

ОТЗЫВ

официального оппонента А.А.Смольникова
на диссертационную работу Рудика Дмитрия Геннадьевича
«Изучение и разработка методов регистрации вакуумного ультрафиолета
для сцинтилляционного нейтринного детектора на жидком аргоне»,
представленную на соискание
ученой степени кандидата физико-математических наук
по специальности 01.04.01 — приборы и методы экспериментальной физики.

Основное направление диссертационной работы Рудика Дмитрия Геннадьевича – это экспериментальные исследования свойств сцинтилляторов на основе жидкого аргона (LAr) +Xe с применением различных типов сместителей спектра (шифтеров) с целью поиска оптимальных решений для увеличения световыхода и фактора отбора полезных событий по форме импульсов. Особое внимание уделено одному из наиболее перспективных направлений – детальному изучению характеристик LAr-сцинтиллятора с растворенным в нем (xenon doped) ксеноном в качестве высокоэффективного равномерно распределенного по объему сместителя спектра, что обеспечивает более высокую эффективность отбора по форме импульса и лучший сбор сцинтилляционного света, а также должно улучшать восстановление координат событий, поскольку переизлучение происходит в точке взаимодействия. Полученные результаты важны не только для дальнейшего усовершенствования детектора на жидком аргоне CENNS-10, с помощью которого в рамках эксперимента COHERENT недавно был впервые зарегистрирован процесс упругого когерентного рассеяния нейтрино на ядрах ^{40}Ar , а также для других планируемых крупномасштабных экспериментов с детекторами на основе LAr-сцинтиллятора.

При этом в рамках данной диссертационной работы был набран и проанализирован не только обширный экспериментальный материал, но и сделаны важные, интересные и полезные для практического применения теоретические выводы, касающиеся адекватного понимания и описания сцинтилляционных процессов, происходящих при передаче энергии от возбужденных атомов/молекул аргона атомам/молекулам ксенона.

Не откладывая на потом, надо сразу отметить, что в ходе этих исследований Дмитрий Геннадьевич проявил себя не только как квалифицированный экспериментатор, умеющий правильно разрабатывать и применять методику постановки и проведения измерений, но и как ученый, хорошо разбирающийся в теории сложных сцинтилляционных процессов и умеющий, на основе своих знаний, правильно интерпретировать новые полученные результаты.

Жидкий аргон используется в качестве сцинтиллятора в различных экспериментах, таких как поиски темной материи, двойного бета распада, нейтринные осцилляционные эксперименты и т.п. LAr экономически более эффективен по сравнению с Xe, так, например, он позволяет создавать килотонные детекторы, может быть легко очищен и обладает высокой сцинтилляционной эффективностью по сравнению с другими жидкими сцинтилляторами. В качестве сцинтиллятора LAr обеспечивает очень эффективное распознавание формы импульса (PSD) между различными типами частиц благодаря значительной разнице в относительных интенсивностях быстрой и медленной составляющих сигнала. Однако существенным недостатком LAr является то, что длина волны сцинтилляции лежит в диапазоне вакуумного ультрафиолета ВУФ (~ 128 нм). Распространенным и удобным решением этой проблемы

является применение сместителей спектра - шифтеров (wavelength shifter-WLS) в сторону большей длины волны. Например, на детекторе CENNS-10 коллаборации CONERENT считывание сигнала выполняется комбинацией чувствительных к визуальному свету ФЭУ с применением шифтера TPB. Поэтому оптимизация WLS для переизлучения сцинтилляционного света LAr очень важна для улучшения отклика детектора.

Диссертация в общем и целом хорошо структурирована по главам и параграфом, за небольшими исключениями, так, например, параграф 3.6 «Анализ эффективности регистрации света» несколько краток (всего 5 строк), что представляется малоинформативным. Во Введении дается краткая характеристика экспериментов, использующих детекторы на основе жидкого аргона и обосновывается актуальность проведенных исследований, сформулированы цель работы, её научная новизна и практическая значимость. В Главе 1 приводится описание тестовой установки – миниатюрного детектора на жидком аргоне с внутренним альфа-источником и дано описание постановки и методики эксперимента. Глава 3 посвящена анализу набранных данных, в Главе 4 приводятся и обсуждаются полученные результаты, в Заключение суммируются основные результаты исследования, возможности их применения и намечены пути дальнейших исследований, в Приложении описаны процедуры работы с газами.

Не буду более подробно описывать содержание каждой отдельной главы, и тем более параграфов, отмечу лишь основные пункты по результатам.

Было показано, что газообразный ксенон, растворенный в LAr, работает как распределенный по объему шифтер, смещающий длину волны от 128 нм до 175 нм. Как показано в более ранних работах, Xe, добавленный в малых концентрациях (до 260 частей на миллион по массе), переизлучает только медленную компоненту сцинтилляции LAr. По этой причине при малых концентрациях не получалось использовать Xe в качестве одностадийного WLS и одновременно сохранять хорошую эффективность PSD-анализа в смеси LAr + Xe.

Основным результатом данного исследования является доказательство того, что быстрая компонента света LAr полностью переизлучается при высоких концентрациях (> 1500 ppm) в смеси LAr + Xe. Это было подтверждено экспериментально впервые. Также была получена количественная оценка константы скорости передачи энергии для быстрой компоненты LAr-сцинтилляции, которая отличается от константы скорости для медленной компоненты, что согласуется с теоретическими расчетами А. Hitachi, предложившим разные скорости передачи энергии атомам Xe для быстрой и медленной компонент. Было продемонстрировано, что эффективность PSD зависит от концентрации Xe и тесно связана с процессом fast component re-emission. В тестах с высокими концентрациями Xe было продемонстрировано, что эффективность PSD становится лучше, чем в тестах с применением шифтера TPB совместно с различными введенными концентрациями Xe, либо в тестах с прямыми измерениями с чистым LAr.

Стабильность параметров смеси для самой высокой протестированной концентрации Xe ~ 3000 ppm была исследована в течение 54 часов непрерывных измерений. В диссертации говорится, что не наблюдалось существенных изменений ни в одном параметре, связанном с концентрацией Xe. С другой стороны, все эти параметры чувствительны только к концентрации Xe < 1500 ppm и, поэтому, делается вывод, что эффективная концентрация Xe не упала ниже 1500 ppm. Также не наблюдалось никаких процессов агрегации, которые могут повлиять на полученные параметры, как это было предположено в некоторых публикациях.

Таким образом, автор считает, что концентрация Хе останется неизменной для долгосрочных экспериментов с LAr допированным Хе при температурах около 94К.

В данной работе впервые: экспериментально показано, что передача возбуждения синглетных состояний аргона атомам ксенона растет с увеличением концентрации ксенона; получено первое прямое экспериментальное подтверждение перераспределения быстрых компонент ре-эмиссии в LAr, допированном Хе. Этот эффект изучался при различных концентрациях Хе до ~ 3000 ppm. Было показано, что LAr допированный высокой концентрацией Хе без TPB, имеет лучшую эффективность распознавания формы импульса (PSD), чем чистый LAr или (LAr + Хе) вместе с TPB.

Конечно, как впрочем и в любой диссертационной работе, не обошлось без некоторых недочетов и разночтений, вызвавших ряд замечаний оппонента, часть из которых приведена ниже.

1. Несмотря на то, что в данной работе получено значительное количество экспериментальных данных, численные значения которых могут с успехом использоваться другими исследователями в дальнейших работах по данному направлению, все они, к сожалению, представлены только в графическом виде (причем, наиболее интересные, например, на рисунках 4.2 – 4.5 в логарифмической (по Y или по X) или даже, как Рис 4.6, 4.7 - в двойной (Y и X) логарифмической шкале), и на 105 страниц диссертации приведена всего одна таблица, в которой даются только условия проведения измерений, но не их количественные результаты. Из-за отсутствия таблиц, все погрешности измерений представлены только на рисунках в виде «усов», но ни в подписях к рисункам, и нигде в тексте не указано, что из себя представляют показанные на всех графиках погрешности, можно только догадываться, что во всех случаях это стандартные статистически погрешности на уровне $\pm 1\sigma$, но в этом случае систематические погрешности не указываются и остаются неизвестными. В тексте диссертации систематические погрешности указаны только для нескольких величин (значений SPE, концентраций Хе, константы переноса и некоторых других).

2. Некоторые основные количественные конечные результаты в диссертации приводятся вообще без ошибок, как, например, «эффективность метода вакуумного осаждения в ~ 1.6 раза превышает используемый метод покраски», «показано увеличение световыхода в ~ 3 раза по сравнению с измерениями в чистом аргоне и в ~ 1.5 раза по сравнению с измерениями с применением ТФБ», «растет эффективность регистрации фотонов в 1.5 – 3 раза, а также эффективность разделения типов частиц по форме сигнала в 1.2 – 2 раза». Если, например, в 1.2 раза с учетом погрешностей окажется в 1.2 ± 0.2 раза, то для экспериментатора это не увеличение.

3. В диссертации не определены (по крайней мере не приведены) количественно такие важные характеристики и параметры, как световой выход сцинтилляционного детектора при различных концентрациях Хе в общепринятых единицах photoelectrons/keVee, эффективность светосбора в детекторе, квантовая эффективность ФЭУ (QE), собственные световыходы исследуемого сцинтиллятора для различных концентраций Хе, класс чистоты используемого Хе, порог регистрации, собственные шумы (темновой ток) ФЭУ, отношение пик/долина при SPE калибровке, величины квантинг фактора Q_α для альфа 5,64 МэВ $_\alpha$, собственный фон тестовой камеры без источников, эффективность совпадений с детектором NaI(Tl) для γ - 511 кэВ от источника ^{22}Na , времена измерений (или скорости счета) представленных на всех рисунках экспериментальных спектров, не поставлена в соответствие шкала в фотоэлектронах

к шкале в кэВ, и т.д. Из-за отсутствия численных значений вышеперечисленных параметров, часть полученных результатов и выводов носит сравнительно-относительный качественный характер, и, как следствие, многие интересные и важные результаты данного исследования получаются замкнутыми сами на себя. По этой причине трудно адекватно оценить некоторые из полученных результатов и сделанные выводы и сравнить количественно данные результаты с опубликованными результатами других исследований.

Есть небольшие замечания по терминологии:

1. Глава 1 озаглавлена «Свойства конденсированного аргона и его применение», а параграф 1.1 «Конденсированные благородные газы», хотя, как и в этой главе так и далее везде речь идет только о жидком аргоне, недаром для него в диссертации вводится обозначение LAr. Следуя формулировке ВАК, понятие «конденсированные газы» входит в понятие «конденсированного состояния» и включает в себя как жидкое, так твердое состояние вещества.

2. Трудно согласиться с утверждением «показано, что смесь с большой концентрацией Хе в аргоне стабильна в течение длительного сеанса измерений», поскольку термин «длительный сеанс измерений» вряд ли подходит для 54-часового сеанса по сравнению с длительностью Engineering Run (Февраль-Май 2017) и First Production Run (Июль 2017-Ноябрь 2018) на установке CENNS-10, не говоря уже о других многолетних экспериментах.

3. Приходится обратить внимание и на досадную опisku-опечатку в начале содержательной части Автореферата, где вместо передачи возбуждения синглетных состояний атомов аргона атомам ксенона написано о «передаче энергии от возбужденных ЯДЕР аргона ЯДРАМ ксенона», что заставило автора данного отзыва засомневаться в собственной компетенции в вопросах сцинтилляционных процессов.

Также есть некоторые вопросы и замечания по методике измерений, но они были подробно обсуждены с диссертантом в период прочтения первых черновых вариантов диссертации и в большинстве случаев учтены при подготовке к защите.

В заключение необходимо особо отметить, что за месяц до защиты этой диссертации, 10 января 2020 года, коллаборация COHERENT объявила о первых положительных результатах по регистрации процесса упругого когерентного рассеяния нейтрино (на уровне $3,5 \sigma$) на ядрах ^{40}Ar , полученных с использованием сцинтилляционного детектора на основе жидкого аргона CENNS-10. Не вызывает сомнений, что действительно немалый вклад в достижении этого важного научного результата был сделан благодаря R&D работам в рамках данной диссертации, в результате которых после модификации установки CENNS-10 удалось существенно повысить эффективность пленочных отражателей-переизлучателей на основе TPВ+Тефлон, и, в комплексе с другими мерами, увеличить световыход в детекторе с 0,6 в первом техническом запуске до 4.6 ± 0.4 photoelectrons/keVee в первой физической серии измерений (First Production Run), а порог регистрации снизился с 80 до 20 keVnr что, в свою очередь и позволило получить первые положительные результаты на детекторе CENNS-10 [Доклад: *Jacob Zettlemoyer, Fermilab Joint Experimental-Theoretical Physics Seminar January 10, 2020*]. Кроме того, в этом же докладе говорится о предстоящих планах коллаборации по созданию нового крупномасштабного (ton-scale) детектора CENNS-750, в котором предусматривается допирование LAr ксеноном, поэтому результаты данной диссертационной работы безусловно найдут прямое практическое применение на следующем этапе экспериментов в рамках COHERENT коллаборации.

Таким образом, поставленные в диссертационной работе цели выполнены на высоком научном уровне и полученные результаты без сомнений представляют большой научный и практический интерес, а сама диссертация представляется научным трудом, выполненным на хорошем профессиональном уровне.

Результаты, представленные в диссертации, докладывались на международных конференциях и научных семинарах. По материалам диссертации опубликованы статьи в реферируемых журналах. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

Несмотря на указанные замечания, которые в большей мере относятся к стилю и форме изложения, считаю, что данная работа вполне соответствует требованиям ВАК, предъявляемым к диссертационным работам на соискание степени кандидата физико-математических наук, а её автор, Рудик Дмитрий Геннадьевич, безусловно заслуживает присвоения ученой степени кандидата физико-математических наук.

Старший научный сотрудник
Лаборатории ядерных проблем
Объединенного института ядерных исследований,
к.ф.-м.н.



Смольников Анатолий Алексеевич

141980 г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6
тел. +7 (496) 2163205, e-mail: smoln@jinp.ru
27 января 2020 г.

Подпись А.А.Смольникова заверяю:
Ученый секретарь
Лаборатории ядерных проблем
Объединенного института ядерных исследований



Титкова Ирина Викторовна