

На правах рукописи

Тант Зин

**Нейтронный детектор космического гамма-телескопа
«ГАММА-400»**

01.04.01 – "Приборы и методы экспериментальной физики"

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Автор:



Москва – 2013 г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Проблема темной материи (скрытой массы) и ее детектирование во Вселенной является одной из важнейших астрофизических проблем XXI века. Использование гамма-астрономических методов для регистрации процессов аннигиляции и распада гипотетических частиц темной материи (слабовзаимодействующие частицы, вимп-частицы) – один из основных экспериментальных методов получения прямого ответа на существование частиц темной материи и их характеристик. Гамма-излучение практически полностью поглощается в верхних слоях атмосферы Земли, поэтому гамма-астрономические наблюдения сегодня осуществляют за пределами атмосферы на ИСЗ, орбитальных станциях или космических аппаратах, направляющихся к другим планетам и за пределы солнечной системы. Научный комплекс «ГАММА-400» предназначен для получения данных для определения природы «темной материи» во Вселенной, а также развития теории происхождения высокоэнергичных космических лучей и физики элементарных частиц, методами гамма-астрономии, поиска и исследования гамма-всплесков.

Сигнал от аннигиляции или распада частиц темной материи можно ожидать в области энергии гамма-квантов 100 ГэВ и несколько выше. Информацию о процессах самоаннигиляции и распада частиц темной материи, кроме гамма-квантов, могут нести электроны и позитроны. В космосе поток протонов в 1000 раз больше потока электронов при энергиях больше 100 ГэВ и поэтому необходимо обеспечить выделение электронов на фоне протонов. Как электроны, так и протоны создают каскад в веществе гамма-телескопа, в основном, в калориметре. Но каскады отличаются по форме и составу частиц.

В научном комплексе «ГАММА-400» выделение электронов на фоне протонов планируется проводить по анализу поперечного развития

каскада в калориметрах и стриповых детекторах, анализу продольного развития каскада во всех детекторах, а также, по количеству нейтронов, в основном возникающих при взаимодействии протонов в калориметре, с помощью детектора нейтронов. Нейтронный детектор гамма-телескопа «ГАММА-400» предназначен для разделения электромагнитных и адронных каскадов путём определения количества нейтронов, возникающих в веществе калориметра при прохождении частицы высокой энергии.

В настоящее время детекторов, позволяющих решить данную проблему, не существует из-за особенностей спектра нейтронов, их временного и пространственного распределения, а также ограничений на размеры детектора. Поэтому работа по разработке нейтронного детектора космического гамма-телескопа «ГАММА-400» и математическому моделированию его характеристик является актуальной научной задачей по созданию новых приборов для исследований в области экспериментальной ядерной физики.

Цель работы. Разработка физической модели детектора нейтронов в составе комплекса «ГАММА-400», предназначенного для разделения электромагнитных и адронных каскадов путём определения количества нейтронов, возникающих при прохождении частиц высокой энергии для обеспечения режекции протонов, обоснование состава детектора и его характеристик. Для этой цели необходимо решить следующие задачи:

- Провести анализ состава и временных характеристик падающего на детектор излучения.
- Разработать варианты построения нейтронного детектора.
- На основе математического моделирования провести сравнение характеристик различных вариантов построения нейтронного детектора.

- Выбрать оптимальный вариант построения нейтронного детектора, обеспечивающий возможность режекции адронных каскадов.
- На основе математического моделирования получить пространственно-временное распределение нейтронов в каскадах различной природы, регистрируемых выбранной моделью нейтронного детектора.
- Создать действующие образцы модели нейтронного детектора и провести экспериментальные исследования их характеристик.

Научная новизна работы.

Разработанный нейтронный детектор, состоящий из чередующихся слоев замедлителя и быстродействующих борсодержащих сцинтилляторов с использованием оптоволоконного сбора света, позволяет проводить идентификацию электромагнитных и адронных каскадов по количеству и пространственно-временному распределению нейтронов с минимальным мертвым временем и коэффициентом режекции адронных каскадов от 50 до 10 в зависимости от энергии, регистрируемых протонов, электронов и фотонов в диапазоне энергий 25 - 1000 ГэВ.

Практическая значимость работы

Выбранная модель нейтронного детектора, благодаря малой длительности сигналов (15-20 нс), позволяет значительно уменьшить просчёт нейтронов в адронных каскадах высокой энергии $>100\text{ГэВ}$ и других импульсных нейтронных потоках высокой интенсивности (>750 нейтр./см²*с). Разработанная конструкция нейтронного детектора не содержит дефицитных материалов, таких как He-3 и может быть применена при создании мониторов импульсных потоков нейтронов. Разработанный детектор нейтронов, благодаря оптоволоконному сбору света сцинтилля-

ций, может быть изготовлен любых размеров и применен при создании мониторов для контроля перемещений ядерных материалов.

Автор выносит на защиту

1. Результаты математического моделирования отклика различных вариантов нейтронного детектора для гамма- телескопа «ГАММА-400».
2. Выбор варианта построения детектора для создания действующего образца нейтронного детектора.
3. Результаты математического моделирования пространственно-временного распределения регистрируемых нейтронов в каскадах различной природы.
4. Доказательство возможности разделения электромагнитных и адронных каскадов по количеству и пространственно-временному распределению нейтронов, регистрируемых составными частями нейтронного детектора, с коэффициентом режекции от 50 до 10 в зависимости от энергии попадающих в телескоп протонов в диапазоне энергий от 25 до 1000 ГэВ.
5. Результаты экспериментального исследования характеристик действующих образцов нейтронного детектора и их сравнения с результатов математического моделирования.

Апробация результатов работы.

Основные результаты диссертационной работы были доложены на научных сессиях НИЯУ МИФИ 2008, 2011, 2012, 2013; Конференциях Ломоносов-2008, 2011; 8-ой, 9-ой и 10-ой Курчатовской молодёжной научной школах (2010, 2011, 2012гг.); 23rd European Cosmic Ray Symposium (and 32nd Russian Cosmic Ray Conference) Moscow, Russia, 2012.

Личное участие автора

- Разработка алгоритмических моделей конструкций нейтронного детектора.
- Проведение моделирование отклика различных вариантов детектора и анализ полученных результатов.
- Выбор перспективной конструкции для создания действующего образца нейтронного детектора.
- Обработка результатов экспериментальных исследований и сравнение их с результатами расчетного моделирования.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения. Работа содержит 121 страниц основного текста, 87 рисунков и 10 таблиц и список литературы из 86 наименований.

Публикация

По теме диссертационной работы опубликованы 15 работ, в том числе 4 работы опубликованы в периодических научных изданиях, включённых ВАК РФ в перечень ведущих рецензируемых научных журналов, рекомендованных для опубликования основных научных результатов диссертации на соискание ученой степени кандидата наук. Перечень этих работ приведен в конце автореферата.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цели работы, указана научная новизна, практическая значимость и апробация полученных результатов, изложены основание положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведен литературный обзор по использованию калориметров в физике высокой энергии, применению информации о количестве возникающих в каскадах нейтронов для идентификации час-

тиц в калориметрии. Калориметры играют важнейшую роль в современных экспериментах на ускорителях высокоэнергичных частиц и космических экспериментах. Попадая в калориметр, заряженная частица теряет свою энергию, создавая многочисленные вторичные частицы. Адроны (протоны) теряют энергию за счёт множественного рождения вторичных частиц (пионов, каонов). Электрон (лептон) теряет энергию за счет радиационных процессов (тормозного излучения, генерации пар). Вторичные частицы также теряют свою энергию на пути в среде и могут создать третичные и т.д. частицы. Этот процесс, называется каскадом и, в конечном счете, приводит к почти полной потере энергии начальной частицы. В каскаде рождаются различные частицы: пионы, каоны, протоны, нейтроны, электроны, позитроны, гамма-кванты и т.д. Дискриминация адронных и лептонных (электромагнитных) каскадов является одним из важнейших аспектов обработки экспериментальных результатов при калориметрии, как в астрофизике, так и в экспериментах на ускорителях. Разделение подобных событий представляет собой сложную проблему, так как каскады, вызванные адронами и электронами довольно сходны. Число нейтронов, возникающих в адронных каскадах, значительно больше числа нейтронов, образующихся в лептонных каскадах. С помощью нейтронных детекторов отличают лептонный каскад от адронного по количеству образующихся в каскаде нейтронов. Обычно их помещают после обычного калориметра. Впервые нейтронный детектор в качестве дополнения калориметра с целью идентификации частиц был применен в Российско-итальянском проекте «РИМ-ПАМЕЛА». Идентификация частиц в калориметрах осуществляется совместным анализом информации от калориметра и нейтронного детектора.

Однако, быстродействие газовых нейтронных счетчиков, выпускаемых в настоящее время, недостаточно для исключения наложения импульсов, создаваемых разными нейтронами в одном каскаде, и приводит к просчету числа событий, что подтверждается опытом их эксплуатации в составе научного космического комплекса ПАМЕЛА. Для успешного применения нейтронного детектора в составе гамма-телескопа ГАММА-400 необходимы исследования по созданию нейтронного детектора нового поколения конструктивно связанного с гамма-телескопом.

Во второй главе приводятся результаты моделирования откликов вариантов конструкции нейтронного детектора (НД) гамма-телескопа ГАММА-400. Расчеты проводили в пакете программ GEANT4. В качестве расчетной модели использовали несколько вариантов построения НД, основанных на различных типах регистраторов медленных нейтронов. НД находится в самом нижнем уровне телескопа. Он используется для регистрации нейтронов утечки, образовавшихся в калориметрах, которые находятся на более высоких уровнях гамма телескопа при прохождении электромагнитного излучения или лептонов или адронов. Количество зарегистрированных нейтронов учитывается для выделения гамма-квантов и лептонов на фоне протонов космических лучей. Число нейтронов в каскадах зависит от энергии и типа частицы и, в соответствии с предварительными оценками, составляет ~ 400 для протона с энергией 100 ГэВ. Каскады, инициированные в калориметре адронами и электронами, развиваются за времена порядка 10^{-9} с. Поэтому основными характеристиками, учитываемыми при сравнении вариантов построения НД, являлись быстродействие и эффективность регистрации.

В расчётных моделях НД учитывали наличие полистирольного детектора утечки С4 в составе гамма-телескопа. В большинстве расчётов на

детектор С4 падал плоскопараллельный поток нейтронов со спектром, приведенным на рис. 1, полученным в предварительных расчётах каскада, инициированного протоном с энергией 100 ГэВ с помощью GEANT 3.21.

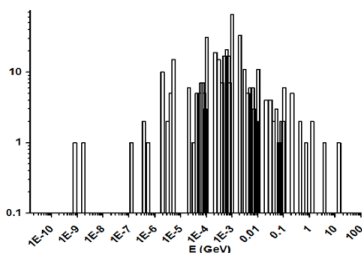


Рис. 1. Спектр падающих нейтронов

Полная статистика упавших на детектор нейтронов составляла от 10^5 до 10^6 . Все конструкции НД имели поперечный размер 80×80 см². Для выделения событий регистрации нейтронов на фоне заряженных частиц и гамма-квантов каскада во всех вариантах конструкций НД регистрация

нейтронов основана на процессе их замедления, и введен временный порог начала регистрации, равный, как правило, 1 мкс после попадания быстрого нейтрона в С4.

В первом варианте конструкции НД применены гелиевые счётчики в качестве детектора нейтронов и полиэтиленовая пластина толщиной 5 см - в качестве замедлителя. Газоразрядные счётчики встроены в пластину параллельно продольной оси и находятся в центре пластины. Использовано два типа гелиевых счётчиков: с активной длиной 323 мм и диаметром 18,5 мм; и длиной 320 мм и диаметром 32 мм.

Таблица 1. Значения эффективности регистрации нейтронов

Размеры гелиевого счётчика	ø18,5×323 мм	ø32×320 мм
без учёта разрешающего времени и совпадения событий в одной трубке	16%	9%
с учётом разрешающего времени и совпадения событий в одной трубке	10%	5%

Количество счётчиков с диаметром 18,5 мм составляло 84 штуки, а с диаметром 32 мм – 48 штук. В гелиевых счётчиках происходит реакция $n + {}^3\text{He} \rightarrow {}^3\text{H} + {}^1\text{H} + 0,764 \text{ МэВ}$. При проведении расчетов также учитывали, что длительность сигналов в гелиевых счетчиках составляет 20-30 мкс. В данном случае необходимо учитывать возможность совпадений событий в одном счётчике в течение разрешающего времени счетчика. В табл. 1 приведены полученные эффективности регистрации нейтронов НД с трубками разного диаметра без учёта и с учётом совпадения событий в одном счетчике.

Уменьшить вероятность просчетов можно, если в качестве детектора, применить органический сцинтиллятор или полупроводниковый детектор небольших размеров. Вторая конструкция расчетной модели НД состоит из чередующихся слоев сцинтиллятора на основе полистирола толщиной 0,5 см и листов кадмия толщиной 200 мкм. Толщина детектора варьировалась от 5 до 15 см. В качестве замедлителя нейтронов в данной конструкции выступает полистирол. Регистрация нейтронов осуществлялась слоями сцинтиллятора по гамма-излучению реакции захвата нейтронов кадмием. При проведении расчетов считали, что детектор регистрирует нейтрон в случае потери энергии в полистироле электроном, возникшем в результате взаимодействия захватного гамма-кванта с веществом детектора, более заданного порога (2,5 МэВ) регистрации, обусловленного необходимостью дискриминации фонового гамма-излучения. Гамма-излучение регистрируется всем НД как целым вне зависимости от того, в каком слое кадмия возник гамма-квант. Время высвечивания полистирола составляет 5 нс и длительность сигнала, с учетом применения светосмещающих волокон для сбора и вывода световых фотонов на светоприемник, может быть сделана не более 10-50 нс. На рис. 2 приведен

временной профиль возникающих электронов с порогом регистрации 2,5 МэВ. Шаг временной дискриминации равен 10 нс. Из графика видно, что для диапазона времен, где наблюдается наибольшая интенсивность событий, число электронов составляет 700 при числе нейтронов, падающих на детектор 10^6 . Следовательно, вероятность попадания во временной канал более одного события составляет $\sim 10^{-3}$.

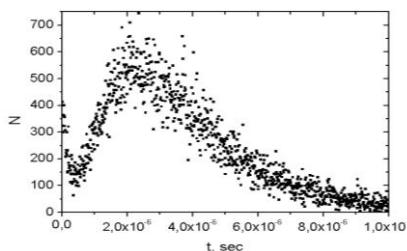


Рис. 2. Временной профиль зарегистрированных электронов, $E_e > 2,5$ МэВ

Эффективность регистрации нейтронов рассмотренной конструкции НД находится в зависимости от количества слоев Cd в пределах от 1 % до 2 % с относительной погрешностью $\pm 0,1$ % при толщине НД 5 см. Низкая эффективность регистрации нейтронов такой моделью объясняется тем, что гамма-кванты, возникающие в кадмии за счёт (n,γ) реакции, обладают широким энергетическим спектром от 0,01 до 9 МэВ, а для регистрации нейтронов используется только гамма-излучение с энергией больше 2,5 МэВ, и сцинтилляционный детектор, выполненный из материала с малым атомным номером, имеет недостаточную толщину для эффективного взаимодействия с возникающим гамма-излучением. Вследствие этого большинство гамма-квантов покидают объём НД без взаимодействия или создают сигнал ниже порогового.

Увеличив общую толщину детектора, а, следовательно, количество регистрирующих слоев и массу детектора, можно увеличить эффективность регистрации нейтронов данной конструкцией НД. При увеличении толщины детектора до 15 см значение эффективности регистрации нейтронов детектором увеличивается до 27 % и более (рис.3).

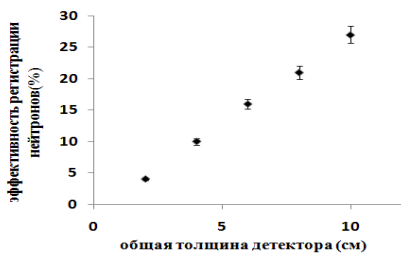


Рис. 3. Зависимость эффективности регистрации от толщины детектора

что нейтрон зарегистрирован, если в чувствительном слое детектора появляется либо альфа-частица либо ядро лития, с энергией, обеспечивающей энерговыделение в кремнии выше заданного порога (0,8 МэВ).

Конструкция НД в данном исполнении должна иметь сегментированную конструкцию. Сегментация кремниевого детектора позволяет получать пространственную характеристику образования каскада нейтронов, а также избежать наложения сигналов в одном сегменте с учетом ожидаемой длительности сигнала 5-10 мкс. В качестве детекторов планируется применять кремниевые ионно-имплантированные спектрометрические детекторы с чувствительной площадью $30,6 \times 30,6 \text{ мм}^2$ и с габаритными размерами $31,65 \times 31,65 \text{ мм}^2$. При расчетах эффективности регистрации нейтронов сегментацию не учитывали.

В первую очередь проводили расчёты для определения оптимальной толщины слоёв кремния и бора, с учетом которых выбирали толщину бора либо 2,5 мкм, либо 1,5 мкм и 5,5 мкм для кремния, чтобы энергия альфа-частицы полностью поглощалась в слое кремния. Применен бор, обогащённый ^{10}B до 80 %. Рассматривали модели НД, показанные на рис. 4 и 5.

Третий вариант конструкции НД основан на применении кремниевых детекторов и борного конвертора. Преобразование нейтронов в заряженные частицы в конвертере происходит на основе реакции (n, α) . В реакции образуются альфа-частицы и ядра лития. Считается,

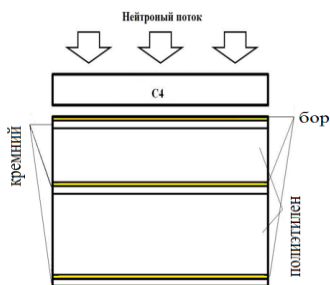


Рис. 4. Схема детектора с горизонтальным расположением слоёв (бор+кремний)

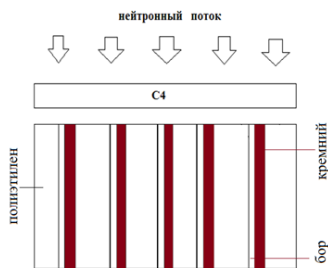


Рис. 5. Схема детектора с вертикальным расположением слоёв (бор+кремний)

Общая толщина обеих моделей НД составляла 5 см. В модели НД (рис. 5) слои бор + кремний размещены горизонтально сверху, в центре и снизу полиэтиленового замедлителя. В модели НД (рис.6) слои бор + кремний вертикально вложены в полиэтиленовую пластину через каждые 2 см. Полученные значения эффективности регистрации нейтронов с различными толщинами борных конверторов приведены в табл. 2. Толщина кремниевых регистраторов фиксирована при значении 5,5 мкм. Были предприняты попытки увеличения эффективности регистрации за счет увеличения суммарной площади кремния. Однако полученные результаты показали, что добавление слоёв (бор + кремний) не обеспечивает значительного увеличения эффективности регистрации нейтронов.

Таблица.2. Значения эффективности регистрации нейтронов

Модель	Толщина бора (мкм)	Эффективность (%)
См. рис. 4.	1,5	$4,1 \pm 0,1$
	2,5	$3,8 \pm 0,1$
См. рис. 5.	1,5	$4,58 \pm 0,01$
	2,5	$4,56 \pm 0,01$

Были проведены расчеты по оптимизации расположения крем-

ниевых детекторов в полиэтиленовом замедлителе. Для двух слоев наилучшая эффективность 2,4 % достигается при расположении первого слоя на расстоянии 1 см в полиэтилене, а второго - 2,5-3 см.

В четвёртом варианте конструкции НД полупроводниковые детекторы заменены органическим сцинтиллятором толщиной 0,5 см. В качестве конвертора потока нейтронов в заряженные частицы применяли бор как в качестве внешнего покрытия толщиной 2 мкм, так и введением 4 % бора внутрь сцинтиллятора. Схемы расчетных моделей конструкций НД приведены на рис. 6 и 7.

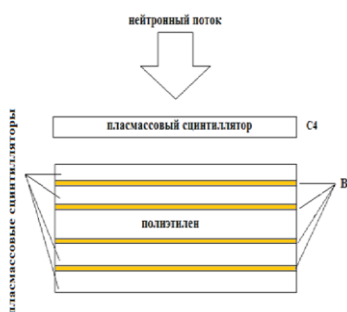


Рис. 6. НД со сцинтилляторами с борным покрытием

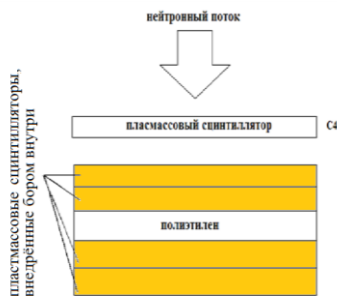


Рис. 7. НД с борсодержащими пластмассовыми сцинтилляторами

Толщина полиэтиленового замедлителя – 3 см. Суммарная толщина детектора составляет приблизительно 5 см. Нейтроны, попадая в объём детектора, замедляются либо в сцинтилляторах на основе полистирола, либо в полиэтилене. Замедленные нейтроны взаимодействуют с бором за счёт (n, α) реакции, и рожденные в реакции альфа-частицы и ядра лития разлетаются в противоположные стороны и регистрируются сцинтиллятором.

Получены значения эффективности регистрации нейтронов 3 ± 1 % для модели детектора с покрытием из бора, обогащенного до 90% изо-

топом ^{10}B , и 12 ± 1 % для модели детектора на основе пластмассового сцинтиллятора с распределенным в его объеме природным бором.

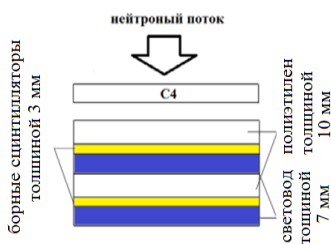


Рис. 8. НД с применением полиэтилена (1 см), борного сцинтиллятора (3 мм) и пластмассового световода (7 мм)



Рис. 9. Схема выбранной конструкции НД

Увеличение эффективности регистрации нейтронов получено при помещении пластмассовых сцинтилляторов с введенным бором после полиэтиленового замедлителя толщиной 1 см (рис. 8). При применении природного бора с концентрацией 4 % в сцинтилляторе, эффективность регистрации нейтронов достигает 15 % при толщине детектора 6 см, содержащем 3 чередующихся слоя: полиэтилен, 1 см + сцинтиллятор, полистирол с бором, 3 мм + световод, полистирол без сцинтиллирующих добавок, 7 мм.

Для дальнейших исследований выбрана модель НД, приведенная на рис. 9. Для выбранного варианта эффективность регистрации нейтронов составляет 16 % (24% для бора, обогащенного ^{10}B до 80%). Модель включает в себя антисовпадательную защиту от фоновых заряженных частиц из нижней полусферы (слой сцинтиллятора без бора).

Также рассмотрена модель НД, в которой регистраторы нейтронов из светосостава $^6\text{LiF}+\text{ZnS}$ чередуются с полиэтиленовыми замедлителями. В состав одного слоя детектора включены: полиэтиленовый замедлитель толщиной 1 см, два слоя $\text{LiF}+\text{ZnS}$ толщиной либо 2 мм, либо 0,5

мм, слой из полистирола толщиной 4 мм или 1 мм. Толщина одного слоя детектора сохранялась равной 1,5 см. Литий обогащен изотопом литий-6 до 90%. Расчёты сделаны с разным количеством слоёв детектора, Эффективность регистрации при толщине детектора 6 см составила 10%.

В третьей главе приведены результаты экспериментального исследования характеристик макета нейтронного детектора и сравнения полученных результатов с расчетными для детектора с размерами и составом экспериментального макета. В качестве источника нейтронного излучения при проведении экспериментальных исследований служил импульсный нейтронный генератор марки ИНГ-101 с энергией 2,2 МэВ (дейтериевая мишень). Для детектирования потока нейтронов была создана физическая модель НД, состоящего из чередующихся слоев сцинтиллятора на основе полистирола толщиной 0,5 см (8 слоёв) и листов кадмия толщиной 200 мкм (7 слоёв). Размеры детектора – 24x20x4 см³.

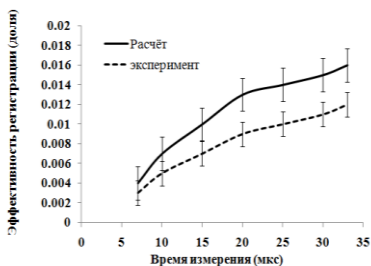


Рис. 10. Эффективность регистрации лабораторного макета

Результаты сравнения расчётных и экспериментальных результатов приведены на рис. 10. Длительность сбора событий составляла 32 мкс. Эффективность регистрации нейтронов макетом в эксперименте составила приблизительно $1,2 \pm 0,3\%$ (за 32 мкс). На основе полученных данных в

расчёте получается немного завышенное ($1,7 \pm 0,3\%$) значение эффективности регистрации, чем в эксперименте. Ход зависимостей совпадает. В расчетных исследованиях не учитывалась длительность импульса генератора и распределение количества нейтронов в нем. Количество нейтро-

нов в импульсе определялось по показаниям монитора, поэтому возможно наличие неисключенной систематической погрешности.

В четвёртой главе рассмотрены результаты расчетного исследования пространственно-временного отклика выбранной по результатам предыдущих исследований модели НД (см. рис. 9) в составе комплекса GAMMA-400.

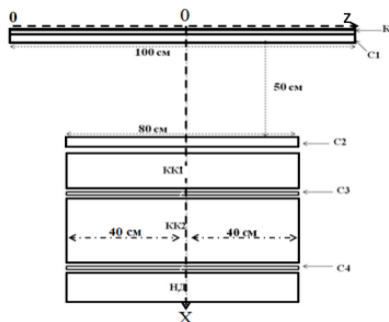


Рис.11. Упрощённая схема гамма-телескопа

Поток нейтронов, рождающихся в электромагнитных и адронных ливнях в калориметре гамма-телескопа рассчитывали с использованием упрощённой схемы гамма-телескопа (рис. 11). Она состоит из вольфрамового конвертера (К) толщиной 0,351 см, калориметра

(КК1), состоящего из сцинтиллятора CsI(Tl) толщиной 5,62 см, калориметра (КК2) из кристаллов BGO толщиной 24,6 см, времяпролетной системы (ВПС) из сцинтилляционных детекторов C1 ($100 \times 100 \times 2 \text{ см}^3$) и C2 ($80 \times 80 \times 2 \text{ см}^3$), разнесённых на 50 см, сцинтилляционных детекторов C3 и C4 толщиной 1 см, и нейтронного детектора (НД) толщиной 6 см.

Моделировали энергетические распределения нейтронов, рождающихся в калориметрах КК1 и КК2 и падающих в НД, и пространственные и временные распределения альфа-частиц, возникающих в НД за счёт (n, α) реакции в борсодержащем сцинтилляторе. В большинстве расчётов первоначальные заряженные частицы (протоны, электроны) падают вдоль оси OX телескопа. Энергии протонов выбирали с коэффициентом 2,5 относительно энергий электронов, чтобы их средние энерговыделения в

калориметрах были приблизительно одинаковы. Проведены расчёты для событий взаимодействия электронов с энергией $E_e = 400$ ГэВ, и протонов с энергией $E_p = 1000$ ГэВ.

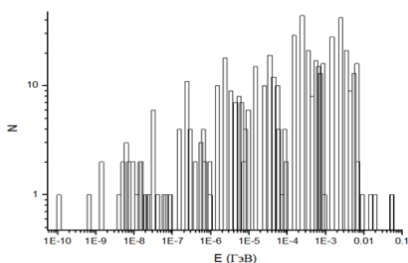


Рис. 12. Энергетическое распределение нейтронов для электрона с $E = 400$ ГэВ

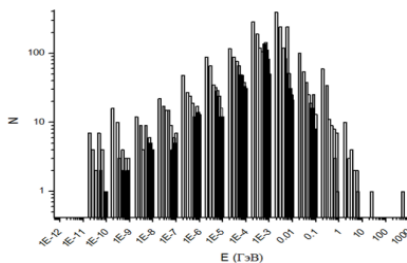


Рис. 13. Энергетическое распределение нейтронов для протона с $E = 1000$ ГэВ

В первую очередь рассматривали энергетические распределения нейтронов, падающих на НД (рис. 12 и 13). Согласно приведенным распределениям, 70 % нейтронов имеет энергию менее 1 МэВ тогда, когда первоначальной частицей был протон и 60 % нейтронов имеет энергию менее 1 МэВ, если падает электрон. Энергии рождающихся нейтронов достигают 10^5 МэВ для протонного ливня и не превышают 10 МэВ для электронного, но выбранный вариант НД из-за небольшой толщины водородосодержащего материала регистрирует в основном нейтроны с энергией меньше 1 МэВ.

На рис. 14 и 15 представлены временные распределения α -частиц, возникающих за счёт (n,α) реакции, протонов и электронов в сцинтилляторах НД. Реакция (n,α) в боре-10 является главным процессом для регистрации нейтронов в данной модели детектора. Протоны, возникающие в НД, представляют собой вторичные протоны лавины и протоны отдачи, проявляющиеся в результате замедления нейтронов. Электроны могут быть как вторичными, рождающимися в КК2 в процессе развития

лавины, так и за счёт взаимодействия гамма-квантов, возникающих при снятии возбуждения и радиоактивного распада ядер КК2 и НД.

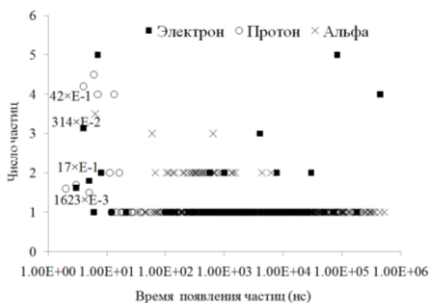


Рис. 14. Время появления заряженных частиц в сцинтиляторах НД для протонного каскада с энергией 1 ТэВ

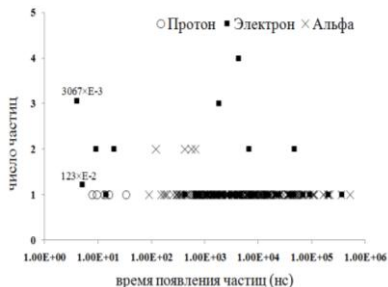


Рис. 15. Время появления заряженных частиц в сцинтиляторах НД для электронного каскада с энергией 400 ГэВ

В приведенных временных распределениях учтены пороги энерговыделения для каждого типа частиц. Значение порога для протонов и альфа-частиц – 1 МэВ, значение порога для электронов составляет 100 кэВ. В соответствии с графиками рис.14 и 15 протоны и электроны попадают в НД и начинают взаимодействовать с ним спустя 2-3 нс после попадания первоначальной частицы в телескоп. Взаимодействие с протонами продолжается до ~ 40 нс. Электроны и альфа-частицы продолжают проявляться до 600-700 мкс. Для уменьшения вклада фоновых событий, предлагается выбрать старт счёта нейтронных событий не меньше 40 нс после появления сигнала С1 и стоп не более 600-700 мкс.

Рассмотрены пространственные распределения альфа-частиц в слоях борных сцинтилляторов НД при падении протона с энергией 1000 ГэВ и электрона с энергией 400 ГэВ. Эти распределения представлены в рис. 16 и 17. Слои НД, содержащие сцинтилляторы состоят из полос сцинтилляторов с независимым сбором света, шириной 10 см. Ориента-

ция соседних слоев различна. Таким образом, НД позволяет наблюдать пространственное распределение плотности точек регистрации нейтронов с дискретностью $10 \times 10 \text{ см}^2$.

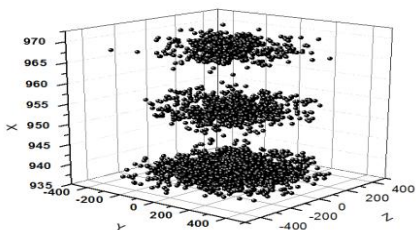


Рис. 16. Распределения альфа-частиц в слоях борного сцинтиллятора НД при падении протона с энергией 1000 ГэВ

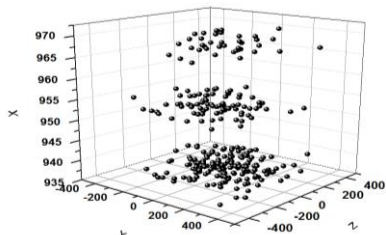


Рис. 17. Распределения альфа-частиц в слоях борного сцинтиллятора НД при падении электрона с энергией 400 ГэВ

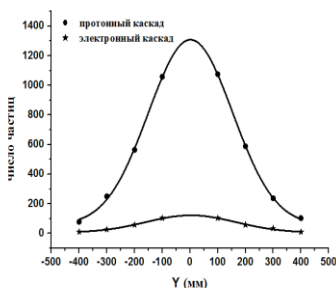


Рис. 18. Распределения количества зарегистрированных нейтронов по полосам сцинтилляторов по оси Y

кое, чем «электронное», но указанное отличие не настолько велико, чтобы его можно было использовать для идентификации каскадов в отличие от их количества. В табл. 3 показаны соотношения чисел зарегистрированных нейтронов в протонном и электронном каскадах для различных энергий первичных частиц.

На рис. 18 приведены распределения количества зарегистрированных нейтронов по оси Y. Параметры их аппроксимации нормальным распределением составляют: для протонного каскада $\bar{y} = 1,8$, $\sigma_p = 151,9 \pm 3,1$, высота = 1252,5, для электронного - $\bar{y} = 3,0$, $\sigma_e = 162,8 \pm 11,2$, высота = 116,9. Из параметров следует, что «протонное» пространственное распределение более узкое, чем «электронное», но указанное отличие не настолько велико, чтобы его можно было использовать для идентификации каскадов в отличие от их количества.

Таблица 3. Количество зарегистрированных нейтронов в НД для протонных и электронных каскадов с различной энергией.

Энергия протонов(ГэВ) / Энергия электронов (ГэВ)	25/10	250/100	1000/400
Количество зарегистрированных нейтронов для протонного каскада /электронного каскада. (Для одного события)	291/6	918/62	3953/272

Кроме случаев попадания частиц в гамма-телескоп сверху, рассмотрено развитие каскадов и регистрация нейтронов НД при попадании частиц в калориметры телескопа сбоку.

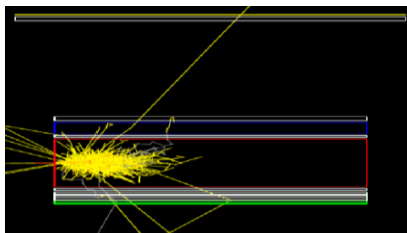


Рис. 19(а). Схема электромагнитного каскада для случая попадания электрона в калориметр КК2 с боку

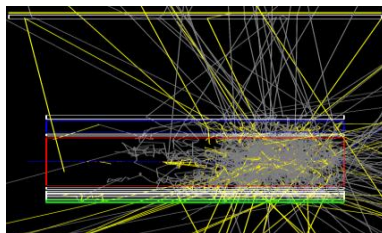


Рис. 19(б). Схема адронного каскада для случая попадания протона в калориметр КК2 с боку

На рис. 19 показаны схемы развития электромагнитного и адронного каскадов в случае, когда электрон с энергией 400 ГэВ, либо протон с энергией 1 ТэВ падает на калориметр КК2 с боку. В указанном здесь случае число зарегистрированных нейтронов в протонном каскаде примерно в 30 раз превышает число зарегистрированных нейтронов в электронном каскаде. Проведено исследование эффективности регистрации нейтронов НД в зависимости от начала времени учета событий в различных каскадах (рис. 20).

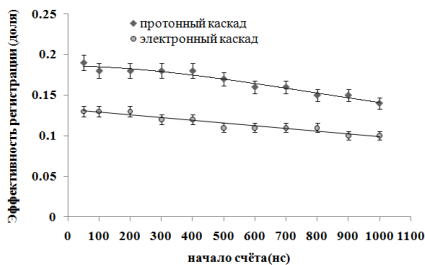


Рис. 20. Зависимость эффективности регистрации НД от времени начала счёта в протонном каскаде с энергией 1 ТэВ и в электронном каскаде с энергией 400 ГэВ

Это объясняется тем, что в каскаде, инициированном электроном, количество рождающихся нейтронов, имеющих энергию меньше 1 МэВ (60 %) меньше количества нейтронов с энергией меньше 1 МэВ в протонном каскаде (70%). Указанная особенность увеличивает различие в количестве зарегистрированных нейтронов в каскадах различной природы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Изучены способы разделения электромагнитных и адронных каскадов в калориметрии, роль нейтронов при разделении каскадов, существующие системы детектирования нейтронов в калориметрии и применение математического моделирования при создании детекторов излучения.

2. Разработаны алгоритмические модели нейтронного детектора на основе многослойных конструкций замедлителей нейтронов и регистраторов медленных и тепловых нейтронов, таких как: гелиевые счетчики; кадмиевые конверторы в сочетании с пластическими сцинтилляторами; полупроводниковые кремниевые детекторы и пластические сцинтилляторы с борными покрытиями; пластические борсодержащие сцинтилляторы; органические светопроводы с нанесенным светосоставом на основе смеси ${}^6\text{LiF}+\text{ZnS}(\text{Ag})$.

3. Расчетным путем для модельного спектра нейтронов было показано, что эффективность регистрации нейтронов различных детекторов составляет:

- для гелиевых счётчиков в качестве регистратора медленных нейтронов и замедлителя из полиэтилена - 10% для счетчиков $\varnothing 32$ мм и 16% для счетчиков $\varnothing 18,5$ мм без учета мертвого времени. С учетом мертвого времени - 5% и 9%, соответственно;
- для детектора, состоящего из чередующихся слоев сцинтиллятора на основе полистирола и листов кадмия, - не более 2 %. Такая низкая эффективность регистрации нейтронов при достаточном быстродействии (~ 10 нс) такой моделью объясняется тем, что сцинтилляционный детектор, выполненный из материала с малым атомным номером, имеет недостаточную толщину для эффективного взаимодействия с гамма-излучением (n, γ) реакции в кадмии;
- для различных модификаций детектора на основе кремниевых детекторов и борного конвертора при применении бора, обогащенного до 80% изотопом B-10, - не более 4%;
- при применении борного конвертора, нанесенного на пластмассовый сцинтиллятор, - 4%;
- для детектора на основе многослойной комбинации замедлителя нейтронов и светосостава ${}^6\text{LiF} + \text{ZnS}(\text{Ag})$ - 10%. С учетом малой длительности сигналов (40 нс) и высокого световыхода (160000 фотонов/событие) модель перспективна для дальнейших исследований;
- при использовании борсодержащего пластмассового сцинтиллятора для бора природного состава - не менее 15% и не менее 24% для обогащенного бора.

4. Выбран оптимальный вариант построения нейтронного детектора по наибольшей эффективности регистрации нейтронов адронного каскада ($>15\%$) и достаточному быстродействию (~ 50 нс) на основе замедлителя, быстродействующих борсодержащих сцинтилляторов и оптоволо-

конного сбора света, обеспечивающий необходимый коэффициент режекции адронных каскадов.

5. Исследовано пространственное и временное распределение нейтронов, регистрируемых выбранной моделью детектора для гамма-спектрометра «ГАММА-400». Получены параметры разделения адронных и электромагнитных каскадов по количеству и временному распределению зарегистрированных нейтронов. Коэффициент режекции p/e событий меняется от 10 до 50 в зависимости энергии каскада.

6. Изготовлено два варианта исполнения действующих образцов детектора нейтронов: на основе многослойного пластмассового сцинтиллятора с кадмиевыми конверторами и борсодержащего пластмассового сцинтиллятора с полиэтиленовым замедлителем и оптоволоконным сбором света на SiФЭУ. Результаты экспериментальных исследований показали хорошее согласие (с систематическим расхождением $\sim 1\%$) эффективностей регистрации нейтронов и совпадение хода зависимости эффективности регистрации от времени сбора событий для этих образцов.

Основные положения диссертационной работы изложены **в четырёх печатных работах** в периодических научных изданиях, **включённых ВАК РФ в перечень ведущих рецензируемых научных журналов**, рекомендованных для опубликования основных научных результатов диссертации на соискание ученой степени кандидата наук:

1) Кадилин В.В, Деденко Г.Л, Тант Зин, Самосадный В. Т, Бритвич Г. И, Гавриков И.В, Исаков С.В, Оценка эффективности нейтронного детектора для измерения характеристик импульсных потоков нейтронов. // Ядерные измерительно-информационные технологии, (2012), т. 2(42), с. 4-8. (ISSN 1729-2689)

- 2) Кадилин В.В, Деденко Г.Л, Тант Зин. Расчетное моделирование эффективности регистрации нейтронного детектора гамма телескопа «ГАММА-400». // Ядерная физика и инжиниринг (математическое моделирование в ядерных технологиях), 2013, том 4, № 1, с. 83–90. (ISSN 2079-5629)
- 3) Кадилин В.В, Деденко Г.Л, Тант Зин. Расчетное исследование пространственно-временного отклика нейтронного детектора в составе комплекса «ГАММА-400». // Естественные и технические науки , 2012, № 6(62), с.37-40. (ISSN 1684-2626).
- 4) Dedenko G., Thant Zin, Kadilin V., Gavrikov I., Thyryn E., Isakov S. Comparison of calculation results of efficiency of neutron detection for model with silicon semiconductor detector and model with plastic scintillator for Gamma telescope Gamma-400. // Journal of Physics: Conference Series (JPCS), V. 409, 012125, 2013, 23rd European Cosmic Ray Symposium (and 32nd Russian Cosmic Ray Conference) Moscow, Russia, 2012. (ISSN 1742-6596).

Основные положения диссертационной работы изложены также в следующих сборниках материалов Российских и международных научных конференций, молодёжных научных школ:

- 1) Кадилин В.В, Бритвич Г.И., Гавриков И.В., Зебзеева И.В., Тант Зин. Экспериментальное исследование эффективности регистрации нейтронов нейтронного детектора для гамма-телескопа «ГАММА-400». // 8-ая Курчатовская молодёжная научная школа, Сб. аннотации, секция «Фундаментальные исследования», 2010, С.174.
- 2) Кадилин В.В, Гавриков И.В., Тант Зин. Расчёт и выбор модели нейтронного детектора для гамма-телескопа « ГАММА-400 ». // 8-ая Курчатовская молодёжная научная школа. Сб. докладов, Секция «Фундаментальные исследования», 2011, С.422-426.

- 3) Кадилин В.В., Самосадный В.Т., Бритвич Г.И., Деденко Г.Л., Зебзеева И.В., Гавриков И.В., Тант Зин. Нейтронный детектор для измерения характеристик импульсных потоков нейтронов. // Научная сессия НИЯУ МИФИ – 2011, Аннотация докладов, Том 1, С.195.
- 4) Кадилин В.В., Деденко Г.Л., Тант Зин, Гавриков И.В. Математическая модель нейтронного детектора гамма телескопа «ГАММА 400». // Научная сессия НИЯУ МИФИ – 2011, Аннотация докладов, Том 2, С.106.
- 5) Кадилин В.В., Бритвич Г.И., Зебзеева И.В., Гавриков И.В., Тант Зин. Экспериментальные исследования характеристик макета нейтронного детектора для гамма-телескопа «ГАММА-400». // Научная сессия НИЯУ МИФИ – 2011, Аннотация докладов, Том 2, С.106.
- 6) Тант Зин. Сравнение расчетных результатов эффективности нейтронного детектора научного комплекса «ГАММА-400». // Конференция «Ломоносов-2011», сб. тезисов, Секция «Физика», Подсекция «Астрофизика», С.8.
- 7) В.В. Кадилин, Г.Л. Деденко, Тант Зин. Расчёт эффективности регистрации нейтронов сцинтилляционного многослойного детектора с помощью пакета GEANT4. // 9-ая Курчатовская молодёжная научная школа, Сб. аннотации работ, 2011, Москва, С.250.
- 8) В.В. Кадилин, Г.Л. Деденко, Тант Зин. Моделирование детектора быстрых нейтронов на основе гелиевых счётчиков. // 9-ая Курчатовская молодёжная научная школа, Сб. аннотации работ, 2011, Москва, С.251.
- 9) В.В. Кадилин, Г.Л. Деденко, Тант Зин, Расчётное моделирование эффективности регистрации нейтронного детектора гамма-телескопа «Гамма-400». // Научная сессия НИЯУ МИФИ – 2012. Аннотация докладов, Том 1, С.190.

- 10) Г.Л. Деденко, В.В. Кадилин, А.А. Каплун, И.А. Мереминский, Тант Зин, Ю.Т. Юркин. Расчетное исследование пространственно-временного отклика нейтронного детектора в составе комплекса «ГАММА-400». // Научная сессия НИЯУ МИФИ – 2013. Аннотация докладов, Том 1, С.140.
- 11) В.В. Кадилин, Г.Л. Деденко, Тант Зин. Расчёт эффективности регистрации нейтронов сцинтилляционного многослойного детектора с помощью пакета GEANT4. // 9-ая Курчатовская молодёжная научная школа, Сб. аннотации работ, 2011, Москва, С.250.
- 12) В.В. Кадилин, Г.Л. Деденко, Тант Зин. Моделирование детектора быстрых нейтронов на основе гелиевых счётчиков. // 9-ая Курчатовская молодёжная научная школа, Сб. аннотации работ, 2011, Москва, С.251.
- 13) В.В. Кадилин, Г.Л. Деденко, Тант Зин, Расчётное моделирование эффективности регистрации нейтронного детектора гамма-телескопа «Гамма-400». // Научная сессия НИЯУ МИФИ – 2012. Аннотация докладов, Том 1, С.190.
- 14) Г.Л. Деденко, В.В. Кадилин, А.А. Каплун, И.А. Мереминский, Тант Зин, Ю.Т. Юркин. Расчетное исследование пространственно-временного отклика нейтронного детектора в составе комплекса «ГАММА-400». // Научная сессия НИЯУ МИФИ – 2013. Аннотация докладов, Том 1, С.140.
- 15) Г.Л. Деденко, В.В. Кадилин, Ю.Т. Юркин, И.А. Мереминский, Тант Зин. Расчетное моделирование нейтронного детектора гамма-телескопа «ГАММА-400». // Научная сессия НИЯУ МИФИ – 2013. Аннотация докладов, Том 2, С.89.