

Изучение космических лучей

Методическое указание к лабораторной работе для студентов дневного и заочного обучения

Составители: Бадлуев А.И., Иванов К.Н., Базарсадаев Б.Ц.

Методическое указание к лабораторной работе для студентов дневного и заочного обучения инженерно-технических и технологических специальностей по «Квантовой физике».

Ключевые слова: Космические лучи, Мю – мезон, нейтрино, антинейтрино, электроны, позитроны, гамма – квант, угловое распределение.

Редактор Т.А. Стороженко

Подписано в печать 26.06.2004 г. Формат 60 × 84 1/16
Усл.п.л. 0,7, уч.-изд.л. 0,6: Печать операт., бум. писч.
Тираж _____. Заказ № 91

Издательство ВСГТУ, Улан-Удэ, ул. Ключевская, 40, в.
© ВСГТУ, 2004 г.

Министерство образования и науки Российской Федерации

Восточно-Сибирский государственный
технологический университет

ФИЗИКА

Методическое указание к лабораторной работе

Изучение космических лучей

Составители: Бадлуев А.И.
Иванов К.Н.
Базарсадаев Б.Ц.

Издательство ВСГТУ
Улан-Удэ, 2004

Введение

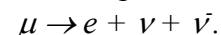
Космические лучи – это поток частиц, приходящих на землю из межзвездного пространства. Первичные космические лучи состоят главным образом из протонов (~90 %), α - частиц и более тяжелых ядер, основная доля первичных космических лучей имеет энергию 10^9 - 10^{10} эВ, но встречаются также частицы со значительно большей энергией (до 10^{19} эВ). Частицы с энергиями меньше 10^9 эВ отклоняется магнитным полем земли и не попадает на нее. Поток протонной компоненты с энергией выше $1,4 \cdot 10^{19}$ эВ составляет примерно один протон на $1 \text{ см}^2/\text{с}$. В результате взаимодействия первичных космических лучей с ядрами атмосферы появляются новые (вторичные) частицы – мезоны различных сортов, распад которых приводит к появлению электронов, позитронов и фотонов большей энергии. Таким образом, вторичные космические лучи, наблюдаемые на высоте до 10 км, совершенно не похожи по своему составу на первичные космические лучи. Космическое излучение, приходящее в нижние слои атмосферы, принято делить на мягкую и жесткую компоненты.

Мягкая компонента состоит из электронов, позитронов и γ -квантов, которые сильно поглощаются в веществе. Поглощение частиц мягкой компоненты существенным образом зависит от порядкового номера Z вещества. Частицы мягкой компоненты почти целиком поглощаются десятисантиметровым слоем свинца.

Жесткая компонента состоит из μ -мезонов, которые слабо поглощаются веществом, притом приблизительно одинаково веществами с разными Z .

Столь большое различие проникающей способности частиц обеих компонент объясняется тем, что электроны и позитроны мягкой компоненты при взаимодействии с веществом тратят большую часть своей энергии на излучение, а потери μ - мезонов на излучение сравнительно малы.

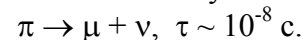
Потери энергии на ионизацию и возбуждение атомов вещества для электронов и μ - мезонов космических лучей на уровне моря примерно одинаково и сравнительно малы. Особенностью μ - мезонов является их распад на электроны, нейтрино и антинейтрино:



В плотной среде поглощение μ - мезонов обусловлено потерей энергии на ионизацию атомов среды. В газобразной среде пробег μ - мезонов велик и нужно учитывать их выбывание из потока космических лучей за счет спонтанного распада.

1. Угловое распределение жесткой компоненты космических лучей на уровне моря

Можно считать, что основная часть мезонов рождается в верхних слоях атмосферы. Мю – мезоны, входящие в состав жесткой компоненты, возникают в результате распада π - мезонов – продуктов ядерного взаимодействия первичных космических лучей с ядрами атмосферы:



Следовательно, μ - мезоны проходят почти весь слой атмосферы (~ 900 г/см²). При этом они частично поглощаются, частично распадаются. Мезоны, идущие под углом θ к вертикали (рис. 1) и попадающие на уровень моря, проходят в атмосфере путь $1/\cos(\theta)$ раз больший, чем мезоны, идущие по вертикали. Поэтому вероятность распада для μ - мезонов, идущих под углом θ , больше. При увеличении угла θ будет увеличиваться также слой воздуха, который должны пройти мезоны. Это приводит к увеличению поглощения за счет ионизационных потерь. Таким образом, оба фактора должны привести к уменьшению интенсивности μ - мезонов с увеличением зенитного угла θ . Можно, однако, выделить ту часть мезонов

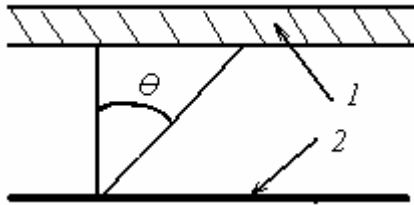


Рис. 1 Генерация мезонов и путь их прохождения в атмосфере: 1- слой генерации, 2 – уровень моря

Это приводит к увеличению поглощения за счет ионизационных потерь. Таким образом, оба фактора должны привести к уменьшению интенсивности μ - мезонов с увеличением зенитного угла θ . Можно, однако, выделить ту часть мезонов, которые поглотились за счет увеличения количества вещества. Измерения интенсивности вертикального потока μ - мезонов, выполненные на разных глубинах под землей, показали, что число μ - мезонов $N(x)$ уменьшается как функция количества пройденного плотного вещества $x(\text{г/см}^2)$ по следующему закону:

$$N(x) = \left(\frac{1000}{1000 + x} \right)^{1,6} = \left(\frac{1000}{\xi} \right),$$

где $\xi = 1000 + x$ – полное количество вещества, пройденного μ - мезоном от места генерации до места поглощения (масса вертикального столба воздуха принята равной 1000 г/см^2). Из рис. 1 видно, что $\xi = 1000 / \cos(\theta)$. Таким образом, число мезонов, дошедших до счетчика на уровне моря, уменьшается за счет поглощения в веществе по закону

$$P_1(\theta) \sim (\cos \theta)^{1,6} \quad (1)$$

С увеличением длины пути, пройденного мезоном, увеличивается вероятность распада мезона. Вероятность прохождения мезоном пути l без распада равна

$$P_2(\theta) \sim \exp\left(-\frac{l(\theta)}{L}\right), \quad (2)$$

где $L = v\tau$ - длина распадного пробега; $v = \beta c$ – скорость мезона; τ - время жизни движущегося мезона. Из релятивистской механики известно

$$\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

где τ_0 – время жизни покоящегося мезона. Тогда

$$L = \beta c \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - \beta^2}} = \beta c \tau_0 \frac{E_\mu}{m_\mu c^2} \quad (3)$$

где $E_\mu = m_\mu c^2 / \sqrt{1 - \beta^2}$ – полная энергия мезона; m_μ - масса мезона; $m_\mu = 105,5 \text{ МэВ/}c^2$ - масса мезона в энергетических единицах.

Отношение числа мезонов, идущих по зенитным углом θ , вертикально падающих мезонов можно записать в виде

$$\frac{N(\theta)}{N(0^\circ)} = \frac{P_1(\theta)}{P_1(0^\circ)} \frac{P_2(\theta)}{P_2(0^\circ)} = (\cos \theta)^{1,6} \frac{e^{-l(\theta)/L}}{e^{-l_0/L}} \quad (4)$$

где $P_1(\theta)$ и $P_2(\theta)$ определены формулами (1) и (2). Можно считать, что по вертикали мезоны проходят путь $l_0 = 15 \text{ км}$. Путь мезонов под углом θ равен

$$l(\theta) = \frac{l_0}{\cos \theta} \quad (5)$$

Воспользовавшись формулами (3) и (5), а также экспериментально определенным отношением $N(\theta)/N(0)$, с помощью формулы (4) можно получить значение τ_0 .

Нужно помнить, что проведенные расчеты дают значение τ_0 только по порядку величины, поскольку они не учитывают, как меняется вероятность распада μ - мезонов из – за уменьшения их энергии, вследствие ионизационного торможения. Такой учет усложнил бы формулы, однако изменил бы результат примерно в два раза.

2. Экспериментальная методика

В настоящей работе изучаются вторичные космические лучи, их состав и угловое распределение жесткой компоненты.

2.1. Изучение состава космических лучей

В этой части работы надо показать, что наблюдаемые на уровне моря космические лучи состоят из двух резко отличающихся по своим свойствам компонент – мягкой и жесткой и найти отношение интенсивности обеих компонент.

Работа выполняется с помощью «телескопа», состоящего из двух детекторов, включенных на совпадение (блок схема рис. 2). Принцип действия такой установки прост. Космические частицы регистрируются детекторами 1 и 2; если частица пройдет через оба детектора (частица а),

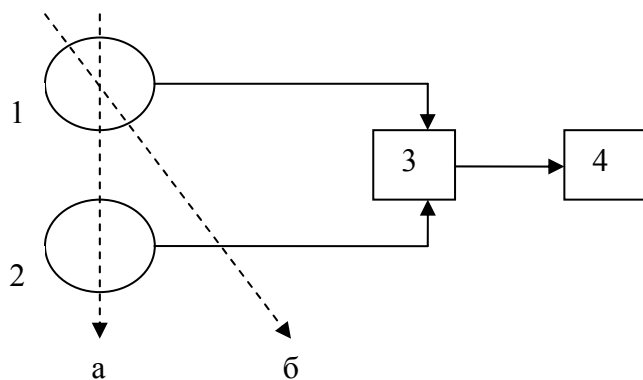


Рис. 2. Блок схема установки для изучения космических лучей 1,2 – детекторы, 3 – схема совпадений, 4- пересчетный прибор

то схема совпадений вырабатывает импульс. Если частица проходит через один из детекторов и не попадает во второй детектор (частица б), тогда схема совпадений импульс не вырабатывает. Таким образом, число импульсов, сосчитанных пересчетным прибором, должно быть равным числу

частиц, прошедших через оба детектора и зарегистрированных ими.

В отсутствии поглощающих фильтров между детекторами установка будет регистрировать частицы как жесткой, так и мягкой компоненты космического излучения. Если же между электродами помещать поглотители (например, свинец), тогда частицы мягкой компоненты будут поглощаться в поглотителе. Это приведет к заметному уменьшению скорости счета совпадений. Начиная с некоторой толщины поглотителя снижение скорости счета N от толщины поглотителя x называется кривой поглощения.

По кривой поглощения определяется интенсивности мягкой I_M и жесткой I_J компонент. Для этого прямолинейную часть, соответствующую жесткой компоненте, продолжают до пересечения с осью ординат. Это дает величину I_J (рис.3). Оставшаяся часть соответствует I_M .

Порядок выполнения работы

1. Ознакомится с приборами на рабочем столе и их работой.
2. Подключить в сеть шнур питания.(при этом на индикаторе секунды “TIME” должно установиться значение 10, а на индикаторе количество частиц “IMP” - 0000)

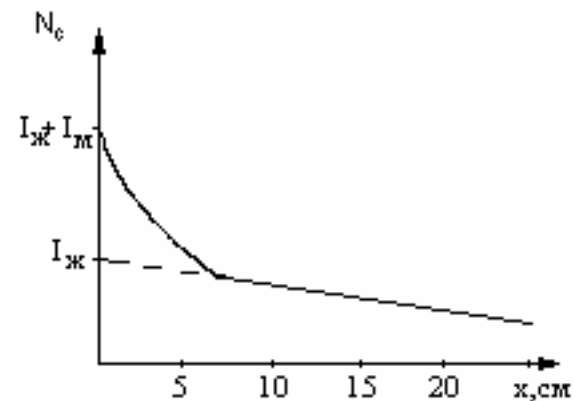


Рис. 3. Кривая поглощения космических лучей в свинцовом фильтре

3. Нажать кнопку «Сброс» при этом на индикаторах должно загореться «ноль».

4. Для установки времени нажать кнопку «Установка» и кнопками «+», «-» установить $T=999$ секунд. Повторно нажать «Установка».

5. Установить угол наклона на 0^0 (при этом между счетчиками не должно быть свинцовых фильтров).

6. Нажать кнопку «Пуск» (загорается индикатор «Измерение»), после чего должно появиться и нарастать значение индикатора количества частиц N «IMP», и когда станет $T = 999$ с. Счетчик остановится.

7. Провести серию измерений скоростей совпадений при различных толщинах свинцового фильтра. Для этого повторять п. 6 для каждой толщины свинцового фильтра. Результаты занести в таблицу.

8. Нарисовать график зависимости скорости совпадений от толщины свинцового фильтра. Графически установить интенсивность мягкой и жесткой компонент космического излучения.

x, мм.	20	40	60	80	100	120	140	160	180
N									

2.2. Изучение углового распределения жесткой компоненты космических лучей и определение времени жизни μ - мезона

В этой части работы можно воспользоваться установкой, используемой в первой части, с тем дополнением, что телескоп детекторов можно поворачивать вокруг оси на заданный угол по отношению к вертикали. Для изучения жесткой компоненты космических лучей между детекторами следует поместить свинцовый фильтр толщиной не менее 10 см. При расположении установки внутри здания роль фильтров выполняют перекрытия, и свинцовый фильтр не нужен. При помощи установки найти угловую зависимость

интенсивности жесткой компоненты космических лучей, т. е. зависимость счета совпадений N от зенитного угла θ (в том числе для $\theta = 0$).

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с приборами на рабочем столе и их работой.

2. Подключить в сеть шнур питания.(при этом на индикаторе секунды “TIME” должно установиться значение 10, а на индикаторе количество частиц “IMP” - 0000)

3. Нажать кнопку «Сброс», при этом на индикаторах должно загореться «ноль».

4. Для установки времени нажать кнопку «Установка» и кнопками «+», «-» установить $T=100$ секунд. Повторно нажать «Установка».

5. Установить угол наклона на 0^0 (при этом между счетчиками не должно быть свинцовых фильтров).

6. Нажать кнопку «Пуск» (загорается индикатор «Измерение»), после чего должно появиться и нарастать значение индикатора количества частиц N «IMP», и когда станет $T = 100$ с. Счетчик остановится.

7. Провести серию измерений скоростей совпадений при различных углах θ . Для этого повторять п. 6 для каждого угла θ .

8. В результаты измерений под углом $\theta > 50^0$ необходимо внести поправку на счет ливней N_l из стен и потолка помещения.

9. В качестве числа таких ливней N_l взять число совпадений при угле 90^0 . Результаты занести в таблицу и

построить график функций $\frac{N_{изм}(\theta) - N_l}{N_{изм}(0^0)}$, и $Cos(\theta)^{1,6}$ в зависимости от угла θ .

θ	$N_{изм}(\theta)$	$N_{изм}(\theta)$	$N_{изм}(\theta) - N_l$	$Cos(\theta)^{1,6}$

10. Полученный график сравнить с графиком функции $\text{Cos}(\theta)^{1,6}$, характеризующей уменьшение интенсивности жесткой компоненты космических лучей лишь за счет ионизационных потерь.

11. По величине $\frac{N_{изм}(\theta) - N_{л}}{N_{изм}(0^{\circ})}$, взятой из экспериментального графика для некоторого угла (например, $\theta = 60^{\circ}$), оценить значение τ_0 и погрешность полученного результата.

Контрольные вопросы

1. Состав и энергия первичных космических лучей.
2. Мягкая и жесткая компоненты космических лучей.
3. Механизм образования мезонов в космических лучах, характеристики распада π - и μ - мезонов.
4. Почему электроны и позитроны космических лучей относятся к «мягкой» компоненте и поглощаются целиком приблизительно 10 см свинца, а μ - мезоны той же энергии относятся к «жесткой» компоненте и свободно проходят через этот слой?
5. Описание экспериментальной установки и порядок выполнения работы по изучению космических лучей.

Список рекомендуемой литературы

1. Григоров Н. Л., Кондратьев М. А., Рапопорт И. Д. Космические лучи. - М.: Физматиз, 1962.
2. Вайсенберг А.О. Мю – мезон. - М. АН СССР, 1963.
3. Дороткин Н. А. Космические лучи. М., Гостехиздат, 1954.
4. Мурзин В.С., Сарычева Л. И. Космические лучи и их воздействие. - М.: Атомиздат, 1968.