

**Руководство к выполнению лабораторных работ
по ядерной физике**

Клочков М.А. Сидоров В.И.

Детектор μ -мезонов

Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского

Космические лучи

Космические лучи – поток частиц, которые приходят на Землю из межзвездного пространства. Космическое излучение подразделяют на первичное и вторичное.

Первичные космические лучи это поток частиц высокой энергии, приходящих в район Земли из мирового пространства. Первичное космическое излучение состоит из протонов (~ 90%) , α -частиц (~ 7%) и более тяжелых ядер. Основная доля первичных космических лучей имеет энергию $10^9 - 10^{10}$ эВ, также встречаются частицы с энергией до 10^{22} эВ. Частицы, энергия которых менее 10^9 эВ, отклонятся магнитным полем Земли. Основными источниками первичных космических лучей являются взрывы сверхновых звезд (галактические космические лучи) и Солнце (солнечные космические лучи). Большие энергии (до 10^{16} эВ) галактических космических лучей объясняются ускорением частиц на ударных волнах, образующихся при взрывах сверхновых звезд.

Характеристики первичных космических лучей		
	Галактические космические лучи	Солнечные космические лучи
Поток	$\sim 1 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	Во время солнечных вспышек может достигать $\sim 10^6 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$
Состав	1. Ядерная компонента - ~90% протонов, ~10% ядер гелия, ~1% более тяжелых ядер 2. Электроны (~1% от числа ядер) 3. Позитроны (~10% от числа электронов) 4. Антиадроны <1%	98-99% протоны, ~1.5% ядра гелия
Энергия	$10^6 - 10^{21}$ эВ	$10^5 - 10^{11}$ эВ

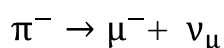
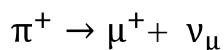
Солнечные космические лучи имеют, как правило, меньшую энергию (<400 МэВ), но весьма большую интенсивность (порядка $10^6 - 10^8$ частиц/см²сек).

Вторичное космическое излучение возникает вследствие прохождения космических лучей через атмосферу Земли.

На высоте порядка нескольких десятков километров ($\sim 10^6$ см) от поверхности Земли в результате взаимодействия первичных космических лучей (в основном протонов) с ядрами атомов атмосферы образуются новые частицы:

π^- - мезоны, K^- - мезоны, нуклон – антинуклонные пары, гипероны и т.д. Как правило, одна из вторичных частиц, того же типа, что и первичная, получает, в среднем, около 50% начальной энергии (так называемый эффект "лидерования").

Поэтому такая частица может еще несколько раз провзаимодействовать в атмосфере. Первичный нуклон с энергией $> 10^{12}$ эВ может испытать до десятка таких последовательных столкновений с ядрами атомов воздуха. Рожденные в этих взаимодействиях заряженные π^\pm - мезоны затем распадаются, или могут сами провзаимодействовать с ядрами воздуха. Время жизни заряженных пионов – $\tau \sim 2 \cdot 10^{-8}$ с, а распадаются они с образованием μ -мезонов и нейтрино:



Нейтральные π^0 - мезоны из-за малого времени их жизни $\tau \sim 10^{-16}$ с практически сразу распадаются на два гамма-кванта ($\pi^0 \rightarrow 2\gamma$), которые образуют электромагнитный каскад состоящий из фотонов, электронов и позитронов. Энергия, которую получает эта пара квантов, много больше массы покоя нейтрального π^0 - мезона (~ 135 МэВ), и, следовательно, для таких γ – квантов наиболее вероятным процессом взаимодействия со средой будет образование электрон –позитронных пар (e^+e^-).

Электроны, в свою очередь, за счет тормозного излучения на ядрах атомов воздуха, дают опять высокоэнергичные γ -кванты, которые превращаются опять в

e^+e^- пару и так далее. Таким образом в воздухе появляется электронно-фотонный каскад.

В атмосфере развивается электромагнитный каскад, а также адронный каскад (рис.1).

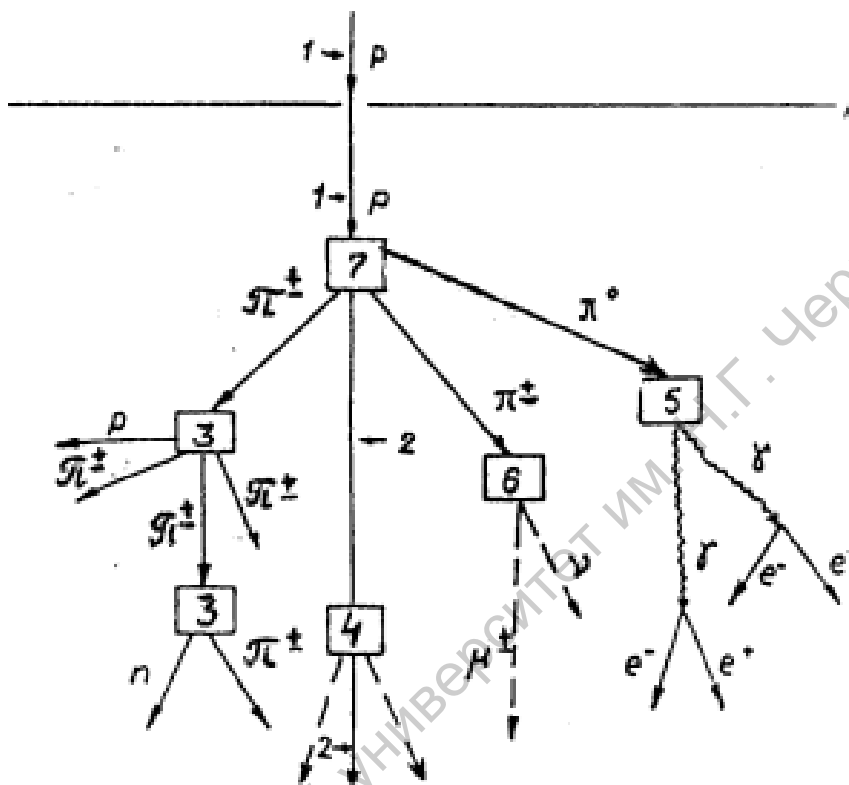


Рис.1 Развитие адронного каскадного ливня от первичной космической частицы в атмосфере:

А – верхняя граница атмосферы, 1 – первичная частица (протон), 2 – вторичная лидирующая частица (нуклон), 3 – ядерные взаимодействия пионов, 4 – ядерные взаимодействия без образования релятивистских частиц, 5 – распад нейтрального пиона (возникновение электромагнитного каскада), 6 – распад заряженных пионов (возникновение мюонной компоненты), 7 – взаимодействие высокоэнергичных частиц с ядрами атомов воздуха. Космическое излучение, приходящее в нижнее слою атмосферы, принято делить на мягкую (сильное поглощение) и жесткую (слабое поглощение) компоненты.

Компонента электромагнитного каскада состоящая из электронов, позитронов и фотонов имеет относительно большое сечение поглощения. Оно

зависит от порядкового номера Z вещества поглотителя. Эти частицы почти полностью поглощаются десятисантиметровым слоем свинца.

μ - мезоны слабо поглощаются веществом, приблизительно одинаково веществами с разными Z .

Отличие проникающей способности частиц обеих компонент объясняется тем, что электроны и позитроны имеют самую маленькую массу из заряженных частиц. При взаимодействии с веществом они тратят большую часть своей энергии на излучение, а потери мюонов на излучение сравнительно малы так как μ -мюон примерно в 207 раз тяжелее электрона.

Каскадные процессы являются причиной появления широких атмосферных ливней, мюонов и электронов.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Установка, с помощью которой изучается состав и интенсивность различных компонент космических лучей, состоит из двух рядов газоразрядных счетчиков Гейгера, являющихся детекторами излучения (рис. 2 -1).

Между рядами счетчиков можно размещать пластины свинцового фильтра. Установка регистрирует только такие события, когда одна и та же частица проходит через оба ряда счетчиков. Это осуществляется использованием специальной электронной схемы совпадений (рис. 2 -2). Для этого каждый ряд счетчиков подключен к своему входу схемы совпадений. Схема совпадений срабатывает тогда и только тогда, когда одна и та же частица пройдет через два ряда счетчиков. Выходной импульс со схемы совпадений поступает для регистрации на счетное устройство (рис. 2 -3).

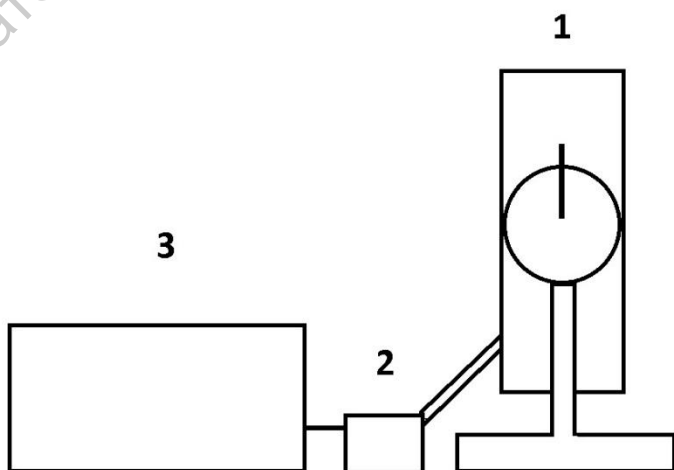


Рис.2. Общая схема установки

Задание 1. Изучение состава космических лучей.

В работе необходимо найти отношение интенсивностей электронно-фотонной компоненты и μ -мезонной компоненты.

Установка регистрирует частицы как электронно-фотонной компоненты так и μ -мезонной компоненты космического излучения. Если между детекторами поместить поглощающий фильтр (свинец), то электроны, позитроны и фотоны будут сильнее поглощаться в фильтре, чем μ -мезоны. При толщине поглотителя более 10 см регистрируется практически только μ -мезоны космических лучей. Зависимость скорости счета N от толщины поглотителя d называется *кривой поглощения*.

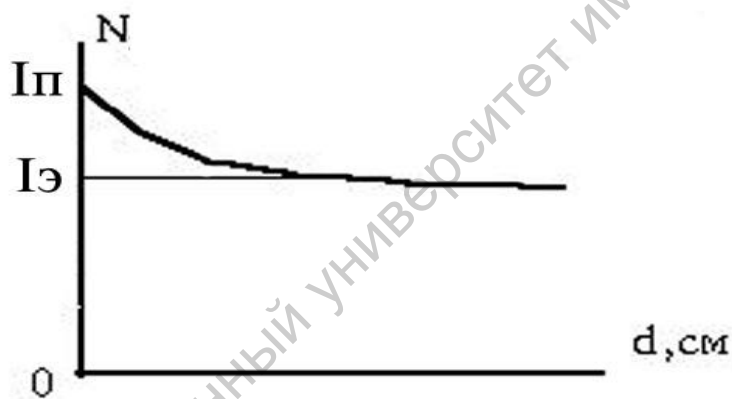


Рис.3 Кривая поглощения космических лучей фильтром.

По кривой поглощения космических лучей определяются полная интенсивность I_p и интенсивность мезонной I_m компоненты. I_ε - интенсивность электронно-фотонной компоненты

$$I_p = I_m + I_\varepsilon$$

В работе исследуется прохождение космических лучей через вещество – свинец.

Измерения проводятся при вертикальном падении лучей, соответствующем максимуму интенсивности космического излучения. Статистическая ошибка должна составлять не менее 3%.

Построить кривую поглощения (Рис.3). Найти отношение I_ε/I_m .

Задание 2. Изучение углового распределения интенсивности космического излучения

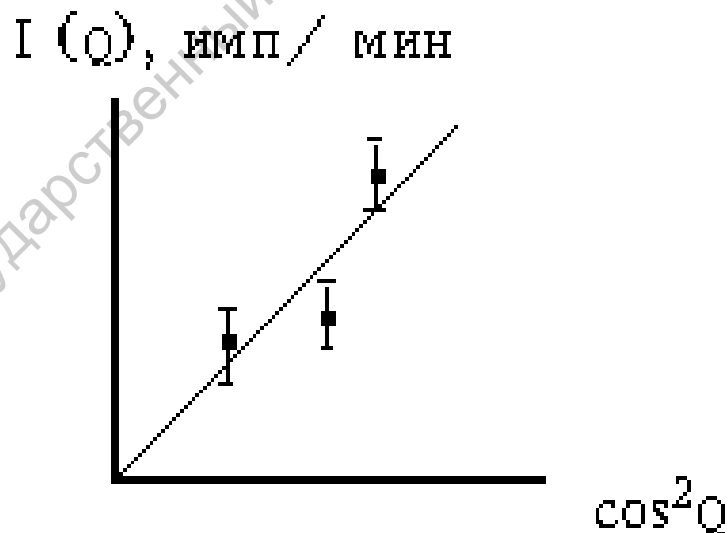
В работе необходимо получить зависимость интенсивности μ - мезонов космических лучей от угла наблюдения Θ .

μ - мезоны, идущие под углом Θ к вертикали, проходят в атмосфере путь, в $1/\cos\Theta$ раз больший, чем мезоны, идущие по вертикали, поэтому вероятность их распада больше и больше слой проходимого воздуха. А значит, растет их поглощение и, следовательно, уменьшается их интенсивность с увеличением угла Θ . В работе предлагается проверить справедливость формулы зависимости интенсивности падающих космических лучей от угла наблюдения Θ .

$$I = I_0 \cos^2\Theta,$$

где I_0 - интенсивность вертикально падающих лучей ($\Theta = 0$), Θ - зенитный угол, отсчитываемый от вертикали

Построить график зависимости интенсивности космических лучей I от $\cos^2\Theta$ с указанием погрешности (Рис.4).



Список литературы

1. Мухин К.Н. Экспериментальная ядерная физика. М.: Энергоатомиздат, 1993.
2. Мурзин В.С. Введение в физику космических лучей. М.: Атомиздат, 1979.
3. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Учеб.пособие: Для вузов. В 5 т. Т.V. Атомная и ядерная физика – 2-е изд.,стереот. – М.:ФИЗМАТЛИТ; изд-во МФТИ, 2002, - 784с. С.415,736-742
4. Ракобольская И.В. Ядерная физика. Изд.3, перераб. 2014

Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского