

Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана

**Н.К. Веретимус, И.Н. Фетисов**

# **Космические лучи**

Методические указания к лабораторной работе Я-62  
по курсу общей физики

Москва

Издательство МГТУ им. Н.Э.Баумана

2008

*Цель работы* – ознакомление с космическими лучами (КЛ), взаимодействиями и превращениями элементарных частиц, исследование поглощения КЛ в веществе, разделение излучения на мягкую и жесткую компоненты.

## **Теоретическая часть**

### **1. Космофизический аспект**

*Космические лучи* – поток элементарных частиц и атомных ядер высокой энергии, приходящих на Землю из космического пространства (*первичные* КЛ) [1-4]. В результате взаимодействия КЛ с атомами атмосферы образуются *вторичные* КЛ, в которых присутствуют практически все элементарные частицы. В исследовании КЛ четко выделяются два аспекта – *космофизический* и *ядернофизический*.

В космофизическом аспекте занимаются изучением природы первичных КЛ, их происхождения, механизмов ускорения частиц, энергетических спектров и т.д.

Существование КЛ было установлено в 1912 г. австрийским физиком Гессом. Предполагая, что разряд электроскопа происходит за счет ионизации воздуха под действием радиоактивного излучения земных пород, Гесс поднялся с электроскопами на воздушном шаре. Вопреки ожиданиям, ионизация воздуха возрастала с высотой и на высоте 4800 м стала в четыре раза больше, чем на уровне моря. Гесс сделал правильный вывод, что более высокая ионизация наверху объясняется предположением, что на границу земной атмосферы из мирового пространства падает излучение очень большой проникающей способности. С этого открытия начались исследования КЛ на различных высотах разными физическими методами. Эти исследования продолжаются и в наше время.

Среди первичных КЛ различают высокоэнергичные (вплоть до  $10^{21}$  эВ) *галактические* КЛ, приходящие к Земле извне Солнечной системы, равномерно со всех направлений, и *солнечные* КЛ умеренных энергий ( $\leq 10^{10}$  эВ), связанные с активностью Солнца и потому подверженные большим вариациям. (Примечание: электронвольт – энергия, приобретаемая частицей с элементарным зарядом в электрическом поле с разностью потенциалов 1 В;  $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ ).

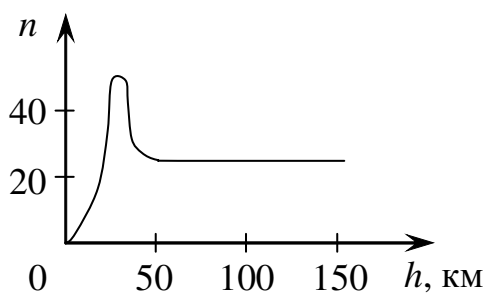


Рис. 1. Высотная зависимость плотности потока космических лучей

Было установлено изменение плотности потока частиц в зависимости от высоты наблюдения (рис.1). На высотах свыше 50 км аппаратура регистрирует первичные КЛ. С высоты 50 км начинаются взаимодействия КЛ с атомами воздуха, при этом образуется большое количество вторичных частиц. В нижних слоях атмосферы доминирует

поглощение частиц над их размножением.

В выяснении природы первичных КЛ чрезвычайно важную роль сыграли *геомагнитные эффекты*, т. е. зависимость интенсивности КЛ и их энергетического спектра от геомагнитных координат точки наблюдения, а также зенитной и азимутальной ориентации регистрирующих приборов. Эти эффекты возникают вследствие того, что Земля имеет магнитное поле, в котором частицы КЛ отклоняются. Из опытов следует, что частицы первичного излучения имеют *положительный* заряд [1].

Первичные галактические КЛ состоят из протонов (92 %), ядер гелия (7 %) и более тяжелых ядер (1%).

Распределение КЛ по энергиям характеризуется *энергетическим спектром*. Интегральным энергетическим спектром  $I(E_k)$  называется поток

космических частиц, кинетическая энергия которых превышает  $E_k$ . Энергетический спектр первичных галактических КЛ приближенно описывается выражением

$$I(E_k) \approx AE_k^{-\gamma},$$

где  $A$  – коэффициент пропорциональности. Показатель степени изменяется от  $\gamma=1,4$  при  $10^{10}$  эВ до  $\gamma=2,2$  при  $10^{18}$  эВ. Поток частиц быстро уменьшается с увеличением их энергии: на площадь  $1 \text{ м}^2$  падает за год примерно  $10^{11}$  частиц с энергией свыше  $10^{10}$  эВ и только одна частица с энергией свыше  $10^{16}$  эВ.

Полагают, что галактические КЛ заполняют всю Галактику и их суммарная энергия сравнима с энергией звездного излучения, энергией движения межзвездного газа и энергией магнитного поля Галактики. Поэтому КЛ играют большую роль в динамике галактических процессов.

Вопрос о происхождении галактических КЛ пока далек от окончательного решения.

Подавляющая часть первичных КЛ приходит к Земле из окружающего галактического пространства. Но небольшая часть КЛ, преимущественно низких энергий, приходит к Земле от Солнца. Во время кратковременных вспышек на Солнце поток солнечных КЛ может возрасти в тысячи раз. Мощные солнечные вспышки сильно влияют на магнитосферу Земли, распространение радиоволн и работу электронных устройств. Они опасны для людей при полете на другие планеты.

## 2. Ядернофизический аспект

В этом аспекте изучаются взаимодействия КЛ высоких энергий с веществом, генерация элементарных частиц и их свойства. При исследовании космических лучей было получено много принципиально важных

результатов. Были открыты позитрон, мюон, мезоны и др. элементарные частицы, а также установлены многие закономерности в физике элементарных частиц. По мере развития ускорительной техники исследования в этом направлении постепенно перемещались на ускорители. Однако еще долго КЛ будут оставаться уникальным источником частиц сверхвысоких энергий, недоступных для ускорителей.

### 2.1. Элементарные частицы и их взаимодействия.

*Релятивистские эффекты.* Частицы космических лучей обычно движутся со скоростью, близкой к скорости света  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с, поэтому необходимо учитывать закономерности теории относительности.

Масса частицы зависит от скорости  $V$

$$m = \gamma m_0,$$

где  $m_0$  - масса покоя, гамма-фактор

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - (V/c)^2}}.$$

Энергия  $E$  и масса  $m$  связаны фундаментальным соотношением

$$E = mc^2 = \gamma m_0 c^2. \quad (1)$$

Энергия включает в себя энергию покоя  $E_0 = m_0 c^2$  и кинетическую энергию  $E_k$ :  $E = E_0 + E_k$ . Кинетическая энергия равна  $E_k = (\gamma - 1)m_0 c^2$ . Энергия покоя электрона составляет 0,51 МэВ, а протона – 938 МэВ.

За исключением протона, электрона, фотона и нейтрино, элементарные частицы нестабильны и распадаются на другие частицы. Среднее время жизни частицы зависит от ее скорости

$$\tau = \gamma \tau_0, \quad (2)$$

где  $\tau_0$  – время жизни в покое.

*Частицы и античастицы.* Характерной чертой микромира является существование *античастиц*. Частица и ее античастица имеют одинаковые массы, время жизни и схемы распада, но противоположные по знаку электрический заряд, магнитный момент и некоторые другие характеристики (барионный заряд, лептонный заряд и др.). Для электрона  $e^-$  античастицей является позитрон  $e^+$ , для протона  $p$  – антипротон  $\bar{p}$ . Частица и ее

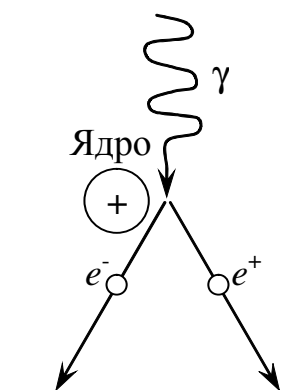
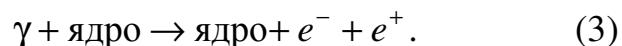


Рис. 2. Схема процесса образования пары электрон-позитрон в поле ядра

античастица рождаются парами в столкновении других частиц. Например, электрон и позитрон рождаются при столкновении  $\gamma$ -кванта (фотона большой энергии) с атомным ядром (рис. 2):



В соответствии с законом (1), рождение пары возможно при энергиях  $\gamma$ -квантов  $E_\gamma$ , превышающих суммарную энергию покоя электрона и позитрона:  $E_\gamma > 2m_0c^2 = 1,02 \text{ МэВ}$ .

Эта энергия в  $10^6$  раз больше энергии квантов видимого излучения.

Частица при столкновении со своей античастицей вместе исчезают (аннигилируют), превращаясь в другие частицы. Например, электрон и позитрон превращаются в два  $\gamma$ -кванта:



Если электрон и позитрон перед аннигиляцией покоились, то  $\gamma$ -кванты имеют одинаковую энергию 0,51 МэВ (энергия покоя одной заряженной частицы) и разлетаются в противоположных направлениях по закону сохранения импульса. В процессе (4) энергия покоя полностью переходит в энергию электромагнитного поля.

*Фундаментальные взаимодействия.* В настоящее время известны четыре вида фундаментальных взаимодействий элементарных частиц:

сильное, электромагнитное, слабое и гравитационное. Они перечислены в порядке убывания силы взаимодействия, которую можно представить в виде ряда:  $1:10^{-2}:10^{-6}:10^{-38}$ . Очень слабое гравитационное взаимодействие не играет роли в мире элементарных частиц.

По своим свойствам элементарные частицы разделены на три класса – адроны, лептоны и переносчики взаимодействия (например, фотоны для электромагнитных взаимодействий).

Распад частиц происходит за счет того или иного взаимодействия, причем время жизни частиц различно для разных взаимодействий. Чем слабее взаимодействие, тем больше время жизни. Среднее время жизни частиц  $\tau_0$  по порядку величины равно  $10^{-23}$  с для распада по сильному,  $10^{-16}$  с – по электромагнитному и  $10^{-8}$  с – по слабому взаимодействию.

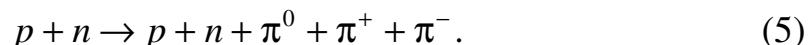
Сильные взаимодействия. Частицы, участвующие в сильном взаимодействии, называются *адронами*. К ним относятся протон, нейтрон, мезоны, гипероны и несколько сотен очень нестабильных элементарных частиц. Одним из проявлений этого взаимодействия являются силы, которые связывают нуклоны (протоны и нейтроны) в атомном ядре.

Сильное взаимодействие – короткодействующее. Наибольшее расстояние, на котором оно проявляется, по порядку величины равно  $r \sim 10^{-15}$  м. Примерно такой же размер имеют нуклоны.

При взаимодействии адронов достаточно большой энергии с нуклонами и ядрами рождаются другие адроны, среди которых главную роль в КЛ играют  $\pi$ -мезоны (пионы).

Существуют пионы с элементарным положительным ( $\pi^+$ ), отрицательным ( $\pi^-$ ) зарядом и незаряженный  $\pi^0$ . Заряженные пионы образуют пару частица – античастица. Масса заряженного  $\pi$ -мезона в 273 раза больше массы электрона и в 6 раз меньше массы нуклона (энергия покоя равна  $E_0 = 140$  МэВ для заряженного пиона и 135 МэВ для  $\pi^0$ -мезона).

В качестве примера приведем одну из множества реакций рождения пионов при столкновении нуклона с нуклоном



Пионы имеют значительную энергию покоя, которую они получают за счет кинетической энергии налетающей частицы. Для того чтобы произошло рождение частиц, энергия налетающей частицы должна быть достаточно большой; с увеличением этой энергии растет число рожденных пионов. Реакции (3), (4), (5) являются наглядным доказательством взаимосвязи массы и энергии (1). Кроме пионов, рождаются и другие адроны, роль которых в общей картине космических лучей невелика.

$\pi$ -Мезоны нестабильны и распадаются, о чем будет сказано ниже.

Адрон пробегает в веществе некоторое расстояние, прежде чем он испытает сильное взаимодействие с ядром. Средний пробег  $\lambda$  принято выражать в г/см<sup>2</sup>. Для взаимодействия протонов с ядрами воздуха  $\lambda = 70$  г/см<sup>2</sup> (в пересчете на воду это соответствует слою толщиной 70 см).

Электромагнитные взаимодействия – взаимодействия между электромагнитным полем и частицами с электрическим зарядом или магнитным моментом (силы Кулона, Лоренца и др.). Оно в сотни раз слабее сильного взаимодействия. Радиус действия электромагнитных сил не ограничен.

Электромагнитные взаимодействия ответственны за поглощение в веществе заряженных частиц и  $\gamma$ -квантов.

Заряженные частицы теряют свою энергию в результате двух основных процессов – ионизационного и радиационного торможения.

В результате кулоновского взаимодействия быстрой заряженной частицы с атомами энергия частицы затрачивается на увеличение энергии атома или на его ионизацию. Такой процесс потери энергии называют ионизационным торможением. Удельные потери энергии (на единицу длины



пути в веществе) зависят от заряда, массы и энергии частицы, а также от вещества.

Сущность радиационного торможения заключается в том, что в

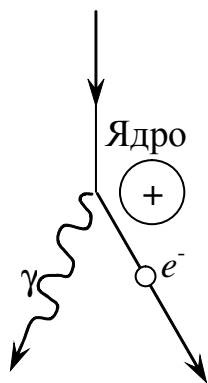


Рис. 3. Схема процесса образования тормозного фотонного излучения

кулоновском поле ядра частица получает ускорение, что, в соответствии с законом электродинамики, всегда приводит к электромагнитному излучению (рис. 3). При этом возникает непрерывный спектр  $\gamma$ -лучей – тормозное излучение. (Заметим, что этот процесс порождает рентгеновское излучение в специальных лампах). Это явление важно для легких заряженных частиц (электронов и

позитронов). Частицы большой массы (мезоны, протоны) при той же кулоновской силе испытывают меньшее ускорение, поэтому радиационное торможение для них несущественно.

Радиационные потери, небольшие при малой энергии, быстро возрастают с ростом энергии частицы. В воздухе удельные радиационные потери становятся больше ионизационных при энергии электрона свыше 80 МэВ.

$\gamma$ -Кванты, проходя через вещество, теряют свою энергию главным образом за счет следующих явлений: комптон-эффекта, фотоэффекта и рождения электрон-позитронных пар.

Комптон-эффект, или рассеяние  $\gamma$ -квантов на электронах, при котором фотоны передают часть своей энергии атомным электронам.

Фотоэффект, или поглощение  $\gamma$ -кванта атомом, когда вся энергия фотона передается электрону, вылетающему в результате этого из атома.

Рождение электрон-позитронных пар за счет энергии фотона (3).

В зависимости от энергии фотона доминирует тот или другой процесс: при низких энергиях – фотоэффект, при средних – эффект Комптона, при высоких – рождение пар.

Нейтральный пион с очень малым временем жизни ( $\tau_0 = 1,8 \cdot 10^{-16}$  с) распадается на два  $\gamma$ -кванта в результате электромагнитного взаимодействия:

$$\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma. \quad (6)$$

Суммарная энергия двух  $\gamma$ -квантов равна полной энергии пиона, включающей энергию покоя 135 МэВ и кинетическую энергию. Таким образом, даже медленный пион порождает фотоны с энергией в десятки МэВ. Образование энергичных фотонов через процесс рождения и распада  $\pi^0$ -мезонов играет важную роль при прохождении КЛ через атмосферу, о чем будет сказано ниже.

Слабые взаимодействия ответственны за  $\beta$ -распад ядер, за многие распады элементарных частиц, а также за все процессы взаимодействия нейтрино с веществом. Радиус действия этих сил порядка  $10^{-18}$  м.

Вследствие действия слабых сил заряженные пионы со средним временем жизни  $\tau_0 = 2,6 \cdot 10^{-8}$  с распадаются на мюоны ( $\mu^\pm$ ) и нейтрино (или антинейтрино, отмеченное знаком тильда):

$$\begin{aligned} \pi^+ &\rightarrow \mu^+ + \nu_\mu, \\ \pi^- &\rightarrow \mu^- + \tilde{\nu}_\mu. \end{aligned} \quad (7)$$

Масса мюона составляет примерно 3/4 массы пиона.

Мюоны распадаются на позитрон или электрон и два нейтрино

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \tilde{\nu}_\mu, \quad \mu^- \rightarrow e^- + \tilde{\nu}_e + \nu_\mu. \quad (8)$$

Мюоны, электроны и нейтрино относятся к *лептонам*. Они участвуют в слабых взаимодействиях, а также, если заряжены, и в электромагнитных, но не участвуют в сильных взаимодействиях.

Нейтрино – незаряженные частицы, участвуют только в слабом взаимодействии. Поэтому они способны пронизывать огромную толщину вещества, например, пройти насквозь земной шар или Солнце. Нейтрино бывает трех типов, отличающихся внутренним свойством (лептонным зарядом). В распадах (8) появляются электронное  $\nu_e$  и мюонное  $\nu_\mu$  нейтрино. Масса покоя нейтрино очень мала (вопрос о массе нейтрино – предмет современных исследований).

Время жизни мюонов  $\tau_0 = 2,2 \cdot 10^{-6}$  с, и они могут пролететь большое расстояние до распада, равное  $l = V\tau = V\gamma\tau_0$ . Для оценки порядка величины  $l$  будем считать скорость мюона близкой к скорости света, а величину  $\gamma$  – различной; тогда  $l \approx 600\gamma$ , м. Для малоэнергичных мюонов  $\gamma \approx 1$ , а пробег менее 1 км. Для энергичных мюонов, рожденных в верхних слоях атмосферы, гамма-фактор может составлять сотни и больше, и такие частицы могут пройти без распада всю атмосферу.

## 2.2. Прохождение космических лучей через атмосферу

Вторичные КЛ возникают в атмосфере в длинной и разветвленной цепи превращений. Исходным звеном такой цепи является сильное взаимодействие частицы первичных КЛ (протона или ядра) с ядрами атомов воздуха в верхних слоях атмосферы. Ядро-мишень при этом, как правило, разваливается на протоны и нейтроны. То же происходит и с первичной частицей, если она состояла из нескольких нуклонов. Образующиеся при этом протоны и нейтроны в дальнейшем ведут себя так же, как и первичные протоны, но с меньшей энергией.

В сильных взаимодействиях, кроме развала ядер, рождается много пионов. Заряженные пионы, будучи адронами, ведут себя подобно нуклонам и, если они не распались, при столкновении с ядрами рожают новые пионы. Толщина земной атмосферы составляет около  $1000 \text{ г/см}^2$ , в ней может произойти свыше десяти последовательных ядерных взаимодействий

нуклонов и заряженных пионов. Они образуют ядерно-активную компоненту вторичных КЛ. На рис. 4 схематически представлено несколько поколений развития ливня, порожденного взаимодействием протона с ядром.

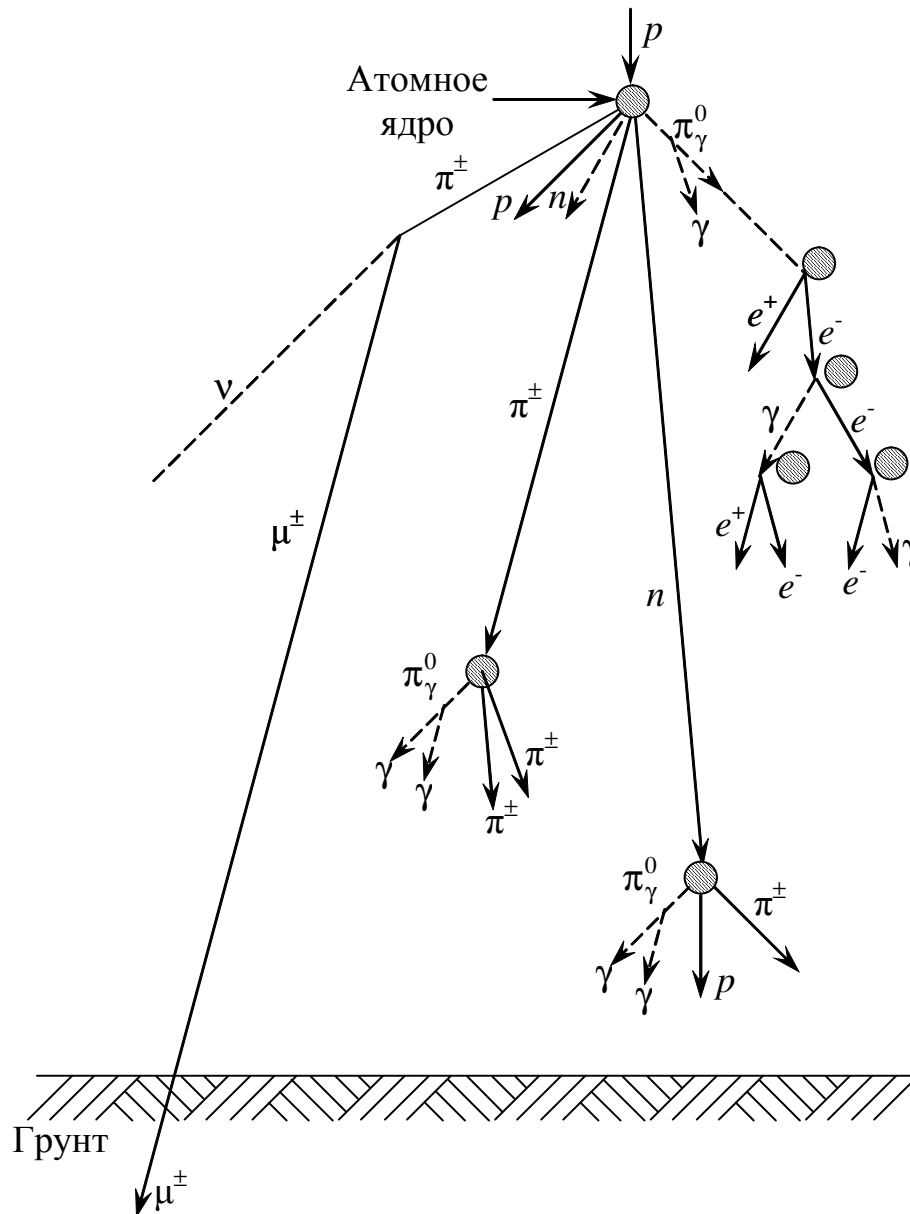


Рис. 4. Схема развития ливня из адронов, лептонов и фотонов в атмосфере: в результате столкновения протона  $p$  с ядром образуются два заряженных и один нейтральный пионы, а также нуклоны  $n$  и  $p$ ;  $\pi_0$ -мезон после распада на  $\gamma$ -кванты порождает электронно-фотонный ливень; один из заряженных пионов распадается на мюон

По мере прохождения через атмосферу число ядерно-активных частиц сначала возрастает, а их энергия уменьшается. Наконец, при малой энергии

рождение пионов прекращается, и эта составляющая начинает затухать. До уровня моря ядерно-активные частицы почти не доходят.

Часть заряженных пионов распадается на мюоны (7), образуя мюонную компоненту вторичных КЛ. Мюоны очень большой энергии, для которых время жизни велико (2), проходят без распада всю атмосферу. Они замедляются только за счет ионизационного торможения, могут пройти всю атмосферу и даже углубиться в землю на несколько километров.

Возникновение *электронно-фотонной* компоненты связано в основном с распадом  $\pi^0$ -мезонов на  $\gamma$ -кванты (6) и образованием электронов (и позитронов) при распаде мюонов (8). В кулоновском поле ядер  $\gamma$ -квант рождает электрон-позитронную пару (рис.2). За счет *тормозного излучения*

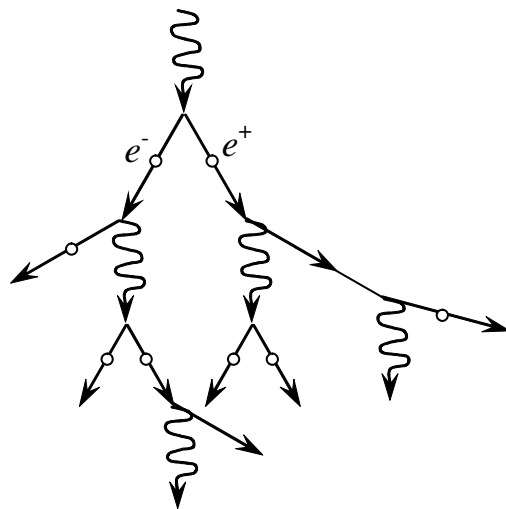


Рис. 5. Схема развития электронно-фотонного ливня в атмосфере

частиц этой пары вновь возникают  $\gamma$ -кванты (рис. 3), которые рождают, в свою очередь, электрон-позитронные пары (формула (3)). Повторение этого процесса приводит к лавинообразному увеличению числа частиц — возникновению *электронно-фотонного каскадного ливня* (рис. 5).

С развитием электронно-фотонного ливня уменьшается энергия частиц. При энергии электронов (позитронов) меньше 80

МэВ ионизационные потери больше радиационных и ливень затухает.

Число частиц в максимуме ливня пропорционально энергии первичной частицы. Ливни, образующиеся для первичной частицы с энергией  $\epsilon > 10^{14}$  эВ, содержат  $10^6 \div 10^9$  частиц и называются широкими атмосферными ливнями (ШАЛ). На уровне моря частицы ливня покрывают площадь до

нескольких квадратных километров. Огромное число частиц в ливне позволяет его обнаруживать и изучать с помощью сравнительно небольшого количества счетчиков, размещенных на большой площади и сработавших одновременно. С помощью ШАЛ проводится исследование КЛ в области сверхвысоких энергий.

Подведем итог. Все компоненты вторичных КЛ достигают максимума своего развития высоко в атмосфере. До уровня моря доходят только немногие частицы, среди которых нет первичных КЛ и очень мало вторичных ядерно-активных частиц. На уровне моря поток КЛ состоит в основном из мюонов, электронов, позитронов и  $\gamma$ -квантов. Через площадку  $1 \text{ см}^2$ , в телесном угле 1 стерадиан за 1 минуту проходит примерно одна частица.

## **Экспериментальная часть**

### **1. Установка и методика опыта**

На уровне моря принято разделять космические лучи (КЛ) на мягкую и жесткую компоненты в зависимости от степени их поглощения в веществе (мягкая ослабляется сильнее). Жесткая компонента состоит преимущественно из мюонов, мягкая – из электронов, позитронов и  $\gamma$ -квантов. Как говорилось выше, легкие электроны и позитроны замедляются за счет двух видов торможения – радиационного и ионизационного, а тяжелые мюоны – только за счет ионизационного. Поэтому мюоны могут проходить большие толщины вещества.

В экспериментальной части работы изучают поглощение КЛ в свинце, разделяют излучение на две компоненты и находят отношение числа частиц в них [5].

Лабораторная установка (рис. 6) включает в себя шесть счетчиков Гейгера-Мюллера, объединенных в две группы СЧ1 и СЧ2. Между счетчиками можно помещать поглотитель П из свинцовых пластин толщиной по 2 см (до 9 пластин).

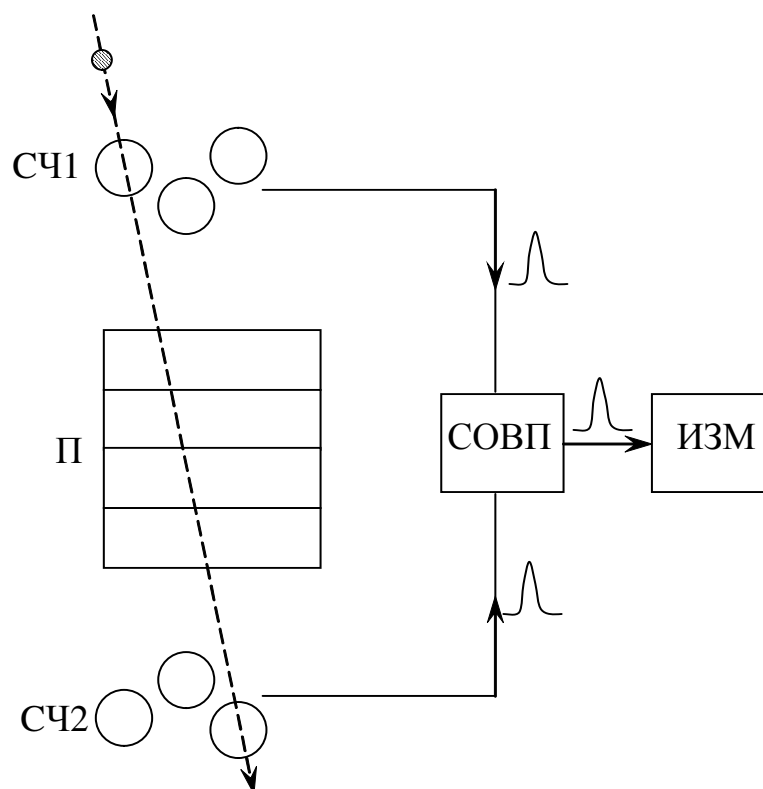


Рис. 6. Схема телескопа заряженных частиц:  
СЧ1 и СЧ2 – счетчики Гейгера-Мюллера; П –  
поглотитель из свинца; СОВП – схема  
совпадений; ИЗМ – измерительное устройство

Счетчик представляет собой стеклянную трубку диаметром 3 см и длиной 37 см, заполненную специальной газовой смесью при низком давлении. По оси трубки натянута тонкая проволока, а сама трубка внутри покрыта проводящим слоем. Слой и проволока образуют два электрода, к которым приложено большое напряжение. Когда заряженная частица (мюон или электрон) проходит через счетчик, она ионизирует небольшое количество атомов газа. Оторванные электроны разгоняются электрическим полем и сами ионизируют другие атомы. В результате возникает электрический пробой газа, в цепи протекает кратковременный импульс тока, который регистрируется специальным устройством.

От каждой группы счетчиков электрический импульс поступает на схему совпадений СОВП. Если частица проходит через обе группы счетчиков и поглотитель (показано штриховой линией), то верхний и нижний счетчики срабатывают одновременно, а схема совпадений выдает импульс. Измерительное устройство ИЗМ считает эти импульсы за определенное время, а результат измерения высвечивается на индикаторе.

Таким образом, установка, называемая *телескопом заряженных частиц*, регистрирует частицы, падающие в определенном направлении и прошедшие через обе группы счетчиков и поглотитель.

Телескоп можно наклонять от вертикального положения на угол до  $\pm 90^\circ$  с шагом  $15^\circ$ . В данной работе телескоп регистрирует частицы, близкие к вертикальному направлению.

В работе изучается зависимость от толщины поглотителя  $d$  скорости счета частиц установкой  $n = N/t$ , где  $N$  – число совпадений за время экспозиции  $t$ . Графическую зависимость  $n(d)$  называют *кривой поглощения* (рис. 7). Вертикальной чертой показаны случайные погрешности измерения  $\Delta n$  (9). Участок  $AB$  на графике соответствует поглощению мягкой компоненты, которая практически полностью поглощается слоем свинца толщины несколько см. Участок  $BC$  отражает поглощение жесткой компоненты. Экстраполируя прямую  $BC$  до пересечения с осью ординат в точке  $D$ , получаем значение  $n_{0ж}$ , т.е. скорость счета жесткой компоненты в отсутствие поглотителя. Величина  $n_0$  в точке  $A$  есть суммарная скорость счета мягкой и жесткой компонент. Следовательно, разность  $n_{0м} = n_0 - n_{0ж}$  есть скорость счета мягкой компоненты в отсутствие поглотителя. Отсюда можно получить отношение числа заряженных частиц жесткой и мягкой компонент  $n_{0ж}/n_{0м}$  в вертикальном потоке на уровне моря в условиях данного помещения.



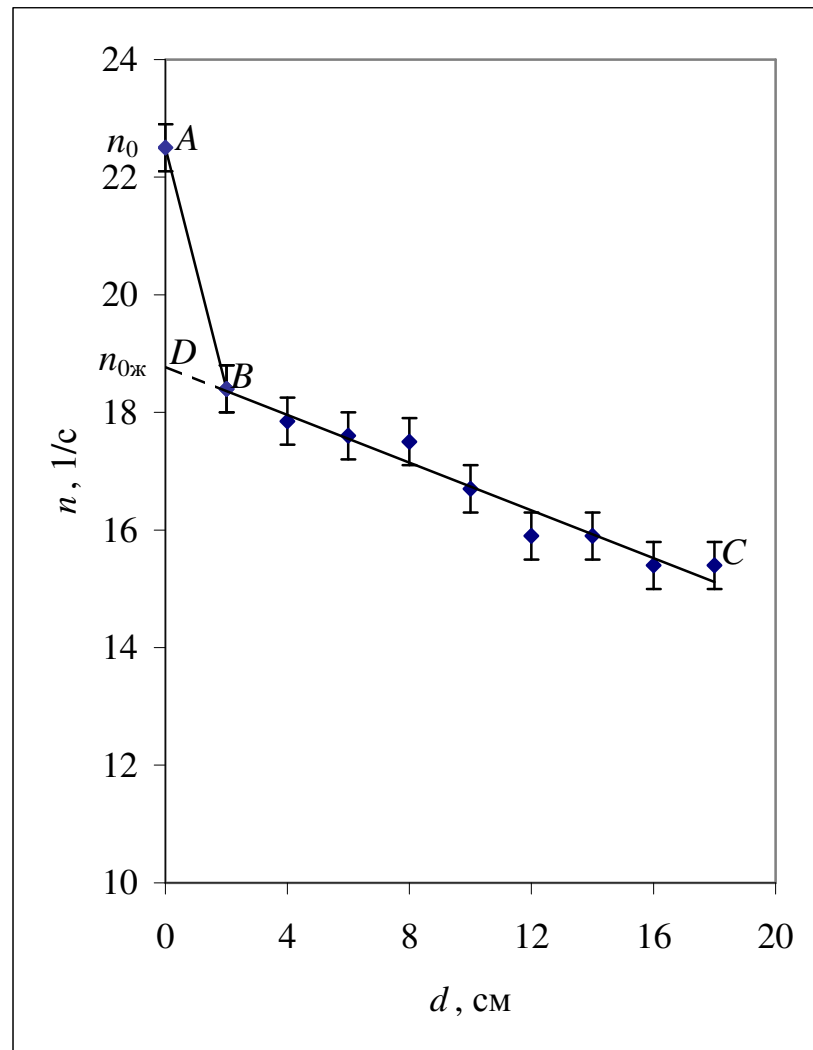


Рис. 7. Типичная кривая поглощения частиц КЛ в свинце:  $n$  – скорость счета частиц, прошедших через свинец толщины  $d$ ;  $AB$  – поглощение мягкой компоненты;  $BC$  – поглощение жесткой компоненты

## 2. Погрешности измерений

Погрешность измерения скорости счета  $n$  частиц КЛ с помощью телескопа имеет две составляющие – систематическую и случайную. Систематическая обусловлена тем, что установка может регистрировать другие события, неотличимые от изучаемых. Например, схема совпадений может сработать от двух различных частиц, падающих одновременно сбоку

телескопа, одна из которых прошла через верхний счетчик, а другая – через нижний. Анализ таких событий выходит за рамки данной работы.

*Случайные погрешности* обусловлены самой статистической природой изучаемого явления. Пусть при измерении космических лучей или радиоактивности счетчик зарегистрировал  $N_i$  частиц. Повторяя измерения в тех же условиях, получим различные значения  $N_i : N_1, N_2, \dots, N_k$ , изменяющиеся случайным образом. Вероятность появления того или иного значения  $N_i$  описывается *распределением Пуассона*.

Из распределения Пуассона следует, что случайную погрешность можно найти из одного измерения (а не из нескольких, как для обычных измерений). Пусть за время измерения  $t$  (точно) установка зарегистрировала  $N$  частиц. Тогда скорость счета равна  $n = N/t$ . *Среднеквадратическое* отклонение для этой величины  $N$  равно

$$\sigma = \sqrt{N}.$$

Следовательно, абсолютная погрешность измерения скорости счета с доверительной вероятностью  $P = 0,68$  равна

$$\Delta n = \sqrt{N}/t, \quad (9)$$

а относительная погрешность

$$\varepsilon = \Delta n/n = 1/\sqrt{N}.$$

Относительная погрешность уменьшается с увеличением числа зарегистрированных частиц, например,  $\varepsilon = 0,1 = 10\%$  при  $N = 100$  и  $\varepsilon = 0,01 = 1\%$  при  $N = 10000$ . Поэтому для уменьшения случайной погрешности необходимо зарегистрировать большое число частиц.

В данной установке за 15 мин измерений регистрируется всего  $N = 150 \div 200$  частиц с погрешностью примерно 8 %, которая велика для анализа результатов. Существенно увеличить  $N$  не позволяет время лабораторной работы. Поэтому для построения кривой поглощения студенты используют как собственные измерения, так и более точные

(“базовые”) данные, полученные за длительное время и приведенные на установке.

### 3. Выполнение работы

#### Задание 1. Ознакомиться с установкой и подготовить ее к работе.

Установка состоит из телескопа (рис. 6) и измерительного устройства, соединенных кабелем. Телескоп должен находиться на постоянном месте и быть наклоненным на  $15^\circ$ , при этом удобно устанавливать пластины в рабочее положение, вдвигая их до упора.

На задней стенке измерительного устройства находятся сетевой выключатель и клемма заземления.

На передней панели измерительного устройства расположены цифро-буквенный индикатор и управляющие кнопки:

- кнопками “+” и “-” устанавливают время измерения (экспозицию)  $t$  (от 1 до 999 с);
- кнопка “Пуск/Стоп” предназначена для запуска процесса измерения; по окончании заданной экспозиции измерения останавливаются; для начала нового измерения снова нажать кнопку “Пуск/Стоп”; если кнопку нажать в процессе измерения, то счет импульсов останавливается.

1. Проверить наличие заземления. При отсутствии заземления обратиться к дежурному по лаборатории.
2. Перед включением установки в сетевую розетку сетевой выключатель должен находиться в положении “Выкл”. Вставить сетевую вилку в розетку и включить выключатель “Сеть”. После чего должны появиться подсветка выключателя, а на индикаторе

информация – “*time 10.0 s*”. Это означает, что время счета будет 10 с.

3. Для ознакомления с установкой проделать следующее упражнение. Установить экспозицию 15 с. Для запуска процесса измерений нажать и отпустить кнопку “Пуск/Стоп”. Верхняя строка индикатора (секундомер) показывает прошедшее время, а нижняя – число зарегистрированных импульсов (*imp.*). Когда секундомер остановится, можно снять показания – число зарегистрированных импульсов (установка за 15 с может ничего не зарегистрировать). Повторить измерение, снова нажав кнопку “Пуск/Стоп”. Такая же последовательность действий будет при выполнении работы, но с большой экспозицией.
4. Установить экспозицию 900 с, при которой выполнять все измерения.

### Задание 2. Исследовать поглощение КЛ в свинце

*Примечание:* В ходе выполнения данного задания необходимо обрабатывать результаты измерений, сначала базовые, приведенные на установке, а затем и собственные. График поглощения необходимо построить на занятии.

1. Подготовить табл. 1 для записи результатов измерений.

Таблица 1

$d$ , см	$t$ , с	$N$	$n = N/t$ , с <sup>-1</sup>	$\Delta n = \sqrt{N}/t$ с <sup>-1</sup>

*Примечание:* в табл. 15 строк.

2. Для различной толщины поглотителя  $d$  при экспозиции  $t = 900$  с измерить число частиц  $N$ , прошедших через поглотитель. Результаты записать в табл. 1. Измерения выполнять при толщинах, указанных на

установке. Первую пластину вставить в середине между счетчиками, остальные наращивать с обеих сторон. Толщина одной пластины 2 см.

3. По окончании измерений выключить установку.

#### 4. Обработка результатов измерений

1. Записать в табл. 1 базовые результаты измерений, приведенные на установке.

2. Вычислить значения  $n$  и  $\Delta n$ , записать их в табл. 1.

3. Построить графическую зависимость  $n$  от  $d$  (рис. 7). Поскольку величина  $n$  изменяется в небольших пределах, ось ординат должна начинаться примерно с минимального значения. Вертикальной чертой показать случайную погрешность измерения (полная длина черты равна  $2\Delta n$ ). При некоторых толщинах могут быть и собственные, и базовые результаты. На графике необходимо нанести те и другие различными значками.

4. Через экспериментальные точки провести на графике две прямые, отражающие поглощение мягкой и жесткой компонент. Прямую с малым наклоном продолжить до пересечения с осью ординат, как показано на рис. 7.

5. Используя пояснения на рис. 7, определить по графику значения  $n_0$ ,  $n_{0ж}$ ,  $n_{0м}$  и записать их в табл. 2.

Таблица 2

$n_0, \text{с}^{-1}$	$n_{0ж}, \text{с}^{-1}$	$n_{0м} = n_0 - n_{0ж}, \text{с}^{-1}$	$n_{0ж}/n_{0м}$

6. Вычислить отношение числа частиц жесткой и мягкой компонент  $n_{0ж}/n_{0м}$  и записать его в табл. 2.

## Контрольные вопросы

1. Как были открыты КЛ?
2. Какие частицы называются адронами? Приведите примеры.
3. Приведите примеры сильных взаимодействий частиц КЛ.
4. Какие электромагнитные взаимодействия происходят с заряженными частицами и фотонами высокой энергии?
5. Какие частицы называются лептонами?
6. Приведите примеры слабых взаимодействий.
7. Почему мюоны поглощаются в веществе слабее, чем электроны?
8. Объясните устройство телескопа заряженных частиц.
9. Как можно разделить электронно-фотонную и мюонную компоненты КЛ?
10. Чему равна относительная случайная погрешность измерения скорости счета, если зарегистрировано  $N = 400$  частиц?

### Список литературы

1. *Сивухин Д.В.* Общий курс физики; т. V, ч. 2. – М.: Наука, 1989.
2. *Мартинсон Л.К., Смирнов Е.В.* Квантовая физика. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004.
3. *Савельев И.В.* Курс общей физики; Т.3. М.: Наука, 1987.
4. Физическая энциклопедия. М.: Сов. энциклопедия. Т. 2. 1990.
5. *Граменицкий П.В., Родионов В.А., Соколова И.Н.* Изучение свойств космических лучей: Методические указания к лабораторной работе № 300 по курсу общей физики / Под. Ред. С.П. Ерквича. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1994.

## Оглавление

	стр.
Теоретическая часть .....	2
1. Космофизический аспект .....	2
2. Ядернофизический аспект .....	4
2.1. Элементарные частицы и их взаимодействия .....	5
2.2. Прохождение космических лучей через атмосферу .....	11
Экспериментальная часть .....	14
1. Установка и методика опыта .....	14
2. Погрешности измерений .....	17
3. Выполнение работы .....	19
4. Обработка результатов измерений .....	21
Контрольные вопросы .....	22
Список литературы .....	23