

Санкт-Петербургский государственный университет

Физический факультет

Т. А. Тулина

КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ

Методические материалы к дистанционной лабораторной работе

Санкт-Петербург, 2008

Оглавление

1. Открытие космических лучей	3
2. Свойства и происхождение первичных космических лучей	3
3. Космические лучи в гелиосфере	10
4. Космические лучи в геосфере	11
5. Некоторые сведения о природе мюонов и пионов.....	13
6. Угловое распределение жесткой компоненты космических лучей на уровне моря	15
7. Указание по обработке данных и вычислениям.....	17
Литература.....	18

1. Открытие космических лучей

Космические лучи были открыты в 1912 году австрийским физиком Виктором Францем Гессом (1883—1964).

История открытия космических лучей начинается с 1900—1901 года, когда впервые обнаружили “остаточную” ионизацию, т. е. слабый “темновой” ток при изучении влияния на электропроводность газов ионизирующих источников. Одним из исследователей “темнового” тока был Ч. Вильсон, создатель “камеры Вильсона” (1912 год). Сначала считали, что ионизирующее излучение, вызывающее “темновой” ток исходит из почвы Земли. Тем более, интенсивность этого излучения падала с высотой над уровнем моря. В. Гесс, изучая “поле радиоактивности” (field of radioactivity), поднимался с ионизационной камерой на воздушном шаре до высоты 5 км и обнаружил возрастание интенсивности, начиная с 1 км над уровнем моря. Он назвал открытое им излучение “высотным”. Были различные предположения о происхождении этого излучения, пока в 1925 году американский физик Р. А. Милликен не доказал его внеземное происхождение. Он же и дал ему современное название “космические лучи”.

2. Свойства и происхождение первичных космических лучей

Космические лучи, которые мы наблюдаем у поверхности Земли, в основном продукты взаимодействия первичных космических лучей со слоем атмосферы.

Основная компонента первичных космических лучей — ядерная. Она на 87% состоит из протонов и на 12% из ядер гелия. На долю более тяжёлых ядер приходится 1%. Космические лучи также содержат электроны — 2% от числа ядер, позитроны — 10% от числа электронов, нейтрино и фотоны. Есть небольшое количество антипротонов — 10^{-4} от числа протонов.

Химический состав космических лучей и распространённость этих же элементов в Галактике совпадают, за исключением области лёгких ядер Li, Be, B и области железа Sc, Ti, V. Этот факт можно объяснить тем, что взаимодействуя с межзвёздным веществом, а это в основном водород, космические лучи претерпевают ядерные взаимодействия, превращаясь в ядра с меньшим Z (реакции срыва), обогащая тем самым выделенные области элементов по отношению к их содержанию в Галактике. Таким образом, можно предположить, что космические лучи имеют галактическое происхождение. Поток галактических космических лучей на верхние слои атмосферы Земли приблизительно равен 1 частица/(см²×сек), (любопытно отметить: плотность межзвёздного вещества в Галактике — 1 частица/см³).

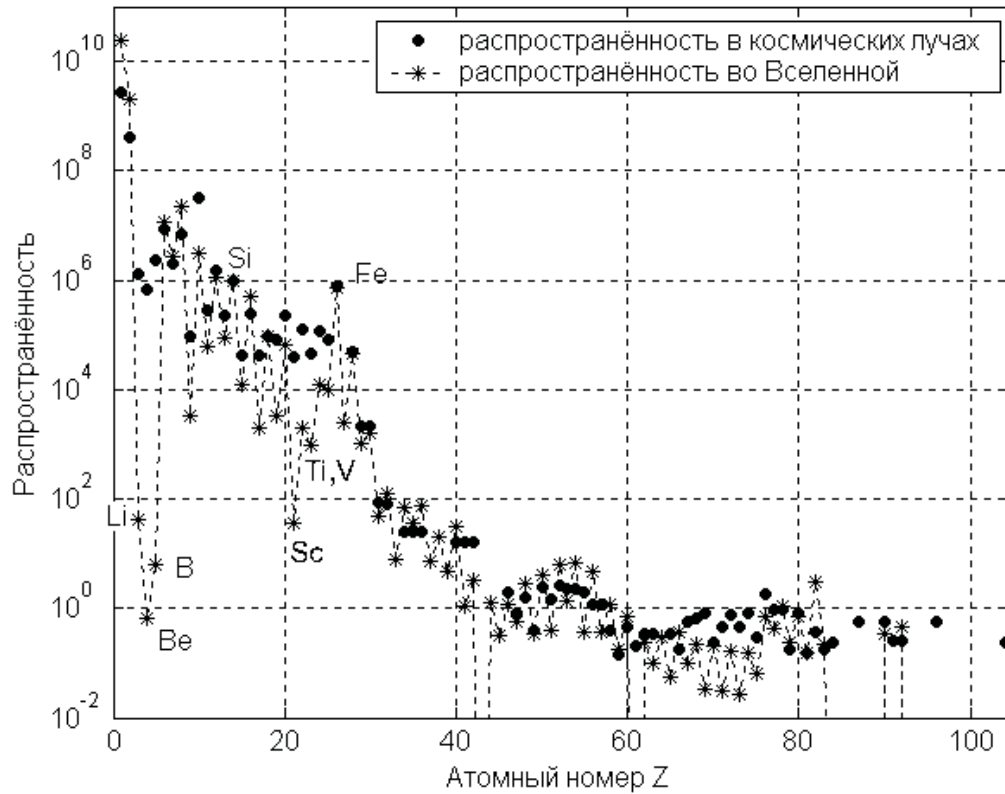


Рис.1. Состав ядерной компоненты первичных космических лучей и распространённость ядер во Вселенной. Оба графика нормированы так, что содержание кремния, Si, равно 10^6 .

Энергетический спектр **протонно-ядерной компоненты** первичного космического излучения лежит в области от 10^6 до 10^{20} эВ. Интенсивность падает с ростом энергии частиц как $E^{-\xi}$. В интервале энергий от 10^{11} эВ до 10^{15} эВ $\xi=2,75$, а потом, вплоть до энергии $\sim 10^{20}$ эВ $\xi=3,2$. Область энергии 10^{15} эВ, где спектр испытывает резкий излом принято называть коленом.

Природа этого излома в спектре космических лучей связана с тем, что частицы с энергиями выше $10^{14} - 10^{15}$ эВ плохо удерживаются магнитным гравитационным полями Галактики.

Область предельных значений энергии $\sim 10^{19} - 10^{20}$ ГэВ является большой загадкой для учёных. Не обнаружены надёжные источники



Рис.2. Интегральный энергетический спектр протонно-ядерной компоненты космических лучей.

частиц таких энергий (см. конец главы), нет сведений об их составе, и до сих пор ведутся споры, не являются ли завышенными эти энергии. Дело в том, что протоны и ядра с энергиями $(1—5) \times 10^{19}$ эВ, взаимодействуя с реликтовым излучением, должны быстро терять энергию на фоторождение пионов.

Спектр электронной компоненты измерялся приборами, установленными на искусственных спутниках Земли. При энергиях ниже 1 ГэВ спектр и интенсивность зависят от солнечной активности. В интервале 1—10 ГэВ интенсивность увеличивается с энергией примерно в 50 раз. Энергетический спектр электронов при энергии выше 10 ГэВ пропорционален $E^{-\xi}$, где $\xi = 3,25 \pm 0,20$. Он обрезается на уровне 10^{12} эВ из-за потерь на синхротронное излучение при движении в магнитном поле Галактики. Это излучение находится в радиодиапазоне.

Наряду с диффузным свечением всего небосвода, были найдены источники скопления электронов высокой энергии. Наиболее интересным из них является Крабовидная туманность. Она возникла на месте взрыва сверхновой, который был отмечен в китайских летописях в 1054 году как ярко вспыхнувшая звезда. Границы туманности расширяются со скоростью 1000 км/сек и сейчас она достигает в диаметре около шести световых лет. В центре туманности находится пульсар. Мощность, которая расходуется в ней на образование электронов, достигает примерно 10^{38} эрг/сек.

Позитроны в космических лучах появляются в результате распада π^+ -мезонов, которые рождаются при столкновениях протонно-ядерной составляющей космических лучей с межзвёздным газом.

В настоящее время известны три вида **нейтрино и антинейтрино**: электронное, мюонное и тау-нейтрино. Нейтрино участвуют только в слабых взаимодействиях. Предполагается, что масса нейтрино во Вселенной составляет около 0,1%. Наряду с отдельными источниками нейтрино существует равномерно распределённое во Вселенной фоновое нейтринное излучение. Его наличие объясняется теорией происхождения Вселенной. Согласно этой теории мир образовался в результате Большого Взрыва, природа которого неизвестна. Однако, развитие Вселенной хорошо описано теоретически начиная с **планковского момента** после Большого Взрыва: $t_{\text{пл}} = 5,4 \cdot 10^{-44}$ сек. Этому моменту соответствуют **планковские энергии** частиц 10^{19} ГэВ, их **планковская температура** $T \sim 10^{32}$ К, характерные расстояния между частицами, равные **планковской длине** 10^{-33} см и **планковская плотность** 10^{94} г/см³.

Приблизительно через 1 секунду после Большого взрыва вещество Вселенной состояло из адронов и нейтрино (и их античастицы). Так как адроны и нейтрино практически не взаимодействуют, то в этот момент нейтринное облако стало расширяться и остывать отдельно. Так образовались реликтовые нейтрино. В наши дни плотность каждого вида нейтрино во Вселенной 100 – 150 пар $\nu\bar{\nu}$ в 1 см³, средняя энергия $5 \cdot 10^{-4}$ эВ.

Существует целый раздел в астрономии — нейтринная астрономия. Традиционный объект изучения нейтринной астрономии — наше Солнце. Нейтрино слабо поглощаются веществом и в состоянии пересечь Метагалактику,

т. е. приносят нам информацию из отдалённых частей Вселенной. Выдающимся достижением нейтринной астрономии является регистрация потока нейтрино от вспышки сверхновой в Большом Магеллановом Облаке в 1987 году (SN 1987A, SN — Super Nova).

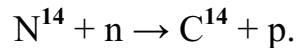
Фотоны занимают особое место в семье космических лучей. В первую очередь это свет, который позволил людям наблюдать звёздное небо и получить первые базовые знания о строении Вселенной. Современные телескопы, работающие в широком спектре электромагнитных волн от радиодиапазона до рентгеновских и гамма лучей, позволяют исследовать многообразные процессы, протекающие во Вселенной. В частности, в 1948 году было открыто рентгеновское излучение Солнца с помощью счётчика Гейгера-Мюллера, поднятого в верхние слои атмосферы американской ракетой. С тех пор было найдено несколько сот источников рентгеновского излучения, как в нашей Галактике, так и вне неё.

Что касается фотонов с энергией 50-1000 МэВ, то их существование говорит о взаимодействии протонов с межзвёздным веществом. Одним из продуктов этого взаимодействия являются π^0 мезоны, которые распадаются на γ -кванты. По интенсивности γ -излучения можно судить о плотности вещества во Вселенной.

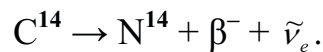
В 1965 году было открыто реликтовое излучение. Спектр этого излучения совпадает со спектром абсолютно чёрного тела при температуре 2,78 °К. Реликтовое излучение отличается высокой изотропией. Однако на небесной сфере есть две диаметрально противоположные области, в одной из которых температура спектра выше средней, а в другой ниже. Это объясняется движением солнечной системы, эффектом Доплера. Скорость Солнца относительно реликтового излучения 390 ± 60 км/сек. Происхождение реликтового излучения, как и происхождение реликтовых нейтрино, связано с эволюцией Вселенной. Примерно через 400000 лет после Большого взрыва, когда температура упала до 4000-3000 °К, произошла рекомбинация протонов и альфа-частиц с электронами, т. е. образовались атомы водорода и гелия. Средняя энергия электромагнитного излучения такой температуры 0,3-0,4 эВ. Оно уже не могло ионизовать атомы и поглощаться ими. В результате Вселенная стала прозрачна для излучения. Свободно распространяясь и остывая, это излучение в настоящее время заполняет всю Вселенную. Плотность числа фотонов около 400 см^{-3} , что соответствует плотности энергии $0,25 \text{ эВ/см}^3$. На каждый атом во Вселенной приходится более 10^8 квантов реликтового излучения. Из-за высокой плотности реликтовое излучение активно взаимодействует с космическими частицами. Выше упоминалось, что протоны и ядра с энергиями $(1-5) \cdot 10^{19}$ эВ, взаимодействуя с реликтовым излучением, теряют энергию на фоторождение пионов. Тяжёлые ядра в таких столкновениях расщепляются, что, возможно, является причиной низкого содержания тяжёлых элементов во Вселенной. Быстрые электроны, сталкиваясь с фотонами реликтового излучения, могут передать им свою энергию вплоть до рентгеновского диапазона

(обратный эффект Комптона). Этим процессом можно объяснить фоновое рентгеновское излучение.

Важной характеристикой космических лучей является их практически стабильная интенсивность на протяжении миллиардов лет. В пределах от 35000 лет тому назад и до настоящего времени мы оцениваем интенсивность космического излучения с помощью радиоуглеродного анализа. Известно, что состав атмосферы Земли за это время не изменялся. Космические лучи, вступая в реакции с ядрами атмосферы, порождают нейтроны, которые взаимодействуют с ядрами азота:



Углерод C^{14} нестабилен, и распадаясь с периодом $T_{1/2} = 5700$ лет, превращается снова в азот:



В случае постоянства интенсивности космических лучей, соотношения изотопов углерода $\text{C}^{14}/\text{C}^{12}$ в атмосфере не изменяется. Углерод, в составе углекислого газа, поглощается растениями, как наземными, так и морскими. После гибели растения, углерод C^{14} распадается, и соотношение изотопов углерода $\text{C}^{14}/\text{C}^{12}$ в нём падает со временем. Если мы имеем датированные образцы дерева или ткани, донных отложений ила и т. д., то мы можем восстановить интенсивность космических лучей. Такие предметы находятся в гробницах египетских фараонов, в скифских курганах. Датировка археологических находок не древнее 5000 лет. Донные отложения ила в океанах позволяют проследить интенсивность космического излучения вплоть до 35000 лет, при условии, что ил откладывался равномерно во времени. С точностью 20% можно сказать, что никаких аномальных отклонений интенсивности космических лучей за этот период не было.

Более отдалённые периоды изучаются по соотношению радиоактивных изотопов в метеоритах, а также в лунном грунте. Исследования показали, что 300-900 миллионов лет назад поток космических лучей был в 2-3 раза меньше, чем в настоящее время. Но в более ранние периоды, 1,4 и 2,2 миллиарда лет, интенсивность космических лучей была примерно такая же, как и сейчас.

Для определения ядерного состава космического излучения был разработан метод ископаемых треков. В старых кристаллических породах (кварц, полевой шпат и др.), которые сейчас покрыты слоем грунта, а когда-то были на поверхности, находят следы прохождения тяжёлых заряженных частиц ($Z > 25$). Ядра разрушают кристаллическую решётку и по масштабам этого разрушения судят об их заряде. Исследования показали, что за последние 10 миллионов лет состав тяжёлой ядерной компоненты не изменился.

Следует упомянуть о высокой изотропии протонно-ядерной и электронной компонент космического излучения. Причиной этому являются неодно-

родности магнитного поля в Галактике. Заряженные частицы, отклоняясь в магнитных полях, теряют первоначальное направление и беспорядочно рассеиваются. Исключение составляют только частицы с предельно высокими энергиями. Их треки преимущественно лежат в плоскости диска нашей Галактики. Коэффициент анизотропии $\delta = (J_{\max} - J_{\min}) / (J_{\max} + J_{\min}) \approx 0,2 - 0,25$.

Что касается фотонов, кроме реликтового излучения, то картина их распределения в пространстве более сложная и обусловлена расположением источников.

Наряду с потерями энергии из-за взаимодействия с межзвёздным веществом (1 частица/см³) и реликтовым излучением существуют механизмы ускорения космических частиц. Важнейший из них — это ускорение на ударных волнах, образованных взрывами сверхновых. Внешняя оболочка взорвавшейся звезды расширяется со скоростью, превышающей скорость распространения колебаний в межзвёздном веществе, “скорости звука”. Образуется ударная волна, несущая в себе предельно ионизованное вещество, в которое вморожено магнитное поле. Это поле генетически связано с магнитным полем взорвавшейся звезды. Его напряжённость многократно превосходит напряжённость магнитного поля межзвёздного пространства. Движущееся магнитное поле создаёт индуцированное электрическое поле. Космическая частица, летящая навстречу такой волне, искривляет свою траекторию из-за магнитного поля и одновременно ускоряется электрическим полем. Она может вылететь из области ударной волны, как бы отразившись от неё, может задержаться в ней, пока магнитное поле ударной волны не уменьшится. Заряженные частицы могут потерять энергию в ударных волнах, это происходит, если они её догоняют. Однако вероятность встретить ударную волну больше, чем догнать. Исходя из известных скоростей ударных волн и вероятности встречи с ними космических частиц, расчёты предсказывают увеличение энергии вплоть до 10^{14} эВ. Прирост энергии тем больше, чем больше заряд частицы.

По составу и энергетическому спектру, можно делать предположения об источниках космических лучей. Выше было отмечено, что схожее распространение элементов в космических лучах и в Галактике указывает на их галактическое происхождение.

Наша галактика называется Млечный Путь или Галактика с большой буквы. Она является одной из 10^{11} галактик во Вселенной. Видимая часть Вселенной называется Метагалактикой. Плотность энергии космических лучей, магнитного поля и межзвёздного вещества в Галактике приблизительно одинакова и составляет по отдельности 10^{-12} эрг/см³ ($\sim 0,6$ эВ/см³). Полная энергия космических лучей равна произведению плотности энергии на объём Галактики $W \sim 10^{54}$ эрг.

Если бы космические лучи жили в Галактике бесконечно долго, то даже слабые источники могли бы обеспечить такую энергию. Но Галактика заполнена межзвёздным веществом, в основном водородом, при столкновениях с которым, космические лучи теряют энергию. Они также покидают нашу Га-

лактику, преодолев гравитацию и магнитное поле. Поэтому время жизни космических частиц ограничено: $T \sim 10^{14}$ сек или $3 \cdot 10^6$ лет. Таким образом, мощность источников космического излучения должна быть не меньше чем

$$P > (W/T) \sim 10^{54} \text{ эрг} / 10^{14} \text{ сек} = 10^{40} \text{ эрг/сек.}$$

Солнце испускает около 10^{26} частиц с энергией выше 10^9 эВ в секунду. Следовательно, мощность излучения Солнца 10^{35} эВ/сек или около 10^{23} эрг/сек ($1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-12}$ эрг). В галактике около 10^{11} звёзд, они дают 10^{34} эрг/сек, что явно недостаточно для поддержки уровня космического излучения. К тому же химический состав и спектр солнечного излучения не соответствует космическим лучам. В Галактике есть звёзды много мощнее Солнца, но их недостаточно для пополнения космических лучей.

Главный источник космических лучей — это взрывы сверхновых. Суммарная энергия выброшенной из них материи достигает 10^{54} эрг. Известно, что в нашей Галактике сверхновые взрываются примерно раз в 30 лет, так что они вполне способны поддержать уровень космического излучения.

К внегалактическим источникам космических лучей относятся радиогалактики и квазары. Радиогалактики отличаются от обычных галактик тем, что их светимость в радиодиапазоне повышена по сравнению с другими галактиками. Радиоволны в межгалактическом пространстве рассеиваются меньше, чем видимый свет, поэтому многие радиогалактики практически не видны в оптическом диапазоне. В настоящее время обнаружено более 500 радиогалактик. Они могут быть источниками космических лучей в метагалактическом пространстве.

Другие кандидаты во внегалактические источники космических лучей — квазары. Радиоизлучение от них видно в очень маленьком телесном угле, а в оптическом диапазоне они выглядят как слабые звёзды. Отсюда и их название (quasar — quasi stellar radio source — звёздopodobный радиоисточник). Оптический спектр квазаров имеет очень большое красное смещение, которое соответствует скоростям в сотни тысяч километров в секунду, т. е. удалению от нас в тысячи мегапарсек ($1 \text{ парсек (пк или пс)} = 3,0857 \cdot 10^{16} \text{ м}$; световой год равен $9,1065 \cdot 10^{15} \text{ м}$, $1 \text{ сг} = 0,3068 \text{ пк}$).

Существует ещё одна точка зрения на природу квазаров. Считается, что это выброшенные из ядер близлежащих галактик, а также, возможно, и нашей, сгустки материи, которые удаляются от нас с громадными скоростями, но находятся гораздо ближе, чем предполагаемые квазары-галактики, и имеют небольшие размеры и невысокую светимость.

В последнее время внимание астрофизиков приковано к излучению активных ядер галактик (AGN — active galactic nuclei). AGN — это ядра галактик разного типа, которые характеризуются электромагнитным излучением переменной интенсивности. Диапазон излучения широк, от радиоволн до гамма-лучей. Для наблюдателя с Земли они выглядят как яркие звёзды и выделяют огромное количество энергии: от 10^{42} до 10^{48} эрг/сек, что намного больше, чем выделение энергии Млечного Пути.

Другой интересный объект — гамма всплески (GRB — gamma-ray bursts), в которых за короткий промежуток времени, от 0,1 до 100 сек, высвобождается энергия в виде гамма квантов порядка 10^{52} эрг. Частота всплесков ~ 1-2 раза в день. Выделение энергии гамма всплесками достаточно, чтобы обеспечить плотность космических лучей с энергией более 10^{19} эВ для полного объёма Вселенной. Природа генераторов GRB ещё не до конца изучена.

3. Космические лучи в гелиосфере

Солнце также является источником космических лучей, однако, в его спектре больше протонов (98-99%), меньше ядер гелия (1-2%) и практически отсутствуют другие ядра. Энергия этих частиц лежит в интервале от 10^5 до 10^{11} эВ. Спектр трудно назвать степенным, так как показатель ξ меняется от 2 до 7 по мере увеличения энергии.

Солнце непрерывно излучает электрически нейтральную плазму, состоящую из протонов, альфа-частиц и электронов. Её средняя скорость 320 км/сек, но иногда достигает и 1000 км/сек. Средняя плотность плазмы у орбиты Земли 5-10 частиц/см³. Поток плазмы принято называть солнечным ветром. Скорость солнечного ветра практически не падает с расстоянием от Солнца, уменьшается только его плотность.

Солнечные космические лучи с энергией выше 10^7 эВ являются результатом мощных выбросов вещества атмосферы Солнца во время вспышек. Интенсивность этих вспышек претерпевает 11-летний цикл. В годы активного Солнца интенсивность солнечных космических лучей может в миллионы раз превышать интенсивность галактических, в промежутках между вспышками солнечные космические лучи с высокой энергией не регистрируются. Существует также 27-дневный цикл, связанный с вращением Солнца вокруг своей оси. Примерно раз в 22 года магнитное поле Солнца меняет свои полюса, это сказывается на интенсивности солнечных космических лучей.

Благодаря солнечному ветру, плотность вещества в окрестностях Солнца выше, чем в межзвёздном пространстве. По мере удаления от Солнца плотность вещества падает и “скорость звука” в нём становится меньше скорости распространения солнечного ветра. Формируется первая стоячая ударная волна на расстоянии около 50 АЕ (АЕ — астрономическая единица длины, равная расстоянию от Земли до Солнца, $1,496 \cdot 10^{11}$ м). Гелиосфера — это пространство, ограниченное первой стоячей ударной волной.

Относительно межзвёздного вещества Солнце перемещается со скоростью 20 км/сек, что больше “скорости звука”. За пределами первой стоячей ударной волны образуется вторая ударная волна уже на расстоянии 100 АЕ.

Из-за движения Солнца относительно межзвёздной среды гелиосфера приобрела форму капли. Состояние гелиосферы зависит, в первую очередь, от активности Солнца, т. е. подвержено 11-летнему циклу. Ядерная и электронная компоненты галактических космических лучей, попадая в гелиосферу,

испытывают соответствующие периодические модуляции интенсивности. При высокой активности Солнца интенсивность галактических космических лучей снижается. Колебания достигают 6% от среднего.

С гелиосферой связывают наличие аномальной компоненты космических лучей (АКЛ) (см. рис. 1), т. е. повышенное содержание ядер кислорода и гелия с энергией около 1 ГэВ. Считается, что нейтральные атомы межзвёздного вещества, попадая в гелиосферу, ионизируются плазмой солнечного ветра, теряя 1-2 электрона оболочки. Затем, двигаясь в сторону Солнца, ускоряются в ударных волнах от солнечных вспышек.

4. Космические лучи в геосфере

У Земли есть магнитное поле, способное отклонить заряженную частицу, а также, атмосфера, толщиной 1030 г/см^2 .

Магнитное поле Земли имеет дипольный момент $8,1 \cdot 10^{25} \text{ Гс} \cdot \text{см}^3$. Полюса этого диполя не совпадают с полюсами Земли. Напряжённость поля у поверхности Земли $0,5 \text{ Э}$. Оно простирается на 70-80 тысяч километров в сторону Солнца и на многие миллионы километров в противоположном направлении. Эта асимметрия вызвана солнечным ветром.

Заряженные частицы с энергией ниже 1 ГэВ/нуклон, как правило, не достигают даже верхних слоёв атмосферы, так как захватываются полем. В результате, образовался радиационный пояс Земли. На экваторе он находится в пределах от 700 до 1000 км над уровнем моря, снижается и уплотняется у магнитных полюсов. Он был обнаружен вторым советским спутником, запущенным в ноябре 1957 года. Счётчик Гейгера-Мюллера зарегистрировал высотный ход изменения интенсивности излучения в полярных областях. Это излучение не доходило до поверхности Земли, т. е. должно было быть мягким. Дальнейшие исследования показали, что плотность космических частиц в радиационном поясе в тысячи раз превосходит их плотность на поверхности Земли. Аномальная компонента космических лучей (АКЛ) в большей своей части задерживается в радиационном поясе. Радиационный пояс имеет сложную конфигурацию: есть внутренний и внешний радиационные пояса. Во внутреннем поясе энергия захваченных частиц больше, чем во внешнем. Подобно магнитному полю, радиационные пояса не симметричны относительно оси магнитного диполя. Они прижаты к Земле солнечным ветром в дневное время и отброшены от неё ночью.

Из-за геометрии магнитного поля у частиц небольших энергий больше шансов попасть в нижние слои атмосферы в высоких широтах, чем на экваторе. Около полюсов есть области, в которых магнитное поле практически равно нулю.

Магнитное поле отклоняет первичные заряженные частицы. Положительно заряженные приходят в верхние слои атмосферы преимущественно с Запада, а отрицательно заряженные — с Востока. Азимутальная асимметрия около 0,7 в пользу положительно заряженных частиц.

Известно, что космическая частица с энергией около 10^{10} эВ за время жизни в Галактике преодолевает толщину вещества всего 5 г/см^2 . Атмосфера Земли (толщиной 1030 г/см^2) практически полностью поглощает первичное космическое излучение. При столкновении с ядрами атмосферы протонов и ядер первичного космического излучения происходят ядерные реакции с множественным рождением вторичных частиц, которые, в свою очередь, либо распадаются, либо вступают в реакции с ядрами воздуха. Такой процесс называется каскадным. Число вторичных частиц и их энергии зависят от сорта и энергии первичной частицы. Особенностью взаимодействия частиц высокой энергии с ядрами является эффект лидирования, приводящий к сохранению примерно половины энергии у рождённой частицы того же сорта что и налетающая в каждом акте соударения. Поток вторичных частиц образует конус, ось которого совпадает с направлением движения первичной космической частицы. Пересечение конуса с поверхностью Земли может покрывать десятки квадратных километров. Такие потоки называются широкими атмосферными ливнями (ШАЛ).

Численный состав частиц в ШАЛ вначале растёт с приближением к Земле, потом уменьшается. Протон с энергией 10^{15} эВ порождает в максимуме ливня 10^6 - 10^9 частиц. Состав вторичных частиц показан на рис. 3. До уровня моря могут доходить тысячи вторичных частиц. Как правило, это мюоны, фотоны и электроны. Ядерная компонента на уровне моря мала. Электроны и мюоны тратят практически одинаковую энергию на ионизацию атомов атмосферы. Однако при взаимодействии с кулоновским полем ядра, потери на тормозное электромагнитное излучение у электронов больше в $(m_\mu/m_e)^2 \approx 4,3 \cdot 10^4$ раз, чем у мюонов. Электроны теряют энергию по экспоненциальному закону $E = E_0 e^{-x/r}$, где r — радиационная длина. Для воздуха $r = 36,5 \text{ г/см}^2$. Энергия электрона, прошедшего атмосферу, примерно равна $E = 10^{-12} E_0$.

Фотоны и электроны принято называть мягкой компонентой космического излучения, так как они легко поглощаются плотным веществом. Мюоны с энергией больше 10 ГэВ способны преодолеть толстые слои вещества. Их мы называем жёсткой компонентой вторичных космических лучей.

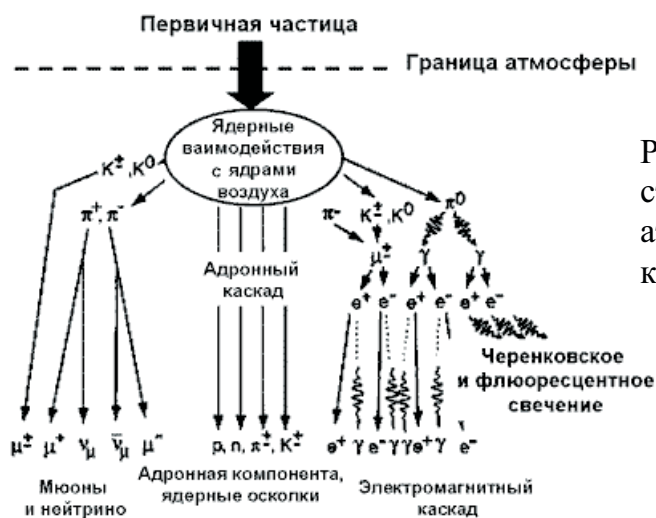


Рис. 3. Каскадный процесс взаимодействия первичных космических лучей с атмосферой — рождение вторичной компоненты космических лучей.

Изучение космических лучей внесло вклад в физику элементарных частиц. По сути, космические лучи были единственным источником редких для земных условий элементарных частиц в первой половине XX века. В 1932 году был открыт позитрон, в 1937 — мюон, в 1947 — пионы и лямбда гиперон. В 1947 — 1951 годы открыли каоны.

5. Некоторые сведения о природе мюонов и пионов

Согласно современным представлениям существует 12 неделимых элементарных частиц. Это кварки и лептоны (от греч. leptos — лёгкий, тонкий). Все они фермионы, т. е. имеют спин $1/2\hbar$. Кварки могут находиться только в связанном состоянии, образуя адроны (от греч. hadros — большой, сильный). Все адроны принимают участие в сильных взаимодействиях. Кварки и лептоны сгруппированы в три поколения. Каждой элементарной частице соответствует античастица.

Таблица 1

Три поколения кварков и лептонов (частицы)

Поколения:	1	2	3	Спин (\hbar), чётность	Электрически й заряд Q
кварки	u	c	t	$1/2^+$	$+2/3e$
	d	s	b	$1/2^+$	$-1/3e$
лептоны	e	μ	τ	$1/2$	$-1e$
	ν_e	ν_μ	ν_τ	$1/2$	0

Таблица 2

Некоторые свойства лептонов (частицы)

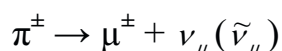
Частица	Масса ($m c^2$) МэВ	Лептонный заряд			Основные моды распада
		L_e	L_μ	L_τ	
e^-	0,511	1	0	0	
μ^-	105,66	0	1	0	$e^- \tilde{\nu}_e \nu_\mu$
τ^-	1777	0	0	1	адроны + ν_τ , $\mu^- \tilde{\nu}_\mu \nu_\tau, e^- \tilde{\nu}_e \nu_\tau$
ν_e	$< 3 \cdot 10^{-6}$	1	0	0	
ν_μ	< 0.19	0	1	0	
ν_τ	< 18.2	0	0	1	

Каждое поколение лептонов имеет свой лептонный заряд, и эксперимент показывает строгое сохранение этого заряда. Внутренняя чётность у лептонов отсутствует.

Элементарные частицы первого поколения образуют мир вокруг нас. Кварки составляют протоны и нейтроны, электроны формируют оболочки атомов. Элементарные частицы второго и третьего поколений проявляют себя только во взаимодействиях. Можно сказать, что каждое следующее поколение элементарных частиц тяжелее (массивнее) предыдущего.

Цель нашей работы — определить время жизни покоящегося мюона. Мюоны — это лептоны второго поколения с массой покоя превышающей в 207 раз массу электрона. Как и электроны, мюоны имеют спин $1/2\hbar$, отрицательно и положительно заряжены (μ^- и μ^+ — частица и античастица).

Мюоны образуются в распаде π^\pm -мезонов (пионов):



$\tau = (2,6030 \pm 0,0023) \cdot 10^{-8}$ сек — среднее время жизни покоящегося пиона.

Пионы — это адроны, состоящие из двух кварков (кварка и антикварка) и являющиеся квантами поля ядерных взаимодействий. Их существование предсказал японский физик Х. Юкава в 1935 году.

Таблица 3

Основные характеристики пионов

Частица	Кварковая структура	Масса (mc^2) МэВ	Спин, чётность	Время жизни, сек	Основные моды распада
π^-	$u\bar{d}$	139,57	0^-	$2.60 \cdot 10^{-8}$	$\mu^- \bar{\nu}_\mu$
π^+	$d\bar{u}$	139,57	0^-	$2.60 \cdot 10^{-8}$	$\mu^+ \nu_\mu$
π^0	$\frac{1}{\sqrt{2}}(u\bar{u} - d\bar{d})$	134,98	0^-	$8.28 \cdot 10^{-17}$	2γ

В верхних слоях атмосферы протоны и ядра космических лучей взаимодействуют с ядрами атомов. Вместе с другими вторичными частицами образуются пионы. Заряженные пионы до распада могут потерять часть энергии на ионизацию атомов атмосферы. Остановившийся отрицательный пион π^- иногда захватывается на атомную оболочку, образуя мезоатом, затем поглощается ядром и расщепляет его.

Причина, по которой пионы распадаются на лептоны второго, а не первого поколения, заключена в особенности слабого взаимодействия, связанной с квантовомеханической характеристикой продуктов распада — спирально-

стью. Спиральность определяется как проекция спина частицы на направление её движения. Спиральность принято считать положительной или правовинтовой (правой), если спин направлен вдоль импульса частицы, и отрицательной или левовинтовой (левой), если спин направлен против импульса. Для нейтрино всех поколений спиральность задаёт лептонный заряд — все нейтрино левовинтовые (лептонный заряд “1”), антинейтрино правовинтовые (лептонный заряд “-1”). Заряженные лептоны имеют и правую и левую спиральность.

Рассмотрим распад пиона в его собственной системе координат. Спин пиона равен нулю, поэтому, вследствие законов сохранения импульса и момента количества движения, заряженный лептон и нейтрино вылетают в противоположных направлениях, а их спиральности совпадают. Допустим, распадается π^+ -мезон. Следовательно, вылетает антилептон и нейтрино оба с отрицательной спиральностью, так как все нейтрино левовинтовые. Из многочисленных экспериментов известно, что в слабых взаимодействиях доля e^+ , μ^+ , τ^+ с положительной спиральностью (правой) равна v/c , где v — скорость частицы, c — скорость света. При распаде π^+ -мезона могут родиться только левовинтовые заряженные лептоны e^+ или μ^+ . Их доля относительно правовинтовых, запрещённых в этом распаде, $1 - v/c$. Из законов сохранения энергии и импульса можно рассчитать скорости мюона и электрона, они равны: $v_\mu = 0,272 c$, $v_e = 0,999973 c$. Следовательно, распад на позитрон и нейтрино подавлен относительно распада на положительный мюон и мюонное нейтрино как $(1 - 0,999973)/(1 - 0,272) = 3,7 \cdot 10^{-5}$. С учётом плотности конечных состояний двух ветвей распада (фазовым объёмом), получим фактор подавления электронного распада $1,28 \cdot 10^{-4}$, что хорошо согласуется с экспериментом $1,23 \cdot 10^{-4}$.

6. Угловое распределение жесткой компоненты космических лучей на уровне моря

На рис. 4 показана интенсивность мюонов, электронов и протонов в зависимости от массы вертикального столба воздуха над ними. Видно, что генерация мюонов наиболее интенсивно происходит в слое (100-150) г/см², т. е. на высоте около 15 км. Измерения спектра мюонов на уровне моря показали, что подавляющее количество имеет энергию в пределах 0,1-3 ГэВ.

Потери на ионизацию в вертикальном столбе атмосферы порядка 2-3 ГэВ. Значит, их начальная энергия находится в пределах 2-6 ГэВ. С другой стороны известно, что спектр мюонов в верхних слоях атмосферы носит степенной характер $N_\mu(E) \sim E^{-2.6}$ и средняя энергия мюонов по всему спектру около 5 ГэВ (в расчёт средней энергии не включались мюоны, чья энергия ниже 2 ГэВ). Таким образом, средняя энергия мюонов достигших уровня моря с учётом потерь на ионизацию около 4 ГэВ. Мюоны проходят почти весь слой атмосферы (~ 900 г/см²). Они частично поглощаются (остановившийся мюон может за-

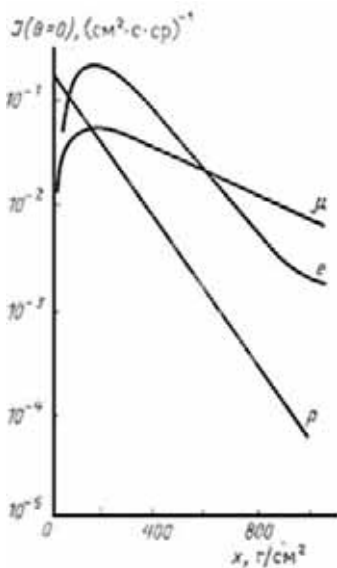


Рис. 4. Интенсивность протонов, электронов и мюонов в зависимости от глубины атмосферы.

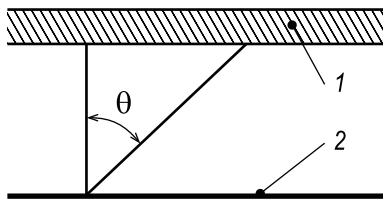


Рис.5. Генерация мюонов и путь их прохождения в атмосфере: 1— слой генерации; 2 — уровень моря.

нять место электрона в электронной оболочке атома, а затем распасться), частично распадаются. Мюоны идущие под углом θ к вертикали (рис. 5) и попадающие на уровень моря проходят 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 мюонов за счёт ионизационных потерь. Таким образом, оба фактора должны привести к уменьшению интенсивности мюонов с увеличением зенитного угла θ .

Можно выделить ту часть мюонов, которые поглотились за счёт увеличения количества вещества. Измерения интенсивности вертикального потока мюонов выполненные на разных глубинах под землёй показали, что число мюонов $N(x)$ уменьшается за счёт потерь на ионизацию как функция от количества пройденного плотного вещества x ($\text{г}/\text{см}^2$) по 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 регистрации. Такая зависимость интенсивности от толщины поглощающего слоя является следствием степенного характера спектра мюонов в стратосфере.

Из рис. 5 видно, что $\xi = 900 / \cos \theta$. Таким образом, число мюонов, дошедших до счётчика на уровне моря, уменьшается за счёт поглощения в веществе по закону

$$P_2(\theta) \sim (\cos \theta)^{1.6}. \quad (10.1)$$

Вероятность прохождения мюоном пути l без распада равна

$$P_2(\theta) = \exp\left(-\frac{l(\theta)}{L}\right), \quad (10.2)$$

где $L = v\tau$ — длина распадного пробега; v — 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

$$L = \beta c \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - \beta^2}} = \beta c \tau_0 \frac{E_\mu}{m_\mu c^2}, \quad (10.3)$$

где $E_\mu = m_\mu c^2 / \sqrt{1 - \beta^2}$ — полная энергия мюона, m_μ — масса мюона. E_μ можно принять равной $4 \cdot 10^9$ эВ.

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

$$\frac{N(\theta)}{N(0^\circ)} = \frac{P_1(\theta)}{P_1(0^\circ)} \frac{P_2(\theta)}{P_2(0^\circ)} = (\cos \theta)^{1.6} \frac{e^{-l(\theta)/L}}{e^{-l_0/L}}, \quad (10.4)$$

где $P_1(\theta)$ и $P_2(\theta)$ даны формулами (10.1) и (10.2).

Воспользовавшись экспериментально определённым отношением $N(\theta)/N(0^\circ)$, а также формулами (10.3) и (10.4), можно получить значение τ_0 .

Нужно помнить, что проведённые расчёты дают значение τ_0 только по порядку величины, поскольку они не учитывают, как меняется вероятность распада мюонов из-за уменьшения их энергии в результате ионизационного торможения.

7. Указания по обработке данных и вычислениям

От общего числа совпадений необходимо отнять число случайных совпадений. Число случайных совпадений вычисляется по формуле:

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

где $t_{\text{разр}}$ — разрешающее время схемы совпадений; N_1 и N_2 — число импульсов, сосчитанных отдельно первым и вторым детекторами в 1 секунду.

В результаты измерений под углами $\theta > 50^\circ$ необходимо внести поправку за счёт ливней $N_{л}$ из стен помещения. В качестве числа таких ливней берут число совпадений при угле 90° (за вычетом случайных совпадений).

Результаты измерений заносят в таблицу измерений.

Таблица 4

Результаты измерений

θ	$N_{изм}(\theta) \pm \Delta N_{изм}(\theta)$	$(N_{изм}(\theta) - N_{сл})$ $\pm \Delta(N_{изм}(\theta) - N_{сл})$	$(N_{изм}(\theta) - N_{сл} - N_{л})$ $\pm \Delta(N_{изм}(\theta) - N_{сл} - N_{л})$

Для оценки времени жизни покоящегося мюона надо построить график функции $(N(\theta) - N_{сл} - N_{л}) / (N(0^\circ) - N_{сл})$ в зависимости от угла θ и сравнить его с графиком функции $(\cos \theta)^{1.6}$, характеризующей уменьшение интенсивности жёсткой компоненты космических лучей лишь за счёт ионизационных потерь. Более точный результат можно получить тремя способами:

1. Усреднить вычисленные из формулы (10.4) длины распадного пробега L ;
2. Подогнать функции (10.4) к экспериментальным данным путём подбора параметра L ;
3. С помощью метода наименьших квадратов определить не только длину распадного пробега, но и $N(0^\circ)$. Последнюю величину сравнить с экспериментом.

Задание составлено на основе пособия [1].

Рис. 1 взят из [6], рис. 2, 3 из [5], рис. 4 из [2], рис. 5 из [1].

Литература

1. Н. Л. Григоров, М. А. Кондратьева, И. Д. Рапопорт. Космические лучи. М., Физматгиз, 1962.
2. В. С. Мурзин. Введение в физику космических лучей. Изд. Московского университета, 1988.
3. И. М. Капитонов. Введение в физику ядра и частиц. М., КомКнига, 2006.
4. В. Л. Гинзбург. Космические лучи у Земли и во Вселенной. М., Наука, 1967.
5. М. И. Панасюк. Странники Вселенной. Сайт в сети Интернет:
<http://nuclphys.sinp.msu.ru/pilgrims/>
6. Г. Фрауэнфельдер, Э. Хенли. Субатомная физика. М., Мир, 1979.
7. Физический энциклопедический словарь.
Ред. А. М. Прохоров, М., Советская энциклопедия, 1983.