

УТВЕРЖДАЮ

Директор Международной  
межправительственной организации  
«Объединенный институт ядерных  
исследований» (ОИЯИ),  
академик РАН



Г.В.Трубников

августа

2022 г.

## ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Международной межправительственной организации «Объединенный институт ядерных исследований» (ОИЯИ) на диссертационную работу Шманина Евгения Владимировича «Разработка радиационно-стойкого модуля электромагнитного калориметра спектрометра LHCb», представленную к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – «Приборы и методы экспериментальной физики».

Диссертационная работа Шманина Евгения Владимировича посвящена решению экспериментальной задачи по разработке радиационно-стойкого модуля электромагнитного калориметра крупного эксперимента LHCb на Большом адронном коллайдере (БАК) для обеспечения стабильной и долговременной работы этого калориметра.

### **Актуальность темы исследования**

Актуальность темы определяется необходимостью модернизации электромагнитного калориметра, представляющего собой важную и целостную подсистему эксперимента LHCb, к ожидаемому увеличению радиационных нагрузок в результате многократного возрастания светимости БАК, а также и оптимизацией энергетического и временного разрешения этого калориметра в условиях развития БАК.

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



Во **Введении** приводится справка о возникновении и принципах методов регистрации частиц, обосновывается актуальность данного исследования, формулируются его цели и задачи. Перечисляются положения, выносимые на защиту. Дано резюме относительно новизны и значимости, об апробации работы и публикации ее результатов.

В **Первой главе** описывается эксперимент ЛНСб на БАК, его основные достижения и устройство, а также обосновывается необходимость модернизации электромагнитного калориметра.

Действующий электромагнитный калориметр состоит из модулей типа «шашлык», состоящих из чередующихся слоев сцинтиллятора и поглотителя, служащего радиатором электромагнитных ливней. В качестве сцинтиллятора применяется полистирол с добавлением РТР и РОРОР, Модули пронизывают волокна, собирающие свет с оболочкой для переизлучения в диапазон зеленого цвета. Главным недостатком органических материалов является невысокая радиационная стойкость, приводящая к ухудшению сигнала по мере накопления дозы.

Степень деградации отклика детектора, представленная на рисунке 26 первой главы работы, демонстрирует невозможность использования модулей действующей сборки при поглощенной дозе порядка 100 Мрад. Поэтому предложено изменение схемы сегментации калориметра с заменой модулей, расположенных близко к пучку, на радиационно-стойкие модули.

Во **Второй главе** обсуждаются возможные варианты радиационно-стойких модулей, в том числе типы сцинтилляторов и поглотителей электромагнитных ливней. Приводятся соответствующие данные о моделировании энергетического разрешения модулей. В качестве обновленной конструкции выбрана технология калориметров типа «спагетти» (SPACAL).

Выбранная технология позволяет получить относительно компактный электромагнитный ливень, что ценно при повышенной загрузке. Технология SPACAL подразумевает применение сцинтилляционных волокон. Помимо световых основных требованием к ним является значение длины затухания света, значительно превышающее длину модуля, а также ее сохранение в приемлемом диапазоне при радиационных нагрузках.

При исследовании изменения прозрачности сцинтилляционных материалов под воздействием радиационных нагрузок была подтверждена возможность использования кристаллов (GAGG:Ce) в обновляемых модулях. Хотя при поглощенной дозе порядка 100 Мрад длина затухания в волокнах на основе GAGG:Ce снижается в три раза, ее значение остается на допустимом уровне.

Представлено моделирование наведенной активности в исследуемых кристаллах, а также оценен вклад от радиоломинесцентного шума в



оцифровку сигнала. В заключение этой главы описывается моделирование энергетического разрешения различных конфигураций модулей SPACAL, на основе которого выбрана оптимальная для прототипа.

**В Третьей главе** представлено моделирование зависимости энергетического разрешения для возможных вариантов прототипа. Описан выбор варианта для проведения экспериментальных исследований. Дано детальное описание процесса сборки модуля для экспериментального исследования. Результаты проведенных измерений согласуются ожидаемыми значениями энергетического разрешения модуля для исследуемых значений энергии электронов.

Измеренное временное разрешение прототипа незначительно отличается от значения временного разрешения действующих модулей электромагнитного калориметра ЛНС. В предположении о влиянии на временное разрешение продольных флуктуаций электромагнитного ливня предложено их снижение путем двустороннего считывания света и асимметричного разделения модуля по направлению электромагнитного ливня. Такое решение послужило основой создания очередного прототипа.

**В Четвертой главе** описана сборка и экспериментальное изучение прототипа. Сделан оптимальный выбор поглотителя на основе моделирования энергетического разрешения. Обновленный прототип отличается от начального более плотным материалом поглотителя и асимметричным разделением на продольные секции. Его экспериментальное исследование проводилось с использованием идентичной установки в DESY. Измеренное энергетическое разрешения соответствует требованиям эксперимента ЛНСб.

Однако временное разрешение оказалось значительно хуже, чем у предыдущего прототипа. Был устранен недостаток конструкции системы светосбора, и измерения временного разрешения были проведены вновь. Полученные результаты удовлетворяют требованиям эксперимента ЛНСб.

**В Заключении** сформулированы основные результаты диссертации. Результаты исследований представлены в 4 публикациях, из них 3 в журналах, рекомендованных ВАК.

### **Научная новизна выносимых на защиту результатов**

Перспектива радикального увеличения светимости БАК остро ставит задачу принципиального обновления электромагнитного калориметра ЛНС. Его модули, функционирующие в настоящее время, окажутся неработоспособны, прежде всего, из-за возрастающих радиационных нагрузок. Изменение конструкции модулей электромагнитного калориметра ЛНСб на основе радиационно-стойких материалов, предложенное Е.В. Шманиным, обоснованное им путем компьютерного моделирования и



экспериментов, позволяет применить подобные модули при планируемом уровне светимости БАК.

### **Значимость диссертационной работы**

Особо стоит отметить непосредственное участие диссертанта в новых научных разработках известного международного сотрудничества и его практическую работу в инфраструктуре ЦЕРН. Используются достижения в области кристаллофизики, технология 3Д-печати, программы физического моделирования как основы в принятии решений относительно конструкции прототипов. Опыт создания передового детектора, накопленный в результате такого комплексного подхода, будет востребован исследованиях по физике высоких энергий в РФ.

### **Замечания по диссертационной работе**

1. В справке развития экспериментальных методов физики частиц имеются пропуски. Стоило бы отметить Д.В. Скобельцына, первым поместившим камеру Вильсона и обнаружившим следы частиц с энергией свыше 20 МэВ, что указало на корпускулярную природу космической радиации и стало началом физики высоких энергий. Опушен фотоэмульсионный метод, давший основополагающие открытия, начиная с радиоактивности. В ЦЕРН он использовался в гибридных экспериментах как средство реконструкции вершин (эксперименты Омега, Хорус, Опера). Стоило бы упомянуть советского радиофизика Л.А. Кубецкого создавшего первый фотоэлектронный умножитель, не ограничиваясь цитированием архива IEEE. Раз вопрос поставлен широко диссертанту полезно обратиться к подборке журнала УФН на сайте <http://nuclphys.sinp.msu.ru/UFN/index.html> НИИЯФ имени Д.В. Скобельцына МГУ.
2. Рис. 26 указано а.у. Как нормировались данные разных лет?
3. В описании исследования длины затухания волокна из сцинтиллятора GAGG отсутствует численное значение величины. В тексте приведено лишь количественное сравнение со значением до облучения. Указанное значение представляется определить исходя из рисунка 40, однако, автору следовало поместить значения длин затухания на рисунок или в текст.
4. В главе 4 автору следовало поменять местами пункты 4.1 и 4.2 по моделированию вариантов конфигурации модуля и сборке



прототипа для соблюдения хронологического порядка изложения.

5. В работе присутствуют незначительные опечатки, а также в пункте 3 главы 1 часть единиц измерений представлена латиницей, а не кириллицей.

Перечисленные замечания носят рекомендательный характер и не влияют на общую высокую оценку диссертационной работы. Проведенные исследования имеют высокий научный уровень и полностью соответствуют цели диссертации. Обоснованность и достоверность полученных результатов не вызывают сомнений. По своей направленности диссертационное исследование полностью соответствует специальности 01.04.01 – «Приборы и методы экспериментальной физики». Список цитированной литературы соответствует теме исследования. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

По своей актуальности, новизне, достоверности, научному уровню, практической значимости диссертационная работа «Разработка радиационно-стойкого модуля электромагнитного калориметра спектрометра ЛНСб» полностью удовлетворяет требованиям пп. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», а ее автор Шманин Евгений Владимирович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – «Приборы и методы экспериментальной физики».

Отзыв на диссертацию обсуждался и был одобрен 31 августа 2022 года на Специализированном семинаре им. А. М. Балдина № 800 Лаборатории физики высоких энергий ОИЯИ «Релятивистская ядерная физика и поляризационные явления».

**Отзыв составил**

Зарубин Павел Игоревич доктор физико-математических наук, начальник сектора Лаборатории физики высоких энергий В.И. Векслера и А.М. Балдина Объединенного института ядерных исследований, тел.+7-496-2163-303, zarubin@jinr.ru.

/П.И. Зарубин/

Список основных публикаций сотрудников ОИЯИ, составивших отзыв по теме защищаемой диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет

1. Zarubin P.I. et al./ Enhanced production of  $^8\text{Be}$  nuclei in relativistic nuclei fragmentation// Proceedings of Science (380), 219 – 2022.
2. Zarubin P.I. et al./ Search for Decays of the  $^9\text{B}$  Nucleus and Hoyle State in  $^{14}\text{N}$  Nucleus Dissociation// Physics of Particles and Nuclei (53), 2, – P. 456 – 460 – 2022
3. Zarubin P.I. et al./ Possibility of measuring the angular characteristics of the primary and secondary tracks of relativistic nuclear fragmentation by the nuclear track emulsion method.// Bulgarian Chemical Communications (54) – 2022
4. Zarubin P.I. et al./ An Enhancement of Formation of Unstable  $^8\text{Be}$  Nucleus with the Growth of  $\alpha$ -Particle Multiplicity in Fragmentation of Relativistic Nuclei // Physics of Atomic Nuclei (84) 9, 1641 – 1646 – 2021
5. Zarubin P.I. et al./ Correlation in formation of  $^8\text{Be}$  nuclei and  $\alpha$ -particles in fragmentation of relativistic nuclei// Physics Letters, Section B: Nuclear, Elementary Particle and High-Energy Physics (820), 136460 – 2021
6. Zarubin P.I. et al./ Monte Carlo modeling of production of three alpha-particles in low energy  $n + ^{12}\text{C}$  interactions// Modern Physics Letters A (36), 25, 2150182 – 2021
7. Zarubin P.I. et al./ Unstable states in dissociation of relativistic nuclei: Recent findings and prospects of research// European Physical Journal A (26), 20, 250 – 2020
8. Zarubin P.I. et al./ Prospects of nuclear clustering studies via dissociation of relativistic nuclei in nuclear track emulsion// Journal of Physics: Conference Series (1555), 1, 012005. – 2019
9. Zarubin P.I. et al./ Application of nuclear track emulsion in low-energy studies// Bulgarian Chemical Communications (52), 147–151. – 2020



10. Zarubin P.I. et al./ Features of  $3\alpha$ -particles formation in dissociation of  $^{12}\text{C}$  nuclei in nuclear track emulsion// Bulgarian Chemical Communications (52), 157–164. – 2020
11. Zarubin P.I. et al./ Investigation of the dissociation of  $^{10}\text{B}$  nuclei in a nuclear track emulsion// Bulgarian Chemical Communications (52), 152 –156. – 2020
12. Zarubin P.I. et al./ Investigation of nuclear emulsions in terms of neutron dosimetry// Radiation protection dosimetry (186), 2–3, 229 – 234. – 2019
13. Zarubin P.I. et al./ The Hoyle State in the Relativistic Dissociation of Light Nuclei// Physics of Atomic Nuclei (82), 9, 1225 – 1233. – 2019
14. Zarubin P.I. et al./ Toward ternary fission accompanied by the  $^8\text{Be}$  nucleus// Eurasian Journal of Physics and Functional Materials (3), 1, 71 – 83. – 2019
15. Zarubin P.I. et al./ Application of Nuclear Track Emulsion in Search for the Hoyle State in Dissociation of Relativistic  $^{12}\text{C}$  Nuclei// Physics of Atomic Nuclei (81), 9, 1237 – 1243. – 2018