

ОТЗЫВ

официального оппонента кандидата технических наук Замятина Николая Ивановича на диссертацию Кудряшова Ильи Анатольевича «Электроника считывания малого ионизационного калориметра, алгоритмы анализа данных космического эксперимента НУКЛОН и измерение спектра никеля», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 - Физика атомного ядра и элементарных частиц.

Диссертация Кудряшова Ильи Анатольевича посвящена задачам по созданию научной аппаратуры, алгоритмов по анализу данных и измерению спектров тяжелых ядер в космическом эксперименте Нуклон. Диссертантом выносятся на защиту следующие положения, которые были сформулированы, как цели и задачи для исследований в данной диссертационной работе:

- измерить тяжелую компоненту (Fe, Ni) спектров космических лучей (КЛ);
- создать (*совместно с экспертами по электронике*) комплекс научной аппаратуры (КНА) с учетом особенностей регистрации тяжелых ядер;
- создать новые и адаптировать существующие алгоритмы анализа данных, которые позволяли бы уверенно определять направление прилёта тяжелых ядер, заряд и их энергию.

Объектом исследования данной диссертации является комплекс научной аппаратуры космического эксперимента Нуклон и, в частности, малый ионизационный калориметр (МИК), а также спектр тяжелых элементов космических лучей (КЛ).

Предметом данного исследования является оптимизация электроники считывания МИК космического эксперимента Нуклон, создание математической модели установки и алгоритмов анализа данных для получения спектров с использованием калориметра.

Диссертация состоит из:

- введения с обоснованием актуальности проблемы;
- семи глав с описанием состава аппаратуры, программ обработки экспериментальных и тестовых результатов, алгоритмов анализа данных эксперимента НУКЛОН;
- заключения с основными результатами.

В первой главе автор лаконично делает экскурс в историю исследования космических лучей (КЛ), рассмотрена структура спектра КЛ, описаны механизмы рождения КЛ, приведен обзор современных экспериментов. Понятным физическим языком описаны различные (сложные) модели существующего изгиба «колена» в спектре КЛ и напоминает, что задачей диссертации и эксперимента НУКЛОН является продвижение верхнего предела энергий, достижимых в прямых измерениях КЛ, к области «колена».

Во второй главе диссертации приведено описание научной аппаратуры НУКЛОН с обоснованием принятых решений, учитывая специфику орбитального эксперимента (минимизация веса, электрической мощности, числа детектирующих каналов, компромисса координатной точности детекторов и быстродействия). Автор доказывает обоснованность применения двух калориметров: (СИЭ) - система измерения энергии (кинематический адронный KLEM спектрометр) и малый ионизационный калориметр для измерения лептонного

спектра и возможности Е-калибровки на орбите.

Третья глава посвящена специальной интегральной микросхеме считывания СИМС-Нуклон, разработанной участниками данного эксперимента (эксперты НИЯФ МГУ и НИЯУ МИФИ) для МИК. В данном калориметре активной средой являются кремниевые стриповые детекторы, которые регистрируют «видимую» энергию ливня. Результаты моделирования для протонов и электронов с ожидаемой энергией показывают, что при шаге стрипа равном 1 мм и активной толщине кремниевого детектора 300 мкм ($1 \text{ m.i.p./300 мкм/Si} = 3,6 \text{ фКл}$) плотность ионизационных потерь в центре ливня может достигать $3 \times 10^4 \text{ m.i.p.}$, это эквивалентно заряду сигнала с одного стрипа $Q = 1.08 \times 10^5 \text{ фКл} = 108 \text{ пКл}$. Общей особенностью, практически, всех орбитальных экспериментов, для измерения энергии заряженной компоненты КЛ является необходимость детекторной электроники с большим динамическим диапазоном (ДД), в данном случае до 30 000 m.i.p. Главным техническим решением новой СИМС является применение билинейной амплитудной (переходной) характеристики для обеспечения соотношения сигнал/шум в области малых сигналов и динамического диапазона в области всего измеряемого амплитудного спектра. Полный динамический диапазон измеряемых сигналов разделен на два линейных участка с разным усилением, переключение поддиапазонов происходит автоматически. В процессе разработки данной микросхемы при непосредственном участии диссертанта было проведено полное тестирование (создан автоматизированный стенд) и по результатам измерений основных параметров ИС (линейность, усиление, сигнал/шум, потребление и др.) были выбраны оптимальные величины внешних резисторов и регулируемых потенциалов. Правильность схмотехнических решений СИМС-НУКЛОН и принятых решений по оптимизации параметров в результате испытаний на стенде и в комплекте собранного детекторного модуля (ледера) подтвердились полученными экспериментальными результатами на орбите. *К сожалению, один из самых информативных рисунков (рис.3.23) по результатам испытаний СИМС-НУКЛОН, где приведены амплитуды калибровочных и пучковых сигналов, остался без пояснений, например, чем объясняется неоднородность по каналам ИС.*

В четвертой главе автор приводит алгоритмы программ для физического моделирования на основе созданной математической модели аппаратуры НУКЛОН и подробно рассматривает алгоритмы предварительной обработки данных. Основной физической задачей эксперимента НУКЛОН является измерение энергетических спектров различных компонентов КЛ. Моделирование позволило – сделать оценку координатного, зарядового и энергетического разрешения. Особую сложность представляет процесс выделения электронов на превышающем на 3 порядка фоновом потоке протонов. Полученные результаты моделирования были проверены в тестовых сеансах на различных пучках ускорителя SPS CERN.

Пятая глава диссертации содержит описание и принципы основных алгоритмов физического анализа данных в КНА НУКЛОН. Измерение энергии регистрируемых частиц в установке реализовано с помощью классической методики ионизационного калориметра (МИК) и с помощью методики кинематического калориметра (СИЭ). Для испытаний аппаратуры и проверки правильности предложенных алгоритмов анализа данных были проведены несколько сеансов на выведенном пучке SPS CERN.

В шестой главе приведены экспериментальные результаты проверки корректности предложенных автором алгоритмов в сеансах на SPS. Испытания алгоритмов проводились на доступном в тестовом сеансе энергетическом диапазоне - электроны с энергией 100, 150 и 200 ГэВ сравнивались с пионами с энергий 350 ГэВ. Алгоритм выделения электронов на адронном фоне в ускорительном эксперименте на SPS CERN позволяет выделять полезный сигнал на уровне 4×10^{-4} при сохранении 50% статистики, что экспериментально подтверждает корректность тестируемого алгоритма (метод BDT), рис.6.5 (стр.118). *Автор диссертации констатирует, к сожалению, о том, что не удалось продемонстрировать методику выделения электронов и измерить электронный спектр в полетном эксперименте, т.к. пришлось существенно увеличить порог триггерной системы (из-за возникших технических проблем), чтобы решить основную задачу эксперимента.*

В седьмой главе представлены результаты эксперимента НУКЛОН, полученные на космической орбите. Важным методическим результатом является совпадение потоков компонент КЛ, измеренных в эксперименте НУКЛОН, с предыдущими экспериментами в пределах ошибок в хорошо известной и измеренной энергетической области. Этот результат говорит о правильности работы алгоритмов предварительного анализа, построения кривых эффективностей алгоритмов и триггера, а также о работоспособности аппаратуры в целом при выполнении космического полета. Важным физическим результатом является измеренный спектр никеля, полученный впервые для энергетического диапазона, не подверженного солнечной модуляции до рекордно высоких энергий $10^3 \div 2 \times 10^4$ ГэВ.

Автором создана специализированная математическая модель установки Нуклон в пакете Geant4 для оптимизации настроек триггерной системы. и алгоритмы определения направления прилета заряда и энергии для тяжелых ядер, вычислены функции эффективности триггера и алгоритмов анализа.

Построены спектры тяжелых компонент космических лучей, в том числе впервые измерен спектр никеля до энергий в несколько десятков ТэВ.

Научно-методическая новизна детекторной электроники МИК определяется рекордно высоким динамическим диапазоном многоканальной микросхемы считывания и данными, полученными в результате космического эксперимента НУКЛОН, в котором применялась данная микросхема.

Степень достоверности результатов подтверждается успешной эксплуатацией аппаратуры и разработанных автором алгоритмов обработки, а также соответствием экспериментальных данных ионизационного калориметра МИК данным других частей установки и результатам других экспериментов.

Все выносимые на защиту результаты и положения были получены лично автором или при его определяющем участии.

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 10 статьях в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по

специальности 01.04.16.

В отзыве на диссертацию Кудряшова Ильи Анатольевича хочется отметить, что текст диссертации написан грамотным русским языком, читать текст работы интересно, все утверждения обоснованы, сделаны корректные ссылки на литературные источники. В заключении диссертант приносит благодарность своим коллегам и научному руководителю, это всегда приятно слышать от молодых диссертантов.

К недостаткам по тексту диссертации следует отнести некоторые упущения, которые были бы полезны в методической главе-3:

- в тексте указан динамический диапазон сигналов для СМИС-НУКЛОН: $1 \div 30\,000$ m.i.p., если ДД начинается с одного m.i.p., то был бы полезен спектр тест-сигнала 1m.i.p., хотя бы для ИС без соединения с детектором (нулевой шум);

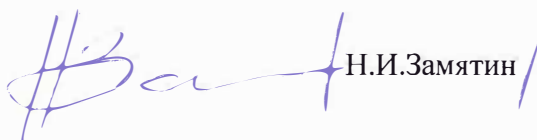
- нет нигде в тексте очень важной информации о схеме включения (DC или AC) СМИС с детектором, какая величина рабочего напряжения, величина напряжения полного обеднения детектора, величина темнового тока стрипов, рабочая температура в объеме Si-детекторов МИК;

- грамматических (в основном - падежи) ошибок/опечаток в тексте немного (не более 10).

Диссертация И.А..Кудряшова по содержанию, качеству и значимости полученных результатов безусловно удовлетворяет требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а диссертант заслуживает присуждения ему степени кандидата физико-математических наук.

16.11.2021 г.

Кандидат технических наук

 Н.И.Замятин

Подпись Н.И.Замятина удостоверяю

Учёный секретарь ЛФВЭ



А.П.Чеплаков

Официальный оппонент Замятин Н.И. , кандидат технических наук,
начальник сектора НМОКТС Лаборатории физики высоких энергий
имени В.И. Векслера и А.М. Балдина ММО ОИЯИ

Рабочий e-mail, рабочий телефон: 6-51-87 , zamiatin@sunse.jinr.ru

Специальность, по которой защищена диссертация: 01.04.23 - Физика высоких энергий

Адрес места работы: 141980 Моск. обл., Дубна, ул. Жолио-Кюри 6, ЛФВЭ ОИЯИ