

Вопрос по выбору

Абрамова Татьяна

21 сентября 2019 г.

Тема: Исследование поглощения вторичного космического излучения в веществе.

1 Космические лучи

Космическими лучами называют элементарные частицы и ядра высоких энергий, источниками которых служит Солнце и другие, более удаленные, астрономические объекты. Частицы, попадающие в атмосферу земли принято называть первичными, а результаты взаимодействия этих частиц с атмосферой земли - вторичными.

Впервые указание на возможность существования ионизирующего излучения внеземного происхождения было получено в начале XX века в опытах по изучению проводимости газов. Обнаруженный спонтанный электрический ток в газе не удавалось объяснить ионизацией, возникающей от естественной радиоактивности Земли. Наблюдаемое излучение оказалось настолько проникающим, что в ионизационных камерах, экранированных толстыми слоями свинца, все равно наблюдался остаточный ток. В 1911–1912 годах В. Гессом был проведен ряд экспериментов с ионизационными камерами на воздушных шарах. Он обнаружил, что излучение растет с высотой, в то время как ионизация, вызванная радиоактивностью Земли, должна была бы падать с увеличением высоты.

Анализ химического состава первичных космических лучей показывает, что они состоят в основном из протонов ($> 90\%$), α -частиц (7%), а также тяжелых ядер, электронов, позитронов, нейтрино и γ -квантов. Энергии частиц достигают значений $10^{19} - 10^{20}$ эВ (Рис. 1). Наблюдение частиц больших энергий считается невозможным из-за эффекта Грейзена-Зацепина-Кузьмина [1, 2].

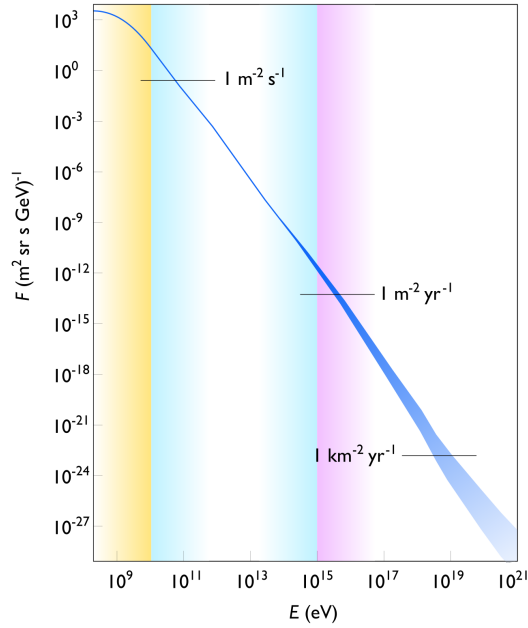
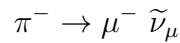
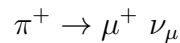
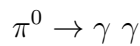


Рис. 1: Энергетический спектр первичных космических лучей. Ширина кривой определяет погрешность измерения.

Состав вторичных космических лучей определяется реакциями, происходящими в атмосфере Земли. Для протонов средний пробег до ядерного взаимодействия примерно равен 80 г/см^2 , что составляет $1/13$ часть толщи атмосферы, поэтому протоны успевают несколько раз вступить во взаимодействие. В результате взаимодействия первичного излучения с ядрами атомов преимущественно происходит рождение пионов. Распад заряженных пионов приводит к образованию мюонов.



Распад нейтральных пионов – к образованию мягкой (электронно-фотонной) компоненты.



Таким образом, первичное космическое излучение практически не достигает поверхности Земли. Вторичные лучи принято разделять на две компоненты: жесткую и мягкую.

Жесткая (высокоэнергичная) компонента главным образом состоит из мюонов. Мюоны обладают высокой проникающей способностью и доходят до земли (и даже глубоко под землю), теряя малую часть своей

энергии. В результате траектории этих частиц можно считать прямолинейными и не зависящими от вещества, через которое они проходят. Поток мюонов зависит от угла, под которым они падают из-за разной толщины атмосферы. Для описания угловой зависимости потока мюонов используют эмпирическую формулу:

$$\Phi(\theta) = \Phi_0 \cos^2(\theta), \quad (1)$$

где θ - угол между направлением мюона и вертикалью. К жесткой компоненте можно также отнести высокоэнергичные гамма-кванты и нейтрино (при этом гамма-кванты невозможно увидеть на схеме совпадения, а нейтрино вовсе не регистрируются без использования мега-установок).

Мягкая компонента главным образом состоит из низкоэнергетичных электронов и гамма-квантов. Пробег этих частиц сравнительно мал, поэтому регистрируются частицы, родившиеся в непосредственной близости от детектора. Энергии таких частиц редко достигают 100 МэВ (см. Рис. 3), а направление движения при небольших отклонениях от вертикали можно считать изотропным.

В данной работе изучается взаимодействие вторичного космического излучения со свинцом. Рассмотрим взаимодействие для мягкой и жесткой компонент излучения отдельно.

Для мюонов в данном диапазоне энергий потери на тормозное излучение малы (т.к. потери $\sim \frac{1}{m^2}$), большая часть энергии уходит на ионизацию вещества.

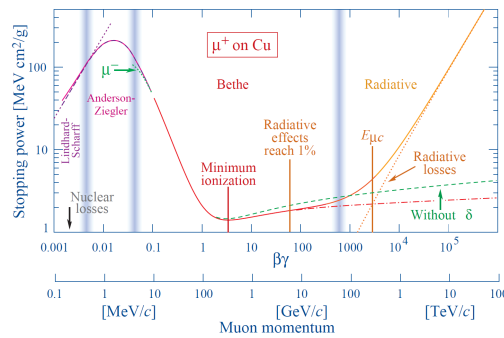


Рис. 2: Зависимость потерь энергии на единицу длины (с учетом эффекта плотности) от энергии мюона.

При таких энергиях мюон является минимально ионизирующей частицей. Тогда потери будут примерно постоянными (Рис. 2)

$$-\frac{dE}{dx} \approx 2 \frac{\text{МэВ}}{\Gamma \cdot \text{см}^{-2}}$$

Для электронов преобладают потери за счет тормозного излучения (Рис. 3, 4).

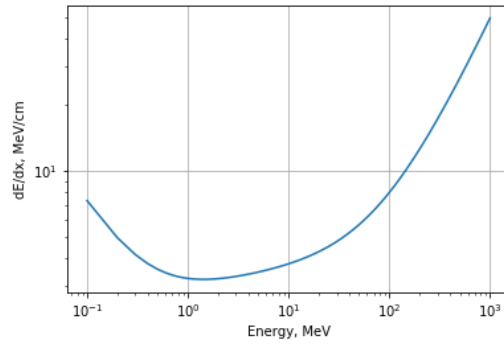


Рис. 3: Зависимость потерь энергии электрона на единицу длины пробега в свинце от энергии.

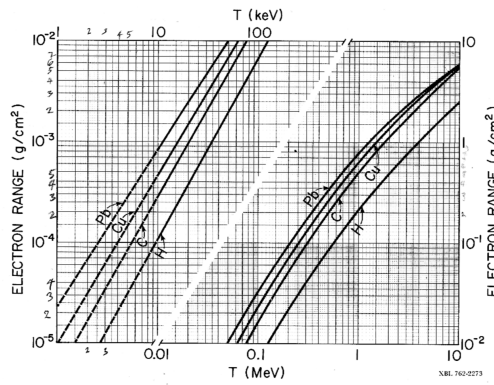


Рис. 4: Пробег электронов в различных веществах.

Для фотонов преобладает процесс рождения пар (Рис. 5).

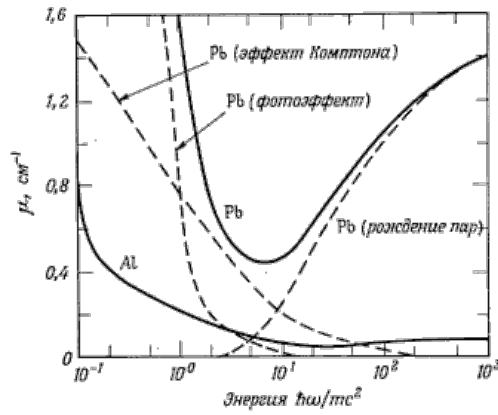


Рис. 5: Вклад различных процессов в сечение поглощения γ -квантов в свинце.

Зависимость числа импульсов за определенный промежуток времени (рекомендуемое время измерения $t = 10$ мин) от толщины поглотителя $N(L)$ хорошо описывается функцией

$$N = N_0 \cdot e^{-\frac{L}{\lambda}} + C \quad (2)$$

где λ - длина пробега ($\text{г}/\text{см}^2$), $L = \rho \cdot l$ - толщина поглотителя ($\text{г}/\text{см}^2$), ρ - плотность поглотителя ($\text{г}/\text{см}^3$), l - толщина поглотителя (см). Отсюда можно найти параметр λ , по нему - среднюю энергию $E_{\text{ср}}$ из графиков Рис. 6.

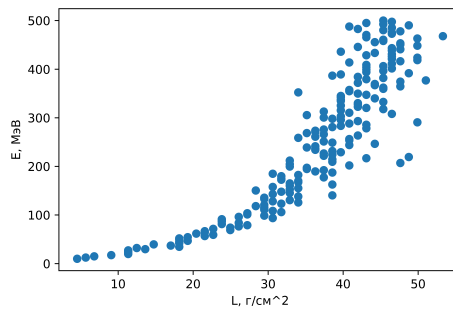


Рис. 6: Зависимость длины пробега электронов в свинце от энергии.

2 Установка

Установка состоит из двух счетчиков Гейгера-Мюллера, набора свинцовых пластин, которые можно вдвигать в зазор между счетчиками и блока управления и индикации. Установка может поворачиваться вокруг оси крепления его к стойке на угол, считываемый на круговом лимбе прибора.

Блок управления и индикации содержит:

1. Таймер с максимальным временем измерения 999 с
2. Высоковольтный выпрямитель для питания счетчиков
3. Схема совпадений, которая формирует сигнал только если сигналы с двух счетчиков совпадают во времени с некоторой точностью ($t \approx 1\text{мкс}$)
4. Блок пересчета импульсов

3 Результаты

Измерения проводились на трех установках сразу, две из которых были повернуты на угол $\theta = 0^\circ$, третья - на угол $\theta = 15^\circ$ к вертикали. Измерения для числа пластин 4, 7, 8 проводились по два раза, так как для данного количества пластин первое измерение показало результаты, отличные от ожидаемых. Полученные данные для трех установок отдельно представлены на Рис. 7 (установка, повернутая на угол - красный цвет). Видно, что для каждой установки отдельно точки не ложатся на кривую вида (2). Для повернутой на 15° к вертикали установки количество импульсов в среднем меньше, чем на двух других, что подтверждает уравнение (1).

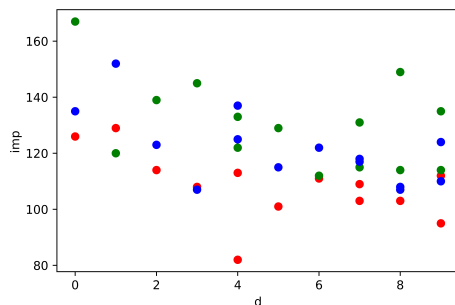


Рис. 7: Измерения для трех установок отдельно ($\theta = 15^\circ$ – красного цвета).

На Рис. 8 представлен график зависимости суммарного числа импульсов со всех трех установок от толщины поглотителя.

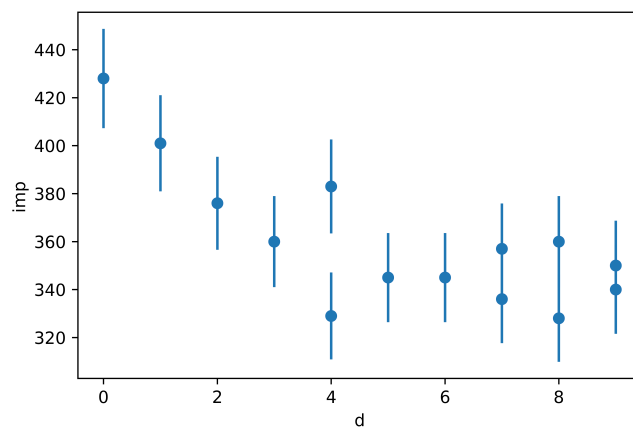


Рис. 8: Зависимость суммарного числа импульсов со всех трех установок от толщины поглотителя

Усреднение для каждой точки по всем измерениям представлено на графике Рис. 9. Здесь точки ложатся на кривую вида (2).

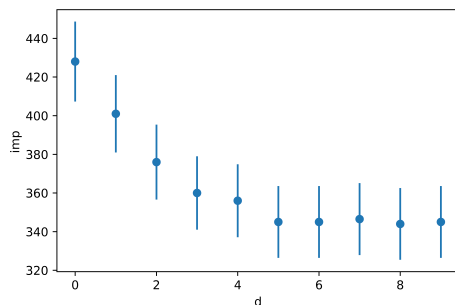


Рис. 9: Усредненное для каждой точки количество импульсов для разного числа свинцовых пластин.

Аппроксимация данных кривой (2) (Рис. 10) дает параметры

$$N_0 = 89 \pm 3$$

$$\lambda = 45 \pm 4 \text{ г/см}^2$$

$$C = 341 \pm 2$$

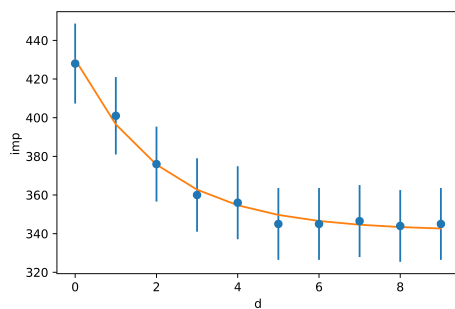


Рис. 10: Аппроксимация зависимости суммарного числа импульсов с трех установок, усредненного по всем измерениям для различного числа пластин поглотителя.

Средняя энергия частиц:

$$E_{\text{ср}} = 400 \text{ МэВ}$$

Список литературы

- [1] Зацепин Г. Т., Кузьмин В. А. *О верхней границе спектра космических лучей*. Письма в ЖЭТФ, 1966, Т.4, № 3, 114—117.
- [2] Greisen, Kenneth. *“End to the Cosmic-Ray Spectrum?”*. Physical Review Letters. 16 (17): 748—750. DOI:10.1103/PhysRevLett.16.748.