

В.Ф. Сокуров

ФИЗИКА КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ: КОСМИЧЕСКАЯ РАДИАЦИЯ

ВЫСШЕЕ
ОБРАЗОВАНИЕ



Серия
• Высшее образование •

В.Ф. Сокуров

**ФИЗИКА
КОСМИЧЕСКИХ
ЛУЧЕЙ**

**КОСМИЧЕСКАЯ
РАДИАЦИЯ**

Ростов-на-Дону
«Феникс»
2005

УДК 524:53(075.8)
ББК 22.38я73
КТК 136
С59

Сокуров В.Ф.

С59 **Физика космических лучей: космическая радиация /**
В.Ф. Сокуров. – Ростов н/Д.: Феникс, 2005. – 188 с.: ил. –
(Высшее образование).

ISBN 5-222-07838-8

Важнейшей характеристикой состояния атмосферы Земли является ее пропускание потоков электромагнитных излучений в различных частотных диапазонах, характеризующих поток космической радиации, воздействующей на земное и околоземное пространство. В книге рассмотрены основные два вида электромагнитных излучений в атмосфере: в видимом диапазоне и в радио-очень низкочастотном диапазоне (ОНЧ).

Книга будет полезна для старших школьников, студентов, аспирантов и преподавателей, а также для всех интересующихся природой Земли.

ISBN 5-222-07838-8

УДК 524:53(075.8)
ББК 22.38я73

© В.Ф. Сокуров, 2005
© Оформление: изд-во «Феникс», 2005

Глава 1 | ПРЕДИСЛОВИЕ

1.1. Экскурс в историю развития исследований космических лучей

Для начала напомним, что *космические лучи* – это поток ядер атомов и элементарных частиц высокой энергии, приходящих на Землю из космоса (*первичные космические лучи*), а также элементарные частицы, рожденные ими в результате взаимодействий в атмосфере (*вторичные космические лучи*).

Открытие космических лучей было сделано случайно: никто из физиков не ставил специальной задачи их обнаружить, когда начинал работать с электроскопами – прообразами современных воздушных ионизационных камер.

В течение десятилетнего периода, предшествующего открытию, многие физики наблюдали слабую ионизацию воздуха при отсутствии каких-нибудь внешних источников ионизации: в 1900 г. – немецкие ученые Ю. Эльстер и Г. Гейтель и английский ученый Ч.Т. Вильсон, в 1903 г. – Э. Резерфорд и Г. Кук, в 1909–1911 гг. – немецкий физик Т. Вульф, шведский метеоролог А. Гоккель и другие доказал внеземное происхождение источника ионизации воздуха австрийский физик В.Ф. Гесс после совершения в 1911–1912 гг. семи полетов на воздушных шарах, в гондоле которых находились герметические электрометры, поднявшись в последнем рекордном полете на высоту 5350 м. Измерения Гесса показали, что ионизация воздуха плавно уменьшается вплоть до высоты 1000 м над уровнем моря, а затем начинает медленно расти и на высотах 3000–4000 м уже пре-

вышает ионизацию на уровне моря. Результаты Гесса подверг критике немецкий физик В. Кольхёрстер, который отрицал гипотезу о внеземном происхождении источника ионизации воздуха. В 1913–1914 гг. он совершил пять полетов на воздушных шарах, достигнув высоты 9300 м. С помощью самой совершенной по тому времени ионизационной камеры Кольхёрстер, наперекор своим убеждениям, подтвердил и уточнил данные Гесса.

Окончательно доказал внеземное происхождение космических лучей Р.А. Милликен (США), тоже не веривший выводам Гесса, который в серии опытов 1923–1926 гг. применил метеорологические баллоны, оснащенные необходимой аппаратурой для автоматических измерений поглощения космических лучей атмосферой Земли. Он же ввел термин *космические лучи*. Применение шаров-зондов позволило Милликену достичь высоты 15500 м. Датой открытия космических лучей принято считать 1912 г., а Гесса – первооткрывателем их, что выразилось официально в присуждении ему в 1936 г. Нобелевской премии по физике. В 1925 г. Л.В. Мысовский и И.Е. Тамм (СССР), Р.А. Милликен и Дж. Камерон (США) независимо изучали поглощение космических лучей в озерной воде и показали существование проникающего излучения. В том же году Г. Гофман (Германия) обнаружил наличие мягкой компоненты в космических лучах на уровне моря, но выводы о существовании мягкой и жесткой компоненты в космических лучах были сделаны много позже. В 1923–1927 гг. советский физик Д.В. Скобельцын изучал эффект Комптона в камере Вильсона. После помещения в 1925 г. Скобельцыным этой камеры в магнитное поле возникла принципиально новая методика в физическом эксперименте, которая позволила ему обнаружить в 1927 г. «ультра-бета-частицы», иногда появлявшиеся в

камере группами до трех штук. Работа Скобельцына не опровергла бытовавшую тогда гипотезу о фотонной природе космических лучей, но дала мощный толчок к изучению механизма их поглощения.

Нидерландский физик Якоб Клей в 1927 г. возвращался пароходом в Голландию с острова Ява, имея при себе ионизационную камеру, и обнаружил широтный эффект космических лучей: уменьшение их интенсивности при приближении к экватору на 10–15% по сравнению со средними широтами. Результат Клея означал, что первичное космическое излучение, входящее в атмосферу Земли, является заряженным. Данные Клея были объяснены немецкими физиками В. Боте и В. Кольхёрстером, применившими в 1929 г. вертикальный телескоп газоразрядных счетчиков Гейгера-Мюллера, изобретенный за год до этого, для регистрации космических лучей. Два счетчика были окружены со всех сторон и отделены друг от друга слоем защиты, но регистрировали, по мнению авторов, одновременные прохождения заряженных частиц. В 1930 г. итальянский физик Б. Росси, работавший в Германии, применил схему совпадений для регистрации одновременных событий в трех газоразрядных счетчиках. Новая методика стала впоследствии мощным инструментом в физических исследованиях. В частности, она позволила Б. Росси в 1932 г. увидеть наличие мягкой и жесткой компоненты в космических лучах. Накопление экспериментальных данных стимулировало развитие теории. В 30-е годы стала бурно развиваться квантовая электродинамика, опережая эксперимент на некоторых направлениях и обогащая его. В 1929 г. О. Клейном (Швеция) и И. Нишиной (Япония) была развита теория комптоновского рассеяния фотонов, в которой учитывались состояния с отрицательной энергией, введенные в 1928 году П. Дираком

(Англия). В 1932 г. при помощи камеры Вильсона, помещенной по методу Скобельцына в магнитное поле, К.Д. Андерсон (США) обнаружил в космических лучах *позитрон*, предсказанный Дираком.

В 1930–1932 гг. немецкий физик Х.А. Бете, эмигрировавший из Германии в 1933 г., и в 1933 г. Ф. Блох (США) получили формулу для ионизационных потерь заряженных частиц, что облегчило интерпретацию результатов Б. Росси в 1932 г. Х.А. Бете и В. Гайтлер (Англия) в 1934 г. разработали теорию радиационных процессов и получили формулы для вычисления эффективных поперечных сечений тормозного излучения электрона и образования гамма-квантом электрон-позитронных пар. В 1935 г. П. Оже (Франция) и Б. Росси доказали наличие двух компонент в космических лучах: *мягкую*, поглощаемую десятисантиметровым слоем свинца, и *жесткую*, которая не поглощается полностью даже метровым слоем свинца.

В 1934 г. С.Н. Вернов (СССР) впервые применил автоматическую регистрацию интенсивности космического излучения в полетах шаров-зондов путем установления на них радиопередающей аппаратуры, подключенной к выходу двух счетчиков Гейгера-Мюллера. Счетчики были разделены слоем свинца толщиной 2 см, а аппаратура выделяла одновременные разряды, возникающие в них. Впоследствии, в 1936–1939 гг., разработанный метод помог С.Н. Вернову измерять широтный эффект в стратосфере в диапазоне от 5° до 56° и показать, что подавляющая часть первичного космического излучения состоит из заряженных частиц. В 1938 г. П.М. Блэкетт (Англия) и Дж. Оккиалини (Италия) с помощью камеры Вильсона, управляемой телескопом из счетчиков Гейгера-Мюллера, обнаружили ливни вторичных заряженных частиц, которые впервые наблюдал Д.В. Ско-

бельцын в 1929 г. в виде групп треков «ультра-бета-частиц». А несколько ранее, в 1937 г., индийский физик Г. Баба и В. Гайтлер в Англии, а также независимо от них Дж. Карлсон и Р. Оппенгеймер в США построили каскадную теорию электронно-фотонных ливней.

В 1935 г. японский физик Х. Юкава предположил существование нестабильных заряженных или нейтральных частиц *мезонов* – квантов обменных ядерных сил с массой 200–300 масс электрона. Спустя два года, в 1937 г. К.Д. Андерсон и С.Г. Неддермейер (США), наблюдая треки заряженных частиц в камере Вильсона (которая была помещена в магнитное поле) до и после прохождения свинцовой или платиновой пластинки, пришли к заключению, что в составе космических лучей имеется нестабильная частица с массой в 100 раз больше массы электрона. Поначалу новая частица была отождествлена с мезоном Юкавы, хотя слабое поглощение ее в атмосфере являлось противоречием. Впоследствии выяснилось, что эта массивная проникающая частица есть «тяжелый электрон» – *мюон*, который не является мезоном Юкавы. В 1938 г. П. Оже и независимо В. Кольхёрстер, регистрируя совпадения разрядов в счетчиках Гейгера-Мюллера, которые находились на удалении друг от друга в горизонтальной плоскости, обнаружили широкие атмосферные ливни.

Вторая мировая война прервала практически все физические мирные исследования, поэтому научные публикации об изучении космических лучей практически перестали выходить даже в США. Только с 1947 г. число публикаций стало снова значительным. Война стимулировала развитие техники, чем повлияла на характер послевоенных исследований. Следует отметить, что послевоенное изучение физики космических лучей распалось на несколько направле-

ний и проследить историю развития исследований достаточно сложно. Постепенно выделилось два важнейших аспекта исследований: ядерно-физический и космофизический. Оба направления, безусловно, перекрываются во многих вопросах, но имеют и неперекрывающиеся задачи. К числу важнейших достижений ядерно-физического аспекта следует отнести открытие в космических лучах *пи-мезонов* и *и* странных частиц, что дало мощный толчок развитию физики элементарных частиц; результаты по множественному рождению частиц, механизму образования и развития широкого атмосферного ливня, нейтринные эксперименты и опыты, связанные с поиском протонного распада. Космофизический аспект в ряде экспериментов связан с ядерно-физическим: нейтринные эксперименты, поиск локальных источников и анизотропии космических лучей и др. Прогресс космофизического аспекта в немалой степени связан также с развитием ракетной космической техники, позволившей изучать космические лучи за пределами атмосферы Земли в пределах Солнечной системы, понять строение магнитосферы Земли и межпланетного магнитного поля.

В 1947 г. Ч.М.Дж. Латтес (Бразилия), Дж. Оккиалини (Италия) и С.-Ф. Пауэлл (Англия), анализируя следы заряженных частиц в ядерных эмульсиях, которые экспонировались на вершине Пик-дю-Миди (2800 м) в Альпах (Франция) и на горе Чакалтай (5500 м) в Боливии, открыли новую частицу – *пи-мезон*. Эта частица оказалась тем ядерным квантом, существование которого предполагал Юкава.

В 1947 г., вскоре после открытия *пи-мезона*, Дж.Р. Рочестер и К. Батлер, работая в лаборатории космических лучей Манчестерского университета, впервые наблюдали два случая распада тяжелых частиц в камере Вильсона. Это были первые наблюдения странных частиц, в частности *К-мезонов*.

В 1951 г. манчестерская группа, куда входили Р. Армен-терос, К. Баркер, К. Батлер, А. Кацон и А. Чепмен, в камере Вильсона открыла *лямбда-гиперон*. Через год та же группа, в которую вместо А. Чепмена вошел С. Йорк, наблюдала в камере Вильсона *кси-гиперон*.

Наконец, в 1953 г. была открыта последняя частица в космических лучах – *сигма-гиперон*. Ее распады обнаружила в ядерных эмульсиях миланская группа: А. Бонетти, Л. Реве-Сетти, М. Понетти, Г. Томазини.

С 1945 г. началось активное изучение широких атмосферных ливней. В 1947–1949 гг. исследования привели Г.Т. Задепина (СССР) к выводу о существовании в широком атмосферном ливне ядерно-каскадного процесса. В 1950–1951 гг. японские физики Дж. Нишимура и К. Камата получили теоретически структурную функцию электронно-фотонного ливня. Теорию множественного рождения вторичных частиц развивали В. Гейзенберг (1936–1952), Э. Ферми (1950), И.Я. Померанчук (1951), Л.Д. Ландау (1953). Основы теории происхождения космических лучей заложил Э. Ферми (1949). Новая эра в изучении космических лучей наступила после первых полетов советского искусственного спутника Земли в 1957 г. Уже в 1958 г. были обнаружены Вал Алленом (США) при помощи спутников «Эксплорер-1» и «Эксплорер-3» внутренний радиационный пояс, а С.Н. Верновым, А.И. Лебединским и А.Е. Чудаковым (СССР) с помощью ИСЗ-3 – внешний.

Дальнейшие исследования с помощью выносных аппаратов позволили обнаружить секторную структуру межпланетного магнитного поля, изучить строение магнитосферы; обнаружить явление переполюсовки общего магнитного поля Солнца, проходившее примерно в середине 11-летнего цикла солнечной активности. Наибольший вклад в кос-

мофизические исследования внесли ученые СССР и США путем использования многочисленных искусственных спутников различного назначения, межпланетных космических станций, геофизических ракет.

В 60-х годах стала интенсивно развиваться нейтринная астрономия. Еще в 1946 г. Б.М. Понтекорво (СССР) предложил хлор-аргонную реакцию для регистрации солнечных электронных нейтрино. Начиная с 1967 г. Р. Дэвисом в США поставлен ряд экспериментов, имеющих цель измерить поток электронных нейтрино, исходящих из ядра Солнца. Результаты экспериментов поставили новые вопросы, так как поток солнечных нейтрино оказался в пять раз ниже ожидаемого. В 1978 г. введен в строй подземный сцинтилляционный телескоп Баксанской нейтринной обсерватории (БНО, СССР), предназначенный для регистрации галактических нейтрино, генерируемых во время вспышек сверхновых. Программа исследований реализовалась под руководством Г.Т. Задепина и А.Е. Чудакова. В нескольких лабораториях мира в 80-х XX века годах начались поиски протонного распада, в СССР – в БНО и в соляной шахте г. Артёмовска.

В 50-х годах начато изучение первичного энергетического спектра космических лучей с помощью крупных установок, регистрирующих широкие атмосферные ливни. Эти исследования привели советских физиков С.Н. Вернова, Г.Б. Христиансена и др. к открытию перелома в энергетическом спектре первичного космического излучения при энергии $3 \cdot 10^{15}$ эВ, который, вероятно, связан с энергетическим порогом удержания космических лучей в нашей Галактике. Открытие зарегистрировано в середине 70-х годов, но результаты накапливались в течение двадцатилетнего периода работы. В ходе мировых исследований установлено:

- 1) энергетический спектр космических лучей простирается вплоть до 10^{20} эВ;
- 2) фон космических лучей ниже энергии 10^{15} эВ практически изотропен, а в области сверхвысоких энергий 10^{17} – 10^{19} эВ имеет анизотропию, указывающую, возможно, как на галактическое, так и на внегалактическое его происхождение.

В этих же экспериментах было показано:

- 1) множественность *пи-мезонов*, возникающих в ядерных взаимодействиях при сверхвысоких энергиях, высока и растет с увеличением энергии;
- 2) нуклоны высоких энергий в каждом взаимодействии передают во вторичные частицы в среднем половину энергии;
- 3) в «стволе», широкого атмосферного ливня идут «лидирующие» высокоэнергетичные частицы, которые снабжают ливень энергией на всем его протяжении.

Такова краткая история изучения космических лучей, в которой берет свое начало история исследования физики элементарных частиц, космофизики и физики Солнца.

1.2. Экспериментальные методы изучения космических лучей.

Крупнейшие экспериментальные установки

Согласно всесоюзной классификации научных направлений, физика космических лучей является одним из разделов более общего направления – *ядерной физики*. Поэтому, например, в экспериментальных методах физики космических лучей, как и в ядерной физике, применяют детекторы излучений. Но имеются и особенности, присущие только

экспериментальным методам исследования космических лучей, которые, в свою очередь, следует классифицировать по соответствующим темам исследований.

■ *Первичное космическое излучение*

Исследование первичного космического излучения предполагает:

- ▶ измерение энергетического спектра первичных космических частиц в области энергий $E_0 > 10^{17}$ эВ, выяснение вопроса о его галактическом либо метagalактическом происхождении;
- ▶ измерение химического состава первичных космических лучей при энергии 10^{14} – 10^{15} эВ;
- ▶ поиск и изучение локальных источников космических лучей в Галактике.

Первая задача на современном этапе развития экспериментальной техники может быть решена только с помощью комплексных установок для изучения широких атмосферных ливней на уровне моря. Главная трудность – низкий поток первичного космического излучения и невозможность непосредственного измерения энергии первичной частицы. Благодаря использованию метода ШАЛ эффективная площадь регистрации крупнейших экспериментальных установок достигает десятков квадратных километров. Для детектирования заряженных частиц ШАЛ обычно применяют сцинтилляционные и черенковские детекторы с большой площадью регистрации и значительным объемом энерговыделения. Наиболее часто в детекторах применяют пластмассовые сцинтилляторы на основе полистирола с площадью 1–2 м², в качестве радиатора черенковских счетчиков зачастую используют дистиллированную воду, залитую в металлические баки объемом в несколько кубических метров.

Комплексная установка ШАЛ Haverah park университетов Лидс, Ноттингем, Лондон, Дархем (Англия) предназначена для изучения продольного развития, флуктуации глубины максимума каскада, энергетических спектров электронов и мюонов ШАЛ, а также для измерения первичного энергетического спектра. Диапазон энергий, регистрируемых ШАЛ, — от 10^{16} до 10^{20} эВ. Площадь комплексной установки, на которой размещены 580 водных черенковских детекторов, равна 15 км^2 . В середине 80-х годов эксплуатация установки прекращена, а детекторы используются для других задач:

Установка Сиднейского университета (Австралия) имела площадь 40 км^2 . В ее состав входили 408 жидких сцинтилляционных детекторов, площадь каждого — 6 м^2 . Имелась возможность регистрации ШАЛ от $2 \cdot 10^{17}$ до 10^{20} эВ. В 80-х годах установка не эксплуатировалась.

Якутская комплексная установка ШАЛ Института космофизических исследований и аэронавтики Якутского филиала Сибирского отделения АН СССР имела площадь 18 км^2 , на которой были размещены 172 пластмассовых сцинтилляционных детектора площадью 2 м^2 каждый. Регистрировались ШАЛ с энергией 10^{17} – 10^{20} эВ. В 1985 г. в районе Аке-но (Япония) была запущена экспериментальная установка ШАЛ с площадью 20 км^2 .

В экспериментальной установке университета Юта (США) применен оптический метод регистрации ШАЛ. Детектируется флуоресценция воздуха, вызванная ШАЛ, с помощью 60 параболических зеркал диаметром 1,5 м. Возможно детектирование ШАЛ с энергией $E_0 > 10^{20}$ эВ, если таковые существуют в природе. Эффективная площадь регистрации для таких ШАЛ достигает 1000 км^2 , ибо она определяется площадью светосбора в той области атмосферы, откуда приходит наибольшее количество флуоресцентного света.

Вторая задача – измерение химического состава первичных космических лучей – решена для области энергий $E_0 < 10^{14}$ эВ с помощью ядерных фотоэмульсий и советского искусственного спутника Земли «Протон-4», на котором был установлен ионизационный калориметр (рис. 1.1) массой 12 т. Для более высокоэнергетической части космических лучей задача не решена. Косвенное ее решение возможно путем изучения продольного развития ШАЛ в атмосфере (иными словами, каскадной кривой ШАЛ), которое будет несколько различным для частиц разного сорта и одинаковой энергии. Флуктуации коэффициентов неупругости лидирующих частиц, пробегах нуклонов, множественности вторичных частиц в ШАЛ делают это отличие еще менее заметным. Поэтому в области сверхвысоких энергий космических лучей реально ставить вопрос только о соотношении ядер водорода и гелия или ядер водорода и всех остальных ядер, вместе взятых. Некоторые надежды можно возлагать на радиоголографию ШАЛ в лучах его собственного когерентного радиоизлучения. Этот метод предложен физиками Харьковского госуниверситета и может быть применен в области сверхвысоких энергий ШАЛ для рассматриваемой задачи. Однако детальных расчетов его применимости в реальном эксперименте на одной из действующих комплексных установок ШАЛ пока не существует. Ранее ядерный состав в области сверхвысоких энергий изучался путем измерения высоты максимума развития и флуктуации числа *мюонов* на уровне моря ШАЛ с фиксированной энергией.

Третья задача – поиск и изучение локальных источников космических лучей в Галактике – решается двумя путями: оптическим и методом ШАЛ. Направление на локальный источник сохраняет при движении в Галактике либо

высокоэнергетический гамма-квант, либо протон или ядро сверхвысокой энергии, такой, что межзвездные магнитные поля не могут существенно отклонить их на пути к Земле. Оптический метод используется для детектирования атмосферных ливней, вызываемых гамма-квантами с энергией $E > 10^{11} - 10^{12}$ эВ, по их черенковскому излучению в ночной атмосфере в видимой области спектра. Известно, что показатель преломления воздуха n можно представить в виде:

$$n = 1 + \eta = 1 + \eta_0 \cdot \exp\left(-\frac{l}{h_0(\theta)}\right) = 1 + \frac{\eta_0 \cdot x}{\rho_0 h_0 g(\theta)}. \quad (1.1)$$

Здесь $\eta \sim 2,92 \cdot 10^{-4}$. Максимальный черенковский угол в атмосфере мал, поэтому можно записать:

$$\cos \theta_{\text{чер}} = \frac{1}{n \cdot \beta} \approx \frac{1}{n} = \frac{1}{1 + \eta} = \sqrt{1 - \sin^2 \theta_{\text{чер}}} \approx 1 - \frac{\theta_{\text{чер}}^2}{2}. \quad (1.2)$$

Буквой β здесь обозначено отношение скорости частицы к скорости света. Теперь можем выразить $\theta_{\text{чер}}$:

$$\theta_{\text{чер}} = \frac{2\eta}{1 + \eta} \approx 2\eta; \quad \theta_{\text{чер}} \approx \sqrt{2\eta} = \sqrt{\frac{2\eta_0 x}{\rho_0 h_0 g(\theta)}}. \quad (1.3)$$

На пороге черенковского излучения угол $\theta_{\text{чер}} = 0$, а, следовательно, $\cos \theta_{\text{чер}} = 1$ и можно записать:

$$\beta = \frac{1}{n} = \frac{1}{1 + \eta}. \quad (1.4)$$

Тогда полная энергия частицы на пороге черенковского излучения:

$$\epsilon_{\text{чер}} = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \beta^2}} = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{1}{(1 + \eta)^2}}} \approx \frac{mc^2}{\sqrt{2\eta}}, \quad (1.5)$$

где mc^2 – энергия покоя заряженной частицы. Черенковский угол в воздухе на уровне моря $\sim 1,4^\circ$, на высотах излучения ливней $E > 10^{11} - 10^{12}$ эВ угол $\theta_{\text{чер}} \sim 0,8^\circ$, поэтому направление прихода первичного гамма-кванта с точностью $< 1^\circ$ может быть определено. На практике угловое разрешение определяется приемниками света, так как средний угол многократного кулоновского рассеяния частиц в ливне значительно больше черенковского угла. Однако угловое разрешение приемников света не должно быть значительно меньше черенковского угла. Приемниками света обычно служат фотоэлектронные умножители, способные регистрировать кратковременные вспышки (~ 1 нс) черенковского света в ночном небе. Приемники направляют на мощные галактические радиоисточники или пульсары. В частности, гамма-кванты с энергией $\sim 10^{12}$ эВ впервые обнаружены в направлении на пульсар, находящийся в Крабовидной туманности. В Советском Союзе подобная экспериментальная установка действовала более 20 лет в Крымской астрономической обсерватории. С помощью нее получен энергетический спектр гамма-квантов в интервале энергий $E = 10^{12} - 10^{16}$ эВ, идущих от локального источника Лебедь X-3.

Локальные источники космических лучей в Галактике можно изучать при помощи экспериментальных установок, регистрирующих ШАЛ на уровне моря или на высотах гор. На этих установках измеряют пространственные углы прихода ливней, то есть зенитный и азимутальный углы оси ливня. Если известно мировое время регистрации каждого события, можно вычислить его угловые координаты на неподвижной звездной карте неба. Чем точнее измеряются углы θ , φ и мировое время, тем быстрее можно набрать необходимую статистику для выделения локального источника, если он существует, на неподвижной звездной карте. Зенитный

угол θ и азимутальный угол φ измеряют временным методом при помощи быстрых сцинтилляционных детекторов. Предположим, что на земной поверхности расположены $(n + 1)$ штук сцинтилляционных детекторов в точках с координатами $(X_0, Y_0, Z_0), (x_1, y_1, z_1), \dots, (x_p, y_p, z_p), \dots, (x_n, y_n, z_n)$. Выбирая точку (X_0, Y_0, Z_0) за начало отсчета, найдем радиус-вектор каждой из точек, где расположены оставшиеся n детекторов:

$$R(x_p, y_p, z_p) = (x_i - x_0)e_x + (y_i - y_0)e_y + (z_i - z_0)e_z, \quad i = 1, 2, \dots, n,$$

где e_x, e_y, e_z — орты осей X, Y, Z декартовой системы координат с началом в точке (X_0, Y_0, Z_0) . Единичный вектор вдоль направления оси ШАЛ:

$$h(\theta, \varphi) = \sin \theta \cdot \cos \varphi \cdot e_x + \sin \theta \cdot \sin \varphi \cdot e_y + \cos \theta \cdot e_z. \quad (1.6)$$

Сгусток частиц ШАЛ имеет форму плоского диска (по крайней мере на малых и средних расстояниях от оси), поэтому легко определить расстояние каждого детектора с координатами $R_i(x_p, y_p, z_p)$ от плоского фронта ШАЛ в момент его касания детектора с координатами (X_0, Y_0, Z_0) :

$$ct = (R_i, h_i). \quad (1.7)$$

Здесь c — скорость света; t — время срабатывания i -го сцинтилляционного детектора относительно детектора, находящегося в начале отсчета (X_0, Y_0, Z_0) . Для нахождения углов θ, φ можно использовать метод наименьших квадратов; после чего θ, φ находят, решая систему уравнений.

Если в системе электронной регистрации ШАЛ достигнуто высокое временное разрешение, устранены всевозможные аппаратные дрейфы, то при достаточном количестве сцинтилляционных детекторов может быть получено угловое разрешение $< 1^\circ$. Установки ШАЛ, использующие опи-

санный метод, успешно работают несколько десятилетий, но локальные источники космических лучей наблюдаются на них сравнительно недавно. Этому способствовало высокое качество исполнения электронной временной аппаратуры.

■ Взаимодействия при высоких энергиях

Основным методом изучения взаимодействий при высоких и сверхвысоких энергиях является метод ионизационного калориметра. Калориметр должен различать случаи одновременного падения на него более одной частицы, поэтому мгновенное распределение ионизации должно подробно изучаться как в продольном, так и в поперечном относительно траектории частицы направлении. Ионизационный калориметр устроен следующим образом. По-

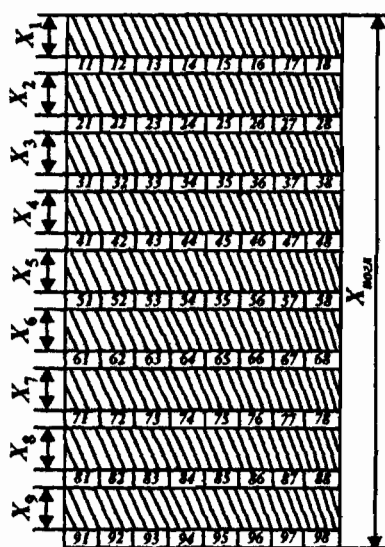


Рис. 1.1.
Ионизационный
калориметр

глотитель из плотного вещества толщиной $X_{\text{полн}}$ разбит на n слоев толщиной

$$X_i = \frac{X_{\text{полн}}}{n}.$$

Под каждым слоем находятся детекторы ионизации. Детекторы D_1 и D_2 включены на совпадение и производят предварительный отбор энергичных частиц.

Выработанный схемой совпадений сигнал опроса управляет работой калориметра. Детектор D_3 , в зависимости от задачи, включа-

ется либо на совпадение, либо на антисовпадение с детекторами D_1 и D_2 . При попадании частицы в калориметр она создает в нем полный ионизационный эффект.

I_0 — полное число пар ионов. Полное энергосодержание $E_0 = aI_0$, где a — среднее значение энергии, затрачиваемой на образование одной пары ионов. Зная распределение ионизации $I(X)$ по глубине поглотителя калориметра, можно определить E_0 :

$$E_0 = aI_0 = \alpha \sum \Delta I_k, \quad (1.8)$$

где ΔI_k — полное число пар ионов в k -м дискретном слое толщиной X_k , г/см².

Предполагается, что все вторичные частицы полностью поглотились в слое $X_{\text{полн}}$, то есть $I(X_{\text{полн}}) = 0$.

При попадании радиоактивной частицы в калориметр суммарное энергосодержание складывается из двух слагаемых: полная энергия, переданная π^0 -мезонам во всех взаимодействиях, и полная энергия, затраченная на ядерные расщепления.

Некоторая часть энергии, уходящая на ядерные расщепления (6–10% от E_0), не регистрируется.

Энергия радиоактивного распада ядер, как правило, выделяется после мгновенной регистрации ионизации, а нейтринно ионизации не создают. Толщина слоев поглотителя X_k должна быть оптимальной. Выбирают ее таким образом, чтобы электромагнитный каскад, образованный гамма-квантом средней энергии, который возникает в распадах π^0 -мезонов, поглощался не менее чем двумя слоями X_k . Такое требование позволяет найти минимальное число слоев n :

$$n = X_{\text{полн}} / X_0 \ln(E_y / \epsilon_{\text{кр}}), \quad (1.8)$$

где X_0 — радиационная длина вещества поглотителя, г/см²; E_y — средняя энергия каскадных гамма-квантов; $\epsilon_{\text{кр}}$ — крити-

ческая энергия для вещества поглотителя (энергия, при которой потери электронов на ионизацию и на тормозное излучение становятся равными). Фактически в знаменателе формулы стоит $X_{\text{макс}}$ — путь, пройденный ливнем, образованным фотоном с энергией E_γ в веществе поглотителя до максимума развития. Полная толщина поглотителя $X_{\text{пол}}$ выбирается таким образом, чтобы первичная ядерно-активная частица (точнее — лидирующая частица) испытала 7–5–12 каскадных взаимодействий, то есть:

$$X_{\text{пол}} = (7-12)\lambda, \quad (1.9)$$

где λ — свободный ядерный пробег в веществе поглотителя. Ионизационный калориметр должен достаточно часто регистрировать частицы высоких энергий. Для оценки геометрической эффективности регистрации вводят такую характеристику калориметра, как светосила:

$$G = \frac{S_1 S_2}{h^2}. \quad (1.10)$$

Здесь S_1 и S_2 — площади верхнего и нижнего оснований калориметра; h — расстояние между ними. Следует стремиться к максимальной величине светосилы, но без ущерба для остальных характеристик калориметра. Оптимальным веществом для поглотителя калориметра являются железо (Fe), латунь, медь (Cu), которые имеют значительную плотность и средний порядковый номер, что обеспечивают сравнительно небольшие размеры, высокую светосилу и хорошее пространственное разрешение калориметра при минимальном числе детекторов ионизации. Наилучшим детектором ионизации в калориметрах является ионизационная камера. Ее достоинства: высокая линейность и большой динамический диапазон характеристики, связывающей величину ионизации и потерю энергии частицей; высокая стабильность; до-

статочное быстродействие; произвольность формы и размера; высокое пространственное разрешение (~ 5 см). Электроды ионизационной камеры изготавливаются из вещества, близкого по плотности и порядковому номеру к этим показателям у вещества поглотителя, для уменьшения переходных эффектов в слоистых структурах.

В бывшем СССР имелось два крупных ионизационных калориметра. Первый расположен на Тянь-Шаньской высокогорной станции (высота 3200 м над уровнем моря) Физического института им. П.Н. Лебедева Российской Академии Наук. Площадь его основания равна 36 м^2 , энергетический диапазон $10^{12} - 5 \cdot 10^{13}$ эВ. Второй находится на высокогорной станции Ереванского физического института АН Армении на г. Арагац (высота 3250 м над уровнем моря.). Его энергетический диапазон составляет $10^{12} - 5 \cdot 10^{13}$ эВ, а площадь основания равна 100 м^2 .

На территории высокогорной станции на горе Арагац, в основном усилиями ФИ РАН им. П.Н. Лебедева и Ереванского ФИ АН Армении, был подготовлен эксперимент АНИ (адронные наземные исследования; Ани – средневековая столица Армении). Основным детектором крупнейшего экспериментального комплекса будет самый большой в мире ионизационный калориметр, который сооружается на высоте 3250 м над уровнем моря. Его площадь составит 1600 м^2 , а диапазон измеряемых энергий ядерно-активных частиц – $5 \cdot 10^{12} - 10^{16}$ эВ при толщине железного поглотителя, равной восьми ядерным пробегам, – 130 г/см^2 . Толщина отдельных слоев железного поглотителя – 5 см. Скорость регистрации событий, соответствующих первичным космическим частицам с энергией $E_0 > 3 \cdot 10^{17}$ эВ, будет равна 10 событий/год. Экспериментальный комплекс даст важную информацию о ядерных взаимодействиях при энергиях, недоступных современным ускорителям.

1.3. Нейтринная астрофизика

Астрофизический аспект физики нейтрино, по-видимому, зародился после предложения Б. Понтекорво в 1946 г. хлор-аргонной реакции для детектирования нейтрино. Еще один толчок дали предложения советского академика А. Маркова (1958 г.) и американского физика К. Грейзена (1960 г.) о глубоководной и подземной регистрации атмосферных нейтрино, рождающихся в распадах π - и K -мезонов. В настоящее время, как известно, оба предложения реализованы в подземных нейтринных детекторах. Вероятно, удельный вес нейтринных экспериментов в астрофизике будущего будет возрастать. Это связано с уникальной проникающей способностью нейтрино, которые могут без существенных потерь выходить из недр различных по масштабу астрофизических объектов. Нейтрино может нести информацию о и первых секундах нашей Вселенной. Подобно реликтовому излучению фотонов наша Вселенная заполнена изотропным реликтовым потоком нейтрино (нейтринное море) с плотностью 300 см^3 , со спектром, соответствующим излучению абсолютно черного тела при температуре $T = 2 \text{ К}$, и энергией $\sim 10^{-3} \text{ эВ}$. Однако совершенно неясно, каким способом это нейтринное море можно детектировать.

В 1978 г. в СССР был введен в строй подземный скинтилляционный телескоп Баксанской нейтринной обсерватории Института ядерных исследований АН СССР на Северном Кавказе. Основной его задачей являлся поиск мощных локальных источников нейтрино в Галактике, в частности, взрывов сверхновых. Во время вспышки сверхновой в течение 10–30 секунд излучается $\sim 10^{58}$ штук нейтрино, часть из которых проходит через нашу Землю. Достаточно зарегистрировать несколько нейтрино, пришедших из одной точки, на небесной сфере, в течение достаточно ко-

роткого промежутка времени, чтобы уверенно установить произошедшее грандиозное событие в Галактике. Атмосферные нейтрино образуют изотропный фон, но его величина ~ 1 событие в неделю не создает больших помех для регистрации взрывных процессов. Сцинтилляционный телескоп находится под склоном горы Андырчи на глубине не менее 350 м. Геометрически он представляет собой параллелепипед с площадью основания 256 м^2 и высотой 11 м. Все грани этого параллелепипеда являются слоями сцинтилляционных детекторов. Кроме того, внутри расположены еще два слоя, каждый из которых удален от соответствующего основания на 3,6 м. Каждый из 3200 детекторов, составляющих 8 слоев, представляет собой резервуар размером $70 \times 70 \times 30$ см, заполненный жидким сцинтиллятором, вспышки света в котором регистрируются одним фотоэлектронным умножителем с большой площадью фотокатода. Детектируются нейтрино, приходящие из нижней полусферы и взаимодействующие в грунте под телескопом. Во взаимодействиях нейтрино рождаются *мюоны* (электроны), летящие в том же направлении, которые и регистрируются сцинтилляционными детекторами. Отбор события производится, если мюон (электрон) пересек, по крайней мере, 2 из 8 слоев телескопа и ниже расположенный детектор по времени сработал раньше, чем верхний. Такой метод позволяет определять направление мюона с точностью $\sim 2^\circ$ и отбрасывать фоновые события, создаваемые космическими мюонами, которые приходят из верхней полусферы. Проводимый эксперимент запланирован на длительное время, так как взрыв сверхновой – редкое событие (один раз в 30–50 лет). Кроме того, регистрируемый эффект будет уменьшаться с увеличением расстояния до места вспышки, в то время как вероятность далеких от Земли событий с рассто-

нием, грубо говоря, растет квадратично. В настоящее время уже существует мировая сеть станций для обнаружения нейтринных всплесков.

Еще одна станция имелаась в соляной шахте г. Артемовска на Украине, где на глубине 600 м водного эквивалента находилось 100 т жидкого сцинтиллятора и использовалось 128 фотоумножителей. В туннеле под Монбланом, между Францией и Италией, на глубине 4270 м водного эквивалента итальянскими (Туринский университет) и российскими (ИЯИ РАН) физиками проводился совместный эксперимент. Использовалось 90 т жидкого сцинтиллятора. Детектировались события с помощью фотоумножителей и стримерных камер.

В США эксперимент проводится в золотоносной шахте Хоуметейк штата Южная Дакота, рядом с установкой Дэвиса (4400 м водного эквивалента, 900 т воды: фотоумножителями регистрируется черенковское излучение заряженных продуктов взаимодействия нейтрино); в шахте Сильвер Кинг штата Юта (1700 м водного эквивалента, 1000 т воды, 800 фотоумножителей в воде); в соляной шахте г. Мортон штата Огайо (1670 м водного эквивалента, 10 000 т воды, 2400 фотоумножителей в воде). Построена нейтринная станция в Японии (Камиока). Сооружаются две установки для глубоководной регистрации нейтрино очень высокой энергии в океане на глубине 5 км (США) и в озере Байкал. 23 февраля 1987 г. в созвездии Большое Магелланово облако, в соседней с нашей Галактике, произошла вспышка сверхновой звезды, от которой зарегистрирован кратковременный нейтринный поток японской станцией Камиока (11 событий) и станцией США 1 МВ (7 событий). Это был взрыв голубого гиганта.

Перечисленные нейтринные станции проводят комплек-

сные исследования, в частности, одновременно изучают фон космических лучей из верхней полусферы, а в некоторых случаях ведут поиск протонного распада, предсказанного современной теорией элементарных частиц. География экспериментов на подземных установках, в которых ведется поиск распада протона, еще более обширна, а методы детектирования – более разнообразны. Во всех случаях эти подземные комплексные установки являются экспериментальной базой физики космических лучей, удельный вес которой в ядерной физике по-прежнему остается высоким.

Солнце в активные периоды своих 11-летних циклов является источником космических лучей и возмущенного солнечного ветра. При этом оно активно воздействует на магнитосферу Земли и ее радиационные пояса, а также производит модуляцию галактических космических лучей.

Существует мировая сеть станций, которые ведут непрерывные измерения различных компонент космических лучей на поверхности Земли. Характерной особенностью этих измерений является унификация данных для облегчения и ускорения обработки огромного экспериментального ма-

териала. Постоянную службу несут за пределами атмосферы искусственные спутники Земли и научно-исследовательские станции различного назначения, которые измеряют энергетические и зарядо-массовые спектры солнечных космических лучей, интенсивность солнеч-



Рис. 1.2.
*Солнечные космические лучи
и процессы в гелиосфере*

ных рентгеновских всплесков, пространственное распределение заряженных частиц в магнитосфере Земли и межпланетном пространстве. В этих исследованиях используются самые последние достижения экспериментальной ядерной физики и техники, в том числе последние достижения в автоматизации научных исследований. Изучение солнечных космических лучей приобретает огромное народнохозяйственное значение, так как солнечно-земные связи оказывают влияние на климат и погоду, на здоровье людей, работающих в космосе и на Земле, а возможно, и на сейсмическую активность отдельных районов Земли. Поэтому сеть станций службы Солнца на Земле и в космосе непрерывно расширяется, экспериментальное оборудование постоянно совершенствуется и обновляется, что требует высококвалифицированных специалистов для проводящихся исследований.

1.4. Виды космического излучения

До 40-х годов нашего столетия почти все сведения о небесных телах были получены с помощью оптического метода исследования. Дело в том, что атмосфера Земли пропускает только электромагнитные волны длиной от 0,3 мкм до нескольких микрометров и радиоволны – от нескольких сантиметров до десятков метров. Для остальной части шкалы электромагнитных волн атмосфера непрозрачна. Между тем во Вселенной излучаются электромагнитные волны всех диапазонов – от радиоволн до гамма-излучения.

Космическое радиоизлучение впервые было обнаружено в 30-х годах при изучении грозových помех. В 40–50-х годах начались поиски и изучение источников космическо-

го радиоизлучения. Для этой цели использовали радиолокаторы, затем начали строить радиотелескопы с огромными чашеобразными антеннами и чувствительными приемниками излучения. Быстрое развитие радиоастрономии привело к целому ряду важнейших открытий.

Было обнаружено, что нейтральный холодный водород, который составляет основную массу межзвездного газа и в оптическом диапазоне невидим, испускает монохроматическое радиоизлучение с длиной волны 21 см. Это помогло изучить распределение водорода в нашей звездной системе — Галактике, включая даже далекие области, закрытые пылевыми облаками, которые, однако, для радиоволн прозрачны.

Далее были открыты галактики, мощность радиоизлучения которых в миллионы раз больше, чем у нашей Галактики (их называли радиогалактиками). Оказалось, что такое мощное радиоизлучение имеет нетепловую природу. Оно вызвано гигантскими взрывами, при которых выбрасываются огромные массы вещества, в миллионы раз больше массы Солнца. Выброшенные при взрыве быстро летящие заряженные частицы в межзвездном магнитном поле движутся по криволинейным траекториям, то есть с ускорением. Ускоренное же движение заряда сопровождается излучением электромагнитных волн. Это нетепловое излучение называют *магнитотормозным* или *синхротронным* (оно наблюдается в синхротронах-ускорителях заряженных частиц). Изучение синхротронного излучения дает ценные сведения о движении потоков космических частиц и о межзвездных магнитных полях. Обычно излучаются радиоволны, но если частицы движутся с очень большими скоростями или в достаточно сильном магнитном поле, то они испускают видимое, ультрафиолетовое и даже рентгеновское излучение.

Для регистрации космического излучения, от инфракрасного до рентгеновского, очень широко используется фотографический метод. Кроме того, в качестве приемников излучения применяются термопары, термосопротивления, а также фотоэлектрические устройства.

Как отмечалось выше, атмосфера сильно поглощает коротковолновое излучение. До поверхности Земли доходит только ближнее ультрафиолетовое излучение, да и то сильно ослабленное. Поэтому коротковолновое космическое излучение можно изучать только с помощью ракет и спутников. Такие исследования позволили изучить ультрафиолетовую область спектра Солнца, а также исследовать очень горячие звезды с температурой до 30 000 К, сильно излучающие в ультрафиолетовой области.

Поскольку температура солнечной короны составляет около 10^{11} К, то в соответствии с законами теплового излучения корона должна быть источником рентгеновского излучения. Первые же опыты с помощью ракет подтвердили это. Оказалось, что рентгеновское излучение Солнца постоянно. При хромосферных вспышках наблюдаются всплески рентгеновского излучения. Это объясняется тем, что выброшенные при вспышке быстро летящие электроны испускают рентгеновское излучение при столкновении с другими частицами солнечной атмосферы, а также при торможении в сильном магнитном поле активных областей (синхротронное излучение). Заметим, что рентгеновское излучение Солнца – важнейший источник ионизации верхнего слоя атмосферы Земли – ионосферы. С помощью космических аппаратов было обнаружено рентгеновское излучение различных далеких объектов (ядер галактик, нейтронных звезд и других).

1.5. Космические лучи

Исследования, которые сейчас можно с удобствами производить в космосе, доказывают, что на нашу Землю непрерывно падает поток ядерных частиц, движущихся со скоростями, практически равными скорости света. Их энергия лежит в пределах 10^8 – 10^{20} эВ. Энергия порядка 10^{20} эВ превосходит на восемь порядков энергии, которые можно создать в самых мощных ускорителях!

В основном первичные космические лучи состоят из протонов (около 90%); кроме протонов в них присутствуют и более тяжелые ядра. Разумеется, сталкиваясь с другими молекулами, атомами, ядрами, космические лучи способны создать элементарные частицы всех типов. Но астрофизиков интересует первичное излучение. Как создаются потоки частиц, обладающих такой энергией? Где лежат источники этих частиц?

Достаточно давно было доказано, что не Солнце является основным источником космического излучения. Но если так, то ответственность за создание космических лучей нельзя переложить и на другие звезды, поскольку в принципе они ничем не отличаются от Солнца. Кто же виноват?

В нашей Галактике существует Крабовидная туманность, которая образовалась в результате взрыва звезды в 1054 г. (не надо забывать, что ученые следят за звездным небом не одну тысячу лет). Опыт показывает, что она является источником радиоволн и космических частиц. Это совпадение дает разгадку огромной энергии космических протонов. Достаточно допустить, что электромагнитное поле, образовавшееся в результате взрыва звезды, играет роль синхротрона; и тогда огромная энергия, которая набирается частицей, путешествующей по спирали вокруг линий магнитной индукции на протяжении тысяч световых лет, может достигнуть тех фантастических цифр, которые мы привели.

Расчеты показывают, что, пролетев расстояние, равное поперечнику нашей Галактики, космическая частица не может набрать энергии больше чем 10^{15} эВ. Видимо, частицы с максимальной энергией приходят к нам из других галактик.

Разумеется, нет никакой необходимости полагать, что только взрывы звезд приводят к появлению космических частиц. Любые звездные источники радиоволн могут быть одновременно источниками космических лучей.

Существование космических лучей было обнаружено еще в начале нашего века. Установив электроскопы на воздушном шаре, исследователь замечал, что разрядка электроскопа на больших высотах идет значительно быстрее, чем если этот старинный прибор, оказавший физикам немало услуг, помещен на уровне моря.

Оказалось, что всегда происходящий спад листочков электроскопа не является следствием несовершенства прибора, а есть результат действия каких-то внешних факторов.

В 20-х годах физики уже понимали, что ионизация воздуха, которая снимала заряд с электроскопа, было внеземного происхождения. Милликен первый уверенно высказал такое предположение и дал явлению его современное название — *космическое излучение*.

В 1927 г. советский ученый Д.В. Скобельцын первый получил фотографию следов космических лучей в ионизационной камере.

Обычными способами, которые мы описывали ранее, была определена энергия космических частиц. Она оказалась огромной.

Изучая природу космических лучей, физики сделали ряд замечательных открытий. В частности, существование позитрона было доказано именно этим путем. Также точно и

π -мезоны – частицы с массой, промежуточной между массами протона и электрона, были впервые обнаружены в космических лучах.

Исследования космических лучей продолжают оставаться одним из увлекательных занятий физиков.

Если в воздухе нет ионов, то заряженный электроскоп должен сохранять свой заряд неопределенно долгое время. Однако опыт показывает, что электроскоп постепенно разряжается.

Вначале это явление объясняли ионизирующим действием радиоактивного излучения Земли. Если это так, то по мере удаления от поверхности Земли ионизирующее излучение должно ослабевать. Еще в 1912 г. с помощью воздушных шаров было установлено, что интенсивность ионизирующего излучения возрастает с увеличением высоты. Следовательно, это излучение возникает не на Земле, а где-то в мировом пространстве. Поэтому его стали называть *космическим излучением*, или *космическими лучами*.

Изучение космических лучей в высокогорных областях показало, что они состоят из *пионов, протонов, нейтронов* и других частиц, среди которых были обнаружены и многие неизвестные ранее частицы. Эти частицы были названы вторичными, так как выяснилось, что они образуются в верхних слоях атмосферы при взаимодействии первичных космических частиц, летящих из мирового пространства, с ядрами атомов атмосферы.

Исследования показали, что интенсивность космических лучей вблизи магнитных полюсов Земли примерно в 1,5 раза больше, чем на экваторе. Изучение отклоняющего действия магнитного поля Земли на первичное космическое излучение показало, что оно состоит из положительно заряженных частиц. Много ценных сведений о первичном косми-

ческом излучении получено с помощью искусственных спутников и космических кораблей.

В настоящее время установлено, что первичное космическое излучение состоит из стабильных частиц высоких энергий, летящих в самых различных направлениях в космическом пространстве. Интенсивность космического излучения в районе Солнечной системы составляет в среднем 2–4 частицы на 1 см^2 за 1 секунду. Оно состоит в основном из протонов (91 %) и α -частиц (6,6%); небольшая часть приходится на ядра других элементов (менее 1%) и электроны (1,5%).

Среднее значение энергии космических частиц – около 10^4 МэВ, а энергия отдельных частиц достигает чрезвычайно высоких значений – 10^9 МэВ и более. Где возникают космические частицы и как они ускоряются до таких огромных энергий, еще точно неизвестно. Предполагают, что они выбрасываются при взрывах новых и сверхновых звезд и ускоряются при взаимодействии с неоднородными магнитными полями в межзвездном пространстве.

Солнце периодически (во время вспышек) испускает солнечные космические лучи, которые состоят в основном из протонов и α -частиц, имеют небольшую энергию, но высокую интенсивность, что приходится учитывать при планировании космических полетов.

Вторичные частицы также обладают очень высокой энергией и при столкновении с ядрами вызывают дальнейшее размножение частиц.

В результате лавинообразного размножения частиц в верхних слоях атмосферы образуется каскадный ядерный ливень. На рис. 1.3 изображен искусственный каскадный ливень, полученный в камере Вильсона, перегороденной свинцовыми пластинами. Частица высокой энергии, проходя через слой свинца, создает ливень частиц, которые при про-



Рис. 1.3.
Ядерный ливень

хождении следующих слоев свинца создают новые ливни.

Ядерный ливень в атмосфере затухает, когда энергия частиц снижается до нескольких десятков мегаэлектронвольт. Остаток энергии протоны тратят на ионизацию воздуха; нейтроны поглощаются ядрами, вызывая различные ядерные реакции, а пионы, составляющие основную часть ливневых частиц, распадаются. Образующиеся в большом количестве фотоны и электроны сильно погло-

щаются атмосферой.

Каждый нейтральный пион очень быстро превращается в два фотона высокой энергии. При распаде заряженных пионов образуются новые частицы – μ -мезоны, или *мюоны*, которые были открыты К. Андерсеном в 1935 г. при изучении космических лучей, задолго до открытия пионов. Масса мюона в 207 раз больше массы электрона, то есть составляет около $3/4$ массы пиона. Существуют мюоны только двух видов – положительно и отрицательно заряженные; они обозначаются μ^+ и μ^- . При распаде $\pi^\pm$ мезонов образуются $\mu^\pm$ мезоны. Оказывается, что, в отличие от пионов, мюоны не участвуют в ядерных взаимодействиях и расходуют энергию только на ионизацию. Поэтому они обладают высокой проникающей способностью и составляют так называемую жесткую компоненту космического излучения. Мюоны пролетают сквозь атмосферу, и их обнаруживают даже на значительной глубине под поверхностью Земли.

Мюоны нестабильны, они существуют всего несколько микросекунд и распадаются на другие частицы. На уровне

моря космическое излучение имеет примерно в сто раз меньшую интенсивность, чем на границе атмосферы, и состоит в основном из мюонов. Остальную часть составляют электроны и фотоны и незначительное количество ливневых частиц. Из первичного космического излучения только отдельные частицы, с исключительно высокой энергией (более 10 МэВ), пробиваются сквозь атмосферу. В космических лучах мюоны, как и пионы, летят со скоростями, близкими к скорости света, и поэтому благодаря релятивистскому замедлению времени успевают до своего распада пролететь большие расстояния.

1.6. Античастицы

Антиматерия – материя, построенная из античастиц. Существование античастиц было впервые предсказано в 1930 году английским физиком П. Дираком. Из уравнения Дирака для релятивистского электрона следовало второе решение для его двойника, имеющего ту же массу и положительный электрический заряд. В то же время была известна лишь одна положительно заряженная частица – *протон*, резко отличающаяся по своим свойствам от электрона. Теоретики стали придумывать хитроумные объяснения этих различий, но вскоре выяснилось, что протон не имеет ничего общего с частицей, предсказанной Дираком. В 1932 году положительно заряженные позитроны обнаружил в космических лучах американский физик К. Андерсон. Это открытие явилось блестящим подтверждением теории Дирака.

В 1955 году на новом ускорителе в Беркли Э. Сегре, О. Чемберлен и другие обнаружили антипротоны, рожденные в столкновении протонов с ядрами медной мишени.

До этого протон с отрицательным зарядом долго и безуспешно разыскивался в космических лучах. В 1956 году был открыт и антинейтрон. Сейчас известно уже множество частиц, почти всем им соответствуют античастицы.

Частицы и античастицы имеют одинаковую массу, время жизни, спин, но различаются знаками всех зарядов: электрического, барионного, лептонного и так далее. Это следует из общих принципов квантовой теории поля и подтверждается надежными экспериментальными данными.

С современной точки зрения элементарные частицы разбиваются на две группы.

Первая из них — частицы с полужелым спином: заряженные лептоны $e^{\pm}$, $\mu^{\pm}$, $\tau^{\pm}$, соответствующие им нейтрино и кварки u , d , s , c , b , t . Все эти частицы обладают и античастицами.

Другая группа — это кванты полей с целым спином, переносящие взаимодействия: *фотоны*, промежуточные *бозоны* слабых взаимодействий, *глюоны* сильных взаимодействий. Некоторые из них истинно нейтральны (γ , Z^0), то есть все их квантовые числа равны нулю и они идентичны своим античастицам; другие (W^+ , W^-) также образуют пары частица-античастица. Легко теперь увидеть, что все *барионы*, состоящие из трех кварков, должны иметь античастицы, например: нейтрон имеет состав (udd), антинейтрон — ($\bar{u}\bar{d}\bar{d}$). Мезоны состоят из кварка и антикварка и, вообще говоря, также имеют античастицы, например: π^- -мезон состоит из кварков ($d\bar{u}$), а π^+ -мезон состоит из кварков ($\bar{d}u$). В то же время имеются мезоны, симметричные относительно замены кварков на антикварки (например, π^0 , ρ , η — мезоны, куда входят пары кварков $u\bar{u}$, $d\bar{d}$, $s\bar{s}$). Такие мезоны будут истинно нейтральными.

Характерная особенность поведения частиц и античастиц — их аннигиляция при столкновении. Еще Дирак пред-

сказал процесс аннигиляции электронов и позитронов в фотоны:

$$e^+ + e^- \rightarrow \gamma + \gamma.$$

Процессы аннигиляции идут, разумеется, с сохранением энергии, импульса, электрического заряда и т. п. При этом могут рождаться не только фотоны, но и другие частицы; очевидно, что вследствие законов сохранения различных зарядов одновременно рождаются и соответствующие античастицы, как, например, в реакции аннигиляции электрона и позитрона в пару мюонов: $e^+ + e^- \rightarrow \mu^- + \mu^+$. В таких реакциях были открыты «очарованные» и «прелестные» частицы. В аналогичном процессе $e^+ + e^- \rightarrow \tau^- + \tau^+$ открыли тяжелый τ -лептон. В последние годы процесс аннигиляции все чаще используется как один из самых совершенных методов исследования микромира.

Операция замены частиц на античастицы получила название *зарядового сопряжения*. Так как истинно нейтральные частицы тождественны своим античастицам, то при операции зарядового сопряжения они переходят сами в себя.

В сильных и электромагнитных взаимодействиях имеется полная симметрия между частицами и античастицами: если возможен какой-то процесс с частицами, то возможен и имеет те же характеристики аналогичный процесс с соответствующими античастицами. Подобно тому как протоны и нейтроны благодаря сильному взаимодействию связываются в ядра, из соответствующих античастиц будут образовываться антиядра.

В 1965 году на ускорителе в США был получен *антидейтрон*. В 1969 году в Протвино на ускорителе Института физики высоких энергий советские физики открыли ядра *антигелия-3*, состоящие из двух антипротонов и *антинейтрона*. Затем были открыты и ядра антитрития — тяжелого ан-

тиводорода, состоящие из одного антипротона и двух антинейтронов. В принципе можно представить себе и антиатомы, и даже большие скопления антивещества. Свидетельством присутствия антивещества во Вселенной было мощное аннигиляционное излучение, приходящее из областей соприкосновения вещества с антивеществом.

Ведь аннигиляция только 1 грамма вещества и антивещества приводит к выделению энергии, равной 10^{14} Дж, что эквивалентно взрыву средней атомной бомбы в 10 кило тонн. Однако астрофизика таких данных пока не имеет, и даже в космических лучах антипротоны встречаются довольно редко. Сейчас уже практически нет сомнений, что Вселенная в основном состоит из обычного вещества.

Но так было не всегда. На ранней стадии развития Вселенной при очень больших температурах – около 10 К – количество частиц и античастиц почти совпадало: на большое количество антипротонов (примерно на каждые несколько миллиардов) приходилось столько же протонов и еще один «лишний» протон. В дальнейшем при остывании Вселенной все частицы и античастицы проаннигилировали, породив в конечном итоге фотоны, а из ничтожного в прошлом избытка частиц возникло все, что нас теперь окружает. Аннигиляционные фотоны, постепенно охлаждаясь, дожили до наших дней в виде реликтового излучения. Отношение современной плотности протонов к плотности реликтовых фотонов (10^{-9}) и дало сведения о величине избытка частиц над античастицами в прошлом. Если бы этого избытка не было, то произошла бы полная взаимная аннигиляция частиц и античастиц и в результате возникла бы довольно унылая Вселенная, заполненная холодным фотонным газом.

Откуда же взялся этот избыток? Одна из гипотез предполагает, что в начальном состоянии число частиц и античас-

тиц совпадало, но затем из-за особенностей в динамике их взаимодействия возникла асимметрия.

Аннигиляция – это единственный процесс, в котором исчезают обе начальные частицы и вся их масса полностью переходит, например, в энергию фотонов. Никакая другая реакция, используемая в энергетике, таким свойством не обладает. И при делении урана, и в процессах термоядерного синтеза в энергию превращается лишь небольшая часть (порядка десятых долей процента) массы покоя частиц, участвующих в реакции. Поэтому аннигиляция антивещества с веществом дает в тысячу раз больше энергии, чем при делении такого же количества урана. Если бы в нашем распоряжении была небольшая планета из антивещества, то все проблемы с энергетическим кризисом сразу отпали. Предположим, мы научились бы переводить всю энергию аннигиляции в электрическую. Тогда для того, чтобы обеспечить планету годовым запасом электроэнергии, надо отколоть от планеты и подвергнуть аннигиляции всего лишь 1000-килограммовый кусок антивещества. Сравните эти 1000 килограмм с сотнями миллионов тонн угля и нефти, которые мы добываем ежегодно, чтобы решить ту же самую задачу!

Сколько энергии выделяется на 1 грамм топлива?

1. Аннигиляции вещества и антивещества – 10^{14} Дж.
2. Деление урана – 10^{11} Дж.
3. Сжигание угля – $2,9 \cdot 10^4$ Дж.

Антивещество было бы идеальным топливом еще и потому, что оно не загрязняет окружающую среду. После аннигиляции в конечном счете остаются только фотоны высокой энергии и нейтрино.

Нашу Землю регулярно бомбардирует поток космических лучей – частиц высоких энергий, которые генерируются при различных процессах, происходящих в нашей Га-

лактике. Большую часть этих частиц составляют протоны и ядра гелия.

В 1979 году в космических лучах были найдены и *антипротоны*. Об этом сообщили сразу две группы: советские физики из Ленинградского физико-технического института имени А.И. Иоффе и американские ученые из Центра космических полетов имени Л. Джонсона. Позитрон был обнаружен в космических лучах в 1932 году. Такой большой промежуток времени между открытием в космических лучах позитрона и антипротона объясняется тем, что антипротон намного сильнее взаимодействует с веществом, чем позитрон, антипротоны из космоса не успевают дойти до поверхности Земли, они аннигилируют уже в самых верхних слоях атмосферы. Именно поэтому поиск антипротонов в космических лучах представляет собой сложную техническую задачу. Надо поднять детектор как можно выше, к границе атмосферы. Все эксперименты по поиску античастиц в космических лучах были выполнены на аэростатах. Например, в опытах Р. Голдена воздушный шар поднимал примерно 2 тонны аппаратуры на высоту 36 километров.

Но можно ли считать, что эти антипротоны прилетели к нам из антимира? Вообще говоря, нельзя. В космических лучах есть протоны достаточно высокой энергии, и при столкновении с частицами, например, межзвездного газа, они могут рождать антипротоны в той же самой реакции, что идет на ускорителях:

$$p + p \rightarrow \bar{p} + p + p + p.$$

Таким образом, сам факт обнаружения антипротонов в космических лучах можно объяснить, не привлекая гипотезы об антимире.

В космических лучах наблюдались обычные ядра многих элементов таблицы Менделеева, вплоть до Урана. Од-

нако ни одного антиядра в космических лучах до сих пор обнаружено не было. Правда, пределы, которые были получены в опытах по поиску антиядер, еще не настолько низки, чтобы можно уверенно исключить возможность их существования. Сторонники антимира считают, что поток ядер антигелия должен быть в 10 раз меньше той величины, которую удалось измерить на сегодняшний день. Предсказываемое значение не слишком мало и в принципе достижимо уже в ближайшем будущем.

Надо сказать, что если бы удалось обнаружить хотя бы одно ядро антигелия, а еще лучше – антиуглерода, то это бы стало исключительно серьезным подтверждением гипотезы о существовании антимира. Дело в том, что вероятность создать антигелий за счет столкновения протонов космических лучей с веществом межзвездного газа пренебрежимо мала, меньше 10^{-11} . В то же время если существуют антисозвезды, то в них антиводород должен перегорать в антигелий, а затем – в антиуглерод.

Как бы то ни было, антиядер пока не зарегистрировано, хотя с большой уверенностью отрицать их присутствие в космических лучах нельзя.

У нас нет надежных доказательств того, что какие-либо частицы антимира прилетают к нам на Землю. Так как мы не наблюдали ни одного антиядра, результаты по измерению потока антипротонов не могут расцениваться как доказательство существования антимира – слишком много для этого требуется предположений, которые нуждаются в объяснении и проверки. Вместе с тем наши экспериментальные результаты не настолько полны и точны, чтобы совсем закрыть возможность существования антимира.

Однако данные по космическим лучам могут наложить некоторые ограничения на примесь антивещества в нашей

Галактике. Считается, что почти все космические лучи генерируются в процессах, которые происходят «внутри» нашей Галактики. Поэтому доля антивещества, возможно существующего в Галактике, не должна превышать доли антипротонов и антиядер в космических лучах. Известно, что в космических лучах отношение числа антипротонов к числу протонов приблизительно равно 10^{-4} , а отношение числа ядер антигелия к числу протонов по крайней мере меньше 10^{-5} .

Отсюда можно сделать вывод: примесь антивещества в Галактике меньше 10^{-4} – 10^{-5} . Это означает, что экспериментальные данные по космическим лучам не противоречат наличию, грубо говоря, одной антизвезды на каждые 10–100 тысяч обычных звезд. Подчеркнем, что такая оценка отнюдь не является доказательством существования антизвезд. Совершенно неясно, как могли такие антизвезды образоваться в нашей Галактике.

Свет от антизвезды нельзя отличить от видимого света обычных звезд. Однако процессы термоядерного синтеза, который обеспечивает «горение» звезд, идут по-разному для звезд и антизвезд. Если в первом случае реакции термоядерного синтеза сопровождаются испусканием нейтрино, например, в таких процессах:

$$p + p \rightarrow d + e^+ + \nu,$$

то в антизвездах аналогичные реакции приводят к вылету антинейтрино:

$$\bar{p} + \bar{p} \rightarrow \bar{d} + e^- + \bar{\nu}.$$

С экспериментальной точки зрения более выгодно искать громадные потоки антинейтрино, которые могут возникать на последней стадии эволюции антизвезд. Дело в том, что, когда звезда исчерпывает все свои запасы термоядерного топлива, она начинает катастрофически быстро сжиматься

под действием своих гравитационных сил. Если масса звезды составляет одну-три массы Солнца, то это сжатие продолжается до тех пор, пока электроны не «вдаются» внутрь атомных ядер, из которых состоит звезда. При этом происходит превращение протонов ядер в нейтроны и испускаются нейтрино:

$$e^- + p \rightarrow n + \nu.$$

Когда звезда почти целиком будет состоять из нейтронов, сжатие прекратится, так как силы гравитационного притяжения будут уравновешены мощными силами отталкивания, которые происходят между нейтронами. Происходит образование так называемой *нейтронной звезды* — стабильного объекта с исключительно большой плотностью и малыми размерами. Радиус нейтронной звезды с массой Солнца — порядка 10 километров (радиус Солнца порядка 700 000 километров).

Ясно, что при коллапсе антизвезды должны образоваться антинейтроны и процесс образования антинейтронной звезды будет сопровождаться испусканием антинейтрино:

$$e^+ + \bar{p} \rightarrow \bar{n} + \bar{\nu}.$$

Поток таких антинейтрино должен быть исключительно велик, ведь при коллапсе практически каждый из громадного числа протонов звезды, превращаясь в нейтрон, дает одно нейтрино: число антинейтрино $\approx$ числу антипротонов в антизвезде $\approx 10^{57}$. Уже существующие нейтринные телескопы могут зарегистрировать возникновение такой колоссальной нейтринной вспышки, если она произошла в нашей Галактике.

1.7. Античастицы. Взаимные превращения вещества и поля

Из квантовой теории следует, что для каждой частицы должна существовать античастица, то есть сходная с ней частица, с такой же массой, спином, временем жизни, но отличающаяся от нее знаком заряда, взаимным расположением вектора магнитного момента и спина и некоторыми другими характеристиками.

Первой обнаруженной на опыте античастицей был «положительный электрон» – *позитрон*. Примерами таких пар частица-античастица являются также отрицательный и положительный *пионы*, положительные и отрицательные *пионы* и *каоны*. Название других античастиц получается прибавлением к названию соответствующих частиц приставки «анти», а для их обозначения используются те же символы. У фотона, нейтрального пиона и этамезона нет античастиц (можно сказать, что в этих случаях частица и античастица совпадают). Как и соответствующие частицы, антипротон, позитрон и антинейтрино устойчивы, остальные античастицы нестабильны.

При изучении поглощения γ -квантов с энергией более 1 МэВ было обнаружено образование пар электрон-позитрон. Когда γ -квант пролетает в сильном электрическом поле вблизи ядра, он превращается в пару электрон-позитрон. Возникновение пар электрон-позитрон можно наблюдать при пропускании γ -излучения сквозь свинцовую пластинку, перегораживающую камеру Вильсона. Следы позитронов и электронов в магнитном поле симметрично искривляются в разные стороны и расходятся в виде буквы V.

Так как энергия, соответствующая массе покоя электрона или позитрона, составляет 0,511 МэВ, то превращение γ -квантов в пару электрон-позитрон может произойти только в том случае, когда энергия γ -кванта больше 1,02 МэВ. Если

энергия γ -кванта превышает 1,02 МэВ, то избыток энергии составляет кинетическую энергию электрона и позитрона.

Образующиеся при распаде нейтральных пионов во вторичном космическом излучении γ -кванты очень высоких энергий генерируют электроны и позитроны, которые также обладают высокой энергией и при взаимодействии с веществом атмосферы испускают тормозное γ -излучение, что в свою очередь приводит к генерации новых пар. Так происходит образование так называемой мягкой компоненты вторичного космического излучения, сильно поглощаемой атмосферой.

Если электроны и позитроны могут возникать из γ -квантов, то они, очевидно, могут и исчезать, превращаясь в γ -кванты. Опыты, выполненные супругами Жолио-Кюри, подтвердили, что при встрече позитрон и электрон исчезают, как говорят, аннигилируют, превращаясь в большинстве случаев в два γ -кванта с энергиями 0,51 МэВ, разлетающиеся в противоположные стороны (иногда образуется три γ -кванта с общей энергией 1,02 МэВ): $e^- + e^+$.

Можно привести и другие примеры таких превращений. При распаде нейтрального пиона образуется два γ -кванта: $\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$. При этом происходит превращение энергии, соответствующей массе покоя пиона, в энергию электромагнитного излучения.

При столкновении γ -кванта большой энергии с протоном могут образоваться нейтрон и пион:

$$\gamma + p \rightarrow n + \pi^+,$$

а за счет энергии электромагнитного излучения увеличивается масса покоя.

Эти опыты доказывают, что электромагнитное излучение, частицы которого (фотоны) не имеют массы покоя, может превращаться в частицы вещества и обратно. Все изложен-

ное подтверждает, что *материя существует в виде вещества и поля и эти два вида материи могут превращаться друг в друга*. Это превращение может происходить с участием кинетической энергии. Например, протон может приобрести энергию в электрическом поле ускорителя, а затем при его столкновении с другим протоном за счет кинетической энергии могут образоваться новые.

Американский физик Э. Лоуренс и его сотрудники получили в 1955 г. из антипротонов антинейтрон. Эти античастицы были получены в мощном ускорителе при бомбардировке протонов протонами с энергией $6 \cdot 10^3$ МэВ. При столкновениях протонов рождались пары протон-антипротон и нейтрон-антинейтрон:

$$p + p \rightarrow p + \bar{p} + n + \bar{n} + p + p.$$

При встрече антипротона с протоном или антинейтрона с нейтроном происходит их аннигиляция: нуклон и антинуклон исчезают, а вместо них образуется несколько ней-



Рис. 1.4.
Взаимодействие
протонов

тральных и заряженных пионов (в среднем около 5). На рис. 1.4 показана аннигиляция антипротона и протона в пузырьковой камере. Движущийся снизу антипротон $\bar{p}$ встречается с протоном. В результате аннигиляции в этом случае образовались 4 положительных и 4 отрицательных пиона, разлетающихся в разные стороны (магнитное поле направлено от читателя). Излом одного следа в нижней части рисунка означает распад пиона: $\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu_\mu$ (нейтрино следа не оставляет).

Нейтральные пионы распадаются на γ -кванты. Заряженные пионы распадаются с образованием мюонов и нейтрино, мюоны в свою очередь распадаются с образованием электронов, позитронов и нейтрино. Аннигиляция позитронов заканчивает превращение пары нуклон-антинуклон. В результате образуются несколько γ -квантов и несколько нейтрино. Открытие антинуклонов указывает на возможность существования антивещества, целиком состоящего из античастиц. Так, отрицательно заряженный антипротон с вращающимся вокруг него позитроном представляет собой антиводород. Антинуклоны могут образовать ядра других антиатомов. Пока удалось получить только антидейтрон и ядро антигелия. Ясно, что получение антивещества встречает огромные трудности, поскольку при его контакте с веществом происходит аннигиляция. Возможно, что где-нибудь во Вселенной существуют целые антимирры, состоящие из антивещества.

1.8. Открытие новых элементарных частиц

В 1947 г. Г. Рочестер и С. Батлер при изучении космических лучей обнаружили в камере Вильсона расходящиеся из одной точки в виде буквы V следы частиц. Было очевидно, что они рождались при распаде каких-то неизвестных частиц, которые нейтральны и следов не оставляли.

Позднее эти новые частицы были обнаружены и другими исследователями. Одна из них примерно вдвое легче протона и была названа *K-мезоном*, или *каоном*; другая частица несколько тяжелее протона, получила название *λ -частицы* (*лямбда*).

В течение последующих восьми лет к ним присоединились заряженные каоны, а также два новых вида тяжелых частиц: σ -частицы (*сигма*) и ξ -частицы (*кси*); σ - и ξ -части-

цы, как и λ -частица, оказались тяжелее протона и получили общее название *гиперонов*.

Открытие каонов и гиперонов было совершенно неожиданным, и они получили название *странных частиц*. Их роль в строении вещества неясна, хотя очевидно, что все они участвуют в ядерных взаимодействиях. *Странные частицы* обладают рядом «загадочных» свойств, например имеют неожиданно большое с точки зрения теории время жизни.

Элементарные частицы образуются при столкновениях частиц высоких энергий с другими частицами. Долгое время такие столкновения можно было наблюдать только в космических лучах, которые были единственным источником частиц высоких энергий. В космических лучах и было открыто большинство элементарных частиц.

В настоящее время для изучения элементарных частиц используются ускорители протонов и других заряженных частиц. На крупнейшем Серпуховском ускорителе получают пучок протонов с энергией $76 \cdot 10^3$ МэВ, а также пучки других частиц (пионов, каонов и др.) с энергией до $60 \cdot 10^3$ МэВ. Строятся гигантские ускорители, рассчитанные на получение энергий порядка 10^6 МэВ.

В середине 50-х годов была открыта еще одна разновидность мезонов — η -мезон (*эта*), и самая тяжелая частица — Ω -гиперон (*омега*).

В 1961–1962 гг. экспериментально было доказано существование другого типа нейтрино — *мюонного нейтрино*, получившего обозначение ν_μ ; *электронное нейтрино* стали обозначать ν_e .

Мюоны образуются вместе со своим нейтрино при распаде заряженных пионов.

Мюонное нейтрино (ν_μ) и антинейтрино ($\bar{\nu}_\mu$) очень похожи по своим свойствам на электронное нейтрино (ν_e) и

антинейтрино ($\bar{\nu}_e$), однако опыты показали, что это различные частицы.

Удивительным свойством мюона, которое пока не получило объяснения, является его полное сходство с электроном во всем, кроме массы: мюон в 207 раз тяжелее электрона. Этот «тяжелый электрон» может даже на некоторое время занимать место электрона в атоме, вращаясь по очень близко расположенной к ядру орбите.

При распаде мюонов образуются электроны и позитроны и два нейтрино – электронное и мюонное.

Классификация элементарных частиц

Важнейшим общим свойством элементарных частиц является их способность к взаимному превращению. При распаде частиц одни частицы исчезают, другие рождаются. Взаимное превращение частиц происходит и при столкновениях двух частиц высоких энергий. Например, два протона, столкнувшись, могут превратиться в другие частицы:

$$P + P \rightarrow p + n + \pi^+.$$

Во всех превращениях частиц выполняется закон сохранения полной энергии, включающей энергию, соответствующую массам покоя, и кинетическую энергию частиц, причем эти энергии могут переходить друг в друга.

При самопроизвольном распаде частицы суммарная масса покоя образующихся частиц меньше массы покоя распавшейся частицы, а энергия, соответствующая этой разности масс покоя, превращается в кинетическую энергию частиц продуктов распада. При столкновении двух частиц возможно обратное превращение энергии.

В приведенных выше примерах масса покоя рождающихся частиц больше массы покоя двух сталкивающихся про-

тонов за счет их кинетической энергии. Два протона, столкнувшись, могут породить пион:

$$P + P \rightarrow P + p + \pi^0,$$

если их кинетическая энергия при столкновении превышает энергию, соответствующую массе покоя пиона. Этот пример особенно нагляден, поскольку сохраняются исходные частицы и образуется новая.

При превращениях частиц, кроме закона сохранения полной энергии, выполняются законы сохранения заряда, количества движения.

Важнейшей характеристикой частицы является ее масса, которая отражает инертные и гравитационные свойства частицы и определяет имеющийся в ней запас энергии. Легчайшей частицей, обладающей массой покоя, является электрон (0,511 МэВ). Большинство частиц обладает спином, то есть собственным моментом количества движения. Можно представить, что они, наподобие волчка, вращаются вокруг собственной оси. Спин частицы каждого вида имеет строго определенное значение; если спин фотона принять за единицу, то все частицы имеют спин 0, $1/2$ или 1 (кроме гиперона, спин которого равен $3/2$).

Некоторые частицы нейтральны, другие обладают положительным или отрицательным электрическим зарядом, равным по величине заряду электрона. Заряд входит в обозначение всех заряженных частиц, кроме протона.

Почти все элементарные частицы нестабильны. В свободном состоянии стабильны только протон, электрон и частицы, не имеющие массы покоя (фотон и нейтрино). Остальные частицы самопроизвольно распадаются, и все, кроме нейтрона, имеют очень непродолжительное среднее время жизни.

Элементарные частицы делятся на четыре класса:

- 1) *фотоны* (γ -кванты); фотоны не имеют массы покоя и заряда; спин равен 1;
- 2) *лептоны* – легкие частицы, у лептонов спин равен $1/2$;
- 3) *мезоны* – промежуточные частицы; спин мезонов равен 0;
- 4) *барионы* – тяжелые частицы; самый легкий барион – протон; у всех барионов, кроме n -частицы, спин равен $1/2$.

Частицы различных классов отличаются не только массой и значением спина. Так, фотоны и лептоны не участвуют в ядерных взаимодействиях, а мезоны и барионы участвуют.

У лептонов и барионов внутри класса действуют законы сохранения числа частиц. Когда, например, исчезает один барион, вместо него появляется другой. Закон сохранения числа барионов делает протон стабильным: он самый легкий барион и поэтому не может самопроизвольно распадаться с образованием другого бариона. Законы сохранения числа барионов и числа лептонов многократно проверены на опыте.

У класса мезонов и фотонов закон сохранения не выполняется, и они могут возникать и исчезать в любом количестве.

1.9. Излучение «сверхсветовых» частиц (эффект Черенкова) **(Денисов С.П., 1996). Физика**

В этой статье рассмотрены история открытия, объяснение и основные свойства излучения Черенкова. Обсуждены современные применения детекторов черенковского излу-

чения в экспериментах на ускорителях и с космическими лучами.

1. Введение

В 1934 году экспериментально обнаружено, а в 1937 году теоретически объяснено одно из красивейших физических явлений – свечение, вызываемое заряженной частицей, которая движется в среде с постоянной скоростью, превышающей скорость распространения света в этой среде. В статье это явление называется по имени первооткрывателя излучением *Черенкова*, как это принято в зарубежной литературе. В отечественных публикациях его часто называют излучением *Вавилова-Черенкова*, поскольку Сергей Иванович Вавилов играл активную роль в опытах, проводимых Павлом Алексеевичем Черенковым. Сергей Иванович предложил тему исследований и постоянно интересовался результатами эксперимента.

История открытия эффекта Черенкова, описанная в разделе 2, весьма интересна и поучительна, в первую очередь – для молодых ученых. В разделе 3 даны три простых объяснения возникновения излучения Черенкова. Два из них основаны на законах классической волновой оптики – теории интерференции и принципе Гюйгенса, третье – на квантово-корпускулярных представлениях об излучении. В разделе 4 рассмотрены принципы действия и современное применение детекторов черенковского излучения для регистрации элементарных частиц в экспериментах в физике высоких энергий, космических лучах и астрофизике.

Для тех, кто заинтересуется излучением Черенкова и захочет получить о нем больше сведений, в заключение приведены ссылки на книги, как научно-популярные, так и специальные.

В качестве единицы энергии используются электронвольт (эВ), равный энергии, приобретаемой электроном при прохождении разности потенциалов 1 вольт ($1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$), а также производные: $1 \text{ КэВ} = 10^3 \text{ эВ}$, $1 \text{ МэВ} = 10^6 \text{ эВ}$, $1 \text{ ГэВ} = 10^9 \text{ эВ}$ и $1 \text{ ТэВ} = 10^{12} \text{ эВ}$.

2. История открытия

В начале 30-х годов молодой аспирант Павел Алексеевич Черенков начал заниматься изучением источника, содержащего несколько десятых долей грамма радия. Его руководителем был известный в то время специалист по люминесценции Сергей Иванович Вавилов. *Люминесценция* — это «холодное» свечение вещества под действием внешнего облучения (например, ультрафиолетовыми или рентгеновскими лучами), представляющее собой избыток над тепловым излучением и имеющее длительность, значительно превышающую период световых колебаний. Механизм люминесценции заключается в возбуждении атомов вещества внешним источником и испускании ими света при переходе в основное состояние. Время жизни атома в возбужденном состоянии может быть очень малым (миллиардные доли секунды) или очень большим (несколько часов), но оно всегда конечно. Ко времени проведения опытов Черенкова основные закономерности люминесценции были установлены. Они сводились к следующему:

- интенсивность и спектральный состав люминесценции зависят от типа вещества, его чистоты и температуры;
- излучение происходит изотропно (равномерно во все стороны);
- даже малые примеси некоторых веществ могут заметно уменьшить интенсивность люминесценции (так называемый эффект «тушения», связанный с конечным

временем жизни атома в возбужденном состоянии и возможностью передать за это время энергию возбуждения молекуле примеси, а не излучить ее в виде фотона).

В результате весьма трудных и детальных исследований, продолжавшихся несколько лет, Черенкову удалось доказать, что наряду с люминесценцией при облучении всех использованных в опыте жидкостей некоторыми радиоактивными β - и γ -источниками появляется совершенно новый тип свечения, многие характеристики которого прямо противоположны свойствам люминесценции, а именно:

- интенсивность и спектр излучения почти не зависят от типа вещества, его чистоты и температуры;
- излучение связано с движением в среде электронов (это было установлено в специальных опытах, в которых сосуд с исследуемой жидкостью помещали в магнитное поле);
- излучение поляризовано и направлено вдоль пучка электронов;
- излучение имеет сплошной спектр, максимум интенсивности приходится на синюю часть спектра;
- излучение имеет пороговый характер; оно не вызывается, например, рентгеновскими лучами с максимальной энергией 30 КэВ.

Основные проблемы в исследованиях Черенкова были связаны с тем, что новое свечение оказалось очень слабым. Это сейчас существуют фотоумножители, позволяющие регистрировать отдельные фотоны, а в 30-х годах наиболее чувствительным детектором света был человеческий глаз. Чтобы заметить свечение даже очень мощным по тем временам радиоактивным источником, Черенков час-полтора адаптировался в полной темноте. За это время чувстви-

ность глаз возрастала в десятки тысяч раз и можно было наблюдать весьма слабое свечение. Чтобы не вносить в результаты измерений ошибок, связанных с быстрым утомлением глаз, приходилось часто отдыхать, так что общая продолжительность измерений не превышала 2,5 часа в сутки. За три года Черенков провел десятки тончайших опытов.

Первая работа с новыми результатами была опубликована в 1934 году в журнале «Доклады Академии наук СССР» и была воспринята... неоднозначно. Вспоминая этот период своей жизни в лекции на семинаре «Черенковские детекторы и их применение в науке и технике», посвященном своему восьмидесятилетию и пятидесятилетию открытия эффекта, названного его именем, Павел Алексеевич Черенков говорил:

– Возвращаясь к прошлому, могу сказать, что мне не доставляло особого удовольствия узнавать, что мои эксперименты подчас квалифицировались как занятие спиритизмом, часто проводилась параллель с ошибочным эффектом, закрытым Вудом, пресловутыми N-лучами Блондло. Правда, иногда были приятные исключения. Я до сих пор с большим удовольствием вспоминаю восклицание крупнейшего ученого этой эпохи Нильса Бора «Wunderbar, Wunder-schon!», повторенное несколько раз после того, как мною было ему показано одно из самых существенных свойств излучения – его пространственная асимметрия. Тем не менее атмосфера недоверия к новому эффекту со стороны научной общественности продолжала сохраняться. Наиболее открытым и резким проявлением этого недоверия был отказ журнала *Nature* опубликовать посланную мною краткую статью с изложением сути явления и его основных свойств...

Увы, как это ни странно, приходится признать, что консерватизм ученых подчас очень силен и история открытия

Черенковского излучения не единственное тому подтверждение.

Забегая вперед, скажем, что обнаруженное Черенковым свечение носит универсальный характер в том смысле, что под действием излучения с достаточной энергией должны «светиться» все прозрачные тела, а не только жидкости. До Черенкова с радиоактивными источниками таких излучений работали довольно много физиков. Что же, никто из них не наблюдал нового излучения? Оказывается, наблюдали. И первой из них, скорее всего, была знаменитая Мария Кюри, лауреат двух Нобелевских премий (по физике и химии), которая заметила голубое свечение бутылей с концентрированными растворами радия. В 1926 году французский физик Малле обратил внимание на голубой цвет прозрачных веществ, расположенных рядом с радиоактивными источниками. Он даже определил спектр свечения и указал на некоторые его отличия от люминесценции. Но Малле не довел своих исследований до конца, не попытался объяснить обнаруженное им излучение. Поэтому его работам (возможно, незаслуженно) не придали особого значения.

Заслуга Черенкова состояла в том, что он не только обратил внимание на новое явление, но и детально изучил все его свойства в той мере, в какой это позволяла сделать экспериментальная техника 30-х годов. Он не успокоился, пока явление не было полностью понято. Мне посчастливилось, будучи аспирантом, работать несколько лет в лаборатории П.А. Черенкова в Физическом институте им. П.Н. Лебедева и затем неоднократно с ним встречаться. На меня произвели большое впечатление тщательность, с которой П.А. Черенков готовил и проводил научные исследования, его стремление разобраться в деталях эксперимента и «до конца» понять полученные результаты. Этого же он требовал

от своих сотрудников, этому учил молодежь. Иногда приходится слышать, что П.А. Черенкову повезло, что открытие было случайным. Возможно. Наверное, во всех открытиях есть доля везения. Но несомненно другое: обнаружить в 30-х годах черенковское излучение можно было только в результате очень тщательных и тонких экспериментов.

3. Объяснение

Первую интерпретацию результатов опытов П.А. Черенкова дал С.И. Вавилов в том же номере журнала «Доклады Академии наук СССР», где была опубликована первая статья ученого. С.И. Вавилов справедливо считал, что обнаруженное излучение есть излучение движущегося в среде электрона, а не атомов среды, но при этом полагал, что оно связано с торможением электронов при их взаимодействии с атомами среды: ведь из классической электродинамики было хорошо известно, что заряд, движущийся с ускорением, излучает. Однако простая гипотеза С.И. Вавилова не могла объяснить всей совокупности экспериментальных фактов, в частности интенсивности излучения и его слабой зависимости от атомного номера атомов среды, и ее пришлось отбросить.

Правильное объяснение оказалось прочтым и очень красивым. Оно было дано только через три года после первой публикации П.А. Черенкова и принадлежало Игорю Евгеньевичу Тамму и Илье Михайловичу Франку, которые показали, что заряженная частица, движущаяся в среде равномерно и прямолинейно со скоростью, превышающей скорость распространения света в данной среде, порождает излучение Черенкова.

Естественно задать вопрос: как же так может быть? Ведь до публикации работы И.Е. Тамма и И.М. Франка в 1937 году

считалось, что заряд, движущийся с постоянной скоростью, не может излучать. Да, считалось. Но при этом молчаливо предполагалось, что скорость движения заряда не может превышать скорость распространения света. Но последнее утверждение справедливо только для вакуума. Действительно, в вакууме, согласно теории относительности, скорость распространения света $c = 3 \cdot 10^8$ м/с является максимальной скоростью и всегда $u < c$, где u – скорость движения частицы. Другое дело – вещество. Как хорошо известно, в веществе с показателем преломления n скорость света равна $\frac{c}{n}$ и возможно выполнение условия $u > \frac{c}{n}$ без противоречия с теорией относительности.

4. Применение

Широкое практическое использование черенковского излучения началось после создания высокочувствительных детекторов света – фотоэлектронных умножителей (сокращенно ФЭУ). Оно применяется в основном для регистрации релятивистских частиц в физике высоких энергий и космических лучах при помощи черенковских счетчиков. В этом разделе будут рассмотрены основные разновидности детекторов Черенкова.

Дифференциальные черенковские счетчики

Дифференциальные счетчики используют для идентификации (определения сорта) частиц в пучках на ускорителях. Обычно такие пучки содержат несколько типов частиц (электроны, мюоны, пионы, каоны, протоны или антипротоны) с разными массами покоя. Пучки формируют при помощи магнитных элементов (магнитов и квадрупольных линз), и поэтому все частицы в них, независимо от массы, имеют одинаковый импульс. Задача дифференциального счетчика – выб-

рять частицы того сорта, с которыми проводится эксперимент.

Черенковское излучение, испускаемое частицей под углом q , собирается в фокальной плоскости сферического зеркала в узкое кольцо с радиусом $r = \frac{R}{2} \operatorname{tg} q$, где R — радиус зеркала. Предоставляем читателю возможность самому доказать, что это именно так. Поскольку частицы в пучке имеют разные массы и одинаковый импульс, то их скорости и, следовательно, углы излучения будут отличаться, а значит, черенковский свет фокусируется в кольца разного радиуса r . Поместив в фокальной плоскости зеркала кольцевую диафрагму подходящего диаметра, можно выделить свет от частиц с определенной массой и зарегистрировать его расположенными за диафрагмой ФЭУ.

Основной характеристикой дифференциального счетчика является разрешение по скорости $\frac{D_q}{b}$.

D_q определяется в основном угловым разбросом частиц в пучке, а D_n — дисперсией среды (черенковского радиатора). Для получения высокого разрешения по скорости нужно использовать хорошо сформированный «параллельный» пучок частиц, малые углы q и радиаторы с низкой дисперсией. Современные дифференциальные счетчики обладают

разрешением $\frac{D_q}{b} \sim 10^{-6}$. В них применяются газовые ради-

аторы, а угол излучения составляет $\sim 1^\circ$. Чтобы при столь малых углах получить достаточное для эффективной регистрации частиц количество фотонов, счетчики имеют большую длину (до десятков метров). Для компенсации дисперсии иногда используют специальную, достаточно сложную

оптику. Попробуйте оценить, какое разрешение по скорости должен иметь счетчик для разделения пионов ($mc^2 = 140$ МэВ), и каонов ($mc^2 = 494$ МэВ) в пучке с импульсом 40 ГэВ/сек, используемый для проведения экспериментов в Институте физики высоких энергий (г. Протвино).

Счетчики типа RICH с регистрацией кольца черенковского света

Целью многих экспериментов на ускорителях является изучение взаимодействия пучков высокоэнергичных частиц с мишенями из различных материалов. Образующиеся при взаимодействии вторичные частицы вылетают из мишени в широком диапазоне углов и поэтому не могут быть идентифицированы при помощи описанных выше дифференциальных счетчиков. Для этого используются детекторы типа RICH (Ring Imaging Cherenkov counter). Они отличаются от дифференциальных счетчиков тем, что в фокальной плоскости сферического зеркала вместо узкой кольцевой диафрагмы располагаются детекторы, позволяющие определить радиус и положение центра кольца сфокусированного черенковского света. По радиусу кольца определяют скорость частицы (и массу, если известен импульс), а по положению его центра – угловые координаты траектории частицы.

Пороговые черенковские счетчики

В пороговых счетчиках регистрируется черенковский свет, излученный в широком диапазоне углов. В них отсутствует прецизионная фокусирующая оптика. Любая частица, скорость которой превышает пороговое значение $u = c/n$, может быть ими зарегистрирована (отсюда их название). В пороговых счетчиках обычно используются газовые среды. Для газов величина $n = 1$ с хорошей степенью точности пропорциональна давлению. Это позволяет плавно и просто ме-

нять показатель преломления радиатора и, следовательно, значение пороговой скорости.

Пороговые счетчики широко применяют в экспериментах на ускорителях для идентификации самых легких частиц (как пучковых, так и вторичных). Для этого давление газа устанавливают таким, чтобы скорости всех других частиц были меньше пороговой и они не могли излучать. Основное достоинство пороговых счетчиков по сравнению с дифференциальными и типа RICH – их простота.

Черенковские счетчики полного поглощения

Идентификация и определение энергии электронов и γ -квантов – одна из самых актуальных задач в физике высоких энергий в настоящее время. Это связано, в частности, с тем обстоятельством, что большинство элементарных частиц нестабильно и многие из них через очень короткое время, не позволяющее зарегистрировать их непосредственно, распадаются на электроны и γ -кванты. Изучение таких частиц возможно только путем регистрации продуктов их распада.

Основным способом регистрации электронов и γ -квантов высокой энергии (больше нескольких гигаэлектронвольт) является метод полного поглощения создаваемых ими в среде детектора электромагнитных ливней. Рассмотрим кратко, как возникают и что представляют собой электромагнитные ливни.

Главной реакцией для ультрарелятивистских электронов и позитронов является тормозное излучение γ -кванта в поле атомных ядер:

$$e + A \rightarrow \gamma + e' + A'$$

(штрих означает изменение энергии частицы). Аналогично, самым вероятным процессом для γ -квантов с энергиями в

десятки МэВ и выше является образование электрон-позитронных пар:

$$\gamma + A \rightarrow e^+ + e^- + A'.$$

Посмотрим, что случится при попадании, например, высокоэнергичного γ -кванта в достаточно толстый слой вещества, толщина которого во много раз превышает средний пробег γ -кванта до образования e^+e^- пары (для плотных сред с большим A средний пробег составляет всего 5–10 мм). Через короткое время γ -квант превратится в электрон и позитрон; те, в свою очередь, быстро излучат тормозные γ -кванты и в результате вместо одного γ -кванта получатся два γ -кванта, e^+ и e^- , причем энергия каждой частицы будет в среднем равна $1/4$ от первоначальной. Процесс лавинообразного размножения частиц и дробления энергии будет продолжаться до тех пор, пока реакции тормозного излучения и рождения пар играют доминирующую роль. Затем, при малых энергиях, в дело вступят другие процессы (например, ионизационные потери энергии для электронов и позитронов), приводящие к уменьшению потока частиц. Образовавшиеся в веществе электроны, позитроны и γ -кванты и представляют собой электромагнитный ливень. Легко сообразить, что ливень от первичного электрона или позитрона будет развиваться аналогично ливню от γ -кванта.

Если электромагнитный ливень возник в прозрачном веществе, то электроны и позитроны будут излучать черенковский свет. Если толщина вещества к тому же достаточна для полного поглощения ливневых частиц, то число черенковских фотонов и, следовательно, сигналы с регистрирующих их ФЭУ будут пропорциональны энергии первичного электрона или γ -кванта. На этом основан принцип измерения энергии черенковскими спектрометрами полного поглощения. В качестве радиаторов в них используются очень

прозрачные свинцовые стекла (тяжелые флинт) и некоторые кристаллы. В последнее десятилетие в экспериментах в физике высоких энергий широко используют спектрометры типа ГАМС, разработанные в Институте физики высоких энергий под руководством Ю.Д. Прокошкина. Они представляют собой «стенки», составленные из блоков оптического стекла. Характерный размер блока – $4 \times 4 \times 40 \text{ см}^3$. Каждый блок «просматривается» своим ФЭУ. Важной особенностью спектрометров ГАМС является возможность наряду с энергией измерять с высокой точностью координаты попадающих в детектор частиц по распределению энергии ливня в поперечном направлении. Самый большой спектрометр ГАМС содержит 4000 блоков стекла. Он используется в экспериментах в Европейском центре по ядерным исследованиям (ЦЕРН) вблизи Женевы. Крупные спектрометры типа ГАМС используются в Институте физики высоких энергий, Фермиевской национальной ускорительной лаборатории (США), Брукхейвенской национальной лаборатории (США).

Детекторы черенковского излучения для регистрации космических лучей

Электромагнитные ливни могут развиваться не только в плотных средах, но и в газах, в частности в воздухе. Например, γ -кванты с энергиями в десятки и сотни тераэлектронвольт (10^{12} эВ), попадающие в атмосферу Земли из космоса, дают мощное черенковское излучение. Источниками таких γ -квантов являются далекие звезды, изучение спектров излучения помогает лучше понять процессы, происходящие во Вселенной. Этим занимается молодая наука – гамма-астрономия. Первые эксперименты по наблюдению черенковских вспышек от космических частиц были выпол-

нены еще в 50-х годах В. Голбрайтом и Дж. Джелли, а также Н.М. Нестеровой и А.Е. Чудаковым. В настоящее время функционируют несколько крупных экспериментальных установок, на которых ведутся исследования в области гамма-астрономии. Черенковский свет в них регистрируется либо непосредственно ФЭУ с большими фотокатодами, либо детекторами, похожими на прожекторы (в фокусе прожекторных зеркал, имеющих диаметр до нескольких метров, располагаются чувствительные ФЭУ). Чтобы уменьшить фон от постороннего света и определить направление движения первичного γ -кванта, в одной установке используют ряд таких детекторов, расположенных на некотором расстоянии друг от друга. Регистрируются события, когда сигналы в детекторах появляются одновременно. Эксперимент, естественно, ведется только в безлунные ночи при прозрачной атмосфере.

Черенковское излучение сопровождает не только электромагнитные ливни, но и так называемые широкие атмосферные ливни (ШАЛ), возникающие от сильновоздействующих космических частиц (адронов). Для изучения ШАЛ также применяются черенковские детекторы.

Но есть один тип космических частиц, которые очень слабо взаимодействуют с веществом и их нельзя зарегистрировать по ливням в атмосфере: это нейтрино. Изучение космических нейтрино представляет особый интерес, так как может дать информацию о процессах, происходящих в глубинах галактик и звезд, в частности внутри Солнца. Этим занимается новая наука – *нейтринная астрономия*. Чтобы «уловить» нейтрино, приходится строить очень массивные детекторы – весом в тысячи тонн и более, и помещать их глубоко под землей или под водой, чтобы уменьшить фон от всех других, менее проникающих, космических частиц.

Ниже рассматриваются два примера нейтринных детекторов, в которых регистрируется черенковское излучение от вторичных заряженных частиц, возникших при взаимодействии нейтрино с водой. Вода является самым дешевым, а иногда и бесплатным черенковским радиатором.

Первый пример – установка KAMUKANDE-II, расположенная на глубине 1 км в шахте Камиока в 300 км от Токио. В установке используется цилиндрический стальной танк диаметром 15,6 м и высотой 16 м, наполненный водой (вес 3000 т), очищенной от радиоактивных загрязнений. Длина пробега черенковского фотона в воде доходит до 55 м. Более 1000 ФЭУ с полусферическим фотокатодом диаметром 0,5 м используют для регистрации черенковского света. В этой шахте сооружается значительно более крупная установка SUPER-KAMUKANDE, которая будет иметь водяной черенковский детектор (вес 50 000 т) с 13 000 ФЭУ. Установки KAMUKANDE предназначены для регистрации нейтрино от Солнца и взрывов сверхновых звезд, а также поиска распада протона с временем жизни до 10^{33} – 10^{34} лет.

Другой пример – Байкальский нейтринный телескоп (БНТ), использующий воду озера Байкал как черенковский радиатор. Выбор Байкала для создания подводного нейтринного детектора не случаен. Озеро имеет большую глубину (до 1,7 км), и вода его достаточно прозрачна. Кроме того, зимой оно покрывается толстым слоем льда, что упрощает монтаж установки. Черенковский свет от взаимодействий нейтрино на больших глубинах регистрируется фотоумножителями, опускаемыми под воду на специальных тросах – стрингах. В настоящее время работает только часть БНТ, содержащая около сотни ФЭУ. Предполагается, что число ФЭУ и соответственно объем «просматриваемой» ими воды будет постепенно нарастать. Программа

исследований на БНТ включает изучение спектров космических нейтрино и мюонов при высоких энергиях. Отметим, что «свечение» океана на очень больших глубинах связано в значительной степени с черенковским излучением электронов от β -распада ^{40}K .

В заключение упомянем, что существует весьма интересный проект использования льда Антарктиды как черенковского радиатора для регистрации космических частиц.

5. Заключение

В 1994 году открытию П.А. Черенкова исполнилось 60 лет. За это время оно, как и многие другие выдающиеся открытия, прошло путь от недоверия до всеобщего признания и широкого использования. Число работ, посвященных излучению Черенкова и его применению, составляет несколько тысяч. Но это не означает, что все уже понято и изучено. Как теоретические, так и экспериментальные исследования излучения Черенкова продолжаются. Они открывают новые стороны и неожиданные возможности использования этого замечательного явления.

В силу специфики статьи, рассчитанной на учащихся старших классов и преподавателей физики средней школы, и ограниченности ее объема «за бортом» остались многие красивые эффекты, связанные, например, с излучением «сверхсветового» заряда в кристаллах, радиоизлучением Черенкова, применением в ускорительной технике, биологии, медицине, химии и др. Для тех, кто захочет глубже ознакомиться с историей открытия, теорией и применениями черенковского излучения, рекомендуется следующая литература:

1. Первые советские нобелевские лауреаты-физики. М.: Знание, 1984.

Книга включает нобелевские лекции П.А. Черенкова, И.Е. Тамма и И.М. Франка.

2. *Болотовский Б.М.* Свечение Вавилова-Черенкова. М.: Наука, 1964.

Хорошее научно-популярное изложение истории открытия, теории и практического использования черенковского излучения.

3. *Джелли Дж.* Черенковское излучение и его применение. М.: Иностранная литература, 1960.

Одна из первых книг по черенковскому излучению, многие главы написаны достаточно популярно и не требуют специальных знаний.

4. *Зрелов В.П.* Излучение Вавилова-Черенкова и его применение в физике высоких энергий. М.: Атомиздат, 1968. Т. 1, 2.

Подробная монография по теории и детекторам излучения Черенкова.

5. *Гинзбург В.Л.* Теоретическая физика и астрофизика. М.: Наука, 1981.

Автор – выдающийся ученый, внесший большой вклад в развитие теории черенковского излучения. Книга требует хорошей теоретической подготовки.

6. Черенковские детекторы и их применение в науке и технике. М.: Наука, 1990.

Сборник содержит оригинальные доклады, представленные на семинаре, посвященном 50-летию открытия черенковского излучения и 80-летию П.А. Черенкова; часть докладов требует специальных знаний.

Глава 2 | КОСМИЧЕСКИЕ ВЗРЫВЫ

2.1. Теория Большого взрыва

Согласно самой признанной на сегодня космологической модели, Вселенная возникла в результате так называемого Большого взрыва. При этом возникает вопрос, что было раньше, а поэтому теория Большого взрыва смыкается не только с другими науками, но и с философией и религией.

Как правило, считается, что Большой взрыв был ужасающим. Действительно, Большой взрыв происходит в определенное мгновение, в определенном месте пространства. Но до Большого взрыва не было пространства и времени. После Большого взрыва Вселенная начала расширяться, создавая пространство и время в четырехмерном измерении.

Так как с научной точки зрения нет смысла задавать вопрос, что было до Вселенной, в этом же смысле не надо спрашивать, что было за ее преде-

лами, потому что пределов не существовало. Вселенная расширяется не в пространстве, она расширяется вместе с пространством. То есть это вовсе не означает, что существует вероятность, как это постулирует любая теория, что есть другие вселенные, кроме той, в которой мы живем.



Рис. 2.1.
Расширение Вселенной

■ Доказательство теории Большого взрыва

В пользу теории Большого взрыва у нас есть два доказательства: существование радиационного фона и расширение Вселенной. Доказательство расширения было приведено американским астрономом Эдвином Хабблом в 1929 году. Хаббл, изучая спектры далеких галактик, заметил, что длина волны некоторых полос больше длины волны тех же полос в лабораторных условиях.

Это явление — следствие хорошо известного физического явления, эффекта Доплера. Когда источник электромагнитного излучения (а в целом — любого типа волны) удаляется от наблюдателя, длина излученной световой волны увеличивается, то есть смещается к красному (красный сдвиг).

Явление, наблюдаемое в спектрах галактик, изучаемых Хабблом, можно, следовательно, гипотетически объяснить тем, что они удаляются от нашей, другими словами, что сама Вселенная расширяется. Кроме того, изучив соотношение параметров различных галактик, Хаббл предположил также, что чем больше расстояние до Галактики, тем больше и скорость ее отдаления.



Рис. 2.2.
Большой взрыв

Тот факт, что галактики удаляются от нашей, не означает, что Млечный Путь занимает центральное место, в каком-то смысле привилегированное, для расширения. И действительно, геометрия самой Вселенной такова, что она расширяется во все стороны таким образом, что все галактики отдаляются друг

от друга. Поэтому в любой Галактике можно экспериментально обнаружить тот же эффект удаления от других галактик.

■ Первые мгновения Вселенной

Чтобы воссоздать историю Вселенной, особенно в самые первые мгновения, астрономы прибегли к физике элементарных частиц. Эта область науки изучает первичные составляющие материи, не только *протоны* и *электроны*, но и частицы с более экзотическими названиями, такие как *мезоны*, *пионы*, *нейтрино* и так далее; некоторые из них существуют лишь короткие мгновения внутри ускорителя частиц, в котором можно воссоздать, хотя бы частичные, условия, которые были в первоначальной Вселенной.

К сожалению, научные знания, которыми мы сегодня располагаем, не позволяют проникнуть в то мгновение, когда произошел Большой взрыв, а также уловить ту долю секунды, которая была до «нуля». Законы физики не в состоянии объяснить, что произошло в момент между Большим взрывом и 10^{-43} секунды (этот кратчайший период называли временем Планка), как, впрочем, не в силах создать и теорию самого Большого взрыва.

В мгновение 10^{-43} секунды Вселенная была бесконечно маленькой, горячей и плотной. В следующую долю секун-



Рис. 2.3. На фотографии, сделанной спутником «Кобе», видно неравномерное расширение фонового излучения

ды она сильно переменялась: начала столь быстро расширяться от бесконечно малых размеров до момента, известного как «вздутие», Вселенная начала выделять в совокупности энергию и элементарные частицы, такие как *кварки* и *антикварки*. До того момента, когда Вселенная прожила десятитысячную долю секунды, из кварков шел процесс образования протонов и нейтронов – частиц, из которых состоят ядра атомов.

■ *После Большого взрыва*

Через секунду после Большого взрыва температура снизилась на 10 млрд градусов; во Вселенной преобладали излучение и такие легкие частицы, как электроны, и их античастицы – позитроны.

Античастицы похожи на обычную материю, с той только разницей, что частицы антиматерии имеют противоположный частицам обычной материи заряд; когда они встречаются, они тут же взаимоуничтожаются (это явление называется *аннигиляцией*), выделяя энергию. Это происходит и с парой электрон-позитрон, которые аннигилируют, образуя два гамма-кванта. Тем не менее после этой фазы должен был образоваться избыток материи по сравнению с антиматерией, потому что все, что мы сегодня наблюдаем во Вселенной, состоит из материи, а антиматерия отсутствует.

Чуть больше чем через минуту после Большого взрыва протоны и нейтроны начали соединяться между собой, образуя ядра гелия, состоящие из двух протонов и двух нейтронов. Большая часть ядер гелия, существующих на сегодняшний день во Вселенной, образовалась в первую четверть часа после первоначального взрыва. В последующие 300 000 лет значительных изменений не происходило. Вселенная, расширившись, остыла, и с этого момента электроны стали

соединяться с ядрами водорода и гелия, образуя первые атомы. То есть произошло своего рода сосредоточение космического облака, Вселенная стала прозрачна для света.

В следующие мгновения материи стало прибавляться, и приблизительно через миллион лет после Большого взрыва начали образовываться первые звезды и первые галактики, которые через 12–14 млрд лет после Большого взрыва мы наблюдаем как эволюционирующие.

■ **Фоновое космическое излучение**

В ходе наблюдений за Вселенной на микроволновом уровне было открыто, что во все стороны идет достаточно однородное излучение, известное как радиационный космический фон. Космологи объясняют его как эхо Большого взрыва, но для этого еще нужны основательные доказательства.

Открытия

В 1948 году американский физик русского происхождения Джордж Гамов и его молодые коллеги Ральф Альфер и Роберт Герман выдвинули теорию, что Вселенная возникла 10–20 млрд лет назад при очень высоких температуре и плотности, как и предполагает теория Большого взрыва; тогда расширение должно охладить излучение до 5 градусов выше абсолютного нуля, а его спектр будет выглядеть как спектр *черного тела*, то есть аналогично излучению любого тела, находящегося в полном термическом равновесии при данной температуре.

Любопытно, что это излучение было открыто совершенно случайно в 1964 году, о чем на следующий год сообщили Арно Пензиас и Роберт Вильсон, работавшие в американской лаборатории «Белл телефон лабораторис». Ученые

вели работу с помощью антенны, построенной для связи с телекоммуникационными спутниками «Эко», когда неожиданно обнаружили фоновый электрический шум, который непрерывно испускался во всех направлениях.

Поначалу они подумали, что это помехи, наведенные близко расположенным передатчиком. Но проверка окрестных территорий не обнаружила ни одного источника микроволнового излучения.

Исследователи пришли к заключению, что причина шума – в излучении, которое, видимо, равномерно поступает из космоса, а точнее – из далеких недр Вселенной, от источника с реальной температурой около 3,5 К, а длина волны составляет 7 см. Температура была выше теоретически ожидаемой, и поэтому исследователи не торопились с обнаружением своего открытия.

За открытие фонового космического излучения Пензиас и Вильсон получили в 1978 году Нобелевскую премию в области физики вместе с группой астрономов Принстонского университета – Диком, Пибблзом, Роллом и Уилкинсом, которые в том же, 1964, году занимались радиоастрономическими исследованиями, как раз пытаясь обнаружить излучение.

Происхождение фонового космического излучения

Согласно теории Большого взрыва, когда температура первородной Вселенной опускается примерно до 3000 К, элементарные частицы могут образовывать атомы водорода и гелия. Внезапное исчезновение свободных электронов приводит к излучению, которое свободно распространяется в виде фотонов при микронной длине волны.

С этого момента Вселенная становится прозрачной для излучения. До рекомбинации тепловое равновесие между

энергией и материей следовало закону Планка о черном теле. Вселенная была непрозрачной оптически. После рекомбинации излучение продолжало точно следовать закону *черного тела*, хотя уже больше не находилось в равновесии с материей.

Длина волны испущенного излучения сдвигается к красному с расширением Вселенной, пока не достигает диапазона микроволн. Поэтому температура излучения *черного тела*, обратно пропорциональная длине волны, уменьшается по достижении примерно 3 К.

Слабое излучение, наблюдаемое сегодня, – это информация о давно прошедших событиях, потому что свет из Галактики вышел очень давно, когда возраст Вселенной составлял 300 или 500 тысяч лет, а плотность была 1000 атомов на см³.

Характеристики

Пензиас и Вильсон открыли, что интенсивность излучения одинакова во всех направлениях с погрешностью в 3%. Такая однородность была присуща и первородной Вселенной.

Однако нам известно, что Вселенная неоднородна: есть галактики и скопления галактик, расположенные вокруг огромных пустых «сфер». Неоднородность Вселенной, наступившая по прошествии времени после Большого взрыва, должна наложить отпечаток и на фоновое излучение. Поэтому, чтобы обнаружить действительную деформацию, самое главное – с особой точностью измерить спектр этого излучения. Чтобы избежать искажения приходящей на Землю волны сантиметрового диапазона, вносимого поглощением и испусканием излучения молекулами земной атмосферы, 18 ноября 1989 года НАСА (Национальное управле-

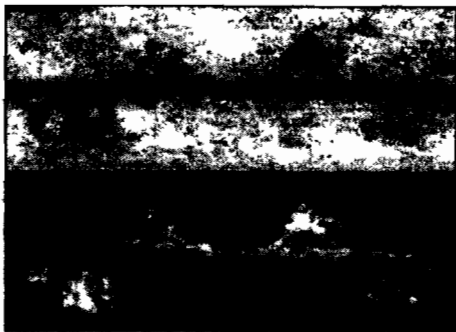


Рис. 2.4.

*Спутник «Кобе» изучает фоновое излучение также
и в инфракрасном диапазоне.
На изображении видны пылевые облака Млечного Пути*

ние по аэронавтике и исследованию космического пространства) запустило спутник «Кобе» (Cosmic microwave Background Explorer).

Уже через 9 минут после запуска был получен спектр черного тела, никогда раньше не наблюдавшегося в природе, и

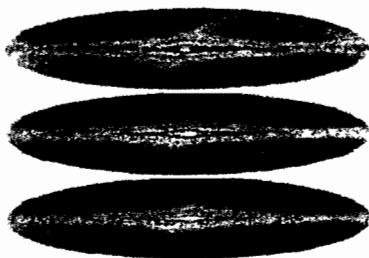


Рис. 2.5. Изображения неба,
сделанные «Кобе»
при различных длинах волн
в поисках гетерогенности
фоновое излучения

еще одно подтверждение теории Большого взрыва, потому что только в столь особых условиях космическое излучение может «преданно» следовать закону излучения черного тела. Полученная погрешность составила 0,005%. Еще более интересное открытие было сделано в 1992 году, когда на «Кобе» был помещен детектор. Наблюдались небольшие колебания по от-

ношению к среднему излучению, равные почти сотой доле, которые соответствуют более горячей зоне. Обнаруженные колебания температуры составили порядка $0,000030$ К при средней температуре $2,73$ К. Согласно утверждениям космологов, такие флуктуации возникают во Вселенной из-за неоднородности, приведшей впоследствии к образованию галактик. Для ее изучения разрабатываются и реализуются различные задачи для спутников.

■ *Расширение Вселенной*

На сегодняшний день теория Большого взрыва многие вопросы оставляет без ответа. Похоже, что первородная Вселенная могла «передать» информацию относительно интенсивности фонового космического излучения, достигнув своего рода равновесия в каждой своей части. Время передачи такой информации в каждый уголок Вселенной, переносясь со скоростью света (максимально возможная в природе скорость), превышает возраст самой Вселенной. Здесь имеется явное противоречие. А вот второй вопрос относится к средней плотности материи во Вселенной. И действительно, по общей теории относительности предполагается, что, если плотность оказывается ниже определенного критического значения, Вселенная обречена на расширение и, даже если процесс будет сдерживаться гравитационной силой, она только замедлит процесс увеличения ее размеров. Если плотность окажется выше критического значения, Вселенная подойдет к Большому сжатию, гигантскому финальному коллапсу. Имеются данные о том, что плотность современной Вселенной очень близка к критическому значению. Но существует ряд теорий, утверждающих, что небольшое начальное отклонение от этого значения впоследствии увеличивается, и сегодня его легко наблюдать. Для подтверж-

дения полученных на сегодняшний день сведений следует предположить, что изначальная плотность отклоняется от критической на 10^{-40} , то есть крайне незначительно.

■ «Вздутие»

Чтобы объяснить эту непоследовательность, физик-теоретик Алан Гут в начале 1980-х годов предложил так называемую теорию расширения Вселенной «вздутием» (inflation). На ее основе была выдвинута гипотеза, что у Вселенной вскоре после рождения был кратчайший период, в который расширение в отличие от сегодняшнего темпа шло гораздо быстрее: размеры Вселенной увеличивались экспоненциально. Процесс «вздутия», согласно Гуту, начался приблизительно на 10^{-34} секунде после Большого взрыва и продолжался до 10^{-32} секунды, удваивая размеры Вселенной каждые 10^{-34} секунды. В этот кратчайший отрезок времени Вселенная увеличила свои размеры примерно в 10^{30} раз. Это быстрое расширение привело к мгновенному «растягиванию» и неоднородности структуры новорожденной Вселенной. Возможно, что до «вздутия» фотоны насквозь пересекали Вселенную, поддерживая ее однородность. Это могло бы объяснить, почему фоновое космическое излучение бывает столь однородным. В результате «вздутия» плотность Вселенной могла бы достичь критического значения.

2.2. Галактики

Галактики – это гигантские звездные системы, связанные общим гравитационным взаимодействием. Эти звездные скопления – основные «кирпичики», из которых состоит Вселенная. Большое количество независимых друг от дру-

га галактик было выявлено лишь в относительно недавние времена, то есть примерно в 1930-е годы. До этого не было ясности, что это за размытые объекты, наблюдаемые в телескоп, в самых разных концах неба, находятся ли они близко (и, следовательно, принадлежат к нашей Галактике, Млечному Пути) или очень далеко. Поэтому тогда предпочитали говорить не о галактиках, а о туманностях.

■ *Классификации галактик*

У галактик достаточно разные формы и размеры. У средней Галактики, например Млечного Пути, общая масса – приблизительно 100 млрд солнечных масс. Но есть и карликовые галактики, содержащие 100 000 звезд, в той или иной степени представляющие собой шаровые скопления, и гигантские галактики вроде М87 в созвездии Девы с массой 2000–3000 млрд солнечных масс.

Классификация галактик основана на их морфологии, то есть форме, наблюдаемой в телескоп. Такая классификация была введена Эдвином Хабблом в 1925 году, а затем развита Жераром де Вокулером и Сиднеем ван ден Бергом. По классификации Хаббла, которой пользуются и сегодня, галактики делятся на три больших класса: эллиптические, спиральные и неправильные.

В 1936 году Хаббл ввел новый класс галактик – линзообразные – промежуточный между эллиптическими и спиральными.

Спиральные галактики

Характеризуются структурой в виде плоского тонкого диска, в котором локализована большая часть звезд и можно различить ветви спирали, которые завертывают центральную светящуюся зону, так называемую выпуклость.

В зависимости от степени «завернутости» ветви спирали подразделяются на три категории: сильно изогнутые, широкие и не доходящие до ядра и с промежуточными характеристиками. Отдельную группу составляют спиральные галактики с перемычкой, характеризующиеся светящимся заграждением из звезд, пересекающим ядро, и похоже, что именно оттуда «растут» спирали. Они тоже подразделяются на три категории в зависимости от того, прямые или разомкнутые у них ветви. В целом галактики с обычными и пересеченными спиралями составляют 61% от общего количества.

Спиральные галактики обычно состоят из молодых звезд звездного населения I в области диска, обычно локализованного среди ветвей, где, очевидно, идет активное образование звезд. Старые звезды населения II находятся в области ядра, но в первую очередь в гало, то есть в верхних слоях. Кроме того, в спиралях много межзвездной материи и газа.

Линзообразные галактики

Линзообразные галактики имеют такое название потому, что когда на них смотришь сбоку, они похожи на две выпуклые линзы, наложенные друг на друга. У этих галактик может быть преграждение (8BO), а может и не быть (80). Как и у спиралей, у них есть центральная светящаяся выпуклость, слегка сплюснутая, и диск меньших размеров. Такой тип галактик составляет 22% от общего количества.

Эллиптические галактики

В эллиптических галактиках (E) звезды распределены в основном симметрично по сфере, что делает их похожими на шаровые скопления. Эллиптические галактики подразделяются на группы, которым присвоены номера от 0 до 7. Практически сферическим дан номер E0, а с удлинённой

формой, напоминающей форму «сигары», получили обозначение Е7. Тем не менее сплюсненность зависит от угла зрения, под которым ведется наблюдение: Галактика ЕО, которая кажется идеально сферической, может оказаться удлинённой, если смотреть на нее от полярной оси.

В эллиптических галактиках в основном старые звезды звездного населения II, самые яркие – красные гиганты, которые окрашивают в этот цвет всю Галактику в целом. В этих галактиках межзвездная материя практически отсутствует, и поэтому в них не идет образование новых звезд. У эллиптических галактик масса сильно различается: от менее 1 млн солнечной массы (карликовые эллиптические галактики) до нескольких тысяч миллиардов (гигантские эллиптические галактики). Эллиптические галактики составляют во Вселенной 13%.

Неправильные галактики

Остальные галактики, которые можно наблюдать во Вселенной (около 4%), классифицируются как неправильные (I г), потому что трудно определить их форму или подобрать шаблон их описания. Их масса очень мала (сотая доля массы Млечного Пути), они обычно являются спутниками более крупных галактик. Типичный пример – Магеллановы Облака, являющиеся галактиками-спутниками нашей Галактики. В неправильных галактиках много межзвездной материи и молодых звезд.

■ Связь между классификацией и эволюцией

Некоторое время астрономы думали, что морфологическая последовательность галактик имеет и эволюционное значение. Такое убеждение было построено, очевидно, на постепенном переходе эллиптических галактик в спираль-

ные, что следовало из классификации Хаббла. По сути, считалось, что галактики рождаются эллиптическими, а затем медленно меняют свою морфологию, пока не становятся неправильного типа.

Согласно современным теориям эволюции этот взгляд полностью устарел. Форма галактик связана с другими факторами, в частности с количеством образующихся в их недрах звезд. Если по каким-то причинам звезды образуются за короткий промежуток времени и одновременно, потребив большую часть газа и межзвездной пыли, Галактика эволюционирует в эллиптическую. И, наоборот, если образование звезд медленное и продолжается еще и сегодня, Галактика становится спиральной. Другой фактор, отчасти связанный с предыдущим, который может повлиять на форму Галактики, – это тесное взаимодействие на грани столкновения или слияния.

■ *Взаимодействующие галактики*

При телескопических наблюдениях иногда можно увидеть близко расположенные друг к другу галактики, которые, похоже, гравитационно взаимодействуют между собой.

Различие между эллиптическими и спиральными сегодня объясняется еще и теорией слияния галактик. Согласно этой гипотезе, некоторые эллиптические галактики, особенно самые большие, образовались в результате слияния двух и более галактик, даже спирального типа. И, действительно, воспроизведение на компьютере такой модели подтверждает, что, когда сливается несколько галактик, результат всегда один – образование гигантской эллиптической Галактики. Реже, как показали некоторые наблюдения, происходит обратный процесс. Материя, экстрагированная эллиптической Галактикой с помощью гравитационных сил

во время взаимодействия с другой Галактикой, образует структуру, похожую на ветви спирали, обычно направленные в сторону меньшей Галактики.

Такие внезапные события, как слишком сильное сближение или проход одной Галактики через другую, приводят к тому, что в одной или обеих возникает приливно-отливная волна, похожая на концентрические круги от брошенного в пруд камня. Если волна доходит до зоны, богатой газом, например диска спиральной Галактики, внезапно происходит одновременное сильное сжатие газа. Из этого вещества тут же образуется новая звезда, которая горит недолго вместо обычных миллиардов лет. Результатом внезапного взаимодействия поэтому является во многих случаях преждевременное старение Галактики, которая израсходовала весь или почти весь запас газа в этом последнем ярком небесном фейерверке.

■ Происхождение галактик

Теория Большого взрыва, как уже говорилось, допускает развитие Вселенной во временной эволюции. Наблюдения космического фонового излучения показывают, что при



Рис. 2.6. M81 – SB, похожая на Млечный Путь

рождении, когда еще не существовало ни звезд, ни галактик, Вселенная была однородной. Механизмы, которые привели к образованию галактик, еще известны не полностью, тем не менее было предложено несколько гипотез.

В первородной Вселенной происходили небольшие колебания плотности, связанные с зарождающимся движением частиц материи и излучением, идущим из-за высочайших температур со скоростью света. То есть проявилась бесконечная неоднородность, обнаруженная недавно у космического фонового излучения. При колебаниях плотности, возникающих случайно и непрерывно, Галактика становится достаточно большой и продолжает вбирать другую материю и расширяться, и этот процесс становится постоянным.

■ *Противоречивые модели*

Согласно иерархической теории образования галактик, структуры, которые поначалу образовались вокруг неоднородной материи, были примерно в 1 млн раз больше солнечной массы, то есть более или менее равны массам шаровых скоплений. Постепенно они сливались вместе, образуя более крупные совокупности, пока не доходили до массы сотни миллиардов звезд, то есть становились теми галактиками, которые нам сегодня известны.

Следующий шаг – объединение галактик в группы – скопления и сверхскопления галактик. Термин «иерархическая» свидетельствует о том, что из более мелких структур образовывались более крупные, которые сегодня наполняют Вселенную. Существует противоположный взгляд: более мелкие образовывались из более крупных. Во главе школы, разрабатывавшей эту теорию, стоял советский астроном Зельдович. Его теория эволюции Вселенной предпола-

гала первоначальное образование сверхскоплений галактик. Массы этой совокупности существовали долгое время и поэтому испытывали на себе сильное расширение пространства из-за первоначального (Большого) взрыва. Сила притяжения «растягивала» в одном направлении эти огромные структуры, образуя «листы» плотной материи, в отличие от больших сфер шаровых скоплений. Затем только что образовавшийся «лист» материи приобретает другие размеры, образуя волоконца. По прошествии времени эти волоконца фрагментируются на более мелкие совокупности, порождая шаровые скопления. Только в конце процесса отдельные галактики возникают из газового облака, делая видимым образование ярких звезд.

Только в последние 20 лет удалось построить базы наблюдения, чтобы проверить, какая из этих теорий убедительнее. И только в последние годы удалось произвести точные наблюдения самых удаленных, а потому молодых галактик с помощью больших наземных телескопов и работающего с несравнимой точностью космического телескопа «Хаббл».

То, что эти галактики, которые находятся на расстоянии, соответствующем лишь 2 млрд лет после Большого взрыва, оказались эллиптическими, во всем похожими на те, что мы видим вблизи, заставляет склониться к первой гипотезе об иерархической структуре Вселенной.

2.3. Эволюция звезд

Вся жизнь звезды проходит под воздействием двух сил: гравитации, пытающейся заставить звезду коллапсировать под влиянием собственной массы, и энергии, возникающей

во время протекающей в центре звезды ядерной реакции. При образовании звезды превалирует сила гравитации. Ядро раскаляется, пока температура не достигнет 10–20 млн градусов, достаточных для начала ядерной реакции. В течение продолжительного периода эти силы находятся в равновесии и звезда остается стабильной. Когда ядерное горючее начинает заканчиваться, светило становится нестабильным и переходит в заключительные фазы своей эволюции с преобладанием то гравитации, то расширения. То, как протекает этот этап, зависит от разных факторов, характерных для звезды: температуры, плотности, химического состава. Но определяющим фактором является масса, в зависимости от которой в дальнейшем происходит взрыв с образованием сверхновой, трансформация в белого карлика, нейтронную звезду или сразу в черную дыру.

■ *Звезды и планеты*

Согласно теоретическим исследованиям, только объекты, превышающие массу Юпитера в 80 раз, становятся настоящими звездами. Объекты с маленькой массой (менее чем в 17 раз превышающие массу Юпитера) обречены на то, чтобы стать планетами. Между этими двумя вышеописанными типами с промежуточной массой встречаются «странные» объекты, чтобы считаться планетами, они слишком большие, но недостаточно велики для того, чтобы внутри них возникли ядерные реакции, характерные для звезд, и потому — слишком холодные. Речь идет о коричневых карликах, темных и трудноразличимых объектах, иногда сразу превращающихся в очень большие планеты. Существование подобных объектов удалось доказать эмпирически только в последнее время с помощью космического телескопа «Хаббл».

■ Рождение звезды

Как известно, звезды образуются из межзвездных газовых облаков, находящихся в большинстве своем в галактическом диске. Тем не менее детально процесс образования звезды осмыслен еще не до конца. В частности, еще неясно, какие явления могут приводить к концентрации газа в облаке, после которой начинается образование новой звезды. Один из самых интересных ответов на этот вопрос, предложенных астрономами, предполагает взрыв сверхновой недалеко от облака. Действительно, взрыв порождает ударные волны, которые сжимают газ, что приводит к необходимой его концентрации в самой плотной области облака.

С увеличением концентрации температура в центре облака поднимается и протозвезда становится источником инфракрасного излучения. Когда температура становится достаточно высокой, водород начинает гореть. Процесс уплотнения заканчивается, а звезда на диаграмме Герцшпрунга-Ресселла оказывается на главной последовательности.

С этого момента звезда на очень продолжительный период стабилизируется и проводит в этом состоянии около 90% своей жизни, в зависимости от массы. Звезда солнечной массы остается на главной последовательности около 10 млрд лет; звезда на порядок большей массы – лишь 300 млн лет.

■ Эволюция звезд с малой массой

Пройдя стационарный период, который соответствует фазе главной последовательности, звезда начинает терять свою стабильность и дальнейшая судьба у нее может быть различной.

Рассмотрим случай звезды маленькой массы, то есть имеющей массу в 4–5 раз меньше солнечной. Ее особенность такова: в самых глубоких слоях отсутствует конвек-

ция, то есть материя, из которой она состоит, не столь активна, как это, напротив, имеет место у звезд большой массы. Это означает, что, когда водород в ядре начинает иссякать, реакция не перемещается к более верхним слоям, а продолжает происходить вокруг ядра, где водород очень медленно превращается в гелий. Однако ядро гелия раскаляется, верхние слои звезды упорядочиваются, перестраивая свою структуру, а светило на диаграмме Герцшпрунга-Ресселла медленно покидает главную последовательность. Плотность материи в центре звезды увеличивается, а вещество в ядре вырождается, то есть приобретает особую консистенцию, отличную от консистенции обычного вещества.

Звезда на диаграмме Герцшпрунга-Ресселла смещается вправо, а затем вверх, двигаясь в область красных гигантов. Ее размеры значительно увеличиваются, а температура внешних слоев уменьшается благодаря эффекту расширения.

А вот температура ядра снижается, поэтому ядерная реакция уже не может идти из-за того, что температура недостаточна для синтеза гелия. Подобный синтез сопровождается так называемой вспышкой гелия. Звезда на диаграмме Герцшпрунга-Ресселла продолжает перемещаться вправо,

в то место, где на оси абсцисс диаграммы находятся шаровые скопления.

В углеродном ядре температура растет до момента, когда, если звезда обладает достаточной массой, углерод начинает гореть, а затем взрыва-

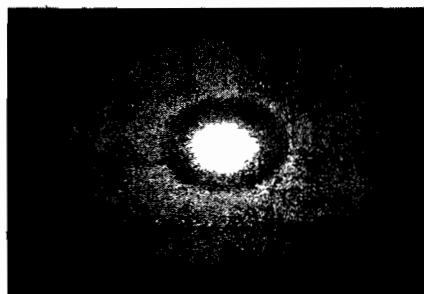


Рис. 2.7. *Белый карлик*

ется. Происходит это или нет, но во время последней стадии материя поверхности звезды теряет массу.

Эта потеря может происходить на разных фазах или одновременно, когда верхние слои звезды стремятся наружу, образуя большой шар. В последнем случае образуется планетарная туманность, то есть сферическая оболочка материи, распространяющаяся в космос.

Ядро звезды, если при последующих сжатиях и расширениях оно испускает количество материи, превышающее 1,4 солнечной массы, становится белым карликом, из чего можно сделать вывод о ее медленном угасании. Считается, что поскольку охлаждение идет очень медленно, с рождения Вселенной ни один белый карлик еще не дошел до термической смерти.

■ *Эволюция звезд с большой массой*

У звезд с массой, превышающей солнечную в 5 раз, фазы сжатия и расширения повторяются несколько раз, всегда приводя к образованию тяжелых химических элементов. Во время этих нестабильных фаз звезда претерпевает последовательные изменения видимой звездной величины. В этих случаях говорят о переменной звезде. Цефевды пред-



Рис. 2.8.

*Звезда – прародительница сверхновой
в Большом Магеллановом Облаке*

ставляют собой классический пример звезд, проходящих такие стадии эволюции. Звезда приобретает каплевидную концентрическую структуру, внутри происходят последние фазы ядерных реакций. В частности, более легкие элементы сгорают в более высоких слоях, где температура ниже, тогда как более тяжелые пылают в центральной части ядра, где температура, напротив, имеет тенденцию к повышению. У звезд с массой, превышающей солнечную в 5–9 раз, сгорание углерода и кислорода может происходить практически мгновенно. Если масса звезды еще больше, в ядре синтезируются такие элементы, как магний, неон, сера и кремний. В чрезвычайных случаях термоядерный синтез продолжается до тех пор, пока ядро звезды почти целиком не преобразовывается в железо. В этот момент цепная реакция прекращается, потому что она не может идти одновременно с плавлением железа. Таким образом, оказывается, что звезда израсходовала все свои запасы ядерного топлива и начинает сжиматься.

Если масса звезды не превышает 10 солнечных масс, последние фазы оказываются нестабильными, в разных слоях идут спонтанные ядерные реакции, которые могут привести к вспышке сверхновой. Тем временем взаимная нейтронизация протонов и электронов звездного ядра приводит к тому, что ядро полностью начинает состоять из нейтронов. После взрыва поверхностные слои звезды разрушаются, а ядро быстро уплотняется, пока не становится несжимаемым. В этом случае сжатие звезды задерживается. Остатки вещества становятся нейтронной звездой, которая стремительно вращается вокруг собственной оси, и она начинает наблюдаться как пульсар, из-за взрыва перемещающийся по космосу со скоростью сотни километров в секунду. Если масса звезды еще больше, давление гравитационных сил настоль-

ко велико, что нейтроны ядра вынуждены «пакетироваться» до невообразимой плотности, пока вещество не потеряет свою сущность.

В этом случае речь идет о необратимом гравитационном коллапсе, что приводит к образованию черной дыры.

■ Белые карлики

Белые карлики представляют собой звезды с малой массой в последней стадии эволюции. Они входят в категорию коллапсирующих звезд, к которой принадлежат также нейтронные звезды и черные дыры. Первыми звездами, определенными в начале XX века как белые карлики, были 40-я Эридана В и Сириус В. Эти звезды имеют очень высокую температуру поверхности, но их светимость такая низкая, что это можно объяснить, только предположив, что их масса крайне мала. Сегодня известно несколько сотен белых карликов, которые, как считается, составляют около 10% звездного населения, но из-за низкой светимости эти объекты трудно идентифицировать.

Происхождение

Так уже говорилось, белые карлики образуются тогда, когда звезды малой массы подходят к заключительному циклу термоядерных реакций. Тогда ядро звезды коллапсирует под собственным весом, образуя сверхплотный объект из выродившейся материи, состоящей из «упакованных» вместе атомных ядер и электронов. Гравитационный коллапс в белых карликах не бесконечен, как в черных дырах, его останавливает квантовый эффект, связанный с давлением, оказываемым электронами. Но это происходит только при условии, что масса звезды не превышает, как показал индийский физик Субрахманьян Чандрасекар в 1931 году,

1,4 солнечной массы («предел Чандрасекара»). Если же масса звезды больше, она неизбежно станет нейтронной звездой или черной дырой.

Образовавшись, белый карлик находится в определенной области диаграммы Герцшпрунга-Ресселла, внизу слева. Он обречен погаснуть, медленно остывая и превращаясь в черного карлика. Но похоже, что процесс идет настолько медленно с начала истории Вселенной до сегодняшнего дня, что еще не наступило время для образования хотя бы одного черного карлика.

Характеристики

Масса белых карликов сопоставима с массой Солнца, но их радиус равен радиусу Земли, около 6000 км. Поэтому их плотность столь высока: 1 см^3 материи белого карлика весит около 1 т.

Эти звезды характеризуются средней температурой поверхности 20 000–30 000 К. Поэтому их называют не просто карликами, а белыми карликами, тогда как звезды типа Солнца (около 6000 К) называют желтыми. Но интервал температур поверхности этих объектов очень широкий и составляет приблизительно 4000–100 000 К. Температура 4000 К присуща красным звездам, несмотря на их название. Кроме того, у них очень разные спектры: в основном они состоят из широких полос абсорбции, но в некоторых случаях последние вообще отсутствуют. В спектре некоторых белых карликов есть только полосы водорода, у других – только гелия и металлов.

Несмотря на то, что у белых карликов высокая температура поверхности, их малые размеры приводят к тому, что излучение света очень невысокое: 12–16-я звездная величина.

■ Новые звезды

Новые звезды имеют очень высокую степень переменности. Происхождение термина «новые» относится к античности, когда из-за внезапного увеличения блеска их воспринимали родившимися из ничего.

Происхождение

Новые – это бинарные системы, состоящие из белого карлика и звезды солнечного типа главной последовательности или последовательности красных гигантов. Две звезды системы следуют по очень узкой орбите, период которой составляет несколько часов. Поэтому расстояние между ними минимально, что приводит их к взаимодействию. Когда второй компонент бинарной системы в ходе своей эволюции расширяется, переходя определенную границу (так называемый предел Роша), часть его материи притягивается белым карликом, образуя поверхность Роша. Материя постепенно собирается на поверхности очень горячей звезды, температура и давление которой таковы, что существует вероятность начала взрывной ядерной реакции, внезапно увеличивающей блеск системы. С этой точки зрения новые похожи на сверхновые, хотя в целом речь идет о совершенно разных явлениях, а выделяемая при взрыве энергия ниже в миллион раз.

Классификация

В зависимости от графика изменения блеска различают классические, карликовые и периодически повторяющиеся новые. Классические достигают максимальной светимости за несколько часов. За этот период времени новая увеличивает свою звездную величину в среднем почти на 12 единиц. При сопоставлении графиков зависимости блеска от време-

ни различных новых было замечено, что подъем к максимуму идет медленнее.

Светимость новой остается максимальной на период от нескольких суток до нескольких месяцев, после чего она начинает снижаться: сначала быстро, потом медленнее, чтобы вернуться к уровню изначальной бинарной системы в течение нескольких лет. Максимальная абсолютная звездная величина светимости составляет 6 единиц для более медленных и 9 – для более быстрых новых. Поэтому их можно наблюдать в других галактиках и до определенной степени они могут быть ориентирами для измерения удаленности.

Карликовые новые – это подкласс, прототипом которого является звезда в Близнеце. Оптические вспышки новых этого типа невелики – около 5-й звездной величины, и они повторяются с более или менее регулярными интервалами времени: в среднем раз в 120 суток, бывают интервалы и в несколько лет. Оптические вспышки происходят быстро, обычно в течение нескольких суток или нескольких часов, после чего блеск светила в течение нескольких недель падает до исходного уровня. Периодически повторяющиеся новые представляют собой своего рода промежуточный вариант между классическими и карликовыми новыми. Как ясно из их названия, оптические вспышки повторяются; в этом они похожи на карликовые новые, с той только разницей, что интервал времени между вспышками составляет несколько десятков лет. Во всяком случае увеличение светимости заметнее (около 8 звездных величин), что делает их схожими с классическими новыми.

Самая большая катастрофа, происходящая со звездой, – это вспышка сверхновой, возникающая на заключительной стадии эволюции звезд большой массы – гигантов и сверхгигантов. Во время мощнейших взрывов за несколько секунд



Рис. 2.9. Двойное кольцо. Газопылевая материя, испущенная во время взрыва сверхновой

высвобождается количество энергии, сопоставимое с энергией, испущенной звездой за всю ее жизнь. Хотя природа сверхновых оставалась многие века непознанной, это одни из самых наблюдаемых в предшествующие эпохи небесных объектов. И, действительно, многие из них настолько яркие, что их можно хорошо видеть невооруженным глазом, а в некоторых случаях – даже среди бела дня. Первое «официальное» свидетельство о сверхновых относится к 185 году н. э. Исторически значимые сверхновые наблюдали Тихо Браге в 1572 году и Кеплер в 1604 году. Кроме того, сверхновую 1054 года наблюдали древние китайские и японские астрономы. Сегодня она известна как туманность М1.

Происхождение сверхновых

Механизмы взрывов сверхновых различаются в зависимости от того, принадлежит ли звезда бинарной системе или она юстированная. В первом случае взрываются лишь второстепенные звезды системы белый карлик по такой же схеме, как и в случае с новой. Белый карлик вступает в гравитационный коллапс, что приводит к взрыву.

тационное взаимодействие со вторым звездным компонентом, притягивая материю с его поверхности. Захваченная таким образом материя падает на поверхность белого карлика, раскаляется, и начинается ядерная реакция, которая приводит к мгновенному разрушению бинарной системы.

А вот во втором случае звезда самовзрывается. Как известно, жизнь любой звезды определяется шатким равновесием между центростремительной гравитационной силой составляющей ее материи и центробежной силой излучения, возникающего в ходе ядерных реакций, происходящих в ее недрах. После того как пройдены все возможные циклы ядерных реакций, это хрупкое равновесие нарушается. В этот момент внезапно усиливается гравитационная сила и звезда начинает быстро сжиматься. Последующий резкий разогрев приводит к началу ядерной реакции в ядре звезды, в результате которой высвобождается энергия, приводящая к взрыву и исчезновению звезды.

Характеристики сверхновых

Сверхновые – особый случай переменных звезд, у которых переменность блеска одинаковая, т. к. она связана с разрушением звезды. Но кривая изменения блеска выстраивается и для сверхновых, как и для других переменных звезд. Хотя эти графики для разных сверхновых заметно различаются, существуют легко распознаваемые общие черты. Во-первых, у типичной кривой блеска имеется характерный крутой подъем, достигающий до максимального значения блеска за несколько суток. Сверхновая имеет максимум блеска в течение приблизительно 10 сут., после чего он сначала прерывисто, затем почти равномерно спадает. Кстати, интерпретируя кривую изменения блеска сверхновой, можно установить динамику взрыва и изучить эволюцию

звезды. Часть кривой между началом подъема и точкой максимального блеска совпадает со взрывом звезды, а последующее понижение графика соответствует расширению и охлаждению выбросов газа из взорвавшейся звезды, так называемого остатка сверхновой.

Классификация сверхновых

Сверхновые делятся на два основных типа. Сверхновые типа I (SN I) произошли, скорее всего, от старых звезд, представлявших собой бинарные системы. Их графики изменения блеска схожи: с быстрым нарастанием блеска, по виду которого следует снижение приблизительно на 3 звездные величины в течение месяца. Кроме того, в их спектре отсутствует полоса водорода. Сверхновые типа II (8M II), напротив, образуются из молодых звезд с массой порядка десятка солнечных масс; их постоянно наблюдают в спиральных и неправильных галактиках. Сверхновые типа II менее ярки, форма кривой блеска бывает различной. В их спектрах присутствуют водородные полосы.

Значение сверхновых

По теоретическим выкладкам в нашей Галактике в среднем должна взрываться одна звезда примерно раз в 30 лет, тем не менее последний взрыв наблюдался в 1604 году. Вероятно, некоторые сверхновые, взорвавшиеся в Галактике, находятся по другую сторону галактического ядра и поэтому недоступны для наблюдения. Самая последняя сверхновая SM 1987A наблюдалась в 1987 году в Большом Магеллановом Облаке.

Похоже, сверхновые играют очень важную роль в звездообразовании, потому что во время взрыва образуется ударная волна, способствующая уплотнению звездообразующих туманностей. Кроме того, они выбрасывают в кос-

мос составляющую их материю, что меняет состав межзвездной среды, обогащая ее металлами.

И, наконец, во время взрыва не происходит полного разрушения самой звезды. Из сверхновых образуются нейтронные звезды и пульсары, а также – черные дыры.

Взрывы сверхновых – это самые катастрофические явления в жизни звезд. Независимо от физических процессов, приведших к взрыву, эволюция исторгнутой в космос звездной материи, то есть остатка сверхновой, проходит фазы, сходные с эволюцией звезды. Из-за расширения самые глубокие области постепенно становятся более разреженными, а наружные слои «заметают» окружающую межзвездную среду, вбирая газ и увеличивая собственную плотность. На этой первой фазе количество собранной материи значительно меньше исторгнутой в космос взрывом сверхновой, а расширение внешней оболочки происходит приблизительно с одинаковой скоростью. Это фаза свободного расширения. Но примерно через 200 лет, когда внешняя оболочка остатка сверхновой расширится до радиуса в несколько парсеков, расширение собранной межзвездной материи замедляется. И тогда образуется фронт столкновения межзвездной среды и расширяющейся оболочки. Давление и плотность в этой области растут, поднимая температуру газа туманности до нескольких миллионов градусов, что приводит к ионизации атомов. Расширение остатков сверхновой входит, таким образом, во вторую фазу так называемого адиабатического расширения, продолжающуюся приблизительно 1000 лет. В конце концов остатки сверхновой входят в радиоактивную фазу, длящуюся примерно 100 000 лет. В этой фазе остатки сверхновых растрачивают всю свою внутреннюю энергию на различные физические процессы.

■ Радиои兹лучение

Большая часть остатков сверхновых, известных на сегодняшний день, открыта благодаря их мощному радиои兹лучению. В целом в нашей Галактике было открыто около 150 остатков сверхновых и еще порядка 30 – в Магеллановых Облаках. Радиои兹лучение остатка сверхновой возникает из-за синхротронного и兹лучения, которое вырабатывается летящими в магнитном поле со скоростью, близкой к скорости света, проникшими в туманность электронами.

Многие остатки сверхновых, например Кассиопеи А (самый мощный источник радиои兹лучения в этом созвездии), носят имена, данные им радиоастрономами. Но большей части присвоены каталожные номера вроде O263.9–3.3, где O означает «Грин» (фамилия астронома, автора каталога), а цифры – галактические координаты остатка сверхновой.

■ Рентгеновское и兹лучение

Первым известным источником рентгеновского и兹лучения, который был определен как астрофизический объект, была Крабовидная туманность – знаменитый остаток сверхновой, взорвавшейся в 1054 году в созвездии Тельца.

Рентгеновское и兹лучение остатка сверхновой в основном происходит в фазе свободного расширения и фазе адиабатического расширения. Рентгеновское и兹лучение является следствием воздействия множества физических процессов, один из них возникает при взаимодействии в туманности ионизированных атомов и электронов. Когда отрицательно заряженный электрон сближается с положительно заряженным ионом, он отклоняется со своей траектории. Изменение траектории приводит к ускорению электрона, и избыток кинетической энергии выделяется в виде рентгеновского и兹лучения. Потеря энергии приводит, в свою очередь, к

замедлению электрона. Образовавшееся таким образом излучение называется тормозным (от немецкого *bremmstrahlung*, *bremm* – тормозной и *strahlung* – излучение).

Первые успешные рентгеновские наблюдения остатков сверхновых были проведены Эйнштейновской обсерваторией НАСА в ноябре 1978-го – апреле 1981 года. В обсерватории внимательно изучали структуру рентгеновских лучей остатков сверхновой и реконструировали карту распределения в них горячего газа. Химический состав туманности был установлен по полосам рентгеновского излучения кремния, серы и аргона.

■ **Возраст остатков сверхновой**

Возраст остатков сверхновой легко определить, когда известна дата взрыва звезды. В других случаях сделать это сложнее. Если повезет и в остатках сверхновой ютится пульсар, можно узнать возраст обоих объектов, замерив период пульсации пульсара и его изменение во времени. Во всех остальных случаях основываются на сопоставлении с остатками сверхновых, возраст которых определен. В целом остатки сверхновых – относительно молодые объекты, чей возраст насчитывает от нескольких сотен до нескольких тысячелетий. И, действительно, по прошествии времени они деформируются из-за взаимодействия с межзвездной средой, в которой они распространяются, пока их разреженность не приводит к тому, что остатков сверхновых больше не видно.

Классификация

Остатки сверхновых подразделяют на три большие группы. Остатки сверхновых с оболочкой – это самые молодые объекты, они имеют почти правильную сферическую фор-

му, возникающую в начале радиального расширения туманного вещества с большей плотностью по краям, чем в центре. Вторая группа представлена так называемыми *плерионами*. Это молодые остатки сверхновых, в которых, как, например, в Крабовидной туманности, имеется пульсар. В отличие от остатков сверхновой с оболочкой, на рентгеновских снимках виден повышенный блеск в центральных областях из-за наличия зоны диффузного излучения (синхротронная туманность), возможно, из-за пульсара. Последняя группа – нетипичные остатки сверхновых, это остатки сверхновых с оболочками, морфология которых сильно изменена из-за взаимодействия с межзвездной средой и наличия молекулярных облаков.

Название «пульсар» происходит от сокращения английского выражения «pulsating star» (пульсирующая звезда). *Пульсары* – это нейтронные звезды с быстрым вращением. Их главная особенность – не постоянное излучение радиации, а в высшей степени регулярные, с короткой продолжительностью (от нескольких десятых миллисекунды до нескольких десятых или сотых секунды) всплески радиоволн.

■ Пульсары. Открытие

Первый пульсар, известный как PSR1919+21, был открыт в 1967 году Джоселином Беллом и Энтони Хьюишем из института радиоастрономии Кембриджского университета. При помощи радиотелескопа Белл обнаружил неизвестный сигнал, пришедший из космической области поблизости от плоскости Галактики. Любопытно, что сигнал был прерывистым, то есть возникал и исчезал с равными временными интервалами чуть больше секунды.

За короткое время были открыты другие аналогичные объекты. Поначалу, из-за регулярной периодичности сиг-

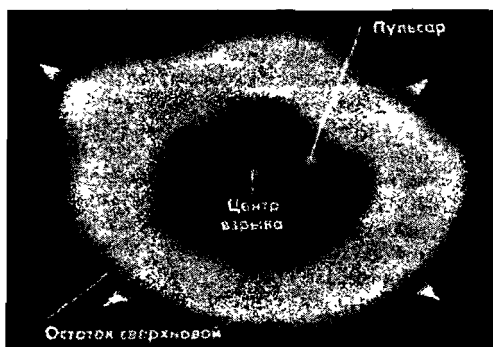


Рис. 2.10. После взрыва сверхновой рождается пульсар

налов, считалось, что они приходят от внеземной разумной цивилизации. Лишь позже была понята истинная природа пульсаров.

Излучение пульсара интенсивнее вблизи магнитных полей. Если ось магнитного поля нейтронной звезды не совпадает с осью вращения звезды, магнитные поля совершают круговое движение вокруг оси вращения. Таким образом, пучок радиоволн уходит в космос и доходит до Земли, периодически прерываясь, с интервалами, равными периоду вращения нейтронной звезды, подобно тому, как маяк отбрасывает свет. Поэтому явление и называется *эффектом маяка*. Электромагнитное излучение пульсара создается за счет вращательной энергии нейтронной звезды. Потеря вращательной энергии приводит к увеличению периода вращения, то есть к замедлению вращения звезды, что подтверждено наблюдениями. Поэтому чем старше пульсар, тем длиннее период его пульсации.

Радиоизлучение пульсара бесконечно. Через несколько десятков миллионов лет теряется большая часть его вращательной энергии, а излучение ослабевает и в какой-то

момент перестает быть доступным для наблюдения. Но в некоторых случаях можно наблюдать гораздо более старые нейтронные звезды, проявляющие такую же активность, как и радиопульсар, с чрезвычайно короткими периодами вращения, порядка нескольких тысячных долей секунды. Именно поэтому их называют *сверхбыстрыми пульсарами*. В отличие от большей части наблюдаемых пульсаров, они не являются отдельными объектами, а входят в двойные системы. При таких условиях возможно, что нейтронная звезда взаимодействует со второй звездой, отбирая у нее материю, что приводит к ее ускорению, в противоположность тому, как это происходит у изолированных пульсаров.

С 1967 года по сегодняшний день было открыто около 760 пульсаров. Практически все они находятся в Галактике.

■ *Нейтронные звезды. Характеристики*

Нейтронные звезды находятся на завершающем этапе процесса эволюции звезды, их масса в несколько раз отличается от солнечной. У этих объектов, после того как закончились все возможные ядерные процессы, внезапно начинает доминировать гравитационная сила, и звезда начинает быстро сжиматься.

Следующий за этим внезапный разогрев приводит к ядерной реакции, вызывающей сильный взрыв, приводящий в исполнение смертный приговор звезде, — вспышку сверхновой.

Но после взрыва наружные слои звезды устремляются в космос. Ее ядро (если ее масса не превышает 2,5 солнечной массы) испытывает гравитационный коллапс, образуя звездное образование очень высокой плотности, а точнее — нейтронную звезду. Если масса ядра больше, возникает черная дыра. Плотность нейтронных звезд составляет порядка

10^{15} г/см³. Это означает, что 1 см³ материи нейтронной звезды весил бы на Земле около 1 млрд т. Внутри нейтронной звезды свободные электроны и протоны взаимно нейтрализуются, образуя нейтроны и нейтрино, что останавливает коллапс. Этот процесс *трансформации*, или *нейтронизации*, идет до тех пор, пока основная часть звездного ядра не будет состоять из нейтронов.

В результате гравитационного коллапса нейтронная звезда резко ускоряет вращение до периода в несколько десятков миллисекунд, который характерен для пульсаров.

Излучение

У обычных звезд световое излучение является результатом происходящих в их недрах ядерных реакций. В нейтронной звезде эти процессы уже не столь активны, и поэтому они перестают создавать световую энергию. Электромагнитное излучение нейтронных звезд, проявляющееся как пульсар, на самом деле берет начало не внутри звезды, а извне, в областях, близких к ее поверхности. Ведь у нейтронной звезды магнитное поле повышенной интенсивности – в миллионы раз сильнее, чем у Солнца, – которое распространяется в окружающем пространстве, создавая область влияния, так называемую *магнитосферу*. Нейтронная звезда втягивает в магнитосферу потоки электронов и позитронов, которые ускоряются из-за ее собственного вращения со скоростью, близкой к скорости света. Магнитное поле нейтронной звезды влияет на движение этих частиц, которые движутся по спирали вдоль силовых линий. Таким образом, они излучают часть своей кинетической энергии в виде электромагнитного, так называемого *синхротронного излучения*.

■ Черные дыры

По-видимому, *черные дыры* – это те объекты Вселенной, которые привлекают наибольшее внимание широкой общественности. Это звезды большой массы на конечной стадии жизни, которые создают такое сильное гравитационное поле, что абсолютно не могут отражать свет, поэтому для наблюдателя они кажутся черными.

Не излучая электромагнитной энергии какого-либо типа, они не могут наблюдаться непосредственно; поэтому настолько трудно подробно изучить их природу, что можно начать сомневаться в их существовании. Но в последние годы набралось определенное количество косвенных доказательств их наличия, позволивших с достаточной уверенностью определить место этих объектов среди прочих, населяющих Вселенную.

Гипотезы Лапласа

Первым человеком, предположившим существование черных дыр, был французский математик XVIII века Симон-Пьер де Лаплас, который, изучая теорию тяготения, выдвинул гипотезу, что могут существовать объекты, параболическая скорость для которых выше скорости света. *Параболическая скорость* – это минимальная скорость, необходимая для того, чтобы преодолеть гравитационное поле определенного объекта (например, для Земли она составит около 11 км/с), и зависит от плотности порождающего поле объекта. При предполагаемом Лапласом существовании достаточно плотного тела относительная параболическая скорость будет настолько высокой, что даже свет с его скоростью 300 000 км/с не сможет излучаться с его поверхности. Теория Лапласа в те далекие времена не была принята, и только в начале XX века с рождением и развити-

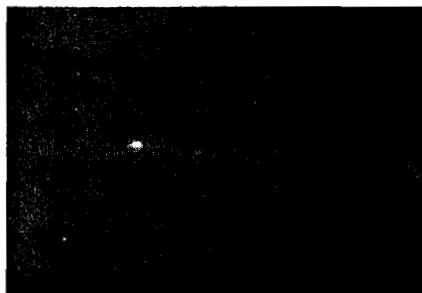


Рис.2.11. В ядре эллиптической галактики M87, возможно, рождается черная дыра

ем квантовой механики ученые разобрались с двойной природой света, который может вести себя как волна или как совокупность частиц. Эта концепция развивалась в свете общей теории относительности, сформулированной Альбертом Эйнштейном в 1915 году, а затем, примерно

через год, немецким физиком Карлом Шварцшильдом, заложившим математическое основание теории черных дыр.

Рождение черной дыры

Черные дыры, названные так в 1967 году американским астрофизиком Джоном Уилером, – не что иное, как завершающий период эволюции звезд большой массы, превышающей солнечную в 5 раз. Когда звезда израсходовала все запасы ядерного горючего, она подходит к последнему и окончательному сжатию. После этой фазы наступает смерть звезды. В этот момент ее судьба определяется исключительно собственной массой. Если она меньше солнечной, звезда про-

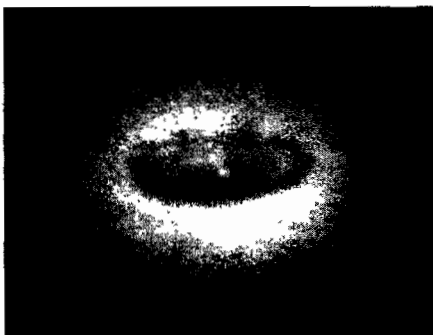


Рис. 2.12. Ядро Галактики M87, внутри которой, возможно, находится черная дыра

должна сжиматься, медленно угасая. И, наоборот, если масса звезды очень большая, она закончит свое существование огромным взрывом сверхновой, во время которого она может почти полностью исчезнуть в этом взрыве. В этом случае на ее ядро будет воздействовать гравитационный коллапс и образуется нейтронная звезда или черная дыра, объект с непредсказуемо большой плотностью и исчезающе маленькими размерами.

Черные дыры и относительность

Черные дыры представляют собой великолепную природную лабораторию, где ученые могут проверять самые смелые гипотезы теоретической физики. И действительно, в соответствии с общей теорией относительности действие законов физики может меняться под воздействием гравитационного поля. В частности, бег времени в гравитационных полях разной интенсивности имеет разные ритмы. Например, время течет медленнее рядом с черными дырами, чем рядом с Солнцем. Но черные дыры не только влияют на течение времени, но и искривляют окружающее пространство.

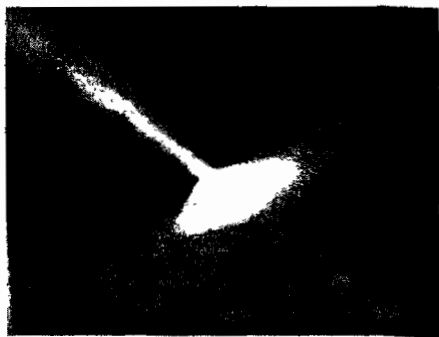


Рис. 2.13. Диск, растущий вокруг черной дыры звездных размеров

Что может обуздать черную дыру, неизвестно. Физические условия ее недр слишком отличаются от экспериментальных моделей и любых, самых невероятных, предположений.

Например, войдя в черную дыру, можно было бы выйти в другую черную дыру и, та-

ким образом, в другую точку пространства, а возможно, и времени. Вследствие этого некоторые убеждены, что черные дыры могут стать средством для путешествий в пространстве с мгновенной скоростью или даже для путешествий во времени. Естественно, в этих случаях достаточно сложно провести точную границу между научным шарлатанством и фантастикой. Вероятнее всего, объект, попавший в черную дыру, тут же будет раздавлен огромным гравитационным полем.

Типы черных дыр

По теории звездной эволюции большинство звезд – это звезды большой массы, поэтому можно ожидать, что черных дыр в нашей Галактике очень много. В частности, исходя из того, что звезды обычно рождаются парами или, выражаясь научным языком, бинарными системами, черные дыры – не одиночные объекты, а по большей части у них имеется второй компонент. Существует гипотеза, что рядом с черными дырами звездного типа, образовавшимися вслед-



Рис. 2.14. Зона X-образной формы образовалась из предполагаемой черной дыры величиной около 100 млн солнечных масс

ствие гравитационного коллапса крупной звезды, есть черные дыры гораздо больших размеров, образующиеся в ядрах галактик. Массы этих гигантских черных дыр составляют сотни миллионов солнечных масс, что равно примерно одному проценту общей массы Галактики.

Поэтому их обычно называют *сверхкрупными черными дырами*. По последним теориям во всех галактиках, в том числе и в Млечном Пути, есть гигантская черная дыра в центре; именно благодаря ее гравитационному действию мы и видим большую часть светящейся материи, сконцентрированную в центральных областях.

Исследования черных дыр

Исходя из того что черные дыры не могут наблюдаться непосредственно, для их поиска косвенным путем и изучения используют бинарные системы.

В этом случае у черной дыры есть звезда, второй компонент бинарной системы; оба объекта обращаются вокруг некоей воображаемой точки на соединяющей их центры прямой линии, то есть в центре массы всей бинарной системы. Когда для системы наступают критические условия, зависящие от орбит двух звезд и радиуса второго компонента бинарной системы, черная дыра вступает с последним в гравитационное взаимодействие, втягивая ее газ в свои поверхностные слои. Второй компонент начинает образовывать воронку вокруг черной дыры, образуя, таким образом, структуру, известную как «диск роста», после чего низвергается внутрь и бесследно исчезает. Во время этого процесса газ приобретает гравитационную энергию и из-за повышения кинетического движения молекул раскаляется, достигая температуры порядка 1 млн градусов. При столь высокой температуре черная дыра испускает не видимый свет, а очень мощное излучение — рентгеновские лучи. Поэтому наличие источника рентгеновских лучей является характерной чертой бинарных систем, в которые входит черная дыра. По этой причине поиск таких объектов получил развитие в недавнем прошлом, с появлением рентген-аст-

рономии. Приведенный критерий, как и прочие, находящиеся в распоряжении астрофизиков, позволяет только классифицировать представляющие интерес X-бинарные (излучающие рентгеновские лучи) системы. Тем не менее этому есть только косвенные подтверждения, но нет неопровержимых доказательств. Поэтому наиболее осторожные астрономы предпочитают говорить, что, возможно, эти объекты и являются черными дырами. Однако с определенной долей уверенности можно предположить наличие черных дыр в некоторых X-бинарных системах. Первая была найдена в Лебеде X-1 в начале 1970-х годов.

2.4. Галактические взрывы

■ Сверхмассивные черные дыры

Формирование галактики – очень сложный процесс. В нем участвуют гравитация, столкновение огромных газовых шаров. Задействована динамика звезд, химия смешивающихся газов.

Когда Вселенная была молодой, не было звезд и планет: был водоворот облаков водородного газа. Тайна заключается в том, как каждое облако превратилось в комплекс галактик, которые мы видим сегодня. Мы не знаем, как это происходило, как галактики получились из горячего ионизированного газа, который заполнял Вселенную.

До недавних пор сверхмассивные черные дыры были лишь теорией. Это гигантские черные дыры апокалиптических размеров: в 10^{15} раз массивнее обычной черной дыры. Они размером с Солнечную систему. Сверхмассивные черные дыры – это взбесившееся тяготение; это объект с таким плотным веществом, что его тяготение ненасытно. Ничто не может вырваться из черной дыры, даже свет. Все, что к ней

приближается – газ, звезды, целые солнечные системы, – засасывается в небытие. Она разрушает даже сам механизм Вселенной. Если представить себе мир как пространственно-временную сеть, то тяготение обычных звезд и планет создает вмятины в этой сети. Но огромное тяготение сверхмассивной черной дыры так разрушительно, что искривляет пространство-время за предел прочности.

В середине сверхмассивной черной дыры находится одна из самых таинственных вещей в физике – *сингулярность* – точка, где пространство-время и известные законы физики разваливаются.

Что происходит в центре сингулярности – полная тайна, и для ее открытия требуется новая физика, которой у нас пока нет. Некоторые считают, что можно пройти сквозь сингулярность и оказаться в другой части Вселенной. Теория же об этом пока ничего не знает.

Были попытки объяснить существование сверхмассивных черных дыр присутствием и влиянием очень редких галактик.

Активные галактики – это одни из самых ярких объектов Вселенной. У этих галактик яркое светящееся ядро с обширным выбросом энергии из центра. Мощное ядро горячего яркого газа называли *квазар*. Ученые считают, что вра-

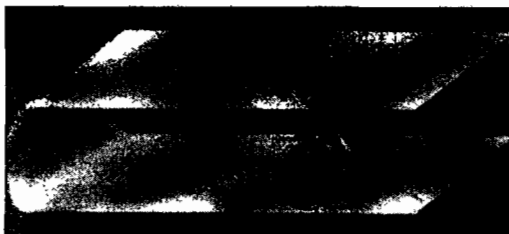


Рис. 2.15. Сингулярное состояние материи

щающаяся масса Галактики может обуславливаться гигантской черной дырой, поглощающей газ и звезды.

В 1983 г. на Паламарском телескопе были найдены пути к доказательству существования сверхмассивных черных дыр.

С этой целью исследовали неактивную Галактику – нашу соседку – Андромеду, подобную нашей. С помощью спектроскопа измерили спектрограммы света звезд, вращающихся вокруг центра.

Впрямую черную дыру увидеть нельзя, поэтому ведут поиск влияния ее гравитации. Ее огромное тяготение заставляет двигаться окрестные звезды со скоростью свыше 500 тысяч км/час. Измерив скорость движения этих звезд, можно доказать существование черной дыры в центре Галактики.

Спектроскоп показывает центр Галактики как белую полосу, а движение звезд вокруг ядра отслеживается темной вертикальной полосой.

Если звезды у галактического центра движутся медленно, темная линия не изменяется. При движении звезд с боль-

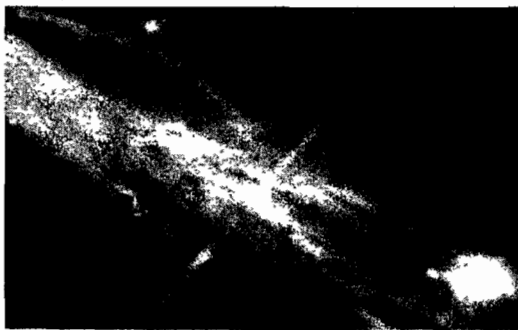


Рис. 2.16. Галактика Андромеда

шой скоростью темная линия резко смещается по отношению к линии центра.

В спектре Андромеды наблюдалось это явление, то есть в окрестности центра звезды двигались очень быстро – 500 тыс. км/час. Это говорит о наличии сверхмассивной черной дыры в Андромеде.

Были получены такие же результаты при наблюдении десятков других галактик. Эти результаты были подтверждены при наблюдении на космическом телескопе «Хаббл» в 1994 г.

На Гавайях наблюдатели обнаружили сверхмассивную черную дыру и в нашей Галактике. Наблюдения проводились с помощью телескопа, расположенного на горе Мано-Нокея на высоте 4270 м. Это самый большой оптический телескоп в мире. Его 10-метровое зеркало состоит из 36 сегментов полированного алюминизированного стекла. Этот телескоп может видеть очень слабые объекты и различать очень тонкие детали.

Анализ движения слабых звезд может выделить присутствие черной дыры. Были обнаружены в двух световых неделях от центра Галактики звезды, движущиеся со скорос-



Рис. 2.17. Самый большой оптический телескоп в мире



Рис. 2.18. Космический телескоп «Хаббл»

тью 100 км/сек. Это говорит о том, что в центре находится масса в $2 \cdot 10^6$ раз больше массы Солнца. То есть это сверхмассивная черная дыра.

Самая разрушительная сила во Вселенной таится в ядре нашей Галактики – Млечный Путь.

Как влияет черная дыра на окружающую Галактику?

Существует связь между массой черной дыры и массой окружающей ее Галактики. В зависимости от величины галактик черные дыры имеют массу 10^6 – 10^7 массы Солнца. Соотношение $M_{\text{яд}}/M_{\text{гал}}$ является постоянной величиной:

$$M_{\text{яд}} = 0,005 M_{\text{гал}}.$$

Звезды на краю Галактики столь далеки от черной дыры, что ее гравитация на них совершенно не действует.

Эти звезды чувствуют гравитацию всей Галактики, не важно, есть ли там черная дыра. То есть между звездами на краю Галактики и черной дырой нет никакой связи. Однако существует связь между массой черной дыры и скоростью движения звезд на периферии Галактики. Чем больше черная дыра, тем быстрее движутся звезды на краю Галактики. Факт тесной зависимости между скоростью звезд и

черной дырой внутри Галактики – свидетельство того, что происходило ранее. То есть галактики и гигантские черные дыры могли быть связаны с рождения.

Все предыдущие идеи образования галактик предполагали, что в ранней Вселенной газ просто конденсировался в форме звезд и галактик. Сейчас же выдвинута новая идея. Предположено, что центр каждого раннего газового облака мог коллапсировать в форме гигантской черной дыры. Черная дыра немедленно начинала поглощать окружающий газ, создавая яркий квазар.

Когда черная дыра при действующем вихревом квазаре поглотит все в окрестностях, она прекращает поглощение и остается невидимой в центре Галактики. Момент, когда черная дыра отбрасывает прочь окружающую Галактику, зависит от того, насколько быстро движутся звезды во внешней галактике. Чем быстрее движутся звезды, тем тяжелее их оттолкнуть и тем больше надо произвести энергии черной дыре, чтобы преодолеть движение кружащихся звезд. Это означает, что размер черной дыры, в конечном счете, зависит от того, насколько быстро вокруг нее движутся звезды вновь образованной Галактики. Должна быть простая корреляция между массой черной дыры и скоростью звезд вновь образованной окружающей Галактики. Именно это и было обнаружено.

Если верно, что сверхмассивные черные дыры помогают запустить механизм образования звезд, тогда, значит, – все гигантские черные дыры и галактики связаны с рождения. То есть причина образования галактик – это есть процесс формирования сверхмассивных черных дыр в их ядрах.

Теория раскрывает тайну образования галактик. В ранней Вселенной каждое вихревое газовое облако могло стать Галактикой при одном решающем условии: создание нена-

сытно поглощающей черной дыры. Черная дыра немедленно начинала втягивать в себя газовое облако. Это вызывало гигантскую вспышку образования звезд, и Галактика зарождалась. В конце концов черная дыра и ее квазар отталкивали остаток Галактики. После поглощения квазара, оставшись без материала, черная дыра замирала в ядре Галактики. Таким образом, сверхмассивная черная дыра – ужасная разрушающая сила – могла также быть основой создания нашей Галактики.

На Гавайях обнаружено, что черная дыра нашей Галактики, возможно, начала поглощать, так как появилось свечение центра Галактики. Свет может исходить от горячего газа, засасываемого в черную дыру. Источник света при наблюдении был неподвижен относительно движущихся вокруг него звезд. То есть свет приходит от самой сверхмассивной черной дыры. Черная дыра ведет себя стабильно спокойно уже давно, однако огромная катастрофа может зажечь ее снова, которая заставит звезды с края Галактики сместиться к черной дыре. Такая катастрофа может случиться.

Джон Дубинский вычислил конечную судьбу нашей Галактики и ближайшей соседки – Андромеды.

Сейчас Галактика Андромеда движется к Млечному Пути, значит, в будущем они подойдут друг к другу. Сейчас Андромеда приближается со скоростью 400 тыс. м/сек, и однажды она в нас врежется. Это произойдет через три миллиарда лет. Облака газа врежутся друг в друга со скоростью 1000 км/сек, и это должно вызвать гигантские ударные волны, которые разогреют газ до высокой температуры.

В середине этого водоворота кипящий газ ввинтится в две стягивающиеся черные дыры. Возникнет двойное поглощающее безумие, в то время, как две чудовищные спирали

вопьются друг в друга, образуя новую черную дыру. Это сильнейшее столкновение собьет Землю и Солнечную систему с орбиты.

У нашей Солнечной системы будет существовать две возможных судьбы:

1. Если мы будем на одной стороне Галактики, когда это случится, нас выкинет в пустое пространство – это удачный вариант.

2. Если мы будем на другой стороне Галактики, нас бросит в центр хаоса.

В активном центре слившихся галактик создается огромная поглощающая черная дыра, которая запустит гигантские взрывы типа взрывов сверхновых. Атмосфера Земли исчезнет, океаны испарятся, а Земля превратится в тост.

Начало конца ознаменуется гибелью бесчисленных солнц. Через десять миллиардов лет наш красный гигант начнет выбрасывать внешние слои в виде газа – произойдет взрыв. В итоге ядро Солнца сожмется до размеров Земли, став тусклой сферой – *белым карликом*. Это будет означать гибель всего живого.

Однако, согласно некоторым подсчетам, развитые цивилизации могут поселиться вокруг умирающих звезд, но и они будут обречены.

По мере охлаждения белого карлика может зародиться кое-что еще. Через довольно долгий период времени углеродно-кремниевая атмосфера звезды может породить новые формы жизни, состоящие не из плоти и крови, а из электрических импульсов. Располагая достаточным временем, из этих форм могут появиться создания, которые могут стать в определенном смысле разумными. Это последняя надежда на жизнь Галактики, несущей свет.

Наступит день, когда звезды в Галактике перестанут пополняться новыми, потому что закончится газ. Родится пос-

ледная звезда, после чего звезды начнут гаснуть, словно кто-то начнет выключать их одну за другой.

Если взглянуть на Млечный Путь изда- лека, он мало-помалу

будет становиться все тусклее и тусклее. В конце-концов погаснет вся Галактика.

Эра звезд подошла к концу. То, что останется от этой, когда-то великолепной, Галактики, будет выброшено в глубокий космос или стянуто в центр, где останки поглотят бесчисленные черные дыры.

После этого черные дыры поглотят друг друга. И мы сможем только зафиксировать волны в их гравитационных полях.

Что же будет со сверхмассивной черной дырой в ядре Млечного Пути? Дракон останется там до конца, поглощая остатки Галактики. Но даже он не вечен. Стало известно, что черные дыры испаряются. Чтобы понять и предсказать этот феномен, требуются знания квантовой механики. Сверхмассивные черные дыры в центре галактик, поглощающие все, до чего могут дотянуться, постоянно теряют один атом за определенный промежуток времени, что приведет к тому, что они полностью испарятся. Однако до такого варианта конца, по оценкам, пройдет десять в сотой степени лет.

Когда гигантская черная дыра совершит свой последний выброс, она начнет излучать видимый свет. Сильная гравитация исказит свет вокруг нее. В созвездии Девы наблюдается такой свет, возможно это свет умирающих черных дыр.



Рис.2.19. *Млечный Путь*

Черная дыра будет нагреваться все сильнее, пока в итоге не погибнут черная дыра и сама Галактика. Перестанут действовать законы физики.

Наше собственное будущее по сравнению с отдаленным будущим Вселенной весьма коротко. Может показаться, что все, что мы делаем здесь, окажется ненужным. Однако вместо того, чтобы сожалеть об этом, мы должны наслаждаться выпавшим на нашу долю мгновением жизни под Солнцем.

Завтра астрономы будут искать новые миры, другие галактики, которым только предстоит родиться.

Глава 3 | **Источники КОСМИЧЕСКОЙ РАДИАЦИИ. РАСПРОСТРАНЕНИЕ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ**

3.1. Введение

В предлагаемом пособии рассмотрены вопросы, выходящие за рамки вузовской программы, касающиеся астрофизических и ядерно-физических проблем, значительно расширяющие представления о структуре материи и Вселенной.

Работа написана с целью ознакомления читателя с современными представлениями о природе мироздания, структурой материи на основе экспериментальных исследований и модельных расчетов, которые приводят нас к истокам возникновения материи и Вселенной.

В работе представлены методы изучения потоков космической радиации как от локальных источников, так и от глобальных межгалактических источников, а также вторичные эффекты при взаимодействии этих потоков со средой.

3.2. Космические лучи.

Их состав и происхождение

Земную атмосферу непрерывно бомбардируют частицы, движущиеся из мирового пространства со скоростью, близкой к скорости света. Эти частицы получили название *космических лучей*, подчеркивающее их внеземное происхождение.

Космические лучи состоят из тех же элементарных частиц, что и вещество на Земле, однако их отличают два важных признака. Во-первых, в космических лучах атомы химических элементов полностью лишены электронов, то есть представлены оголенными атомными ядрами. Во-вторых, частицы космических лучей обладают огромными кинетическими энергиями по сравнению с частицами обычного вещества. Этим объясняется выдающееся значение космических лучей в современной физике. Как естественный источник частиц очень высокой энергии космические лучи играют незаменимую роль при изучении элементарной структуры вещества и характера взаимодействия между элементарными частицами. Это направление исследований обычно называют ядерным направлением в физике космических лучей. Возможности ядерного направления еще далеко не исчерпаны. Энергии отдельных частиц космических лучей столь велики, что они еще долго будут оставаться вне конкуренции по сравнению с частицами, ускоренными самыми совершенными лабораторными ускорителями.

В настоящее время выяснилась также важная роль космических лучей в астрофизике. Астрономии известны области во Вселенной с температурами газа до десятков миллионов градусов.

Во внутренних частях некоторых звезд, вероятно, существуют температуры до миллиарда градусов. Температуре 1 млрд град, отвечает энергия теплового движения частиц газа порядка 0,1 МэВ. Основная же масса частиц космических лучей имеет энергии от 10^9 эВ (1 ГэВ) и выше, то есть в десятки тысяч раз более высокие, чем тепловые энергии частиц в самых горячих частях Вселенной. Таким образом, с неизбежностью приходится допустить, что энергия частиц космических лучей имеет нетепловое происхождение и что частицы приобретают ее при каких-то внешних воздействиях.

Космические лучи были открыты в 1912 г. В. Гессом. Различают *первичные космические лучи* – космические лучи до входа в атмосферу и *вторичные космические лучи*, образовавшиеся в результате процессов взаимодействия первичных космических лучей с атмосферой Земли.

Что же такое космические лучи? В основном это заряженные частицы – *протоны* (p), *электроны* (e^-), *позитроны* (e^+), *ядра* (A), а также нейтральные частицы – *нейтрино* (ν), *гамма-фотоны* (γ), имеющие кинетическую энергию более 100 МэВ. Однако следует отличать космические лучи от элементарных частиц. Это различие заключается в том, что космические лучи представляют собой оголенные атомные ядра и отдельные элементарные частицы, обладающие огромными кинетическими энергиями.

Космические лучи обладают не только очень высокой энергией, но и достаточно высокой интенсивностью, вследствие чего плотность энергии космических лучей в пространстве и создаваемое ими давление чрезвычайно велики. Например, в нашей Галактике полная энергия космических лучей сравнима с энергией звездного излучения, энергией теплового движения межзвездного газа и кинетической энергией его турбулентных движений, а также с энергией магнитного поля Галактики.

■ Происхождение космических лучей

Один из основных вопросов, который должен быть решен теорией, – выяснение, где образуются и как распределены космические лучи во Вселенной. Показано, что космические лучи более или менее равномерно заполняют всю Галактику. Это, однако, еще не доказывает, что космические лучи в ней же и образуются. Согласно так называемой метагалактической теории, космические лучи равномерно,

с той же плотностью, что и у Земли, заполняют вообще всю Вселенную, вернее ту ее часть, которую можно наблюдать и изучать имеющимися средствами, т. е. Метагалактику. Эта теория не противоречит данным радиоастрономии. Объем нашей Галактики равен примерно 10^{67} см³. В то же время в Метагалактике Галактики распределены довольно редко — в среднем одна Галактика содержится в объеме около 10^{75} см³, то есть объем всех галактик составляет всего лишь около одной стомиллионной доли пространства Метагалактики. Оценки показывают, что заполнить все межгалактическое пространство космическими лучами (к.л.) с наблюдаемой у Земли галактической плотностью энергии 10^{12} эрг/см³ очень трудно. Энергия космических лучей в этом случае оказалась бы по меньшей мере в сотни раз меньше кинетической энергии газа и энергии магнитного поля в межгалактическом пространстве и, следовательно, не может черпаться из этих ИСТОЧНИКОВ. Такую энергию не могут обеспечить также все имеющиеся галактики и радиогалактики, несмотря даже на огромную мощность последних в отношении генерации космических лучей. Наконец, космические лучи с такой высокой плотностью энергии не могли сохраниться и от ранних стадий эволюции Метагалактики, когда можно было бы допустить существование каких-то неизвестных нам процессов их генерации. Итак, Метагалактика непрерывно расширяется и плотность энергии космических лучей, если они образовались в далеком прошлом, в настоящее время была бы очень малой. Все эти соображения делают метагалактическую теорию очень неубедительной. Более того, в последнее время благодаря успехам рентгеновской астрономии появились и прямые данные, противоречащие этой теории. Оказалось, что средняя концентрация релятивистских электронов в Метагалактике не может превы-

шать тысячных долей их концентрации у Земли. В противном случае эти электроны, взаимодействуя с радиоволнами реликтового излучения (обратный эффект Комптона), давали бы сильное рентгеновское излучение. Такое излучение, как показывают наблюдения, отсутствует. Полученные данные говорят в пользу того, что наблюдаемые у Земли электроны образуются и накапливаются в Галактике. Нет никаких оснований думать, что протоны и более тяжелые ядра ведут себя в этом отношении по-другому. Таким образом, оправдывается галактическая теория происхождения космических лучей.

Галактическая теория основывается на представлении, что космические лучи образуются и длительное время удерживаются в нашей и других галактиках, лишь медленно вытекающая из них в межгалактическое пространство. Двигаясь по прямой, космические лучи покинули бы Галактику за несколько тысяч лет. В масштабах Галактики это время столь мало, что наполнить ее космическими лучами при такой быстрой утечке было бы невозможно. Однако благодаря присутствию межзвездного магнитного поля, движение космических лучей имеет очень сложный и запутанный характер. Межзвездное магнитное поле как бы «закреплено» или, как говорят, «вморожено» в межзвездном газе. Последний находится в состоянии движения, перемешивает и запутывает магнитные силовые линии поля. Двигаясь в таком неоднородном поле, частицы космических лучей многократно отклоняются и рассеиваются, в целом их движение может быть уподоблено диффузии молекул в газе. В результате время утечки космических лучей из Галактики оказывается в тысячи раз большим, чем при прямолинейном движении.

Здесь мы имеем в виду подавляющую часть космических лучей с энергиями 10^{15} – 10^{16} эВ. Частицы более высоких энер-

гий, число которых в космических лучах очень мало, слабо отклоняются галактическим магнитным полем и покидают Галактику сравнительно быстро. С этим, по-видимому, связан излом в энергетическом спектре космических лучей при энергии $\sim 10^{15}$ эВ.

Наиболее надежная оценка времени утечки космических лучей из Галактики получается из данных об их химическом составе. Как уже указывалось, в космических лучах в очень большом количестве по сравнению с обычным веществом присутствуют легкие ядра He, Be, B. Эти ядра образуются в результате распада более тяжелых ядер при их столкновениях с ядрами атомов межзвездного газа (в основном водорода). Для того чтобы легкие ядра присутствовали в наблюдаемом количестве, космические лучи за время их движения в Галактике должны проходить толщину межзвездного газа около 3 г/см^2 . Средняя плотность газа в Галактике, включая внешние области диска, составляет около 10^{-25} г/см^3 или меньше, если имеется протяженное гало. Поэтому космические лучи при их хаотическом движении в Галактике должны проходить путь в среднем около $3 \cdot 10^{25} \text{ см}$ или больше. Так как их скорость мало отличается от скорости света ($c = 3 \cdot 10^{10} \text{ см/сек}$), то, следовательно, время утечки космических лучей из Галактики оказывается равным:

$$T > 10^{15} \text{ сек} = 3 \cdot 10^7 \text{ лет.}$$

Полная энергия космических лучей в объеме Галактики $V = 10^{67} \text{ см}^3$ (если считать плотность энергии примерно одинаковой всюду в Галактике и равной ее значению у Земли ($10^{-12} \text{ эрг/см}^3$)) равна 10^{55} эрг . Вследствие утечки из Галактики эта энергия должна возобновляться каждые $3 \cdot 10^7 \text{ лет}$. Отсюда следует, что в Галактике должны существовать источники

космических лучей с мощностью $U = \frac{W}{T} = 10^{40} \text{ эрг/сек}$. Эта

оценка практически не зависит от размера заполняемого космическими лучами объема Галактики, так как с ростом V , а следовательно, W должно возрастет и время T .

Мощность 10^{40} эрг/сек очень велика. Так, например, если все звезды в Галактике генерируют космические лучи так же как и Солнце, то есть со средней мощностью около 10^{24} эрг/сек, то суммарная их мощность составляет 10^{35} эрг/сек, то есть в 100 тысяч раз меньше необходимой.

Для решения вопроса об источниках космических лучей привлекаются данные астрофизики и радиоастрономии. Из всех объектов в Галактике, генерирующих космические лучи, лишь сверхновые звезды обладают достаточной мощностью. Действительно, уже давно известно, что вспышки сверхновых звезд сопровождаются выбросом огромных масс газа, образующих вокруг взрывающейся звезды большую ярко светящуюся и расширяющуюся туманность. Полная энергия взрыва, которая уходит на излучение и кинетическую энергию разлета газа, может достигать 10^{51} и даже 10^{52} эрг. Примером такой катастрофы в мире звезд служит упоминавшаяся выше сверхновая в Кассиопее, вспыхнувшая 250 лет назад, а также известная *Крабовидная туманность*, возникшая как результат вспышки сверхновой в 1054 г.

В нашей Галактике, по последним данным, сверхновые вспыхивают в среднем не реже, чем раз в 100 лет. Если отнести выделяемую при вспышке энергию около 10^{51} эрг к такому промежутку времени, то средняя мощность вспышек сверхновых в Галактике составляет около $3 \cdot 10^{41}$ эрг/сек.

Если несколько процентов этой мощности передается космическим лучам, то этого достаточно для поддержания их энергии на современном уровне, однако сами по себе энергетические оценки указывают лишь на возможность возникновения большого количества космических лучей при

вспышках сверхновых, но ни в коей мере не доказывают, что это имеет место и в действительности. Решающими здесь оказались радиоастрономические наблюдения. Они показали, что в оболочках сверхновых действительно заключено огромное количество ультрарелятивистских электронов, создающих наблюдаемое радиоизлучение и даже значительную часть видимого оптического излучения оболочки. Однако радиоастрономия позволяет непосредственно обнаружить только радиоизлучающие электроны. Поэтому еще нельзя окончательно утверждать, хотя это представляется вполне естественным, что при вспышках сверхновых генерируется также достаточное количество протонов и ядер, входящих в состав космических лучей. В связи с этим не потеряли значение поиски и других возможных источников космических лучей в Галактике. Большой интерес в этом отношении представляет область галактического ядра. В этой сравнительно небольшой, с диаметром 6–8 парсек (пс), быстро раздающейся области сосредоточено большое количество звезд и межзвездного газа. Методами радиоастрономии наблюдаются непрерывное истечение и отдельные выбросы газа из области ядра. Возможно, что здесь также имеют место взрывные процессы, аналогичные взрывам сверхновых, только гораздо большей мощности.

Изучение области галактического ядра еще только начинается, но имеющиеся данные показывают, что мощность генерации космических лучей галактическим ядром вряд ли превосходит суммарную мощность их генерации при вспышках сверхновых в Галактике. Кроме того, большая часть космических лучей, образованных в ядре, покинет диск раньше, чем достигнет окрестностей Солнца.

Остановимся, наконец, на еще одном из основных вопросов теории происхождения космических лучей, а имен-

но, на вопросе о возможных механизмах ускорения частиц до очень больших энергий. В деталях этот вопрос еще далек от окончательного решения.

Однако в общих чертах природа процесса ускорения частиц уже ясна. Для понимания механизма ускорения частиц в космосе очень важно уяснить отличие космической плазмы от обычного неионизованного газа, с которым мы имеем дело в земных условиях. В обычном газе огромную роль играют столкновения между отдельными молекулами. Движение одной части газа передается другой его части только в результате столкновений между частицами газа. В таких столкновениях энергия подавляющего числа молекул мало отличается от среднего значения, определяемого температурой газа.

■ **Солнечные космические лучи**

Солнце представляет собой гигантский естественный ускоритель заряженных частиц. Наряду с различными видами электромагнитного излучения значительная доля энергии солнечных вспышек передается ускоренным частицам — солнечным космическим лучам (с. к. л.). Механизмы их ускорения и выхода за пределы солнечной атмосферы остаются в значительной степени неясными.

Основную долю солнечных космических лучей составляют протоны, обнаружены также ядра с зарядом $Z = 2$, электроны с энергией > 40 кэВ. Зарегистрированы также заметные потоки солнечных дейтронов и установлено наличие трития (^3H) и изотопа гелия ^3He . На Солнце ускорение частиц может, по-видимому, происходить в двух областях — *хромосфере*, где плазма имеет высокую плотность, и в *солнечной короне*, где плотность плазмы низка. В области с небольшой плотностью потери энергии при столкновениях

ускоряемых частиц с частицами среды малы, поэтому ускоряются здесь все ядра, а в области с высокой плотностью, где потери на столкновения велики, ускоряются преимущественно протоны, теряющие при столкновениях меньше энергии, чем более тяжелые ядра.

Покидая область ускорения, частицы солнечных космических лучей в течение многих часов блуждают в межпланетном магнитном поле, рассеиваясь на его неоднородностях, и постепенно уходят за пределы Солнечной системы. Часть из них вторгается в атмосферу Земли, вызывая дополнительную ионизацию в основном в области полярных шапок, что усиливает поглощение коротких радиоволн.

Распределение солнечных космических лучей по энергии и зарядам у Земли определяется как особенностями процесса ускорения частиц в источнике (солнечная вспышка) и выхода их из области ускорения, так и условиями распространения в межпланетных магнитных полях, полное число ускоренных во вспышке частиц может быть 10^{32} , а их суммарная энергия – 10^{32} эрг, что сравнимо с энергией радиации вспышки. Верхний предел энергии солнечных космических лучей равен $2 \cdot 10^{10}$ эВ, нижний – около 10^6 эВ. При меньших энергиях частицы уже нельзя рассматривать как независимо движущиеся, поскольку они начинают коллективно взаимодействовать с межпланетным магнитным полем (то есть приобретают свойства плазмы). Поток солнечных частиц с энергией 10^9 эВ после сильных вспышек может более чем в 10^3 раз превышать поток галактических космических лучей вблизи орбиты Земли.

Объемная плотность энергии по всему спектру солнечных космических лучей на орбите Земли спустя час после мощной солнечной вспышки может достигать 10^{-9} эрг/см³ (в 10^3 – 10^4 раз больше, чем для галактических частиц). Спектр

солнечных космических лучей является круто падающим, то есть число частиц быстро уменьшается с ростом энергии. Так, спустя 6 часов после очень мощной вспышки 23 февраля 1956 г. поток частиц на орбите Земли с энергиями $5 \cdot 10^9$ и $9 \cdot 10^9$ эВ был равен $1,8 \cdot 10^{-1}$ и 10^{-3} см⁻²·сек⁻¹ соответственно.

Установлено, что наибольшую радиационную опасность представляют солнечные протоны с энергией выше 10^8 эВ, которые создают в обшивке корабля мощную электронно-фотонную лавину и поток рентгеновских лучей (за счет тормозного излучения электронов).

Частицы меньших энергий будут эффективно поглощаться обшивкой космического корабля. На орбите Земли по-



Рис. 3.1. Фотография солнечной короны промежуточного типа, структура магнитного поля короны

ток излучения достигает максимальной величины через 8–6 часов после начала вспышки и существенно уменьшается через 30–32 часа. От сравнительно небольших вспышек максимальный поток протонов с энергией $> 10^8$ эВ не превышает значения 10^{-3} – 10^{-2} см⁻²сек⁻¹, что сравнимо с потоком излучения во внутреннем поясе радиации Земли. Максимальный поток протонов с энергией выше $5 \cdot 10^8$ эВ от наиболее мощных вспышек составляет около 10^{-3} см⁻²сек⁻¹. Частота появления мощных вспышек составляет один случай за несколько лет, так что полеты малой длительности практически безопасны при толщине углеродного экрана всего 5–10 г/см².

Проблема прогнозирования вспышек очень актуальна, но, по-видимому, еще далека от разрешения.

3.3. Радиационная защита – магнитное поле Земли

Вопросы радиационной безопасности космонавтов, космической радиосвязи и навигации, прогноза изменения орбит спутников, вследствие их торможения в атмосфере, использования спутников в качестве обсерваторий, вынесенных за пределы поглощающей атмосферы, проблемы, связанные с изучением и освоением Венеры, Марса и других тел Солнечной системы, требуют от физиков детального знания количественных характеристик околоземного пространства и понимания физической природы происходящих процессов. Сходные явления исследуются и на других планетах.

Кроме Земли, магнитосфера обнаружена у Марса, Юпитера, Сатурна, Меркурия. На Венере и Луне магнитное поле практически отсутствует, и магнитосфер нет, хотя обтека-

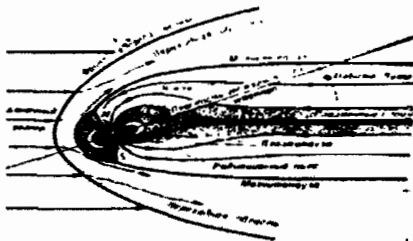
ние этих планет солнечным ветром вызывает вблизи этих тел Солнечной системы весьма своеобразные явления. Тем интереснее выяснить, почему из планет земной Группы только у Земли существует протяженная магнитосфера с огромным богатством плазменных процессов, разнообразием полярных сияний, поясами радиации (магнитных ловушек).

На основании анализа измерений геомагнитного поля во многих районах земного шара было установлено, что в среднем оно близко к полю простого магнитного диполя, расположенного в центре Земли, с осью, наклоненной к оси вращения примерно на 11° (это приводит к различному положению на Земле географических и магнитных полюсов). На это основное магнитное поле накладываются как мелкомасштабные аномалии (такие, например, как известная Курская магнитная аномалия), так и крупномасштабные («мировые») аномалии. Наиболее значительные мировые аномалии расположены над территорией Сибири (здесь поле значительно превышает среднее) и над Южной Америкой и Атлантикой (здесь поле аномально мало). Мировые аномалии оказывают большое влияние на движение заряженных частиц в поясах радиации до высот в несколько тысяч километров от поверхности Земли, мелкомасштабные аномалии почти незаметны уже на высотах порядка сотни километров. При помощи спутников была проведена детальная мировая магнитная съемка на различных высотах. Полученные данные вместе с данными измерений, выполненными на наземных магнитных обсерваториях и в океанах и на спутниках, позволили описать постоянное магнитное поле Земли с точностью до долей процента. Однако магнитное поле Земли непостоянно, так как в верхней атмосфере (в ионосфере и выше), как было выяснено, текут электрические токи, создающие дополнительную перемен-

ную компоненту поля. Особенно велика она во время полярных сияний; это явление называется магнитной бурей. Медленно изменяется и постоянное поле, обусловленное, по-видимому, медленными геологическими процессами, сопровождаемыми движениями проводящих масс земного ядра.

Прямые измерения в околоземном и межпланетном пространстве, осуществленные космическими зондами и аппаратами, показывают, что поток солнечной плазмы, движущийся почти радиально, существует все время (солнечный ветер) и поэтому геомагнитное поле со стороны Солнца всегда поджато к Земле. Область, где геомагнитное поле, хотя и искаженное этим сжатием, сохраняет более или менее постоянное направление силовых линий, называется *магнитосферой*.

Внутренняя часть магнитосферы, включающая в себя магнитные силовые линии, выходящие из Земли на низких и средних широтах, в меньшей степени реагирует на активные процессы, происходящие во внешней ее части во время магнитных бурь и полярных сияний. Здесь оказывается возможным длительный захват электронов и ионов с энергиями в десятки килоэлектровольт (кэВ) и более в магнитную ловушку, образуемую геомагнитным полем.



Частицы высоких энергий, находящиеся в зоне захвата, образуют вокруг геомагнитной оси симметричные пояса радиации. В первые годы после их открытия (1958 г.) дискутировался вопрос о числе таких поясов. Как вы-

Рис. 3.2. Магнитосфера Земли

яснилось, вопрос этот в основном формален, так как каждый тип частиц в соответствии со своей энергией обладает характерным распределением в околоземном пространстве, то есть образует «свой пояс». Все же удобно выделить сравнительно спокойную внутреннюю зону на низких и средних широтах и более переменную и обширную внешнюю зону на средних и высоких широтах, сливающуюся с зоной *авральной радиации*, или *плазменным слоем*.

Подавляющая часть первичных космических лучей приходит к Земле не от солнца, а извне — из окружающего галактического пространства. Их называют *галактическими*. Некоторая сравнительно небольшая часть, преимущественно частицы малых энергий (< 1 ГэВ), приходит к Земле от Солнца. Солнечные космические лучи можно отделить от галактических, поскольку они появляются только периодически, во время сильных хромосферных вспышек на Солнце. Энергетический спектр солнечных космических лучей круто падает в области больших энергий, поэтому они вносят заметный вклад только в первичные малые энергии.

Средняя во времени мощность Солнца как источника космических лучей — около 10^{24} эрг/сек. Такой мощности соответствует у Земли поток энергии $3,5 \cdot 10^{-4}$ эрг/(см² · сек). Эта величина в 20 раз меньше оцененного выше потока энергии всех первичных космических лучей. Следует, однако, иметь в виду, что во время кратковременных вспышек поток энергии солнечных космических лучей может в тысячи раз превышать его среднее значение. Оказалось, что отдельные частицы космических лучей имеют не только очень высокую энергию, но и достаточно большую интенсивность (концентрацию). В результате плотность энергии космических лучей в пространстве и обусловленное ими давление весьма велики. Так, в пределах нашей звездной системы —

Галактики – полная энергия всех космических лучей сравнима с энергией звездного излучения, энергией теплового движения межзвездного газа, кинетической энергией его турбулентных движений, а также с энергией магнитного поля Галактики. Отсюда следует, что космические лучи должны играть большую роль в динамике Галактики в целом. Иными словами, во Вселенной, помимо всегда принимавшихся во внимание в астрономии сил тяготения и газового давления, действуют также весьма значительные силы, обусловленные давлением космических лучей и тесно связанными с ними магнитными полями.

Несколько счетчиков, включенных на совпадение, регистрируют только частицы, проходящие через все счетчики, то есть движущиеся в пределах угла 0. Помещая между счетчиками поглотители, можно определить проникающую способность излучения.

Таким образом, исследование космических лучей привело к открытию нового круга явлений, которые не наблюдаются в естественных условиях на Земле и пока не могут быть воспроизведены в лабораторных условиях.

■ *Открытие космических лучей и методы их изучения*

Роль космических лучей во Вселенной выяснилась лишь в середине XX в., что в значительной мере объясняется экранирующим действием атмосферы. Подавляющая часть космических лучей поглощается уже в ее верхних слоях.

На поверхности Земли космические лучи обнаруживаются лишь по слабым эффектам ионизации.

В начале 20-х годов в опытах с электроскопами и ионизационными камерами была обнаружена постоянная остаточная ионизация газов, вызываемая каким-то очень про-

никающим излучением. Это излучение не могли полностью задержать даже очень толстые слои свинца, которых было достаточно для устранения известного в то время радиоактивного излучения. Внеземная природа обнаруженного проникающего излучения была установлена в 1912–1914 гг. опытами австрийского физика В. Гесса и других физиков, поднимавшихся с ионизационными камерами на воздушных шарах.

Природа космического излучения длительное время, вплоть до 40-х гг., оставалась неясной. В течение этого времени интенсивно развивалось и ядерное направление – изучение взаимодействия космических лучей с атмосферой и вторичных частиц, возникающих при таком взаимодействии. Для этих исследований они нашли, что на больших расстояниях от поверхности Земли ионизация, вопреки ожиданиям, увеличивается, например на высоте 4800 м – вчетверо, на высоте 8400 м – в 10 раз. Окончательно доказал внеземное происхождение космических лучей Р. Милликен (США), осуществивший в 1923–1926 гг. серию опытов по исследова-



Рис. 3.3.

Электромагнитный каскад

нию поглощения космических лучей атмосферой (кстати, именно он ввел термин «космические лучи»).

Для этих исследований сконструированы телескопы, состоящие из большого числа счетчиков ионизирующих частиц. Включенные на совпадение счетчики позволяют установить направление движения частицы и проследить ее взаимодей-

ствие с веществом между счетчиками. Большую роль в изучении космических лучей сыграла камера Вильсона. В однородном магнитном поле кривизна траектории частицы растет с потерей энергии. Траектория показывает, что частица влетела в камеру снизу. Кривизна траектории после прохождения частицы через свинцовую пластинку и, следовательно, потери части энергии увеличилась. Направление отклонения следа в магнитном поле показывает, что частица заряжена положительно (отрицательно заряженная частица отклонилась бы вправо). Этим методом К. Андерсон в 1932 г. открыл позитрон.

В 1929 г. с помощью камеры Вильсона, помещенной в магнитное поле, советский физик Д.В. Скобельцын сумел измерить энергию отдельных частиц и обнаружил так называемые ливни, состоящие из многих частиц, одновременно попадающих в камеру. Ливни свидетельствовали о размножении частиц космических лучей в атмосфере. В 30-х гг. это явление было доказано прямым измерением хода интенсивности космических лучей в зависимости от высоты. Оказалось, что интенсивность потока космических лучей возрастает лишь до высоты около 20 км над уровнем моря. На этой высоте она имеет максимум и при дальнейшем подъеме снижается. Это объясняется тем, что по мере проникновения в атмосферу космические лучи образуют в большом количестве вторичные частицы. Плотность потока частиц нарастает, но на высотах менее 20 км этот процесс перекрывается поглощением частиц в атмосфере. Систематические исследования влияния магнитного поля Земли на интенсивность и направление прихода частиц космических лучей показали, что подавляющая часть первичных лучей, попадающих в атмосферу, имеет положительный электрический заряд. С этим связана восточно-западная асимметрия ин-

тенсивности космических лучей – из-за отклонения в магнитном поле Земли с запада приходит больше частиц, чем с востока.

В те же годы в космических лучах (с помощью камеры Вильсона) были обнаружены новые элементарные частицы: *позитрон* (К. Андерсон, 1932 г.) и *мюоны* (мю-мезоны, К. Андерсон, 1937 г.). В 1947 г. были открыты мезоны другого типа заряженные пи-мезоны. Открытие было сделано группой ученых (Ч. Латтес, Д. Оккиалини и С. Пауэлл, США), использовавших метод ядерных фотоэмульсий. В фотоэмульсиях быстрые заряженные частицы оставляют отчетливые следы в результате вызываемого ими эффекта ионизации вещества. По следам, оставленным частицами, можно определить интенсивность их потока, длину пробега в эмульсии, толщину следа, ионизационную способность, а по этим данным возможно в ряде случаев найти заряд, массу, скорость и энергию частиц. Применение метода фотоэмульсий позволило в 1948 г. установить ядерный состав первичного космического излучения. В фотоэмульсиях, поднятых на высоту 29 км в 1948 г., Э. Ней, Г. Брадт и Б. Питерс (США) обнаружили следы ядер тяжелых элементов, вплоть до ядер железа. Эти ядра вместе с протонами (ядрами водорода) и образуют поток первичных космических лучей у Земли. С этого времени центр тяжести исследований постепенно перемещается в сторону изучения первичных космических лучей, выяснения их происхождения и связанных с этим вопросов астрофизики.

3.4. Характеристики космических лучей. Химический состав. Источники

За исключением протонов и электронов на больших высотах, все остальные частицы образуются в результате взаимодействия первичных космических лучей с атмосферой.

Характеристики космических лучей до входа в атмосферу (первичные космические лучи)

	Галактические космические лучи	Солнечные космические лучи
Поток	$\sim 1 \text{ см}^{-2} \text{сек}^{-1}$	Во время солнечных вспышек может достигать $\sim 10^6 \text{ см}^{-2} \text{сек}^{-1}$
Состав	1. Ядерная компонента: $\sim 90\%$ протонов, 10% ядер гелия, 1% более тяжелых ядер. 2. Электроны (1% от числа ядер). 3. Позитроны (10% от числа электронов). 4. Антиадроны $< 1\%$	$98-99\%$ протоны, $\sim 1,5\%$ ядер гелия
Диапазон энергии	10^6-10^{21} эВ	10^5-10^{11} эВ

Таким образом вместо одной первичной частицы возникает большое число вторичных частиц, которые делятся на адронную, мюонную и электронно-фотонную компоненты. Такой каскад покрывает большую территорию и называется *широким атмосферным ливнем*. В одном акте взаимодействия протон обычно теряет примерно 50% своей энергии, а в результате взаимодействия возникают в основном пионы. Каждое последующее взаимодействие первичной частицы добавляет в каскад новые адроны, которые летят преимущественно по направлению первичной частицы, обра-

зуя адронный компонент ливня. Образующиеся пионы могут взаимодействовать с ядрами атмосферы, а могут распадаться, формируя мюонную и электронно-фотонную компоненты ливня. Адронная компонента до поверхности Земли практически не доходит, превращаясь в мюоны, нейтрино и γ -кванты.

Для ядер гелия (α -частиц) пробег взаимодействия X составляет около 25 г/см^2 , для более тяжелых ядер — еще меньше. Первое взаимодействие $\lambda = 70 \text{ г/см}^2$ протоны испытывают в среднем на высоте около 20 км. Толщина всей атмосферы составляет 1000 г/см^2 , то есть примерно 15 ядерных пробегов для протонов. Поэтому вероятность достичь поверхности Земли, не испытав столкновений, для первичной частицы ничтожно мала. Небольшое количество первичных протонов можно наблюдать лишь на высоких горах. Но для наблюдения первичных ядер более тяжелых элементов уже необходимо поднимать приборы в верхние слои атмосферы, например, на шарах-зондах. Протон, испытавший ядерное столкновение, теряет в среднем от 30 до 50% первоначальной энергии. В результате основная часть протонов первичных космических лучей со средней энергией около 10 ГэВ после нескольких ядерных взаимодействий теряет свою энергию и не доходит до уровня моря.

Два самых крупных достижения физики за последние десятилетия:

- 1) открытие того, что нейтрино имеют небольшую массу;
- 2) обнаружение ускорения расширения Вселенной.

Три физика из Университета штата Вашингтон в Сиэттле предлагают связать эти два открытия с одной из самых странных особенностей Вселенной — темной энергией. Такая связь, по их мнению, может быть осуществлена на фундаментальном уровне с помощью пока еще неоткрытой субатомной

частицы, которую они называли *акселерон* (*acceleron*).

Темная энергия была пренебрежима в ранней Вселенной, но теперь она составляет приблизительно 70% наблюдаемого космоса. Понимание этого явления поможет объяснить далекое будущее Вселенной, в частности, будет ли продолжаться ускорение расширения Вселенной неопределенно долго.

«В этой новой теории нейтрино находятся под влиянием новой силы, возникающей из-за их взаимодействий с акселеронами. Темная энергия возникает, когда Вселенная пытается растянуть нейтрино врозь, подобно упругому растяжению в натянутой резиновой полоске», – говорит профессор физики Вашингтонского университета Анна Нельсон. По ее словам, это натяжение и приводит к ускорению расширения Вселенной.

Нейтрино зарождаются триллионами в ядерных печах звезд типа нашего Солнца. Они двигаются через Вселенную, и миллиарды их проходят сквозь вещество, включая и людей, каждую секунду. Помимо крохотной массы, они не имеют никакого электрического или цветового заряда, а это означает, что они взаимодействуют с веществом крайне незначительно, легко проходя через любые материалы.

«Но взаимодействие между акселеронами и остальной материей еще более слабое», – говорит Нельсон. – *«Поэтому эти частицы еще не были обнаружены сложными детекторами».* Однако в новой теории акселероны проявляют силу, которая может влиять на нейтрино. Эта сила, по мнению авторов, может быть обнаружена с помощью разнообразных экспериментов с нейтрино, уже проводящихся во всем мире.

«Существует много моделей темной энергии, но эксперименты главным образом ограничены космологией, в частно-

сти измерением темпа расширения Вселенной. Поскольку для этого нужно наблюдать очень отдаленные объекты, очень трудно проводить такие измерения с высокой точностью», — говорит Нельсон. — «Наша модель — единственная, которая дает некоторый мыслимый способ делать эксперименты на Земле, чтобы обнаружить силу, порождающую темную энергию. Мы можем сделать это, используя существующие эксперименты с нейтрино».

Новая теория создана Анной Нельсон, Дэвидом Капланом и Нилом Вейнером из Университета штата Вашингтон. Их работа, частично поддержанная Американским министерством энергетики, подробно изложена в статье, принятой к публикации в одном из ближайших выпусков *Physical Review Letters* — журнала Американского физического общества.

Исследователи говорят, что масса нейтрино может фактически изменяться в зависимости от окружающей среды, через которую оно проходит. Таким образом, появляются небольшие вариации массы в зависимости от того, движется ли нейтрино через воздух, воду или призму. Это означает, что датчики нейтрино могут выдавать несколько различные результаты в зависимости от того, где они находятся и что их окружает. «Но если нейтрино — компонент темной энергии, то это говорит о наличии силы, которая позволит урегулировать противоречия среди различных экспериментов. Существование этой силы, возникающей при взаимодействии нейтрино и акселеронов, продолжает питать расширение Вселенной», — говорит Нельсон. Физики проверили следствия своей теории, которые могли бы предсказать, продолжит ли Вселенная расширяться неопределенно долго или перейдет в состояние резкой остановки и последующий коллапс — в так называемый «Big Crunch» — Большой Хруст. Хотя



Рис. 3.4. Наблюдаемое распределение звезд

новая теория и не предсказывает Большого Хруста, по словам Нельсон, она подразумевает, что в некоторый момент расширение прекратит ускоряться. *«В нашей теории, в конечном счете, нейтрино должны разойтись слишком далеко друг от друга и стать слишком массивными, чтобы на них продол-*

жала оказывать влияние темная энергия, так что ускорение расширения должно будет остановиться. Вселенная может продолжать расширяться, но со все более убывающей скоростью» – к такому выводу приходят авторы.

Большинство величайших гениев науки совершали свои открытия в области астрономии – Птолемей, Коперник, Галилей, Кеплер, Ньютон, Эйнштейн. В последние десятилетия половина всех Нобелевских премий по физике присуждается за открытия, которые так или иначе связаны с астрономией. В десятке крупнейших достижений в области физики за 2003 год семь открытий относятся к астрономии.

На фотографиях, сделанных космическим аппаратом «Кассини» после его прибытия в систему Сатурна, обнаружены два новых, ранее не известных спутника планеты-гиганта. Их орбиты лежат на расстоянии 194 000 и 211 000 км. то есть между орбитами Мимаса и Энцелада. Размеры (поперечник) новых спутников составляют соответственно 3 и 4 км.

Ракета Дельта II запустила космический аппарат НАСА Мессенджер в межпланетный полет к Меркурию. Мессенджер должен стать первым зондом, выведенным на орбиту Меркурия.



Рис. 3.5.

*Запуск космического аппарата
НАСА Мессенджера*

Изображение, полученное обсерваторией Чандра, предоставит возможность осуществить невозможное ранее исследование катастрофической судьбы, которая ожидает звезды, намного более массивные, чем Солнце.

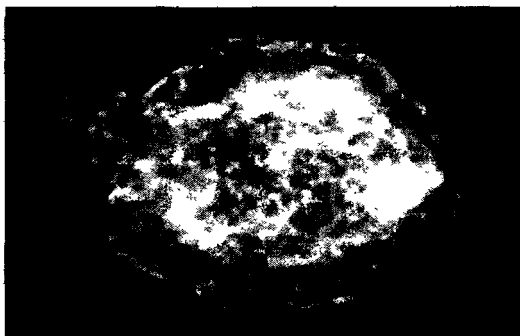


Рис. 3.6. Рентгеновское изображение
остатка сверхновой – Кассиопея А

Эту удивительную туманность в форме пузыря (рис. 3.7), как бы «насаженную» на яркое волокно из водородного газа, выдул сильный звездный ветер, истекающий из горячей молодой звезды. Снимок получен на космическом телескопе «Хаббл».



Рис. 3.7. Космический пузырь, занесенный в каталог под номером N44

В туманности Лагуна звезды борются с газом и пылью, а в выигрыше оказываются фотогафы. Эту фотогеничную туманность, известную также как М8, можно увидеть даже в бинокль в созвездии Стрельца (рис. 3.8, 3.9). В результате мощных процессов звездообразования возникает беспорядочное смешение разных цветов. Газ светится красным цветом, когда звездный свет с высокой энергией его возбуждает.

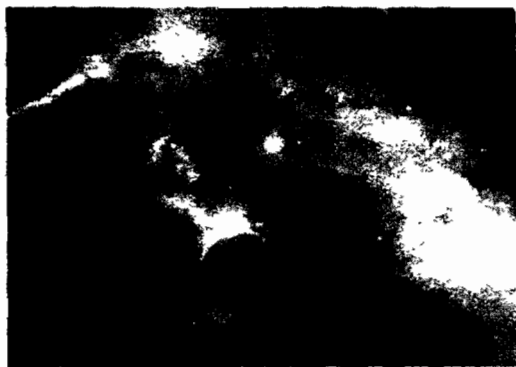


Рис. 3.8.
Туманность Лагуна крупным планом

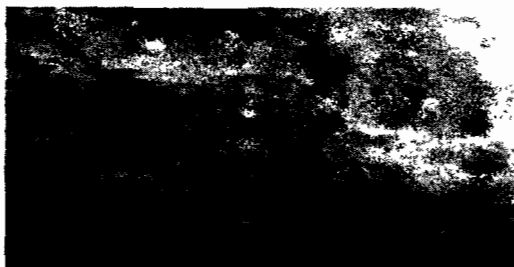


Рис. 3.9. *Туманность М8*

Сколько галактик на этом изображении – одна или две? Такой вопрос возник в 1950 году, когда астроном Арт Хоаг случайно обнаружил этот необычный внегалактический объект (рис. 3.10). В наружном кольце преобладают яркие голубые звезды, а в центре находится шар из гораздо более красных звезд, которые, вероятно, значительно старше. Между ними – «пробел», который выглядит почти совсем темным.

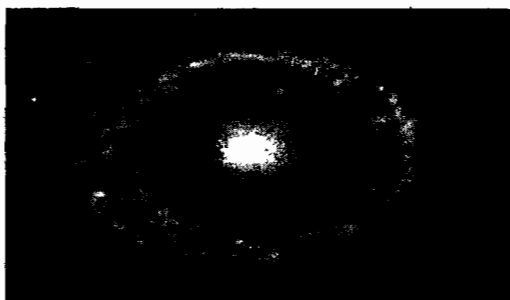


Рис. 3.10.

*Внегалактический объект,
обнаруженный Артом Хоагом в 1950 г.*

Что за странные объекты видны на рисунке 3.11? Они являются изображениями одной-единственной необычной голубой каплеобразной кольцевой галактики, которая волей

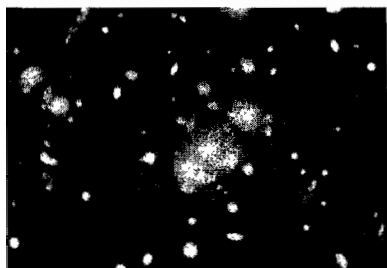


Рис. 3.11.
*Наблюдение Голубой
каплеобразной галактики,
расположенной за гигантским
скоплением галактик*

случая оказалась расположена за гигантским скоплением галактик. Галактики скопления совместно с темной материей в скоплении действуют как гравитационная линза.

Крошечный шарик демонстрирует бесконечное расширение Вселенной во времени (рис. 3.12). Немногим более одной десятой миллиметра в диаметре, он

движется в сторону гладкой пластинки благодаря флуктуациям энергии вакуума. Сила притяжения между шариком и пластинкой объясняется действием **эффекта Казимира**, названного в честь ученого, открывшего его 50 лет назад. Ученый пытался объяснить, почему так медленно движутся жидкости, подобные майонезу.

Самое грандиозное явление, известное человеку, – это **расширение нашей Вселенной**, доказанное в 1929 г. Расстоя-

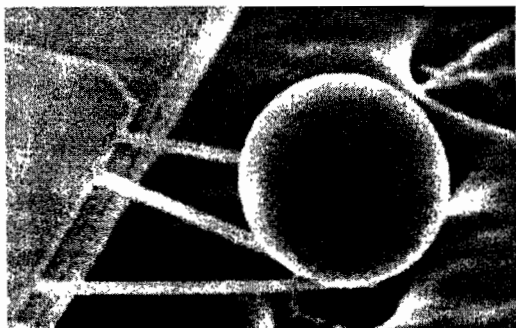


Рис. 3.12. Демонстрация эффекта Казимира

ния между скоплениями галактик непрерывно возрастают, и это важнейший факт для понимания устройства мироздания. Определения скорости расширения – постоянной Хаббла, ее зависимости от времени остаются важнейшим предметом наземных и орбитальных наблюдений.

1 июля 2004 г. в 02:12 UT (06:12 по Москве) межпланетная станция **Cassini** шла на орбиту Сатурна.

Эта миссия в системе Сатурна принесла множество открытий, а пока вспомним, что **Cassini** успела сделать «по дороге к Сатурну».

Недавно открытая **Седна** (известная также как 2003 VB12), самый удаленный объект в Солнечной системе, вращающийся вокруг Солнца, представляет из себя загадку. Радиус орбиты Плутона составляет 40 AU, где 1 AU (Astronomical Unit – астрономическая единица) равна расстоянию от Земли до Солнца.

Принято считать, что основной вклад в интегральный поток космических лучей вносят взрывы сверхновых звезд.

На рис 3.15 показана область вокруг звезды, которая наблюдалась в 1006 го-

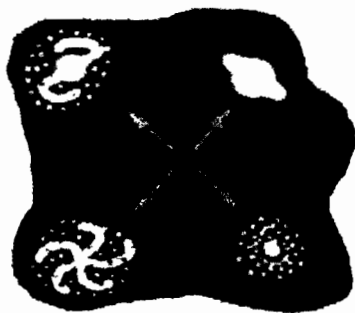


Рис. 3.13.

Расширение Вселенной



Рис. 3.14. Вид взорвавшейся
сверхновой

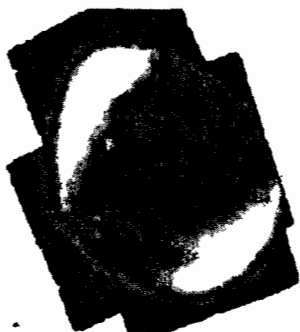


Рис. 3.15.
Сверхновая 1006 года

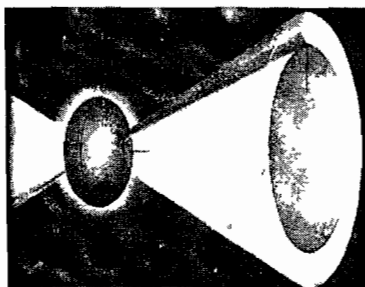


Рис. 3.16.
Пульсар – одна из последних фаз эволюции звезды

дукак сверхновая. Картинка составлена из перекрывающихся рентгеновских снимков. На ней видны ободки расширяющейся ударной волны от взорвавшейся звезды.

По наблюдениям ASCA, впервые было показано, что энергетический спектр ярких областей излучается электронами очень высокой энергии, летящими почти со скоростью света вдоль линий магнитного поля. Если (как ожидается) вместе с этими энергичными электронами летят и высокоэнергичные протоны, тогда будет доказано, что оболочки вспышек сверхновых типа сверхновой 1006 года являются источниками загадочных космических лучей Хесса.



Рис. 3.17. *Соотношение размеров нейтронной звезды в масштабе Москвы*

■ Источники космических лучей



Рис. 3.18. Сравнение размеров звезды на промежуточных этапах в процессе эволюции

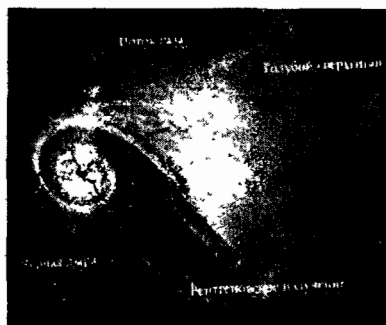


Рис. 3.19. Черная дыра – конечный этап эволюции звезды

π -мезоны нестабильны. Заряженные π^+ -мезоны, которые распадаются сравнительно не очень быстро (в среднем за $2,6 \cdot 10^{-8}$ сек), успевают частично взаимодействовать с другими ядрами атомов воздуха.

3.5. Распределение источников космических лучей сверхвысоких энергий. (Численный эксперимент)

В работе [11] представлены методы и результаты численного моделирования источников космических лучей сверхвысоких энергий в масштабе Вселенной, а также электро-

магнитных излучений при прохождении вторичных ядер через атмосферу Земли.

Однако, согласно проделанным оценкам, максимальная энергия, сообщаемая частицам в момент взрыва, не превышает сотни ТэВ. Следовательно, частицы с энергиями 10^{15} – 10^{20} эВ, наблюдаемые в эксперименте, получают дополнительную энергию в процессе блуждания в метagalacticком пространстве за счет различных механизмов ускорения. Согласно выводам в работе [11], достижение частицами предельно высоких энергий возможно за счет механизма ускорения заряженных частиц электромагнитными волнами.

$$E_0 = \gamma \left(\frac{n}{n_0} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (3.1)$$

где n – концентрация частиц в области захвата волной; n_0 – концентрация частиц на уровне наблюдения; γ – энергия частицы в момент захвата ее волной.

Учитывая изменение концентрации частиц с расстоянием от источника, получим зависимость энергии частицы от пройденного расстояния:

$$E_0 = \gamma K(R)^{\frac{3}{2}}, \text{ эВ.} \quad (3.2)$$

Зависимость потока частиц от энергии:

$$I(>E_0) = (k \pm dk) E^{\gamma \pm d\gamma}, \quad (3.3)$$

где γ – показатель спектра.

Нами проведено математическое моделирование по пространственному распределению источников космических лучей сверхвысоких энергий с учетом потерь при прохождении межзвездного вещества и увеличения энергии заря-

женных частиц при захвате в окрестности источника электромагнитными волнами.

Была решена обратная задача, постановка которой с априори монохроматическим ядерным составом частиц приводит к уравнению Фредгольма первого рода:

$$F(\xi) = \int W(E_0, A, \xi) \delta(A) j(E_0) dE_0, \quad (3.4)$$

где F – интегральное распределение параметра, W – функционал, включающий в себя функцию энергии частицы, зависящую от расстояния от источника излучения, A – массовое число, $j(E_0)$ – дифференциальный энергетический спектр.

Вычисление интеграла проводилось методом Монте-Карло с нижним энергетическим порогом $5 \cdot 10^{14}$ эВ.

Из предположения изотропности распределения материи в масштабе Вселенной разыграно $1,3 \cdot 10^6$ источников в кубе пространства со стороной 10^2 Мегапарсек.

Решая обратную задачу, для каждой разыгранной энергии получим расстояние от точки взрыва.

$$R = \left(\frac{E_0}{\gamma K} \right)^{\frac{2}{3}}, \text{ пс.} \quad (3.5)$$

То есть энергетический спектр преобразуется в спектр расстояний от источников генерации.

Полученная картина позволяет выделить четыре глобальных источника генерации космических лучей сверхвысоких энергий:

1. Звезды.
2. Галактики.
3. Скопления галактик.
4. Сверхскопления.

Таким образом, разыгранное распределение расстояний позволяет выделить следующие виды спектров:

1. Внутригалактический $E_0 > 10^{14} - 10^{15}$ эВ.

2. Галактический – генерирует частицы с энергиями более $5 \cdot 10^{15} - 10^{17}$ эВ.

3. Спектр скоплений галактик с $E_0 > 10^{19}$ эВ.

4. Спектр сверхскоплений с $E_0 > 10^{20}$ эВ.

То есть резкое изменение интенсивности потока частиц может быть вызвано утечкой частиц из сверхскопления с энергиями $E_0 > 10^{20}$ эВ.

Следует ожидать прихода частиц от других сверхскоплений с энергиями $E_0 > 10^{21}$ эВ.

Глава 4 | ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЧАСТИЦ СВЕРХВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ СО СРЕДОЙ

4.1. Электромагнитный каскад в атмосфере Земли.

Широкий атмосферный ливень (ШАЛ)

Поток космических частиц, попадающих в атмосферу Земли, взаимодействует с атомами и ядрами составляющих атмосферу газов, вызывая каскадные процессы потоков вторичных частиц, в свою очередь взаимодействующих с компонентами атмосферы за счет сильных ядерных, слабых ядерных и электромагнитных сил. Формирующиеся элект-

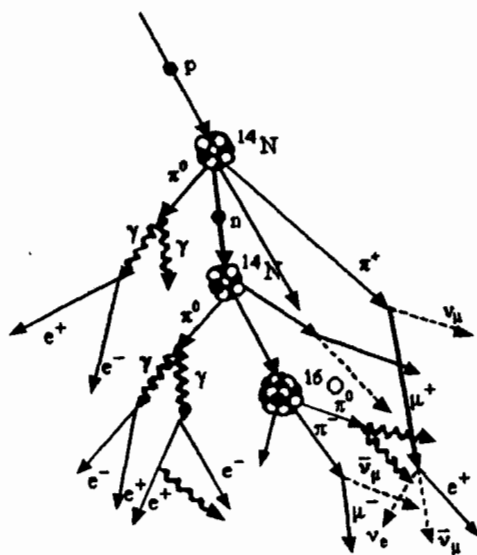


Рис. 4.1. Развитие ядерно-активного и электромагнитного каскада в атмосфере широкого атмосферного ливня (ШАЛ)

ромагнитные каскады вторичных частиц воздействуют на среду за счет механизмов поляризации и ионизации составляющих среду атомов.

Электромагнитный каскад в силу зарядовой асимметрии приобретает пространственное распределение и, попадая на уровень наблюдения, накрывает довольно большую площадь, что дает возможность при определенном распределении детекторов на этой площади по потоку вторичных частиц регистрировать каждую частицу, превышающую энергетический порог детектора.

Крупнейшие установки мира, такие как Якутская (Россия), Акено (Япония), Хавера Парк (Англия), «Мушинный глаз» (США), Сиднейская (Австралия) созданы с целью

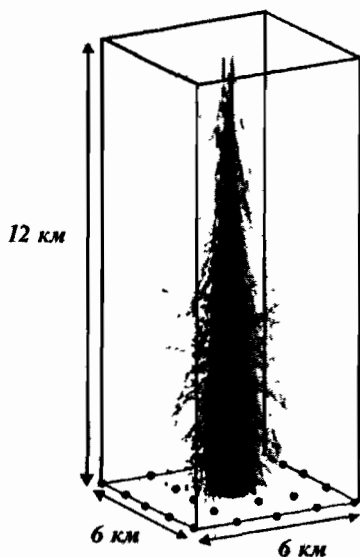


Рис. 4.2. Пространственное распределение компонент широкого атмосферного ливня.

Показан поток вторичных частиц, накрывающих установку.

решения задач по происхождению космических лучей сверхвысоких энергий, механизмов их ускорения путем измерения энергетического спектра и распределения по направлениям прихода частиц сверхвысоких энергий. 44 детектора электронной компоненты распределены по диагоналям шестигранника с радиусом относительно центра 0,5 км и 1,0 км.

В результате взаимодействия с ядрами атмосферы первичные космические лучи (в основном протоны) создают большое число вторичных частиц — *пионов, протонов, нейтронов, мюонов, электронов, позитронов и фотонов*. Таким образом вместо одной первичной частицы возникает большое число вторичных частиц, которые делятся на адронную, мюонную и электронно-фотонную компоненты. Такой каскад покрывает большую территорию и называется **широким атмосферным ливнем**. Для ядер гелия (α -частиц) пробег взаимодействия X составляет около 25 г/см^2 , для более тяжелых ядер — еще меньше. Первое взаимодействие ($\lambda = 70 \text{ г/см}^2$) протоны испытывают в среднем на высоте око-

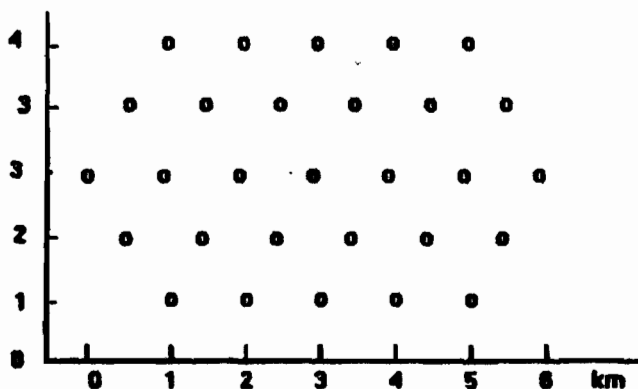


Рис. 4.3.

План Якутской комплексной установки ШАЛ.
Кружки — сцинтилляционные детекторы.

ло 20 км. Толщина всей атмосферы составляет 1000 г/см, то есть примерно 15 ядерных пробегов для протонов. Поэтому вероятность достичь поверхности Земли, не испытывая столкновений, для первичной частицы ничтожно мала. Небольшое количество первичных протонов можно наблюдать лишь на высоких горах. Но для наблюдения первичных ядер более тяжелых элементов уже необходимо поднимать приборы в верхние слои атмосферы, например, на шарах-зондах.

Протон, испытавший ядерное столкновение, теряет в среднем от 30 до 50% первоначальной энергии. В результате основная часть протонов первичных космических лучей со средней энергией около 10^7 ГэВ после нескольких ядерных столкновений замедляется и в дальнейшем быстро теряет оставшуюся энергию на ионизацию атомов воздуха. Лишь протоны с первичной энергией в несколько сотен гигаэлектронвольт и выше могут достичь земной поверхности, однако число таких протонов относительно мало. Таким образом, первичные частицы очень быстро растрачивают свою энергию в атмосфере. Она распределяется между многими вторичными частицами, число которых лавинообразно нарастает по мере углубления в атмосферу.

Размножение частиц продолжается до тех пор, пока энергия отдельных частиц не уменьшится примерно до сотни мегаэлектронвольт.

При меньших энергиях рождение новых частиц становится маловероятным по сравнению с другими видами потерь энергии.

Эти частицы нестабильны. Заряженные π -мезоны, которые распадаются сравнительно не очень быстро (в среднем на $2,6 \cdot 10^{-8}$ сек), успевают частично взаимодействовать с другими ядрами атомов воздуха и снова вызвать такие же



Рис. 4.4. Макет Якутской установки ШАЛ.
Установка расположена на дне старого русла реки Лена
в 75 км от Якутска. Площадь установки 20 км²

ядерные процессы, как и первичные частицы. Часть заряженных π -мезонов распадается, не успев вступить в ядерные взаимодействия. В результате распада заряженных π -мезонов образуются μ -мезоны и ν -нейтрино. Среди частиц, образующихся непосредственно в акте ядерного взаимодействия, главную роль играют π -мезоны. Помимо них образуются также пары протон-антипротон, нейтрон-антинейтрон и нестабильные частицы: К-мезоны и гипероны. Однако в развитии «ливней» частиц, как и в полном энергетическом балансе, роль их по сравнению с π -мезонами невелика.

В одном акте взаимодействия протон обычно теряет — 50% своей энергии, а в результате взаимодействия возникают в основном пионы. Каждое последующее взаимодействие первичной частицы добавляет в каскад новые адроны, которые летят преимущественно по направлению первичной частицы, образуя адронный компонент ливня.

Образующиеся пионы могут взаимодействовать с ядрами атмосферы, а могут распадаться, формируя мюонную и электронно-фотонную компоненты ливня. Адронная компонента до поверхности Земли практически не доходит, превращаясь в мюоны, нейтрино и γ -кванты.

$$\pi^0 \rightarrow 2\gamma,$$

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu,$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu,$$

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu,$$

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu.$$

Образующиеся при распаде нейтральных пионов γ -кванты вызывают каскад электронов и γ -квантов, которые в свою очередь образуют электрон-позитронные пары. Заряженные лептоны теряют энергию на ионизацию и радиационное торможение. Поверхности Земли в основном достигают релятивистские мюоны. Электронно-фотонная компонента поглощается сильнее.

Один протон с энергией $> 10^{14}$ эВ может создать 10^6 – 10^9 вторичных частиц. На поверхности Земли адроны ливня концентрируются в области порядка нескольких метров, электронно-фотонная компонента – в области ~ 100 м, мюонная – нескольких сотен метров. Поток космических лучей на уровне моря примерно в 100 раз меньше потока первичных космических лучей ($0,01 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$).

4.2. Электромагнитные вспышки

Процессы когерентной деполяризации атомов, рекомбинации и прилипания электронов вызывают потоки излучения Вавилова–Черенкова, ионизационного и радиоизлучений.

Важнейшей характеристикой состояния атмосферы Земли является ее пропускание потоков электромагнитных излучений в различных частотных диапазонах.

В работе рассмотрены основные два вида электромагнитных излучений в атмосфере: в видимом диапазоне и в радио- очень низкочастотном диапазоне (ОНЧ).

При взаимодействии первичных частиц с ядрами атмосферы в результате развития электромагнитного каскада поток вторичных релятивистских частиц (широкие атмосферные ливни – ШАЛ) генерирует электромагнитную вспышку в атмосфере. Интенсивность потока электромагнитных вспышек в атмосфере идентифицирует интенсивность частиц сверхвысоких энергий, что позволяет прямым методом измерять энергетический спектр космических лучей.

■ Излучение Вавилова-Черенкова

Этот эффект открыт в 1934 г. советскими физиками П.А. Черенковым и С.И. Вавиловым – излучение электромагнитных волн носителем электрического заряда, движущимся со скоростью v , превышающей фазовую скорость:

$$u = \frac{c}{n},$$

где c – скорость света в вакууме; n – показатель преломления среды, то условием возникновения излучения будет $v > u$,

или $\beta n > 1$, где $\beta > \frac{v}{c}$.

При движении электрического заряда в среде вокруг него образуется область поляризации (смещение электронов), которая как бы отрывается от самого заряда из-за меньшей скорости распространения возмущений и образует электромагнитную волну. В отличие от тормозных механизмов излучения здесь мощность излучения определяется скорос-

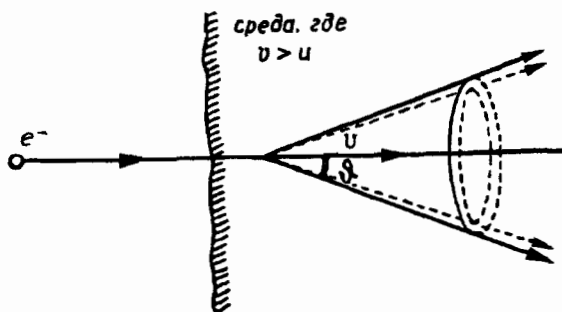


Рис. 4.5. Механизм излучения Вавилова-Черенкова

тью, а не ускорением частиц. Излучение концентрируется вокруг конуса, ось которого совпадает с направлением скорости частицы, а угол θ между фронтом волны (образующей конуса) и осью конуса определяется соотношением:

$\cos \theta = \frac{1}{\beta n}$. Излучение поляризовано – электрический вектор электромагнитных колебаний направлен вдоль направления движения частиц, вызывающих излучение.

Задача по измерению спектра плотностей черенковского излучения ШАЛ требует применения весьма высокочувствительной аппаратуры. Чувствительность же аппаратуры определяется как минимум трехкратным превышением зарегистрированного полезного сигнала над флуктуациями шумов.

Рассматривая два детектора с одинаковой квантовой эффективностью фотоумножителей и одинаковым телесным углом обзора, можно сравнить их чувствительности. Отсюда видно, что повысить чувствительность можно двумя путями:

1. Увеличить площади светосбора детекторов.
2. Улучшить разрешающую способность аппаратуры. Увеличение площади светосбора в данном эксперименте проведено за счет увеличения количества фотоумножителей.

Улучшение же разрешающей способности аппаратуры с логарифмической системой преобразования сигнала – за счет использования линейного пропускателя, разработанного автором.

По потоку черенковских вспышек в пятнадцатиминутные временные интервалы получены спектры плотностей черенковского излучения ШАЛ и энергетический спектр потока частиц в диапазоне сверхвысоких энергий.

В результате таких преобразований с помощью большого оптического детектора получена интегральная скорость счета полезных сигналов, достаточная для измерения спектров плотностей черенковского излучения ШАЛ с пятнадцатиминутной экспозицией со статистической погрешностью 10%.

Прозрачность атмосферы при регистрации черенковского излучения на уровне наблюдения можно определить как отношение регистрируемой плотности (Q_i) потока черенковского света к излучаемой (Q_0):

$$T_i = \frac{Q_i}{Q_0}. \quad (4.1)$$

Для относительных измерений мы использовали понятие калибровочной прозрачности T_0 (то есть прозрачности, соответствующей наилучшей видимости).

Тогда изменение прозрачности относительно калибровочной можно выразить через изменение регистрируемой плотности:

$$\frac{T_i}{T_1} = \frac{Q_i}{Q_1}, \quad (4.2)$$

где Q_1 – плотность потока черенковского света ШАЛ, зарегистрированная при наилучших условиях видимости.

При переходе к интегральному спектру плотностей черенковского излучения ШАЛ флуктуации плотности потока черенковского света можно представить через флуктуации интегральной интенсивности спектра:

$$\frac{Q_i}{Q_1} = \left(\frac{N_i}{N_1} \right)^{\frac{1}{\alpha}}, \quad (4.3)$$

где α – показатель интегрального спектра; $\frac{N_i}{N_1}$ – флуктуации интегральной интенсивности спектра.

То есть регистрируемую в данный временной интервал прозрачность атмосферы можно представить через измеряемый в это же время поток черенковского излучения ШАЛ:

$$T_i = T_1 \left(\frac{N_i}{N_1} \right)^{\frac{1}{\alpha}}. \quad (4.4)$$

Мы провели сравнение данных по флуктуациям интегральной интенсивности спектров плотностей черенковского излучения ШАЛ с данными метеостанции по дальности видимости. Калибровочную же прозрачность по теории ослабления можно найти из уравнения Бугера:

$$T_1 = \exp \left\{ -k(S_m) \cdot \frac{L}{S_{m1}} \right\}. \quad (4.5)$$

Спектр аппроксимируется функциями:

$$I(>Q) = 1,9 \cdot 10^{-6} \left(\frac{Q}{10} \right)^{-1,5 \pm 0,03}, \quad c^{-1} \cdot cp^{-1}; \quad 17 < Q < 60; \quad (4.6)$$

$$I(>Q) = 7,1 \cdot 10^{-6} \left(\frac{Q}{10} \right)^{-2,12 \pm 0,04}, \quad c^{-1} \cdot cp^{-1}; \quad 100 < Q < 1480.$$

Полученная зависимость $\frac{N_i}{N_1}(S_{m1})$ имеет степенной характер и после анализа по методу наименьших квадратов аппроксимируется функцией:

$$\frac{N_i}{N_1} = (0,175 + 0,02) \cdot S_m^{0,33 \pm 0,02}, \quad 4 < S_m < 50 \text{ км.} \quad (4.7)$$

Экстраполируя эту зависимость до значений $\frac{N_i}{N_1} = 1$, то есть до $N_i = N_1$ — максимальной интегральной интенсивности, характеризующей калибровочную прозрачность, получим значение дальности видимости: $S_{m1} = 200 \pm 60 \text{ км.}$

Таким образом, из интегрального спектра плотностей черенковского излучения ШАЛ был получен первичный спектр, охватывающий диапазон энергий от $2 \cdot 10^{15}$ эВ до 10^{17} эВ. Спектр аппроксимируется функциями:

$$F(> E_0) = 1,8 \cdot 10^{-10} \cdot \left(\frac{E_0}{10^{15}} \right)^{-1,6 \pm 0,04}, \quad \text{см}^{-2} \text{с}^{-1} \text{ср}^{-1}; \quad (4.8)$$

$$2 \cdot 10^{15} < E_0 < 5 \cdot 10^{15} \text{ эВ.}$$

■ Поток ионизационных вспышек в атмосфере

Этот метод регистрации ШАЛ предполагает регистрацию свечения, возникающего при ионизации атмосферы заряженными частицами ливня.

При давлении атмосферы свыше 100 г/см^2 , то есть на высотах менее 15 км, на которых начинается развитие ШАЛ, интенсивность ионизационного свечения, выраженная в числе фотонов на единицу пути заряженной частицы, явля-

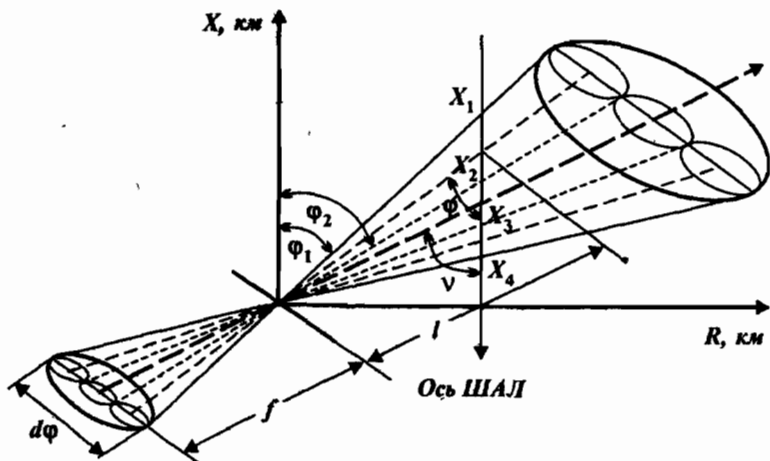


Рис. 4.6. Схема принципа действия макета УИС-М

ется постоянной. Постоянство интенсивности объясняется тем, что, несмотря на увеличение энергии возбуждения молекул по мере углубления ШАЛ в атмосферу, происходит уменьшение времени между столкновениями и становится заметным гашение за счет безызлучательных переходов при столкновении возбужденных молекул азота с молекулами кислорода или азота. Абсолютная величина интенсивности зависит в первую очередь от того, каков спектр ионизирующего излучения. Спектр ионизирующего излучения простирается от 300 нм до 500 нм и имеет несколько пиков в этом интервале. Наибольшая интенсивность излучения в области 400 нм, где площадь пика составляет 25% от всего спектра излучения.

**■ Поток очень низкочастотных (ОНЧ)
радиовспышек и космические лучи
сверхвысоких энергий**

Введение

Исследование интенсивности потока первичных частиц сверхвысоких энергий посредством измерения потока ОНЧ радиовспышек, генерируемых широкими атмосферными ливнями (ШАЛ), в настоящее время наиболее перспективно, доступно и интересно.

Поток космических лучей сверхвысоких энергий создает в атмосфере Земли поток лавин вторичных частиц, которые в свою очередь генерируют поток ОНЧ радиоимпульсов. Этот поток распространяется в волноводе Земля-ионосфера с очень малым затуханием, что дает возможность детектировать частицы сверхвысоких энергий на очень больших расстояниях от оси ШАЛ.

Механизм ОНЧ излучения

Известно, что при движении через атмосферу Земли релятивистские частицы ШАЛ в результате процессов ионизации атомов кислорода и азота создают ионизационный след с временем жизни около 10^{-3} сек.

Регулярная вертикально направленная составляющая напряженности электрического поля Земли создает электрический ток в столбе ионизации за счет ускорения ионов азота и кислорода. Плотность тока определяется по формуле:

$$j = \frac{e2En \cdot t}{2M},$$

где e – заряд электрона; E – напряженность электрического поля Земли; M – масса ионов; n – концентрация плазмы;

t – время жизни трека. Тогда ток ионов в столбе ионизации:

$$I_s = \int j dS = \int \left[\frac{e2En \cdot t}{2M} \right] \pi r dr,$$

где r – расстояние от оси ливня.

Концентрация плазмы в столбе ионизации определяется пространственным распределением частиц ШАЛ:

$$N(x) = i \int f(x, t, \theta) dx, \quad (4.9)$$

где i – коэффициент линейной ионизации: $i = 80 \text{ см}^{-1}$ [9];

$f(x)$ – функция пространственного распределения частиц ШАЛ (ФПР);

t – глубина атмосферы;

θ – зенитный угол ливня.

ФПР [1–3]:

$$f(x, t, \theta) = \frac{1}{2\pi r_0^2} \cdot \frac{(1+x)^{1-b}}{\lambda+x} \cdot N(E_0, t, \theta), \quad (4)$$

где N – полное число частиц на уровне наблюдения [1]:

$$\lg N(E_0, t, \theta) = \lg \rho_{600} + 4,44 - \lg(b-2) + 0,98b. \quad (5)$$

b – параметр ФПР [1–4]:

$$b = 3,54 - 2,16(1 - \cos \theta) + 0,15 \lg \rho_{600}.$$

$x = \frac{r}{r_0}$ – относительное расстояние от оси ливня; r_0 – па-

раметр ФПР; E_0 – энергия первичной частицы [1]:

$$E_0 = 4,1 \cdot 10^{17} \rho_{600}^{0,96}. \quad (6)$$

ρ_{600} – классификационный параметр установки.

Плазменный шнур с ионным током можно считать элементарным вибратором. Для ШАЛ с энергией первичной частицы $> 10^{18} - 10^{19}$ эВ можно рассчитать эффективную дли-

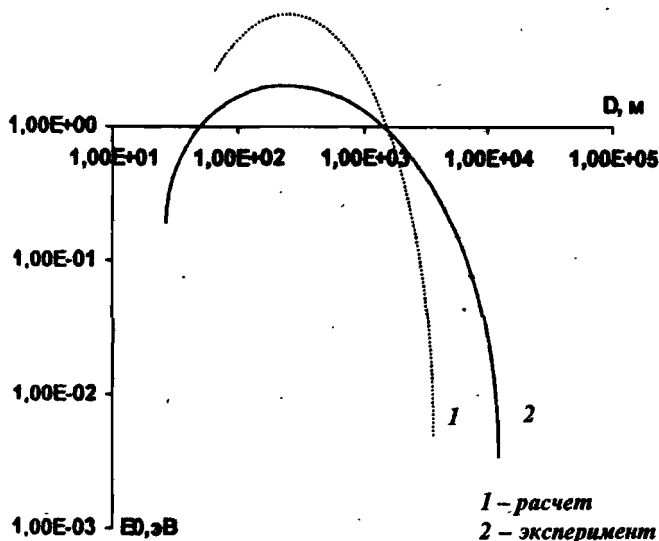


Рис. 4.7. Зависимость напряженности поля волны от расстояния от оси ливня

ну шнура, а следовательно, вибратора. Оценку напряженности поля волны можно получить из классических уравнений для частоты излучения 10^3 – 10^4 сек⁻¹ [6].

Рассчитанная напряженность поля волны в зависимости от расстояния от оси ливня сравнивалась с экстраполяцией данных работы [9]. Видно хорошее согласие результатов.

Экспериментальные данные

Из приведенных оценок видно, что рассмотренный механизм ОНЧ излучения является наиболее достоверным. Можно предположить, что космические лучи сверхвысоких энергий вносят существенный вклад в общий уровень естественных ОНЧ импульсов в приземном слое. С этой целью проведено сравнение экспериментальных данных по иссле-

дованию потока ОНЧ импульсов на Чукотке (Мыс Шмидта) и на Аляске (Барроу) [8].

Измерение потока атмосфериков на Чукотке проводилось на восьми частотных каналах в диапазоне частот $(0,5-10) \cdot 10^3 \text{ сек}^{-1}$ [8]. Полученные плотности потока сигналов наилучшим образом аппроксимируются степенной функцией с показателем:

$$\gamma = 1,84 \pm 0,05.$$

Для различных сезонов получены значения:

- июль: $\gamma = 1,84 \pm 0,05$;
- сентябрь: $\gamma = 1,94 \pm 0,08$;
- декабрь: $\gamma = 2,00 \pm 0,07$.

Спектр плотностей потока атмосфериков есть функция числа событий от напряженности электрического поля волны. Сравнивая с энергетическим спектром плотности потока космических лучей сверхвысоких энергий, можно заметить аналогию не только в показателях (для частиц с $E_0 = 10^{18}-10^{19} \text{ эВ}$ ($\gamma = 2,0 \pm 0,7$), но и в аргументах этих функций $\{I(>E_0) = \kappa I(> E_v)\}$. Это видно из следующих соотношений. Ток в столбе ионизации пропорционален мощнос-

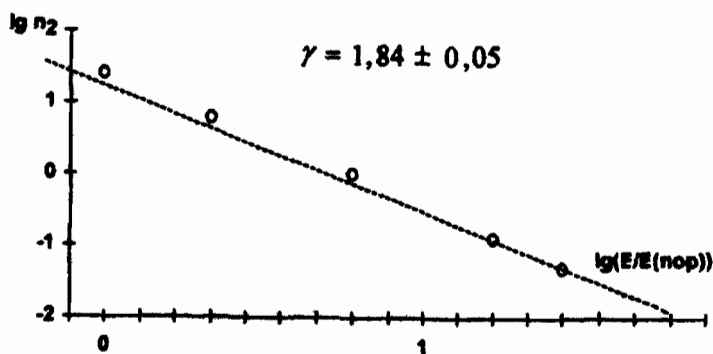


Рис. 4.8. Плотность потока ОНЧ радиоимпульсов

ти ливня: $I = \kappa P$, то есть энергии первичной частицы (E_0). В то же время ток пропорционален напряженности поля волны: $I = \kappa E_v$. То есть $E_0 = \kappa E_v$. Поэтому была поставлена задача получить зависимость $E_0(E_v)$ и идентифицировать энергетический спектр по спектру плотностей напряженности электрического поля волны, излученной ШАЛ.

Численный эксперимент

С этой целью был проведен численный эксперимент по исследованию потока атмосфериков. В численном эксперименте были воссозданы аналогичные с реальным экспериментом условия.

Энергия частицы, расстояние и зенитный угол генерировались как случайные числа, после чего рассчитывалась напряженность поля волны. При распространении в волноводе Земля–ионосфера рассчитывалось затухание ОНЧ сигнала. Учитывая заложенный порог чувствительности аппаратуры, производился отбор событий и строился спектр плотностей потока атмосфериков.

1. Функция распространения (ФР) ОНЧ излучения.

Для реализации заданного алгоритма численного эксперимента был выведен аналитический вид функции распространения (ФР) ОНЧ импульсов в приземном слое.

С этой целью были проанализированы данные [6] – зависимость напряженности электрического поля волны от частоты излучения для различных расстояний. Пользуясь экстраполяцией, эти данные были преобразованы в зависимости электрического поля волны от расстояния для восьми частот, на которых производились измерения в нашем эксперименте.

Были получены гладкие выпуклые кривые, хорошо аппроксимирующиеся параметрическими функциями.

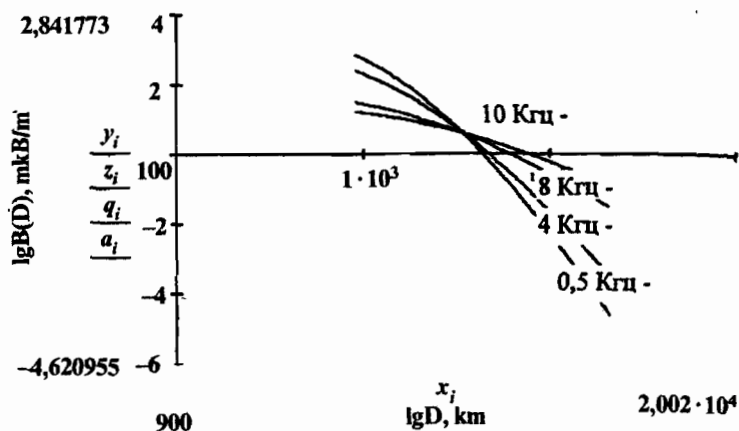


Рис. 4.9 Функция распространения ОНЧ импульсов

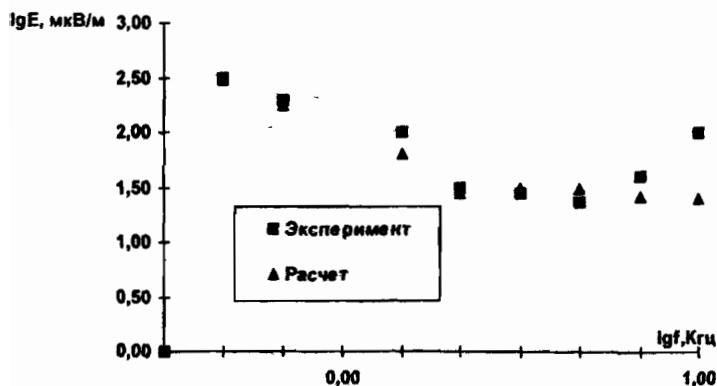


Рис. 4.10. Амплитудный спектр ОНЧ излучения

$$B(f, D) = K(f)(1,5 + x)^{-1} \cdot (1 + x)^{-bD}, \quad (4.12)$$

где $x = D/D_0$ – относительное расстояние от источника излучения;

$$b(f) = (11,0 \pm 0,6) \cdot \exp[(6,8 \pm 0,4)10^4 \cdot \{1 - ((\lg f + 92,6)/92,9) + \ln((\lg f + 92,6)/92,9)\}], \quad (4.13)$$

$$K(f) = (114,0 \pm 6,0) \cdot \exp[(4,3 \pm 0,2)10^4 \cdot \{1 - ((\lg f + 92,6)/93,3) + \ln((\lg f + 92,6)/93,3)\}]. \quad (4.14)$$

В результате оптимизации функции распространения получены зависимости от частоты параметров b , κ . Сравнение полученной аппроксимации с данными [6] показывает хорошее согласие.

Таким образом, в математическую модель численного эксперимента был заложен функционал:

$$F(X) = W[X, U(A)], \quad (4.15)$$

где W – оператор, устанавливающий причинно-следственную связь между $U(A)$ и $F(X)$.

Функция $F(X)$ описывает следствие некоторого процесса, причина которого определяется функцией $U(A)$.

Решая обратную задачу, по наблюдаемым следствиям $F(X)$ отыскивают причину $U(A)$.

На Мысе Шмидта при исследовании потока ОНЧ импульсов были получены две экспериментальные функции.

В первом случае исследовался амплитудный спектр излучения, который можно описать функцией вида:

$$E_v(f, D) = W[A(f), B(f, D), \Phi(\Gamma)], \quad (4.16)$$

где $A(f)$ – спектр источника излучения; D – расстояние от источника излучения, $\Phi(\Gamma)$ – аппаратная функция.

Во втором случае измерялась интегральная интенсивность потока дискретных сигналов:

$$I(>E_{\text{пор}}) = K \int W[A(f), B(f, D), \Phi(\Gamma)] dW. \quad (4.17)$$

Во втором случае из распределения интенсивности потока сигналов в некотором частотном диапазоне можно в определенном приближении получить амплитудный спектр эффективного источника, представляющего из себя набор источников различной мощности, а из распределения расстояний до этих источников – эффективное расстояние локализации излучения. Варьируя параметры функции распространения при решении интеграла (12) и сравнивая полученный из распределения интенсивностей потока амплитудный спектр с экспериментально измеренным, был получен аналитический вид интегральной функции.

2. Плотность потока ОНЧ импульсов.

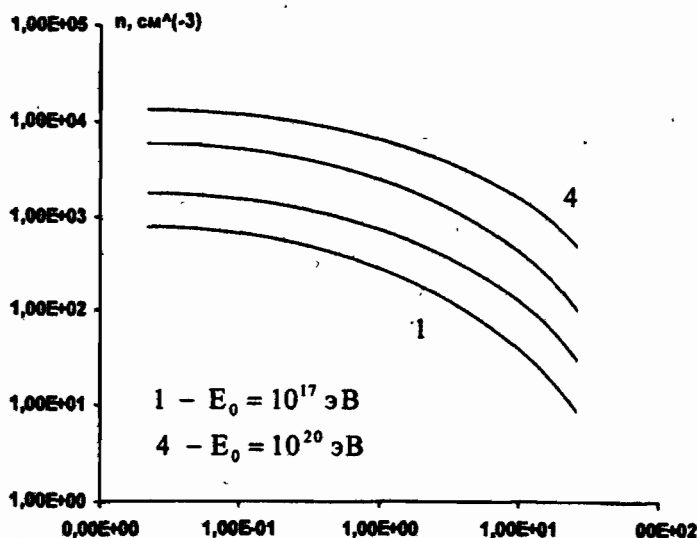


Рис. 4.11. Концентрация плазмы в треке

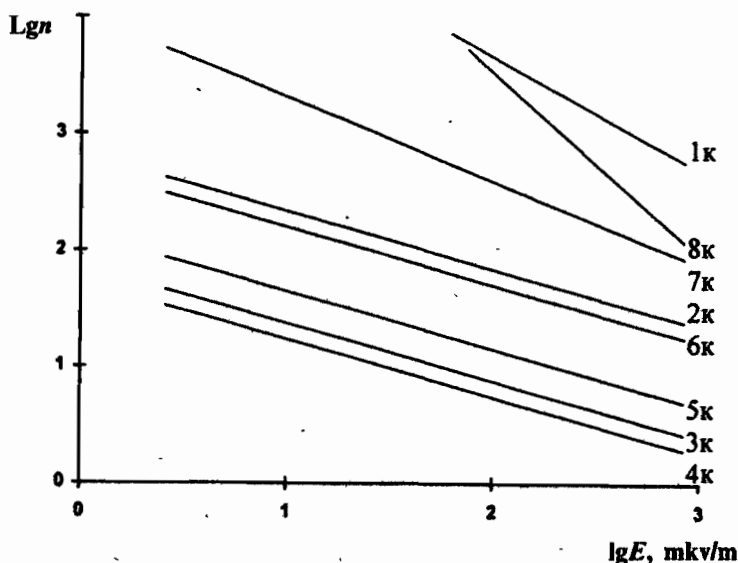


Рис. 4.12. Результаты математического моделирования по спектру плотностей ОНЧ волн

В математическую модель численного эксперимента по исследованию плотности потока атмосфериков был заложен первичный энергетический спектр [1]. Решение этого интеграла проводилось методом Монте-Карло. В результате розыгрыша был получен спектр плотностей потока атмосфериков, нормированный на экспериментально измеренный.

Результаты эксперимента

В результате проведенного моделирования получена связь энергетического спектра первичных частиц и спектра потока атмосфериков. Этот коэффициент связи отображает зависимость энергии первичной частицы от напряженности электрического поля ОНЧ волны:

$$E_0 = 2,36 \cdot 10^{17} E_{\gamma}, \text{ эВ.} \quad (4.18)$$

С помощью найденной зависимости потока атмосфериков с потоком космических лучей был построен энергетический спектр первичных частиц по спектру плотностей потока атмосфериков.

Полученный спектр хорошо согласуется с результатами измерений [1], а также с измерениями на различных установках мира в диапазоне $3 \cdot 10^{18} < E_0 < 3 \cdot 10^{19}$ эВ с интегральным показателем $\gamma = 2,16$.

Это согласуется с данными [1]: $\gamma = 2,2$ для $E_0 = 10^{18}$ эВ.

Заключение

Можно сделать следующие выводы:

1. Полученная в численном эксперименте площадь регистрации: $S = 6 \cdot 10^{13} \text{ м}^2$.

Площадь же регистрации крупнейших установок мира $S = 2 \cdot 10^7 \text{ м}^2$.

2. Эффективное расстояние регистрации для ливней с $E_0 = 7 \cdot 10^{18}$ эВ составляет $D = 4,4 \cdot 10^3 \text{ км}$.

Для оцененного расстояния и чувствительности аппаратуры около 1 мкВ/м энергетический порог регистрации составляет $E_{\text{опор}} = 10^{17}$ эВ.

На основании этих данных интенсивность потока атмосфериков, генерируемых частицами сверхвысоких энергий, равна:

$$I = F(10^{17}) S_{\phi} = 6 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1}.$$

Сравнивая полученный результат с интенсивностью молний, являющихся альтернативными источниками атмосфериков, составляющей $5 \cdot 10^2 \text{ сек}^{-1}$, можно заключить, что измеренный в эксперименте [8] поток ОНЧ радиоимпульсов на 90% порожден частицами сверхвысоких энергий при их взаимодействии с атмосферой Земли.

Таким образом, из вышеизложенного следует, что огромная площадь регистрации позволит измерить интенсивность космических лучей с энергией первичной частицы более 10^{20} эВ.

При этом ожидаемая статистика является достаточной для исследования таких фундаментальных вопросов, как резкий обрыв спектра в области 10^{20} эВ, вопросы анизотропии, поиск глобальных источников излучения частиц сверхвысоких энергий.

ЛИТЕРАТУРА |

Основная литература

1. Григорьев В.М., Глушков А.В., Сокуров В.Ф. и др. Характеристики сверхмощных ШАЛ на уровне моря. Изв. АН СССР, сер.: Физ. Т. 42. № 7. М., 1978, 6 с.

2. Sokurov V.F., Efimov N.N. The Measurement EAS Cerenkov Light Density Spectra. Proc. 16th ICCR. Kyoto, 1979, 8 p.

3. Сокуров В.Ф., Махмудов Б.М., Алимов Т.А. Исследование функции пространственного распределения черенковского излучения ШАЛ на установке Сам. ГУ. Изв. АН СССР, сер.: Физ. Т. 9, с. 1813. М., 1982, 3 с.

4. Сокуров В.Ф. Исследование первичного энергетического спектра космических лучей в интервале 10^{15} – 10^{17} эВ и прозрачности атмосферы по спектру плотностей черенковского излучения ШАЛ / Автореферат дис. на соиск. уч. степ. канд. физ.-мат. наук. Спец. Совет МГУ им. Ломоносова. М., 1983, 32 с.

5. Dimmshtein O.S., Efimov N.N., Sokurov V.F. et. el. The Futher Development of the lakutsk EAS Array and the Metodical Problems. Proc 13th ICCR. Denver, USA. 1973, 8 p.

6. Альперг Я.Л., Гусева А. Г., Флигель Д.С. Распространение низкочастотных электромагнитных волн в волноводе Земля – ионосфера. М.: Наука, 1967, с. 123.

7. Сокуров В.Ф. Результаты исследования спектра плотностей черенковского излучения ШАЛ. – В кн.: Космические лучи с энергией выше 10^{17} эВ. Якутск: изд. ЯФ СО АН СССР, 1983, с. 16–61.

8. Гусев А.Н., Сокуров В.Ф., Черныш Г.Н. Плотность потока дискретных сигналов в овале полярных сияний. В кн.: Школа-семинар по ОНЧ излучениям. Якутск: изд. ЯФ СО АН СССР, 1985.

9. *Suga K., Kakimoto F., Nishi K.* Radio Signals from very Large Showers. Proc. 19th ICCR, 1985, v. 7, p. 268–271.

10. *Diminshtein O.S., Diakonov M.N., Sokurov V.F. et.* Cerenkov Radiation of the EAS Superhigh Energy. Proc. 15th ICCR, v. 8. Plovdiv, 1977, 4 p.

11. *Сокуров В.Ф.* Проблемы физики сверхвысоких энергий. М.: Деп. в ВИНТИ. 26.05.93. № 1439-И93. 1993, 385 с.

12. *Сокуров В.Ф.* Радиоизлучение ШАЛ экстремально высоких энергий в ОНЧ диапазоне. В кн.: Широкие атмосферные ливни с энергией выше 10^{17} эВ. Якутск: изд. ЯФ СО АН СССР, 1987.

Дополнительная литература

1. *Стожков Ю.И.* Космические лучи в атмосфере Земли.

2. *Петрукович А., Зеленый Л.* У природы есть и космическая погода.

3. *C. Caso et al.* The European Physical Journal C3 (1998) 1 (Cosmic Rays by T.K. Gaisser and T. Stanev).

4. What are cosmic rays? (Laboratory of Hight Energy Astrophysics at NASA).

5. *Кочаров Е.* Экспериментальная палеоастрофизика: достижения и перспективы.

ПРИЛОЖЕНИЕ |

Расчет детектора ионизационного излучения

При заданных координатах точки пересечения ливня с поверхностью Земли $K(0, B_1, C_1)$ (рис. 5.1), заданных углах – зенитном и азимутальном (θ и φ), параметрах установки, можно найти координаты точек пересечения ливня с апертурой установки. Ливень аппроксимируем пространственной прямой СК, апертуру установки – поверхностью конуса.

Уравнение прямой СК можно получить, найдя линию пересечения плоскости ОКС и КСВ (рис. 5.1).

Уравнение плоскости ОКС по трем точкам: $O(0, 0, 0)$; $K(0, B_1, C_1)$; $C(B_1 \cdot \operatorname{tg} \sigma / \cos \varphi, 0, C_1 - B_1 \cdot \operatorname{tg} \varphi)$:

$$\begin{vmatrix} X & Y & Z \\ 0, & B_1, & C_1 \\ B_1 \cdot \operatorname{tg} \sigma / \cos \varphi & 0 & C_1 - B_1 \cdot \operatorname{tg} \varphi \end{vmatrix} = 0; \quad (5.1)$$

Для плоскости ВКС:

$B(0, 0, -B_1 \cdot \operatorname{tg} \varphi)$; $K(0, B_1, C_1)$; $C(B_1 \cdot \operatorname{tg} \sigma / \cos \varphi, 0, C_1 - B_1 \cdot \operatorname{tg} \varphi)$:

186

$$\begin{vmatrix} X & Y & Z - (C_1 - B_1 \cdot \operatorname{tg} \varphi) \\ 0, & B_1, & B_1 \cdot \operatorname{tg} \varphi \\ B_1 \cdot \operatorname{tg} \sigma / \cos \varphi & 0 & 0 \end{vmatrix} = 0; \quad (5.2)$$

Уравнение конуса:

$$\frac{X^2}{a^2} + \frac{Y^2}{b^2} - \frac{Z^2}{c^2} = 0. \quad (5.3)$$

Решая определители (5.1), (5.2), получим систему уравнений:

$$\begin{cases} XB_1 \cdot (C_1 - B_1 \cdot \operatorname{tg} \varphi) + Y \cdot B_1 \cdot \operatorname{tg} \sigma / \cos \varphi - Z \cdot B_1^2 \cdot \operatorname{tg} \sigma / \cos \varphi = 0, \\ Y \cdot B_1^2 \cdot \operatorname{tg} \sigma \operatorname{tg} \varphi / \cos \varphi - Z \cdot B_1^2 \cdot \operatorname{tg} \sigma / \cos \varphi + (C_1 \cdot B_1 \cdot \operatorname{tg} \varphi) B_1^2 \cdot \operatorname{tg} \sigma / \cos \varphi = 0, \\ \frac{X^2}{a^2} + \frac{Y^2}{b^2} - \frac{Z^2}{c^2} = 0. \end{cases} \quad (5.4)$$

Обозначим: $B_1 \cdot \operatorname{tg} \sigma / \cos \varphi = \Gamma$; $C_1 \cdot B_1 \cdot \operatorname{tg} \varphi = P$.

Решая систему (5.4), найдем координаты точек $D(A_2, B_2, C_2)$; $E(A_3, B_3, C_3)$.

Проектируя на фокальную плоскость мозаики ФЭУ, получим прямую $D'E'$ с координатами:

$$\begin{aligned} D'(A'_2, B'_2, C'_2); E'(A'_3, B'_3, C'_3); \\ D'(A_2 F / C_2, B_2 F / C_2, F); E'(A_3 F / C_3, B_3 F / C_3, F). \end{aligned} \quad (5.6)$$

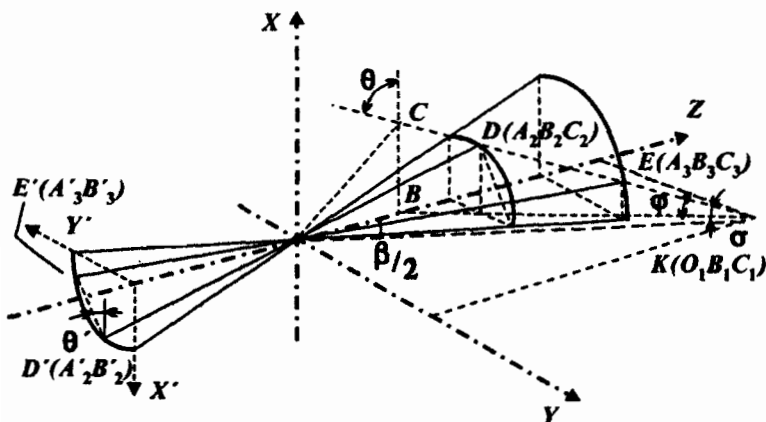


Рис. 5.1. Диаграмма направленности детектора ионизационного излучения и пространственное положение траектории ливня:

$СК$ – траектория ливня;

$ДЕ$ – проекция участка траектории ливня, прошедшего через апертуру установки на фокальную плоскость линзы;

F – фокусное расстояние линзы Френеля.

Перенесем центр координат в точку О. Уравнение проекции ливня на фокальной плоскости будет:

$$Y' = \{(A'_2 - A'_3)/B'_1 - B'_2\} \cdot X' + B_1 F / C_1. \quad (5.7)$$

Подставляя значение A'_2, A'_3, B'_2, B'_3 , получим:

$$Y' = \{C_3 \cdot (A_2 - A_3) / C_2 \cdot (B_3 - B_2)\} \cdot X' + B_1 F / C_1. \quad (5.8)$$

Уравнение фотокатодов в фокальной плоскости:

$$X'^2 + y'^2 - 2a'x' - 2b'y' + a'^2 + b'^2 - R^2 = 0. \quad (5.9)$$

Из (5.8) и (5.9) получим систему уравнений:

$$\begin{cases} X'^2 + y'^2 - 2a'x' - 2b'y' + a'^2 + b'^2 - R^2 = 0, \\ x'C_3 \cdot (A_2 - A_3) - y'C_2 \cdot (B_3 - B_2) + \frac{B_1 F}{C_1} \cdot C_2 (B_3 - B_2) = 0, \end{cases}$$

где R – радиус фотокатода; a', b' – координаты ФЭУ на фокальной плоскости.

Таким образом, на каждом фотокатоде имеем две точки пересечения:

$$K'(A'_4, B'_4); \quad B'(A'_5, B'_5).$$

Длина каждого отрезка будет:

$$K'B' = \sqrt{(A'_4 - A'_5)^2 + (B'_5 - B'_4)^2}. \quad (5.11)$$

Проекция на плоскость $Z = C_2$:

$$KB = \sqrt{(A'_4 - A'_5)^2 + (B'_5 - B'_4)^2} \cdot \frac{C_2}{F}. \quad (5.12)$$

Длина ΔDE на пространственной прямой:

$$\Delta DE = \frac{KB \cdot \sin \sigma'}{\sin \sigma}; \quad (5.13)$$

$$\sigma' = \arctg \frac{C_3 (A_2 - A_3)}{C_2 (B_3 - B_2)}. \quad (5.14)$$

Подставив (5.12), (5.14) в (5.13), получим:

$$KB = \left[\sqrt{(A'_4 - A'_5)^2 + (B_5 - B_4)^2} \cdot \frac{C_2}{F} \sin \sigma \right] \cdot \sin \left[\frac{C_3(A_2 - A_3)}{C_2(B_3 - B_2)} \right].$$

Высота-координата:

$$X = \frac{A_4 - A_5}{2}; \quad h = (A_4 - A_5) \cdot \frac{C_2}{2F}. \quad (5.16)$$

Задержка:

$$\Delta\tau = \frac{\Delta DE}{2F}. \quad (5.17)$$

В частном случае плоскость $ДЕОД'E'$ совместима с плоскостью $ХОZ$. Тогда трек ливня совмещается с осью $X'O'$.

Графически находим части апертур каждого ФЭУ, участвующего в ливне.

Варьируя расстоянием от точки пересечения ливня R с горизонталью, проведенной от установки, зенитным углом θ , первичной энергией ливня E_0 , получим различные комбинации $\Delta\tau_i$, ΔV_i , высоты X_i , регистрируемые при заданных начальных условиях. На основании полученных данных рассчитываются эффективные площади регистрации установкой потока частиц различных первичных энергий.

$$\zeta_i = \eta - \frac{\beta}{2} + (n-1) \cdot \frac{\Delta\beta \cdot \frac{\cos \pi}{6}}{\cos \theta} + \frac{\Delta\beta}{2}; \quad (5.18)$$

где θ – угол между треком первичной частицы и осью $O'X'$ (рис. 5.2).

Из рис. 5.2 имеем:

$$X_i = \frac{\Delta R_i}{\operatorname{tg} \theta}; \quad (5.19)$$

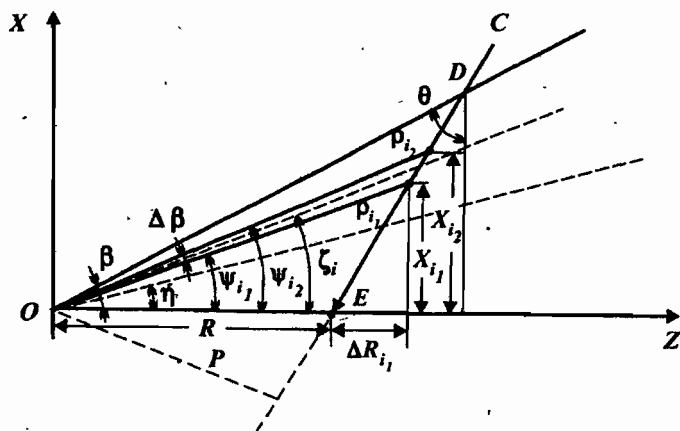


Рис. 5.2. Плоскость пересечения траектории ливня с диаграммой направленности установки (ДОН)

β – апертура установки и плоскость прохождения ливня;

η – наклон оптической оси установки к горизонтالي;

$\Delta\beta_i$ – апертура одного ФЭУ, участвующего в ливне;

$\Delta\beta$ – полная апертура одного ФЭУ;

ζ_i – наклон оси одного ФЭУ к горизонтали;

θ – зенитный угол ливня.

$$\Delta R_i = R \cdot \left(\frac{1}{\operatorname{tg} \theta \cdot \operatorname{tg} \left(\eta - \frac{\beta}{2} \right)} - 1 \right)^{-1}; \quad (5.20)$$

$$\rho_i = \frac{R}{\cos \zeta_i} \cdot \left(1 + \frac{1}{\frac{1}{\operatorname{tg} \theta \cdot \operatorname{tg} \left(\eta - \frac{\beta}{2} \right)} - 1} \right); \quad (5.21)$$

$$\Delta l_i = \frac{X_{i_2} - X_{i_1}}{2 \cos \theta}, \quad (5.22)$$

где Δl_i – путь прохождения ливня в апертуре одного ФЭУ.

Отсюда:

$$\Delta \tau_i = \frac{\Delta l_i}{C}. \quad (5.23)$$

Обозначим $\frac{F}{\sigma} = Y_i$.

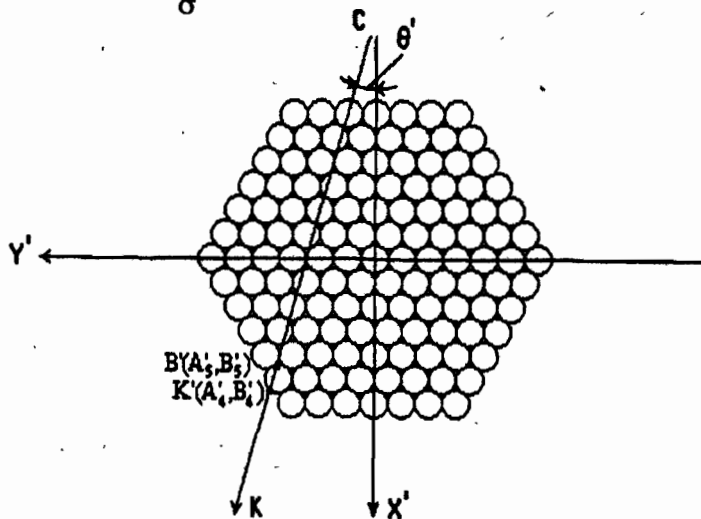


Рис. 5.3. Расположение ФЭУ в фокальной поверхности детектора и пример прохождения трека ливня через мозаику ФЭУ (СК)

Тогда:

$$Y_i = \frac{KCQ}{4\pi} \cdot \cos \left(\theta + \frac{\psi_{i_1} - \psi_{i_2}}{2} \right) \cdot \frac{A \Delta \tau}{K_\phi R_\phi \Delta \Omega} \cdot \int \left[\frac{N(> E_0, \theta, t)}{\rho_i^2} \right] dl,$$

где $N(>E_0, \theta, t)$ рассчитывается [2]:

$$N(x) = i \int f(x, t, \theta) dx,$$

где i – коэффициент линейной ионизации: $i = 80 \text{ см}^{-1}$ [8];

$f(x)$ – функция пространственного распределения частиц ШАЛ (ФПР);

t – глубина атмосферы;

θ – зенитный угол ливня.

$$E_0 = 10^{18} \text{ эВ (1), } 10^{19} \text{ эВ.}$$

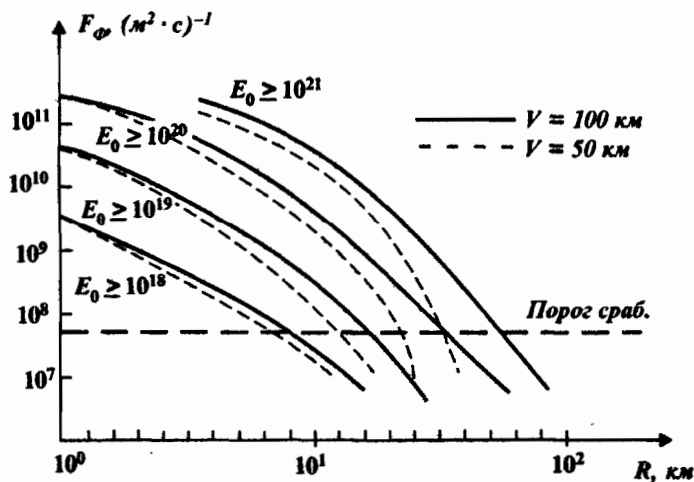


Рис. 5.4. Зависимость облученности от расстояния для первичных энергий

На рис. 5.4 приведены зависимости отношения сигнал/шум от расстояния K до оси ливня для одного ФЭУ, измеряющего отрезок каскадной кривой в районе максимума развития ливня.

Кривая 1 – для ливня с первичной энергией $E_0 = 10^{18} \text{ эВ}$;

Кривая 2 – для ливня с первичной энергией $E_0 = 10^{19} \text{ эВ}$;

Кривая 3 – для ливня с первичной энергией $E_0 = 10^{20}$ эВ;
Кривая 4 – для ливня с первичной энергией $E_0 = 10^{21}$ эВ.

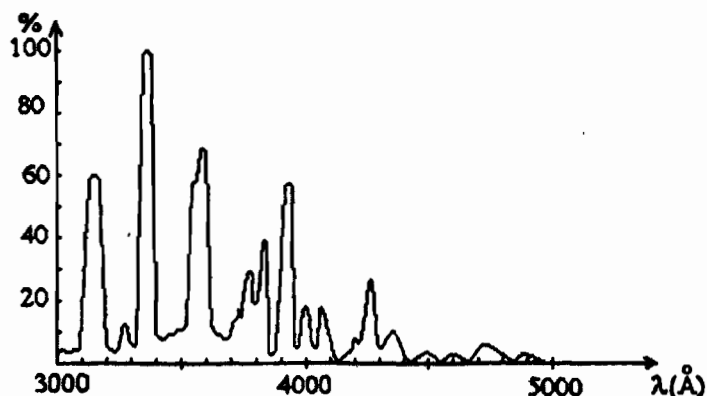


Рис. 5.5. Спектр ионизационного излучения в атмосфере

Рассчитанные эффективные площади и годовая статистика регистрации при видимости 50 км и 100 км приведены в таблице 1.

Таблица 1

E_0	$V = 100$ км		$V = 50$ км
E_0 эВ	Эффективная площадь ($\text{км}^2 \text{стер}$)	Годовая статистика (ливней/год)	Эффективная площадь ($\text{км}^2 \text{стер}$)
10^{18}	97,0	310	71
10^{19}	714,0	45	335
10^{20}	2023,0	3	955
10^{21}	5980,0	0,3	2000

Годовая статистика рассчитана с учетом того, что эффективное время работы детекторов ионизационного свечения составляет 10% от общего календарного времени. При этом в расчет закладывался энергетический спектр, приведенный в работе [1].

Показано, что с помощью одного пункта регистрации ионизационного свечения ШАЛ, работающего совместно с действующей установкой ШАЛ, возможно определение светового потока от отдельных участков каскада с точностью не хуже 30%.

ОГЛАВЛЕНИЕ |

Глава 1.

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
1.1. Экскурс в историю развития исследований космических лучей	3
1.2. Экспериментальные методы изучения космических лучей.	
Крупнейшие экспериментальные установки	11
<i>Первичное космическое излучение</i>	12
<i>Взаимодействия при высоких энергиях</i>	18
1.3. Нейтринная астрофизика	22
1.4. Виды космического излучения	26
1.5. Космические лучи	29
1.6. Античастицы	34
1.7. Античастицы. Взаимные превращения вещества и поля	43
1.8. Открытие новых элементарных частиц	46
<i>Классификация элементарных частиц</i>	48
1.9. Излучение «сверхсветовых» частиц (эффект Черенкова)	50

Глава 2.

КОСМИЧЕСКИЕ ВЗРЫВЫ	67
2.1. Теория Большого взрыва	67
<i>Доказательство теории Большого взрыва</i>	68
<i>Первые мгновения Вселенной</i>	69
<i>После Большого взрыва</i>	70
<i>Фоновое космическое излучение</i>	71
<i>Расширение Вселенной</i>	75
<i>«Вздутие»</i>	76
2.2. Галактики	76
<i>Классификации галактик</i>	77
<i>Связь между классификацией и эволюцией</i>	79
<i>Взаимодействующие галактики</i>	80

Происхождение галактик	81
Противоречивые модели	82
2.3. Эволюция звезд	83
Звезды и планеты	84
Рождение звезд	85
Эволюция звезд с малой массой	85
Эволюция звезд с большой массой	87
Белые карлики	89
Новые звезды	91
Радиоизлучение	97
Рентгеновское излучение	97
Возраст остатков сверхновой	98
Пульсары. Открытие	99
Нейтронные звезды. Характеристики	101
Черные дыры	103
2.4. Галактические взрывы	108
Сверхмассивные черные дыры	108

Глава 4.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЧАСТИЦ

СВЕРХВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ СО СРЕДОЙ..... 118

3.1. Введение	118
3.2. Космические лучи. Их состав и происхождение	118
Происхождение космических лучей	120
Солнечные космические лучи	126
3.3. Радиационная защита – магнитное поле Земли	129
Открытие космических лучей	
и методы их изучения	133
3.4. Характеристики космических лучей.	
Химический состав. Источники	137
Источники космических лучей	148
3.5. Распределение источников	
космических лучей сверхвысоких энергий.	
(Численный эксперимент)	148

Глава 4.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЧАСТИЦ

СВЕРХВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ СО СРЕДОЙ 152

4.1. Электромагнитный каскад в атмосфере Земли.

Широкий атмосферный ливень (ШАЛ) 152

4.2. Электромагнитные вспышки 157

Излучение Вавилова-Черенкова 158

Поток ионизационных вспышек в атмосфере 162

Поток очень низкочастотных (ОНЧ)

радиовспышек и космические лучи

сверхвысоких энергий 164

ЛИТЕРАТУРА 175

Основная литература 175

Дополнительная литература 176

ПРИЛОЖЕНИЕ 177

Расчет детектора ионизационного излучения 177



Торговый дом **Феникс**

Для крупно-оптовых покупателей.

344082, г. Ростов-на-Дону, пер. Халтуринский, 80.

Тел.: (863) 261-89-53, 261-89-54, 261-89-55, 261-89-56,
261-89-57, факс: 261-89-58. E-mail: torg@phoenixrostov.ru

Представительства в г. Москва
г. Москва, ул. Космонавта Волкова,
д. 25/2, 3-й подъезд,
район метро «Войковское»
Директор –
Моисеенко Сергей Николаевич
Тел.: (095) 156-05-68, 450-08-35
e-mail: fenix-m@ultranet.ru

г. Москва, шоссе Фрезер, 17,
район метро «Авиамоторная»
Директор –
Мячин Виталий Васильевич
Тел.: (095) 517-32-95, 107-44-98,
8-901-711-79-81
Тел./факс: 8-501-413-75-78
e-mail: mosfen@bk.ru, mosfen@nm.ru

**Издательский Торговый Дом
«КноРус»**
г. Москва, ул. Б. Переяславская, 46
Метро «Рижская», «Проспект Мира»
Тел.: (095) 280-02-07, 280-72-54,
280-91-06
e-mail: phoenix@knorus.ru

**Представительство
в г. Санкт-Петербург**
г. Санкт-Петербург,
ул. Кронштадтская, 11
Директор –
Стрельникова Оксана Борисовна
Тел.: (812) 335-34-84
e-mail: fnx.spb@mail.ru

**Представительство
в г. Владивосток**
г. Владивосток, ул. Фадеева, 45а
Директор – Калинин Олег Викторович
Тел.: (4232) 23-73-18
e-mail: oleg38@mail.primorye.ru

**Представительство
в г. Новосибирск**
ООО «ТОП-Книга»
г. Новосибирск, ул. Арбузова, 1/1
Вяльцева Ирина
Тел.: (3832) 361028, доб. 165
e-mail: phoenix@top-kniga.ru

Представительство на Украине
ООО «Кредо», г. Донецк,
ул. Университетская, 96
Тел.: +38 062 – 345-63-08,
339-60-85
e-mail: moiseenko@skif.net

Представительства в Ростове-на-Дону:

1. пер. Согласия, 3;
тел. 8(863) 2999-339
2. пер. Соборный, 17;
тел. 8(863) 2624-707
3. ул. Большая Садовая, 70;
тел. 8(863) 2620-673
4. ул. Немировича-Данченко, 78;
тел. 8(863) 2446-934
5. ул. Пушкинская, 245/61;
тел. 8(863) 2665-832
e-mail: fenix21@inbox.ru

Сайт Издательства «Феникс»
[http://
www.phoenixrostov.ru](http://www.phoenixrostov.ru)

По вопросам издания книг:

Тел.: 8-863-2618950
e-mail: office@phoenixrostov.ru



Издательство

Феникс

Приглашаем к сотрудничеству
АВТОРОВ для издания:

- ☑ учебников для ПТУ, ссузов и вузов;
 - ☑ научной и научно-популярной литературы по МЕДИЦИНЕ и ВЕТЕРИНАРИИ, ЮРИСПРУДЕНЦИИ и ЭКОНОМИКЕ, СОЦИАЛЬНЫМ и ЕСТЕСТВЕННЫМ НАУКАМ;
 - ☑ литературы по ПРОГРАММИРОВАНИЮ и ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКЕ;
 - ☑ ПРИКЛАДНОЙ и ТЕХНИЧЕСКОЙ литературы;
 - ☑ литературы ПО СПОРТУ и БОЕВЫМ ИСКУССТВАМ;
 - ☑ ДЕТСКОЙ и ПЕДАГОГИЧЕСКОЙ литературы;
 - ☑ литературы по КУЛИНАРИИ и РУКОДЕЛИЮ.
-

ВЫСОКИЕ ГОНОРАРЫ!!!

ВСЕ финансовые ЗАТРАТЫ БЕРЕМ НА СЕБЯ!!!

При принятии рукописи в производство

ВЫПЛАЧИВАЕМ гонорар на 10 % ВЫШЕ

ЛЮБОГО РОССИЙСКОГО ИЗДАТЕЛЬСТВА!!!

Рукописи не рецензируются и не возвращаются!

Руководитель редакционно-издательского отдела

Кузнецов Владимир Петрович

тел.: 8 (863) 261-89-78;

e-mail: lknet@rambler.ru

.....

ПОЧТОВЫЙ АДРЕС:

344082, г. Ростов-на-Дону, пер. Халтуринский, 80

САЙТ <http://www.phoenixrostov.ru>

ДИРЕКТОР: Вальдман Леонид Ефимович

ПРИЕМНАЯ тел.: 8 (863) 261-89-50;

e-mail: fenix@fiber.ru, fenix_office@mail.ru

Торговый дом



ПРЕДЛАГАЕТ:

- ☒ Около 100 новых книг каждый месяц
- ☒ Более 3000 наименований книжной продукции собственного производства
- ☒ Более 1500 наименований обменной книжной продукции от лучших издательств России

ОСУЩЕСТВЛЯЕМ:

- ☒ Оптовую и розничную торговлю книжной продукцией

ГАРАНТИРУЕМ:

- ☒ Своевременную доставку книг в любую точку страны, ЗА СЧЕТ ИЗДАТЕЛЬСТВА, автотранспортом и ж.-д. контейнерами
- ☒ МНОГОУРОВНЕВУЮ систему скидок
- ☒ РЕАЛЬНЫЕ ЦЕНЫ
- ☒ Надежный ДОХОД от реализации книг нашего издательства

НАШ АДРЕС:

344082, Ростов-на-Дону, пер. Халтуринский, 80.

НАШ САЙТ:

<http://www.webkniga.ru>

<http://www.phoenix.ic.ru>

Серия
• Высшее образование •

Сокуров Валерий Федорович

**ФИЗИКА
КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ:
КОСМИЧЕСКАЯ РАДИАЦИЯ**

Ответственный
за выпуск:
Корректор:
Художник:

Кузнецов В.П.
Подопригорина О.И.
Тимофеева Е.В.

Лицензия ЛР № 065194 от 2 июня 1997 г.

Сдано в набор 03.10.2005 г. Подписано в печать 30.11.2005 г.

Формат 84x108 $\frac{1}{32}$. Бумага типографская.

Гарнитура Школьная.

Тираж 3000 экз. Заказ № 3330

Отпечатано в типографии ООО "Кубаньпечать".

Адрес: 350059, г. Краснодар, ул. Уральская, 98/2.

Издательство «Феникс»
344082, г. Ростов-на-Дону,
пер. Халтуринский, 80.