



САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
НАУЧНЫЙ ПАРК

Образовательный ресурсный центр по направлению физика

Л.И. Виноградов

КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ

**Учебно-методическое пособие
(описание лабораторной работы)**

№ 6

ПРОБНАЯ ВЕРСИЯ

Санкт-Петербург

2018

Учебно-методическое пособие предназначено для студентов СПбГУ естественно-научных направлений обучения.

Лабораторная работа выполняется на оборудовании Образовательного ресурсного центра по направлению физика Научного парка СПбГУ (<http://researchpark.spbu.ru>).

Космические лучи

Введение

Атмосфера нашей планеты непрерывно подвергается бомбардировке космическими лучами. Наблюдаемые на поверхности Земли частицы и кванты, как правило, носят вторичный характер. Возникают, так называемые, вторичные космические лучи в результате взаимодействия в атмосфере и в толще Земли.

Космические лучи, бомбардирующие атмосферу, это ядра атомов, электроны, фотоны, нейтрино и, в общем, это могут быть и экзотические частицы, например, WIMPs.

По месту возникновения космические лучи могут принадлежать источникам, лежащим в нашей Галактике, это так называемые галактические космические лучи (ГКЛ) и вне нашей Галактики (ВГКЛ). В настоящее время полагают, что наиболее энергичные космические лучи возникают именно вне нашей Галактики. Галактические и внегалактические космические лучи (ГКЛ и ВГКЛ) обычно называются первичными космическими лучами (ПКЛ). И, наконец, источником космических лучей является наше Солнце (СКЛ-солнечные космические лучи).

Основной поток космических лучей состоит из ядер атомов. Энергетический спектр частиц простирается от десятков МэВ (10^7 эВ) до 10^{20} эВ. Для сравнения: современный ускоритель Большой Адронный Коллайдер сталкивает протоны с энергией $7 \cdot 10^{12}$ эВ (7 ТэВ). Если рассмотреть в спектре частицы с энергий выше 1 ГэВ (10^9 эВ) на нуклон, то 85 процентов это будут протоны, 13 процентов альфа частицы и порядка 2 процентов приходится на электроны и ядра более тяжелых элементов. Для энергий в спектре менее 1 ГэВ на нуклон соотношение протонов, альфа частиц и других частиц составляет 90, 9,1 процент.

Спектр энергий космических лучей для всех частиц $dN(E)/dE$ спадает с ростом энергии (выше энергии 10^{10} эВ) как $E^{-2.7}$, но при энергии порядка $3 \cdot 10^{15}$ эВ наблюдается излом, т.н. "коллено" (knee), после которого спад спектра идет сильнее, как $E^{-3.2}$. При

энергии порядка 10^{18} эВ спектр уплощается и переходит в т.н. “лодыжку” (ankle). (При определенной фантазии, наблюдая спектр КЛ в другом масштабе, можно увидеть нечто, напоминающее ногу. Отсюда и возникли термины “колени”, ”лодыжка”. Физики шутят.)

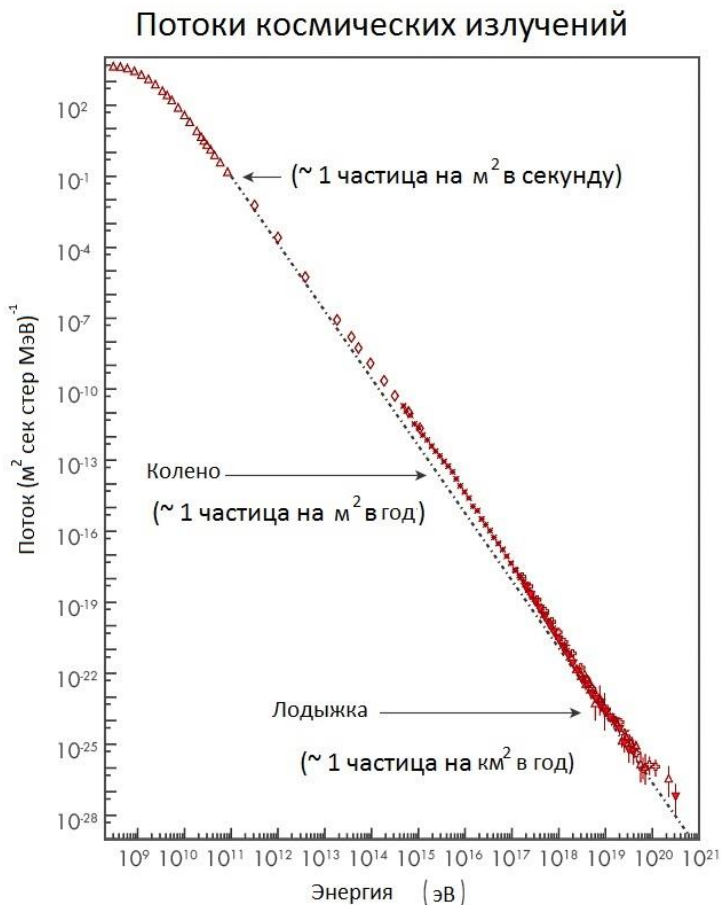


Рис.1. Энергетический спектр всех частиц космических лучей. Область энергий менее 10^{10} эВ подвержена значительным вариациям в результате солнечной активности.

При энергии $\sim 10^{10}$ эВ поток частиц составляет 1 частица на 1 м^2

в 1 сек, в области колена – 1 частица на 1 м^2 в 1 год, а при энергиях близких к максимальным – 1 частица на 1 км^2 в 1 год.

Потоки частиц от Солнца во время солнечных вспышек может достигать около 10^6 частиц на 1 см^2 в 1 сек. Энергия частиц от Солнца сравнительно невысокая. Полученный из наблюдений верхний предел энергии СКЛ порядка $2 \cdot 10^{10}$ эВ.

Приходящее к атмосфере Земли космическое излучение (ГКЛ) изотропно. Это связано с воздействием на траекторию заряженных частиц галактических магнитных полей. Изотропность ГКЛ затрудняет локализацию и идентификацию источников галактических космических лучей. В настоящее время считается, что основными источниками космических лучей внутри Галактики являются взрывы сверхновых звезд. Возможно, что частицы с очень большими энергиями ($E > 10^{18}$ эВ) могут достигать атмосферы Земли напрямую от источников, но таких события происходят и регистрируются очень редко.

Интенсивность ГКЛ в мягкой части спектра модулируется 11-летними циклами солнечной активности. Наблюдается антикорреляция: при максимальном количестве солнечных пятен, поток ГКЛ уменьшается из-за сильных магнитных полей в межпланетном пространстве, обусловленных мощными выбросами плазмы Солнцем. Происходит блокирование потока ГКЛ на пути в солнечную систему этими магнитными полями. Кроме того магнитное поле Земли (Земля это магнитный диполь) сильно влияет на траектории частиц с энергиями меньшими 1ГэВ на нуклон. Давно известен т.н. широтный эффект: поток частиц на геомагнитном экваторе меньше по сравнению с потоком в высоких широтах (величина эффекта порядка 10%).

Первичный поток КЛ (в основном это протоны) не достигает поверхности земли, так как по мере вхождения в плотные слои атмосферы происходят многочисленные взаимодействия частиц с ядрами атомов воздуха. Происходит развитие т.н. ядерно-каскадного процесса (Рис.2). В результате каскада возникает большое количество вторичных частиц в атмосфере: пионов, нуклонов, мюонов, электронов, позитронов, фотонов. От одной энергичной частицы возникает ливень вторичных частиц, которые делятся на три ветви: адронную, мюонную и электронно-фотонную. Ливень вторичных частиц покрывает большую пло-

щадь и называется широким атмосферным ливнем (ШАЛ). Достигают поверхности Земли в основном релятивистские мюоны (жесткая компонента). Электронно-фотонная компонента поглощается сильнее атмосферой (мягкая компонента).

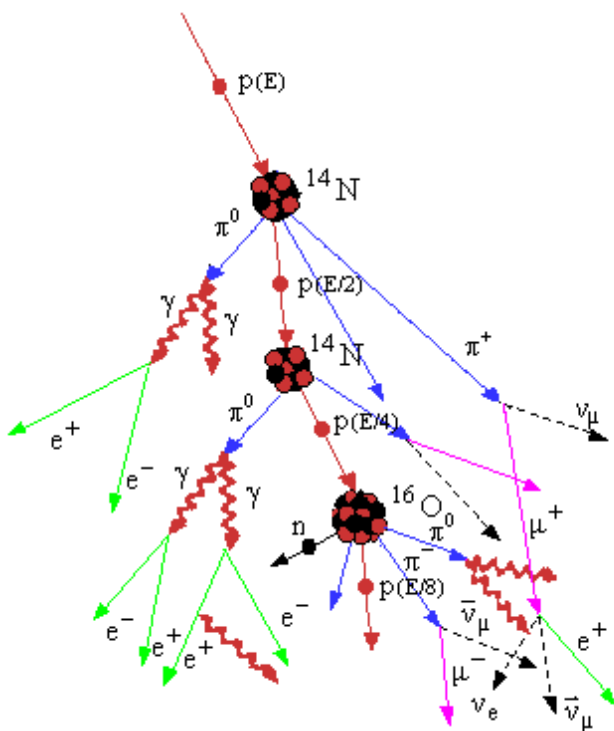


Рис.2. Схематическое изображение ядерно-каскадного процесса, вызванного первичной частицей протоном.

Из сказанного выше следует, что изучение ГКЛ «прямыми» методами (методами, в которых измеряется энергия и заряд первичной частицы) можно только за пределами атмосферы при помощи космических аппаратов или высотных аэростатов. Измерения энергии космических лучей «прямыми» методами ограничены возможностями космических аппаратов. Достижимая граница этих измерений оказываются менее 10^{15} эВ. Это область «колена» в спектре космических лучей. Сведения о высокоэнергичной ча-

сти спектра космических лучей получено «косвенными» методами, прежде всего методом широких атмосферных ливней (ШАЛ). Суть метода состоит в регистрации ливня вторичных частиц, образующихся при вхождении в атмосферу первичной частицы. Собирая сведения об энергии частиц ливня от детекторов, размещенных на большой площади, делается заключение об энергии частицы, породившей ливень.

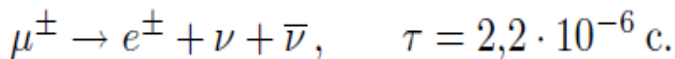
Излучение, приходящее в нижние слои атмосферы, принято делить на мягкую и жесткую компоненты.

Мягкая компонента состоит из электронов, позитронов и γ -квантов, которые сильно поглощаются в веществе. Поглощение частиц мягкой компоненты существенным образом зависит от порядкового номера Z вещества поглотителя. Частицы мягкой компоненты почти целиком поглощаются десятисантиметровым 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 мюон примерно в 207 раз тяжелее электрона.

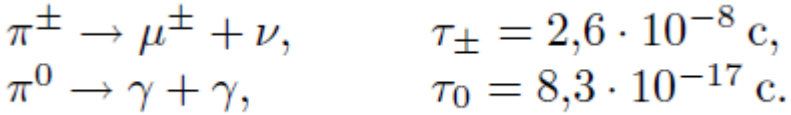
Потери энергии на ионизацию и возбуждение атомов вещества для электронов и мюонов космических лучей на уровне моря примерно одинаковы и сравнительно малы. Особенностью мюонов является их распад на электроны, нейтрино и антинейтрино:



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.

§ 1. 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:



Следовательно, мюоны проходят почти весь слой атмосферы ($\sim 900 \text{ г/см}^2$). При этом они частично поглощаются, частично распадаются. Мюоны, идущие под углом θ к вертикали (рис. 1.2) и попадающие на уровень моря, проходят в атмосфере путь в $1/\cos\theta$ раз 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

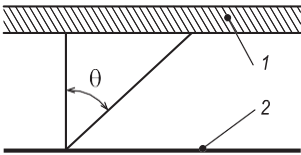


Рис.3. Генерация мюонов и путь их прохождения в атмосфере:
1 - слой генерации; 2 - уровень моря

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 количе-

ства пройденного плотного вещества x (г/см^2) по следующему закону:

$$N(x) = \left(\frac{900}{900 + x} \right)^{1,6} = \left(\frac{900}{\xi} \right)^{1,6},$$

где $\xi=900+x$ - полное количество вещества, пройденного мюоном от места генерации до места поглощения (масса вертикального столба воздуха принята равной 900 г/см^2). Из рис.3 видно, что $\xi=900/\cos\theta$. Таким образом, число мюонов, дошедших до счетчика на уровне моря, уменьшается за счет поглощения в веществе по закону

$$P_1(\theta) \sim (\cos \theta)^{1,6}. \quad (1)$$

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

$$P_2(\theta) = \exp \left(-\frac{l(\theta)}{L} \right), \quad (2)$$

где $L = \mathbf{v}\tau$ - длина распадного пробега; $\mathbf{v} = \beta\mathbf{c}$ - скорость мюона; τ - время жизни движущегося мюона. Из релятивистской механики известно, что

$$\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - \beta^2}},$$

где τ_0 - время жизни покоящегося мюона. Тогда

$$L = \beta c \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - \beta^2}} = \beta c \tau_0 \frac{E_\mu}{m_\mu c^2}, \quad (3)$$

где $E_\mu = m_\mu c^2 / \sqrt{1 - \beta^2}$ - полная энергия мюона, E_μ можно принять равной $4 \cdot 10^9$ эВ; m_μ - масса покоящегося мюона, которая в энергетических единицах составляет 105,8 МэВ/ c^2 .

Отношение числа мюонов, идущих под зенитным углом θ , к числу вертикально падающих мюонов можно записать в виде

$$\frac{N(\theta)}{N(0^\circ)} = \frac{P_1(\theta)}{P_1(0^\circ)} \frac{P_2(\theta)}{P_2(0^\circ)} = (\cos \theta)^{1,6} \frac{e^{-l(\theta)/L}}{e^{-l_0/L}}, \quad (4)$$

где $P_1(\theta)$ и $P_2(\theta)$ определены формулами (1) и (2). Можно считать, что по вертикали мюоны проходят путь $l_0=15$ км. Путь мюонов под углом θ равен

$$l(\theta) = \frac{l_0}{\cos \theta}. \quad (5)$$

Воспользовавшись формулами (3) и (5), а также экспериментально определенным отношением $N(\theta)/N(0^\circ)$, с помощью формулы (4) 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 ионизационного торможения.

§ 2. Указания по выполнению работы

В настоящей работе изучаются вторичные космические лучи, их состав и угловое распределение жесткой компоненты. Работа выполняется с помощью “телескопа”, состоящего из двух детекторов, включенных на совпадения (см. блок-схему на рис.4). Космические частицы регистрируются детекторами 1 и 2. Если частица пройдет через оба детектора (частица а), то схема совпадений 3 вырабатывает импульс. Если частица проходит через один из детекторов и не попадает в другой детектор (частица б), тогда схема совпадений импульс не вырабатывает. Таким образом, число импульсов, сосчитанных пересчетным прибором 4, будет равно числу частиц, прошедших через оба детектора и зарегистрированных ими.

Задание 1. Изучение состава космических лучей.

В этой части работы надо показать, что наблюдаемые на уровне моря космические лучи состоят из двух резко отличающихся по своим свойствам компонент - мягкой и жесткой - и найти отношение интенсивностей 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 будет 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 I_M и жесткой I_J компонент. Для этого прямолинейную часть, соответствующую жесткой компоненте, продолжают до пересечения с осью ординат. Это дает величину I_J (рис.4). Оставшаяся часть соответствует I_M . Для более точного определения I_J и I_M необходимо вычитать из общего числа совпадений число случайных совпадений.

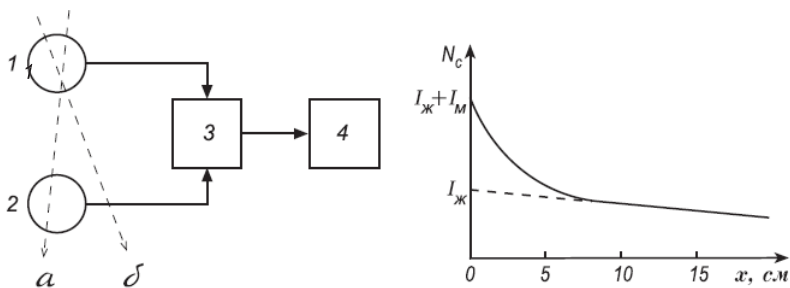


Рис.4. Блок-схема лабораторной установки для изучения космических лучей (слева) и кривая поглощения космических лучей

фильтром (справа).

Задание 2. Изучение углового распределения жесткой компоненты космических лучей и определение времени жизни мюона.

В этой части работы можно воспользоваться установкой, используемой в первой части с тем дополнением, что телескоп детекторов можно поворачивать вокруг горизонтальной оси на заданный угол по отношению к вертикали. Для изучения жесткой компоненты космических лучей между детекторами следует поместить свинцовый фильтр толщиной не менее 10 см. При расположении установки внутри здания роль фильтра играют бетонные перекрытия, и свинцовый фильтр не нужен.

При помощи установки найти угловую зависимость интенсивности жесткой компоненты космических лучей, т. е. зависимость счета совпадений N от зенитного угла θ (в том числе для $\theta=0^\circ$). Измерения счета совпадений надо производить с как можно большей статистической точностью, учитывая, что поток мюонов на уровне моря составляет около 1 мюона в минуту на см^2 .

Длину распадного пробега и время жизни мюона определить одним из способов, указанных в §3.

В отчете представить блок-схему установки с описанием опытов, таблицы измерений и графики, значения интенсивностей жесткой и мягкой компонент космических лучей, значение энергии мюонов, использованное в расчетах, значение длины распадного пробега, вычисленное время жизни мюона.

§ 3. Указания по обработке данных и вычислениям

Обычно из общего числа совпадений необходимо вычитать число случайных совпадений. Число случайных совпадений определяется по формуле

$$N_{\text{сл}} = 2 \text{ тразр} N_1 N_2 ,$$

где тразр - разрешающее время схемы совпадений; N_1 и N_2 - число импульсов, сосчитанных отдельно первым и вторым детекторами (каналами).

В результаты измерений под углами $\theta > 50^\circ$ необходимо внести

поправку за счет ливней N_L из стен и потолка помещения.
 В качестве числа таких ливней берут число совпадений при угле 90° (за вычетом случайных совпадений).
 Результаты измерений заносят в таблицу:

| θ | $N_{\text{ИЗМ}}(\theta)$ | $N_{\text{ИЗМ}}(\theta) - N_{\text{СЛ}}$ | $N_{\text{ИЗМ}}(\theta) - N_{\text{СЛ}} - N_L$ |
|----------|--------------------------|--|--|
| | | | |

Для оценки времени жизни мюона надо построить график функции

$$\frac{N_{\text{ИЗМ}}(\theta) - N_{\text{СЛ}} - N_L}{N_{\text{ИЗМ}}(0^\circ) - N_{\text{СЛ}}}$$

в зависимости от угла θ и сравнить его с графиком функции $(\cos\theta)^{1.6}$, характеризующей уменьшение интенсивности жесткой компоненты космических лучей лишь за счет ионизационных потерь. По величине $N(\theta)/N(0^\circ)$, взятой из экспериментального графика для некоторого угла (например, $\theta = 60^\circ$) можно оценить значение τ_0 .

Вычислить значение τ_0 и оценить погрешность результата можно при помощи метода наименьших квадратов. Для этого нужно аппроксимировать экспериментальную кривую $N_{\text{ИЗМ}}(\theta) - N_{\text{СЛ}} - N_L$ соответствующей функцией (см. формулы (3)-(5)). Как видно, в таком подходе не обязательно знать $N_{\text{ИЗМ}}(0^\circ)$, поскольку эта величина является варьируемым параметром и определяется из подгонки.

§ 4. Контрольные вопросы

Состав и энергия первичных космических лучей.
 Мягкая и жесткая компоненты космических лучей.
 Механизм образования мюонов в космических лучах. Характеристики распада π -мезонов и мюонов.
 Почему электроны и позитроны космических лучей относятся к “мягкой” компоненте и поглощаются целиком приблизительно в 10 см свинца, а мюоны той же энергии относятся к “жесткой”

компоненте и свободно проходят через этот слой?

Время жизни мюонов, учет эффекта, следующего из специальной теории относительности.

Зависимость вероятности поглощения и распада от расстояния, пройденного μ -мезонами в атмосфере.

Описание экспериментальной установки и порядок выполнения работы по изучению космических лучей.

Методика обработки данных, учет ливней от стен и числа случайных совпадений. Определение времени жизни μ - мюона и погрешности полученного результата.

Литература

1. Практикум по ядерной физике, под редакцией В.О.Сергеева, Спб, 2006.
2. Т.А.Тулина. Космические лучи. Методические материалы к дистанционным экспериментальным работам по ядерной физике. Санкт-Петербург 2009.
3. Сайт: <http://nuclphys.sinp.msu.ru>
4. Сайт проекта “Нуклон”: <http://www.sinp.msu.ru/ru/project/8344>
5. Сайт Particle Data Group: <http://pdg.lbl.gov/2017/reviews/rpp2017-rev-cosmic-rays.pdf>
6. Сайт обсерватории им.Пьера Оже: <https://www.auger.org/>

24.01.2018. вариант №1, подготовлен доцентом Виноградовым Л.И.