

**Международная организация Объединенный Институт Ядер-
ных Исследований**

Лаборатория Ядерных Проблем

Реферат по специальности

**Исследование спектра первичных космических лучей в
эксперименте «НУКЛОН»**

Руководитель:

к.ф.-м.н. Ткачев Л.Г. (ЛЯП ОИЯИ)

Исполнитель:

Плотникова Е.М.

Дубна, 2006

Содержание

| | |
|---|-----------|
| Введение в физику Космических лучей | 3 |
| Актуальные задачи по исследованию ГКЛ | 8 |
| Эксперимент НУКЛОН и его задачи: | 10 |
| • Основная концепция эксперимента НУКЛОН | 10 |
| • Научные задачи эксперимента НУКЛОН | 15 |
| • Структура детектора НУКЛОН | 15 |
| • Преимущества эксперимента НУКЛОН по сравнению с другими экспериментами | 20 |
| Заключение | 21 |
| Литература | 22 |

Введение в физику Космических лучей

Космическое излучение, случайно открытое в 1912 г. австрийским физиком Виктором Гессом во время полетов на воздушном шаре, представляет собой, в основном, поток ядер ионизированных атомов практически всех известных элементов таблицы Менделеева, приходящий равномерно со всех направлений (изотропно) из окружающего Землю пространства. Космические лучи (КЛ) приходят к нам как из ближнего (околосолнечного), так и из дальнего (галактического) и, по-видимому, сверхдальнего (внегалактического) мирового пространства.

Энергия солнечных лучей сравнительно невысокая. Полученный из наблюдений верхний предел энергии частиц СКЛ $E_k \approx 2 \cdot 10^{10}$ эВ. Нижняя граница их энергии неопределенна ($E_k < 10^6$ эВ). В отличие от СКЛ галактические и внегалактические космические лучи (ГКЛ и ВГКЛ) обычно называются первичными космическими лучами (ПКЛ). Они представляют собой малоизменяющиеся во времени поток атомных ядер с энергией $10^9 - 10^{20}$ эВ. Основными источниками КЛ внутри Галактики являются взрывы сверхновых звезд, а ВГКЛ – ядра активных галактик, пульсары.

Космические лучи состоят примерно на 98% из ядер и на 2% из электронов. Протоны составляют 87% ядер, 12% приходится на α - частицы и 1% - на тяжелые элементы. Гамма-кванты и нейтрино также были обнаружены в составе ПКЛ и в последние десятилетия интенсивно исследуются.

Состав космических лучей был определен экспериментально в области энергий от нескольких МэВ до нескольких ТэВ. Обнаружено хорошее согласие между относительными распространенностями элементов на Солнце и в космических лучах, что указывает на единый механизм их образования.

Однако имеются и некоторые существенные различия. Так, в космическом излучении по сравнению с тяжелыми элементами содержание легких элементов Н и Не весьма низкое. Причиной может быть высокая ионизационная способность водорода, сопровождающаяся не столь быстрым его ускоре-

нием, или наличием другого источника, влияющего на состав космических лучей. Кроме того, в космическом излучении повышено содержание элементов Li, Be и B, а также ядер, расположенных непосредственно перед железом. Поскольку Li, Be и B не образуются в результате нуклеосинтеза в звездах, появление этих элементов можно объяснить, считая их продуктами реакции расщепления на ядрах C, N и Fe.

Отношение доли первичных (C, N и Fe) к доле вторичных (Li, Be и B) частиц позволяет оценить продолжительность пребывания частиц в пределах нашей Галактики. Эта продолжительность равна примерно 10^6 лет. Распределение относительных распространенностей элементов оказывается почти не зависящим от энергии (за исключением Fe). В области низких энергий (ниже 1 ГэВ/нуклон) становится весьма заметным влияние солнечного ветра на прибывающую из космоса плазму. В периоды повышенной солнечной активности усиливающийся солнечный ветер из-за захваченного магнитного поля отклоняет низкоэнергетическое космическое излучение от Земли, и сам дает значительный вклад в наблюдаемый низкоэнергетический поток частиц. Эта 11-летняя модуляция, обусловленная активностью Солнца, наблюдалась в космическом излучении. Геомагнитное поле Земли также оказывает влияние на космические лучи, приводя к зависимости результатов наблюдения от географической широты.

При энергиях выше нескольких ТэВ сведения о составе излучения из разных экспериментов противоречивы (Рис. 1). Известен только интегральный энергетический спектр, в котором информация о составе потеряна. Он простирается, по крайней мере, до энергий 10^{20} эВ, где наблюдаемые потоки чрезвычайно малы. В широкой области энергий спектр хорошо описывается степенным законом

$$\frac{dN}{dE} \propto E^{-\gamma}.$$

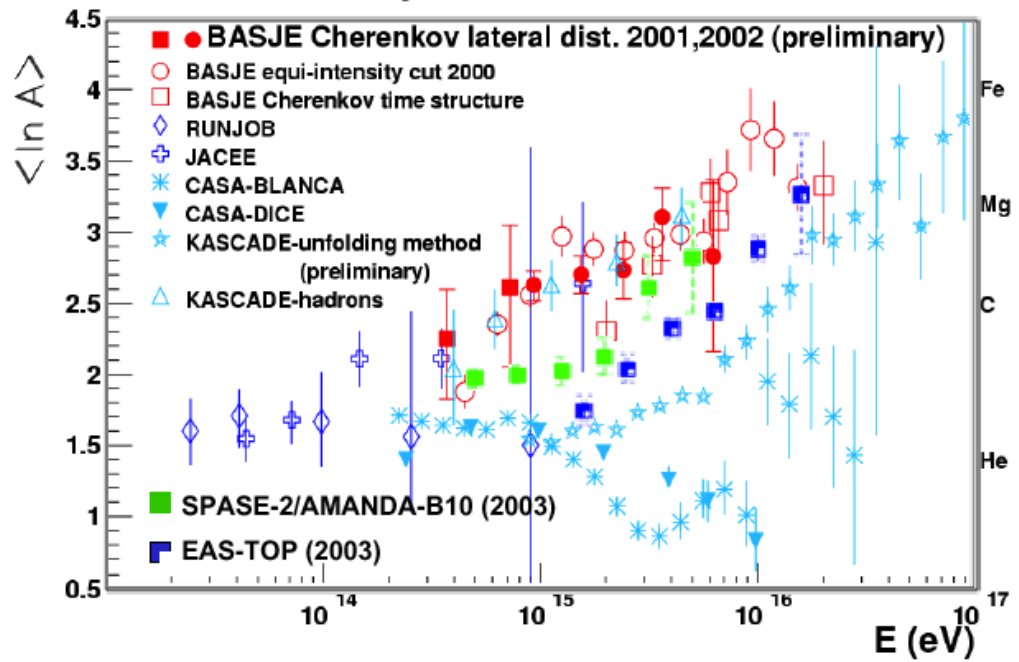


Рис. 1. Среднее массовое число ядер космического излучения, полученное в разных экспериментах по ШАЛ и в двух прямых экспериментах RUNJOB, JACEE.

Вплоть до энергий 10^{15} эВ значение $\gamma \approx 2.7$. Далее спектр становится круче с $\gamma \approx 3$ ("колени"), что, возможно, указывает на различное происхождение этих двух областей (Рис. 2). Начиная с энергий примерно 10^{18} эВ, спектр снова становится менее крутым ("лодыжка"). Поведение спектра при энергии 10^{20} эВ служит предметом многочисленных обсуждений, поскольку благодаря взаимодействию КЛ с космическим фоновым излучением максимальное значение энергии должно достигаться при $5 \cdot 10^{19}$ эВ (предел Грейсена – Зацепина - Кузьмина). Не ясно также, выходит ли спектр на плато в этой области или же поток просто становится слишком малым для его надежного измерения. Наблюдение одного события при энергиях $(3.2 \pm 0.9) \cdot 10^{19}$ эВ и еще нескольких при энергиях выше 10^{20} эВ породили предположение о том, что источником этих событий служит распад новых сверхтяжелых частиц темной материи. В этой области энергий ведутся активные экспериментальные исследования.

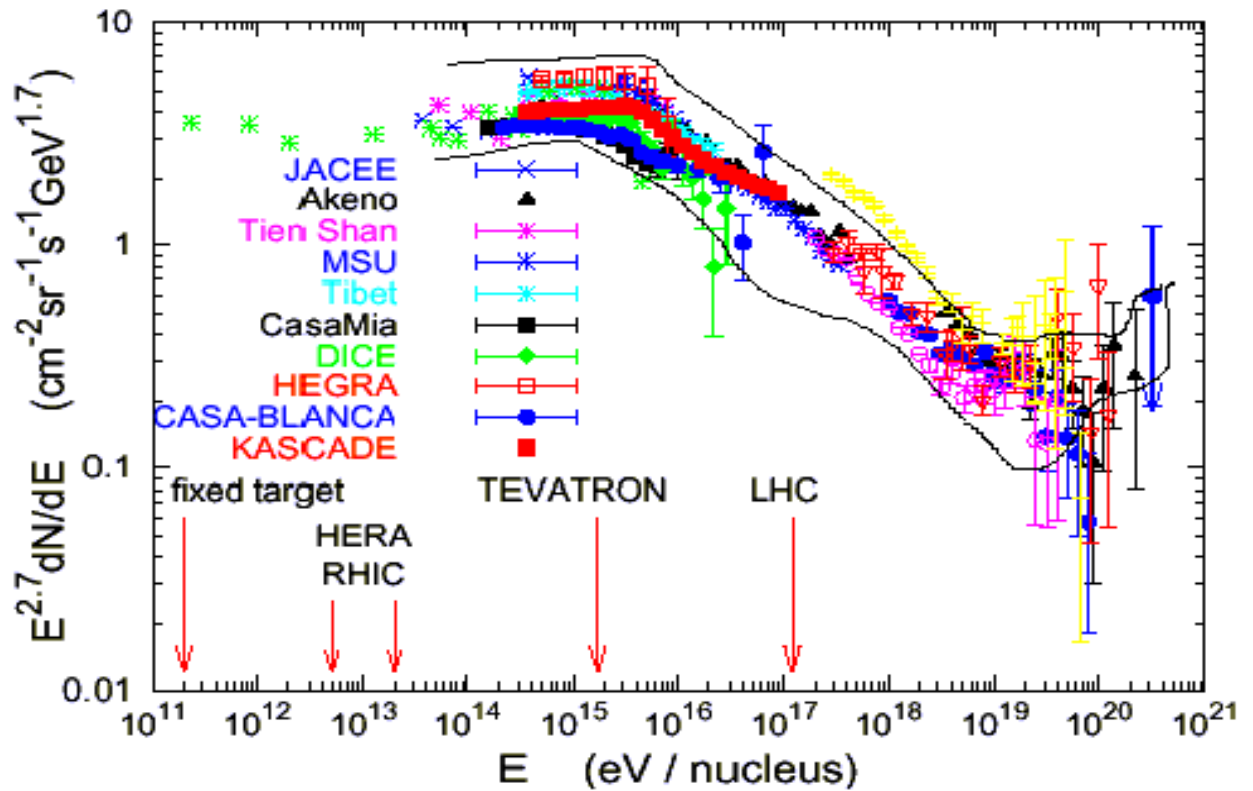


Рис.2. Спектр космического излучения в области энергий 10^{11} - 10^{20} эВ. При энергии 10^{15} эВ отчетливо видно "колени", открытое Г.Б. Христансенем и Г.В. Куликовым в 1958 г. Поведение спектра выше 10^{20} эВ довольно противоречиво.

Вклад электронов в космическое излучение составляет примерно 2%. Релятивистские электроны детектируются, главным образом, в радиодиапазоне по характерному для них синхротронному излучению. Отсюда можно сделать выводы относительно галактического магнитного поля. Электроны могут образовываться либо непосредственно в источниках космического излучения, либо в межзвездной среде как вторичные продукты ядерных реакций

$$\pi^{\pm} \rightarrow \mu^{\pm} \nu_{\mu}^{(-)} \rightarrow e^{\pm} \nu_e^{(-)}$$

Однако в таких процессах должно образовываться не больше 10% электронов, поскольку наблюдаемая распространенность позитронов составляет лишь 10% от распространенности электронов. Столь же важная информация может быть получена из наблюдаемого спектра антипротонов. Значительный

поток антипротонов указывал бы на присутствие во Вселенной большого количества антивещества. Кроме того, антипротоны могут рождаться во взаимодействиях протонов с межзвездным веществом. В последнее время получены весьма интересные данные о потоке антипротонов средних энергий, однако до сих пор отсутствуют надежные экспериментальные данные о потоке антипротонов низких энергий. Сложность их регистрации состоит в том, что они намного сильнее взаимодействуют с веществом. Антипротоны из космоса не успевают дойти до поверхности Земли, они аннигилируют уже в самых верхних слоях атмосферы. Низкоэнергетические антипротоны - уникальный зонд для изучения элементарных частиц ранней Вселенной, поскольку они с большой вероятностью могли быть созданы "испаряющимися" черными дырами. Поэтому так важно проводить исследования космического излучения за пределами атмосферы Земли в открытом космосе.

Интенсивность космического излучения на поверхности Земли составляет примерно 1000 событий в секунду на квадратный сантиметр. Поскольку энергия космического излучения варьируется в пределах 15 порядков, для всестороннего исследования этого явления необходимы различные экспериментальные подходы. Кроме того, если оценить плотность энергии КЛ в Галактике, то окажется, что она составляет ~ 1 эВ/см³, что сравнимо с плотностью суммарного электромагнитного излучения звезд в Галактике, с энергией теплового движения межзвездного газа и кинетической энергии его турбулентных движений, а также с плотностью энергии магнитного поля Галактики. Это позволяет считать космические лучи существенной составляющей межзвездной среды Галактики, а установление источников КЛ, механизмов ускорения КЛ и изучение процессов распространения их до Земли – одной из важнейших задач астрофизики.

Актуальные задачи по исследованию ГКЛ

Несмотря на почти вековую историю изучения КЛ, их происхождение, особенно в области высоких энергий, по большому счету, остается загадкой.

До сих пор астрофизика высоких и низких энергий имеет в своем составе целый ряд неразрешенных вопросов:

- Рождаются ли первичные космические лучи (ПКЛ) непосредственно при взрыве сверхновой, или же заметный вклад дает горячая компонента межзвездного газа?
- Продолжается ли ускорение в межзвездном пространстве или оно ограничено непосредственно областью сверхновой? Возможна ли суперпозиция вкладов ударных волн от нескольких соседних сверхновых?
- Что представляет собой "колени" в спектре КЛ? Одинаков ли состав ПКЛ до и после "колени"?

Множество гипотез было предложено для объяснения всего комплекса наблюдаемых данных по КЛ, однако пока картина оказывается очень неясной и во многом противоречивой.

Рассмотрим стандартную схему происхождения и ускорения ПКЛ:

- При энергиях до 10^{15} эВ формирование и ускорение ПКЛ можно объяснить процессами в остатках сверхновых звезд и их взаимодействием с ударными волнами в межзвездном газе;
- При энергиях от 10^{15} эВ до 10^{18} эВ основной вклад дают другие источники — активные галактические ядра (АГЯ), пульсары;
- При энергиях выше 10^{18} эВ ПКЛ могут иметь внегалактическое происхождение.

Все перечисленные процессы находят свое отражение в значении химического состава и энергетических спектров КЛ, измеряемых у Земли. Однако, в отличие от исследования Галактики методами астрономии в оптическом, радио, рентгеновском, гамма диапазонах электромагнитного излучения, когда сохраняется направление на исследуемый объект, поток ГКЛ у Земли носит интегральный характер информации об источниках и процессах распространения КЛ в Галактике. Исходя из этого, задача интерпретация состава и энергетического спектра КЛ является объективно трудной. Необходимы прецизионные данные об элементном составе ГКЛ и относительном поведении энергетических спектров различных элементов. Такая подробная и преци-

зионная информация накоплена лишь до энергий $\sim 10^{12}$ эВ, на основе которой был оценен “возраст” ГКЛ, разработаны теоретические модели рождения и распространения ГКЛ, принятые большинством астрофизиков. Аппроксимация полученных результатов в область больших энергий вызывает споры, т.к. не хватает достоверных экспериментальных данных.

На сегодняшний день создано множество моделей физической интерпретации факта “колена”, но ни одна из них не предоставляет убедительных экспериментальных доказательств. Все существующие модели можно условно разделить на две группы: “ядернофизическая” и “астрофизическая”. В “ядернофизической” группе моделей отвергается наличие излома (“колена”) в энергетическом спектре КЛ. Экспериментальный результат изменения интенсивности потока КЛ, объясняется принципиальным изменением характера ядерного взаимодействия на этих энергиях. Это наиболее ранняя и, пожалуй, наиболее радикальная интерпретация феномена “колена”. Предлагались либо радикальные изменения известных механизмов рождения элементарных частиц, либо механизмы рождения новых экзотических элементарных частиц. И то, и другое порой опровергали самые фундаментальные законы физики. Однако достоверных доказательств этих утверждений в потоках широких атмосферных ливней (ШАЛ) пока не нашли.

В “астрофизической” группе моделей также нет единства мнений о характере механизмов порождающих “колени” ГКЛ. Существует около 20 гипотез, объяснения “колена”, но их можно объединить в 3 класса:

- “Колени” в спектре ГКЛ отражает максимальную энергию ускорения КЛ в основных источниках.
- Диффузионные модели, в которых излом возникает вследствие распространения, т.е. по дороге от источников до Земли. При этом фоновый спектр КЛ, т.е. спектр в источниках имеет чисто степенной вид с единым показателем $\sim 2.5-2.9$ во всем диапазоне до 10^{18} эВ.
- Модель близкого источника Ерлыкина-Вольфендейла, в которой фоновый спектр КЛ также имеет единый показатель во всем диапазоне

до 10^{18} эВ, и только в области “колена” доминирует близкорасположенный источник, т.е. Сверхновая.

Только новые эксперименты шаг за шагом, установка за установкой накапливают крупицы знаний о космических лучах, которые позволят приблизиться к решению тайны КЛ. Возможно, что загадка происхождения космических лучей потому и остается загадкой, что мы, как оказалось в последние 10 лет, практически ничего не знаем об основных составляющих материи и энергии во Вселенной. В том числе, и в нашей Галактике масса темной материи в несколько раз превосходит известную нам материю и излучение. Новые данные, приведшие к предположению о существовании темной энергии, добавили новые загадки в астрофизике и космологии.

Спутниковый (долгосрочный) эксперимент НУКЛОН, направленный на измерение энергетических спектров и зарядового состава космических лучей (КЛ) в области энергий 1-1000 ТэВ, (непосредственно) прилегающей к “колелу” в спектре галактических КЛ (ГКЛ), является одним из многообещающих космических экспериментов.

Эксперимент НУКЛОН и его задачи.

Основная концепция эксперимента НУКЛОН

Для изучения ПКЛ прямыми методами необходимо поднять аппаратуру за пределы атмосферы с помощью баллонов или спутников. Основная концепция эксперимента НУКЛОН - это создание научной аппаратуры относительно небольшого веса (менее 200 кг) и габаритных размеров (менее 1.0 м^3), способной решать актуальные задачи экспериментальной физики КЛ в широком диапазоне энергий 10^{11} - 10^{15} эВ. Этот подход не требует собственного носителя аппаратуры, как это было в предыдущих исследованиях. Для ее экспонирования возможно использование дополнительных резервов, которые регулярно появляются на ряде серийных российских КА при выполнении долговременных целевых задач. Такая концепция позволяет минимизировать за-

траты и максимальным образом приблизить срок проведения космического эксперимента.

Резкое уменьшение массы аппаратуры достигается тем, что в проектируемом спектрометре предлагается применить известный кинематический метод исследования КЛ высоких энергий в сочетании с установкой для развития и измерения каскада от заряженных и нейтральных частиц.

Подход базируется на усовершенствованном методе Кастаньоли. Сам метод Кастаньоли базируется на том, что во взаимодействиях частиц с одинаковыми массами в системе центра вторичные пионы разлетаются вперед и назад. Тогда в лабораторной системе отсчета вследствие преобразований Лоренца среднее значение псевдобыстроты:

$$\eta_i = - \ln \operatorname{tg} (\theta_i / 2)$$

оказывается пропорциональным логарифму первичной энергии налетающей частицы. Этот метод применялся в экспериментах, где в качестве детекторов использовались ядерные эмульсии, что не давало возможности регистрировать вторичные γ – кванты, и это приводило к большой погрешности (100 -200 %) в определении энергии событий от 0.1 до 1 ТэВ.

Учитывая особенности и вышеприведенные трудности определения энергии по углам вылета вторичных частиц при энергиях порядка 100 ГэВ, был предложен комбинированный метод, основанный на измерении углов вылета как заряженных, так и нейтральных частиц. Иллюстрация метода можно провести на следующей схеме (Рис. 3):

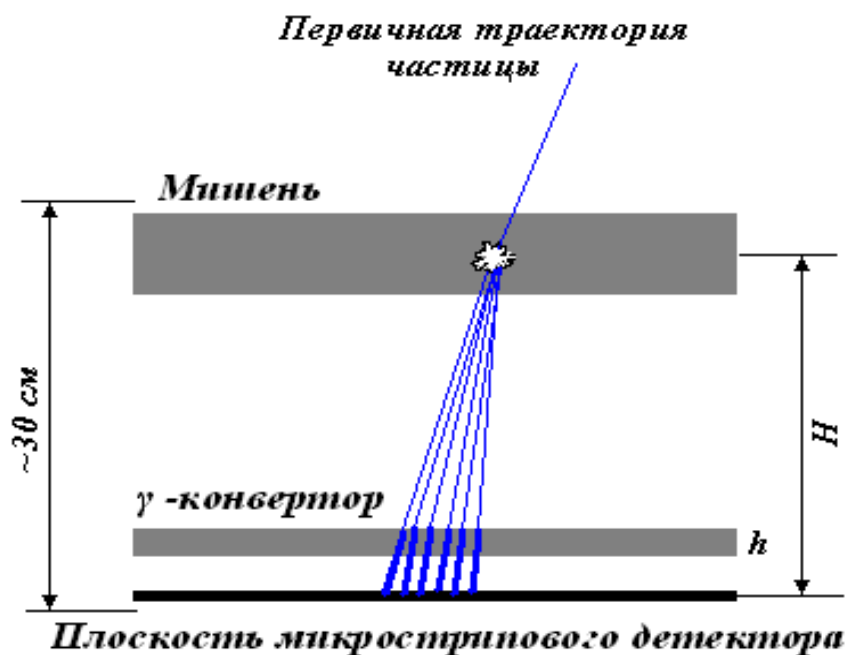


Рис. 3. Схема прибора.

В состав прибора входят мишень и тонкий слой свинца (вольфрама), играющий роль конвертора γ – квантов. Под конвертором предполагается расположить слой координатно-чувствительных детекторов, способных фиксировать число и координаты заряженных частиц под конвертором. В качестве таких детекторов предполагается использовать силиконовые микростриповые детекторы.

Первичная частица взаимодействует в мишени, где образуются N_g вторичных γ – квантов с энергией $(E_\gamma)_i$ и N_{ch} заряженных частиц с энергией $(E_{ch})_i$.

Число частиц до конвертора:

$$N_{before} = N_{ch} + N_g \sim 2 N_{ch}$$

Конвертор нейтральных частиц – тонкий слой свинца или вольфрама толщиной $h \sim 1 \div 2$ см – располагается на некотором расстоянии от точки первого взаимодействия - $H \sim 20$ см, и непосредственно перед регистрирующей плоскостью. Он конвертирует практически все вторичные γ – кванты, падающий на этот слой вещества, и узкий пучок электронов за счет каскадного размножения в свинце, где число электронов пропорционально E_γ^S . Часть вторичных заряженных частиц, родившихся в мишени $N_{ch}W_{in}$, будет испытывать

повторные взаимодействия в тонком слое вещества, и множественность этих вторичных частиц будет пропорционально $\ln E_{ch}$. Таким образом, умножение числа частиц в конверторе будет увеличиваться с ростом энергии.

$$N_{after} = (1 - W_{in})N_{ch} + W_{in}N_{ch}m_{ch} + N_g m_g$$

Коэффициенты размножения в свинце заряженных частиц:

$$m_{ch}(E_{ch}) \sim \ln(E_{ch})$$

γ – квантов:

$$m_g(E_g) \sim (E_g)^*$$

$$N_{after} = N_{before} M(E)$$

Среднее значение M увеличивается от 3.5 при 100ГэВ до 20 при 1000ГэВ. Если в качестве параметра, чувствительного к энергии, использовать значение множественности, то погрешность в определении энергии оказывается около 100%. В эксперименте НУКЛОН в качестве такого параметра, зависящего от распределения плотности потока вторичных частиц по псевдобыстротам, будет использоваться величина:

$$S = \sum \eta_i^2 N_i$$

$$\eta_i = - \ln \operatorname{tg}(\theta_i/2) = - \ln(r_i / 2H)$$

r_i - расстояние до оси ливня i – ого координатного детектора, в котором зарегистрировано N_i частиц, H – расстояние до точки взаимодействия.

За счет квадратичности функции параметра S заметно подавляется вклад медленных частиц, образующихся в результате каскадного процесса в ядре мишени, и тем самым ликвидирует один из недостатков метода Кастаньоли.

Такой метод дает возможность создания регистрирующей аппаратуры относительно небольшого веса при значительной величине ее светосилы с перспективой длительного времени экспозиции и проведения исследований.

Возможность уточнения указанных результатов в эксперименте НУ-

КЛОН кардинальным образом связана с необходимостью увеличения статистики в этой области энергий, так как недостаточная статистика является одним из слабых мест всех предыдущих экспериментов. В связи с тем, что толщина совокупности детекторов установки НУКЛОН представляет в среднем 80-100 г/см, что в 1-1.5 раза меньше длины ядерного взаимодействия, то практически все протоны и ядра КЛ вплоть до ГэВ-ных энергий будут проходить через детекторы с вероятностью взаимодействия в мишени или конверторе не более 50%.

Поток КЛ на интервале от ≈ 1 ГэВ до ≈ 1000 ГэВ изменяется в 10^{13} - 10^{14} раз и трудной задачей триггера является эффективное подавление потока частиц с малой энергией, как не представляющего физического интереса, и селекция событий от взаимодействия частиц высокой энергии в области “колена”. Следует заметить, что интегрально поток КЛ всех энергий относительно невелик и составляет $\approx 1(\text{см}\cdot\text{ср}\cdot\text{сек})^{-1}$, что дает $\approx 10^5$ частиц/(сек•нуклон). Наиболее ограничивающим фактором будет, по-видимому, не загрузка триггерной системы по браковке фоновых событий и скоростью записи полезных событий, а доступный объем передаваемой на землю информации в совокупности с возможностью предварительной фильтрации получаемых данных на бортовом компьютере.

Целью триггерной системы является способность регистрации всех событий - полезных и фоновых, их быстрая обработка с целью полной или частичной отбраковки бесполезных событий при сохранении полезных и выработка управляющих команд для электроники всех детекторов, позволяющих запомнить сигналы отфильтрованных событий для последующей обработки. Триггерная система НА НУКЛОН предполагается многоуровневая. Кроме того, учитывая, что поток космического излучения на интервале энергий 10^{11} - 10^{16} эВ меняется на несколько порядков, необходимо предусмотреть возможность перестраиваемого триггера для эффективного отбора более редких событий на верхнем пределе интервала энергий.

Исходя из вышеуказанной необходимости быстрой обработки большого потока неселектированной информации, в работе триггерной системы исполь-

зуется упрощенная логика анализа принимаемых событий, быстрые детекторы и быстрая триггерная электроника с минимальными мертвыми временами. Дополнительным требованием ко всем работающим в космосе детекторам, в том числе к триггерной системе, является высокая степень надежности и малое энергопотребление. Указанным требованиям удовлетворяют сцинтилляционные детекторы, временное разрешение которых порядка 10 псек, и это подтверждается существующей практикой их использования на космических аппаратах.

Научные задачи эксперимента НУКЛОН

- Исследование энергетических спектров различных элементов в космических лучах в области энергий 1-1000 ТэВ, проверка гипотезы наличия неоднородностей (“колен”) в спектрах различных ядер КЛ, что может свидетельствовать о смене источников ускорения в указанной области энергий.
- Проверка гипотезы разных наклонов спектров различных компонент, которая предполагает специфические места ускорения тяжелых элементов в Галактике, где сосредоточено повышенное количество тяжелых элементов.
- Исследование энергетической зависимости отношений вторичных ядер Li, Be, B к ядрам CNO и группы суб-Fe к Fe, что дает возможность измерения энергетической зависимости коэффициента диффузии, а значит, позволяет получить переход от наблюдаемых у Земли спектров КЛ к истинным спектрам в источниках для различных компонент и установить наличие или отсутствие процессов доускорения КЛ по мере их распространения до Земли.
- Исследование тонкой структуры представительности отдельных элементов с целью подтверждения или опровержения гипотезы, что на начальном этапе ускорения ускоряются космические пылинки.
- Исследование возможной пространственной анизотропии отдельных

групп ядер, что может быть связано с наличием близкого источника КЛ.

Структура детектора НУКЛОН

Как же надо сконструировать прибор, чтобы он смог при таком маленьком весе решить поставленные научные задачи?

Во-первых, как уже говорилось, нужно чтобы прибор измерял энергию частиц, во-вторых, необходимо измерить заряд частицы, в-третьих, необходимо измерить угол прилета частицы, в-четвертых, надо отличить полезный сигнал от частицы с интересующей нас пороговой энергией не менее 1 ТэВ, от шумового сигнала. То есть, надо создать систему быстрого триггера, которая поможет селектировать основную массу ненужных сигналов и передавать на Землю только нужные сигналы. И, наконец, прибор должен иметь достаточно большой геометрический фактор, чтобы набрать максимально возможную статистику полезных событий. Обычно установки, удовлетворяющие таким критериям, весят не менее 1 тонны, а прибор НУКЛОН весит, как уже упоминалось выше, около 150 - 200 кг (Рис. 4).

Конечно, чтобы удовлетворить всем требованиям пришлось применять самые новейшие технологии, а именно микростриповые кремниевые детекторы, которые уже довольно давно используются для анализа процессов множественного рождения в экспериментах на крупнейших ускорителях частиц. Падовые детекторы выдержали полет в стратосфере в течение нескольких недель в Антарктиде и продемонстрировали надежность и эффективность их использования. В эксперименте НУКЛОН такие падовые кремневые детекторы будут применяться для определения заряда частиц, и предполагается использовать 4 слоя таких детекторов, чтобы довести точность измерения заряда до 0.2 и увеличить надежность измерений.

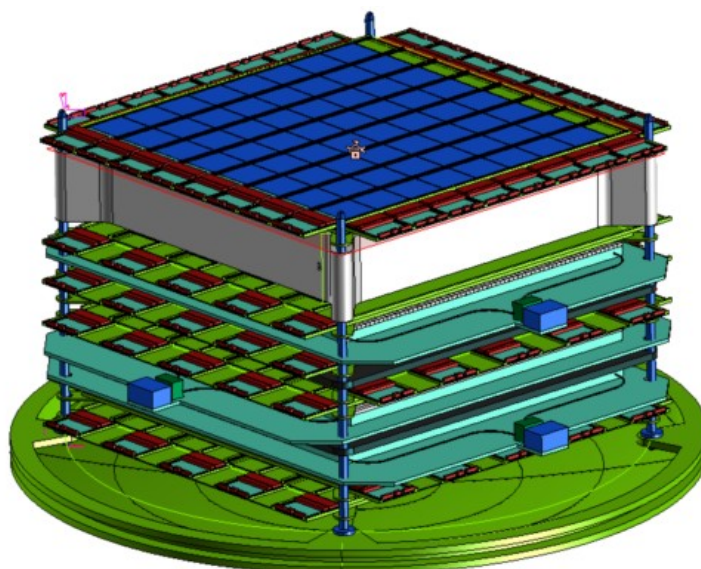


Рис. 4. Общий вид детектора НУКЛОН

Для определения пространственной плотности частиц - “фотографии” каскада, которая требуется для определения энергии частицы по методу KLEM, будут применяться микростриповые кремниевые детекторы, которые будут иметь пространственное разрешение на уровне 200 мкм. Микростриповые детекторы “сфотографируют” изображение пятна и далее это изображение будет передано на Землю, где оно будет математически обработано, и будет определена энергия первичной частицы.

Одним из неприятных эффектов для методики KLEM является эффект обратного тока: часть частиц, образовавшихся в акте ядерного взаимодействия, летит назад, а не вперед. Эти частицы могут попасть в детектор заряда, имитируя увеличение заряда. Величина обратного тока сильно растет с ростом энергии и зависит от объема вещества в установке. Снижение искажений, связанных с воздействием обратного тока на детектор заряда, достигается путем разбиения плоскости зарядового детектора на пады. Секционирование детектора уменьшает вероятность одновременного попадания в чувствительную часть детектора исследуемой частицы и фоновой, причем использование несколько слоев детекторов снижает эту вероятность еще в несколько раз. Поэтому оказывается чрезвычайно важным измерять ось прохождения частицы с очень хорошей точностью, для этого в установке НУКЛОН используется несколько плоскостей микростриповых детекторов.

Разрез установки приведен на (Рис. 5). И на нем изображены две частицы, проваимодействовавшие в мишени, и зарегистрированные во всех 16 детектирующих слоях.

На схеме детектора представлены:

- Блок измерения заряда – 4 слоя падовых кремниевых детекторов, каждый размером 0.8×2.0 см. Толщина слоя падовых кремниевых детекторов – всего 300 мкм, а пространственное разрешение – 1 см.
- Блок измерения энергии и определения оси ливня – 6 слоев микростриповых детекторов с пространственным разрешением не менее 200 мкм.
- Блок выработки быстрого триггера, состоящий из 6 плоскостей сцинтилляторов.

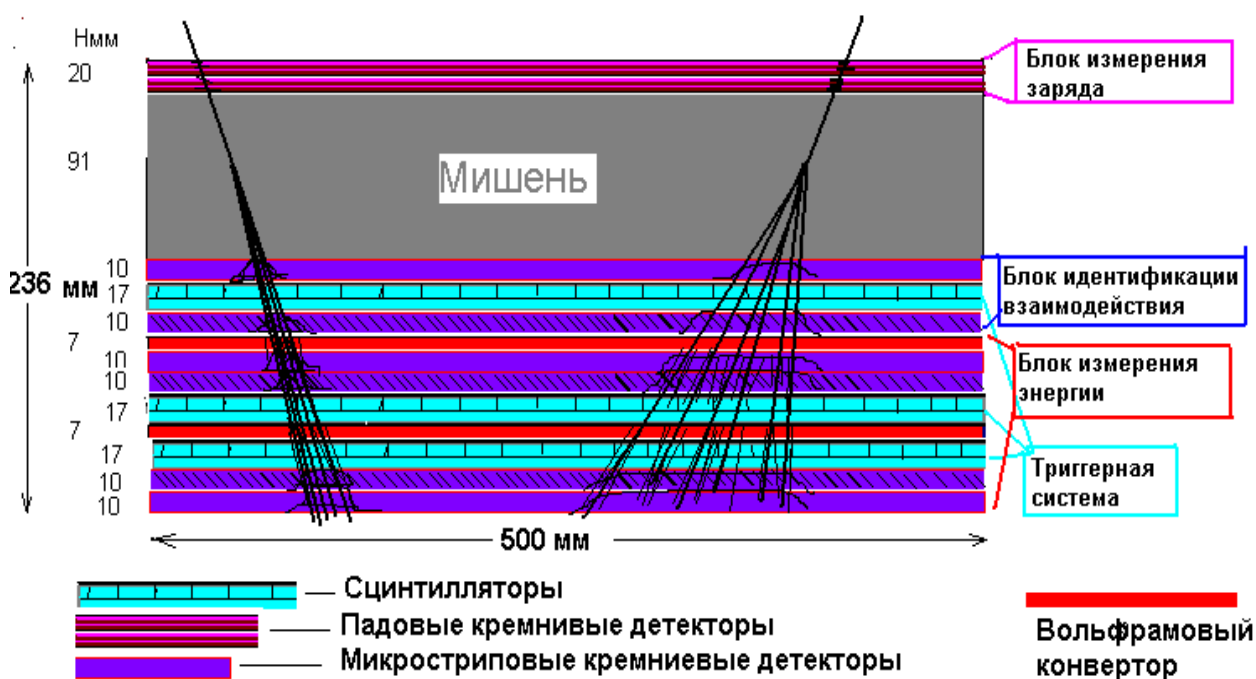


Рис. 5. Принципиальная схема детектора НУКЛОН.

В относительно тонкой мишени частица испытывает ядерное взаимодействие, образуются вторичные γ -кванты (от распада π^0 и η -мезонов) и заряженные однозарядные частицы (в основном пионы). На некотором расстоянии от мишени расположено 2 слоя вольфрама по 0.7 см. При прохождении через

них практически все γ -кванты конвертируют в электрон-позитронные пары, треки которых измеряются микростриповыми детекторами, расположенными после конверторов. Слои координатно-чувствительных детекторов, способных фиксировать как число, так и распределение пространственной плотности заряженных частиц около трека первичной частицы, расположены под каждым из слоев вольфрама для определения энергии частицы. Еще два слоя микростриповых детекторов находится между мишенью и конвертором. Они совместно с остальными слоями позволяют с очень хорошей точностью восстанавливать направление трека первичной частицы.

Триггерная система детектора НУКЛОН состоит из 6 плоскостей сцинтилляционных детекторов, изготовленных из тонких сцинтилляционных полосок (стрипов) размером $500 \times 30 \times 5$ мм³ с вклеенными спектросмещающими WLS-файберами (Рис. 6). Направления 16 стрипов в соседних плоскостях ортогональны друг другу. Сцинтилляторы используются для выработки триггера первого и второго уровня, а также для отбора событий из мишени с энергией $E > 100$ ГэВ с осью событий в геометрическом акцептансе установки. Поверхность сцинтилляционных полосок – диффузно-отражающая, а свет снимается с помощью спектросмещающих волокон (WLS-файберов), вклеенных в канавку стрипа по всей его длине. По двум парам-файберов на одной поверхности стрипа свет идет на два 1-канальных ФЭУ, а по 3-м-файберам с другой поверхности свет идет на другую сторону стрипа к 16-канальному ФЭУ. Свет передается на фотокатод одноканального ФЭУ для выработки триггера 1-го уровня и, одновременно, на фотокатод 16-канального ФЭУ для выработки триггера 2-го уровня, позволяющего оценить ось события. Противоположный от ФЭУ конец-файбера отполирован и имеет зеркало для отражения падающего света, что увеличивает световой сигнал от прошедшей через стрип заряженной частицы.

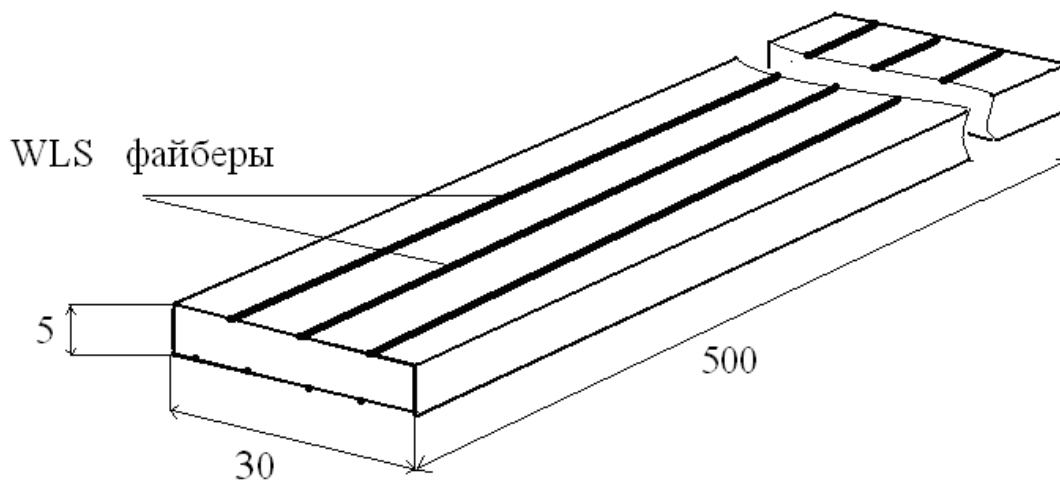


Рис. 6. Внешний вид сцинтилляционной стрипы

Существенной особенностью при использовании волокон для переизлучения и вывода света из сцинтилляторов является существование предельно допустимого изгиба волокон как внутри сцинтиллятора, так и вне его. Фирмы-изготовители волокон рекомендуют минимальный обеспечивающий долговременную стабильность радиус кривизны изгиба около 20 см. При меньшем радиусе кривизны с течением времени на поверхности волокна (клевдинг) могут образоваться трещины, нарушающие условия для полного внутреннего отражения света и понижающие эффективную длину поглощения света в волокне. Из-за ограниченных размеров гермоконтейнера НА НУ-КЛОН радиус кривизны изгиба волокон выбран около 5 см, поэтому приходится применять специальную термическую обработку изготовленных триггерных модулей для повышения долговременной стабильности оптических свойств волокон в течение 5-летней работы на орбите.

Преимущества эксперимента НУКЛОН по сравнению с другими экспериментами

Несмотря на маленький вес прибора, такой эксперимент имеет целый

ряд преимуществ перед тонкими калориметрами час:

- В настоящий момент суммарный планируемый фактор экспозиции эксперимента НУКЛОН превышает почти в 10 раз имеющиеся эксперименты (~ 5 лет).
- Исследование в открытом космосе доли вторичных к первичным ядер имеет принципиальное преимущество по сравнению с баллонными экспериментами (CREAM, Tiger, Tracer и др.), в которых остаточная атмосфера составляет около 4 г/см^2 , что в десять раз превышает толщину вещества, проходимого ядрами в Галактике при энергии около 1ТэВ.
- Поскольку прибор почти не имеет тяжелого вещества, то ожидаемый обратный ток, искажающий зарядовое разрешение на порядки меньше, чем в обычных тонких калориметрах.
- Прибор дает возможность проведения мониторинга заряженных частиц с энергией 1ТэВ в условиях отсутствия искажающего влияния атмосферы.

Заключение

Главная идея при создании детектора "Нуклон" состоит в том, чтобы на основе последних достижений в экспериментальной физике высоких энергий на ускорителях создать аппаратуру, способную решить поставленные научные задачи космического эксперимента по измерению спектра и состава ПКЛ в области "колена".

И тогда, имея достаточно хорошую статистику о КЛ, набранной в течение 5 лет, можно получить более определенные данные о спектре и характере изменений химического состава ПКЛ в этой области энергий.

Таким образом, следует подчеркнуть, что новый космический эксперимент НУКЛОН, охватывая широкий диапазон изучаемых ядер вплоть до железа $Z=26$ и энергий до "колена" $E \sim 10^{15}$ эВ, что позволит проверить теорети-

ческие модели, и будет служить основанием для новых идей в этой области астрофизики.

Список литературы

1. Г.В. Клапдор – Клайнгротхаус, К. Цюбер // *Астрофизика элементарных частиц*, под ред. В.А. Бедняков // М., ред. журнала “Успехи физических наук”, 2000, стр. 228-231.
2. В.С. Березинский // *Астрофизика космических лучей* // М., Наука, 1990.
3. В. Борейко, В. Гребенюк, Н. Журавлев, А. Калинин и др. // *Разработка и изготовление рабочего макета позиционно-чувствительного сцинтилляционного детектора НА НУКЛОН* // Дубна, 2004.
4. Г. Л. Башинджагян, Н. Баранова, Н. Егоров, А. Калинин, А. Садовский и др. // *Спутник НУКЛОН. Общие положения*.
5. D. Basin, O. Tarasov, M. Lewitowich, O. Sorlin // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 482, 2002, P. 307.
6. С. Хокинг // *Черные дыры и молодые вселенные* // Амфора, СПб, 2004.