

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Физтех-школа электроники, фотоники и молекулярной физики

Лабораторная работа 5.7.1
Измерение углового распределения жесткой
компоненты космического излучения

Салтыкова Дарья

Б04-105

Допуск _____

Выполнение _____

Сдача _____

1 Введение

Цель работы: с помощью телескопа и двух сцинтилляторов измеряется угловое распределение жесткой компоненты космического излучения и на основе полученных данных оценивается время жизни мюона.

2 Теоретические сведения

Космические лучи — это стабильные частицы и ядра атомов, зародившиеся и ускоренные до больших энергий вне Земли, изотропно падающие на границу земной атмосферы (первичное космическое излучение), а также различные частицы, рожденные ими при взаимодействии с ядрами атомов воздуха (вторичное космическое излучение).

Первичное космическое излучение — протоны (90%) и α частицы (10%). Для протонов сечение взаимодействия с ядрами атомов, содержащихся в воздухе, близко к геометрическому и равняется

$$\sigma_{p\ air} \simeq \pi R^2 = \pi(R_0 A^{\frac{1}{3}}) = 300\text{мб}$$

Тогда слой атмосферы при таких сечениях есть $8 \div 12$ свободных пробегов протонов.

Вторичные частицы включают в себя пионы, каоны и гипероны. Для пиона время жизни $\tau_0 = 2,5 \cdot 10^{-8}$ и схема распада

$$\pi^{\pm} \rightarrow \mu^{\pm} + \nu$$

Но также возможно взаимодействие с ядрами атомов воздуха. Какое из двух событий произойдет зависит от плотности атмосферы. Пробег для распада:

$$L_{\text{расп}} = \beta c \tau_0 \gamma = \frac{c \tau_0 E_{\pi}}{m_{\pi} c^2}$$

А для взаимодействия:

$$L_{\text{вз}} = \frac{1}{\sigma_{\pi\ air} n} = \frac{A}{\sigma_{\pi\ air} \rho N}, \quad \sigma_{\pi\ air} \simeq \frac{2}{3} \sigma_{p\ air} \simeq 200\text{мб}$$

Тогда вероятность взаимодействия равна вероятности распада при

$$E_{\pi} = \frac{A m_{\pi} c^2}{\sigma_{\pi\ air} \rho N c \tau_0}$$

Мюоны же преимущественно вызывают ионизацию воздуха. Для прохождения всей атмосферы энергия должна составлять порядка 2ГэВ. Распад мюона происходит со временем жизни $\tau_0 = 2 \cdot 10^{-6}$ по каналам:

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \tilde{\nu}_e + \nu_{\mu}, \quad \mu^- \rightarrow e^- + \tilde{\nu}_{\mu} + \nu_e$$

Время жизни увеличивается $\tau = \tau_0 \gamma$. При этом распадный пробег мюона с энергией 2ГэВ есть

$$L_{\text{расп}} = \beta c \tau_0 \gamma \approx 12\text{км}$$

Также в сильных взаимодействиях рождаются нейтральные пионы, распадающиеся на два гамма-кванта. Их время жизни мало и они не успевают взаимодействовать с атомными ядрами. Гамма кванты же в поле атомных ядер рожают электрон-позитронные пары.

Процесс продолжается лавинообразно и один нейтральный пион может дать начало лавине, число частиц в которой достигает 10^5 . Как следствие одна частица с энергией 10^{20} эВ дает на уровне моря лавину с числом частиц порядка 10^{10} .

Исследования показывают, что интенсивность распределения космических лучей резко зависит от направления, увеличиваясь при переходе к вертикальному. При этом по вертикали мюоны проходят порядка $L_0 \simeq 15km$. Тогда

$$\Delta L = L_0 \left(\frac{1}{\cos \theta} - 1 \right)$$

$$P(\Delta L) = 1 - \exp(-\Delta L/L_{\text{расп}}), L_{\text{расп}} = c\tau$$

А также число дошедших мюонов уменьшается за счет поглощения в веществе по закону

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

А из-за распада мюонов

$$P_2(\theta) = \exp(-L(\theta)/L)$$

Тогда отношение числа мюонов, идущих под зенитным углом θ , к числу вертикально падающих есть

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

Учитывая $L(\theta) = L_0/\cos \theta$, получаем оценку на время жизни τ_0 .

3 Экспериментальная установка

Установка регистрирует те частицы, которые летят внутри обозначенного телесного угла. Схема регистрирует истинные и случайные совпадения.

Число случайных совпадений $N = 2\tau N_1 N_2$, где N_1, N_2 — число импульсов за единицу времени от каждого счетчика.

Величину разрешающего времени стараются максимально уменьшить. Для данной геометрии $\tau \simeq (1 \div 2) \cdot 10^{-6}c$.

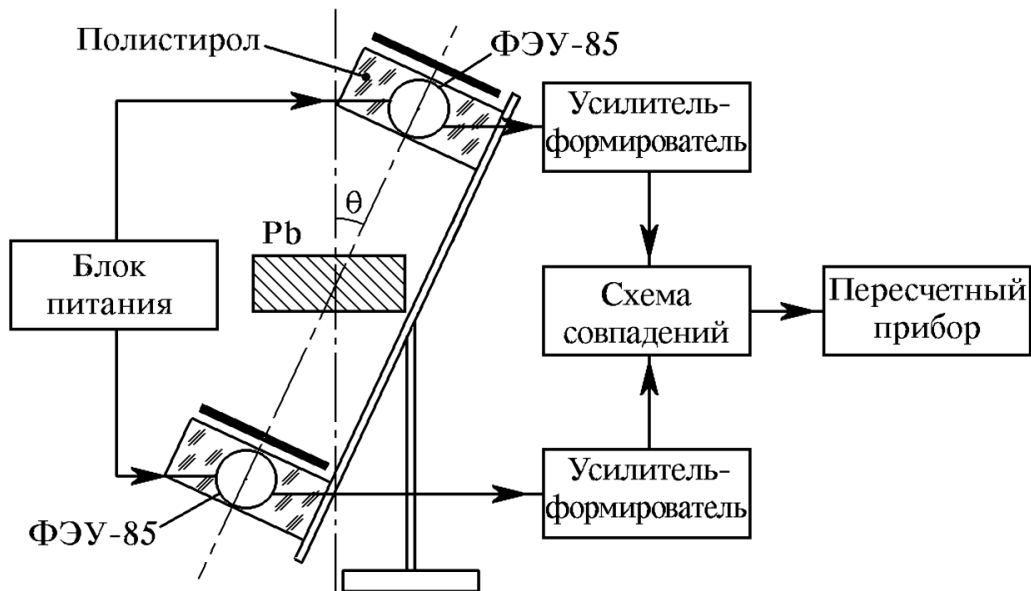


Рис. 1: Экспериментальная установка

4 Ход работы

1. Проведем оценку фонового излучения.

$$I_{\text{ф}} = 0,081 \pm 0,004, (\varepsilon = 5\%)$$

2. **Определим толщину свинцового фильтра**, который следует установить между счетчиками телескопа, чтобы регистрировать только жесткую компоненту космического излучения.

Измерим зависимость скорости счета N от толщины поглотителя x . I - частота двойных совпадений I^* с учетом фона и случайных совпадений (см. ниже).

$t, \text{с}$	N	$x, \text{мм}$	$I^*, 1/\text{с}$	$I, 1/\text{с}$
600	378	2	0,630	0,549
	366	4	0,610	0,529
	357	12	0,595	0,514
	354	20	0,589	0,508
	346	30	0,577	0,495
	342	40	0,569	0,488

Оценим число случайных совпадений.

$$I_{\text{случ}} = 2\tau I_1 I_2 = 2\tau \frac{N_1 N_2}{T^2}$$

Для проведенного эксперимента $\tau = 10^{-7} \text{с}$, $T = 300 \text{с}$, $N_1 = 3328$, $N_2 = 3489$. Отсюда $I_{\text{случ}} \approx 2,4 \cdot 10^{-4} 1/\text{с}$.

Построим кривую поглощения.

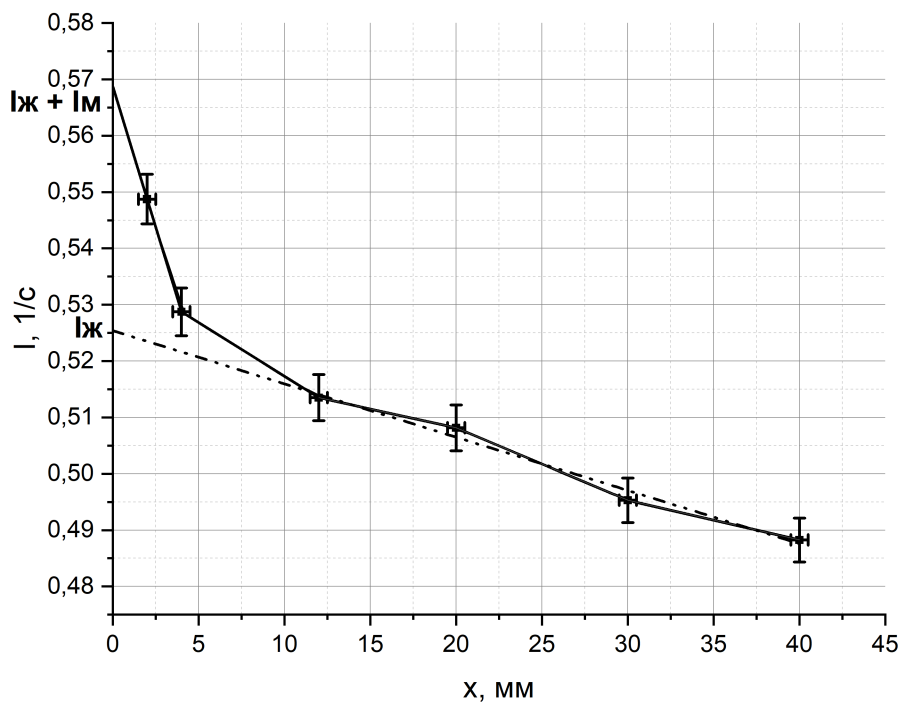


Рис. 2: Кривая поглощения

Определим интенсивность мягкой $I_{\text{м}}$ и жесткой $I_{\text{ж}}$ компонент.

$$I_{\text{м}} = (0,0432 \pm 0,0002) \text{ 1/c}$$

$$I_{\text{ж}} = (0,525 \pm 0,002) \text{ 1/c}$$

3. Изучим угловое распределение жесткой компоненты космических лучей. Для этого необходимо поместить между детекторами свинцовый фильтр толщиной, выбранной в соответствии с измеренной кривой поглощения. Однако во время выполнения работы выяснилось, что при наличии свинцовых пластин установка не выдерживает поворот на нужный угол, поэтому измерения проводились без них. Таким образом, отсеивание мягкой компоненты произведено не было.

Измерим угловую зависимость интенсивности излучения I в диапазоне от 0 до 70 градусов.

$t, \text{с}$	$\theta, ^\circ$	$\ln(\cos\theta)$	N	$I^*, \text{1/c}$	$I, \text{1/c}$	I/I_0	$\ln(I/I_0)$
600	0	0	528	0,880	0,799	1	0
	20	-0,062	424	0,706	0,625	0,783	-0,245
	30	-0,144	396	0,660	0,579	0,725	-0,322
	50	-0,442	312	0,520	0,439	0,550	-0,598
	70	-1,073	248	0,413	0,332	0,415	-0,879

Построим график зависимости $\ln I$ от $\ln \cos \theta$.

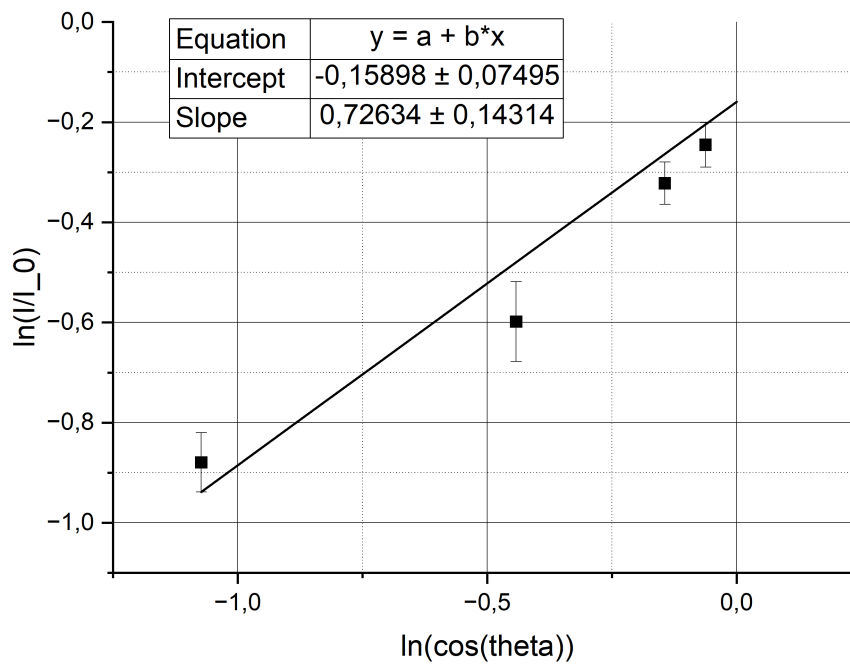


Рис. 3: $\ln(I/I_0)(\ln \cos \theta)$

Определим показатель экспоненты n в угловой зависимости $I = I_0 \cos^n \theta$. $n = 0,72 \pm 0,14$.

Оценим время жизни мюона. Из графика (для $\theta = 50^\circ$): $\frac{I(\theta)}{I(0)} = 0,619$.

Из теории время жизни мюона:

$$\tau_0 = \frac{L_0(\cos \theta - 1)}{\cos \theta (\ln \frac{N(\theta)}{N(0)} - 1,6 \ln \cos \theta)} \cdot \frac{m_\mu c^2}{\beta c E_\mu}.$$

Учитывая табличные значения полной энергии, энергии покоя и величины свободного пробега мюона.

$$\tau_0 = 1,05 \pm 0,12 \text{ мкс } (\varepsilon = 9\%)$$

5 Вывод

В ходе работы было проведено измерение угловой зависимости интенсивности космического излучения (без исключения мягкой компоненты) и оценено время жизни мюона.

По кривой поглощения были определены интенсивности мягкой и жесткой компонент космического излучения $I_{\text{м}} = (0,0432 \pm 0,0002) \text{ 1/с}$, $I_{\text{ж}} = (0,525 \pm 0,002) \text{ 1/с}$.

Также был получен показатель $n = 0,72 \pm 0,14$ теоретически предсказанной зависимости $I = I_0 \cos^n \theta$. Значение не совпадает с теоретическим $n_{\text{теор}} = 1,6$, вероятно, из-за влияния мягкой компоненты.

На последнем этапе работы было оценено время жизни мюона: $\tau_0 = 1,05 \pm 0,12 \text{ мкс}$. Табличное значение $\tau_{0\text{теор}} = 2,2 \text{ мкс}$. Проведенные расчеты дают значение τ_0 только по порядку величины, поскольку они не учитывают как меняется вероятность распада мюонов из-за уменьшения их энергии вследствие ионизационного торможения.