

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора физико-математических наук
Бузулуцкова Алексея Фёдоровича на диссертационную работу
Сидоренкова Андрея Юрьевича на тему
«Разработка жидкого сцинтиллятора на основе линейного алкилбензола
для экспериментов следующего поколения в астрофизике частиц» на
соискание учёной степени кандидата физико-математических наук
по специальности 01.04.01 - «приборы и методы экспериментальной
физики»

Диссертационная работа посвящена разработке новых эффективных жидких органических сцинтилляторов для экспериментов по регистрации нейтрино в астрофизике и физике высоких энергий.

Избранная тема, несомненно, является актуальной, так как жидкие органические сцинтилляторы активно применяются в детекторах нейтрино низких энергий, а именно астрофизических нейтрино, в частности солнечных нейтрино, реакторных нейтрино и геофизических нейтрино.

Основной целью диссертационной работы являлись разработка и создание высокоэффективных жидких сцинтилляторов на основе линейного алкилбензола и новых высокоэффективных сцинтилляционных добавок, а также разработка методов исследования их параметров, включая разработку специализированного отечественного фотоэлектронного умножителя (ФЭУ) для детекторов на основе жидких органических сцинтилляторов.

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы.

Во введении дается обоснование актуальности разработки новых жидких органических сцинтилляторов для крупномасштабных нейтринных экспериментов, сформулированы задачи и цели исследований, показаны новизна работы, ее практическая значимость.

В первой главе обсуждается роль жидких органических сцинтилляторов в экспериментах в астрофизике частиц, в частности в нейтринной физике и приводится краткий обзор крупных экспериментов, в которых они нашли применение.

Во второй главе описаны основные механизмы сцинтилляции в жидких органических сцинтилляторах, представлены результаты исследования сцинтилляционных параметров жидких сцинтилляторов на основе линейного алкилбензола (LAB) и других растворителей, таких как диизопропилнафталин (DIN) и псевдокумол (PC). Описаны методы и средства исследования параметров разрабатываемых жидких сцинтилляторов.

В третьей главе описываются способы очистки жидких сцинтилляторов, так как оптические свойства жидкого сцинтиллятора чрезвычайно важны в детекторах большого объема.

Четвертая глава диссертации посвящена исследованию ФЭУ для использования в детекторах на основе жидких органических сцинтилляторов. В частности в коллаборации с ООО «МЭЛЗ ФЭУ» были разработаны и созданы пилотные образцы отечественных ФЭУ с полусферическим фотокатодом диаметром 3 дюйма для детекторов следующего поколения.

В пятой главе представлены результаты тестирования высокоэффективных и быстрых неорганических сцинтилляционных кристаллов для исследования нелинейных эффектов в жидких сцинтилляторах.

Основные результаты, полученные соискателем, заключаются в следующем:

1. Разработаны и созданы жидкие органические сцинтилляторы с повышенным световыходом на основе новых кремнийорганических сцинтилляционных добавок и линейного алкилбензола для экспериментов следующего поколения по астрофизическим нейтрино, реакторным нейтрино и геофизическим нейтрино. Световыход новых сцинтилляторов почти в 2 раза превышает световыход сцинтилляторов с использованием РРО. При этом максимум спектра излучения приходится на 490 нм, а кинетика свечения характеризуется компонентами с постоянными времени высвечивания 10 нс (83% от полного световыхода), 50 нс (10%) и 190 нс (7%).

2. Разработаны методы исследования основных сцинтилляционных свойств жидких сцинтилляторов - относительного световыхода и кинетики свечения на базе быстродействующих фотоумножителей с фотокатодами с высокой квантовой эффективностью.

3. Разработаны совместно с ООО «МЭЛЗ ФЭУ» полусферические 3-дюймовые ФЭУ для крупномасштабных детекторов следующего поколения. ФЭУ характеризуется высоким усилением (10^7), хорошим однофотоэлектронным сигналом (отношение пик/долина равно 3) и хорошим временным разрешением (разброс времени пролета фотоэлектронов - 3 нс).

4. Разработаны методы исследования высокоэффективных быстрых неорганических сцинтилляционных кристаллов GAGG(Ce) (гадолиний-алюминий-галлиевый гранат) для исследования нелинейных эффектов в жидких органических сцинтилляторах с использованием комптоновской спектрометрии. Показано, что сцинтилляторы обладают высоким световыходом и быстрой кинетикой свечения.

5. Разработана и создана электронная регистрирующая система на базе быстродействующего оцифровщика импульсов DRS4 для низкофоновой установки по исследованию содержания радиоактивного изотопа ^{14}C в жидких сцинтилляторах на основе органических растворителей.

Таким образом, поставленная цель по разработке и созданию высокоэффективных жидких сцинтилляторов на основе линейного алкилбензола и новых высокоэффективных сцинтилляционных добавок, а также методов исследования их параметров, была достигнута. Научная новизна работы заключается в том, что впервые в мире разработаны жидкие сцинтилляторы с высоким световыходом на основе линейного алкилбензола с кремнийорганическими сцинтилляционными добавками и исследованы их основные сцинтилляционные параметры. Показано, что световыход таких сцинтилляторов существенно превышает световыход сцинтилляторов с использованием традиционных сцинтилляционных добавок (например, РРО). Разработанные жидкие сцинтилляторы с кремнийорганическими добавками, несомненно, представляют большой интерес для крупномасштабных экспериментов в физике нейтрино низких энергий. Также впервые в отечественной практике разработан и создан специализированный фотоэлектронный умножитель для использования в детекторах на основе жидких органических сцинтилляторов. Создание такого фотоумножителя открывает возможности решения проблемы импортозамещения и возрождения массового производства фотоумножителей в нашей стране.

Хотя в целом работа выполнена на высоком уровне, в ней имеются отдельные недостатки; их список, а также замечания к работе приведены ниже:

1) Везде в тексте диссертации используется термин «жидкие сцинтилляторы». Наряду с жидкими органическими сцинтилляторами, используемыми при комнатной температуре и являющимися объектом исследования в данной работе, в этот класс сцинтилляторов входят также и криогенные жидкие неорганические сцинтилляторы на основе благородных газов, которые не имеют отношения к теме диссертации. Поэтому правильнее было бы использовать термин «жидкие органические сцинтилляторы».

2) В первой главе, где дан обзор применению жидких органических сцинтилляторов в экспериментах по физике и астрофизике частиц, к сожалению, не упомянут важный класс подсистем на их основе, а именно подсистема вето-детекторов нейтронов в подземных экспериментах по поиску темной материи. Не один детектор темной материи не может обойтись без такой подсистемы, так как она подавляет самый важный фон для ядер отдачи - нейтронный фон, а по объему жидкого сцинтиллятора такие подсистемы сравнимы с подземными детекторами нейтрино.

3) На Рис. 2.31 представлен интересный результат по различию формы сигналов нескольких типов жидких сцинтилляторов при облучении гамма-квантами и альфа-частицами, из которого видно, что наибольшее различие достигается в новом сцинтилляторе на основе линейного алкилбензола с кремнийорганической добавкой - за счет более длинной медленной компоненты. Такие сцинтилляторы могли бы быть востребованы в сцинтилляционных детекторах быстрых нейтронов, регистрируемых по протонам отдачи, где эффективное отделение нейтронов от фона гамма-квантов идет как раз за счет различия формы сигнала. В частности, хотелось бы знать, могут ли конкурировать жидкие сцинтилляторы, разработанные в диссертации, со стильбеном, который широко используется в нейтронных счетчиках. Жаль, что это важное применение не упомянуто в диссертации.

Указанные недостатки не снижают практической ценности и высокого уровня работы, представленной к защите.

Диссертационная работа является значительным вкладом в развитие технологии жидких органических сцинтилляторов. Следует отметить завершенность диссертационной работы, её соответствие заявленному шифру специальности, достаточное количество и качество публикаций соискателя. Её содержание достаточно полно отражено в 12 статьях, входящих в перечень ВАК при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации. Автореферат полностью отражает содержание диссертации и соответствует требованиям, предъявляемым ВАК.

Полученные Сидоренковым А. Ю. результаты являются новыми, обоснованными и достоверными. Его диссертация полностью отвечает всем требованиям, предъявляемым ВАК к кандидатским диссертациям, а её автор заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 - приборы и методы экспериментальной физики.

Официальный оппонент:
главный научный сотрудник лаборатории 3-3
ИЯФ СО РАН им. Г.И. Будкера,
г. Новосибирск,
д.ф.-м.н.
e-mail: A.F.Buzulutskov@inp.nsk.su

Бузулуцков Алексей Федорович

12.11.2021

Подпись Бузулуцкова А.Ф. заверяю:
Ученый секретарь ИЯФ СО РАН

Резниченко А.В.

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ им. Г.И. Будкера
Сибирского отделения Российской академии наук (ИЯФ СО РАН)
Проспект ак. Лаврентьева, д. 11, г. Новосибирск, 630090
телефон: (383) 329-47-60, факс: (383) 330-71-63
<http://www.inp.nsk.su>, e-mail: inp@inp.nsk.su

Бузулуцков Алексей Федорович

Доктор физико-математических наук по специальности 01.04.01-
Приборы и методы экспериментальной физики.

Список публикаций Бузулуцкова А.Ф. по теме диссертации
Сидоренкова А.Ю.:

- 1) 1. Aalseth C. E., Abdelhakim S., Agnes P., ..., Buzulutskov A., et al., SiPM-matrix readout of two-phase argon detectors using electroluminescence in the visible and near infrared range // *Eur. Phys. J. C.* 2021. V. 81. Paper 153. P. 1-17.
<https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-020-08801-2>.
- 2) 2. Bondar A., Borisova E., Buzulutskov A., Frolov E., Nosov V., Oleynikov V., Sokolov A., Observation of primary scintillations in the visible range in liquid argon doped with methane // *J. of Instrumentation.* 2020. V. 15. Paper C06053. P. 1-10.
<http://doi.org/10.1088/1748-0221/15/06/C06053>
- 3) 3. Bondar A., Borisova E., Buzulutskov A., Frolov E., Oleynikov V., Sokolov A., Observation of unusual slow components in electroluminescence signal of two-phase argon detector // *J. of Instrumentation.* 2020. V. 15. Paper C06064. P. 1-17.
<http://doi.org/10.1088/1748-0221/15/06/C06064>
- 4) 4. Bondar A., Buzulutskov A., Parkhomchuk V., Petrozhitskiy A., Shakirova T., Sokolov A., Low-pressure TPC with THGEM readout for ion identification in Accelerator Mass Spectrometry // *Nucl. Instrum. and Methods A.* 2020. V. 958. Paper 162780. P. 1-4.
<https://doi.org/10.1016/j.nima.2019.162780>
- 5) 5. Bondar A., Buzulutskov A., Dolgov A., Frolov E., Nosov V., Oleynikov V., Shemyakina E., Sokolov A., Neutral bremsstrahlung in two-phase argon electroluminescence: further studies and possible applications // *Nucl. Instrum. and Methods A.* 2020. V. 958. Paper 162432. P. 1-4. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2019.162432>
- 6) 6. Buzulutskov A., Shemyakina E., Bondar A., Dolgov A., Frolov E., Nosov V., Oleynikov V., Shekhtman L., Sokolov A., Revealing neutral bremsstrahlung in two-phase argon electroluminescence // *Astroparticle Physics.* 2018. V. 103. P. 29–40.
<https://doi.org/10.1016/j.astropartphys.2018.06.005>
- 7) 7. Aalseth C.E., Acerbi F., Agnes P., ..., Buzulutskov A., ..., et al., DarkSide-20k: A 20 tonne two-phase LAr TPC for direct dark matter detection at LNGS // *Eur. Phys. J. Plus.* 2018. V. 133: 131. P. 1-129. <http://doi.org/10.1140/epjp/i2018-11973-4>
- 8) 8. Bondar A., Buzulutskov A., Dolgov A., Grishnyaev E., Nosov V., Oleynikov V., Polosatkin S., Shekhtman L., Shemyakina E., Sokolov A. Measurement of the ionization yield of nuclear recoils in liquid argon using a two-phase detector with electroluminescence gap // *J. of Instrumentation.* 2017. V. 12. Paper C05010. P. 1-9.
<http://doi.org/10.1088/1748-0221/12/05/C05010>
- 9) Buzulutskov A., Photon emission and atomic collision processes in two-phase argon doped with xenon and nitrogen // *Europhys. Lett.* 2017. V. 117. Paper 39002. P. 1-6.
<http://doi.org/10.1209/0295-5075/117/39002>