

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ НОВОСИБИРСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

Физический факультет

Кафедра общей физики

Жилич В.Н., Нестеренко А.Р.

Изучение состава космического излучения.

Обучающий комплекс для выполнения лабораторной работы

Новосибирск 2012

Новая автоматизированная лабораторная работа «Изучение состава космического излучения» предназначена для введения в физику космических лучей. При выполнении работы происходит знакомство студентов с теорией ливней, основными свойствами космического излучения: интенсивностью, составом и угловым распределением ливней. По результатам измерений определяется время жизни мюонов. Для данной работы создана установка, включающая в себя сцинтилляционные детекторы, разработанные в ИЯФ СО РАН и необходимую регистрирующую электронику и средства автоматизации для обработки большого объема статистики. Это оригинальный тип детектирующих устройств, позволяющих собирать большой объем счета частиц, поскольку детектирующая поверхность собрана из массива детекторов. Это позволяет набирать большой регистрируемых данных. Которые обрабатываются специальной программой. В сравнении с существующими лабораторными работами данное исполнение лабораторной работы позволяет более точно изучать природу космических лучей.

При выполнении работы студенты знакомятся с основными методами регистрации частиц, получают представление о статистических методах обработки данных. На базе данной установки планируется расширение списка лабораторных работ, позволяющих углубленное изучение физики взаимодействия излучения и частиц высокой энергии с веществом, а также знакомство с другими методами регистрации элементарных частиц. Данный обучающий комплекс является оригинальным и не имеет аналогов.

Пособие может быть полезно преподавателям и студентам, обучающимся в ВУЗах физического профиля..

Авторы: Жилич В.Н., Нестеренко А. Р.

Обучающий комплекс подготовлен в рамках реализации Программы развития НИУ-НГУ на 2009-2018г.

Жилич В.Н., Нестеренко А. Р.

Лабораторная работа 5.4

Изучение состава космического излучения.

Оборудование: Измерительный стенд состоит из двух детекторов, собранных из набора сцинтилляционных счетчиков, набор свинцовых фильтров общей толщиной 15см, набор свинцовых кирпичей, регистрирующая электроника, разработанная в ИЯФ СО РАН.

Цель работы: Изучение состава и интенсивности лептонной компоненты космического излучения на уровне моря. Изучение углового распределения мюонов космического излучения на уровне моря и определение их времени жизни.

1. Основные сведения о космических лучах.

Космические лучи это поток частиц, приходящих на Землю из межзвездного пространства. Первичные космические лучи состоят главным образом из протонов (90%), α -частиц и более тяжелых ядер. Основная доля первичных космических лучей имеет энергию $10^9 - 10^{10}$ эВ, но встречаются также частицы со значительно большей энергией (до 10^{19} эВ). Частицы с энергиями менее 10^9 эВ отклоняются магнитным полем Земли и не попадают на нее.

Поток протонной компоненты с энергией выше $2 \cdot 10^9$ эВ составляет примерно один протон на $1 \text{ см}^2 / \text{с}$. В результате взаимодействия первичных космических лучей с ядрами атмосферы появляются новые (вторичные) частицы мюоны различных сортов, распад которых приводит к появлению электронов, позитронов и фотонов большой энергии.

Таким образом, вторичные космические лучи, наблюдаемые на высоте до 10 км, совершенно не похожи по своему составу на первичные космические лучи. Космическое излучение, приходящее в нижние слои атмосферы, принято делить на мягкую и жесткую компоненты.

Мягкая компонента состоит из электронов, позитронов и порядкового номера Z вещества поглотителя. Частицы мягкой компоненты почти целиком поглощаются 10-сантиметровым слоем свинца.

Жесткая компонента состоит из мюонов, которые слабо поглощаются веществом, притом приблизительно одинаково веществами с разными Z . Столь большое различие проникающей способности частиц обеих компонент связано с тем, что электроны и позитроны мягкой компоненты при взаимодействии с веществом тратят большую часть своей энергии на излучение, а потери мюонов на излучение сравнительно малы. Это объясняется тем, что количество излученной энергии пропорционально квадрату заряда и обратно пропорционально квадрату массы частицы, а мю-мюон примерно в 210 раз тяжелее электрона. Потери энергии на ионизацию и возбуждение атомов вещества для электронов и мюонов космических лучей примерно одинаковы. При релятивистских скоростях ($\beta \gg 1$) ионизационные потери в веществе составляют около 1.8 МэВ на 1 г/см^2 .

Особенностью мюонов является их распад на электроны, нейтрино и антинейтрино:



среднее время жизни покоящегося мюона $\tau^0 = 2,2 \cdot 10^{-6}$ с. В плотной среде поглощение мюонов обусловлено потерей энергии на ионизацию атомов среды. В газообразной среде пробег мюонов велик и нужно учитывать их выбывание из потока космических лучей за счет спонтанного

распада.

Интенсивность заряженных частиц на уровне моря имеет следующие значения (для вертикального потока):

$$J_{\text{ж}} = 0,82 \cdot 10^{-2} \text{ см}^{-2} \text{с}^{-1} \text{ср}^{-1}$$

$$J_{\text{м}} = 0,31 \cdot 10^{-2} \text{ см}^{-2} \text{с}^{-1} \text{ср}^{-1}.$$

2. Угловое распределение жесткой компоненты космических лучей на уровне моря.

Можно считать, что основная часть мюонов рождается в верхних слоях атмосферы и имеет энергию 1-10 ГэВ. Мюоны, входящие в состав жесткой компоненты, возникают в результате распада пионов — продуктов ядерного взаимодействия первичных космических лучей с ядрами атмосферы:

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

$$\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma,$$

$$\tau^{\pm} = 2,6 \cdot 10^{-8} \text{ с},$$

$$\tau^0 = 8,3 \cdot 10^{-17} \text{ с}.$$

Следовательно, мюоны проходят почти весь слой атмосферы (900 г/см^2). При этом они частично поглощаются, частично распадаются. Без существенной ошибки можно считать, что основная часть мюонов, достигающая уровня моря, зарождена в верхнем слое атмосферы до давления $100 - 150 \text{ г/см}^2$ на высоте l . Мюоны, идущие под углом θ к вертикали и попадающие на уровень моря, проходят в атмосфере путь $l/\cos \theta$, т.е. больший, чем мюоны, идущие по вертикали. Поэтому вероятность распада для мюонов, идущих под углом θ , больше.

При увеличении угла θ будет увеличиваться также слой воздуха, который должны пройти мюоны. Это приводит к увеличению поглощения за счет ионизационных потерь. Таким образом, оба фактора должны привести к уменьшению интенсивности мюонов с увеличением зенитного угла θ .

Можно, однако, выделить ту часть мюонов, которые поглотились за счет увеличения количества вещества. Измерения интенсивности вертикального потока мюонов, выполненные на разных глубинах под землей, показали, что число мюонов $N(x)$ уменьшается как функция количества пройденного плотного вещества x (г/см^2) по следующему закону:

$$N(x) = (900/(900 + x))^{1,6},$$

где $(900+x)$ — полное количество вещества, пройденного мюоном от места генерации до места поглощения (масса вертикального столба воздуха принята равной 900 г/см^2). Из геометрических соображений очевидно, что $(900 + x) = 900/\cos \theta$. Таким образом, число мюонов, дошедших до счетчика на уровне моря, уменьшается за счет поглощения в веществе по закону

$$N(\theta) = N_0 (\cos \theta)^{1,6}.$$

С увеличением длины пути, пройденного мюоном, увеличивается вероятность распада мюона. Вероятность прохождения мюоном пути l без распада равна

$$P(\theta) = \exp(-l(\theta)/L),$$

где $L = v\tau$ — длина распадного пробега; $v = \beta c$ — скорость мюона;

τ — время жизни движущегося мюона.

Из релятивистской механики известно, что $\tau = g\tau^0$, τ^0 — время жизни покоящегося мюона, а $g = E_{\mu}/m_{\mu}c^2$ — релятивистский фактор. Средняя энергия мюона E_{μ} составляет $4 \cdot 10^9 \text{ эВ}$; m_{μ} — масса покоящегося мюона составляет $105,8 \text{ МэВ}/c^2$.

Отношение числа мюонов, идущих под зенитным углом θ , к числу вертикально падающих мюонов

можно записать в виде

$$N_1(\theta)/N_1(0^\circ) = (\cos \theta)^{1.6} \exp(-l_0/\cos \theta/L) / \exp(-l_0/L),$$

где l_0 - высота образования мюонов (10-15 км). Воспользовавшись экспериментально определенным отношением $N(\theta)/N(0^\circ)$ можно получить значение τ^0 .

Нужно помнить, что 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 ионизационных потерь.

3. Описание экспериментальной установки.

Установка, с помощью которой выполняются лабораторные работы, состоит из двух сцинтилляционных детекторов, набора свинцовых фильтров общей толщиной 15см и регистрирующей электроники в разработке ИЯФа.

Сцинтилляционный счетчик представляет собой сочетание сцинтиллятора и фотоэлектронного умножителя (ФЭУ), соединенных через специальную оптическую систему — световод (прозрачная пластмасса). В данном случае сцинтиллятор это прозрачная пластмасса (полистирол) со специальными добавками флуоресцирующих органических соединений типа п-терфенил или антрацена.

Принцип действия сцинтилляционного счётчика состоит в следующем: заряженная частица, проходя через сцинтиллятор, возбуждает и ионизирует молекулы вещества. Возвращаясь в невозбуждённое (основное) состояние, атомы испускают фотоны. Специальные добавки подобраны так, чтобы излучение происходило в видимой области спектра. Излученный свет собирается с помощью световода на фотоэлектронный умножитель, который преобразующего световую вспышку в импульс электрического тока, который обрабатывается регистрирующей электроникой. Принципиальная схема детектора приведена на рисунке.

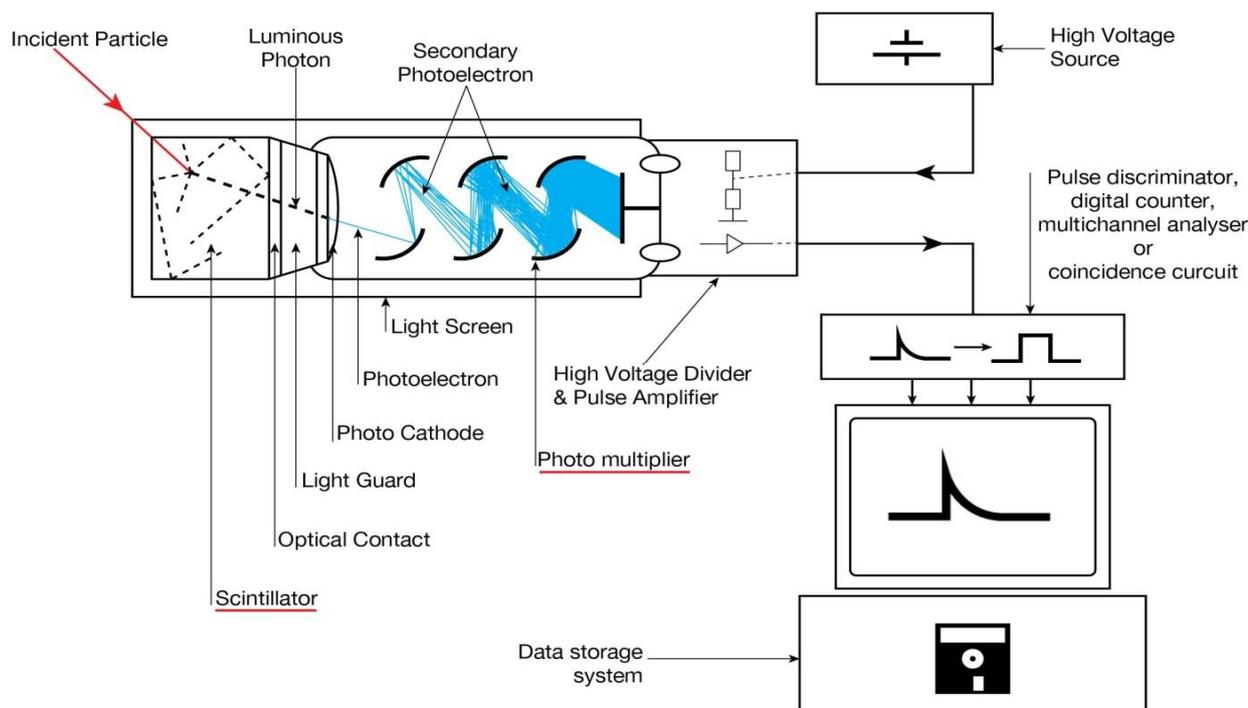


Рис. 1. Устройство сцинтилляционного счетчика.

4. Изучение состава и интенсивности лептонной компоненты космического излучения на уровне моря.

Для изучения состава и интенсивности лептонов на уровне моря служит установка, состоящая из двух сцинтилляционных детекторов, расположенных один против другого. Между сцинтилляционными детекторами размещаются пластины свинцового фильтра.

Установка регистрирует только такие события, при которых частица проходит через оба детектора. Это происходит с помощью специальной электронной схемы совпадений. Для этого сигнал каждого детектора подается на дискриминатор, затем на формирователь и на вход схемы совпадений. Схема совпадений срабатывает тогда, когда есть сигналы на обоих входах. Это может происходить от одной частицы, прошедшей через оба сцинтилляционных детектора, или от случайных совпадений.

В этой работе надо показать, что наблюдаемые на уровне моря космические лучи состоят из двух резко отличающихся по своим свойствам компонент мягкой и жесткой и найти интенсивности обеих компонент. В отсутствие поглощающих фильтров между детекторами установка будет регистрировать частицы как жесткой, так и мягкой компонент космического излучения. Если же между детекторами помещать поглотители (например, свинец), тогда частицы мягкой компоненты будут поглощаться в поглотителе. Это приведет к заметному уменьшению скорости счета совпадений.

Начиная с некоторой толщины поглотителя снижение скорости счета по мере увеличения толщины поглотителя становится незаметным. Это соответствует регистрации только жесткой компоненты космических лучей. Зависимость скорости счета N от толщины поглотителя x называется кривой поглощения. По кривой поглощения определяются интенсивности мягкой J_m и жесткой J_j компонент.

Для этого прямолинейную часть, соответствующую жесткой компоненте, продолжают до пересечения с осью ординат. Это дает величину J_j . Оставшаяся часть соответствует J_m .

Для более точного определения J_j и J_m необходимо вычитать из общего числа совпадений число случайных совпадений, которое определяется по формуле $F_{сл} = 2 \tau_{сиг} F_1 F_2$, где $F_{1,2}$ - частота срабатывания счетчиков, $\tau_{сиг}$ — длина сигналов после формирователя.

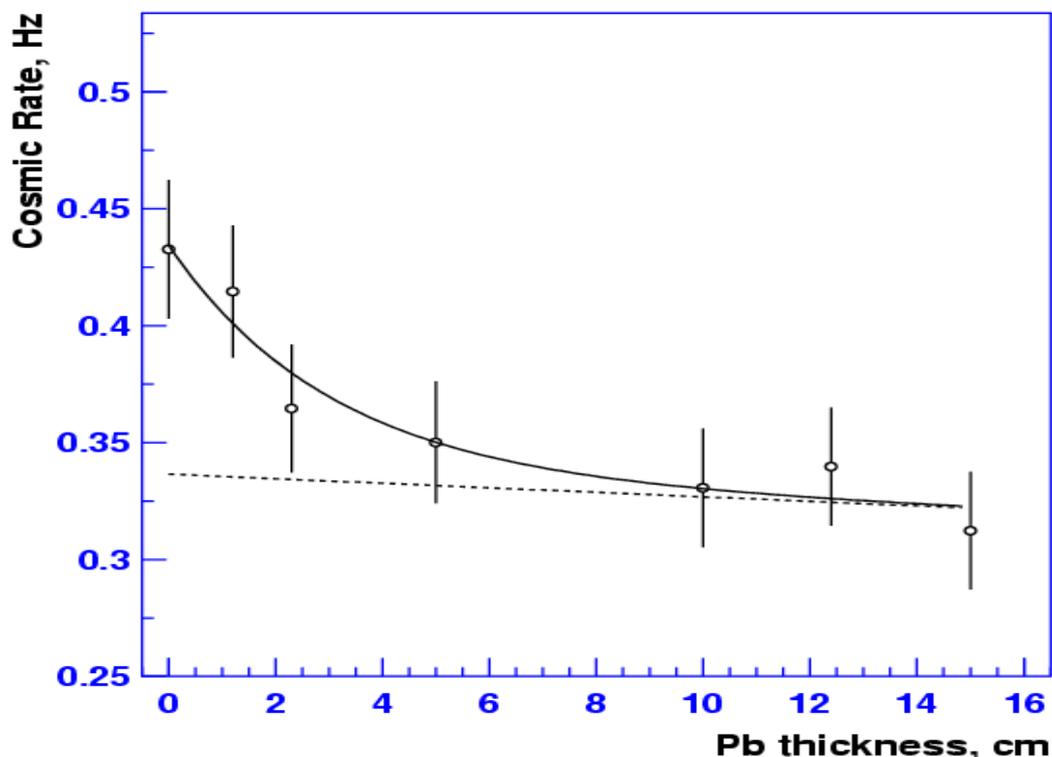


Рис. 2. Кривая поглощения частиц космических лучей в свинце.

4.1 Порядок выполнения измерений.

- 1) Включить сетевое питание электроники и высоковольтного источника.
- 2) Проверить при помощи осциллографа работоспособность детекторов и электроники, наблюдая сигналы в последовательных узлах схемы :
 - после детектора;
 - после дискриминатора;
 - после формирователя ;
 - после схемы совпадений.
- 3) Измерить характерную ширину и амплитуды сигналов в каждой точке.
- 4) Измерить скорость счета каждого детектора после дискриминатора и после формирователя.
- 5) Вычислить частоту счета случайных совпадений.
- 6) Измерить общую интенсивность космического излучения без свинцового фильтра установив время измерения 250 сек.
- 7) Поставить поочередно свинцовые фильтры толщиной 1.2, 2.4, 5, 10, 12.4, 14.8 см , измерить соответствующее число и занести в таблицу. Определить статистические ошибки измерения частоты исходя из Пуассоновской статистики.
- 8) Построить график зависимости интенсивности скорости счета от толщины фильтра X.
- 9) Проанализировать форму кривой поглощения с точки зрения характера взаимодействия электронов и мюонов в свинце. Грубо определить соотношение мягкой и жесткой компонент. Для улучшения точность эксперимента определить критические 2-3 точки и выполнить дополнительные изменения уменьшив статистическую ошибку для критических точек в 2 раза.
- 10) Определить интенсивность жесткой и мягкой компонент $J_{ж}$ и $J_{м}$ в единицах $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}\text{ср}^{-1}$. Оцените ошибки определения этих параметров. Для вычисления J надо принять во внимание соотношение $F=J*W$, где W -телесный угол счетчиков. В нашем случае можно воспользоваться приближенной формулой $W=2\pi(1- L/(L^2+d^2)^{0.5})$, где L - расстояние между счетчиками, а d - размер счетчика.

Таблица 1.

Толщина Фильтра , см	Число отсчетов N	Время набора, сек	Частота, Гц	Ошибка
0		250		
1.2				
.....				

5. Изучение углового распределения мюонов космического излучения на уровне моря и определение их времени жизни.

Основным видом потерь энергии мюонов при прохождении ими воздуха являются потери на ионизацию атомов. Как было сказано выше, для релятивистских частиц потери энергии на ионизацию примерно постоянны и составляют около $\epsilon = 1.8$ МэВ на 1 г/см^2 . Толщину вещества удобно мерить в единицах $l \cdot r$, где l — толщина, а r — плотность. Толщина атмосферы составляет около 900 г/см^2 . Поэтому поверхности могут достигать мюоны с начальной энергией больше, чем $E_{\text{мин}} \approx 1,8 \text{ МэВ} \cdot 900 = 1,6 \text{ ГэВ}$. Без существенной ошибки можно считать, что основная часть мюонов, достигающая уровня моря, зарождена в верхнем слое атмосферы на высоте 10-15 км.

Как было сказано выше, измерения интенсивности вертикального потока мюонов под землей показали, что вероятность поглощения следует закону $1/(l \cdot r)^{1.6}$. Принимая во внимание, что мюоны, зарегистрированные под углом θ прошли слой воздуха толщиной $l_0/\cos \theta$, где l_0 — толщина атмосферы, ожидаемая зависимость скорости счета от угла $N(\theta) \propto (\cos \theta)^{1.6}$. Однако в реальности наблюдается более сильная зависимость $(\cos \theta)^2$. Дополнительные потери можно объяснить распадом мюонов на лету и тогда

$$N_1(\theta)/N_1(0^\circ) = (\cos \theta)^{1.6} \exp(-l_0/\cos \theta/L) / \exp(-l_0/L),$$

где длина пробега $L = g\tau_0 c = c\tau_0/m_m c^2$.

Таким образом

$$\tau_0 = m_m c^2 / E_m \cdot l_0 / c \cdot (1/\cos \theta - 1) / \ln(N_1(0^\circ)/N_1(\theta) \cdot (\cos \theta)^{1.6}).$$

В качестве величины E_m можно взять минимальную энергию, которая необходима мюону прохождения атмосферы

$E_{\text{мин}} = \epsilon \cdot l_0 / \cos \theta$. Тогда формула упрощается до

$$\tau_0 = m_m c^2 / \epsilon c \cdot (1 - \cos \theta) / \ln(N_1(0^\circ)/N_1(\theta) \cdot (\cos \theta)^{1.6}).$$

5.1 Порядок выполнения измерений.

Для получения углового распределения и времени жизни мюонов служит установка с телескопом (как и в первом упражнении). Ось телескопа можно наклонять на заданный угол по отношению к вертикали.

Начало работы до 6 пункта соответствует описанию из предыдущей работы.

- 6) Измерить общую интенсивность космического излучения без свинцового фильтра установив время измерения 250 сек.
- 7) Поставить свинцовый фильтр 5 см, закрепить его. Провести набор статистики поочередно для следующих углов наклона θ : 0,30, 45, 60, 75 и 90 градусов. Данные записать в таблицу.

Таблица 2.

Угол от вертикали , градусы	Число отсчетов N	Время набора, сек	Частота, Гц	Ошибка
0°		300		
30°		400		
45°		600		
60°		600		
75°		600		
90°		600		

6. Обработка результатов.

- 1) Построить полученное экспериментальное распределение $F(\theta)$. Сравнить его с функцией $(\cos \theta)^2$.
- 2) Выделить долю частиц, поглотившихся из-за распада. Для этого на построенный график нанести график $F(\theta) = F(0) (\cos \theta)^{1,6}$.
- 3) Определить время жизни мюона τ_0 для разных значений зенитного угла 30° - 75° . Оценить статистическую ошибку измерения. Проанализировать другие источники ошибок в определении τ_0 .
- 4) Определить абсолютную интенсивность J_0 вертикального потока мюонов на уровне моря (см. пункт 10 из предыдущей работы). Сравнить с известным значением.

7. Контрольные вопросы.

1. Объясните устройство и принцип работы сцинтилляционных детекторов.
2. Каковы природа и состав космических лучей?
3. В каких процессах появляется мюонная компонента космических лучей?
4. Почему интенсивность космических лучей прошедших через свинцовый поглотитель мало отличается от интенсивности космических лучей падающего космического излучения?

8. Список литературы.

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Кн.2. Электричество и магнетизм. - М.: АСТ, 2002. - 336 с.
2. Трофимова Т.И. Курс физики. - М.: Высш. шк, 2002. - 542 с.
3. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. - М.: Высш. шк., 2002. - 718 с.

4. Шубин А.С. Курс общей физики. – М.: Высш. шк., 1976. – 480 с.

5. Кортнев А.В., Рублев Ю.В., Куценко А.Н. Практикум по физике. – М.: Высш. шк., 1963. – 517 с.

