

## Работа 7.1

### Измерение углового распределения жесткой компоненты космического излучения Селюгин Михаил, 876

#### 1 Теория вопроса

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  $\alpha$  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:

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

Тогда вероятность взаимодействия равна вероятности распада при

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

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  $\theta$ , к числу вертикально падающих есть

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

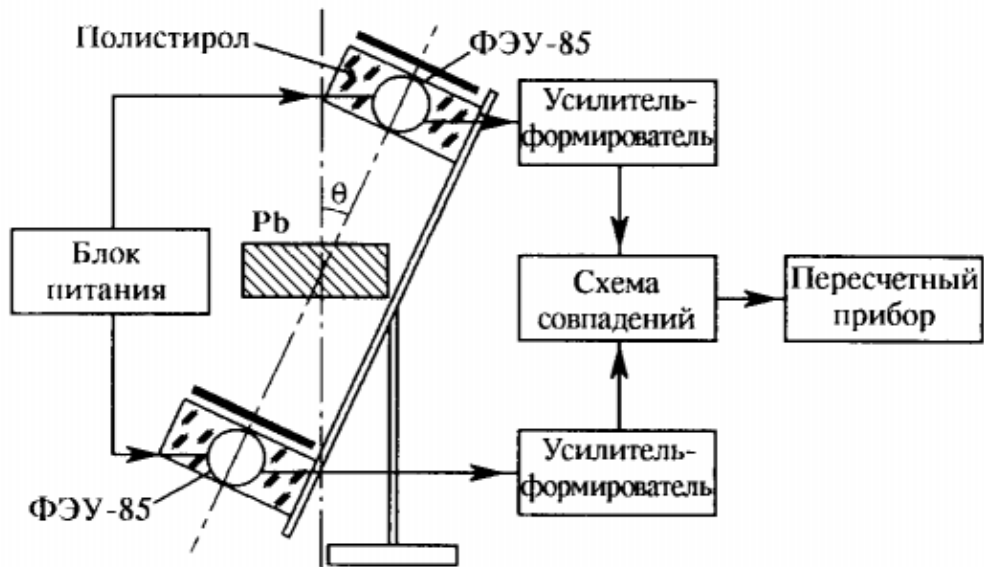
Учитывая  $L(\theta) = L_0/\cos \theta$ , получаем оценку на время жизни  $\tau_0$ .

## 2 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  $\tau \simeq (1 \div 2) \cdot 10^{-6}c$ .



Р и с. 1. Схема установки для изучения углового распределения жесткой компоненты космических лучей

### 3 Результаты измерений

1. Измерение угловой зависимости интенсивности жесткой компоненты.
2. Оценка времени жизни мюона.

## 4 Обработка результатов

1. Для обработки результатов введем следующие обозначения:

- $\theta$  — угол наклона телескопа;
- $N$  — показания счетчика;
- $I_{\text{ф}}$  — частота фонового излучения;
- $I_{\text{п}}$  — частота двойных совпадений;
- $I$  — частота двойных совпадений с учетом фона.

Внесем данные в таблицу.

$\theta, \text{grad}$	$\ln(\cos\theta)$	$t, \text{с}$	$N, \text{частиц}$	$I_{\text{ф}}, \text{Гц}$	$I_{\text{п}}, \text{Гц}$	$I, \text{Гц}$	$I/I_0$	$\ln(I/I_0)$
0	0,000	600	390	0,035	0,650	0,615	1,000	0,000
10	-0,015	600	318	0,035	0,530	0,495	0,805	-0,217
30	-0,144	600	219	0,035	0,365	0,330	0,537	-0,623
45	-0,347	600	159	0,035	0,265	0,230	0,374	-0,984
70	-1,073	600	65	0,035	0,108	0,073	0,119	-2,127

Таблица 1. Данные для получения зависимости частоты двойных совпадений от угла наклона телескопа с учетом фонового излучения.

## 2. Оценка фона

Проведем оценку фонового излучения исходя из показателей счетчика при угле наклона телескопа  $\theta = 90^\circ$  и получим

$$I_{\text{ф}} = 0,035 \pm 0,002 (\varepsilon = 5\%)$$

### 3. По таблице 1 построим график

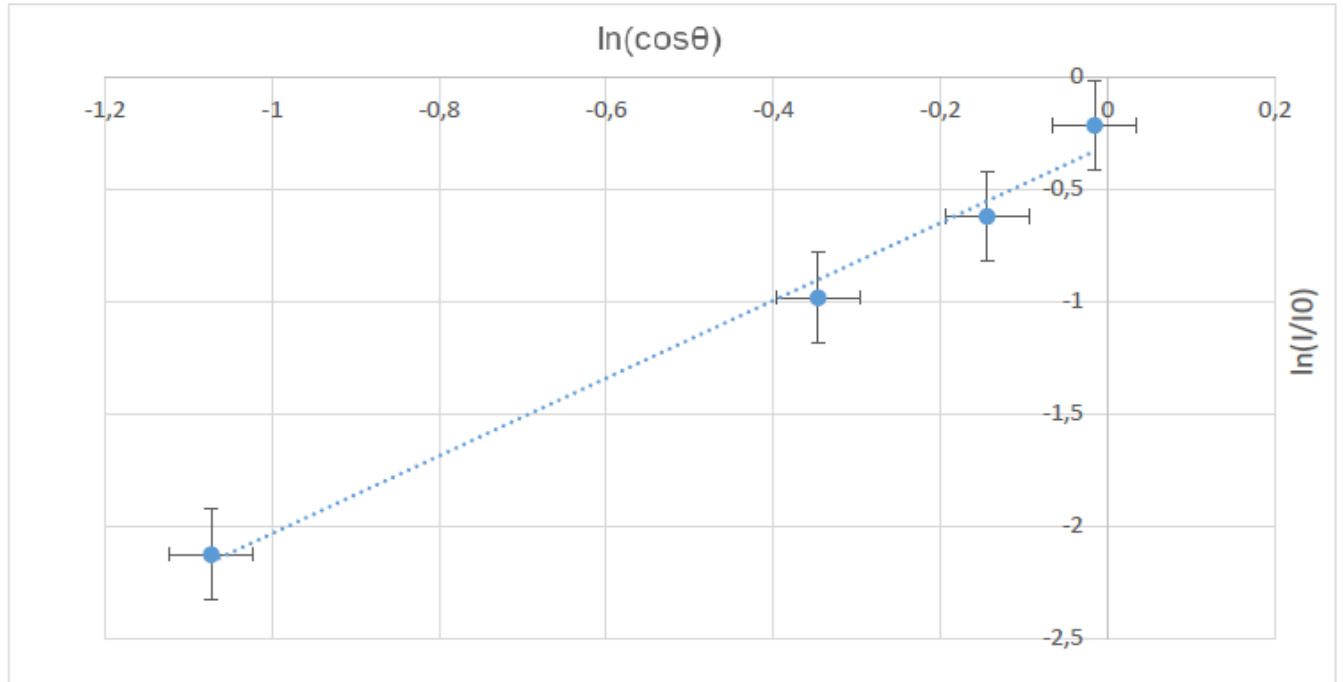


Рис. 1. График зависимости частоты двойных совпадений  $I$  от угла наклона телескопа в логарифмическом масштабе -  $\ln(I/I_0)$  от  $\ln(\cos\theta)$

Теоретически была выведена зависимость

$$I = I_0 \cos^n \theta$$

В логарифмическом масштабе угол наклона как раз равняется показателю степени  $n$ . С помощью МНК был определен угол наклона линии тренда

$$n = 1,71 \pm 0,07 (\varepsilon = 4\%)$$

**4. Оценка числа случайных совпадений** Число случайных совпадений определяется формулой

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

Для проведенного эксперимента  $\tau = 10^{-7} \text{ с}$ ,  $T = 300 \text{ с}$ ,  $N_1 = 3175$ ,  $N_2 = 2961$ .

Отсюда,  $I_{rand} \approx 2 \cdot 10^{-5}$ , что на несколько порядков меньше величины измеряемых в эксперименте двойных совпадений.

## 5. Оценка времени жизни мюона

Из теории время жизни мюона:

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

Проведем оценку для  $45^\circ$ , учитывая табличные значения полной энергии, энергии покоя и величины свободного пробега мюона.

$$\tau_0 = 6,2 \pm 0,6 \text{ мкс } (\varepsilon = 8\%)$$

## 6. Оценка погрешностей

1. Для построения графика.

$\delta\theta = 1^\circ$  - погрешность измерения угла наклона. Тогда систематическая погрешность  $\delta(\ln \cos \theta) = \tan \theta \cdot \delta\theta \leq 0.05$ . Исходя из этого, возьмем погрешность по оси абсцисс равной 0,05

Случайную погрешность измерения фона находим из того, что счетчик при  $\theta = 90^\circ$  зафиксировал  $N = 21$  двойное совпадение

$$\varepsilon_{I_\Phi} = \frac{1}{21} \approx 0,05$$

Тогда возьмем  $\varepsilon_I = 5\%$  и рассчитаем погрешность по оси ординат как

$$\varepsilon_{\frac{I}{I_0}} = \sqrt{\varepsilon_I + \varepsilon_{I_0}} = \sqrt{2\varepsilon_I} \approx 7\% \Rightarrow \delta \frac{I}{I_0} \leq 0,07$$

$$\delta(\ln \frac{I}{I_0}) = \delta \frac{I}{I_0} \frac{I_0}{I} \leq 0,2$$

2. Для оценки времени жизни мюона.

Воспользуемся приведенными выше выкладками и рассчитаем погрешности  $\delta(\ln \frac{I}{I_0})$ ,  $\delta(\ln \cos \theta)$  в точке  $\theta = 60^\circ$ .

$$\delta(\ln \frac{I}{I_0}) = 0,06$$

$$\delta(\ln \cos \theta) = 0,03$$

Тогда для их суммы  $\delta_+ = 0,11$ ,  $\varepsilon_+ = 5\%$  и для итоговой погрешности получаем

$$\varepsilon_\tau = \sqrt{2\varepsilon_{\cos}^2 + \varepsilon_+^2} \approx 10\%$$

## 5 Вывод

В данной работе было изучено угловое распределение компоненты космического излучения. Теоретически была предсказана зависимость  $I = I_0 \cos^n \theta$ , а в ходе эксперимента был также получен показатель  $n = 1,71 \pm 0,07$ . Причем точки с хорошей точностью легли на прямую, хотя не производилось отсеивания мягкой компоненты космического излучения. Из этого можно сделать вывод, что в условиях эксперимента вклад мягкой компоненты незначителен. Также была проведена оценка вклада случайных совпадений и было получено, что он на порядок меньше величины фиксируемых двойных совпадений.

На последнем этапе работы было оценено время жизни мюона:  $\tau_0 = 6,2 \pm 0,6$  мкс. Результат по порядку величины совпал с табличным значением.