



НИЦ «Курчатовский институт»



ФГБУ «Государственный научный Центр Российской Федерации
-Институт теоретической и экспериментальной физики»

Международные эксперименты

Зайцев Ю.М.

Реальное международное сотрудничество ИТЭФ на уровне экспериментальных групп началось в начале 70-х годов. В то время ускорительный комплекс УНК в Протвино обладал максимальной энергией протонов и зарубежные группы активно начали принимать участие в совместных экспериментах с российскими учеными.

Первая публикация результатов совместного международного эксперимента сотрудников ИТЭФ состоялась в 1975 году

Neutron-Proton Elastic Scattering from 10-GeV/c to 70-GeV/c

V. Bohmer, J. Engler, W. Flauger, H. Keim, F. Monnig, K. Pack, H. Schoper (CERN & Karlsruhe U.), A. Babaev, E. Brachman, G. Eliseev, A. Ermilov, Iouri Galaktionov, Yu. Gorodkov, Yu. Kamyshkov, E. Leikin, V. Lyubimov, V. Shevchenko, O. Zeldovich (Moscow, ITEP & Moscow State U.)

Jan 1975 - 16 pages

Nucl.Phys. B91 (1975) 266

В середине 70-х годов прошлого столетия началось активное сотрудничество российских институтов с лабораторией FERMILAB (USA).

Ниже приведена одна из первых публикаций коллаборации Fermilab-IHEP-ITEP-Michgan U., выполненная на 15-футовой пузырьковой камере

[Search for mu e Events in anti-neutrino - Nucleon Interactions](#)

[J.P. Berge \(Fermilab\)](#) *et al.*. Oct 1976. 13 pp.

Published in **Phys.Rev.Lett. 38 (1977) 266**

В 1978 году в Fermilab коллаборацией [Pennsylvania U.](#) & [Moscow, ITEP](#) & [William-Mary U.](#) был выполнен эксперимент на пучке 400 ГэВ.с по рождению в частиц в заднюю полусферу (публикации в 1979 году)

[Backward Production of Protons in Nuclear Reactions With 400-{GeV} Protons](#)

[Yu.D. Bayukov](#), [V.I. Efremenko](#), [S. Frankel](#), [W. Frati](#), [M. Gazzaly](#), [G.A. Leksin](#), [N.A. Nikiforov](#), [C.F. Perdrisat](#), [V.I. Chistilin](#), [Yu.M. Zaitsev](#) ([Pennsylvania U.](#) & [Moscow, ITEP](#) & [William-Mary Coll.](#)).

Jun 1979. 22 pp. **Phys.Rev. C20 (1979) 764**

['Backward' Production of Protons, Deuterons, Tritons, 3He, 4He And, Pions in the Interaction of 400-{GeV} Protons With Nuclei](#)

[Yu.D. Bayukov](#) *et al.* ([Pennsylvania U.](#) & [Moscow, ITEP](#) & [William-Mary Coll.](#)).

Nov 1978. 8 pp. **Phys.Lett. B85 (1979) 315**

Примерно в то же время началось активное сотрудничество с
Лабораторией CERN

в области нейтринной физики – группа В. Кафтanova

Коллаборация [CHARM](#)

[NIKHEF, Amsterdam-CERN-Hamburg U.-Moscow, ITEP-INFN, Rome](#)

[Experimental Study of Neutral Current and Charged Current Neutrino Cross-Sections](#)

[CHARM](#) Collaboration ([M. Jonker \(NIKHEF, Amsterdam\)](#) *et al.*). Dec 1980. 11 pp.

Published in **Phys.Lett. B99 (1981) 265**

в области адронной физики – группа Ю. Галактионова

Munich, Max Planck Collaboration [FNAL U.-Moscow, ITEP](#)

[Prompt Photon Production In Pi- P, Pi+ P And P P Collisions At 300-gev/c](#)

[NA24](#) Collaboration ([A. Bamberger \(Bari U. & INFN, Bari\)](#) *et al.*). 1985.

На электрон-позитронном коллайдере (LEP) – группа Ю. Галактионова

Коллаборация [L3](#) (60 институтов и около 450 соавторов)

Выполнен большой цикл работ (более 290 журнальных публикаций)

На Теватроне (FERMILAB) – группа В. Гаврилова

Коллаборация [D0](#) (75 институтов и около 350 соавторов)

Выполнен большой цикл работ (более 200 журнальных публикаций)

Ксеноновые камеры на универсальном сепарированном пучке

700- ЛИТРОВАЯ КСЕНОНОВАЯ КАМЕРА –ДИАНА

700-л ксеноновой пузырьковой камеры ДИАНА , без магнитного поля, 1500 кг ксенона, Эффективность регистрации γ - квантов близка к 100% Исследования аннигиляций антипротонов низких энергий на ядрах ксенона.

Получено 1.4 млн. снимков в 1987-1993 гг.

После завершения работы камеры ДИАНА на освободившемся универсальном пучке группой немецких ученых вместе с сотрудниками ИТЭФ в 1994 году проведен набор экспериментального материала с помощью привезенной из Германии аппаратуры и телескопа K^+ - мезонов

Observation of a narrow baryon resonance with positive strangeness formed in K^+Xe collisions

[DIANA](#) Collaboration ([V.V. Barmin](#) , [A.E. Asratyan](#), [V.S. Borisov](#) ([Moscow, ITEP](#)) , [C. Curceanu](#) ([Frascati](#)) , [G.V. Davidenko](#), [A.G. Dolgolenko](#) ([Moscow, ITEP](#)) , [C. Guaraldo](#) ([Frascati](#)) , [M.A. Kubantsev](#), [I.F. Larin](#), [V.A. Matveev](#), [V.A. Shebanov](#), [N.N. Shishov](#), [L.I. Sokolov](#), [V.V. Tarasov](#), [G.K. Tumanov](#), [V.S. Verebryusov](#) ([Moscow, ITEP](#)))

Phys.Rev. C89 (2014) 4, 045204

Асимметрия разлета осколков при тройном делении

К 1992 г. группа Г.В. Даниляна выполнила цикл работ по исследованию асимметрии разлета осколков при тройном делении ^{233}U и ^{239}Pu поляризованными нейтронами.

Эксперименты были поставлены на высокоинтенсивном пучке поляризованных нейтронов высоко-поточного реактора Института Лауэ-Ланжевена (ИЛЛ) в Гренобле (Франция), что позволило в разумное время набрать статистику для тройного деления на фоне в 1000 раз большей скорости счета бинарного деления. Результаты измерений показали, что отношение коэффициентов Р-нечетной асимметрии для тройного и бинарного делений оказалось близким к единице с точностью 10%, что свидетельствовало о приблизительной идентичности квазистационарных переходных состояний в седловой точке для бинарного и тройного деления.

Поиски Т-нечетной угловой корреляции в тройном делении

В 1998-1999 гг. по инициативе Г.В. Даниляна Сотрудничеством ИТЭФ–ПИЯФ–Тюбингенский университет–ИЛЛ–Дармштадтский технический институт–Курчатовский институт был поставлен на высокопоточном реакторе ИЛЛ в Гренобле (Франция) поисковый эксперимент по обнаружению

Т-нечетной угловой корреляции в тройном делении ядер ^{233}U поляризованными холодными нейтронами. Эффект лево-правой асимметрии эмиссии альфа-частиц относительно плоскости, определяемой векторами поляризации пучка и импульса легкого осколка, оказался неожиданно большим $D = (-0,41 \pm 0,01) \cdot 10^{-2}$. Природу возникновения такой корреляции предстоит выяснить.

Измерение поворота спина нейтрона в ^{204}Pb

Во второй половине 1990-х годов группа под руководством П.А. Крупчицкого начала исследования электромагнитных свойств нейтрона и нейтронно-оптических эффектов. На реакторе Института Гана-Мейтнера в Берлине (Германия) с помощью нейтронного поляриметра, установленного на пучке холодных нейтронов, проведены измерения P -нечетного угла поворота спинов поляризованных нейтронов при прохождении через мишень, обогащенную изотопом ^{204}Pb . Измеренное значение угла поворота спина нейтронов на изотопе ^{204}Pb было первым экспериментальным результатом и указало на неожиданно большой P -нечетный эффект, который нельзя объяснить в рамках компаунд-ядерной модели смешивания состояний с противоположной четностью для набора известных s - и p -резонансов. Однако, если предположить существование пока необнаруженного p -резонанса, можно получить хорошее согласие экспериментальных данных и теоретических оценок на P -нечетный эффект. Этот результат инициировал поиск такого p -резонанса в ЛНФ ОИЯИ группой Л.Б. Пикельнера.

Эксперимент GERDA

Целью международного проекта GERDA является создание установки нового поколения и поиск безнейтринного двойного бета-распада ^{76}Ge .

1 ноября 2011 года состоялся пуск установки GERDA-I в подземной лаборатории Гран Сассо (Италия) и начаты рабочие измерения с использованием восьми имеющихся детекторов из обогащенного германия общей массой 17.6 кг

В настоящее время набрана статистика около 500 дней измерений, эксперимент завершен. Получен запланированный уровень фона и продемонстрированы хорошие перспективы данного подхода по поиску безнейтринного двойного бета-распада.

Получено ограничение на безнейтринный двойной бета-распад ^{76}Ge – $T_{1/2} > 2.1 \cdot 10^{25}$ лет, что приводит к ограничению $\langle m\nu \rangle < (0.2-0.6)$ эВ.

В марте 2015 г. запущена установка GERDA-II с 40 кг обогащенного германия и с планируемой чувствительностью ~ 1026



Схема установки GERDA

Эксперимент MAJORANA

Целью международного проекта MAJORANA является создание установки нового поколения и поиск безнейтринного двойного бета-распада ^{76}Ge с чувствительностью $\sim 6 \cdot 10^{27}$ лет. На первом этапе создается установка MAJORANA-DEMONSTRATOR с 40 кг HPGe детекторов (из них 30 кг из обогащенного германия-76), расположенная в подземной лаборатории SURF (США). Планируемая чувствительность - $\sim 10^{26}$ лет за три года измерений. Набор данных начнется в 2015 г.

Коллаборации GERDA и MAJORANA планируют объединить свои усилия для создания полномасштабного детектора GERDA/MAJORANA с весом ^{76}Ge 1000 кг.

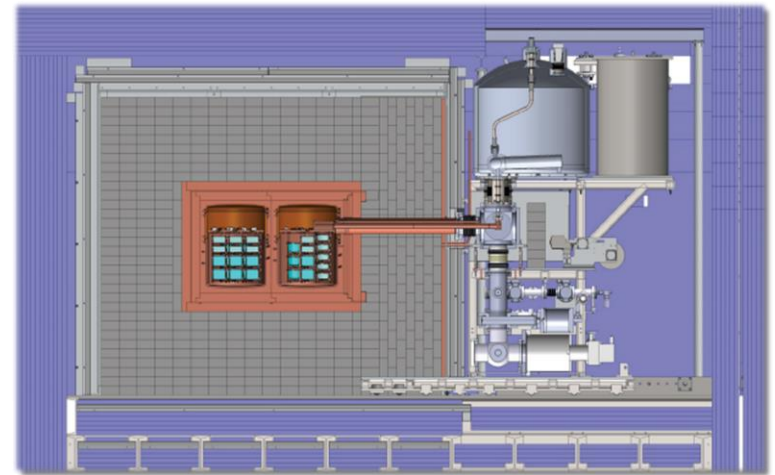
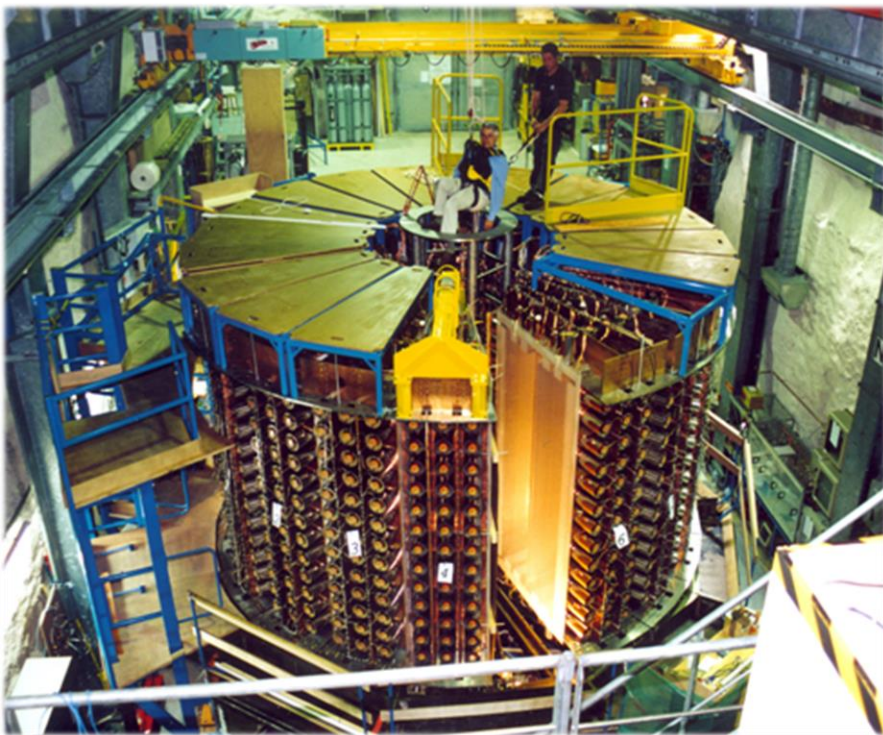


Схема установки
MAJORANA-DEMONSTRATOR



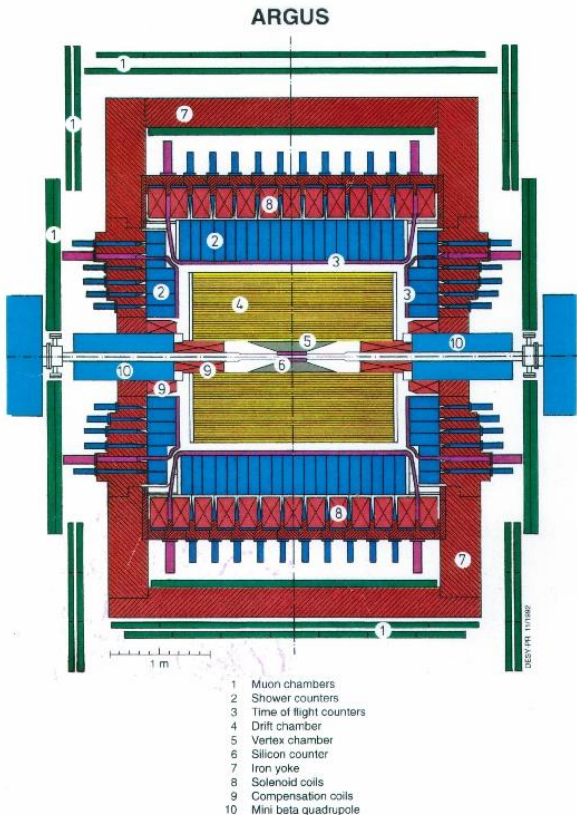
Детектор NEMO-3 в процессе сборки

Эксперимент NEMO-3

В подземной лаборатории LSM (Франция) усилиями ученых ИТЭФ, ОИЯИ (Россия), IN2P3/CNRS (Франция) и ученых из США и Чехии был создан уникальный трековый детектор NEMO-3

В 2003-2011 гг. на этом детекторе были исследованы 7 различных изотопов (^{48}Ca , ^{82}Se , ^{96}Zr , ^{100}Mo , ^{116}Cd , ^{130}Te , ^{150}Nd). Для всех этих изотопов были получены наиболее точные значения периодов полураспада по каналу $2\beta 2\nu$ и одни из лучших ограничений на безнейтринный двойной бета-распад и распады с испусканием майорона. Для $2\beta 0\nu$ -распада ^{100}Mo получен предел $T_{1/2} > 1.1 \cdot 10^{24}$ лет, что приводит к ограничению $\langle m\nu \rangle < 0.3-0.6$ эВ

ARGUS (A Russian-German-United States-Sweden Collaboration)



Эксперимент *ARGUS* оказался одним из наиболее успешных экспериментов по физике элементарных частиц, выполненных в лаборатории DESY (Германия). Детектор работал на электрон-позитронном коллайдере *DORIS*.

Специалисты ИТЭФ предложили новую концепцию дрейфовой камеры эксперимента и активно участвовали в ее создании, разработали и создали мюонную систему, участвовали в разработке и создании вершинной камеры.

В этом эксперименте при активном участии ученых ИТЭФ в 80-х – 90-х годах прошлого века выполнен обширный цикл исследований свойств прелестных и очарованных частиц, тау-лептона, осуществлен поиск новых частиц и явлений.

Был открыт целый ряд новых очарованных частиц и их новых распадов. Наиболее точно измерены параметры Мишеля в распадах тау-лептона. Новое измерение массы тау-лептона позволило устранить имевшиеся противоречия с теорией. Была измерена спиральность тау-нейтрино и получено лучшее в то время ограничение на его массу.

Впервые определены элементы СКМ-матрицы $|V_{td}|$ и (одновременно с группой CLEO) $|V_{ub}|$ - фундаментальные параметры современной теории элементарных частиц, связывающие кварки первого и третьего поколений. Впервые безмодельным образом был определен еще один фундаментальный параметр теории - $|V_{cb}|$. Таким образом были измерены все три стороны треугольника унитарности, и получено свидетельство того, что его углы, определяющие различие свойств материи и анти-материи, довольно велики.

В 1987 году в эксперименте ARGUS при активном участии физиков ИТЭФ было открыто явление неожиданно большого смешивания B_0 и анти- B_0 мезонов, что однозначно указывало на то, что масса топ-кварка, еще неоткрытого к тому времени и поиски которого активно велись на всех ускорителях мира, по самым осторожным оценкам превосходит 50 ГэВ.

Сразу после открытия в 1987 году смешивания $B0$ анти- $B0$ мезонов началось создание установок для поиска CP -нарушения в системе B -мезонов.

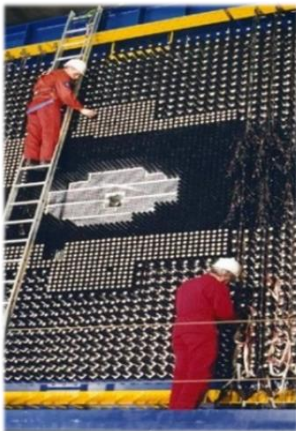
Результаты, полученные коллаборацией ARGUS, привели к появлению целого нового направления исследований – изучению различия свойств материи и антиматерии в распадах прелестных частиц.

Сразу после открытия в 1987 году смешивания $B0$ анти- $B0$ мезонов началось создание установок для поиска CP -нарушения в системе B -мезонов.

Первый проект B -фабрики для поиска CP -нарушения в системе B -мезонов был разработан в ДЕЗИ с активным участием специалистов из ИТЭФ. К сожалению, этот проект не был одобрен дирекцией ДЕЗИ.

[HELENA: A Beauty factory in Hamburg](#)
[H. Albrecht \(DESY\) et al.](#). Mar 1992. 330 pp. DESY-92-041

В лаборатории DESY стартовал эксперимент $HERA-B$, основной целью которого было исследование CP -нарушения в системе B -мезонов, используя внутреннюю мишень в протонном кольце комплекса HERA.



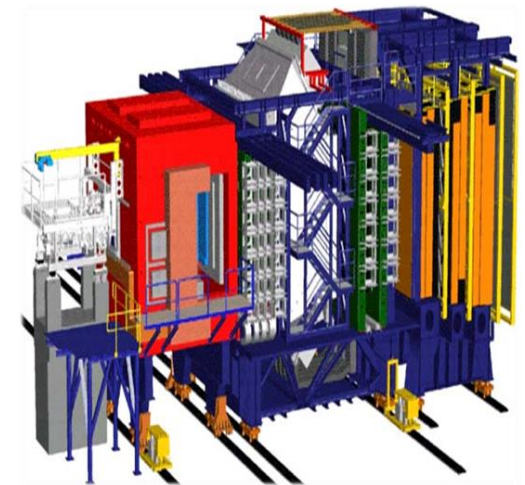
Монтаж
Калориметра



Монтаж
Мюонной
Системы



В эксперименте $HERA-B$ был выполнен целый ряд исследований по рождению очарованных и B -мезонов, J/ψ и Y -мезонов, получены лучшие на то время верхние пределы на распад $D0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ и на существование пентакварков.



Детектор $HERA-B$

Позднее в Японии (КЕК) и в США (SLAC) были построены специальные асимметричные электрон-позитронные ускорители – В-фабрики.

Эксперимент **Belle** был запущен в эксплуатацию в 1999 г. на асимметричном электрон-позитронном коллайдере КЕКВ в научном центре КЕК (Цукуба, Япония), в котором активное участие приняли сотрудники ИТЭФ.

В 2001 году в экспериментах Belle впервые обнаружено CP-нарушение в распаде $B_0 \rightarrow J/\psi K_0$, согласующееся с предсказанием модели Кобаяши-Маскавы.

Помимо решения главной задачи, измерения параметров CP-нарушения в распадах В-мезонов, и поиска редких распадов В-мезонов, ученые ИТЭФ внесли большой вклад в физику кваркония и очарованных адронов.

Одним из важных достижений в эксперименте Belle, в котором сотрудники ИТЭФ играли ведущую роль, было открытие и исследование экзотических состояний кваркония.

Установка CLAS

(**C**ebaf **L**arge **A**cceptance **S**pectrometer).

Исследование e , eA , gp и gA взаимодействий на установке CLAS ускорителя CEBAF (USA).

Основным направлением исследований является изучение строения нуклонов и ядер.

Одной из важных задач современной физики высоких энергий является изучение внутренней структуры нуклона и описание этой трехмерной структуры в терминах кварковых и глюонных полей.

Детектор CLAS – современный многоцелевой спектрометр, позволяющий проводить исследования с интенсивными электронными и фотонными пучками с энергией до 6 ГэВ на различных мишенях.

Наиболее значимыми элементами установки, разработанными ИТЭФ являются: магнит, цепь пучковых дипольных растерных магнитов с источниками питания и электромагнитный калориметр на основе кристаллов вольфрама свинца с фотодиодным считыванием.

Важным вкладом ИТЭФ в новый детектор CLAS12 является разработка двух эскизных проектов сверхпроводящих спектрометрических магнитов в виде тороида и соленоида.

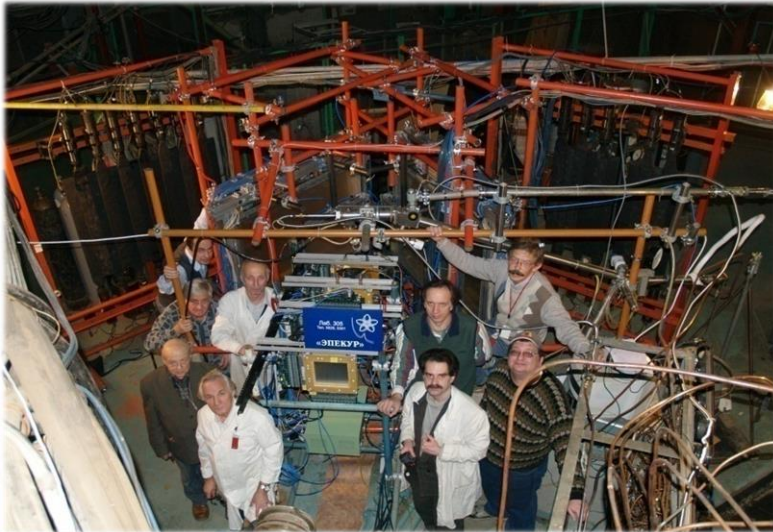
Более 150 физиков из 30 институтов и университетов США, Франции, Италии, Кореи и России (МГУ) являются членами коллаборации CLAS .

К настоящему времени на установке CLAS опубликовано более 130 работ в реферируемых журналах.

Начало работы нового детектора CLAS12 (12 ГэВ) - 2017.

Установка ЭПЕКУР (ИТЭФ)

В эксперименте **ЭПЕКУР**, используя новейшие достижения в электронике и методике эксперимента, можно получить данные с очень высоким разрешением и статистической точностью. Такие данные, с одной стороны, дадут новый импульс к развитию ПВА, а с другой - их можно будет использовать для непосредственного поиска узких резонансов. Установка была построена в 2004-2008 гг. коллаборацией ИТЭФ, ПИЯФ и Абиленского христианского университета (США).



В период с 2009 по 2011 годы на установке **ЭПЕКУР** было записано более **3 миллиардов** триггеров и выполнены наиболее точные на настоящий момент измерения дифференциальных сечений упругого пион-протонного рассеяния в резонансной области.

*Запуск установки **ЭПЕКУР** в ИТЭФ (декабрь 2008 года).*

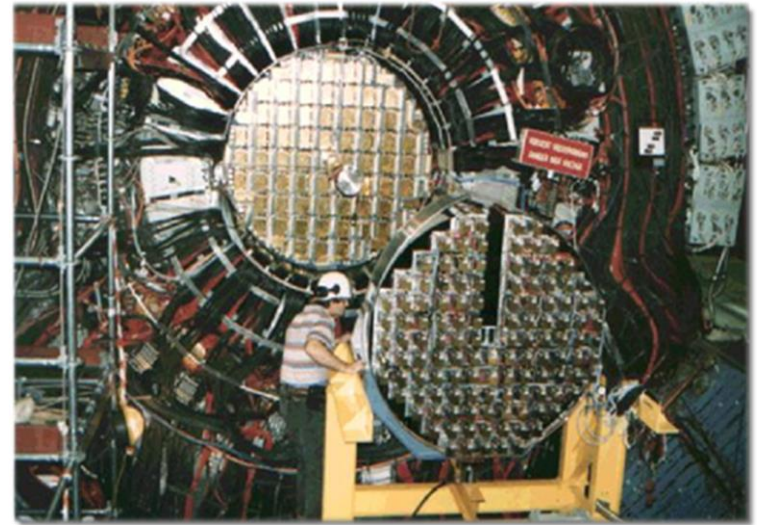
Эксперимент H1 в DESY

Создание установки H1 началось в 80-е годы прошлого столетия. На протяжении многих лет детектор H1 модернизировался. В ИТЭФ были созданы одни из наиболее важных приборов детектора - калориметры. Среди калориметров, собранных в ИТЭФ:

- часть жидкоаргонового адронного калориметра;
- задний адронный калориметр "SPACAL";
- передний нейтронный калориметр;
- тороидальный магнит.

Современные границы познания структуры материи простираются от 10^{-16} см до 10^{28} см.

Эксперимент H1 на электрон-протонном коллайдере HERA был нацелен на исследование внутреннего устройства объектов материального микромира на минимально доступных масштабах расстояний.



Сборка калориметра SPACAL в H1

Основные научные открытия, сделанные в эксперименте H1

Было обнаружено, что плотности кварков и глюонов резко возрастают на малых расстояниях внутри протона.

В глубоко-неупругом рассеянии электронов на протонах были обнаружены диффракционные явления.

Эксперименты ATLAS и CMS (CERN)

Физики ИТЭФ работают в экспериментах ATLAS и CMS на Большом Адронном Коллайдере (БАК) с самого начала этих проектов. В 1990-х годах группами ИТЭФ были разработаны методики калориметрии на основе жидкого сцинтиллятора, жидкоаргоновых дрейфовых трубок и кварцевых волокон

Группа ИТЭФ предложила использовать калориметр на кварцевых волокнах для области малых углов установки CMS. Была проведена оптимизация конструкции передних калориметров с кварцевыми волокнами и совместно с сотрудниками РФЯЦ ВНИИТФ (г. Снежинск) освоена уникальная технология производства модулей. 36 модулей весом около 4 т каждый были изготовлены во ВНИИТФ по договору с ИТЭФ. Эти модули были доставлены в ЦЕРН, оснащены кварцевыми волокнами и фотоэлектронными умножителями.



Передний калориметр ATLAS перед установкой в криостат

Группой ИТЭФ в ATLAS вначале самостоятельно, а затем совместно с партнерами были созданы и испытаны прототипы калориметра, и был выбран вариант на базе дрейфовых трубок в жидком аргоне с материалом поглотителя из вольфрама. ИТЭФ совместно с заводами ОЗТМ и ТС (Москва) и Туламашзавод разработали технологию и наладили серийное производство анодов из вольфрама диаметром 5 мм с допуском ± 15 микрон.

Общее число анодов – 32000, масса – 5,75т.

Передние калориметры ATLAS и CMS продемонстрировали высокую радиационную стойкость и надежность работы. Данные с передних калориметров необходимы для регистрации адронных струй в области малых углов и реконструкции недостающей поперечной энергии. Эти измерения сыграли важную роль в обнаружении бозона Хиггса в экспериментах ATLAS и CMS.

Эксперимент LHCb (CERN)

Международный эксперимент LHCb - один из четырех основных экспериментов на Большом Адронном Коллайдере (БАК), предназначен для того, чтобы ответить на один из самых интригующих вопросов современной физики высоких энергий - какие процессы, действующие после Большого Взрыва, позволили материи сохраниться в том виде, в котором мы ее наблюдаем сегодня, и, соответственно, объяснить и понять - почему в ходе эволюции Вселенной исчезло антивещество.

Ученые из ИТЭФ в эксперименте LHCb внесли решающий вклад в создание одной из основных систем идентификации частиц - калориметрической системы, а именно в разработку и создание электромагнитного калориметра.



Электромагнитный калориметр LHCb

В фокусе научных интересов группы ИТЭФ в эксперименте LHCb находится изучение рождения тяжелых (прелестных и очарованных) кварков и свойств адронов, содержащих тяжелые кварки. Геометрия детектора LHCb позволяет изучать процессы рождения тяжелых кварков и кваркониев в уникальной кинематической области. Группой было впервые обнаружен эффект множественного рождения тяжелых кварков в высокоэнергетичных протон-протонных столкновениях.

Эксперимент ALICE (CERN)

Международный эксперимент ALICE – единственный специализированный тяжело-ионный эксперимент на Большом адронном коллайдере в ЦЕРН, запуск которого состоялся 2009 г. Эксперимент ALICE относится к физике кварк–глюонной материи. Эта недавно возникшая область физики имеет целью решение фундаментальной научной задачи современной физики – объяснить структуру, происхождение и эволюцию барионной материи Вселенной, которая составляет основу вещества звезд, планет и живых существ.

Физики ИТЭФ являются членом коллаборации ALICE с 1993 года. Основным направлением деятельности группы являлось создание новой времяпролетной методики для идентификации заряженных частиц на основе плоско-параллельных газовых камер.



Сборка детекторов для системы TOF, сборка одного из 18 супермодулей TOF

По окончании стадии R&D 2003-2008 группа ИТЭФ принимала активное участие в сборке и калибровке крупнейшей в мире время-пролетной системы детектора ALICE

(159 000 каналов, 150 м²), превосходившей ранее имевшиеся в 50-100 раз по числу каналов и площади.

Группа ИТЭФ принимает активное участие в анализе данных по поиску следов образования кварк-глюонной плазмы с опорой на использование информации детектора TOF.

ИТЭФ в экспериментах на ускорительном комплексе ФАИР

Основание участия в коллаборациях
Распоряжение Правительства РФ от 27.02.2010 № 245-р

Участие ИТЭФ в CBM

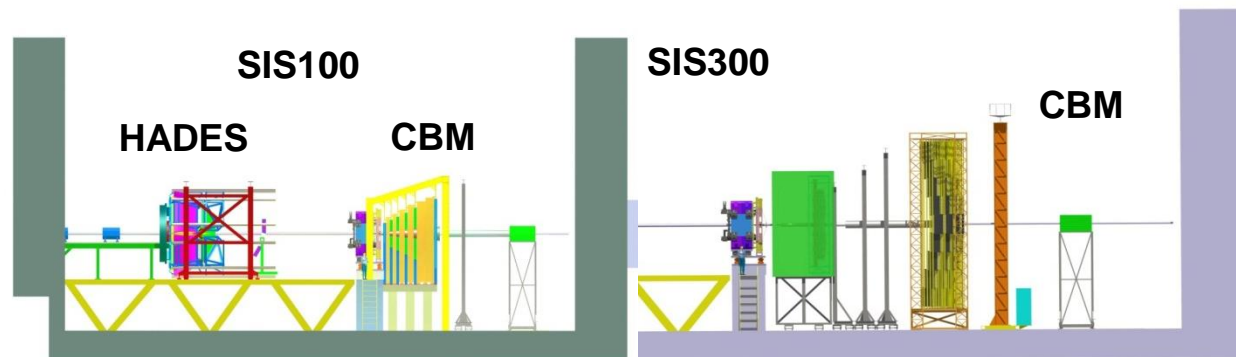
- центральная часть системы времени пролета
- электромагнитный калориметр
- активное участие в разработке программного обеспечения.

Проведены испытания прототипов детекторов

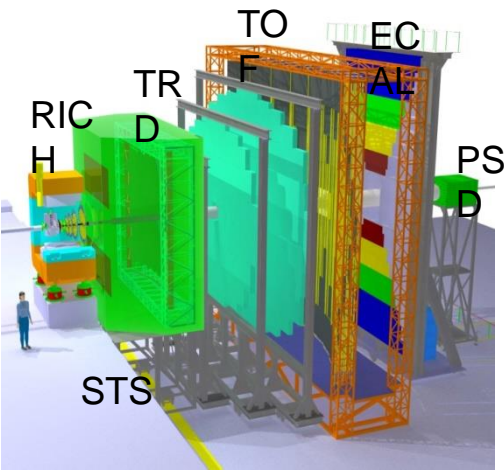
Результаты публикуются в ежегодных сборниках «CBM Progress Report».

Подготовлены Технические проекты по центральной части
время-пролетного детектора и электромагнитному калориметру

Начало экспериментов в стадии SIS100 запланировано
на 2021 год



Расположение детекторов HADES и CBM в экспериментальном зале
ФАИР на SIS100 и SIS300



Детектор CBM

Группа А. Герасимова в
эксперименте PANDA - разработка
струйной мишени

Группа А. Голубева в
эксперименте
HEDgeNOB (APPA) –
High Energy Density matter
generated by Heavy iOn Beam

- исследование плазмы с
помощью ионных пучков

SHiP Search for Hidden Particle

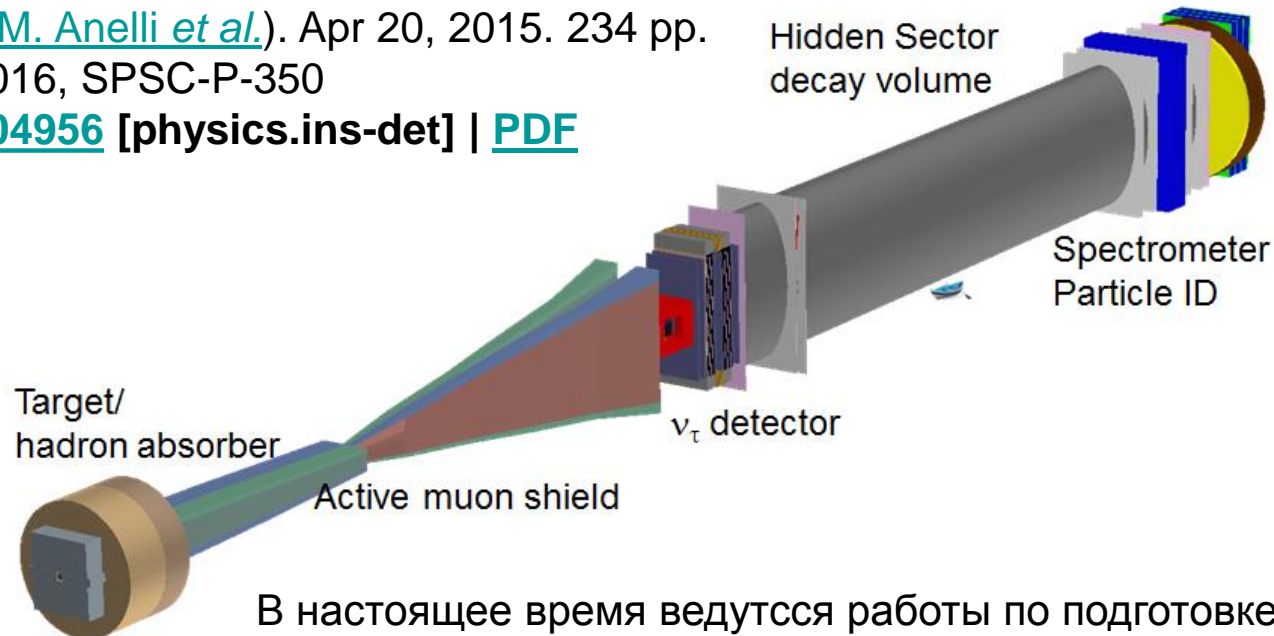
В 2015 году физики ИТЭФ приняли активное участие в разработке предложения нового детектора SHiP, который планируется создать для работы на ускорителе CERN SPS для поиска новых частиц и прецизионных исследований тау нейтрино.

[A facility to Search for Hidden Particles \(SHiP\) at the CERN SPS](#)

[SHiP Collaboration \(M. Anelli et al.\)](#). Apr 20, 2015. 234 pp.

CERN-SPSC-2015-016, SPSC-P-350

e-Print: [arXiv:1504.04956](https://arxiv.org/abs/1504.04956) [physics.ins-det] | [PDF](#)



Полная длина установки
более 100 м

В настоящее время ведутся работы по подготовке технического проекта (TDR), который должен быть готов в 2018 году

Принимает участие более 200 физиков из
45 университетов и институтов