то в коридоре Исаак Яковлевич назначил мне встречу. Его первым и, кажется, единственным вопросом было: «Что Вы знаете о квантовой теории поля?» Я ответил, что выучил Гайтлера. «Тогда сосчитайте сечения процессов вида  $N\bar{N} \rightarrow 2\pi$ ». Других указаний я не получил и понял, что мне надо обращаться к литературе. Я нашел в УФН обзор по теории  $\pi N$ -взаимодействий и узнал, что такое изотопическая инвариантность и  $PS-PS$ -теория, как тогда называли теорию псевдоскалярных мезонов

с псевдоскалярной связью. После Гайтлера вычисление сечений аннигиляции не составило труда.

Я позвонил Исааку Яковлевичу по его домашнему телефону, который он мне дал, и пришел к нему домой показать результаты. Исаак Яковлевич взглянул и сказал: «Это неверно». Я очень удивился и сказал в ответ, что при малых энергиях одно из сечений совпало у меня с тем, что приведено в книге Ферми «Элементарные частицы». Реакция Исаака Яковлевича была неожиданной для меня: он рассердился так, что у него налилось кровью лицо, и сказал или, вернее, закричал: «Это Вам не закон божий, чтобы ссылаться на авторитеты». Я в растерянности стал смотреть свои бумаги и сразу увидел, что, переписывая одно из сечений, я потерял степень массы, так что формула приобрела неправильную размерность; тут же я исправил ошибку. Последовал вопрос, знаю ли я что-нибудь об инвариантной теории возмущений. Я ответил, что нет. В ответ Исаак Яковлевич сказал, что нужно ее выучить и сделать расчеты заново. На этот раз Чук, как звали его коллеги из сверстников в глаза и все за глаза, действовал иначе. Он сказал, что я должен купить книгу Ахиезера и Берестецкого «Квантовая электродинамика» и сборник под редакцией Иваненко «Новейшее развитие квантовой электродинамики», позвонить и прийти к нему. Это была счастливая эпоха до книжного «бума», когда книги ждали знатоков в магазинах годами, и я без труда выполнил указанное. Исаак Яковлевич тщательно отметил знаками  $\checkmark$  и  $\nabla$  разделы в обеих книгах, которые надо было изучать обязательно и факультативно.

Книги стоят у меня сейчас, 32 года спустя, и здесь нарративный источник (я) можно контролировать документами. Логика расстановки галочек всюду ясна. Единственное, что меня огорчает, — это то, что Чук пренебрег ясной, легкой, правильной и физичной статьей М. Фирца, впрочем, правда, не содержащей новых результатов.

Я до сих пор помню, что мне доставила какие-то большие трудности статья Швингера «О калибровочной инвариантности и поляризации вакуума». Статья несет помету  $\nabla$ , но мне она показалась красивой и важной, и я хотел ее полностью разобрать. Важной она и правда была, но пришлось поработать. Чук не спросил ничего о том, что я разобрал, а что нет, но следующее указание по литературе было прочесть статью автора, имя которого я напрочь забыл (помню только, что это была новая статья из «Proc. Royal Soc.» и чтение предполагало фактически, что я прочел весь сборник включая неотмеченного Эдвардса). Статья использовала что-то вроде континуального интеграла и лежала в области поисков точных решений в какой-то мезонной теории. Все это было уже в сезоне 1954—1955 гг., и Исаак Яковлевич к вопросу о ней не вернулся, у него началась эпоха нуль-заряда в мезон-

ных теориях с графиками и двухпредельной техникой; в соответствующие статьи он поручал мне вписывать формулы.

Пока же начался май 1955 г. и я изредка ходил в МИФИ на лекции (посещение было очень свободное) и разбирал Швингера. В очередную встречу у кафедры Чук спросил, что я делаю. Я сказал, что изучаю «галочки». Чук спросил: «А сечения?» Я ответил, что, как я теперь понимаю, инвариантная теория — просто другой способ счета и сечения не изменятся. Чуку ответ явно не понравился. Надвигалась сессия, и он спросил, где я буду летом. Я сказал, что после экзаменов уеду на все лето на Рижское взморье. «А работать будете?» — «Да», — ответил я, озабоченный поляризацией вакуума и калибровочной инвариантностью. Чук сказал, что нужно все же вычислить сечения заново. «Когда сосчитаете, найдите меня». И Исаак Яковлевич сказал, когда и в какой гостинице он будет жить.

Туда я и пришел с расчетом в инвариантной технике. Сечения не изменились. Тогда Исаак Яковлевич сказал: «Попробуйте получить изотопические соотношения между сечениями, это будет иметь *научное значение*». Я был уже достаточно образован, чтобы понять, что научное значение  $PS-PS$ -расчетов было для Исаака Яковлевича малым или нулевым из-за большой константы связи и неприменимости теории возмущений, а изотопическая инвариантность — вещь точная. Мне удалось получить ответ, который был отдан на экспертизу Владимиру Борисовичу Берестецкому и некоторое время у него лежал. Потом я узнал, что эту же задачу Исаак Яковлевич дал Илье Мироновичу Шмушкевичу и ждал, когда он получит ответ. В середине зимы 1954/55 г. ответ получился и у Ильи Мироновича; он совпал с моим, хотя ход рассуждений был другим. Все это было опубликовано в Докладах АН в 1955 г., а в 1956 г. Исаак Яковлевич взял меня в аспирантуру в ИТЭФ.

В течение тех обсуждений, которые я имел возможность вести с ним вплоть до 1966 г. (когда была опубликована совместная работа И. Я. Померанчука, Л. Б. Окуня и моя о теневой Вселенной), я понял, что одной из особенностей отношения Исаака Яковлевича к науке была бескомпромиссность. Понятие научной истины было для него абсолютным: работа была либо истинной — «имеющей научное значение», либо никакой. Зато любой правильный результат даже малого масштаба имел «научное значение». Всякое обсуждение с ним начиналось с его попыток опровергнуть предлагаемый результат, и это было суровое испытание...

Ю. А. Вдовин

## ВОСПОМИНАНИЯ О И. Я. ПОМЕРАНЧУКЕ

В 1952—1955 гг. я был аспирантом И. Я. Померанчука. Наверное, каждый, кто встречался с И. Я. Померанчуком, тем более работал с ним или под его руководством, всегда будет помнить об этих встречах. Обаяние его личности было очень велико. Когда Исаак Яковлевич увлекался какой-то идеей, не важно, своей собственной или чужой, он как бы излучал энергию, энтузиазм, заряжал всех окружающих.

Поражала его безграничная преданность науке. Никакого хобби для него не существовало. И конечно, его безукоризненная честность, щепетильность, нетерпимость ко всякой фальши, в чем бы она ни проявлялась.

Жизнь Исаака Яковлевича была очень насыщенной, он не хотел терять даром ни одной лишней минуты. Наверное, многие его аспиранты и студенты помнят встречи у дома на набережной Максима Горького в 8—8.30 утра и обсуждения в машине по дороге в ИТЭФ.

Сильное впечатление производила физическая интуиция И. Я. Померанчука. Помню, меня долго мучила одна проблема. Исааку Яковлевичу понадобилось 20—30 минут, чтобы, как говорится, на пальцах, из физических соображений сделать оценки и предсказать ожидаемый результат расчета.

Исаак Яковлевич был очень деликатным человеком, но если он сталкивался с каким-то поступком, поведением связанных с ним людей, не отвечающим его очень высоким морально-этическим требованиям, он мог «взорваться», и такой «взрыв» провинившийся запоминал очень надолго.

И. М. Дремин

## ПЛАМЕННЫЙ

О, сколько жизни было тут...

Ф. ТЮТЧЕВ

Даже яркие слова ветшают, стираются от частого употребления, находят своих привычных соседей и начинают восприниматься только в определенных сочетаниях. Может быть, поэтому к слову «пламенный» так и хочется присоединить «оратор» или «революционер». При этом представляется страстная фигура, подавшааясь вперед вслед за вытянутой рукой.

Но вот заходишь в бывший когда-то загородным домом старинный особняк, где сейчас размещаются теоретики ИТЭФа, и видишь: висящий на стене конференц-зала портрет в скромной деревянной рамке. Небольшого роста, не очень гладко выбритый, в скромном костюме человек на портрете задумчиво склонил набок голову, характерным жестом руки, задержавшейся у подбородка, как бы подчеркивая напряженность мысли. И кажется, что здесь нет места страстям, все спокойно. Но глаза! Вглядитесь — они не просто задумчивые. Если бы глаза были лишь зеркалом души, оно бы не выдержало того глубинного пламени, которое полыхало в этом человеке при встрече с интересной физической проблемой. Мне очень нравится этот портрет. Здесь весь Чук — пламенный ученый, а для меня еще и пламенный учитель.

1954 год ничем не был примечателен в его жизни — работа, лекции по теории относительности и семинары в МИФИ, студенты, студенты... Я был среди них, набирался храбрости (и немножко знаний) для того, чтобы по прошествии года подойти к Чуку и задать ему какие-то (представляющиеся теперь наивными) вопросы о мю-мезонах. Но он вдруг загорелся, задвигался, и, отвечая быстро на ходу, потянул меня в деканат, где вытащил книгу с обзором Флюгге и вручил ее, прибавив: «Прочтете — придете».

Так для меня начались его Уроки, мораль и цель которых я осознал значительно позже.

*Урок первый — учиться.*

Давая обзор, он, вероятно, прекрасно понимал, что осилить его на четвертом курсе можно, только перерыв массу дополнительной литературы. А захочет ли студент делать это? Выяснив потом парой вопросов, что раскопки велись старательно, он тут же переключился на

*Урок второй — считать.*

Задача была легкой, решение он знал и потому не тратил много времени, когда на стометровке от проходной до здания ему сообщали неверный ответ. Неверно решенная легкая задача как-то гасила пламень его души, он не возмущался, а просто казался равнодушным. Даже когда было получено верное решение, это не тронуло его, но он все же спросил, каким способом решалась задача. И вдруг, услышав ответ, мгновенно преобразился, зажегся, закачал головой и преподнес

*Урок третий — считать верно и кратчайшим путем.*

Оказалось, что использовалась старая теория возмущений, тогда как надо было сосчитать простые диаграммы Фейнмана. Соотношение затрат времени при двух способах с учетом неопытности, видимо, надо было оценить как 100 : 1. Протертые штаны ему понравились, но истязаний он не любил и потому посовето-

вал изучить § 25 в книге Ахиеезра, Берестецкого и вновь повторить расчеты.

«И вообще, приходите ко мне на преддипломную практику». Так, поднимаясь ранней весной 1956 г. по лестнице наверх в кабинет Чука и волнуясь при мысли о какой-то новой интересной задаче, я и не думал о том, что сразу же получу

*Урок четвертый — не терять времени зря.*

Он, конечно, приготовил нечто, но начал не с этого. «А сколько Вам лет?» — ошарашил меня столь обыденным вопросом. И, услышав, что двадцать, как-то с сожалением, немного с тоской сказал: «Хорошо! Эх, мне бы сейчас столько».

Что-то уже начинало давить на него, и в то утро он был особенно небрит, выглядел очень уставшим. Поэтому, придя домой, я на вопрос родителей о том, старый или молодой руководитель у меня, ответил: «Старый». — «А сколько ему лет?» — «Да этак лет сорок пять».

*Урок пятый — думать и обсуждать.*

Все же в тот раз он дал несколько небольших задач. Решив часть из них, я подумал, что кое-что могу предложить и сам. Чук улыбнулся: «Ну, это уже давно сделано — уж очень просто». Стало ясно, почему он еще на лекциях третьего курса рекомендовал посещать семинар Ландау — там можно не только слушать, но и обсуждать, получать советы.

*Урок шестой — гражданственность.*

Да и в ИТЭФе в то время был маленький семинар теоретиков, в комнатке за конференц-залом, которая чем-то напоминает фойе. Все аспиранты и дипломники также должны были приходиться к нему. Обычно мы забивались в угол справа от входа. Потом приходил Ландау, усаживался в кресло у окна и Чук предоставлял слово докладчику. Однажды он извиняющимся тоном сказал, что на сегодня никакого сообщения не подготовлено. Я ожидал, что Дау взорвется, но тот улыбнулся (как мне показалось, каким-то своим сокровенным мыслям) и предложил обсудить ситуацию в физике в Союзе. Оценки были звучные, порой резкие — в учет принимались не только способности, но и гражданские качества. А под конец, когда кто-то назвал еще одну фамилию, Чук, услышав ее, вскочил со стула и, резким движением выпрямившись, сказал твердо: «Прошу слово ... при мне не произносить!»

*Урок седьмой — забота о сотрудниках.*

Конечно, работа для него была главным делом жизни, и, видимо, многие знают, как горела вечерами лампа в его кабинете, кипел чайник... Поэтому мешать ему очень не хотелось и в кабинет старались ходить пореже. Однажды, когда Чук давал мне очередную задачу, в кабинет вошел один из сотрудников и очень стеснительно напомнил Чуку о другом из его сотрудников, который молод, очень способен и достоин был бы стать «старшим».

Чук встрепенулся, зашагал из угла в угол и, покачивая головой, заговорил: «Да, да. И как я мог забыть? Сегодня же поговорю об этом». Свое обещание он сдержал.

*Урок восьмой — учиться всегда.*

«Сегодня разговор отменяется, — как-то встретил меня Чук, — еду в ФИАН, к Игорю Евгеньевичу. Ему пришел препринт с теорией сверхпроводимости — надо учиться».

*Урок девятый — широта кругозора.*

Статьи, семинары и расчеты приносят пользу, если для них подготовлена почва. Поэтому Чук предлагал на пятом курсе сдавать экзамены Ландау. Это был хороший «тренинг» — помимо обычных студенческих занятий и преддипломных расчетов, приходилось дополнительно сдавать по три-четыре экзамена в семестр, вычитывая их программу с хорошо известных листочков, напечатанных на тонкой папиросной бумаге.

*Урок десятый — серьезно относиться ко всему.*

А потом наступили летние каникулы. Правда, понятие отдыха и тут было относительным. Осталось несколько задач, которые одновременно дал Чук. Часть задач казались не очень интересными или же легкими. Поэтому принимался за те, которые были по душе, в надежде, что обойдется. Не обошлось! Однажды я принес ответ задачи, которая мне понравилась (потом узнал, что статью на эту тему ранее написали в ЖЭТФ двое сотрудников Чука). Переписав ответ несколько по-своему, Чук ободряюще улыбнулся, потом задумался и вдруг закричал: «Ничего я в Вас не понимаю! То такую сложную задачу сделали, а то с простыми справиться не можете!» (привожу эту фразу в переложении на литературный язык). Оправдываться было бесполезно, потому что «не хочу справляться» прозвучало бы еще хуже. Ошеломленный, я выскочил из кабинета и рассказал об этом своим товарищам. Те подняли меня на смех: «Тебе уже скоро диплом защищать, а Чук тебя еще только первый раз так-то!» При следующей встрече мне было почему-то неловко, а Чук, видимо, не придал этому никакого значения и был опять внимателен и общителен.

*Урок одиннадцатый — держать слово.*

Опытный руководитель начинает беспокоиться о распределении студента раньше, чем сам распределяемый. Как-то однажды Чук, сильно заросший бородой и выглядевший очень уставшим, остановил меня и каким-то несвойственным ему извиняющимся голосом сказал: «Вы знаете, я что-то стал себя плохо чувствовать. (Я не уверен, что он признавался в этом хоть кому-нибудь, но, видимо, перед молодым студентом это было сделать легче. — И. Д.). Так вот, в этом году я решил устроить передышку и не брать себе аспирантов и студентов. Если будете поступать куда-то в аспирантуру, дам самую лучшую рекомендацию». И он сдержал свое слово. Так я попал в ФИАН.

Урок двенадцатый — пламенность.

Уже будучи в аспирантуре, я пришел как-то к Чуку рассказать о сделанной работе. Стоя у столь привычной доски, он сосредоточенно слушал, внимательно изучал выписываемые формулы. Но реакция его вновь оказалась совершенно неожиданной для меня: он использовал сравнение с одним из авторитетнейших физиков. Это было настолько несоразмерной, незаслуженной похвалой, что ошарашило даже больше, чем если бы он обругал. Для себя я объяснил, что Чук, видимо, имел в виду краткость изложения. А может быть, он действовал согласно чьему-то изречению (которое так любил И. Е. Тамм): «Ученик — не сосуд, который надо наполнить, а факел, который надо зажечь!» Дабы не быть смешным, я никому не рассказывал об этом эпизоде и решил все-таки описать его здесь лишь затем, чтобы показать, насколько противоположно полярным мог быть Чук, зачастую не знавший предела в своей страстности. Но ведь именно это помогало ему творить!

Как и многие воспоминания, мои краткие заметки воспроизводят личность Чука односторонне, через призму личного. Но не сомневаюсь, все согласится с тем, что страстность, пламенность была одной из его характернейших черт. Никогда не слышал, чтобы в чьих-либо оценках рядом со словом «Чук» появилось определение «бесстрастный». Такого не могло быть в принципе.

Д. Амати

## ЧЕТЫРЕ ВСТРЕЧИ

Я встречался с Померанчуком четырежды в моей жизни. Я все еще ясно вижу небольшого темноволосого человека с искрящимися глазами, борющегося со своим плохим английским, постоянно улыбающегося и с неизменной папиросой во рту.

Я встретился с ним впервые в 1955 г., когда посетил Советский Союз, будучи очень молодым и неопытным физиком. Это была импровизированная, незапланированная поездка, когда официальные визиты еще не вошли в моду. Об этом свидетельствовал мой рюкзак, с которым я приехал тем летом в Москву вместе с Бруно Витале. Мы посетили ряд лабораторий, и именно тогда завязались многие знакомства и дружеские связи. Однако подробности различных встреч затмеваются в моей памяти ослепляющим блеском моего посещения Института физических проблем.

Я вспоминаю наше появление в довольно небольшом кабинете. Вдоль стены стоял диван и несколько кресел, где сидели Лев Ландау и его группа; в этой группе, мне кажется, я различаю Померанчука. Атмосфера была довольно ледяной, и меня сразу

же попросили изложить то, что я хотел сказать. К тому времени я как раз написал свою первую статью; она касалась правил отбора в аннигиляции  $p\bar{p}$  в пионы, и я помню, что у нас среди сохраняющихся квантовых чисел была  $G$ -четность. Я излагал нашу работу, и у меня складывалось ощущение, что говорю я две недели подряд. На протяжении этого, казавшегося бесконечным периода времени настроение аудитории постепенно менялось: за недоброжелательными взглядами последовали вопросы, в которых слышалось сомнение, затем — нескончаемые комментарии и, наконец, отеческое одобрение. Несмотря на многочисленные утверждения о том, что такой прием был типичным для Ландау, я все же продолжаю считать, что причиной тому, что в начале приема царил такая холодная атмосфера, послужило то, что наш визит был «навязан» официальным лицом, отвечавшим за наше времяпровождение.

После семинара, когда я тоже сидел на диване, Ландау спросил о моих планах. Я отважился выдвинуть идею о рассмотрении динамики процесса аннигиляции на основе подхода Тамма—Данкова. На лице Ландау появилось саркастическое выражение, и он спросил меня, почему мне так хочется испортить хорошую работу бессмысленными расчетами.

Моя дальнейшая эволюция как физика часто сталкивала меня с идеями и результатами маленького темноволосого человека, и его личность выросла в моем сознании до ее реальных размеров. Мой интерес к антипротонам заставил меня внимательно изучить «правила Померанчука»:  $\sigma(\bar{p}p) \sim \sigma(\bar{p}n)$ , следующие из сохранения изоспина, а затем и знаменитую теорему Померанчука:  $\sigma(\bar{p}p) \sim \sigma(pp)$ . Когда я встретился с ним во второй раз, в 1962 г. на конференции в ЦЕРНе, этот родоначальник асимптотических закономерностей, несомненно, был звездой конференции, на которой доминировали вопросы, связанные с реджевскими полюсами. В то время я работал в этой области и поэтому неоднократно беседовал с ним. Я помню Померанчука, улыбающегося, спокойно выдвигающего концепции, и яростно спорящего Володю Грибова.

Помню, что, когда я увидел его вновь в 1964 г. на конференции в Дубне и в 1965 г. в Ереване, его темные волосы поседели. Вскоре после этого с чувством глубокой печали я узнал о том, что эта моя встреча с ним была последней. Тем не менее я узнаю его стиль у многих замечательных советских физиков, которые имеют честь быть его учениками или, лучше сказать, его младшими коллегами. Это стиль личности, в которой научные и человеческие качества тесно переплетаются. Я уверен в том, что этот стиль оказывает влияние не только на то, как они работают и взаимодействуют, но и на их физику. То ценное, что объединяет их, демонстрирует плодотворное влияние, которое оказывали и продолжают оказывать такие замечательные личности, как Ландау и Померанчук, на целые поколения физиков.

Чистый тон не создается импульсами.

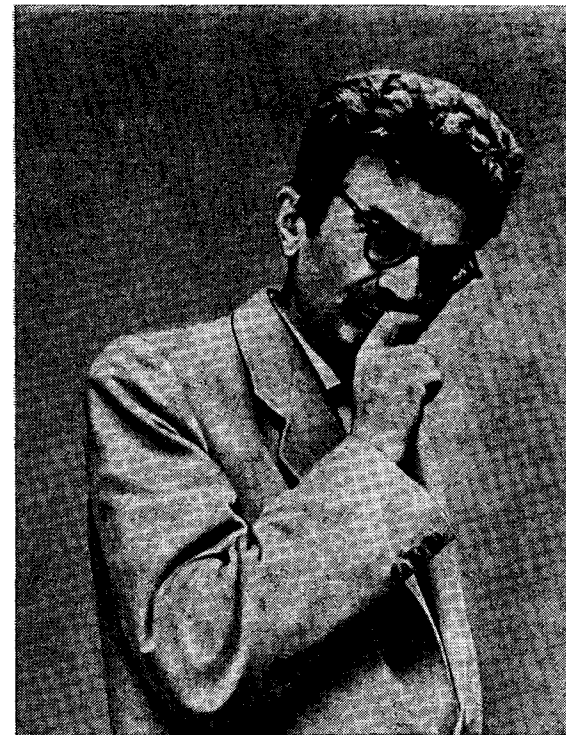
В. Б. БЕРЕСТЕЦКИЙ

Р. Е. Маршак

## ИЗ ВОСПОМИНАНИЙ ОБ АКАДЕМИКЕ ПОМЕРАНЧУКЕ

Впервые я встретился с академиком Померанчуком тридцать лет назад на советской конференции по частицам высоких энергий, проходившей в Москве с 14 по 22 мая 1956 г. Это была первая международная конференция по физике высоких энергий, проводившаяся в Советском Союзе. За месяц до нее состоялась шестая ежегодная Рочестерская конференция по ядерной физике высоких энергий. Три советских физика (В. И. Векслер, М. А. Марков и В. П. Силин) были приглашены на Рочестерскую конференцию. Одновременно приглашения посетить московскую конференцию были направлены двенадцати американцам. Оба эти события стали возможны благодаря рассекречиванию советских исследований по физике высоких энергий вскоре после смерти Сталина. Таким образом было положено начало программе обменов в зарождавшейся тогда области физики частиц, которая, несмотря на все превратности в течение последующих тридцати лет, привела к установлению дружеских отношений и плодотворному научному сотрудничеству между многими советскими и американскими физиками.

Наши русские хозяева на московской конференции 1956 г. были воодушевлены, так как это происходило через несколько месяцев после широко разрекламированного «секретного» обличения Сталина Хрущевым. Померанчук не был исключением и в своей спокойной и недемонстративной манере высказывал оптимистические надежды на будущее. Из-за привлекательности его личных качеств и того очевидного факта, что он являлся источником информации, творческого мышления и мудрости в советской физике частиц, Померанчук моментально стал центром внимания американской делегации. Мы стремились обсудить вопросы теории частиц с человеком, в котором мягкая манера общения так сочеталась с широтой интересов и который одинаково свободно ориентировался в феноменологических и математических аспектах нашей науки. Достаточно упомянуть работы, представленные на московской конференции, чьим автором или соавтором был Померанчук: «Трудности электродинамики и мезонной теории

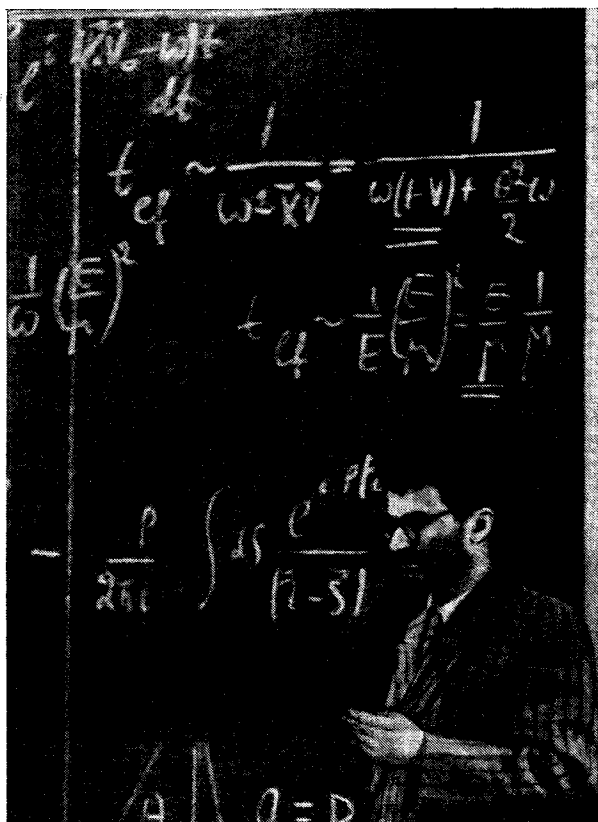


И. Я. Померанчук. Начало 60-х гг.

Фото П. И. Зольникова

и опыты со слабо взаимодействующими частицами», «Образование  $\pi$ -мезонных пар  $\gamma$ -квантами больших энергий и излучение  $\gamma$ -квантов  $\pi$ -мезонами» (совместно с Л. Д. Ландау), «Угловая корреляция при распаде гиперонов» (совместно с В. Б. Берестецким и В. П. Игнатенко). Было ясно, что Померанчук интересовался широким спектром проблем сильных, электромагнитных и слабых взаимодействий и что он являлся главным вдохновителем своих молодых и более старших коллег.

Интересно, что в первой из работ, доложенных на московской конференции, Померанчук утверждал, что физический заряд исчезает в пределе точечного взаимодействия не только в электромагнетизме, но и в мезонной теории и даже для взаимодействий, ответственных за бета-распад. Аргумент об исчезновении константы связи стал предметом активной полемики, и позднее на киевской конференции 1959 г. Ландау сказал: «Когда четыре года назад Померанчук показал, что использование ряда взаимодействий, рассматриваемых в теоретической физике, ведет к само-



И. Я. Померанчук на Всесоюзной конференции по физике высоких энергий, 1956 г.

Фото Л. И. Лапидуса

обману и что правильное обращение с соответствующими гамилтонианами приводит к отсутствию всякого взаимодействия, в теории сильных взаимодействий возникла совершенно новая концепция. В самом деле, многие теоретики утверждают, что не согласны с аргументами Померанчука; но мне экспериментальным путем удалось установить, что во всех случаях их возражения направлены против аргументов, никогда не выдвигавшихся ни Померанчуком, ни, насколько мне известно, кем-либо иным. В то же время они совершенно незнакомы с аргументами Померанчука...» Таким образом, Ландау отдавал должное Померанчуку как автору утверждений, обычно приписывавшихся ему самому, но в таком тоне, с которым Померанчук, не сомневаясь, не согласился бы. Независимо от того, кому принадлежит исход-

ное авторство «нуль-зарядной» программы в квантовой теории поля (я думаю, что его в равной степени разделяют Померанчук и Ландау), ясно, что концентрация исследований Померанчука в последние годы его жизни на дисперсионной теории и полюсах Редже во многом является следствием его сотрудничества с Ландау в этой области и его собственных затянувшихся сомнений в самосогласованности квантовой теории поля.

Самому участвовать в дискуссиях с этой интереснейшей и блестящей командой Ландау и Померанчука на московской и киевской конференциях и наблюдать за их дискуссиями с другими американскими учеными было на редкость интересно — это оттачивало ум. Но впереди была трагедия, которая сразила эти два столпа советской мощи в физике высоких энергий. Мне повезло провести несколько запоминающихся часов с Померанчуком и Ландау в Институте теоретической и экспериментальной физики меньше чем за год до ужасного происшествия с Ландау. ИТЭФ был одним из пяти институтов, которые посетила небольшая американская делегация — и я в ее составе — в мае 1960 г. в рамках программы обмена визитами, входившей в соглашение Мак-Коуна — Емельянова о мирном использовании атомной энергии. К сожалению, главная встреча Эйзенхауэра и Хрущева сорвалась как раз во время нашего визита и общая ситуация обострилась. Однако дружеские связи, возникшие в Москве и Киеве, пережили эти потрясения, и встреча с Померанчуком и Ландау была теплой и доброжелательной, как никогда. (Фактически институт, в котором работал Ландау, не входил в наш официальный маршрут, и его приход в ИТЭФ для встречи с нами был жестом доброй воли.) Ко времени моего следующего приезда в Советский Союз — для участия в Рочестерской конференции 1964 г. в Дубне — Ландау уже не занимался физикой. Возможность такого чисто интеллектуального наслаждения от бесед с Померанчуком и Ландау уже никогда не вернется. На дубненской конференции была представлена важная работа Грибова, Померанчука и Тер-Мартirosяна «Движущиеся разрезы в  $J$ -плоскости и реджевские условия унитарности», но с Померанчуком мы там не встречались.

Последняя моя встреча с академиком Померанчуком произошла двадцать лет назад, в мае 1966 г., после моего участия в работе международной весенней школы по частицам, организованной в Ялте академиком Боголюбовым. В это время Померанчук был уже серьезно болен и прошел безуспешный курс интенсивной противораковой радиотерапии. Окруженный обожавшими его коллегами Померанчук пытался подшучивать над тем, что у него пропал голос, и говорить о физике, но это удавалось ему с трудом.

Когда я уезжал из Москвы, меня попросили показать одному известнейшему американскому врачу рентгенограммы Померанчука, с тем чтобы узнать, нельзя ли спасти его жизнь хирурги-



ческой операцией. К несчастью, приговор не оставлял надежд. И через полгода академик Померанчук был потерян для мира физики и человечества в самом расцвете сил.

Ю. А. Симонов

## УНИКАЛЬНО И НЕЗАБЫВАЕМО

Нам повезло. Исаак Яковлевич Померанчук читал нам два года подряд основные курсы теорфизики и еще вел спецсеминар на последнем курсе. Я никогда больше не слышал таких лекций: в них была особенная внутренняя красота и логика, все рассказывалось как-то изнутри, как бы очевидно, подсмотревшим движение космических лучей в земной атмосфере, излучение заряда в синхротроне или замедление нейтрона в веществе. (Это было уникально, и как жаль, что никому не пришло в голову их стенографировать.) Но в ответ на эти чудеса вы должны были любить физические явления; конечно, не такой любовью, как Исаак Яковлевич, это невозможно, но честно и искренне, насколько у вас хватало сил. Символом веры было помнить наизусть физические постоянные, и я помню один такой опрос среди студентов-теоретиков, который походил на «Страшный суд» в Сикстинской капелле.

Помню, как на пятом курсе на спецсеминаре мы выучили статьи по только что обнаруженному несохранению четности и докладывали втроем, каждый свою часть. Как мне досталось, когда я не знал ответа на вопрос из соседней части! Ведь я решил словчить в отношении Физики!

По счастью, я попал в ИТЭФ, как я узнал потом, благодаря поддержке Исаака Яковлевича. Я часто видел его по понедельникам на семинарах и по средам, когда приезжал Ландау. То, как Померанчук вел семинары, было так же уникально, как его лекции. Об этом, наверное, могли бы рассказать многие...

Мне посчастливилось поработать бок о бок с Исааком Яковлевичем, когда началась реджистика. Появилась сенсация — ветвления в комплексных угловых моментах. Я выучил только что пришедшую статью Мандельстама (казалось, очень трудно!) и много раз подряд рассказывал Чуку лично и на семинаре. Возникла идея создания общей теории ветвлений, и вот Исаак Яковлевич, Карен Аветович Тер-Мартirosян и я сидим в кабинете Померанчука по многу часов; в дни, когда я оставался дома (Померанчук разрешал), или по вечерам он часто звонит (через загородный коммутиатор) и подробно обсуждает детали уравнений. Но мне трудно: я не привык работать втроем по 12—14 часов

в сутки, без выходных, и через некоторое время я отъединяюсь, чтобы сделать отдельную задачу. А Исаак Яковлевич, Карен Аветович и приехавший В. Грибов продолжают свой марафон еще в течение многих месяцев, каждый день до полуночи. Я не знаю, чего в этой упоенной работе было больше — страсти или упорства, характерных для всех троих, но мне показалось, что заводилой был все-таки Исаак Яковлевич.

В один из последних дней его пребывания в институте Исаак Яковлевич встретил меня в коридоре. Он спросил, что я делаю, а потом мягко, но настойчиво сказал: «А почему Вам снова не поработать в теории поля? Вы неплохо там работали». Я выполнил совет Померанчука уже после его смерти и оценил его сполна.

Когда думаешь об Исааке Яковлевиче, то мысль невольно возвращается к ветхозаветным пророкам, чья неистовая любовь к истине открывала людям сердца. Он из их числа.

В. С. Попов

## НИГДЕ Я НЕ ПОЛУЧАЛ СТОЛЬКО ПОЛЬЗЫ, КАК НА СЕМИНАРЕ, РУКОВОДИМОМ И. Я. ПОМЕРАНЧУКОМ

Мне не посчастливилось быть учеником или близким сотрудником И. Я. Померанчука. Поэтому неудивительно, что мои воспоминания о нем носят в значительной мере случайный характер и не связаны с событиями, существенными в его жизни. Но может быть эти заметки представят некоторый интерес как своего рода «взгляд со стороны».

Я поступил на работу в ИТЭФ (в те годы Институт назывался ТТЛ — Теплотехническая лаборатория) в 1959 г., но знакомство с Исааком Яковлевичем состоялось несколько раньше, за один-два года до этого. Тогда я занимался теорией дифракционного расщепления дейтрона и т. п. вопросами. Одной из основополагающих была статья И. Я. Померанчука и Л. Д. Ландау по дифракционным вопросам. Ее я старательно штудировал, однако не мог получить из одной формулы, скажем (А), последующие (В) и (С)... Проведя вычисления не один раз и постоянно получая другой ответ, я со свойственной молодости самонадеянностью решил, что обнаружил ошибку в этой работе. После одного из семинаров Ландау я подошел к Исааку Яковлевичу со словами: «Исаак Яковлевич, я читал Вашу статью, и, по-видимому, у Вас там ошибка». Он не стал откладывать дело в долгий ящик. Мы отошли к окну, я раскрыл злополучную статью и свои вычисле-

ния. Исаак Яковлевич быстро вспомнил нужное место, объяснил, как из (А) получить (В), и, заглянув мельком в мои бумаги, указал, в чем, по-видимому, заключается моя ошибка (так оно и было). Весь разговор занял не более 10 минут, но произвел на меня сильное впечатление. Особенно меня поразило то, что И. Я. помнит все технические детали своей работы (а ведь она была выполнена за несколько лет до нашего разговора). Помню также взгляд Исаака Яковлевича — внимательный и в целом доброжелательный, хотя и довольно строгий.

Когда встал вопрос о моей работе в ТТЛ после окончания аспирантуры в МГУ у И. С. Шапира, Исаак Яковлевич пожелал познакомиться со мной поближе. Мне было предложено доложить одну из моих работ. Я выбрал работу, в которой с помощью операторного исчисления Фейнмана («метод распутывания») решалась задача о движении спина в переменном магнитном поле. Семинар проходил во всем известной комнате № 9. У меня сохранилось ощущение простора и пустоты в этой большой комнате, хотя собрались, по-видимому, все теоретики ТТЛ (какой контраст с сегодняшним днем, когда комната во время четверговых семинаров набита народом, а опоздавшие стоят в дверях!). Как это ни странно, я не могу сейчас вспомнить, как протекал сам доклад и что спрашивал Исаак Яковлевич.

В последующие годы общение с Исааком Яковлевичем проходило на семинарах, о которых стоит сказать несколько слов. К тому времени я посещал семинары и у других наших крупных теоретиков, поэтому мог сравнивать. У Л. Д. Ландау сразу чувствовалось, что это семинар для избранных. «Право голоса» принадлежало первым трем рядам; остальные молча слушали, понимая далеко не все и не всегда. Дискуссию Ландау часто обрывал, если вопрос казался ему ясным (конечно, замечания самого Льва Давидовича бывали весьма глубоки и нетривиальны, но понимать их было нелегко). В отличие от Ландау И. Е. Тамм обычно внимательно слушал докладчика, не перебивая его. Иногда он, однако, быстро вскакивал, выходил к доске и разъяснял непонятные моменты, а также делился возникавшими у него соображениями. Это мне очень нравилось.

Но нигде я не получал столько пользы, как на семинаре, руководимом Исааком Яковлевичем. Каждый вопрос разбирался досконально, точные вопросы и замечания Исаака Яковлевича вскрывали и проясняли неясные моменты. Происходило это так: Исаак Яковлевич вежливо останавливал докладчика и просил разъяснить тот или иной вопрос просто, «по-рабочекрестьянски». Тут аудитория удваивала внимание, а для докладчика часто наступали трудные времена (если вопрос Исаака Яковлевича был неожиданным и для него). В ходе дискуссии либо вопрос прояснялся, либо оказывалась поставленной некоторая научная проблема, которую следовало изучить. Такое стремление Исаака

Яковлевича к максимальной ясности очень облегчало нам, молодым теоретикам ТТЛ, «подтягивание» к самым современным проблемам физики.

Семинар Исаака Яковлевича пользовался огромной популярностью. Сохранилось в памяти, как выступали на нем Я. Б. Зельдович, И. Е. Тамм, А. Д. Сахаров, А. А. Логонов, А. Н. Тавхелидзе и многие другие. В те годы (1960—1966), по-видимому, почти всякий физик, работавший в области теории элементарных частиц или атомного ядра, стремился «пропустить» свои новые результаты через Исаака Яковлевича, и это всегда давало большую пользу<sup>1</sup>.

В связи с семинарами вспоминается следующий характерный эпизод. В мае 1963 г. Исааку Яковлевичу исполнилось 50 лет. Об этом событии я ничего не знал, так как никакой подготовки к юбилею в теоретическом отделе не велось (думаю, что Исаак Яковлевич все это запретил). Так случилось, что семинар пришлось на день рождения Исаака Яковлевича. Семинар начался как обычно, потом во время какой-то паузы встал А. Б. Мигдал и произнес: «Сегодня Чуку исполняется 50 лет. Я его горячо поздравляю». Начались аплодисменты. Исаак Яковлевич встал, поклонился во все стороны и тут же молча сел. Семинар продолжался.

Более тесный научный контакт с Исааком Яковлевичем был у меня в 1964 г. В то время у нас с В. Д. Муром возникла идея о том, что можно в рамках полюсной модели доказать, что полные сечения сильных взаимодействий при  $s \rightarrow \infty$  выходят на константу. Исаак Яковлевич этим очень заинтересовался и какое-то время следил за нашей работой. По ходу дела нужно было вычислять довольно сложные интегралы, связанные с проверкой условия унитарности в  $s$ -канале. Было весьма поучительно наблюдать, как Исаак Яковлевич их быстро оценивает и приближенно вычисляет. Было очевидно, что его интересовало быстрее получение результата, выяснение научной истины, а математические красоты мало трогали.

Общение с Исааком Яковлевичем много дало нам, хотя сама попытка улучшить известное неравенство Фруассара довольно быстро провалилась (и, как теперь очевидно, не случайно).

Вот наиболее существенное из того, что сохранила моя память о замечательном физике-теоретике Исааке Яковлевиче Померанчуке.

<sup>1</sup> Разумеется, я не хотел бы быть понятым так, что, восхваляя семинар Померанчука, я критикую стиль других семинаров. Если я отдавал безусловное предпочтение семинару Исаака Яковлевича, то это объясняется субъективными причинами и связано с уровнем моей подготовки и способностей. Вообще же почти очевидно, что семинар, руководимый всяким крупным ученым, несет на себе неповторимый отпечаток его творческой индивидуальности и уже потому незаменим.

А. Б. Кайдалов

## МОЙ РУКОВОДИТЕЛЬ И. Я. ПОМЕРАНЧУК

Мне повезло быть аспирантом Исаака Яковлевича, к сожалению последним, которым он руководил. Впервые Померанчук стал моим научным руководителем еще на четвертом курсе МИФИ в 1960 г. В то время Исаак Яковлевич читал для студентов МИФИ курс лекций по квантовой теории поля. Его лекции отличались чрезвычайной ясностью изложения и в то же время затрагивали самые актуальные в те годы вопросы теории — аналитические свойства амплитуд рассеяния и функций Грина, дисперсионные соотношения. Помню первую задачу, которую поставил Исаак Яковлевич нам с Борисом Карнаковым (он, так же как и я, был впоследствии его дипломником и аспирантом). «Знаете ли вы, что такое „феномен Купера“?» — спросил Померанчук, когда мы впервые оказались в его кабинете. Мы, студенты четвертого курса, еще об этом ничего не слышали. Тогда Исаак Яковлевич сформулировал для нас квантовомеханическую задачу о спаривании в сверхпроводнике. Она была поставлена настолько четко и ясно, что мы смогли ее решить, а затем обобщить на более сложные случаи, не обсуждавшиеся в оригинальной работе.

Вспоминая встречи и научные беседы с Померанчуком, мне хотелось бы отметить его исключительно внимательное и доброжелательное отношение к чужим мыслям и идеям (часто весьма несовершенным). В то же время он совершенно не терпел поспешных и непродуманных заявлений и выводов. Глубокое и требовательное отношение к научной работе было и, я думаю, продолжает и сейчас оставаться одним из характерных признаков «школы Померанчука», одним из главных принципов, на которых строилась работа в теоретическом отделе ИТЭФ.

Исключительное внимание уделял Исаак Яковлевич связи между теоретиками и экспериментаторами. Когда я только начал приходить в ИТЭФ, Померанчук отметил, что для теоретика посещение общего с экспериментаторами семинара (по средам) является обязательным. К сожалению, сейчас многие теоретики (особенно молодые) редко посещают этот семинар, который постепенно как-то угасает.

В 60-е годы новая литература появлялась сначала в филиале библиотеки на чердаке, где в то время располагались аспиранты-теоретики. Помню оживленные обсуждения новых статей за круглым столом, на котором раскладывались журналы. Мне кажется, что новую литературу тогда читали более внимательно, чем сейчас. Отчасти это связано с тем, что Померанчук, который очень тщательно изучал новые статьи, мог, встретив любого сотрудника теоретического отдела, спросить: «А что Вы думаете об этой

статье?» И конечно, каждый из нас хотел иметь собственное мнение о новых работах, в особенности о тех, которые вызвали наибольший интерес.

Мне кажется, что самой характерной чертой Исаака Яковлевича была его глубочайшая любовь и преданность науке. Даже находясь в больнице, тяжело больной, он продолжал работать и живо интересоваться последними научными новостями. Эта глубокая и чистая любовь Исаака Яковлевича к науке несомненно оказывала сильное и благотворное влияние на всех, кто окружал его, и в особенности на молодежь. Я считаю, что мне бесконечно повезло: большое счастье — видеть, общаться и находить для себя образец в таком выдающемся человеке и ученом, каким был Исаак Яковлевич Померанчук.

Е. Д. Жижин

## АТМОСФЕРА ТВОРЧЕСТВА

Исаака Яковлевича Померанчука всегда окружала необыкновенная атмосфера творчества. Эта атмосфера привлекала к нему людей незаурядных, преданных науке. Сам Исаак Яковлевич был великим энтузиастом в науке, и своим энтузиазмом он буквально заражал всех вокруг.

Мне вспоминаются встречи с И. Я. Померанчуком в конце 50-х — начале 60-х годов, когда я делал только первые шаги в науке и когда его влияние на меня было особенно сильным.

Впервые я увидел Исаака Яковлевича в начале 1954 г. в стенах Московского механического института на ул. Кирова, 21, где он был профессором. К этому моменту я уже много слышал о нем, знал, что он член-корреспондент АН СССР и занимается исследованиями проблемы взаимодействия элементарных частиц. Уже само название проблемы вызывало у нас — молодых людей — жгучий интерес, от него веяло романтикой неизведанного, лежащего в глубинах материи. И вот по коридору идет невысокий человек с книгой под мышкой. Идет, не замечая ничего вокруг, погруженный в свои мысли. Подошел к аудитории, в которой у него через несколько минут должны были начаться занятия со студентами, остановился, раскрыл книгу и углубился в ее изучение. Причем вид у него был такой, что все происходящее вокруг: необходимый переход из одного места в другое, занятия со студентами — все это отрывает от дела, которое захватило его целиком. Вот так наши пути в этом коридоре пересекались в течение всего семестра, и неизменно повторялась одна и та же картина. Книга, которую Исаак Яковлевич так неистово изучал, была сборником

статей «Новейшее развитие квантовой электродинамики», только что вышедшим из печати. Как я узнал много позднее, именно в этот период Исаак Яковлевич заинтересовался свойствами уравнений квантовой теории поля в тех случаях, когда взаимодействие нельзя считать малым.

Эти первые встречи с Исааком Яковлевичем подействовали на меня чрезвычайно сильно. Я впервые в жизни повстречал человека, настолько целеустремленного в науке, настолько заинтересованного своим делом, способного до такой степени отрешиться от окружающей обстановки. Эти качества тогда еще незнакомого мне человека поразили меня, невольно захотелось подражать ему.

Потом были лекции Померанчука по квантовой механике — необычайно глубокие, красивые. Были заседания научного семинара ИТЭФа, душой которого был Исаак Яковлевич. Были обсуждения научных проблем с Л. Д. Ландау в аспирантской теоретического отдела ИТЭФа по средам, были многочисленные встречи с Исааком Яковлевичем — руководителем моей учебно-исследовательской работы, диплома, аспирантуры.

Исаак Яковлевич, пожалуй, раньше всех приходил на работу, а когда мы вечером покидали ИТЭФ, то в окнах его кабинета на втором этаже чаще всего горел свет — он продолжал трудиться.

Исаак Яковлевич все делал очень искренне. Он искренне радовался, искренне огорчался и негодовал. Однажды я постучался к нему. Открылась дверь, и я увидел, что у него в кабинете гость — его друг и соратник Александр Ильич Ахиезер. Я хотел было уйти, чтобы не мешать их встрече. Однако Исаак Яковлевич буквально затащил меня в кабинет, познакомил с Александром Ильичем. И начались воспоминания. При этом оба они вели себя как мальчишки.

Так постепенно я узнал и искренне на всю жизнь полюбил Исаака Яковлевича — большого ученого, замечательного человека.

Ю. П. Никитин

## ВОСПОМИНАНИЯ ОБ УЧИТЕЛЕ

Весьма сомневаюсь в том, что Исаак Яковлевич Померанчук был в восторге, когда я по направлению кафедры теоретической ядерной физики МИФИ поступил под его научное руководство. Зато твердо знаю, что я сам чувствовал при этом. После первого же разговора с Учителем о моей дальнейшей деятельности я понял, насколько я невежествен и самонадеян. Однако признаваться в этом даже самому себе, а тем более друзьям-студентам было стыдно. Поэтому я смалодушничал и решил подождать, когда

Учитель меня с треском выгонит. Но Исаак Яковлевич, несмотря на внешнюю суровость, оказался на редкость добрым, чутким и внимательным человеком. После очередного страшного и беспощадного разноса моих бесполезных квазинаучных трудов он, к моему удивлению, после небольшой паузы заявлял, что кое в чем не совсем прав. Двумя-тремя замечаниями Учитель устанавливал направление, в котором надо было действовать, и мне ничего не оставалось делать, как «вкалывать» дальше, пока не получалось что-либо путное. Исаак Яковлевич умел радоваться успехам своих учеников. Я знаю это по себе. Мне даже сейчас не совсем ясно, как ему удавалось увидеть среди моря глупости рациональное зерно. Но для меня несомненно, что его редкие похвалы в мой адрес были, мягко говоря, несколько преувеличены. По-видимому, он делал это с педагогическими целями, стремясь поддержать и развить самые скромные способности своих учеников к научно-исследовательской деятельности.

Работая со студентами и аспирантами, сотрудничая с молодыми учеными, я очень часто спрашиваю себя: а как поступил бы в том или ином случае Учитель? Всего около 9 лет мне пришлось учиться у Исаака Яковлевича. Это очень мало. Но все же эти годы определили мой жизненный путь, а это неопределимо много для меня.

Помните, как смеялся Исаак Яковлевич? Его мощный, раскатистый, ничем не сдерживаемый, заразительный смех. В его смехе было все, все неповторимые качества его души, его простота и величие большого Ученого, Человека, Учителя!

Весьма лестно и почетно считаться учеником академика И. Я. Померанчука. По-моему, это и очень ответственно, и очень трудно, если жить и работать в науке так же беззаветно, как Исаак Яковлевич. Как не хватает сейчас его строгой оценки, его скупого одобрения! В физике элементарных частиц эпоха расцвета и больших надежд. А все же представляется, что Исаак Яковлевич где-то далеко впереди самого переднего фронта науки. Он по-прежнему недостижим и непостижим, потому что он неповторим.

В. Д. Мур

## ЭТО БЫЛО НЕДАВНО, ЭТО БЫЛО ДАВНО

Осенью 1960 г. мне посчастливилось стать аспирантом Исаака Яковлевича Померанчука. Естественно, первые впечатления связаны скорее с учебными, чем с чисто научными вопросами. Впрочем, как мне кажется, Исаак Яковлевич не проводил резкой границы между ними. Но обо всем по порядку.

После окончания физфака МГУ я работал по распределению в Рентгено-радиологическом институте Минздрава РСФСР. Благодаря цепочке счастливых случайностей Виктор Михайлович Галицкий, заведовавший тогда кафедрой теоретической ядерной физики МИФИ, предложил мне продолжить учебу в аспирантуре под руководством И. Я. Померанчука. Недоставало немного: согласия самого Исаака Яковлевича, который в то время и не подозревал о моем существовании. Для меня же это имя ассоциировалось со словами моего первого научного руководителя Владимира Яковлевича Файнберга, читавшего нам лекции по квантовой теории поля: «...Померанчук с помощью сложнейшей двухпредельной техники доказал существование нуль-заряда в квантовой электродинамике...»

И вот я с внутренним трепетом стою перед небольшого роста щуплым человеком с пронзительным взглядом, блистающим через стекла очков из-под несколько насуспенных густых черных бровей. Исаак Яковлевич спросил, знаком ли я с представлением Мандельштама, и, несмотря на положительный ответ, попросил меня внимательно изучить эту тему. При следующей встрече он задал всего лишь один вопрос: до каких передаваемых импульсов  $t$  двойная спектральная функция равна нулю при любых энергиях  $s$ ? Ответ прост:  $t = 4\mu^2$ . Однако так как я ожидал чего-то ошеломляющего, то долго колебался, прежде чем ответить. Эти тривиальные  $4\mu^2$  решили мою судьбу.

Нечто похожее повторилось на экзамене по квантовой механике. Одновременно со мной аспирантами И. Я. Померанчука были Ю. П. Никитин и В. Н. Мельников, которые учились у него, будучи еще студентами МИФИ. Как-то в разговоре с одним из них (Ю. П.) я узнал, что один из любимых И. Я. вопросов по квантовой механике — штарк-эффект в атоме водорода с  $n = 2$ . В классическом учебнике Ландау и Лифшица этот вопрос излагается методом разделения переменных в параболических координатах, и я, от греха подальше, буквально наизусть выучил соответствующий параграф. На экзамене в числе прочих действительно был и этот. Не понимая цели вопроса, я отбарабанил все по учебнику, чем, по-видимому, привел в некоторое замешательство Исаака Яковлевича. Во всяком случае, ни одного дополнительно вопроса он не задал, а только с заметным сожалением сказал, что это, конечно, все правильно, но лучше было бы разобрать этот вопрос «по-рабочекрестьянски», по теории возмущений с вырождением. Кто бы мог подумать, что на кандидатском экзамене Исаак Яковлевич задаст простую студенческую задачу? Можно было бы привести еще несколько подобных случаев, в которых выразился, как мне кажется, научный стиль Померанчука — стремление обнажить сущность любого, от самого простого до самого сложного, физического явления в по возможности простых ситуациях. Заканчивая «экзаменационную» тему, упомяну экзамен по

квантовой теории поля — хронологически первый, который я сдавал Померанчуку. Получив в кабинете Исаака Яковлевича вопросы, я огляделся, не зная, куда бы пристроиться. Заметив это, он сказал, что готовиться к ответу можно где угодно, например в библиотеке. Поймав мой недоуменный взгляд, Исаак Яковлевич как-то особенно значительно произнес слова, которые навсегда врезались в память: «Вадим Давыдович, меня вы обмануть можете, но Науку вы не обманете». В этих словах — отношение Исаака Яковлевича к науке, для которого она означала все. Он говорил: «Если бы не было Науки, то незачем было бы жить». Возвращаясь к экзамену по квантовой теории поля, хотелось бы добавить лишь одно: Померанчук не отделял обучение от собственно науки, для него это был единый процесс. Так, одним из вопросов был такой: оценить зависимость от импульса обрезания поправки к швингеровской поправке к магнитному моменту электрона. Ни в монографии Ахизера<sup>7</sup> и Берестецкого, ни в книгах Швехера, Бете, Гофмана или Боголюбова и Ширкова я не встречал (может быть, по недосмотру) такого вопроса и был несколько озадачен. Но вскоре вспомнил, что нечто связанное с этим вопросом обсуждалось на одном из недавних семинаров в ИТЭФе. Правда, во время обсуждения я мало что понял. Однако это смутное воспоминание вместе с четко сформулированным вопросом свели ответ к простой технической задаче.

Здесь самое время сказать несколько слов о замечательном теоретическом семинаре, руководимом Померанчуком. Практически в каждом сообщении он умел найти изюминку и в виде вопроса к докладчику обнажить общефизическую проблему в любой задаче, какой бы унылой на первый взгляд (особенно для неискущенного участника) она ни выглядела. Обычно это происходило так. Исаак Яковлевич, характерным жестом похлопывая себя по голове, говорил, что он чего-то не понимает, и просил докладчика разъяснить ему «по-рабочекрестьянски» тот или иной затронутый вопрос. После этого задача начинала сверкать новыми красками. Насколько я могу судить, с семинаром Померанчука в этом отношении могли конкурировать лишь теоретический семинар в ФИАНе, руководимый Игорем Евгеньевичем Таммом, и семинар в МИФИ, руководимый Виктором Михайловичем Галицким. Исаак Яковлевич очень ответственно относился к проведению семинара и, насколько я помню, только один раз ушел с семинара, разозленный докладчиком, который в ответ на задаваемые Померанчуком вопросы повторял практически одно и то же. И. Я. долго это терпел, после чего, взбешенный, буквально выбежал из конференц-зала, хлопнув дверью.

Нужно сказать, что столь же ответственно Исаак Яковлевич относился и к ежемесячным заседаниям кафедры теоретической ядерной физики МИФИ, профессором которой он был. Его непрерывное участие придавало этим заседаниям значимость и делови-

тость, стимулировало и дисциплинировало молодых членов кафедр. И эти заседания, и теоретический семинар Померанчук считал неотъемлемой частью научной работы, и его отношение к ним определялось его преклонением перед Наукой. Для Исаака Яковлевича не было мелочей в любых вопросах, так или иначе связанных с Наукой, которой он отдавал всего себя.

Меня поражала непрехотливость Исаака Яковлевича в обычной жизни. В частности, его обед, как мне кажется, систематически состоял из семикопеечной булки, которую он разламывал пополам, с куском вареной колбасы. Все это запивал чаем, который заваривал здесь же, в кабинете, процеживая его через фунтик, свернутый из листа писчей бумаги.

Исаак Яковлевич был добрым и чутким человеком. Ощущение это сложилось у меня под влиянием каких-то неуловимых деталей, частных, связно изложить которые я не в состоянии. Гораздо проще привести пример его удивительного отношения к молодым сотрудникам. Однажды при обсуждении дисперсионного соотношения для амплитуды рассеяния нейтрино вперед я вскользь упомянул о необходимости одного вычитания (это довольно простое утверждение не вызвало у меня ни капли сомнения). Исаак Яковлевич грозно на меня взглянул, взорвался, как водородная бомба, и со словами: «Какую чушь вы порете!» — в энергичных выражениях отослал меня обдумать этот вопрос. В назначенный срок, через день, я, теряясь в догадках, стоял у дверей кабинета Померанчука, ожидая следующего разноса, так как ничего путного придумать не смог. Однако, как только И. Я. увидел меня, без всяких напоминаний, как бы продолжая разговор, сказал: «...в прошлый раз произошло недоразумение, так как вы, по-видимому, имели в виду инвариантную амплитуду, а я — амплитуду рассеяния, квадрат модуля которой дает дифференциальное сечение...» Этот эпизод показывает, насколько Исаак Яковлевич уважал мнение собеседника, какого бы ранга он ни был.

Вспоминая впоследствии этот и некоторые другие случаи, я нашел, как мне кажется, разгадку причины исключительно сильного влияния И. Я. Померанчука на учеников. Если подсчитать то, что в хоккее называется «чистым временем», окажется, что вряд ли наберется один день непосредственного общения с Исааком Яковлевичем за те шесть лет, которые мне посчастливилось быть его учеником. Однако перед каждым научным разговором и во время него я, с одной стороны, всегда испытывал неизъяснимый трепет, а с другой — был предельно мобилизован. Это в конечном счете и являлось, по-видимому, причиной научного роста.

Еще одной загадкой, которая осталась для меня так и неразгаданной, были лекции Исаака Яковлевича. К сожалению, мне удалось побывать только на половине первой из лекций по квантовой теории поля, которые И. Я. Померанчук читал студентам-теоретикам пятого курса МИФИ в 1961 г. Во время перерыва И. Я.

сказал, что мне нецелесообразно слушать эти лекции, так как якобы я все это знаю. Эти слова я расценил как приказ и не осмелился прийти, о чем до сих пор сожалею, ни на одну из последующих лекций. Просмотрев после окончания семестра конспект этих лекций и сопоставив прочитанный объем с манерой чтения (И. Я. непрестанно курил, говорил неторопливо, иногда характерным жестом постукивая себя по голове; так, во всяком случае, было в течение всех 45 минут, пока я был на лекции), я поразился. Исаак Яковлевич сумел невероятным образом в столь короткий срок изложить все существенные вопросы квантовой теории поля включая перенормировку, нуль-заряд и т. п. Я думаю, эти лекции не потеряли своей актуальности и сейчас, через четверть века. Было бы замечательно, если бы удалось их восстановить по записям слушавших его студентов.

Память об Исааке Яковлевиче Померанчуке вызывает чувства, прекрасно выраженные поэтом:

О милых спутниках, которые наш свет  
Своим сопутствием для нас животворили,  
Не говори с тоской: *их нет*;  
Но с благодарностью: *были*.

М. Ф. Ломанов

## И ПОЗИТРОННАЯ ТОМОГРАФИЯ

Вышедший из московского Физтеха, автор этой заметки принадлежал к значительно более молодому поколению ИТЭФа, чем Исаак Яковлевич. Но теперь можно оценить, как велика была его роль в формировании наших научных интересов. Откровенно говоря, наш курс не отличался особенной ясностью целей, и по этому поводу вспоминается контакт с Исааком Яковлевичем моего однокашника. Наш студент увлекался теорией... выигрыша на скачках на ипподроме. Однажды — это было в 1952 г. — он прибежал с радостной вестью. «Меня Чук заметил, — объявил он, — и позвал на беседу. Только мы вдвоем, он и я, просиживали штаны в библиотеке». Результат следующего дня был огорчителен: «Не взял...»

Но вот что было важно для молодежи: на семинарах ИТЭФа сложилась традиция вытаскивать молодых людей к доске с докладами на произвольную тему, преимущественно из «Physical Reviews». Конечно, докладчик нуждался в поддержке аудитории. Таким внимательным партнером, несомненно, бывал Исаак Яковлевич: он (в отличие от многих людей) *умел слушать*. «Я не специалист в этом вопросе и, может быть, чего-нибудь недопони-

маю» — так деликатно вмешивался Исаак Яковлевич, а затем сделал достаточно веское замечание.

Уже много лет спустя приходится сталкиваться не только с общепризнанными, но и с совсем неожиданными следами его деятельности. Например, на протяжении 1975 г. на страницах американского «Journal of Nuclear Medicine» тянулась полемика о предельных возможностях позитронной компьютерной томографии, применяемой в медицинской диагностике. Нечеткость изображений все время пытались объяснить большим пробегом позитронов в тканях организма. Наконец, появилось короткое письмо в редакцию журнала, в котором Г. Мюллнер вспомнил о статье И. Я. Померанчука из ЖЭТФ 1949 г. Решение проблемы было найдено с той же легкостью, с которой сам Исаак Яковлевич сумел остановить спор одной короткой репликой. Причина нашлась не там, где ее искали, а в угле разлета аннигиляционных гамма-квантов, которые летят не точно в противоположных направлениях, как считается. Хотя поправка на скорость движения атомного электрона и не велика, но как раз она и портит качество изображения на томографе. Отмеченный факт прочно вошел в технику интроскопии. Однако он забыт историей физики. О приоритете Померанчука больше не упоминают, в чем можно убедиться, например пролистав изданную в 1983 г. монографию А. М. Сороко «Интроскопия».

Заметим кстати, что результат И. Я. Померанчука используется и в другой области — радиоастрономии, когда по ширине линии аннигиляционных гамма-квантов определяют температуру газа в далеких туманностях.

Касаясь еще медицинских вопросов, нужно сказать и о главном. До Исаака Яковлевича вряд ли кому-либо приходила мысль использовать для медицины наши большие протонные ускорители. Реальным воплощением его идеи стало новое направление применения ускорителей, и «терапевтическая и экспериментальная» физика на протонном синхротроне ИТЭФа дала лечение уже полутора тысячам больных.

Конечно, все приведенные нами факты далеки от основной деятельности выдающегося теоретика, но именно они доказывают тесную взаимосвязь фундаментальных и прикладных направлений науки. Притом даже совсем «слабое» взаимодействие бывает сильным по результату. Это проявилось и в тех малозаметных контактах, когда мы не только жили и работали бок о бок с Исааком Яковлевичем, но и постоянно ощущали его присутствие, поддавались его обаянию и как ученого, и как человека.

Б. М. Карнаков

## НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ

Сообщение, что Алеша Кайдалов и я будем проводить УИР под руководством Исаака Яковлевича, вызвало в нашей группе живое обсуждение. Имя Померанчука было для нас одним из символов теоретической физики, и перспектива общения с ним вызвала у меня самые разноречивые ощущения. Когда мы представлялись Исааку Яковлевичу, то уже знали, что со студентами он мягок и доброжелателен, но может и вспылить (рассказывали, что однажды на экзамене он, потрясенный познаниями одного из студентов, выбросил в окно его зачетку). Исаак Яковлевич пригласил нас для разговора в ИТЭФ и для начала предложил задачу. Задача была простая, на релятивистскую кинематику, при этом было задано численное значение энергии налетающего нуклона. Направляясь на встречу с Исааком Яковлевичем, мы с Алешей сравнили результаты: и формулу, и число (первые пять знаков которого мы, конечно, знали на память). Испытывая известное многим волнение, мы вошли в кабинет Померанчука. В ответ на предложение сообщить результат один из нас взял мел и начал: «Формула для импульса имеет вид...» Исаак Яковлевич прервал: «Какое получилось число?» Не знаю почему, но державший мел после паузы продолжал примерно так же, как и начал, а другой просто молчал. Исаак Яковлевич, уже повысив голос: «Я спрашиваю число». После этого молчали уже оба. Исаак Яковлевич спросил наши записи. Узнав, что они в портфелях, оставленных у проходной, он послал нас за ними. Выскочив из кабинета и выяснив, что число не забыто, мы стали с Алешей упрекать друг друга в молчании. К счастью, после нашего возвращения минут через двадцать инцидент был исчерпан.

Преодоление чувства робости, возникающей при подходе к кабинету Исаака Яковлевича, было, как мне представляется, своеобразной платой за возможность общения с таким Ученым и Человеком. При этом именно процесс обсуждения полученных результатов представлял собой школу, в которой Исаак Яковлевич проявлял себя как внимательный и требовательный Учитель. Когда решение ему нравилось, он сразу давал это почувствовать. Если же требовалась доработка, то после обсуждения с ним становилось понятным, в каком направлении и почему она необходима. Здесь проявлялась поразительная черта Исаака Яковлевича (знакомая всем по научным семинарам) — задавать такие вопросы, после ответа на которые предмет обсуждения обычно становился ясным и понятным. Так, когда мы с Алешей рассказывали ему работу по образованию резонансов, в которой в результате манипуляций со спиральными амплитудами был сделан вывод о возмож-

ности зануления дифференциального сечения, Исаак Яковлевич предложил нам написать соответствующие инвариантные амплитуды. После того как это было сделано, наше утверждение выглядело уже очевидным.

Сочетание научного дарования, высоких человеческих качеств, душевного отношения к людям было основой той творческой обстановки, которую создал Исаак Яковлевич. Его авторитет был безусловным, а ученики и коллеги платили ему своей любовью и уважением. Вспоминаются трогательные попытки физиков ускорить развитие медицинской науки с целью выработки эффективных методов борьбы с той страшной болезнью, которая поразила Исаака Яковлевича.

А. А. Ансельм

## ОБСУЖДЕНИЯ С И. Я. ПОМЕРАНЧУКОМ ПРОБЛЕМЫ НУЛЯ ЗАРЯДА

Хотя я и раньше немного знал Исаака Яковлевича, мое более близкое знакомство с ним состоялось в 1957 г., когда меня вызвал в Москву мой учитель К. А. Тер-Мартirosян в связи со всеобщим возбуждением, охватившим физиков Москвы, — только что была высказана идея, что в четырехфермионном взаимодействии, может быть, отсутствует проблема «нуль-заряда». В Москве я сразу же окунулся в атмосферу невероятного ажиотажа — все с минуты на минуту ждали великих событий, все время собирались маленькие импровизированные семинары, два десятка теоретиков находились в непрерывном личном (и особенно телефонном) контакте. В этой обстановке Исаак Яковлевич производил впечатление исключительно счастливого человека. Он излучал энергию и энтузиазм. Так и вижу его с предупредительно нацеленным на собеседника пальцем: «Имейте в виду, если окажется, что в четырехфермионном взаимодействии нет нуля-заряда, работы хватит всем... теоретикам всего мира».

Только сейчас мы знаем, насколько он был прав. Бесконечно жаль, что он не дожил до асимптотической свободы. Можно представить себе, как безмерно счастлив был бы он, узнав о существовании теории без нуля-заряда и о том, к какой удивительной физике приводит такая теория...

Я получил задание изучить проблему, как мне тогда показалось, на второстепенном направлении: рассмотреть четырехфермионное взаимодействие в двухмерном мире — ходили слухи, что такую модель рассмотрел Тирринг и получил какие-то интересные результаты. Позже выяснилось, что мне повезло: оказа-

лось, что на двухмерной модели можно легко увидеть несостоятельность так называемой «двухпредельной техники», которая только что была применена, по идее Ландау, на «основном направлении» — для анализа четырехфермионного взаимодействия в реальном четырехмерном мире. Я экспромтом рассказал о полученном результате Ландау и Померанчуку в ИТЭФе, в «теоркомнате» на первом этаже, после общепланового семинара в среду, который непременно всегда посещал Ландау. В какой-то мере моя работа противоречила их собственной, но с какой непредвзятостью выслушали они меня! Было видно, какое удовольствие доставляет им несколько неожиданный поворот теории; тут же выяснилось, что из изучения другого модельного примера Исаак Яковлевич и сам имел некоторые подозрения относительно «двухпредельной техники»...

Не столь приятным был для меня другой случай обсуждения проблемы нуля-заряда с Исааком Яковлевичем. Я только что напечатал статью, в которой из общих свойств перенормируемости, унитарности и т. п. обсуждал возможную структуру квантовой электродинамики в области сверхвысоких энергий. В работе анализировался условный вопрос о том, что будет, если нуля заряда в электродинамике все-таки нет, если высшие приближения по константе связи радикально меняют характер теории. При этом я вообще не обсуждал физические аргументы Ландау и Померанчука, показывающие, что высшие приближения едва ли могут быть существенны. Именно это страшно рассердило Исаака Яковлевича.

Случилось так, что я зашел к нему в кабинет вечером накануне того дня, когда должен был защищать кандидатскую диссертацию в ИТЭФе. Исаак Яковлевич только что просмотрел мою статью в ЖЭТФе, включенную, кстати, в диссертацию. Не могу дословно привести всех его высказываний по поводу моей работы и меня лично, но смысл их состоял в том, что на физические аргументы (его и Ландау, относящиеся к проблеме нуля-заряда) нужно отвечать физическими аргументами, а не условными конструкциями типа математических условных теорем. Я впервые (и, рад сказать, в последний раз) столкнулся с подлинным гневом Исаака Яковлевича, и ощущения мои были не из приятных... Однако перед самым моим уходом Исаак Яковлевич вдруг, не глядя на меня, сказал: «Между прочим, насчет завтрашней диссертации не беспокойтесь... Одно не имеет отношения к другому».

А я и не очень беспокоился. Я уже достаточно знал Исаака Яковлевича и понимал, что его гнев совершенно не имеет личного характера, просто моя работа вошла в противоречие с его убеждениями о том, как должна делаться настоящая теоретическая физика, чего, конечно, Исаак Яковлевич стерпеть не мог...

Спустя несколько лет мы с Я. И. Азимовым рассказывали Исааку Яковлевичу нашу работу о движении полюсов Редже для потенциала Юкавы. Работа понравилась ему, и вдруг, когда мы



вместе выходили из ИТЭФа, он, лукаво прищурившись в мою сторону, сказал: «Кажется, у нас с Вами, Алексей Андреевич, были некоторые разногласия по поводу нуля-заряда?» Я понял, что наконец прощен.

Когда думаешь об Исааке Яковлевиче, вспоминаешь много разрозненных эпизодов; и некоторые из них кажутся не случайными.

В 1964 г. во время Рочестерской конференции в Дубне мы небольшой компанией гуляли по набережной Волги. Разговор зашел о недавно предложенных Гелл-Манном и Цвейгом кварках. Кто-то легкомысленно заметил: «Ну, подумаешь, в конце концов — кварки. Будет еще один адрон, только с дробным значением электрического заряда». «Нет, нет, — немедленно откликнулся Исаак Яковлевич, — ведь один из кварков должен быть стабильным. Из них же можно будет мыло варить... — А потом вдруг, подумав, добавил загадочную фразу: — И вообще, неизвестно еще, какая у них масса... Может быть, она вообще равна нулю...»

В начале 30-х годов Исаак Яковлевич учился на Физмехе в Ленинграде. Руководителем одной из учебных лабораторий у Померанчука была в то время моя мать — Ирина Викторовна Мочан. В ее воспоминаниях об Исааке Яковлевиче всегда смешивалось восхищение и некоторый ужас. «Он был такой сильный студент, — рассказывала она мне много лет спустя, — что я ужасно боялась его. И не напрасно. Однажды он пришел ко мне с отчетом о лабораторной работе. Пока он сдавал мне этот отчет, я поняла, что десятки студентов, сдававших его раньше, делали одну и ту же ошибку — должно быть, списывали друг у друга. У меня не хватило смелости сказать об этом ему. Я просто приняла зачет и в дальнейшем требовала уже правильного выполнения работы».

С. Г. Матинян

## И. Я. ПОМЕРАНЧУК В ПЕРИОД ОТКРЫТИЯ НЕСОХРАНЕНИЯ ЧЕТНОСТИ

Я бы хотел рассказать об одном эпизоде, который во многом определил мою научную судьбу и связан с Исааком Яковлевичем Померанчуком. Мое первое знакомство с Исааком Яковлевичем состоялось в начале 1957 г. Это было очень интересное для молодого человека, желающего заниматься теорией элементарных частиц, время: незадолго до этого возникла проблема несохранения четности в слабых взаимодействиях, появилась знаменитая статья

Ли и Янга, работа Л. Д. Ландау о комбинированной четности, известная работа моих новых знакомых из ИТЭФа (Б. Л. Иоффе, Л. Б. Окуня и А. П. Рудика) о нарушении  $C$ -четности, вот-вот ожидалось результаты опыта по асимметрии электронов в  $\beta$ -распаде поляризованного кобальта. Все жили в атмосфере, насыщенной захватывающими открытиями — большими и не совсем большими, но открытиями.

Надо сказать, что я — аспирант ученика Л. Д. Ландау Г. Р. Хуцишвили — был в определенной степени «готов» к этому периоду: будучи студентом четвертого курса Тбилисского университета, я прочел статью Ву, переведенную в УФН в 1951 г., об экспериментальном статусе теорий  $\beta$ -распада (в то время физики считали, и Ву показывала это в своем обзоре, написанном до возникновения проблемы несохранения четности, что  $S + T$ -вариант теории надежно установлен, никакой речи не было о  $V$ - или  $A$ -вариантах). В этой статье было примечание переводчика (В. Б. Берестецкого) о том, что ситуация с вариантами  $\beta$ -взаимодействия неясна, особенно если учесть, что, как заметил Ландау, никто не знает, чему равна четность нейтрино, и поэтому если ввести в игру  $\gamma_5$ , то вместо пяти возможных вариантов теории могут быть и все десять. Так в примечании к статье Ву в УФН появились альтернативные варианты теории  $\beta$ -распада Ландау. Правда, говорилось в примечании, для разрешенных спектров эти варианты приводят к тому же, что и прежние, но неизвестно, что будет в случае запрещенных спектров для альтернативных вариантов Ландау. Я стал размышлять по этому поводу, получил все то же самое, что и прежде, и пришел к выводу, что причина здесь в нулевой массе нейтрино (я так и назвал свою дипломную работу (1954 г.): «Альтернативные варианты теории  $\beta$ -распада и вопрос нейтрино»). Когда я при нашей первой встрече в январе 1957 г. с Чуком рассказал ему об этом, он с присущей ему прямотой сказал: «Да, здесь Вы не „потянули“, оставалась „самая малость“ — исследовать поляризационные явления, но в 1953 г. вряд ли кому-нибудь, а не только Вам, студенту четвертого курса, могла бы прийти в голову идея о сложении единицы с  $\gamma_5$ ».

Уже знакомый с работой трех авторов из ИТЭФ, я в течение дня, будучи, как уже говорил, «готовым» к этому, вычислил вероятности различных асимметрий и корреляций в распадах  $\Lambda$ ,  $\Sigma$ ,  $\Xi$ -гиперонов (несколько ранее часть такой работы выполнили Кабир, Ли и Янг). На другой день я утром пришел к Чуку в его знаменитый кабинет и рассказал ему о расчетах. Надо было видеть, как просиял Чук, который, по-видимому, не ожидал от провинциала, каким был (да и, наверное, остался) я, такой прыти, позвал Леву Окуня, и тот сказал, что воспроизвел мои расчеты и в них все верно.

Этот эпизод навсегда останется в моей памяти, я потом часто встречался с Исааком Яковлевичем, рассказывая ему свои работы,

и всегда он выслушивал меня с большим вниманием и, я это чувствовал, теплотой.

И еще вспоминается мне командировка Исаака Яковлевича летом 1962 г. в Женеву. Это был его первый (и последний) выезд за рубеж — на Международную (Рочестерскую) конференцию по физике высоких энергий.

Советская делегация на этой конференции была беспрецедентно многочисленной и представительной. Это были годы зарождения, интенсивного развития и расцвета принципиальных основ реджистики. Признанными лидерами здесь были И. Я. Померанчук и В. Н. Грибов, оба — члены нашей делегации. Возглавляли делегацию академики А. И. Алиханов и В. И. Векслер. В ее составе были Н. Н. Боголюбов, М. А. Марков, В. В. Владимирский, В. П. Желепов и другие.

И вот делегация в старом аэропорту Шереметьево. Объявлена посадка на наш рейс, а Чук, приехавший чуть ли не первым в аэропорт, вдруг исчез. Руководители делегации забеспокоились, отправив меня, как одного из самых молодых в делегации, на поиски. Выяснилось, что Исаак Яковлевич в почтовом отделении пишет письмо жене перед отлетом.

На всю жизнь запомнились мне вечерние прогулки по берегу Женевского озера, когда окруженные членами делегации Чук и Володя Грибов вели нескончаемые страстные обсуждения проблем, выдвигаемых реджистикой.

И опять в духе Исаака Яковлевича — он решил, что такой роскошной жизни с него хватит, надо ехать домой, работать, и, пользуясь представившейся возможностью, уехал на два дня раньше всей делегации.

И. Я. Померанчук был очень чутким и отзывчивым человеком. Одно время (это было в конце 50-х годов) я хотел перейти на работу в ИТЭФ. Чук, узнавший об этом, приветствовал мое желание и взялся мне помочь. По-видимому, все шло к тому, чтобы моя мечта осуществилась, но неизлечимая болезнь Исаака Яковлевича помешала довести это до конца.

Что запомнилось мне в Исааке Яковлевиче, что я вынес из общения с ним? Конечно, очень многое профессионального характера. Но самым главным для меня были его беспримерная преданность делу науки, можно сказать научному ремеслу, и неумное научное любопытство.

Л. Г. Ландсберг

## ИСААК ЯКОВЛЕВИЧ ПОМЕРАНЧУК

Во время моей работы в ИТЭФе в 1957—1966 гг. мне не довелось тесно общаться с Исааком Яковлевичем Померанчуком. Но я часто видел и слышал его на семинарах и в кулуарных обсуждениях и постоянно испытывал на себе обаяние этого исключительного человека, Чука, о котором без всякого преувеличения можно сказать, что он был рыцарем Науки и совестью института. Видимо, по молодости я тогда немного стеснялся Чука и свои вопросы по науке старался в основном выяснять с Л. Б. Окунем, Б. Л. Иоффе, К. А. Тер-Мартirosяном, И. С. Шапиро и другими более молодыми теоретиками ИТЭФа. Сейчас я, конечно, очень жалею, что редко пользовался возможностью прямых обсуждений с Чуком.

Чем больше проходит времени, тем теплее становится на душе, когда вспоминаешь, с каким увлечением относился к физике Чук, как интересовался и радовался он, когда происходили какие-либо научные события, появлялись новые проблемы. Наверное, многие помнят, как он вскакивал во время семинаров и восклицал: «Слушайте, слушайте!» или «О!» — держа указательный палец перед глазами.

Конечно, когда обсуждения непосредственно касались вопросов, которыми Чук занимался сам, его интерес проявлялся особенно остро. В связи с этим мне вспоминается история с обратным рассеянием пионов, которое, как казалось вначале, обнаружить не удалось. Но вот наконец оно появилось! Это было ему интересно и приятно, и мне помнятся беседы с ним на эти темы, которые велись, кажется, на одной из школ в Ереване, где докладывались результаты первых опытов по наблюдению обратного рассеяния.

Но Чука интересовала прежде всего наука, а не только его собственные работы. И его радость и возбуждение, когда становилось известным что-то новое и интересное, всегда были искренними и сильными.

Я вспоминаю какой-то из дней 1961 г., когда я был в кабинете у Абрама Исааковича Алиханова (кажется, вместе с В. А. Любимовым и В. С. Кафтаповым мы рассматривали наши эксперименты по  $\mu$ -распадам). Вдруг неожиданно вошел Чук и сказал: «Абрам Исаакович! Я должен Вам сказать, что, по-видимому, сделано очень крупное открытие...» Речь шла об обнаружении  $\omega$ -мезона в экспериментах группы Альвареца, первые сведения о котором пришли тогда к Чуку. И мне трудно передать словами, хотя эта картина очень жива в памяти и сейчас, спустя четверть века, как увлечен был Чук, какое у него было выражение лица, как

бескорыстно радовался он этой новости о неожиданном и замечательном явлении, положившем начало физике резонансов.

Таких или похожих эпизодов было довольно много. Исаак Яковлевич очень ярко и образно реагировал на подобные события, и его слова и остроумные высказывания немедленно становились достоянием научного фольклора. Помню, что, когда летом 1964 г. физики съехались на Международную конференцию в Дубну и стало известным открытие группой Фитча и Кронина  $K_L^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ -распада, Чук тут же рассказал анекдот о человеке, который, когда его вели на виселицу, спросил, какой сегодня день, и, узнав, что понедельник, воскликнул: «Ничего себе начинается неделя!» И с этих слов долго начинались все разговоры о конференции.

Последний год, когда Чук был с нами... Грустная весть о его тяжелой болезни уже стала известной. Какое-то время, когда он чувствовал себя особенно плохо, он не мог ходить в ИТЭФ. Потом наступило непродолжительное улучшение — и вот Чук опять в институте, он опять выступает на семинарах, с увлечением обсуждает вопросы, которыми он так плодотворно занимался последние годы. И глядя на этого мужественного человека, просто невозможно было поверить, что он безнадежно болен и знает об этом.

И вот наступил печальный декабрьский день 1966 г., когда мы прощались с Чуком. Случилось так, что для меня это был еще и последний день моей работы в ИТЭФе, и мне казалось тогда, да кажется и сейчас, что кончилось что-то очень для меня важное, связанное с молодостью, со счастливыми годами напряженной работы с такими замечательными людьми, как Абрам Исаакович Алиханов и Исаак Яковлевич Померанчук.

### И. И. Левинтов

## ВОСПОМИНАНИЯ О И. Я. ПОМЕРАНЧУКЕ

— Иосиф Иосифович, как Вы думаете, есть кварки?

— Нет.

— ?

— Ну, они были бы в камнях...

Исаак Яковлевич (задумчиво):

— Они были бы в камнях...

(Я заглянул к Исааку Яковлевичу в кабинет, но у него был народ, и я сразу ушел после его вопроса.)

Исаак Яковлевич:

— Реджистика — это как борщ, в котором есть все: свекла, коренья, приправа — только мяса нет!

— ... Мэтр, но... (из разговора с Ландау).

— Товарищ волк знает! (в дискуссии).

— Если это акт веры — я согласен (замечание к недостаточно обоснованной аргументации докладчика на семинаре).

Исаак Яковлевич курил на семинаре — зажигает спичку, а когда огонек дойдет почти до пальцев, возьмет за обгорелую головку и смотрит, как огонек гаснет.

— Иосиф Иосифович, это был удар ниже пояса! (Я рассказывал на семинаре первые данные о сужении конуса в  $pp$ -рассеянии и усомнился в правильности теоремы Померанчука, которая основывалась на существовании предельного радиуса взаимодействия. Я не обсудил этот вопрос с Исааком Яковлевичем до семинара, и он не нашелся тогда что ответить. Но он был прав. Он был прав.)

### Г. А. Лексин

## НЕСКОЛЬКО БЕСЕД С И. Я. ПОМЕРАНЧУКОМ

И. Я. Померанчука я знал много лет, но лично беседовал с ним всего лишь два или три раза. Общее непреходящее впечатление: глубочайшая научная и человеческая порядочность, на всю жизнь чувство большого уважения.

В конце 50-х годов, когда мы появились в ИТЭФе и стали видеть Померанчука чаще, чем во время его приездов в Дубну, Ю. Д. Баяков как-то сказал, что Исаак Яковлевич похож на марсианина. По прошествии многих лет эта парадоксальная внешняя характеристика не кажется мне абсурдной.

При разговоре Померанчук подходил близко к собеседнику. Часто говорил длинно, точнее, длинными фразами со многими придаточными предложениями, которые уточняли, детализировали основную мысль, оговаривали особый случай и т. д. Стремление к точности усложняло фразу, но мысль всегда доводилась до конца.

Первая моя беседа с Исааком Яковлевичем была связана с проводимым нами тогда экспериментом по измерению сечения пион-пионного взаимодействия. В то время это был достаточно актуальный вопрос, но не из самых первостепенных. Исаак Яковлевич обсуждал его заинтересованно, подробно вникая в детали постановки опыта. Запомнились простота и наглядность подхода. Например, Померанчук не пренебрег простой геометрической картинкой однопионной и трехпионной шубы нуклона при оценке вклада неполюсных диаграмм. На всю жизнь запомнилось высказанное им, по-видимому не впервые, предупреждение о возмож-

ном возникновении невольных ошибок при введении поправок на конечный результат. Экспериментатору почему-либо результат не нравится, он вводит поправку, правильную поправку, и правильно вводит, но подспудно в ту сторону, какая ему нужна, и так до тех пор, пока результат его не удовлетворит. Исаак Яковлевич призывал заранее, до получения результата, проанализировать все необходимые поправки. Померанчук был инициатором использования пучков заряженных частиц, в частности нашего ускорителя, для лучевой терапии. Это предложение он обсуждал в последний год жизни уже в больнице. Я внутренне горд тем, что, когда для обсуждения понадобился экспериментатор, он позвал меня. Самое яркое впечатление от этой встречи, пожалуй, в том, что полностью отсутствовал, так сказать, больничный колорит. Кажется, Исаак Яковлевич и одет был не в халат, а, как всегда, в костюм. О здоровье как-то совсем вскользь, разговор шел о деле, о выступлении на Ученом совете Онкологического центра.

Люблю вспоминать не раз повторявшийся эпизод. Семинар ИТЭФа. В первом ряду справа от прохода сидят Алиханов и Ландау. Во втором ряду за Ландау — Померанчук. Кстати, все трое семинаров не пропускали и очень активно обсуждали доклады. Бывало, Ландау возражал докладчику, спорил с ним. Тут подключалась тогдашняя молодежь, которая по-разному — сейчас не важно, кто как, — возражала Ландау. Ландау быстро поворачивался отвечать, Померанчук клал ему руку на плечо и говорил: «Дау, они правы». Это не только про Окуня, Иоффе, Тер-Мартirosяна, Кобзарева и др., но в большей мере про веру Померанчука в своих учеников.

Я. И. Грановский

## КАКИМ МНЕ ЗАПОМНИЛСЯ И. Я. ПОМЕРАНЧУК. ПОЕЗДКА В РУБЕЖНОЕ

Я не имел счастья слушать лекции академика Померанчука или работать с ним вместе над научными проблемами, но как раз поэтому те немногие впечатления, которые сохранились в моей памяти, остаются такими же яркими, как и 25 лет назад, — на них нет налета повседневности, обычности.

Что меня поражало в нем — это необыкновенная, просто рыцарская вежливость, окружавшая его атмосфера галантности, часто употреблявшиеся им слова «Ваш покорный слуга». Его глубокая интеллигентность проявлялась не только в общении, но и в языке его статей. За их строками просто чувствуешь мяг-



Рубежное Ворошиловградской области. Улица им. академика И. Я. Померанчука. На этой улице находится здание рабфака, в котором учился И. Я. Померанчук в 1927—1929 гг.  
Фото Я. И. Грановского, 1985 г.

кую полуулыбку, как на его фотографии, висящей в конференц-зале ИТЭФа.

Я понимаю, что он не всегда был таким, что людям, попавшим под огонь его научной критики, он представлялся совсем другим, но, по-моему, одно вовсе не исключает другое: интеллигентность и принципиальность предполагают друг друга. В повседневной жизни он мог пользоваться не только лексиконом д'Артаньяна, но и менее изысканными выражениями — это не меняет оценки Чука как человека.

Второе впечатление относится уже к науке. Как-то после одного из семинаров Ландау, где в который уже раз было отмечено, что резерфордово сечение рассеяния одинаково выглядит и в классике, и в «квантах», я обратился к Исааку Яковлевичу с вопросом, что он думает об этом. Чуть помявшись, он сказал, что простые вещи — самые трудные для объяснения и что он таковым не располагает. На мое робкое замечание, что, может быть, симметрия — причина совпадения, он ответил, что это почти наверняка, но как проследить эту связь...

Более двадцати лет прошло, пока мне удалось уловить эту связь, но ободряющее действие мимолетного разговора, который я воспринял как мягкое подталкивание к работе (результат должен быть «почти наверняка»), помню совершенно отчетливо.

В октябре 1985 г. я побывал в г. Рубежном Ворошиловградской области, где в молодости жил И. Я. Померанчук. В Рубежном существует музей истории Рубежанского химкомбината, в котором один из стендов посвящен деятельности академика И. Я. Померанчука. Хранитель музея Иван Данилович Виленский, соученик Исаака Яковлевича, рассказал мне следующее.

В конце 20-х годов Юзик Померанчук был одним из активных комсомольцев города. Участь на рабфаке (его называли также «химическим институтом»), он читал лекции для населения о происхождении Земли и небесных тел, а также по химии (в частности, о рациональном питании). Одно время его выдвигали в секретари райкома комсомола, однако он отвел свою кандидатуру, считая, что ему еще надо поучиться. Из Рубежного Исаак Яковлевич уехал в 1931 г.

В музее хранятся личные вещи И. Я. Померанчука: портфель и очки, копия (машинописная) диплома об окончании вуза и присвоении квалификации физика, трехтомник трудов с дарственной надписью родственников академика, несколько фотографий (в частности, беседующие с Исааком Яковлевичем академики В. И. Векслер и С. Н. Вернов). На стенде «Их воспитал комсомол» — фото 1929 г.

Одна из улиц города (в двух-трех кварталах от химкомбината) названа именем И. Я. Померанчука. На ней — и старое здание рабфака (ныне техникум), и более современные дома. Рядом с техникумом — мемориал героям Отечественной войны 1941—1945 гг.

*И. Б. Хрипович*

## ДВА СВИДЕТЕЛЬСТВА

Мне доводилось видеть Исаака Яковлевича Померанчука в ИТЭФе и на семинарах Ландау. Я не раз слышал рассказы о бескомпромиссной, суровой преданности Померанчука физике; не скрою, порой в словах рассказчиков звучало осуждение, не всем, наверное, по плечу подвижническое отношение Исаака Яковлевича к науке. Навсегда запомнил маленького тщедушного человека с шапкой черных с проседью волос, небритого, в выпуклых очках. Он чем-то напоминал мне взъерошенную птицу. Вот только голос — неожиданно сильный, низкий, прокуренный...

Однако фактически я не был знаком с Исааком Яковлевичем.

Поэтому все, чем я мог бы поделиться здесь, — это рассказы о нем двух замечательных людей, которых я знал, которых чтит и чту и которых уже тоже нет с нами.

Восторженные отзывы о физиках были не столь уж обычны для Андрея Михайловича Будкера. Но И. Я. Померанчук — особый случай.

— Померанчук говорит, что  $N$  — суперголова. Подумайте, Померанчук не понимает, что суперголова — именно он сам!

— Померанчук — настоящий физик. Он, единственный из всех светил, пришел посмотреть наш ускоритель, первый ускоритель со встречными электронными пучками.

Зимняя школа ИТЭФа. Вечер. Снег поскрипывает под ногами. Владимир Борисович Берестецкий вспоминает:

— Едем в машине, Дау, Чук и я. Чук начинает корить Дау: «Учитель, ты ленишься, ты не делаешь того, что мог бы сделать». Я жду взрыва. Но Дау отвечает спокойно: «Чук, ты глубоко неправ. Я работаю, как могу. Я не Ферми. Не надо пыжиться».

*С. Дрелл*

## ДВЕ ВСТРЕЧИ НА КОНФЕРЕНЦИЯХ

Впервые я встретил профессора И. Я. Померанчука на киевской конференции по физике высоких энергий в 1959 г. Возможность познакомиться со столь многими советскими коллегами, работающими в области физики частиц, и узнать их как живых людей, а не просто как имена, связанные с интересными и важными исследованиями, делала эту конференцию совершенно исключительной.

Я встретился с Померанчуком еще раз на Международной конференции по физике высоких энергий в ЦЕРНе в 1962 г. В моей памяти живо и навсегда запечатлелся тот момент, когда я увидел Померанчука с Грибовым и Окуном по их прибытии в ЦЕРН. Работы Померанчука и его сотрудников играли выдающуюся роль на той черновской конференции, проходившей во время наивысшего расцвета теории реджевских полюсов и применений аналитичности к теории рассеяния. Мы говорили о померонном обмене, траектории померона, ее наклоне и интерсепте, а также о теореме Померанчука как центральных составляющих в развитии успешного феноменологического описания и понимания процессов рассеяния при высокой энергии.

Всегда дружелюбный и мягкий, Померанчук был истинным источником мудрости для всех нас. Его непосредственные научные достижения и вклад в науку его школы сделали ПOME-

ранчука признанным лидером современной физики частиц. Сегодня, отмечая свое 40-летие, Институт теоретической и экспериментальной физики чтит его заветы, вдохновение и мудрость.

А. Салам

## ПРЕДАННОСТЬ ФИЗИКЕ ОЩУЩАЛАСЬ В КАЖДОМ ЕГО СЛОВЕ

Первая моя встреча с И. Я. Померанчуком произошла в 1962 г. на Рочестерской конференции в Женеве. Это был год, отмеченный особым интересом к теоремам Померанчука, наложившим ограничения на асимптотическое поведение сечений. Поскольку идеи теории полюсов Редже также находились в центре внимания, то естественно, что Грибов и Померанчук должны были быть приглашены на эту встречу. Тот факт, что почти никто не видел их до этого, и то, что их работы были столь новаторскими, сделали сенсацией их участие в работе конференции.

Я очень стремился встретиться с ними в неофициальной обстановке и пригласил их на обед. Они ответили, что должны посоветоваться со своей делегацией о том, насколько это уместно. На следующий день они сказали, что делегация не возражает против нашей встречи. Мы отправились вместе в один из женеvских ресторанов. Теперь, когда я знаком с Грибовым гораздо лучше, я поражен тем, что он, так же как и Померанчук, был весьма скован. Что касается Грибова, это могло объясняться присутствием его учителя, для Померанчука же это могло быть естественной манерой поведения. Как обычно, на Померанчуке был неважно сидевший костюм, а сам он выглядел несколько дней не брившимся. Но его величие, его преданность физике, его внутренняя чистота и целостность ощущались в каждом произнесенном слове.

Естественно, мы обсуждали влияние работ Померанчука и Грибова на физику того времени. У них было много вопросов о моей тогдашней деятельности, почти целиком связанной с проблемами симметрии и калибровочными теориями. Мы также коротко поговорили о сделанном мною в 1960 г. предложении создать Международный центр теоретической физики и о симпозиуме, который предполагалось провести в Триесте сразу после встречи в ЦЕРНе. Мы обсудили возможность поддержки Советским Союзом идеи о Международном центре теоретической физики. В целом это было одним из основных событий той конференции и памятной для меня возможностью встретиться с этими двумя блестящими людьми.

Р. А. Салмерон

## МОЯ ВСТРЕЧА С И. Я. ПОМЕРАНЧУКОМ

Померанчука я видел только один раз. Это произошло в 1962 г. на конференции по физике высоких энергий, которая проводилась в ЦЕРНе. Я никогда не забуду эту встречу и наш разговор.

С присущей ему и хорошо всем знакомой простотой Померанчук первым начал беседу, сказав мне, что считает конференцию очень интересной. Беседуя с ним, я находился одновременно под сильнейшим впечатлением от того, что имел возможность говорить с таким выдающимся физиком, и от обаяния, которое от него исходило. В то время я принимал участие в первых экспериментах при очень высоких энергиях, которые проводились на протонном синхротроне ЦЕРНа. Тогда это были самые высокие энергии, доступные для ускорителей.

Я спросил Померанчука, не может ли он объяснить мне ход развития его идей, которые привели к знаменитой теореме о равенстве сечений для частиц и античастиц. Этот вопрос вызвал у него взрыв смеха, и он скромно ответил, как если бы речь шла о самых простых вещах на свете, что «они приходят сами собой».

Андре Мартен

## МОИ КОРОТКИЕ ВСТРЕЧИ С И. Я. ПОМЕРАНЧУКОМ

С Чуком (Померанчуком) я встречался только дважды. Первая встреча произошла в июле 1962 г. во время Женевской конференции по физике высоких энергий. Все западные физики-теоретики были очень довольны, что многие ведущие советские теоретики, такие, как Померанчук, Окунь, Грибов и др., смогли принять участие в этой конференции. Мне кажется, я одновременно познакомился с Грибовым и Померанчуком. В то время они активно работали вместе. Это был период, когда теория реджеvских полюсов почти достигла своего максимального расцвета, и они представили на конференции много поразительных результатов.

Я был очень удивлен тем, как внешне выглядел такой великий человек. Я не ожидал увидеть очень скромного на вид человека, с лучезарной улыбкой, открывавшей редкие, потемневшие от чрезмерного курения зубы, но больше всего меня поразили его глаза, искрящиеся умом и озорством. Для меня этот первый контакт с русскими физиками имел неоценимо важное значение.

Впрочем, как и для моего ливано-американского друга Никола Хури.

Наша вторая встреча произошла в Ереване в 1965 г., куда мне выпало счастье быть приглашенным в числе выдающихся западных физиков. Говоря «выдающихся», я имею в виду не себя, а, например, Мёрри Гелл-Манна. Профессор Алиханян организовал нам пышный прием. Мы были счастливы встретиться со столькими замечательными учеными, и в их числе с Померанчуком. За день до окончания работы конференции он должен был уехать, так как у него были какие-то дела в Москве, в то время как мы должны были совершить еще одну поездку: из Еревана в Тбилиси на машине и автобусе (машина и автобус ехали наперегонки!).

Померанчук пришел попрощаться. Случилось так, что в тот момент я был вместе с Леоном Ледерманом и Мелом Шварцем. Его прощальные слова были специально предназначены каждому из нас троих.

Леону Ледерману он сказал: «Кварки существуют!»

Мелу Шварцу: « $W$  существует!»

И мне: «Аналитичность существует!»

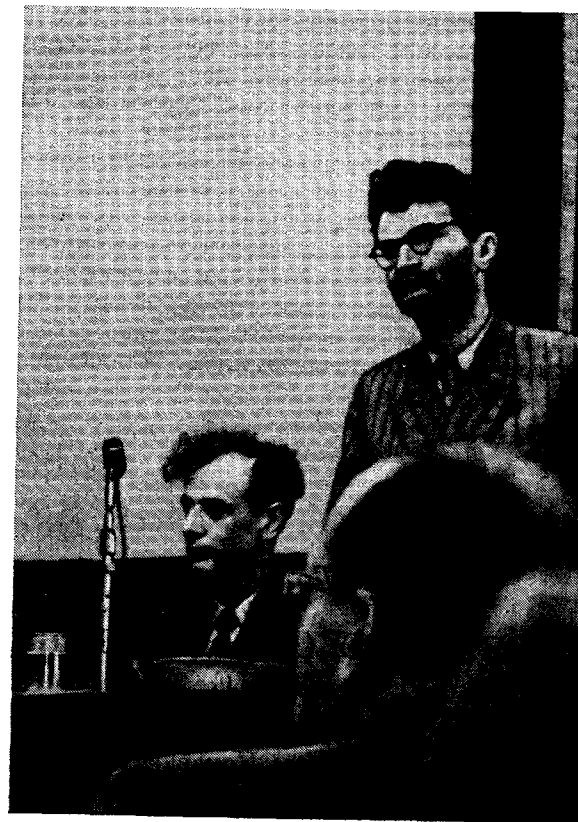
С чувством большой печали несколько месяцев спустя мы узнали о его болезни. Об этом сообщил Николай Николаевич Боголюбов, который приезжал в ЦЕРН. И вскоре после этого мы услышали о смерти Померанчука.

#### Примечания

1. Некоторые молодые физики могут не знать, что в то время Леон Ледерман «охотился» за свободными кварками с помощью детектора, в результате чего было получено то, что позднее было понято как первые проявления  $J/\psi$ . Мел Шварц был еще очень активен в области физики частиц и надеялся найти  $W$  с массой порядка 2 ГэВ. Действительно, несколько позднее ученые ЦЕРНа сделали заявление на одном из Нью-Йоркских заседаний Американского физического общества о том, что у них есть на это некоторые указания. На самом деле они были введены в заблуждение событиями образования чарма, однако в то время о чарме никто не знал.

2. В тот период, в 1962—1965 гг., у нас было ощущение, что контакты между физиками Запада и Востока чрезвычайно улучшаются. Возможно, встреча в Женеве между Рейганом и Горбачевым приведет среди прочих вещей к новому улучшению в этом направлении.

Ноябрь 1985 г.



И. Я. Померанчук и Л. Д. Ландау на Всесоюзной конференции по физике частиц высоких энергий, 1956 г.

Фотография прислана В. Вайскопфом

В. Ф. Вайскопф

## ПИСЬМО О И. ПОМЕРАНЧУКЕ

Профессору Л. Б. Окуню, ИТЭФ

Дорогой друг!

Я узнал от Карла Штрауха, что Вы собираете воспоминания об Исааке Померанчуке.

Посылаю Вам очень хорошую фотографию (ее происхождение мне неизвестно), изображающую Исаака и Дау в таких характерных позах, что она наверняка Вам понравится<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Прилагаю плохую копию этого фото. Хорошая репродукция будет послана приблизительно через три недели.

Вот история — воспоминание, оставшееся с тех давних дней, когда я был в Советском Союзе. Мы всегда удивлялись, каким образом Исааку удавалось каждый день выглядеть небритым, но так, что он всегда был одинаково заросшим. Нам хотелось понять, как он этого достигает. Должен же он бриться иногда, чтобы не дать бороде отрасти; выбритым же его никогда не видели. Исаак так и не открыл нам своего секрета.

Конечно, это не было его единственным достижением. Меня всегда поражали глубина его познаний и оригинальность его идей.

Надеюсь, этот маленький анекдот и фотография пригодятся Вам. К сожалению, я не мог приготовить фото раньше, так как записку от Карла Штрауха получил довольно поздно.

С наилучшими личными пожеланиями, остаюсь искренне Ваш

*Вики*

(Виктор Ф. Вайскопф).  
18 декабря 1985 года

*М. Л. Голдбергер*

## НА РОЧЕСТЕРСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ В ДУБНЕ

Впервые я встретил профессора Померанчука в августе 1964 г. на Рочестерской конференции в Дубне. Воспоминание об этой встрече — одно из наиболее сильных впечатлений моей первой поездки в Советский Союз. Насколько мне помнится, несколько советских физиков, в том числе Окунь, Грибов и, возможно, Зельдович, стояли рядом с Померанчуком, когда я подошел к ним. У меня возникло ощущение мгновенной близости с этим улыбающимся живым невысоким человеком, который совершенно не походил на того, каким я его себе представлял.

Он излучал огромную теплоту и сердечность, и я пришел почти в замешательство от того энтузиазма, который он обрушил на меня, радуясь по поводу нашей встречи. Я помню, что одной из тем нашей беседы были довольно эвристические аргументы, которые я тогда пропагандировал и из которых следовало, что реальная часть амплитуды протон-протонного (а также пион-протонного) рассеяния вперед при очень высоких энергиях должна стать отрицательной.

К сожалению, жизнь предоставила мне только те несколько дней дубненской конференции для общения с этим великим физиком. Но то, что я имел эту возможность, я расцениваю как большую удачу.



*И. Я. Померанчук, С. Н. Вернов и В. И. Векслер  
на 12-й Рочестерской конференции. Дубна, 1964 г.*

Фото Ю. А. Туманова

*Карл Штраух*

## ВСТРЕЧА В ЕРЕВАНЕ

Я познакомился с Исааком Померанчуком на Ереванской летней школе, организованной Артемом Алиханяном. Это был мой первый приезд в Советский Союз, и об этом визите у меня остались незабываемые воспоминания. Одно из них — это встреча с Померанчуком.

Мои лекции были посвящены экспериментам по фоторождению мезонов и других частиц, в которых использовалась пузырьковая камера, облучавшаяся тормозным излучением с энергией 6 ГэВ от Кембриджского электронного ускорителя. Эти результаты представляли значительный интерес для теоретиков, и поэтому я не был удивлен тем, что Померанчук захотел узнать о них. Что меня действительно удивило, так это то, какие вопросы он задавал. Он хотел знать не просто результаты, но и экспериментальные детали, относящиеся к тому, каким образом были получены результаты, особенно новые. Я, как экспериментатор, находился под сильным впечатлением этой заинтересованности, столь отличавшейся от реакции многих моих коллег. Мне стало ясно, что





*И. Я. Померанчук и К. Штраух (Гарвард) во время Весенней школы теоретической и экспериментальной физики. Ереван, май 1965 г.*

передо мной истинный физик, глубоко вникающий во все аспекты нашей области науки.

Что касается меня лично, Померанчук помог мне познакомиться со многими советскими теоретиками, присутствовавшими на школе. Во время нашего разговора на ступенях Академии наук Армянской ССР нас сфотографировали. Эта фотография висит в кабинете у меня на работе и ежедневно напоминает мне о встрече с этим замечательным человеком.

*Дж. Бьёркен*

## ЕГО РАБОТЫ ПРОРЕЗАЛИ ТУМАН

Когда я узнал, что в связи с сорокалетием ИТЭФа создается сборник, посвященный И. Я. Померанчуку, я обрадовался возможности поместить в нем свои воспоминания об этом большом ученом.

Откровенно говоря, личных встреч с И. Померанчуком я не помню. Если они и были, то в лучшем случае являлись поверхностными: взгляд издали молодого физика на великого челове-



*М. С. Козодаев, В. С. Кафтанов, А. И. Алиханов, Б. Л. Иоффе, К. А. Тер-Мартirosян, Л. Л. Гольдин, И. Я. Померанчук и Л. Г. Ландсберг  
Снимок сделан в парке ИТЭФа в 1965 г. Л. Юанем*

ка, окруженного, без сомнения, другими великими людьми. Тем не менее Померанчук как ученый оказал на меня двойное воздействие. Во-первых, на меня оказали сильное влияние его прекрасные работы по дисперсионной теории — как непосредственно, так и через работы Грибова и других. В начале 60-х годов я тяготел к группе Беркли, и эти блестящие работы прорезали окружающий нас туман и ярко продемонстрировали чрезвычайно высокий уровень некоторых исследований по физике в Советском Союзе.

Во-вторых, Померанчук оказал на меня влияние и в более личном плане. В середине 60-х годов мое внимание привлекла локальная алгебра токов — предмет, который в то время в США не имел слишком много приверженцев и, я думаю, вообще несколько недооценивался. Мне сказали, что Померанчук быстро заметил мои статьи, счел их интересными и пропагандировал в СССР, и особенно в ИТЭФе. Не говоря уже о том, что подобное отношение было в высшей степени лестным, оно привело к тому, что мне, как я думаю, стало гораздо легче приехать в ИТЭФ, и со временем я много раз посещал этот институт. Эти визиты имели высочайшую ценность для меня как в чисто человеческом, так и в научном плане. Научная атмосфера в ИТЭФе и высокие интеллектуальные

стандарты во многом обязаны влиянию И. Я. Померанчука, и я благодарен за возможность сказать несколько слов в знак уважения и памяти об этом большом ученом.

Надеюсь, что личные, а также внешние обстоятельства позволят мне в будущем возобновить визиты в ИТЭФ.

*А. И. Рудерман*

## НАЧАЛО ПРОТОННОЙ ТЕРАПИИ В СССР

В середине 1965 г. ко мне обратился академик А. А. Вишнеvский с просьбой оценить состояние больного И. Я. Померанчука и при необходимости взять его на лучевую терапию. Вскоре по этому же поводу ко мне приехал сотрудник ИТЭФа Л. Б. Окунь.

Свидание состоялось. В кабинет вошел размеренным шагом худощавый мужчина среднего роста, лет 45, интеллигентного облика, с удивительно проницательным взглядом, без каких-либо проявлений волнения и признаков внутренних переживаний. После беседы и детального осмотра, а также рентгеноvского исследования я убедился в правильности предварительного диагноза и разъяснил, что в таких случаях целесообразно лучевое лечение. После небольшой паузы Исаак Яковлевич произнес: «Профессор, я знаю, чем болен, давайте откровенно поговорим, в чем будет заключаться лучевая терапия и почему Вы пользуетесь гамма-излучением?» Не вдаваясь в обсуждение первой половины фразы, я ответил, что во всем мире медицинское дистанционное облучение сейчас проводится  $Co^{60}$ , хотя возможны облучения и другими ионизирующими излучениями. Я продемонстрировал сравнительные таблицы из статей Р. Р. Вильсона (Radiology. 1946. Vol. 47; Phys. Rev. 1947. Vol. 71; Радиобиология/ Под ред. Г. М. Франка. 1955) распределения глубинных доз различных излучений, приравненных друг к другу по максимальной ионизации. В частности, для электронов — 14,4 МэВ; рентгеноvных лучей — 200 кэВ с медным фильтром 0,5 мм и дейтронов — 190 МэВ. На них отчетливо демонстрировались достоинства пика Брэгга.

— За чем же дело стало?

— Медики не имеют таких установок. Они в руках физиков. Требуется соответствующее решение.

— Ну, в этом можно советской медицине помочь.

Тут же состоялся телефонный разговор академиков И. Я. Померанчука и В. А. Кириллина (в то время председателя ГКНТ). На следующий день я был вызван в ГКНТ, а еще через день президент АМН СССР Н. Н. Блохин и я уже обсуждали с В. А. Кириллиным текст возможных заданий по использованию заряженных ядерных частиц в медицине. Ответственными исполнителями



*И. Я. Померанчук. 1965 г.*

были выделены ИЭиКО (Институт экспериментальной и клинической онкологии), ИТЭФ и ОИЯИ. Затем состоялся Ученый совет ИЭиКО с участием И. Я. Померанчука, В. П. Джеллепова и ряда других ведущих физиков и лучевых терапевтов Москвы. После моего доклада и детального обсуждения выяснилось, что физико-техническая подготовка к клиническому использованию протонов займет немало времени.

В связи с этим гамма-терапия больного, начатая в ИЭиКО, продолжалась. Имел место вполне благоприятный непосредственный эффект облучения — болезнь стабилизировалась. Однако, как и следовало ожидать, через некоторое время наступило ухудшение состояния. Приглашенный ГК по атомной энергии из Парижа на консультацию известный лучевой терапевт профессор М. Тюбиана заявил, что, по его мнению, лечение велось «на выс-

шем уровне», и он дополнительно ничего рекомендовать не может. Вскоре наступила смерть. «Sit tibi terra levis».

Надо заметить, что даже в последние дни своей жизни Исаак Яковлевич продолжал интересоваться ходом подготовки к лечению применению ядерных частиц. Он неоднократно говорил об этом, когда мы вместе с академиками Н. Н. Блохиным и И. А. Кассирским приезжали к нему на консультацию.

Вспоминая личность И. Я. Померанчука, я вновь представляю себе этого умного, скромного, чрезвычайно талантливого ученого, милого в обращении с окружающими человека. Его высказывания всегда были доброжелательными и деликатными. Он никогда не жаловался.

Исаак Яковлевич всегда подчеркивал целесообразность коллективных усилий, указывая в числе других особенное значение привлечения к нашим делам своих товарищей — Л. Б. Окуня, Л. Л. Гольдина и некоторых других сотрудников ИТЭФа. Он считал, что в общем новое направление в практической медицине, несмотря на поддержку Государственного комитета по науке и технике и Академии медицинских наук, будет проходить по многим причинам с трудностями. И в этом он оказался прав. Почти повседневно возникавшие непредвиденные трудности преодолевались коллективными усилиями исполнителей, а также благодаря пониманию проблемы в ГКНТ и АМН СССР.

Надо иметь в виду, что постановка проблемы в целом была новой в мировой практике.

И вот прошло 20 лет. За это время были созданы и реконструированы протонные медицинские пучки в ИТЭФе, ОИЯИ и ЛИЯФе, спроектировано и создано несколько поколений уникального специального оборудования как физико-технического, так и медицинского значения. Найден ряд решений к разным подходам лечебной практики при различных заболеваниях. Только в ИТЭФе лечились с выраженным клиническим эффектом уже более 1000 больных. Институт благодаря активности директора И. В. Чувило связан со многими лечебными учреждениями. Это, кроме Онкоцентра, Института нейрохирургии, эндокринологии, офтальмологии, урологии и другие.

Можно констатировать нарастающий интерес к разрабатываемой проблеме как внутри страны, так и во всем мире. Свидетельством этому служат многочисленные доклады на разных конференциях, съездах, специальные семинары, симпозиумы как в СССР, так и за рубежом, а также число публикаций (более 350), кандидатские и докторские диссертации. Более 50 человек награждены медалями ВДНХ, 12 человек стали лауреатами Государственной премии СССР.

Становление использования ядерных частиц в лучевой терапии продолжается. Работы еще много, нельзя успокаиваться на достигнутых результатах. Именно развитие проблемы имел в виду И. Я. Померанчук еще при первой встрече со мной.

В. Н. Грибов

## СМЕРТЬ ЧУКА

Последний год жизни, несмотря на полное понимание своей обреченности, Исаак Яковлевич работал исключительно напряженно. У него было ощущение, что необходимо успеть еще что-то сделать.

Последнюю нашу совместную работу мы обсуждали за неделю до его смерти. При этом у меня возникли сомнения в правильности одного из обсуждавшихся утверждений. С этими сомнениями я уехал в Ленинград.

Вернувшись в Москву через неделю, я узнал, что накануне Чуку стало совсем плохо и он практически без сознания. Я поехал к нему домой. Когда я приехал, то оказалось, что в течение последних десяти-пятнадцати минут Чук пришел в сознание и ему немного лучше. Дочь Чука Марина сказала ему, что я приехал. Он попросил меня войти. Когда я вошел, он улыбнулся и, говоря с большим трудом, спросил, как обстоят дела с возражениями, которые я имел при отъезде. Я ответил, что все в порядке и что я был неправ. Он сказал: «Ну, очень хорошо» — и вскоре опять потерял сознание. Под утро, не приходя в сознание, Чук скончался.

В. Б. Берестецкий

## СЛОВО ПРОЩАНИЯ\*

Вклад Померанчука в развитие физики очень велик. Он открыл, т. е. теоретически предсказал, много интересных явлений, которые, одни сразу, другие через ряд лет, в зависимости от степени подготовленности экспериментаторов и их приборов, обнаруживались на опыте и создавали основу для дальнейших исследований. Такие «эффекты Померанчука» есть в физике твердого тела, физике низких температур, электродинамике электронов, позитронов и в других областях физики.

Когда ядерная физика выделила направление, получившее огромное прикладное значение, работы Померанчука были основополагающими для развития теории нейтронных реакторов в

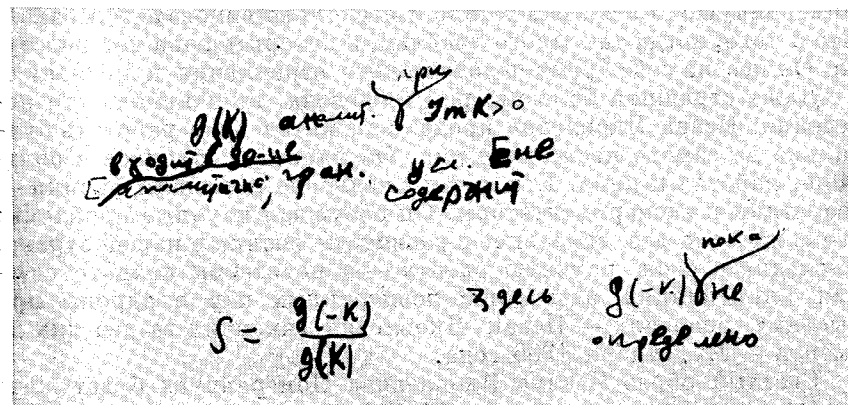
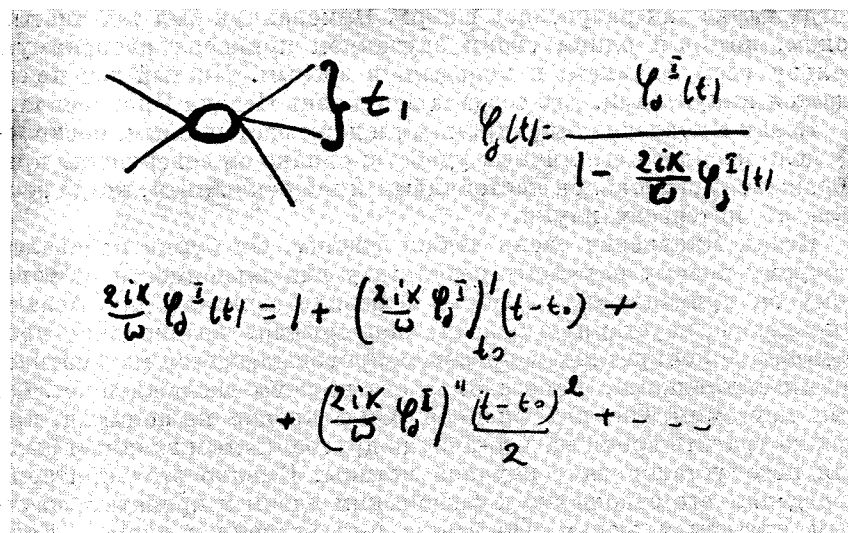
\* В основу публикуемых отрывков из некролога «Исаак Яковлевич Померанчук» (УФН. 1967. Т. 92, вып. 2. С. 355) легло выступление В. Б. Берестецкого на траурной церемонии в Доме ученых 16 декабря 1966 г.



Мемориальная доска на здании ИТЭФа, в котором работал И. Я. Померанчук (изготовлена по эскизу А. Б. Мигдала)

нашей стране. Когда зародилась и стала быстро развиваться физика элементарных частиц, Померанчук целиком посвятил себя ее трудным проблемам. Здесь им было положено начало созданию нового направления науки — физики предельно высоких энергий.

Работы Померанчука, и недавние и давние, его проблемы, его эффекты, его знаменитая теорема живы сейчас и долго будут жить не только в истории науки, но и в повседневной работе физиков, теоретиков и экспериментаторов.



Фрагменты расчетов, выгравированные на мемориальной доске

Значение Исаака Яковлевича Померанчука в науке далеко не исчерпывается этими результатами. Померанчук принадлежал к той редкой и драгоценной группе ученых, без существования которых наука вообще бы, по выражению Эйнштейна, не поднялась, как не мог бы вырасти лес из одних вьющихся деревьев. Для людей типа Померанчука наука — органическая непосредственная всепоглощающая потребность. Значение таких людей было огромным во все времена и стало еще более значительным в наше время, когда в науку привлечено большое число людей,

когда наука так разрослась вширь. Померанчук был тем чистым тоном, который одним своим звучанием приносил неопенимую пользу всем физикам, и молодым, и зрелым. Чистый тон не создается импульсами. Его создала вся жизнь Исаака Яковлевича.

Исаак Яковлевич был скромным и даже застенчивым, поскольку дело касалось его личных удобств; однако он совершенно преобразился, становился настойчивым и непреклонным, когда речь шла об интересах науки.

Исаак Яковлевич очень любил физику. Он бурно радовался каждому новому научному результату вне зависимости от того, кому он принадлежал. Любовь к физике означала для Исаака Яковлевича неустанную работу, непрерывное интенсивное продумывание конкретных вопросов, сопровождающееся математическими выкладками. Работа была его высшим наслаждением. Он был неутомим. Он жил физикой. Он искренне не понимал, как можно тратить время на что-нибудь другое. Самым главным было для него установление научной истины. Именно этот критерий определял его отношение к физическим идеям и проектам, научным статьям и людям. Он всегда был устремлен вперед. Если ему рассказывали о том, как стал «работать» один из «эффектов Померанчука», он только устало и несколько виновато улыбался. Что с того, когда так много проблем, к которым пока нет подступа. Он нес на себе бремя человеческого стремления к познанию.

Даже страшная болезнь, рак пищевода, не изменила его поведения. Исаак Яковлевич продолжал интенсивно работать буквально до самого последнего дня. Он работал, находясь в больнице, работал и дома. Его почти ежедневно посещали физики — теоретики и экспериментаторы. Он обсуждал научные проблемы; его волновало все, связанное с развитием физики в нашей стране. Последнюю свою научную работу — о поведении полного сечения аннигиляции электронно-позитронных пар в адроны при высоких энергиях — Исаак Яковлевич закончил за два дня до смерти — 12 декабря 1966 года.

Светлый образ Исаака Яковлевича Померанчука будет жить в сердцах тех, кто имел счастье быть его учеником, сотрудником, в сердцах тех, кому довелось общаться с ним.

Подражать такой жизни невозможно. Но сам факт существования такой жизни долго будет служить реальной силой развития науки.

## НАУЧНЫЕ ОБЗОРЫ

Эти блестящие работы прорезали окружавший нас туман и ярко продемонстрировали чрезвычайно высокий уровень некоторых исследований по физике в Советском Союзе.

ДЖ. БЬЕРКЕН

Л. Б. Окунь

РАБОТЫ И. Я. ПОМЕРАНЧУКА  
ПО ФИЗИКЕ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

## 1. ВВЕДЕНИЕ

О работах И. Я. Померанчука по теории элементарных частиц в этом сборнике рассказывают две обзорные статьи: статья Б. Л. Иоффе, в которой преимущественно обсуждаются вопросы квантовой теории поля, и настоящая статья, в которой основное внимание обращено на конкретные физические эффекты. Разумеется, такое деление является в известном смысле условным и некоторое перекрытие двух статей неизбежно.

Более двух десятилетий, прошедших после смерти Исаака Яковлевича, радикально изменили картину физики элементарных частиц. Возникли квантовая хромодинамика и единая теория электрослабых взаимодействий — все то, что сегодня называют стандартной калибровочной моделью. От читателя требуется серьезное усилие, чтобы мысленно перенестись в мир, где еще не было этой стандартной калибровочной теории. Тем поразительней, насколько актуальны и в настоящее время поднятые И. Я. Померанчуком вопросы, насколько органично вплелись в ткань современной физики его идеи, подходы и результаты.

## 2. РАБОТЫ ПО КВАНТОВОЙ ЭЛЕКТРОДИНАМИКЕ

## 2.1. Дельбрюкковское рассеяние

Первая работа Исаака Яковлевича по физике элементарных частиц была выполнена им совместно с Л. Д. Ландау и А. И. Ахиезером в 1936 г. и была посвящена анализу сечения рассеяния света светом в случае, когда энергия фотонов много больше массы электрона [1]. В 1937 г. был опубликован расчет родственного процесса — когерентного рассеяния  $\gamma$ -лучей ядрами [2]. Это когерентное рассеяние, существование которого было предсказано в 1933 г. Дельбрюком, было предметом большого числа теоретических и экспериментальных работ. Следует отметить, что наиболее надежно дельбрюкковское рассеяние было измерено только в 70-е годы с помощью фотонов высоких энергий ( $\geq 1$  ГэВ), т. е. именно в том асимптотическом пределе, который был рассмотрен в работах [1, 2], — когда энергия фотонов много больше массы электрона. Подробное описание теоретических расчетов и критическое обсуждение экспериментальных попыток измерить дельбрюкковское рассеяние читатель может найти в обзоре [3]. Специальный параграф этого обзора посвящен работе А. И. Ахиезера и И. Я. Померанчука [2].

2.2. Уровни атомов с  $Z > 137$ 

Следующая работа Исаака Яковлевича по квантовой электродинамике, совместно с Я. А. Смородинским, появилась в 1945 г. [4]. В ней был поставлен важный вопрос о поведении уровней атома с зарядом ядра  $Z > 137$  с учетом конечных размеров ядра. Из решения уравнения Дирака в кулоновском поле было известно, что в случае точечного ядра энергия связи электрона растет с ростом  $Z$  и становится равной массе электрона  $m$  при  $Z = 137$ . При  $Z > 137$  уравнение не имеет осмысленного решения: наступает так называемое падение на центр. В работе [4] было показано, что для ядра, имеющего конечные размеры  $r_N$ , энергия связи нижнего дискретного уровня плавно проходит через значение  $m$  и достигает значения  $2m$  при некотором критическом заряде  $Z_c$ , зависящем от величины  $r_N$ . В частности, при  $r_N = 1,2 \cdot 10^{-12}$  см, согласно оценке [4],  $Z_c = 200$ . Как показали более корректные расчеты, проведенные 20 лет спустя, оценка  $Z_c(r_N)$ , данная в работе [4], оказалась завышенной. В действительности  $Z_c = 169$  при  $r_N = 1,2 \cdot 10^{-12}$  см. При стремлении  $r_N$  к нулю  $Z_c$  стремится к 137.

На первый взгляд обсуждение больших значений  $Z \simeq 170$  может иметь чисто академический интерес. Однако это не так. Дело в том, что при сближении двух тяжелых ядер могут возникнуть на короткое время ядерные системы и с большими зарядами. Я. А. Смородинский вспоминает, что еще в 1940 г. Исаак Яковлевич говорил, что хорошо бы ударить ураном по урану. Действительно, при столкновении двух ядер урана суммарный заряд «ядерной молекулы» равен 184. Как заметили в 1969 г. С. С. Герштейн и Я. Б. Зельдович, в этом случае энергия связи электронного уровня уже превышает  $2m$ , так что голому «ядру» с зарядом 184 энергетически выгодно родить электронно-позитронную пару, причем электрон сядет на уровень с энергией связи, превышающей  $2m$ , а позитрон уйдет «на бесконечность». Детальный расчет этого явления был выполнен В. С. Поповым [5, 6]. (История вопроса и физика явления обсуждаются в обзорах [7–9].) В 1980-е годы на специально построенном ускорителе тяжелых ионов в Дармштадте (ФРГ) начались поиски таких спонтанно испущенных позитронов. Пока экспериментальная ситуация не ясна. Экспериментаторы сообщают о каких-то странных пиках в спектрах позитронов и электронов [10]. Но можно надеяться, что в ближайшем будущем вопрос прояснится.

## 2.3. Аннигиляция медленных позитронов

В конце 1940-х годов Исаак Яковлевич опубликовал две статьи [11, 12], посвященные аннигиляции медленных позитронов. В первой из них прямым расчетом было установлено, что сечение двух-

- 1) О движении атомов приеш в сверхтекучем гелии  
[Совместно с Л.Д. Ландау] (экспериментально подтверждена)
- 2) Теория распада  $He_2$  в  $He_3$  (экспериментально подтверждена)
- 3) Теория жидкого  $He_2$  (экспериментально подтверждена)
- 4) Крайняя ступень при аннигиляции позитрония (и др.)
- 5) Превращение  $e^+e^-$  пары в пару  $\mu^+\mu^-$   
[Совместно с В.Б. Березицким]
- 6) Внешние электронная полярзация вакуума на уроки  $\mu$ -мезон  
и др. [Совместно с А.Д. Балакиным] (журнал наблюдений)
- 7) Внешне многократное рассеяние на тормозное излучение при  
больших энергиях [Совместно с Л.Д. Ландау] (журнал наблюдений)
- 8) Дифракционный механизм излучения  $\mu$ -мезонам  
[Совместно с Л.Д. Ландау]
- 9) Дифракционный механизм образования  $\mu$ -пар  $\mu^+\mu^-$   
и др.
- 10) Дифракционный механизм образования  $\mu$ -мезонов при соударе-  
ниях  $\mu$ -мезонов с ядрами [Совместно с Е.Л. Рейнбергом]
- 11) Обобщение формулы Уорда в случае рассеяния на спинах  $\mu$
- 12) Обращение перенормированного заряда в ядре в квадратной  
электродинамике [Совместно с Л.Д. Ландау]
- 13) Двух-предельное разделение вопроса об иезиновении первого  
квантового заряда в ядре в квадратной электродинамике.
- 14) Иезиновение перенормированного заряда в мезонной теории  
с неабелевыми и неабелевыми взаимодействиями.
- 15) Равенство малых величин рассеяния и аннигиляции при больших  
энергиях.
- 16) Иезиновение перенормировки  $(\mu^+ \rightarrow \mu^-)$  при больших энергиях  
[Совместно с Л.Б. Окунем]
- 17) Теория  $n$ -д фолкловитий в мезонной теории  
и др.
- 18) Периферические столкновения элементарных частиц  
[Совместно с Л.Б. Окунем]

Список основных результатов, полученных И. Я. Померанчуком,  
составленный им в 1962 г.

- 19) Теория мало-кратных процессов при больших энергиях  
[Совместно с В.Б. Березицким]
- 20) Об асимптотическом поведении процессов аннигиляции и  
упругого рассеяния при больших энергиях [Совместно с  
В.И. Грибовым]
- 21) О некоторых свойствах амплитуды упругого рассеяния при  
большых энергиях [Совместно с В.И. Грибовым]
- 22) Соотношения между амплитудой теории комптонных  
обращенных масс в [Совместно с В.И. Грибовым]
- 23) Спиновая структура излучения  $\mu$ -мезонного и  $\mu$ -мезон-  
мезонного рассеяния при больших энергиях [Совместно с В.И. Грибовым]
- 24) Параллельные и кривые Ландау [Совместно с В.И. Грибовым]
- 25) Ограничения на скорости поворота амплитуд при больших  
энергиях [Совместно с В.И. Грибовым]
- 26) Рассеяние медленных нейтронов в жидком  $He_2$  [Совместно  
А.И. Ахмезеров и И.А. Ахмезеров]
- 27)  
[Совместно с В.И. Грибовым и Л.Б. Окунем]

квантовой аннигиляции электрона и позитрона в триплетном спиновом состоянии стремится к нулю, когда относительная скорость позитрона и электрона стремится к нулю. Таким образом, двухквантовая аннигиляция медленных позитронов может осуществляться только в том случае, когда суммарный спин электрона и позитрона равен нулю. Отсюда Исаак Яковлевич делает вывод о том, что должны существовать два сорта позитрониев — атомов, состоящих из позитрона и электрона: ортопозитроний и парапозитроний. В основном состоянии ортопозитроний распадается на три фотона и живет примерно  $10^{-7}$  с, а парапозитроний — на два фотона, время его жизни порядка  $10^{-10}$  с. Существование двух типов позитрония является фундаментом всей физики позитрония и ее многочисленных приложений в физике твердого тела и физической химии. С другой стороны, орто- и пара-

позитроний явились прообразами орто- и паракваркониев — многочисленных нейтральных мезонов, самыми известными из которых являются уровни чармония и ипсилона.

Правило отбора, открытое И. Я. Померанчуком, инициировало работу Л. Д. Ландау [13], в которой это правило было обобщено на случай произвольных скоростей аннигилирующих частиц, поскольку было показано, что два фотона, летящих в противоположные стороны, не могут иметь угловой момент, равный единице. Независимо эта же теорема была доказана через два года Янгом [14].

В работе [12] Исаак Яковлевич рассмотрел время жизни медленных позитронов в конденсированных телах и газах. Основная мысль этой работы заключается в том, что из-за кулоновского отталкивания ядром позитрон не может проникнуть внутрь атома и поэтому аннигилирует с наружными атомными электронами. Это приводит к двум следствиям. Во-первых, возрастает (по сравнению с более ранними теоретическими оценками) время жизни позитрона в среде. Во-вторых, поскольку наружные электроны имеют импульсы порядка или меньше  $am$ , отклонение угла между двумя аннигиляционными квантами от  $180^\circ$  должно быть  $\lesssim \alpha = \frac{1}{137}$ , т. е. меньше одного градуса. (При аннигиляции на внутренних атомных электронах получились бы значительно большие отклонения от  $180^\circ$ . С другой стороны, для электронов проводимости в металлах отклонение от  $180^\circ$  значительно меньше.) Это слабое нарушение коллинеарности аннигиляционных квантов оказалось существенным, в частности, для исследования электронных спектров твердых тел, а также для томографии, осуществляемой с помощью позитронов (см. по этому поводу воспоминание М. Ломанова в настоящем сборнике).

#### 2.4. Свойства $\mu$ -атомов

В 1952 г. вышли две работы Исаака Яковлевича с соавторами [15, 16], посвященные  $\mu$ -атомам, т. е. атомам, в которых вокруг ядра движется отрицательный мюон.

В работе [15] совместно с Б. Л. Иоффе было показано, что переход мюона с уровня  $2s$  на уровень  $2p$  с испусканием низкоэнергетического атомного электрона (так называемого оже-электрона) должен быть значительно более вероятным, чем переход  $2s \rightarrow 1s$  с испусканием оже-электрона высокой энергии. Это объясняло, почему при захвате отрицательных мюонов легкими атомами в фотопластинках энергичные оже-электроны в заметном числе не наблюдались.

В работе [16] совместно с А. Д. Галаниным был вычислен сдвиг уровней  $\mu$ -водорода, обусловленный поляризацией электронно-позитронных пар в вакууме. Эта поляризация искажает кулоновское поле ядра на расстояниях порядка комптоновской волны

электрона ( $\sim 1/m$ ). Размер электронной орбиты в обычном водороде в 137 раз больше, и потому сдвиги электронных орбит из-за электронной поляризации вакуума малы. В мюонном же атоме размер мюонной орбиты примерно в 210 раз меньше размера соответствующей электронной орбиты. Поэтому в сдвиге уровней  $\mu$ -водорода электронная поляризация вакуума играет основную роль. Последующие расчеты и измерения [17, 17a] сдвига уровней мюонов в  $\mu$ -водороде и в более тяжелых  $\mu$ -атомах подтвердили правильность расчетов работы [16].

#### 2.5. Аннигиляция $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$

Замечание В. Б. Берестецкого и И. Я. Померанчука [18] о том, что квантовая электродинамика может быть проверена путем измерения сечения процесса  $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$  и сравнения экспериментальных данных с теоретическим сечением, поражает сегодня тем, как мало было известно об электродинамике при высоких энергиях в 1955 г. Ведь тогда еще не работал ни один электронно-позитронный коллайдер. Впервые приведенное в этой заметке выражение для сечения процесса  $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$  является стандартным сечением, на которое в настоящее время нормируют все процессы  $e^+e^-$ -аннигиляции. Отношение полного сечения  $e^+e^-$ -аннигиляции в адроны к сечению  $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$  обозначается буквой  $R$ . Это отношение явилось предметом теоретического рассмотрения в одной из последних работ Исаака Яковлевича (см. об этом в разд. 4 настоящей статьи).

#### 2.6. Тормозное излучение образование пар электронами высокой энергии

В работах Л. Д. Ландау и И. Я. Померанчука [19, 20] был поставлен и на качественном уровне решен вопрос о радиационных процессах в среде при столь высокой энергии электрона, когда длина, на которой формируется тормозной фотон (или электрон-позитронная пара), существенно превышает расстояния между атомами среды. В этих условиях из-за многократного кулоновского рассеяния на длине формирования фотона вероятность тормозного излучения и рождения пар уменьшается, изменяется спектр фотонов, в частности исчезает инфракрасная расходимость, и полное число излученных квантов оказывается конечным. Дальнейшее развитие работы [19, 20] получили в статье А. Б. Мигдала [21].

Впоследствии идея о росте характерных продольных расстояний с ростом энергии налетающей частицы стала неотъемлемым элементом теоретического анализа рождения адронов при столкновениях энергичных частиц с нуклонами и ядрами.



## 2.7. Поляризация вакуума и незамкнутость квантовой электродинамики

В 1955 г. Л. Д. Ландау и И. Я. Померанчук поставили вопрос о внутренней несамосогласованности квантовой электродинамики [22]. (Вплотную к этой работе примыкает работа Исаака Яковлевича [23]. Аналогичные идеи были высказаны Е. С. Фрадкимым [24].) В основе работ [22—24] лежали формулы, которые были получены незадолго до этого Л. Д. Ландау, А. А. Абрикосовым и И. М. Халатниковым [25] и независимо М. Гелл-Манном и Ф. Лоу [26]. Эти формулы выражали зависимость эффективного заряда электрона от переданного электрону импульса. Л. Д. Ландау и И. Я. Померанчук всерьез отнеслись к тому, что из-за поляризации вакуума на малых расстояниях глубоко внутри облака виртуальных пар заряд частицы становится существенно больше, чем на больших расстояниях, где он экранируется виртуальными парами. Начиная рассмотрение с конечного физического заряда и переходя к малым расстояниям, они пришли к выводу, что на некоторой малой, но ненулевой длине заряд должен обратиться в бесконечность. Этот «ложный полюс» в квантовой электродинамике, так же как и аналогичная проблема в мезонной теории сильного взаимодействия, подробно рассматриваются в обзоре Б. Л. Иоффе в настоящем сборнике. Здесь же мы отметим лишь важное наблюдение, содержащееся в работе [23], что если в природе имеются примерно 12 заряженных лептонов, то электромагнитное взаимодействие станет сильным на тех же расстояниях, на которых становится сильным гравитационное взаимодействие (т. е. на планковской длине).

«Бегущие» заряды и идея о том, что вблизи планковской длины все взаимодействия объединяются в единое универсальное взаимодействие, являются одними из центральных элементов современных теоретических конструкций, моделирующих физику на сверхмалых расстояниях. Во всех этих конструкциях существеннейшую роль играет то обстоятельство, что, в то время как в абелевых калибровочных теориях (каковой является электродинамика) поляризация вакуума приводит к экранировке заряда, в неабелевых теориях (примером которых является хромодинамика) она приводит к антиэкранировке заряда. В результате заряд с уменьшением расстояния падает и имеет место явление «асимптотической свободы», открытое в 1973 г. Гроссом, Политцером и Вильчеком [27, 28]. (Следует заметить, что впервые другой (антиэкранировочный) знак поляризации вакуума был обнаружен у заряженных векторных бозонов в 1965 г. В. С. Ваяшиным и М. В. Терентьевым [29], которые, однако, не учли вклада так называемых духов (открытых Л. Д. Фаддеевым и В. Н. Поповым в 1967 г. [30]) и получили, что коэффициент  $b = -20/3$ . В рамках калибровочной  $SU(2)$ -теории знаменитый антиэкранировочный

коэффициент  $b = -22/3$  был впервые вычислен И. Б. Хрипловичем в 1969 г. [31]. Работы [29, 31] отмечаются, например, в статье К. Джонсона «Физика асимптотической свободы» [32]; к сожалению, авторы этих работ в свое время не осознали физического смысла полученных ими результатов.)

## 2.8. Электромагнитные свойства адронов

Две статьи 1961 г. [33, 34] были посвящены процессам взаимодействия адронов с виртуальными фотонами кулоновского поля ядра. Здесь особенно следует отметить подкрепленное расчетом предложение И. Я. Померанчука и И. М. Шмушкевича [33] измерять электромагнитный переход быстрого  $\Lambda$ -гиперона в  $\Sigma^0$ -гиперон. По существу этот процесс обратен процессу распада  $\Sigma^0 \rightarrow \Lambda \gamma$  и дает возможность косвенным образом определить ширину этого распада, а следовательно, время жизни  $\Sigma^0$ -гиперона. Для того чтобы избавиться от фона — перехода  $\Lambda \rightarrow \Sigma^0$ , вызванного сильным взаимодействием с нуклонами ядра, — необходимо отбирать  $\Sigma^0$ -гипероны, летящие под малыми углами вперед. Единственный эксперимент такого рода [35] был выполнен на пучке  $\Lambda$ -гиперонов в ЦЕРНе и дал  $\tau_{\Sigma^0} = (5,8 \pm 1,3) \cdot 10^{-20}$  с.

К 1961 г. существовало несколько работ, обсуждавших возможные свойства (гипотетического в то время) нейтрального векторного мезона, который вскоре был открыт (первое сообщение [36] о наблюдении  $\omega^0$ -мезона было направлено в печать в августе 1961 г.). Вклад в это обсуждение внесла статья И. Ю. Кобзарева, Л. Б. Окуня и И. Я. Померанчука [37], направленная в печать за полгода до открытия  $\omega^0$ -мезона (последний обозначается в ней  $\rho^0$ ). Рассматривая виртуальный переход  $\rho^0 \leftrightarrow \gamma$ , авторы проследили, каким образом возникают диагональные состояния с определенной массой — «физический  $\rho^0$ », взаимодействующий с электромагнитным током, и по-прежнему безмассовый фотон. Аналогичное рассмотрение в рамках стандартной электрослабой модели провел спустя 10 лет т'Хоофт [38], проследивший, как перемешивание  $W^0$  и  $\gamma$  приводит к сдвигу масс  $Z$ -бозона относительно масс  $W^\pm$ -бозонов и к появлению взаимодействия  $Z$  с электромагнитным током.

## 3. РАБОТЫ ПО ТЕОРИИ СИЛЬНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ

Теория сильных взаимодействий при высоких энергиях была предметом, над которым Исаак Яковлевич напряженно работал с начала 1950-х годов и до последних дней своей жизни. Он пришел в эту область из ядерной физики низких энергий (см., например, известную книгу А. И. Ахиезера и И. Я. Померанчука [39]). Неудивительно поэтому, что целый ряд его работ, анализирующих

сильные взаимодействия элементарных частиц, уходит своими корнями в ядерную физику низких энергий. В особенности это относится к обсуждаемым в разд. 3.1 работам, посвященным теории так называемых обменных процессов, теории процессов, идущих на дейтронах, из которых извлекаются данные о взаимодействиях различных частиц с нейтронами (ведь мишеней, состоящих из свободных нейтронов, нет), а также к теории дифракционных и периферийных процессов (разд. 3.2 и 3.3). Именно дифракционный подход к столкновениям сильновзаимодействующих частиц привел И. Я. Померанчука к формулировке знаменитых асимптотических теорем (разд. 3.4). Трудности в согласовании дифракционного описания процессов при асимптотически высоких энергиях с картиной периферических взаимодействий, идущих путем одномезонного обмена, нашли свое разрешение в так называемой реджистике, в создании которой работы, идеи и энтузиазм Исаака Яковлевича сыграли ключевую роль (см. разд. 3.5).

### 3.1. Феноменология малочастичных процессов

Работы, о которых рассказывается в этом разделе, в основном посвящены обмену рассеянию нуклонов и взаимодействиям  $\pi$ -мезонов с дейтронами. Обменным столкновением нейтрона с покоящимся протоном называется столкновение, при котором протон передает нейтрону свой заряд и практически не происходит передачи импульса. В результате возникают быстрый протон и медленный нейтрон. Аналогично определяется обменное столкновение и в других случаях, например при столкновении быстрого протона с медленным нейтроном (в дейтроне). Феноменологическому исследованию обменных процессов посвящены работы [40—45].

В работах [40—42], выполненных совместно с И. М. Шмушкевичем, обсуждается тормозное излучение фотонов при столкновениях нуклонов с нуклонами [40], с многонуклонными ядрами [41] и дейтронами [42]. Основная идея этих работ — резкое изменение движения электрического заряда должно приводить к интенсивному тормозному излучению.

В работах [43—45] дана теория обменного рассеяния быстрых нуклонов на дейтронах. При этом два медленных нуклона тождественны ( $nn$ , если налетает нейтрон, и  $pp$ , если налетает протон) и не могут находиться в триплетном по спину состоянии. Это обстоятельство, как подчеркивается в работах [43, 44], позволяет установить спиновую зависимость обменных сил.

Аналогичные идеи легли в основу работ [46—48], где рассматривались перезарядка (и упругое рассеяние) заряженных пионов на дейтронах (выполнены совместно с В. Б. Берестецким) и захват  $\pi$ -мезона дейтроном [49]. Эти последние работы были сделаны под непосредственным влиянием эксперимента В. Пановского и сотрудников [50]. В работах [40—49] И. Я. Померанчук и его

соавторы стремились вести анализ на чисто феноменологическом уровне, не используя теорию возмущений для сильных взаимодействий мезонов с нуклонами. К этим работам примыкает и статья [51], в которой предложен метод определения четности  $\Xi^-$ -гиперона путем его захвата протоном из  $s$ -волны. При этом возникают два  $\Lambda$ -гиперона. Предлагается изучать угловые корреляции между пионами, которые возникают от распада  $\Lambda$ -гиперонов. Если четность  $\Xi^-$ -гиперона положительна, то пионы должны разлетаться в противоположные стороны; если же она отрицательна, то они должны лететь преимущественно в одном направлении. Учитывая блестящие успехи  $SU(3)$ -симметрии и модели кварков, в настоящее время нет сомнений в том, что четность  $\Xi^-$ -гиперона положительна. Но прямого экспериментального доказательства этого факта до сих пор нет.

### 3.2. Теория дифракционных процессов

По существу, то же стремление — понять как можно больше в процессах сильного взаимодействия в условиях отсутствия последовательной теории сильного взаимодействия — лежит в основе цикла работ Исаака Яковлевича, посвященных исследованию дифракции. Дифракционное рассеяние сильновзаимодействующих частиц очень похоже на дифракционное рассеяние света на непрозрачном экране. Детали взаимодействия света с экраном и материал, из которого он изготовлен, не важны, существенно лишь, что экран черный, т. е. поглощает все попадающие на него фотоны. При дифракционном описании взаимодействия нуклонов и мезонов с нуклонами и ядрами основное — это то, что мишень можно рассматривать как непрозрачный (черный) или полупрозрачный (серый) шарик.

Впервые Исаак Яковлевич обратился к дифракции в 1946 г., когда совместно с А. И. Ахиезером рассмотрел дифракционное рассеяние протонов ядрами [52]. В этой работе было впервые учтено влияние на дифракцию кулоновского взаимодействия частицы с мишенью. В работе 1953 г. с Л. Д. Ландау [53] было рассмотрено излучение тормозных фотонов при столкновении энергичных пионов с нуклонами и ядрами. При этом сравнивались между собой два механизма излучения: дифракционно рассеянным пионом и пионом, захваченным мишенью. Было показано, что должен доминировать последний — механизм излучения при захвате. В работах [54, 55] с А. И. Ахиезером аналогичное рассмотрение было проведено для протона; корректный учет аномального магнитного момента протона был сделан в работе [55].

Совместно с Е. Л. Фейнбергом Исаак Яковлевич в 1953 г. рассмотрел процесс, в котором дифракционно рассеянный нуклон испускает пион [56]. Такое дифракционное рождение частиц инте-

ресно тем, что в отличие от других неупругих процессов оно не падает с ростом энергии сталкивающихся частиц.

В работах [57, 58] Исаак Яковлевич дал расчет дифракционного фоторождения на ядрах пар пионов. В этих работах обращает на себя внимание замечание о том, что в силу сохранения зарядовой четности дифракционное рождение пары нейтральных пионов запрещено. «Квант зарядово-нечетен. Система из двух  $\pi^0$ -мезонов зарядово-четна. Так как ядро выполняет только функции черного тела, то его следует считать зарядово-четным». Это замечание представляет собой первый шаг на пути установления квантовых чисел того объекта, который в дальнейшем получит название померона.

Два взаимодополняющих обзора, опубликованных в 1956 г. (совместно с Е. Л. Фейнбергом [59]) и в 1958 г. (совместно с А. И. Ахизером [60]), завершают эту серию работ по дифракционным эффектам.

### 3.3. Периферийные столкновения сильновзаимодействующих частиц

В 1959—1960 гг. были опубликованы три статьи [61—63] Исаака Яковлевича с соавторами. В первой из них [61] было подчеркнуто, что при достаточно больших прицельных расстояниях взаимодействия между двумя частицами определяются обменом минимальным числом мезонов: одним  $\pi$ -мезоном в случае нуклон-нуклонного рассеяния, двумя — в случае пион-нуклонного рассеяния и т. д.; выделение одномезонного (или двухмезонного) обмена в работе [61] предлагалось осуществить путем измерения фаз рассеяния в состояниях с большим орбитальным моментом  $l$ . Для амплитуды рассеяния с данным  $l$  были получены явные выражения через функции Лежандра второго рода  $Q_l$  (для одномезонного обмена) и двукратный интеграл от этих функций (для двухмезонного обмена).

В статье [62], посвященной количественной оценке двухмезонного вклада, было получено представление для амплитуды с данным  $l$  в виде однократного интеграла по квадрату переданного импульса от произведения  $Q_l$  и абсорбтивной части амплитуды в импульсном представлении. Это же представление было независимо получено в 1961 г. М. Фруассаром и использовано им при доказательстве известной теоремы Фруассара [64]. Грибов [65] и Фруассар [66], опираясь на работы Редже [67] по комплексным угловым моментам в нерелятивистской квантовой механике, аналитически продолжили это выражение в область комплексных  $l$  и получили так называемое представление Грибова—Фруассара (см. ниже). Конкретные расчеты двухмезонного вклада, проведенные в статье [63], показали, что для нуклонов с энергией  $\leq 200$  МэВ уже фазы волн с  $l = 3$  и  $4$  с хорошей точностью могут

быть получены из одномезонного приближения. Учет периферийного «хвоста» при больших  $l$  является неотъемлемым элементом современного фазового анализа [68].

### 3.4. Сильные взаимодействия при асимптотически высоких энергиях. Работы 1950-х годов

Первая работа Исаака Яковлевича, посвященная процессам сильного взаимодействия при асимптотически высоких энергиях, была опубликована в 1951 г. [69]. Это был отклик на работу Э. Ферми [70], в которой была предложена статистическая теория множественного рождения сильновзаимодействующих частиц, в основном  $\pi$ -мезонов. Согласно Ферми, объем, в котором при столкновении устанавливается статистическое равновесие рожденных частиц, должен уменьшаться с ростом энергии сталкивающихся частиц обратно пропорционально этой энергии. И. Я. Померанчук отметил, что говорить о более или менее идеальном газе сильновзаимодействующих частиц (а именно пользуясь формулами для идеального газа, вел расчеты Ферми в работах [70, 71]) можно только в том случае, если упомянутый объем будет расти с ростом энергии, поскольку с ростом энергии растет среднее число рожденных частиц. Это наблюдение приводило к выводу о том, что с ростом энергии множественность должна расти гораздо быстрее, чем по теории Ферми. Работа [69] инициировала целый ряд теоретических исследований, и в частности работу Л. Д. Ландау [72], применившего к процессу множественного рождения гидродинамический подход. Краткое изложение дальнейшей истории вопроса и список литературы можно найти в книге [73].

Вскоре после открытия антипротона появляются работы [74, 75]. В первой из них Исаак Яковлевич приходит к выводу о том, что сечение реакции перезарядки  $p\bar{p} \rightarrow n\bar{n}$  должно падать с ростом энергии. Опираясь на этот вывод и используя изотопическую инвариантность, он доказывает, что при асимптотически больших энергиях должны быть равны упругие сечения рассеяния антипротона и антинейтрона на протоне, а также и соответствующие полные сечения. В работе [75] аналогичные утверждения были обобщены для нуклон-нуклонного и пион-нуклонного взаимодействий. В частности, было показано, что сечение перезарядки  $\pi^-p \rightarrow \pi^0n$  должно асимптотически падать с ростом энергии, а упругие и полные сечения взаимодействия с протонами должны быть асимптотически одинаковы для  $\pi^+$ - и  $\pi^-$ -мезонов.

В основе этих первых асимптотических теорем лежало представление о том, что при очень высоких энергиях должны доминировать каналы множественного рождения, число которых должно расти, в результате чего на канал перезарядки будет прихо-

даться все меньшая доля полного сечения. По существу, это было естественное следствие представления о «черном» или «полусером» нуклоне.

Та же дифракционная картина привела Исаака Яковлевича к формулировке в 1958 г. еще более сильной теоремы [76], согласно которой должно иметь место асимптотическое равенство полных сечений взаимодействия частиц и античастиц. Это утверждение было доказано в работе [76] на примере взаимодействий протон—протон и антипротон—протон, но в работе подчеркивалось, что такие же равенства должны иметь место для любой сильновзаимодействующей частицы и ее античастицы. К тому времени, когда была напечатана работа [76], данные о взаимодействиях антипротонов имелись лишь при энергиях в несколько сот МэВ. При этих энергиях сечения антипротонов значительно больше, чем сечения протонов, так что предсказание равенства сечений было очень нетривиальным. Ключевым элементом доказательства теоремы было использование аналитических свойств амплитуды рассеяния как функции своих кинематических переменных. В плоскости, определяемой реальной и мнимой частями энергии протона, рассеянию протонов отвечают значения  $E > M$ , а рассеянию антипротонов — значение  $E < -M$ , где  $E$  — энергия, а  $M$  — масса протона. Используя дисперсионные соотношения для амплитуды рассеяния на нулевой угол, Исаак Яковлевич показал, что ненулевая разность асимптотических сечений для протона и антипротона привела бы к асимптотически растущему сечению упругого рассеяния в противоречии с представлением о конечных размерах частиц.

Теоремы Померанчука стоят у истока важного научного направления — физики асимптотически высоких энергий. Они стимулировали не только поток теоретических обобщений (см., например, обзоры [77, 78]), но и строительство новых, более энергичных ускорителей, постановку десятков новых важных экспериментов. Крупнейшие физики-теоретики во всем мире включились в разработку асимптотической физики.

### 3.5. Сильное взаимодействие при асимптотически высоких энергиях. Работы 1960-х годов

В начале 1960-х годов стало ясно, что «самоочевидное» представление о том, что эффективный радиус частиц не меняется с ростом их энергии, нуждается в ревизии. Важную роль в осознании этого обстоятельства сыграла работа В. Б. Берестецкого и И. Я. Померанчука [79], в которой было рассмотрено сечение рождения двух пионов при столкновении двух нуклонов, обменивающихся виртуальным пионом, и показано, что отношение этого сечения к квадрату сечения упругого пион-нуклонного рассеяния

асимптотически растет как логарифм энергии. Если исходить из того, что полное сечение столкновения нуклонов и сечение упругого рассеяния пиона на нуклоне постоянны, то получается внутреннее противоречие: сечение одного из неупругих каналов при достаточно высокой энергии должно было стать больше полного сечения. (Независимо к аналогичному противоречию другим путем пришел В. Н. Грибов [80].) Из этого противоречия были возможны следующие выходы: полное сечение взаимодействия нуклонов растет с энергией, и/или сечение упругого рассеяния пиона на нуклоне падает с энергией, и/или в асимптотике незаконно пользоваться приближением одномезонного обмена для описания периферийных процессов.

В следующей работе [81] Исаака Яковлевича с В. Н. Грибовым была рассмотрена аннигиляция протона и антипротона в два пиона и было показано, что в приближении однонуклонного обмена сечение такого процесса падает не быстрее, чем  $1/E$ , в противоречии с предсказаниями статистических теорий. Чтобы снять это противоречие, было необходимо предположить, что в  $t$ -канале имеет место компенсация однонуклонного полюса и многочастичного разреза. Это означало, в свою очередь, что с ростом энергии эффективные предельные расстояния, на которых происходит взаимодействие, должны расти.

В 1961 г. теория сильных взаимодействий при асимптотически высоких энергиях претерпела радикальные изменения. Возникли новая картина и новый язык для описания этой картины, язык реджевских полюсов. Основные элементы этой картины были открыты в работах Т. Редже [67], М. Фруассара [64], В. Н. Грибова [65], Дж. Чу и С. Фраучи [82, 83]. Т. Редже впервые рассмотрел в нерелятивистской квантовой механике парциальные амплитуды с данным значением  $l$  как аналитические функции  $l$ . М. Фруассар установил, что полные сечения сильных взаимодействий асимптотически могут расти, но не быстрее, чем  $\ln^2 E$ . В. Н. Грибов [65], Дж. Чу и С. Фраучи [82, 83] перенесли результаты Редже в область квантовой теории поля и показали, что если полное сечение стремится к постоянному пределу, то упругое сечение должно логарифмически падать, а его угловое распределение логарифмически сужаться, что отвечало системе, прозрачность и радиус которой растут с энергией. Такое поведение отвечало амплитуде вида  $s^{j(t)}$ , где  $s$  — квадрат энергии,  $t$  — квадрат переданного импульса, а  $j(t)$  — зависящий от  $t$  угловой момент сложного комплекса частиц — реджеона, от которого происходит обмен. Постоянному полному сечению отвечает  $j(0) = 1$ . Функция  $j(t)$  получила название реджевской траектории. При  $t < 0$  реджевская траектория определяет рассеяние частиц; при  $t > 0$  траектория с данными квантовыми числами (среди которых, разумеется, отсутствует угловой момент) проходит на плоскости  $j, t$  через точки, отвечающие частицам с данными квантовыми числами. При этом

$j$  — угловой момент частицы, а  $t$  — квадрат ее массы. Чу и Фраучи, которые впервые построили такие графики [83], предположили что при  $t > 0$  реджевские траектории почти линейны. Траектория  $j(t)$  характеризует положение полюса парциальной амплитуды в  $t$ -канале. Полюс с квантовыми числами вакуума, доминирующий в упругом рассеянии, получил название вакуумного полюса или полюса Померанчука (померона).

То обстоятельство, что обмен помероном доминирует в сечениях взаимодействия любой пары частиц, позволило В. Н. Грибову и И. Я. Померанчуку [84] установить асимптотические факторизационные отношения между различными сечениями, например  $\sigma_{\pi N}^2 = \sigma_{\pi\pi} \sigma_{NN}$ . В последующей заметке [85] они проанализировали спиновую структуру нуклон-нуклонных и пион-нуклонных амплитуд, обусловленных вакуумным полюсом. Амплитуды, обусловленные фермионными полюсами Редже, описывающие такие процессы, как двухпионная аннигиляция протона и антипротона или рассеяние пиона нуклоном на  $180^\circ$ , были рассмотрены в статье [86]. Различным аспектам реджевских полюсов были посвящены работы [87—90], опубликованные в 1962 г. Две из этих работ были доложены на Рочестерской конференции 1962 г. в Женеве. Исаак Яковлевич сделал доклад «Полюса Редже и особенности Ландау» [89], а В. Н. Грибов — «Ограничение скорости убывания амплитуд различных процессов» [90] (см. [91], с. 543 и 524 соответственно). Реджевским полюсам на этой конференции были посвящены доклады Т. Редже, Дж. Чу, С. Мандельстама, М. Гелл-Манна и других. В частности, в докладе Гелл-Манна реджевская траектория с квантовыми числами вакуума названа траекторией Померанчука и обозначена  $P$ . Впервые вакуумный полюс связывается с именем Померанчука в статье С. Фраучи, М. Гелл-Манна и Ф. Закарайзена [92]<sup>1</sup>.

В 1963 г. выяснилось, что вера в то, что все особенности в плоскости комплексного момента — это полюса, необоснованна: С. Мандельстам открыл точки ветвления [93]. Картина  $j$ -плоскости резко усложнилась. В 1964 и 1965 гг. вышли две работы В. Н. Грибова, И. Я. Померанчука и К. А. Тер-Маргиросяна [94, 95], в которых анализировались свойства ветвлений. Но последовательная диаграммная техника расчета реджевских ветвлений была создана В. Н. Грибовым [96] уже после смерти Исаака Яковлевича.

В 1969 г. был открыт так называемый Серпуховский эффект. Группа ИФВЭ—ЦЕРН, руководимая Ю. Д. Прокошкиным [97], открыла на ускорителе в Серпухове, что энергетическая зависимость полных сечений взаимодействий  $\pi$ -мезонов и  $K$ -мезонов с нуклонами меняет свой характер в районе 20—30 ГэВ (см.

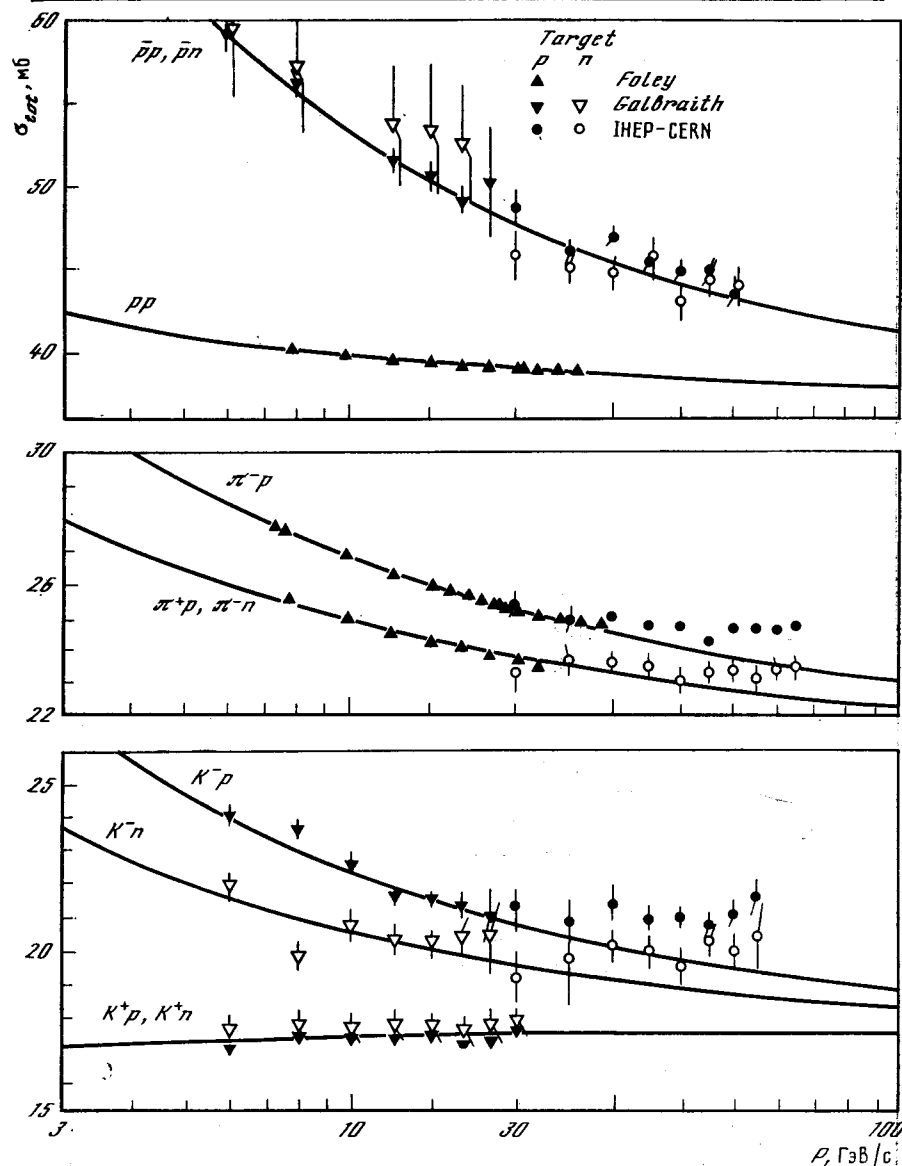


Рис. 1. Полные сечения рассеяния антипротонов, протонов,  $\pi^\pm$ -мезонов и  $K^\pm$ -мезонов на протонах и нейтронах

Теоретические предсказания Барджера изображены сплошными линиями. Эти предсказания были основаны на модели реджевских полюсов и предположении, что полные сечения асимптотически выходят на постоянные пределы. Экспериментальные точки [97], отклоняющиеся от теоретических кривых, были получены в 1969 г. на Серпуховском ускорителе

<sup>1</sup> Я благодарен А. Б. Кайдалову и М. Гелл-Манну, напомнившим мне об этом.

рис. 1, взятый из работы [97]). Стало ясно, что если справедлива теорема Померанчука, то до энергий, где она должна выполняться, еще очень далеко. Последующие эксперименты при еще более высоких энергиях (на ускорителях ЦЕРНа и ФНАЛа и коллайдере ЦЕРНа) показали, что все полные сечения растут с энергией, а разности между сечениями частиц и античастиц уменьшаются (см. рис. 2, взятый из работы [98]; см. также [99]).

После создания в начале 1970-х годов квантовой хромодинамики реджевский подход к теории асимптотик наполнился новым содержанием, но эта тема выходит за рамки данного обзора (см. сравнение современных экспериментальных данных с теорией так называемого сверхкритического померона с  $j(0) \approx 1,1$  в работе [100]).

### 3.6. $SU(3)$ -симметрия и кварки

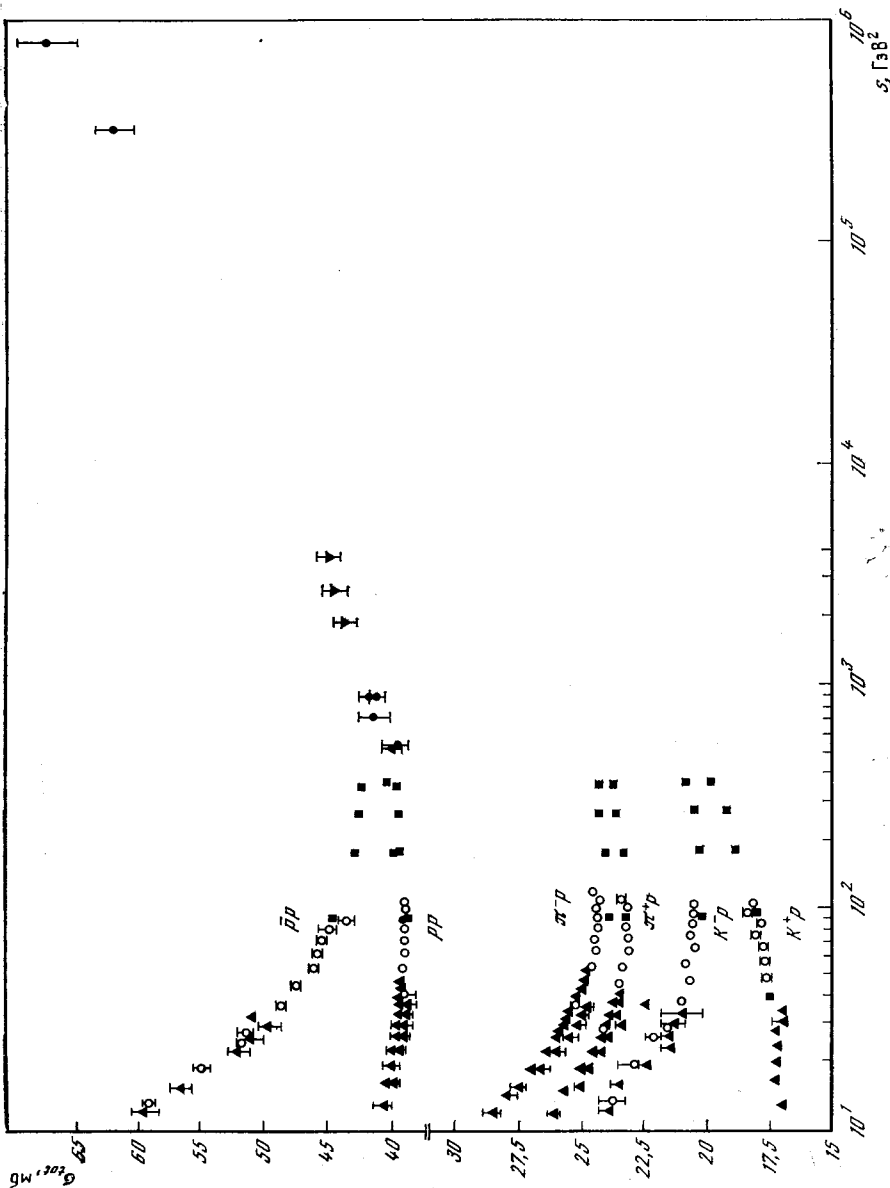
В работе Б. Л. Иоффе, И. Ю. Кобзарева и И. Я. Померанчука [101]  $SU(3)$ -симметрия применялась к распадам  $B$ -мезона и  $f^0$ -мезона с  $J^P = 1^+$  и  $2^+$  соответственно (в современных обозначениях  $b_1(1235)$  и  $f_2(1270)$ ). Обсуждая отношение вероятностей  $B \rightarrow \rho\pi$  и  $B \rightarrow \rho\omega$ , а также  $f \rightarrow K_1^0 K_1^0$  и  $f \rightarrow \pi^+\pi^-$ , авторы заключили на основе имевшихся в их распоряжении экспериментальных данных, что ни  $B$ , ни  $f$  не являются унитарными синглетами, и предприняли одну из первых попыток «укомплектовать» октет мезонов с  $J^P = 2^+$ . То обстоятельство, то  $f$ -мезон не является унитарным синглетом, представляло большой интерес, поскольку было широко распространено мнение, что эта частица должна лежать на вакуумной реджевской траектории и, следовательно, должна обладать квантовыми числами вакуума.

В работе [102] на основе  $SU(3)$ -симметричной кварковой модели получены соотношения между электромагнитными разностями масс барионов декуплета  $J^P = 3/2^+$  и октета  $J^P = 1/2^+$ . Независимо эти соотношения были найдены и другими авторами [103, 104]. Разброс в экспериментальных данных (см. [105]) все еще не позволяет сделать определенное заключение о том, насколько адекватны были исходные положения работы [102]. Однако аналогичный подход к хромомагнитному расщеплению масс барионов привел впоследствии А. де Рухулу, Г. Джорджи и Ш. Глешоу [106] к ряду весьма точных предсказаний, например к предсказанию разности масс  $\Lambda_c^-$  и  $\Sigma_c^-$ -гиперонов.

←

Рис. 2. Экспериментальные данные о полных сечениях рассеяния антипротонов, протонов,  $\pi^\pm$ -мезонов и  $K^\pm$ -мезонов на протонах на 1986 г.

Две крайние правые точки получены на протон-антипротонном коллайдере ЦЕРНа. Отчетливо виден рост сечений с энергией



## 4. ПОСЛЕДНИЕ РАБОТЫ

Из четырех работ, сделанных Исааком Яковлевичем в последний год жизни, три [107—109] были написаны его сотрудниками и опубликованы уже после его смерти и лишь одна работа [110] вышла из печати при его жизни.

Статьи [107—109] посвящены различным аспектам физики асимптотик. В статье [107], написанной К. А. Тер-Мартirosяном, рассмотрено угловое распределение упруго рассеянных частиц вне области дифракционного пика. Данные по  $pp$ -рассеянию в этой области при энергиях налетающих протонов 12—30 ГэВ были получены незадолго до того Ориром. (Какими низкими были в то время асимптотически высокие энергии!) Исаак Яковлевич показал, что в этой области существен вклад реджевских ветвлений и что данные Орира могут быть описаны этим вкладом. Дальнейшее уточнение этого расчет получил в работе А. А. Ансельма и И. Т. Дятлова [111], обнаруживших на плавном фоне медленные осцилляции углового распределения.

Статья [108] была написана В. Н. Грибовым и В. М. Шехтером при участии И. М. Шмушкевича. В этой статье был поставлен вопрос о том, может ли при очень высоких энергиях сечение какого-либо слабого процесса, например рассеяния нейтрино на электро-не, достичь порядка величины сечений сильного взаимодействия, скажем порядка  $10^{-26}$  см<sup>2</sup>. Постановка такого вопроса до создания перенормируемой теории слабого взаимодействия была более чем законной. Используя требования аналитичности и унитарности, Исаак Яковлевич смог показать, что очень быстрый рост сечений быть не может и потому энергии, где слабое сечение может стать большим, должны быть очень велики. Идеи, заложенные в работе [108], развивались в ряде работ [112—115], результаты которых суммированы в обзоре [116]. Некоторые из вопросов, анализировавшихся в работах [108, 112—116], не потеряли своего значения и в рамках стандартной теории электрослабого взаимодействия. Например, вопрос о том, что является аналогом теоремы Фруассара в том случае, когда возможен обмен безмассовыми частицами (нейтринными парами).

Статья В. Н. Грибова, Б. Л. Иоффе и И. Я. Померанчука [109] поступила в редакцию «Ядерной физики» в марте 1967 г., через 3 месяца после смерти Исаака Яковлевича. В этой статье было дано теоретико-полевое обоснование аргументов Бьёркена [117], который утверждал, что при высоких энергиях сечения процессов  $e^+e^- \rightarrow$  адроны и  $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$  должны быть сравнимы, а также, что должны быть сравнимы вероятности распадов  $W$ -бозонов на лептоны и адроны. Обоснование этих утверждений, данное в работе [109], подробно обсуждается в обзоре Б. Л. Иоффе в этом сборнике. На рис. 3, взятом из [118], приведены экспериментальные данные, полученные на различных установках, ил-

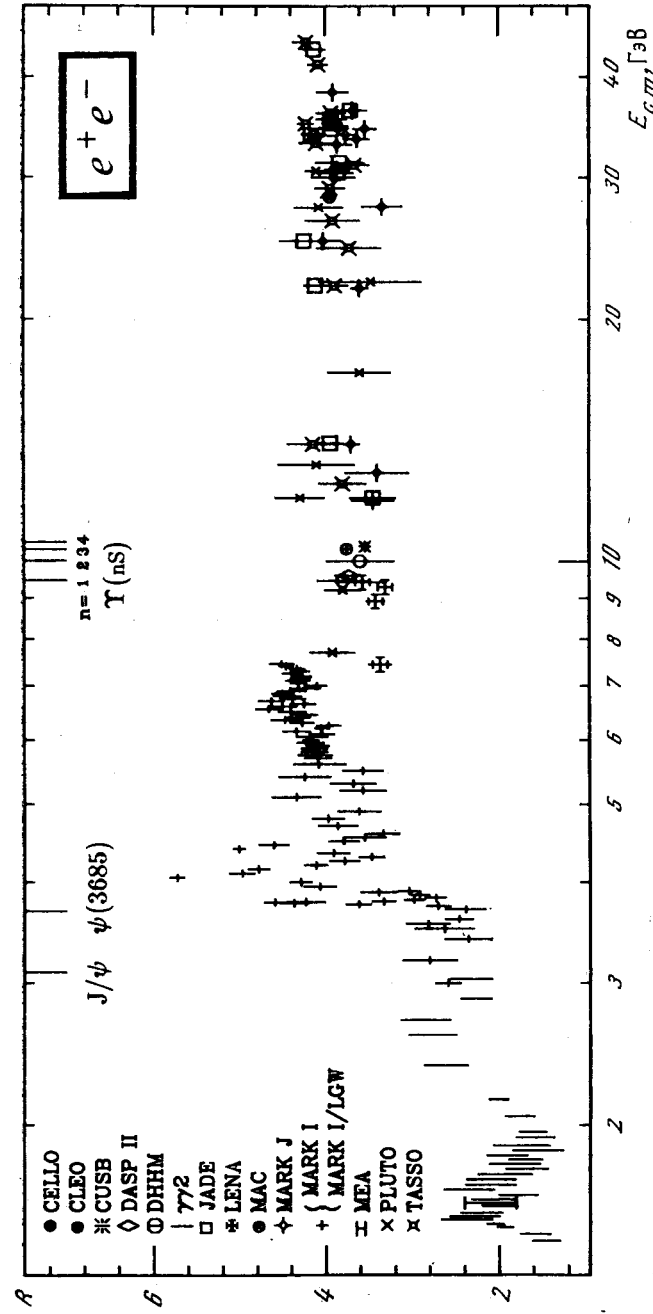


Рис. 3. Экспериментальные данные о полном сечении аннигиляции электрона и позитрона в адроны, полученные в различных лабораториях мира

По оси абсцисс отложена энергия в системе центра масс, по оси ординат — величина  $R$ , равная отношению сечения аннигиляции в адроны к «стандартному» сечению аннигиляции  $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ . Различным значениям энергии соответствуют значения  $R$ , измеренные примерно в 10 различных экспериментальных установках.

люстрирующие постоянство величины  $R = \sigma(e^+e^- \rightarrow \text{адроны}) / \sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)$  при высоких энергиях (на этом рисунке указаны также положения некоторых уровней чармония и ипсилония).

В статье И. Ю. Кобзарева, Л. Б. Окуня и И. Я. Померанчука [110], написанной в конце 1965 г., была выдвинута гипотеза о возможном существовании так называемого зеркального мира. Это было сделано для того, чтобы хотя бы на эстетическом уровне восстановить симметрию между левым и правым, нарушение которой было обнаружено в 1964 г. в распадах долгоживущих нейтральных  $K$ -мезонов. Согласно [110], каждой «нашей» частице отвечает своя «зеркальная» частица с той же массой и такими же взаимодействиями: сильным, электромагнитным и слабым (с точностью до знака фазы, нарушающей  $CP$ -инвариантность). Так что могут существовать зеркальные атомы, молекулы, звезды и даже зеркальная жизнь. Однако, как показано в [110], взаимодействие зеркальных частиц с «нашими» должно быть очень слабым; возможно, единственным взаимодействием между ними является гравитационное взаимодействие. В статье предлагались эксперименты по поискам зеркального вещества в пределах Солнечной системы.

В последующие годы некоторые авторы [119—127] обращались к гипотезе о зеркальном мире. Интерес к этой гипотезе особенно возрос в связи с открытием так называемого «темного вещества» во Вселенной (см., например, [128]), а также в связи с моделями великого объединения и суперструн. Если в околоземном пространстве имеется заметная концентрация зеркального вещества, оно может быть обнаружено, по-видимому, еще до конца этого столетия.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Akhiezer A. I., Landau L. D., Pomeranchuk I. Ya. // Nature. 1936. Vol. 138. P. 206.
2. Ахиезер А. И., Померанчук И. Я. // ЖЭТФ. 1937. Т. 7. С. 567.
3. Paratzagos P., Mork K. // Phys. Repts. 1975. Vol. 21С. N 2.
4. Pomeranchuk I. Ya., Smorodinsky Ya. A. // J. Phys. USSR. 1945. Vol. 9. P. 97.
5. Попов В. С. // ЖЭТФ. 1970. Т. 59. С. 965.
6. Попов В. С. // ЯФ. 1971. Т. 14. С. 458.
7. Зельдович Я. Б., Попов В. С. // УФН. 1971. Т. 105. С. 403.
8. Попов В. С. // Природа. 1981. № 10. С. 14.
9. Soffel M., Müller B., Greiner W. // Phys. Repts. 1982. Vol. 85. P. 51.
10. Cowan T., Backe H., Bethge K. et al. // Phys. Rev. Lett. 1986. Vol. 56. P. 444.
11. Померанчук И. Я. // Докл. АН СССР. 1948. Т. 60. С. 213.
12. Померанчук И. Я. // ЖЭТФ. 1949. Т. 19. С. 183.
13. Ландау Л. Д. // Докл. АН СССР. 1948. Т. 60. С. 207.
14. Yang C. N. // Phys. Rev. 1950. Vol. 77. P. 242.
15. Иoffee В. Л., Померанчук И. Я. // ЖЭТФ. 1952. Т. 23. С. 123.
16. Галанин А. Д., Померанчук И. Я. // Докл. АН СССР. 1952. Т. 86. С. 25.

17. Brown L. S., Cahn R. N., McLerran L. D. // Phys. Rev. 1975. Vol. 12. P. 581, 596, 609.
- 17a. Watson J. S., Sundaresan M. K. // Canad. J. Phys. 1974. Vol. 52. P. 2037.
18. Берестецкий В. Б., Померанчук И. Я. // ЖЭТФ. 1955. Т. 29. С. 864.
19. Ландау Л. Д., Померанчук И. Я. // Докл. АН СССР. 1953. Т. 92. С. 535.
20. Ландау Л. Д., Померанчук И. Я. // Там же. 1953. Т. 92. С. 735.
21. Мигдал А. Б. // Там же. 1954. Т. 96. С. 49.
22. Ландау Л. Д., Померанчук И. Я. // Там же. 1955. Т. 102. С. 489.
23. Померанчук И. Я. // Там же. Т. 103. С. 1005.
24. Фрадкин Е. С. // ЖЭТФ. 1955. Т. 29. С. 258.
25. Ландау Л. Д., Абрикосов А. А., Халатников И. М. // Докл. АН СССР. 1954. Т. 95. С. 497, 773, 1177; Т. 96. С. 261.
26. Gell-Mann M., Low F. // Phys. Rev. 1954. Vol. 95. P. 1300.
27. Gross D. J., Wilczek F. // Phys. Rev. Lett. 1973. Vol. 30. P. 1343.
28. Politzer H. D. // Ibid. P. 1346.
29. Ваняшин В. С., Терентьев М. В. // ЖЭТФ. 1965. Т. 48. С. 565.
30. Faddeev L. D., Popov V. N. // Phys. Lett. B. 1967. Vol. 25. P. 29.
31. Хриплович И. Б. // ЯФ. 1969. Т. 10. С. 409.
32. Johnson K. // Asymptotic realms of physics / Ed. A. H. Guth, K. Huang, R. L. Jaffe. Cambridge (Mass.); MIT press, 1983. P. 20—31.
33. Shtushkevich I. M., Pomeranchuk I. Ya. // Nucl. Phys. 1961. Vol. 23. P. 452.
34. Никитин Ю. И., Померанчук И. Я., Шмушкевич И. М. // ЖЭТФ. 1961. Т. 41. С. 963.
35. Dydak F., Navarra F., Overeth O. E. et al. // Nucl. Phys. B. 1977. Vol. 118. P. 1.
36. Maglic B. C., Alvarez L. W., Rosenfeld A. H., Stevenson M. L. // Phys. Rev. Lett. 1961. Vol. 7. P. 178.
37. Кобзарев И. Ю., Окунь Л. Б., Померанчук И. Я. // ЖЭТФ. 1961. Т. 41. С. 495.
38. Hooft G. 't // Phys. Lett. B. 1971. Vol. 37. P. 195.
39. Ахиезер А. И., Померанчук И. Я. Некоторые вопросы теории ядра. 2-е изд. М.: Гостехиздат, 1950. 416 с.
40. Померанчук И. Я., Шмушкевич И. М. // Докл. АН СССР. 1949. Т. 64. С. 499.
41. Померанчук И. Я., Шмушкевич И. М. // Там же. 1950. Т. 70. С. 33.
42. Померанчук И. Я., Шмушкевич И. Я. // Там же. 1952, Т. 87. С. 385.
43. Померанчук И. Я. // ЖЭТФ. 1951. Т. 21. С. 1113.
44. Померанчук И. Я. // Докл. АН СССР. 1951. Т. 78. С. 249.
45. Померанчук И. Я. // ЖЭТФ. 1952. Т. 22. С. 624.
46. Берестецкий В. Б., Померанчук И. Я. // Докл. АН СССР. 1951. Т. 77. С. 803.
47. Берестецкий В. Б., Померанчук И. Я. // ЖЭТФ. 1951. Т. 21. С. 1313.
48. Берестецкий В. Б., Померанчук И. Я. // Докл. АН СССР. 1951. Т. 81. С. 1019.
49. Померанчук И. Я. // Там же. Т. 80. С. 47; ЖЭТФ. 1952. Т. 22. С. 129.
50. Rapofsky W. K. H., Aamodt R. L., Hadley J. // Phys. Rev. 1951. Vol. 81. P. 565.
51. Окунь Л. Б., Померанчук И. Я., Шмушкевич И. М. // ЖЭТФ. 1958. Т. 34. С. 397.
52. Ахиезер А. И., Померанчук И. Я. // Там же. 1946. Т. 16. С. 396.
53. Ландау Л. Д., Померанчук И. Я. // Там же. 1953. Т. 24. С. 505.
54. Ахиезер А. И., Померанчук И. Я. // Докл. АН СССР. 1954. Т. 94. С. 821.
55. Ахиезер А. И., Померанчук И. Я. // ЖЭТФ. 1956. Т. 30. С. 201.
56. Померанчук И. Я., Фейнберг Е. Л. // Докл. АН СССР. 1953. Т. 93. С. 439.



57. Померанчук И. Я. // Там же. 1954. Т. 96. С. 265.
58. Померанчук И. Я. // Там же. С. 481.
59. Feinberg E. L., Pomernanchuk I. Ya. // Nuovo sim. Suppl. 1956. N 4. P. 652.
60. Агнесер А. И., Померанчук И. Я. // УФН. 1958. Т. 55. С. 593.
61. Окунь Л. Б., Померанчук И. Я. // ЖЭТФ. 1959. Т. 36. С. 300; Nucl. Phys. 1959. Vol. 10. P. 492.
62. Галанин А. Д., Грашин А. Ф., Иоффе Б. Л., Померанчук И. Я. // ЖЭТФ. 1959. Т. 37. С. 1663; Nucl. Phys. 1960. Vol. 17. P. 181.
63. Галанин А. Д., Грашин А. Ф., Иоффе Б. Л., Померанчук И. Я. // ЖЭТФ. 1960. Т. 38. С. 47.
64. Froissart M. // Phys. Rev. 1961. Vol. 123. P. 1053.
65. Грибов В. Н. // ЖЭТФ. 1961. Т. 41. С. 667.
66. Froissart M. La Jolla Conference, 1961. Unpublished.
67. Regge T. // Nuovo sim. 1959. Vol. 14. P. 951; 1960. Vol. 18. P. 947.
68. Höhler G. // Phys. Lett. B. 1986. Vol. 170. P. 246.
69. Померанчук И. Я. // Докл. АН СССР. 1951. Т. 78. С. 889.
70. Fermi E. // Progr. Theor. Phys. 1950. Vol. 5. P. 570.
71. Fermi E. // Phys. Rev. 1951. Vol. 81. P. 683.
72. Ландау Л. Д. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1953. Т. 17. С. 51.
73. Никитин Ю. П., Розенталь И. Л. Теория множественных процессов. М.: Атомиздат, 1976. 232 с.
74. Померанчук И. Я. // ЖЭТФ. 1956. Т. 30. С. 423.
75. Окунь Л. Б., Померанчук И. Я. // Там же. 1956. Т. 30. С. 424.
76. Померанчук И. Я. // Там же. 1958. Т. 34. С. 727.
77. Логунов А. А., Нгуен Ван Хъу, Годоров И. Т. // УФН. 1966. Т. 88. С. 51.
78. Eden R. J. // Rev. Mod. Phys. 1971. Vol. 43. P. 15.
79. Берестецкий В. Б., Померанчук И. Я. // ЖЭТФ. 1960. Т. 39. С. 1078; Nucl. Phys. 1961. Vol. 22. P. 629.
80. Gribov V. N. // Ibid. 1961. Vol. 22. P. 246.
81. Gribov V. N., Pomernanchuk I. Ya. // Ibid. 1962. Vol. 33. P. 516.
82. Chew G. F., Frautschi S. C. // Phys. Rev. Lett. 1961. Vol. 7. P. 394.
83. Chew G., Frautschi S. // Ibid. 1962. Vol. 8. P. 41.
84. Грибов В. Н., Померанчук И. Я. // ЖЭТФ. 1962. Т. 42. С. 1141; Phys. Rev. Lett. 1962. Vol. 8. P. 343.
85. Грибов В. Н., Померанчук И. Я. // ЖЭТФ. 1962. С. 1682; Phys. Rev. Lett. 1962. Vol. 8. P. 412.
86. Грибов В. Н., Окунь Л. Б., Померанчук И. Я. // ЖЭТФ. 1962. Т. 45. С. 114.
87. Грибов В. Н., Померанчук И. Я. // Там же. Т. 43. С. 308; Nucl. Phys. 1962. Vol. 38. P. 516.
88. Грибов В. Н., Иоффе Б. Л., Померанчук И. Я., Рудик А. П. // ЖЭТФ. 1962. Т. 42. С. 1419.
89. Грибов В. Н., Померанчук И. Я. // Там же. Т. 43. С. 1970; Phys. Rev. Lett. 1962. Vol. 9. P. 238.
90. Грибов В. Н., Померанчук И. Я. // ЖЭТФ. 1962. Т. 43. С. 1556; Phys. Lett. 1962. Vol. 2. P. 239.
91. Proc. 1962 Intern. Conf. on High-Energy Phys. Genève, 1962. P. 950.
92. Frautschi S., Gell-Mann M., Zachariasen F. // Phys. Rev. 1962. Vol. 126. P. 2204.
93. Mandelstam S. // Nuovo sim. 1963. Vol. 30. P. 1113, 1127, 1148.
94. Грибов В. Н., Померанчук И. Я., Тер-Мартirosян К. А. // ЯФ. 1965. Т. 2. С. 361; Phys. Lett. 1964. Vol. 9. P. 269.
95. Gribov V. N., Pomernanchuk I. Ya., Ter-Martirosyan K. A. // Phys. Rev. 1965. Vol. 139. P. 184.
96. Грибов В. Н. // ЖЭТФ. 1967. Т. 53. С. 652.
97. Аллаби Дж. В., Бушин Ю. Б., Горин Ю. Н. и др. // Там же. 1969. Т. 10. С. 10.

98. Donnachie A. // Proc. XXIII Intern. Conf. High-Energy Phys. Berkeley, 1986.
99. Albrow M., Donnachie A., Geist W. et al. Probing the Pomeron // CERN Courier. 1986. Vol. 26, N 7. P. 7.
100. Кайдалов А. Б., Тер-Мартirosян К. А. // ЯФ. 1984. Т. 39. С. 1545; Т. 40. С. 211.
101. Иоффе Б. Л., Кобзарев И. Ю., Померанчук И. Я. // ЖЭТФ. 1965. Т. 48. С. 375.
102. Долгов А. Д., Окунь Л. Б., Померанчук И. Я., Соловьев В. В. // ЯФ. 1965. Т. 1. С. 730; Phys. Lett. 1965. Vol. 15. P. 84.
103. Волков Д. В. // Письма в ЖЭТФ. 1965. Т. 1. С. 129.
104. Кuo T. K., Yao T. // Phys. Rev. Lett. 1965. Vol. 14. P. 79.
105. Particle data group. Review of particle properties // Phys. Lett. B. 1986. Vol. 170. P. 276, 316, 331.
106. De Rujula A., Georgi H., Glashow S. L. // Phys. Rev. D.— Part. and Fields. 1975. Vol. 12. P. 147.
107. Померанчук И. Я. // Собр. науч. тр.: в 3-х т. М.: Наука, 1972. Т. 3. С. 398.
108. Померанчук И. Я. // ЯФ. 1970. Т. 11. С. 852.
109. Грибов В. Н., Иоффе Б. Л., Померанчук И. Я. // Там же. 1967. Т. 6. С. 587.
110. Кобзарев И. Ю., Окунь Л. Б., Померанчук И. Я. // Там же. 1966. Т. 3. С. 1154.
111. Ансельм А. А., Дятлов И. Т. // Там же. 1967. Т. 6. С. 591, 603.
112. Долгов А. Д., Захаров В. И., Окунь Л. Б. // Там же. 1971. Т. 14. С. 1044, 1247; 1972. Т. 15. С. 808.
113. Dolgov A. D., Okun L. B., Zakharov V. I. // Phys. Lett. B. 1971. Vol. 37. P. 298; Nucl. Phys. B. 1972. Vol. 37. P. 493.
114. Appelquist T., Bjorken J. D. // Phys. Rev. D — Part. and Fields. 1971. Vol. 4. P. 3522.
115. Dolgov A. D., Gribov V. N., Okun L. B., Zakharov V. I. // Nucl. Phys. B. 1973. Vol. 59. P. 611.
116. Долгов А. Д., Захаров В. И., Окунь Л. Б. // Проблемы ядерной физики элементарных частиц: Сб. ст., посвящ. памяти А. И. Алиханова. М.: Наука, 1975. С. 124.
117. Bjorken J. D. // Phys. Rev. 1966. Vol. 148. P. 1467.
118. Particle data group // Phys. Lett. B. 1986. Vol. 170. P. 83.
119. Николаев Н. Н., Окунь Л. Б. // ЯФ. 1968. Т. 8. С. 99.
120. Блинныеков С. И., Хлопов М. Ю. // Там же. 1982. Т. 36. С. 809; Астрон. журн. 1983. Т. 60. С. 632; Solar Phys. 1983. Vol. 82. P. 383.
121. Schwarz A. S. // Nucl. Phys. B. 1982. Vol. 208. P. 141.
122. Schwarz A. S., Tyurkin Yu. S. // Ibid. Vol. 209. P. 427.
123. Okun L. B. Prepr. ITP-149. Moscow, 1983.
124. Bernard C., De Rujula A., Lautrup B. Prepr. CERN TH. 3694. 1983.
125. De Rujula A., Glashow S. L. // Nature. 1984. Vol. 312. P. 734.
126. Kolb E. W., Seckel D., Turner M. S. // Ibid. 1985. Vol. 314. P. 415.
127. Glashow S. L. // Phys. Lett. B. 1986. Vol. 167. P. 35.
128. Bahcall J. N. // Astrophys. J. 1984. Vol. 286. P. 169.

Б. Л. Иоффе

РАБОТЫ И. Я. ПОМЕРАНЧУКА  
ПО КВАНТОВОЙ ТЕОРИИ ПОЛЯ

Квантовая теория поля была главным интересом всей жизни Исаака Яковлевича — с занятий ею он начал свою работу в науке и этим же закончилась его жизнь.

Первые работы Исаака Яковлевича, выполненные им в 1936 г. совместно с А. И. Ахиезером под руководством Л. Д. Ландау, были посвящены вычислению сечений рассеяния света на свете и когерентного рассеяния  $\gamma$ -квантов ядрами [1, 2]. Даже сейчас, с помощью развитой фейнмановской техники, нахождение этих сечений представляет собой совсем не простую задачу. Тем более сложным выглядело решение этой задачи в 30-е годы, когда все вычисления делались нековариантно.

Из полученных в этих работах результатов наибольший интерес представляют выражения (см. [2]) для дифференциального сечения когерентного рассеяния  $\gamma$ -квантов ядрами при больших энергиях  $\omega \gg m$  и малых углах рассеяния  $\theta \ll 1$ ,  $\omega\theta \gg m$ , и полного сечения

$$\sigma = (aZ^4\alpha^6/\omega^2) \ln(\omega/m). \quad (1)$$

Здесь  $\alpha$  — постоянная тонкой структуры,  $\alpha \approx 1/137$ ;  $Z$  — атомный номер ядра;  $m$  — масса электрона;  $a$  — не определенный в работе [2] численный фактор. На основе современной техники эти сечения были вычислены только в 1952 г. Бете и Рёрлихом [3]. При этом численный фактор  $a$  оказался равным  $98/(27\pi^3)$ .

После этих работ Исаак Яковлевич надолго оставил квантовую теорию поля и вернулся к ней лишь через 10 лет в работе о предельном  $\lambda$ -процессе [4]. Предельный  $\lambda$ -процесс был предложен Вентцелем и Дираком. Цель его состояла в устранении возникающих в теории поля расходимостей, и достигалась эта цель путем видоизменений коммутационных соотношений за счет введения параметра  $\lambda$ , который в конце вычислений должен был стремиться к нулю. Это направление оказалось тупиковым и в дальнейшем не развивалось. (С современной точки зрения причина неудачи состояла в том, что при таком подходе приходилось нарушать соотношение унитарности. Эта же причина, по сути дела, привела к полученному в работе Исаака Яковлевича [4] выводу о том, что предельный  $\lambda$ -процесс дает неоднозначные результаты для собственной энергии частиц.)

В это время, в конце 40-х годов, несмотря на большую занятость другими проблемами, Исаак Яковлевич систематически изучает квантовую теорию поля и скоро становится одним из крупнейших в нашей стране специалистов в этой области. Зимой

1948/49 г. Исаак Яковлевич читает в Механическом институте (ныне МИФИ) факультативный курс по квантовой теории, курс, уникальный по тем временам. В него были включены вопросы, которые нельзя было найти нигде, кроме оригинальной литературы, причем зачастую в изложении Исаака Яковлевича они были представлены намного более ясно (а главное, физично), чем в оригинале.

Когда появились статьи Швингера, Фейнмана и Дайсона по теории перенормировок, Исаак Яковлевич одним из первых в Союзе понял, что эти работы знаменуют начало новой эры в квантовой теории поля. Он изучает эти статьи сам и с большим одобрением относится к тому, что в этом направлении начинают работать его сотрудники. В октябре 1952 г. Исаак Яковлевич организует теоретический семинар по квантовой теории поля. В первую очередь на этом семинаре были рассказаны первые статьи Дайсона, Фейнмана, Швингера и Салама по квантовой электродинамике и теории перенормировок, затем статьи Швингера по функциональной формулировке уравнений для функции Грина в квантовой теории поля и работа Фейнмана «Операторное исчисление», где квантовая электродинамика была сформулирована на языке континуального интеграла. Изложение каждой из статей продолжалось несколько семинаров, причем участники семинара, и в первую очередь сам Исаак Яковлевич, стремились не только понять идею работы, но и разобраться во всех ее деталях и овладеть ее методом.

В 1950—1951 гг., после того как в результате работ Фейнмана, Швингера и Дайсона был построен последовательный метод проведения перенормировок массы и заряда и с помощью этого метода в квантовой электродинамике вычислены радиационные поправки к основным физическим эффектам, центр тяжести теоретических исследований сместился в сторону мезонных теорий. Это было связано, конечно, и с тем, что в то время во все большем объеме стали поступать экспериментальные данные о свойствах  $\pi$ -мезонов и об их взаимодействии с нуклонами. Исааком Яковлевичем и его сотрудниками было сделано несколько работ по анализу взаимодействия  $\pi$ -мезонов с нуклонами. Хотя эти работы не относятся к квантовой теории поля, о них нужно сказать здесь несколько слов, поскольку они в заметной степени определили направление дальнейших исследований Исаака Яковлевича по квантовой теории поля.

В работах [5, 6] был проведен систематический количественный анализ процессов захвата  $\pi$ -мезонов протонами и дейтронами и при сравнении с экспериментом [7] получен вывод о том, что четности  $\pi^\pm$ - и  $\pi^0$ -мезонов одинаковы и отрицательны<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Изотопическая инвариантность  $\pi$ -нуклонного взаимодействия тогда не была общепринята, и тот факт, что  $\pi^+$ -,  $\pi^-$ - и  $\pi^0$ -мезоны принадлежат к од-

Утверждение о том, что четность  $\pi^-$ -мезона отрицательна, непосредственно следует из реакции  $\pi^- + d \rightarrow n + n$ , что и было отмечено в экспериментальной работе [7], где эта реакция была впервые наблюдена. (Авторы работы [7] предполагали, что спин  $\pi^-$ -мезона равен нулю; это несколько позже было доказано прямым экспериментом [8].) Авторы работы [7] заметили также, что факт отсутствия на опыте реакции  $\pi^- + d \rightarrow p + n + \pi^0$  в сопоставлении с тем, что реакция  $\pi^- + p \rightarrow n + \pi^0$  идет с большой вероятностью, может быть качественно объяснен, если принять, что четность  $\pi^0$ -мезона также отрицательна. Для окончательного заключения по этому вопросу был, однако, необходим количественный анализ, который был сделан в работах [5, 6], а также (практически одновременно) в работах Маршака и Тамора [9, 10]. (Сравнивая работы [5] и [9, 10], следует заметить, что в работе [9] содержались лишь качественные оценки, а в [10], сделанной так же, как и [5], на базе мезонной теории, в отличие от [5] были рассмотрены не все возможные варианты взаимодействия  $\pi$ -мезонов с нуклонами.) Проведенное Исааком Яковлевичем исследование этой проблемы [6] выгодно отличалось от работ [5, 9, 10] в том отношении, что последние были сделаны на основе мезонной теории в первом приближении теории возмущений, тогда как работы Исаака Яковлевича основывались на феноменологическом подходе. Впрочем, с современной точки зрения работы [5, 9, 10] также являются правильными, поскольку малы длины рассеяния  $\pi$ -мезонов на нуклонах в  $s$ -волне, которые определяли изучавшиеся в [5, 9, 10] эффекты, и, следовательно, в этой задаче методы теории возмущений применимы.

При рассмотрении различных эффектов на основе мезонных теорий в то время, как правило, предполагалось, что константа пион-нуклонного взаимодействия мала, и использовались методы теории возмущений. Некоторым оправданием для этого служило то, что первые опыты, из которых можно было определить константу  $\pi N$ -взаимодействия (эксперименты по фоторождению пионов), удавалось описать с помощью малой константы псевдовекторного  $\pi N$ -взаимодействия [11, 12]. (Следует отметить, что в работах [11, 12] также был получен вывод об отрицательной четности  $\pi^-$ -мезонов.) Поэтому была надежда, что в той или иной форме может осуществляться мезонная теория с малой константой связи. С появлением более широкого круга экспериментальных данных, однако, выяснилось [13], что совокупность экспериментов никак

нуму изотопическому мультиплету, был отнюдь не ясен. Так, например, в то время, когда заряженные  $\pi$ -мезоны были уже открыты, а  $\pi^0$  еще нет (1949–1950-е гг.), Л. Д. Ландау категорически отрицал возможность его появления, говоря: «Бог не допустит существования дифтона». Я хотел бы отметить, что работа [5] была сделана по предложению Исаака Яковлевича. Им же была высказана идея вычисления полного сечения захвата  $\pi^-$  в дейтроне с помощью использования теоремы полноты.

нельзя описать на базе мезонной теории с малой константой взаимодействия.

Таким образом, встал вопрос о том, как работать с мезонной теорией, не прибегая к теории возмущений, и в первую очередь — как записать точные уравнения теории и провести в них перенормировку массы и заряда. В работе [14] была предложена точная система ковариантных уравнений мезонной теории в виде бесконечной совокупности «зацепляющихся» уравнений для функций Грина. Уравнения, однако, были записаны в форме, малоудобной для проведения перенормировки массы и заряда. В работе А. Д. Галанина, Б. Л. Иоффе и И. Я. Померанчука [15] была построена другая, более удобная для проведения перенормировок бесконечная система ковариантных уравнений и в ней осуществлена перенормировка массы и заряда. В работе было показано, что при решении системы уравнений методом итераций получают результаты теории возмущений с учетом перенормировок. Однако попытка обрыва системы перенормированных уравнений на  $k$ -м члене с последующим решением конечного числа уравнений не приводила к успеху: в конечной системе оставались расходимости, которые в итерационной процедуре решения компенсировались членами с  $n > k$ , т. е. оборванная система не была перенормированной.

По этой причине полученная система уравнений не оправдала ожиданий Исаака Яковлевича, который надеялся решить задачу сильного взаимодействия  $\pi$ -мезонов с нуклонами путем построения точной системы перенормированных зацепляющихся уравнений и последовательного (может быть, численного) приближенного ее решения, переходя от системы  $n$  уравнений к  $n + 1$ .

Нужны были новые физические идеи о том, как найти такие системы уравнений квантовой теории поля, чтобы при построении в них метода последовательных приближений каждое приближение было бы внутренне замкнутым и перенормируемым. Такая идея была выдвинута в известном цикле работ Л. Д. Ландау, А. А. Абрикосова и И. М. Халатникова [16], появившемся в начале 1954 г.<sup>2</sup> В этих работах было впервые введено представление об эффективной, зависящей от расстояния константе связи (эффективном заряде) в квантовой электродинамике (КЭД) и указано, как нужно находить нулевое приближение в КЭД. Ход рассуждений был следующим. КЭД имеет смысл только после размазывания взаимодействия, т. е. введения параметра обрезания  $\Lambda$ . При этом затравочный заряд  $e_1$  есть функция  $\Lambda$ :  $e_1^2 = e_1^2(\Lambda^2)$ . Для того чтобы вычислить нулевое приближение

<sup>2</sup> Почти одновременно (на 3 месяца позже) близкие идеи были выдвинуты в статье М. Гелл-Манна и Ф. Лоу [17]. В Москве работа [17] стала известна лишь в конце 1954 г., так что И. Я. Померанчук в своих дальнейших исследованиях этой проблемы основывался на работах Л. Д. Ландау, А. А. Абрикосова и И. М. Халатникова [16].

в КЭД, верное на малых расстояниях (или при больших импульсах  $k$  и  $p$  виртуальных фотона и электрона,  $|p^2| \sim |k^2| \gg m^2$ ,  $p^2 < 0$ ,  $k^2 < 0$ ), и, в частности, найти такую зависимость  $e_1^2(\Lambda^2)$ , которая давала бы правильное значение физического заряда электрона, нужно просуммировать в ряду теории возмущений все члены, в которых малость  $e_1^2$  компенсируется большим  $\ln(\Lambda^2/p^2)$ . Тем самым система уравнений для функции Грина в КЭД фиксиро-

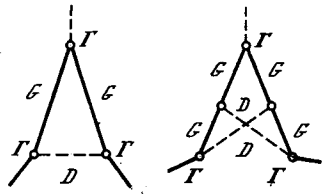


Рис. 1. Диаграмма, описывающая второй член в правой части уравнения (2) для вершинной функции

Рис. 2. Простейшая перекрестная диаграмма для вершинной функции

валась однозначно: это были уравнения Швингера—Дайсона для функций Грина фотона и электрона, в которых вершинная функция  $\Gamma$  определялась так называемым трехгаммным уравнением, символически:

$$\Gamma = 1 + \Gamma G \Gamma G \Gamma D. \quad (2)$$

На диаграммном языке уравнение (2) описывалось диаграммой рис. 1, где сплошным и пунктирной линиям соответствовали точные пропагаторы электрона  $G$  и фотона  $D$ , а в вершинах стояли точные вершинные функции  $\Gamma$ . Перекрестные диаграммы для вершинной функции (например, диаграмма рис. 2) отбрасывались, поскольку в них степень  $e_1^2$  превосходила степень  $\ln(\Lambda^2/p^2)$ . При этом все рассмотрение было законным, если  $e_1^2(\Lambda^2) \ll 1$ ,  $\ln(\Lambda^2/p^2) \gg 1$ . Решая полученную систему уравнений, Ландау, Абрикосов и Халатников нашли выражение для функции Грина фотона

$$[k^2 D(k^2)]_{\text{непер}} = [1 + (e_1^2/3\pi) \ln(\Lambda^2/-k^2)]^{-1}, \quad (3a)$$

$$[k^2 D(k^2)]_{\text{пер}} = [1 - (e^2/3\pi) \ln(-k^2/m^2)]^{-1} \quad (3б)$$

и связь между затравочным и физическим ( $e^2 = 1/137$ ) зарядами электрона

$$e_1^2(\Lambda^2) = e^2/[1 - (e^2/3\pi) \ln(\Lambda^2/m^2)], \quad (4)$$

где  $m$  — масса электрона. (В случае  $\nu$  заряженных фермионов в знаменателе  $e^2$  заменяется на  $\nu e^2$ .) Из (4) видно, что  $e_1^2(\Lambda^2)$  обращается в бесконечность при  $(e^2/3\pi) \ln(\Lambda^2/m^2) = 1$ , так что метод рассмотрения пригоден лишь при  $1 - (e^2/3\pi) \ln(\Lambda^2/m^2) > e^2$  и в нем нельзя переходить к пределу  $\Lambda \rightarrow \infty$ .

То, что область применимости метода ограничена условием  $\ln(-k^2/m^2) < 3\pi/e^2$ , можно увидеть также, сравнивая вклад от-

брошенной диаграммы рис. 2 с вкладом диаграммы рис. 1. Их отношение порядка

$$e^2/[1 - (e^2/3\pi) \ln(-k^2/m^2)], \quad (5)$$

т. е. вблизи полюса в функции Грина фотона (3б) вкладом перекрестных диаграмм уже нельзя пренебрегать.

После работы Ландау, Абрикосова и Халатникова сразу возникло несколько вопросов: 1) указывает ли полученный результат только на неприменимость использованного авторами подхода при  $\ln(-k^2/m^2) > 3\pi/e^2$ , или же он означает куда большее — внутреннюю противоречивость КЭД; 2) возникают ли подобные результаты в мезонных теориях. Исаак Яковлевич занялся обеими этими проблемами. При этом ввиду важности результатов он хотел также получить их и другим методом — не с помощью рассмотрения неперенормированных функций Грина с проведением перенормировки в конечных результатах, как это делалось в работах Ландау, Абрикосова и Халатникова, а путем решения уравнений для перенормированных функций Грина типа предложенных в [15]. Эта последняя программа была реализована в работе [18] для случая псевдоскалярной мезонной теории. Для перенормированных функций Грина мезона и нуклона использовались уравнения, найденные в [15], а для вершинной функции в соответствии с основной идеей работ Ландау, Абрикосова и Халатникова было записано перенормированное трехгаммное уравнение. Полученная система уравнений была полностью перенормированной, т. е. уже не имела недостатка, присущего оборванной системе уравнений работы [15].

В результате решения этой системы уравнений были найдены следующие выражения для асимптотик функций Грина нуклона  $G(p)$ , мезона  $D(p^2)$  и вершинной функции  $\Gamma_5(p)$  в симметричной теории взаимодействия нуклонов с изотопическим триплетом пионов:

$$\begin{aligned} pG(p) &= (1 - 5\lambda\xi)^{-3/10}, & p^2D(p^2) &= (1 - 5\lambda\xi)^{-4/5}, \\ \gamma_5\Gamma_5(p) &= (1 - 5\lambda\xi)^{1/5}, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $\lambda = g^2/4\pi$ ,  $\xi = \ln(-p^2/m^2)$ . (В теории, где есть только нейтральные пионы, показатели заменяются на  $-1/10$ ,  $-2/5$ ,  $-1/5$  соответственно.) Связь между затравочной, зависящей от обрезания константой взаимодействия  $g_1^2(\Lambda^2)$  и физической константой  $g^2$  дается соотношением типа (4):

$$g_1^2(\Lambda^2) = g^2/[1 - 5(g^2/4\pi) \ln(\Lambda^2/m^2)]. \quad (7)$$

Выражения (6) имеют полюс при  $\xi = 1/5\lambda$ , и вблизи полюса вклад отброшенной диаграммы рис. 2 был порядка вклада диаграммы рис. 1. Таким образом, ситуация оказалась аналогичной той, которая имела место в КЭД. (Этот же вывод был получен из рассмо-

трения перенормированных уравнений в работе [19].) Рассмотрение других перенормируемых мезонных теорий привело к сходным результатам.

Физическая природа связи (4) между затравочным и перенормированным зарядами в КЭД ясна: соотношение (4) выражает тот факт, что в силу поляризации вакуума, т. е. экранирования пробного заряда в вакууме зарядами противоположного знака, заряд, наблюдаемый на малых расстояниях, должен быть больше заряда на больших расстояниях. Встает вопрос, можно ли так выбрать  $e_1^2(\Lambda^2)$ , чтобы на больших расстояниях получить наблюдаемую величину физического заряда электрона?

Развитый в [16] метод позволял, стартуя с больших расстояний, доходить до значений  $e_1^2(\Lambda^2) \sim 1$ . Чтобы понять, что это означает, выразим с помощью (4)  $e^2$  через  $e_1^2(\Lambda^2)$ :

$$e^2 = e_1^2(\Lambda^2) / [1 + (e_1^2(\Lambda^2) / 3\pi) \ln(\Lambda^2 / m^2)]. \quad (8)$$

При  $e_1^2(\Lambda^2) \sim 1$   $(e_1^2 / 3\pi) \ln(\Lambda^2 / m^2) \gg 1$  в области, где решение Ландау, Абрикосова и Халатникова еще законно, так что единицей в знаменателе в (8) можно пренебречь. Но тогда

$$e^2 = 3\pi / \ln(\Lambda^2 / m^2) \quad (9)$$

не зависит от  $e_1^2$  и стремится к нулю при  $\Lambda \rightarrow \infty$ . Пренебрежение единицей в знаменателе в (8) соответствует пренебрежению в лагранжиане системы электронов и фотонов действием свободного электромагнитного поля, так как единица в знаменателе в (8) возникала за счет члена  $\sim k^2$  в уравнении для функции Грина фотона

$$[k^2 + P(k^2)]D(k^2) = 1. \quad (10)$$

Но если можно пренебречь действием свободного электромагнитного поля при  $e_1^2(\Lambda^2) \leq 1$ , то следует ожидать, что это можно будет сделать еще с большим основанием при дальнейшем увеличении  $e_1^2(\Lambda^2)$ . Тем самым соотношение (9) оказывается верным всегда при больших  $\Lambda$  и предельный переход  $\Lambda \rightarrow \infty$  возможен. Отсюда возникает полученный Л. Д. Ландау и И. Я. Померанчуком [20] и Е. С. Фрадкиным [21] вывод о том, что из квантовой электродинамики следует обращение в нуль физического заряда электрона, т. е. что КЭД внутренне противоречива на малых расстояниях (или при больших передаваемых импульсах). При обсуждении физических следствий полученного результата Ландау и Померанчук [20] отмечали, что поскольку энергии, при которых наступает крах КЭД, чрезвычайно велики,

$$\Lambda \approx m \exp(3\pi / 2ve^2), \quad (11a)$$

где  $v$  — число заряженных фермионов, то другие неэлектромагнитные взаимодействия (в частности, на что обращал внимание

Я. Б. Зельдович, слабые взаимодействия), включившись ранее, могут существенно изменить ситуацию. Л. Д. Ландау и И. Я. Померанчуку представлялась весьма интересной идея о том, что кризис КЭД наступит при тех энергиях (или на тех расстояниях), когда гравитационное взаимодействие станет порядка электромагнитного, т. е.  $\Lambda \sim M_{Pl}/e$ , где  $M_{Pl} \approx 10^{19}$  Гэв — масса Планка. Согласно (11a), это могло осуществиться при  $v \approx 12$ .

Как известно, сейчас в моделях теорий, объединяющих все взаимодействия включая гравитационные, масштаб энергий, при которых происходит это объединение, находят примерно из таких же соображений.

Хотя приведенные выше аргументы в пользу «нуля заряда» в КЭД представлялись (и представляются) весьма вескими, их, строго говоря, нельзя было считать формальным доказательством. Кроме того, эти рассуждения нельзя было перенести на мезонную теорию, поскольку в ней перенормировка заряда возникает за счет действия трех факторов  $Z_1^2 Z_2^{-2} Z_3$ , а не только одного  $Z_3$ , соответствующего поляризации вакуума. С другой стороны, как было отмечено в [20], если в КЭД проблема «нуль-заряда» хотя и носила принципиальный характер, но практического значения не имела (так как отступления от обычной теории начинались при чрезвычайно больших, недостижимых на опыте энергиях), в мезонной теории из-за большой величины  $g^2/4\pi$  возникновение «нуль-зарядной» ситуации должно было бы привести к ломке старых и введению новых физических представлений уже на расстояниях  $10^{-13}$  см, т. е. при передаваемых импульсах порядка нескольких сот МэВ. Поэтому было чрезвычайно важно разработать такой метод рассмотрения проблемы, который дал бы формальное доказательство нуля заряда в КЭД и который можно было бы обобщить на мезонные теории.

Эта программа была осуществлена И. Я. Померанчуком в работах [22—26].

Основная идея этих работ состояла во введении во взаимодействие двух параметрических разных радиусов обрезания при интегрировании по виртуальным бозонам и фермионам (фотонам и электронам в случае КЭД). До работ [22—26] два разных радиуса обрезания в КЭД рассматривались А. А. Абрикосовым и И. М. Халатниковым [27], которые показали, что если обозначить предел обрезания в импульсном пространстве по виртуальным электронам через  $\Lambda_p$ , а по виртуальным фотонам — через  $\Lambda_k$ , то  $\Lambda_p \geq \Lambda_k$ . (При выполнении обратного неравенства результаты, полученные с двухпредельным обрезанием, такие же, как и с однопредельным.) В случае двухпредельного обрезания имеют место то же выражение функции Грина фотона (3) и та же связь между затравочным и перенормированным зарядом (4), причем под  $\Lambda$  в (3) и (4) следует понимать  $\Lambda_p$  (если импульс фотона  $k^2 < \Lambda_k^2$ , если же  $k^2 > \Lambda_k^2$ , то  $k^2 D(k^2) = 1$ ). Исаак Яковлевич по-

казал [22], что при специальной форме двухпредельного обрезания, когда  $\Lambda_p^2$  и  $\Lambda_k^2$  параметрически различны и

$$\ln(\Lambda_p^2/\Lambda_k^2) \gg 1, \quad (11)$$

соотношения (3), (4) остаются верными при любых, а не только при малых  $e_1^2$ . Доказательство основывалось на оценке вклада перекрестных диаграмм в вершинную функцию по сравнению с вкладом основной диаграммы рис. 1. Действительно, сравним, например, вклад диаграмм рис. 2 и 1. В решении Ландау, Абрикосова и Халатникова (в поперечной калибровке)  $G(p) = p^{-2}$  и  $\Gamma_\mu = \gamma_\mu$ . Подставляя эти выражения и пропагатор фотона (3) в формулу, описывающую диаграмму рис. 2, и учитывая, что интегрирование по фотонам ограничено пределом  $\Lambda_k^2$ , легко получить, что в наиболее опасной области  $e_1^2/3\pi \sim 1$

$$\Gamma^{(2)} \sim \frac{e_1^2}{1 + (e_1^2/3\pi) \ln(\Lambda_p^2/\Lambda_k^2)} \ll \frac{3\pi}{\ln(\Lambda_p^2/\Lambda_k^2)} \ll 1, \quad (12)$$

т. е. при выполнении (11)  $\Gamma^{(2)}$  можно пренебречь даже при больших  $e_1^2$ . Аналогичным образом было доказано, что малы вклады любых перекрестных диаграмм, а также диаграмм, содержащих рассеяние света на свете. Тем самым был доказан нуль заряда в КЭД.

В работах [23—26] такая же двухпредельная техника была применена к рассмотрению псевдоскалярной мезонной теории и был получен аналогичный вывод об обращении в нуль перенормированной константы связи  $g^2$ .

Первый способ аргументации состоял в следующем [23]. При условии

$$(g_1^2/\pi) \ln(\Lambda_p^2/\Lambda_k^2) \gg 1 \quad (13)$$

найденные в [27] с помощью двухпредельной техники выражения для функции Грина нуклона  $pG(p)$  и вершинной функции  $\Gamma(p)$  оказываются не зависящими от  $g_1^2$ , а функция Грина мезона  $k^2 D(k^2)$  обратно пропорциональна  $g_1^2$ . Такая зависимость от  $g_1^2$  возникает, если в лагранжиане пренебречь действием свободного мезонного поля. Если вклад свободного мезонного поля мал при малых  $g_1^2$ , то тем более им можно пренебречь при больших  $g_1^2$ . Отсюда следует, что использование двухпредельного обрезания позволяет перенести аргументы, приведенные Ландау и Померанчуком [20] в пользу нуля заряда в КЭД, на мезонную теорию. Действительно, возникающая в двухпредельной технике связь между  $g_1^2$  и  $g^2$

$$g^2 = g_1^2 / \left[ 1 + \frac{g_1^2}{4\pi} \left( 4 \ln \frac{\Lambda_p^2}{m^2} + \ln \frac{\Lambda_k^2}{m^2} \right) \right] \quad (14)$$

верна при любых  $g_1^2$ , так что в (14) можно перейти к пределу  $\Lambda_p^2, \Lambda_k^2 \rightarrow \infty$  и получить вывод об обращении  $g^2$  в нуль.

Другой способ доказательства [24—26] состоял в непосредственном анализе вклада в вершинную функцию перекрестных диаграмм типа рис. 2 и диаграмм, включающих рассеяние мезона мезоном (простейшая из них представлена на рис. 3). Было показано, что при выполнении условия (13) вклад этих неучтенных членов всегда мал по сравнению с учтенными членами как при малых, так и при больших  $g_1^2$ . Тем самым прямым образом было

Рис. 3. Простейшая диаграмма, описывающая вклад рассеяния мезона мезоном в вершинную функцию

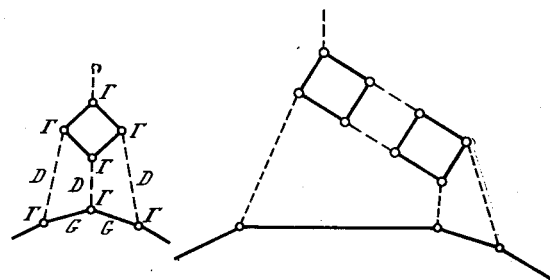


Рис. 4. Диаграмма вершинной функции, учитывающая двойное рассеяние мезона мезоном

доказано, что формула (14) верна всегда и в ней можно переходить к пределу  $\Lambda_p^2, \Lambda_k^2 \rightarrow \infty$ .

В этом доказательстве был, однако, один пункт, который вызывал беспокойство у Исаака Яковлевича. Вклад простейшей диаграммы с рассеянием мезона мезоном рис. 3 был мал — порядка  $1/\ln(\Lambda_p^2/\Lambda_k^2)$  — и так же был мал — такого же порядка — вклад в вершинную функцию более сложных диаграмм с рассеянием мезона мезоном. Однако в отличие от перекрестных диаграмм, где учет более сложных диаграмм давал сходящийся ряд по  $1/\ln(\Lambda_p^2/\Lambda_k^2)$ , в случае рассеяния мезона мезоном более сложная диаграмма рис. 4 давала вклад того же порядка, что диаграмма рис. 3, и вклады того же порядка возникали от еще более сложных диаграмм. По мнению Исаака Яковлевича, здесь могла крыться опасность для доказательства: если бы при суммировании всех диаграмм с рассеянием мезона мезоном результат оказался в  $\ln(\Lambda_p^2/\Lambda_k^2)$  большим вклада диаграммы рис. 3, то доказательство могло стать неверным.

Трудная задача суммирования всех существенных диаграмм с рассеянием мезона мезоном (проблема «паркета», как называл ее Л. Д. Ландау) была решена И. Т. Дятловым, В. В. Судаковым и К. А. Тер-Мартirosяном [28—30], и было показано [31], что при этом никакой величины типа  $\ln(\Lambda_p^2/\Lambda_k^2)$  не возникает. Отсюда в статье [31], подводящей итог исследованию всей проблемы, был сделан окончательный вывод об обращении в нуль физического.

заряда в мезонных теориях, т. е. об их внутренней противоречивости.

Основываясь на всех этих результатах, Л. Д. Ландау и И. Я. Померанчук пришли к выводу о полной несостоятельности всех квантовых теорий поля с локальными лагранжианами, а так как иных не существовало, то вообще всего лагранжева или гамильтонова подхода в квантовой теории поля. При этом, поскольку в мезонных теориях, характеризуемых большой константой связи, противоречия наступали при  $\Lambda \sim 500$  МэВ, ожидалось, что при передаваемых импульсах такого порядка, т. е. на расстояниях  $\sim 10^{-13}$  см, возникнут наблюдаемые эффекты. Ландау и Померанчук ожидали появления нового универсального механизма (новой универсальной длины), который проявился бы как в сильных, так и в электромагнитных взаимодействиях. Поэтому они предлагали искать отклонения от КЭД в электромагнитных процессах с передаваемыми импульсами  $\sim 1$  ГэВ. Эта точка зрения Л. Д. Ландау и И. Я. Померанчука стимулировала появление работы В. Б. Берестецкого и др. [32], где было показано, что величина аномального магнитного момента мюона весьма чувствительна к нарушениям КЭД на малых расстояниях.

Л. Д. Ландау считал [33], что единственно возможным описанием процессов на малых расстояниях должна быть теория  $S$ -матрицы, основанной на свойствах аналитичности и унитарности. И. Я. Померанчук придерживался близкой точки зрения.

Дальнейшие теоретические исследования, проводившиеся в 50-х и начале 60-х годов, внесли мало нового в проблему нуля заряда. Рассматривались различные модели, вводились разные обрезания. При этом либо подтверждался нуль заряда (например, в модели Ли), либо результат был неопределенным, так что выводы И. Я. Померанчука оставались непоколебленными.

Существенным моментом в дальнейшем развитии теории явилась разработка методов ренормализационной группы [34, 17, 35], в результате которой исследование проблемы свелось к изучению свойств функций Гелл-Манна—Лоу.

Мне кажется, что то ощущение, которое возникло у теоретиков, работавших в квантовой теории поля (особенно в области применения ее к процессам сильного взаимодействия), было ощущение тупика. Поэтому со второй половины 50-х годов большая часть их перешла на другие направления: либо на более формальные математические, такие, как аксиоматическая квантовая теория поля, либо на различные феноменологические подходы. Сам Исаак Яковлевич занялся теорией сильных взаимодействий при высоких энергиях на основе феноменологического и дисперсионного подходов, затем теорией периферийных процессов и описанием процессов при высоких энергиях на базе реджевской теории.

По моему мнению, именно эта область физики элементарных

частиц, где требовалось сочетание тонкой физической интуиции и формального аппарата теории, более всего соответствовала таланту Исаака Яковлевича, сильной стороной которого всегда была физическая интуиция. (Я думаю, что в этом отношении он, может быть, даже превосходил своего учителя.) В этой области физики элементарных частиц Исаак Яковлевич получил ряд выдающихся результатов: им была доказана знаменитая «теорема Померанчука», установлена (совместно с В. Н. Грибовым) факторизация вычетов в теории полюсов Редже и т. д. (подробнее об этом см. статью Л. Б. Окуня).

Рассматривая проблему нуля заряда с точки зрения сегодняшнего дня, мы можем сказать: да, Померанчук был прав, а все те, кто его критиковал с формальных позиций, неправы — все квантовые теории поля с юкавским взаимодействием обладают свойством нуля заряда. Но квантовая теория поля на этом не закончила свое существование: были открыты неабелевы калибровочные поля, непротиворечивые — обладающие свойством асимптотической свободы — на малых расстояниях, т. е. для которых нет свойства нуля заряда. И сейчас при построении моделей «великого объединения» приходится иметь в виду проблему нуля заряда: теории, в которых нефизический полюс возникает при энергиях, существенно меньших  $M_{Pl}$ , как правило, не считаются подходящими кандидатами в теории «великого объединения».

Экспериментальные поиски отклонений от КЭД на малых расстояниях дали отрицательный результат. В частности, были выполнены очень точные измерения аномального магнитного момента мюона, результаты которых оказались в прекрасном согласии с предсказаниями КЭД. Отсюда стало ясно, что изменения в теории, которых следовало ожидать, не носят универсального характера: КЭД не портится вплоть до весьма малых расстояний. Тем самым возникла возможность использования электромагнитных процессов в качестве пробника для изучения свойств адронов. Именно с этой возможностью была связана последняя работа Исаака Яковлевича по квантовой теории поля, которой суджено было стать вообще его последней работой.

Новый всплеск интереса к квантовой теории поля возник у Исаака Яковлевича в 1966 г., когда он уже был тяжело болен. Это было связано с успехами метода алгебры токов. Ему нравилось то, что в методе алгебры токов не используются конкретные виды лагранжианов взаимодействия, и он допускал, что при таком подходе недостатки, присущие рассматривавшимся ранее моделям квантовой теории поля, могут не сказаться. Последняя работа Исаака Яковлевича, выполненная им совместно с В. Н. Грибовым и Б. Л. Иоффе [36], была посвящена вычислению асимптотического поведения полного сечения аннигиляции  $e^+e^-$  в адроны при высоких энергиях. До этого попытка найти такую асимпто-

тику была предпринята в работе Бьёркена [37]. Бьёркен высказал утверждение, что при больших энергиях  $\sigma$  ( $e^+e^- \rightarrow$  адроны) должно вести себя как полное сечение  $e^+e^-$ -аннигиляции в пару невзаимодействующих частиц (например,  $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ ), т. е. быть пропорциональным  $1/E^2$ , где  $E$  — энергии  $e^+$  и  $e^-$  в системе центра инерции. По тем временам такое утверждение было новым и неожиданным, поскольку считалось, что сечения рождения адронов будут сильно подавлены быстро убывающими с ростом энергии форм-факторами. В работе Бьёркена [37] не было, однако, серьезного доказательства сделанного утверждения, поскольку все рассмотрение фактически проводилось без учета сильного взаимодействия адронов.

В работе [36] утверждение, что  $\sigma$  ( $e^+e^- \rightarrow$  адроны)  $\sim 1/E^2$ , было доказано, используя только свойства коммутаторов электромагнитных токов и спектральных функций представления Челлена—Лемана (в предположении, что последние существуют). Ход рассуждений был следующим. Полное сечение  $e^+e^-$ -аннигиляции в адроны можно записать в виде

$$\sigma(E) = (8\pi^2 e^2/q^2) \rho(q^2), \quad q^2 = (p_+ + p_-)^2 = 4E^2, \quad (15)$$

где  $\rho(q^2)$  определяется через матричные элементы электромагнитного тока  $j_\mu$  с помощью равенства

$$\sum_n \langle 0 | j_\mu(0) | n \rangle \langle n | j_\nu(0) | 0 \rangle (2\pi)^4 \delta^4(p_n - q) = (q_\mu q_\nu - q^2 \delta_{\mu\nu}) \rho(q^2). \quad (16)$$

Положим в (16)  $\mu = 0$ ,  $\nu = i = 1, 2, 3$  и проинтегрируем по  $q_0$ . Будем иметь

$$\begin{aligned} 2q_i \int_0^\infty q_0 \rho(q^2) dq_0 &= q_i \int_0^\infty dq^2 \rho(q^2) = \\ &= \int_{-\infty}^\infty dq_0 \int d^4x e^{-iqx} \langle 0 | [j_0(x), j_i(0)] | 0 \rangle = \\ &= 2\pi \int d^3x e^{-iqx} \langle 0 | [j_0(x), j_i(0)] | 0 \rangle_{x_0=0}. \end{aligned} \quad (17)$$

Интеграл в левой части (17), пропорциональный  $\int \sigma(E) E^2 dE^2$ , выразился через одновременной коммутатор электромагнитных токов, вычисление которого может быть проведено на основании общих свойств теории без знания конкретного вида взаимодействия. Если электромагнитный ток есть ток заряженных фермионов со спином  $1/2$ , то одновременной коммутатор в правой части (17) можно выразить через функцию Грина этих фермионов  $G(x)$ . Записывая для  $G(x)$  представление Челлена—Лемана и используя свойства спектральных функций этого представления, авторы

работы [36] показали, что правая часть (17) как функция предела обрезания  $\Lambda$  расходится квадратично; следовательно, так же ведет себя и левая часть, т. е.

$$\int \sigma(E) E^2 dE^2 \sim \Lambda^2. \quad (18)$$

Отсюда следует, что  $\sigma(E) \sim 1/E^2$ . (В работе [36] было доказано, что пределы обрезания в правой и левых частях (17) одного порядка.) Аналогичным образом было доказано, что  $\sigma \sim 1/E^2$  также и в том случае, когда электромагнитный ток является током заряженных бозонов со спином 0.

Утверждение о том, что  $\sigma$  ( $e^+e^- \rightarrow$  адроны)  $\sim 1/E^2$ , сейчас является классическим: существует несколько способов его вывода; оно широко используется как при теоретических исследованиях, так и при экспериментальном анализе процесса  $e^+e^-$ -аннигиляции в адроны (современное состояние вопроса см., например, в книге [38]).

Последний разговор по этой работе с Исааком Яковлевичем был у меня в воскресенье 12 декабря 1966 г. Исаак Яковлевич был давно и тяжело болен. На протяжении нескольких месяцев он уже совсем не мог есть — опухоль пережала пищевод — и его кормили жидкой пищей через трубку, введенную в пищевод ниже опухоли. Он мог говорить только шепотом и поэтому пользовался усилителем с микрофоном. Тем не менее он продолжал работать. В предыдущем разговоре, примерно за неделю до этого, Исаак Яковлевич просил меня проверить некоторые аспекты доказательства, поскольку у В. Н. Грибова появились сомнения в части нашей аргументации. Я проверил и пришел к выводу, что все правильно. Когда по приходе я сказал об этом Исааку Яковлевичу, оказалось, что он тоже пришел к такому выводу. Мы еще раз обсудили всю проблему, и в заключение Исаак Яковлевич сказал: «Поговорите с Володей (В. Н. Грибовым. — *Б. И.*), и если у него не будет возражений, то надо писать статью». Насколько я знаю, это был последний разговор Исаака Яковлевича о физике. Меньше чем через двое суток, во вторник 14 декабря 1966 г., его не стало.

Исаак Яковлевич много сделал в квантовой теории поля, но мог сделать еще больше. Ему очень не повезло, и не повезло дважды. Он слишком поздно включился в развитие теории в эпоху создания теории перенормировок и квантовой электродинамики, как из-за того, что был очень занят прикладными вопросами, так и из-за сильной оторванности советской физики от зарубежной в конце 40-х и начале 50-х годов. Он не дождался возрождения квантовой теории поля в 70-х годах и умер в самом начале этого процесса.

Основной результат, полученный им в квантовой теории поля, был, увы, отрицательным. И это глубоко противоречило всему



стилю его научного мышления, в котором были тесно слиты физическая интуиция и владение формальным аппаратом теории. Тем не менее и в этих, очень для него неблагоприятных условиях Исаак Яковлевич многое совершил. И благодаря ему многое в квантовой теории поля было понято. Трудно даже вообразить, как активно и с каким энтузиазмом работал бы Исаак Яковлевич и как это повлияло бы на всю физику, если бы он жил в эпоху нового расцвета физики частиц в 70-х годах, когда вся обстановка в науке была именно в его стиле — бурный прогресс в теории шел рука об руку с бурным прогрессом в эксперименте.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Akhiezer A. I., Landau L. D., Pomeranchuk I. Ya. // Nature. 1936. Vol. 138. P. 206.
2. Ахиезер А. И., Померанчук И. Я. // ЖЭТФ. 1937. Т. 7. С. 567; Phys. Zs. Sowjet. 1936. Vol. 10. P. 649.
3. Bethe H., Rohrlich F. // Phys. Rev. 1952. Vol. 86. P. 10.
4. Померанчук И. Я. // ЖЭТФ. 1947. Т. 17. С. 667.
5. Иоффе Б. Л., Рудик А. П., Шмушкевич И. М. // Докл. АН СССР. 1951. Т. 77. С. 403; ЖЭТФ. 1952. Т. 22. С. 11, 21.
6. Померанчук И. Я. // Докл. АН СССР. 1951. Т. 80. С. 47; ЖЭТФ. 1952. Т. 22. С. 129.
7. Rapofsky W. K. H., Aamodt R. L., Hadley J. // Phys. Rev. 1950. Vol. 80. P. 282; 1951. Vol. 81. P. 565.
8. Durbin R., Loar H., Steinberger J. // Ibid. 1951. Vol. 83. P. 646.
9. Marshak R. E., Tamor S. // Ibid. 1950. Vol. 80. P. 766.
10. Tamor S. // Ibid. 1951. Vol. 82. P. 38.
11. Вгисекнер К. // Ibid. 1950. Vol. 79. P. 641.
12. Балдин А. М., Михайлов В. В. // УФН. 1951. Т. 44. С. 200.
13. Иоффе Б. Л., Рудик А. П. // ЖЭТФ. 1952. Т. 22. С. 127.
14. Иоффе Б. Л. // Докл. АН СССР. 1954. Т. 95. С. 761.
15. Галанин А. Д., Иоффе Б. Л., Померанчук И. Я. // Там же. Т. 98. С. 361.
16. Ландау Л. Д., Абрикосов А. А., Халатников И. М. // Там же. Т. 95. С. 497, 773, 1177; Т. 96. С. 261.
17. Gell-Mann M., Low F. // Phys. Rev. 1954. Vol. 95. P. 1300.
18. Галанин А. Д., Иоффе Б. Л., Померанчук И. Я. // ЖЭТФ. 1955. Т. 29. С. 51.
19. Абрикосов А. А., Галанин А. Д., Халатников И. М. // Докл. АН СССР. 1954. Т. 97. С. 793.
20. Ландау Л. Д., Померанчук И. Я. // Там же. 1955. Т. 102. С. 489.
21. Фрадкин Е. С. // ЖЭТФ. 1955. Т. 28. С. 750.
22. Померанчук И. Я. // Докл. АН СССР. 1955. Т. 103. С. 1005.
23. Померанчук И. Я. // Там же. Т. 104. С. 51.
24. Померанчук И. Я. // Там же. Т. 105. С. 461.
25. Померанчук И. Я. // ЖЭТФ. 1955. Т. 29. С. 869.
26. Pomeranchuk I. Ya. // Nuovo sim. 1965. Vol. 3. P. 1186.
27. Абрикосов А. А., Халатников И. М. // Докл. АН СССР. 1950. Т. 103. С. 993.
28. Дятлов И. Т., Тер-Мартirosян К. А. // ЖЭТФ. 1956. Т. 30. С. 416.
29. Судаков В. В. // Докл. АН СССР. 1956. Т. 111. С. 338.
30. Дятлов И. Т., Судаков В. В., Тер-Мартirosян К. А. // ЖЭТФ. 1957. Т. 32. С. 767.
31. Pomeranchuk I. Ya., Sudakov V. V., Ter-Martirosyan K. A. // Phys. Rev. 1956. Vol. 103. P. 784.

32. Берестецкий В. Б., Крохин О. И., Хлебников А. К. // ЖЭТФ. 1956. Т. 30. С. 788.
33. Ландау Л. Д. О фундаментальных проблемах // Теоретическая физика в XX веке: [Сб., посвящ. памяти В. Паули]. Кембридж (США), 1960. Англ. яз.; Пер. на рус. яз. М.: Изд-во иностр. лит., 1962. С. 285.
34. Stueckelberg E. C. G., Peterman A. // Helv. phys. acta. 1953. Vol. 26. P. 499.
35. Bogolubov N. N., Shirkov D. V. // Nuovo sim. 1956. Vol. 3. P. 845.
36. Грибов В. Н., Иоффе Б. Л., Померанчук И. Я. // ЯФ. 1967. Т. 6. С. 587.
37. Bjorken J. D. // Phys. Rev. 1966. Vol. 148. P. 1467.
38. Ioffe B. L., Khoze V. A., Lipatov L. N. // Hard processes. Vol. 1. Amsterdam: North-Holland, 1984.

А. Д. Галанин

## О РАБОТАХ И. Я. ПОМЕРАНЧУКА ПО ФИЗИКЕ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ И О ВЛИЯНИИ ЕГО ИДЕЙ НА ПОСЛЕДУЮЩЕЕ РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Еще до Великой Отечественной войны советские физики-теоретики работали над созданием теории ядерных реакторов, т. е. аппаратов, в которых протекает регулируемая цепная реакция деления ядер. Война прервала эти исследования. В 1943—1944 гг. они возобновились, особенно интенсивно после 1945 г., когда перед всей страной встала задача в минимальные сроки ликвидировать монополию США на ядерное оружие. В то время перед физиками стояла особенно ответственная задача — построить теорию, которая не только описывала бы физику явлений, протекающих в ядерных реакторах, но на основании которой можно было бы производить инженерное проектирование, а затем строительство и эксплуатацию ядерных реакторов.

Среди создателей этой теории И. Я. Померанчук занимал почетное место. Для того чтобы роль Исаака Яковлевича стала яснее, необходимо остановиться на основных результатах, которые были получены Я. Б. Зельдовичем и Ю. Б. Харитоновым в 1939—1940 гг. [1—3]. В работе [1] было показано, что цепная реакция деления на быстрых нейтронах в природном уране невозможна. В работе [2] рассматривалась смесь урана с водородом. В этом случае быстрые нейтроны, возникшие при делении, замедляются при столкновении с протонами и вызывают повторное деление урана-235, только достигнув энергии, близкой к энергии теплового движения. При замедлении нейтронов есть вероятность поглощения ураном-238, который имеет сильные резонансы.

В работе [2] было сформулировано уравнение, определяющее вероятность ( $\varphi(E)$ ) избежать резонансного поглощения при замедлении от энергии  $E$  до тепловой. Решение уравнения показало, что резонансное поглощение при малых концентрациях урана пропорционально первой степени, а при больших — корню квадратному из концентрации, т. е. возникает самоэкранировка резонансного поглощения. В этой же работе было получено выражение для коэффициента размножения в бесконечной среде:  $k_\infty = \nu\varphi\theta$ , где  $\nu$  — число вторичных нейтронов при делении,  $\varphi$  — вероятность избежать резонансного поглощения при замедлении,  $\theta$  — вероятность деления урана-235 при поглощении теплового нейтрона. Впоследствии был добавлен еще один множитель  $\epsilon$  — вероятность деления урана-238 быстрым нейтроном; тогда возникла знаменитая формула «четырёх сомножителей»:  $k_\infty = \nu\epsilon\varphi\theta$ . Максимум  $k_\infty$  совпадает с максимумом произведения  $\varphi\theta$ . Такой максимум существует, так как с ростом концентрации урана  $\varphi$  падает, а  $\theta$  растёт. Используя известные к тому времени экспериментальные данные, авторы работы [2] показали, что если замедлителем является вода, то  $(k_\infty)_{\max} < 1$ , т. е. нельзя получить цепную реакцию деления на природном уране.

Таким образом, из работы [2] следовало, что необходимо изучать другие замедлители, имеющие малое сечение поглощения (графит, тяжёлая вода), и построить теорию резонансного поглощения в неводородном замедлителе. Вскоре стало ясно, что размещение урана в замедлителе в виде отдельных блоков размером 2—3 см увеличивает  $k_\infty$  (это чрезвычайно важное обстоятельство, позволившее построить ядерные реакторы на природном уране с графитовым и тяжёловодным замедлителями, было выяснено И. Я. Померанчуком и И. И. Гуревичем (см. [3], комментарий к работе [2])). Поэтому надо было построить теорию резонансного поглощения в гетерогенном реакторе, чтобы определить эффект дополнительной экранировки, связанной с гетерогенным размещением урана. Наконец, надо было создать теорию гетерогенного реактора, в которой явно учитывалась бы его неоднородная структура.

Свои работы по теории ядерных реакторов И. Я. Померанчук обобщил в рукописи [4], которая была написана совместно с А. И. Ахиезером в 1946—1947 гг., но, к сожалению, не была напечатана. Некоторые разделы из нее впоследствии были опубликованы в книге [5], в докладах на I Женевской конференции по мирному использованию атомной энергии [6], в посмертном издании трудов И. Я. Померанчука [7], использованы в книге [8].

Ниже я подробно остановлюсь на следующих разделах теории, изложенной в рукописи [4]: а) гетерогенная теория ядерных реакторов; б) теория резонансного поглощения в однородной среде; в) теория резонансного поглощения в гетерогенной среде (последняя создана И. Я. Померанчуком в соавторстве с

И. И. Гуревичем, далее для краткости будем обозначать ее ГП-теория). Выбор разделов определяется тем, что именно эти вопросы относились к числу наиболее важных, которые надо было решить после работы [2].

Когда в 1955 г. на I Женевской конференции по мирному использованию атомной энергии появились после длительного перерыва публикации по теории ядерных реакторов, то оказалось, что результаты, полученные в США и СССР, во многом совпадают. Наибольшие отличия в подходах имелись в гетерогенной теории реакторов, которая практически не развивалась в США (разд. 2) и в теории резонансного поглощения в гетерогенном реакторе (разд. 4). Что касается резонансного поглощения в однородной среде, то основной результат оказался одинаковым. Этот результат даже в советских учебниках (см. [9]) называют приближением Вигнера, хотя его следовало бы называть приближением Ахиезера—Померанчука—Вигнера. В монографии Вигнера и Вейнберга [10] указывается, что качественное рассуждение, лежащее в основе этого результата, принадлежит Эйнштейну. Приоритетный спор и участие в решении задачи столь знаменитых физиков, как Эйнштейн и Вигнер, заставляют нас остановиться здесь на этом вопросе (см. разд. 3).

Идеи, заложенные в записи гетерогенных уравнений, долгое время имели только теоретическое значение и не оказывали влияния на практические методы расчета. Однако за последние годы положение коренным образом изменилось, и теперь эта теория лежит в основе значительной части практических расчетов гетерогенных реакторов.

Роль теории резонансного поглощения в гетерогенном реакторе несколько иная. Эта теория явилась наиболее простым предельным случаем, с которым сравнивались все последующие теоретические уточнения и экспериментальные данные. Длительное время практические расчеты опирались на полумпирические формулы, построенные на основе теории ГП. Затем наступила эпоха численных расчетов, которая отодвинула на задний план сложные теоретические поправки к результатам ГП, но сами эти результаты, описывающие основные закономерности, никогда не утратят своего значения.

В разд. 5 более кратко рассмотрены решения еще двух других задач, принадлежащие И. Я. Померанчуку: теория «экспоненциальных опытов» и возрастная теория замедления<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Ниже я буду следовать идеям И. Я. Померанчука, не придерживаясь буквального совпадения с авторами работ [4, 6, 7] во второстепенных деталях.

## 2. ГЕТЕРОГЕННАЯ ТЕОРИЯ РЕАКТОРА

Гетерогенный реактор состоит из системы параллельных цилиндрических блоков урана, окруженных замедлителем (в настоящее время вместо «блок» говорят «твэл» — тепло выделяющий элемент или ТВС — тепло выделяющая сборка, если блок имеет сложную конструкцию). Основная идея теории состоит в том, что каждый блок характеризуется некоторым набором параметров, которые можно считать заданными, т. е. не зависящими от свойств и расположения остальных блоков. Идея построения такой теории принадлежит Л. Д. Ландау.

Теория, которая изложена в [4], относится к нитевидным блокам, точнее, к блокам с радиусом  $\rho$ , много меньшим шага решетки  $a$ . Рассматривается идеальный реактор на тепловых нейтронах, в котором поглощаются только тепловые нейтроны. В таком реакторе каждый блок характеризуется двумя параметрами: постоянной размножения  $\eta$ , равной числу быстрых нейтронов, испущенных блоком при поглощении им одного теплового нейтрона, и тепловой постоянной  $\gamma$ , равной отношению числа тепловых нейтронов (откуда и возникло ее название), поглощенных блоком  $j$ , к потоку тепловых нейтронов  $\Phi$  на его поверхности:

$$\gamma = j/\Phi. \quad (4)$$

Уравнение гетерогенного реактора строится с помощью двух функций Грина  $G_f(r, r')$  и  $G_s(r, r')$ , равных потоку тепловых нейтронов в точке  $r$ , возникших под влиянием единичных точечных источников (точнее, нитевидных) быстрых и тепловых нейтронов для  $G_f$  и  $G_s$  соответственно, расположенных в точке  $r'$ . Если в точках  $r_k$  расположены блоки с характеристиками  $\eta_k$  и  $\gamma_k$ , то в силу линейности уравнений замедления и диффузии нейтронов поток тепловых нейтронов в точке  $r$  ( $r, r_k$  — двумерные векторы, расположенные в плоскости, перпендикулярной блокам) будет равен

$$\Phi(r) = \sum_{k'} [\eta_k G_f(r, r_k) - G_s(r, r_k)] \gamma_k \Phi_{k'} \quad (2)$$

где  $\Phi_{k'}$  — поток тепловых нейтронов на поверхности блока, центр которого расположен в точке  $r_{k'}$ . Пусть точка  $r$  стремится к точке на поверхности блока  $k$ . Тогда

$$\Phi_k = \sum_{k'} H_{kk'} \Phi_{k'}, \quad (3)$$

где

$$H_{kk'} = H(r_k, r_{k'}) = \gamma_{k'} [\eta_{k'} G_f(r_k, r_{k'}) - G_s(r_k, r_{k'})], \quad (4)$$

причем  $G_s(r_k, r_k)$  — значение  $G_s(r, r_k)$ , если точка  $r$  расположена на поверхности блока, центр которого  $r_k$  (такая оговорка нужна,

так как для цилиндрического блока  $G_s(r, r') \rightarrow \infty$  при  $r \rightarrow r'$ ).

Условие существования нетривиального решения системы (3) линейных однородных уравнений относительно  $\Phi_k$

$$\det(H - 1) = 0 \quad (5)$$

с физической точки зрения является условием критичности. При этом надо найти то решение (5), которому соответствует минимальное значение коэффициента размножения.

В теории предполагается, что

$$a \gg l_s, \quad (6)$$

где  $l_s$  — длина рассеяния нейтронов в замедлителе. Тогда в большей части объема ячейки справедливо уравнение диффузии. Если замедлитель однородный и бесконечно протяженный, то в качестве  $G_f$  и  $G_s$  можно взять функции Грина в диффузионно-возрастном приближении для неограниченной среды. Конкретное выражение для  $H(r_k, r_{k'})$  приведено, например, в [8, 11].

Можно отказаться от (6) и использовать более точные приближения, чем диффузионное (например, приближение  $P_3$  метода сферических гармоник), но это направление не получило значительного развития [12].

Первое применение теории — бесконечная однородная решетка. В этом случае поток на всех блоках одинаков и уравнение (3) дает

$$\sum_k H(r_k) = 1. \quad (7)$$

Если выполнены неравенства  $4\pi^2\tau/a^2 \gg 1$ ,  $4\pi^2L^2/a^2 \gg 1$  (обычно они хорошо выполняются), то суммирование в (7) приводит к условию критичности

$$\eta = 1 + q_0 + q_1, \quad q_0 = \frac{a^2 \Sigma_a}{\gamma}, \quad q_1 = \frac{a^2}{4\pi L^2} \left( \ln \frac{a^2}{\rho^2} - \frac{3}{2} + \delta \right), \quad \frac{\pi \rho^2}{a^2} \ll 1, \quad (8)$$

где  $\Sigma_a$  — макроскопическое сечение поглощения замедлителя;  $\delta$  — весьма малая поправка, зависящая от формы ячейки (для квадратной ячейки  $\delta = 0,0237$ ). Физический смысл  $q_0$  — отношение числа нейтронов, поглощенных замедлителем, к числу поглощенных блоком, если поток в замедлителе равен потоку на поверхности блока;  $q_1$  учитывает неравенство этих потоков. Если пренебречь  $\delta$ , то результат совпадает с условием критичности одной цилиндрической ячейки, равновеликой исходной, с граничным условием равенства нулю тока нейтронов через границу ячейки (ячейка Вигнера—Зейтца). Такую ячейку и рассматривали ранее для определения  $q_0, q_1$ . Гетерогенные уравнения показали, что цилиндрическая аппроксимация ячейки имеет очень высокую точность.

В случае конечного однородного реактора без отражателя можно применить метод фиктивных источников, располагая их вне реактора, так, чтобы на поверхности поток (2) обратился в нуль (для плоского реактора результат точный, для цилиндрического при большом числе ячеек имеет малую погрешность). Тогда можно искать решение в виде

$$\Phi_k = \sum_{\alpha} C(\alpha) \exp(i\alpha r_k),$$

где суммирование производится по направлениям вектора  $\alpha$ . Например, для цилиндрического реактора

$$\sum_k C(\alpha) \exp(i\alpha r_k) = \text{const } J_0(\alpha r),$$

$J_0$  — функция Бесселя нулевого порядка. При этом условии критичности вместо (7) будет

$$\sum_k \exp(i\alpha r_k) H(r_k) = 1. \quad (9)$$

Вычисления приводят к следующему результату:

$$k_{\infty} = (1 + \alpha^2 L_p^2) \exp(\alpha^2 \tau), \quad k_{\infty} = \eta (1 + q)^{-1}, \\ q = q_0 + q_1, \quad L_p^2 = (q/(1 + q)) L^2, \quad (10)$$

где  $L_p$  — длина диффузии в решетке. Такой же результат получается и для гомогенного реактора (если пренебречь рассеянием нейтронов на уране), только  $q_1 = 0$ . Таким образом была доказана законность гомогенизации гетерогенного реактора, т. е. замены его гомогенным реактором с эффективными параметрами  $k_{\infty}$  и  $L_p^2$ .

Еще один результат теории состоял в доказательстве того, что поток замедляющихся нейтронов в ячейке не зависит от координат. Для бесконечной однородной решетки поток замедляющихся нейтронов пропорционален величине

$$\frac{1}{4\pi\tau} \sum_k \exp\left[-\frac{(r-r_k)^2}{4\tau}\right] = \frac{1}{a^2}, \quad (11)$$

причем отклонения от постоянной в правой части по порядку величины равны  $\exp(-4\pi^2\tau/a^2)$ , что обычно весьма мало.

Решением этих задач ограничивались приложении теории в 40-х годах: раз была доказана законность гомогенизации, то переходили к дифференциальным уравнениям, которые описывают гомогенный реактор с эффективными параметрами. Для их решения были разработаны численные методы.

Последующие 25—30 лет добавили не очень много. В 50-х годах были проведены численные расчеты реакторов с малым (порядка 10) числом блоков и показано, что гомогенизация возможна и в этом случае [13, 14]. Была рассмотрена сложная ре-

шетка, в элементарной ячейке которой имеется несколько различных блоков. В 60-е годы теория распространена на реактор с большими блоками и из условия критичности вида (10) получены выражения для длины миграции с учетом рассеяния в блоке (в том числе получены выражения для анизотропии миграции) [11].

В течение многих лет теория, основанная на гомогенизованных уравнениях, удовлетворяла запросы практики. Однако она не могла корректно ответить на ряд вопросов, которые возникали по мере усложнения конструкции и повышения требований к точности расчета: каковы распределения энергии как между ТВС с различными свойствами, так и по высоте ТВС при наличии органов регулирования, каковы эффективности органов регулирования в неоднородном реакторе и т. д. Только в конце 70-х и начале 80-х годов гетерогенная теория реактора из красивого теоретического приема превратилась в практический инструмент реакторных расчетов.

Необходимо отметить два момента. Основное препятствие для численного решения уравнения (3) состоит в том, что матричные элементы  $H_{kk'}$  (4) отличны от нуля даже при больших значениях  $|k - k'|$ . Это связано с тем, что  $G_{f,s}(r - r')$  затухают на расстояниях порядка  $L$ , а длина диффузии в графите и тяжелой воде сравнима с размерами реактора. Поэтому матрица  $H_{kk'}$  имеет размерность, достигающую до  $10^3 \times 10^3$ , что делает расчеты на ЭВМ слишком трудоемкими.

Выход был найден следующим образом [15]. Если к (2) применить оператор  $\Delta - L^{-2}$ , то дальнедействующая часть  $H_{kk'}$  обращается в нуль. Если  $a^2 \ll L^2$ , то приближенно дальнедействующая часть  $H_{kk'}$  обращается в нуль, если на (3) подействовать конечно-разностным аналогом оператора  $\Delta - L^{-2}$  (фактически это сводится к некоторой линейной комбинации уравнений (3)). В такой оператор можно ввести несколько параметров и выбрать их из условия наилучшей минимизации модифицированного ядра  $H_{kk'}$  вне небольшой окрестности данного блока. Модифицированные матричные элементы  $H_{kk'}$  будут отличными от нуля только в малой окрестности диагонали  $k = k'$ , и к решению уравнения можно применить методы, разработанные для численного решения дифференциальных уравнений гомогенного реактора. Разложение в ряд Фурье по высоте реактора позволило распространить метод на трехмерные задачи [16].

Далее, что не менее существенно, были разработаны [15] численные методы для определения граничных коэффициентов (заменяющих коэффициенты  $\eta, \gamma$ ) на поверхности блока или на поверхности коаксиального блока цилиндра:

$$\frac{\partial \Phi_{n,k}}{\partial r} = \sum_{n'} \Lambda_{n,n'}^k \Phi_{n',k}, \quad (12)$$

где  $k$  — номер блока;  $n, n'$  — индексы нейтронных групп (возрастное приближение заменено малогрупповым — 2—5 нейтронных групп, но при определении матричных элементов  $\Lambda$  используется многогрупповое приближение — порядка 100 групп). Матрицы  $\Lambda$  учитывают рождение, поглощение, рассеяние, а значит, и замедление нейтронов в блоке. В случае больших блоков уже нельзя ограничиться средним значением потока на поверхности блока, т. е. монопольным приближением (как фактически было сделано в (3)), а нужно рассматривать  $\Phi$  в (12) как компоненту Фурье по азимутальному углу. Обычно не идут дальше дипольного приближения, когда учитывается одна гармоника.

Разработанные методы позволяют вычислять трехмерные распределения энерговыделения (или других функционалов от сечений) в больших реакторах, когда число блоков достигает тысячи.

Таким образом, идея, высказанная Л. Д. Ландау, сформулированная и исследованная в рукописи [4], долгое время представлявшая только теоретический интерес, в настоящее время превратилась в мощный метод, постоянно используемый в практических расчетах гетерогенных ядерных реакторов.

Разработаны и альтернативные подходы [17, 18], но они не выглядят столь же последовательными или столь же законченными.

### 3. РЕЗОНАНСНОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ В ОДНОРОДНОЙ СРЕДЕ

Рассматривая резонансное поглощение в однородной среде, Ахиезер и Померанчук [4, 7] так же, как в [2], записывают уравнение для  $\varphi(E)$ ; в настоящее время чаще рассматривают уравнение для потока нейтронов.

Если нейтрон при замедлении достиг энергии  $E$ , то вероятность столкнуться с ядром  $i$  и не поглотиться равна  $\Sigma_{si}(E)/\Sigma_t(E)$ , где  $\Sigma_{si}, \Sigma_t$  — макроскопические сечения рассеяния на нуклиде  $i$  и полное макроскопическое сечение среды. Вероятность уменьшить при этом энергию до  $E'$  (упругое рассеяние, изотропное в системе центра масс)

$$w_i(E, E') = (1 - \varepsilon_i)^{-1} E^{-1}, \quad \varepsilon_i E \leq E' \leq E,$$

где  $\varepsilon_i = (A_i - 1)/(A_i + 1)^2$  — максимальный сброс энергии при столкновении с нуклидом атомной массы  $A_i$ . Вероятность не поглотиться при дальнейшем замедлении до тепловой энергии равна  $\varphi(E')$ . Собирая все множители, суммируя по всем сортам нуклидов и интегрируя по энергии, получаем искомое уравнение

$$\varphi(E) = \sum_i \frac{\Sigma_{si}(E)}{\Sigma_t(E)(1 - \varepsilon_i)E} \int_{\varepsilon_i E}^E \varphi(E') dE'. \quad (13)$$

Для водорода  $\varepsilon = 0$  и возникает уравнение, исследованное в [2]. Теперь сформулируем предположения теории. Во-первых, предполагается, что масса ядра поглотителя столь велика, что изменение энергии нейтрона при столкновении с ним много меньше, чем ширина той энергетической области, где поглощение существенно. Поэтому  $\varphi(E')$  можно вынести за знак интеграла в том слагаемом (13), которое относится к поглотителю. Тогда вместо (13) имеем

$$\varphi(E) = \frac{1 - W(E)}{E} \sum_i \frac{\Sigma_{si}}{\Sigma_s(1 - \varepsilon_i)} \int_{\varepsilon_i E}^E \varphi(E') dE', \quad (14)$$

где сечение рассеяния поглотителя не входит в  $\Sigma_s$ , суммирование производится только по ядрам замедлителя,  $W(E) = \Sigma_a(E)/\Sigma_t(E)$  — вероятность поглощения при столкновении (для замедлителя  $\Sigma_a(E) = 0$ ).

Второе предположение: резонансные уровни не перекрываются и можно независимо рассматривать поглощение каждым уровнем. Поэтому будем считать, что  $W(E)$  относится к одному уровню. Третье предположение: поглощение каждым уровнем (но не обязательно всей совокупностью уровней) мало:

$$b = \int (W(E)/E) dE \ll 1. \quad (15)$$

Это предположение вносит в теорию малый параметр  $b$ . В первом порядке по  $b$  запишем (если  $b = 0$ , то  $\varphi = 1$ )  $\varphi(E) = 1 + b\varphi_1(E)$ ,  $W(E) = bW_0(E)$  и тогда вместо (14) получим

$$\varphi_1(E) = \sum_i \frac{\Sigma_{si}}{\Sigma_s(1 - \varepsilon_i)E} \int_{\varepsilon_i E}^E \varphi_1(E) dE - W_0(E). \quad (16)$$

Уравнение (16) решается с помощью преобразования Меллина. Приведем окончательный результат [4, 7]:

$$\varphi(E_0) = 1 - \int_{E_T}^{E_0} W(E) \frac{dE}{\xi(E)}, \quad W(E) = \frac{\Sigma_a(E)}{\Sigma_s + \Sigma_a(E)}, \quad (17)$$

где  $\xi = \sum_i \xi_i \Sigma_{si}/\Sigma_s$ ,  $\xi_i = 1 + \varepsilon_i \ln \varepsilon_i/(1 - \varepsilon_i)$ ;  $E_0$  — максимальная энергия нейтронов;  $E_T$  — их тепловая энергия. Если имеется много неперекрывающихся уровней, то

$$\varphi \equiv \varphi(E_0) = \prod_i \left( 1 - \int \frac{W_i(E) dE}{\xi E} \right) \sim \exp(-\psi),$$

$$\psi = \int \frac{W(E) dE}{\xi E}, \quad W(E) = \sum_i W_i(E), \quad (18)$$

что совпадает с результатом Вигнера [10]. При  $\xi = 1$  (водород) этот результат был получен в [2]. Если  $\Sigma_a(E) \ll \Sigma_s$ , то получим результат возрастного приближения или приближение Ферми:

$$\varphi = \exp\left(-\int \frac{\Sigma_a(E) dE}{\xi \Sigma_s E}\right). \quad (19)$$

Предположим, что в интервале  $(E, E')$  сечение поглощения бесконечно велико, а вне его равно нулю (этот пример взят из [10]). Тогда по (19)  $\varphi = 0$ , а по (18)  $\varphi \neq 0$ . Фактически же  $\varphi \neq 0$  только в том случае, когда нейтрон может перескочить интервал  $(E, E')$  в результате одного столкновения, т. е.  $E - E' < E\varepsilon$ . Если  $E - E' = E\varepsilon$ , то из (18) получим  $\varphi = \exp[-(1/\xi) \ln(1 - \varepsilon)]$ , что при  $A \gg 1$  равно  $\exp(-2)$  вместо  $\varphi = 0$ . Такое рассуждение показывает, что приближение Ферми (19) завышает резонансное поглощение, а приближение Ахизера—Померанчука—Вигнера (18) занижает. Очевидно, что в этом случае нарушено условие (15) и формула (18) не обязана давать правильный результат.

Легко вычислить  $\varphi$  для одного резонансного уровня с естественной формой линии

$$\sigma_a(E) = \sqrt{\frac{E_r}{E}} \frac{\sigma_a(E_r)}{1+x^2}, \quad x = \frac{2}{\Gamma}(E - E_r). \quad (20)$$

Результат интегрирования следующий:

$$\varphi = \exp(-\psi), \quad \psi = cI_a/(\xi\Sigma_s), \quad I_a = \beta I_\infty, \\ \beta = (1 + \Sigma_a(E_r)/\Sigma_s)^{-1/2}, \quad (21)$$

где  $c$  — концентрация поглотителя;  $I_a$  — эффективный резонансный интеграл;  $I_\infty$  — резонансный интеграл бесконечного разбавления:

$$I_\infty = \int \frac{\Sigma_a(E) dE}{E} = \frac{\pi}{2} \frac{\Gamma \sigma_a(E_r)}{E_r}. \quad (22)$$

Из (21) видно, что при больших концентрациях поглощающего вещества резонансный интеграл обратно пропорционален, а резонансное поглощение  $\psi$  прямо пропорционально квадратному корню из концентрации (для водорода этот результат был получен в [2]).

Для резонанса (20) можно определить «ширину опасной зоны», или «практическую ширину резонанса»:

$$\Delta E_r = \Gamma \sqrt{\Sigma_a(E_r)/\Sigma_s}. \quad (23)$$

Условие применимости (18) состоит в неравенстве

$$\Delta E = 4E_r/A \ll \Delta E_r = \Gamma \sqrt{\Sigma_a(E_r)/E_s}, \quad (24)$$

где  $A$  — атомная масса поглотителя. Для концентраций урана-238 в реакторах неравенство (24) соблюдается для нижних уровней,

но нарушается для более высоких; роль этих высоких уровней в реакторе на тепловых нейтронах мала.

Дальнейшие усилия многих авторов были направлены главным образом на устранение первого предположения. При этом наибольшие трудности встречаются для случая, когда ширина опасной зоны одного порядка с величиной скачка энергии при столкновении нейтрона с ядром поглотителя. Развитие теории резонансного поглощения изложено, например, в монографиях [19, 20].

#### 4. РЕЗОНАНСНОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ В ГЕТЕРОГЕННОМ РЕАКТОРЕ

Построение теории резонансного поглощения в гетерогенной среде было очень важным этапом на пути осуществления цепной реакции деления урана. Такая теория была создана И. И. Гуревичем и И. Я. Померанчуком в 1943 г. [6, 7]. Она базируется на следующих допущениях: 1) величина скачка энергии нейтрона при столкновении с ядром замедлителя много больше ширины опасной зоны резонанса; 2) можно пренебречь рассеянием нейтронов внутри блока и рассматривать поглощение нейтрона только на прямых пролетах через блок.

Ширина опасной зоны  $\Delta E_r$  определяется из условия  $\Sigma_a(E_r + \Delta E_r/2) \bar{l} = 1$ , где  $\Sigma_a(E)$  — макроскопическое сечение поглощения в блоке;  $\bar{l}$  — средняя хорда блока, равная  $\bar{l} = 4V_0/S$  ( $V_0$  — объем,  $S$  — поверхность блока). Если сечение дано (20) и  $1/2 \Gamma \ll \Delta E_r \ll E_r$ , то (см. (23))

$$\Delta E_r = \Gamma \sqrt{\bar{p}}, \quad \bar{p} = \Sigma_a(E_r) \bar{l} \quad (25)$$

Для первых резонансных уровней урана-238 при  $\bar{l} = 1$  см  $\bar{p} \sim 10^3$ , т. е.  $\Delta E_r \gg \Gamma$ . Следовательно, основное резонансное поглощение происходит не в центральной части резонанса шириной  $\Gamma$ , а в значительно более широкой области  $\Delta E_r$ , т. е. фактически на крыльях резонансной кривой.

Рассмотрим один уровень. Как отмечалось в разд. 2, поток замедляющихся нейтронов в ячейке не зависит от координат, если поглощение равно нулю. При выполнении условия

$$\Delta E = (1 - \varepsilon) E_r = (4A/(1 + A)^2) E_r \gg \Delta E_r \quad (26)$$

( $A$  — атомная масса замедлителя) энергия  $E'$ , при которой произошло последнее столкновение нейтрона перед тем, как он попал внутрь опасной зоны (энергия  $E$ ), лежит в подавляющем большинстве случаев вне опасной зоны. Поэтому генерация нейтронов внутри опасной зоны происходит равномерно по координатам и изотропно по углам (это утверждение иногда называют «гипотезой плоского потока»). В этом случае вероятность в фор-

муле (18) запишется следующим образом:

$$W(E) = G_0(E)/(G_0(E) + \bar{l}_1 \Sigma_{s1}), \quad (27)$$

где  $G_0(E)$  — вероятность столкнуться в блоке, если падающий поток нейтронов изотропен;  $\bar{l}_1 \Sigma_{s1}$  — вероятность столкнуться в замедлителе. Здесь  $\bar{l}_1$  — средняя хорда замедлителя, равная  $\bar{l}_1 = 4V_{зам}/S$ , причем  $S$  — поверхность блока. В работах [6, 7] подробно анализируется только случай больших ячеек, когда  $G_0 \ll \bar{l}_1 \Sigma_{s1}$ :

$$\psi = \frac{S}{4\xi\Sigma_s V} \int \frac{G_0(E)}{E} dE \quad (28)$$

( $V$  — объем ячейки).

Для вычисления  $G_0(E)$  воспользуемся вторым предположением: рассеяние внутри блока малое. Пусть нейтрон падает на блок под таким углом, что хорда, проведенная в этом направлении, равна  $l$ . Тогда вероятность поглотиться при пересечении блока равна  $1 - \exp[-\Sigma_a(E)l]$  и, следовательно,

$$G_0(E) = \int_0^{l_{max}} [1 - \exp(-\Sigma_a(E)l)] w(l) dl, \quad (29)$$

где  $w(l)$  — распределение хорд по длинам, нормированное так, что

$$\int_0^{l_{max}} w(l) dl = 1.$$

Вставив (29) в (28), изменим порядок интегрирования и получим

$$\psi = cV_0 I_a / \xi \Sigma_s V, \quad (30)$$

где  $c$  — концентрация поглотителя в блоке;  $cV_0/V$  — средняя концентрация в ячейке;  $I_a$  — эффективный резонансный интеграл:

$$I_a = [\Gamma/(2c\bar{l}E_r)] \bar{J}(p) \quad (31)$$

(черта означает усреднение по хордам). И если использовать (20) и в медленно изменяющихся множителях положить  $E = E_r$ , то

$$J(p) = \int_{-\infty}^{+\infty} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{p}{1+x^2}\right) \right] dx. \quad (32)$$

Так как для основных уровней урана-238  $p \gg 1$ , то в подынтегральном выражении (32) можно пренебречь единицей по сравнению с  $x^2$ . Тогда интеграл легко вычисляется:

$$J(p) = 2\sqrt{\pi p}. \quad (33)$$

Таким образом, эффективный резонансный интеграл равен

$$I_a = (\Gamma \sqrt{\sigma_r/E_r}) C; \quad C = (\sqrt{\pi/cl}) \sqrt{\bar{l}}/\sqrt{\bar{l}}, \quad (34)$$

где отдельно выделен множитель, зависящий от параметров уровня. Если воспользоваться формулой (22), то получим коэффициент блокировки

$$\beta = I_a/I_\infty = (2/\sqrt{\pi p}) \sqrt{\bar{l}}/\sqrt{\bar{l}}. \quad (35)$$

Таким образом, эффективный резонансный интеграл обратно пропорционален, а резонансное поглощение прямо пропорционально квадратному корню из размеров блока и концентрации поглотителя в нем<sup>2</sup>. Множитель  $\sqrt{\bar{l}}/\sqrt{\bar{l}}$  весьма близок к единице. Для цилиндра он равен 0,9726.

Если имеется много неперекрывающихся уровней, причем поглощение в каждом мало, то вероятность избежать резонансного поглощения определяется следующим образом:

$$\varphi = \prod_i (1 - \psi_i) \sim \exp(-\psi), \quad (36)$$

где

$$\psi = \sum_i \psi_i = [cV_0/(\xi\Sigma_s V)] I_a, \quad I_a = \sum_i I_a^{(i)}, \quad (37)$$

и  $I_a^{(i)}$  — эффективный резонансный интеграл  $i$ -го уровня.

Сравним  $\beta$  (35) с аналогичным отношением (21) в гомогенном случае, если  $\Sigma_a(E_r) \gg \Sigma_s$  и средние концентрации поглотителя одинаковы (принято, что  $\sqrt{\bar{l}} = \sqrt{\bar{l}}$ ):

$$\beta_{гет}/\beta_{гом} = \sqrt{\bar{l}}/(\Sigma_s \bar{V}). \quad (38)$$

Если, например,  $\Sigma_s^{-1} = \bar{l} = 2\rho$ , то отношение (38) равно  $2\rho/a$ , где  $a$  — размер ячейки. Взяв  $\rho = 2$ ,  $a = 20$  см, получим, что (38) равно 0,2, т. е. резонансное поглощение в гетерогенном реакторе существенно меньше, чем в гомогенном (при одинаковых средних концентрациях).

В формулу (34) входит комбинация параметров уровня  $f_i = \Gamma_i \sqrt{\sigma_{ri}/E_{ri}}$ . Относительная величина  $f_i = f_i/\sum_j f_j$  показывает роль различных уровней в резонансном поглощении. Для урана-238 (по современным данным)  $f_1 = 41\%$ ,  $f_2 = 17\%$ ,  $f_3 = 14\%$ ,  $f_4 = 5\%$ , т. е. поглощение первыми четырьмя уровнями ( $E_r =$

<sup>2</sup> В оптике известно, что при прохождении света через поглощающую пластинку количество поглощенной энергии (при условии, что форма линии резонанса естественная) пропорционально квадратному корню из толщины пластинки. По свидетельству И. И. Гуревича, авторы работы [6] обратили внимание на это обстоятельство уже после окончания работы [6].

= 6,7; 21; 37; 66 эВ) составляет 77% всего (блокируемого) резонансного поглощения.

При энергии выше нескольких килоэлектронвольт блокировка уровней уже не существенна. Кроме того, имеется большое число слабых  $p$ -уровней, которые не блокируются. Не блокируется также поглощение, обусловленное частью сечения, которая подчиняется закону  $1/v$ . Таким образом, полный резонансный интеграл состоит из двух частей — блокируемого и неблокируемого:

$$I_a = I_{\text{бл}} + I_{\text{нбл}}, \quad \psi = \psi_{\text{бл}} + \psi_{\text{нбл}}. \quad (39)$$

Такое разделение резонансного поглощения на две части с различной зависимостью от размеров блока использовалось при обработке экспериментальных данных. Наиболее употребительная запись резонансного интеграла следующая:

$$I_a = A + B\sqrt{S/M}, \quad (40)$$

где  $S$  — поверхность блока, см<sup>2</sup>;  $M$  — масса, г;  $A$  и  $B$  — эмпирические постоянные. В первых советских измерениях было получено [21]  $A = 5,1$ ;  $B = 21,5$  (если  $I_a$  в барнах). Согласно обзору [22],  $A = 4,25$ ;  $B = 26,8$  (в постоянную  $A$  включено поглощение по закону  $1/v$ ; точность 3,5%). Эксперимент подтвердил зависимость (40), следующую из теории ГП. До ее опубликования в США использовали линейную аппроксимацию

$$I_a = A' + B'S/M,$$

которая согласуется с опытом в более узком интервале  $S/M$ .

В работе [6, 7] проанализирована зависимость резонансного поглощения от температуры блока. Доплеровское уширение резонансных линий не влияет на неблокируемое резонансное поглощение, слабо зависит от температуры поглощения сильными резонансными уровнями. Основная температурная зависимость обусловлена широкой энергетической областью, где расположены уровни средней силы. Из теории [6, 7] следует

$$I_a(T) = A + B [1 + (\sqrt{T/T_0} - 1) \alpha] \sqrt{S/M}, \quad (41)$$

где  $T_0 = 293$  К и  $\alpha$  — эмпирическая постоянная, равная для металлического урана 0,125. Часто (см., например, [22]) температурный коэффициент относят ко всему резонансному поглощению, а не к блокированной части. Тогда получается, что  $\alpha$  зависит от  $S/M$ . Пересчет данных [22] по (41) приводит к постоянному значению  $\alpha$ , как это и следует из теории ГП.

Отметим, что для упрощения расчетов формулу (29) часто заменяют более простой («рациональное приближение» Вигнера; именно в этом пункте на Женевской конференции 1958 г. было установлено отличие теории ГП от теории, развиваемой в США):

$$G_0(E) = \Sigma_a(E) \bar{l} / (1 + \Sigma_a(E) \bar{l}). \quad (42)$$

Функция (42) имеет правильные значения при  $\Sigma_a \bar{l} \ll 1$  и  $\Sigma_a \bar{l} \gg 1$ . Из (42) получаем коэффициент блокировки

$$\beta = (1 + \bar{p})^{-1/2}, \quad (43)$$

что при  $\bar{p} \gg 1$  отличается от (35) на 10%.

Если в (27) не пренебрегать  $G_0$  в знаменателе, то

$$\psi = \frac{S}{4\xi\Sigma_a V} \int \frac{G_0(E)}{1 + G_0(E)(\Sigma_{s1}\bar{l}_1)^{-1}} \frac{dE}{E}. \quad (44)$$

Или, разложив в ряд, получим поправку на интерференцию блоков

$$\psi = \psi_0(1 - D), \quad D = \left( \bar{l}_1 \Sigma_{s1} \int G_0(E) \frac{dE}{E} \right)^{-1} \int G_0^2(E) \frac{dE}{E}. \quad (45)$$

Поправка  $D$  обычно называется поправкой Данкова—Гинзбурга, хотя, как видно, она была получена в работе ГП (конкретные вычисления по (44) были выполнены в работе [23]). Фактически в этом пункте была допущена небольшая некорректность. Правильный результат (см. [24, 25]) получится, если заменить

$$\bar{l}_1 \Sigma_{s1} \rightarrow G_1 / (1 - G_1), \quad (46)$$

где  $G_1$  — вероятность столкнуться в замедлителе для того нейтрона, который попал в замедлитель, пересекая границу блока. Соотношение (46) превращается в равенство, если для  $G_1$  применить рациональное приближение

$$G_1 = \bar{l}_1 \Sigma_{s1} / (1 + \bar{l}_1 \Sigma_{s1}). \quad (47)$$

Для тесных решеток, когда  $\bar{l}_1 \Sigma_{s1} \ll 1$ , это приближение достаточно хорошее. Но для решеток с большим шагом  $1 - G_1$  должно экспоненциально убывать с ростом  $\bar{l}_1 \Sigma_{s1}$ :

$$1 - G_1 \sim \exp(-l_{\min} \Sigma_{s1}), \quad (48)$$

где  $l_{\min}$  — минимальное расстояние между блоками. Например, если  $\bar{l} \Sigma_{s1} = 1$  и отношение объемов замедлителя и блока равно 10, то рациональное приближение в 2 раза завышает поправку; правда, сама поправка составляет всего 2%.

Поучительно сравнить результаты численного расчета величины резонансного интеграла первых уровней урана-238 с расчетом по теории ГП. Такое сравнение показывает (см., например, [25]), что главные уровни урана-238 ( $E_r \leq 100$  эВ) описываются теорией ГП с погрешностью всего в несколько процентов. Имеются, однако, уровни с большими нейтронными ширинами (например,  $E_r = 190$  эВ), для которых расхождение достигает 100%. Резонансное рассеяние на таких уровнях столь велико, что надо учитывать замедление нейтронов на уране. Максимум резонансного рассеяния смещен относительно максимума поглощения в сторону больших энергий (из-за интерференции между потенциаль-



ным и резонансным рассеянием). Если величина скачка энергии при столкновении с ядром урана больше (или равна) ширине опасной зоны (для уровня  $E_r = 190$  эВ они одного порядка), то замедление на уране должно привести к всплеску потока нейтронов ниже опасной зоны. Численные расчеты (см. [15]) подтверждают эти соображения. Ясно, что такие эффекты не учитываются теорией ГП.

Суммарная ошибка в вычислении заблокированного резонансного поглощения по теории ГП порядка 5%. Условие (26) для первого уровня и графитового замедлителя не выполняется. Тем не менее теория ГП к нему применима. Численные расчеты показывают, что при энергии вблизи первого уровня поток нейтронов в ячейке существенно зависит от координат. Однако эта зависимость имеет характер «тени», т. е. ослабление потока происходит за счет тех нейтронов, которые прошли через блок. Для справедливости теории ГП требуется однородность по пространству только тех нейтронов, которые двигаются по направлению к блоку. Такая однородность выполняется и при условии  $\Delta E_r \sim \Delta E$ . Истинное отклонение от гипотезы плоского потока должно проявиться в зависимости  $I_a$  от размеров ячейки. Для обычно используемых блоков такая зависимость заведомо меньше 1%.

Численный расчет заблокированного резонансного поглощения [25] привел к следующим значениям постоянных  $B$  и  $\alpha$  в (41):

$$B = 26,1 \pm 0,3 \pm (0,03), \quad \alpha = 0,119 \pm 0,005 \pm (0,002),$$

где ошибка связана с ошибками в параметрах резонансных уровней, а в скобках указана ошибка аналитической аппроксимации (41). Таким образом, хотя вычисление  $I_a$  отдельных уровней по теории ГП приводит к ошибкам около 5% для нижних уровней и 50—100% для уровней с большими нейтронными ширинами, аппроксимация (41), следующая из теории ГП, оказывается удивительно точной:  $\sim 0,1\%$  в зависимости от размеров блока и  $\sim 2\%$  в температурной зависимости (металлический уран,  $0,5 \text{ см} \leq \rho \leq 2,6 \text{ см}$ ,  $293 \text{ К} \leq T \leq 800 \text{ К}$ ).

Дальнейшее развитие теории шло по следующим направлениям: 1) рассмотрение более сложной геометрии: полый цилиндр, кластер, наличие замедлителя в блоке; 2) отказ от второго предположения в теории ГП, т. е. учет рассеяния и замедления в блоке; 3) широкое использование «теоремы эквивалентности», связывающей резонансное поглощение в гомогенном и гетерогенном случаях (см. формулы (21) и (43)); 4) развитие численных методов (см. обзоры [19, 20], а также [15]).

## 5. О НЕКОТОРЫХ ДРУГИХ РАБОТАХ

### И. Я. ПОМЕРАНЧУКА

Из результатов работы [2] следовало, что надо рассматривать неводородные замедлители, например графит. Его свойства были плохо известны. Для измерения длины замедления (возраста) и длины диффузии проводились «экспоненциальные опыты». Теория их была построена И. Я. Померанчуком в сотрудничестве с И. И. Гуревичем. Опыты состояли в измерении спада нейтронного потока вдоль оси призмы из графита, если в какой-то точке на оси призмы помещен источник нейтронов. Эти опыты могли быть поставлены в то время, когда еще не было накоплено достаточного количества чистого графита и урана, чтобы построить реактор.

И. Я. Померанчук показал, что спад резонансных нейтронов происходит по закону

$$n(z) \sim \exp(-z^2/4\tau), \quad (49)$$

где  $z$  — расстояние от источника до точки наблюдения. Измерив  $n(z)$  с помощью детектора, имеющего сильный резонанс при энергии  $E$ , можно определить  $\tau(E)$ .

Поток тепловых нейтронов спадает по другому закону (при больших  $z$ ):

$$\Phi(z) \sim \exp(-\sqrt{(\pi/a)^2 + (\pi/b)^2 + L^{-2}z}), \quad (50)$$

где  $a, b$  — размеры призмы в направлении, перпендикулярном оси  $z$ ;  $L$  — длина диффузии тепловых нейтронов.

Аналогичные опыты и расчеты в США производил Ферми. Впоследствии такие опыты были заменены опытами с импульсным источником, они имеют большую точность.

Другой раздел теории, о котором надо упомянуть, — это возрастная теория замедления. И. Я. Померанчук показал [5], что возрастное приближение справедливо не только для тяжелых ядер, когда изменение энергии нейтрона при столкновении весьма мало, но также и для легких ядер, таких, как углерод, дейтерий. Для простой воды возрастное приближение не обладает хорошей точностью, главным образом потому, что при больших энергиях сечение рассеяния на протоне мало и нейтрон «проскакивает» почти всю длину замедления в первых столкновениях.

И. Я. Померанчуку принадлежит также условие критичности в возрастном приближении. Уравнения возрастного приближения имеют следующий вид: плотность замедления удовлетворяет уравнению

$$\Delta n(r, \tau) = \partial n(r, \tau) / \partial \tau \quad (51)$$

с начальным условием  $n(r, 0) = (k/T) \Phi(r)$ , где  $k$  — коэффициент размножения;  $T$  — время жизни теплового нейтрона;  $\Phi(r)$  —

поток тепловых нейтронов, подчиняющийся уравнению

$$D\Delta\Phi(r) - \Phi(r)/T = -\kappa(r, \tau_T), \quad (52)$$

где  $D$  — коэффициент диффузии;  $\tau_T$  — возраст нейтронов, замедлившихся до тепловой энергии.

Условие критичности легче всего получить, сделав фурье-преобразование уравнений (51), (52). В качестве условия существования ненулевого решения получим

$$k = (1 + \kappa^2 L^2) \exp(\kappa^2 \tau_T), \quad L^2 = DT, \quad (53)$$

где  $\kappa^2$  — квадрат волнового вектора. Эта формула независимо была получена Ферми, ее следует называть формулой Померанчука—Ферми. Таким образом, решение может содержать фурье-компоненты только с  $\kappa$ , удовлетворяющим условию (53). Например, для плоского реактора

$$\Phi(x) = A \cos \kappa x.$$

Граничные условия  $\Phi(\pm H/2) = 0$  дают размер реактора  $H = \pi/\kappa$ . При  $\kappa^2 \tau_T \ll 1$ ,  $\kappa^2 L^2 \ll 1$  уравнение (53) переходит в формулу одногруппового приближения

$$\kappa^2 = (k - 1)/M^2, \quad M^2 = L^2 + \tau_T,$$

которое использовалось до работы И. Я. Померанчука.

Формула (53) долгое время весьма широко применялась. По мере развития вычислительной техники возрастное приближение заменяется на многогрупповое. Это приближение удобнее для численных расчетов и при большом числе групп точнее возрастного.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Здесь изложены наиболее существенные разделы теории ядерных реакторов, в разработке которых участие И. Я. Померанчука было решающим. В теории резонансного поглощения, одного из главных эффектов, определяющих критичность реактора, ему принадлежат основополагающие работы, которые не потеряли своего значения до настоящего времени. Гетерогенная теория реактора, первоначально казавшаяся несколько академической, в настоящее время широко используется в практических расчетах. Эта теория позволяет получать детальную информацию о распределении энерговыделения в реакторе, которую в гомогенном приближении либо невозможно получить, либо она не будет обладать достаточной точностью.

\* \* \*

Все, имевшие счастье работать и общаться с И. Я. Померанчуком в те далекие годы, с благодарностью вспоминают об атмосфере интенсивного творческого поиска, которая не покидала его ни на минуту и передавалась хотя бы частично его сотрудникам.

\* \* \*

Автор признателен А. И. Ахизеру, И. И. Гуревичу и Л. Б. Окуню за весьма ценные замечания.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Зельдович Я. Б., Харитон Ю. Б. // ЖЭТФ. 1939. Т. 9, вып. 12. С. 1425.
2. Зельдович Я. Б., Харитон Ю. Б. // Там же. 1940. Т. 10, вып. 1. С. 29.
3. Зельдович Я. Б. Избр. тр. Частицы, ядра, Вселенная. М.: Наука, 1985. 463 с.
4. Ахизер А. И., Померанчук И. Я. Теория нейтронных мультиплицирующих систем // Отчет ИТЭФ. М., 1947.
5. Ахизер А. И., Померанчук И. Я. Некоторые вопросы теории ядра. 2-е изд. М.: Гостехиздат, 1950. 316 с.
6. Гуревич И. И., Померанчук И. Я. Теория резонансного поглощения в гетерогенных системах. Реакторостроение и теория реакторов // Докл. сов. делегации на Междунар. конф. по мирному использованию атомной энергии. М.: Изд-во АН СССР, 1955. Т. 5. С. 557.
7. Померанчук И. Я. Собр. науч. тр. М.: Наука, 1972. Т. 1. 360 с.
8. Галанин А. Д. Теория ядерных реакторов на тепловых нейтронах. М.: Атомиздат, 1957. 358 с.
9. Фейнберг С. М., Шихов С. Б., Троянский В. Б. Теория ядерных реакторов. М.: Атомиздат, 1978. Т. 1. 397 с.
10. Вейнберг А., Вигнер Е. Физическая теория ядерных реакторов: Пер. с англ. М.: Изд-во иностр. лит., 1961. 732 с.
11. Галанин А. Д. Теория гетерогенного реактора. М.: Атомиздат, 1971. 246 с.
12. Галанин А. Д., Горлин Б. З. // Атом. энергия. 1974. Т. 36, вып. 2. С. 125.
13. Батъ Г. А. Расчеты гетерогенных реакторов с небольшим числом блоков. Реакторостроение и теория реакторов. // Докл. сов. делегации на Междунар. конф. по мирному использованию атомной энергии. М.: Изд-во АН СССР, 1955. Т. 5. С. 199.
14. Галанин А. Д. Критические размеры гетерогенного реактора с малым числом блоков // Там же. С. 236.
15. Кочуров Б. П. Численные методы в теории гетерогенного реактора. М.: Атомиздат, 1980. 112 с.
16. Кочуров Б. П., Малофеев В. М. // Атом. энергия. 1980. Т. 48, вып. 6. С. 387.
17. Городков С. С. Препр. ИАЭ № 2251. М., 1973.
18. Лалетин Н. И., Ельшин А. Б. // Атом. энергия. 1977. Т. 43, вып. 4. С. 247.
19. Дреснер Л. Резонансное поглощение в ядерных реакторах: Пер. с англ. М.: Атомиздат, 1962. 135 с.
20. Лукьянов А. А. Замедление и поглощение резонансных нейтронов. М.: Атомиздат, 1978. 360 с.
21. Егизаров М. Б., Дикарев В. С., Мадеев В. Г. // Измерение резонансного поглощения в уран-графитовой решетке: Сес. АН СССР по мирному использованию атомной энергии, 1—5 июля 1955 г. М.: Изд-во АН СССР, 1955. С. 53.

22. *Hellstrand E.* // Reactor physics in the resonance and thermal regions. MIT press, 1966. Vol. 2. P. 151.  
 23. *Петров Ю. В.* // Атом. энергия. 1957. Т. 2, вып. 4. С.357.  
 24. *Bell G. I.* // Nucl. Sci. Eng. 1959. Vol. 5, N 2. P. 138.  
 25. *Галанин А. Д.* Введение в теорию ядерных реакторов на тепловых нейтронах М.: Энергоатомиздат, 1984. 416 с.

Г. Н. Кулипанов, А. Н. Скринский  
 СИНХРОТРОННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ  
 И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ

Магнитотормозное (синхротронное) излучение заинтересовало И. Я. Померанчука в 1938 г. как возможная причина ограничения энергии электронов и позитронов, доходящих из космоса к Земле сквозь ее магнитосферу. Работа [1] ознаменовала начало изучения астрофизического аспекта магнитотормозного излучения. В ней было получено удобное выражение для погонных потерь энергии на синхротронное излучение при движении во внешнем магнитном поле и было показано, что вследствие излучения в магнитном поле Земли спектр поступающих в атмосферу первичных электронов ограничивается энергиями порядка  $10^{17}$  эВ. В дальнейшем было обнаружено, что именно это излучение определяет видимое и рентгеновское свечение многих космических объектов; оно служит важным источником астрофизической информации.

Следующая работа И. Я. Померанчука в этой области [2], выполненная совместно с Д. Д. Иваненко в 1944 г., посвящена влиянию синхротронного излучения на работу циклического ускорителя — бетатрона — и непосредственно связана с решением атомной проблемы. В этой работе было показано, что синхротронное излучение приводит к установлению предела энергии электронов, ускоряемых в бетатроне. Для предельной энергии была получена формула из равенства силы радиационного торможения и ускоряющей силы электрического вихревого поля, были сделаны оценки, показывающие, что предельные энергии бетатронов лежат в области  $\sim 5 \cdot 10^8$  эВ.

В работе [3], выполненной вместе с Л. А. Арцимовичем в 1945 г., изучены угловое и спектральное распределение синхротронного излучения. Показано, что вся энергия излучения сосредоточена в плоскости орбиты (радиуса  $R$ ) в области углов порядка  $\theta \sim m_e c^2/E = 1/\gamma$ , а максимум спектрального распределения лежит в области волн  $\lambda \sim R/\gamma^3$ . В этой работе впервые рассмотрен вопрос об интерференции излучения отдельных электронов друг

с другом, проанализированы также пределы, в которых излучение пучка есть просто некогерентная сумма излучений составляющих его электронов, и намечены изменения, вносимые взаимодействием электронов между собой. Интересно отметить связь таких эффектов корреляции положения излучающих электронов с современными работами по когерентной генерации коротковолнового излучения электронными пучками высокой энергии (так называемые лазеры на свободных электронах).

В этой же работе [3] рассмотрены дополнительные эффекты влияния синхротронного излучения на ускорение электронов в бетатроне, определены величины сжатия орбиты под влиянием излучения и с учетом изменения поперечных фокусирующих сил, получена формула для предельной энергии электронов в бетатроне, которая примерно в 2 раза меньше по сравнению с полученной в [2].

Результаты всех своих работ, касающихся излучения релятивистских электронов в магнитном поле, И. Я. Померанчук изложил в докладе на сессии ОФМН АН СССР 20 марта 1946 г., краткое содержание которого было опубликовано в [4]. Примерно аналогичные исследования в то же время в связи с американской атомной программой были выполнены Ю. Швингером [5, 6].

В дальнейшем были рассчитаны характеристики излучения для движения в периодически меняющемся вдоль пути магнитном поле [7] — так называемый ондуляторный случай. Затем в рамках классической электродинамики было изучено излучение в произвольных внешних полях [8, 9].

Большое внимание уделялось очень важному практическому вопросу — исследованию влияния синхротронного излучения на движение электронов и позитронов в циклических ускорителях и накопителях (радиационное охлаждение электронных пучков в их орбитальном и спиновом движении), т. е. именно тому кругу вопросов, в котором пионером был И. Я. Померанчук.

Было обнаружено и много интересных и практически важных эффектов квантовой природы. Квантованность излучения приводит к растущей с энергией электронов орбитальной и спиновой диффузии, конкуренция которой с радиационным охлаждением определяет установившиеся орбитальные и поляризационные характеристики пучков в накопителях. В последнее время экспериментально достижимые характеристики пучков проектируемых линейных коллайдеров подходят к тому уровню, когда квазиклассические расчеты становятся уже полностью неприменимыми, и в частности радиационные потери на единицу длины пути определяются уже качественно другой формулой, чем была получена в свое время И. Я. Померанчуком.

Но использование синхротронного излучения для формирования пучков высокой энергии (а также для наблюдения за этими светящимися пучками) в интересах ядерной физики и физики эле-

ментарных частиц далеко не исчерпывает область его практического применения. Все большее значение приобретает использование электронных накопителей в качестве источников электромагнитного излучения в диапазоне от ультрафиолетового до жесткого рентгеновского с интенсивностью и особенно яркостью, на много порядков превышающими характеристики любых других имеющихся источников. Использование синхротронного излучения в течение последнего десятилетия (см., например, [10]) показало, что, подобно тому как эксперименты на электрон-позитронных встречных пучках поставляют сейчас значительную часть всей информации в физике элементарных частиц, эксперименты с синхротронным излучением уже дают существенный вклад в развитие многих областей науки (атомная, молекулярная физика, физика твердого тела, изучение катализа, материаловедение, биофизика). Интенсивно развиваются новые технологии, основанные на использовании синхротронного излучения.

В настоящей статье дана характеристика возможностей источников синхротронного излучения (СИ) и рассмотрены пути и пределы их дальнейшего совершенствования, а также кратко рассмотрены некоторые области применения этого класса источников, причем основное внимание уделено тем вопросам, в которых применение СИ открывает принципиально новые возможности.

## 2. ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

### 2.1. Качественные характеристики синхротронного излучения одиночного электрона

Рассмотрим излучение ультрарелятивистского электрона ( $\gamma = E/(mc^2) \gg 1$ , а в интересующем нас случае даже  $\gamma > 100$ , где  $E$  — энергия электрона,  $mc^2 \approx 0,5$  МэВ — его энергия покоя), движущегося в некотором магнитном поле (пусть сложной конфигурации) вблизи одной замкнутой траектории. Именно такая ситуация характерна для интересующих нас циклических ускорителей и накопителей.

Пусть на достаточно длинном участке траектория электрона близка к окружности радиуса  $R$ . Тогда излучение будет сконцентрировано вблизи плоскости орбиты (основная мощность сконцентрирована в угле порядка  $\psi_{xz} \sim 1/\gamma$ ). В точку наблюдения, расположенную в этой плоскости, излучение приходит по касательной, проведенной к траектории из этой точки. Длина участка траектории, дающего основной вклад в мощность излучения в выбранной точке наблюдения, — длина формирования излу-

ния — будет порядка

$$L_{\phi} \approx R/\gamma = mc^2/(eH),$$

где  $e$  — заряд электрона;  $H$  — магнитное поле в точке излучения.

Электромагнитная волна, излученная электроном при однократном прохождении, будет приходить в точку наблюдения в виде всплеска электрического и магнитного поля, причем длительность всплеска оценивается следующим образом:

$$\Delta T_c = L_{\phi}/v - L_{\phi}/c \approx R/(c\gamma^3) \approx mc/(\gamma^2 eH),$$

где  $v$  — скорость электрона;  $c$  — скорость света.

Соответственно спектр излучения будет иметь максимум при длине волны

$$\lambda_c = R/\gamma^3.$$

Отметим, что угловой расходимости излучения  $\psi \sim 1/\gamma$  на длине волны  $\lambda \sim R/\gamma^3$  соответствует «эффективный» поперечный размер источника, равный по порядку величины

$$\Delta_{1z} \sim \Delta_{1x} \sim R/\gamma^2.$$

Электрическое и магнитное поле в максимуме всплеска будет

$$E_{\max} \approx 4\gamma^4 e/(RL),$$

где  $L$  — расстояние от точки наблюдения до точки излучения. Соответственно плотность потока энергии излучения одного электрона при периодическом движении, оцениваемая как среднее по времени от  $cE^2/4\pi$  ( $c$  — скорость света), будет равна

$$I_1 = [e^4/(m^2 c^3)] H^2 \gamma^4 / L^2.$$

Плотность потока энергии  $I_1$  определяет освещенность образца на расстоянии  $L$  от точки излучения.

Полная интенсивность излучения по всем направлениям

$$P_1 = I_1 S \approx e^4 H^2 \gamma^2 / (m^2 c^3) = r_e^2 H^2 \gamma^2 c,$$

где  $S = L^2/\gamma^2$  — суммарная площадь участка, освещаемого нормально падающим синхротронным излучением и находящегося на расстоянии  $L$  от точки излучения ( $r_e = e^2/mc^2$ ).

Важной характеристикой является также величина, определяющая потери энергии электрона на один оборот. Если магнитное поле на участках излучения постоянно, потери энергии за оборот равны

$$\Delta W_{\text{об}} = \frac{4\pi e^4 H^2 \gamma^2}{3m^2 c^3} R = \frac{4\pi e^2}{3R} \gamma^4.$$

Полное число квантов всех энергий, излучаемых одним электроном за оборот, равно

$$N_{1\Sigma} \approx W_{\text{об}} \lambda_c / (\hbar c) \approx 2\pi e^2 / (\hbar c) = 2\pi \alpha \gamma,$$

где  $\hbar$  — постоянная Планка;  $\alpha = 1/137$  — постоянная тонкой структуры.

При однократном пролете электрона спектр излучения в точке наблюдения будет, естественно, сплошным. Для интересующей нас области длин волн  $\lambda \ll R$  последовательные прохождения электрона в практических ситуациях являются нескоррелированными и спектр при «периодическом» движении излучающего электрона останется сплошным. Интенсивность излучения в длинноволновой части спектра при  $\lambda > \lambda_c$  медленно падает как  $(\lambda_c/\lambda)^{1/2}$ , в коротковолновой части спектра при  $\lambda < \lambda_c$  наблюдается быстрый экспоненциальный спад  $\sim \sqrt{\lambda_c/\lambda} \exp(-\lambda_c/\lambda)$ .

Следует заметить, что угловая расходимость излучения с  $\lambda_1 > \lambda_c$  определяется значением энергии, при которой спектр излучения имел максимум на этой длине волны  $\psi_{\lambda_1} = 1/\gamma_1$ , где  $\gamma_1 = (R/\lambda_1)^{1/2}$ , поэтому  $\psi_{\lambda} \sim (\lambda/R)^{1/2}$ .

Интервал углов, в пределах которых излучение от одного электрона приходит в точку наблюдения, после усреднения во времени может быть охарактеризован введением «эффективного» радиального размера, равного

$$\Delta_{1x} \sim R\psi_{\lambda}^2.$$

По вертикальному направлению ситуация более сложная: если точка наблюдения находится в плоскости орбиты, интервал углов прихода излучения в точку наблюдения равен нулю; при отклонении от этой плоскости он линейно возрастает и соответствует вертикальному размеру

$$\Delta_{1z} \sim R\psi_{\lambda}\zeta/L,$$

где  $\zeta$  — отклонение от плоскости орбиты;  $L$  — расстояние от точки излучения до точки наблюдения;  $\psi_{\lambda}$  — угловая расходимость СИ на длине волны  $\lambda$ . Поскольку основная мощность излучается в вертикальном угле  $\zeta/L = \psi_{\lambda}$ , «эффективный» вертикальный размер оказывается равным также  $R\psi_{\lambda}^2$ .

Вектор напряженности электрического поля в точке наблюдения, лежащей в плоскости орбиты, перпендикулярен к касательной, проведенной из точки наблюдения к траектории электрона, и лежит в плоскости орбиты; магнитное поле волны перпендикулярно к этой плоскости, т. е. излучение в плоскости орбиты линейно поляризовано. Если точка наблюдения выходит из плоскости орбиты, излучение становится эллиптически поляризованным. Направление вращения векторов поля излучения совпадает с видимым из точки наблюдения направлением вращения электрона. Поэтому по разные стороны плоскости орбиты излучение имеет левую и правую эллиптическую поляризацию.

## 2.2. Излучение электрона

в периодически меняющемся вдоль пути магнитном поле

Магнитное поле может и не быть постоянным вдоль траектории движения электрона. Весьма эффективным способом повышения интенсивности СИ является постановка магнитных «змеек», создающих знакопеременное периодическое магнитное поле с периодом  $\lambda_0$  на участке траектории длиной  $L_{зм} = N\lambda_0$  ( $N$  — число элементов периодичности). В простейшем виде поле в такой змейке

$$H(z) = H_0 \sin 2\pi z/\lambda_0.$$

Независимо от параметров змейки и энергии электронов потери энергии электронами в змейке  $\Delta W_{зм}$  определяются точно так же при прохождении длины  $L_{зм}$  в магнитном поле:

$$\Delta W_{зм} = [e^4 \gamma^2 / (m^2 c^4)] \overline{H_0^2} L_{зм} = r_e^2 \overline{H_0^2} \gamma^2 L_{зм}.$$

Спектральное и угловое распределения излучения из змейки существенно зависят от соотношения между максимальным углом поворота электрона в поле змейки  $\alpha_0 = \lambda_0 / (2\pi R) = \lambda_0 e H_0 / (2\pi \mu c^2)$  и углом излучения электрона из одиночного магнита  $\psi_{xz} \sim 1/\gamma$ . Отношение этих величин принято называть параметром модуляции

$$K = \alpha_0 \gamma = \lambda_0 e H / (2\pi \mu c^2),$$

который и определяет режим работы змейки.

### Ондуляторный режим

При малых полях  $K \ll 1$ , поперечное движение электронов в змейке является нерелятивистским, величиной модуляции продольной скорости электрона при движении в змейке можно пренебречь. Электромагнитная волна, излученная электроном при однократном прохождении змейки, приходит в точку наблюдения, расположенную вдоль оси змейки в виде пуга всплесков электрического (магнитного) поля, отстающих на время

$$T_1 = \lambda_0 / v_{\parallel} - \lambda_0 / c,$$

где  $v_{\parallel}$  — скорость электрона вдоль оси змейки. Благодаря искривленной траектории в змейке продольная скорость электрона вдоль оси  $z$  будет равна  $v_{\parallel} = v(1 - \alpha_0^2/4)$ , поэтому

$$T_1 = \frac{\lambda_0}{v(1 - \alpha_0^2/4)} - \frac{\lambda_0}{c} = \frac{\lambda_0}{2\gamma^2 c} \left(1 + \frac{\alpha_0^2 \gamma^2}{2}\right).$$

Соответственно в точке наблюдения на оси  $z$  регистрируется излучение с длиной волны

$$\lambda_{\text{онд}} = T_1 c = \frac{\lambda_0}{2\gamma^2} \left(1 + \frac{\alpha_0^2 \gamma^2}{2}\right) = \frac{\lambda_0}{2\gamma^2} \left(1 + \frac{K^2}{2}\right).$$

К точке наблюдения, расположенной над некоторым углом  $\theta$  к оси змейки, источник излучения приближается со скоростью  $v_{\parallel} \cos \theta$ . В этой точке регистрируется излучение с длиной волны

$$\lambda_{\text{онд}} = (\lambda_0/2\gamma^2) (1 + K^2/2 + \gamma^2\theta^2).$$

Монохроматичность излучения в ондуляторном случае определяется длительностью дуга и соответственно числом излучателей:

$$\Delta\lambda/\lambda_{\text{онд}} \sim 1/N.$$

Угловая расходимость ондуляторного излучения по порядку величины составляет

$$\Delta\psi_{0z} \sim \Delta\psi_{0x} \sim \sqrt{\lambda L_{\text{онд}}} \sim \sqrt{1 + K^2/2}/\gamma \sqrt{N}.$$

Этой угловой расходимости ондуляторного излучения соответствует «эффективный» поперечный размер источника, равный

$$\Delta_{1z} \sim \Delta_{1x} \sim \sqrt{\lambda L_{\text{онд}}}.$$

Полное число квантов, излучаемых одним электроном при пролете через ондулятор:

$$N_{1 \text{ онд}} = \frac{\Delta W_{\text{эм}} \lambda_{\text{онд}}}{\hbar c} \sim \frac{1}{137} N (\alpha_0 \gamma)^2.$$

Излучение из ондулятора с поперечным магнитным полем линейно поляризовано, излучение из ондулятора со спиральным магнитным полем — циркулярно поляризовано.

*Режим генерации гармоник ондуляторного излучения ( $K \geq 1$ )*

При увеличении магнитного поля в змейке величина  $K$  увеличивается, поперечное движение электрона становится релятивистским, модуляция продольной скорости электрона вдоль оси змейки становится существенной. В этом случае в спектре излучения появляются гармоники ондуляторного излучения ( $i = 1, 2, 3, \dots$ )

$$\lambda_i = \frac{\lambda_0}{2i\gamma^2} \left( 1 + \frac{K^2}{2} + \gamma^2\theta^2 \right).$$

Параметр  $K$  определяет отношение двух характерных времен для излучения из змейки при большом поле.

Первое время — это длительность всплеска электрического (магнитного) поля из одиночного магнита, регистрируемого наблюдателем:

$$\Delta T_{\text{СИ}} \sim mc/(\gamma^2 e H_0).$$

Второе время — это интервал между всплесками электрического (магнитного) поля, излученных из соседних магнитов:

$$\Delta T_{\text{онд}} = \frac{\lambda_0}{2\gamma^2 c} \left( 1 + \frac{K^2}{2} + \gamma^2\theta^2 \right).$$

Отношение этих времен

$$\Delta T_{\text{онд}}/\Delta T_{\text{СИ}} \sim K (1 + K^2/2)$$

и определяет число гармоник, вносящих существенный вклад в полную мощность излучения из змейки.

*Синхротронный режим ( $K \gg 1$ )*

В области больших значений магнитного поля ( $K \gg 1$ ) характеристики излучения с данного участка траектории определяются локальной кривизной траектории. Характеристики потока СИ в точке наблюдения получаются за счет суммирования потоков с разных участков траектории.

### 2.3. Когерентное синхротронное излучение

Если в накопителе движется  $N$  электронов, то в обычной ситуации на существующих накопителях относительные положения электронов можно считать скоррелированными с точностью лишь до длины сгустков, в которые собраны электроны (порядка 1 см или больше). Излучение в интересующей нас коротковолновой области при этом некогерентно, и потоки энергии отдельных электронов  $I_1$  просто складываются, т. е.  $I_N = NI_1$ . Однако если сгруппировать электроны, хотя бы на коротком участке орбиты, в сгустки длиной 10—0,1 мкм, то в видимой и ультрафиолетовой области излучение будет когерентно и поток энергии от  $N$  электронов  $I_N = N^2 I_1$  будет в  $N$  раз больше, чем обычное синхротронное излучение. Учитывая, что  $N$  очень велико — порядка  $10^8$ — $10^{11}$ , задача представляется весьма интересной.

Когерентным синхротронным излучением интенсивно занимались в 50-е годы. Однако открытие лазеров, с одной стороны, и плохие параметры электронных пучков 50-х годов — с другой, остановили развитие этих работ. Получение когерентного излучения в инфракрасной области с помощью «лазера на свободных электронах» (ондулятор, окруженный оптическим резонатором), установленного на пучке линейного ускорителя [11], стимулировало рассмотрение возможностей группировки электронов в накопителе в сгустки длиной 10—0,1 мкм. Идея «оптического клистрона» [12] позволила получить когерентное излучение на существующих накопителях в области длин волн от инфракрасной до ультрафиолетовой [13].

### 3. ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОТОКОВ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Для большинства приложений основной потребительской характеристикой синхротронного излучения является яркость источника ( $B_{\lambda}$ ) в данном участке спектра, равная числу фотонов,

излучаемых в единицу времени с единицы площади источника в единицу телесного угла:

$$B_\lambda = \dot{N}(\lambda)/S\Omega,$$

где  $\dot{N}$  — спектральный поток фотонов от источника излучения;  $S$  — площадь источника излучения;  $\Omega$  — телесный угол источника излучения.

Яркость существенно зависит от размера ( $\sigma_{x,z}$ ) и угловых разбросов ( $\theta_{x,z}$ ) электронного пучка. Поскольку

$$\sigma_{x,z}\theta_{x,z} = \varepsilon_{x,z},$$

где  $\varepsilon_{x,z}$  — фазовый объем электронного пучка, то наиболее важным условием повышения яркости является минимизация фазового объема электронного пучка, определяемого в накопителе электронов равновесием между квантовым возбуждением и радиационным затуханием.

Кроме того, для повышения яркости источника магнитная структура накопителя электронов должна включать достаточно длинные промежутки для постановки змеек и ондуляторов, на азимуте которых электронный пучок должен иметь поперечные размеры и угловые разбросы, оптимальные для постановки змеек и ондуляторов. В центре промежутков

$$\sigma_{x,z} = \sqrt{\varepsilon_{x,z}\beta_{x,z}}, \quad \theta_{x,z} = \sqrt{\varepsilon_{x,z}/\beta_{x,z}},$$

где  $\beta_{x,z}$  — локальное эффективное фокусное расстояние магнитной системы. Учитывая протяженность источника, эффективные поперечные размеры пучков излучения из змеек и ондуляторов:

$$\Delta_{x,z} = \sqrt{\sigma_{x,z}^2 + (\lambda L + \theta_{x,z}^2 L^2)}.$$

Угловая расходимость пучка СИ из змеек и ондуляторов определяется угловой расходимостью излучения и угловым разбросом электронов в пучке

$$\Delta_{x'}, \Delta_{z'} = \sqrt{\psi_\lambda^2 + \theta_{x,z}^2}.$$

Поэтому для оптимизации параметров сильнополевой змейки на максимум яркости необходимо сжать размеры электронного пучка в месте постановки змейки за счет уменьшения  $\beta_{x,z}$  в точке излучения аналогично тому, как это делается в местах взаимодействия для увеличения светимости встречных пучков (промежутки с малой  $\beta$ -функцией); имеет смысл уменьшать размер до тех пор, пока угловой разброс в пучке электронов не превысит угловую расходимость синхротронного излучения. Учитывая это, в месте постановки сильнополевой змейки должно быть

$$\beta_{x,z} \sim L_{эм}.$$

Эффективность применения змеек в ондуляторном режиме сильно зависит от углового разброса электронов в пучке. Для получения пучков ондуляторного излучения с  $\Delta\lambda/\lambda \sim 1/N$  и яркостью  $B_{онд} \sim N^2$  ( $N$  — число элементов периодичности ондулятора) необходимо обеспечить на всей длине ондуляторов условие интерференции излучения от электронов, имеющих угловой разброс  $\theta_{x,z}$ :

$$L_{онд}\theta_{x,z}^2 < \lambda_{онд}/\pi.$$

Это условие приводит к требованию

$$\varepsilon_{x,z} < (\lambda_{онд}/\pi)(L_{онд}/\beta_{x,z}).$$

Соответственно промежутки для постановки ондуляторов необходимо делать с большой  $\beta_{x,z}$ -функцией. Интересно отметить, что предельная величина яркости источника, ограниченная только дифракционными эффектами, достигается в случае  $\varepsilon_{x,z} < \lambda$ . В этом случае весь поток квантов из ондулятора обладает пространственной когерентностью.

Требование минимизации фазового объема  $\varepsilon_{x,z}$  и получение в то же время оптимальных характеристик магнитной фокусирующей системы накопителя ( $\beta_{x,z}$ ) определяют магнитную структуру накопителя. Характерно, что независимо от структуры фазовый объем электронного пучка определяется энергией и одной геометрической характеристикой — углом поворота  $\varphi_M$  в дипольных магнитах суперпериода [14]:

$$\varepsilon_{x \min} \sim E^2 \varphi_M^3.$$

В накопителях — специализированных источниках СИ, кроме решения задач увеличения яркости источника, следует предусмотреть возможность более полного использования и других особенностей СИ.

Например, вывод пучка синхротронного излучения из области, где вертикальный размер расширен, а угловой разброс в пучке электронов уменьшен до величины, существенно меньшей расходимости синхротронного излучения (промежутки с большой  $\beta$ -функцией), позволит, используя геометрическое диафрагмирование пучка СИ, выделять излучение с высокой степенью линейной и круговой поляризации не только в области вакуумного ультрафиолета, но и в жесткой рентгеновской области.

Для получения временной модуляции интенсивности СИ в широком диапазоне времени ( $10^{-11}$  — 1 с) в специализированном накопителе — источнике СИ — предусматривают:

высокочастотную систему, позволяющую иметь сгустки длиной 0,1—1 см;

специальную систему синхронизации для обеспечения работы накопителя в режиме одного сгустка либо в режиме  $n$  сгустков.

следующих с интервалом времени  $\Delta T = T_{\text{обр}}/n$  ( $T_{\text{обр}}$  — время обращения частиц в накопителе).

При разработке электронных накопителей — специализированных технологических источников синхротронного излучения очень существенными аспектами становятся простота, надежность и сравнительная дешевизна. И несомненно, такие накопители могут быть много проще существующих накопителей. Правда, источники рентгеновского диапазона (длина волн порядка ангстрема и короче) останутся крупными установками, которые рационально сооружать в больших научных центрах. Источник же с верхней границей излучаемого спектра около десяти ангстрем вполне доступен для отдельных институтов, больших лабораторий и промышленных предприятий.

#### 4. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ РЕНТГЕНОВСКОЙ МИКРОСКОПИИ

Рассмотрим теперь некоторые области применения синхротронного излучения.

Появление источников рентгеновского излучения на много порядков более ярких, чем существовавшие прежде, заставляет по-новому взглянуть на возможности различных вариантов микроскопии в этом диапазоне длин волн ( $\lambda \leq 100 \text{ \AA}$ ).

Интересно отметить, что во всех вариантах рентгеновских микроскопий число полезных квантов на площадь разрешаемого элемента определяется только яркостью источника [15]:

$$\dot{N}_\gamma = B_\lambda \lambda^2 \Delta\lambda / \lambda.$$

Логически простейшим вариантом микроскопии является контактная микроскопия, основанная на использовании высокого разрешения регистраторов.

В последнее время, в основном благодаря развитию технологии рентгенолитографии, появилось достаточно большое количество рентгенорезистов — пленок различных материалов (в основном органического происхождения), скорость травления которых зависит от дозы рентгеновского излучения, поглощенной в единице объема рентгенорезиста (типичная величина — от  $10 \text{ мДж/см}^3$  до  $500 \text{ Дж/см}^3$ ). Пространственный рельеф, получаемый на рентгенорезисте после травления, можно считать с помощью сканирующего электронного микроскопа. В области мягкого рентгеновского излучения ( $\lambda \sim 5 \div 100 \text{ \AA}$ ) рентгенорезисты имеют прекрасное пространственное разрешение ( $50\text{--}200 \text{ \AA}$ ) и чувствительность, приближающуюся к чувствительности идеального детектора, когда минимальная регистрируемая доза соответствует поглощению 1—10 квантов в элементарной ячейке объема резиста, линейные размеры которой равны простран-

венному разрешению. Большая величина яркости источников синхротронного излучения позволяет получать за малые времена микрорентгенограммы с хорошим пространственным разрешением при сравнительно большой величине расстояния между объектом и регистратором, что дает возможность:

вести съемку различных образцов, в том числе биологических объектов, в специальном контейнере, имеющем достаточную однородность поглощения на рабочей длине волны;

использовать специальные кинематические затворы для снятия микрокинофильмов;

вести многоракурсную съемку образца с последующей стереоскопической интерпретацией.

Возможность выделения любой длины волны из спектра синхротронного излучения позволяет работать в области  $K$ -краев поглощения средних и тяжелых элементов ( $\lambda = 0,5 \div 20 \text{ \AA}$ ), присутствующих в образце. Разностная картина, получаемая от съемки образца точно на  $K$ -крае поглощения и чуть ниже по энергии, позволяет существенно повысить контрастность изображения по соответствующему химическому элементу.

Использование варианта проекционной микроскопии позволяет отказаться от применения регистратора с высоким разрешением, равным требуемому разрешению по образцу.

Возможность применения регистраторов с плохим разрешением позволяет перейти в проекционной микроскопии к использованию современных координатно-чувствительных детекторов (типа ПЗС-матриц) с эффективностью счета квантов, близкой к единице. Это дает возможность приблизить различаемый контраст изображения к уровню, определяемому статистическими флуктуациями. Важным достоинством является также возможность легкого включения этих регистраторов в линию с ЭВМ.

Энергетическое разрешение современных координатно-чувствительных детекторов очень слабое, поэтому для фиксирования узкого диапазона используемых длин волн необходимо применение монохроматоров. С этой точки зрения очень важным будет кажущееся сегодня возможным создание средствами полупроводниковой интегральной микроэлектроники детекторов, обладающих как достаточным координатным (число разрешаемых элементов по одному направлению  $\sim 100$ ), так и энергетическим (допустим, порядка процента) разрешением. Напомним, что уже сейчас в рентгеновском диапазоне разработаны одиночные полупроводниковые детекторы с энергетическим разрешением  $\sim 1\%$ .

Легкость включения в проекционной микроскопии регистраторов в линию с ЭВМ сильно упрощает получение сведений о поглощении образца на разных длинах волн, что позволяет по  $K$ -скачкам поглощения получить информацию о распределении средних и тяжелых элементов по образцу (с тем же пространственным разрешением  $\delta$ ).



Очень плодотворным вариантом рентгеновской микроскопии, уже осуществленным на пучке СИ, является сканирующая микроскопия. В этом варианте ограниченный диафрагмой с размером  $\delta$  поток квантов падает на близко расположенный образец и регистрируется результат взаимодействия квантов с материалом образца. Момент регистрации синхронизирован с положением диафрагмы, сканирующей образец.

Существенным преимуществом сканирующей рентгеновской микроскопии (как и сканирующей электронной микроскопии) является возможность регистрации всей гаммы эффектов взаимодействия излучения с образцом, что позволяет получать очень богатую информацию об образце.

Сравнивая возможности сканирующей рентгеновской (имеется в виду проникающий диапазон) микроскопии и родственной сканирующей электронной микроскопии, отметим лишь следующее. Рентгеновская микроскопия в отличие от электронной допускает полное разделение образца и «облучателя» по вакууму, а при регистрации рентгеновских квантов — и нахождение образца в удобных невакуумных условиях. При регистрации характеристического излучения на одинаковое число вторичных люминесцентных квантов требуется на 3—4 порядка меньшая радиационная нагрузка образца в рентгеновском случае, чем в электронном. Это полезное обстоятельство во многих случаях может иметь решающее значение.

Качественно новые перспективы открываются с появлением ярких рентгеновских источников перед рентгеновской микрофотографией [16].

Важным достоинством голографии является то, что контрастность голограммы (при оптимальном выборе опорного освещения) не зависит прямо от контрастности образца и может оставаться высокой даже для очень слабо поглощающих и слабо фазосдвигающих образцов. Центральная часть прошедшего пучка несет лишь малую долю голографической информации (о форме объекта) и часто эту часть можно просто не регистрировать. Контрастность голограммы будет понижаться лишь фоновым рассеянием на веществе образца.

Восстановление изображения образца по голограмме при наиболее естественной для рентгеновской области поквантовой регистрации разумнее всего, по-видимому, производить чистой обработкой информации на ЭВМ (с последующим при необходимости синтезом изображения). Хотя полезно иметь в виду, что при применении аналоговой регистрации вполне возможно последующее восстановление увеличенного изображения с помощью обычного оптического лазера.

## 5. ПРИМЕНЕНИЕ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ РЕНТГЕНОСТРУКТУРНОГО АНАЛИЗА

Индивидуальная микроскопия образца позволяет получить сведения о размерах и расположении каждой отдельной его детали. Если же нас интересуют характеристики целого ансамбля одинаковых (или почти одинаковых) объектов, то в зависимости от их относительного положения, изучая взаимодействие рентгеновского излучения с этими ансамблями, можно получать разнообразную и иногда весьма полную информацию об интересующих нас объектах.

В зависимости от степени упорядоченности положений изучаемых объектов меняется картина дифракции падающего на объекты рентгеновского излучения. Меняется также характер и объем информации, которую можно извлечь из этой картины.

Если изучаемые объекты расположены в образце полностью случайно, дифракционная картина так называемого диффузного рассеяния от всего образца будет просто некогерентным наложением картин рассеяния одиночными объектами. В этом случае можно получить картину распределения эффективной электронной плотности по объекту, при этом объектами могут быть отдельные атомы в газе, флуктуации плотности в жидкости, капельки эмульсий и т. д.

По мере нарастания степени упорядоченности идентичных объектов (закрепление центров, выстраивание одной из осей и т. д.) картина дифракции становится все более когерентной, с резкими переходами от сильно освещенных мест (рефлексов) к слабо освещенным, и все более информативной. При этом, однако, для высокоупорядоченных систем приходится дополнительно менять ориентацию объекта относительно падающего монохроматического излучения либо пользоваться несколькими длинами волн (в пределе сплошным спектром) с определением энергии квантов, соответствующих каждому рефлексу.

В случае идеального кристалла, построенного из полностью идентичных и одинаково расположенных элементарных ячеек, возможно определение положения каждого не слишком легкого атома.

Во всех вариантах рентгенодифракционного структурного анализа главным достоинством использования СИ являются гораздо более высокая, чем у других источников, спектральная яркость и возможность работать с любой длиной волны. Особенно большой выигрыш получается, если окажется возможным применение детекторов, одновременно регистрирующих как точку прихода кванта на детектор, так и его энергию с нужным разрешением.

При изучении периодических надмолекулярных структур, примерами которых являются многие биологические объекты,

в частности мышечные волокна, применение СИ уменьшало время экспозиции как за счет более высокой яркости, так и за счет выбора оптимальной длины волны, дающей наилучшую (по интенсивности и контрастности) дифракционную картину. Требование прозрачности объектов для употребляемого излучения заставляет использовать достаточно малые  $\lambda$ , а соответственно углы дифракции на таких структурах будут тоже малыми. Может оказаться полезной работа вблизи  $K$ -краев поглощения каких-то элементов, входящих в состав, объекта. При этом надо сравнивать дифракционные картины по обе стороны  $K$ -края.

Применение в таких экспериментах еще и современных высокоэффективных регистраторов рентгеновских квантов, включенных в линию с ЭВМ, позволяет на много порядков снизить время экспозиции и перейти, в частности, к съемкам динамики структурных перестроек живых объектов [17].

## 6. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА ОБЪЕКТОВ

**С** В последнее время рентгенофлуоресцентный анализ широко используется в чисто практических целях для определения элементного состава различных образцов, в том числе биологических объектов. Для возбуждения характеристического излучения используют рентгеновские трубки, радиоактивные изотопы или пучки заряженных частиц. В качестве детекторов применяются либо спектрографы, разлагающие излучение по длинам волн, либо полупроводниковые детекторы, имеющие хорошее разрешение по энергии (150 эВ при  $h\nu \sim 6$  кэВ).

Использование синхротронного излучения для возбуждения флуоресценции позволяет сократить время проведения экспериментов, уменьшить радиационную нагрузку образца, а также повысить чувствительность метода благодаря резкому уменьшению фона, определяемого когерентным и комптоновским рассеянием первичных фотонов на образце.

При такого рода экспериментах выгодно из непрерывного спектра СИ с помощью различного рода монохроматоров вырезать участок шириной несколько процентов с нижней границей, лежащей немного выше рабочего края поглощения. При анализе на сравнительно легкие элементы с энергией возбуждения до 15 кэВ предпочтительным может оказаться использование СИ из ондулятора без дополнительной монохроматизации.

В этом случае в первичном потоке отсутствуют фотоны с энергией характеристического излучения. Это полностью убирает фон, обусловленный когерентным рассеянием, при использовании в качестве регистратора полупроводникового детектора с энергетическим разрешением, много лучшим интервала между нижним

краем спектра падающего излучения и энергией характеристических квантов.

Естественная линейная поляризация СИ приводит к угловой анизотропии в упругом и комптоновском рассеянии.

Используя линейно поляризованное излучение для возбуждения флуоресценции, размещая детектор в плоскости электрического вектора под углом  $\theta = 90^\circ$  к направлению падения и уменьшая телесный угол регистрации детектора и размер пятна на образце, можно резко уменьшить фон, определяемый упругим и комптоновским рассеянием. В этом же случае уменьшается и фон за счет однократного брэгговского отражения от возможных кристаллических включений.

Большой запас интенсивности при использовании СИ позволяет резко уменьшить толщину образца. В этом случае можно добиться сильного подавления вторичных процессов в образце:

многократного комптоновского рассеяния, существенно уширяющего комптоновский пик, особенно в легких матрицах; тормозного излучения фотоэлектронов, дающего вклад в фоновое плато;

межэлементного возбуждения и поглощения флуоресценции, требующих межэлементной коррекции при обработке спектра.

Чувствительность метода (с потерей скорости) можно поднять, если использовать узкий спектральный интервал (меньше ширины края поглощения) падающего излучения и производить многократное сравнение энергетического спектра рассеянного излучения при возбуждении чуть ниже и чуть выше края поглощения. При этом получается также и наименьшая радиационная нагрузка на исследуемый образец.

Развитие метода рентгенофлуоресцентного элементного анализа на синхротронном излучении [18] показало следующие его достоинства:

- высокую чувствительность ( $10^{-9}$  —  $10^{-7}$  г/г);
- малый объем и вес изучаемого объекта (0,1—3 мг);
- панорамность измерения (от натрия и до конца периодической таблицы могут быть измерены концентрации всех элементов без исключения);
- неразрушающую процедуру измерения и малую радиационную нагрузку (возможность исследования процессов в биологических объектах);
- возможность измерения поверхностного и объемного распределения элементов;
- экспрессность получения результата и возможность организации массового автоматизированного элементного анализа для прикладных целей (геология, промышленность, медицина, криминалистика).

## 7. ЯДЕРНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ И БЛИЗКИЕ ВОПРОСЫ

Спектральная плотность потока квантов СИ из змеек, установленных на накопителе электронов с энергией 3—8 ГэВ, столь высока, что в пределах характерных ширин ядерных уровней, сильно связанных электромагнитными переходами с основным уровнем, на объект может падать достаточно интенсивный поток хорошо коллимированных квантов.

Основная проблема, которую необходимо решить, — выделение в полном потоке СИ ( $\Delta\lambda/\lambda \sim 1$ ) относительно весьма малого количества квантов, лежащих в спектральной ширине, соответствующей необходимому ядерному уровню ( $\Delta\lambda/\lambda \sim 10^{-10} - 10^{-15}$ ). Если решить эту проблему, то появляется возможность проводить эксперименты с любыми ядрами на интенсивном узконаправленном потоке квантов (на четыре-пять порядков большем, чем от уникально мощных источников 0,1 кюри/мм<sup>2</sup>), имеющем амплитудную модуляцию излучения с временами 0,1—1 нс и обладающем естественной поляризацией излучения [15].

Очень заманчиво получить с помощью СИ интенсивные узконаправленные пучки мёссбауэровских квантов. Возможная схема включает в себя брэгговское отражение от кристалла-монокроматора (подобно обычной схеме монохроматизации), который должен содержать ядра мёссбауэровского изотопа. При этом кристалличность структуры и наличие эффекта Мёссбауэра необходимы для сохранения направленности потока квантов, а резонансность ядерного рассеяния и использование тонкого кристалла обеспечивают преимущественное отражение полезных квантов.

Одна из первых схем выделения интенсивных узконаправленных пучков мёссбауэровских квантов 14,4 кэВ уровня железа-57, реализованная сотрудниками ИЯФ СО АН СССР и ИАЭ им. И. В. Курчатова [19], использовала:

предварительную монохроматизацию пучка СИ с помощью двухкристального монокроматора, настроенного на нужную энергию с помощью радиоактивного источника;

подавление когерентного фона с помощью чисто ядерного отражения от обогащенного изотопом железа-57 монокристалла гематита, в котором ядерная решетка в два раза больше электронной;

подавление когерентного и некогерентного фона за счет высокой поляризации пучка СИ и использования отражений от гематита с углом Брэгга, близким к 45°;

снижение некогерентного фона за счет использования анализирующего кристалла перед детектором;

выделение интересующего участка спектра излучения от гематита с помощью полупроводникового детектора и использование его временного распределения;

анализ временного распределения излучения, регистрируемого детектором.

В описанной схеме были достигнуты условия, в которых подавлен фон, обусловленный мгновенной дифракцией на электронах, диффузным и неупругим рассеянием огромного потока квантов СИ на образце. В дальнейшем [20] был выделен поток резонансных квантов и изучен его временной ход на временах 10—30 нс относительно импульса СИ.

Эти эксперименты, а также результаты, полученные недавно в HASYLAB [21], позволяют надеяться на реализацию метода ядерно-брэгговской монохроматизации рентгеновского излучения в будущем.

Использование СИ позволит, по-видимому, проводить мёссбауэровские эксперименты (все известные, а возможно, и совершенно новые) с любыми ядрами, имеющими подходящие (по энергии и ширине) уровни, с ограничениями, накладываемыми только спецификой эффекта Мёссбауэра.

## 8. ГЕНЕРАЦИЯ ИМПУЛЬСНЫХ ПУЧКОВ МЕДЛЕННЫХ ПОЗИТРОНОВ ВЫСОКОЙ ЯРКОСТИ С ПОМОЩЬЮ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Пучки медленных позитронов в последние годы широко используются для исследований в атомной физике, физике твердого тела, физике поверхности [22]. Наиболее интенсивные источники медленных позитронов получают замедлением позитронов, производимых в электрон-позитронных ливнях электронами высокой энергии на электронных ускорителях. Так, например, на хороших линейных ускорителях [23] с энергией 200 МэВ получают источники медленных позитронов  $\sim 10^6 e^+$ /импульс при длительности импульса от 10 нс до 3 мкс с частотой повторения 300 Гц.

Образование электрон-позитронных пар в поле ядра жесткими фотонами синхротронного излучения ( $E_\gamma = (1-1,5) \text{ МэВ}$ ), получаемыми с помощью сверхпроводящей змейки на накопителе с энергией 8—10 ГэВ, также может стать интенсивным источником импульсного потока медленных позитронов. Отношение сечения образования пар к полному поглощению в области энергий вблизи порога ( $E_\gamma = 1-1,2 \text{ МэВ}$ ) меняется от  $10^{-3}$  до  $10^{-1}$ . Поэтому, изменяя спектр синхротронного излучения, определяемого энергией электронов в накопителе и величиной магнитного поля в сверхпроводящей змейке, можно получать при потоке квантов синхротронного излучения  $\sim 10^{18}$  фот./( $\text{с} \cdot \text{мрад}$ ) число позитронов из мишени  $10^{15}-10^{17} e^+$ /с. При этом длительность импульса позитронов будет  $\sim 0,1-1$  нс, число позитронов в импульсе  $10^{10}-10^{12}$ , яркость позитронного источника  $10^{14}-10^{16} e^+/(см^2 \cdot \text{с} \cdot \text{ср})$ .

## 9. ПОЛУЧЕНИЕ МОЩНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ПОТОКОВ НЕЙТРОНОВ

В настоящее время для получения импульсных потоков нейтронов используют механические затворы на реакторах ( $\tau > 1$  мс), импульсные реакторы ( $\tau > 1$  мкс), пучки ускоренных электронов или протонов ( $\tau > 10$  нс). Пучки синхротронного излучения из накопителей электронов с энергией 8—10 ГэВ можно применять для генерации (порог  $\gamma$  —  $n$  реакции для  ${}^9\text{Be}^4$  1,66 МэВ) импульсного потока нейтронов длительностью  $\tau < 1$  нс [24]. Постановка сверхпроводящей змейки с полем 100 кЭ на такой накопитель позволяет получить пучки СИ непрерывной мощностью 1 МВт (поток квантов в области  $E_\gamma \sim (1,7-2)$  МэВ  $N_\gamma \sim 10^{18}$  фот./с). Число нейтронов, производимых фотонами данной энергии в мишени, определяется отношением сечения фоторождения нейтронов к полному сечению поглощения (вблизи порога рождения это число  $\sim 10^{-3}$ ). Полное число производимых нейтронов находится интегрированием этого отношения по фотонному спектру. Энергетическая зависимость поведения сечения фоторождения нейтронов вблизи порога рождения позволяет получать без замедления большое количество нейтронов малых энергий. При решении проблем, связанных с охлаждением мишени, можно иметь импульсный источник нейтронов с параметрами: энергия нейтронов ( $10^3 - 10^5$ ) эВ, число нейтронов в импульсе  $\sim 10^{10}$ , частота повторения  $10^5$  с $^{-1}$ . Длительность импульса потока нейтронов из мишени

$$\Delta\tau_n = \Delta\tau_{\text{СИ}} + \Delta l_{\perp}/v_{\text{нейтр}} + \Delta l_{\parallel}/c,$$

где  $\Delta\tau_{\text{СИ}}$  — длительность сгустка СИ;  $\Delta l_{\perp}$  — поперечный размер мишени;  $\Delta l_{\parallel}$  — продольный размер мишени. Малая расходимость пучка СИ позволяет использовать для этих целей мишень малых размеров ( $0,1 \times 10 \times 10$ ) см $^3$ . При этом в области энергий  $10^3 - 10^5$  эВ длительность импульса потока нейтронов из мишени будет меньше 1 нс, что позволит использовать времяпролетную монохроматизацию с разрешением  $\sim 10^{-3}$  на малых пролетных базах (5—10 м).

Малый размер источника нейтронов делает очень высокой яркость источника ( $10^{14}$  нейтр./с·см $^2$ ·ср), что позволяет использовать кристаллические монохроматоры для брэгговской монохроматизации нейтронов. При этом монохроматизацию  $\sim 10^{-3}$  можно получать, располагая монохроматор на расстоянии 1—2 м от источника.

Кроме того, такой источник нейтронов создает достаточно плотную ( $\sim 10^{10}$  см $^{-3}$ ) импульсную мишень из свободных нейтронов, синхронно появляющуюся с пучком электронов и  $\gamma$ -квантов. Это позволяет говорить о постановке экспериментов по  $\gamma$ - $n$  и  $e^{\mp}$ - $n$ -рассеянию со светимостью  $\sim 10^{29}$  см $^{-2}$ ·с $^{-1}$ .

## 10. ПОЛУЧЕНИЕ ИНТЕНСИВНЫХ ПУЧКОВ ПОЛНОСТЬЮ ИОНИЗОВАННЫХ (ГОЛЫХ) АТОМНЫХ ЯДЕР ТЯЖЕЛЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Генерация пучков СИ мощностью 1 МВт с энергией квантов порядка  $K$ -края поглощения тяжелых элементов ( $E_\gamma^k \sim 10^2$  кэВ) откроет возможность создания источников полностью ионизованных (голых) ядер этих элементов, основанных на ионизации внутренних  $K$ - и  $L$ -уровней. Большая величина сечения ионизации  $\gamma$ -квантами, превышающая в  $10^2 - 10^3$  раз, сечение ионизации электронами, и возможность использования оптимального спектра излучения делают более предпочтительным вариант применения СИ даже по сравнению с оптимальным вариантом применения электронных пучков с рекуперацией [25]. Применение СИ для создания источника полностью ионизованных (голых) ядер обладает и другими преимуществами (отсутствие свободных электронов, легкость получения сверхвысокого вакуума, простота использования ловушек специальной конструкции, необходимых для удержания и накопления ядер и т. д.).

Сложность и уникальность такого типа источников полностью ионизованных (голых) ядер в какой-то мере адекватны открываемым экспериментальным возможностям, так как соударение двух таких ядер, ускоренных до энергии 5—10 МэВ на нуклон, позволяет получать промежуточные ядра с зарядом, превышающим критический ( $\alpha Z > 1$ ,  $\alpha = 1/137$ ). Это дает возможность экспериментального исследования сверхсильных электрических полей и открывает новые пути проверки квантовой электродинамики.

Следует заметить, что получение не полностью ионизованных ( $n = 10 - 20$ ) атомов тяжелых элементов возможно при использовании менее мощных пучков СИ ( $P \sim 1$  кВт,  $h\nu \sim 30$  кэВ) при ионизации только  $L$ -уровня. Такие интенсивные ускоренные пучки ионов можно эффективно применять, например, для синтеза сверхтяжелых элементов. Постановка таких экспериментов вблизи от накопителей — источников СИ — может оказаться, кроме того, очень удобной и в связи с уникальными возможностями, которыми обладает СИ при использовании его в качестве источника возбуждения при рентгенофлуоресцентном способе элементного анализа.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Примеры использования синхротронного излучения для решения ряда физических задач, рассмотренные в данной статье, убедительно показывают, как развитие идей И. Я. Померанчука создает принципиально новые возможности для различных исследовательских и прикладных направлений.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Померанчук И. Я. // ЖЭТФ. 1939. Т. 9. С. 915; J. Phys. USSR. 1940. Vol. 2. P. 65.
2. Иваненко Д. Д., Померанчук И. Я. // Докл. АН СССР. 1944. Т. 44. С. 343; Phys. Rev. 1944. Vol. 65. P. 343.
3. Арцимович Л. А., Померанчук И. Я. // ЖЭТФ. 1946. Т. 16. С. 379; J. Phys. USSR. 1945. Vol. 9. P. 267.
4. Померанчук И. Я. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1946. Т. 10. С. 316.
5. Schwinger J. // Phys. Rev. 1946. Vol. 70. P. 798.
6. Schwinger J. // Ibid. 1949. Vol. 75. P. 1912.
7. Гинзбург В. Л. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1947. Т. 11. С. 165.
8. Байер В. Н., Катков В. М., Страроженко В. М. // ЖЭТФ. 1972. Т. 63. С. 2121.
9. Алферов Д. Ф., Башмаков Ю. А., Бессонов Е. Г. // ЖЭТФ. 1972. Т. 42. С. 1921; Тр. ФИАН СССР. 1975. Т. 80. С. 100.
10. Синхротронное излучение в ИЯФ СО АН СССР; [Библиогр. указ.]. Новосибирск, 1986.
11. Elias L. R. et al. // Phys. Rev. Lett. 1976. Vol. 36. P. 717.
12. Винокуров Н. А., Скринский А. Н. Препр. ИЯФ СО АН СССР № 77-69. Новосибирск, 1977.
13. Billardon M. et al. // Phys. Rev. Lett. 1983. Vol. 51, N 18. P. 1652.
14. Korchyganov V. N. et al. // Nucl. Instrum. and Meth. 1983. Vol. 208, N 1/3. P. 11—18.
15. Кулипанов Г. Н., Скринский А. Н. // УФН. 1977. Т. 2. С. 369.
16. Кондратенко А. М., Скринский А. Н. Препр. ИЯФ СО АН СССР № 75-102. Новосибирск, 1975; Оптика и спектроскопия. 1977, Т. 42, вып. 2. С. 338.
17. Вазина А. А. // Тр. Всесоюз. совещ. по использованию синхротронного излучения СИ-82. Новосибирск, 1982. С. 171.
18. Barychev V. B., Kulipanov G. N., Skrinisky A. N. // Nucl. Instrum. and Meth. 1986. Vol. A246, N 1/3.
19. Artemyev A. N., Kabannik V. A. et al. // Ibid. 1978. Vol. 152, N 1. P. 235—241.
20. Чечин А. И. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1983. Т. 37, вып. 11. С. 531.
21. Gerdau E., Ruffer R. // Nucl. Instrum. and Meth. 1986. Vol. A246, N 1/3. P. 362.
22. Frieze W. E. et al. // Phys. Rev. B — Solid State. 1985. Vol. 31, N 9. P. 5628.
23. Howell R. H. et al. // Nucl. Instrum. and Meth. 1985. Vol. 10/11. P. 373—377.
24. Еремеев И. Р. // Письма в ЖЭТФ. 1978. Т. 27. № 1.
25. Донец Е. Д. и др. // Тр. IV Всесоюз. совещ. по ускорителям заряженных частиц. 1975. Т. 1. С. 314.

А. Ф. Андреев

## ФИЗИКА КВАНТОВЫХ ЖИДКОСТЕЙ И КРИСТАЛЛОВ

Физика гелия не была в центре научных интересов Исаака Яковлевича Померанчука, если судить об этом по объему его научных работ, посвященных данной области. Однако специалистам хорошо известно, что многие из развиваемых в настоящее

время направлений физики гелия тесно связаны с идеями, высказанными много лет назад Исааком Яковлевичем. Характерно, что это относится и к такому сугубо инженерному направлению, как криогенная техника.

Наиболее известна в этом отношении работа И. Я. Померанчука 1950 г. «К теории жидкого  $^3\text{He}$ » [1]. Именно в ней был предложен метод Померанчука (как он теперь называется) — метод получения сверхнизких температур путем адиабатической кристаллизации жидкого  $^3\text{He}$ .

Соображения, высказанные в этой работе, внешне весьма просты. Важно, однако, что к моменту написания работы твердый  $^3\text{He}$  вообще еще не был получен, а экспериментальные исследования жидкого  $^3\text{He}$  находились в самом зачаточном состоянии. Многие весьма существенные параметры не были известны даже по порядку величины. В этих условиях решение столь тонкого вопроса, каким является вопрос о кристаллизации жидкого  $^3\text{He}$  при низких температурах, требовало исключительной физической интуиции. Существует прямая связь между краткими интуитивными замечаниями работы И. Я. Померанчука [1], касающимися возможности обмена в кристаллическом состоянии и времен релаксации, сопровождающей переход жидкость—кристалл, и современными теориями квантовых кристаллов и спин-поляризованных жидкого и твердого  $^3\text{He}$ .

В той же работе [1] дана качественная теория жидкого  $^3\text{He}$  при температурах ниже температуры фермиевского вырождения. Найденные И. Я. Померанчуком температурные зависимости теплоемкости и коэффициентов вязкости и теплопроводности были впоследствии подтверждены теорией ферми-жидкости Л. Д. Ландау и многочисленными экспериментами. Эта часть работы также явилась предвестником замечательного направления физики низких температур.

В 1948—1949 гг. И. Я. Померанчуком были опубликованы две статьи [2, 3], посвященные свойствам жидких растворов изотопов гелия  $^3\text{He}$  и  $^4\text{He}$ . В первой из них (совместно с Л. Д. Ландау) введено понятие о примесных квазичастицах. Во второй статье [3] оно положено в основу последовательной теории слабых растворов  $^3\text{He}$  в сверхтекучем  $^4\text{He}$ . Понятие о примесных квазичастицах сыграло в последующие годы очень важную роль в физике квантовых кристаллов. Превращение в кристаллах гелия примесных частиц и точечных дефектов в делокализованные квазичастицы, которые, подобно проводящим электронам в металлах, свободно двигаются через кристалл, и их квантовая диффузия — примеры обнаруженных в последние годы явлений, имеющих непосредственную идейную связь с работами Ландау и Померанчука.

## 1. ПОЛУЧЕНИЕ СВЕРХНИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР МЕТОДОМ ПОМЕРАНЧУКА

Возможность понижения температуры при адиабатической кристаллизации  $^3\text{He}$  была предсказана И. Я. Померанчуком [1], обратившим внимание на весьма своеобразный характер фазовой диаграммы  $^3\text{He}$ , связанный с наличием у атомов ядерных спинов. Рассуждения И. Я. Померанчука основаны на существенном различии обменных эффектов атомов  $^3\text{He}$  в жидкой и кристаллической фазах.

В жидкости атомы делокализованы в пространстве и потому обменное взаимодействие спинов велико. При температурах ниже фермиевской система ведет себя как сильно вырожденная ферми-жидкость. Энтропия  $s_l$  жидкости (в расчете на одну частицу, включая, конечно, спиновую энтропию) линейно убывает с понижением температуры. Согласно современным экспериментальным данным [4], фактически низкотемпературный линейный закон энтропии справедлив (на кривой плавления) при температурах ниже 20 мК. Если его записать в виде

$$s_l = (T/T_F) \ln 2, \quad (1)$$

т. е. ввести температуру Ферми  $T_F$  как температуру, при которой экстраполированное значение энтропии равно  $\ln 2$  — энтропии свободного спина, то эксперимент дает  $T_F = 0,15$  К.

В кристалле атомы находятся в узлах решетки, из-за чего обмен подавлен, и энтропия кристалла равна  $s_c = \ln 2$ . Она имеет чисто спиновую природу. Орбитальная (фононная) энтропия пренебрежимо мала, поскольку она порядка куба отношения температуры к температуре Дебая, которая весьма высока ( $\theta \approx 20\text{K}$ ).

Таким образом, при  $T \ll T_F$  энтропия кристалла больше энтропии жидкой фазы. При кристаллизации тепло должно не выделяться, как обычно, а поглощаться. Другими словами, теплота плавления отрицательна.

С повышением температуры энтропия жидкости растет, и при  $T \gg T_F$  мы возвращаемся к привычной картине с  $s_l > s_c$  с положительной теплотой плавления.

Известное соотношение Клапейрона—Клаузиуса

$$dP/dT = (s_l - s_c)/(v_l - v_c), \quad (2)$$

где  $P(T)$  — давление затвердевания как функция температуры;  $v_c, v_l$  — объемы на одну частицу в кристалле и жидкости, показывает своеобразный характер функции  $P(T)$  (см. рис. 1, смысл пунктирной кривой будет объяснен в разд. 3). Действительно, разность объемов  $v_l - v_c$  всегда положительна и мало меняется при изменении температуры. Фактически она меняется от 1,20 до 1,31 см<sup>3</sup>/моль при понижении температуры от 0,32 К. Поэтому в точке  $T = T_m$ , определяемой соотношением  $s_l(T_m) = s_c(T_m)$ ,

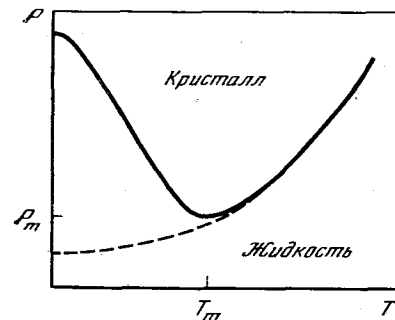


Рис. 1. Фазовая диаграмма  $^3\text{He}$

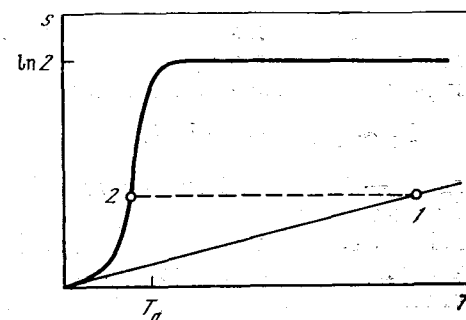


Рис. 2. Энтропийная диаграмма  $^3\text{He}$

имеется минимум (эффект Померанчука) на кривой затвердевания  $P(T)$ . Эксперимент дает  $T_m = 0,319$  К,  $P_m = P(T_m) = 29,3$  бар. Давление плавления при нуле температуры равно 34,4 бар, так что минимум Померанчука довольно глубокий. При давлении  $P > P_m$  наблюдается весьма своеобразное поведение  $^3\text{He}$ . С понижением температуры он сначала затвердевает, а при дальнейшем понижении температуры при фиксированном давлении снова плавится.

Принципиально охлаждение по методу Померанчука заключается в адиабатической кристаллизации жидкого  $^3\text{He}$  путем увеличения давления при условии, что с помощью предварительного охлаждения другим методом и сжатия жидкий  $^3\text{He}$  приведен в состояние, соответствующее кривой плавления при  $T < T_m$ . В этой низкотемпературной области кристаллизация сопровождается поглощением тепла и, следовательно, дальнейшим понижением температуры.

Предельная температура, достижимая с помощью метода Померанчука, определяется энергией взаимодействия  $T_0$  ядерных спинов в кристаллической фазе. Действительно, при температурах  $T \leq T_0$  становится существенным взаимодействие спинов, что приводит к их упорядочению. В результате энтропия  $s_c$  в соответствии с теоремой Нернста быстро убывает при  $T \leq T_0$  от значения  $\ln 2$ . На рис. 2 показан характер зависимостей  $s_c(T)$  и  $s_l(T)$  на кривой плавления. Пусть точка 1 соответствует начальному состоянию  $^3\text{He}$  в «камере Померанчука», т. е. в камере в начальный момент находится только жидкая фаза в условиях, соответствующих кривой плавления. Охлаждение происходит адиабатически, т. е. при постоянной полной энтропии и вдоль кривой плавления. Точка, изображающая состояние системы на  $s$ - $T$ -диаграмме рис. 2, будет двигаться вдоль горизонтальной пунктирной линии. При этом происходит непрерывный переход  $^3\text{He}$  из жидкой фазы в твердую. Предельная температура  $T \sim T_0$  соответствует полной кристаллизации  $^3\text{He}$  (точка 2 на рис. 2).

Сам Исаак Яковлевич полагал, что обменное взаимодействие ядерных спинов в кристалле столь ничтожно, что основную роль играет магнитное диполь-дипольное взаимодействие. При этом

$$T_0 \sim \mu^2/a^3 \sim 10^{-7} \text{ К},$$

где  $\mu$  — магнитный момент ядра  ${}^3\text{He}$ ;  $a$  — межатомное расстояние. Однако он отнюдь не отрицал возможности обменного взаимодействия. Вот цитата из статьи [1]: «Существование кристаллической решетки, в которой амплитуда нулевых колебаний значительно меньше, чем расстояние между атомами, приводит либо

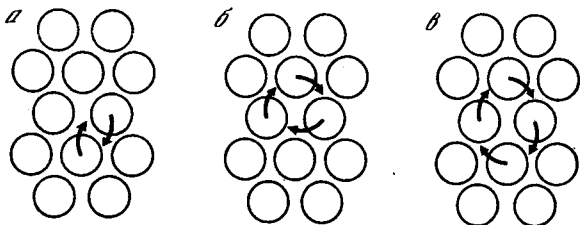


Рис. 3. Туннельные перестановки двух, трех и четырех частиц в кристалле

к исчезновению эффектов, связанных с обменом двух атомов, либо к их значительному уменьшению». Сейчас известно, что в отличие от всех других кристаллов амплитуда нулевых колебаний в кристаллах гелия не мала, а составляет более  $1/3$  межатомного расстояния. Обменное взаимодействие ядерных спинов значительно превосходит релятивистское диполь-дипольное взаимодействие. Фактически  $T_0 \sim 10^{-3}$  К.

Интересно, однако, отметить, что основную роль в кристаллах гелия играет не «обмен двух атомов», т. е. туннельные перестановки в кристалле двух соседних частиц (рис. 3, а). Такие процессы весьма затруднены из-за того, что кристаллы гелия довольно плотно упакованы и в них нет достаточного для парной перестановки свободного объема. В настоящее время установлено (см., например, [5]), что в кристаллах  ${}^3\text{He}$  основные процессы обмена — это показанные на рис. 3, б и в туннельные циклические перестановки трех и четырех частиц. На рис. 3 видно, что для таких процессов требуется меньше свободного объема. Конечно, увеличение числа участвующих в акте обмена частиц уменьшает вероятность процесса. Однако фактически при увеличении числа частиц с двух до четырех уменьшения вероятности не происходит, поскольку из-за недостатка свободного объема процесс парного обмена (рис. 3, а) сопровождается смещением других соседних частиц.

Эффект Померанчука оказывается, таким образом, тесно связан с процессами квантовой туннельной делокализации частиц в кристаллах гелия. Благодаря таким процессам возникает довольно необычная для физики твердого тела картина кристалла. В обычных кристаллах единственным типом движения частиц (при не слишком высоких температурах) являются малые колебания вблизи узлов решетки. В кристаллах гелия, являющихся наиболее ярким представителем так называемых квантовых кристаллов, на колебательное движение накладывается вполне наблюдаемое поступательное движение частиц, обычно характерное для жидкостей. Ниже, в разд. 2, мы обсудим некоторые из явлений, обусловленные квантовой природой кристаллов гелия.

С другой стороны, из формулы (1) можно сделать интересные выводы по поводу свойств жидкой фазы. Температура Ферми  $T_F = 0,15$  К, при которой энтропия  $s_l$  достигает значения порядка единицы, оказывается существенно ниже других характерных для жидкого гелия температур порядка  $1-10$  К. Это означает, что эффективная масса фермиевских возбуждений жидкости существенно больше массы свободного атома  ${}^3\text{He}$ . Физическая причина большой эффективной массы заключается в существовании частичной локализации частиц за счет взаимодействия с соседями и образования в жидкости ближнего порядка, подобного кристаллическому. Частичная локализация должна уменьшать обменное взаимодействие ядерных спинов в жидкости. Мы обсудим этот вопрос в разд. 3. Здесь отметим лишь, что эффект Померанчука дает возможность нового подхода к вопросу о структуре жидкостей.

Впервые метод Померанчука был успешно осуществлен в 1965 г. Ю. Д. Ануфриевым [6], который охладил  ${}^3\text{He}$  от  $50$  мК до температуры ниже, во всяком случае,  $18$  мК. После того как четыре экспериментальные группы [7—10] достигли с помощью метода Померанчука температур порядка  $1$  мК, стало ясно, что речь идет о новом эффективном методе охлаждения, имеющем важные преимущества по сравнению с другими методами. В настоящее время считается общепризнанным, что метод Померанчука весьма эффективен при исследованиях самого  ${}^3\text{He}$  особенно в интервале температур от  $2$  до  $10$  мК. При более высоких температурах успешно применяется метод растворения  ${}^3\text{He}$  в  ${}^4\text{He}$ , при более низких — ядерное размагничивание.

## 2. ПРИМЕСНЫЕ КВАЗИЧАСТИЦЫ В ТВЕРДОМ ГЕЛИИ

Изображенные на рис. 3 процессы туннелирования атомов в квантовых кристаллах твердого гелия приводят к делокализации атомов. Однако если кристалл состоит из частиц одного сорта (например,  ${}^4\text{He}$ ), такие туннельные процессы непосредственно не

наблюдаемы, поскольку они сводятся к перестановке тождественных частиц. Делокализация приводит к новым наблюдаемым явлениям, если туннелирующие частицы отличны в каком-либо отношении друг от друга. В случае  $^3\text{He}$  частицы отличаются проекцией спина и делокализация приводит, как мы видели, к появлению обменного взаимодействия ядерных спинов. Явления другого типа связаны с поведением примесей и вообще любых точечных дефектов в кристаллах гелия.

Простейший способ обнаружения делокализации частиц (а не спинов) в кристаллах состоит в следующем. Рассмотрим кристалл  $^4\text{He}$ , содержащий примесный атом  $^3\text{He}$ . Благодаря процессам туннелирования этот атом перемещается в кристалле. В силу периодичности внешних условий, в которых находится атом  $^3\text{He}$ , квантовые состояния системы классифицируются заданием вектора квазиимпульса. Энергия является некоторой периодической функцией квазиимпульса. Ситуация здесь вполне аналогична, с одной стороны, хорошо известному случаю электронов в металлах, с другой — рассмотренному Л. Д. Ландау и И. Я. Померанчуком [2]

Рис. 4. Температурная зависимость коэффициента диффузии при различных концентрациях

случаю примесей  $^3\text{He}$  в жидком  $^4\text{He}$ . Примесные атомы ведут себя как квазичастицы, свободно движущиеся через кристалл с постоянной скоростью [11]. Наиболее важными характеристиками этих квазичастиц являются ширина  $\Delta$  энергетической зоны (или частота туннелирования  $J \sim \Delta/\hbar$ ) и скорость движения  $v \sim aJ$ . Типичные значения этих величин для примесей  $^3\text{He}$  в кристаллах  $^4\text{He}$  таковы:

$$\Delta \leq 10^{-4} \text{ К}, \quad J \leq 1 \text{ МГц}, \quad v \leq 0,1 \text{ см/с}.$$

Если концентрация примесей достаточно мала, они представляют собой разреженный газ квазичастиц и должна иметь место так называемая квантовая диффузия, характерные черты которой напоминают скорее диффузию частиц в газах, а не в кристаллах. Для оценки коэффициента диффузии можно использовать обычную формулу кинетической теории газов  $D \sim vl$ , где  $l$  — длина свободного пробега примесных квазичастиц.

На рис. 4 показана ожидаемая температурная зависимость коэффициента диффузии. Имеются три характерных температурных области. В области I достаточно низких температур диффузия ограничена столкновениями примесей с примесями. Коэффициент диффузии не зависит от температуры и обратно пропорционален

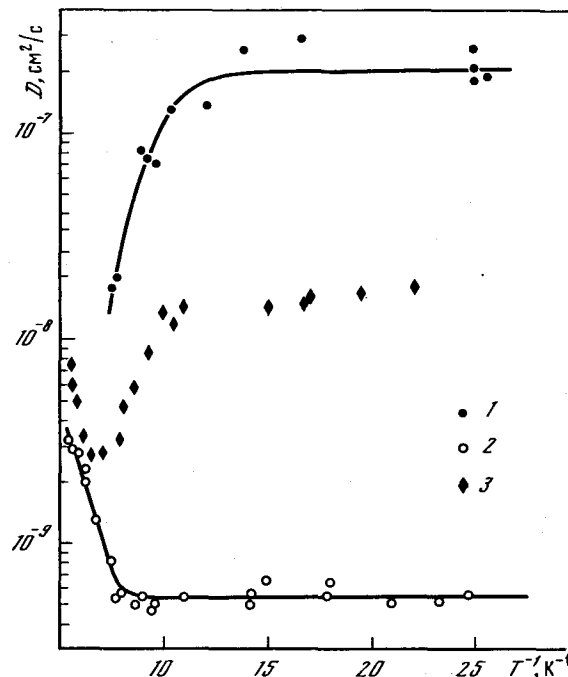


Рис. 5. Температурная зависимость коэффициента диффузии примесей  $^3\text{He}$  в кристаллах  $^4\text{He}$  с молярным объемом  $21 \text{ см}^3$  при различных молярных концентрациях (1 —  $6 \cdot 10^{-3}\%$ ; 2 —  $0,75\%$  [12]; 3 —  $5 \cdot 10^{-2}\%$  [13])

концентрации  $x$  примесей. С ростом температуры становится существенным взаимодействие примесей с фононами. Это уменьшает длину свободного пробега.

В области II диффузия ограничена столкновениями примесей с фононами и уменьшается с повышением температуры. Такое поведение диффузии необычно для большинства кристаллов, в которых основную роль играет другой, классический, надбарьерный механизм диффузии и все диффузионные процессы становятся более интенсивными с повышением температуры. Такой механизм существует и в квантовых кристаллах: при достаточно высокой температуре вместо квантовой туннельной диффузии основную роль начинает играть обычная термоактивационная диффузия, экспоненциально возрастающая с повышением температуры (область III на рис. 4). Так как коэффициент диффузии зависит от концентрации лишь в области I, повышение концентрации сужает область II и в конце концов приводит к ее полному исчезновению. Пунктирные кривые на рис. 4 демонстрируют изменение характера температурной зависимости диффузии при увеличении концентрации ( $x_3 > x_2 > x_1$ ).



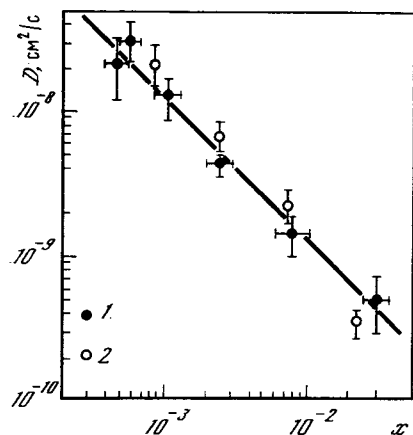


Рис. 6. Концентрационная зависимость коэффициента диффузии  ${}^3\text{He}$  в кристаллах  ${}^4\text{He}$  при  $T < 1,2 \text{ K}$   
1 — данные работы [14];  
2 — данные работы [15]

На рис. 6 показана концентрационная зависимость коэффициента диффузии в низкотемпературной области I [14, 15]. Экспериментальные данные следуют закону  $Dx = 1,2 \cdot 10^{-11} \text{ см}^2/\text{с}$ , показанному сплошной прямой на рис. 6. Коэффициент диффузии растет с уменьшением концентрации, что вполне согласуется с фактом свободного движения уединенной примеси.

Характерной особенностью примесных квазичастиц в кристаллах гелия является чрезвычайно малое значение ширины  $\Delta \sim 10^{-4} \text{ K}$  их энергетической зоны. Поэтому при увеличении концентрации в области еще малых концентраций возникает ситуация, когда энергия взаимодействия примесей сравнивается с  $\Delta$ . В этих условиях должен возникать своеобразный эффект локализации примесей и квантовая диффузия должна подавляться взаимодействием примесей между собой [16]. Фактически локализация примесей  ${}^3\text{He}$  в кристаллах  ${}^4\text{He}$  была экспериментально обнаружена [17] при концентрациях порядка нескольких процентов. При низких температурах экспериментальные данные [17] отчетливо демонстрируют критический характер перехода от квантовой диффузии к локализации.

### 3. СПИН-ПОЛЯРИЗОВАННЫЙ ${}^3\text{He}$

Исследование  ${}^3\text{He}$  с существенной поляризацией ядерных спинов — одно из популярных в настоящее время направлений физики гелия. Интерес к таким исследованиям обусловлен чрезвычайной чувствительностью фазовой диаграммы  ${}^3\text{He}$  к состоянию

На рис. 5 представлены экспериментальные данные [12, 13] о коэффициенте диффузии примесей  ${}^3\text{He}$  в кристаллах  ${}^4\text{He}$  с молярным объемом  $21 \text{ см}^3$  при различных концентрациях. Кривая 1 соответствует очень низкой молярной концентрации —  $6 \cdot 10^{-3}\%$ . Здесь видны температурные области I и II. Кривая 2 соответствует высокой молярной концентрации —  $0,75\%$ . Здесь видны области I и III. Промежуточная фононная область отсутствует. Наконец, на кривой 3, соответствующей промежуточной концентрации  $5 \cdot 10^{-2}\%$ , видны все три характерные температурные области.

спиновой системы. Последнее ясно уже из результатов И. Я. Померанчука [1]. Действительно, эффект Померанчука, как мы видели, непосредственно обусловлен наличием большой энтропии системы неупорядоченных ядерных спинов кристалла. Представим себе, что спины ядер  ${}^3\text{He}$  полностью поляризованы, например, достаточно сильным магнитным полем. Спиновая часть энтропии в этом случае равна нулю, и  ${}^3\text{He}$  должен вести себя подобно  ${}^4\text{He}$  — минимум Померанчука исчезает. Фазовая диаграмма спин-поляризованного  ${}^3\text{He}$  показана пунктирной линией на рис. 1. Поляризация спинов значительно расширяет, таким образом, область существования кристаллической фазы.

Наиболее существенная проблема здесь — это фактическое осуществление спиновой поляризации. Равновесная поляризация во внешнем магнитном поле может достигать большой величины лишь в кристаллической фазе. Здесь обменное взаимодействие порядка  $T_0 \sim 1 \text{ мК}$ , поэтому при температурах выше  $T_0$  степень поляризации, определяемая законом Кюри, равна  $\text{th}(\mu H/T)$ . При температуре  $5 \text{ мК}$  и вполне достижимом магнитном поле  $H = 80 \text{ кЭ}$  получаем степень поляризации  $85\%$ .

Совершенно иная ситуация имеет место в жидкости, где благодаря фермиевскому вырождению поляризация порядка единицы возникает лишь в недостижимо сильных магнитных полях  $H \sim \sim T_F/\mu \sim 2,5 \cdot 10^6 \text{ Э}$ . Между тем именно исследование сильно поляризованной жидкости представляет наибольший интерес. Важный вопрос здесь заключается в следующем [18]. Рассмотрим энергию жидкости в расчете на одну частицу  $E$  как функцию степени поляризации  $\alpha$ :

$$E(\alpha) = E(0) + a\alpha^2 + b\alpha^4 + \dots \quad (3)$$

Если атомы жидкости сильно локализованы, т. е. справедливо представление о жидкости как о «почти твердом теле», то зависимость энергии от спинового состояния, и в частности от  $\alpha$ , слаба. Все коэффициенты  $a, b, \dots$  в разложении (3) должны быть малы. Единственный фактически известный сейчас коэффициент  $a$  (он определяется путем измерения магнитной восприимчивости жидкого  ${}^3\text{He}$  в слабом поле:  $a = \mu^2 N/2\chi$ ,  $N$  — число частиц в единице объема) действительно аномально мал.

Этому факту, однако, существует альтернативное объяснение, основанное на представлении о жидком  ${}^3\text{He}$  как о системе, близкой к порогу ферромагнитной неустойчивости. Тогда коэффициент  $a$  мал, а все остальные коэффициенты разложения (3) должны иметь свой естественный порядок величины.

Для выяснения вопроса о том, является ли жидкий  ${}^3\text{He}$  почти твердым телом или почти ферромагнетиком, необходимы, таким образом, эксперименты при больших степенях поляризации. Многообещающий метод получения спин-поляризованного жидкого  ${}^3\text{He}$  был предложен Кастаном и Нозьером [18]. Метод основан на из-

вестном из эксперимента факте о том, что при низких температурах времена распада неравновесной спиновой поляризации достигают макроскопически больших значений.

Дело в том, что наиболее сильное обменное взаимодействие ядерных спинов сохраняет полный спин и потому не может привести к релаксации поляризации. Релаксация происходит за счет релятивистского диполь-дипольного взаимодействия. Кроме того, при низких температурах в ферми-жидкостной области время релаксации возрастает с понижением температуры пропорционально  $1/T^2$  из-за запретов, налагаемых принципом Паули. В эксперименте в этих условиях важную роль играет релаксация на магнитных примесях, расположенных на стенках камеры, однако существуют методы экранировки влияния стенок путем покрытия их слоем  $^4\text{He}$ . Фактически времена релаксации поляризации в  $^3\text{He}$  достигают десятков минут.

Метод Кастена и Нозьера заключается в поляризации внешним магнитным полем  $^3\text{He}$  в твердом состоянии с последующим уменьшением давления и плавлением поляризованного  $^3\text{He}$  за времена, меньшие времени релаксации поляризации. В последние годы метод был успешно осуществлен двумя группами [19, 20]. Был получен жидкий  $^3\text{He}$  со степенью поляризации соответственно 55 и 65%, существовавшей в течение нескольких минут. В процессе экспериментов измерялись параметры кривой плавления поляризованного  $^3\text{He}$ . В области левее минимума Померанчука был обнаружен сдвиг кривой плавления по сравнению с неполяризованным  $^3\text{He}$  на величину порядка 1 бар в сторону низких давлений, что вполне согласуется с картиной, изображенной на рис. 1. В ближайшее время можно, таким образом, ожидать появления экспериментальных данных о свойствах поляризованного жидкого  $^3\text{He}$  и решения вопроса о том, является ли он почти твердым телом или почти ферромагнетиком.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Померанчук И. Я. // ЖЭТФ. 1950. Т. 20. С. 919.
2. Ландау Л. Д., Померанчук И. Я. // Докл. АН СССР. 1948. Т. 59. С. 669.
3. Померанчук И. Я. // ЖЭТФ. 1949. Т. 19. С. 42.
4. Лоунасмаа О. В. Принципы и методы получения температур ниже 1К. М.: Мир, 1977. 365 с.
5. Andreev A. F. // Progress in low temperature physics./Ed. D. F. Brewer. Amsterdam: North-Holland, 1982. Vol. 8. P. 67—132.
6. Ануфриев Ю. Д. // Письма в ЖЭТФ. 1965. Т. 1, вып. 6. С. 1.
7. Johnson R. T., Rosenbaum R., Symko O. G., Wheatley J. C. // Phys. Rev. Lett. 1969. Vol. 22. P. 449.
8. Sites J. R., Osheroff D. D., Richardson R. C., Lee D. M. // Ibid. Vol. 23. P. 836.
9. Halperin W. P., Buhrman R. A., Webb W. W., Richardson R. C. // Proc. XIII Intern. Conf. low. temp. phys. N. Y.: Plenum press, 1973. P. 976.
10. Alvesalo T. A., Anufriev Yu. D., Collan H. K. et al. // Phys. Rev. Lett. 1973. Vol. 30. P. 962.

11. Андреев А. Ф., Лифшиц И. М. // ЖЭТФ. 1969. Т. 56. С. 2057.
12. Мухеев В. А., Есельсон Б. Н., Григорьев В. Н., Мухин Н. П. // Физика низких температур. 1977. Т. 3. С. 385.
13. Allen A. R., Richards M. G. // Proc. Intern. Quantum Cryst. Conf. Fort Collins (Col.), 1977. P. C-83.
14. Richards M. G., Pope J., Widom A. // Phys. Rev. Lett. 1972. Vol. 29. P. 708.
15. Григорьев В. Н., Есельсон Б. Н., Мухеев В. А., Шульман Ю. Э. // Письма в ЖЭТФ. 1973. Т. 17. С. 16.
16. Каган Ю. // УФН. 1983. Т. 141. С. 541.
17. Мухеев В. А. // Там же. С. 544.
18. Castaing B., Nozieres P. // J. Phys. 1979. Vol. 40. P. 257.
19. Bonjaint G., Puech L., Greenberg A. S. et al. // Phys. Rev. Lett. 1984. Vol. 53. P. 1092.
20. Dutta A., Archie C. N. // Ibid. 1985. Vol. 55. P. 2949.

В. Л. Гуревич

## О РАБОТАХ И. Я. ПОМЕРАНЧУКА ПО ТЕОРИИ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Главная идея И. Я. Померанчука, относящаяся к теории теплопроводности диэлектриков, получила специальное название «проблема длинных волн». Эта идея обсуждается практически во всех современных книгах и обзорах, посвященных теплопроводности диэлектриков. Она сохранила актуальность до настоящего времени, стимулировала и продолжает стимулировать большое число работ в этом направлении и, таким образом, вошла в золотой фонд современной науки. Естественно, в настоящей статье речь пойдет в первую очередь о ней.

Попутно мы расскажем и о том, как эта же самая идея использовалась в теории поглощения звука. Скажем мы и о других идеях, высказанных И. Я. Померанчуком в связи с развитием теории теплопроводности диэлектриков, и об их дальнейшей судьбе. Но чтобы лучше представить, какое место в науке занимают все эти идеи, мы начнем с краткого описания развития теории теплопроводности кристаллических диэлектриков до того, как эти идеи были высказаны.

Атомы, периодическое расположение которых в пространстве образует кристалл, могут совершать колебания относительно своих положений равновесия. Практически при всех температурах вплоть до температуры плавления амплитуда этих колебаний мала: она гораздо меньше характерного межатомного расстояния. Соответственно потенциальную энергию кристаллической решетки можно разложить в ряд по степеням смещений атомов относи-

тельно положений равновесия. Разложение должно, очевидно, начинаться с квадратичных членов. Следующие — ангармонические — члены в силу сказанного должны быть малы. Поэтому в нулевом приближении рассматривают картину колебаний кристаллической решетки в пренебрежении ангармонизмом решеточных сил.

Как и для любой системы материальных точек, совершающих малые колебания, произвольное колебательное движение можно представить в виде суперпозиции независимых колебаний совокупности гармонических осцилляторов. В данном случае в силу трансляционной симметрии решетке имеется простой способ охарактеризовать отдельные осцилляторы. Каждый из них описывает волнообразное движение атомов решетки и потому характеризуется волновым вектором  $\mathbf{k}$ . Кроме того, волны с одним и тем же  $\mathbf{k}$  могут различаться типом колебательного движения, т. е. номером колебательной ветви  $j$ . Число различных колебательных ветвей равно  $3s$ , где  $s$  — число атомов в элементарной ячейке кристалла, т. е. минимальной ячейке, пространственное повторение которой дает весь кристалл.

Зависимость частоты колебания от его волнового вектора —  $\Omega_j(\mathbf{k})$  — носит название *закона дисперсии*  $j$ -й колебательной ветви. Среди колебательных ветвей есть три *акустические*, у которых частоты  $\Omega_\alpha(\mathbf{k})$  стремятся к нулю при  $k \rightarrow 0$ . Для длинных волн, т. е. при  $ka \ll 1$ , где  $a$  — постоянная решетка, акустические ветви представляют собой обычные звуковые колебания, распространяющиеся в кристалле. Звуковые колебания имеют линейный закон дисперсии:

$$\Omega_\alpha(\mathbf{k}) = v_\alpha(\mathbf{n})k, \quad (1)$$

где  $\alpha$  — номер акустической колебательной ветви;  $v_\alpha$  — фазовая скорость звука, которая может зависеть от направления  $\mathbf{n}$  вектора  $\mathbf{k}$ , но не от его абсолютной величины. Если кристалл обладает упругой изотропией, то три акустические ветви представляют собой одну продольную

$$\Omega_l = v_l k \quad (2)$$

и две поперечные с совпадающими законами дисперсии

$$\Omega_t = v_t k, \quad (3)$$

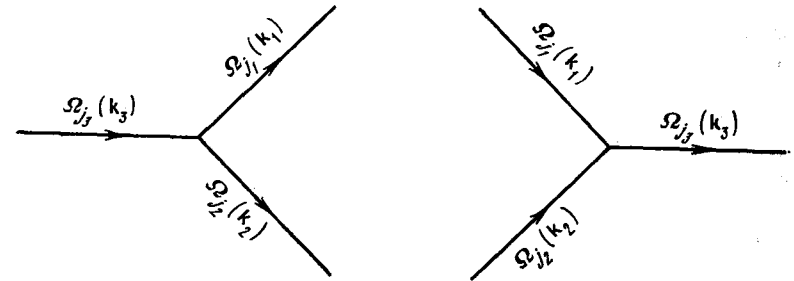
где  $v_l$  и  $v_t$  — соответственно продольная и поперечная скорости звука, которые уже не зависят от  $\mathbf{n}$ . Скорость  $v_l$  всегда больше, чем  $v_t$ , как минимум раза в полтора.

В кристаллах, обладающих упругой анизотропией, разделение звуковых колебаний на продольные и поперечные, вообще говоря, уже не имеет места. Однако из трех колебаний всегда имеется одно, скорость которого максимална. Его называют квази-

продольным. Два других звуковых колебания называют квази-поперечными.

Если  $s = 1$ , то в кристалле имеются только три акустические ветви. При  $s > 1$  есть еще  $3(s - 1)$  так называемые оптические ветви, т. е. такие, у которых  $\Omega_j(\mathbf{k})$  при  $\mathbf{k} \rightarrow 0$  стремится к конечному значению — предельной частоте оптических колебаний.

Производя квантование колебаний решетки, мы получаем *фононы* — колебательные кванты. Энергия такого кванта есть  $\hbar\Omega_j(\mathbf{k})$ . Число  $N_{kj}$  таких квантов в состоянии  $(\mathbf{k}, j)$ <sup>1</sup> есть величина



Процессы рождения и уничтожения фононов в наинизшем приближении теории возмущений

на, которая в отсутствие ангармонических взаимодействий остается постоянной; иными словами, в гармоническом приближении решеточные осцилляторы находятся в стационарных состояниях.

Следующие члены разложения потенциальной энергии по степеням смещений атомов, как уже говорилось, малы, поэтому естественно изучать их роль с помощью теории возмущений. Главным из них является член третьего порядка, отвечающий так называемому кубическому ангармонизму; его мы будем рассматривать в первую очередь.

Поскольку ангармоническое взаимодействие слабое, так что для его описания можно использовать теорию возмущений, фононы можно рассматривать как газ квазичастиц, которые относительно редко взаимодействуют («сталкиваются») друг с другом. Важное отличие от обычного газа заключается в том, что столкновения сопровождаются, вообще говоря, рождением или уничтожением фононов. Для тройного (кубического) ангармонизма в наинизшем приближении теории возмущений такие процессы схематически изображены на рисунке. При столкновениях выполняется закон сохранения энергии:

$$\hbar\Omega_{j_1}(\mathbf{k}_1) + \hbar\Omega_{j_2}(\mathbf{k}_2) = \hbar\Omega_{j_3}(\mathbf{k}_3). \quad (4)$$

<sup>1</sup> Так коротко мы будем обозначать состояние, принадлежащее колебательной ветви  $j$  и имеющее волновой вектор  $\mathbf{k}$ .

Что же касается волновых векторов сталкивающихся фононов, то, прежде чем записать закон сохранения для них, следует заметить, что все физически различные значения волнового вектора занимают ограниченную область  $k$ -пространства. Эта область представляет собой внутренность и часть поверхности некоторого многогранника — так называемой зоны Бриллюэна. Связано это с тем, что на периодическое волновое движение накладывается периодичность равновесного расположения атомов в самой кристаллической решетке, а волновые движения с длиной волны меньше удвоенной постоянной решетки вообще невозможны. Закон сохранения волнового вектора имеет вид

$$\mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2 = \mathbf{k}_3 + \mathbf{b}, \quad (5)$$

где  $\mathbf{b}$  есть один из так называемых векторов обратной решетки<sup>2</sup>. Векторы  $\mathbf{k}_1$  и  $\mathbf{k}_2$  находятся в пределах зоны Бриллюэна. Суммарный вектор  $\mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2$  может также находиться в пределах зоны Бриллюэна; в этом случае мы должны в качестве вектора обратной решетки положить  $\mathbf{b} = 0$ . Такой процесс столкновения называется *нормальным*. Если же сумма  $\mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2$  оказывается вне зоны Бриллюэна, вектор  $\mathbf{b}$  в (5) подбирается таким образом, чтобы вектор  $\mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2 - \mathbf{b}$  оказался в ее пределах. Такие процессы получили название *процессов переброса*.

В кинетике фононов часто пользуются понятием времени свободного пробега (или времени релаксации) фонона  $\tau$ . Это характерное время между двумя актами рассеяния фонона. Малость ангармонизма, позволяющая использовать теорию возмущений для описания фонон-фононных столкновений, приводит к неравенству

$$\Omega_j(\mathbf{k}) \tau_{kj} \gg 1. \quad (6)$$

Отметим, что по самому своему смыслу время  $\tau$  определяется не точно, а по порядку величины.

Современная теория теплопроводности диэлектриков начинается с работы Пайерлса [1]. Он дал строгую квантовомеханическую формулировку идее, высказанной ранее Дебаем [2], — о том, что конечное теплосоппротивление устанавливается в результате взаимного рассеяния колебаний решетки, обусловленного ангармонизмом решеточных сил. При высоких температурах (по сравнению с характерной дебаевской температурой  $\Theta$ ) теория дает следующее выражение для теплопроводности, правильно описываю-

<sup>2</sup> Пусть  $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2$  и  $\mathbf{a}_3$  — векторы решетки, т. е. три вектора, параллельные ребрам параллелепипеда объема  $\mathcal{V}$ , образующего элементарную ячейку. Тогда основные векторы обратной решетки  $\mathbf{b}_1, \mathbf{b}_2, \mathbf{b}_3$  определяются как  $\mathbf{b}_1 = 2\pi [\mathbf{a}_2 \times \mathbf{a}_3] \mathcal{V}^{-1}$ ,  $\mathbf{b}_2 = 2\pi [\mathbf{a}_3 \times \mathbf{a}_1] \mathcal{V}^{-1}$ ,  $\mathbf{b}_3 = 2\pi [\mathbf{a}_1 \times \mathbf{a}_2] \mathcal{V}^{-1}$ . Вектор обратной решетки — это произвольный вектор вида

$$\mathbf{b} = m_1 \mathbf{b}_1 + m_2 \mathbf{b}_2 + m_3 \mathbf{b}_3,$$

где  $m_1, m_2, m_3$  — целые числа, положительные, отрицательные или равные нулю.

щее как ее температурную зависимость, так и порядок величины:

$$\kappa \cong \sum_j \int \frac{d^3k}{(2\pi)^3} \tau_{kj} g_{kj}^2, \quad (7)$$

где  $g_{kj} = \partial \Omega_j(\mathbf{k}) / \partial k$  — групповая скорость колебания решетки. Для длинноволновых акустических колебаний она имеет тот же порядок величины, что и фазовая скорость звука  $v$ .

Температурная зависимость (7) определяется зависимостью от температуры  $T$  времени  $\tau_{kj}$ .

Величина  $1/\tau_{kj}$  — вероятность рассеяния фонона  $(\mathbf{k}, j)$  — в наинизшем приближении теории возмущений пропорциональна числу возбужденных фононов  $N_{\mathbf{k}'j}$ . Это число есть равновесная функция Планка  $N_{\mathbf{k}'j}^{(0)}$ , которую при  $T \gg \Theta$  можно представить в виде

$$N_{\mathbf{k}'j}^{(0)} = \frac{1}{\exp[\hbar \Omega_j(\mathbf{k}')/T] - 1} \simeq \frac{T}{\hbar \Omega_j(\mathbf{k}')}.$$

Таким образом, мы получаем, что время  $\tau_{kj}$ , а вместе с ним и теплопроводность  $\kappa$  обратно пропорциональны  $T$ :

$$\kappa \propto 1/T. \quad (8)$$

Это и есть знаменитый результат Пайерлса, касающийся температурной зависимости теплопроводности для случая высоких температур.

К тому же самому выводу можно прийти и изучая классическую картину взаимодействия волн. Вероятность рассеяния данной волны за счет ангармонизма пропорциональна среднему квадрату смещений атомов, создаваемому всеми прочими волнами; он же, в свою очередь, пропорционален  $T$ . Точнее, отношение среднего квадрата смещения атома  $\overline{\Delta x^2}$  к  $a^2$  есть малый параметр, который и характеризует относительную малость ангармонического взаимодействия:

$$\overline{\Delta x^2}/a^2 \simeq T/Mv^2, \quad (9)$$

где  $v$  — некоторое среднее значение скорости звука, а  $M$  — порядка средней массы атомов, слагающих решетку. Типичные значения ангармонического параметра обычно составляют несколько сотых. Длина  $l$  и времена  $\tau$  свободного пробега фононов выражаются через этот параметр по формулам

$$l \simeq (Mv^2/T) a, \quad (10)$$

$$\tau \simeq (Mv^2/T) (1/\Omega_D), \quad (11)$$

где  $\Omega_D$  — характерная дебаевская частота, равная  $\Theta/\hbar$ , а  $l$  связано с  $\tau$  соотношением  $l = g\tau$ . Эти формулы справедливы для тепловых фононов с частотами порядка предельной частоты  $\Omega_D$ .

У длинноволновых акустических фононов, частоты которых гораздо меньше  $\Omega_D$ , время  $\tau$  (и длина  $l$ ) свободного пробега зависят от  $k$ . Такую зависимость мы будем указывать иногда в качестве аргумента этих величин, а иногда — в виде индекса  $\tau_k$ .

Эти результаты существовали уже в классической теории Дебая. Однако только в теории Пайерлса поведение теплопроводности было подвергнуто последовательному квантовомеханическому рассмотрению. Пайерлс выяснил разницу в поведении дискретной решетки и континуума и установил тот важный факт, что в вероятность рассеяния  $1/\tau$  дают вклад только процессы переброса, для которых вектор  $b$  в (5) отличен от нуля. Поскольку при  $T \gg \Theta$  число процессов переброса тоже пропорционально  $T$ , это ограничение не меняет вывода о том, что температурная зависимость теплопроводности имеет вид (8).

Следующий существенный шаг в теории теплопроводности и был сделан И. Я. Померанчуком [3—5]. Он обратил внимание на то, что температурная зависимость теплопроводности совсем не обязательно следует закону (8), так как интеграл (7) может расходиться на малых  $k$ .

Рассуждения И. Я. Померанчука начинаются с подробного анализа вклада длинноволновых акустических фононов в теплопроводность. Нужно вычислить их время свободного пробега  $\tau_{k\alpha}$  и выяснить, как оно зависит от  $k$ . Это время, очевидно, должно определяться взаимодействием длинноволновых фононов с коротковолновыми, так как последние занимают гораздо больший фазовый объем, т. е., попросту говоря, таких фононов больше, чем длинноволновых. Начнем с анализа законов сохранения при поглощении длинноволнового акустического каким-либо коротковолновым фононом. Обозначая частоту и волновой вектор длинноволнового фонона соответственно  $\omega$  и  $\mathbf{k}$ , а коротковолнового фонона —  $\Omega$  и  $\mathbf{K}$ , мы имеем

$$\omega_{\alpha}(\mathbf{k}) + \Omega_j(\mathbf{K}) = \Omega_j(\mathbf{K} + \mathbf{k}). \quad (12)$$

Разлагая правую часть по малому волновому вектору  $\mathbf{k}$ , мы можем переписать ее в виде

$$\Omega_j(\mathbf{K} + \mathbf{k}) = \Omega_j(\mathbf{K}) + \mathbf{k}g_j(\mathbf{K}). \quad (13)$$

Таким образом, для того чтобы процесс поглощения был разрешен, должно выполняться соотношение

$$v_{\alpha}k = \mathbf{k}g_j = g_j k \cos \phi_k, \quad (14)$$

где  $\phi_k$  — угол между векторами  $\mathbf{g}_j(\mathbf{K})$  и  $\mathbf{k}$ . Это означает, что поглощение может иметь место, только если фазовая скорость длинноволновых фононов меньше групповой скорости коротковолновых. Если и существуют коротковолновые фононы, удовлетворяющие этому условию, то их следует искать в первую очередь среди акустических фононов. Дело в том, что при небольшом числе

атомов  $s$  в элементарной ячейке (а результаты Померанчука могут относиться только к этому случаю) групповые скорости у оптических фононов заметно меньше, чем у акустических. Поэтому далее мы будем в качестве ветвей  $j$  рассматривать только акустические ветви.

Проанализируем эту ситуацию для простейшего мыслимого случая, а именно для случая упругоизотропного тела, в котором отсутствует дисперсия скорости звука, т. е., иными словами, скорость звука не зависит от  $k$ . Поскольку в таком теле продольные фононы обладают наибольшей скоростью звука, из (14) следует, что в нем продольные длинноволновые фононы в наинизшем приближении теории возмущений вообще не могут поглощаться в результате взаимодействия с коротковолновыми фононами. Этот результат был получен Л. Д. Ландау и Ю. Б. Румером [6], т. е. был известен еще до работ И. Я. Померанчука [3—5].

В реальных кристаллах всегда имеет место и дисперсия скорости звука, и упругая анизотропия. Если эти эффекты малы, то, по мнению Померанчука [3], положение дел не должно меняться, так как в предельном случае их отсутствия имеет место только что обсуждавшийся случай изотропного тела без дисперсии. Если же дисперсия и анизотропия велики, можно представить себе, что для длинноволновых квазипродольных фононов  $\mathbf{k}$ , распространяющихся в некотором направлении, можно подобрать такие тепловые фононы  $\mathbf{K}$ , у которых групповая скорость  $g$  превысит наибольшую фазовую скорость звука  $v$ . В этом случае трехфононные процессы с участием одного длинноволнового квазипродольного фонона и двух тепловых фононов должны существенно ограничивать время свободного пробега квазипродольных длинноволновых фононов. Однако такое ограничение времени свободного пробега длинноволновых фононов, которое приводило бы к конечной теплопроводности, может иметь место, только если соответствующие фононы  $\mathbf{K}$  найдутся для фононов  $\mathbf{k}$ , движущихся под любым углом. Такое тождественное условие накладывает жесткое ограничение на анизотропию и дисперсию, так что представляется маловероятным, чтобы во всех кристаллах оно было выполнено.

Поэтому, как считал Померанчук, следует ожидать, что существуют по меньшей мере два типа диэлектриков. Для одного из них трехфононные процессы в достаточной мере ограничивают время свободного пробега длинноволновых квазипродольных фононов. Для них при высоких температурах имеет место закон Пайерлса  $\kappa \propto 1/T$ . Для диэлектриков другого типа и имеет место проблема длинных волн, пути решения которой, предложенные Померанчуком, мы сейчас и обсудим<sup>3</sup>.

<sup>3</sup> Если область углов, для которой условие (14) не выполняется, мала, может иметь место смешанная ситуация. В этом случае  $\kappa$  состоит из двух частей, сравнимых между собой, например, при комнатных температурах, но имеющих различную температурную зависимость.

Прежде всего нужно выяснить, в какой мере ограничивают время свободного пробега трехфононные столкновения, в которых все участвующие фононы длинноволновые, т. е. векторы  $\mathbf{k}$  и  $\mathbf{K}$  одного порядка.

Есть две причины, по которым соответствующее время свободного пробега быстро возрастает при уменьшении длины вектора  $\mathbf{k}$ . Во-первых, если вектор  $\mathbf{k}$  мал, то мало общее число фононов, которые могут принимать участие в трехфононных столкновениях: как уже говорилось, их волновые векторы должны быть порядка  $\mathbf{k}$ . Во-вторых, с уменьшением  $\mathbf{k}$  убывает и матричный элемент ангармонического взаимодействия: квадрат матричного элемента оказывается пропорциональным произведению волновых векторов всех трех участвующих во взаимодействии фононов. Если принять во внимание оба эти обстоятельства, то расчет дает следующую зависимость от времени свободного пробега длинноволновых ( $\hbar\omega \ll T$ ) квазипродольных фононов:

$$1/\tau^{(3)} \simeq (T/Mv^2) \Omega_D (ka)^4. \quad (15)$$

Здесь мы обозначили время свободного пробега за счет трехфононных процессов через  $\tau^{(3)}$ , чтобы отличить его от «четырёхфононного времени», которое мы выпишем ниже. При подстановке зависимости (15) в формулу (7) интеграл по  $k$  линейно расходится на нижнем пределе. Это означает, что трехфононные столкновения длинноволновых квазипродольных фононов происходят настолько редко, что они не могут обусловить конечную теплопроводность.

Тогда возникает вопрос, не могут ли эту ситуацию исправить четырехфононные столкновения, обусловленные четверным ангармонизмом или же тройным ангармонизмом во втором приближении теории возмущений. Легко убедиться, что четырехфононные процессы типа  $2 \rightarrow 2$  (два фонона сливаются и образуются два других) оказываются разрешены. Законы сохранения при этих процессах дают

$$\omega(\mathbf{k}) + \Omega(\mathbf{K}) - \Omega(\mathbf{K}') - \Omega(\mathbf{K} - \mathbf{K}' + \mathbf{k}) = 0, \quad (15)$$

и процесс оказывается заведомо разрешенным даже для изотропной сплошной среды при определенных  $\mathbf{K}$  и  $\mathbf{K}'$ , если, например, фонон  $\mathbf{K}$  — акустический продольный, а хоть один из фононов,  $\mathbf{K}'$  или  $\mathbf{K} - \mathbf{K}' + \mathbf{k}$  — акустический поперечный. В этом проще всего убедиться следующим образом. Учитывая малость волнового вектора  $\mathbf{k}$ , посмотрим, что дает это соотношение при  $k = 0$ . Тогда оно превратится в равенство, выражающее законы сохранения при распаде фонона  $\mathbf{K}$  на два других фонона —  $\mathbf{K}'$  и  $\mathbf{K} - \mathbf{K}'$ . Легко убедиться, что такие процессы разрешены, если фонон  $\mathbf{K}$  — продольный, а фононы  $\mathbf{K}'$  и  $\mathbf{K} - \mathbf{K}'$  либо оба поперечные, либо один из них продольный, а другой поперечный. При этом угол между векторами  $\mathbf{K}$  и  $\mathbf{K}'$  отличен от нуля и определяется отношениями  $v_l/v_t$  и  $K'/K$ .

Если теперь считать волновой вектор  $\mathbf{k}$  отличным от нуля, но достаточно малым, то этот угол также должен измениться на малую величину, т. е. процесс по-прежнему останется разрешенным.

Что же касается амплитуды перехода за счет тройного ангармонизма во втором приближении теории возмущений<sup>4</sup>, то она вычисляется по обычным правилам квантовой механики через амплитуды переходов  $V$ , обусловленные тройным ангармонизмом. Для такого процесса, когда в начальном состоянии имеются какие-то фононы 1 и 2, а в конечном — фононы 3 и 4, мы находим, что амплитуда пропорциональна сумме

$$\sum_j \frac{V(1, 2, j)V(j, 3, 4)}{[(\Omega_j - \Omega_1 - \Omega_2)\Omega_j]}, \quad (17)$$

где суммирование производится по всем промежуточным однофононным состояниям, таким, что волновой вектор промежуточного фонона есть  $\mathbf{K} + \mathbf{k}$ . Важно, что, поскольку трехфононные процессы с участием фононов 1 и 2 запрещены, знаменатель в этом выражении в нуль не обращается.

Если фонон  $\Omega_j$  ( $\mathbf{K} + \mathbf{k}$ ) в промежуточном состоянии поперечный, то знаменатель равен по порядку величины  $v^2 K^2$  и получившееся выражение оказывается того же порядка, что и амплитуда перехода, обусловленная четверным ангармонизмом. Однако амплитуда (17) оказывается намного больше, если фонон ( $j, \mathbf{K} + \mathbf{k}$ ) в промежуточном состоянии продольный. В этом случае разность

$$\Omega_j - \Omega_1 - \Omega_2 \equiv \Omega_l(\mathbf{K} + \mathbf{k}) - \Omega_l(\mathbf{K}) - \omega(\mathbf{k}) = \mathbf{k}\mathbf{g} - \omega(\mathbf{k})$$

мала — порядка  $\omega(\mathbf{k})$ . С другой стороны, в нуль она не обращается, так как трехфононные процессы с участием фонона  $\omega(\mathbf{k})$  запрещены.

Вероятность перехода пропорциональна квадрату модуля (17), т. е., следовательно,  $1/\omega(\mathbf{k})$ , поскольку для взаимодействия, обусловленного ангармонизмом решеточных сил,  $|V(1, 2, j)|^2 \propto \omega(\mathbf{k})$ . Во всех остальных множителях можно пренебречь малым волновым вектором  $\mathbf{k}$ . В вероятности перехода фигурирует в качестве множителя следующая комбинация фононных функций распределения:

$$N_2(N_3 + 1)(N_4 + 1) - (N_2 + 1)N_3N_4.$$

При подсчете длины или времени свободного пробега фонона в качестве этих функций распределения следует подставить равновесные функции Планка. Тогда с учетом закона сохранения (16) лег-

<sup>4</sup> В своих первых работах [3, 4] И. Я. Померанчук обсуждал роль четверного ангармонизма. На то, что роль тройного ангармонизма во втором приближении теории возмущений может оказаться важнее, он обратил внимание в работе [5].

ко видеть, что это выражение пропорционально

$$e^{\hbar\omega/T} - 1 = \hbar\omega/T.$$

После выделения этого множителя можно положить  $k = 0$  и в аргументе  $\delta$ -функции, также входящей в выражение для вероятности перехода.

В итоге результирующее выражение для  $1/\tau$ , определяемого четырехфононными процессами, оказывается не зависящим от  $k$  и равным по порядку величины

$$1/\tau^{(4)} \simeq \Omega_D (T/Mv^2)^2. \quad (18)$$

Поскольку оно вычислено во втором приближении теории возмущений, оно содержит не первую степень, а квадрат малого параметра ангармонизма  $T/Mv^2$ .

Полное время свободного пробега  $\tau$  определяется выражением

$$1/\tau = 1/\tau^{(3)} + 1/\tau^{(4)}.$$

Подставим это выражение для  $\tau$  в (7). Выражение (7) содержит сумму по различным колебательным ветвям. В соответствии со сказанным выше основную роль в этой сумме играет одно слагаемое, а именно то, которое соответствует квазипродольным акустическим фононам. Вклад от этого слагаемого равен

$$\kappa \simeq v \int_0^{\pi/a} dk k^2 l(k). \quad (19)$$

Мы видим, что главный вклад в этот интеграл дают некоторые промежуточные значения  $k$ , равные по порядку величины

$$k_1 \simeq (1/a) (T/Mv^2)^{1/4}. \quad (20)$$

Соответственно верхний предел интегрирования можно с принятой точностью заменить на  $\infty$ , и мы получаем закон

$$\kappa \propto T^{-5/4}, \quad (21)$$

который и приходит на смену закону Пайерлса (8).

Таким образом, в данном случае тепло в основном переносится не тепловыми фононами с  $k \simeq 1/a$ , как было бы в случае закона Пайерлса (8), а подтепловыми с  $k \simeq k_1$ . С ростом температуры возрастают эти характерные значения  $k$ , что и обеспечивает более быстрое спадание теплопроводности.

Заметить это более быстрое спадание на опыте не всегда просто. Неравенство  $T \gg \Theta$  выполняется на эксперименте с очень небольшим запасом уже в силу того, что у большинства кристаллов температура плавления всего лишь в несколько раз превышает температуру Дебая. Однако Померанчук в своей работе [5], анализируя экспериментальные данные, приходит к выводу, что ряд этих данных свидетельствует в пользу закона (21).

Другое интересное явление связано с переносом тепла в малых образцах диэлектриков, у которых по крайней мере один характерный размер  $L$  меньше, чем  $l(k_1)$  (или в поликристаллических образцах, у которых характерный размер кристаллита удовлетворяет такому же неравенству) [7]. В этом случае максимально достижимая длина свободного пробега фононов  $l$  имеет порядок  $L$ . Чтобы получить теплопроводность в этом случае, надо в качестве нижнего предела в интеграле (19) заменить 0 на величину  $k_2$ , определяемую из условия

$$l(k_2) = L. \quad (22)$$

Если длина  $L$  столь мала, что  $k_2 > k_1$ , то четырехфононные процессы не влияют существенным образом на теплопроводность, но зато она оказывается зависящей от размера  $L$  по закону

$$\kappa \propto L^{-1/4}. \quad (23)$$

Еще один интересный вопрос кинетики кристаллических диэлектриков, который тоже рассмотрел Померанчук, — это проблема теплопроводности и поглощения звука в кристаллах с точечными дефектами. На таких дефектах акустические фононы испытывают так называемое рэлеевское рассеяние; выражение для соответствующего обратного времени свободного пробега фонона имеет вид

$$1/\tau_d = \zeta \Omega_D c_d (ka)^4, \quad (24)$$

где  $c_d$  — относительная концентрация атомов примеси, а  $\zeta$  — численный коэффициент, который, согласно Померанчуку, порядка 100.

Это выражение зависит от частоты фонона так же, как и величина  $1/\tau^{(3)}$  (15). При достаточно больших концентрациях дефектов  $c_d$  столкновения с дефектами происходят чаще, чем трехфононные столкновения. Однако в полной аналогии с тем, что говорилось выше, само по себе время  $\tau_d$  не может ограничить теплопроводности образца больших размеров, так как оно быстро возрастает с ростом длины волны фонона. Теплопроводность получается конечной, если наряду с рэлеевским рассеянием фононов учесть также и четырехфононные столкновения, обусловленные тройным ангармонизмом решеточных сил (формула (18)). При этом окажется, что тепло в основном переносится фононами с волновыми векторами порядка

$$k_d \simeq \frac{1}{a} (\zeta c_d)^{1/4} \left( \frac{T}{Mv^2} \right)^{1/4}. \quad (25)$$

Изложенные соображения применимы, если это характерное значение  $k_d$  получится гораздо меньше предельного, т. е. если основную роль в переносе тепла играют подтепловые фононы. Тогда теплопроводность  $\kappa \propto T^{-1/2}$ . Она существенно зависит от кон-

центрации дефектов:  $\kappa \propto c^{-1/4}$ . Если же характерный размер  $L$  образца столь мал, что  $l(k_d) \gg L$ , то теплопроводность зависит от этого размера по закону (23). Таким образом, рассеяние фононов точечными дефектами, само по себе не приводящее к конечной теплопроводности, в сочетании с рассеянием на границах образца должно давать теплопроводность, обратно пропорциональную  $L^{1/4}$ . И наконец, поскольку в этой ситуации в выражение для теплопроводности входит в качестве релаксационной характеристики фононного газа только величина (24), которая вообще не зависит от температуры, Померанчук приходит к весьма важному выводу, что может существовать сравнительно широкий температурный интервал, в котором и сама теплопроводность не зависит от температуры, но при этом обнаруживает слабую зависимость от размеров образца  $L$ . Подчеркнем, что этот вывод справедлив вне зависимости от соотношения между температурой  $T$  и дебаевской температурой  $\Theta$ .

В работах [8, 9] Померанчук указывает, что теплопроводность — не единственное кинетическое явление, для которого существует проблема длинных волн. Другое такое явление — это поглощение звука в диэлектриках. Имеется в виду в первую очередь сравнительно низкочастотный звук, частоты которого  $\omega_s$  удовлетворяют условию

$$\omega_s \tau \ll 1. \quad (26)$$

При выполнении условия (26) коэффициент поглощения звука равен по порядку величины

$$\gamma \simeq (\omega_s^2 / \rho v^2) \eta, \quad (27)$$

где  $\eta$  — есть некоторая компонента тензора коэффициентов вязкости (какая именно — зависит от направления распространения звука и его поляризации). Для компонент этого тензора справедлива следующая порядковая оценка, полученная Ахиезером [10]:

$$\eta_{ij} \simeq T \sum_k \int_{\Omega} \frac{d^3k}{(2\pi)^3} \tau_{kj} \Gamma^2, \quad (28)$$

где  $\Gamma$  есть так называемый коэффициент Грюнайзена, характеризующий относительный сдвиг частоты фонона под влиянием деформации.  $\Gamma$  — величина безразмерная; ее абсолютное значение составляет по порядку величины несколько единиц. Порядковые оценки  $\Gamma$  не зависят от величины волнового вектора  $k$ , поэтому нет необходимости производить оценку выражения (28) заново<sup>5</sup>,

<sup>5</sup> Есть, правда, и принципиальное различие между релаксационными процессами, дающими вклад в теплопроводность и вязкость чистых кристаллов. В первом случае теплопроводность ограничивают только процессы переброса, т. е. такие фонон-фононные столкновения, для которых  $b \neq 0$ , а во втором — вообще все фонон-фононные столкновения. Поскольку, однако, вероятность процессов переброса и нормальных процессов при высоких температурах одного порядка, порядковая оценка для  $\eta/\kappa$ , приведенная в тексте, имеет место.

а достаточно ограничиться порядковым соотношением, справедливым при не слишком больших частотах  $\omega_s$ :

$$\eta/\kappa \simeq T/v^2.$$

Нужно только указать, какие частоты следует считать не слишком большими. Это частоты, удовлетворяющие условию

$$\omega_s \tau (k_1) \ll 1, \quad (29)$$

где  $k_1$  определяется выражением (20).

Если же это неравенство изменится на противоположное, то возникнет ситуация, вполне аналогичная той, которую мы обсуждали для теплопроводности в связи с формулой (23). Только роль характерных размеров в данном случае играет длина звуковой волны  $1/k$ . При  $\omega_s \tau (k_1) \gg 1$  в качестве нижнего предела при интегрировании по  $k$  следует взять величину  $k_\omega$ , определяемую из условия  $\omega_s \tau (k_\omega) = 1$ . Это приводит к изменению частотной зависимости поглощения звука: вместо зависимости (27)  $\gamma \propto \omega^2$  мы теперь имеем

$$\gamma \propto \omega^{1/4}. \quad (30)$$

Может оказаться, что на опыте проще наблюдать измененную частотную зависимость, чем измененную температурную.

Подводя некоторые итоги, можно еще раз подчеркнуть, что первоначальная идея И. Я. Померанчука касалась частотной и температурной зависимости времени свободного пробега квазипродольных длинноволновых фононов. В температурной зависимости теплопроводности эта идея проявляется лишь опосредованно — в виде проблемы длинных волн. Чрезвычайно интересно было бы проверить эти идеи Померанчука непосредственно, например измеряя частотную и температурную зависимость коэффициента поглощения квазипродольного ультразвука. Такие опыты сопряжены с большими экспериментальными трудностями, которые далеко не просто преодолеть и в настоящее время.

Однако по прошествии около десяти лет со времени публикации этих работ И. Я. Померанчука удалось наблюдать на опыте одно кинетическое явление, которое позволяет осуществить более прямую проверку поведения времени свободного пробега длинноволновых фононов. Это явление увлечения электронов фононами в полупроводниках<sup>6</sup>. Заключается оно в следующем. Под влиянием градиента температуры возникает поток фононов. Эти неравновесные фононы, сталкиваясь с электронами проводимости полупроводника, сообщают им направленное движение, в результате чего в полупроводнике возникает ток или, при разомкнутой цепи, электрическое поле. Иными словами, увлечение электронов

<sup>6</sup> Существование такого явления в проводниках теоретически предсказал Л. Э. Гуревич [11].



фононами вносит вклад в термоэлектрические явления в полупроводниках; и, изучая эти явления на опыте, можно судить о длине свободного пробега фононов и ее температурной зависимости. При этом в эффект дают вклад именно те фононы, которые взаимодействуют с электронами проводимости. В полупроводниках это отнюдь не тепловые фононы, а подтепловые фононы со сравнительно большими длинами волн, как можно убедиться, проанализировав законы сохранения при электрон-фононных столкновениях. Иными словами, это именно те фононы, для которых Померанчук и сформулировал проблему длинных волн.

Первым полупроводником, в котором наблюдалось увлечение электронов фононами, был кристаллический германий. Это кристалл, относящийся к самому симметричному кристаллическому классу  $O_h$  кубической сингонии. Он обладает вполне заметной упругой анизотропией. Поэтому при интерпретации данных опыта изложенные выше идеи И. Я. Померанчука для расчета времени свободного пробега фононов. Тем самым мы переходим от изложения этих идей к описанию их эволюции и дальнейшей судьбы в науке.

Вопрос о том, как вычислять время свободного пробега длинноволновых фононов в кристаллах, обладающих упругой анизотропией, подверг подробному теоретическому анализу К. Херринг [12].

Херринг, полностью отдавая должное Померанчуку, поставившему проблему длинных волн, обратил внимание на то, что Померанчук при анализе процессов типа (12) рассмотрел не самый общий случай. Самый общий же случай состоит в том, что два тепловых фонона, фигурирующих в этом соотношении, принадлежат к разным колебательным ветвям, так что оно принимает вид

$$\omega_\alpha(\mathbf{k}) + \Omega_j(\mathbf{K}) = \Omega_j(\mathbf{K} + \mathbf{k}).$$

Разлагая правую часть в ряд по малому волновому вектору  $\mathbf{k}$ , мы можем переписать это соотношение также и в следующем виде:

$$v_\alpha k = \Omega_j(\mathbf{K}) - \Omega_j(\mathbf{K}) + \mathbf{k}g_j(\mathbf{K}). \quad (31)$$

Вопрос заключается в том, можно ли удовлетворить этому соотношению при любом значении волнового вектора  $\mathbf{k}$ . Очевидно, это возможно, если разность  $\Delta\Omega(\mathbf{K}) \equiv \Omega_j(\mathbf{K}) - \Omega_j(\mathbf{K})$  положительна и при этом достаточно мала (порядка  $\omega_\alpha(\mathbf{k})$ ). Поэтому прежде всего теория должна ответить на другой вопрос — может ли эта разность оказаться малой при том условии, что частоты  $\Omega_j$  и  $\Omega_j'$  велики: ведь это частоты тепловых фононов.

Херринг указал, что эта разность может быть сколь угодно малой вблизи так называемых линий контакта колебательных ветвей. Это такие линии в  $\mathbf{k}$ -пространстве, вдоль которых две фононные частоты оказываются вырожденными, т. е. имеет место со-

отношение  $\Omega_j(\mathbf{K}) = \Omega_j'(\mathbf{K})$ . Такое вырождение фононного спектра наверняка имеет место при наличии у кристалла определенных элементов симметрии. Таковыми являются оси 3-, 4- или 6-го порядка; если вектор  $\mathbf{K}$  параллелен такой оси, то имеет место вырождение. При небольших отклонениях вектора  $\mathbf{K}$  от направления вырождения имеет место небольшое расщепление фононных частот. При наличии расщепления соотношение (31) оказывается возможным. Как сам факт наличия вырождения, так и характер расщепления частот определяется в этом случае симметрией кристалла. Отсюда тесная связь между поведением трехфононного времени свободного пробега  $\tau^{(3)}(k)$  при малых  $k$  и симметрией кристалла. В частности, для кристаллов кубической сингонии Херринг [12] получил следующий закон:

$$1/\tau^{(3)}(k) \simeq \Omega_D^2 (T/Mv^2) (ak)^2. \quad (32)$$

Результаты опытов по исследованию термоэлектрических явлений, обусловленных увлечением электронов фононами, обнаруживают удовлетворительное согласие с этим выражением.

С другой стороны, при подстановке (32) в формулу для теплопроводности (7) мы получаем сходящееся выражение. Значит, для этих наиболее симметричных кристаллов решение проблемы длинных волн принципиально отличается от того, что было предложено Померанчуком.

Оно отличается также, хотя и не столь принципиальным образом, для кристаллов гексагональной, тетрагональной и ромбоэдрической сингоний. В этих кристаллах тоже имеется вырождение фононного спектра, обусловленное симметрией. Оказывается, что для этих кристаллов интеграл (7) с временем  $\tau^{(3)}$ , вообще говоря, расходится, так что в соответствии с идеями Померанчука для получения конечной теплопроводности приходится принимать во внимание четырехфононные процессы. Однако эта расходимость всего лишь логарифмическая, так что при учете четырехфононных процессов Померанчука возникает в дополнение к закону Пайерлса (8) слабая (логарифмическая) зависимость от температуры, которую едва ли можно зарегистрировать на опыте.

Из сказанного уже просматривается ответ на основной вопрос, касающийся дальнейшей эволюции идей И. Я. Померанчука, — к каким кристаллам они непосредственно применимы. Это те кристаллы, где во всяком случае отсутствует симметричное вырождение фононного спектра, т. е. кристаллы, принадлежащие к наименее симметричным сингониям — триклинной, моноклинной, орторомбической. Но нельзя утверждать, что эффект Померанчука должен существовать в любом таком кристалле. Дело в том, что, кроме симметричного вырождения фононного спектра, может существовать еще так называемое случайное вырождение. Оно непосредственно не связано с симметрией кристалла, а определяется некоторыми соотношениями (неравенствами) между константа-

ми, характеризующими его фоновый спектр. Если в кристалле есть такое случайное вырождение, то трехфононные столкновения тоже ограничивают время свободного пробега длинноволновых квазипродольных фононов. В итоге комбинированное действие трех- и четырехфононных процессов опять-таки приводит к тому, что произведение  $\kappa T$  зависит от температуры логарифмически. Таким образом, предсказанная Померанчуком зависимость вида  $\kappa \propto T^{-1/4}$  может наблюдаться в кристаллах низкой симметрии, где отсутствует случайное вырождение колебательных ветвей. Такая же зависимость может существовать и в известном смысле противоположном случае кристаллов высокой симметрии (кубической, гексагональной), где в силу «случайных» причин мала анизотропия фононного спектра.

Несколько слов об экспериментальном подтверждении, которое получили изложенные идеи И. Я. Померанчука или же идеи, в той или иной мере инициированные его исследованиями и продолжающие их. Как уже говорилось, непосредственная проверка предсказаний Померанчука в отношении температурной зависимости теплопроводности при температурах выше дебаевской — дело, по меньшей мере, чрезвычайно трудное. Эти трудности имеют принципиальный характер. Ведь необходимо различить на опыте две зависимости  $T$  и  $T^{1/4}$  в сравнительно нешироком температурном интервале.

Теория Померанчука предсказывает также зависимость теплопроводности от размеров образца. Наблюдать такую зависимость тоже совсем не просто. Для этого требуется приготовить серию образцов разных размеров, но мало отличающихся друг от друга во всех остальных отношениях, в частности характером дефектов и их концентрацией.

Более многообещающими с этой точки зрения представляются опыты по измерению частотной зависимости коэффициента поглощения звука в кристаллах диэлектриков. Зависимость (30)  $\gamma \propto \omega^{1/4}$  уже наблюдалась в ряде случаев [13—15]. Однако требуется еще всесторонний анализ, чтобы можно было с уверенностью сказать, что эта зависимость обусловлена именно эффектами Померанчука.

Выше говорилось, что исключительно чувствителен к частотной и температурной зависимости длины свободного пробега длинноволновых фононов эффект увлечения электронов фононами в полупроводниках. Как именно эта зависимость влияет на вклад увлечения в термоэлектрические явления, выяснил Херринг [16]. Для термомагнитных явлений этот вопрос исследовали Образцов и автор настоящей статьи [17]. И тот и другой вклады были изучены экспериментально для ряда случаев (мы сошлемся на первые экспериментальные наблюдения [18—20] и обзоры [21, 22]).

Дальнейшая разработка и развитие идей Померанчука породили также и обширную теоретическую литературу, касающуюся

вычисления длин свободного пробега длинноволновых фононов в разных случаях. Высказывалась, например, мысль о том, что запреты на фонон-фононные столкновения, обнаруженные Померанчуком, были получены без учета неопределенности фононных частот, обусловленной столкновениями с другими фононами [23—26]. Учет такой неопределенности мог бы сделать разрешенными многие из этих процессов и тем самым в ряде случаев решить проблему длинных волн.

С другой стороны, было предложено доказательство того, что роль ангармонического фонон-фононного взаимодействия сводится не только к созданию неопределенности у фонон-фононных частот вследствие фонон-фононных столкновений. Оно создает также и вещественный вклад в фононные частоты, который оказывается больше затухания [27], т. е., иными словами, создает дисперсию скорости звука. Более того, можно показать, что эта дисперсия имеет определенный знак: она всегда отрицательна, т. е. в соответствии с первоначальной идеей Померанчука препятствует релаксации длинноволновых продольных фононов. Однако подробно описывать эти, а также многие другие идеи, подчас очень красивые и нетривиальные, здесь нет возможности. Да и говорить об экспериментальном их подтверждении тоже пока рано. Поэтому мы ограничимся указанием на то, что систематическое их изложение можно найти в монографиях автора настоящей статьи [28].

Подводя итоги, можно сказать, что идеи И. Я. Померанчука оказали большое влияние на развитие кинетики фононных систем вообще и теории теплопроводности кристаллических диэлектриков в частности. Главная их ценность состоит в том, что они привлекли внимание к проблеме длинных волн как важной проблеме кинетики фононов, имеющей принципиальное значение для физики диэлектриков и полупроводников. И. Я. Померанчук поставил эту проблему. Свое дальнейшее развитие она получила в ряде последующих работ. Эти результаты, надежно подтвержденные опытом, останутся в науке навсегда.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Peierls R. // Ann. Phys. 1929. Vol. 3. P. 1055.
2. Debye P. Vorträge über die kinetische Theorie der Materie und Elektrizität. Leipzig: Teubner, 1914.
3. Померанчук И. Я. // ЖЭТФ. 1941. Т. 11. С. 246; J. Phys. USSR. 1941. Vol. 4. P. 259.
4. Pomeranchuk I. Ya. // Phys. Rev. 1941. Vol. 60. P. 820.
5. Померанчук И. Я. // ЖЭТФ. 1942. Т. 12. С. 419; J. Phys. USSR. 1943. Vol. 7. P. 197.
6. Landau L. D., Rumer Yu. B. // Phys. Zs. Sowjet. 1937. Vol. 11. P. 18. (Ландау Л. Д. Собрание трудов. М.: Наука, 1963. Ст. 27).
7. Померанчук И. Я. // ЖЭТФ. 1942. Т. 12. С. 245; J. Phys. USSR. 1942. Vol. 6. P. 237.
8. Померанчук И. Я. // ЖЭТФ. 1941. Т. 11. С. 455; J. Phys. USSR. 1941. Vol. 4. P. 529.

9. *Pomeranchuk I. Ya.* // J. Phys. USSR. 1943. Vol. 7. P. 266.
10. *Aхизер А. И.* // ЖЭТФ. 1938. С. 1318; J. Phys. USSR. 1939. Vol. 1. P. 277.
11. *Гуревич Л. Э.* // ЖЭТФ. 1946. Т. 16. С. 193, 416; J. Phys. USSR. 1945. Vol. 9. P. 477; 1946. Vol. 10. P. 67.
12. *Herring C.* // Phys. Rev. 1954. Vol. 95. P. 954.
13. *Claiborne L. T., Hemphill R. B., Einspruch N. G.* // J. Acoust. Soc. Amer. 1969. Vol. 45. P. 1352.
14. *Илисаевский Ю. В., Кулакова Л. А.* // ФТТ. 1973. Т. 15. С. 286; 1974. Т. 16. С. 3417.
15. *Григорович Г. М., Илисаевский Ю. В., Рувинский М. А., Щетинин В. П.* // ФТТ. 1983. Т. 25. С. 3671; 1985. Т. 27. С. 2496.
16. *Herring C.* // Phys. Rev. 1954. Vol. 96. P. 1163.
17. *Гуревич В. Л., Образцов Ю. Н.* // ЖЭТФ. 1957. Т. 32. С. 390.
18. *Frederikse H. P. R.* // Phys. Rev. 1953. Vol. 91. P. 491; Vol. 92. P. 248.
19. *Мочан И. В., Образцов Ю. Н., Крылова Т. В.* // ЖТФ. 1957. Т. 27. С. 242.
20. *Herring C., Geballe T. H.* // Bull. Amer. Phys. Soc. Ser. II. 1956. Vol. 1. P. 117.
21. *Herring C.* // Halbleiter und Phosphore / Red. M. Schön, H. Welker. В., 1958. S. 184.
22. *Звярянов П. С., Гусева Г. И.* // УФН. 1968. Т. 95. С. 565.
23. *Kawasaki K.* // Progr. Theor. Phys. 1961. Vol. 26. P. 795.
24. *Simons S.* // Proc. Phys. Soc. 1963. Vol. 82. P. 401.
25. *Maris H. J.* // Phil. Mag. 1964. Vol. 9. P. 901.
26. *Гуревич Л. Э., Шкловский Б. И.* // ФТТ. 1967. Т. 9. С. 526.
27. *Гуревич В. Л., Лайхтман Б. Д.* // ЖЭТФ. 1979. Т. 77. С. 1978.
28. *Гуревич В. Л.* Кинетика фононных систем. М.: Наука, 1980. 400 с.  
*Gurevich V. L.* Transport in phonon systems. Amsterdam: North-Holland Phys. Publ., 1987.

СПИСОК НАУЧНЫХ РАБОТ И. Я. ПОМЕРАНЧУКА<sup>1</sup>

1936—1941

- О свойствах металлов при очень низких температурах. (Совм. с Л. Д. Ландау.) // ЖЭТФ. 1937. Т. 7. С. 379; Phys. Zs. Sowjet. 1936. Bd. 10. S. 649. (Собр. науч. тр. Т. 1. Ст. 1<sup>2</sup>).
- Рассеяние света светом. (Совм. с А. И. Ахизером и Л. Д. Ландау.) // Nature. 1936. Vol. 138. P. 206. (Собр. науч. тр. Т. 2. Ст. 33).
- Когерентное рассеяние  $\gamma$ -лучей ядрами. (Совм. с А. И. Ахизером.) // ЖЭТФ. 1937. Т. 7. С. 567; Phys. Zs. Sowjet. 1936. Bd. 10. S. 649. (Собр. науч. тр. Т. 2. Ст. 34).
- О рассеянии медленных нейтронов в кристаллической решетке // ЖЭТФ. 1938. Т. 8. С. 894; Phys. Zs. Sowjet. 1938. Bd. 13. S. 65. (Собр. науч. тр. Т. 1. Ст. 25).
- Критическое поле у сверхпроводников малых размеров // ЖЭТФ. 1938. Т. 8. С. 1096. (Собр. науч. тр. Т. 1. Ст. 2).
- Максимальная энергия, которую могут иметь на поверхности Земли первичные электроны космических лучей из-за излучения в земном магнитном поле // ЖЭТФ. 1939. Т. 9. С. 915; J. Phys. USSR. 1940. Vol. 2. P. 65. (Собр. науч. тр. Т. 2. Ст. 41).
- О влиянии магнитного поля на электропроводность монокристаллов висмута при низких температурах. (Совм. с Б. И. Давыдовым.) // ЖЭТФ. 1939. Т. 9. С. 1294; J. Phys. USSR. 1940. Vol. 2. P. 147. (Собр. науч. тр. Т. 1. Ст. 3).
- О конце трека мезотрона в камере Вильсона. (Совм. с А. Б. Мигдалом.) // Докл. АН СССР. 1940. Т. 27. С. 652; Phys. Rev. 1940. Vol. 57. P. 934. (Собр. науч. тр. Т. 2. Ст. 42).
- Теплопроводность парамагнитных диэлектриков при низких температурах // ЖЭТФ. 1941. Т. 11. С. 226; J. Phys. USSR. 1941. Vol. 4. P. 356. (Собр. науч. тр. Т. 1. Ст. 7).
- О теплопроводности диэлектриков при температурах больше дебаевской // ЖЭТФ. 1941. Т. 11. С. 246; J. Phys. USSR. 1941. Vol. 4. P. 259. (Собр. науч. тр. Т. 1. Ст. 8).
- О поглощении звука в диэлектриках // ЖЭТФ. 1941. Т. 11. С. 455; J. Phys. USSR. 1941. Vol. 4. P. 529. (Собр. науч. тр. Т. 2. Ст. 9).
- Рождение мезонных пар при аннигиляции позитрона // J. Phys. USSR. 1941. Vol. 4. P. 277.
- Рассеяние мезонов мезонами // J. Phys. USSR. 1941. Vol. 4. P. 277.
- Ядерные реакции внутри звезд // J. Phys. USSR. 1941. Vol. 4. P. 285.
- О теплопроводности диэлектриков // Phys. Rev. 1941. Vol. 60. P. 820. (Собр. науч. тр. Т. 1. Ст. 10).

1942—1946

- О теплопроводности диэлектриков при температурах меньших дебаевской // ЖЭТФ. 1942. Т. 12. С. 245; J. Phys. USSR. 1942. Vol. 6. P. 237. (Собр. науч. тр. Т. 1. Ст. 11).

<sup>1</sup> Список научных работ воспроизводится по Собранию научных трудов И. Я. Померанчука в трех томах (М.: Наука, 1972).

<sup>2</sup> Ссылки на статьи, опубликованные в Собрании научных трудов, далее приводятся следующим образом: Собр. науч. тр. Т. №. Ст. №.

- Теплопроводность диэлектриков при высоких температурах // ЖЭТФ. 1942. Т. 12. С. 419. J. Phys. USSR. 1943. Vol. 7. P. 197. (Собр. науч. тр. Т. 1. Ст. 12).
- Зависимость поглощения звука в диэлектрике от частоты и температуры // J. Phys. USSR. 1943. Vol. 7. P. 266. (Собр. науч. тр. Т. 1. Ст. 13).
- Кулоновские силы и строение нейтрона // Докл. АН СССР. 1943. Т. 41. С. 162. (Собр. науч. тр. Т. 2. Ст. 54).
- Спектр мягкой компоненты в воздухе при больших энергиях. (Совм. с А. Кирпичевым.) // Докл. АН СССР. 1943. Т. 41. С. 19. (Собр. науч. тр. Т. 2. Ст. 43).
- К теории переходных эффектов в космических лучах. (Совм. с А. Кирпичевым.) // Докл. АН СССР. 1944. Т. 42. С. 396. (Собр. науч. тр. Т. 2. Ст. 44).
- К теории поглощения инфракрасных лучей в кристаллах, обладающих центром симметрии // ЖЭТФ. 1943. Т. 13. С. 428; J. Phys. USSR. 1943. Vol. 7. P. 262. (Собр. науч. тр. Т. 1. Ст. 14).
- Экранирование эффективных сечений для тормозного излучения и образования пар с помощью экспериментальных значений атомформфактора. (Совм. с А. Кирпичевым.) // Докл. АН СССР. 1944. Т. 45. С. 301. (Собр. науч. тр. Т. 2. Ст. 45).
- Рассеяние мезонов, сильно взаимодействующих с нуклонами // Докл. АН СССР. 1944. Т. 44. С. 13. (Собр. науч. тр. Т. 2. Ст. 55).
- О теплопроводности солей в методе магнитного охлаждения. (Совм. с А. И. Ахиезером.) // J. Phys. USSR. 1944. Vol. 8. P. 216. (Собр. науч. тр. Т. 1. Ст. 15).
- О тепловом равновесии между спинами и решеткой. (Совм. с А. И. Ахиезером.) // ЖЭТФ. 1944. Т. 14. С. 342; J. Phys. USSR. 1944. Vol. 8. P. 206. (Собр. науч. тр. Т. 1. Ст. 16).
- К интерпретации экспериментальных данных о больших лавинных ливнях // ЖЭТФ. 1944. Т. 14. С. 252; J. Phys. USSR. 1944. Vol. 8. P. 17. (Собр. науч. тр. Т. 2. Ст. 46).
- Излучение быстрых электронов в магнитном поле. (Совм. с А. Л. Арцимовичем.) // ЖЭТФ. 1946. Т. 16. С. 379; J. Phys. USSR. 1945. Vol. 9. P. 267. (Собр. науч. тр. Т. 2. Ст. 48).
- О максимальной энергии, достижимой в бетатроне. (Совм. с Д. Д. Иваненко.) // Докл. АН СССР. 1944. Т. 44. С. 343. (Собр. науч. тр. Т. 2. Ст. 47).
- Об уровнях энергии систем с  $Z > 137$ . (Совм. с Я. А. Смородинским.) // J. Phys. USSR. 1945. Vol. 9. P. 97. (Собр. науч. тр. Т. 2. Ст. 35).
- О теплопроводности висмута. (Совм. с А. И. Ахиезером.) // ЖЭТФ. 1945. Т. 15. С. 587. (Собр. науч. тр. Т. 1. Ст. 4).
- Об упругом рассеянии ядрами быстрых заряженных частиц. (Совм. с А. И. Ахиезером.) // ЖЭТФ. 1946. Т. 16. С. 396; J. Phys. USSR. 1945. Vol. 9. P. 471. (Собр. науч. тр. Т. 3. Ст. 96).
- О рассеянии нейтронов с энергией несколько градусов в жидком гелии II. (Совм. с А. И. Ахиезером.) // ЖЭТФ. 1946. Т. 16. С. 391; J. Phys. USSR. 1945. Vol. 9. P. 461. (Собр. науч. тр. Т. 1. Ст. 18).
- Излучение релятивистских электронов в магнитном поле // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1946. Т. 10. С. 316. (Собр. науч. тр. Т. 2. Ст. 49).

## 1947—1951

- О рассеянии медленных нейтронов в кристаллах. (Совм. с А. И. Ахиезером.) // ЖЭТФ. 1947. Т. 17. С. 769; J. Phys. USSR. 1947. Vol. 11. P. 167. (Собр. науч. тр. Т. 1. Ст. 28).
- Обобщение предельного  $\lambda$ -процесса и неоднозначность в устранении бесконечностей квантовой теории элементарных частиц // ЖЭТФ. 1947. Т. 17. С. 667; Phys. Rev. 1949. Vol. 76. P. 298. (Собр. науч. тр. Т. 2. Ст. 56).
- К теории резонансного рассеяния частиц. (Совм. с А. И. Ахиезером.) // ЖЭТФ. 1948. Т. 18. С. 603. (Собр. науч. тр. Т. 1. Ст. 29).

- О рефракции нейтронов. (Совм. с А. И. Ахиезером.) // ЖЭТФ. 1948. Т. 18. С. 475 (Собр. науч. тр. Т. 1. Ст. 30).
- О движении посторонних частиц в гелии II. (Совм. с Л. Д. Ландау.) // Докл. АН СССР. 1948. Т. 59. С. 669. (Собр. науч. тр. Т. 1. Ст. 19).
- О флуктуациях ионизационных пробегов // ЖЭТФ. 1948. Т. 18. С. 759. (Собр. науч. тр. Т. 2. Ст. 50).
- Введение в теорию нейтронных мультиплицирующих систем (реакторов). (Совм. с А. И. Ахиезером.) // Отчет ИТЭФ. М., 1947. (Собр. науч. тр. Т. 1. Ст. 27).
- Правила отбора при аннигиляции электронов и позитронов // Докл. АН СССР. 1948. Т. 60. С. 213. (Собр. науч. тр. Т. 2. Ст. 36).
- Некоторые вопросы теории ядра. (Совм. с А. И. Ахиезером.) М.: Гостехиздат. 1-е изд. 1948; 2-е изд. 1950. 416 с.
- Влияние примесей на термодинамические свойства и скорость второго звука в гелии II // ЖЭТФ. 1949. Т. 19. С. 42. (Собр. науч. тр. Т. 1. Ст. 20).
- Замечание о рассеянии частиц с нулевой энергией // ЖЭТФ. 1948. Т. 18. С. 1146 (Собр. науч. тр. Т. 1. Ст. 31).
- Время жизни медленных позитронов // ЖЭТФ. 1949. Т. 19. С. 183. (Собр. науч. тр. Т. 2. Ст. 37).
- Излучение при столкновении быстрых нейтронов с протонами. (Совм. с И. М. Шмушкевичем.) // Докл. АН СССР. 1949. Т. 64. С. 499. (Собр. науч. тр. Т. 3. Ст. 80).
- К определению неэлектромагнитного взаимодействия между электронами и нейтронами. (Совм. с А. И. Ахиезером.) // ЖЭТФ. 1949. Т. 19. С. 558. (Собр. науч. тр. Т. 1. Ст. 32).
- О  $\beta$ -распаде нейтрона. (Совм. с В. Б. Берестецким.) // ЖЭТФ. 1949. Т. 19. С. 756. (Собр. науч. тр. Т. 2. Ст. 67).
- Электромагнитное излучение под действием обменных сил. (Совм. с И. М. Шмушкевичем.) // Докл. АН СССР. 1950. Т. 70. С. 33. (Собр. науч. тр. Т. 3. Ст. 81).
- К теории жидкого  $^3\text{He}$  // ЖЭТФ. 1950. Т. 20. С. 919. (Собр. науч. тр. Т. 1. Ст. 24).
- Обменные столкновения быстрых нуклонов с дейтронами. I // ЖЭТФ. 1951. Т. 21. С. 1113. (Собр. науч. тр. Т. 3. Ст. 82).
- Обменные столкновения быстрых нуклонов с дейтронами // Докл. АН СССР. 1951. Т. 78. С. 249. (Собр. науч. тр. Т. 3. Ст. 83).
- О превращении заряженного  $\lambda$ -мезона в нейтральный мезон при столкновении с протоном и дейтроном. (Совм. с В. Б. Берестецким.) // Докл. АН СССР. 1951. Т. 77. С. 803; ЖЭТФ. 1951. Т. 21. С. 1333. (Собр. науч. тр. Т. 3. Ст. 84).
- К теории образования многих частиц в одном акте // Докл. АН СССР. 1951. Т. 78. С. 889. (Собр. науч. тр. Т. 3. Ст. 105).
- Захват  $\lambda$ -частиц в дейтроне // Докл. АН СССР. 1951. Т. 80. С. 47. (Собр. науч. тр. Т. 3. Ст. 86).
- О столкновении  $\lambda$ -мезонов с дейтроном. (Совм. с В. Б. Берестецким.) // Докл. АН СССР. 1951. Т. 81. С. 1019. (Собр. науч. тр. Т. 3. Ст. 88).
- Теплопроводность полностью ионизированного газа при высоких температурах. (Совм. с В. Б. Берестецким и Б. Л. Иоффе.) Работа выполнена в 1951 г. Впервые опубликована в Собр. науч. тр. Т. 1. С. 345.

## 1952—1956

- К теории захвата  $\lambda$ -частиц в дейтроне // ЖЭТФ. 1952. Т. 22. С. 129. (Собр. науч. тр. Т. 3. Ст. 85).
- Обменные столкновения быстрых нуклонов с дейтронами. II // ЖЭТФ. 1952. Т. 22. С. 624. (Собр. науч. тр. Т. 3. Ст. 87).
- Об электронах, образующихся при захвате  $\mu$ -мезонов на атомные уровни.

- (Совм. с Б. Л. Иоффе.) // ЖЭТФ. 1952. Т. 23. С. 123. (Собр. науч. тр. Т. 2. Ст. 38).
- О спектре  $\mu$ -мезоводорода. (Совм. с А. Д. Галаниным.) // Докл. АН СССР. 1952. Т. 86. С. 251. (Собр. науч. тр. Т. 2. Ст. 39).
- Об испусканиях  $\gamma$ -квантов больших энергий при столкновении быстрых нейтронов с протонами. (Совм. с И. М. Шмушкевичем.) // Докл. АН СССР. 1952. Т. 87. С. 385. (Собр. науч. тр. Т. 3. Ст. 89).
- О парамагнитной дисперсии. (Совм. с А. И. Ахизером.) // Докл. АН СССР. 1952. Т. 87. С. 917. (Собр. науч. тр. Т. 1. Ст. 17).
- Излучение  $\gamma$ -квантов при столкновении быстрых  $\pi$ -мезонов с нуклонами. (Совм. с Л. Д. Ландау.) // ЖЭТФ. 1953. Т. 24. С. 505; CERN Symp. 1956. Vol. 2. P. 159. (Собр. науч. тр. Т. 3. Ст. 97).
- О внешней (дифракционной) генерации частиц при ядерных столкновениях. (Совм. с Е. Л. Фейнбергом.) // Докл. АН СССР. 1953. Т. 93. С. 439. (Собр. науч. тр. Т. 3. Ст. 98).
- Пределы применимости теории тормозного излучения электронов и образования пар при больших энергиях. (Совм. с Л. Д. Ландау.) // Докл. АН СССР. 1953. Т. 92. С. 535. (Собр. науч. тр. Т. 2. Ст. 51).
- Электроно-лавиновые процессы при сверхвысоких энергиях. (Совм. с Л. Д. Ландау.) // Докл. АН СССР. 1953. Т. 92. С. 735. (Собр. науч. тр. Т. 2. Ст. 5).
- Излучение фотона, сопровождающееся захватом быстрого протона ядром. (Совм. с А. И. Ахизером.) // Докл. АН СССР. 1954. Т. 94. С. 821. (Собр. науч. тр. Т. 3. Ст. 99).
- Перенормировка массы и заряда в ковариантных уравнениях квантовой теории поля. (Совм. с А. Д. Галаниным и Б. Л. Иоффе.) // Докл. АН СССР. 1954. Т. 98. С. 361. (Собр. науч. тр. Т. 2. Ст. 57).
- Полуфеноменологическая теория образования  $\pi$ -мезонных пар  $\gamma$ -квантами больших энергий // Докл. АН СССР. 1954. Т. 96. С. 265. (Собр. науч. тр. Т. 3. Ст. 100).
- Образование  $\pi$ -мезонных пар  $\gamma$ -квантами в случае тяжелых ядер // Докл. АН СССР. 1954. Т. 96. С. 481. (Собр. науч. тр. Т. 3. Ст. 101).
- Об асимптотике функций Грина нуклона и мезона в псевдоскалярной теории со слабым взаимодействием. (Совм. с А. Д. Галаниным и Б. Л. Иоффе.) // ЖЭТФ. 1955. Т. 29. С. 51. (Собр. науч. тр. Т. 2. Ст. 58).
- Обобщение теоремы Уорда на случай конечных длин волн света у частиц со спином 0 // Докл. АН СССР. 1955. Т. 100. С. 41. (Собр. науч. тр. Т. 2. Ст. 59).
- О точечном взаимодействии в квантовой электродинамике. (Совм. с Л. Д. Ландау.) // Докл. АН СССР. 1955. Т. 102. С. 489. (Собр. науч. тр. Т. 2. Ст. 60).
- Равенство нулю перенормированного заряда в квантовой электродинамике // Докл. АН СССР. 1955. Т. 103. С. 1005. (Собр. науч. тр. Т. 2. Ст. 61).
- О перенормировке мезонного заряда в псевдоскалярной теории с псевдоскалярной связью // Докл. АН СССР. 1955. Т. 104. С. 51. (Собр. науч. тр. 1955. Т. 2. Ст. 62).
- Об обращении в нуль перенормированного мезонного заряда в псевдоскалярной теории с псевдоскалярной связью // Докл. АН СССР. 1955. Т. 105. С. 461. (Собр. науч. тр. Т. 2. Ст. 63).
- Решение уравнений псевдоскалярной мезонной теории с псевдоскалярной связью // ЖЭТФ. 1955. Т. 29. С. 869. (Собр. науч. тр. Т. 2. Ст. 64).
- Образование  $\mu$ -мезонной пары при аннигиляции позитрона. (Совм. с В. Б. Берестецким.) // ЖЭТФ. 1955. Т. 29. С. 864. (Собр. науч. тр. Т. 2. Ст. 40).
- Об излучении  $\gamma$ -квантов, сопровождающемся поглощением быстрых протонов ядрами. (Совм. с А. И. Ахизером.) // ЖЭТФ. 1956. Т. 30. С. 201. (Собр. науч. тр. Т. 3. Ст. 102).
- Равенство нулю перенормированного заряда в электродинамике и в мезонной теории // Nuovo sim. 1956. Vol. 3. P. 1186. (Собр. науч. тр. Т. 2. Ст. 65).

- Изотопическая инвариантность и рассеяние антинуклонов нуклонами // ЖЭТФ. 1956. Т. 30. С. 423. (Собр. науч. тр. Т. 3. Ст. 106).
- Изотопическая инвариантность и сечения взаимодействия  $\pi$ -мезонов и нуклонов высокой энергии с нуклонами. (Совм. с Л. Б. Окунем.) // ЖЭТФ. 1956. Т. 30. С. 424. (Собр. науч. тр. Т. 3. Ст. 107).
- Теория резонансного поглощения в гетерогенных системах. (Совм. с И. И. Гуревичем.) // Междунар. конф. по мирному использованию атомной энергии. Женева, 1955. М.: Изд-во АН СССР, 1955. С. 557. (Собр. науч. тр. Т. 1. Ст. 26).
- Равенство нулю перенормированного заряда в теориях поля с точечным взаимодействием. (Совм. с В. В. Судаковым и К. А. Тер-Мартirosяном.) // Phys. Rev. 1956. Vol. 103. P. 784. (Собр. науч. тр. Т. 2. Ст. 66).
- Корреляционные явления при захвате  $K$ -мезонов. (Совм. с В. Б. Берестецким.) // ЖЭТФ. 1956. Т. 31. С. 350. (Собр. науч. тр. Т. 2. Ст. 68).
- Дисперсионные соотношения для рассеяния  $\pi$ -мезонов на дейтронах. (Совм. с Б. Л. Иоффе и А. П. Рудиком.) // ЖЭТФ. 1956. Т. 31. С. 712. (Собр. науч. тр. Т. 3. Ст. 90).
- О числе различных типов  $K$ -мезонов. (Совм. с Б. Л. Иоффе и Л. Б. Окунем.) // Nucl. Phys. 1956/1957. Vol. 2. P. 277. (Собр. науч. тр. Т. 2. Ст. 69).
- Замечание о числе различных типов  $K$ -мезонов // Nucl. Phys. 1956/1957. Vol. 2. P. 281. (Собр. науч. тр. Т. 2. Ст. 70).
- Неупругие дифракционные процессы при высоких энергиях. (Совм. с Е. Л. Фейнбергом.) // Nuovo sim. Suppl. 1956. Vol. 3, N 4. P. 652. (Собр. науч. тр. Т. 3. Ст. 103).

## 1957—1961

- О возможном дипольном моменте перехода у  $\Lambda$ -частиц. (Совм. с Б. Л. Иоффе.) // Докл. АН СССР. 1957. Т. 113. С. 1251. (Собр. науч. тр. Т. 2. Ст. 71).
- Равенство полных сечений взаимодействия нуклонов и антинуклонов при больших энергиях // ЖЭТФ. 1958. Т. 34. С. 725. (Собр. науч. тр. Т. 3. Ст. 108).
- О взаимодействии  $\Xi$ -гиперонов с нуклонами и легкими ядрами. (Совм. с Л. Б. Окунем и И. М. Шмушкевичем.) // ЖЭТФ. 1958. Т. 34. С. 1246. (Собр. науч. тр. Т. 2. Ст. 72).
- Об определении четности  $K$ -мезона. (Совм. с Л. Б. Окунем.) // ЖЭТФ. 1958. Т. 34. С. 997. (Собр. науч. тр. Т. 2. Ст. 73).
- О возможности формулировки теории сильновзаимодействующих фермионов. (Совм. с А. А. Абрикосовым, А. Д. Галаниным, Л. П. Горьковым, Л. Д. Ландау и К. А. Тер-Мартirosяном.) // Phys. Rev. 1958. Vol. 111. P. 321.
- Дифракционные явления при столкновениях быстрых частиц с ядрами. (Совм. с А. И. Ахизером.) // УФН. 1958. Т. 55. С. 593. (Собр. науч. тр. Т. 3. Ст. 104).
- Функции Грина в мезонных теориях. (Совм. с А. А. Абрикосовым, А. Д. Галаниным, Б. Л. Иоффе и И. М. Халатниковым.) // Nuovo sim. 1958. Vol. 8. P. 782.
- Об устойчивости фермиевской жидкости // ЖЭТФ. 1958. Т. 35. С. 524. (Собр. науч. тр. Т. 1. Ст. 22).
- Изотопический эффект в остаточном электрическом сопротивлении металлов // ЖЭТФ. 1958. Т. 35. С. 992. (Собр. науч. тр. Т. 1. Ст. 5).
- О взаимодействии между электронами проводимости в ферромагнетиках. (Совм. с А. И. Ахизером.) // ЖЭТФ. 1959. Т. 36. С. 859. (Собр. науч. тр. Т. 1. Ст. 6).
- О периферийных взаимодействиях элементарных частиц. (Совм. с Л. Б. Окунем.) // ЖЭТФ. 1959. Т. 36. С. 300; Nucl. Phys. 1959. Vol. 10. P. 492. (Собр. науч. тр. Т. 3. Ст. 91).
- $\beta$ -Взаимодействие и формфактор нуклона. (Совм. с В. Б. Берестецким.) // ЖЭТФ. 1959. Т. 36. С. 1321. (Собр. науч. тр. Т. 2. Ст. 74).

- О столкновении нуклонов с большими орбитальными моментами. (Совм. с А. Д. Галаниным, А. Ф. Грашиным и Б. Л. Иоффе.) // ЖЭТФ. 1959. Т. 37. С. 1663; Nucl. Phys. 1960. Vol. 17. P. 181. (Собр. науч. тр. Т. 3. Ст. 92).
- Рассеяние нуклона на нуклоне в двухмезонном приближении при больших орбитальных моментах. (Совм. с А. Д. Галаниным, А. Ф. Грашиным и Б. Л. Иоффе.) // ЖЭТФ. 1960. Т. 38. С. 475. (Собр. науч. тр. Т. 3. Ст. 93).
- О пределах применимости теории переходного излучения. (Совм. с Г. М. Гарибяном.) // ЖЭТФ. 1959. Т. 37. С. 1828. (Собр. науч. тр. Т. 2. Ст. 53).
- Об асимптотической зависимости сечений при больших энергиях. (Совм. с В. Б. Берестецким.) // ЖЭТФ. 1960. Т. 39. С. 1078; Nucl. Phys. 1961. Vol. 22. P. 629. (Собр. науч. тр. Т. 3. Ст. 109).
- К теории рассеяния медленных нейтронов в ферми-жидкости. (Совм. с А. И. Ахиезером и И. А. Ахиезером.) // ЖЭТФ. 1961. Т. 41. С. 644. (Собр. науч. тр. Т. 1. Ст. 23).
- О процессах взаимодействия  $\gamma$ -квантов с нестабильными частицами. (Совм. с И. М. Шмушкевичем.) // Nucl. Phys. 1961. Vol. 23. P. 452. (Собр. науч. тр. Т. 3. Ст. 94).
- Фазовый анализ  $pp$ -рассеяния при энергии 95 МэВ. (Совм. с В. А. Боровиковым, И. М. Гельфандом и А. Ф. Грашиным.) // ЖЭТФ. 1961. Т. 40. С. 1106.
- Об электромагнитном взаимодействии нейтрального векторного мезона. (Совм. с И. Ю. Кобзаревым и Л. Б. Окунем.) // ЖЭТФ. 1961. Т. 41. С. 495. (Собр. науч. тр. Т. 2. Ст. 75).
- Об образовании пучков  $\pi$ -мезонов большой энергии. (Совм. с Ю. П. Никитиным и И. М. Шмушкевичем.) // ЖЭТФ. 1961. Т. 41. С. 963. (Собр. науч. тр. Т. 3. Ст. 95).

## 1962—1966

- Асимптотическое поведение процессов аннигиляции и упругого рассеяния при высоких энергиях. (Совм. с В. Н. Грибовым.) // Nucl. Phys. 1962. Vol. 33. P. 516; Intern. Conf. Theor. Aspects Very High Energy Phenomena. CERN, 1961. P. 376; Препр. ИТЭФ-61-15. М., 1961. (Собр. науч. тр. Т. 3. Ст. 110).
- Комплексные орбитальные моменты и соотношения между сечениями различных процессов при высоких энергиях. (Совм. с В. Н. Грибовым.) // ЖЭТФ. 1962. Т. 42. С. 1141; Phys. Rev. Lett. 1962. Vol. 8. P. 343. (Собр. науч. тр. Т. 3. Ст. 111).
- О некоторых свойствах амплитуды упругого рассеяния при больших энергиях. (Совм. с В. Н. Грибовым.) // ЖЭТФ. 1962. Т. 43. С. 308; Nucl. Phys. 1962. Vol. 38. P. 516. (Собр. науч. тр. Т. 3. Ст. 112).
- Некоторые следствия из гипотезы движущихся полюсов для процессов при больших энергиях. (Совм. с В. Н. Грибовым, Б. Л. Иоффе и А. П. Рудиком.) // ЖЭТФ. 1962. Т. 42. С. 1419. (Собр. науч. тр. Т. 3. Ст. 113).
- О рассеянии медленных нейтронов в ферми-жидкости. (Совм. с А. И. Ахиезером.) // Nucl. Phys. 1963. Vol. 40. P. 139. (Собр. науч. тр. Т. 1. Ст. 24).
- Спиновая структура амплитуд мезон-нуклонного и нуклон-нуклонного рассеяний при высоких энергиях. (Совм. с В. Н. Грибовым.) // ЖЭТФ. 1962. Т. 42. С. 1682; Phys. Rev. Lett. 1962. Vol. 8. P. 412. (Собр. науч. тр. Т. 3. Ст. 114).
- Полюса Редже и особенности Ландау. (Совм. с В. Н. Грибовым.) // ЖЭТФ. 1962. Т. 43. С. 1970; Phys. Rev. Lett. 1962. Vol. 9. P. 238; Proc. Intern. Conf. High Energy Phys. Geneva, 1962. P. 543. (Собр. науч. тр. Т. 3. Ст. 115).

- Ограничение скорости убывания амплитуд различных процессов. (Совм. с В. Н. Грибовым.) // ЖЭТФ. 1962. Т. 43. С. 1556; Phys. Lett. 1962. Vol. 2. P. 239; Proc. Intern. Conf. High Energy Phys. Geneva, 1962. P. 522. (Собр. науч. тр. Т. 3. Ст. 116).
- О процессах, определяемых фермионными полюсами Редже. (Совм. с В. Н. Грибовым и Л. Б. Окунем.) // ЖЭТФ. 1963. Т. 45. С. 114. (Собр. науч. тр. Т. 3. Ст. 117).
- Особенности парциальных волн вблизи  $j = 1$  и поведение амплитуды упругого рассеяния при высоких энергиях. (Совм. с В. Н. Грибовым и К. А. Тер-Мартirosяном.) // Phys. Lett. 1964. Vol. 9. P. 269. (Собр. науч. тр. Т. 3. Ст. 118). Замечание к этой работе // Phys. Lett. 1964. Vol. 12. P. 153. (Собр. науч. тр. Т. 3. С. 340).
- Некоторые следствия из унитарной симметрии для процессов с участием  $\omega$ -,  $\phi$ - и  $f^0$ -мезонов. (Совм. с Б. Л. Иоффе и И. Ю. Кобзаревым.) // ЖЭТФ. 1965. Т. 48. С. 375. (Собр. науч. тр. Т. 2. Ст. 76).
- Двигающиеся ветвления в  $j$ -плоскости и реджионные условия унитарности. (Совм. с В. Н. Грибовым и К. А. Тер-Мартirosяном.) // ЯФ. 1965. Т. 2. С. 361; Phys. Rev. 1965. Vol. 139. P. 184; Вопросы физики элементарных частиц. Ереван, 1964. С. 167; XII Междунар. конф. по физике высоких энергий. Атомиздат, 1966. Т. 1. С. 363. (Собр. науч. тр. Т. 3. Ст. 119).
- Структура  $j$ -плоскости вблизи  $j = 1$  и дифракционное рассеяние при высоких энергиях. (Совм. с В. Н. Грибовым и К. А. Тер-Мартirosяном.) Препр. ИТЭФ № 238. М., 1964.
- «Теневая Вселенная» и нейтринный опыт. (Совм. с Л. Б. Окунем.) // Письма в ЖЭТФ. 1965. Т. 1. С. 28; Phys. Lett. 1965. Vol. 16. P. 338. (Собр. науч. тр. Т. 2. Ст. 77).
- Электромагнитные разности масс барионов и  $SU(6)$ -симметрия. (Совм. с А. Д. Долговым, Л. Б. Окунем и В. В. Соловьевым.) // ЯФ. 1965. Т. 1. С. 730; Phys. Lett. 1965. Vol. 15. P. 84. (Собр. науч. тр. Т. 2. Ст. 78).
- На каких расстояниях происходит взаимодействие при высоких энергиях? (Совм. с В. Н. Грибовым и Б. Л. Иоффе.) // ЯФ. 1965. Т. 2. С. 768. (Собр. науч. тр. Т. 3. Ст. 120).
- О возможности экспериментального обнаружения зеркальных частиц. (Совм. с И. Ю. Кобзаревым и Л. Б. Окунем.) // ЯФ. 1966. Т. 3. С. 1154. (Собр. науч. тр. Т. 2. Ст. 79).
- О полном сечении аннигиляции электронно-позитронных пар в адроны при высоких энергиях. (Совм. с В. Н. Грибовым и Б. Л. Иоффе.) // ЯФ. 1967. Т. 6. С. 587. (Собр. науч. тр. Т. 3. Ст. 121).
- Формула Орира как следствие ветвлений в  $j$ -плоскости. (Собр. науч. тр. Т. 3. Ст. 122).
- Ограничение на скорость роста сечений слабых взаимодействий // ЯФ. 1970. Т. 11. С. 852. (Собр. науч. тр. Т. 3. Ст. 123).

ЗАПИСКА, НАПРАВЛЕННАЯ И. Я. ПОМЕРАНЧУКОМ  
В ОТДЕЛЕНИЕ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ АН СССР

Бюро отделения ядерной физики АН СССР

Ввиду того, что я не могу присутствовать на заседании Бюро, я хотел бы изложить свои соображения по вопросу, поставленному на его обсуждение, — о Серпуховском ускорителе.

1. Физика элементарных частиц, физика высоких энергий развивается в последнее время чрезвычайно быстрыми темпами. В этой области мы имеем в последнее время настоящий поток важнейших открытий. Достаточно упомянуть о новой области — физике резонансов — и первых шагах в теоретической их интерпретации (симметрии). Это направление может привести к обнаружению принципиально новой формы вещества типа, например, кварков. Теоретическое и практическое значение выходов может быть только недооценено. Возможно, еще более глубокие последствия возникнут на базе только год назад открытого несохранения комбинированной четности. Этими примерами, разумеется, отнюдь не исчерываются даже наиболее важные и глубокие направления развития физики высоких энергий. Мы ни в коем случае не имеем права допустить отставание Советского Союза в этой, одной из лидирующих, области современной науки.

2. Важности открытий физики высоких энергий отвечает усложнение экспериментальных методов в этой области. Без преувеличения можно сказать, что за последние годы началась и продолжается подлинная революция в экспериментальных методах. Если мы в СССР не создадим современную экспериментальную базу, то уже через несколько лет мы вообще не будем по-настоящему понимать, что именно происходит, не говоря о большем.

3. Строительство Серпуховского ускорителя дает нам возможность занять подлинно передовые позиции в этой области. Но для того чтобы эти возможности превратились в реальность, необходимо:

а) обеспечить создание самого ускорителя на современном уровне (качество магнитов, мощный инжектор, дающий большую интенсивность, устойчиво работающие на высоком уровне радиотехнические, вакуумные и т. д. системы);

б) не менее важным, чем а), является создание к моменту пуска ускорителя в Серпухове целого ряда современных экспериментальных установок и достаточной вычислительной базы для обработки экспериментов.

Не обеспечив пункт б), мы ничего не достигнем. Это надо четко объяснить в тех инстанциях, которые ведают финансовыми ресурсами и так далее. Бюро должно полностью поддерживать такую, и только такую, программу финансирования, которая обеспечивает выполнение как пункта а), так и пункта б). Я уверен, что при достаточно энергичных действиях со стороны физиков эта программа финансирования будет одобрена.

Академик

И. Я. Померанчук

[Октябрь, 1965 г.]<sup>1</sup>

ОСНОВНЫЕ ДАТЫ ЖИЗНИ И ДЕЯТЕЛЬНОСТИ  
И. Я. ПОМЕРАНЧУКА

- Исаак Яковлевич Померанчук родился 20 мая 1913 г. в Варшаве \*.  
1918 г. Семья переехала в Ростов-на-Дону.  
1923 г. Семья переехала в Донбасс (ст. Переездная, а затем ст. Рубежная Донецкой ж. д.).  
1927 г. Окончил Рубежанскую 7-летнюю школу.  
1928—1937 гг. Член ВЛКСМ.  
1929 г. Окончил 2-летнюю школу фабрично-заводского ученичества при Рубежанском химическом заводе.  
1929—1931 гг. Рабочий Рубежанского химического завода.  
1931 г. Поступил на 1-й курс Ивановского химико-технологического института.  
1932 г. Перевелся на 2-й курс Ленинградского политехнического института.  
1935 г. Уехал в Харьков к Л. Д. Ландау для сдачи теоретического минимума и выполнения дипломной работы.  
1936 г. Защитил в Ленинграде дипломную работу, окончил Ленинградский политехнический институт и поступил в аспирантуру Украинского физико-технического института в Харькове.  
1936 г. Опубликовал первую научную работу.  
1937 г. Окончил аспирантуру УФТИ.  
1937—1938 гг. Ассистент кафедры физики Московского института легкой промышленности.  
1938 г. Защитил кандидатскую диссертацию.  
1938—1939 гг. Ассистент Ленинградского университета.  
1939—1940 гг. Младший научный сотрудник Ленинградского физико-технического института.  
1940—1943 гг. Старший научный сотрудник Физического института АН СССР им. П. Н. Лебедева.  
1940 г. Защитил докторскую диссертацию «Теплопроводность и поглощение звука в диэлектриках» (ФИАН, 19 сентября).  
1941 г. Эвакуация в составе ФИАН в Казань.  
1942 г. Командировка в Армению в составе группы А. И. Алиханова, создавшей станцию по изучению космических лучей на горе Арагац.  
1943—1946 гг. Заведующий сектором Лаборатории № 2 АН СССР (ЛИПАН).  
1946 г. 1.02.—1.06. Старший научный сотрудник Лаборатории № 3 АН СССР (ТТЛ).  
1946 г. 1.06.—1966 г. 14.12. Заведующий теоретическим сектором ТТЛ (ИТЭФ).  
1946 г.—1966 г. 14.12. Профессор кафедры теоретической физики Московского механического института — ММИ (МИФИ).  
1947 г. Утвержден ВАК в звании профессора.  
1950 г. Удостоен Государственной премии СССР.  
1950 г. Удостоен премии АН СССР им. Л. И. Мандельштама.  
1953 г. Избран членом-корреспондентом АН СССР.  
1954 г. Удостоен Государственной премии СССР, награжден орденами Ленина и Трудового Красного Знамени.  
1964 г. Избран действительным членом АН СССР.  
1966 г. 14.12. Скончался в Москве.

\* Отец — Померанчук Яков Исаакович, 1887 года рождения, уроженец Бреста. Умер в 1934 г. в Москве.

Мать — Померанчук Амалия Давыдовна, 1887 года рождения, уроженка Варшавы. Умерла в 1958 г. в Москве.

<sup>1</sup> Сохраняющаяся копия записки не содержит точной даты. — Примеч. ред.

## КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ\*

*Галанин Алексей Дмитриевич* (р. 1916 г.) — окончил МГУ в 1940 г., доктор физ.-мат. наук, профессор, старший научный сотрудник ИТЭФ.

*Голдбергер Марвин Леонард* (р. 1922 г.) — американский физик, член Национальной АН, президент Калифорнийского технологического ин-та.

*Гольдин Лев Лазаревич* (р. 1919 г.) — окончил МГУ в 1941 г., доктор физ.-мат. наук, профессор, заведующий отделом ИТЭФ.

*Грановский Яков Иосифович* (р. 1931 г.) — окончил Казахский гос. ун-т в 1953 г., заведующий кафедрой, профессор Донецкого гос. ун-та.

*Грибов Владимир Наумович* (р. 1930 г.) — окончил ЛГУ в 1952 г., член-корреспондент АН СССР, заведующий лабораторией ИТФ им. Л. Д. Ландау.

*Гуревич Вадим Львович* (р. 1934 г.) — окончил ЛГУ в 1956 г., доктор физ.-мат. наук, профессор, заведующий сектором ФТИ им. А. Ф. Иоффе.

*Гуревич Исай Израилевич* (р. 1912 г.) — окончил ЛГУ в 1934 г., член-корреспондент АН СССР, заведующий лабораторией ИАЭ им. И. В. Курчатова.

*Джелепов Венедикт Петрович* (р. 1913 г.) — окончил ЛПИ в 1937 г., член-корреспондент АН СССР, директор ЛЯП ОИЯИ.

*Дрелл Сидней* (р. 1926 г.) — американский физик, заместитель директора Центра Стэнфордского линейного ускорителя (СЛЯК).

*Дремин Игорь Михайлович* (р. 1935 г.) — окончил МИФИ в 1958 г., доктор физ.-мат. наук, заместитель заведующего отделом теоретической физики ФИАН.

*Ельшиевич Михаил Александрович* (р. 1908 г.) — окончил ЛГУ в 1930 г., академик АН БССР, профессор Белорусского гос. ун-та.

*Жижин Евгений Дмитриевич* (р. 1933 г.) — окончил МИФИ в 1957 г., доктор физ.-мат. наук, профессор МИФИ.

*Зельдович Яков Борисович* (1914—1987) — академик АН СССР, заведующий теоретическим отделом ИФП им. С. И. Вавилова.

*Иванова-Померанчук Марина Алексеевна* (р. 1935 г.) — окончила МГЭИ в 1956 г., канд. экон. наук, заведующая отделом ЦНИТЭ ИНПИ Нефтехим.

*Иоффе Борис Лазаревич* (р. 1926 г.) — окончил МГУ в 1949 г., доктор физ.-мат. наук, профессор, заведующий лабораторией ИТЭФ.

*Кайдалов Алексей Борисович* (р. 1940 г.) — окончил МИФИ в 1963 г., доктор физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник ИТЭФ.

*Карнаков Борис Михайлович* (р. 1939 г.) — окончил МИФИ в 1963 г., канд. физ.-мат. наук, доцент МИФИ.

*Кикоин Абрам Константинович* (р. 1914 г.) — окончил ЛПИ в 1936 г., профессор Уральского гос. ун-та им. Горького.

*Кобзарев Игорь Юрьевич* (р. 1932 г.) — окончил МИФИ в 1955 г., доктор физ.-мат. наук, профессор, ведущий научный сотрудник ИТЭФ.

*Коган Владимир Ильич* (р. 1923 г.) — окончил МИФИ в 1947 г., канд. физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник ИАЭ.

*Козодаев Михаил Сильч* (1909—1986) — окончил ЛГУ в 1938 г., доктор физ.-мат. наук, профессор, заведующий отделом ИТЭФ.

*Кукавадзе Георгий Михайлович* (р. 1914 г.) — окончил ТГУ в 1938 г., доктор физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник ИТЭФ.

*Абов Юрий Георгиевич* (р. 1922 г.) — окончил МГУ в 1947 г., член-корреспондент АН СССР, заведующий лабораторией ИТЭФ.

*Абрикосов Алексей Алексеевич* (р. 1928 г.) — окончил МГУ в 1948 г., академик АН СССР, заведующий сектором ИТФ им. Л. Д. Ландау.

*Алексеевский Николай Евгеньевич* (р. 1912 г.) — окончил ЛПИ в 1936 г., член-корреспондент АН СССР, заведующий лабораторией ИФП им. С. И. Вавилова.

*Алиханова Слава Соломоновна* (р. 1916 г.) — окончила Московскую консерваторию им. П. И. Чайковского в 1937 г. по классу скрипки, лауреат Всесоюзного конкурса.

*Амати Даниеле* (р. 1931 г.) — итальянский физик-теоретик, старший сотрудник теоретического отдела ЦЕРН.

*Андреев Александр Федорович* (р. 1939 г.) — окончил ЛФТИ в 1961 г., академик АН СССР, заместитель директора ИФП им. С. И. Вавилова.

*Андроникашвили Элевтер Луарсабович* (р. 1910 г.) — окончил ЛПИ в 1932 г., академик АН ГССР, директор Ин-та физики АН ГССР.

*Ансельм Алексей Андреевич* (р. 1934 г.) — окончил ЛГУ в 1955 г., профессор, доктор физ.-мат. наук, заведующий теоретическим отделом ЛИЯФ им. Б. П. Константинова.

*Азиезер Александр Ильич* (р. 1911 г.) — окончил КПИ в 1934 г., академик АН УССР, заведующий теоретическим отделом ХФТИ АН УССР.

*Берестецкий Владимир Борисович* (1913—1977) — окончил ЛПИ в 1937 г., доктор физ.-мат. наук, профессор, заведующий лабораторией теоретической физики ИТЭФ в 1967—1977 гг.

*Биленький Самоил Михалевич* (р. 1926 г.) — окончил МИФИ в 1950 г., доктор физ.-мат. наук, старший научный сотрудник ЛТФ ОИЯИ.

*Боголюбов Николай Николаевич* (р. 1909 г.) — академик АН СССР, директор ОИЯИ.

*Бургов Николай Андреевич* (р. 1915 г.) — окончил ЛГУ в 1939 г., доктор физ.-мат. наук, профессор-консультант ИТЭФ.

*Бьёркен Джеймс* (р. 1934 г.) — американский физик, член Национальной АН, заместитель директора Фермиевской национальной ускорительной лаборатории.

*Вайскопф Виктор Фредерик* (р. 1908 г.) — австрийский, с 1937 г. американский физик-теоретик, член Национальной АН, иностранный член АН СССР, почетный профессор Массачусетского технологического ин-та.

*Ван Хове Леон* (р. 1924 г.) — член Бельгийской АН, старший сотрудник теоретического отдела ЦЕРН.

*Вдовин Юрий Александрович* (р. 1928 г.) — окончил МИФИ в 1952 г., доктор физ.-мат. наук, профессор МИФИ.

\* Сокращения расшифрованы в списке сокращений.



*Кулипанов Геннадий Николаевич* (р. 1942 г.) — окончил Новосибирский электротехн. ин-т в 1963 г., канд. физ.-мат. наук, заведующий лабораторией ИЯФ СО АН СССР.

*Курбатов Леонид Николаевич* (р. 1913 г.) — окончил ЛПИ в 1936 г., член-корреспондент АН СССР, заведующий кафедрой МФТИ.

*Ландсберг Леонид Григорьевич* (р. 1930 г.) — окончил МГУ в 1954 г., доктор физ.-мат. наук, заведующий лабораторией ИФВЭ.

*Липидус Лев Иосифович* (1927—1986) — окончил МИФИ в 1950 г., доктор. физ.-мат. наук, профессор, заведующий сектором ОИЯИ.

*Левинтов Иосиф Иосифович* (р. 1916 г.) — окончил МГУ в 1940 г., доктор физ.-мат. наук, профессор, заведующий лабораторией ИТЭФ.

*Лексин Георгий Александрович* (р. 1929 г.) — окончил МГУ в 1952 г., доктор физ.-мат. наук, профессор, заведующий отделом ИТЭФ.

*Ломанов Михаил Федорович* (р. 1930 г.) — окончил МГУ в 1953 г., доктор физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник ИТЭФ.

*Маршак Роберт* (р. 1916 г.) — американский физик, член Национальной АН, профессор ун-та шт. Вирджиния.

*Мартен Андре* (р. 1926 г.) — французский физик-теоретик, старший сотрудник теоретического отдела ЦЕРН.

*Матинян Сергей Гайкович* (р. 1931 г.) — окончил ТГУ в 1954 г., член-корреспондент АН АрмССР, заместитель директора Ереванского физического ин-та.

*Мещеряков Михаил Григорьевич* (р. 1910 г.) — окончил ЛГУ в 1936 г., член-корреспондент АН СССР, директор лаборатории ОИЯИ.

*Мигдал Аркадий Бенедиктович* (р. 1911 г.) — окончил ЛГУ в 1936 г., академик АН СССР, заведующий отделом ИТФ им. Л. Д. Ландау.

*Мур Вадим Дмитриевич* (р. 1937 г.) — окончил МГУ в 1960 г., канд. физ.-мат. наук, доцент МИФИ.

*Назутин Илья Евсеевич* (р. 1912 г.) — окончил Киевский гос. ун-т в 1936 г., доктор техн. наук, профессор ВНИИ неорг. материалов, начальник лаборатории.

*Никитин Сергей Яковлевич* (р. 1916 г.) — окончил ЛПИ в 1938 г., доктор физ.-мат. наук, профессор, заведующий лабораторией ИТЭФ.

*Никитин Юрий Петрович* (р. 1937 г.) — окончил МИФИ в 1960 г., доктор физ.-мат. наук, профессор МИФИ.

*Ожунь Лев Борисович* (р. 1929 г.) — окончил МИФИ в 1953 г., член-корреспондент АН СССР, заведующий лабораторией ИТЭФ.

*Паслова Муза Константиновна* (р. 1919 г.) — окончила Ленинградскую гос. консерваторию в 1942 г. по классу органа, поэт, драматург, член ССП.

*Пайерлс Рудольф Эрнст* (р. 1907 г.) — английский физик-теоретик, член Королевского общества.

*Понтекоров Бруно Максимович* (р. 1913 г.) — окончил Римский ун-т в 1933 г., академик АН СССР, заведующий отделом ОИЯИ.

*Попов Владимир Степанович* (р. 1932 г.) — окончил МГУ в 1956 г., доктор физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник ИТЭФ.

*Рудерман Аркадий Иосифович* (р. 1908 г.) — окончил I Московский мед. ин-т в 1930 г., доктор мед. наук, заведующий отделением ВОИЦ АМН СССР.

*Рудик Алексей Петрович* (р. 1921 г.) — окончил МИФИ в 1949 г., доктор физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник ИТЭФ.

*Салам Абдус* (р. 1926 г.) — окончил Кембриджский ун-т в 1949 г., пакистанский физик-теоретик, иностранный член АН СССР, директор Международного центра теоретической физики в Триесте.

*Салмерон Роберто* (р. 1926 г.) — физик-экспериментатор, профессор Высшей политехнической школы, Палезо, Франция.

*Семенов Иван Петрович* (р. 1918 г.) — окончил МОПИ в 1948 г., бывший начальник телефонного узла ИТЭФ.

*Симонов Юрий Антонович* (р. 1934 г.) — окончил МИФИ в 1958 г., доктор физ.-мат. наук, заведующий лабораторией ИТЭФа.

*Скринский Александр Николаевич* (р. 1936 г.) — окончил МГУ в 1959 г., академик АН СССР, директор ИЯФ СО АН.

*Сморodinский Яков Абрамович* (р. 1917 г.) — окончил ЛГУ в 1939 г., доктор физ.-мат. наук, профессор, ведущий научный сотрудник ИАЭ им. И. В. Курчатова.

*Спивак Петр Ефимович* (р. 1911 г.) — окончил ЛПИ в 1936 г., член-корреспондент АН СССР, главный научный сотрудник ИАЭ им. И. В. Курчатова.

*Тер-Мартиросян Карен Аветикович* (р. 1922 г.) — окончил ТГУ в 1943 г., доктор физ.-мат. наук, профессор, заведующий лабораторией ИТЭФ.

*Файнберг Владимир Яковлевич* (р. 1926 г.) — окончил МИФИ в 1949 г., доктор физ.-мат. наук, профессор, заведующий сектором ФИАН им. П. Н. Лебедева.

*Фейнберг Евгений Львович* (р. 1912 г.) — окончил МГУ в 1935 г., член-корреспондент АН СССР, заведующий сектором ФИАН им. П. Н. Лебедева.

*Флеров Георгий Николаевич* (р. 1913 г.) — окончил ЛПИ в 1938 г., академик АН СССР, директор лаборатории ядерных реакций ОИЯИ.

*Халатников Исаак Маркович* (р. 1919 г.) — окончил Днепропетровский ун-т в 1941 г., академик АН СССР, директор ИТФ им. Л. Д. Ландау.

*Хриплович Иосиф Бенционович* (р. 1937 г.) — окончил Киевский гос. ун-т в 1959 г., доктор физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник ИЯФ СО АН СССР.

*Цукерман Илья Соломонович* (р. 1930 г.) — окончил МИФИ в 1953 г., канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник ИТЭФ.

*Шальников Александр Иосифович* (1905—1986) — окончил ЛПИ в 1928 г., академик АН СССР, заведующий лабораторией ИФП им. С. И. Вавилова.

*Шапиро Иосиф Соломонович* (р. 1918 г.) — окончил МГУ в 1941 г., член-корреспондент АН СССР, заведующий сектором ФИАН им. П. Н. Лебедева.

*Ширков Дмитрий Васильевич* (р. 1928 г.) — окончил МГУ в 1949 г., член-корреспондент АН СССР, начальник сектора ОИЯИ.

*Шпинель Владимир Семенович* (р. 1911 г.) — окончил Киевский гос. ун-т в 1936 г., доктор физ.-мат. наук, профессор, заведующий лабораторией НИЯФ МГУ.

*Штраух Карл* (р. 1916 г.) — американский физик-экспериментатор, член Национальной АН, профессор Гарвардского университета.

- ВОНЦ АМН СССР — Всесоюзный онкологический центр АМН СССР.
- ИАЭ — Институт атомной энергии им. И. В. Курчатова.
- ИТФ — Институт теоретической физики АН СССР. им. Л. Д. Ландау.
- ИТЭФ — Институт теоретической и экспериментальной физики.
- ИФВЭ — Институт физики высоких энергий.
- ИФП — Институт физических проблем АН СССР им. С. И. Вавилова.
- ИЯФ СО АН — Институт ядерной физики Сибирского отделения АН СССР.
- КГУ — Киевский государственный университет им. Т. Г. Шевченко.
- КПИ — Киевский политехнический институт им. 50-летия Великой Октябрьской социалистической революции.
- ЛГУ — Ленинградский государственный университет им. А. А. Жданова.
- ЛИПАН — Лаборатория измерительных приборов АН СССР (ныне ИАЭ).
- ЛИЯФ — Ленинградский институт ядерной физики АН СССР им. Б. П. Константинова.
- ЛПИ — Ленинградский политехнический институт им. М. И. Калинина.
- ЛТФ ОИЯИ — Лаборатория теоретической физики ОИЯИ.
- ЛЯП ОИЯИ — Лаборатория ядерных проблем ОИЯИ.
- МГУ — Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова.
- МИФИ — Московский инженерно-физический институт.
- ММИ — Московский механический институт (ныне МИФИ).
- МФТИ — Московский физико-технический институт.
- НИЯФ МГУ — Научный институт ядерной физики МГУ.
- ОИЯИ — Объединенный институт ядерных исследований.
- ТГУ — Тбилисский государственный университет.
- ТТЛ — Теплофизическая лаборатория АН СССР (ныне ИТЭФ).
- ФИАН — Физический институт АН СССР им. П. Н. Лебедева.
- ФТИ — Физико-технический институт АН СССР им. А. Ф. Иоффе.
- ХФТИ — Харьковский физико-технический институт АН УССР (УФТИ).
- ЦЕРН — Европейская организация ядерных исследований.
- ЦНИТЭИНП — Нефтехимический центральный научный ин-т технико-экономических исследований нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности.

- Абов Ю. Г. 69, 72
- Абрикосов А. А. 93, 94, 98, 194, 215, 216, 217, 218, 219, 220
- Адамар Ж.-С. 27
- Азимов Я. И. 161
- Алексеевский Н. Е. 10, 14, 15, 16
- Алиханов А. И. 20, 26, 35, 44, 48, 49, 50, 51, 53, 54, 58, 59, 71, 72, 74, 75, 91, 110, 117, 164, 165, 166, 168, 179
- Алиханова С. С. 58
- Алихановы 24, 62
- Алиханян А. И. 41, 58, 60, 83, 91, 174, 177
- Альварец Л. 165
- Амати Д. 140
- Андреев А. Ф. 266
- Андроникашвили Э. Л. 62
- Анна Ивановна 102
- Ансельм А. А. 123, 160, 162, 206
- Ануфриев Ю. Д. 17, 271
- Арцимович Л. А. 48, 49, 54, 79, 83, 246
- Ахизер А. И. 27, 30, 34, 47, 66, 69, 74, 80, 86, 122, 134, 138, 152, 155, 188, 195, 197, 198, 212, 228, 229, 236, 245, 288
- Ахизер Н. И. 32
- Балдин А. М. 79
- Барджер В. 203
- Бахметьев Л. П.
- Баюков Ю. Д. 167
- Берестецкий В. Б. 7, 19, 33, 35, 70, 72, 82, 98, 117, 124, 126, 134, 135, 138, 142, 143, 155, 171, 183, 196, 200, 222
- Берман Р. 36
- Бессель Ф. 232
- Бете Г. 155, 212
- Бетховен Л. ван 102
- Биленький С. М. 114, 117
- Блейер К. 34
- Блох Ф. 89
- Блохин Н. Н. 130, 180, 182
- Блохицев Д. И. 79
- Боголюбов Н. Н. 100, 108, 109, 145, 155, 164, 174
- Бозе Ш. 17
- Бор Н. 28, 34
- Борн М. 9
- Бриллюэн Л. 280
- Бронштейн М. П. 43
- Брэгг Г. 180, 262
- Будкер А. М. 106, 171
- Бургов Н. А. 61
- Бьёркен Дж. 178, 187, 206, 224
- Вавилов С. И. 118
- Вайнсток Р. 47
- Вайскопф В. Ф. 32, 175, 176
- Вайцзеккер Г. 133
- Ван Хове Л. 47
- Ваняшин В. С. 194
- Вдовин Ю. А. 136
- Вейнберг А. 45, 229
- Векслер В. И. 49, 107, 142, 164, 170, 177
- Вентцель Г. 212
- Вернов С. Н. 170, 176
- Вертинский А. 102
- Вигнер Е. 33, 45, 229, 231, 236, 240
- Вик Д. К. 47
- Виленский И. Д. 9, 170
- Вильсон Р. Р. 72, 180
- Вильчек Ф. 194
- Вильямс Э. 133
- Витале Б. 140
- Вишневский А. А. 102, 103
- Владимирский В. В. 50, 164
- Войтовецкий В. К. 65
- Вороновская Е. В. 8, 9
- Гаврилов С. А. 50
- Гайтлер В. 133, 134
- Галанин А. Д. 50, 69, 93, 192, 214, 227

\* Указатель разбит на три части. В первой — перечислены фамилии или имена, упоминаемые в основном тексте книги. Во второй части перечислены фамилии, встречающиеся в библиографических ссылках на статьи, опубликованные на русском языке, в третьей — на статьи, опубликованные на английском или немецком языках.

- Галицкий В. М. 96, 154, 155  
 Гейгер Х. 21  
 Гейзенберг В. 31, 84, 96  
 Гейликман Б. Т. 106, 115, 117  
 Гелл-Манн М. 67, 68, 111, 113, 162, 174, 194, 202, 215, 222  
 Герлах В. 62  
 Герштейн С. С. 189  
 Гете В. 34  
 Гинзбург В. Л. 89, 241  
 Глешоу Ш. 205  
 Голдбергер М. Л. 176  
 Головин Б. М. 107  
 Гольдин Л. Л. 71, 131, 179, 182  
 Горбачев М. С. 174  
 Гордан П. 67  
 Гофман Ф. 155  
 Грановский Я. И. 9, 168  
 Грибов В. Н. 82, 83, 99, 101, 103, 123, 124, 127, 128, 129, 130, 141, 145, 147, 164, 171, 172, 173, 176, 179, 182, 198, 201, 202, 206, 222, 225  
 Грин Дж. 92, 98, 150, 213, 215, 216, 217, 218, 219, 220, 224, 230  
 Гросс Д. 194  
 Грюнайзен Э. 288  
 Гуревич В. Л. 277  
 Гуревич И. И. 24, 34, 42, 64, 83, 87, 228, 229, 237, 239, 243, 245  
 Гуревич Л. Э. 13, 19, 289  
 Гюнттер Н. М. 13
- Давиденко В. А. 64  
 Давыдов Б. И. 48  
 Дайсон Ф. 36, 91, 92, 213, 216  
 Данков С. 141, 241  
 Даныш М. 113, 114, 117  
 Дебай П. 268, 280, 282, 285  
 Дейч М. 65  
 Дельбрюк М. 188  
 Джанелидзе Г. Ю. 19  
 Джелепов Б. С. 61  
 Джелепов В. П. 104, 105, 119, 164, 181  
 Джонсон И. 194  
 Джорджи Г. 205  
 Диамант А. Я. 77  
 Дирак П. 17, 31, 139, 212  
 Долгов А. Д. 128  
 Достоевский Ф. М. 46  
 Дрелл С. 2, 171  
 Дремин И. М. 136  
 Дятлов И. Т. 123, 206, 221
- Ельяшевич М. Л. 19  
 Емельянов В. С. 79, 145
- Жижин Е. Д. 151
- Закарайзен Ф. 202  
 Затонский В. П. 12  
 Зейтц Ф. 231  
 Зельдович Я. Б. 10, 22, 25, 26, 149, 176, 189, 219, 227  
 Зольников П. И. 144
- Иваненко Д. Д. 49, 64, 117, 134, 246  
 Иванова-Померанчук М. А. 99, 102, 130, 182  
 Игнатенко В. П. 143  
 Измайлов С. В. 19  
 Иоффе А. Ф. 13, 39  
 Иоффе В. Л. 50, 70, 88, 92, 101, 118, 124, 127, 130, 163, 165, 168, 179, 188, 192, 194, 205, 206, 212, 214, 222  
 Ирина Никаноровна 56, 102  
 Исаакян А. 60
- Кабир Р. 163  
 Каган Ю. М. 96  
 Казаринов Ю. М. 107, 119  
 Казариновский М. В. 89  
 Кайдалов А. Б. 124, 150, 159  
 Кальман Х. 65  
 Капица П. Л. 24, 32, 62, 97  
 Каратеодори К. 97  
 Карнаков Б. М. 150, 159  
 Кассирский А. И. 130, 182  
 Кастен Б. 275, 276  
 Катышев В. С. 106  
 Кафтанов В. С. 165, 179  
 Керст Д. 49, 64  
 Кириллин В. А. 119, 131, 180  
 Клаузиус Р. 268  
 Клебш А. 67  
 Кобзарев И. Ю. 101, 127, 130, 133, 168, 195, 205, 208  
 Кобзарев Ю. Б. 54  
 Коган В. И. 77, 133  
 Козодаев М. С. 53, 106, 179  
 Компанец А. С. 89  
 Корнфельд М. И. 41  
 Кронин Дж. 165  
 Крупчицкий П. А. 74  
 Кудряпцев В. Е. 78  
 Кукавадзе Г. М. 75  
 Кулипанов Г. Н. 246  
 Купер Л. 150  
 Кюри П. 275
- Ландау Л. Д. 10, 11, 12, 15, 16, 20, 21, 23, 24, 25, 27, 29, 30, 31, 32, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 43, 45, 48, 50, 52, 53, 56, 57, 58, 59, 62, 64, 67, 73, 75, 81, 82, 84, 86, 88, 89, 91, 92, 93, 94, 95, 97,

- 98, 99, 102, 117, 119, 121, 122, 123, 127, 129, 138, 139, 141, 143, 144, 145, 146, 147, 148, 152, 154, 161, 163, 167, 168, 169, 170, 171, 175, 188, 192, 193, 194, 197, 199, 202, 212, 214, 215, 216, 217, 218, 219, 220, 221, 222, 230, 234, 267, 272, 283
- Ландсберг Л. Г. 165, 179  
 Лапидус Л. И. 116, 144  
 Лаппо-Данилевский И. А. 65  
 Ларкин А. И. 133  
 Левинтов И. И. 166, 167  
 Ледерман Л. 174  
 Лежандр А. 198  
 Лейпунский А. И. 38, 61, 77, 83  
 Лексин Г. А. 167  
 Леман Г. 224  
 Лемпорт В. 125  
 Леонтович М. А. 77, 79, 83, 132  
 Ли Т. 163, 222  
 Лида 100, 102, 103  
 Линденбаум С. 51, 128  
 Лифшиц Е. М. 28, 29, 52, 81, 89, 154  
 Логунов А. А. 149  
 Ломанов М. Ф. 157, 192  
 Лоу Ф. 215, 222  
 Любимов В. А. 59, 165
- Мак-Коун 145  
 Мандельстам С. 146, 154, 202  
 Мандельштам Л. И. 34  
 Марков М. А. 142, 164  
 Мартен А. 173  
 Маршак Р. Е. 142, 143  
 Матиян С. Г. 162  
 Маша 101  
 Медведев Б. В. 120  
 Мельников В. Н. 154  
 Мёссбауэр Р. 123, 262, 263  
 Мещеряков М. Г. 66, 106  
 Мигдал А. Б. 40, 41, 69, 78, 79, 83, 95, 96, 106, 115, 117, 118, 119, 149, 184  
 Миллс Р. 126, 127  
 Миткевич В. Ф. 21  
 Моррисон Д. 57  
 Мочан К. В. 162  
 Мур В. Д. 149, 153, 155  
 Мюллерер Г. 158  
 Мямлин В. 80
- Нахутин И. Е. 37  
 Нернст В. 269  
 Никитин С. Я. 48, 50, 53, 75, 83  
 Никитин Ю. П. 152, 154, 300  
 Нозьер П. 275, 276  
 Нордсик А. 89
- Оже П. 39  
 Окунь Л. Б. 101, 103, 125, 129, 135, 163, 165, 168, 171, 173, 176, 180, 182, 188, 195, 208, 222, 245  
 Орир Дж. 206  
 Осипенков В. Т. 54, 55
- Павлова М. К. 60  
 Пайерлс Р. 34, 35, 36, 280, 282, 283, 285, 291  
 Пайс А. 111  
 Пановский В. 196  
 Пастернак Б. Л. 26  
 Паули В. 25, 27, 32, 39, 69, 113, 276  
 Писаренко Н. Л. 48  
 Планк М. 28, 84, 219, 250, 281, 285  
 Плачек Г. 34  
 Пневский Е. 117  
 Подгорецкий М. И. 90, 91, 118  
 Политгер Г. 194  
 Померанчук А. Д. 303  
 Померанчук Я. И. 303  
 Понтекорво Б. М. 106, 109, 115, 117  
 Попов В. Н. 194  
 Попов В. С. 147, 189  
 Прокошкин Ю. Д. 202  
 Пушкин А. С. 18, 40
- Рамзэй Н. 51  
 Редже Т. 82, 161, 172, 198, 201, 202, 222  
 Рейган Р. 174  
 Рёрлих Ф. 212  
 Ривин А. 89  
 Рогинский С. З. 14  
 Розенфельд А. 114  
 Розинг В. С. 14  
 Рудерман А. И. 71, 102, 131, 180  
 Рудик А. П. 50, 70, 83, 88, 89, 91, 92, 118, 127, 163  
 Румер Ю. Б. 283  
 Рухула А. де 205
- Салам А. 172, 213  
 Салмерон Р. 173  
 Салтыков-Щедрин М. Е. 25  
 Самойлов А. Г. 49, 77  
 Самойлович А. Г. 19  
 Сатаров В. И. 107  
 Сахаров А. Д. 149  
 Семенов И. П. 76  
 Семенов Н. Н. 10  
 Сидур В. 125  
 Силин В. П. 142  
 Силис Н. 125  
 Симонов Ю. А. 146

Синельников К. Д. 35  
 Скринский А. Н. 246  
 Смородинский Я. А. 52, 79, 83, 106, 115, 117, 119, 189  
 Снегов С. 78  
 Спивак П. Е. 14, 21, 53, 54  
 Сталин И. В. 142  
 Соколов А. А. 117  
 Соловьев В. В. 128  
 Сорокин В. С. 19  
 Сороко Л. М. 119, 158  
 Стеклов В. А. 123  
 Судаков В. В. 221  
 Тавхелидзе А. Н. 149  
 Тамм И. Е. 77, 79, 83, 132, 139, 140, 141, 148, 149, 155  
 Тамор С. 214  
 Терентьев М. В. 126, 194  
 Терлецкий Я. П. 117  
 Тер-Мартirosян К. А. 121, 145, 146, 147, 160, 165, 168, 179, 202, 206, 221, 299  
 Тирринг В. 160  
 Тодес О. М. 19  
 Туманов Ю. А. 177  
 Тюбиана М. 182  
 Тяпкин А. А. 118  
 Фаддеев Л. Д. 194  
 Файнберг В. Я. 78, 81, 82, 154  
 Фарри В. 32, 80  
 Фейнберг Е. Л. 34, 55, 77, 79, 81, 83, 197, 198, 299  
 Фейнман Р. 80, 91, 92, 137, 148  
 Ферми Э. 17, 106, 125, 134, 171, 199, 236, 243, 244, 268, 271  
 Фирсов В. Т. 74  
 Фирц М. 134  
 Фитч В. 165  
 Флеров Г. Н. 54, 63, 65  
 Флюгге С. 137  
 Флягин В. Б. 107  
 Фолквер У. 63  
 Фрадкин Е. С. 82, 93, 194, 218  
 Франк Г. М. 180  
 Франк И. М. 118  
 Франс А. 46  
 Фраучи С. 201, 202  
 Френкель Я. И. 9, 13, 14, 19, 21, 24  
 Фруассар М. 149, 198, 201, 206

\* \* \*

Абрикосов А. А. 209, 226, 299  
 Аллаби Д. 210  
 Алферов Д. Ф. 266  
 Андреев А. Ф. 277  
 Ануфриев Ю. Д. 17, 276

Фок В. А. 89, 117  
 Фурье Ж. 223, 234  
 Халатников И. М. 93, 95, 97, 98, 194, 215, 216, 217, 219, 220  
 Харитон Ю. Б. 24, 227  
 Херринг К. 290, 291, 292  
 Хоффт Г. 195  
 Хриплович И. Б. 170, 195  
 Хрущев Н. С. 142, 145  
 Хури Н. 174  
 Хуцишвили Г. Р. 163  
 Цвейг Дж. 162  
 Цукерман И. С. 132  
 Чаплин Ч. 32  
 Чаренц Е. 60  
 Челлен Г. 57, 224  
 Черенков П. А. 118  
 Чувило И. В. 182  
 Чу Дж. 201, 202  
 Шальников А. И. 8, 20, 22, 23, 24  
 Шалыт С. С. 10  
 Шапиро И. С. 74, 94, 148, 165  
 Шварц М. 174  
 Швебер С. 155  
 Швингер Дж. 10, 91, 134, 213, 216, 247  
 Шехтер В. М. 130, 206  
 Ширков Д. В. 120, 155  
 Шмушкевич И. М. 19, 48, 81, 115, 116, 135, 195, 196, 206  
 Шостакович Д. Д. 102  
 Шпинель В. С. 38  
 Шпольский Э. В. 79, 83  
 Шредингер Э. 84  
 Штерн О. 62  
 Штраух К. 175, 176, 177, 178  
 Шубников Л. В. 10, 11, 12, 30  
 Шульженко К. 102  
 Эдвардс С. 134  
 Эйзенхауэр Д. 145  
 Эйлер Г. 31  
 Эйнштейн А. 17, 35, 183, 229  
 Юань Л. 51, 128, 179  
 Юкава Х. 161  
 Янг Ч. 126, 127, 163, 192  
 Яппа Ю. А. 117

Ансельм А. А. 211  
 Арцимович Л. А. 266, 296  
 Ахизер А. И. 208, 209, 210, 226, 245, 294, 295, 296, 297, 298, 299, 300  
 Ахизер И. А. 300

Балдин А. М. 226  
 Байер В. Н. 266  
 Бать Г. А. 245  
 Башмаков Ю. А. 266  
 Берестецкий В. Б. 82, 209, 210, 227, 297, 299, 300  
 Бессонов Е. Г. 266  
 Блинные С. И. 211  
 Боровиков В. А. 300  
 Бушнин Ю. Б. 210

Вазина А. А. 266  
 Ваняшин В. С. 209  
 Вейнберг А. 245  
 Вигнер Е. 245  
 Винокуров Н. А. 266  
 Волков Д. В. 211

Галанин А. Д. 208, 210, 226, 245, 246, 298, 299, 300  
 Гарибян Г. М. 300  
 Гельфанд И. М. 300  
 Гинзбург В. Л. 266, 294  
 Горин Ю. Н. 210  
 Городков С. С. 245  
 Горьков Л. П. 299  
 Грашин А. Ф. 210, 300  
 Грибов В. Н. 210, 211, 227, 300, 301  
 Григорович Г. М. 294  
 Григорьев В. Н. 277  
 Гусев Г. И. 294  
 Гуревич В. Л. 294  
 Гуревич И. И. 245, 299  
 Гуревич Л. Э. 294

Давыдов Б. И. 295  
 Дикарев В. С. 245  
 Долгов А. Д. 211  
 Донец Е. Д. 266  
 Дреснер Л. 245  
 Дятлов И. Т. 211, 226, 301

Егизаров М. Б. 245  
 Ельшин А. Б. 245  
 Еремеев И. Р. 266  
 Есельсон Б. Н. 277

Захаров В. И. 211  
 Зельдович Я. Б. 208, 245  
 Зырянов П. С. 294

Иваненко Д. Д. 266, 296  
 Илisaевский Ю. В. 294  
 Иоффе Б. Л. 82, 208, 210, 211, 226, 227, 297, 298, 299, 300, 301

Каган Ю. М. 277  
 Кайдалов А. Д. 211  
 Катков В. М. 266

Кирпичев А. 296  
 Кобзарев И. Ю. 209, 211, 300, 301  
 Кондратенко А. М. 266  
 Кочуров Б. П. 245  
 Крохин О. И. 227  
 Крылов Т. В. 294  
 Кулакова Л. А. 294  
 Кулипанов Г. Н. 266  
 Куни Ф. М. 82

Лайхтман Б. Д. 294  
 Лалетин Н. И. 245  
 Ландау Л. Д. 208, 209, 210, 226, 227, 276, 293, 295, 297, 298, 299  
 Лифшиц И. М. 277  
 Логунов А. А. 210  
 Лоунасмaа О. В. 276

Мадеев В. Г. 245  
 Малофеев В. М. 245  
 Мигдал А. Б. 209, 295  
 Михайлов В. В. 226  
 Михеев В. А. 277  
 Михин Н. П. 277  
 Мочан И. В. 294

Нгуен Ван Хьеру 210  
 Никитин Ю. П. 209, 210  
 Николаев Н. Н. 211

Образцов Ю. Н. 294  
 Окузь Л. Б. 209, 210, 211, 299, 300, 301

Петров Ю. В. 246  
 Померанчук И. Я. 208, 209, 210, 211, 226, 227, 245, 266, 276, 293  
 Попов В. С. 208

Розенталь И. Л. 210  
 Рувинский М. А. 294  
 Рудик А. П. 226, 299, 300

Скринский А. Н. 266  
 Соловьев В. В. 211, 301  
 Страховенко В. М. 266  
 Судаков В. В. 226, 299

Терентьев М. В. 209  
 Тер-Мартirosян К. А. 210, 211, 226, 299, 301

Тодоров И. Т. 210  
 Торлин Б. З. 245  
 Троянский В. Б. 245

Файнберг В. Я. 81, 82  
 Фейнберг Е. Л. 81, 209, 298  
 Фейнберг С. М. 245  
 Фрадкин Е. С. 82, 209, 226

Халатников И. М. 209, 226, 299  
Харитон Ю. Б. 245  
Хлебников А. И. 227  
Хлопов М. Ю. 211  
Хриплович И. Б. 209

Чечин А. И. 266

Aamodt R. L. 209, 226  
Akhiezer A. I. 47, 208, 226  
Albrowe M. 211  
Allen A. R. 277  
Alvarez L. W. 209  
Alvesalo T. A. 276  
Andreev A. F. 276, 277  
Anufriev Yu. D. 276  
Appelquist T. 211  
Archie C. N. 277  
Artemyev A. N. 266

Backe H. 208  
Bahcall J. N. 211  
Barychev V. B. 266  
Bell G. I. 246  
Bernard C. 211  
Bethge K. 208, 226  
Billardon M. 266  
Bjorken J. D. 211, 227  
Bogolubov N. N. 226  
Bonfaint G. 277  
Brown L. S. 209  
Brueckner K. 226  
Buhrman R. A. 276

Cahn R. N. 209  
Castaing B. 277  
Chew G. F. 210  
Claiborne L. T. 294  
Collan H. K. 276  
Cowan T. 208

Debye P. 293  
De Rujula A. 211  
Dydak F. 209  
Dolgov A. D. 211  
Donnachie A. 211  
Durbin R. 226  
Dutta A. 277

Eden R. J. 210  
Einspruch N. G. 294  
Elias L. R. 266

Faddeev L. D. 209  
Feinberg E. L. 210  
Fermi E. 210  
Frautschi S. C. 210

Шихов С. Б. 245  
Шкловский Б. И. 294  
Шмушкевич И. М. 81, 208, 297, 298,  
299, 300  
Шульман Ю. Э. 277

Щетинин В. П. 294

\* \* \*

Frederikse H. P. 294  
Frieze W. E. 266  
Froissart M. 210  
Geballe T. H. 294  
Geist W. 211  
Gell-Mann M. 209, 210, 226  
Georgi H. 211  
Gerdan E. 266  
Glashow S. L. 211  
Greenberg A. S. 277  
Gribov V. N. 210  
Gross D. I. 209  
Greiner W. 208  
Gurevich V. L. 294

Hadley J. 209, 226  
Halperin W. P. 276  
Hellstrand E. 246  
Hemphill R. B. 294  
Herring C. 294  
Hohler G. 210  
Hooft G. 209  
Howell R. H. 266

Ioffe B. L. 227

Johnson K. 209  
Johnson R. T. 276

Kabannik V. A. 266  
Kawasaki K. 294  
Khose V. A. 227  
Kolb E. W. 211  
Korchydanov V. N. 266  
Kulipanov G. N. 266  
Kuo T. K. 211

Landau L. D. 208, 226  
Lee D. M. 276  
Lipatov L. N. 227  
Loar H. 226  
Low F. 209, 226

Maglic B. C. 209  
Mandelstam S. 210  
Maris H. J. 294  
Marshak R. E. 226  
Mork K. 208  
Muller B. 208

Navarria F. 209  
Nozieres P. 277

Okun L. B. 211  
Osheroff D. D. 276  
Overseth O. E. 209

Panofsky W. K. H. 209, 226  
Papatzagos P. 208  
Peierls R. 293  
Peterman A. 227  
Politzer H. D. 209  
Pomeranchuk I. Ya. 208, 209, 210,  
226, 293, 294  
Pope J. 277  
Popov V. N. 209  
Puech L. 277

Regge T. 210  
Richards M. G. 277  
Richardson R. C. 276  
Rohrlich F. 226  
Rosenbaum R. 276  
Rosenfeld A. H. 209  
Ruffer R. 266  
Rumer Yu. B. 293

Saffel M. 208  
Schwarz A. S. 211  
Schwinger J. 266

Seckel D. 211  
Shirkov D. V. 227  
Shmushkevich I. M. 209  
Simons S. 294  
Sites J. R. 276  
Skrinsky A. N. 266  
Smorodinsky Ya. A. 208  
Steinberger J. 226  
Stueckelberg E. C. G. 227  
Sudakov V. V. 226  
Sundaresan M. K. 209  
Sytko O. J. G. 276

Ter-Martirosyan K. A. 226  
Tamor S. 226

Yao T. 211

Watson J. S. 209  
Webl W. W. 276  
Weinstock R. 47  
Wheatley J. C. 276  
Wick G. C. 47  
Widom A. 277  
Wilczek F. 209

Yang C. N. 208

Zachariasen F. 210  
Zakharov V. I. 211

## СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие . . . . .	5
-----------------------	---

## ВОСПОМИНАНИЯ

1932—1966

<i>Кикоин А. К.</i> Памяти товарища . . . . .	8
<i>Курбатов Л. Н. И. Я.</i> Померанчук в студенческие годы . . . . .	13
<i>Алексеевский Н. Е. И. Я.</i> Померанчук в юности . . . . .	16
<i>Ельшевич М. А.</i> Из воспоминаний о периоде 1931—1935 гг. . . . .	19
<i>Шальников А. И.</i> 50 лет спустя после моего знакомства с Юзником Померанчуком . . . . .	20
<i>Спивак П. Е.</i> Весной 35-го . . . . .	21
<i>Зельдович Я. Б. И. Я.</i> Померанчук — человек и ученый . . . . .	22

1936—1966

<i>Ахизер А. И.</i> Воспоминания об Исааке Яковлевиче Померанчуке . . . . .	30
<i>Пайерс Р. Э.</i> Глубокое впечатление . . . . .	35
<i>Назутин И. Е.</i> Воспоминания о И. Я. Померанчуке . . . . .	37
<i>Шпинель В. С.</i> Воспоминания о харьковском периоде жизни И. Я. Померанчука . . . . .	38
<i>Мицгал А. Б.</i> Наследство Чука . . . . .	40
<i>Гуревич И. И.</i> Исаак Яковлевич Померанчук (Ленинград, 1937—1940 гг.; Москва, 1943—1945 гг.) . . . . .	42
<i>Ван Хове Л.</i> Дань уважения ранней работе И. Померанчука . . . . .	47
<i>Никитин С. Я. И. Я.</i> Померанчук в ЛФТИ и ИТЭФе . . . . .	48
<i>Сморodinский Я. А.</i> Несколько слов об Исааке Яковлевиче . . . . .	52
<i>Ководаев М. С.</i> Лекции для двоих . . . . .	53
<i>Фейнберг Е. Л.</i> Страстность . . . . .	55
<i>Алиханова С. С. И. Я.</i> Померанчук и А. И. Алиханов . . . . .	58
<i>Павлова М. К.</i> Отрывок из поэмы . . . . .	60
<i>Бургов Н. А.</i> Замечательный ученый и человек академик Исаак Яковлевич Померанчук . . . . .	64
<i>Андроникашвили Э. Л. И. Я.</i> Померанчук в моем представлении . . . . .	62
<i>Флеров Г. Н.</i> «Либо стройте ускоритель, либо идите в управление» . . . . .	63
<i>Мещеряков М. Г.</i> Встречи с И. Я. Померанчуком . . . . .	66

1946—1966

<i>Галанин А. Д.</i> О первых годах работы в ИТЭФе с И. Я. Померанчуком . . . . .	69
<i>Гольдин Л. Л.</i> Памяти И. Я. Померанчука . . . . .	71

<i>Абов Ю. Г.</i> Надо чаще вспоминать учителей . . . . .	72
<i>Кукавадзе Г. М.</i> Встречи с И. Я. Померанчуком . . . . .	75
<i>Семенов И. П.</i> Таким я запомнил Исаака Яковлевича . . . . .	76
<i>Коган В. И.</i> Штрихи к портрету . . . . .	77
<i>Файнберг В. Я.</i> Встречи с И. Я. Померанчуком . . . . .	78
<i>Рудик А. П.</i> В Московском механическом институте и Тепло-технической лаборатории . . . . .	83
<i>Иоффе Б. Л.</i> Первые годы общения с И. Я. Померанчуком . . . . .	88
<i>Шапиро И. С.</i> Из воспоминаний о И. Я. Померанчуке . . . . .	94
<i>Абрикосов А. А.</i> На душе теплее . . . . .	94
<i>Халатников И. М.</i> Исаак Яковлевич и Лев Давидович . . . . .	98
<i>Иванова-Померанчук М. А.</i> Исаак Яковлевич и семья . . . . .	99
<i>Джелепов В. П.</i> Выдающийся теоретик — учитель экспериментаторов . . . . .	104
<i>Боголюбов Н. Н.</i> Об Исааке Яковлевиче . . . . .	108
<i>Понтекорво Б. М. И. Я.</i> Померанчук и начало физики высоких энергий . . . . .	109
<i>Биленький С. М.</i> Исаак Яковлевич Померанчук . . . . .	114
<i>Липидус Л. И. И. Я.</i> Померанчук в Дубне, которая тогда так не называлась . . . . .	116
<i>Ширков Д. В.</i> Встречи с Исааком Яковлевичем Померанчуком . . . . .	120
<i>Тер-Мартirosян К. А. И. Я.</i> Померанчук — встречи и годы совместной работы . . . . .	124
<i>Окунь Л. Б. И. Я.</i> Померанчук — каким я знал его (1950—1966 гг.) . . . . .	125
<i>Цукерман И. С. И. Я.</i> Померанчук в ММИ . . . . .	132
<i>Кобзарев И. Ю.</i> Первые встречи с И. Я. Померанчуком . . . . .	133
<i>Вдовиц Ю. А.</i> Воспоминания о И. Я. Померанчуке . . . . .	136
<i>Дрежин И. М.</i> Пламенный . . . . .	136
<i>Амати Д.</i> Четыре встречи . . . . .	140

1956—1966

<i>Маршак Р. Е.</i> Из воспоминаний об академике Померанчуке . . . . .	142
<i>Симонов Ю. А.</i> Уникально и незабываемо . . . . .	146
<i>Попов В. С.</i> Нигде я не получал столько пользы, как на семинаре, руководимом И. Я. Померанчуком . . . . .	147
<i>Кайдалов А. Б.</i> Мой руководитель И. Я. Померанчук . . . . .	150
<i>Жижин Е. Д.</i> Атмосфера творчества . . . . .	151
<i>Никитин Ю. П.</i> Воспоминания об Учителе . . . . .	152
<i>Мур В. Д.</i> Это было недавно, это было давно . . . . .	153
<i>Ломанов М. Ф.</i> И позитронная томография . . . . .	157
<i>Карнаков Б. М.</i> Научный руководитель . . . . .	159
<i>Ансельм А. А.</i> Обсуждения с И. Я. Померанчуком проблемы нуля заряда . . . . .	160
<i>Матинян С. Г. И. Я.</i> Померанчук в период открытия несохранения четности . . . . .	162
<i>Ландсберг Л. Г.</i> Исаак Яковлевич Померанчук . . . . .	165
<i>Левинтов И. И.</i> Воспоминания о И. Я. Померанчуке . . . . .	166
<i>Лексин Г. А.</i> Несколько бесед с И. Я. Померанчуком . . . . .	167

<i>Грановский Я. И.</i> Каким мне запомнился И. Я. Померанчук. Поездка в Рубежное . . . . .	168
<i>Хрипович И. Б.</i> Два свидетельства . . . . .	170
<i>Дрелл С.</i> Две встречи на конференциях . . . . .	171
<i>Салам А.</i> Преданность физике ощущалась в каждом его слове . . . . .	172
<i>Салмерон Р. А.</i> Моя встреча с И. Я. Померанчуком . . . . .	173
<i>Мартен А.</i> Мои короткие встречи с И. Я. Померанчуком . . . . .	173
<i>Вайскопф В. Ф.</i> Письмо о И. Померанчуке . . . . .	175
<i>Голдбергер М. Л.</i> На Рочестерской конференции в Дубне . . . . .	176
<i>Штраух К.</i> Встреча в Ереване . . . . .	177
<i>Вьёркен Дж.</i> Его работы прорезали туман . . . . .	178
<i>Рудерман А. И.</i> Начало протонной терапии в СССР . . . . .	180
<i>Грибов В. Н.</i> Смерть Чука . . . . .	183
<i>Берестецкий В. В.</i> Слово прощания . . . . .	183

## НАУЧНЫЕ ОБЗОРЫ

<i>Окунь Л. Б.</i> Работы И. Я. Померанчука по физике элементарных частиц . . . . .	188
<i>Иоффе Б. Л.</i> Работы И. Я. Померанчука по квантовой теории поля . . . . .	212
<i>Галанин А. Д.</i> О работах И. Я. Померанчука по физике ядерных реакторов и о влиянии его идей на последующее развитие теории . . . . .	227
<i>Кулипанов Г. Н., Скринский А. Н.</i> Синхротронное излучение и его применение . . . . .	246
<i>Андреев А. Ф.</i> Физика квантовых жидкостей и кристаллов . . . . .	266
<i>Гуревич В. Л.</i> О работах И. Я. Померанчука по теории теплопроводности кристаллических диэлектриков . . . . .	277

## ПРИЛОЖЕНИЕ

Список научных работ И. Я. Померанчука . . . . .	295
Записка, направленная И. Я. Померанчуком в Отделение ядерной физики АН СССР . . . . .	302
Основные даты жизни и деятельности И. Я. Померанчука . . . . .	303
Краткие сведения об авторах . . . . .	304
Список сокращений, встречающихся в тексте книги . . . . .	308
Именной указатель . . . . .	309

Научное издание

Воспоминания  
о И. Я. ПОМЕРАНЧУКЕ

Утверждено к печати  
редколлегией серии  
«Ученые СССР»

Очерки, воспоминания, материалы»

Редактор издательства *Е. К. Паламарчук*  
Художественный редактор *М. Л. Храмов*  
Технический редактор *З. Б. Павлюк*  
Корректоры *А. Б. Васильев, Л. В. Лукичева*

ИБ № 37516

Сдано в набор 24.09.87.  
Подписано к печати 29.02.88.  
Т-07368. Формат 60×90<sup>1/8</sup>

Бумага типографская № 1  
Гарнитура обыкновенная

Печать высокая

Усл. печ. л. 20,1. Усл. кр. отт. 21,0 Уч.-изд. л. 21,1  
Тираж 5000 экз. Тип. зак. 1061  
Цена 2 р. 50 к.

Ордена Трудового Красного Знамени  
издательство «Наука»

117864, ГСП-7, Москва, В-485, Профсоюзная ул., 90

2-я типография издательства «Наука»

121099, Москва, Г-99, Шубинский пер., 6

# ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА» ГОТОВИТСЯ К ПЕЧАТИ КНИГА

ВОСПОМИНАНИЯ О В. Г. ФЕСЕНКОВЕ  
(Серия «Ученые СССР. Воспоминания, очерки, материалы»)

20 л. 2 р. 50 к.

Юбилейный сборник очерков и воспоминаний посвящен академику Василию Григорьевичу Фесенкову (1889—1972), одному из основоположников астрофизики в нашей стране. Трудно найти такую область астрономии, в которую В. Г. Фесенков не внес бы существенного вклада. Им опубликовано свыше 650 работ. Исследования В. Г. Фесенкова представляют собой пример тесной связи теории с практикой, с наблюдениями. В течение всей жизни В. Г. Фесенков стремился получить наиболее ценные материалы наблюдений, и это стало движущей силой его большой деятельности по конструированию приборов, разработке новых методов, созданию обсерваторий и организации многочисленных экспедиций.

В сборник включен ряд фундаментальных работ ученого по проблемам астрономии, астрофизики, космогонии. Дана научная биография В. Г. Фесенкова, приведены очерки о его работах, воспоминания о нем его родных, учеников и коллег.

Книга предназначена для астрономов, астрофизиков и историков науки.

Книги можно предварительно заказать в магазинах «Академкнига». Для получения книг почтой заказы просим направлять по одному из перечисленных адресов:

17192 Москва, Мичуринский проспект, 12, магазин «Книга — почтой» Центральной конторы «Академкнига»;  
197345 Ленинград, Петрозаводская ул., 7, магазин «Книга — почтой» Северо-Западной конторы «Академкнига»;

252030 Киев, ул. Пирогова, 4, магазин «Книга — почтой» Украинской конторы «Академкнига» или в ближайший магазин «Академкнига».