

Сканирование и форматирование: Янко Слава (Библиотека Fort/Da) || slavaaa@yandex.ru || yanko_slava@yahoo.com
|| <http://yanko.lib.ru> || Isq# 75088656 || Библиотека: <http://yanko.lib.ru/gum.html> || Номера страниц - внизу
update 24.08.06

Наука для всех



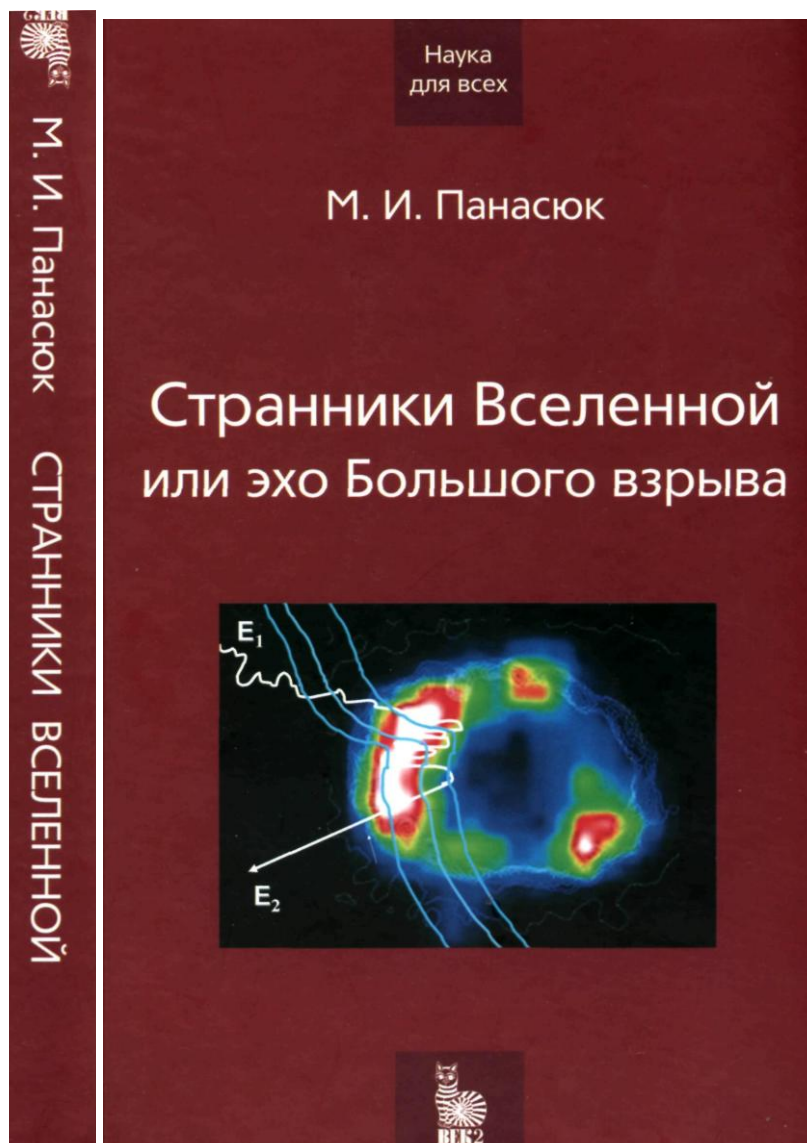
Издательство «Век 2»

Наука для всех

М. И. Панасюк
Странники Вселенной
или эхо Большого взрыва



Фрязино 2005



УДК 524 ББК 22.66 П16

Панасюк Михаил Игоревич - доктор физико-математических наук, профессор. Директор Института ядерной физики МГУ, заведующий кафедрой космических лучей и физики космоса физического факультета МГУ.

Область научных интересов - физика космических лучей и космическая физика.

Панасюк М. И.

Странники Вселенной или эхо Большого взрыва. Фрязино: «Век 2», 2005. - 272 с. - (Наука для всех).

ISBN 5-85099-160-3

Книга посвящена одной из актуальных тем современной астрофизики — космическим лучам — частицам, которые рождаются во Вселенной и приобретают гигантские энергии посредством космических ускорителей. Содержится обзор как истории исследований, так и новейших достижений и проектов в этой области.

В основе книги популярное изложение лекций автора на физическом факультете МГУ.

На обложке: фотография в рентгене разлетающихся в пространстве остатков от взрыва сверхновой звезды SN1987A, полученная на космическом аппарате Chandra. Здесь же показана траектория заряженной частицы, ускоряющейся на фронте ударной волны.

ISBN 5-85099-160-3

© Век 2, 2005

Электронное оглавление

Contents

Электронное оглавление	3
ПРЕДИСЛОВИЕ	9
Глава 1. ПОСЛЕ БОЛЬШОГО ВЗРЫВА	11
1.1. Убегающие галактики	11
Рис. 1.1. Диаграмма Большого взрыва	12
Рис. 1.2. Частицы (протон и электрон) и их антиподы	12
1.2. Сотворение вещества	13
Рис. 1.3. Превращение красного гиганта в нейтронную звезду.	15
1.3. Гибель звезд	15
Рис. 1.4. Многослойная структура «горящей» звезды	15
Таблица 1.1. Времена горения звезды и испускания частиц.	16
Рис. 1.5. Циклический процесс эволюции звезд.	17
1.4. Наш мир — темный и светлый или жизнь в вакууме	18
Рис. 1.6. Наша Галактика. Скопление звезд в основном в спиральных рукавах. В одном из них сейчас находится наша Солнечная система.	18
Рис. 1.7. Структура нашей Галактики — Млечного Пути с характерными размерами.	18
Рис. 1.8. Структура материи во Вселенной.	20
1.5. «Большой взрыв» на Земле	21
Рис. 1.9. Строящийся в Европейском центре ядерных исследований (CERN) гигантский коллайдер - ускоритель сталкивающихся частиц.	22
Глава 2. СТРАННИКИ ВСЕЛЕННОЙ	23
Рис. 2.1. Виктор Гесс в гондole аэростата после проведения экспериментов по исследованию ионизации газов (1912 г.).	24
Рис. 2.2. Примерно так выглядела кривая изменения ионизации с высотой в экспериментах В.Гесса.	24
Рис. 2.3. Р.Милликен.	25
Рис. 2.4. Ф.Цвикки (слева) и В.Бааде первыми обратили внимание на сверхновые звезды, как возможные источники космических лучей.	25
Рис. 2.5. Д.В.Скобельцын — один из первых отечественных исследователей космических лучей.	25
Рис. 2.6. В отличие от электронов, траектории которых искривляются магнитным полем, трек космической частицы виден в виде прямой линии.	26
Глава 3. КАК ПОЙМАТЬ КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ	27
3.1. Космические лучи в атмосфере	27
Рис. 3.1. Каскадный процесс взаимодействия первичных космических лучей с атмосферой — рождение вторичной компоненты космических лучей (так называемые «широкие атмосферные ливни»).	27
3.2. Ловушки для частиц	28
Рис. 3.2. Пьер Оже.	28
Рис. 3.3. Георгий Зацепин с сотрудниками создал установку для изучения широких атмосферных ливней в горах Памира.	29
Рис. 3.4. Качественная картина формирования каскадов вторичных частиц в атмосфере.	30
Рис. 3.5. Регистрация частиц космических лучей наземными установками.	30
Рис. 3.6. Пример визуализации ливня частицы при ее торможении в фотоэмульсии.	31
Рис. 3.7. Регистрация космических лучей методом измерения черенковского света.	32
Рис. 3.8. Один из видов ионизационного калориметра.	33
Рис. 3.9. Легендарные «Протоны» - первые многотонные калориметры, запущенные в космос на советских боевых ракетах.	34
Рис. 3.10. Прибор АТЭС, летавший в Антарктиде.	34
Рис. 3.11. Аэростаты могут летать в Антарктиде до 3-4-х недель.	35
Рис. 3.12. Космические лучи изучаются во всех средах: под землей, на земле, в атмосфере и в космосе.	36
Глава 4. ЧТО МЫ ЗНАЕМ О КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧАХ	37
4.1. Крутая траектория познания состава космического излучения	37
Панасюк М. И. Странники Вселенной или эхо Большого взрыва. Фрязино: «Век 2», 2005. - 272 с. - (Наука для всех).	

Рис. 4.1. Магнитное поле Земли имеет форму диполя.	37
Рис. 4.2. С. Вернов (слева) во время экспедиции в Индийском океане в 1937 г. на теплоходе «Серго».....	38
4.2. Из чего состоят космические лучи.....	39
Таблица 4.1. Содержание некоторых элементов в космических лучах на Солнце и в звездах, приведено относительно ядер кислорода (0).	40
4.3. Энергетические спектры ядер космических лучей.....	41
Таблица 4.2. Энергия различных видов излучений	41
Рис. 4.3. Энергетический спектр «всех частиц» космических лучей без разделения их на отдельные компоненты.	42
Рис. 4.4. Энергетические спектры отдельных компонент космических лучей.	42
Рис. 4.5. Энергетический спектр «всех частиц».	43
Рис. 4.6. Г.Христиансен, первооткрыватель излома («колена») в спектре космических лучей.	44
Глава 5. ОТКУДА ВЫ, СТРАННИКИ ВСЕЛЕННОЙ?	45
5.1. Поиск звезд на небе	45
5.2. Сверхновые старые звезды	46
Рис. 5.1. Историческая сверхновая, которую наблюдал датский астроном Тихо Браге (1546-1601 гг.) в 1572 г.	47
Таблица 5.1. Сверхновые в нашей Галактике за последние 1000 лет.	47
Глава 6. ПУШКИ ВСЕЛЕННОЙ	49
6.1. Космический ускоритель — Пэватрон	49
Рис. 6.1. Остатки взрыва сверхновой звезды SN 1987.	49
Рис. 6.2. Экспериментальные энергетические спектры всех частиц	50
Рис. 6.3. Сталкивающиеся галактики NGC 4038/9.	51
6.2. Превращения звездного вещества или о возрасте космических странников.....	52
6.3. О чем говорят результаты экспериментов	53
Рис. 6.4. Энергетическая зависимость «средней массы» частиц космических лучей — характеристики массового состава частиц.	54
Рис. 6.5. Экспериментальные спектры протонов (H) и железа (Fe) до «колена» не вносят определенности в форму спектра в районе «колена» из-за недостаточной статистики.....	55
Рис. 6.6. Один из проектов большой установки для изучения космических лучей в районе «колена» на борту Международной космической станции. Её вес — несколько тонн.	56
Таблица 6.1. Количество ливней с $E > 5 \cdot 10^{19}$ эВ по измерениям на разных наземных установках ШАЛ.	56
Рис. 6.7. Экспериментальные данные по энергетическим спектрам космических лучей при ультравысоких энергиях не могут пока свидетельствовать ни в пользу существования «обрезания» спектра космических лучей, ни о его продолжении в сторону больших энергий.	57
6.4. Электроны в космических лучах.....	57
Рис. 6.8. Энергетические спектры электронов в разных экспериментах.	57
Таблица 6.2. Звезды — кандидаты в источники электронов космических лучей высоких энергий	58
Глава 7. МИСТЕРИЯ ОБРЕЗАНИЯ.....	59
7.1. Диаграмма Хилласа или в поисках Эватрона	59
Рис. 7.1. Диаграмма Хилласа, демонстрирующая возможности различных астрофизических объектов как ускорителей частиц.	59
Рис. 7.2. Активные ядра галактик (AGN): слева наблюдаемые, а справа — в модельном представлении.	61
7.2. Реликтовое излучение и «конец» спектра космических лучей	62
Рис. 7.3. Спектры энергии фонового рентгеновского- и гамма-излучения (темные значки), а также ядерной компоненты космических лучей (светлые значки).	62
7.3. Сверху — вниз, или вперед к экзотике.....	64
Таблица 7.1. Частицы и их партнеры.....	64
Рис. 7.4. Один из возможных механизмов образования космических лучей ультравысоких энергий при взаимодействии Зэв'ных нейтрино с реликтовыми нейтрино в окрестностях кластера галактик <i>Virgo</i> (модель Z-вспышки).	67
7.4. Новая астрономия?	67
Рис. 7.5. На карте галактического неба показаны направления прихода частиц космических лучей с энергией между $4 \cdot 10^{19}$ эВ и 10^{20} эВ (точки) и более 10^{20} эВ (квадраты) по данным японской установки AGASA.	68
Рис. 7.6. Возможности нейтринной астрономии для изучения астрофизических объектов на расстояниях ~100 Мпк значительно выше, чем с протонной.	69

Глава 8. КОСМИЧЕСКОЕ ОКО	70
8.1. Ультрафиолетовый след космической частицы	70
Рис. 8.1. А.Чудаков.	70
Рис. 8.2. Дж.Линсли, автор проекта «Airwatch».....	72
8.2. Зеркало на орбите	73
Рис. 8.3. Принцип космического метода измерения энергии заряженных частиц ультравысокой энергии (эксперимент «ТУС»).	73
Рис. 8.4. Космический проект EUSO Европейского космического агентства позволит регистрировать космические лучи ЗэВ-ных энергий по их ультрафиолетовым трекам с помощью оптического коллектора света с широкой апертурой, размещенного на борту Международной космической станции.	73
Рис. 8.5. Диаграмма, демонстрирующая возможности наземных и космических установок для регистрации частиц ультравысоких энергий.	75
Рис. 8.6. Космический проект OWL («Сова») позволит получить стереоизображение ультрафиолетового трека в атмосфере и значительно увеличить светосилу метода.	75
Глава 9. ГАММА-ИЗОБРАЖЕНИЕ ВСЕЛЕННОЙ	77
9.1. Гамма-свечение Млечного Пути	77
Рис. 9.1. Карта всего неба в гамма-лучах — результат измерений на космической обсерватории CGRO.	78
Рис. 9.2. Основные физические механизмы генерации космического гамма-излучения.	78
9.2. Загадочные всплески гамма-излучения	82
Рис. 9.3. Распределение дискретных источников гаммаквантов - гамма-всплесков на карте звездного неба по данным эксперимента BATSE на спутнике CGRO.	83
Рис. 9.4. Модели рождения гамма-всплесков в результате коллапса звезды Вольфа-Райе.	84
Глава 10. ЧАСТИЦЫ ИЗ ЗАЗЕРКАЛЬЯ	87
10.1. Другое состояние вещества	87
10.2. Погоня за антивеществом	88
Рис. 10.1. Энергетические спектры антипротонов по данным разных экспериментов (верхняя панель).	88
Рис. 10.2. Эмиссия гамма-излучения в районе массивной черной дыры в центре Галактики по данным космической гамма-обсерватории CGRO.	90
Рис. 10.3. В будущий эксперимент AMS-02 на Международной космической станции входит ряд сложнейших приборов и сверхпроводящий криогенный магнит.	91
Глава 11. ЧАСТИЦЫ ПОЛТЕРГЕЙСТА	93
11.1. Приключения «неуловимых»	93
11.2. Нейтринное море реликтов	94
11.3. Нейтрино сверхновых	95
11.4. Нейтринная астрономия сверхновой SN 1987A	96
11.5. Капканы для неуловимых	96
Рис. 11.1. Энергетические спектры различных компонент нейтринного излучения — атмосферного, галактического (от взрывов сверхновых звезд и из Галактического диска) и астрофизического (от внегалактических источников, например: AGN и гамма-всплесков).	97
Рис. 11.2. Super Kamiokande — крупнейшая нейтринная установка. Она представляет собой огромный бак, наполненный водой, окруженный тысячами детекторов и опущенный глубоко под землю.	98
Рис. 11.3. Принцип работы подводного детектора нейтрино. Черенковский свет в виде конуса, генерированный релятивистскими мюонами (прямая линия), регистрируется «башней» в несколько этажей из детекторов — герметически упакованных фотоумножителей.	99
Рис. 11.4. Эксперимент по регистрации нейтрино на Байкале. Зимой, со льда на глубину около 1,5 км опускаются длинные стринги с детекторами для регистрации черенковского света.	100
11.6. О нейтрино предельно высоких энергий	101
Рис. 11.5. Акустический метод регистрации высокоэнергичных (10 ПэВ) нейтрино.	101
Рис. 11.6. Регистрация нейтрино по черенковскому излучению, возникающему в результате взаимодействия космической частицы (например, нейтрино) с лунным грунтом — реголитом.	103
Глава 12. ДВУЛИКИЙ ЯНУС	104
12.7. Наша звезда на звездной шкале	104
Таблица 12.1. Физические параметры Солнца	104
Рис. 12.1 На диаграмме Герцшпрунга-Ресселя показана зависимость между светимостью звезд (по отношению к светимости Солнца) и поверхностной температурой. Солнце — желтый карлик — находится приблизительно в середине главной последовательности.	104
Панасюк М. И. Странники Вселенной или эхо Большого взрыва. Фрязино: «Век 2», 2005. - 272 с. - (Наука для всех).	

Рис. 12.2 Структура основных областей Солнца	106
12.2. Спринклер Солнечной системы	108
Рис. 12.3 Постоянно вытекающий солнечный ветер «вытягивает» магнитное поле Солнца в межпланетное пространство, создавая межпланетное магнитное поле.	109
12.3. Активная жизнь нашей звезды	109
Рис. 12.4. Периодичность активности Солнца по измерениям числа солнечных пятен (закономерность Швабе-Вольфа)	110
Рис. 12.5 Распределение числа солнечных пятен по диску Солнца, напоминающее крылья порхающей бабочки (Закон Шперера)	111
12.4. Солнечные бури	111
Рис. 12.6. Две активные области на Солнце связаны друг с другом петлевыми структурами, близкими к дипольному магнитному полю	111
Рис. 12.7 Средняя распространенность элементов (атомных ядер) в галактических и солнечных космических лучах.	113
Рис. 12.8. Корональная инжекция солнечного вещества представляет собой магнитно-плазменное облако, распространяющееся в межпланетном пространстве.	114
12.5. Плазменная бутылка солнечной системы	115
Рис. 12.9 Структура гелиосферы.	115
Глава 13. ПОСЛЕДНЕЕ ПРИСТАНИЩЕ СТРАННИКОВ	118
13.1. Солнечная метла	118
Рис. 13.1. Модуляция космических лучей (нижняя панель) по наблюдениям на станциях, расположенных в экваториальной и в полярной (где пороговая жесткость частиц меньше) областях.	119
Рис. 13.2. Структура магнитного поля Солнца по данным космического аппарата «Ulysses», облетевшего Солнце через Южный и Северный полюса.	119
Рис. 13.3. Примерная форма энергетических спектров солнечных и галактических космических лучей (для всех частиц) и аномальной компоненты (для кислорода)	121
13.2. Аномальные частицы в гелиосфере	121
Рис. 13.4. Механизм образования аномальных космических лучей по Л. Фиску.	123
13.3. Магнитная «броня» Земли	124
Рис. 13.5. Проникновение космических лучей в дипольное магнитное поле Земли.	124
Рис. 13.6. Магнитосфера Земли — полость в космическом пространстве, формируемая воздействием солнечного ветра на магнитное поле Земли.	126
13.4. Земная ловушка для космических странников	126
Рис. 13.7. Реальные траектории протонов в магнитном поле Земли.	128
Рис. 13.8. Пространственная структура кольцевого тока - плазменного тора, сформированного во время магнитной бури. Такой плазменный тор создает понижение напряженности магнитного поля Земли (нижняя панель).	129
Рис. 13.9. Изменение границ проникновения солнечных частиц: в условиях магнитной бури (возмущенная магнитосфера) границы смещаются к экватору.	130
Глава 14. СЛЕДЫ СТРАННИКОВ	131
14.1. Атмосферный след странников — климат сегодня	131
Таблица 14.1. Основные виды солнечной радиации и космических лучей	132
Рис. 14.1. Изменение потоков релятивистских электронов, выпадающих из радиационных поясов, и солнечных космических лучей с изменением солнечной активности.	133
Рис. 14.2. Долговременные изменения солнечной, геомагнитной активности и глобальной температуры на Земле.	133
Рис. 14.3. Потери энергии в атмосфере различных компонент космического излучения: ГКЛ, релятивистских электронов и ультрафиолета.	134
14.2. Гром и молнии странников	134
Рис. 14.4. Изменения потоков космических лучей и концентрации ионов в атмосфере в зависимости от высоты доказывают, что ионизация на малых высотах создается частицами ГКЛ.	136
Рис. 14.5. Изменения потока космических лучей и облачного покрова Земли	136
Рис. 14.6. Изменение ионизации воздуха и частоты молний.	138
14.3. Климат до нашей эры и спиральные рукава Галактики	138
Рис. 14.7. Схема, иллюстрирующая взаимосвязь изменения потока космических лучей, связанного с попаданием Земли в спиральные рукава Галактики, с изменением глобальной температуры нашей планеты.	138
14.4. Солнечная бомбардировка атмосферы	140
Рис. 14.8. Изменение концентрации озона после вспышки 14 июля 2000 г. — наиболее	

обширные и значительные изменения концентрации (формирование озонной дыры) произошли через несколько часов после вторжения солнечных частиц	141
14.5. Салют космическим лучам	143
Рис. 14.9. Механизм формирования транзистентных атмосферных явлений при молниевом разряде	143
Рис. 14.10. Пространственное распределение всплесков ультрафиолетового свечения по наблюдениям на спутнике «Университетский-Татьяна» и облачный покров в феврале 2005 г.	144
Глава 15. РАДИОАКТИВНЫЙ КОСМОС	145
15.1. Космический «ТОКАМАК»	145
Рис. 15.1. Скорость счета газоразрядного детектора, установленного на 2-м советском спутнике (справа сверху)	146
Рис. 15.2. Сотрудники Дж.Ван-Аллена, увидевшие первые данные прибора, установленного на спутнике «Эксплорер-1» и «захлебывавшегося» от огромных потоков радиации.....	147
Рис. 15.3. Структура внутреннего и внешнего электронного радиационного пояса Земли.	147
Рис. 15.4. Основные виды движений заряженных частиц радиационных поясов: ларморовское (вращательное) — вокруг магнитной силовой линии; колебательное — вдоль поля с отражением на малых высотах и азимутальный дрейф частиц вокруг Земли (протоны и электроны дрейфуют в противоположные стороны).	149
15.2. Родители пленников магнитной ловушки	149
Рис. 15.5 Механизмы образования протонами ГКЛ электронов с энергиями до сотен кэВ и протонов в сотни МэВ в радиационных поясах (1) и высокоэнергичных электронов в сотни МэВ под радиационными поясами (2).	149
Рис. 15.6. Ионосферная плазма — источник радиационных поясов.	151
Рис. 15.7. Механизм формирования захваченных частиц аномальных космических лучей представляет собой проникновения однократно заряженных ионов АКЛ внутрь магнитного поля, их перезарядку на атомах атмосферы - и последующий захват в магнитное поле.....	153
15.3. Нейтронный ореол Земли	153
Рис. 15.8. Нейтронные потоки в ближнем космосе состоят из трех компонент: нейтронов от солнечных вспышек, а также локальных и альбедных нейтронов, рождающихся в результате взаимодействий ГКЛ соответственно с материалом космического корабля и атомами азота и кислорода атмосферы.....	154
Глава 16. РАДИАЦИОННЫЕ БУРИ В КОСМОСЕ	156
16.1. Радиация на ближних подступах к Земле	156
Рис. 16.1. Пространственные распределения радиации в районе Южно-Атлантической магнитной аномалии. Дозы радиации увеличиваются в минимуме цикла солнечной активности.	156
Таблица 16.1. Таблица радиационных рисков	158
16.2. Радиационные бури на окраине околоземного пространства	158
Рис. 16.2. Изменения потоков электронов с энергией >400 кэВ в радиационных поясах в течение 1 года.	158
Рис. 16.3. Радиационный эффект воздействия релятивистских электронов — внутренний электрический пробой в пластике.	160
Рис. 16.4. Изменения потоков релятивистских электронов (>5МэВ) в радиационных поясах, частота наблюдаемых аномалий в работе спутника и изменения солнечной активности. Аномалии в работе космического аппарата увеличиваются с ростом потоков релятивистских электронов.	161
16.3. Вспышки в глазах и в электронных чипах	162
Рис. 16.5. Нил Армстронг — первый человек на Луне.	162
Рис. 16.6. Механизм формирования одиночного сбоя в микросхеме: тяжелая заряженная частица космических лучей, проникая внутрь чувствительной области, создает локальные нарушения электропроводности, что приводит к сбою в работе.	163
Рис. 16.7. Доказательство связи между изменением потока ГКЛ и одиночными сбоями в компьютерных системах спутника: модуляция ГКЛ в течение цикла солнечной активности приводит к аналогичным изменениям частоты сбоев.	163
Рис. 16.8. Так выглядит пространственное распределение одиночных сбоев в микросхемах по измерениям на высоте ~500 км.	165
Рис. 16.9 Энергичные солнечные частицы тоже воздействуют на функционирование спутников на орбите.	166
Рис. 16.10. Взаимодействие тяжелых частиц ГКЛ с молекулой ДНК в пределах ее линейных размеров (~20 ангстрем) может приводить к нарушениям в ее структуре двумя путями: либо	

через образование свободных радикалов, либо напрямую — путем повреждения самой молекулы.	167
Рис. 16.11. Альфа-частицы и другие тяжелые частицы воздействуют на клетки более эффективно, чем легкие электроны. Тяжелые частицы теряют в веществе гораздо больше энергии на единицу пути, нежели более легкие.	168
16.4. «Человечество не останется вечно на Земле...»	169
Таблица 16.2. Толщины защит космических аппаратов и скафандра космонавта.	170
Рис. 16.12. Если бы на Солнце произошла такая же грандиозная вспышка, как это было в августе 1972 г., то космонавты, находящиеся в это время в открытом космосе или на поверхности Луны, могли бы получить летальные дозы радиации.	170
Рис. 16.13. Космический корабль с магнитной защитой для полета на Марс.	171
16.5. Трансконтинентальные авиарейсы вблизи полюса	172
Рис. 16.14. С увеличением высоты дозы радиации растут: на высоте орбитальной станции МКС они в 200 раз превышают типичные дозы на поверхности Земли.	172
ПОСЛЕСЛОВИЕ	173
Дополнительная литература	174
СЛОВАРЬ.....	175
СОДЕРЖАНИЕ.....	181

ПРЕДИСЛОВИЕ

Нет более умиротворяющей картины, чем ночное звездное небо. Тысячи звезд создают впечатление абсолютного покоя. Нагромождения, названные человеком созвездиями, превращают местами хаос в порядок и заставляют думать о едином начале этого творения природы. Слабые мерцания звезд лишь дополняют картину спокойствия. А ближайшая к нам звезда — Солнце, с его закатами и восходами, мягким и ровным светом, ласкающим глаз человека, вселяет еще большую уверенность в стабильности нашего мира.

Наверное не случайно человек, обладая органами чувств, которые даны ему от природы, огражден от того, что находится за пределами видимой картины космоса.

Реальная же картина, как ученые ее сейчас представляют, мало похожа на ту, что нарисована выше.

Вселенная бурлит... Взрываются звезды, сталкиваются галактики, черные дыры поглощают вещество, многие звезды вращаются с сумасшедшей скоростью и фонтанируют громадные потоки энергии в окрестное пространство. Это, вероятно, еще не полная картина нашей беспокойной Вселенной.

И даже ничем не выделяющееся среди прочих звезд наше Солнце — средняя по размеру звезда — извергает в ближайший к нам космос, Солнечную систему, огромные массы вещества, вызывая гигантские по масштабам взрывы, эквивалентные по мощности миллионам атомных бомб.

5

А ведь именно такой представлял себе Вселенную Михайло Ломоносов:

Когда бы смертным столь высоко
Возможно было взлететь,
Чтоб к Солнцу бrenно наше око
Могло приблизившись возреть;
Тогда б со всех открылся стран
Кипящий вечно Океан.
Там огненны валы стремятся
И не находят берегов;
Там вихри пламенны крутятся
Борючись множество веков;
Там камни как вода кипят,
Горящи там дожди шумят.

Глаз человека на Земле этого не видит. Но человек может все это изучать с помощью различных приборов, созданных им самим. Для исследования Вселенной их размещают на земле и под землей, под водой и над облаками, запускают их в космос.

А как эти бурные процессы во Вселенной сказываются на окружающем нас космическом пространстве, которое человек осваивает; на атмосфере, которой он дышит; на той технике, которую он создает и, наконец, на нем самом? Одним из «продуктов» бурь во Вселенной являются космические лучи, которые были открыты почти 100 лет назад. За это время физики разгадали многие загадки, касающиеся природы этого феномена Вселенной. Сейчас ясно, что их происхождению мы обязаны процессам в космосе, связанным, в первую очередь, с большим выделением энергии. Космические лучи рождаются и приобретают гигантские энергии, порой недоступные имеющимся на Земле ускорителям, при взрывах во Вселенной.

Источниками космических лучей могут быть звезды вдали от нашей Солнечной системы, как в Галактике, так и за ее пределами. Но, помимо дальних астрофизических объектов, наше Солнце, ближайшая к нам звезда, является мощнейшим источником космических лучей.

6

Космические лучи заполняют всю нашу Галактику и, конечно, околосолнечное пространство. Путешествуя в пространстве, часть из них достигает Земли. Эти частицы, обладая значительной энергией, могут представлять определенную опасность для спутников, экипажей космических кораблей, пассажиров высотных самолетов, для бортовой электроники. Но этот перечень далеко не полон. Уже есть доказательства, что космические лучи, проникая в глубь земной атмосферы, оказывают самое непосредственное влияние на погоду.

Панасюк М. И. Странники Вселенной или эхо Большого взрыва. Фрязино: «Век 2», 2005. - 272 с. - (Наука для всех).

Как раз об этом написана книга. Она призвана дать читателю представление о взаимосвязи многих процессов, происходящих и происходивших во Вселенной, и некоторых природных, техногенных и биологических явлениях в среде обитания человека - на Земле и около нее.

В основе книги популярное изложение лекций автора на физическом факультете МГУ как для студентов уже выбравших для себя специальность в области астрофизики космических лучей и физики космоса, так и студентов младших курсов.

Автор выражает свою глубокую благодарность сотрудникам НИИЯФ МГУ К. И. Стратилатовой и А. С. Ковтюху, чья помощь и советы оказали неоценимую услугу при подготовке рукописи этой книги.

Глава 1. ПОСЛЕ БОЛЬШОГО ВЗРЫВА

В одном мгновении видеть вечность...

Уильям Блейк

О том, как устроена Вселенная, мы можем судить благодаря созданным человеком приборам, позволяющим заглянуть на невообразимо далекие расстояния, которые трудно представить. Если воспользоваться принятой в астрономии единицей длины - световым годом (1 св. год = $9,5 \cdot 10^{12}$ км или ~0,3 парсека), то расстояния до видимых приборами источников можно оценить в 5 миллиардов парсек, или 15 миллиардов световых лет!

Наблюдаемая сегодня Вселенная - это огромные объединения звезд - галактики, мелкими вкраплениями заполняющие на первый взгляд пустое пространство. Но, на самом деле, все пространство Вселенной заполнено тем, что мы называем веществом и излучением.

Вначале о веществе.

Вещество состоит из атомных ядер - нуклидов. В ядре находятся протоны и нейтроны (N). Их называют нуклонами. Число протонов определяет заряд ядра (Z), а общее число протонов и нейтронов - массовое число, или массу ядра (A), т.е. $Z+N=A$. Фактически эти два параметра ядра (Z и A) определяют характеристики нуклида и самого вещества.

Так, водород, наиболее распространенный и легкий элемент во Вселенной, имеет $Z=1$ (его обозначение ^1H), а среди наиболее тяжелых и редких - уран имеет $Z=92$ (^{92}U). Одной из задач астрофизики как раз и является выяснение

8

происхождения и распространенности отдельных нуклидов во Вселенной, а их примерно 300.

История Вселенной насчитывает более чем 10 миллиардов лет. Как она возникла?

1.1. Убегающие галактики

Космос проходит бесконечные циклы Больших взрывов и расширений. Возможно, Большой взрыв — не начало времени, а лишь начало последнего цикла из бесконечной серии нагреваний, расширения, застоев, опустошения и вновь расширения.

П. Стейнхард

История космологии — это история наших заблуждений... Мы находимся на маленькой планете во Вселенной, не можем никуда выйти и поставить эксперимент. Все, что мы можем сделать, это взять немного света, который достиг нас и понять, что из себя представляет Вселенная.

М. Чаун

Великим физикам прошлого И.Ньютону и А.Эйнштейну Вселенная представлялась статичной. «Опасаясь» неминуемого ее гравитационного схлопывания, И.Ньютон предположил, что галактик бесконечно много. А. Эйнштейн в своей теории относительности искусственно ввел «космологический член», обеспечивающий силы отталкивания небесных тел с большими массами.

Это было в 1917 г. Но в том же переломном 1917 г. американец В.Слайфер опубликовал работу о разбегании космических туманностей и вслед за ним советский физик А. Фридман в 1924 г. выступил с теорией «разбегающихся» галактик — расширяющейся Вселенной. Это было революционным переворотом в физическом представлении о нашем мире.

Прошло еще несколько лет, и в 1929 г. американец Э.Хаббл обнаружил разбегание галактик. Гипотеза А. Фридмана получила экспериментальное подтверждение по наблюдениям красного смещения в спектрах галактик. Оказалось, что скорость разбегаания галактик пропорциональна расстоянию до них. Из экспериментального факта разбегаания галактик был оценен возраст Вселенной. Он оказался равным, ни много ни мало, около 15 миллиардов лет! Так началась эпоха современной космологии.

Естественно возникает вопрос: а что было в начале? Всего около 20 лет понадобилось ученым, чтобы вновь полностью перевернуть представления о Вселенной.

Ответ предложил наш соотечественник - выдающийся физик Г.Гамов в 40-е годы. История нашего мира началась с Большого взрыва (рис. 1.1). Именно так думает большинство астрофизиков и сегодня.

Большой взрыв - это стремительное уменьшение изначально огромной плотности, температуры и давления вещества, сконцентрированного в очень малом объеме Вселенной. В начальный момент Вселенная имела гигантскую плотность и температуру. На первой секунде своего существования мир имел плотность $\sim 10^5 \text{ г/см}^3$ и температуру $\sim 10^{10} \text{ К}$. Современная температура Солнца в тысячу раз меньше.

В течение короткого промежутка времени после Большого взрыва — всего 10^{-36} сек - крохотная Вселенная была заполнена фундаментальными частицами. Эти частицы, в отличие от нуклидов, протонов и нейтронов — неделимы. Из них и состоят, собственно, протоны и нейтроны — основа ядерной материи. Это фундаментальные фермионы, взаимодействующие друг с другом посредством единого, на тот период

Панасюк М. И. Странники Вселенной или эхо Большого взрыва. Фрязино: «Век 2», 2005. - 272 с. - (Наука для всех).

развития Вселенной, фундаментального взаимодействия. Как происходило такое взаимодействие? Через частицы. Они называются бозонами. Их четыре: фотон (гаммаквант), глюон и два бозона

— W и Z. А сами фундаментальные частицы, т.е. фермионы

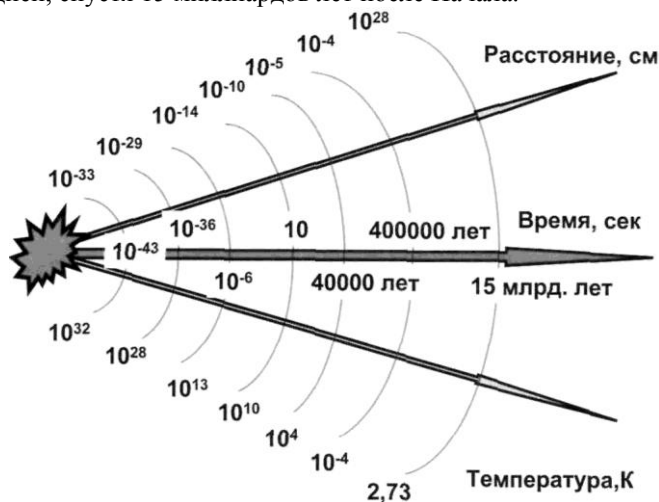
— это шесть видов кварков и шесть видов лептонов.

Именно эта группа частиц из 12 фермионов, взаимодействующих друг с другом посредством 4-х бозонов, по сути

10

Рис. 1.1. Диаграмма Большого взрыва

Рис. 1.1. Диаграмма Большого взрыва — сотворения мира с основными моментами и характеристиками расширяющейся Вселенной. До 10^{-6} сек господствовала эпоха Великого объединения всех трех фундаментальных взаимодействий, закончившаяся слиянием кварков в адроны. На 10 секунде наступила эра доминирования излучения над веществом (радиационная эра). Лишь через 40000 лет вещество начало преобладать над излучением, что привело к образованию атомов (через 400000 лет). Эра вещества продолжается до наших дней, спустя 15 миллиардов лет после Начала.



и есть зародыш Вселенной. Но это еще неполная картина. Среди кварков и лептонов были их антиподы — античастицы, отличавшиеся от обычных частиц знаком некоторых характеристик взаимодействия. В простейшем случае — это электрический заряд (см. рис. 1.2). Например, один из лептонов — электрон может быть как отрицательно заряженным (e^-), так и положительно (e^+), в этом случае его называют позитроном. Античастицы существуют практически у всех частиц, за исключением фотона (γ).

Сверхвысокие начальные температуры Вселенной приводили к столкновениям частиц и их взаимному превращению.

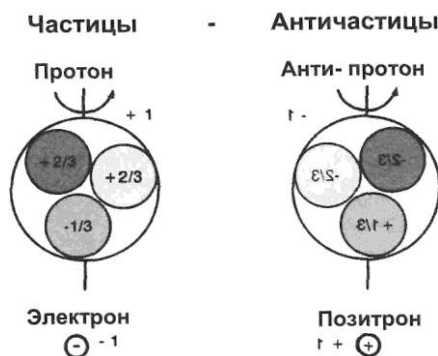
11

Рис. 1.2. Частицы (протон и электрон) и их антиподы

- антипротон и позитрон. Если электрон и позитрон отличаются друг от друга только электрическим зарядом, то протон и антипротон — разной внутренней структурой

- кварками и антикварками. Спин (физическая величина, описывающая вращательное движение) у этих частиц и

античастиц одинаков.



Так, из пары фотонов могли образоваться электрон и позитрон, а столкновение последних

(процесс взаимодействия частицы и античастицы называется аннигиляцией) привести к рождению вновь пары фотонов:

$$(2\gamma) \rightarrow (e^+, e^-),$$

$$(e^+, e^-) \rightarrow (2\gamma).$$

Было возможным и появление новых частиц - нейтрино (ν) и антинейтрино ($\bar{\nu}$):

$$(e^+, e^-) \rightarrow (\nu, \bar{\nu}).$$

А взаимодействие нейтрино со своей античастицей приводило вновь к появлению электрона и позитрона.

Взаимные превращения частиц в условиях сверхвысоких температур напоминали «кипящий суп», в котором число частиц и античастиц было равным. Это означает, что наряду с Вселенной существовала и Антивселенная. Сейчас, через многие миллиарды лет, делаются попытки найти ее или то, что от нее осталось.

12

Вернемся к расширяющейся Вселенной первых мгновений ее существования. Современная физика полагает, что частицы

— фермионы и бозоны, появившиеся сразу после Большого взрыва, неделимы. «Полагает» — означает, что нет пока никаких сведений об их внутреннем строении. Фермионы и бозоны были безмассовыми где-то вплоть до 10^{-10} сек развития Вселенной, и составляли так называемый «кипящий суп» крохотной Вселенной. Они взаимодействовали друг с другом по единому закону Великого объединения.

На 10^{-36} сек эпоха Великого объединения рухнула. Характер взаимодействия частиц начал меняться. Слияние частиц и образование более тяжелых было невозможным, пока Вселенная имела высокую температуру.

Охлаждение Вселенной продолжалось в течение 1 микросекунды. За это время частицы, наполняющие крохотную, размером не более 10^{-14} см, Вселенную, приобретают массу, их энергия увеличивается, и появляются новые частицы

— «настоящие» кварки, с массой, - кирпичики той материи, из которой и состоит современная Вселенная. Стало возможным слияние кварков в более массивные частицы — адроны и антиадроны.

Но Вселенная продолжала остывать, и это привело к уменьшению числа адронов по сравнению с числом лептонов. Среди лептонов имеются нейтрино. В этот период жизни Вселенной (на этот момент ей исполнилось примерно 10 сек) нейтрино, практически не обладающие массой, оказались на свободе: их расширение происходило независимо от всех остальных частиц. Это — реликтовые нейтрино. Ожидается, что они сохранились до сих пор (более подробно о них будет рассказано в главе 11).

Тем временем, аннигиляция частиц продолжалась, что вызвало увеличение числа фотонов. Вселенная стала состоять практически из одного излучения — фотонов и нейтрино. Это была радиационная эра в ее развитии. Дальнейшее уменьшение температуры за счет расширения Вселенной и уменьшение энергии излучения привело к тому, что через десятки тысяч лет после Большого взрыва вещество начало

13

преобладать над излучением, и практически перестало с ним взаимодействовать. А через сотни тысяч лет после Большого взрыва Вселенная как будто «забыла» о своем исходном состоянии.

Но нам остались «свидетели» той эпохи. Это реликтовые нейтрино и реликтовые фотоны. Если вторые уже «пойманы» (о них пойдет речь ниже), то задача экспериментального обнаружения реликтовых нейтрино — чрезвычайно сложна, и ее не удастся пока решить.

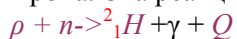
1.2. Сотворение вещества

Когда я был моложе, я думал, что наука и космология могут объяснить строение Вселенной. Сейчас я так не думаю.

Яков Зельдович

Радиационная эра развития Вселенной — чрезвычайно важный период. Именно в это время начали возникать тяжелые ядра — основа химических элементов, заполняющих периодическую таблицу Д.Менделеева. Этот процесс носит название нуклеосинтеза.

Протон, самое легкое ядро, появилось через десятки секунд после рождения Вселенной. В это время температура и плотность Вселенной были достаточно высокими для осуществления синтеза дейтерия — ядра, состоящего из двух протонов, образовавшегося при соударении протона и нейтрона. Эта реакция синтеза сопровождалась генерацией фотонов и выделением энергии:



Здесь $Q = 2,2$ МэВ ($1\text{МэВ} = 10^6\text{эВ}$ - единица измерения энергии) — энергия, выделяемая в этой реакции синтеза. Затем в течение очень короткого промежутка времени (около 10^{-15} минут)

Панасюк М. И. Странники Вселенной или эхо Большого взрыва. Фрязино: «Век 2», 2005. - 272 с. - (Наука для всех).

произошла цепочка реакций превращения дейтерия в тритий и, наконец, дейтерий и тритий образовали гелий ${}^4_2\text{He}$ - второй

14

по своей распространенности элемент во Вселенной. Расчеты показывают, что в этот момент его образовалось приблизительно 24% от всех нуклидов Вселенной. Именно такое среднее содержание гелия мы наблюдаем и в наши дни, в условиях современной Вселенной. Заметим, что цепочка реакций синтеза легких ядер происходит с большим выделением энергии. При создании мощнейших генераторов энергии — термоядерных реакторов и водородных бомб именно эти реакции были взяты за основу.

Но вернемся к модели расширяющейся Вселенной. Когда возникли звезды? Предполагается, что процесс звездообразования начался через 1 миллиард лет после Большого взрыва в результате образования неоднородностей в распределении вещества во Вселенной и гравитационного взаимодействия между отдельными его сгустками. Последние исследования на космических телескопах действительно обнаруживают в далеких областях Вселенной повышенные концентрации вещества - их называют «газовыми» или «молекулярными облаками». Именно здесь наблюдается повышенное количество звезд. Безусловно, процесс образования звезд — очень медленный (по человеческим меркам) — сотни тысяч и миллионы лет.

Модели образования звезд сводятся к первичному формированию, так называемой, протозвезды — сильно разогретому до 10^6K сгустку веществ, состоящему из атомов, лишенных своих электронных оболочек, и свободных электронов. Вещество протозвезды сжимается — коллапсирует, температура ее повышается. Происходит осаждение вещества из окружающего пространства - аккреция. Затем внутри звезды начинаются реакции термоядерного синтеза.

Эти реакции развиваются, когда масса протозвезды становится в 10 раз меньше массы Солнца. Этот период жизни звезды характеризуется «выгоранием» в термоядерном котле легких элементов и образованием тяжелых. В этом плане формирование звезд - важный этап синтеза элементов во Вселенной.

При температуре протозвезды $\sim 10^6\text{K}$ происходят реакции горения дейтерия ${}^2_1\text{H} + {}^2_1\text{H}$ с образованием трития ${}^3_1\text{H}$.

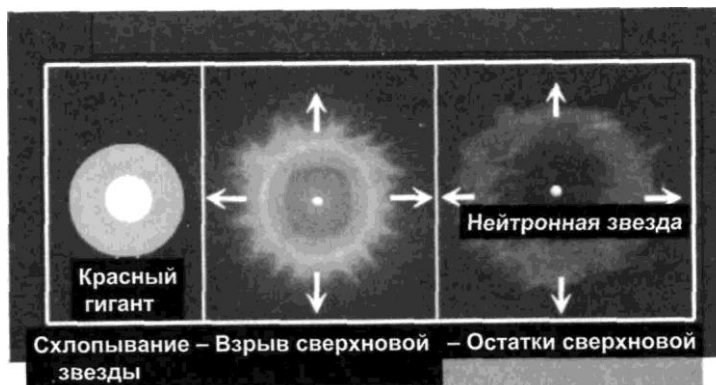
15

Образование трития приводит к увеличению размера протозвезды. Температура ее начинает расти из-за гравитационного сжатия, и возникают условия для последовательного сгорания вещества, начиная от водорода и кончая кремнием и железом. Водород в этой топке горит дольше всех других элементов. Звезда расходует энергию в течение этой фазы, но она не тускнеет, а сжимается, т.к. энергии горения не хватает на преодоление гравитационного сжатия.

Затем во внешней оболочке звезды гелий переходит в углерод, кислород и азот. Этот период времени занимает несколько миллионов лет, постепенно сокращаясь по мере выгорания легких элементов. Не более 1% общей массы звезды превращается в энергию.

Число фаз горения зависит от первоначальной массы звезды. Если она больше 8 масс Солнца, то произойдут все фазы горения вплоть до железа. Синтез новых элементов в термоядерном котле заканчивается на железе - оно не вступает в дальнейшие превращения.

Термоядерный синтез и горение звезды продолжают миллиарды лет, пока не выгорит основная масса водорода. После этого происходит сильное разбухание наружной оболочки звезды, и она переходит в состояние красного гиганта,

Рис. 1.3. Превращение красного гиганта в нейтронную звезду.

16

спектр излучения которого смещен в сторону длинных волн (в связи с охлаждением оболочки). В этом состоянии преимущественно выгорают более тяжелые элементы. С течением времени красный гигант теряет устойчивость, сбрасывает оболочку и уплотняет свою внутреннюю часть. Возникает планетарная туманность с рассеянной диффузной оболочкой большого радиуса и плотным ядром в центре (рис. 1.3).

1.3. Гибель звезд

Только пепел знает, что значит сгореть дотла...

Иосиф Бродский

Ну а далее может произойти, пожалуй, одно из наиболее интересных и величественных событий во Вселенной. По мере истощения термоядерных циклов в звезде начинают преобладать гравитационные силы, которые заставляют сжиматься, коллапсировать звезду. Процесс вновь сопровождается повышением температуры. Становится возможным развал ядер железа в центральной части звезды на нейтроны, протоны и более тяжелые ядра — гелия (альфа-частицы).

Кроме того, происходит превращение пары (p , e^-) в пару нейтрино-антинейтрино. Нейтрино слабо взаимодействует с веществом и покидает разваливающуюся звезду. Потоки нейтрино уносят львиную долю энергии сгорающей звезды. Выход нейтринного потока сокращает время жизни звезды — циклы горения элементов сокращаются. Создается своеобразный нейтринный импульс — свидетельство взрыва звезды.

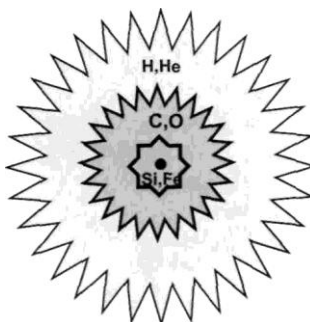
В результате образуется «лукообразная» структура звезды с очень малым по размеру железным ядром и внешней оболочкой из более легких элементов (рис. 1.4).

Если масса железного ядра превышает некоторый предел, звезда коллапсирует и превращается в нейтронную звезду или пульсар с гигантской плотностью вещества. На разных стадиях температура и время горения вещества различаются (см. таблицу 1.1).

17

Рис. 1.4. Многослойная структура «горящей» звезды

Рис. 1.4. Многослойная структура «горящей» звезды — ядра красного гиганта, и превращение её в нейтронную. Горение начинается с легких элементов и заканчивается на кремнии, сере и железе. Формируется «железная» звезда, которая взрывается вследствие гравитационного коллапса. Это момент вспышки сверхновой. Более 90% массы звезды уносится в пространство. От красного гиганта остается нейтронная звезда.



Требуется всего несколько секунд, чтобы звезда перешла в совершенно новое состояние, новый объект. Процесс может пойти дальше — к образованию черной дыры. Коллапс связан с высвобождением энергии, передающейся наружу, к внешним оболочкам, и сопровождающейся резким повышением температуры до миллиардов градусов. Это и есть взрыв сверхновой — для наблюдателя яркая вспышка звезды на небосклоне.

Таблица 1.1. Времена горения звезды и испускания частиц.

Элемент	Температура 10^9 K	Время горения	Испускаемые частицы
Водород	0,02	$7 \cdot 10^6$ лет	Фотоны, нейтрино
Углерод	0,8	600 лет	Нейтрино
Кремний	3.5	1 сутки	Нейтрино

Взрывная волна, распространяющаяся от остатков сверхновой, летит через звездное пространство, создавая локальные неоднородности в распределении плотности вещества — местами разрежения, а местами уплотнения. Вещество, которое

18

образуется при взрыве самой сверхновой, рассеивается в гигантском объеме пространства галактик и перемешивается с более ранними остатками от взрывов других сверхновых с тем, чтобы вновь, в результате длительной эволюции, превратиться в звезды, часть которых вновь должна взорваться. Затем могут образоваться новые звезды, и процесс начнется сначала. Все элементы тяжелее гелия на Земле появились в этот период времени как продукты ядерных реакций и они разлетаются по Вселенной в результате энергии взрыва сверхновых - умирающих звезд.

Есть еще один вариант последовательности событий. Красный гигант, испытывая периодические осцилляции из-за потери вещества, может не перейти на стадию взрыва сверхновой, и тогда она превратится в белого карлика - стационарную, постепенно остывающую звезду. Это может произойти, если по мере прекращения термоядерных реакций на стадии красного гиганта, масса звезды станет меньше массы Солнца. Напротив, если же масса звезды достигнет нескольких масс Солнца, то процесс пойдет по сценарию взрыва сверхновой.

На рис. 1.5 показана диаграмма эволюции типичной звезды, иллюстрирующая сказанное выше. Вот такой «взрывообразный» круговорот происходит с нашей Вселенной... Трудно представить, но все, что есть на Земле и живая природа, и неживая - состоит из «пыли», остатков вещества, взрывающихся звезд.

Взрыв сверхновой - это поистине замечательное событие, не сравнимое по своей энергетике ни с одним достоверно наблюдаемым и «поддающимся» физическим оценкам процессом в окружающем нас мире. Достаточно сказать, что взрыв сверхновой сопровождается выделением энергии, оцениваемой в 10^{52} — 10^{54} эрг. Это пока рекордное энерговыделение астрофизических объектов, реально наблюдаемых и достаточно хорошо изученных.

А наше Солнце, ближайшая к нам звезда? Ей тоже грозит такая же участь - превратиться в пепел? Ведь даже в Библии (Книга пророка Исаии, 60:19) сказано:

19

Рис. 1.5. Циклический процесс эволюции звезд.

Рис. 1.5. Циклический процесс эволюции звезд. Вслед за начальным сжатием оболочки звезды происходит её расширение и образование красного гиганта, в котором сгорают легкие элементы. Массивная «многослойная» звезда с железным ядром может взорваться как сверхновая или превратиться в белого карлика. Сверхновая превращается в нейтронную звезду или пополняет веществом межзвездное пространство. Космические лучи - часть этого вещества.



«Не будет уже Солнце служить тебе светом дневным, и сияние Луны — светить тебе».

И там же:

«И свет Луны будет как свет Солнца, а свет Солнца будет светлее всемерно, как свет семи дней, в тот день».

Превращение Солнца в красный гигант (см. рис. 1.5) - неминуемо. Однако это случится не скоро. Время горения внешних оболочек звезды (когда выгорают легкие элементы) на многие порядки превышает время выгорания более тяжелых. Сейчас на Солнце сгорает водород и пройдет очень много времени, прежде чем температура в центре нашей звезды достигнет величины, при которой станет возможным горение более тяжелых элементов. Оценки показывают, что гравитационного

20

коллапса Солнца следует ожидать не ранее, чем через 5 миллиардов лет. Мы еще вернемся к проблеме сверхновых в последующих разделах книги, т.к. именно они ответственны за многие физические явления во Вселенной, оказывающие влияние, в том числе, и на жизнь на нашей планете.

Таким образом, сразу после Большого взрыва, а затем в процессе формирования звезд и при взрывах сверхновых, во Вселенной происходит превращение вещества - формирование его ядерного состава. Можно отметить, что именно модель Большого взрыва, краткий набросок которой был дан выше, способна описать эволюцию элементов во Вселенной и количественно продемонстрировать их распространенность на сегодняшний день.

Наиболее распространенным элементом во Вселенной, как уже было сказано, является водород. На втором месте находится гелий - его не более 10% от количества водорода. Многие данные о содержании гелия в различных объектах Вселенной свидетельствуют в пользу модели его происхождения в первые минуты после Большого взрыва.

Вслед за гелием в периодической системе элементов находятся более тяжелые элементы: литий (Li), бериллий (Be) и бор (B). Эти элементы, в отличие от водорода и гелия, должны скорее разрушаться, чем образовываться, при первоначальных гигантских температурах Вселенной. И действительно, по сравнению с водородом и гелием, их чрезвычайно мало в межзвездном пространстве и в составе звезд. Еще более тяжелые ядра — вплоть до железа (Fe) образуются в результате слияния (реакций синтеза) в недрах горящих звезд. Их относительная распространенность диктуется законами ядерных реакций и свойствами самих атомных ядер. Синтез элементов тяжелее железа также происходит в результате ядерных реакций, но отличающихся от реакций, характерных для более легких элементов.

Определение распространенности элементов во Вселенной — один из путей изучения тех
Панасюк М. И. Странники Вселенной или эхо Большого взрыва. Фрязино: «Век 2», 2005. - 272 с. - (Наука для всех).

физических процессов, которые происходят на разных стадиях ее развития. Это одна из важнейших задач астрофизики.

21

1.4. Наш мир — темный и светлый или жизнь в вакууме

Даже то пространство, где негде сесть, как звезда в эфире, приходит в ветхость.

И. Бродский

Прошло около 14 миллиардов лет после Большого взрыва и мы наблюдаем современную Вселенную. Из чего она состоит? Вселенная содержит 10^{11} галактик и ее размер $\sim 10^{23}$ км. Средняя плотность вещества и энергии во Вселенной определяется в первую очередь из радиоастрономических наблюдений и с довольно хорошей точностью $\rho \sim 10^{-29}$ г/см³. Сравните это с первоначальной плотностью Вселенной сразу после Большого Взрыва — 10^5 г/см³!

Рассмотрим вкратце структуру ближайшей к нам области Вселенной - Галактики (с большой буквы!) - среды нашего обитания.

Рис. 1.6. Наша Галактика. Скопление звезд в основном в спиральных рукавах. В одном из них сейчас находится наша Солнечная система.



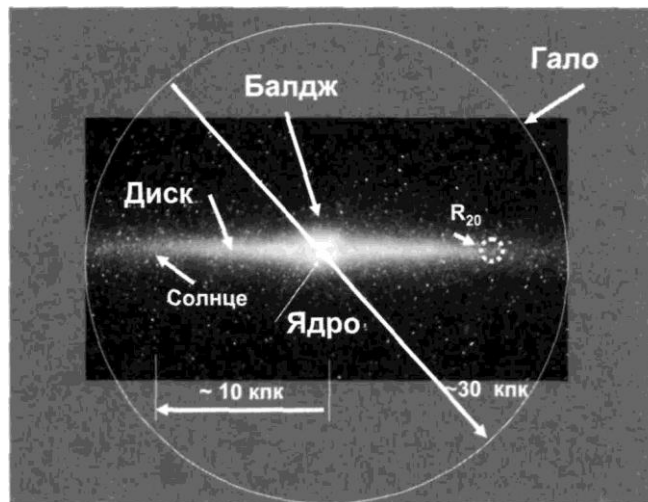
22

Наша Галактика — Млечный Путь — принадлежит к так называемым галактикам спирального типа (S — галактики), представляющих собой вращающийся диск из водородного газа, пыли и звезд с ярко выраженными спиральными рукавами (рис. 1.6). Это — сложный астрономический объект, состоящий из ядра, утолщения в центральной части, — балджа (от английского слова «*bulge*»), гало и собственно самого диска (рис. 1.7). В плотном ядре в центре диска находятся, в основном, старые звезды, и в нем нет газа и пыли. В центре нашей Галактики находится черная дыра (об этих замечательных астрофизических объектах прекрасно рассказано в книге А.М.Черепашука «Черные дыры во Вселенной»).

Недавно орбитальная рентгеновская обсерватория *Chandra* зафиксировала мощную рентгеновскую вспышку в центре Галактики, что позволило определить размер черной дыры - не более расстояния от Земли до Солнца.

Диск Галактики заполнен газом, пылью и, в основном, молодыми звездами. Поперечник диска имеет размер около

Рис. 1.7. Структура нашей Галактики — Млечного Пути с характерными размерами.



23

30000 парсек (пк), балджа - 8000 пк. В спиральных рукавах диска сосредоточены почти все звезды и большая часть газопылевой материи.

Диск окружен сферическим гало. Его размер на порядок превышает поперечный размер диска. В гало находятся редкие звезды и скопления звезд - кластеры, насчитывающие многие сотни тысяч звезд. Кроме этого, в гало есть темная материя (*dark matter*), которая была идентифицирована по гравитационным эффектам. Темная материя увеличивает массу Галактики, по крайней мере, в несколько раз.

Солнце находится в спирали Ориона на расстоянии ~ 25000 пк от центра нашей галактики. Солнце — относительно молодая звезда — ему 5 миллиардов лет. Млечный путь, по крайней мере, вдвое старше, чем Солнце, — возраст звездных кластеров может насчитывать 10 миллиардов лет.

Общее число звезд в диске Галактике — 10^{11} (сто миллиардов). Помимо звезд Галактика включает и межзвездную среду. Основным компонентом межзвездной среды является межзвездный газ, состоящий в основном ($\sim 90\%$) из водорода и межзвездной пыли ($\sim 1\%$). В составе межзвездной среды — магнитные поля, электромагнитные излучения. Галактика вращается дифференциально: на периферии скорость ее вращения меньше, чем в центральных областях. Период обращения нашей Солнечной системы вокруг центра Галактики составляет приблизительно 200 миллионов лет. Запомним эту цифру. Мы к ней еще вернемся в конце книги.

Средняя плотность вещества в диске $\sim 10^{24}$ г/см³ (~ 1 атом водорода на см³). Существуют большие отклонения от этой величины — плотные облака, протяженностью до десятков парсек с плотностями от 100 до 1000 атомов/см³.

Вещество, находящееся в Галактике в атомарном состоянии, под действием ультрафиолетового излучения звезд ионизируется (нейтральные атомы «теряют» свои электронные оболочки). Так, например, до 90% водорода составляют его ионы — протоны.

Масса всей Вселенной, а это — звезды, межзвездная пыль и газ, молекулярные облака, планеты сосредоточена почти

24

целиком в протонах и нейтронах (85% приходится на протоны, а 15% на нейтроны). Нейтроны, будучи нестабильными частицами, существуют только внутри ядер. Все это составляет так называемую барионную материю.

Обратимся теперь к вопросу о количественных соотношениях между различными формами материи в современной Вселенной. На рис. 1.8 дан ответ на этот вопрос, согласно уровню наших знаний на сегодня. Из диаграммы, приведенной на этом рисунке, видно, что лишь несколько процентов (около 4%) состава Вселенной относится к тому, из чего, как мы полагаем, образован наш мир. Это — барионная материя. Все остальное, а это практически 96%, темная материя и темная энергия - пока малопонятные для нас материальные субстанции Вселенной. Мы знаем, что они определенно существуют. Но мы не знаем, что это такое. Мы только строим гипотезы и пытаемся осуществить эксперименты, в надежде доказать их справедливость. Но факт остается — у нас пока нет аргументов в пользу окончательного выбора гипотезы,

Рис. 1.8. Структура материи во Вселенной.

Рис. 1.8. Структура материи во Вселенной. Вклад барионной материи — не более 5%. Остальное приходится на небарионную «темную материю» и «темную энергию», природа которых неизвестна.



25

объясняющей состав темного вещества и темной энергии во Вселенной.

Темная энергия, согласно современным воззрениям, — это как раз та сила, которая заставляет Вселенную расширяться. Если привычная нам гравитация заставляет тела притягиваться друг к другу, то темная энергия — скорее антигравитация, способствующая разлету тел во Вселенной. По-видимому, сразу после Большого взрыва расширение Вселенной происходило с замедлением, но после этого «темная энергия» преодолела гравитацию и началось ускорение. Это не гипотеза, а экспериментальный факт, обнаруженный по красному смещению и изменению яркости далеких сверхновых звезд: они ярче, чем им следовало бы быть при замедлении расширения Вселенной. Эффект «красного смещения» — регистрируемое наблюдателем увеличение длины волны спектра наблюдаемого источника — один из замечательных экспериментальных астрономических фактов. Космологическое «красное смещение» наблюдаемых галактик было предсказано А.Эйнштейном и является по сей день одним из убедительных доказательств расширяющейся Вселенной.

Окунаясь в эпоху ранней космологии, можно вспомнить, что именно великий А. Эйнштейн, стараясь сохранить статичность Вселенной, ввел ставшей исторической космологическую константу Λ , уравнивающую силы притяжения небесных тел. Но вслед за открытием «красного смещения» он вычеркнул константу Λ из своих уравнений. Видимо, А.Эйнштейн был неправ, отказавшись от нее: ведь Λ это и есть та темная энергия, которая интригует современных астрофизиков.

Не ясно, повезло или нет человечеству, но оно живет в период развития Вселенной, когда темная энергия преобладает, способствуя расширению. Но этот процесс, вероятно, не вечен и через время, сопоставимое с возрастом Вселенной (10-20 миллиардов лет), история может повернуть вспять — наш мир начнет сжиматься. Наступит или нет момент «Большого схлопывания» — альтернативы Большого взрыва, безусловно, большой вопрос современной космологии.

26

Ученые сумели доказать существование расширяющейся Вселенной — это красное смещение оптического излучения Галактики и реликтовое электромагнитное излучение — реликтовые фотоны, о которые пойдет речь ниже. Возможно, ученым удастся в будущем установить и существование «предвестников» надвигающегося сжатия Вселенной.

Другой экспериментальный факт — отклонение света от далеких галактик в гравитационных полях Вселенной привел астрофизиков к выводу о существовании скрытой — темной материи — где-то вблизи нас. Именно темная материя изменяет траектории световых лучей на большую величину, чем этого следовало ожидать в присутствии лишь видимых близлежащих галактик. В попытке построить пространственную модель структуры темной материи было изучено распределение на звездном небе более 50000 галактик. Все полученные результаты неумолимо свидетельствуют в пользу ее существования, причем Вселенная — это в основном и есть темная материя. Современные оценки говорят о том, что ее около 80%. Здесь мы вновь повторим — нам

Панасюк М. И. Странники Вселенной или эхо Большого взрыва. Фрязино: «Век 2», 2005. — 272 с. — (Наука для всех).

неизвестно, из каких частиц состоит темная материя. Ученые лишь предполагают, что она состоит из двух частей: пока неизвестных каких-то экзотических массивных частиц и физического вакуума.

Мы еще вернемся к этой проблеме в последующей главе книги, а пока обратимся вновь к привычной для нас форме вещества, состоящей из барионов (протонов и нейтронов) и электронов - «барионной материи». О ней мы знаем гораздо больше. Более чем за столетний период истории развития физики — от открытия элементарных частиц и строения атома до результатов исследований в этой области, а также и в астрофизике, наука получила в свое распоряжение множество новых результатов о строении привычного нам вещества.

1.5. «Большой взрыв» на Земле

Время больше пространства. Пространство — вещь.

И. Бродский

Реалистична ли эта картина первых мгновений жизни Вселенной? Что могут представить физики в качестве доказательств? Здесь надо отвлечься от эпохи Большого взрыва и вспомнить другую эпоху — середину прошлого века.

Конец Второй мировой войны ознаменовался другим взрывом - атомной бомбы, который вызвал в научном сообществе тоже своего рода «Большой взрыв» интереса к проблемам строения вещества. Не затрагивая военного значения этого исторического момента, можно сказать, что это явилось началом активного развития мощного научного направления

— физики микромира. Весь послевоенный период развития физики — это бурный натиск на изучение структуры вещества. И немалую роль здесь сыграли атомные проекты СССР и США. Именно благодаря им ядерная физика, а затем и физика высоких энергий, изучающая элементарные частицы, получили мощный импульс своего развития. Физика высоких энергий изучает природу вблизи нулевой границы пространственно-временной шкалы, приближаясь к эпохе Большого взрыва и, как это ни парадоксально, теснейшим образом связана с космологией и астрофизикой - науками, изучающими природу у верхних границ этой шкалы.

Такая взаимосвязь объясняется тем, что многие важнейшие объекты во Вселенной (такие как пульсары, черные дыры) и Вселенная в целом на ранних стадиях эволюции

— это квантовые объекты. Основные параметры и времена эволюции таких объектов тесно связаны с характеристиками фундаментальных частиц и взаимодействий. Чем полнее мы знаем свойства частиц, тем точнее можем просчитать свойства объектов космических масштабов.

Квантовая механика — очень точная наука. Она основана на соотношении неопределенности и вычислениях вероятности событий, но для большого числа частиц (больших масс

28

вещества) измеряемые величины вычисляются намного точнее, чем в классической физике.

Чтобы проникнуть в глубину материи и изучить ее внутреннее строение, нужно создать большие концентрации энергии. Чем меньше объект изучения, тем больше требуется энергии, чтобы изучить его характеристики. Это следует из квантовой механики, согласно которой все частицы микромира имеют, подобно фотонам, корпускулярно-волновую природу и описываются соотношениями де Бройля. Для релятивистских протонов и антипротонов, которые используются для «просвечивания» ядер и других субатомных частиц в современных экспериментах, длина волны де Бройля

$$\lambda = hc/E,$$

где E — энергия частицы, h — постоянная Планка и c — скорость света в вакууме.

Кварки и лептоны имеют размер менее 10^{-16} см. Согласно Планку для «внедрения» в такие размеры необходимы гигантские энергии, которые требуют создания циклопических по размерам установок на Земле. Это ускорители, которые разгоняют частицы до необходимых энергий. Они стали основным инструментом исследования внутренней структуры ядра и частиц, и их фундаментальных взаимодействий. Именно с развития атомных проектов в двух крупнейших странах мира и началось строительство гигантских ускорителей для изучения структуры материи.

Наиболее мощный на сегодня ускоритель — *Tevatron* в Fermilab, США, — коллайдер, в котором сталкиваются встречные пучки протонов и антипротонов с энергией 1 ТэВ (1 ТэВ = 10^{14} эВ) внутри кольцевого туннеля диаметром около 6 км. При этом выделяется энергия ~2ПэВ ($2 \cdot 10^{15}$ эВ). А вступающий в строй в 2006 г. ускоритель LHC (*Linear Hadron Collider*) в Европейском

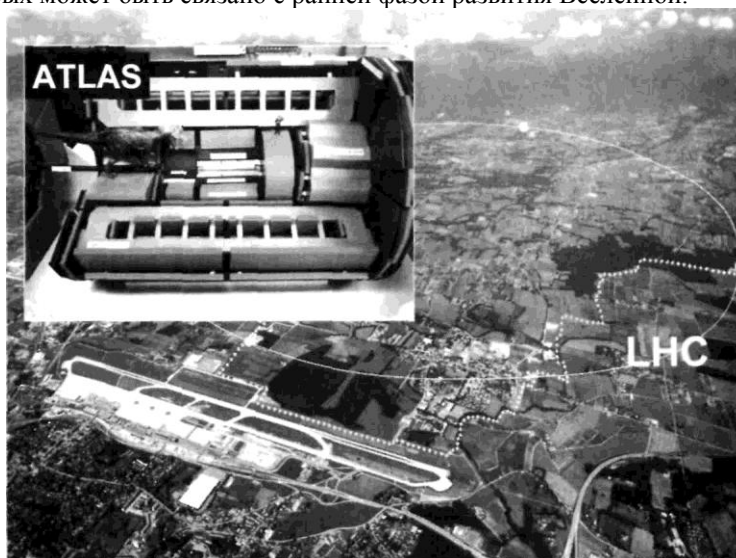
центре космических исследований (CERN), в Швейцарии (рис. 1.9), достигнет максимальных энергий сталкивающихся частиц в 14 ТэВ, что приводит к выделению энергии 100 ПэВ. Диаметр кольца этого ускорителя сопоставим с размером Москвы - около 27 км. Энергии, достижимой на

таком современном ускорителе, как LHC, будет достаточно, чтобы изучать частицы с размерами, характерными для фермионов и бозонов, — 10^{-16} см и менее. Таким образом, физика микромира - это физика высоких энергий.

Конечно, возможности наземной физики высоких энергий не безграничны. Вряд ли в ближайшем будущем в ускорительных экспериментах достижимы значительно более высокие энергии, чем те, которые предполагается получить на LHC (100 ПэВ).

Рис. 1.9. Строящийся в Европейском центре ядерных исследований (CERN) гигантский коллайдер - ускоритель сталкивающихся частиц.

Его подземный туннель занимает гигантскую площадь: он будет иметь диаметр около 27 км (слева внизу — Женевский аэропорт). Вверху слева показан один из детекторов - ATLAS. На фоне человека и динозавра читатель легче может представить его гигантские размеры. Коллайдер будет регистрировать новые частицы, происхождение которых может быть связано с ранней фазой развития Вселенной.



30

А могут ли в природе существовать частицы с энергиями, превышающими «ускорительные»? — Да. Сама природа нам предоставила возможность иметь дело с частицами поистине фантастических энергий. Оказалось, что во Вселенной существуют природные ускорители, разгоняющие частицы до энергий в десятки тысяч, а возможно, в миллионы раз превышающие возможности современных наземных установок.

Эти частицы - космические лучи. О них и пойдет далее речь.

Глава 2. СТРАННИКИ ВСЕЛЕННОЙ

В космосе ничего не пропадает.

С.Лем

В начале XX века французский физик Г.Беккерель обнаружил, что некоторые химические элементы нестабильны — они могут превращаться в другие элементы. Такое превращение сопровождается испусканием частиц. Поток этих частиц получил название радиация, а сам процесс — радиоактивный распад. Обнаружить эти частицы можно было с помощью единственного в то время прибора — электроскопа, который позволял определить присутствие электрически заряженных частиц, находящихся вблизи него. Прибор разряжался в присутствии радиоактивных веществ, излучавших заряженные частицы. По скорости разряда электроскопа определяли уровень мощности радиации.

Открытие космических лучей связано с исследованиями ионизации атмосферного воздуха и газов. Первые свидетельства возможности существования космического излучения были получены английским физиком Ч.Вильсоном (Нобелевским лауреатом 1927 г.) в 1900 г. в его исследованиях с проводимостью газов. Возникающий под действием электрического поля остаточный ток в электроскопе, обнаруженный им, мог быть объяснен ионизацией газа от гамма-излучения, связанного с естественной радиоактивностью почвы и присутствием в воздухе эманации радия — радиоактивного элемента. Однако, существование этого тока в условиях сильной экранировки экспериментальной установки от гамма-

32

квантов позволило Ч.Вильсону высказать предположение о внеземной природе излучения, ответственного за ионизацию газа и, как следствие, генерацию остаточного тока. Ч.Вильсон полагал, что источником этого излучения могут быть частицы высокой энергии, возникающие в верхних слоях атмосферы за счет ускорения электронов в электрическом поле грозových облаков. Наличие внеземного излучения было позднее подтверждено в экспериментах над поверхностью Земли. Среди них: эксперименты Г.Вульфа на Эйфелевой башне (1910-1914 гг.) и Д.Гоккеля (1909-1910 гг.) на воздушном шаре на высотах до 4000 м.

Наиболее результативным оказался эксперимент В.Гесса (1911-1912 гг.) по подъему электроскопов для исследования ионизации на высотах до 5000 м (рис. 2.1).

Именно в этих экспериментах, рискуя жизнью, В. Гесс обнаружил, что ионизационный ток в электроскопе сначала падает (вследствие ослабления влияния радиоактивности Земли), а затем начинает расти за счет увеличения доли космического излучения (рис 2.2). В.Гесс назвал это излучение *«Durchdringende no Höhenstrahlung»* — «проникающее высотное излучение». Он полагал, что это так называемые «ультра-гамма-лучи». В начале XX века гамма-излучением называли компоненту радиоактивного излучения ядер, которая не испытывала отклонения при движении в магнитном поле, в отличие от альфа-излучения и бета-излучения. Во время одного из полетов В. Гесса произошло

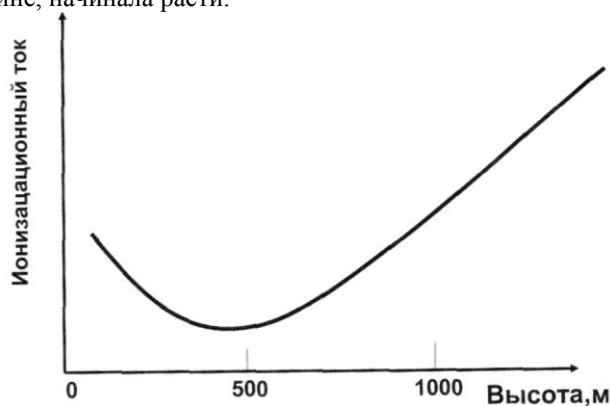
Рис. 2.1. Виктор Гесс в гондоле аэростата после проведения экспериментов по исследованию ионизации газов (1912 г.).



33

Рис. 2.2. Примерно так выглядела кривая изменения ионизации с высотой в экспериментах В.Гесса.

Вначале скорость ионизации падала вследствие уменьшения влияния радиоактивности самой Земли, а затем, по неизвестной причине, начинала расти.



солнечное затмение, но он не увидел уменьшения ионизации. Он сделал правильный вывод, что источником излучения не может быть Солнце.

Эти эксперименты послужили началом нового направления в физике — физики космических лучей. Лишь много лет спустя, в 1936 г., за открытие космических лучей В.Гессу была присуждена Нобелевская премия.

Термин «космические лучи» был дан этому новому виду излучений физиком Р.Миллиkenом (рис.2.3), который продолжал работы в этой области в 1922-1926 гг., достигнув на шарах-зондах высоты измерений 15,5 км. Он показал, что интенсивность космических лучей меняется с высотой, следуя вполне определенной закономерности, связанной с эффективностью их поглощения в атмосфере. Р.Милликену принад-

Рис. 2.3. Р.Милликен.

34

лежит идея зарождения космических лучей в межзвездном пространстве, но не в самих звездах. Она была основана на наблюдениях независимости «ультра-радиации» — космических лучей, наблюдаемых в определенном месте, — от положения на небе Солнца и Млечного Пути. Это было вполне справедливо, согласно современным представлениям, но... лишь отчасти...

Другие физики — Ф.Цвикки вместе с В.Бааде (рис. 2.4) в 1934 г. высказали идею о «новых» и «сверхновых» звездах - источниках космических лучей. Они опубликовали свою гипотезу в 1934 г. в журнале *Physical Review*. Насколько плодотворной оказалась эта идея можно судить о продолжающемся до сих пор потоке научных публикаций, связанных как с теорией ускорения частиц при взрывах сверхновых звезд, так и с экспериментами, направленными на поиски подтверждений этой гипотезы.

Р.Милликен вслед за В.Гессом также полагал, что космическое излучение — это гамма-кванты или гамма-лучи. Поэтому он по аналогии и назвал неизвестный вид проникающего излучения «космическими лучами». Это было в 1932 г. Термин прижился, однако космические лучи не имеют ничего общего с лучом света, а скорее напоминают разреженный

Рис. 2.4. Ф.Цвикки (слева) и В.Бааде первыми обратили внимание на сверхновые звезды, как возможные источники космических лучей.

35

Рис. 2.5. Д.В.Скобельцын — один из первых отечественных исследователей космических лучей.

Рис. 2.6. В отличие от электронов, траектории которых искривляются магнитным полем, трек космической частицы виден в виде прямой линии.



газ, состоящий из частиц, редко взаимодействующих друг с другом.

В первых опытах исследователи имели дело с результатом взаимодействия космических лучей с воздухом и, как следствие, наблюдали остаточный ионизационный ток в приборах. Русские физики Л.Мысовский и Л.Тувим, изучив поглощение частиц в воде, которое было значительно меньше, чем для гамма-квантов, пришли к выводу о большей проникающей способности космического излучения.

Д. Скобельцын (рис. 2.5) был первым, кто смог «увидеть» сами частицы. Для этого он использовал камеру Вильсона, позволявшую регистрировать треки — следы отдельных частиц. Поместив ее в магнитное поле, он обнаружил следы слабо отклоняющихся в магнитном поле частиц (рис. 2.6). Это были космические лучи — частицы из далеких областей Вселенной.

Таково вкратце начало истории открытия космических лучей.

Глава 3. КАК ПОЙМАТЬ КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ

История научных исследований, подобно истории географических открытий, знает немало примеров, когда неожиданное открытие совершенно заслоняло первоначальную цель.

Б. Росси

Исследователи начали изучать космические лучи с помощью приборов на Земле или вблизи нее, на воздушных шарах. Однако, над ними расположена немалая толща атмосферы...

3.1. Космические лучи в атмосфере

Свойство атмосферы поглощать космические лучи было обнаружено еще в первых экспериментах В.Гесса. Попадая в атмосферу Земли, космические частицы (а это в основном протоны и ядра элементов более тяжелых, чем водород) испытывают столкновения с ее атомами и молекулами. В результате происходит расщепление ядер и образование многочисленных вторичных частиц. Среднее расстояние, которое успевает пройти протон в атмосфере, соответствует примерно 1/13 части ее толщи. Это означает, что он может неоднократно вступать в процессы взаимодействия с ядрами воздуха, прежде чем окончательно погибнуть. Отсюда следует, что на меньших высотах вблизи Земли, или в терминах физиков, изучающих космические лучи, — на «больших глубинах», в атмосфере существует лишь вторичная компонента космических лучей.

Состав вторичной компоненты обусловлен физическими процессами взаимодействия первичной частицы с ядрами

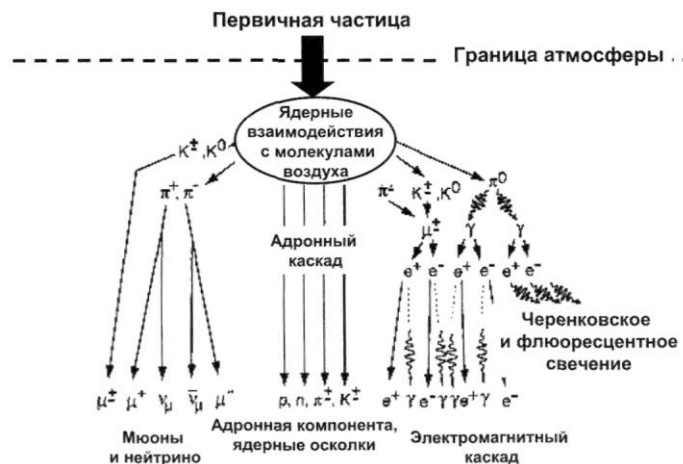
37

атмосферы. Этот процесс называется каскадным. Схема взаимодействия протонов космических лучей с атмосферой показана на рис. 3.1. В актах взаимодействия первичной частицы космических лучей рождаются практически все известные элементарные частицы.

В первоначальном акте взаимодействия основную роль играют элементарные частицы — рождаются пионы или π -мезоны, среди которых есть нейтральные π^0 и заряженные π^\pm . Взаимодействуя с ядрами воздуха, заряженные π^\pm мезоны генерируют новые ливни до тех пор, пока их энергия не снизится до $\sim 10^9$ электронвольт. В первом акте взаимодействия обычно рождается более 50 новых частиц. В результате распада π^\pm -мезонов образуются мюоны (μ -мезоны) и нейтрино (ν). В составе вторичного излучения присутствуют нейтроны. Эта часть каскада носит название адронного ливня.

Нейтральные мезоны (π^0) — их примерно одна треть — распадаются на гамма-кванты, которые в кулоновском поле ядер рождают электроны и позитроны. Тормозное излучение элек-

Рис. 3.1. Каскадный процесс взаимодействия первичных космических лучей с атмосферой — рождение вторичной компоненты космических лучей (так называемые «широкие атмосферные ливни»).



38

трон-позитронной пары приводит к появлению низкоэнергичных фотонов. Этот ливень называется электромагнитным. Адронный ливень сам производит нейтральные пионы, тем самым обеспечивая дополнительный вклад в электромагнитный каскад. На уровне моря остается не более

1% от потока первичных частиц.

Наряду с заряженными первичными частицами в атмосферу могут попадать космические гамма-кванты высоких энергий. В этом случае ливень частиц будет чисто электромагнитным.

Вторичные заряженные частицы — электроны и позитроны, рожденные в каскадном процессе, могут создавать черенковское и флюоресцентное свечение атмосферы.

Процесс образования новых частиц носит лавинообразный характер до тех пор, пока конкурирующие потери энергии не станут доминировать. На некоторой высоте над Землей формируется максимум числа частиц ливня. Число частиц в ливне — огромно: в максимуме оно пропорционально энергии первичной частицы и может достигать миллиарда.

3.2. Ловушки для частиц

Открытие каскадного процесса — рождение вторичных частиц, появляющихся генетически связанными группами, — связано с именем Д.Скобельцына. Он впервые «увидел» ливни космических лучей в опытах с камерой Вильсона, обнаружив следы одновременно рожденных двух или трех частиц внутри камеры Вильсона (см. рис. 2.4). По сути, это были первые наблюдения множественных процессов в ядерной физике высоких энергий.

Затем, в 1938 г. французский физик Пьер Оже, (рис. 3.2) разместил пару детекторов в Альпах и зарегистрировал их одновременное срабатывание. Это было первым указанием на существование каскадного процесса — генерацию ливней вторичных частиц (их называют «широкими атмосферными ливнями» — ШАЛ), рождающихся в атмосфере под действием космических лучей. Оже удалось определить энергию частицы,

39

Рис. 3.2. Пьер Оже.



вызвавшей ШАЛ: она оказалась равной 10^{15} эВ (1 ПэВ). Ее величина была на 7 порядков величины больше измеренной до этого времени энергии частиц.

В дальнейшем исследования были продолжены итальянским ученым Б.Росси, который изучал «каскадную кривую»

— зависимость между числом рожденных вторичных частиц и толщиной вещества, пройденной первичной частицей. Эти эксперименты стали основой нового направления в экспериментальной физике космических лучей — метода широких атмосферных ливней. Рассмотрим его более подробно.

В физике космических лучей экспериментальная задача сводится к определению ряда важнейших физических параметров частиц, среди которых — энергия, масса (зарядовое число) и зарядовое состояние. По массе мы идентифицируем саму частицу, например, для ядер определяем их место в периодической таблице элементов, а, определив энергию, можно построить энергетическое распределение потоков частиц данного типа — энергетический спектр. Знание зарядового состояния важно для ионов — атомов с не полностью заполненными электронными оболочками. Однако космические лучи высоких энергий — это полностью ионизированные атомы, освобожденные от электронных оболочек. Исключение составляет так называемая «аномальная» компонента космических лучей. Об этих частицах речь пойдет ниже.

Помимо этого, исследователям бывает необходимо знать и направление прихода частиц или

пространственное распределение их траекторий движения. Это надо не только для определения местоположения источников космических лучей на небесной сфере но, в ряде случаев, для изучения их движения в магнитных полях. Последнее важно для заряженных частиц,

40

траектории которых могут существенно отклоняться от прямой линии при распространении в межзвездной среде. Кроме этого, для Земли, имеющей собственное магнитное поле, пространственное распределение частиц имеет особое значение для интерпретации данных наземных экспериментов.

На заре исследований космических лучей применявшиеся детекторы были достаточно простыми и использовали принцип ионизации газов при прохождении через них заряженных частиц. Первые детекторы - ионизационные камеры и счетчики Гейгера регистрировали электрический импульс, создаваемый частицей, т.е. сам факт прохождения частицы через детектор, но не могли определить ее природу.

Выше отмечалось, что в результате взаимодействия космического излучения с ядрами атомов атмосферы рождаются новые частицы — вторичные протоны, ядра более тяжелых элементов, нейтроны, электроны, гамма-кванты, мюоны и нейтрино. Вклад этих компонент в суммарный поток излучения на разных высотах зависит как от состава первичного излучения, так и от его энергетического распределения. Физические характеристики каскадного процесса впервые были подробно исследованы российскими физиками — Д.Скобелевым, Н.Добротиним и Г.Зацепиным в 1949г. в горах Памира, где на большой высоте располагались детекторы космического излучения, позволявшие регистрировать вторичные частицы каскада — ливня частиц (рис. 3.3).

Теория каскадного процесса, впервые разработанная Г.Зацепиным, позволила ученым развить методы определения параметров первичной частицы, вторгающейся в атмосферу, по анализу событий в детекторах, вызванных вторичными частицами. Оказалось, что максимум интенсивности частиц в ливне («максимум ливня») зависит как от энергии первичной частицы, так и от ее типа (рис. 3.4).

Определение положения максимума ливня частиц играет большую роль в экспериментах с ШАЛ. Максимум ливня содержит в среднем $\sim 1-1,6$ частицы на каждые 10^9 эВ энергии первичной частицы. Это означает, что с ростом энергии число частиц в максимуме увеличивается. Высота образования

41

Рис. 3.3. Георгий Зацепин с сотрудниками создал установку для изучения широких атмосферных ливней в горах Памира.



максимума над поверхностью Земли или, точнее, глубина t , отсчитываемая от верхней границы атмосферы - X_{\max} , изменяется по логарифмическому закону с изменением энергии первичной частицы (т.е. пропорциональна $\lg E$) Величину X_{\max} можно вычислить, интегрируя плотность воздуха от точки входа в атмосферу и вдоль траектории частицы. Следовательно, X_{\max} измеряется в единицах г/см^2 — произведение плотности вещества (г/см^3) на длину пути частицы.

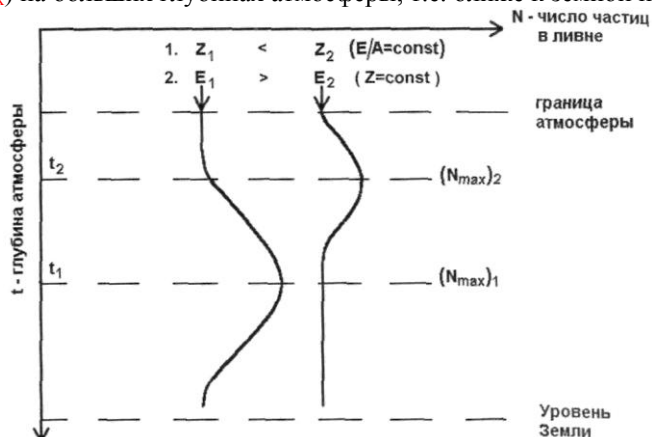
Панасюк М. И. Странники Вселенной или эхо Большого взрыва. Фрязино: «Век 2», 2005. - 272 с. - (Наука для всех).

При вертикальном пролете частицы, ее траектория пересекает $\sim 1000 \text{ г/см}^2$ вещества от границы атмосферы до уровня моря. Частица с энергией 10^{15} эВ достигнет глубины примерно в 500 г/см^2 . Глубина максимума ливня увеличивается на $60\text{--}70 \text{ г/см}^2$ с увеличением энергии частицы на порядок. Однако, глубина максимума зависит и от типа влетающей частицы. Для более массивной частицы, но с той же энергией в единицах МэВ/нуклон, т.е. с той же скоростью ($E/A=\text{const}$), X_{max} , образованный ею, будет наблюдаться выше над землей. Первое адронное взаимодействие для протонов происходит на

42

Рис. 3.4. Качественная картина формирования каскадов вторичных частиц в атмосфере.

Видно, что более энергичные, а также более легкие частицы формируют максимум ШАЛ (максимум вторичных частиц — N_{max}) на больших глубинах атмосферы, т.е. ближе к земной поверхности.



глубине атмосферы $\sim 70 \text{ г/см}^2$ и на меньших глубинах (больших высотах) для более тяжелых ядер с той же энергией E/A . Это различие качественно демонстрируется на рис. 3.4, где приведены распределения числа частиц в ливне для частиц с Z_1 и Z_2 ($Z_1 < Z_2$), но с одинаковыми энергиями и для частиц с $Z=\text{const}$, но с разными энергиями.

Для различных компонент каскадного процесса характер прохождения частиц через атмосферу обладает своими особенностями. Комбинируя методы экспериментальных измерений, чувствительные к той или иной компоненте вторичного излучения, с одной стороны, и, применяя расчетные модели прохождения частиц через атмосферу — с другой, исследователям удастся приблизиться к определению физических параметров первичной частицы. Приблизиться потому, что остается все-таки некоторая неопределенность, иногда значительная, в цепочке измерений и моделирования, связанная с неопределенностью некоторых параметров, заложенных в моделях.

43

Выше отмечалось, что ливни, вызванные первичной частицей с энергией $\sim 10^{15} \text{ эВ}$, проникают на глубину, равную примерно половине толщины атмосферы. Очевидно, что порог по энергии регистрируемых первичных частиц будет зависеть от высоты, на которой размещены детекторы: чем выше они расположены, тем ниже порог.

Однако, метод ШАЛ не «работает» в области энергий менее $\sim 10^{14} \text{ эВ}$. Частицы этих энергий очень быстро поглощаются в атмосфере и не позволяют развиваться вторичной компоненте.

На рис. 3.5 демонстрируется принцип регистрации ШАЛ наземными установками. Обычно детекторы расположены на некотором расстоянии друг от друга и регистрируют вторичные частицы ливня по совпадениям. Распределение плотности частиц в ливне похоже на блин, который распространяется со скоростью, очень близкой к скорости света. Измеряя время прихода фронта частиц ливня, можно вычислить направление прихода первичных частиц. Энергия ливня определяется по суммарной плотности вторичных частиц на расстояниях до 600 м от оси ливня.

Рис. 3.5. Регистрация частиц космических лучей наземными установками.

Детекторы размещаются на большой площади с тем, чтобы зарегистрировать максимально возможное число вторичных частиц каскада ШАЛ.



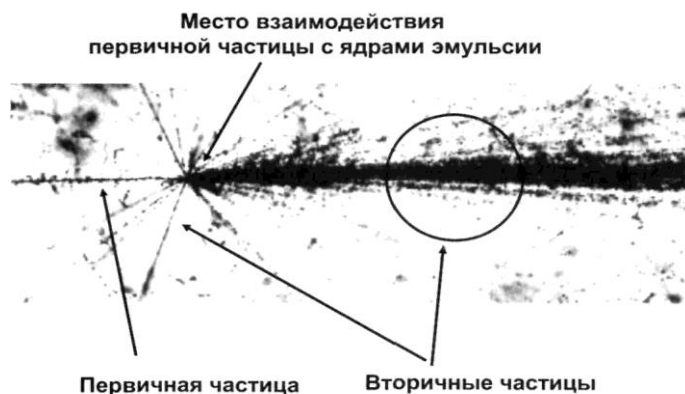
44

Измеряя только, например, адронную компоненту ливня, невозможно определить величину максимума ливня — X_{\max} . Можно измерить другую компоненту - мюонную, каскад которой развивается на отличных от адронной компоненты глубинах. По разнице показаний мюонных детекторов и детекторов, регистрирующих адронную компоненту, а также привлекая каскадные модели, можно определить X_{\max} .

Как можно «увидеть» рождение и гибель ливня? Еще до появления метода ШАЛ, в технике исследования космических лучей широко использовался метод рентгено-эмульсионных камер (РЭК). Частицы, попадая в вещество пленки, на поверхность которой нанесен чувствительный к рентгену и заряженным частицам слой фотоэмульсии, вызывают каскад вторичных частиц (рис. 3.6) — результат взаимодействия первичной частицы с ядрами фотоэмульсии. После проявления в химических растворах треки частиц становятся видимыми. Анализируя толщину, размеры и пространственное положение треков под микроскопом, можно определить и типы частиц, и их энергии. Метод РЭК получил широкое распространение

Рис. 3.6. Пример визуализации ливня частицы при ее торможении в фотоэмульсии.

Следы первичной и вторичных частиц становятся видимыми после проявления пленки в химических растворах.



45

в физике космических лучей. Именно благодаря его применению в 40-х годах прошлого века удалось обнаружить многие ядра — вплоть до железа — в составе первичного космического излучения.

Альтернативным методом измерения энергии частиц в ШАЛ является измерение черенковского свечения. Известно, что скорость распространения частиц в среде с показателем преломления больше, чем единица, может превышать скорость света. Это справедливо для частиц ШАЛ при их распространении в воздухе. В результате происходит излучение черенковского свечения (рис. 3.7). Свечение видно в узком конусе в направлении распространения ливня и может быть зарегистрировано наземными оптическими детекторами. Этот метод позволяет измерить X_{\max} непосредственно. Подобные детекторные наземные установки уже созданы, например CASA-MIA в США и «Тунка» у нас, в России. Данные таких детекторов не только дополняют результаты «классических» установок - ШАЛ, но и служат независимой проверкой их результатов.

Рис. 3.7. Регистрация космических лучей методом измерения черенковского света.

Заряженные частицы, летящие со скоростью, превышающей скорость света (по сравнению с вакуумом), излучают фотоны — свет, который может быть зарегистрирован наземными установками — параболическими зеркалами — коллекторами света.



46

Из приведенного выше рассмотрения возможностей регистрации космических лучей высокой энергии очевидно, что именно каскадный процесс образования вторичных частиц лежит в основе метода определения природы первичной частицы. Атмосфера служит именно тем «рабочим телом» гигантского детектора, который позволяет регистрировать космические лучи сверхвысоких энергий. Однако, этот метод эффективен в области энергий более $\sim 10^{15}$ эВ. А в области меньших энергий?

Здесь атмосфера уже не может служить «генератором» вторичных частиц: они в большинстве своем погибают в верхних слоях атмосферы. Как же измерить энергию частицы в этой области энергий? О методе РЭК было рассказано выше. Он действительно применяется при небольших энергиях: установки достаточно большой площади с использованием РЭК могут быть установлены на аэростатах, самолетах и спутниках с тем, чтобы «приблизиться» к первичным частицам. Но и этот метод имеет свои ограничения, в первую очередь по времени экспозиции РЭК: в течение длительного времени детектор РЭК регистрирует столь много частиц (т.е. «засветится»), что различить отдельные треки в нем станет невозможным - после проявления фотоэмульсия будет черной.

В 50-х годах был изобретен ионизационный калориметр, позволивший сделать настоящий рывок в исследованиях не только космических лучей, но и элементарных частиц в наземных экспериментах на ускорителях. Идея изобретения и создания калориметра для изучения космических лучей принадлежит российским ученым - Н.Григорову, В.Мурзину и И.Раппопорту из Московского государственного университета.

Принцип действия прибора достаточно прост. Калориметр состоит из мишени, внутри которой не только поглощается вся энергия первичной частицы, но и все вторичные частицы (рис. 3.8). По сути, мишень - это «мини-атмосфера» для первичной частицы, которая генерирует каскад вторичных частиц. Мишень — многослойная. В зазорах между веществом мишени устанавливаются детекторы различного типа, кото-

47

Рис. 3.8. Один из видов ионизационного калориметра.

Прибор состоит из углеродной мишени, в которой происходит генерация вторичных частиц — нейтральных пионов, которые, распадаясь, формируют поток фотонов. Они регистрируются слоями детекторов. Измеряя количество вторичных частиц, можно определить энергию первичной. Чем больше слоев детекторов, тем точнее измеряемая энергия.



ые регистрируют вторичные частицы. Обработывая сигналы с различных слоев установки, восстанавливается весь ливень вторичных частиц и, тем самым, параметры первичной частицы. Ионизационный калориметр в данном виде — это детектор полного поглощения, позволяющий проследить всю историю генерации ливня.

Как мы видим, ионизационный калориметр, по существу, — это прибор для измерения энергии первичной частицы по тому же принципу, что и в методе ШАЛ, но с существенным отличием: детекторы калориметра «видят» вторичные частицы, регистрируют их, определяют их параметры и параметры первичной частицы. В методе ШАЛ далеко не все частицы регистрируются наземными установками. Здесь параметры первичной частицы приходится восстанавливать, используя различные модели прохождения частиц через вещество. Поэтому, в отличие от метода ШАЛ, измерения космических лучей калориметрами носят названия «прямых» экспериментов.

48

Впервые ионизационные калориметры для измерений космических лучей были созданы для высокогорных исследований, а затем запущены в космос. История первых космических экспериментов с калориметрами знаменательна и уникальна.

Уже говорилось, что при энергиях менее $\sim 10^{15}$ эВ метод ШАЛ не работает и только «прямые» эксперименты на аэростатах и спутниках с приборами типа калориметров могут обеспечить изучение спектров частиц в этой области энергий. Аэростаты имеют ограниченный срок полетов, а значит ограниченную статистику зарегистрированных событий, и, следовательно, ограничения по максимальной энергии частиц. Спутники с более длительным сроком проведения экспериментов могли бы заполнить эту брешь.

Российским ученым в 60-е годы неожиданно представилась такая возможность - использовать спутники для изучения космических лучей. Это было время, когда особенно высокими темпами наращивался ракетно-ядерный потенциал крупнейших держав - СССР и США. Испытания баллистических ракет следовали одни за другими.

И в этот период «холодной войны» ученым из МГУ

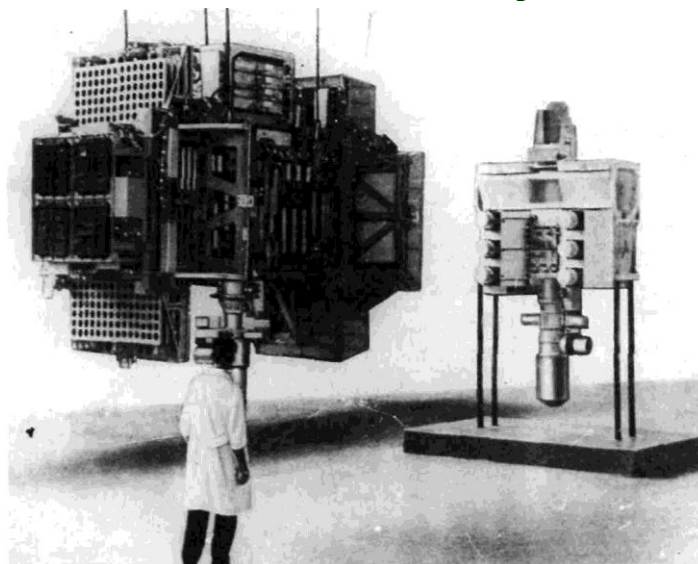
— С.Вернову и Н.Григорову — удалось убедить военных при испытательных пусках баллистических ракет разместить научную аппаратуру — ионизационные калориметры

— вместо габаритно-весовых макетов ядерных боеголовок. Их предложение было принято, и перед учеными открылась действительно уникальная, до сих пор не имеющая аналогов, возможность — запустить в космическое пространство многотонную аппаратуру для исследований частиц высокой энергии. Возможность была максимально использована — было запущено четыре экспериментальные установки «Протон» разных модификаций (рис. 3.9).

Вплоть до 60-х годов в энергетическом спектре космических лучей оставалось «белое пятно» — незаполненная экспериментальными данными область при энергиях менее 10^{15} эВ. В экспериментах на «Протонах» впервые был перекрыт спектр всех частиц в широчайшем диапазоне: от 10^{12} эВ до 10^{15} эВ. Прямой эксперимент, выполненный на спутниках, сомкнулся

Панасюк М. И. Странники Вселенной или эхо Большого взрыва. Фрязино: «Век 2», 2005. - 272 с. - (Наука для всех).

Рис. 3.9. Легендарные «Протоны» - первые многотонные калориметры, запущенные в космос на советских боевых ракетах.



с результатами наземных экспериментов ШАЛ. Это был огромный успех нашей науки!

Современные приборы для изучения космических лучей — довольно сложные системы, способные с большой точностью восстанавливать параметры первичной частицы. Калориметры — их составная часть.

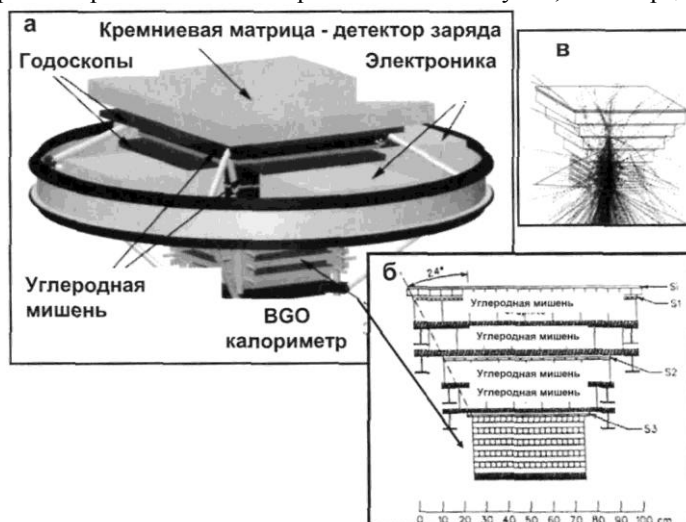
На рис. 3.10 показан один из современных приборов для исследования космических лучей. Этот прибор использовался в двух аэростатных экспериментах АТИС в Антарктиде в 2000 и 2002 годах. Он состоит из набора различных детекторов и мишеней и позволяет идентифицировать энергию, заряд, массу частицы и ее траекторию. Энергия определялась ионизационным калориметром, сделанным из тяжелого материала

- BGO (германата висмута), который является сцинтиллятором - детектором ядерных излучений. На входе установки расположен детектор заряда, состоящий из матрицы полупроводниковых детекторов, предназначенных для определе-

50

Рис. 3.10. Прибор АТИС, летавший в Антарктиде.

На врезках «а» и «б» показаны общий вид и состав этого прибора, состоящего из нескольких детекторов, а на «в» демонстрируется модельный каскад частиц, возникающий при взаимодействии первичного протона с одним из детекторов. Благодаря точному определению параметров вторичных частиц каскада, этот прибор «умеет» не только измерять энергетические спектры космических лучей, но и определять массу частиц.



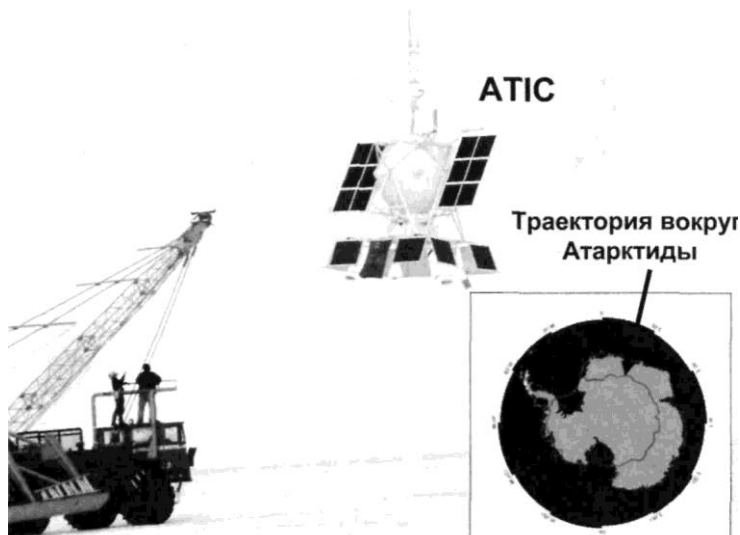
ния заряда (массы) первичной частицы и места ее попадания в установку. Траектория частиц восстанавливается в процессе обработки сигналов от частиц, одновременно попавших в верхний и нижний Панасюк М. И. Странники Вселенной или эхо Большого взрыва. Фрязино: «Век 2», 2005. - 272 с. - (Наука для всех).

слои детекторных систем. Такой прибор насчитывает тысячи отдельных детекторов и, соответственно, тысячи электронных каналов обработки информации. Он позволяет регистрировать космические лучи до энергий в $\sim 10^{14}$ эВ/нукл с разделением по массам отдельных элементов от протонов до железа. Ограничение по максимальной энергии в этой установке связано с размерами детекторов (верхний детектор имеет размер $\sim 1\text{ м}^2$) и временем экспозиции - длительностью полета самого аэростата.

51

Рис. 3.11. Аэростаты могут летать в Антарктиде до 3-4-х недель.

Прибор АТІС дважды совершил путешествия вдоль побережья Антарктиды, собирая информацию о космических лучах.



В Антарктиде в летний период (по южному полушарию) наблюдаются постоянно дующие ветра в течение довольно длительного времени. Этим и воспользовались ученые, запуская аэростаты на далеком континенте. Аэростаты с полезной нагрузкой — научными приборами огибают южный континент за 2-3 недели. Во многих случаях этого достаточно, чтобы набрать статистику для получения достоверных результатов по частицам космических лучей. Именно так было проведено 2 полета аэростатов в Антарктиде с прибором АТІС в гондоле (рис. 3.11).

В этой главе лишь кратко изложены экспериментальные методы изучения космических лучей. В действительности методов очень много, и читатель может почерпнуть сведения о них в специальной литературе. Важно отметить, что они применяются в различных средах (рис. 3.12): в космосе, в атмосфере, на земле и под землей. Каждый из методов имеет

52

Рис. 3.12. Космические лучи изучаются во всех средах: под землей, на земле, в атмосфере и в космосе.

Первичные частицы, не испытавшие взаимодействий с ядрами воздуха могут регистрироваться только на спутниках; широкие атмосферные ливни - на уровне моря (на земле) и в горах, а «проникающая» компонента ливней — мюоны и гамма-кванты — под землей.



свои преимущества и недостатки, но именно их совокупность позволяет ученым построить наиболее полную картину физических характеристик космических лучей.

Мы еще вернемся к экспериментальным методам измерений космических лучей, а пока посмотрим, что же представляют собой космические лучи? Каковы их основные физические характеристики? Почти за столетнюю историю исследований этих странников Вселенной накоплен действительно огромный экспериментальный материал, позволяющий судить не только об их природе, но и о природе космических объектов, ответственных за их рождение. Об этом и пойдет рассказ далее...

Глава 4. ЧТО МЫ ЗНАЕМ О КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧАХ

Если эксперимент подтверждает теорию, это приятно. Если не подтверждает - это интересно.

Яков Зельдович

4.1. Крутая траектория познания состава космического излучения

Вопрос о составе космических лучей и есть, по сути, вопрос об их природе. Первые исследователи космических частиц полагали, что это гамма-излучение - нейтральные фотоны, падающие на атмосферу из космоса. Эта гипотеза преобладала среди многих ученых довольно продолжительное время. Однако, исследование каскадов вторичных частиц, наблюдающихся в атмосфере, не подтвердили эту гипотезу.

Впервые предположили, что космические лучи — это поток заряженных частиц, В. Боте и В. Кольхерстер. Они проделали ряд опытов с детекторами радиоактивных излучений на земле и обнаружили, что частицы, регистрирующиеся их прибором, обладают большей проникающей способностью и не могут быть рожденными при взаимодействии фотонов со стенками детекторов. Однако их выводы из результатов экспериментов окончательно не воспринимались, т.к. в то время физика процессов взаимодействия частиц с веществом не была в достаточной мере ясна.

Большую роль в выяснении природы космических лучей сыграли камеры Вильсона, позволившие визуализировать треки частиц (см. рис. 2.4). Эксперименты Д.Скобельцына с применением камеры (см. главу 2) и последующие опыты, предпринятые Б.Росси, показали, что таинственное космичес-

54

кое излучение обладает достаточно высокой энергией, чтобы проникнуть сквозь большие толщи вещества и при этом испытывает сложные взаимодействия как в атмосфере (широкие атмосферные ливни), так и в материале самих детекторов. Поэтому в течение длительного времени оставался открытым вопрос о природе первичного излучения, т.е. о природе тех частиц, которые падают непосредственно на атмосферу.

Давайте вспомним о том, что наша планета Земля — магнит. Именно существование магнитного поля Земли сыграло решающую роль в определении состава того первичного излучения, которое и интересовало ученых-космиков.

Взгляните на рис. 4.1. Магнитное поле Земли имеет так называемую дипольную форму: у него есть северный и южный полюса, и оно изменяется в зависимости от расстояния: чем дальше от Земли, тем поле слабее, а при заданном расстоянии оно усиливается по мере приближения к полюсам.

Рис. 4.1. Магнитное поле Земли имеет форму диполя.

Ось диполя смещена относительно оси вращения Земли на $\sim 11^\circ$. Поэтому географический экватор не совпадает с геомагнитным. В магнитном поле первичные заряженные частицы, (например, протоны) и нейтральные (например, гамма-кванты) ведут себя по-разному: первые им отклоняются, а вторые движутся по прямым траекториям.



55

Нейтральные частицы (например, фотоны) пересекают магнитное поле, не замечая его. Другое дело — заряженные частицы — их траектории будут искривляться. Причем радиус кривизны траектории в магнитном поле будет зависеть от их энергии, а точнее — импульса (произведения массы частицы на скорость - mv).

Из теории известно соотношение:

$$E(\hbar B)/Z = 300BR(\text{гаусс} \cdot \text{см}),$$

называемое магнитной жесткостью. Именно оно и определяет параметры траектории частицы в магнитном поле. Из формулы для магнитной жесткости видно, что траектория зависит и от заряда частицы Z : для однократно заряженной частицы, например, протона радиус кривизны R в магнитном поле B будет больше, чем для двукратно заряженного иона гелия

— альфа-частицы с той же энергией.

Отсюда ясно, что наше магнитное поле может служить прибором, созданным самой природой для определения состава падающих на Землю частиц (см. рис. 4.1).

Первыми, предложившими использовать магнитное поле Земли в качестве естественного сепаратора заряженных и нейтральных частиц, были те же В. Боте и В. Кольхерстер (именно они на основе своих экспериментов поверили, что первичная компонента космического излучения заряжена, а не нейтральна).

Голландский физик Дж. Клей, путешествуя в 1927 г. от Лейдена до Суэцкого канала обнаружил уменьшение интенсивности космического излучения. Это было первым указанием на существование широтного эффекта космических лучей

— изменения их интенсивности в зависимости от географической широты: на экваторе, вследствие дипольного характера магнитного поля Земли проникает гораздо меньше частиц, чем на высокие широты.

Не все этому поверили. Р.Милликен (именно он назвал неизвестное космическое излучение космическими лучами), не обнаружив заметного эффекта изменения интенсивности частиц между Боливией и Пасаденой в Калифорнии (в 1928 г.),

56

продолжал настаивать на фотонной гипотезе происхождения космических лучей.

Но организованные в 1932 г. многочисленные эксперименты А.Комптона дали убедительные аргументы в пользу альтернативной гипотезы состава космических лучей. Позднее, в 1936-38 годах, С. Верное осуществил измерения широтного эффекта космических лучей, проводя стратосферные эксперименты на шарах-зондах в Индийском океане на теплоходе «Серго» (рис. 4.2).

Он подтвердил результаты, полученные А.Комптоном по исследованию широтного эффекта и выводы о том, что космические частицы заряжены. Оказалось, что на экваторе поток космических лучей в 4 раза меньше потока, наблюдавшегося на высоких широтах. Более того, он пришел к выводу, что большая часть первичной космической радиации состоит из электронов и позитронов. Он писал: «Представляется наиболее вероятным, что первичное космическое излучение почти исключительно состоит из электронов и позитронов».

Рис. 4.2. С. Вернов (слева) во время экспедиции в Индийском океане в 1937 г. на

теплоходе «Серго».



57

(Отметим, что незадолго перед этим, в 1932 г., К. Андерсон открыл положительный электрон - позитрон (об этом будет рассказано в главе 10). Этот вывод был неверным. Уже в 1946 году С.Вернов отказывается от него, тщательно исследовав эффекты прохождения частиц через атмосферу на больших высотах.

Широтная асимметрия космического излучения не единственная в пространственном распределении частиц, наблюдаемых на Земле. Следует ожидать асимметрии восток-запад, если первичные частицы не нейтральны, а заряжены. Положительно заряженные частицы должны отклоняться к востоку, а отрицательные — к западу. Б.Росси провел первые эксперименты для проверки этой гипотезы (1931 г.) и не обнаружил заметного эффекта. Т.Джонсон, осуществляя подобные эксперименты в Мексике в 1933 г., обнаружил восточно-западную асимметрию прихода первичных частиц. Это явилось указанием на то, что первичное излучение состоит из положительно заряженных частиц. Неожиданный результат! Ведь большинство физиков до этого полагало, что если первичное излучение и является заряженными частицами, то это — отрицательно заряженные частицы — электроны (и позитроны).

Существование в космических лучах позитронов было обнаружено М.Шайном в 1940 г. в стратосферных экспериментах. Более того, анализируя результаты прохождения космического излучения через разные толщии свинцовой защиты, М.Шайн пришел к выводу, что оно состоит «скорее всего, из протонов». Этот вывод был правильным и получил подтверждение в работах по исследованию процессов взаимодействия космических лучей с атмосферой и в экспериментах С.Вернова, который ничего не знал о работах М.Шайна, при исследовании в 1949 г. восточно-западной асимметрии в стратосфере в районе Индийского океана.

Следующий шаг в познании природы космического излучения был сделан с помощью детекторов, позволявших оценить массу частицы и ее энергию. Это РЭК - ядерные эмульсии (см. рис. 3.6). Одновременно две группы исследователей из

58

США под руководством Э.Нея, Г.Брадта и Б.Питерса провели на высоте 29 км исследования с помощью эмульсий и обнаружили треки тяжелых частиц, принадлежащих к первичному космическому излучению. Так были обнаружены в космических лучах частицы тяжелее протонов. Но их было значительно меньше. И сейчас это понятно: ведь наша Вселенная почти полностью состоит из водорода.

Ну, а как быть с электронами, позитронами и фотонами в первичном излучении, составлявших основу гипотезы о происхождении космических лучей вплоть до 1940 г.? Их тоже нашли в первичном излучении. Но в количествах, несравненно меньших по сравнению с протонами.

Так, порой очень замысловато и драматично, пролегла траектория движения науки к тому, что сейчас кажется очевидным... О том, как мы сегодня представляем состав космических лучей, пойдет речь в дальнейших разделах книги.

4.2. Из чего состоят космические лучи

К космическим лучам относятся как заряженные, так и нейтральные частицы: атомы различных элементов от водорода до самых «тяжелых» представителей периодической системы Менделеева, а также такие элементарные частицы, как нейтроны, электроны, мезоны и другие. Диапазон их энергий крайне велик — достаточно сказать, что он простирается более чем на 14-15 порядков. Потоки космических лучей сильно меняются в зависимости от энергии — при малых энергиях их значительно больше, чем при высоких и сверхвысоких энергиях.

Более 90% частиц космических лучей составляют атомы водорода, на гелий приходится около 7% и менее 1% — на более тяжелые элементы. Атомы космических лучей лишены электронных оболочек, по сути, это полностью ионизованные атомы, или «голые ядра». Причина этого — взаимодействие с веществом в процессе их переноса во Вселенной. Взаимодействуя с нейтральными частицами, они теряют свои электронные оболочки (так называемый процесс перезарядки).

59

Как показывают расчеты, средний путь, который проходят частицы от места генерации, достаточен, чтобы потерять все орбитальные электроны за счет взаимодействий с космической средой.

Естественно задаться вопросом: как химический состав космических лучей соотносится с составом звезд во Вселенной, с составом ближайшей к нам звезды - Солнца? Ответ дан в таблице 4.1, где приводится относительное содержание различных элементов в составе космических лучей, на Солнце и в звездах.

Таблица 4.1. Содержание некоторых элементов в космических лучах на Солнце и в звездах, приведено относительно ядер кислорода (0).

Элемент	КЛ	Солнце	Звезды
H	685	1445	925
He	48	91	150
Li	0,3	$<10^{-5}$	$<10^{-5}$
Be-B	0,8	$<10^{-5}$	$<10^{-5}$
C	1,8	0,6	0,3
N	$<0,8$	0,1	0,2
O	1,0	1,0	1,0
Mg	0,32	0,05	0,04
Si	0,12	0,06	0,04
Fe	0,14	0,05	0,06

Можно видеть, что состав космических лучей приблизительно соответствует распространенности элементов во Вселенной за исключением двух случаев: во-первых, в космических лучах наблюдается значительно больше легких ядер (Li, Be, B) и, во-вторых, — тяжелых ядер — вблизи железа.

Как сформировался именно такой состав космических лучей? Почему существуют различия в составе звезд и частиц, приходящих к нам из Вселенной? Об этом пойдет речь далее, а пока продолжим рассмотрение их состава.

60

Помимо ядер различных элементов в составе космических лучей имеются электроны. При равных энергиях интенсивность электронов в ≈ 100 раз меньше, чем протонов. В отличие от протонов и более тяжелых ядер, максимальная энергия электронов находится, вероятно, где-то в районе $\sim 10^{14}$ эВ, т.к. ожидается, что при больших энергиях их поток должен резко уменьшаться из-за так называемых синхротронных потерь.

Существуют ли античастицы в составе космических лучей? Их присутствие могло бы свидетельствовать о наличии во Вселенной значительного количества антивещества. Сейчас имеются лишь надежные экспериментальные данные о существовании в составе космических лучей антипротонов в ограниченном диапазоне энергий. Поиск античастиц тяжелее антипротонов — задача будущих экспериментов.

4.3. Энергетические спектры ядер космических лучей

Космические лучи имеют громадный диапазон энергий: от 10^6 до, по крайней мере, 10^{21} эВ. Обычно используют следующие сокращения для единиц энергии: 10^3 эВ (кэВ) — килоэлектронвольт, 10^6 эВ (МэВ) — мегаэлектронвольт, 10^9 эВ (ГэВ) — гигаэлектронвольт, 10^{12} эВ (ТэВ) — тераэлектронвольт, 10^{15} эВ (ПэВ) — петаэлектронвольт, 10^{18} эВ (ЕэВ) — эксаэлектронвольт, 10^{21} эВ (ЗэВ) — зитаэлектронвольт. Для ядер, тяжелее протонов, обычно используют единицы эВ/нуклон, это полная энергия частицы, деленная на число нуклонов в ядре.

Для того, чтобы представить масштаб величин энергий космических лучей, достаточно взглянуть на таблицу 4.2.

Максимальная измеренная энергия космических лучей превышает доступную в наземных экспериментах на 9 порядков — в миллиард раз! Насколько велика энергия частицы величиной в 13эВ? Энергия такой субатомной частицы

61

приближается к энергиям макромира: она может разогнать шайбу массой 200 г до скорости 80 км/ч!

Таблица 4.2. Энергия различных видов излучений

Вид излучения	Энергия, эВ
Ультрафиолет от Солнца	~ 1
Электроны в телевизионном кинескопе	$\sim 10^3$
Максимальная энергия протонов, полученная в наземных ускорителях	$\sim 2 \cdot 10^{15}$
Максимальная измеренная энергия космических лучей	$\sim 3 \cdot 10^{20}$

Здесь уместно сопоставить энергии космических частиц с энергиями частиц, «сделанных» на Земле человеком.

Наиболее мощный ускоритель частиц, расположенный в лаборатории имени Ферми («Фермилаб») в Чикаго, США, может разгонять частицы до энергий только 1,8 ТэВ — 1,8 триллиона электронвольт. Даже строящийся в настоящее время гигантский ускоритель в Женеве, в Европейском центре ядерных исследований (CERN) — LHC (Большой адронный коллайдер), не сможет приблизиться к энергиям космических лучей, достижимых в природе, — он будет ускорять частицы до 14 ТэВ.

Важнейшей характеристикой космических лучей является энергетический спектр - зависимость между потоком частиц (F) и их кинетической энергией (E). Направленный дифференциальный поток определяется количеством частиц N с энергией в диапазоне от E до $E+\Delta E$, падающих на единицу площади в единицу времени t и в единице телесного угла Ω :

$$F(E) = \frac{dN}{dS} d\Omega dt dE ,$$

62

где dS , $d\Omega$, dt и dE — элементы площади, телесного угла, времени и энергии. В данном случае $F(E)$ - дифференциальный энергетический спектр, в отличие от интегрального

$$F(> E) = \int_E^{\infty} F(E) dE .$$

Поток частиц, проинтегрированный по телесному углу, носит название всенаправленного.

Ввиду большого диапазона изменения потока и энергии космических лучей энергетические спектры частиц принято изображать в двойном логарифмическом масштабе, т.е. $\lg F(E) = f(\lg E)$. Наиболее часто для аппроксимаций используется степенная функция, т.е. $\lg F(E) \propto \lg E^{-\gamma}$, где γ — показатель спектра. В двойном логарифмическом масштабе это прямая линия с наклоном γ .

Рассмотрим некоторые обобщающие сведения об энергетических спектрах космических лучей.

Если просуммировать дифференциальные потоки F всех частиц космических лучей (без разделения по Z), измеренных в различных экспериментах (рис. 4.3), то мы получим в двойном логарифмическом масштабе практически прямую линию для спектра в виде

т.е. показатель γ практически постоянен в широком (10 порядков величины!) диапазоне энергий. На самом деле это не так. И вскоре мы это увидим.

Интересно отметить, каковы потоки частиц при различных энергиях. Так, при энергии ~ 10 ГэВ их поток составляет 1 частицу на 1 м^2 в 1 сек, в ПэВ-ой области — 1 частица на 1 м^2 в 1 год, а при близких к максимальным энергиям, при нескольких ЭэВ, — 1 частица на 1 км^2 в 1 год.

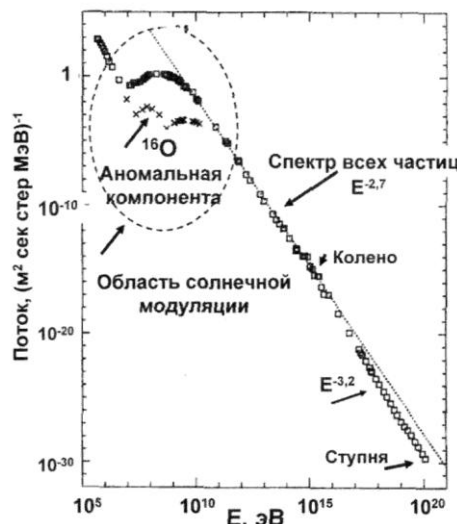
Из теории вероятности известно, что для получения достоверного результата необходимо набрать достаточную статистику событий, чтобы зарегистрировать события с ошибкой,

63

$$\frac{dF}{dE} \propto E^{-\gamma},$$

Рис. 4.3. Энергетический спектр «всех частиц» космических лучей без разделения их на отдельные компоненты.

При энергиях более 10^{10} эВ он имеет наклон $E^{-2,7}$, испытывая укручение в районе колена ($\sim 10^{15}$ эВ). При этих энергиях потоки частиц очень стабильны, а в области энергий менее $\sim 10^{10}$ эВ испытывают значительные вариации под действием солнечной активности. (см. главу 12). Предельная зарегистрированная энергия космических частиц в районе «ступни» составляет $3 \cdot 10^{20}$ эВ.



значительно меньшей измеряемой величины. Известно, что ошибка Δn измерений числа n событий может быть выражена формулой $\Delta n = \sqrt{n}$. Например, при 100 измерениях одной и той же случайно меняющейся физической величины ошибка составит 10%. Можно себе представить, какого размера должна быть установка и сколько времени должен продолжаться эксперимент, если на верхней границе спектра потоки частиц КЛ столь малы! Очевидно, что это должны быть установки с эффективной площадью регистрации частиц в тысячи квадратных километров. И даже при таких масштабах физикам придется ждать многие месяцы и, возможно, годы для регистрации одной частицы в ЭэВ-ной области энергий.

64

Выше мы рассмотрели спектр «всех частиц» космических лучей, без его дифференциации на различные компоненты.

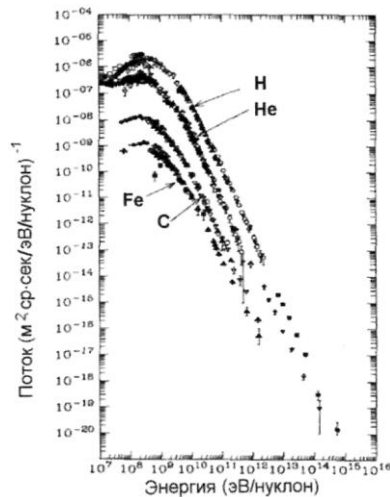
На рис. 4.4 показаны энергетические спектры ряда элементов (H, He, C и Fe) — отдельных компонент КЛ. Здесь представление спектра ограничено ПэВ-ой областью энергий: для более высоких энергий пока нет данных о составе космических лучей. Обращает внимание наличие максимума в спектре различных ядер при энергиях в 300-500 МэВ. Это так называемый модуляционный пик. О нем будет рассказано в главах 12 и 13.

Обратите внимание также на то, что наклон γ практически одинаков для всех частиц со значением $\gamma \sim 2,7$ до энергий ~ 1 ПэВ. При этих энергиях, а точнее при ~ 3 ПэВ, в спектре наблюдается излом — «колени», по терминологии физиков-космиков. Этот излом обнаруживается (см. рис. 4.3), прежде всего, в спектре «всех частиц» (т.е. суммарном спектре всех компонентов космических лучей).

На рис. 4.5 показан суммарный спектр «всех частиц» космических лучей (без разделения на компоненты), в котором «колени» отчетливо видно при энергии ~ 3 ПэВ.

Данное представление спектра отличается от приведенного на рис. 4.3 только тем, что для наглядности шкала ординат — поток, умножена на коэффициент $E^{2,75}$. Это позволило искусственно представить спектр всех частиц более плоским и, тем самым, более детально показать имеющуюся особенность в спектре — «колени» при $E=3$ ПэВ и

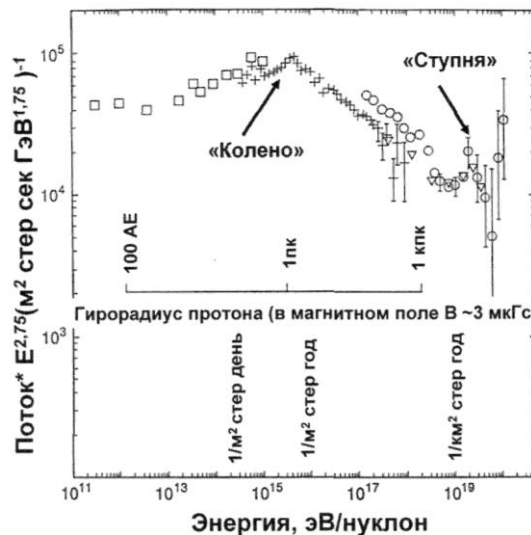
Рис. 4.4. Энергетические спектры отдельных компонент космических лучей.



65

Рис. 4.5. Энергетический спектр «всех частиц».

Хорошо видно «колено» при $\sim 3 \cdot 10^{15}$ эВ и «ступня». Потоки частиц резко уменьшаются с увеличением энергии: при $E \sim 10^{19}$ эВ наблюдается лишь ~ 1 частица, падающая на площадку в 1 км^2 в год. Приведена шкала гирорадиусов (ларморовских радиусов) протонов в магнитном поле напряжённостью в 3 мкГс. При ультра-высоких энергиях $> 10^{19}$ эВ радиусы траекторий протонов должны превышать размеры нашей Галактики.



«ступню» при $E > 1$ ЕзВ. Мы вернемся к теме «колена» и «ступни» в спектре КЛ в последующих разделах, где будем рассматривать методы измерений КЛ и вопросы их происхождения. Пока лишь отметим, что область «колена» замечательна во многих отношениях.

1. Эта область энергий, по-видимому, соответствует предельным возможностям одного из действующих во Вселенной ускорителей КЛ (об этом подробнее далее).

2. «Колено» в ПэВ-ой области энергий близко, как ни удивительно это совпадение, к предельным возможностям имеющихся на Земле ускорителей частиц.

3. Энергия в ПэВ-ой области - «граница» между двумя методами исследований КЛ: в области энергий меньших

66

«колена» исследования космических лучей доступны лишь с помощью приборов, устанавливаемых на аэростатах и спутниках, т.е. в верхней атмосфере и в космическом пространстве, а при энергиях больших колена — с помощью наземных методов измерений (ШАЛ).

Следует также отметить, что открытие излома — «колена» в спектре всех частиц космических лучей в 1956г. принадлежит нашим соотечественникам — российским физикам из Московского государственного университета, работавшим под руководством Г.Христиансена (рис. 4.6).

При энергиях за ПэВ-ой областью спектр становится более крутым ($\gamma \approx 3,2$) вплоть до энергий ~ 1 ЕзВ. При еще больших энергиях в области «ступни» форма спектра становится неопределенной. Есть экспериментальные данные, свидетельствующие о более пологом наклоне (чем $\gamma \approx 3,2$) спектра, а есть

данные, свидетельствующие о противоположном — о резком увеличении крутизны спектра, т.е. исчезновении частиц. Могут ли частицы иметь энергию большую, чем ~ 1 ЗэВ? Эту проблему мы рассмотрим в последующих главах книги, а пока вернемся к измерительным возможностям установок.

Уже отмечалось, что в области энергий более ~ 1 ПэВ метод наземных измерений ШАЛ наиболее эффективен для изучения космических лучей. В области меньших энергий «работают» прямые методы. Взгляните на рис. 4.5, квадраты слева от «колена» — космические экспериментальные данные советских «Протонов» (см. рис. 3.9), перекрывшие большой диапазон энергий вплоть до «колена».

Рис. 4.6. Г.Христиансен, первооткрыватель излома («колена») в спектре космических лучей.



67

Однако из тех же оценок величин потоков космических лучей, приведенных на рис. 4.5, можно видеть, что на «краю» спектра, в районе «ступни», поток космических лучей становится настолько мал (1 частица/км²·стер год), так что для их надежной регистрации необходимы не просто детекторы большой площади, а детекторы гигантских размеров. Наземные измерения позволяют это сделать — на поверхности Земли достаточно много места. И такие детекторы — гигантские установки — создаются. Если для регистрации частиц в районе «колена» размер наземных установок колеблется от сотен квадратных метров до нескольких квадратных километров, то для того, чтобы «поймать» частицы в районе «лодыжки», создаются наземные установки в тысячи квадратных километров.

Наиболее крупная наземная установка, создаваемая сегодня для изучения космических лучей на «краю» спектра — это международный проект *«Pierre Auger»* в Аргентине. Она будет размером около 3000 км². По-видимому, размер установки *«Pierre Auger»* близок к естественному ограничению наземных детекторов космических лучей (здесь и проблемы выбора площадок с плоским рельефом, и климатические ограничения, и проблемы коммуникаций и др.).

Глава 5. ОТКУДА ВЫ, СТРАННИКИ ВСЕЛЕННОЙ?

Каждый дурак знает, что до звезд не достать, а умные, не обращая внимания на дураков, пытаются.

Г.Х. Андерсен

Вопрос об источниках космических лучей, безусловно, волновал и первых исследователей, продолжает волновать и современных ученых. Можно сразу сказать, что сегодня исчерпывающего объяснения происхождения космических лучей нет. Исследования продолжаются...

5.1. Поиск звезд на небе

Выделим основные вопросы, на которые следует получить ответы для выяснения природы космических лучей:

1) какие астрофизические объекты ответственны за генерацию космических лучей; где они расположены: в нашей Галактике или за ее пределами?

2) как можно ускорить частицы до максимально наблюдаемых, т.е. до 3ЭВ -ных, энергий; существуют ли частицы больших энергий и каков их состав?

Идея галактического происхождения космических лучей доминировала на всем протяжении их исследований. Во главу угла здесь ставились, прежде всего, энергетические соображения. В нашей Галактике и в других галактиках сосредоточены мощнейшие астрофизические объекты, способные обеспечить необходимой энергией те частицы, которые, путешествуя в космическом пространстве, достигают Земли.

Выше уже отмечалось, что вещество находится в Галактике в атомарном состоянии и под действием ультрафиолетового

69

излучения звезд оно ионизируется (это процесс «отрыва» орбитальных электронов с оболочек нейтральных атомов при взаимодействии с другими частицами среды). Так, например, по 90% водорода составляют его ионы - протоны. Часть энергии этого ионизированного газа конвертируется в магнитную энергию — так возникает магнитное поле межзвездной среды. Электрическая проводимость этой среды столь велика, что магнитное поле «следует» за потоками плазмы: физики в этом случае говорят о «вмороженности» магнитных силовых линий в межзвездную плазму.

Движение этих потоков плазмы с магнитным полем далеко от однородного, ламинарного — оно в большей степени хаотичное, т.е. турбулентное. Однако есть доказательства существования почти однородного крупномасштабного поля вдоль магнитного поля спиральной дуги.

Какова средняя величина напряженности межзвездного магнитного поля B ? Отметим, что величина B имеет принципиальное значение для проблемы генерации космических лучей: она связана с предельной энергией ускорения частиц (об этом мы поговорим в следующем разделе). В 1953 г. С.Чандрасекар и Э.Ферми оценили напряженность его как $6 \cdot 10^{-6}$ Гаусс = 6 мкГс на основе исследования баланса между магнитными и гравитационными эффектами в спиральном рукаве Галактике.

Согласно современным оценкам, $5 \approx 3\text{мкГс}$. Считается, что в гало магнитное поле значительно меньше. Однако, существуют и другие точки зрения. Так, например, утверждается, что в нашей Галактике, вблизи Солнечной системы $B \approx 6\text{--}7\text{мкГс}$, а в других галактиках между 1 и 10 мкГс.

Если космические лучи рождаются в Галактике, заполняют ее и удерживаются в ней, то можно оценить соотношение плотности кинетической энергии (т.е. энергии, приходящейся на единицу объема) самих космических лучей, магнитного поля и распределенного в Галактике вещества. Плотность энергии магнитного поля оценивается по формуле $B^2/8\pi$, где B — напряженность межзвездного магнитного поля Галактики. Оценки показывают, что они близки по величине и состав-

70

ляют $\approx 1\text{ эВ/см}^3$ (или $\sim 10^{12}\text{ эрг/см}^3$). Отсюда следует первый вывод, что космические лучи - существенная часть материи Галактики.

Можно оценить мощность источников, необходимую для получения такой плотности энергии космических лучей в объеме Галактики. Оказалось, что при размерах нашей Галактики с ее толщиной, равной 300 пк и радиусом 15 кпк, величина мощности составляет $\sim 10^{41}\text{ эрг/сек}$. С

какими астрофизическими объектами сопоставима эта гигантская мощность энергии? Может ли Солнце производить столько энергии?

Действительно, Солнце генерирует космические лучи во время солнечных вспышек, но их предельная энергия около 1 ГэВ. При этом в среднем оно испускает не более 10^{26} таких частиц в секунду (в основном протонов). Отсюда оценка мощности Солнца, не превышающая 10^{23} эрг/сек. В Галактике около 10^{11} звезд типа Солнца, т.е. предельная мощность всего конгломерата звезд не должна быть больше 10^{34} эрг/сек.

И все же в нашей Галактике есть необходимые источники энергии, это — сверхновые звезды.

5.2. Сверхновые старые звезды

Это удивительно, но задолго до выяснения состава самого космического излучения появилась идея о сверхновых, как его источниках. Уже упоминалось, что в 1934 г., в престижном научном журнале *Physical Review* появилась статья В.Бааде и Ф.Цвикки, впервые попытавшихся дать ответ на решение проблемы источника частиц космических лучей. Так что идее о сверхновых, как о звездах, порождающих космические лучи, уже «стукнуло» более полвека...

Когда человек впервые увидел сверхновую?

4 июля 1054 г. в созвездии Тельца вспыхнула звезда по своей яркости сравнимая с Венерой. Она была видна даже днем и оставалась видимой более года. Этот факт отмечен в китайских хрониках. Почти на 900 лет позднее было замечено, что Крабовидная туманность занимает на небе то же самое положение, что и звезда, появившаяся в 1054 г. Это

71

могло означать, что газовое облако, образовавшееся после взрыва звезды, распространяясь в радиальном направлении, с течением времени сформировало объект, который современные астрономы наблюдают как Крабовидную туманность. Современные радиоастрономические данные о дискретных сигналах из этой области подтверждают эту гипотезу: в центре туманности находится пульсар — быстровращающаяся звезда (ее период вращения всего три сотых доли секунды), электромагнитное излучение которой — от радио- до гамма-диапазона. Расстояние до Крабовидной туманности — не менее 6500 световых лет.

Внутри нашей Галактики за последние сотни лет вспыхнули, по крайней мере, еще две другие сверхновые — звезда Тихо Браге в созвездии Кассиопея в 1572 г. (рис. 5.1) и звезда Кеплера в 1604 г. Наиболее масштабное явление наблюдалось в 1937 г., когда в галактике IC4182 появилась сверхновая с яркостью излучения, во много раз превышающей яркость самой галактики. Последняя вспышка сверхновой была зарегистрирована недавно: 23 февраля 1987 г. в Большом Магеллановом облаке (Сверхновая 1987А) - на расстоянии ~50000 пк (~150000 световых лет). До настоящего времени астрономы насчитали более 900 сверхновых и практически все они наблюдались в других галактиках! Но эта цифра подвергается сомнению ввиду того, что она не отражает результаты систематического поиска. Сейчас обсерватории мира, следящие за «подозрительными» галактиками, обнаруживают в год от 20 до 60 сверхновых.

Рис.5.1. Историческая сверхновая, которую наблюдал датский астроном Тихо Браге (1546-1601 гг.) в 1572 г.

Оказалось, что это сверхновая I типа.



72

А в нашей Галактике? Неужели было только 3 случая взрывов сверхновых? Тщательное исследование китайских астрономических записей свидетельствует, что до Сверхновой 1054 г. были еще, по крайней мере, 3 взрыва сверхновых звезд: в 185, 369 и 1006 гг. Из этого следует, что в нашей Галактике взрывы сверхновых происходят 1 раз в 3-4 столетия. Но на самом деле они происходят чаще. Возможно, некоторые взрывы сверхновых происходят в удаленных частях Галактики, оставаясь незамеченными наблюдателями с Земли.

Всего за последние 1000 лет в нашей Галактике наблюдались 6 сверхновых. Все они приведены в таблице 5.1.

Таблица 5.1. Сверхновые в нашей Галактике за последние 1000 лет.

Название	Год наблюдения	Расстояние от Земли,	КПК
Lupus	1006	1,4	
3C58	~1181	2,6	
Kepler	1604	4,2	
Crab	1054	2,0	
Tycho	1572	2,5	
Cas F	~1658	2,8	

Данные радиоастрономии свидетельствуют о существовании 46 остатков сверхновых в нашей Галактике. Полагая, что вероятность взрывов одинакова во всей Галактике, получается от 1 до 5 появлений сверхновых за столетие. Астрономы утверждают, что интересным кандидатом в сверхновые в Галактике может быть красный гигант *Bete Lgeuse* в созвездии Орион. Что ж, если статистика верна, осталось ждать недолго.

Существуют 2 типа сверхновых. Сверхновые типа II вспыхивают в несколько раз чаще, чем сверхновые типа I, обладают большей яркостью и массой по сравнению со сверхновыми типа I. Скорость расширения газовой оболочки, возникающей при взрыве сверхновой типа II, достигает ~5000 км/сек, а для

73

сверхновых I типа — 1000-2000 км/сек. Если масса сверхновых I типа близка к солнечной массе, то для сверхновых II она оценивается в 30 солнечных масс. Сверхновые I располагаются в популяциях старых звезд, в то время как сверхновые II типа - среди молодых, в рукавах спиральных галактик.

Полагают, что для обоих типов сверхновых энергия взрыва обеспечивается гравитационным коллапсом умирающей, старой звезды.

Вспышка сверхновой — это гибель старой звезды в процессе ее эволюции. Поэтому, по-сути, сверхновая вовсе и не звезда, а газо-пылевое облако, расширяющееся в пространстве. В главе 1 уже рассказывалось, что теория эволюции звезд предполагает следующий сценарий: по мере выгорания водорода и других легких элементов в процессе термоядерной реакции внутри звезды — красного карлика — происходит синтез более тяжелых элементов, а затем, вследствие истощения мощности термоядерных реакций, начинают преобладать гравитационные силы. Происходит коллапс звезды - ее гибель (рис. 1.5). Звезда сбрасывает свою оболочку из легких элементов, а внутренняя часть, более тяжелая, превращается в нейтронную звезду, состоящую из нейтронов с железной внешней оболочкой.

В результате взрыва сверхновой высвобождается $\sim 10^{51}$ эрг в виде кинетической и электромагнитной энергии. Взрыв последней сверхновой, SN 1987, оценивается в $\sim 10^{52}$ эрг. Если сверхновые в Галактике взрываются один раз в 30-40 лет, то выделяемая при этом средняя мощность составляет $\sim 10^{42}$ эрг/сек. Сопоставим это с полученной выше оценкой $\sim 10^{41}$ эрг/сек мощности, необходимой для поддержания наблюдаемой плотности энергии космических лучей.

Оказывается, что достаточно всего 10% мощности взрыва сверхновой, чтобы космические лучи могли «существовать» в Галактике.

Именно эти энергетические соображения являются отправной точкой при рассмотрении наиболее явных кандидатов на роль источников космических лучей во Вселенной.

74

Глава 6. ПУШКИ ВСЕЛЕННОЙ

Ничто не происходит без достаточного основания.

М.В.Ломоносов

Помимо высвобождения огромного количества энергии, взрыв сверхновой звезды сопровождается генерацией крупномасштабных магнитных полей — своеобразных магнитных облаков в окрестности места взрыва и ударной волной, расширяющейся с высокой скоростью в межзвездном пространстве плазменной оболочкой (см. рис. 6.2). Именно с этим явлением, в первую очередь, и связан процесс ускорения частиц во Вселенной.

6.1. Космический ускоритель — Пэватрон

Впервые идею ускорения космических лучей в результате множественных отражений от движущихся магнитных облаков выдвинул Э.Ферми в 1949 г. Вкратце этот механизм ускорения можно представить себе следующим образом.

Космические частицы, блуждая во Вселенной, сталкиваются с магнитными облаками в межзвездной среде. Можно показать, что при многократных случайных столкновениях энергия частиц будет увеличиваться. Причем энергетический спектр частиц будет степенным, что согласуется с результатами экспериментальных исследований космических лучей. Это механизм ускорения Ферми первого порядка.

Наиболее эффективно ускорение космических лучей происходит не на ранней фазе взрыва сверхновой, а на

75

последующих, более поздних, по мере расширения газовой оболочки. Такой процесс ускорения в замкнутом объеме расширяющейся оболочки продолжается до тех пор, пока магнитное поле внутри не сравняется с внешним, межзвездным магнитным полем.

После этого начинается процесс «утечки» космических лучей из замкнутого объема оболочки сверхновой в галактическое пространство. Возникает диффузия частиц на магнитных неоднородностях межзвездной среды, обусловленной существованием здесь дрейфующих плазменных облаков. Частицы «забывают» о своем происхождении, и распределение направлений их скоростей в пространстве становится изотропным.

Электроны, преимущественно высокоэнергичные, в процессе распространения теряют энергию вследствие генерации синхротронного излучения, а ядра — в результате ядерных столкновений. Это означает, что с течением времени, по мере распространения частиц в межзвездной среде, их химический состав и энергетические распределения изменяются. Следовательно, состав и энергетические спектры космических лучей, наблюдаемые нами в районе Земли, должны отличаться от спектров, характерных для источника - сверхновой, на ранней фазе ее развития.

А тем временем все новые и новые сверхновые звезды взрываются во Вселенной, пополняя «свежими» частицами межзвездное пространство. Так качественно выглядит процесс генерации космических лучей в галактиках.

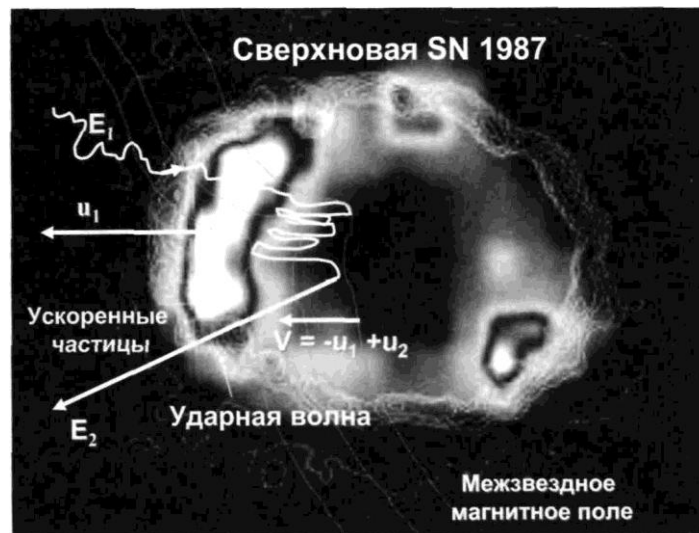
Однако этот механизм слишком медленный, т.е. частицы набирают энергию за достаточно длительное время. Оценки показывают, что за несколько миллионов лет их энергия увеличится не более, чем в несколько раз.

Версия более эффективного ускорительного механизма типа Ферми была предложена в 70-х годах Г. Крымским и другими исследователями. В рамках этого механизма частицы дополнительно ускоряются за счет взаимодействия с сильной ударной волной, распространяющейся в среде межзвездного газа (рис. 6.1).

76

Рис. 6.1. Остатки взрыва сверхновой звезды SN 1987.

На рисунке показана качественная картина механизма ускорения частиц Ферми I рода на ударной волне — внешней оболочке сверхновой, распространяющейся в Магеллановом облаке. Снимок получен рентгеновским телескопом на спутнике «*Chandra*».



К каким количественным оценкам приводит нас процесс ускорения частиц вблизи фронта ударной волны сверхновой? Представим себе частицы с энергией E_1 , которые движутся из области изотропного распределения через фронт волны в ее внутреннюю область. В результате взаимодействия частиц с ударными волнами сверхновой они увеличивают кинетическую энергию. Некоторые частицы остаются за волной, не испытывая ускорения, но другая часть их, ускоренная до величины E_2 , пересекает ударную волну в обратном направлении. В результате одного цикла происходит приращение энергии ΔE частицы на величину:

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{4}{3} \frac{U_1 - U_2}{c}$$

77

здесь U_1 — скорость ударного фронта, U_2 — скорость газа за фронтом, причем ($U_2 < U_1$) и c — скорость света. Затем частицы, оказавшиеся перед волной, захватываются ею. Возникает новый цикл ускорения. Многократное повторение этого процесса может привести к значительному увеличению энергии частицы.

Подробный анализ такого механизма приводит к следующей формуле, демонстрирующей верхний достижимый предел ускорения частиц: $E_{\max} = BLZ$, где B — напряженность магнитного поля, L — радиус траектории (ларморовский радиус) протона в магнитном поле, Z — зарядовое число ядра.

Для межзвездного магнитного поля $B \approx 3 \cdot 10^{-6}$ Гс формула дает оценку $E_{\max} \approx Z \cdot 10^{14}$ эВ. Таким образом, согласно этой модели протоны космических лучей могут быть ускорены до энергий не выше 0,1 ПэВ.

Однако, здесь заложена некоторая неопределенность, связанная с отсутствием надежных сведений о величине B . Возможно, значение B несколько превышает принятое сейчас в ряде моделей значение $B \approx 3 \cdot 10^{-6}$ Гс. В этом случае E_{\max} будет больше, чем приведенная выше оценка.

В основе предложенных механизмов ускорения типа Ферми есть одна трудность. В них рассматривается модель распространения ударной волны в межзвездной среде, уже содержащей частицы высоких энергий. Другими словами, теоретиками задается некий «предускоренный» спектр частиц, или «спектр инжекции», происхождение которого, вообще говоря, неясно.

Другое важное следствие данной модели состоит в том, что энергетические спектры ядерных компонент в районе E_{\max} должны испытывать так называемый «скейлинг» — с увеличением заряда ядра Z или его массы сама величина E_{\max} в размерности полной энергии должна быть разной для различных ядер. С увеличением Z E_{\max} увеличивается. Эти выводы качественно демонстрируются на рис. 6.2, где показан экспериментальный энергетический спектр «всех частиц» и модельные представления энергетических распределений отдельных компонент космических лучей.

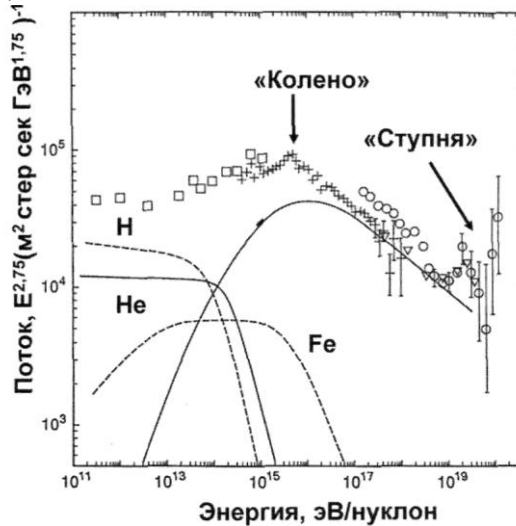
78

Что это означает для физики космических лучей? Мощность сверхновых звезд ограничивает возможность ускорения частиц областью энергетического спектра в районе «колена» (~3 ПэВ). Но из экспериментальных данных следует, что спектр «всех частиц» продолжается вплоть до ЗэВ-ных энергий. Следует принять во внимание следующее соображение. В реальности происходит процесс взаимодействия частиц с ударными волнами распространяющимися от многих сверхновых. Поэтому E_{\max} может еще больше возрасти. Теоретические оценки показывают, что в условиях взаимодействия космических лучей с

Рис. 6.2. Экспериментальные энергетические спектры всех частиц

Рис. 6.2. Экспериментальные энергетические спектры всех частиц (различные значки) и модельные расчеты ускорения различных компонент (H, He и Fe) космических лучей в остатках сверхновой. Каждая

компонента испытывает излом, соответствующий максимальным возможностям космического Пэватрона в соответствии с законом $E_{\max} \propto Z \cdot 10^{14}$ эВ, т.е., чем тяжелее частицы, тем при больших энергиях должно наблюдаться «колено» для конкретного типа частиц. Спектр частиц при больших энергиях («новая компонента») может быть объяснен существованием во Вселенной ускорительного механизма более мощного, чем взрыв сверхновой.



79

конгломератом ударных волн E_{\max} может достигать величины $\sim 10-100$ ПэВ/нукл.

Экспериментальным доказательством ускорения частиц на фронте ударной волной от вспышки сверхновой является, пожалуй, замечательная фотография остатков сверхновой SN 1987, полученная рентгеновским спектрометром на спутнике «Chandra» (см. рис. 6.1). На этом снимке яркие области представляют собой нетепловое рентгеновское излучение. Это синхротронная эмиссия — излучение, вызванное взаимодействием электронов с окружающим магнитным полем на фронте ударной волны. Магнитные поля искривляют траектории движения частиц, и они излучают радиацию. Энергия синхротронной радиации зависит от напряженности магнитного поля в районе ударной волны. Поэтому наблюдаемое в рентгене свечение остатков сверхновых действительно демонстрирует ускорение частиц на фронте разлетающейся ударной волны.

Итак, основными кандидатами на роль ускорителей космических лучей во Вселенной выступают сверхновые звезды. Их взрывы действительно создают условия для ускорения частиц

— галактических космических лучей до ПэВ-ых энергий, т.е. это своего рода Галактический Пэватрон.

Но сверхновые, как, впрочем, и другие объекты Вселенной

— разные. Разные, прежде всего, по таким характеристикам как энергия взрыва, светимость, скорость разлета оболочки, ее состав и др. Так, взрыв сверхновой, наблюдавшийся в 1997 г., по своей энергии ($\sim 3 \cdot 10^{52}$ эрг) в десятки раз превосходил среднее значение, характерное для сверхновых. В последние годы открыты по крайней мере 3 сверхновых, обладающие огромными (свыше 30000 км/сек) скоростями разлета своих оболочек. Они получили название гиперновых, т.е. звезд со сверхмощной энергетикой взрыва. Вполне возможно, что это отдельный класс звезд, отличающийся от «обычных» сверхновых. Очевидно, что от энергии взрыва в первую очередь зависит максимальная энергия космических лучей (доля энергии остатка сверхновой, «передаваемая» космическим лучам, может достигать десятков процентов).

80

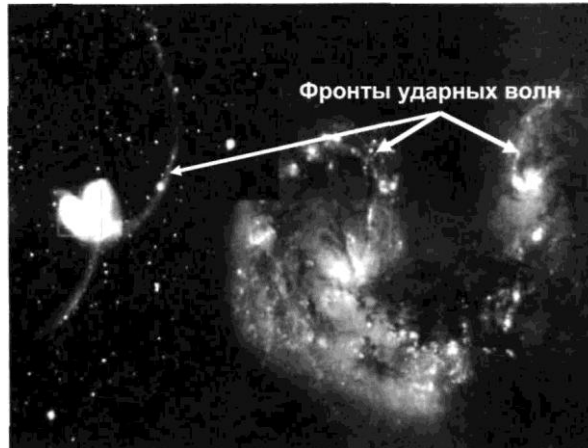
Поэтому, если принять гипотезу рождения космических лучей в результате множественных взрывов сверхновых и гиперновых, можно ожидать зависимости формы результирующего энергетического спектра частиц от статистического распределения взрывов звезд различного типа. В связи с этим интересно заметить, что оценки приводят к заключению, что всего лишь несколько процентов гиперновых при средней частоте их взрывов, не превышающей одного в 10 тысяч лет, могут обеспечить наблюдаемый поток космических лучей.

Есть еще один наблюдательный факт - временная корреляция взрывов сверхновых, связанная с тем, что существуют повышенные концентрации таких звезд в их скоплениях. Происходящий в таких скоплениях взрыв одной сверхновой порождает взрывы близлежащих звезд — соседей. Срабатывает своеобразный «триггер», вызывающий «вселенскую» лавину взрывов. При этом в межзвездной среде распространяется «суперпузырь» остатков гибнущих звезд...

Такие «суперпузыри» могут разгонять космические частицы до энергий, значительно превосходящих энергию «колена» или,

Рис. 6.3. Сталкивающиеся галактики NGC 4038/9.

Можно предположить, что здесь существуют гораздо более мощные ударные волны, чем в остатках сверхновых.



81

другими словами, традиционного Пэватрона — одиночной сверхновой со средней энергией взрыва. К тому же и магнитное поле в окрестности «суперпузыря» может превышать параметры, характерные для средней межзвездной величины. Некоторые исследователи склонны полагать, что в этих областях поле достигает величин 30-45 мкГс, вместо 3 мкГс, принятых для «обычного» межзвездного поля.

Еще более мощные ускорители, чем сверхновые, можно искать и за пределами нашей Галактики...

Во Вселенной, вне пределов нашей Галактики, существуют объекты, где можно ожидать более мощные, чем сопровождающие взрывы сверхновых, ударные волны, например, в сталкивающихся галактиках (рис. 6.3).

Хотя такие события происходят во Вселенной очень редко — возможно один раз в сотни миллионов лет, тем не менее в этих областях можно ожидать ускорения частиц до энергий, превышающих возможности ударных волн от сверхновых. Однако пока мы не располагаем экспериментальными доказательствами такого процесса.

Теперь вернемся вновь к составу космических лучей.

6.2. Превращения звездного вещества или о возрасте космических странников

Частицы космических лучей имеют релятивистские энергии: они преодолевают просторы Вселенной со скоростями, близкими к скорости света. Рождаясь в источнике, космические лучи «наследуют» тот состав вещества, из которого состоит сам источник. Поэтому, изучая космические лучи, можно судить о химическом составе тех звезд, которые их образуют. Однако, не все так просто.

Космические лучи, распространяясь во Вселенной, пронизывают довольно большое количество вещества — межзвездной пыли, ионизированных облаков и др. Встречая на своем пути другие частицы, они могут вступить в ядерные взаимодействия с ними. Результат - рождение новых частиц. Поэтому, очевидно, что состав частиц космических лучей,

82

которые долетают до Земли, может отличаться от того, который образовался в источнике. Это и наблюдается в экспериментах у Земли.

В составе космических лучей мы наблюдаем явный избыток таких элементов, как Li, Be, B, Sc, Ti и ряд других. Особенно много, по сравнению с естественной распространенностью элементов во Вселенной, легких - Li, Be и B. Их вообще не следовало бы ожидать в космических лучах, т.к. они должны были «исчезнуть» при рождении — выгореть в результате термоядерных реакций уже при температурах в несколько миллионов градусов. Расчетное относительное содержание этих элементов по отношению к водороду всего 10^{-13} . В табл. 4.1 приводится состав (относительно кислорода) элементов в ГКЛ и средней их распространенностью во Вселенной. Как это видно, расчеты явно не согласуются с реальной распространенностью этих элементов. Она на 2-3 порядка больше.

Модель, которая может объяснить это различие, заключается в следующем. В отличие от других ядер, эти частицы не образуются в результате нуклеосинтеза при горении звезд. Их источник — ядерные реакции, превращающие более тяжелые ядра в Li, Be, B. Это происходит при взаимодействии ГКЛ — протонов, гелия или же углерода, кислорода и азота с веществом межзвездной среды. В ядерной физике эти реакции хорошо известны — это реакции скалывания.

Однако, в связи с образованием вторичных частиц в составе космических лучей в процессе их распространения, которыми по сути и являются Li, Be и B, возникает проблема. Она заключается в том, что того количества вещества, с которым должны были бы взаимодействовать первичные частицы из источника с тем, чтобы создать вторичные, просто нет в нашей Галактике. Полная масса всего вещества сквозь всю Галактику в несколько тысяч раз меньше, чем это необходимо для эффективного образования новых частиц.

Ответ заключается в том, что космические лучи, едва появившись на свет, начинают блуждать, запутываясь в Галактике. Это им довольно легко сделать, т.к. повсюду в Галактике встречаются неоднородности магнитного поля,

83

заставляющие частицы изменять свои первоначальные траектории, т.е. рассеиваться. Движение частиц приобретает характер диффузии. Модель этого процесса довольно хорошо разработана, что позволяет сравнить ее результаты с экспериментом.

Как указывалось выше, минимальная толщина вещества, необходимая для рождения вторичной компоненты космических лучей составляет $\sim 5 \text{ г/см}^2$. Исходя из этой величины можно вычислить длину пути, а затем, зная скорость частицы, определить время ее жизни.

Однако вещество в Галактике распределено неравномерно: его плотность в диске значительно превышает плотность в гало (рис. 1.4). Получается некоторый разброс расчетных времен жизни или возраста космических лучей: от сотни миллионов до трех миллионов лет. Именно такое время — миллионы лет наши странники проводят в Галактике, прежде чем мы их сумеем зарегистрировать на Земле или вблизи нее.

Поэтому нет ничего удивительного в том, что космические лучи «забывают» о своем месте происхождения во Вселенной: их направление прихода к Земле не совпадает с направлением на источник их происхождения. Поток космических лучей становится изотропным, т.е. приход их с разных направлений равновероятен.

6.3. О чем говорят результаты экспериментов

Чем дальше эксперимент от теории, тем ближе он к Нобелевской премии. *Ф.Жолио Кюри*

Что пытаются найти и доказать в своих экспериментах физики? Безусловно, найти доказательства обсуждаемым моделям происхождения космических частиц или... опровергнуть их, или найти подходы к созданию новых.

Галактический Пэватрон — космический ускоритель, разгоняющий частицы в результате взрывов сверхновых, является, пожалуй, наиболее популярным в настоящее время среди

84

физиков. Давайте посмотрим, насколько эксперименты подтверждают эту модель.

В предыдущих главах мы видели, что для изучения космических лучей применяются различные методики. Их можно разделить на 2 класса: это метод ШАЛ, работающий в области сверхвысоких и ультравысоких энергий (за ПэВ-ой областью энергий), и прямые измерения частиц меньших энергий на аэростатах и спутниках с использованием детекторов, в основе которых лежит калориметрический метод. Оба эти метода перекрывают гигантский диапазон энергий — от сотен МэВ и до предельных, ультравысоких — 10^{20} - 10^{21} эВ.

О чем свидетельствуют эксперименты, основанные на методе ШАЛ? В районе «колена» спектры всех частиц по данным ШАЛ довольно хорошо согласуются друг с другом, демонстрируя переход от пологого спектра с $\gamma \approx 2,7$ к более крутому ($\gamma \approx 3,2$). Достаточно ли этого для сопоставления с теоретическими моделями? — Нет.

Согласно теории, ожидается существование верхнего предела энергии ускоренных частиц, причем, чем тяжелее частица, тем больше E_{max} (т.к. $E_{\text{ma}} \propto Z$). Поэтому необходимы экспериментальные данные — энергетические спектры частиц по крайней мере от водорода (протонов) до железа, чтобы доказать справедливость гипотезы ускорения частиц в остатках сверхновых. Качественно это демонстрируется результатами расчетов на рис. 6.2, где изображены спектры отдельных видов ядер в районе «колена».

А что нам дает эксперимент?

В области за «коленом», используя метод ШАЛ, энергетические распределения частиц различных масс можно получить только на основе моделирования процессов развития ливней в атмосфере. Нельзя сейчас утверждать, что разработанные модели адекватно описывают все реально существующие физические процессы ливня частиц. В моделях существуют неопределенности, приводящие к неоднозначности конечных результатов. Поэтому нет ничего неожиданного в том, что при попытках выделить спектры частиц с разными Z , их формы могут отличаться.

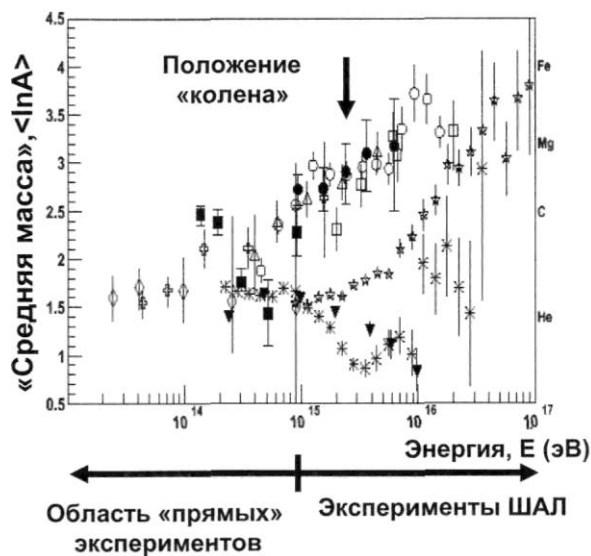
85

На рис. 6.4 можно видеть зависимость от энергии E «средней массы» частиц $\ln A$ ($\ln A$ — расчетная величина, применяемая для оценки химического состава частиц: чем она больше, тем больше в потоке тяжелых частиц, для удобства представления она вычисляется в натуральных логарифмах). Обратите внимание на область за «коленом»: данные ШАЛ имеют здесь неоднозначный характер: нельзя сделать окончательного вывода о том, какова зависимость $\langle \ln A \rangle$ от энергии. Вспомним (см. вновь рис. 6.2), что модели приводят к выводу об «утяжелении» состава космических лучей в районе «колена», т.е. $\langle \ln A \rangle$ должен расти с ростом энергии.

А какова ситуация с экспериментальными данными до «колена», т.е. там, где работают только «прямые» методы измерений космических лучей?

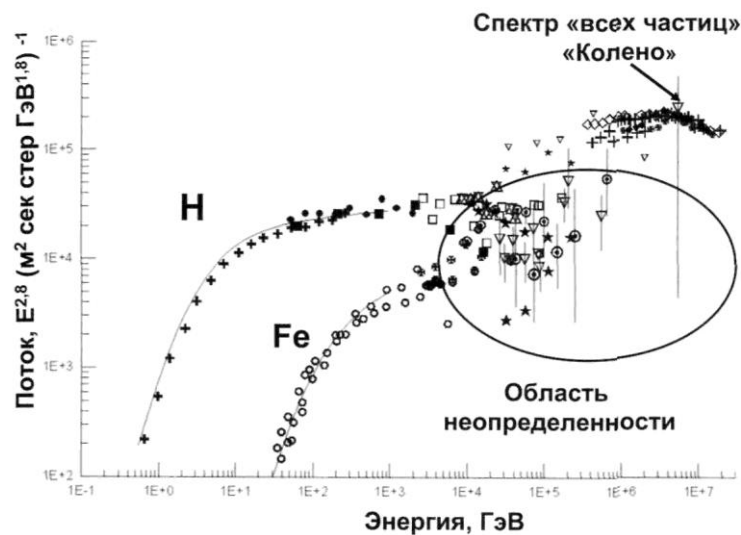
Рис. 6.4. Энергетическая зависимость «средней массы» частиц космических лучей — характеристики массового состава частиц.

Много данных (верхняя часть) свидетельствуют об «утяжелении» состава ГКЛ с ростом энергии, но есть и результаты, противоречащие этому.



86

Рис. 6.5. Экспериментальные спектры протонов (H) и железа (Fe) до «колена» не вносят определенности в форму спектра в районе «колена» из-за недостаточной статистики.



Взгляните на рис. 6.5: здесь, наряду со спектром «всех частиц», приведены спектры двух компонент — протонов (H) и железа (Fe), полученных «прямыми» методами в результате измерений космического излучения калориметрами и детекторами различного типа. Вблизи «колена» данные рассеяны. Почему? Мала статистика событий, число зарегистрированных частиц недостаточно для достоверных выводов. Это следствие как малой длительности проведения экспериментов (экспозиции) на аэростатах и спутниках, так и недостаточной площади (светосилы) самих детекторов для надежной регистрации в области ТэВ-ых энергий и выше.

Каковы перспективы дальнейших исследований в области «колена»? Безусловно, кардинально решить проблему мог бы запуск в космос большого прибора, с достаточной светосилой, для измерений вплоть до ~ 10 ПэВ всех основных компонентов космического излучения. Проблема в том, что такой прибор должен весить не менее 10 тонн.

87

И проекты такие есть. Наиболее подходящая космическая платформа для проведения таких экспериментов — Международная космическая станция, где можно установить прибор столь большой массы. Будем надеяться, что такой проект осуществится (рис. 6.6).

Теперь обратим внимание на самый «край» энергетического спектра — его «ступню». Здесь экспериментальных данных не так уж много. И это, конечно, связано с чрезвычайно низким потоком космических лучей в этой области.

Из известных спектров космических лучей, следует (см. рис. 4.5), что количество частиц при энергии 10^{18} эВ это всего 1 частица/км² стер год. Для более яркого сопоставления приведем следующие цифры. Каждую секунду около 200 частиц космических лучей с энергией несколько миллионов эВ (10^6 эВ=МэВ) падают на квадратный метр поверхности. При больших энергиях, как мы видели (рис. 4.5), их поток резко снижается и при энергии в 10^{18} эВ = 1 ЕэВ достигает земли всего 1 частица в неделю на квадратный километр. А при самых

Рис. 6.6. Один из проектов большой установки для изучения космических лучей в районе «колена» на борту Международной космической станции. Её вес — несколько тонн.



88

больших энергиях, около 10^{19} эВ, — 1 частица на квадратный километр в 100 лет. Отсюда - необходимость создания гигантских установок для их регистрации. Только 3 установки работают в настоящее время в области энергий $>10^{17}$ эВ. Среди них самая крупная — «*Pierre Auger*» в Аргентине.

Чтобы представить себе масштабы этой установки, приведем несколько цифр: 1600 детекторов на расстоянии 1,5 км друг от друга расположены на площади около 3000 км², образуя шестиугольник с максимальным расстоянием между вершинами около 70 км. Это больше, чем Москва, Париж и многие другие города мира.

Сопоставим основные характеристики действующих в настоящее время крупных установок ШАЛ (таблица 6.1).

Таблица 6.1. Количество ливней с $E > 5 \cdot 10^{19}$ эВ по измерениям на разных наземных установках ШАЛ.

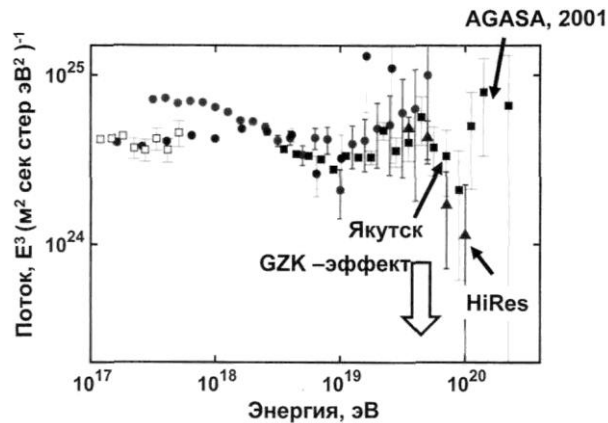
Установка	AGASA	Hi Res	Auger
Светосила, км ² стер	150	800	610 ³
Число ливней в год	5	30	300

Из этой таблицы видно, что «*Pierre Auger*» действительно обладает уникальными возможностями для работы в области ультравысоких энергий космических лучей: ожидаемое количество событий — частиц космических лучей при энергиях $E > 5 \cdot 10^{19}$ эВ за годовую экспозицию ожидается около 300. Эта установка только начала эксплуатироваться и пройдет несколько лет, прежде чем мы получим результат в этой области. Какой?

Посмотрим на имеющиеся в нашем распоряжении результаты. Впервые ливень в атмосфере, вызванный частицей с энергией $1 \text{ ЗэВ} = 10^{20}$ эВ, был зарегистрирован на установке «*Volcano Ranch*» в Нью-Мексико, США, в 1960 г. Именно тогда, более чем 40 лет назад, стало ясно, что в природе существуют частицы столь гигантских энергий. Затем аналогичный ливень с энергией первичной частицы 10^{20} эВ был зарегистрирован на Якутской установке в 1989 г. Он даже получил

89

Рис. 6.7. Экспериментальные данные по энергетическим спектрам космических лучей при ультравысоких энергиях не могут пока свидетельствовать ни в пользу существования «обрезания» спектра космических лучей, ни о его продолжении в сторону больших энергий.



собственное имя «Ариан» — в честь одного из создателей этой установки — Ариана Кузьмина. А самая большая энергия частицы, зарегистрированная в космических лучах, — $3,2 \cdot 10^{20}$ эВ. Это произошло в ноябре 1991 г. на установке *HiRes* в США. Через три года, в 1994 г., частица с энергией $2 \cdot 10^{20}$ эВ была зарегистрирована на установке *AGASA* в Японии.

Статистика событий в этой области энергий набирается очень медленными темпами — уж слишком мал поток космических лучей в этой области энергий. На рис. 6.7 показаны спектры частиц, полученные в последнее время на установках *AGASA* и в Якутске. Здесь мы видим расхождение в результатах — данные Якутска демонстрируют загиб спектра (хотя статистика здесь еще недостаточна), а данные *AGASA* — рост потоков. Конечно, есть сторонники тех или иных результатов, но все же следует констатировать, что в экспериментальном плане вопрос о форме спектра в этой области энергий остается открытым.

А что нам говорит теория? Теория приводит нас к выводу, что таких частиц вообще не должно быть!

90

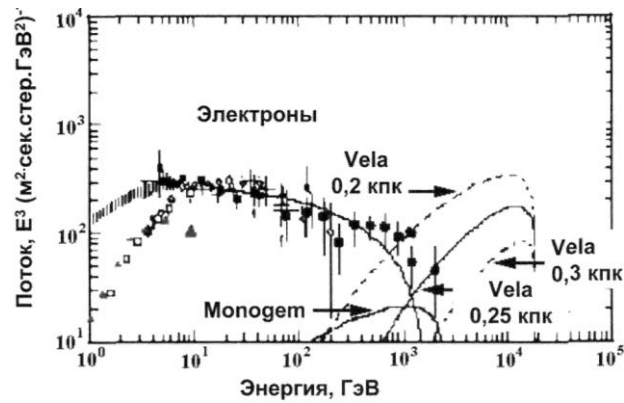
6.4. Электроны в космических лучах

В отличие от ядер, электронов очень мало, не более ~1% от полного потока. Тем не менее, этот компонент излучения очень интересен. Дело в том, что электроны подвержены эффективным потерям энергии в процессе их путешествия во Вселенной. Это и ионизация, и тормозное, и синхротронные типы излучений, а также комптоновское рассеяние. Электроны чрезвычайно чувствительны к магнитному полю и межзвездной материи. Эти поля ограничивают возможность распространения электронов на далекие расстояния от источников. При больших энергиях поток частиц должен исчезать. Ожидается, что это обрезание — «колено» в спектре электронов, будет наблюдаться при энергиях порядка ТэВ, т.е. значительно меньших, чем для ядерного компонента (если обрезание, конечно, существует).

Взглянем на экспериментальные спектры электронов (см. рис. 6.8). Мы не можем категорично утверждать,

Рис. 6.8. Энергетические спектры электронов в разных экспериментах.

Сплошная линия — расчет спектров от источников, расположенных на расстояниях более чем 1 кпк. Видна тенденция к существованию «колена» при энергии ~1 ТэВ, но окончательного вывода сделать нельзя. В правой части показаны модельные расчеты спектров от «ближних» источников *Vela* (на разных расстояниях) и *Monogem*.



91

что спектр электронов действительно обрзан при энергиях более ~ 1 ТэВ — статистика мала в этой области. Для окончательного вывода нужны новые эксперименты в космосе. Они готовятся. Наиболее крупный среди них — японский эксперимент *CALET*, планируемый к запуску на Международную космическую станцию.

Представим себе, однако, что когда будут опубликованы новые результаты по электронам высоких энергий, более 1 ТэВ, окажется, что они существуют — обрезаия спектра нет. Что это будет означать? Этот факт с определенностью нам укажет, что на близких от нас расстояниях действительно существуют источники, генерирующие такие электроны. Наиболее очевидные источники — опять-таки сверхновые, но расположенные на расстояниях порядка 300 парсек от нашей Солнечной системы. Это недалеко. Очевидно, что таких сверхновых должно быть очень мало. Оценки показывают частоту их появления - не более 2-5 за последние 300 тысяч лет!

Почти все они в нижеприведенной таблице 6.2. Здесь приведены расстояния до этих звезд и рассчитанная максимальная энергия генерируемых электронов.

Таблица 6.2. Звезды — кандидаты в источники электронов космических лучей высоких энергий

Звезды	Расстояние, парсек	Расчетная максимальная энергия электронов, ТэВ
Vela	200	15
Monogem	300	3
Loop 1	170	1,7
Geminga	150	1,0

Наряду с экспериментальными данными на рис. 6.8 показаны модельные расчеты спектров электронов от сверхновых звезд *Vela* и *Monogem*. Они действительно, могут «поднять» электронный спектр с «колена» — не дать ему «загнуться» при $E \sim 1$ ТэВ. Так это или нет - покажут только будущие эксперименты.

92

Глава 7. МИСТЕРИЯ ОБРЕЗАНИЯ

Вся правда проходит три стадии: первая: это — удивительно; вторая: это то, против чего все; третья: это принимается как само по себе очевидное.

А. Шопенгауэр

Итак, *экспериментальные данные могут указывать на возможность существования в природе частиц с энергиями в ЗэВ'ы*. Именно такую осторожную формулировку применяют ученые к полученным до настоящего времени результатам экспериментов. Но в ожидании новых данных мысль исследователей не стоит на месте и в равной мере рассматривает как возможности их присутствия в природе, так и отсутствия таких частиц...

Но, прежде всего, конечно, возникает вопрос о самом существовании в природе объектов, способных ускорить частицы до столь гигантских энергий. Рассмотрим эту проблему более подробно.

7.1. Диаграмма Хилласа или в поисках Зэватрона

Заряженные частицы космических лучей отклоняются в космических магнитных полях. Даже для частиц с энергиями из ультрарелятивистской области ЕзВ (10^{18} эВ и выше) на галактических расстояниях заметно отклонение от прямой линии. В магнитном поле с напряженностью ~ 3 мкГс ларморовские радиусы для частиц с энергией $> 10^{20}$ эВ порядка 1000 парсек (см. рис. 4.5). Это больше, чем толщина диска Галактики (см. рис. 1.7). Поэтому почти с уверенностью

93

можно говорить, что частицы ультравысоких энергий рождаются за пределами нашей Галактики.

Но если все же допустить, что «Галактический Зэватрон» существует где-то рядом с нами, мы могли бы его «увидеть» по характерному изменению анизотропии потоков частиц с увеличением энергии: по мере приближения к ультравысоким энергиям направления прихода частиц должны все больше и больше совпадать с галактической плоскостью. Статистически значимых экспериментальных результатов, подтверждающих такую модель, нет. А есть ли вообще во Вселенной кандидаты в Зэватроны?

Если не отходить далеко от основного механизма ускорения астрофизических частиц на межзвездных неоднородностях магнитного поля и/или на ударных волнах (см. главу 6), то, как мы видели, существует проблема ограничения максимальной энергии ускоряемых частиц — E_{\max} , определяемой размером области ускорения, скоростью ударной волны, величиной напряженности магнитного поля и зарядом ускоряемой частицы.

Существует так называемая диаграмма Хилласа (рис. 7.1), демонстрирующая возможности ряда астрофизических объектов, которые могли бы претендовать на роль космических Зэватронов. Если частица ускорится в окрестности какого-либо объекта, то ее ларморовский радиус должен быть меньше самого размера этого объекта. Этим геометрическим соотношением и определяется максимально допустимая энергия ускоряемых частиц — E_{\max} , т.к. ларморовский радиус, как это мы видели выше, зависит от энергии частицы. Но, с другой стороны, можно показать, что E_{\max} определяется и скоростью распространяющейся ударной волны. Здесь существует прямая зависимость — чем больше скорость волны, тем больше E_{\max} . На диаграмме Хилласа прямыми линиями показаны соотношения магнитное поле B — размер астрофизического объекта L (или ускорительной области), которые необходимы для достижения предельного значения энергии протонов $E_{\max} = 10^{20}$ эВ при двух значениях скоростей ударных волн (в единицах $\beta = v/c$ — «безразмерная» величина скорости в единицах скоро-

94

сти света): с $\beta=1/300$ (сплошная линия) и 1 (штриховая), а для ядер железа только при $\beta = 1$ (точечная линия). Здесь же, на рис. 7.1 в масштабе B и L , показаны основные астрофизические кандидаты в Зэватроны.

Рассматривая в качестве кандидатов на источники космических лучей ультравысоких энергий разные астрофизические

Рис. 7.1. Диаграмма Хилласа, демонстрирующая возможности различных астрофизических объектов как ускорителей частиц.

Сплошные линии — оценки размеров (в парсеках) и величины магнитного поля (в гауссах) объектов, способных разогнать протоны до энергий в 10^{20} и 10^{21} эВ при скорости ударной волны в 300 раз меньшей, чем скорость света. Точечная кривая — то же для ядер железа. Темными пятнами отмечены наблюдаемые размеры и магнитные поля различных астрофизических объектов. Вероятно, что при заданных предположениях о характере самого механизма ускорения (Ферми) в известной нам Вселенной нет явного

кандидата на роль Зэватрона. Для сравнения здесь же показаны характеристики работающего на Земле крупнейшего ускорителя *Tevatron* и строящегося *LHC*.



95

объекты, следует принять во внимание возможность замедления частиц в процессе их распространения от источника. В приведенных на рис. 7.1 зависимостях E_{\max} возможные потери частиц в процессе ускорения не учтены, поэтому потенциальные Зэватроны, вообще говоря, в этих координатах должны находиться значительно выше прямых $E_{\max}=10^{20}$ эВ.

В первую очередь следует учитывать синхротронные потери. Эти потери пропорциональны B^2 , поэтому для компактных астрофизических объектов, в которых магнитное поле чрезвычайно велико, они должны быть весьма ощутимы.

Таковыми объектами могут быть *нейтронные звезды*. В них магнитное поле может достигать фантастических величин

— 10^{12} - 10^{15} Гс (для примера, - на поверхности Земли в районе экватора магнитное поле 0,3 Гс). Поэтому из-за синхротронных потерь нейтронные звезды вряд ли могут быть кандидатами на роль источника частиц с энергией $>10^{20}$ эВ.

Только такие области, как внешние доли радиогалактик и межгалактическая среда, имеют достаточно слабые магнитные поля и не создают существенных синхротронных потерь.

Другой объект — *всплески гамма-излучения (Gamma Ray Bursts — GRB)* - наиболее мощное в природе явление: в очень короткий промежуток времени — от 0,1 до 100 сек — всплески высвобождают энергию в виде гамма-квантов порядка 10^{52} эрг. Частота всплесков оценивается на уровне 1-2 в день. Для полного объема Вселенной выделение энергии гамма-всплесками составляет величину $\sim 3 \cdot 10^{44}$ эрг•Мпк³ в год, что совпадает с полной энергией космических лучей.

GRB могут ускорять протоны и другие заряженные частицы до очень больших энергий. Очень вероятно, что ускорение частиц происходит на ультрарелятивистских ударных волнах, распространяющихся от источника в виде сферы или конуса, однако детали такого ускорения еще не разработаны. Мы вернемся к их рассмотрению в главе 9.

Активные галактические ядра (AGN - Active Galactic Nuclei)

— другие очень интересные астрофизические объекты. Это целый класс галактик — квазары, блазары, сейфертовские галактики, радиогалактики и ряд других, которые характери-

96

зуются очень интенсивным радиоизлучением. Для наблюдателя с Земли они выглядят как звезды и имеют огромное энерговыделение: от 10^{42} до 10^{48} эрг/сек, что намного больше, чем энерговыделение всего Млечного Пути. Поэтому Активные ядра — одни из наиболее ярких известных объектов во Вселенной. Они могут менять свою яркость в течение очень короткого периода времени, указывая на то, что эмиссия идет от объекта протяженностью не более нескольких световых месяцев.

В течение продолжительного времени считалось, что звезды — основной источник излучения галактик. В них происходят реакции термоядерного синтеза, и они излучают энергию нагретого

газа. Напротив, в Активных ядрах излучение — нетепловое, оно в основном принадлежит к радио- и гамма-диапазонам спектра электромагнитного излучения.

Активные галактические ядра можно наблюдать в телескопы, в отличие от обычных галактик они находятся на расстояниях в миллиарды световых лет. Современное объяснение этого астрофизического феномена состоит в том, что ядра содержат супермассивные черные дыры, в 10^9 масс Солнца, в их активной стадии. Они окружены слоем вещества — аккреционным диском (рис. 7.2). Продолжительность жизни активных ядер невелика, они умирают приблизительно в течение 100 миллионов лет — черная дыра «поглощает*» все окружающее ее вещество, создавая вокруг себя пустоту.

Наиболее развитые теории предполагают генерацию гаммаквантов на ударных волнах в релятивистских струях (джетах), распространяющихся наружу. Энергия эмиссии черпается из высвобождающейся гравитационной энергии падающего на черную дыру вещества.

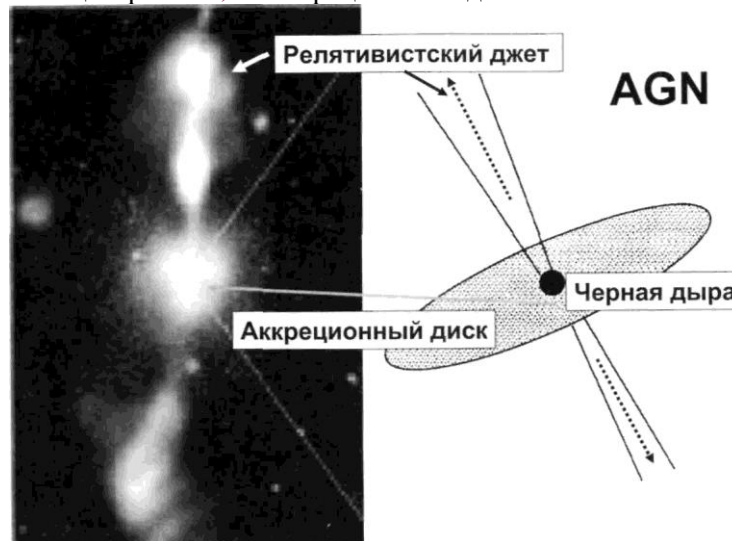
Огромная светимость ядер активных галактик также объясняется аккрецией вещества.

Из анализа наблюдений следует, что радиоисточники образуются в результате выделения энергии в ядре галактики, но не в результате взрыва, а более длительного непрерывного процесса — выбросов струй плазмы с релятивистскими скоростями в двух противоположных направлениях. Возможно,

97

Рис. 7.2. Активные ядра галактик (AGN): слева наблюдаемые, а справа — в модельном представлении.

Предполагается, что активные ядра могут быть мощными источниками частиц, генерируемыми в релятивистских струях — джетах. Источником энергии является поглощение вещества черной дырой, расположенной в центре AGN, из аккреционного диска.



что такая картина обусловлена дипольным характером магнитного поля самого ядра галактики, из магнитных полюсов которого и вытекают джеты. Наблюдаемая повышенная яркость внешних краев структуры связана, вероятно, с существованием плазменных облаков на периферии объекта, которые вращаются вокруг ядра и подвергаются внешнему давлению межгалактического газа. Такая «торообразная» структура радиогалактик наблюдается для Лебедя А - самого мощного внегалактического источника радиоизлучения в созвездии Лебедя.

Полагают, что максимальная энергия частиц ускоряемых в Активных ядрах - $E_{\max} \sim E_H^{1/2}$, где E_H - энергия центрального источника. Но для протонов и других частиц мы вновь

98

сталкиваемся с проблемой ограничения энергии частиц из-за потерь. Сильные радиационные поля вокруг Активного ядра могут служить препятствием для роста энергии.

Еще один астрофизический объект на роль кандидата космических лучей ультравысоких энергий - «горячие пятна» радиогалактик («hot spots»).

С точки зрения возможности ускорения частиц представляется очень интересным наблюдательный факт обрезания частотного спектра радиоволн в районе $\sim 3 \cdot 10^{14}$ Гц у многих

Панасюк М. И. Странники Вселенной или эхо Большого взрыва. Фрязино: «Век 2», 2005. - 272 с. - (Наука для всех).

компактных источников — радиоквазаров, джетов и «горячих пятен». Такое ограничение в спектре можно интерпретировать как результат синхротронных потерь в магнитном поле релятивистских электронов в окрестности ударных волн, которые частицы пересекают в разных направлениях. По синхротронному обрезанию можно оценить энергию протонов, которая оказывается близкой к 13эВ . Разные по мощности радиогалактики ускоряют протоны до различных энергий. Свечение наиболее мощных радиогалактик соответствует энерговыделению $\sim 3 \cdot 10^{47}$ эрг/сек, что приводит к максимальной энергии ускоряемых протонов даже больше, чем 13эВ .

Как эффективные ускорители частиц «горячие пятна» радиогалактик впервые были предложены в 1964г. В.Гинзбургом и С. Сыроватским, причем ближняя радиогалактика М87 — Вирго рассматривалась в качестве основного кандидата. Галактика М87 действительно достаточно близкая (15-25 Мпк) к нам и достаточно мощная, чтобы объяснить происхождение частиц вплоть до ультрарелятивистских энергий. Но проблема в том, что надо одновременно объяснить и изотропию потоков. Изотропию может создать множество галактик, разбросанных во Вселенной. Однако М87 остается единственной достаточно мощной радиогалактикой на близких расстояниях. Других, таких же мощных и более близких, не обнаружено. Например, Галактика СепА хотя и ближе к нам, но слабее М87, а NGC315 — слишком далека.

Таким образом, основной вывод, следующий из диаграммы Хилласа, состоит в том, что во Вселенной не видно яркого кандидата на роль ускорителя частиц до энергий 10^{20} — 10^{21} эВ.

99

Существует и другая сложность в проблеме поиска источников космических лучей ультравысоких энергий, резко ограничивающая пространственную область поиска. Но прежде чем перейти к его сути, рассмотрим вновь... Большой взрыв.

7.2. Реликтовое излучение и «конец» спектра космических лучей

Современная космологическая, так называемая стандартная модель (см. рис. 1.1), определяет начало эволюции с момента, когда размер Вселенной был всего 10^{-33} см (планковская длина), температура — 10^{32} К (планковская температура), а характерные энергии частиц — 10^{28} эВ (планковская энергия). В этот момент все частицы имели скорости, близкие к скорости света.

Затем Вселенная начала расширяться. Доказательством расширения Вселенной является красное смещение спектров излучений галактик, обнаруживаемое по эффекту Доплера. Помимо «красного смещения» существуют и другие факты, свидетельствующие в пользу гипотезы о Большом взрыве.

В 1946г. Г.Гамов и Р.Алфер, а в 1948г. Р.Герман предсказали, что одним из следствий Большого взрыва должен быть остаточный радиосум с температурой $\sim 5\text{К}$. Появление этого излучения относится к концу радиационной фазы развития Вселенной, когда излучение и материя находились в термодинамическом равновесии. Эта фаза привела к объединению нуклонов и электронов в атомы водорода. Электроны все в большей степени оказывались связанными в атомы и «подвижность» фотонов увеличивалась — начался процесс отделения излучения от материи. Можно показать, что распределение потоков фотонов в этот период времени действительно должно соответствовать температуре абсолютно черного тела. Затем наступила фаза материи, продолжающаяся до настоящего времени.

После образования атомов пространство становится прозрачным для света, и фотоны начинают свое блуждание по Вселенной, продолжающееся до сегодняшнего дня. Но

100

этот свет претерпевает существенные изменения. Расширение Вселенной в связи с эффектом Доплера сопровождается смещением цветов спектра в сторону больших длин волн. В результате излучение фотонов становится микроволновым, невидимым для глаза. Но оно может быть зарегистрировано с помощью радиотелескопов.

Излучение со спектром, полностью совпадающим со спектром излучения черного тела при температуре $2,7\text{К}$, действительно обнаружили. Это изотропное коротковолновое излучение в диапазоне длин волн (λ) от миллиметров до сантиметров с максимумом на $\lambda=0,1$ см (рис. 7.3). Его открытие

Рис. 7.3. Спектры энергии фонового рентгеновского- и гамма-излучения (темные значки), а также ядерной компоненты космических лучей (светлые значки).

В области длин волн от $\lambda=10^2$ см до 10^{12} см отчетливо виден пик реликтового микроволнового излучения. Фоновое гамма-излучение на верхнем краю спектра — продукт распада пионов, возникающих при взаимодействии электронов и ядер космических лучей с межзвездной средой. Спектр ядер космических лучей приводится для сравнения. Он демонстрирует верхний предел — максимально возможные потоки

Панасюк М. И. Странники Вселенной или эхо Большого взрыва. Фрязино: «Век 2», 2005. — 272 с. — (Наука для всех).

гамма-квантов в этом диапазоне энергий (или длин волн).



101

сыграло решающую роль в подтверждении модели горячей Вселенной, изотропии ее расширения и однородности.

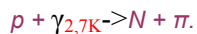
Это удалось сделать сотрудникам фирмы «Bell» из США В.Пензиасу и К.Вильсону в 1961 г. В 1976г. они получили за это открытие Нобелевскую премию.

Трудность измерений заключалась во влиянии атмосферы и температурных колебаний. Впоследствии начались исследования этого радиоизлучения: на воздушных шарах на — высотах 30-40 км и выше - на спутниках. В 1989 г. был запущен спутник *COBE* (*Cosmic Background Explorer*) специально для исследований космического фонового излучения. Средняя энергия фотонов этого излучения очень мала — в 3000 раз меньше энергии фотонов видимого света. Поток реликтового излучения велик: его плотность около 400 фотонов/см³ или 10⁹ фотонов на каждый атом во Вселенной.

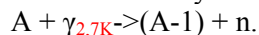
Так было обнаружено остаточное, после Большого взрыва, излучение Вселенной — продукта горячей Вселенной на ее ранней фазе развития. Отсюда его другое название - реликтовое.

В 1966г. К.Грейзен, Г.Зацепин и В.Кузьмин, рассматривая процесс взаимодействия космических лучей с этим излучением, приходят к выводу о существовании «обрезания» потока частиц при ультравысоких энергиях. Этот эффект получил название «GZK-механизма», по первым буквам фамилий авторов. Его суть вкратце сводится к следующему.

Взаимодействие протонов космических лучей с реликтовым излучением приводит к появлению новых частиц, например, π-мезонов, электрон-позитронных пар и др.:



Подобный процесс дезинтеграции должен наблюдаться и для тяжелых ядер: их взаимодействие с реликтовым излучением приводит к расщеплению ядер:



В результате энергия протонов (ядер) быстро уменьшается до величины, ниже которой рождение новых частиц уже

102

становится невозможным. Оценки, сделанные К.Грейзенем, В.Кузьминым и Г.Зацепиным, дают значение $E_{\max} \approx 5 \cdot 10^{19}$ эВ для максимальной энергии протонов (это значение отмечено стрелкой на рис. 6.7) и расстояния $d_{\max} > 50$ Мпк, за пределами которого не могут находиться источники этих частиц. Подобные оценки, проведенные В.Стеккером и Н.Саламоном в 1999г. для ядер, дают значение $E_{\max} \approx 10^{20}$ эВ и $d_{\max} > 100$ Мпк.

Область размером в 50-100 Мпк - это очень малая часть всей Вселенной. И это значит, что частицы с энергией, превышающей GZK-предел, могут прилететь только из ближайших (<100 Мпк) ее областей. Если рассмотреть частицу с энергией 10^{24} эВ, стартовавшую где-то на расстоянии 200 Мпк, то, пролетев это расстояние, ее энергия не может быть выше 10^{20} эВ.

50 Мпк — это расстояние, которое свет проходит за 150 миллионов лет. Другими словами, эта цифра - максимальное время жизни частицы, путешествующей со скоростью света во Вселенной, вне зависимости от того, как велика была ее первоначальная энергия.

В этом и заключается огромная трудность современной астрофизики космических лучей: мы не

только не видим на небе явных кандидатов - астрофизических объектов, способных ускорить частицы до энергий более 10^{20} эВ, но и вынуждены резко ограничить диапазон их поисков ближней к нам областью пространства внутри 50-100 Мпк. А это, очевидно, снижает шансы их обнаружить.

Где здесь выход?

Столкнувшись с трудностями, астрофизики решили подойти к решению проблемы с другой стороны.

7.3. Сверху — вниз, или вперед к экзотике

Если рассмотренный выше процесс поиска источников на основе измерений параметров частиц на Земле можно определить как снизу-вверх («*bottom-up*»), то подход к решению проблемы, описанный ниже, является полной противоположностью первому: сверху-вниз («*top-down*»). Это означает: да, ученые признают, что ультрарелятивистских частиц от

103

Зэватронов, находящихся на недалеких расстояниях, нет. Однако есть совсем другие частицы, еще необнаруженные, которые и создают регистрируемый на Земле поток частиц при энергиях $>10^{20}$ эВ. Что это за частицы?

Основная идея здесь заключается в том, что частицы ультравысоких энергий могут быть продуктом распада еще более энергичных частиц, возможно, абсолютно другой природы. Существует большое число предложений, как объяснить происхождение ультрарелятивистских частиц космических лучей. Большей частью они основаны на стандартной модели эволюции Вселенной, описание которой до первой микросекунды (10^{-6} сек) ее развития мы привели выше. Итак, эти предложения заключаются в следующем.

Прежде всего, вернемся к проблеме эволюции Вселенной (см. рис. 1.1). До планковского момента времени в супермалой Вселенной существовал «квантовый хаос»: было разрушено понимание пространства-времени, не было вектора времени, определяющего прошлое и будущее. Эта была эпоха суперсимметрии или эпоха Великого объединения — объединения всех четырех фундаментальных взаимодействий — сильного, электромагнитного, слабого и гравитационного, в одно — универсальное. Дальнейшее расширение Вселенной связано с ее остыванием.

На 10^{-36} сек после Большого взрыва наступил конец Великого объединения — в этот момент отделяется сильное взаимодействие. Это соответствует характерной энергии $E=10^{24}$ эВ и расстоянию 10^{29} см. Это весьма знаменательный момент времени в жизни Вселенной: помимо конца объединения фундаментальных взаимодействий до этого момента в составе Вселенной существовали все мыслимые фундаментальные частицы.

Причем эти частицы оказываются объединенными в супер-поля, внутри которых находятся пары частиц, отличающихся спином. Это так называемые *SUSY* — суперсимметричные партнеры. Их довольно много (см. табл. 7.1). Суперполя находятся в суперпространстве, ограниченном размером 10^{-29} см. Основные *SUSY*-партнеры приведены в таблице.

104

Таблица 7.1. Частицы и их партнеры

Частица	Спин	Партнер	Спин
Кварк	S	Скварк	0
Лептон	S	Слептон	0
Нейтрино	S	Снейтрино	0
Фотон	1	Фотино	S
Глюон	1	Глюино	S
W-бозон	1	Вино	S
Z-бозон	1	Зино	S
Хиггс	0	Хиггсино	S
Гравитон	2	Гравитино	3/2

Сейчас суперсимметричные частицы пытаются найти на ускорителях. Согласно первому из возможных сценариев частицы рождаются парами и в конце концов должны распадаться с

образованием стабильной частицы (LSP) - Х-частицы. Пока не удалось найти суперсимметричные частицы. Но в экспериментах на ускорителе в CERN получили ограничения по массе LSP-частиц: $>18,4$ ГэВ.

Вернемся вновь к процессу расширения Вселенной. Итак, на 10^{-36} сек произошел конец Великого объединения и вместе с ним исчезла суперсимметрия частиц, описанная выше. Х- и Y-бозоны покидают состояние термодинамического равновесия и приобретают массы. Остальные частицы пока еще имеют нулевую массу. Это продолжается до 10^{-10} сек, когда происходит разделение электромагнитного и слабого взаимодействий.

В этот период кварки, лептоны и промежуточные бозоны приобретают массы. Массы частиц достигают ≈ 100 ГэВ = 10^{11} эВ к 10^{-6} сек (при энергии 300 ГэВ $\approx 3 \cdot 10^{11}$ эВ). Последующее охлаждение Вселенной приводит к формированию новых частиц — адронов из кварков и скварков. После наступает адронная эра — происходит аннигиляция кварков и скварков, а излишек кварков порождает всю наблюдаемую ныне барионную материю.

105

Такова вкратце история Вселенной лишь до 10^{-6} сек с момента Большого взрыва согласно Стандартной космологической модели. Как и любая теоретическая модель, она нуждается в экспериментальных подтверждениях. А до момента наступления полной адекватности модельных и экспериментальных выводов она может изменяться. Но на сегодня Стандартная космологическая модель - основа многих направлений в астрофизике, астрономии, физике элементарных частиц.

Теперь вернемся к проблеме космических лучей ультравысоких энергий. Именно история Большого взрыва на его первоначальной фазе развития позволяет ввести в рассмотрение новые нестабильные супермассивные Х-частицы. Продуктом распада этих Х-частиц, среди прочего, являются в основном лептоны и кварки, энергичные фотоны, а также нейтрино, часть из которых, собственно, и составляет космические лучи ультравысоких энергий.

Такой распад должен был произойти сравнительно недавно - не позже 150-300 миллионов лет назад, т.к. его продукты также должны подвергаться воздействию реликтового излучения. Массы Х-частиц должны значительно превышать наблюдаемые энергии, т.е. быть больше 10^{20} эВ.

Как мы видели выше, такая гипотеза хорошо соответствует теории Великого объединения, предусматривающей существование тяжелых частиц в диапазоне 10^{24} - 10^{25} эВ. И, наконец, отношение объемной плотности этих частиц к среднему времени распада должно соответствовать наблюдаемому потоку космических лучей.

Другой вариант механизма образования Х-частиц может быть связан с супермассивными частицами (превышающими массу протонов и нейтронов в тысячу раз) - основного компонента темной материи. Эти частицы, будучи незаряженными, путешествуют по прямым линиям, не отклоняясь в электрических и магнитных полях Вселенной. На них воздействует только гравитационные поля. Считается, что гало Галактики большей частью состоит из темной материи. Таким образом, представляется вероятным, что «экзотические» частицы, из

106

которых состоит темная материя - реальный кандидат на близлежащий Зэватрон, расположенный в нашей Галактике. Как отмечалось выше, в теории суперсимметрии ожидается существование многих частиц - основы темной материи. В некоторых моделях суперсимметрии постулируется, что это нейтральные частицы, имеющие массу покоя от нескольких ГэВ до нескольких десятков ГэВ с большим временем жизни. Существуют два вида темной материи: горячая и холодная. Горячая темная материя состоит из релятивистских частиц

— нейтрино, например, с массой ≈ 10 эВ. В отличие от горячей, холодная темная материя состоит из тяжелых нерелятивистских частиц с массами не менее ГэВ. Эта часть материи на ранней фазе развития могла служить «зародышем» для образования вещества.

Кандидатов на роль частиц, из которых состоит холодная темная материя, довольно много. Эти частицы должны быть слабодействующими со средой, иначе они бы не дожили бы до более поздних фаз развития Вселенной. Такие слабодействующие частицы получили название WIMP-частиц (*Weakly Interacting Massive Particle*). Следует отметить, что теоретики дают оценку вероятности взаимодействия этих частиц с веществом на много порядков меньше самой, пожалуй, слабодействующей из открытых на сегодня частиц

— нейтрино (в главе 11 об этих частицах будет рассказано более подробно). К WIMP-частицам

могут относиться массивные стабильные нейтрино. Теоретические оценки показывают, что с космологической точки зрения приемлемы только нейтрино с массой менее 100 эВ и энергией от нескольких ГэВ до нескольких ТэВ.

В настоящее время разрабатываются смешанные модели темной материи, в которых 30% приходится на горячую и 70% — на холодную ее часть. Будучи незаряженными, WIMP-частицы не отклоняются магнитным полем, поэтому, измеряя анизотропию их прихода, можно попытаться определить направления на потенциальные источники.

Еще механизм рождения X-частиц связан с так называемыми *топологическими дефектами*, которые собственно,

107

и генерируют эти частицы. Здесь топологические дефекты

— коллапс - переход от симметричной фазы Великого объединения к разрушающей, на ранней стадии ее развития (т.е. на 10^{-36} сек). Такая модель согласуется с принятой сейчас моделью расширяющейся Вселенной.

В момент нарушения симметрии могут рождаться космологические реликты. Среди них — монополи.

Современные теории позволяют оценить массу монополей. Монополи очень тяжелые образования, их масса может достигать 10^{17} ГэВ = 10^{23} эВ (это масса бактерии!). Ранняя Вселенная - единственное место, где могли бы появиться эти гипотетические частицы. В расширяющейся Вселенной происходит уменьшение плотности монополей, но затем, в постинфляционный период развития, их количество вновь может увеличиться.

На фазе доминирования вещества монополи могут принять участие в формировании крупномасштабных астрофизических объектов. Однако их практически не должно быть в галактических дисках. В большей степени они могут присутствовать в Гало и в скоплениях галактик.

Не очень все ясно с временем их жизни. Если монополи распадаются, они производят большое количество нейтрино и фотонов с характерной энергией $\approx 10^{24}$ эВ и малая их доля переходит в протоны.

Такие вторичные протоны могут появляться на разных расстояниях от нашей Солнечной системы. Если эта гипотеза верна, космические лучи ультравысоких энергий — это распадающиеся космологические реликты, формирующие каскад фотонов и нейтрино, фон которых и наблюдается. Если время их жизни сопоставимо со временем жизни Вселенной, то они могут распадаться где угодно, и этим может объясняться изотропность потоков космических лучей.

Согласно теории, в первые минуты образования Вселенной появилось большое количество и других реликтовых частиц

— нейтрино, которые так же, как и реликтовое микроволновое излучение, должны странствовать в межзвездном пространстве. Следуя этой гипотезе, мы живем в «нейтринном море».

108

Оказывает ли это море влияние на нас? Мы этого пока не знаем. Можем ли мы зарегистрировать реликтовые нейтрино? Вероятно, — да. Но об этом далее.

Реликтовое излучение — это, пожалуй, самое главное свидетельство эволюции Вселенной. Оно появилось, когда прошло менее одной тысячной доли жизни Вселенной!

Какие предполагаемые источники нейтрино ультравысоких энергий рассматриваются сейчас?

Один источник уже был упомянут выше: это топологические дефекты. Современные модели предсказывают, что поток массивных нейтрино, возникающих при топологических дефектах и имеющих энергии более 10^{20} эВ, достаточен для регистрации на установках с площадью, скажем, более 100000 км^2 (это больше, чем «*Pierre Auger*»).

В связи с нейтрино ультравысоких энергий изучается также процесс аннигиляции массивных нейтрино с фоновым потоком реликтовых нейтрино — так называемые «Z-вспышки» («*Z-bursts*»). Уровень фона потока реликтовых нейтрино предсказывается космологическими моделями Большого взрыва и Стандартной моделью элементарных частиц. Скорость аннигиляции должна резко возрасти в насыщенной веществом среде кластеров галактик. Сделанные оценки показывают, что плотность нейтрино в кластере галактик достаточна для эффективного взаимодействия и генерации вторичных частиц. Однако, для реализации этого процесса требуются

очень высокоэнергичные нейтрино ($E > 10^{22}$ эВ), возможно за пределами стандартной модели и, кроме этого, наличие у реликтовых нейтрино значительной массы.

Если это взаимодействие происходит на расстояниях ближе, чем 50-100 Мпк, то вновь образованные вторичные фотоны и нуклоны с энергией выше GZK-предела могут попасть в атмосферу Земли и вызвать ливень частиц, который может быть зарегистрирован наземными установками (рис. 7.4). Расчеты показывают, что поток вторичных частиц при осуществлении такого процесса может быть достаточным для надежной регистрации будущими установками для исследования космических лучей.

109

Рис. 7.4. Один из возможных механизмов образования космических лучей ультравысоких энергий при взаимодействии ЗэВ-ных нейтрино с реликтовыми нейтрино в окрестностях кластера галактик *Virgo* (модель Z-вспышки).

Активные галактические ядра — наиболее мощные из известных постоянных эмиттеров энергии во Вселенной могут быть источниками и нейтрино ультравысоких энергий. Так, согласно модельным представлениям, квазары действительно могут излучать нейтрино с энергией более $4 \cdot 10^{19}$ эВ.



7.4. Новая астрономия?

И WIMP-частицы, и монополи, и нейтрино можно попытаться использовать для определения направления на источники.

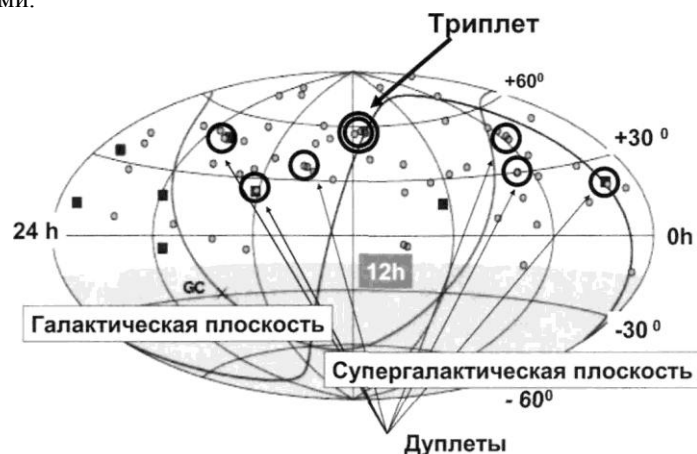
Проблема определения направления прихода частиц чрезвычайно интересна. Ведь в случае успеха, т.е. надежного определения места, откуда могли бы прийти частицы, можно попытаться найти астрофизический объект — генератор этих частиц. Пока нет достаточно надежных экспериментальных данных по идентификации источников. Однако...

Взгляните на карту галактического неба (рис 7.5). На ней изображены все случаи регистрации космических лучей с энергией $> 5 \cdot 10^{19}$ эВ. Из них - 6 дуплетов и 1 триплет (две или

110

Рис. 7.5. На карте галактического неба показаны направления прихода частиц космических лучей с энергией между $4 \cdot 10^{19}$ эВ и 10^{20} эВ (точки) и более 10^{20} эВ (квадраты) по данным японской установки *AGASA*.

Отметим, что частицы с энергией более 10^{20} эВ должны приходить с расстояния < 50 Мпк, если это протоны, и с расстояний < 100 Мпк, если это тяжелые ионы. Среди событий — один триплет (в середине). Нет ни одного астрофизического объекта, который можно было бы идентифицировать с обнаруженными триплетом или дуплетами.



три частицы с разными энергиями пришли из одной точки). Вероятность случайного совпадения таких событий очень мала — менее 0,1%. Окончательные выводы делать рано, но и игнорировать эти факты нельзя. Триплеты и дуплеты, а в дальнейшем — кластеры событий, могли бы свидетельствовать о существовании точечных источников, ответственных за космические лучи ультравысоких энергий.

Масса вопросов возникнет, если такая связь будет обнаружена. Например, каков спектр космических лучей источника, насколько мощен Зэватрон, генерирующий такие энергии? Чем отличаются разные источники? Но, не менее интересно, если будут обнаружены кластеры событий, не имеющих своих астрофизических объектов на звездном небе. В этом случае следует сделать вывод, что источником космических лучей не

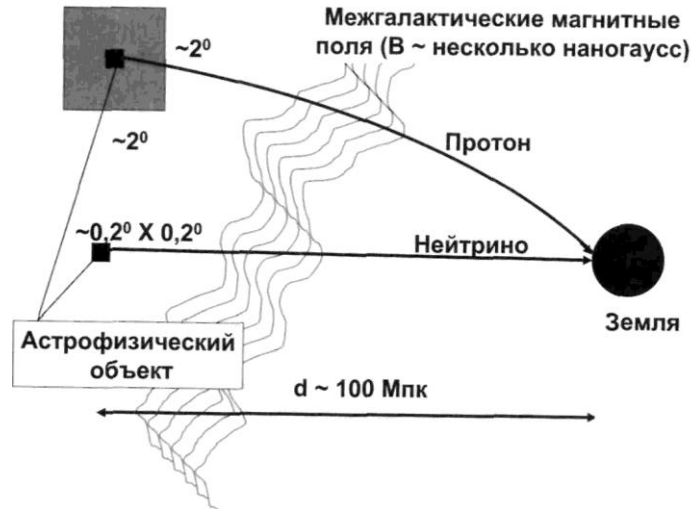
111

может быть вещество Вселенной. Тогда что же? Темная материя, вакуум? Пока это слишком преждевременные вопросы, но ведь мысль нельзя остановить...

Несколько комментариев относительно возможности картографирования астрофизических объектов с помощью частиц ультравысоких энергий. Нельзя забывать о существовании магнитных полей в космосе. Заряженные частицы отклоняются в них. Даже для протонов с энергией 10^{20} эВ, путешествующих с расстояний < 100 Мпк, отклонения от прямой будут весьма заметны: так, при среднем межгалактическом поле $B \approx 1$ нГс (10^{-9} Гс) отклонение может достигать 2° (рис.7.6). Этот факт, создающий дополнительную ошибку, следует учитывать при позиционировании объектов.

Рис. 7.6. Возможности нейтринной астрономии для изучения астрофизических объектов на расстояниях ~ 100 Мпк значительно выше, чем с протонной.

В отличие от протонов ультравысоких энергий, испытывающих искривление своих траекторий под действием межзвездного магнитного поля, нейтрино распространяются практически по прямолинейным траекториям. Как результат - «разрешение» астрофизического объекта во втором случае будет выше.



112

Другое дело нейтрино. Если бы удалось регистрировать нейтрино ультравысоких энергий, то это существенно помогло бы поиску объектов. В этом случае можно было бы говорить о развитии нового направления в астрономии — нейтринной астрономии.

Выше мы вкратце описали ситуацию, сложившуюся с экспериментальным и теоретическим изучением частиц ультравысоких энергий. Похоже, что «космики» столкнулись здесь с очень сложной проблемой, находящейся на стыке космологии, астрофизики и физики элементарных частиц. Пока не хватает экспериментальных данных, чтобы «зацепиться» за ту или иную теоретическую модель, но, похоже, что и теоретические исследования могут выйти на новые направления.

Однако уже теперь ясно, что в проблеме «ступни» энергетического спектра физики вплотную подошли к проблеме ранней истории Вселенной после Великого объединения. Интересно, что сама форма спектра в области GZK-обрезания несет информацию об эволюции Вселенной миллиард лет тому назад. Поэтому нужна большая статистика событий в этой области энергий, чтобы однозначно определить вид спектра.

Не случайно Нобелевский лауреат 2003г. В.Гинзбург внес проблему исследований космических лучей ультравысоких энергий в реестр важнейших задач физики и астрофизики XXI столетия.

В каких же направлениях будут идти эксперименты по исследованию космических лучей на краю спектра?

Вскоре установка «*Pierre Auger*» даст первые результаты. Это означает, что увеличится статистика данных в области энергий более 10^{20} эВ. Напомним, что за год работы «*Pierre Auger*» сможет набирать до 200 событий при энергии более $5 \cdot 10^{19}$ эВ.

Дальнейшее развитие установки «*Pierre Auger*» будет идти, видимо, по линии создания новой — в Северном полушарии, в США. Это позволит получить новые сведения об анизотропии космических лучей ультравысоких энергий. А это важно для решения вопроса об определении источников космических

113

лучей. Среди обсуждаемых источников - радиогалактики, а они распределены анизотропно по отношению к супергалактической плоскости. Одна установка не может справиться с задачей определения направления на такие источники.

Однако возникает вопрос - есть ли принципиально новые подходы к экспериментальному изучению частиц из этой области энергий для совершения качественного скачка по увеличению статистики регистрируемых событий? Сейчас мы можем ответить утвердительно. Об этом пойдет речь в следующей главе.

Глава 8. КОСМИЧЕСКОЕ ОКО

Трудность в науке часто представляет не столько то, как сделано открытие, сколько понять, что оно сделано.

Дж. Верная

Итак, как можно увеличить площадь детекторов для регистрации космических лучей? Как перейти от нескольких тысяч квадратных километров (установка «Pierre Auger») к, скажем, десяткам тысяч, а может быть и к сотням?

Идея здесь состоит в том, чтобы использовать земную атмосферу в качестве такого детектора и регистрировать ШАЛ не с поверхности земли, а из... космоса.

8.1. Ультрафиолетовый след космической частицы

Такие измерения можно осуществить, используя явление флюоресценции. Термин «флюоресценция» относится к процессам возбуждения атомов с последующим испусканием ими фотонов. Так происходит генерация света.

Еще в 40-х годах прошлого века были изобретены люминесцентные лампы. В них использовался эффект возбуждения атомов ртути при воздействии электрического тока. При возвращении в нормальное состояние атомы ртути испускали фотоны, которые при взаимодействии с фосфорным покрытием стенок колбы лампы конвертировались в видимый свет.

Подобное явление может наблюдаться и в атмосфере Земли. Заряженные частицы могут возбуждать атомы воздуха и приводить к эмиссии света в видимом и ультрафиолетовом

115

диапазонах длин волн. Как результат, возникают так называемые атмосферные сцинтилляции.

Детальное экспериментальное изучение атмосферных сцинтилляций началось в начале 60-х годов в связи с Манхэттенским проектом, — атомной программой США, в Лос-Аламосе, — как метод детектирования ядерных взрывов в атмосфере. Ядерный взрыв порождает множество заряженных частиц и эти частицы, распространяясь в атмосфере, вызывают ее свечение, в том числе и в ультрафиолетовом диапазоне. По количеству зарегистрированного света можно было судить о мощности испытываемых бомб. Интересно, что в истоках этих экспериментов стояли Б.Росси и К.Трейзен, участники американского атомного проекта, а в последующем — известные физики в области космических лучей.

Однако и космические лучи могут также вызвать свечение атмосферы. Приоритет в идее регистрации сцинтилляций атмосферы под воздействием космических лучей принадлежит нашему соотечественнику — А.Чудакову (рис. 8.1). Именно он впервые предложил этот метод в 1962 г. для измерений мощных ливней первичных космических лучей.

В главе 3 мы уже рассказывали, что первичные частицы, попадая в атмосферу, вызывают каскад, состоящий из вторичных частиц различного сорта (рис. 3.1). Среди них больше всего электронов. Максимум их числа пропорционален энергии первичной частицы (см. рис. 3.4). Электроны, распространяющиеся в атмосфере, ионизируют воздух и возбуждают энергетические уровни атомов и молекул (последнее означает переход электронов с более низких оболочек в

Рис. 8.1. А.Чудаков.



116

Панасюк М. И. Странники Вселенной или эхо Большого взрыва. Фрязино: «Век 2», 2005. - 272 с. - (Наука для всех).

более высокие энергетические метастабильные состояния). Через очень короткий промежуток времени атомы воздуха (в основном азота) возвращаются в свое нормальное состояние, испуская фотоны на длинах волн от 330 до 450 нм, т.е. в ультрафиолетовом диапазоне. Этот ультрафиолетовый, или флюоресцентный, свет изотропен и его интенсивность пропорциональна энергии ливня на данной глубине атмосферы. При больших потоках частиц ливня флюоресцентное свечение оказывается весьма значительным и может быть зарегистрировано даже на удаленных расстояниях от оси ливня в прозрачной атмосфере.

Так, первичная частица с энергией в 10^{19} эВ создает в атмосфере ливень, состоящий из 10^{16} вторичных электронов. Каждая вторичная частица создает на одном метре пробега ~ 4 фотона. Ливень распространяется со скоростью света на расстояние от 10 до 100 км в зависимости от угла наклона входа частицы в атмосферу. Вначале появляется небольшой ливень в виде диска в верхних слоях атмосферы (его излучаемая мощность 100 киловатт!), который движется по прямой со скоростью света и постепенно увеличивается в размерах. Затем происходит его затухание по мере гибели электронов. Если проинтегрировать весь свет вдоль траектории ливня (или же определить максимум интенсивности света), то эта величина будет пропорциональна энергии первичной частицы. Положение максимума (глубина ливня) может дать информацию о массе частицы.

Особый случай представляют собой флюоресцентные ливни, возникающие на максимальных глубинах в атмосфере, вблизи уровня земли. Такие ливни могут быть созданы только нейтрино, т.к. большая толщина атмосферы не дает возможности проникнуть ливням, создаваемым первичными ядрами, на столь низкие высоты. А для слабо взаимодействующей частицы — нейтрино, напротив, требуется прохождение очень больших толщ вещества прежде, чем она сможет создать ливень.

Каскад заряженных частиц ШАЛ, наряду с флюоресцентным свечением, вызывает мощное черенковское излучение

117

фотонов в направлении строго по вектору распространения ливня (черенковский конус излучения — см. рис. 3.7). По мощности черенковское излучение значительно сильнее, чем флюоресцентное. Сигнал от черенковского свечения может быть использован для определения энергии при регистрации наклонных ливней, вызванных нейтрино. Вероятно, возможно будет зарегистрировать и обратно отраженный черенковский свет от земной поверхности. В этом случае его регистрация будет очень полезна для селекции «полезных» событий, вызванных реальными частицами, от фоновых, нежелательных импульсов света. Другими словами, черенковский сигнал может быть использован в качестве триггера — разрешительного сигнала на регистрацию и анализ информации о флюоресцентном свечении ливня ШАЛ.

Как мы видим, атмосфера представляет собой уникальный по своим возможностям детектор, прежде всего своими размерами — и здесь ей нет равных. Но какими методами можно зарегистрировать светящийся в ультрафиолете след от ливня частицы из области ультрарелятивистской энергии?

Если в качестве детектора использовать коллектор, например, зеркало или систему линз для сбора света от светящегося следа ливня, а в фокусе этого коллектора установить мозаику фотоприемников, то можно зарегистрировать и «запомнить» след вспышки света в ночной безлунной атмосфере. Таким способом могут быть определены и энергия, и масса первичной частицы.

Этот метод весьма перспективен для регистрации космических лучей в области ультравысоких энергий по сравнению с наземными методами. Дело в том, что в «погоне» за статистикой регистрируемых событий, ученые создают наземные установки все больших и больших площадей, а из экономических соображений детекторы вынуждены располагать на значительных расстояниях друг от друга. Так, например, в проекте «*Pierre Auger*» детекторы разделены расстоянием около 2 км. С увеличением расстояния между детекторами основная часть потока частиц проходит вдали от детекторов. Поэтому требуется моделирование пространственной геомет-

118

рии ливня, а это снижает точность расчета энергии первичной частицы. Как мы увидим далее, оптические флюоресцентные установки свободны от этого недостатка.

В середине 60-х годов К.Грейзен из Корнельского университета в США поставил первый наземный эксперимент по регистрации флюоресцентного свечения атмосферы под воздействием космических лучей. А в 1967 г. им была создана первая полномасштабная установка. Ее основой был коллектор с линзами Френеля. Однако эксперимент К.Грейзена окончился неудачей: слишком уж грязной была атмосфера в районе Нью-Йорка. Вслед за К.Грейзенем Д.Линсли и Л.Скарси из г.Альбукерке в США осуществили более успешный эксперимент на установке «Королева пустыни» («*Desert Quenn*») в более чистом небе штата Нью-Мексико. А затем была запущена флюоресцентная установка «Мушиный глаз» («*Fly's Eye*») в штате Юта, США, теперь это — стереосистема из двух оптических коллекторов - *HiRes*. Последняя установка позволила продвигнуться в сторону ЗэВ-ных энергий.

Однако значительно большими возможностями будет обладать коллектор ультрафиолетового света, если его поднять высоко над землей на аэростате или запустить на космическом аппарате на орбиту вокруг Земли. Идея метода была предложена в 1980 г. американцем Д.Линсли (рис.8.2). Он назвал этот проект «*Airwatch*» — «Взгляд с неба». Кстати, именно он опубликовал сведения о первом событии — регистрации частицы с $E=10^{20}$ эВ на установке «*Volcano Ranch*» в США. В чем суть проекта?

Панасюк М. И. Странники Вселенной или эхо Большого взрыва. Фразино: «Век 2», 2005. - 272 с. - (Наука для всех).

Рис. 8.2. Дж.Линсли, автор проекта «*Airwatch*».



8.2. Зеркало на орбите

На рис. 8.3 демонстрируется схема этой идеи.

Прибор, состоящий из коллектора света (им может быть параболическое зеркало или система оптических линз) в фокусе которого размещена мозаика фотоумножителей, будет регистрировать «след» ультрафиолетового свечения, созданный вторгшейся в атмосферу заряженной частицей. Распространяющийся вдоль траектории оси ливня и отра-

Рис. 8.3. Принцип космического метода измерения энергии заряженных частиц ультравысокой энергии (эксперимент «ТУС»).

Коллектор ультрафиолетового света (параболическое зеркало), размещенный на спутнике, позволяет «собрать» свет, генерируемый вторичными электронами ШАЛ в ночной атмосфере Земли. Энергия первичных частиц определяется по количеству света (фотонов), собранного фотоумножителями — детекторами, размещенными в фокальной плоскости зеркала. Если ливень будет проходить под малым углом к поверхности Земли, то это может означать, что он вызван нейтрино, а не заряженными частицами.



120

жающийся от земной поверхности черенковский свет даст дополнительную информацию о высоте максимума ШАЛ (N_{\max}). По-сути, это аналог наземных измерений, но перевернутый с ног на голову. Отсюда его преимущества.

Если спутник запустить на орбиту высотой ~400 км и разместить на нем коллектор света с углом зрения ~60°, то в этом случае площадь пятна на земле составит более 150 000 км². Согласитесь, это очень большая площадь, вряд ли достижимая для наземных установок.

В настоящее время уже планируются подобные эксперименты в космосе. Это - российский эксперимент ТУС на автоматическом космическом аппарате с изменяющейся высотой орбиты от 450 до 600 км и проект EUSO Европейского космического агентства для Международной космической станции (рис. 8.4). Их возможности в сравнении с наземными установками демонстрируются на рис. 8.5. Здесь приведена расчетная

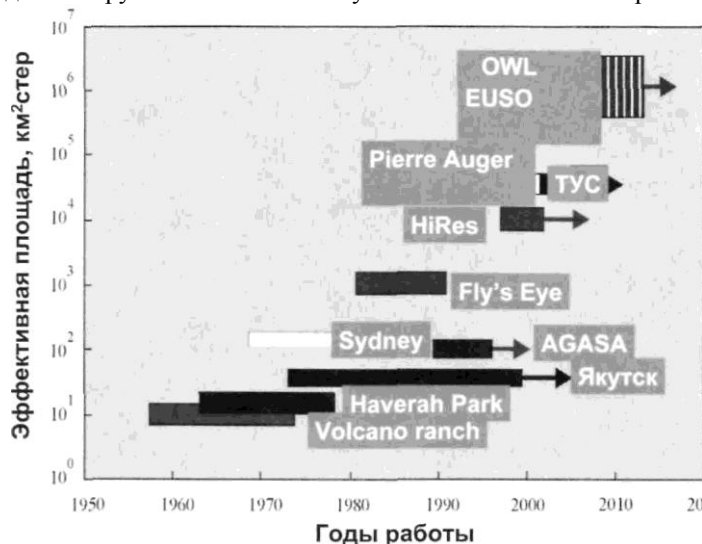
Рис. 8.4. Космический проект EUSO Европейского космического агентства позволит регистрировать космические лучи ЗэВ-ных энергий по их ультрафиолетовым трекам с помощью оптического коллектора света с широкой апертурой, размещенного на борту Международной космической станции.



121

Рис. 8.5. Диаграмма, демонстрирующая возможности наземных и космических установок для регистрации частиц ультравысоких энергий.

Эффективная площадь планируемых космических установок значительно превышает площади наземных.



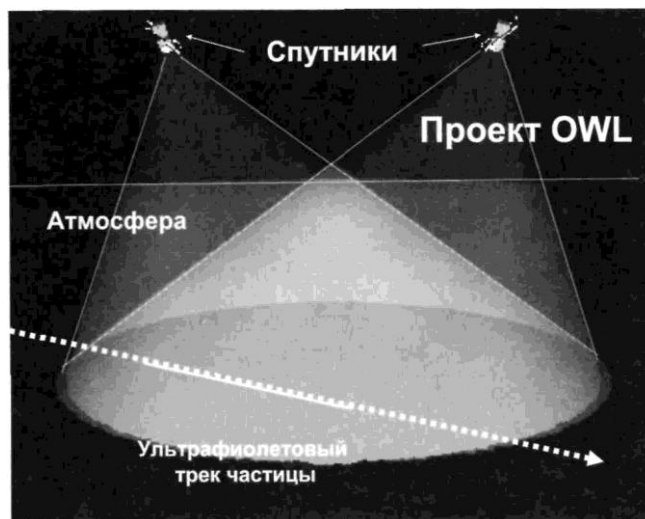
светосила (или эффективная площадь) установок как наземных, так и космических.

Очевидно, что космические проекты типа TUC или EUSO предоставят в руки ученых огромные новые возможности для исследований космических лучей в этой интереснейшей области энергий. Достаточно назвать следующие цифры: при энергии 10^{20} эВ AGASA способна зарегистрировать одно событие в год, Hi Res — 1 в месяц, Auger — 2 события в неделю, EUSO — в среднем одно событие в час.

Но не дождавшись запуска TUC'a или EUSO ученые планируют еще более масштабные эксперименты по регистрации частиц с ЗэВ-ными энергиями. Это проект OWL — «Сова» (*Orbiting Wide-angle Light collectors*) — орбитальный широкоугольный коллектор света). Он предусматривает запуск двух спутников на орбиту высотой 600-1200 км с установками —

122

Рис. 8.6. Космический проект OWL («Сова») позволит получить стереоизображение ультрафиолетового трека в атмосфере и значительно увеличить светосилу метода.



коллекторами ультрафиолетового света (рис. 8.6). Подобный тандем позволит не только увеличить площадь и объем «детектора» — ночной атмосферы, но и получить стереоизображение трека — ливня частиц. Оценки приводят к светосиле такой «установки» — $2,5 \cdot 10^5$ км² стер — рекордной для изучения частиц ультравысоких энергий (см. рис. 8.5).

Но и OWL — не предел. Разместив оптический детектор на геостационарном спутнике (высота орбиты таких спутников около 36000 км, мы сможем создать «детектор» космических лучей предельно возможной для земных условий светосилы: зеркало, размещенное на нем сможет захватить целое полушарие!

Есть еще одно важное приложение космических экспериментов с оптическими детекторами: они могут

зарегистрировать нейтрино ЗэВ-ных энергий. Но об этом далее - в главе 11.

123

Глава 9. ГАММА-ИЗОБРАЖЕНИЕ ВСЕЛЕННОЙ

Реальное путешествие в поиске открытий состоит не только в поиске новых ландшафтов, но и в поиске новых глаз.

Марсель Пруст

Первооткрыватели космических лучей, столкнувшись с внеземной радиацией, предположили, что это гамма-излучение. И в этом была только часть правды. Теперь мы знаем, что пионеры исследования космического излучения натолкнулись на вторичную компоненту космических лучей, рожденную в атмосфере. Среди других частиц было и гамма-излучение. Что такое гамма-излучение?

Гамма-излучение — это высокоэнергичные кванты электромагнитного поля, называемые также фотонами. Как и другие виды излучений, от радио-диапазона до ультрафиолетового, его можно описать либо на «волновом» языке, используя для этого понятие длины волны или частоты, либо использовать энергетические единицы.

Если обратиться ко всему волновому (или энергетическому) диапазону электромагнитного излучения (см. рис. 7.3), то можно видеть, что гамма-излучение находится на самом правом его краю: вслед за радио-, инфракрасным и ультрафиолетовым. Самая низкоэнергичная часть гамма-диапазона (менее ~100 кэВ) носит название рентгеновского.

Вселенную изучают во всех диапазонах энергий. Каждый вид излучений несет свою полезную и взаимодополняющую информацию, необходимую для создания полной картины. В этой главе мы обратимся к самому высокоэнергичному участку электромагнитного спектра - гамма-излучению. Гамма-

124

излучение нейтрально, не взаимодействует с галактическими магнитными полями. В связи с этим оно — уникальный инструмент для исследований объектов Вселенной.

Гамма-излучение может появиться в результате взаимодействия космических лучей с веществом среды, через которую они проходят. Это может быть атмосфера. Ранее мы видели, что действительно, в составе ШАЛ присутствие гамма-излучения весьма заметно. Это гамма-излучение

— продукт распада π^0 -мезонов, образовавшихся в результате взаимодействия космических лучей с атмосферными ядрами. Оно составляет лишь небольшую долю тех ливневых частиц в атмосфере, которые генерируются первичными космическими лучами. Однако, среди самих первичных частиц есть и гамма-кванты, рожденные во Вселенной. Это излучение было открыто в начале 60-х годов на спутниках. Его невозможно зарегистрировать наземными методами: практически все оно (за исключением самой высокоэнергичной части) поглощается в атмосфере.

9.1. Гамма-свечение Млечного Пути

Гамма-излучение, приходящее к нам из Космоса, разделяется на два различных класса. Первый класс гамма-излучения

— диффузное излучение, более или менее равномерно заполняющее нашу Галактику. Вторым — дискретное — так называемые, гамма-всплески, которые рождаются в локальных астрофизических объектах не вполне ясной природы. О них пойдет речь ниже.

На рис. 9.1 вы видите изображение нашей Галактики в гамма-излучении. Это весьма неожиданный результат компьютерной обработки измерений гамма-излучения с энергией в сотни МэВ прибором *EGRET* на космической обсерватории *CGRO* (Космическая гамма-обсерватория им. А.Комптона). Это постоянные гамма-источники. «Светящаяся» Галактика на этом снимке не может быть объяснена только известными наблюдаемыми небесными телами. Интересен здесь тот факт, что в оптическом диапазоне не видно очевидных источников

125

Рис. 9.1. Карта всего неба в гамма-лучах — результат измерений на космической обсерватории *CGRO*.

Диффузное гамма-излучение, исходящее из Млечного Пути — результат взаимодействия галактических космических лучей с межзвездной средой. Отчетливо видны локальные астрофизические объекты, неразличимые в оптических наблюдениях.



такого гамма-излучения. Наблюдения с помощью оптических телескопов дают, скорее, обратную картину: в тех местах, где следовало бы ожидать множество локальных ярких объектов, генерирующих гамма-излучение, — их нет.

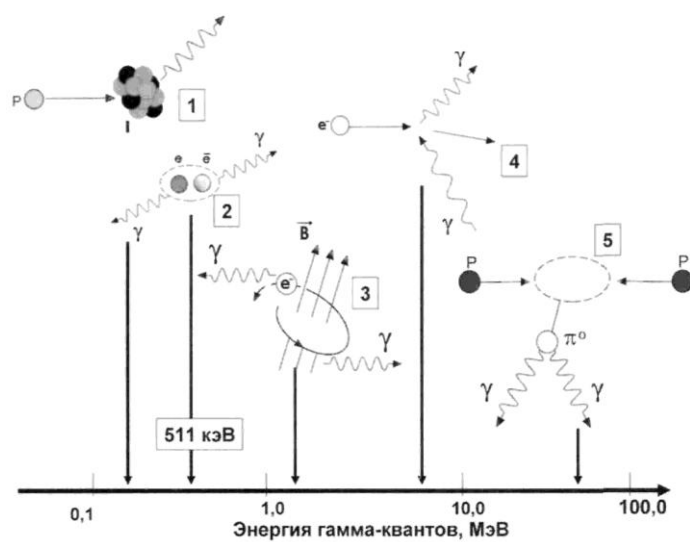
Картина «Гамма-Галактики», полученная в далеком от оптического диапазоне электромагнитного излучения, дает совершенно новую информацию о ближайшей к нам области Вселенной. Прежде всего, она впервые представила доказательства того, что здесь, в Галактике действительно развиваются крупномасштабные процессы выделения гигантских энергий. Видимый свет звезд, наблюдаемый в телескопы — это лишь небольшая доля их энергии. Огромное облако гамма-излучения нашей Галактики формирует гало, распространяющееся во внешнее пространство от Млечного Пути, что и является свидетельством бурных процессов в нашей части Вселенной.

126

Для объяснения наблюдаемого гамма-излучения от гало Млечного Пути нет единственного механизма. Некоторые типы процессов, приводящих к генерации гамма-излучения, показаны на рис. 9.2. Одним из них является столкновение высокоэнергичных космических лучей — электронов с низкоэнергичными фотонами видимого света или с фотонами

Рис. 9.2. Основные физические механизмы генерации космического гамма-излучения.

В области малых энергий (менее 1 МэВ) наблюдается мягкое гамма-излучение, возникающее при взаимодействии космических протонов с ядрами. Возбужденные ядра переходят в основное состояние, с излучением гамма-квантов (1). В этой же области энергий происходит генерация дискретной линии 511 кэВ в результате аннигиляции электронов и позитронов (2). Движение электронов в магнитных полях сопровождается синхротронным излучением гамма-квантов при более высоких энергиях (3). Рассеяние электронов на фотонах малой энергии (например, на реликтовом излучении) приводит к так называемому обратному комптоновскому рассеянию гамма-квантов (4). В области МэВ-ных энергий преобладает эффект генерации гамма-излучения при распаде нейтральных пионов, возникающих при столкновениях протонов космических лучей (5).



127

из инфракрасного диапазона. Такие фотоны могут появиться, например, в результате эмиссии с очень быстро вращающихся нейтронных звезд. Согласно этому механизму, электроны космических лучей передают часть своей энергии фотонам, ускоряя их до энергий гамма-квантов («обратный Комптон-эффект»). Недавно обнаружено, что и другие спиральные галактики обладают такими же скрытыми инфракрасными гало. Своим существованием они обязаны «путешествующим» по Вселенной космическим лучам.

Другой механизм рождения гамма-излучения — это упомянутый выше распад π^0 -мезонов, которые появляются, в свою очередь, в результате взаимодействий космических лучей (протонов высокой энергии) с межзвездной средой. Можно предположить, что скорость генерации или поток π^0 -мезонов в межзвездной среде будет таким же, как и поток космических лучей, если все космические лучи сумеют провзаимодействовать с ядрами среды.

В ядерной физике обычно говорят о длине свободного пробега частицы до взаимодействия: т.е. длина свободного пробега, определяемая толщиной вещества и типом частицы, должна быть достаточной для осуществления взаимодействия. Расчеты показывают, что в реальности не все космические лучи, заполняющие Галактику, могут провзаимодействовать с веществом, заполняющим межзвездное пространство. Так, в направлении центра Галактики поток гамма-излучения составляет сотые доли процента от потока космических лучей. В направлении же перпендикулярном Галактическому диску их поток более чем на порядок меньше.

Характеристики процессов, приводящих к генерации космического гамма-излучения, хорошо известны. Поэтому, измеряя его потоки с помощью приборов, установленных на спутниках, можно получить информацию не только о самих космических лучах, порождающих гамма-излучение, но и о среде их распространения — межзвездной и межгалактической. В этом случае информация о распределении потоков гаммаквантов позволяет нам «увидеть» сами потоки космических лучей, их порождающих.

128

Мы видим, что космические лучи играют ключевую роль в формировании гамма-излучения. Следует ожидать появления наиболее мощных потоков гамма-излучения в тех областях Вселенной, где взрываются сверхновые. Там разлетающиеся ударные волны сверхновых должны генерировать огромное количество «свежих» космических лучей, которые и создают гигантские облака гамма-излучения в окрестности. Подобное явление зарегистрировано космической обсерваторией *Chandra* (см. рис. 6.1) в менее энергичном диапазоне - рентгеновском.

Взрыв сверхновой SN 1987A, наблюдавшийся 23 февраля 1987 г., оказался очень удобным для наблюдений гамма-излучения от этой звезды, т.к. оказалось возможным измерить энергетический спектр гамма-квантов. В нем были обнаружены две спектральные линии 847 и 1288 кэВ, которые принадлежат нестабильному изотопу кобальт-56 (^{56}Co), образовавшемуся, в свою очередь, из изотопа никеля-56 (^{56}Ni). Конечным продуктом этих реакций было железо-56 (^{56}Fe). По интенсивности гамма-линий была определена общая масса железа, образовавшаяся во взрыве — это примерно 0,07 массы Солнца.

Таким образом, мы видим, что измерение гамма-излучения является еще одним важным источником информации о содержании химических элементов в облаке взорвавшейся звезды.

С другой стороны, такие мощные астрофизические объекты как нейтронные звезды или пульсары сами могут быть источниками космического гамма-излучения, они обладают достаточной для этого энергией. Действительно, ряд источников космического гамма-излучения ассоциируется с локальными астрофизическими объектами, такими как нейтронные звезды. Здесь хорошо изученный объект — пульсар в созвездии Краба. Этот источник излучает гамма-кванты вплоть до энергий ~ 200 ТэВ. Или пульсар Вела, находящийся на расстоянии 500 парсек — он мощный генератор электромагнитного излучения в диапазоне от радиоволн до энергий гамма-квантов.

129

Одной из загадок астрофизики является гамма-излучающий объект в созвездии Близнецов. Он получил название Джеминга (от английского словосочетания — *Gemini gamma ray*). Это один из известных наиболее мощных источников гамма-излучения. Лишь после нескольких лет исследований этого объекта в гамма-диапазоне удалось обнаружить его оптический двойник — им оказался очень слабый астрофизический объект. Скорее всего — это нейтронная звезда с периодом 0,24 сек на расстоянии всего (!) 380 парсек. Это — максимально приближенная к нам нейтронная звезда.

Однако гораздо более интригующей с точки зрения астрофизики является гипотеза происхождения гамма-излучения, связанная с темной материей. Все больше и больше появляется теорий в попытке объяснить существование темной материи. Это немудрено: темная материя — это большая часть нашего мира. Еще не обнаруженные массивные слабо-взаимодействующие частицы WIMP'ы - один из кандидатов для темной материи — в отличие от частиц космических лучей, не взаимодействуют со светом, но могут сталкиваться друг с другом, порождая гамма-излучение. Вот вам и альтернативное объяснение гало гамма-излучения нашей Галактики

— доминирующая темная материя создает гамма-свечение Млечного Пути.

Аннигиляция вещества с антивеществом — еще один источник гамма-излучения. Это известно. Но проблема - найти, доказать существование во Вселенной самого антивещества. И будущие исследования космического гамма-излучения несомненно должны способствовать этому.

Гамма-кванты энергичнее фотонов видимого света в десятки миллионов раз. Спектр гамма-излучения (см. рис. 7.3) чрезвычайно широк — от 10^5 - 10^6 эВ (мягкое гамма-излучение) до ультравысоких энергий (10^{14} — 10^{17} эВ). Форма спектра, как это видно из рис. 7.3, достаточно гладкая, однако при хорошем разрешении приборов в нем можно различить отдельные спектральные линии. Например, аннигиляционную линию 511 кэВ, возникающую в результате взаимодействия электронов и позитронов.

130

Какова максимальная энергия гамма-квантов, наблюдаемая в экспериментах?

Сейчас хорошо изучено гамма-излучение некоторых источников вплоть до ТэВ-ной области энергий. Безусловно, при таких энергиях необходимо применять наземные установки, которые регистрируют гамма-кванты по их черенковскому свечению в атмосфере. Для сравнения, верхний предел измерений гамма-излучения на космической обсерватории *CGRO* составил 20 ГэВ.

Среди ТэВ-ных источников гамма-излучения - *Markarian*

- наиболее мощный в этом диапазоне энергий. Это довольно интересно, так как процесс взаимодействия двух гаммаквантов ($\gamma\gamma$), приводящий к рождению электрон-позитронной пары (e^+e^-), в присутствии реликтового излучения должен бы ограничивать поток гамма-квантов сверхвысоких энергий. Но дальше еще загадочней: из созвездия Лебедь X3 до нас доходят гамма-кванты с энергией в ПэВ'ы... Или... — ошибка эксперимента?

Картину Галактики, как она изображена на рис. 9.1, невозможно получить на Земле — эти гамма-кванты поглощаются атмосферой. «Картина» Вселенной в гамма-диапазоне не только более информативна, но представляет качественно новую информацию астрофизикам, чем оптическая астрономия, она позволяет увидеть и ряд локальных крупных астрофизических объектов в Галактике, ответственных за генерацию гамма-излучения. Среди них, например, Вела — крупное созвездие на краю Млечного Пути, или Лебедь X3. Они прекрасно различаются в 100 МэВ-ном гамма-излучении. Именно поэтому возникло мощное направление в космических исследованиях

— гамма-астрономия, позволяющая гораздо глубже заглянуть в недра Вселенной, чем это позволяет сделать обычная оптическая астрономия.

Данный краткий экскурс в проблему показывает существующее сейчас разнообразие теоретических подходов к объяснению уже лежащей на столах астрофизиков экспериментальной картины космического гамма-излучения. Безусловно, это свидетельство в пользу развивающейся науки.

131

9.2. Загадочные всплески гамма-излучения

На рис. 9.1 мы с вами видели картину диффузного гамма-излучения нашей Галактики. Но, оказывается, существуют дискретные, очень кратковременные вспышки гамма-излучения, получившие названия гамма-всплесков. Они на много порядков величины мощнее гамма-излучения Галактики, изображенного на рис. 9.1. Всего лишь за одну секунду они могут выделить энергию, сопоставимую с энергией нашего Солнца!

Открытие гамма-всплесков было, пожалуй, одним из замечательных событий в астрофизике XX века. Их обнаружение тесным образом связано с военными космическими программами эпохи холодной войны в 60-х годах. В тот период разворачивалась система космических средств для обнаружения наземных ядерных взрывов. Американские специалисты из Лос-Аламоса запустили серию спутников «*Vela*» с детекторами для регистрации гамма-излучения, генерируемого при взрывах атомных бомб...

Идея космического слежения за наземными взрывами атомных бомб весьма проста: по временной задержке импульсов гамма-излучения в нескольких детекторах, размещенных на орбите и направленных на Землю, можно определить место, где произведен взрыв. Однако космический ядерный мониторинг дал совершенно неожиданный результат: всплески приходили не от Земли, а из космического пространства! Более того, их нельзя было идентифицировать ни с одним из объектов Солнечной системы. Некоторое время обнаруженное явление было даже засекречено.

Ученых удивляла довольно большая частота наблюдений гамма-всплесков. Заметим, что впервые этот факт был обнаружен в ходе экспериментов на отечественных космических аппаратах серии «Венера», выполненных под руководством Е.Мазеца из Ленинградского Физико-технического института. Если в первые годы исследований гамма-всплесков их наблюдали от 10 до 20 в год, то теперь, по мере освоения более чувствительных детекторов, их частота оценивается на

132

уровне 300 в год. Проведенная корректировка числа событий на карту всего неба, дает еще большую величину — около 800 гамма-всплесков год.

Всплески отличаются разнообразием временных масштабов — их длительность находится в интервале от десятков миллисекунд до десятков секунд. Энергетический спектр гамма-всплесков также как и у космических лучей падающий - с увеличением энергии поток монотонно снижается. Он простирается от десятков кэВ до ГэВ-ных энергий, а иногда наблюдаются даже ТэВ-ные частицы.

С самого начала экспериментального исследования гамма-всплесков делались попытки их отождествления с какими-либо астрофизическими объектами. Однако надежных «привязок» к объектам Вселенной ни в рентгеновском, ни в оптическом диапазонах, несмотря на многочисленные попытки в 70-80 годах, сделать не удалось. Статистический анализ гамма-всплесков, проведенный в уже упомянутом выше эксперименте «Конус» Мазеца на АМС «Венера 11» и «Венера 12», показал, что в распределении гамма-всплесков нет какого-то выделенного направления, т.е. оно является изотропным.

Это было первое замечательное свойство гамма-всплесков, открытое в самом начале их исследований. С другой стороны, изучение зависимости частоты их появления от величины потока (зависимость $\lg N - \lg S$) показало, что она отличается от формы с наклоном $-3/2$, характерным для однородно-заполненного пространства.

Дальнейшие эксперименты на орбитальной гамма-обсерватории имени Артура Комптона (*CGRO — Compton Gamma Ray Observatory*) по огромной статистике (более 2000 всплесков) подтвердили, что действительно распределение гамма-всплесков не однородно. Как следствие, был сделан вывод, что источники гамма-всплесков не могут быть связаны с нашей дискообразной Галактикой. Оставались две возможности — либо источники находятся в гало, образуя что-то наподобие сферической короны, либо разбросаны по всей Вселенной (рис. 9.3).

Одно время Галактические модели гамма-всплесков доминировали в сознании астрофизиков, прежде всего исходя

133

из энергетических соображений: требуемые в таких моделях значения энерговыделений - светимости источников (до 10^{40} эрг/сек) — не намного превосходили мощность уже известных рентгеновских источников: тесных двойных звезд, барстеров. Если же встать на космологическую позицию, т.е. предположить, что источники гамма-всплесков находятся в удаленной Вселенной, скажем, на расстояниях более 15 миллиардов световых лет, то в этом случае вывод должен быть ошеломляющим — энерговыделение гамма-источников должно превосходить возможности наиболее мощных известных астрофизических объектов — квазаров.

Мощность квазаров значительно меньше, чем энерговыделение наиболее мощных гамма-всплесков. Для последних она может достигать 10^{52} эрг/сек и более. Подобные значения

Рис. 9.3. Распределение дискретных источников гаммаквантов - гамма-всплесков на карте звездного неба по данным эксперимента *BATSE* на спутнике *CGRO*.

Отсутствует какая-либо ярко выраженная концентрация источников к галактической плоскости или к центру Галактики. Нет и концентрации источников в направлении известных ассоциаций астрофизических объектов. Распределение гамма-всплесков - изотропно.



134

энерговыделений наблюдаются при взрывах сверхновых, и основная доля энергии заключена в импульсном потоке нейтрино. Но сверхновые взрываются значительно реже, нежели наблюдаются гамма-всплески. Кроме этого, энерговыделение происходит на более длительных масштабах времени. Для гамма-всплесков выдвинут другой механизм генерации — слияние двойных звезд. Вкратце процесс их эволюции описывается следующим образом.

Процесс слияния звезд заканчивается в тот момент, когда ядро одной из них сжимается до предела - момента отделения ее внешней оболочки и начала переработки в термоядерной реакции гелия (водород уже перешел в гелий на более ранней фазе эволюции звезд - когда они были голубыми). В результате образуется новый тип звезд, — так называемые звезды Вольфа-Райе (WR), в которых за время порядка ста тысяч лет весь гелий сжигается и звезда взрывается как сверхновая, образуя нейтронную звезду. Вторая звезда повторяет жизненный путь первой и через некоторое время образуется пара двух нейтронных звезд. Затем, через 10-12 миллиардов лет, происходит столкновение этих звезд с выделением гигантской энергии. Однако эта модель, привлекательная, в первую очередь, с энергетической точки зрения, испытывает большие трудности. В связи с этим, в первую очередь следует упомянуть необходимость объяснения происхождения популяции нейтронных звезд во внешней оболочке гало, так как избыточной концентрации гамма-всплесков вблизи галактической плоскости не наблюдается. К тому же, не наблюдается гало из нейтронных звезд у близлежащих галактик. Так, например, нет никаких указаний на то, что ближайшая к нам туманность Андромеды — источник значительного потока гамма-всплесков.

Поиски источников гамма-всплесков на звездном небе продолжались. Успех пришел в конце 90-х годов, когда европейцы запустили спутник *BeppoSAX*, — рентгеновскую обсерваторию, названную в честь известного итальянского астронома А.Беппо. Идея заключалась в сопоставлении положения гамма-всплеска с рентгеновским источником, ошибка

135

позиционирования которого значительно меньше. И в 1997 г. действительно был зафиксирован гамма-всплеск, сопровождавшийся рентгеновским послесвечением. Точность определения координат была достаточно высока для наведения на это место наземных телескопов и космического — Хаббла.

Здесь был обнаружен удивительный объект с изменяющейся яркостью свечения в оптическом диапазоне. Затем были зарегистрированы другие гамма-всплески, связанные с аналогичными оптическими видимыми объектами. Измерив по доплеровскому смещению расстояние до них, ученые пришли к выводу, что они находятся на границе видимой части Вселенной. Таким образом, появились указания на необходимость связи гамма-всплесков с конкретными источниками, удаленными на космологические расстояния и являющимися, вероятно, самыми мощными во Вселенной. Напомним, эти источники должны высвобождать $\sim 10^{51}$ - 10^{54} эрг в течение типичной продолжительности всплеска — 10-100 сек.

Что же это за источники, способные генерировать такие гигантские потоки энергии? Имея большой опыт создания мощных взрывных устройств — атомных и термоядерных бомб, ученые быстро пришли к аналогии с рукотворными взрывающимися звездами: при взрыве атомной бомбы импульс гамма-излучения, предшествующий разлету раскаленного плазменного шара, является одним из основных поражающих факторов.

Взоры вновь обратились к нейтронным звездам. Чем они привлекательны? Имея мощнейшие магнитные поля (см. диаграмму Хилласа, рис. 7.1) - до $\sim 10^{12}$ Гс, и, возможно, более быстрые скорости вращения (сотые доли секунды) и большую светимость (т.е. энерговыделение), они являются достойными кандидатами на роль источников гамма-всплесков. Электрическое поле, генерируемое из-за быстрого вращения намагниченной звезды, должно ускорять частицы до гигантских энергий.

Это «локальная» модель, объясняющая происхождение всплесков «вблизи» нас, на расстояниях ближе 100-200 парсек (меньше толщины галактического диска).

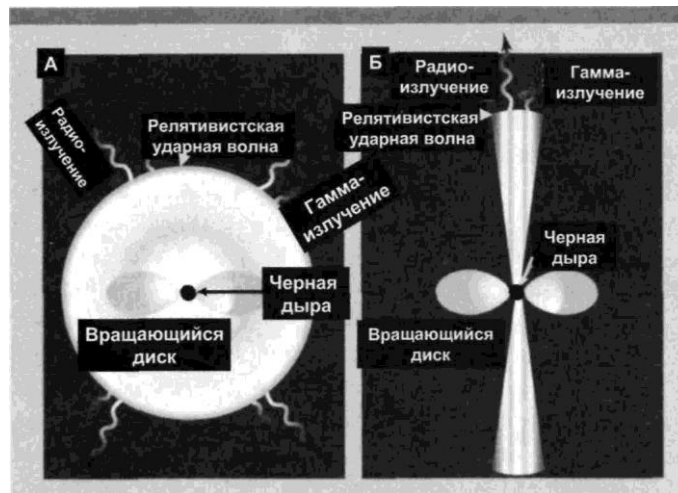
136

В последнее время обсуждается связь гамма-всплесков со взрывами внегалактических сверхновых особого класса — гиперновых. Это довольно редкий класс сверхновых, связанных с предшественницей — звездой Вольфа-Райе - массивной звездой, лишенной водородной и гелиевой оболочек. Коллапс таких звезд возможен один раз в 100 000 лет, что значительно реже, чем коллапс обычных сверхновых (1 раз в 30-50 лет). При взрыве в центре такой звезды образуется черная дыра размером в десять масс Солнца, окруженная аккреционным диском и мощным магнитным полем до 10^{15} Гс.

В этой модели (рис. 9.4) генерация потоков радиоизлучения и гамма-квантов происходит в узком конусе в полярных областях умирающей звезды — гиперновой. Коллапс массивной звезды Вольфа-Райе в черную дыру происходит за сверхкороткое время - триллионные доли наносекунды. Образовавшиеся при этом электрические поля могут конвер-

Рис. 9.4. Модели рождения гамма-всплесков в результате коллапса звезды Вольфа-Райе.

Звезда погибает в течение очень короткого промежутка времени, превращаясь в черную дыру (А). Гамма-излучение, распространяющееся в узких полярных конусах, — результат этого взрыва (Б).



137

тироваться в электроны и позитроны, которые затем быстро аннигилируют. Возникает огромный энергетический импульс, приводящий к нагреву звезды до температуры в миллиарды градусов. Сама звезда пока еще находится вне черной дыры. Горячее вещество звезды моментально, со скоростью света, расширяется, это и есть взрыв. Результатом взрыва является гамма-вспышка, которую мы и наблюдаем вблизи Земли. В этой модели гамма-излучение распространяется в виде узких, направленных в противоположные стороны конусов от взрывающегося астрофизического объекта. А если конус не будет направлен в сторону наблюдателя? Тогда будет регистрироваться лишь рентгеновское, более длительное послесвечение взорвавшегося объекта.

Похоже, что один такой случай недавно, в 2001 г., наблюдался. Надо отметить, что за 30-летнюю историю наблюдения гамма-всплесков все рентгеновские и оптические послесвечения наблюдались после самих гамма-всплесков. Однако при нескольких тысячах зарегистрированных гамма-всплесков послесвечение наблюдалось лишь в 20 событиях. В эксперименте, упомянутом выше, «одинокое» послесвечение — чрезвычайно редкое явление.

Итак, модели генерации гамма-всплесков претерпели и продолжают претерпевать очень быструю эволюцию. Вначале это были модели, связанные с нейтронными звездами в диске и в гало Галактике, затем — слияние двойных звезд на космологических расстояниях, и теперь — взрывы гиперновых. Является ли эта гипотеза окончательной? Скорее всего — нет. Уже обсуждаются и другие подходы к возможной интерпретации рождения гамма-всплесков. Так, одна из новых моделей переносит нас к ранней эпохе эволюции галактик: к квазарам и активным ядрам галактик, где массивные звезды в 100-500 масс Солнца коллапсируют в черные дыры. Но в этой модели далеко не все очевидно и астрофизики склоняются к тому, что вряд ли этот механизм может быть доминирующим.

Недавние астрономические наблюдения показали, что повышенная частота формирования новых звезд происходит как раз в местах возможной локализации гамма-источников.

138

В этих местах наблюдается повышенная плотность вещества

- так называемые гигантские молекулярные облака. Факты свидетельствуют в пользу того, что гамма-источники связаны с эволюцией массивных звезд. Однако вновь следует оговориться, — это пока гипотеза, требующая большего объема наблюдательных данных.

Более того, в связи с этим существует важная проблема, ждущая своего решения. Это проблема частоты наблюдений гамма-всплесков. Ее суть в том, что наблюдаемая частота их появления на три порядка выше частоты рождения звезд, например Вольфа-Райе, в нашей Галактике.

Другой важный аспект этой проблемы заключается в том, что астрофизические объекты, ответственные за генерацию гамма-всплесков, должны быть и мощнейшими источниками узконаправленных струй (джетов) космических лучей

— электронов и ядер. Последние исследования гамма-излучения (например, на космической обсерватории «Интеграл») действительно наглядно демонстрируют существование таких узких, симметричных и направленных в разные стороны джетов гамма-излучения («*twin-jets*»). Этот результат имеет важное приложение и для ускорения космических лучей, которые могут ускориться ударными волнами, распространяющимися вдоль джетов! Тем самым мы отходим от идеи сферически-симметричного ускорителя космических частиц, связанного с взрывом сверхновой и разлетом ее остатков в виде шарообразной структуры. Может ли такой источник стать конкурентом механизма генерации космических лучей от «обычных» сверхновых, покажет время: пока нет ни наблюдательных данных, ни моделей, позволяющих судить об этом.

Так что нужны и новые идеи и новые результаты экспериментов в этом чрезвычайно важном направлении астрофизики.

Глава 10. ЧАСТИЦЫ ИЗ ЗАЗЕРКАЛЬЯ

Зачем среди ночной поры встречаются антимир?

Андрей Вознесенский

В теории Большого взрыва есть проблемы. Как отмечалось выше, в первые мгновения после Большого взрыва, в период Великого объединения, у всех частиц нет масс, и характер их взаимодействий между собой одинаков. В этот момент Вселенная была симметричной: число частиц и античастиц было абсолютно одинаковым. Однако мы живем в материальном мире, состоящем из вещества. Почему?

10.1. Другое состояние вещества

Является ли типичным для Вселенной то состояние вещества, которое существует на нашей планете и в ее окрестностях? «Наши» атомы состоят из нуклонов — протонов, заряженных положительно, нейтральных частиц — нейтронов, упакованных в ядра, и отрицательных электронов, расположенных на внешних оболочках вокруг ядра. Вещества из антиатомов вблизи нас — нет.

Однако, сомнение в исключительности нашего материального мира зародилось после предсказания англичанином П.Дираком возможности существования электрона с положительным зарядом. Такая частица — позитрон — действительно был открыт в 1932 г. в экспериментах К.Андерсона с космическими лучами в камере Вильсона. За это открытие К.Андерсон получил Нобелевскую премию. До К.Андерсона позитроны видел в камере Вильсона Д. Скобельцын в

140

30-х. Но он не опубликовал этих результатов. Почему? Может из-за того, что треки позитронов и электронов в магнитном поле очень похожи? Ведь эти частицы отличаются только электрическим зарядом...

Надо отметить, что изучение космических лучей в середине XX века сопровождалось фейерверком открытий новых элементарных частиц. В 1936 г. были открыты мюон — мю-мезон (μ^-) и его античастица — μ^+ , а в 1947 г. — отрицательный и положительный пионы (π^+ , π^-). Затем, уже на ускорителях, в 1955 г. и 1956 г., были обнаружены отрицательные «кирпичики» ядра — антипротон и антинейтрон. Ну, а сейчас мы знаем, что практически у всех известных частиц есть их античастицы.

Нобелевскому лауреату — П.Дираку принадлежат слова о том, что и Земля, и Солнечная система, преимущественно населенная отрицательными электронами и положительными протонами, скорее случайность, а не закономерность во Вселенной. Возможно, другие звезды и галактики состоят из антиматерии. Поэтому обнаружение античастиц в космических лучах стало популярной, если не навязчивой, идеей среди космиков.

Вместе с тем, из господствовавших до середины 60-х годов представлений об эквивалентности ядерных взаимодействий между нуклонами (протонами и нейтронами) и антинуклонами (антипротонами и антинейтронами) следует существование ядер из антинуклонов — кирпичиков, из которых состоит антивещество.

Вещество и антивещество не могут существовать вместе

- они аннигилируют. Взаимодействие электронов и позитронов приводит к образованию гамма-квантов, а нуклонов и антинуклонов — к образованию нейтральных пионов (π^0). Эти частицы нестабильны и распадаются на гамма-кванты со значительной энергией — более 70 МэВ.

Так существует ли антивещество во Вселенной? Если

— нет, то почему? Почему исчезла симметрия мира?

Поиски античастиц в космических лучах — это способ доказать присутствие антивещества во Вселенной. В течение многих лет попытки найти их были безуспешными. Вопрос об

141

антимирах оставался открытым. К тому же, в 1967 г. А.Сахаров и в 1970г. В.Кузьмин публикуют работы, действительно поставившие под сомнение саму возможность наблюдения антивещества в современной Вселенной.

Для пояснений вновь необходимо вернуться к Большому взрыву. На самых начальных стадиях эволюции Вселенной количество вещества и антивещества, или барионов и антибарионов, было равным. Затем, во время начала сверхбыстрого расширения Вселенной, когда она вышла из состояния теплового равновесия, возник совсем небольшой, оцениваемый в 10^{-9} - 10^{-10} дисбаланс между веществом и антивеществом в пользу вещества — Вселенная приобрела так называемый барионный заряд.

Возникновение барионного заряда Вселенной — бариогенеза — требовало, по Сахарову, немало: ограничения времени жизни протона (нестабильности!), считавшегося одной из долгоживущих частиц. Кроме того, в теории накладывались особые условия, связанные с симметрией частиц (СР-инвариантность).

Свидетельства в пользу симметрии частиц нашли свое подтверждение в экспериментах на К-мезонах. Что же касается нестабильности протона, скорее его стабильности, то следует заметить, что в настоящее время она оценивается никак не меньше, чем 10^{32} лет, что в 10^{22} раз превышает возраст Вселенной!

Вслед за моментом появления крохотного дисбаланса все остальное вещество и антивещество исчезло — оно аннигилировало друг с другом, а тот первичный остаток и стал исходным материалом для современной Вселенной. Тепловое равновесие Вселенной восстановилось, но асимметрия вещества и антивещества осталась. Поэтому мы живем в мире, состоящем из вещества.

Справедливости ради надо отметить, что существует и другая точка зрения на эту проблему, а именно: Вселенная была асимметричной по отношению к частицам и античастицам с самого начала — с исходного момента Большого взрыва. Но вернемся к экспериментам...

142

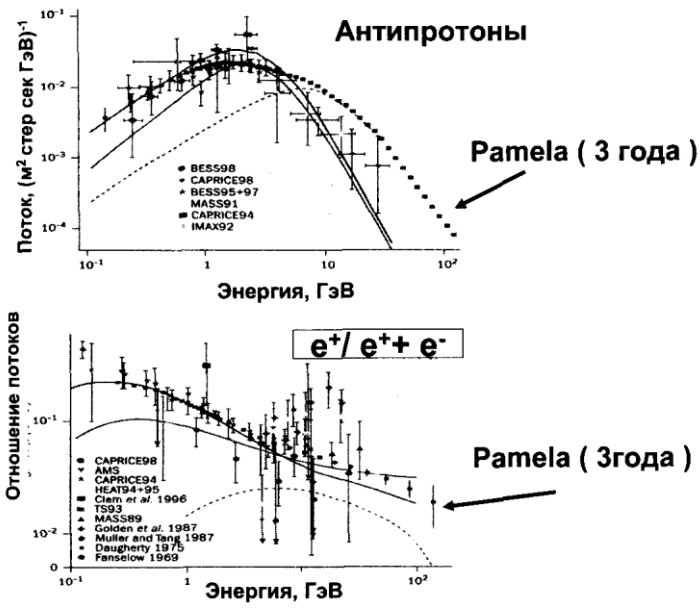
10.2. Погоня за антивеществом

Поиски космических античастиц продолжались. Удача улыбнулась Э.Богомолову из Ленинградского Физико-технического института в 1969-1971 гг. Используя магнитный спектрометр, он в ходе стратосферных полетов на аэростатах зарегистрировал первые антипротоны.

Какой информацией об античастицах из космоса мы обладаем сейчас? Результаты можно видеть на рис. 10.1.

Рис. 10.1. Энергетические спектры антипротонов по данным разных экспериментов (верхняя панель).

Здесь же показан ожидаемый спектр антипротонов по измерениям с помощью «Памелы» после трех лет наблюдений. Точечная кривая — модель аннигиляции суперсимметричных нейтралينو. На нижней панели показаны энергетические зависимости отношения потока позитронов (e^+) к суммарному потоку электронов и позитронов ($e^+ + e^-$). Избыток позитронов при энергиях >10 Гэв может свидетельствовать в пользу существования темной материи.



143

Эксперименты по измерению античастиц проводились до сих пор лишь на аэростатах, на высотах около 40 км, в течение времени не более суток. Этим объясняется небольшая статистика в области больших энергий. Основной вывод, который следует из всех осуществленных экспериментов, это то, что наблюдаемые антипротоны и позитроны являются вторичными продуктами взаимодействия космических лучей с межзвездной средой и с земной атмосферой. Действительно, антипротоны и позитроны могут появиться в результате взаимодействия «обычных» космических лучей с веществом межзвездной среды. Поэтому факт их регистрации в космосе еще не является доказательством существования антиматерии. Могут ли существовать в природе частицы в первозданном виде, т.е. достигшие Солнечной системы и окрестностей Земли, не испытав взаимодействий с межзвездной средой? Это большой вопрос для физики космических лучей и на него пока нет ответа...

Каков же итог наблюдений? Вот он: *как на Земле, так и в ближнем космическом пространстве отсутствует сколь-нибудь заметное количество антивещества*. Позитроны наблюдаются, но их присутствие вполне можно объяснить столкновением других частиц. То же самое применимо к антипротонам — они появляются в результате взаимодействия первичных космических лучей либо с межзвездной средой, либо с атмосферой. Но этот вывод справедлив лишь до определенных энергий. Что будет в области больших энергий, мы не знаем. Будущие исследования позитронов и антипротонов при высоких энергиях (более ~10 ГэВ) действительно могут иметь важное значение. Потому что именно в этой области энергий может наблюдаться существенный избыток этих античастиц из-за присутствия WIMP'ОВ — частиц темной материи.

Уже упоминалось, что WIMP'ами могут быть парные нейтрино. При их аннигиляции и возникают антипротоны и позитроны. Поэтому измерение позитронов и антипротонов в области высоких энергий может оказаться ключом к разгадке природы темной материи.

144

Интересно заметить, что еще одним мощным источником позитронов в нашей Галактике может быть черная дыра, расположенная в ее центре. Действительно, космическая гамма-обсерватория *CGRO* зарегистрировала поток излучения - гамма-квантов — из центра нашей Галактики (рис. 10.2), который может эмитироваться в результате аннигиляции позитронов и электронов. Возможно, существует дополнительный поток античастиц в результате экзотического процесса аннигиляции суперсимметричных нейтрино, но, чтобы это доказать, нужны дальнейшие измерения в области высоких энергий.

Если все же предположить, что во Вселенной существуют протяженные области антивещества, то они не могут быть расположены ближе, чем на расстояниях ~10 мегапарсек.

Рис. 10.2. Эмиссия гамма-излучения в районе массивной черной дыры в центре Галактики по данным космической гамма-обсерватории *CGRO*.

Джеты излучения, наблюдающиеся на снимке, могут быть результатом аннигиляции позитронов и электронов с энергией 511 кэВ. Источником этих частиц может быть темное вещество, состоящее, возможно, из WIMP'ОВ. Они свидетельствуют о мощном процессе аннигиляции электронов и позитронов центре Галактики.



145

Если бы антивещество находилось ближе, то мы должны были бы наблюдать значительный поток гамма-излучения, возникающий в результате аннигиляции вещества и антивещества. Однако, такого излучения нет. С другой стороны, если вещество и антивещество отделены друг от друга во Вселенной, следовало бы ожидать существование неоднородностей в спектре реликтового излучения (см. рис. 7.3). А оценка таких «пустот» во Вселенной из неоднородностей спектра реликтового излучения приводит к их размерам до 15 мегапарсек, что делает картину о разделении вещества и антивещества малореалистичной.

Тем не менее — это все лишь модельные предположения. Нужны более точные эксперименты, чтобы доказать отсутствие антивещества во Вселенной. Или присутствие? Наверное, последнее предположение пока нельзя полностью исключить.

Основной недостаток аэростатных экспериментов в их малой продолжительности, что не дает возможности экспериментаторам продвинуться в область высоких энергий. Выход

- в космических экспериментах по поиску антивещества. Спутники позволяют осуществить более длительные эксперименты и, что очень важно, — выйти за пределы атмосферы, т.е. избавиться от компоненты антивещества, вызванной взаимодействием космических лучей с атмосферными ядрами.

Однозначным свидетельством в пользу существования антивещества во Вселенной могло бы явиться наблюдение антигелия в космических лучах. Антигелий и другие антиядра могут возникать в результате термоядерных реакций в антизвездах, — аналогично тем, что протекают в обычных звездах. Кроме того, антигелий мог остаться после Большого взрыва

— на этот счет есть теоретические расчеты.

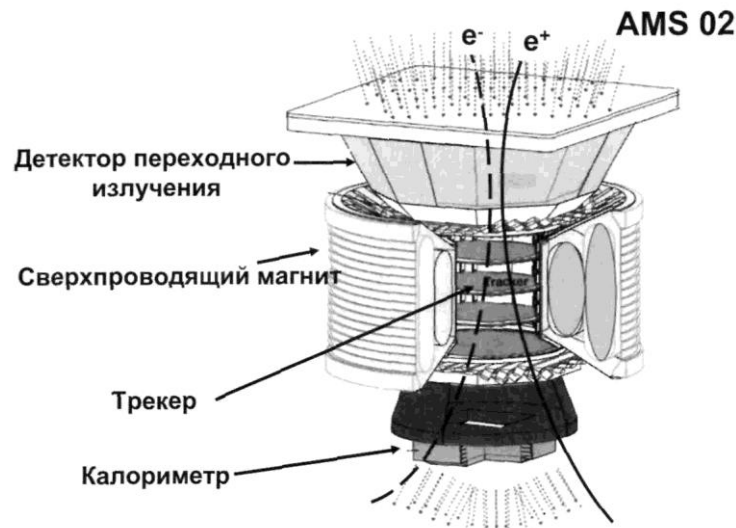
Сейчас готовятся к реализации два космических эксперимента, направленных на поиски антивещества в космическом пространстве: PAMELA и AMS-02. В основе обоих - магнитные спектрометры, позволяющие селектировать частицы по знаку их заряда. Если в PAMELA используется постоянный магнит, то в AMS-02 — сверхпроводящий со значительно большей величиной магнитной индукции (рис. 10.3).

146

В этих сложных приборах используются различные детекторы ядерных излучений, позволяющие разделять частицы по массам, скоростям и энергиям. Возможности спектрометра PAMELA в части регистрации антипротонов, позитронов и электронов показаны на рис. 10.1. По сравнению с экспериментом PAMELA, AMS-02 будет иметь еще большую светосилу, что позволит еще дальше продвинуться по шкале энергий и снизить порог чувствительности по регистрации антигелия.

Рис. 10.3. В будущий эксперимент AMS-02 на Международной космической станции входит ряд сложнейших приборов и сверхпроводящий криогенный магнит.

Их сочетание позволит не только измерить с большой точностью частицы различных масс и энергий, но и, возможно, найти следы антивещества во Вселенной — антипротонов и антигелия. Наличие магнита позволяет сепарировать частицы по заряду: так, например, для электронов и позитронов траектории будут искривлены в разные стороны, что делает возможным разделение сигналов от них в «позиционно-чувствительном» детекторе-трекере. Другие детекторы обеспечивают разделение частиц по массам, энергиям и скоростям.



147

Пройдет совсем немного времени и, возможно, мы станем свидетелями закрытия проблемы существования антивещества в современной Вселенной. А может прав поэт:

...Знакомый лектор мне сказал вчера: «Антимиры? — Мура!»

(Андрей Вознесенский).

Глава 11. ЧАСТИЦЫ ПОЛТЕРГЕЙСТА

Под всякой бездной раскрывается другая, еще более глубокая.

Б. Эмерсон

В этой главе речь пойдет о нейтрино — частицах, приходящих к нам из далеких областей Вселенной. Их называют астрофизическими, чтобы отличить от тех, которые имеют другое происхождение, например, солнечное или атмосферное.

11.1. Приключения «неуловимых»

Эта частица имеет замечательную историю своего открытия. В отличие от многих других «собратьев» ее обнаружили не в экспериментах, а в теоретической работе по изучению бета-распада нейтрона. Это сделал В.Паули. Нейтрон — нестабильная элементарная частица, и за время, немногим более десяти минут, она распадается на протон, электрон и еще что-то. Этим «что-то», что уносит недостающую энергию в реакции бета-распада нейтрона ($n \rightarrow p + e + \bar{\nu}$), должен был быть, по правильному заключению Э.Ферми, «легкий нейтрон», нареченный им «нейтрино». Сам В.Паули не верил в возможность быстрого обнаружения нейтрино. По его гипотезе она не обладает массой покоя и имеет чрезвычайно малую эффективность взаимодействия с веществом. Эта частица может пересечь невероятно толстый слой вещества, не «заметив» его. Поэтому нейтрино трудно обнаружить. Но все же можно. Возможности регистрации нейтрино возрастают при увеличении мощности источников самих этих частиц. Но где взять мощные источники на Земле?

149

Ядерный взрыв — один из таких источников. В процессе деления изотопа урана-235 образуются два осколка, которые превращаются в стабильные ядра — через ряд промежуточных ядерных превращений, в которых и рождаются довольно энергичные нейтрино с энергией в несколько МэВ. То есть при взрыве атомной бомбы происходит образование огромного потока нейтрино. Этим можно было воспользоваться еще в 1945 г., когда была взорвана первая атомная бомба. И американец Ф.Рейнис, первым обнаруживший нейтрино, думал пойти этим путем. Но пошел более безопасным — поиском нейтрино от ядерного реактора. Расчеты приводят к величине потока нейтрино более 10^{19} частиц для реакторов мощностью более 500 Мегаватт. Это большая величина, вселяющая надежду на успех в эксперименте. Ф.Рейнис назвал свой эксперимент «Проект Полтергейст» (1953-56 гг.), подчеркивая стремление поймать невидимые «барабашки». Ф.Рейнис установил вблизи реактора мишень — 400 литров жидкого хлористого кадмия, в котором должны были происходить реакции взаимодействия протонов и нейтрино. За три месяца «поймали» несколько десятков частиц. Это было экспериментальным подтверждением открытия, сделанного В.Паули на бумаге...

Б.Понтекорво еще в 1946 г. предложил другой метод регистрации нейтрино: захват этих частиц изотопом хлора-37 (^{37}Cl) с образованием изотопа аргон-37 (^{37}Ar). Если «выловить» образовавшийся аргон-37 из детекторной мишени, то, подсчитав его количество, можно определить поток падающих на него нейтрино. Но... результат был отрицательным — изотопы аргона не были обнаружены. Это явилось первым указанием на то, что нейтрино может быть разным. И это действительно было доказано американцем Ц.Ву. Он показал, что в реакциях с участием нейтрино нарушается их зеркальная симметрия.

Теперь мы знаем, что существуют разные нейтрино: электронное, которое рождается в паре с позитроном, мюонное — в паре с мюоном и тау-нейтрино. И все эти нейтрино еще имеют свои античастицы.

Но вернемся к Вселенной. Ведь нейтрино есть и там. Откуда они?

150

11.2. Нейтринное море реликтов

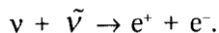
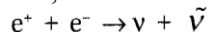
Большой взрыв, как гласит теория, образовал множество частиц — «кипящий суп» и в нем — нейтрино.

По мере остывания этого «супа» — расширения Вселенной

- энергии частиц уже не стало хватать на рождение тяжелых частиц (протонов, нейтронов) и их античастиц, что при существовании постоянно действующей аннигиляции привело к «вымиранию» тяжелых частиц, из которых состоит нынешнее вещество. Уже к середине первой секунды после Большого взрыва доминировали лишь легкие частицы: фотоны, электроны, позитроны и нейтрино.

Скорость образования нейтрино и антинейтрино регулируется двумя противоположными процессами: балансом пар

- электронов и позитронов с одной стороны, и также нейтрино и антинейтрино — с другой:



Баланс наблюдается при высоких температурах, но при охлаждении нейтрино «обретают свободу» — Вселенная становится для них прозрачной. Это эпоха излучения в эволюции Вселенной. Она наступила через десятые доли секунды после Большого взрыва.

После «освобождения» количество нейтрино должно оставаться постоянным вплоть до наших дней. По мере расширения Вселенной их энергия изменяется из-за красного смещения, так же как и энергия реликтового электромагнитного излучения (см. главу 7). Концентрация реликтовых нейтрино и реликтового электромагнитного излучения должна быть примерно равна ~ 300 частиц в см^3 . Это — очень много. Но «поймать» их очень тяжело. В отличие от реликтового излучения, реликтовые нейтрино пока не обнаружены. Современные экспериментальные методы не могут зарегистрировать нейтрино столь малых (не более 30 эВ!) энергий. А обнаружение их было бы грандиозным достижением. Вселенная «прозрачна» для

151

них, и, изучая эти частицы, мы могли бы взглянуть в наше далекое прошлое, непосредственно в период до начала синтеза существующих химических элементов.

Но есть еще одна интригующая проблема, связанная с этими реликтами. Это проблема массы нейтрино или, для данного рассмотрения, проблема баланса массы Вселенной.

Здесь необходимо сделать небольшое отступление и сказать несколько слов о проблеме массы нейтрино. С открытием нейтрино была провозглашена ее «безмассовость». Но это требует экспериментального подтверждения. Не вдаваясь в подробности очень сложных экспериментов по определению массы нейтрино, заметим, что за более чем 50-летнюю их историю, масса нейтрино в экспериментах неуклонно «стремится» к нулю. Б.Понтекорво в 1948г. оценил верхний предел его массы менее, чем в 1200 эВ. А в современных экспериментах российского физика В.Лобашева получен нижний предел в 2,5 эВ. Но более удивительным представляется результат об отрицательной величине квадрата массы нейтрино. Пока не ясно, что это могло бы означать...

Но все же, если даже ничтожная масса нейтрино существует, то масса всех реликтовых нейтрино во Вселенной должна бы превысить массу обычного вещества во Вселенной во много раз! Но пока эта гипотеза «нейтринного моря» Вселенной, которая могла бы приоткрыть тайну «темной материи» или скрытого вещества во Вселенной, имеет столько же сторонников, сколько и противников.

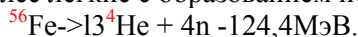
11.3. Нейтрино сверхновых

Выше упоминалось, что взрыв сверхновой — это коллапс звезды, как правило красного гиганта, на поздней стадии ее эволюции (рис. 1.4). Этот период связан с последовательным горением в термоядерном котле сверхновой вначале легких элементов, а затем тяжелых, вплоть до железа. Начиная с фазы горения углерода, основным излучением звезды становится нейтринное. Именно с испусканием нейтрино связаны последующие фазы горения и сжатия звезды. С началом

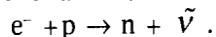
152

выхода нейтрино резко сокращается время горения звезды (см. табл. 1.1).

Коллапс звезды — превращение красного гиганта в нейтронную звезду или черную дыру сопровождается дополнительным образованием нейтрино за счет двух процессов. Первый — это известный в ядерной физике процесс фоторасщепления атомных ядер - распад тяжелого ядра на более легкие с образованием нейтронов и поглощением энергии:



Нейтроны, образующиеся в этой реакции, распадаются и образуют антинейтрино. Кроме того, еще одним источником антинейтрино в момент коллапса звезды является захват электронов протонами или тяжелыми ядрами:



Оказывается, что не все нейтрино выходят из коллапсирующей звезды, часть из них «запираются» внутри нее. Образуется «нейтриносфера» звезды.

Процесс коллапса звезды с образованием нейтриносферы чрезвычайно сложен как с физической точки зрения, так и тем, что требует мощного компьютерного моделирования. Описание его находится в развитии. Отметим здесь лишь то, что «освобождение» нейтрино из коллапсирующей звезды связано, вероятно, с образованием и прохождением ударной волны через нейтриносферу.

Расчеты показывают, что «запертые» нейтрино высвобождаются за очень короткое время — не более 10 миллисекунд. При этом нейтрино уносят примерно 5% энергии взрыва. На этом рождение новых нейтрино не заканчивается. После взрыва начинается образование «тепловых» нейтрино в процессе охлаждения нейтронной звезды. Все это длится всего несколько секунд... Таков, вкратце, механизм рождения нейтрино во время взрыва сверхновой.

Наблюдалось ли что-либо подобное в эксперименте? Вернемся к наиболее изученной сверхновой SN 1987A.

153

11.4. Нейтринная астрономия сверхновой SN 1987A

Пока мы ожидаем вспышки очередной сверхновой, масса научных публикаций посвящена наиболее знаменательному астрофизическому событию ушедшего XX столетия — наблюдению взрыва сверхновой SN 1987A. Впервые в истории были осуществлены экспериментальные наблюдения «живых» нейтрино от этого объекта.

Действительно, нейтринные импульсы были зарегистрированы на нескольких детекторах: на японских установках Kamiokandell и IMB, под горой Монблан в Италии, и у нас на Баксане. Детекторы в установках были разными: в японских использовались водные черенковские детекторы, а в установках на Баксане и Монблане — жидкие сцинтилляторы. Интересно, что три эксперимента — Kamiokandell, IMB и Баксан дали примерно одно и то же время прихода нейтринного сигнала, а Монблан — с более чем с 4-часовой задержкой. Сразу отметим, что физика этого эффекта не вполне ясна, и сейчас она интенсивно обсуждается.

Вернемся к основному нейтринному импульсу. Он был зарегистрирован спустя всего несколько часов после наблюдения оптической вспышки. Это свидетельство в пользу компактности объекта. По величине потока нейтрино была оценена мощность взрыва. Она оказалась равной $3 \cdot 10^{58}$ эрг. Заметим вновь (см. главу 5), что эта энергия достаточна, чтобы «разогнать» космические лучи до ПэВ-ных энергий. Интересно, что из наблюдений нейтрино от SN 1987A по оценке времени их распространения от источника, можно оценить их массу. Это было сделано. Она оказалась равной примерно 30 эВ, что больше, чем в современных наземных экспериментах.

Но не только сверхновые — источники нейтрино во Вселенной. К числу «астрофизических» нейтрино относятся также частицы, рождающиеся в результате столкновений адронной компоненты (преимущественно протонов) космических лучей с ядрами. В результате этих реакций могут рождаться пионы и каоны — нестабильные частицы. Эти частицы.

154

распадаясь, служат еще одним источником нейтрино. Но этот тип реакции не единственный, приводящий к рождению нейтрино. Пионы могут появляться и в результате взаимодействий протонов космических лучей с фотонами низких энергий.

Таким образом, мы видим, что происхождение и фонового гамма-излучения (см. главу 9) и фоновых потоков нейтрино обязано генерации в межзвездной среде пионов. Это, так называемое, пионообразование космическими лучами. В этом плане и нейтрино, и фоновое гамма-излучение являются вторичными продуктами взаимодействия космических лучей с межзвездной средой. Оба эти «продукта» должны возникать одновременно, но затем, в процессе распространения, нейтрино, в отличие от гамма-квантов, будет распространяться на более далекие расстояния. Последние «теряются» в результате более сильной эффективности взаимодействия со средой. Следовательно, если говорить о «нейтринной астрономии», как методе исследования Вселенной с помощью нейтрино, — она должна обладать большими возможностями по сравнению с гамма-астрономией. С помощью нейтринной астрономии можно «видеть» более удаленные источники во Вселенной.

11.5. Капканы для неуловимых

Заканчивая эту главу о необычайно интересных космических частицах — нейтрино, следует заметить, что здесь не рассмотрены еще два важнейших их источника. Это атмосфера и Солнце. К солнечным мы вернемся в ниже, а пока кратко рассмотрим атмосферные.

Атмосферные нейтрино — это вторичные частицы, участники каскадного процесса развития ливней вторичных частиц в огромном слое вещества — атмосфере (см. главу 4). Безусловно, необходимо знать энергетический спектр этих частиц с тем, чтобы «отделить» эту нейтринную компоненту от космических нейтрино галактического и внегалактического происхождения, а также от реликтовых. Спектр атмосферных нейтрино можно рассчитать по исходному спектру

155

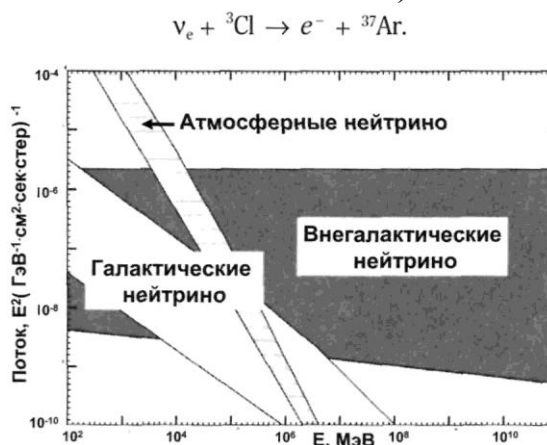
космических протонов и других компонентов ядерного излучения. Это было сделано во многих работах. Качественное представление энергетических спектров всех трех нейтринных компонент показано на рис. 11.1.

В области малых энергий потоки атмосферных нейтрино — самые мощные среди всех и, конечно, они являются весьма нежелательным фоном в экспериментах по поиску космических нейтрино. Как создать детекторы, способные зарегистрировать неуловимые, слабо взаимодействующие с веществом частицы, которых, к тому же, в области высоких энергий чрезвычайно мало?

Один из первых детекторов для поимки нейтрино был создан американцем Р.Дэвисом в 1968 г. В его детекторе содержалось 615 тонн жидкого вещества — перхлорэтилена, содержащего, как это следует из названия, хлор - ^{37}Cl .

Оказывается, этот элемент может вступать во взаимодействия с нейтрино, и продуктами реакции будут изотоп аргона (^{37}Ar) и электроны:

Рис. 11.1. Энергетические спектры различных компонент нейтринного излучения — атмосферного, галактического (от взрывов сверхновых звезд и из Галактического диска) и астрофизического (от внегалактических источников, например: AGN и гамма-всплесков).

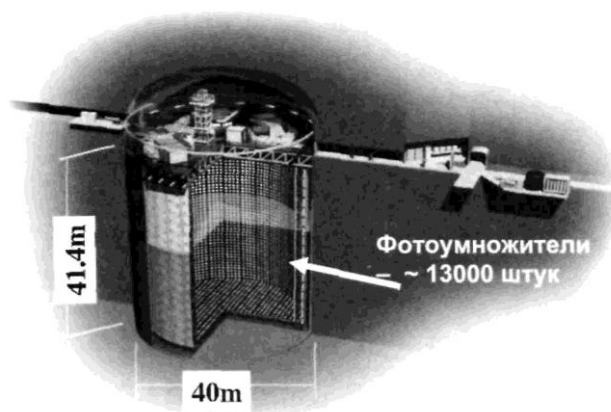


Измеряя число образовавшихся атомов ^{37}Ag , можно оценить падающий на детектор поток нейтрино. За эти исследования Р.Девису (вместе с М.Кошибой) в 2002 г. была присуждена Нобелевская премия. Эксперимент продолжается до сих пор и направлен на изучение солнечных нейтрино.

Другой тип реакций для регистрации нейтрино — галлий-германиевый был реализован на подземной установке в Андырчи у нас, на Северном Кавказе (эксперимент SAGE), и под горой Монблан, в Гран-Сассо, Италия (эксперимент GALLEX). Так же, как и в хлор-аргоновом методе, по выделенным атомам ^{71}Ge судят об исходном потоке нейтрино.

Детекторы для регистрации нейтрино размещают под землей, чтобы избавиться от нежелательного фона мюонов — частиц, образующихся в широких атмосферных ливнях и глубоко проникающих под Землю. Чем глубже мы разместим нейтринный детектор под Землей, тем меньше будет нежелательный фон от этих частиц. Так, например, эксперимент Р.Дэвиса осуществляется в бывшей золоторудной шахте

Рис. 11.2. Super Kamiokande — крупнейшая нейтринная установка. Она представляет собой огромный бак, наполненный водой, окруженный тысячами детекторов и опущенный глубоко под землю.



Хоумстейн, в штате Южная Дакота, на глубине 1400 м.

Но для регистрации нейтрино есть и другой метод — использование воды в качестве «рабочего тела» детектора. Известно, что если частица движется в среде с показателем преломления больше 1, то при релятивистских скоростях возникает черенковское излучение. В данном случае — черенковское излучение релятивистских мюонов — продукт взаимодействия нейтрино с веществом. Разместив под водой фотоприемники, можно измерить поток падающих на установку нейтрино.

Самый большой такой детектор создан в 1996 г. в Японии, это международный эксперимент *Super Kamiokande*. О гигантских размерах этого детектора можно судить по следующим цифрам. Рабочий объем — 50 тысяч тонн воды. Более 10 тысяч фотоумножителей - детекторов света (рис. 11.2). Основная цель эксперимента, так же как и в галий-германиевых (SAGE и GALLEX) и хлорном эксперименте Дэвиса — изучение солнечных нейтрино.

Рис. 11.3. Принцип работы подводного детектора нейтрино. Черенковский свет в виде конуса, генерированный релятивистскими мюонами (прямая линия), регистрируется «башней» в несколько этажей из детекторов — герметически упакованных фотоумножителей.

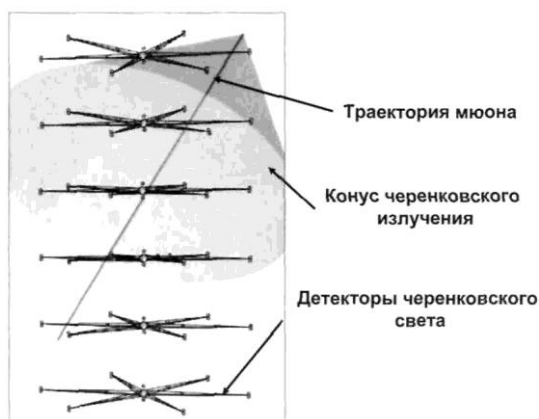
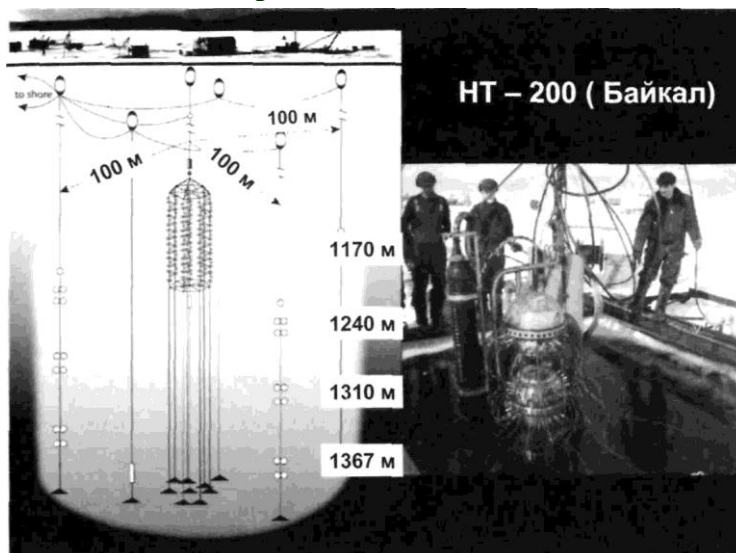


Рис. 11.4. Эксперимент по регистрации нейтрино на Байкале. Зимой, со льда на глубину около 1,5 км опускаются длинные стринги с детекторами для регистрации черенковского света.



Для астрофизических нейтрино нужны и еще большие объемы «рабочего тела» детектора. Почему бы не использовать чистую, прозрачную воду естественных водоемов? Под воду на длинных стержнях — стрингах можно опустить герметически упакованные фотоумножители, которые будут регистрировать черенковское излучение. На рис.11.3 показан принцип работы таких подводных детекторов.

Наш Байкал - уникальный водоем с очень прозрачной водой. Там уже работает установка NT-200 - *Neutrino Telescope-200* (рис. 11.4) Похожий эксперимент, DUMAND, создается вблизи Гавайских островов, на глубине 4,8 км. Еще один, NESTOR (*Neutrino Extended Submarine Telescope*), планируется провести в Средиземном море вблизи Греции к юго-востоку от острова Пелопоннес. В установке NESTOR используются 12 «этажей» детекторов эффективной площадью около 20000 м². Эта установка способна зарегистрировать

159

нейтрино с энергией порядка 10 ТэВ. Есть еще один, уже начавший свою работу эксперимент по поиску нейтрино с использованием гигантского природного рабочего тела детектора. Это эксперимент AMANDA во льдах Антарктиды. Здесь, внутри скважин глубиной от 1 до 3 км размещены детекторы, улавливающие черенковский свет, распространяющийся во льдах. Преимущество этого проекта — в очень низком фоне по сравнению с водными детекторами.

Природные водные и ледяные детекторы - это, пожалуй, наиболее чувствительные приборы для изучения астрофизических нейтрино, сулящие физикам большие перспективы в исследованиях. Можно надеяться, что при следующем взрыве сверхновой нейтринные «сигналы» от нее удастся зарегистрировать установками с большим числом детекторов и они будут более чувствительные, чем в 1987 г.

11.6. О нейтрино предельно высоких энергий

О таких нейтрино уже упоминалось в главе 8 в связи с космическим методом регистрации частиц ультравысоких энергий по измерению флуоресцентного свечения (проекты TUC, EUSO, OWL). Если в подобных экспериментах удастся зарегистрировать косые (входящие в атмосферу под малым углом) ливни в ночной атмосфере, то это будет означать, что источником свечения в атмосфере являются именно нейтрино с энергиями более 1 ЕэВ. Такие ливни могут быть созданы только ими, т.к. ливень от заряженной частицы просто не пробьет столь большую толщину атмосферы.

Нейтрино ультравысоких энергий носят название «космологических», в отличие от астрофизических, солнечных и реликтовых. Вполне возможно, что у них были общие «родители» с заряженными частицами в районе «ступни» — все те же топологические дефекты и неизвестные тяжелые частицы... Пройдет несколько лет и, возможно, удастся поймать 3эВ-ные нейтрино с борта Международной космической станции или спутника Земли.

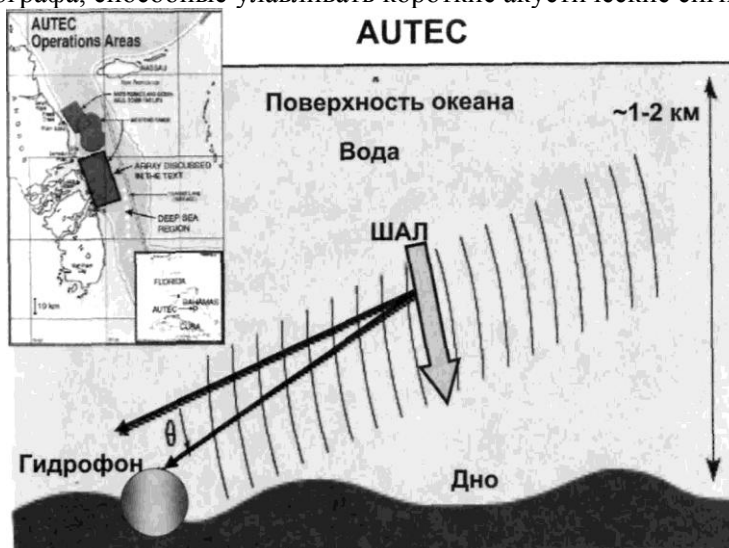
160

Описанными выше методами не исчерпываются возможности ученых зарегистрировать «неуловимых». Как уже мы видели, военные разработки с успехом находят применение в фундаментальной физике.

...Со времен холодной войны остались системы обнаружения подводных лодок - подводные гидрографы — регистраторы акустических сигналов, размещенные на больших подводных пространствах. Так, база США в Атлантике вблизи Багамских островов занимает подводное пространство площадью 250 кв. км. Именно здесь планируется создать подводную акустическую установку. Ливень частиц при взаимодействии с водой создает короткий (длительностью около 100 мксек) акустический сигнал, который может быть зарегистрирован гидрографом (рис. 11.5). Этот метод впервые был предложен нашим физиком Г.Аскарьяном.

Рис. 11.5. Акустический метод регистрации высокоэнергичных (10 ПэВ) нейтрино.

В проекте AUTEС вблизи Багамских островов под водой на площади в 250 км² будут размещены 52 гидрографа, способные улавливать короткие акустические сигналы от ШАЛ.



Метод работает, если энергия нейтрино достаточно велика. Расчеты показывают: частицы должны иметь энергию не менее 10^{16} эВ (10 ПэВ). Таким образом, в руках ученых окажется детектор гигантских масштабов, способный пролить свет на физику высокоэнергичных нейтрино.

Существует еще один довольно перспективный метод регистрации частиц ультравысоких энергий с применением черенковского излучения. Напомним, что частица, движущаяся в среде с показателем преломления $n > 1$ со скоростью $v > c/n$, будет излучать широкий спектр электромагнитных волн от оптического до радиодиапазона. За радиодиапазон «несут ответственность» частицы ливневого каскада с энергией довольно значительной - порядка 30 МэВ, которые, как ожидается, существуют среди вторичных частиц. Надо отметить, что генерация электромагнитного черенковского

Рис. 11.6. Регистрация нейтрино по черенковскому излучению, возникающему в результате взаимодействия космической частицы (например, нейтрино) с лунным грунтом — реголитом.

Черенковское излучение в радиодиапазоне может быть зарегистрировано приемными устройствами на борту окололунного спутника.



162

излучения в радиодиапазоне может происходить не только в атмосфере, но и в горных породах. Этот метод также впервые был предложен Г.Аскарьяном в 1961 г.

Отсюда очевидны методы, которые могут быть использованы для регистрации частиц ультравысоких энергий. Во-первых, можно разместить антенны радиоизлучения на спутнике и «ловить» сигналы, идущие из атмосферы Земли. Но можно попытаться с этой же целью регистрировать радиоизлучение, возникающее при взаимодействии частиц ультравысоких энергий с лунной поверхностью — реголитом. Для этого можно использовать радиотелескопы на Земле или радиоантенны на лунных спутниках (рис. 11.6). Расчеты показывают, что на лунном спутнике с высотой орбиты в десятки километров можно уверенно регистрировать частицы с энергиями в 10^{19} - 10^{20} эВ. Надо заметить, что «лунная программа» исследования космических лучей ультравысоких энергий выгодно отличается от околоземной: на Луне нет радиопомех, созданных техногенной деятельностью человека.

Глава 12. ДВУЛИКИЙ ЯНУС

Ты называешь Солнце
блюдом
Оригинально. Только зря.
С любой круглою посудой
Светило
сравнивать нельзя!

Н. Рубцов

Звезда с названием Солнце находится в самом центре нашей Солнечной системы — части Галактики. Солнце ответственно за многие физические процессы, происходящие в Солнечной системе. С двуликим Янусом сравнивал эту звезду наш соотечественник А. Чижевский. Ниже мы поймем, почему это так...

12.7. Наша звезда на звездной шкале

В астрономии существует зависимость, описывающая скорость энерговыделения (светимости) звезд от их температуры на поверхности. Эта зависимость называется диаграммой Герцшпрунга-Ресселя (рис. 12.1). Из нее следует, что мы соседствуем в общем-то с ничем не примечательной звездой нашей Вселенной: она находится в средней части Главной последовательности. Именно в пределах Главной последовательности находятся большинство звезд. Их очень много — миллиарды только в нашей Галактике. Солнце находится на расстоянии более 30000 световых лет от центра Галактики. Однако до ближайшей к нам звезды — «всего» немногим более четырех световых лет!

Полагают, что Солнце сформировалось вследствие уплотнения межзвездной материи в спиральном рукаве Ориона более нескольких миллиардов лет назад. В таблице можно увидеть основные физические параметры нашей звезды — Солнца.

164

Таблица 12.1. Физические параметры Солнца.

Масса	$\sim 2 \cdot 10^{33}$ г
Радиус	$\sim 7 \cdot 10^5$ км
Температура в центре	$\sim 1.5 \cdot 10^7$ К = $2,8 \cdot 10^7$ F
Средняя скорость вращения	$\sim 26,8$ суток

Что является источником энергии Солнца? Еще в середине прошлого века ученые пришли к выводу, что термоядерные реакции так называемого протон-протонного и углеродного циклов являются теми генераторами энергии, которые приводят к наблюдаемой светимости Солнца.

Вот эти реакции:

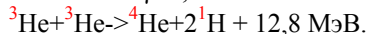
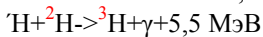
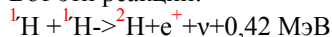
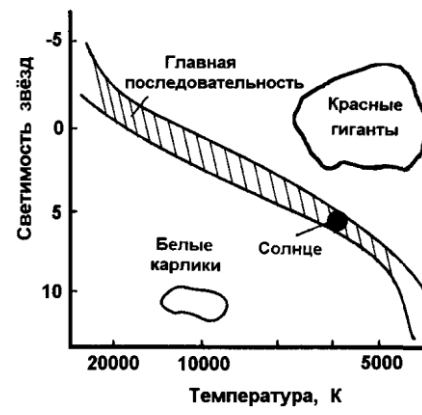


Рис. 12.1 На диаграмме Герцшпрунга-Ресселя показана зависимость между светимостью звезд (по отношению к светимости Солнца) и поверхностной температурой. Солнце — желтый карлик — находится приблизительно в середине главной последовательности.



Отсюда следует, что каждые четыре протона, превращаясь в ядра гелия, высвобождают энергию около 26 МэВ или $\sim 6 \cdot 10^{18}$ эрг на 1 г водорода (с учетом энергии, уносимой нейтрино).

Углеродные реакции (соединение водорода и азота с образованием гелия) реализуются в глубине Солнца, где температуры достаточно высоки. Таким образом, происходит преобразование ядерной энергии в тепловую.

Эволюция нашей Звезды такова, что углеродные реакции в ее недрах неизбежно приводят к утолщению гелиевого ядра и преимущественному протеканию ядерных реакций в достаточно тонком наружном слое. Медленный рост относительно тяжелого ядра при возрастании его температуры должен привести к доминированию углеродных реакций и превращению Солнца из желтого карлика в красный гигант (см. рис. 1.5).

Что будет дальше? Наше Солнце будет тяжелеть из-за преобладания ядерных реакций с образованием все более тяжелых элементов. Из красного гиганта оно постепенно превратится в белого карлика или... ему может быть заготовлена судьба сверхновой (см. рис. 1.7) — Солнце взорвется и даст жизнь новым звездам.

Но пока Солнце светит, оно определяет множество разнообразных процессов, происходящих в окрестности. Рассмотрение их выходит за рамки данной книги, но ниже мы рассмотрим те, которые влияют на характеристики космических лучей — странников Вселенной, попадающих в «сферу влияния» нашего светила.

Солнце имеет довольно сложную структуру (рис. 12.2). В его сердцевине плотность чрезвычайно велика и достигает $\sim 150 \text{ г/см}^3$. Это в 8 раз больше, чем плотность золота. Поверхностный слой называется фотосфера и имеет очень малую толщину - не более 400 км. Фотосфера, или по-гречески «светящаяся сфера» - весьма необычная оболочка Солнца. Она тонка и непрозрачна. Именно она излучает в окружающее пространство свет и тепло. Эта оболочка гораздо холоднее области, находящейся под ней - конвективного слоя. Если в конвективном слое температура достигает мил-

166

Рис. 12.2 Структура основных областей Солнца.

На врезке - солнечная корона, сфотографированная с использованием коронографа в год мощной солнечной активности.



лиона градусов, то в фотосфере — всего несколько тысяч. За фотосферой следует хромосфера, или «окрашенная сфера». Она нагрета сильнее фотосферы. Если ее разглядывать в телескоп с Земли, можно различить красноватый оттенок языков пламени вырывающихся из этой области. Ну, а выше хромосферы расположена корона Солнца.

Фотосфера, хромосфера и корона — составляющие единой атмосферы Солнца. Эта область чрезвычайно динамична. Подчас языки пламени расширяющейся солнечной короны вырываются на многие миллионы километров и изменяют физические свойства межпланетной среды, находившейся до этого момента в спокойном, стационарном состоянии.

Плотность внешних оболочек очень низка - более, чем в 10000 раз меньше плотности воздуха. Средняя плотность звезды — $1,9 \text{ г/см}^3$, т.е. вещество Солнца в среднем в два раза более плотное, чем вода. Солнце, как и большинство звезд Вселенной, состоит большей частью из водорода — во

внешних оболочках звезды его количество достигает 70%

167

(остальное вещество, в основном, гелий с небольшими добавками более тяжелых элементов).

Эти оболочки различаются своей температурой. Чем дальше от центра Солнца, тем меньше становится температура его оболочек, достигая величины $\sim 5000\text{K}$ в фотосфере. Но затем температура вновь начинает расти! И, как показывают измерения, температура короны почти в тысячу раз выше, чем фотосферы, достигая 2 миллионов градусов Кельвина

Солнце является мощным источником полностью ионизированного газа - плазмы. Этот газ, постоянно «вылетающий» из солнечной атмосферы, носит название солнечного ветра. Рассмотрим более подробно это замечательное явление.

12.2. Спринклер Солнечной системы

Спринклер, или поливалка, должна быть хорошо известна читателю. Трава в саду растет хорошо, если ее поливать. Поливалка-спринклер, вращаясь, разбрасывает водяные струи в радиальном направлении и образует в пространстве так называемые спирали Архимеда. Великий грек Архимед обратил внимание на особую форму траектории тела, подвергающегося одновременно радиальному и вращательному движению.

История открытия солнечного ветра занимательна и поучительна. Еще М.В.Ломоносов говорил о внеземном электричестве, связанным с нашим светилом. В начале прошлого века Биркеленд, пожалуй, стал первым, кто сказал, что из особых областей Солнца — пятен происходит постоянное истечение плазмы. Солнечные пятна связаны с активными физическими процессами, происходящими в его атмосфере. Иногда они заканчиваются мощными локальными выделениями энергии - взрывами. Эти взрывы получили название солнечных вспышек. И к ним мы вернемся ниже, а пока обратимся к истории открытия солнечного ветра.

Биркеленд настаивал на постоянном истечении плазмы из солнечных пятен, а другие физики, Чепмен и Ферраро,

168

тридцатью годами позже стали настаивать на спорадической — только во время вспышек - генерации плазменных потоков на Солнце. Но затем, в 1940 г. Хофмайстер и Бирман вновь вернулись к идее постоянного истечения плазмы от Солнца на основе наблюдений кометных хвостов: они всегда были обращены в сторону, противоположную Солнцу. Естественным было предположение о постоянстве давления солнечных частиц на кометное вещество. Это явно не тривиальный результат: Солнце непрерывно эммитирует во внешнюю среду вещество, из которого оно состоит.

Полным доказательством этого могли бы стать только прямые эксперименты по регистрации частиц солнечного ветра. Задача была решена с началом экспериментов на космических аппаратах.

В 1959 г., вслед за запуском первых околоземных спутников, началась лунная эпопея космических исследований. Первые советские полеты к Луне ставили своей целью прямое попадание в наш естественный спутник.

На второй «лунник» - станцию «Луна-2» К.Грингауз поставил специальный детектор для регистрации солнечной плазмы. Его детектор постоянно «ощущал» поток частиц вдоль всей трассы полета к Луне. Это было первым экспериментальным доказательством постоянного истечения плазмы от Солнца. Затем американский «Маринер-2», направленный в сторону Венеры, подтвердил результаты К.Грингауза. Непрерывность истечения солнечного ветра была доказана.

После многих лет экспериментальных исследований мы теперь знаем, что солнечный ветер — это ионизированный газ - плазма солнечной короны состоит из электронов и протонов с малой примесью тяжелых ионов. Плотность этих частиц очень велика (до миллиарда частиц в см^3) и резко убывает с высотой. Это вещество, родителем которого являются недра Солнца, здесь, в короне, оказывается уже гравитационно не связанным со звездой, и начинает жить своей собственной жизнью. Именно с постоянным истечением плазмы связан разогрев самой внешней оболочки Солнца, однако детали этого явления пока не вполне ясны.

169

Частицы солнечного ветра разгоняются до значительных скоростей: вблизи Земли их средняя скорость около 400 км/сек (3 миллиона километров в час). Во время солнечных вспышек из активных областей вырываются потоки высокоскоростной плазмы, они распространяются в Солнечной системе со скоростями ~1000 км/сек и более. Рекордная скорость солнечного ветра, зарегистрированная, кстати, недавно, во время экстремальных солнечных событий октября-ноября 2003 г., достигла более 2000 км/сек.

Солнце представляет собой сложный плазменный астрофизический объект, тело которого пронизывает множество «кровеносных сосудов» — направленных струй частиц, создающих электрические токи. Известно, что электрический ток образует внешнее магнитное поле, напряженность которого зависит от силы тока. Магнитные поля на Солнце — очень нестационарное явление, обусловленное сложной динамикой и пространственным распределением самих токовых систем в недрах Солнца.

Если сравнить энергию выносаемого солнечного ветра с энергией магнитного поля, то, оказывается, что солнечная плазма — гораздо более мощный компонент. Более того, магнитное поле становится «вмороженным» в плазму. Это подразумевает, что динамика солнечных частиц определяет распределение магнитных полей и на расстояниях, далеких от Солнца.

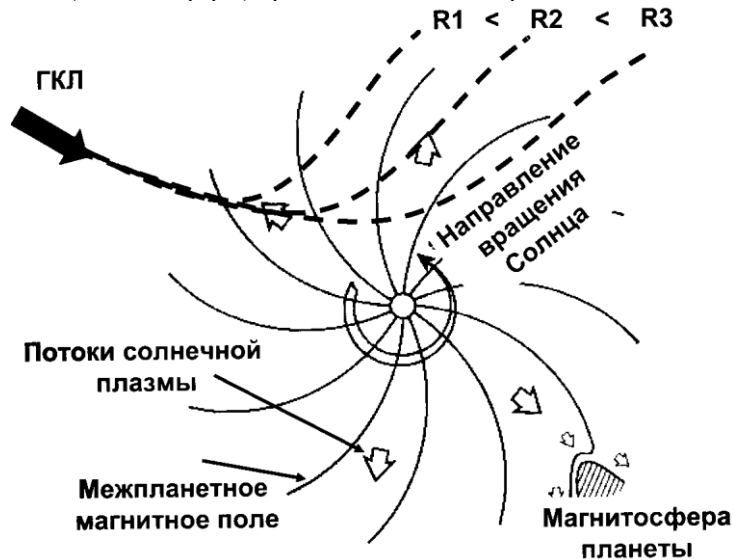
Плазма как бы вытягивает магнитное поле Солнца наружу, формируя внешнее магнитное поле. Нельзя, конечно, не учитывать и того, что в самой внешней среде существуют токи, генерирующие свои магнитные поля, которые вместе с вынесенным наружу магнитным полем Солнца формируют единое межпланетное магнитное поле. Его пространственная структура довольно сложна, но в первом приближении она повторяет структуру потоков плазмы, т.е. архимедовы спирали (рис. 12.3).

На Солнце величина индукции магнитного поля изменяется от 1 Гс в полярных областях до 3000 Гс в районе пятен — активных областях. С увеличением расстояния от Солнца

170

Рис. 12.3 Постоянно вытекающий солнечный ветер «вытягивает» магнитное поле Солнца в межпланетное пространство, создавая межпланетное магнитное поле.

Магнитные поля планет (магнитосферы) представляют собой препятствия для солнечного ветра.



она быстро падает и на орбите Земли ее величина в сотни и тысячи раз меньше.

12.3. Активная жизнь нашей звезды

Динамика внешних оболочек Солнца — солнечная активность, наводит на мысль об изменчивости поведения центрального тела нашей Солнечной системы. Это так, но... как посмотреть... Действительно, есть понятие «солнечной постоянной» — полное количество излучения, падающего в течение одной минуты на единицу площади в один квадратный сантиметр на орбите Земли. Величина солнечной постоянной составляет 1.97 так называемой Большой калории. Интригующим для науки является тот факт, что солнечная

171

постоянная неизменна во времени с точностью 1%! Но это в среднем. Для всех видов излучений. Если мы посмотрим на динамику отдельных видов излучений Солнца, то вывод о постоянстве здесь не применим.

Изучение активности Солнца началось, вероятно, с тех «темных мест» на его поверхности, которые были замечены людьми сотни лет назад и получили название «солнечных пятен». Солнечные пятна и их движение по диску Солнца открыты Галилеем в 1611 г. Если вспомнить об отечественных исследователях пятен на Солнце, то первым из них был, наверное, патриарх Никон. Именно в его летописи (XVII век) мы находим слова о том, что «места черны по Солнцу, аки гвозди...». Теперь мы многое знаем о солнечных пятнах — областях в фотосфере Солнца, отличающихся более низкой температурой (примерно на 1500 градусов). Они возникают там, где прежде «горели» небольшие «факелы» — локальные извержения солнечной плазмы.

Два астронома, Г. Швабе в Германии и Р. фон Вольф в Швейцарии, решили заняться подсчетом солнечных пятен и обнаружили, что число их на диске меняется с удивительной цикличностью. Каждые 11 лет (приблизительно, конечно) число солнечных пятен достигает своего минимума или максимума. Был введен так называемый индекс солнечной активности — число Вольфа — W :

$$W = f + 10g.$$

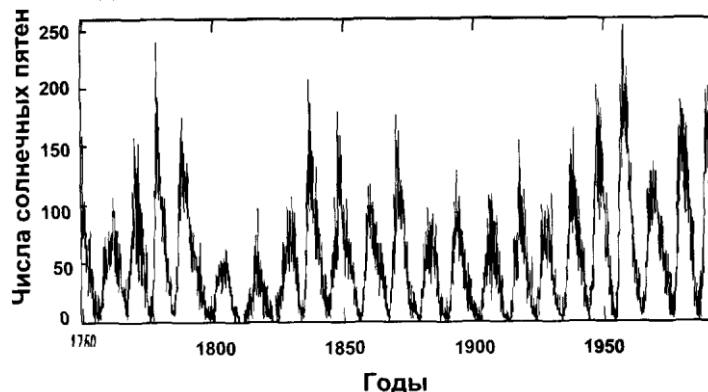
В этой формуле f — число пятен, а g — число групп пятен, видимых на Солнце. Так был открыт солнечный цикл. Отсчет солнечных циклов ведется с XVIII века, поэтому мы сейчас живем в эпоху минимума 23 цикла (рис. 12.4).

Но цикличность изменения числа солнечных пятен — не единственная закономерность активного Солнца. Оказалось, что пятна, образовавшись на средних широтах, «сползают» со временем к экватору, практически исчезая в годы минимума солнечной активности. Эта закономерность получила название «диаграммы бабочки» и гораздо полнее описывает цикл солнечной активности по числу пятен (рис. 12.5).

172

Рис.12.4. Периодичность активности Солнца по измерениям числа солнечных пятен (закономерность Швабе-Вольфа).

Средний период между двумя последовательными циклами составляет 11,1 лет, хотя отдельные периоды продолжались от 7 до 17 лет.

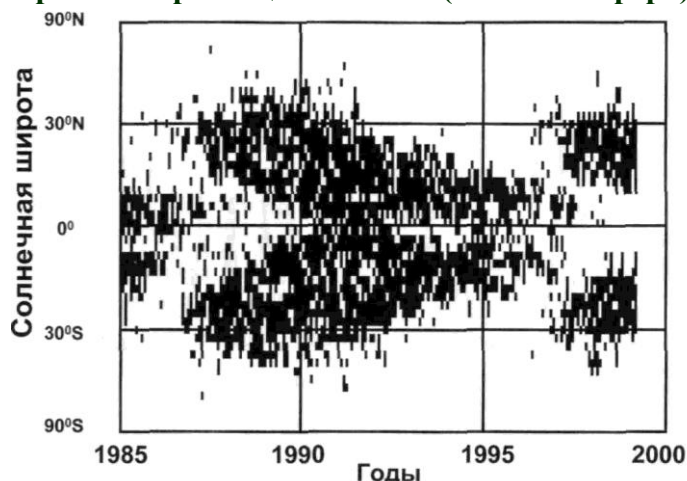


Пятна обладают еще одним характерным свойством: они концентрируют очень сильные магнитные поля, превышающие средние поля в окрестности в тысячи раз. Появление магнитного поля есть следствие существования электрических токов. Более сильное поле генерируется более мощным током. Токи, вызывающие наблюдаемые в пятнах поля, могут достигать огромных величин - 10^{12} Ампер (напомним, что 10^9 — это миллиард).

Отсюда возникает понятие активной области на Солнце: это тот участок в фотосфере Солнца, где факелы порождают пятна с концентрированными магнитными полями и гигантскими электрическими токами. При близком расположении пятен может происходить перезамыкание полей, и они приобретают более сложную структуру. Если посмотреть на Солнце «глазами» наземного магнитографа, то можно увидеть причудливую картину извивающихся магнитных силовых линий, покрывающих всю поверхность Солнца. Однако эта причудливость не мешает выявить области усиленной

173

Рис. 12.5 Распределение числа солнечных пятен по диску Солнца, напоминающее крылья порхающей бабочки (Закон Шперера).



напряженности магнитного поля, соответствующие местам расположения пятен. Другими словами, «магнитная картинка» Солнца во многом повторяет оптическую: темные пятна на светлом диске.

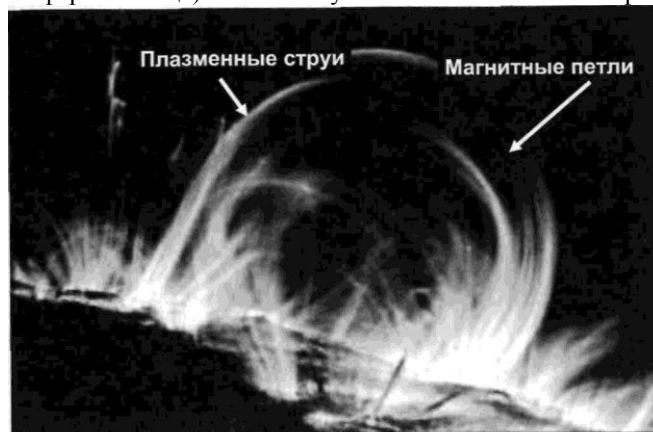
12.4. Солнечные бури

Взаимное существование плазмы и магнитных полей в атмосфере Солнца сложно и многообразно. Но два процесса их взаимодействия во многом определяют структуру активных областей. Плазма — потоки ионизированных частиц, подвергается воздействию магнитного поля, которое заставляет частицы двигаться по спиралевидным траекториям вокруг силовых линий. С другой стороны, концентрированные потоки плазмы, обладая большой энергией, контролируют поведение самого поля. Как результат, подчас в атмосфере Солнца мы наблюдаем сложную арочную или петлеобразную структуру магнитных полей и плазмы (рис. 12.6).

174

Рис. 12.6. Две активные области на Солнце связаны друг с другом петлевыми структурами, близкими к дипольному магнитному полю.

Свечение петель есть не что иное, как движение разогретой плазмы вдоль магнитных петель. Наиболее яркие участки (вблизи фотосферы Солнца) соответствуют более высоким температурам плазмы.



Иногда потоки солнечной плазмы вылетают из хромосферы, увлекая за собой магнитные поля. Это так называемые протуберанцы.

Особенно сильным проявлением солнечной активности являются солнечные или хромосферные вспышки.

Английский астроном Р.Каррингтон и индийский П.Ходжсон были первыми, кто в 1859 г. подробно описали мощнейшую вспышку на Солнце. Они увидели увеличение яркости пятен в «белом свете». В «белом свете» означает, что они наблюдали вспышку без применения специальных светофильтров, настолько мощной она была. Отметим также, что Каррингтон был первым, кто документально «связал» проявление вспышечной активности на Солнце с изменением магнитного поля Земли — геомагнитной бурей.

Панасюк М. И. Странники Вселенной или эхо Большого взрыва. Фрязино: «Век 2», 2005. - 272 с. - (Наука для всех).

Солнечная вспышка - это мощное выделение энергии на Солнце. Оценки показывают, что энергия вспышки может достигать $\sim 10^{25}$ Джоулей. Конечно, это далеко до энергии

175

взрыва сверхновой (10^{45} Джоулей), но на многие порядки превосходит рукотворную взрывную энергию атомных бомб, созданных человеком. (Энергия, выделяемая при взрыве 50-килотонной бомбы $\sim 2 \cdot 10^{14}$ Джоулей.)

Однако мощные потоки плазмы и сильные магнитные поля — не единственные проявления солнечных вспышек. Во время вспышек на Солнце наблюдатели на Земле и на спутниках регистрируют целую гамму различных явлений. Это рентгеновское излучение — результат тепловой эмиссии плазмы в короне, нагретой до 10^7 К; радиоизлучение в гигагерцовом (10^9 Гц) и терагерцовом (10^{12} Гц) диапазонах длин волн, возникающее вследствие движения релятивистских электронов в магнитных полях; жесткое гамма-излучение, как продукт ядерных реакций, происходящих в атмосфере Солнца. И, наконец, это — солнечные энергичные заряженные частицы (протоны, электроны, ядра). Их часто называют солнечными космическими лучами (СКЛ). Эти частицы приобретают значительные энергии в результате действия различных ускорительных механизмов как в атмосфере Солнца, так и в процессе распространения в межпланетной среде.

Какая максимальная энергия частиц, генерируемых на Солнце во время мощных солнечных событий? Измерения показывают, что энергия этих частиц может достигать ~ 1 ГэВ = 10^9 эВ. Это значительно меньше, чем энергии частиц, генерируемых при взрывах сверхновых (~ 1 ПэВ = 10^{15} эВ), но, тем не менее, их энергии перекрываются во время самых мощных событий с низкоэнергичной частью спектра космических лучей, приходящих к нам из Галактики.

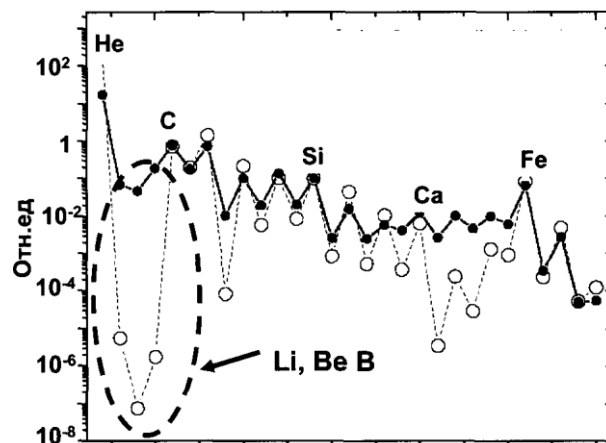
Ускорение этих частиц может происходить на самой ранней фазе развития вспышки, т.е. внутри солнечной атмосферы. Сейчас ясно, что солнечная вспышка носит взрывной характер и сопровождается выбросом солнечного вещества в межпланетное пространство. Быстрые изменения магнитных полей (как по напряженности, так и по пространственной конфигурации) приводят к генерации мощных индукционных электрических полей, которые, собственно, и могут разгонять частицы до наблюдаемых энергий.

176

Состав солнечных космических лучей не идентичен галактическим. Средний элементный состав ГКЛ и СКЛ можно увидеть на рис. 12.7. Различие определяется, в первую очередь, отсутствием в солнечных частицах легких элементов — Li, Be и B. Эти элементы, будучи вторичными в космических лучах (предполагается, что они «выгорают» в термоядерных реакциях в звезде), просто не успевают рождаться в ядерных реакциях при прохождении частиц СКЛ от Солнца до Земли. Кроме того, элементный состав СКЛ может меняться при их проникновении в магнитное поле Земли, т.к. эффективность проникновения частиц зависит от их жесткости, а сама жесткость определяется типом частицы и ее скоростью (см. главу 13).

Развитие космических методов наблюдений Солнца в различных диапазонах длин волн позволило получить «картинки» активных процессов с очень хорошим временным и пространственным разрешением. Ученые-солнечники обратили внимание на существование еще одного процесса, связанного с активизацией Солнца, но, вероятно, отличного от солнечной вспышки.

Рис. 12.7 Средняя распространенность элементов (атомных ядер) в галактических и солнечных космических лучах.



177

Это — «корональные инъекции массы» («*coronal mass ejection*» — СМЕ). Они представляют собой магнитные облака плазмы, свободно распространяющиеся в межпланетном пространстве. Удивительно, но в 90% вспышек СМЕ не наблюдаются, что наводит на мысль о независимости физического процесса, их вызывающего, от генератора солнечных вспышек. Однако какая-то связь все же есть, т.к. только 60% СМЕ происходит без вспышек. В максимуме цикла солнечной активности может наблюдаться до 2-х СМЕ в день. В минимуме эти явления гораздо реже — не более 1-го в неделю.

Какое же отношение СМЕ могут иметь к ускорению солнечных частиц до высоких энергий? Дело в том, что, распространяясь в межпланетной среде, эти «магнитно-плазменные» облака нарушают спокойную структуру «вялотекущего» солнечного ветра с вмороженным в него магнитным полем Солнца. По сути, в межпланетной среде происходит распространение ударной волны, ограниченной в пространстве размерами облака СМЕ.

Если это так, то мы вновь сталкиваемся с космическим ускорителем, очень типичным для Вселенной. Как и ударные волны от сверхновых, ударные волны СМЕ могут ускорять частицы посредством стохастического механизма типа Ферми (рис. 12.8). Как показывают расчеты Е.Бережко, мощности таких явлений в межпланетном пространстве вполне достаточно для ускорения частиц до сотен МэВ.

Как частота солнечных бурь (вспышек на Солнце, корональных инъекций масс) соотносится с солнечной активностью? Действительно, в годы, близкие к максимуму цикла солнечной активности, наблюдается большее число солнечных событий, чем, скажем, в глубоком минимуме. Так в максимуме можно наблюдать порой до нескольких вспышек в день. Однако, отмечено, что в годы, близкие к минимуму, особенно на фазе спада цикла солнечной активности, проявление вспышечной активности Солнца и инъекций масс (порой по своим параметрам достигающих экстремальных значений) - нередкие события. Только в течение последнего периода спада активности, с 2000 по 2005 гг., их было несколько.

178

Рис. 12.8. Корональная инъекция солнечного вещества представляет собой магнитно-плазменное облако, распространяющееся в межпланетном пространстве.

Ударная волна, следующая вместе с инжектированным облаком, может ускорять окружающие её частицы до высоких энергий, формируя тем самым потоки солнечных космических лучей.



Последнее событие - 20 января 2005 г., когда мощная активная область на Солнце произвела потоки столь энергичных частиц, которые не наблюдались с 1989 г. И это произошло практически в минимуме цикла солнечной активности. Поэтому вопрос о связи циклов солнечной активности и ее проявлениях в виде таких высокоэнергетических процессов в межпланетной среде, как солнечные вспышки и корональные инъекции массы, остается открытым.

Насколько мощны и интенсивны солнечные бури на нашем желтом карлике? Смотря с чем сравнивать. Например, вспышечная активность Солнца меньше вспышечной активности самых активных красных карликов на 4 порядка величины.

179

12.5. Плазменная бутылка солнечной системы

Итак, наша звезда является постоянным источником плазмы и магнитных полей. Плазма с вмороженным в нее магнитным полем распространяется в радиальном направлении от Солнца, заполняя гелиосферу — межпланетное пространство, в котором находятся планеты нашей Солнечной системы, крупные астероиды, прилетающие к нам кометы и другие более мелкие объекты Вселенной. Безусловно, солнечный ветер должен оказывать влияние на все эти тела, но это — отдельный предмет космической физики.

Сейчас же зададимся вопросом, что может произойти с солнечным ветром и магнитным полем на далеких расстояниях, там, где солнечная система «кончается»?

В связи с этим вопросом вспомним структуру нашей Галактики (см. рис. 1.6). Солнечная система совершает круговое движение вокруг центра Галактики на расстоянии около 25000 парсек. Скорость движения солнечной системы относительно межзвездной среды составляет «всего» 25 км/сек. Межзвездная среда не пуста, она заполнена нейтральным газом, магнитными полями и космическими лучами. И они противодействуют движущемуся на них потоку частиц солнечного ветра. Учитывая, что плотность частиц солнечного ветра падает обратно пропорционально квадрату расстояния от Солнца и используя оценки для плотностей нейтралов, космических лучей и магнитного поля в межзвездной среде, можно получить оценку расстояния до той границы, где давление частиц солнечного ветра сравнивается с давлением межзвездной среды. Эта граница получила название гелиопаузы. Она определяет искомую границу нашей солнечной системы (рис. 12.9). Можно показать, что эта пограничная область формирует в пространстве нечто наподобие бутылки, или кокона, обращенного в направлении «вверх по потоку» в межзвездном пространстве. А внутри этого кокона должна образоваться пограничная ударная волна (termination shock). За ней скорость солнечного ветра резко замедляется.

180

Рис. 12.9 Структура гелиосферы.

Внутри гелиопаузы преобладает динамическое давление солнечной плазмы, за ней — нейтрального газа, космических лучей и магнитных полей. Предполагается, что как до гелиопаузы, так и за ней должны образовываться ударные волны.



Как далеко от Солнца расположены гелиопауза и ударная волна? Расчеты дают оценку расстояния до ударной волны — не менее 70-100 АЕ (астрономических единиц).

Более тридцати лет назад в направлении от Солнца были запущены четыре космических аппарата: «Pioneer-10», «Pioneer-11» и «Voyager-1», «Voyager-2». Сейчас все они находятся в месте предполагаемого расположения пограничной ударной волны (см. рис. 12.9). Каков результат? Как это часто бывает в науке, мнения ученых разошлись.

Действительно, по мере приближения к предполагаемой ударной волне, детекторы заряженных частиц на «Voyager» начали регистрировать необычные флуктуации их потоков. Это могло бы быть свидетельством ускорения на ударной волне частиц солнечного происхождения, долетевших до этих расстояний. И здесь мы вновь сталкиваемся с ускорением частиц на ударных волнах!

Однако у такой интерпретации

181

экспериментальных данных пока есть противники, утверждающие, что пока доказательств существования ударной волны «Voyager-1 и 2» не представили... Что ж, надо ждать новых экспериментов и анализировать вновь поступающие экспериментальные данные.

Но доказательства существования границы гелиосферы могут быть получены и другими методами и не только с помощью прямых измерений частиц и полей на космических аппаратах. Такие сведения нам могут дать космические лучи, попадающие в гелиосферу из межзвездного пространства. Итак, что же происходит с теми частицами, которые, будучи ускоренными во Вселенной, проникают внутрь нашей Солнечной системы?

Глава 13. ПОСЛЕДНЕЕ ПРИСТАНИЩЕ СТРАННИКОВ

Вся Вселенная содержит послание. Расшифруй его.

И язык его - это здесь и сейчас. *Ошо (Бхагаван Шри Раджниш)*

Космические лучи, рождаясь и распространяясь во Вселенной, попадают и в Солнечную систему — среду, где их параметры могут изменяться. Что именно происходит с космическими лучами в окрестности Солнца — предмет рассмотрения данной главы.

13.1. Солнечная метла

Обратите внимание на рис. 12.3. Архимедовы спирали солнечной плазмы с замороженным в них магнитным полем (спринклер) будут, безусловно, взаимодействовать с заряженными частицами, попадающими в гелиосферу из внешнего пространства. Межпланетное магнитное поле искривляет траектории галактических космических лучей, стремясь уменьшить интенсивность входящих в это пространство частиц. Известно, что на частицу, попавшую в магнитное поле, действует сила Лоренца, величина которой зависит от скорости частицы. Для описания движения частиц в магнитном поле используется величина жесткости R , являющаяся отношением импульса частицы (mv) к ее заряду (Q). Частицы с одинаковой жесткостью имеют одинаковые траектории в магнитном поле. С увеличением скорости частицы, или ее энергии, сила Лоренца уменьшается. Поэтому, чем больше энергия частицы, или ее жесткость, тем менее эффективно воздействует магнитное поле на частицу. Следовательно, для галактических

183

космических лучей можно ожидать ослабление их потока только в низкоэнергичной части спектра.

Чем вам не метла? Это явление называется модуляцией космических лучей. Эффективность модуляции зависит не только от расстояния до Солнца, но и от солнечной активности. В периоды более сильной активности, когда потоки плазмы более мощные, а магнитное поле более неоднородное в пространстве, мы будем наблюдать менее интенсивные потоки галактических космических лучей внутри гелиосферы. И, наоборот, в минимуме цикла солнечной активности потоки космических лучей будут максимальны. Это наглядно демонстрируется сравнением кривых, отображающих число солнечных пятен и потоков космических лучей (рис. 13.1). Они, как говорят физики, находятся в «противофазе» минимум солнечной активности соответствует максимуму потока космических лучей и наоборот.

Рис. 13.1. Модуляция космических лучей (нижняя панель) по наблюдениям на станциях, расположенных в экваториальной и в полярной (где пороговая жесткость частиц меньше) областях.

Вверху показано изменение солнечной активности (по числам Вольфа) за тот же период времени.



184

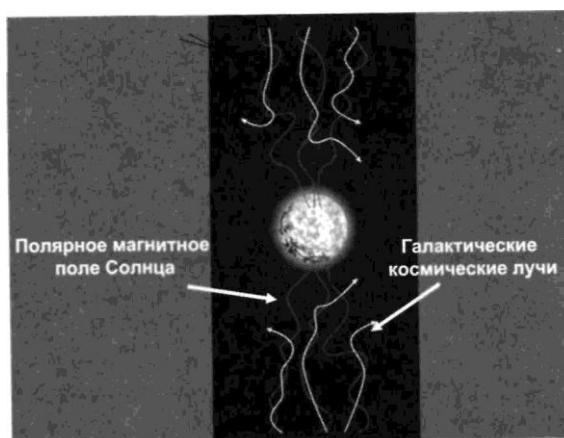
Эффективность модуляции потока зависит от расстояния. Чем дальше от Солнца, тем меньше будут изменения потоков космических лучей.

Анализируя такие данные, т.е. зависимость степени модуляции галактических космических лучей от радиального расстояния, исследователи приходят к оценкам положения внешней границы области модуляции на расстояниях менее 100 а. е. Поэтому где-то в этом месте должна располагаться и пограничная ударная волна гелиосферы и гелиопауза.

Теперь попытаемся вообразить трехмерную, объемную картину области эффективной модуляции космических лучей. Мы мало об этом знаем. Предполагается, что эта область имеет форму эллипсоида, сплюсненного в перпендикулярных от плоскости эклиптики направлениях. Вблизи Солнца такая структура эллипсоида диктовалась предположением существования более однородного магнитного поля Солнца вблизи его полюсов. Так было до начала миссии космического аппарата «*Ulysses*», запущенного в начале 90-х.

Рис. 13.2. Структура магнитного поля Солнца по данным космического аппарата «*Ulysses*», облетевшего Солнце через Южный и Северный полюса.

Модуляция космических лучей вне плоскости эклиптики оказалась такой же, как и в ней — из-за хаотичной структуры магнитного поля.



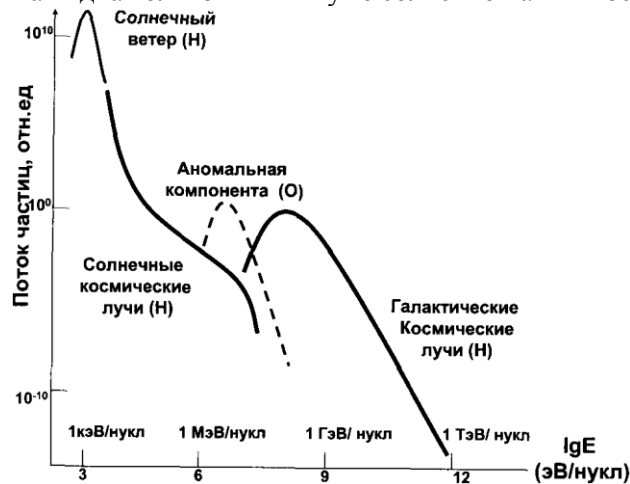
185

Это был первый космический аппарат, вылетевший за пределы плоскости эклиптики. Дело в том, что аппараты, запущенные в космическое пространство со 2-й космической скоростью, будут лететь, как и все планеты, в плоскости эклиптики. Для того, чтобы космическому аппарату вылететь из нее, нужен дополнительный импульс. Его можно создать двигателем, а можно... гравитационным маневром. Именно так был «запрограммирован» *«Ulysses»*. Его запустили не в сторону Солнца, а в обратном направлении. Долетев до Юпитера, самой массивной планеты Солнечной системы, он резко изменил траекторию своей орбиты, «вылетел» из плоскости эклиптики и полетел в сторону Солнца. Он несколько раз пролетел над полюсами Солнца, предоставив ученым уникальную информацию о структуре плазмы, магнитных полей и космических лучей вне плоскости эклиптики.

Оказалось, что степень модуляции космических лучей над полюсами вовсе не такая эффективная, как это предполагали.

Рис. 13.3. Примерная форма энергетических спектров солнечных и галактических космических лучей (для всех частиц) и аномальной компоненты (для кислорода).

Аномальная компонента видна только в минимуме солнечной активности.



186

лось ранее (рис. 13.2). Модуляционная картина галактических космических лучей оказалась мало отличающейся от той, которая наблюдается в плоскости эклиптики. А это значит, что упомянутый выше модуляционный эллипсоид не такой уж и сплюснутый...

Если теперь обратиться к энергетическому спектру галактических космических лучей (см. рис. 13.3), то можно видеть характерный максимум в спектре при энергии около 400 МэВ/нукл. Его появление как раз и связано с модуляцией космических лучей внутри гелиосферы: частицы с энергиями меньшими ~ 400 МэВ/нукл «выметаются» из солнечной системы нашей звездой.

В годы максимума солнечной активности падение потоков слева от максимума спектра больше, а в минимумах меньше. Вот так наша звезда защищает нас от потока ускоренной во Вселенной межзвездной пыли...

13.2. Аномальные частицы в гелиосфере

Гелиосфера заполнена разнообразными частицами - это и галактические частицы, проникающие в нее извне, из межзвездного пространства, и солнечные: плазма солнечного ветра и солнечные космические лучи. Однако есть еще одна компонента, открытая в начале 70-х годов.

Исследователи космических лучей обратили внимание на то, что в энергетическом спектре частиц имеется характерная особенность — локальный максимум при энергиях 10-15 МэВ/нуклон (рис. 13.3). Интересным оказался факт его существования не для всех элементов, а только для кислорода, гелия, неона и ряда других. Было также обнаружено, что эта компонента космических лучей подвергается гораздо более мощной солнечной модуляции, чем в случае «обычных» галактических частиц. Именно в силу этих обстоятельств такие частицы получили название «аномальных космических лучей» (АКЛ). Встал вопрос об их происхождении.

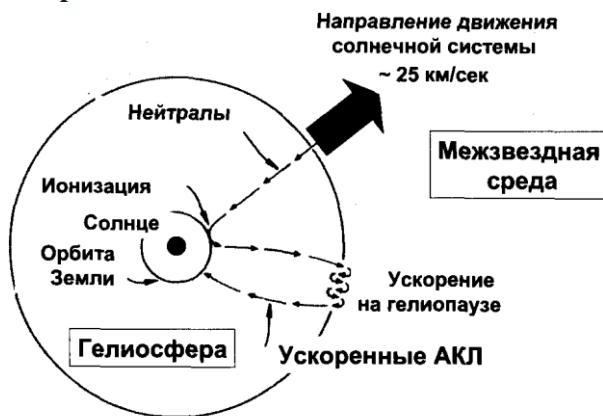
Американский астрофизик Л. Фиск вскоре после их экспериментального обнаружения предложил оригинальную гипотезу.

Панасюк М. И. Странники Вселенной или эхо Большого взрыва. Фрязино: «Век 2», 2005. - 272 с. - (Наука для всех).

тезу их происхождения (рис. 13.4). Она состояла в том, что эти частицы рождаются из межзвездной пыли, «подхватываемой» нашей гелиосферой из межзвездного пространства. Эти частицы проникают в гелиосферу, т.к. она движется в галактическом пространстве со скоростью 25 км/сек, и та часть нейтральных пылинок, которая достигает окрестности Солнца, ионизируется за счет его ультрафиолетового излучения и обмена зарядами с плазмой солнечного ветра. Частицы становятся заряженными. Но их энергия пока очень мала по сравнению с аномальными космическими лучами (сопоставима с энергией частиц солнечного ветра). Эти частицы надо ускорить.

Л. Фиск предположил, что вместе с плазмой солнечного ветра они начинают путешествие к внешним областям гелиосферы вдоль архимедовых спиралей. Ну, а там, на границе, их ожидает ударная волна. Логика мыслей очевидна: если есть ударная волна, то следует ожидать ускорения частиц. Однако проблема заключается в том, что надо доказать существование самой ударной волны на границе гелиосферы (как об этом упоминалось выше, здесь есть пока разные точки зре-

Рис. 13.4. Механизм образования аномальных космических лучей по Л. Фиску.



188

ния), смоделировать взаимодействие частиц с ней и попытаться получить ту форму энергетического спектра и те энергии частиц, которые реально наблюдаются в эксперименте. Пока здесь есть ряд вопросов, ответы на которые еще не получены. Однако, в целом концепция Л. Фиска, пожалуй, верна. Это следует из того, что эти частицы, в отличие от галактических и солнечных, имеют заряд, близкий к $1+$. Это означает, что атомы элементов, входящих в состав АКЛ, «ободраны» не полностью — практически все их электронные оболочки сохранены, не хватает лишь одной или двух... И это весьма важно, т.к. может произойти лишь в одном случае: если источники этих частиц где-то совсем близко от нашей гелиосферы. Расчеты показывают, что они должны располагаться не далее 0,2 парсека. Это совсем рядом. Именно нейтральная пыль межзвездного газа из этой области и пополняет окосолнечное пространство «аномальными частицами».

Как было доказано, что эти частицы имеют такой низкий заряд? Для этого использовали магнитное поле Земли в качестве «сепарирующего детектора» частиц с разными зарядами. К этому вопросу мы вернемся ниже в связи с рассмотрением проблемы проникновения космических лучей в магнитное поле Земли.

Итак, частицы высокой энергии, заполняющие гелиосферу, имеют различное происхождение. Некоторые из этих частиц галактического и внегалактического происхождения, рождающиеся при взрывах сверхновых звезд или в других астрофизических объектах Вселенной. Помимо этих источников, Солнце, в периоды усиления своей активности, генерирует энергичные частицы, которые могут иногда достигать энергий галактических. И, наконец, локальная межзвездная среда забрасывает нам пыль, из которой рождаются новые энергичные частицы.

Мы живем на небольшой планете, и космические лучи, оказавшиеся внутри гелиосферы, могут достигнуть и ее окрестностей. Давайте вместе с космическими лучами начнем приближаться к Земле...

189

13.3. Магнитная «броня» Земли

Приближаясь к Земле, космические лучи встречают два мощных препятствия. Одно из них — атмосфера планеты. Взаимодействие космических лучей с атмосферой было рассмотрено в главе 3. Лишь незначительная доля первичных частиц достигает Земли. Как правило, космические лучи образуют широкие атмосферные ливни вторичных частиц, которые в основном гибнут в атмосфере, выделяя при этом энергию.

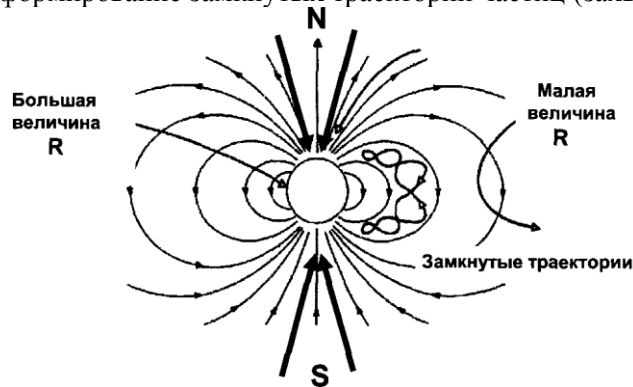
Однако есть еще одна преграда для заряженных частиц, несущихся в сторону Земли. Это ее магнитное поле.

...У английской королевы Елизаветы был придворный врач У.Гильбер. Он впервые доказал, что Земля является вращающимся магнитом.

Форма магнитного поля Земли очень близка к дипольной (рис. 13.5), т.е. оно весьма неоднородно в пространстве: вблизи полюсов поле ослаблено по сравнению с экваториальными

Рис. 13.5. Проникновение космических лучей в дипольное магнитное поле Земли.

Частицы с большей жесткостью R проникают глубже внутрь поля, и часть их достигает атмосферы. Вблизи полюсов, где поле ослаблено, проникают частицы в широком диапазоне R . Внутри поля возможно формирование замкнутых траекторий частиц (захват частиц).



190

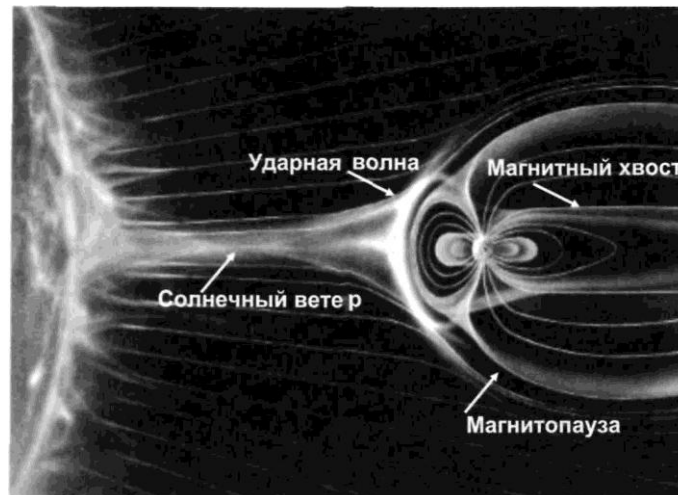
областями на тех же расстояниях r от центра Земли и уменьшается с расстоянием согласно закону r^3 . Напряженность магнитного поля определяется магнитным моментом нашей планеты. Интересно заметить, что величина магнитного момента медленно меняется со временем (это так называемые вековые вариации). В настоящее время эта величина уменьшается. Расчеты показывают, что к концу четвертого тысячелетия (в 3991 г.) Земля может остаться на какое-то время без магнитного поля. Еще одним интересным фактом является инверсия направления магнитного поля Земли (переполусовка): в течение последних 600 миллионов лет это происходило около 1000 раз! Причем время инверсии достаточно длительное: от тысячи до нескольких тысяч лет. В эти периоды времени поле практически исчезает и... Земля становится беззащитной от космических заряженных частиц. Пока вопрос о последствиях этого явления недостаточно изучен.

Теорий, касающихся возникновения магнитного поля, несколько: от вращающегося расплавленного шара до термоядерного реактора, наподобие солнечного в центре нашей планеты. Разнообразие теорий указывает на нерешенность данной проблемы.

Магнитное поле Земли существует не в вакууме, а в среде, наполненной потоками солнечной плазмы и межпланетным магнитным полем. Безусловно, они взаимодействуют друг с другом. Для солнечного вещества и магнитного поля Земля с ее собственным магнитным полем представляет собой реальную преграду: они вынуждены «обтекать» ее. В результате такого «обтекания» магнитное поле Земли, изначально имевшее дипольную форму, превращается в сложную структуру, названную магнитосферой (рис. 13.6).

Открытие магнитосферы мы обязаны исследованиям на спутниках Земли. Именно благодаря космическим экспериментам было обнаружено, что земное магнитное поле имеет полоидальную форму с направленной на Солнце лобовой частью, постоянно омываемой солнечным ветром. На ночной стороне Земли силовые линии вытягиваются в антисолнечном направлении, образуя хвост магнитосферы. Открытие его в

Рис. 13.6. Магнитосфера Земли — полость в космическом пространстве, формируемая воздействием солнечного ветра на магнитное поле Земли.



60-х годах американским физиком Н.Нессом сыграло в дальнейшем выдающуюся роль в космической физике. Ему отводится роль накопителя солнечной энергии, которая высвобождается при явлениях, названных магнитными бурями. Мы еще к ним вернемся, а пока проследим судьбу космических лучей, оказавшихся внутри магнитосферы Земли.

13.4. Земная ловушка для космических странников

В середине прошлого века магнитное поле Земли сыграло решающую роль в определении природы космического излучения. Безусловно, исследователей космических лучей с самого начала волновал вопрос о том, какая доля первичного космического излучения проходит через магнитное поле, и от каких факторов зависят условия проникновения частиц.

Подробно движение заряженных частиц в магнитном поле изучал В.Штермер. Именно он определил основные особен-

192

ности их траекторий в магнитном поле Земли (см. рис. 13.5). Им были определены основные закономерности вариаций потоков частиц с изменением широты, долготы и высоты точки их наблюдения. Эти расчеты помогли исследователям правильно интерпретировать экспериментальные данные.

Заряженные частицы, попадая внутрь магнитного поля Земли, испытывают воздействие силы Лоренца, зависящей от заряда частицы (Q), ее скорости (v) и величины напряженности магнитного поля (B). Сила Лоренца увеличивается как с увеличением Q , так и с увеличением произведения $v \cdot B$. Можно показать, что радиус кривизны траектории частицы с равными величинами mv/Q (m — масса частицы), называемой жесткостью (R), имеют одинаковые траектории. Ясно, что такими частицами могут быть любые — и протоны, и электроны, и ядра.

Именно поэтому в физике космических лучей удобно пользоваться величиной жесткости для описания движения частиц в магнитных полях. Таковы основные закономерности движения галактических космических лучей вблизи Земли.

Так, например, азимутальный эффект прохождения частиц разного знака через магнитное поле (напомним, что частицы разного знака, например, протоны и электроны имеют траектории, направленные в противоположные стороны) помог пионерам исследования космических лучей понять их природу, а именно, доказать, что они состоят из положительно заряженных частиц. Расчеты показывают, что на экватор могут проникать только частицы с энергией, превышающей 15-17 ГэВ.

Движение заряженных частиц в магнитном поле описывается уравнениями, в основе которых лежат законы Ньютона и сила Лоренца. Для вычисления траекторий частиц по этим уравнениям нужны модели магнитного поля и параметры первичных космических лучей. Мы видели (см. рис. 13.6), что магнитное поле Земли — магнитосфера — это существенно искаженный магнитный диполь под воздействием солнечного ветра. Поэтому траектории частиц в реальном поле далеки от плавной кривой для частиц, изображенной на рис. 13.5.

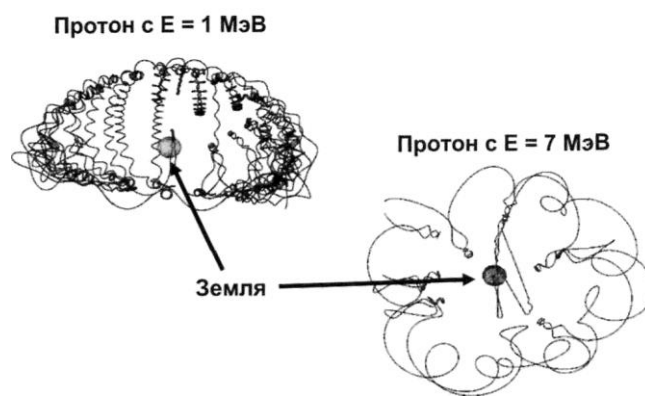
Панасюк М. И. Странники Вселенной или эхо Большого взрыва. Фрязино: «Век 2», 2005. - 272 с. - (Наука для всех).

Скорее, они напоминают запутанные спиралевидные линии с уменьшающимися радиусами кривизны по мере продвижения частицы к Земле (рис. 13.7). Однако в этой сложной картине можно выделить три основные закономерности.

Частицы с малой жесткостью будут отражаться от магнитной брони нашей Земли, частицы с большой жесткостью будут проникать внутрь поля, и они либо погибнут в атмосфере, либо уйдут вновь в космическое пространство. А для некоторой доли частиц, с промежуточными величинами жесткости, магнитное поле представляет собой ловушку - частицы окажутся захваченными в нем (см. рис. 13.5).

Магнитное поле Земли сыграло большую роль в определении природы аномальной компоненты космических лучей. Эксперимент, выполненный российско-американской коллаборацией в начале 90-х годов с использованием спутников Земли, по своей идее был достаточно прост. Для определения заряда частиц АКЛ - кислорода - использовались одновременные измерения частиц как на борту американского спутника IMP-8, летавшего за пределами магнитосферы, и нашего - «Космоса», орбита которого была расположена вблизи Земли на низких высотах.

Рис. 13.7. Реальные траектории протонов в магнитном поле Земли.



194

Частицы разного заряда имеют разные траектории в магнитном поле. Расчеты показали, что на орбиту «Космоса» могут проникнуть ионы кислорода лишь с зарядом $1+$ и не могут с большими зарядами.

Совместные эксперименты показали полную идентичность вариаций потоков АКЛ вне и внутри магнитосферы и позволили точно определить заряд частиц АКЛ. Он действительно оказался близким к $1+$. Это и послужило доказательством справедливости гипотезы Л. Фиска о происхождении АКЛ.

Но ведь есть еще солнечные космические лучи — энергичные частицы, ускоренные во время солнечных вспышек. Как они ведут себя в магнитном поле Земли?

Энергия этих частиц, как правило, значительно меньше, чем частиц ГКЛ (см. рис. 13.3). Поэтому для них весьма проблематичным выглядит возможность достижения низких высот или атмосферы Земли. Лишь во время экстремальных солнечных событий энергия этих частиц приближается к галактическим. Именно во время таких событий спутники на низких орбитах могут зарегистрировать частицы солнечного происхождения. Однако, для этих частиц (как, впрочем, и для всех других) в магнитном поле Земли существует «дыра», куда частицы могут проникать практически беспрепятственно. Это полярные области, так называемые северные и южные полярные шапки. Здесь магнитное поле ослаблено, и солнечные буревые частицы могут достичь границы атмосферы. Нетрудно сообразить, что в связи с этим явлением могут возникнуть проблемы с трансатлантическими авиалайнерами, залетающими на полярные широты. Потоки солнечных космических лучей достаточно большие, чтобы вызвать заметное увеличение доз радиации у экипажа и пассажиров этих самолетов. К этому вопросу мы вернемся позже, а пока зададимся другим: насколько картина проникновения космических лучей, нарисованная выше, стабильна во времени?

Ведь наша магнитная броня находится под постоянным воздействием давления солнечного ветра, которое иногда может испытывать существенные пространственные деформации. Представьте себе столкновение ударной волны плаз-

195

Панасюк М. И. Странники Вселенной или эхо Большого взрыва. Фрязино: «Век 2», 2005. - 272 с. - (Наука для всех).

менного облака - СМЕ, летящего со скоростью 2000 км/с и несущего в себе мегатонны солнечного вещества, с магнитосферой Земли. Безусловно, магнитное поле на дневной, обращенной к Солнцу, стороне сплющится и очень сильно. Эксперименты показывают, что в такие моменты времени дневная граница магнитосферы, обычно находящаяся на расстоянии около 10 радиусов Земли, может приблизиться к Земле на расстояние до 3-х радиусов! На ночной стороне также произойдет сильная деформация поля. Безусловно, для таких периодов времени расчеты проникновения космических лучей, выполненные для стационарных условий, когда солнечный ветер имеет скорость, близкую к 400 км/сек, становятся несостоятельными. Надо использовать модели возмущенной магнитосферы.

Что такое возмущенная магнитосфера? Оказывается, это не только та деформация поля, которая вызывается набегающим на Землю потоком солнечной плазмы. Как правило, после этого вблизи Земли происходит грандиозное явление, называемое магнитной бурей. Рассмотрение этого очень интересного геофизического явления выходит за рамки этой книги. Здесь лишь отметим, что магнитная буря - глобальное искажение магнитного поля Земли - обусловлена генерацией электрических токов внутри самой магнитосферы через некоторое время (минуты или десятки минут) после первоначального толчка облака солнечной плазмы. Именно электрические токи, связанные с движением заряженных частиц плазмы внутри магнитосферной полости, вызывают искажение естественного магнитного поля Земли. Почему? Из физики известно, что ток, текущий по проводнику, генерирует вокруг себя магнитное поле (его называют индукционным). То же самое происходит и в магнитосфере. Индукционное поле создается токами, и в области его локализации общее, суммарное магнитное поле, конечно, будет отличаться от естественного.

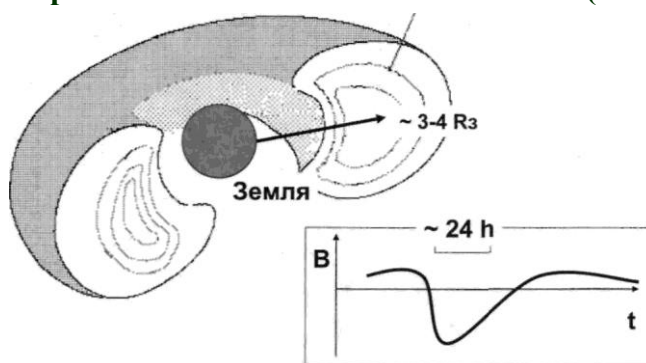
Где в магнитосфере текут эти токи? Оказывается, наиболее мощный ток во время магнитных бурь формируется вблизи Земли, на расстоянии 3-4-х радиусов от ее поверхности. Это так называемый «кольцевой ток». Он состоит как из частиц

196

солнечной плазмы, так и из земной — ионосферной (рис. 13.8). Кольцевой ток во время бурь генерирует мощное индукционное поле в этой области и вызывает уменьшение, депрессию, общего магнитного поля Земли на низких и средних широтах. Это и есть магнитная буря.

Но какое отношение магнитная буря имеет к космическим лучам? Самое непосредственное. Искривление магнитного поля, его ослабление на расстояниях менее 5-6 радиусов Земли (там, где расположен кольцевой ток) существенно меняет траектории космических лучей, проникающих в магнитосферу. Ранее упоминалось о заполнении высокоширотных областей солнечными энергичными частицами во время вспышек. Очень часто генерация частиц на Солнце (точнее, их приход к Земле) совпадает с магнитными бурями. Магнитное поле в эти моменты ослабевает и позволяет частицам проникать глубже в магнитосферу. Для «полярных» частиц это проявляется в виде смещения низкоширотной границы проникновения ближе к экватору: зона заполнения солнечными частицами полярных областей во время магнитных бурь становится более обширной, сдвигаясь к экватору (рис. 13.9).

Рис. 13.8. Пространственная структура кольцевого тока - плазменного тора, сформированного во время магнитной бури. Такой плазменный тор создает понижение напряженности магнитного поля Земли (нижняя панель).



197

Рис. 13.9. Изменение границ проникновения солнечных частиц: в условиях магнитной бури (возмущенная магнитосфера) границы смещаются к экватору.



Такова, в основном, картина проникновения галактических и солнечных космических лучей в магнитное поле Земли. Безусловно, частицы космических лучей, достигшие верхних границ атмосферы, не исчезают бесследно в ее недрах. Они оставляют «следы». Причем, как мы теперь понимаем, очень значимые как для среды обитания человека, технологий, созданных человеком, так и для самого человека, как, впрочем, и любых других биологических структур на Земле...

Глава 14. СЛЕДЫ СТРАННИКОВ

Слепому гневу солнечной короны Подвластны наши ливни и ветра, А к ливню ломит кости у вороны И оттого орет она с утра.

Ю. Левитанский

Потоки космических лучей достигают окрестности Земли и те, которым «повезет» пробиться через магнитное поле, достигают атмосферы. И здесь они не пропадают бесследно... Помните, у С.Лема: «В космосе ничего не пропадает». Ну что же, давайте посмотрим, так ли это.

14.1. Атмосферный след странников — климат сегодня

Взаимодействуя с атмосферой, космические лучи теряют свою энергию — почти 95%. Зададимся вопросом, какова доля этих потерь среди потерь энергии других видов излучений, падающих на Землю. Каковы эти виды излучений? В таблице 14.1 вы можете видеть основные виды солнечной радиации и их поверхностную энергию (энергию, падающую на единицу поверхности атмосферы).

Мы видим, что СКЛ и ГКЛ среди прочих видов космических излучений несут ничтожную долю энергии. Поэтому возникает естественный вопрос, способны ли космические лучи повлиять каким-либо образом на атмосферные процессы? Оказывается — да. Несмотря на их очень малую «энергетику», они играют очень существенную роль в развитии ряда атмосферных явлений, которые могут приводить и к климатическим изменениям.

199

Таблица 14.1. Основные виды солнечной радиации и космических лучей

Вид	Поверхностная энергия, Вт/м ²
Видимое и инфракр. излучение	1090
Ультрафиолетовое излучение	15,4
Рентгеновское излучение	10 ⁻¹
Солнечный ветер	3•10 ⁻⁴
СКЛ	2•10 ⁻³
ГКЛ	7•10 ⁻⁶
Общая радиация	1366

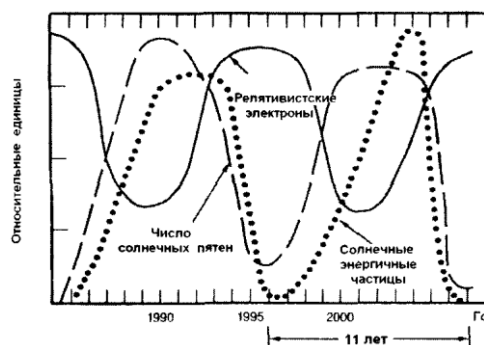
Каким образом вообще можно «нащупать» связь между таким сравнительно «маломощным» агентом космической среды, каким является поток космических лучей и атмосферными явлениями? Обратим внимание на то, что изменения общей радиации Солнца (см. таблицу 14.1) очень малы — не более 0,1%. Несмотря на существенные изменения солнечной активности в течение 11-летнего цикла и других более длительных и более коротких циклов, общий поток солнечного излучения остается постоянным! Однако изменения ГКЛ в течение 11-летнего цикла весьма значительны: ГКЛ подвергаются мощной солнечной модуляции (см. рис. 13.1), поток СКЛ и релятивистских электронов¹ также изменяется с течением солнечного цикла, но более сложным образом, чем ГКЛ (рис. 14.1). Вывод напрашивается сам собой: надо попытаться обнаружить 11-летнюю цикличность (или более долгопериодную) в атмосферных процессах и сравнить ее с солнечной.

Такие попытки были сделаны, и они обнадеживающие. Взгляните на рис. 14.2. На нем приведены изменения числа солнечных пятен (W), индекс, описывающий изменения геомагнитной активности aa (этот индекс пропорционален частоте магнитных бурь), а также изменение глобальной температуры атмосферы Земли (ΔT) за более, чем 100-летний период.

¹ Эти частицы появляются в атмосфере, «высыпаясь» из радиационных поясов Земли (об этом удивительном феномене будет рассказано в главе 15).

200

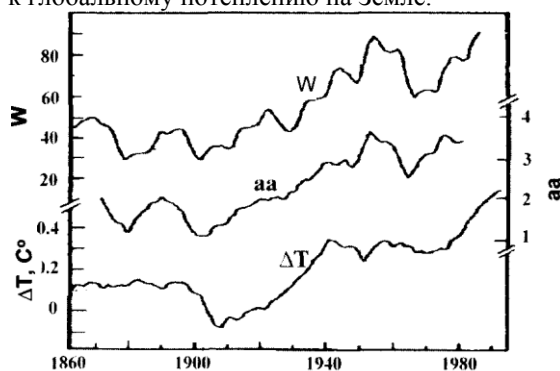
Рис. 14.1. Изменение потоков релятивистских электронов, высыпающихся из радиационных поясов, и солнечных космических лучей с изменением солнечной активности.



Наличие связи между изменением солнечной и геомагнитной активности с изменением температуры атмосферы очевидна - за последнее столетие наша температура не только немного подросла (на $\sim 0,5^\circ$) в соответствии с длиннопериодным трендом усиления активности Солнца. Иногда также удается проследить отдельные, «кратковременные» изменения

Рис. 14.2. Долговременные изменения солнечной, геомагнитной активности и глобальной температуры на Земле.

Положительный тренд солнечной активности приводит к отрицательному тренду (ослаблению) потоков ГКЛ (см. гл. 13) и, возможно, к глобальному потеплению на Земле.



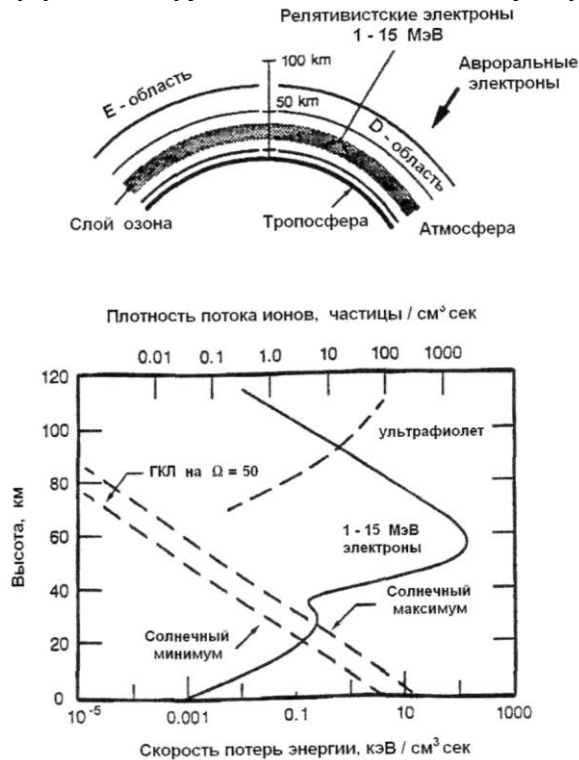
температуры, явно связанные либо с ослаблением, либо с усилением солнечной активности.

Какой физический механизм может быть ответственен за такую связь?

Прежде чем перейти к описанию этого механизма, обратимся к рис. 14.3, на котором изображена структура верхних слоев атмосферы и скорость потерь энергии различных ком-

Рис. 14.3. Потери энергии в атмосфере различных компонент космического излучения: ГКЛ, релятивистских электронов и ультрафиолета.

На высотах от ~20 до ~90 км ионизацию атмосферы создают электроны, а на меньших высотах - ГКЛ. Верхние слои атмосферы ионизируются в основном за счет ультрафиолета.



202

понент космического излучения: ГКЛ, релятивистских электронов радиационных поясов и ультрафиолета Солнца. Потери энергии частицами, проникающими в атмосферу, связаны с ионизацией — превращением нейтральных атомов и молекул воздуха в заряженные. Расчетные значения плотности потоков этих ионов также представлены на этом рисунке. Как мы увидим ниже, именно ионизация воздуха играет большую роль в искомой связи между космическими лучами и атмосферными явлениями.

Что же нам говорят кривые, изображенные на рис. 14.3? Первое: ультрафиолет Солнца ионизирует атмосферу лишь на больших высотах, а ГКЛ — основной фактор, приводящий к ионизации атмосферы на малых высотах (менее 20 км) как во время максимума, так и во время минимума солнечной активности. Ну, а в промежутке, высотах (~20-90 км), — релятивистские электроны, выпадающие из радиационного пояса в атмосферу, создают основную долю ионизированного воздуха. А теперь вспомним: где, на каких высотах сверкают молнии? Не выше нескольких километров над Землей. Вот к ним мы сейчас и обратимся.

14.2. Гром и молнии странников

Грозы — одно из самых захватывающих природных явлений. Подсчитано, что в течение суток наблюдается сотня тысяч гроз на нашей планете. Энерговыведения возникающих молниевых разрядов $\sim 5 \cdot 10^{19}$ Джоулей в сутки. Энергия же атмосферного циклона составляет всего 2% от этой величины, поэтому есть смысл рассматривать прямую физическую связь этих явлений. Ну, а молнии? Что заставляет «разряжаться» грозовые облака?

Одна из идей, активно разрабатываемая в настоящее время, состоит в том, что именно космические лучи и являются тем «спусковым крючком», который заставляет грозовые облака выстреливать молниевые разряды как в сторону поверхности Земли, так в других направлениях.

Панасюк М. И. Странники Вселенной или эхо Большого взрыва. Фрязино: «Век 2», 2005. - 272 с. - (Наука для всех).

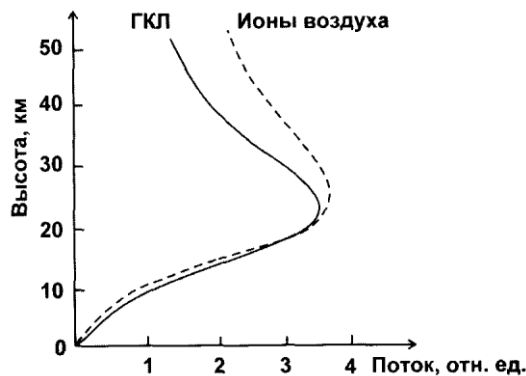
Теперь вспомним про широкие
203

атмосферные ливни: максимум генерации вторичных частиц в ливне приходится на высоты ~15-20км. А максимумы ШАЛ'ов от частицы с энергией в ПэВ-ной области достигают высот в несколько километров. Распределение частиц ливня по высоте характеризуется их высотным ходом (рис. 14.4). Кривая ионизации воздуха ведет себя аналогичным образом. Поэтому, есть смысл подозревать ГКЛ в качестве главного «виновника» ионизации атмосферы на этих высотах. Ну, а далее...

Далее процесс выглядит следующим образом...

Грозовые облака образуются в месте разделения атмосферных фронтов воздушных масс с различной температурой. Они заряжены. Источником их заряда являются космические лучи, ионизирующие воздух. Однако помимо космических лучей естественная радиоактивность создает свой вклад в ионизацию воздуха. Образовавшиеся ионы «прилипают» к аэрозолям воздуха и вместе с ними циркулируют вверх, обрастая все новыми и новыми ионами. Постепенно образуются капли, туман и, наконец, облака. Экспериментальные данные (см. рис.14.5). пожалуй, в пользу этой модели.

Рис. 14.4. Изменения потоков космических лучей и концентрации ионов в атмосфере в зависимости от высоты доказывают, что ионизация на малых высотах создается частицами ГКЛ.



204

Рис. 14.5. Изменения потока космических лучей и облачного покрова Земли.



Одна из теорий, приобретающая все большую и большую популярность (А. Гуревич и др.), свидетельствует в пользу того, что именно космические лучи ШАЛ и являются тем спусковым крючком, который вызывает появление молнии. Вторичные частицы ШАЛ, попавшие в район скопления грозовых облаков, вызывают локальную ионизацию, своего рода проводящий столб воздуха, вдоль которого и начинается разряд грозовых туч, несущих могучие электрические заряды.

Действительно, существуют данные, свидетельствующие о высокой корреляции плотности ионизации воздуха и облачного покрова Земли. Чем больше облаков, тем более вероятным становится проявление грозовой активности и молниевых разрядов. На рис. 14.6 показаны результаты, свидетельствующие в пользу рассматриваемой гипотезы: частота молний действительно коррелирует с изменением ионизации воздуха. Как мы видим из этих данных, ионизация воздуха и рост числа молниевых разрядов совпали с наступлением минимума цикла

Панасюк М. И. Странники Вселенной или эхо Большого взрыва. Фрязино: «Век 2», 2005. - 272 с. - (Наука для всех).

солнечной активности в 1995-1997 гг., когда поток ГКЛ достиг своей максимальной величины.

Становится понятным и наблюдающийся положительный тренд (см. рис. 14.2) глобальной температуры, связанный с многолетним уменьшением потока космических лучей (он

205

Рис. 14.6. Изменение ионизации воздуха и частоты молний.

уменьшается на несколько сотых процентов в год). Таким образом, наблюдающееся в последнюю сотню лет совсем небольшое, но заметное потепление на $0,5^\circ$ скорее всего связано не с увеличением энергии, созданной самим человеком, а вполне естественной причиной — ослаблением потока космических лучей, падающих на Землю.

Если у вышеприведенной модели так много сторонников, как, впрочем, и противников, то ее развитие выглядит и впрямь неожиданным... Но... вспомните слова Луи де Бройля: *«Прогресс науки постоянно тормозится тираническим влиянием некоторых концепций, которые, в конце концов, стали считаться догмами»*.

14.3. Климат до нашей эры и спиральные рукава Галактики

Итак, описанная выше модель демонстрирует, что космические лучи — немаловажный фактор земной погоды. Если это так, то история космических лучей в прошлом и в будущем может помочь установить тенденции в изменении климата на Земле. Отмеченная выше (см. рис. 14.2) связь между отрицательным трендом космических лучей и глобальным потеплением в этом смысле — обнадеживающий факт.

206

Идея еще более смелой «продвинутой» гипотезы высказана А.Неем в 1959 г., и недавно развита Н.Шавивом. Ее суть — в установлении связи между вариациями космических лучей и глобальными изменениями климата на Земле.

Наша Галактика состоит из спиральных рукавов (рис. 1.6), в которых плотность звезд больше и, следовательно, поток космических лучей также должен быть несколько больше, чем вне их. Это, кстати, показано по относительной концентрации изотопов калия в найденных железных метеоритах.

Этим способом было определено, что каждые 130-150 миллионов лет поток космических лучей в Солнечной системе увеличивается в 2,5 раза. Солнечная система, двигаясь в Галактике, пересекает спиральный рукав каждые 130 миллионов лет. Частота взрывов сверхновых в рукавах ожидается тоже выше, чем вне их. Поэтому следует ожидать появления климатической «волны» с периодом 130-150 миллионов лет в связи с вариациями потока космических лучей. Как это определить? Это тоже можно сделать по изотопному методу.

Рис. 14.7. Схема, иллюстрирующая взаимосвязь изменения потока космических лучей, связанного с попаданием Земли в спиральные рукава Галактики, с изменением глобальной температуры нашей планеты.



207

Результат? Данные по вариациям космических лучей и изменению температуры совпали. Прохождение Земли через спиральные рукава Галактики приводит к охлаждению нашей планеты — ледниковым периодам. Неправда ли, заманчивая физическая модель для климатологов? (см. рис. 14.7). Только, если отойти от догм.

В целом, если эта модель верна, она делает космические лучи «ответственным фактором» за климатические изменения на разных шкалах времени. На разных масштабах времени они выступают в качестве либо доминирующего фактора (скажем, при создании облачного покрова или гроз) или вторичного, например, при формировании климатических изменений, связанных с 11-летними циклами солнечной активности и сопутствующей модуляцией ГКЛ, а также, при прохождении Солнечной системы через спиральные рукава Галактики.

14.4. Солнечная бомбардировка атмосферы

Солнечные частицы время от времени бомбардируют Землю (см. главу 13). Особенно их много попадает в полярные шапки. Эти частицы проникают в атмосферу не столь глубоко, как ГКЛ, — всего до высот ~30-90 км. Именно на этих высотах следует ожидать повышенной ионизации воздуха. Есть ли связь между возрастанием потоков СКЛ и арктическими явлениями?

Исследования в этом направлении ведутся, и первые результаты указывают на наличие такой связи. Существует достоверный факт усиления циклонов в районе Гренландии с возрастанием потоков СКЛ с энергией более десятков МэВ. Само усиление циклонов связывается с температурными контрастами в обширных районах верхней атмосферы, возникшей вследствие образования здесь облачности, регулирующий уход излучения как от Земли, так и от атмосферы. Формирование же облачности коррелирует с ионизацией атмосферы (см. рис. 14.5), ответственность за которую несут и СКЛ.

208

Другим наблюдательным фактом в пользу данной модели может служить понижение уровня осадков во время Форбуш-понижений космических лучей. Опять-таки, и здесь, вслед за уменьшением интенсивности космических лучей после прихода ударной волны понижается степень облачности и в результате уровень осадков. С другой стороны, наблюдается увеличение уровня осадков после мощных солнечных вспышек, генерирующих ГэВ-ные протоны.

Другим примером глобальных атмосферных процессов, ответственность за которые несут космические лучи, является озоносфера Земли. Озон — молекула кислорода, состоящая из трех атомов кислорода — O_3 . В отличие от обычного кислорода, озон обладает резким запахом. Отсюда его название.

Этот слой предохраняет живые организмы на Земле от вредного ультрафиолетового излучения Солнца. Озонный слой над Землей расположен на высотах от 10 до 50 км с максимумом в области 20-25 км и является очень подвижной атмосферной субстанцией. Причины изменения концентрации озона над Землей широко обсуждаются. В качестве одной из таких причин называется техногенная — струи реактивных лайнеров, летающих на больших высотах, или выбросы фреона в атмосферу. Что касается фреона, то в ряде стран запретили выпуск бытовых холодильников с фреоном. Где здесь больше недобросовестной конкуренции между производителями холодильников, а где реально существующей и научно-обоснованной модели, предстоит еще окончательно разобраться...

Тем не менее, существуют объективные научные результаты в пользу «космических» причин вариаций озонного слоя. Опять-таки, к числу таких космических факторов относятся ГКЛ, СКЛ и релятивистские частицы — электроны, выпадающие из радиационных поясов.

Известно, что ионизация атомов азота (N) и кислорода (O) воздуха заряженными частицами — космическими лучами приводит к химическим реакциям между ионами и молекулами воздуха, которые, в свою очередь, образуют озonoактивные соединения типа NO и OH, разрушающие молекулы

209

озона. Именно эти озonoактивные соединения влияют на глобальное распределение озона в атмосфере.

Такая модель изменения концентрации озона поддается расчету. В качестве ее входных параметров надо взять энергетические спектры ГКЛ, СКЛ и других частиц и... запустить их в известную химическую среду атмосферы.

В результате можно получить скорости ионообразования в зависимости от географической точки наблюдения и высоты над Землей.

Безусловно, «запускать» частицы надо, зная пространственное распределение их потоков, которое зависит от жесткости геомагнитного обрезания. Так, для ГКЛ и СКЛ следует ожидать увеличения скорости ионизации по мере продвижения к высоким широтам. С другой стороны, широтная вариация изменяется и с высотой по мере ослабления магнитного поля. Солнечная активность в свою очередь накладывает свой отпечаток на временную картину изменений потоков космических лучей. В результате обнаруживается как широтная зависимость для распределения озона, так и его солнечно-циклическая вариация в полярных шапках, связанная с 11-летней модуляцией потока ГКЛ.

Гораздо более заметный эффект на озоносферу Земли производят частицы солнечных вспышек, достигающие атмосферы. Такие события не часты. В годы максимума солнечной активности наблюдается до 10 событий в год с максимальной энергией частиц более 10 МэВ. В годы минимума - не более одного в год. Чем больше энергия частиц, тем глубже проникают они в атмосферу. Таким образом, мощные вспышки оказывают влияние на процессы озонообразования в верхней атмосфере, которые по величине своего эффекта могут превышать вариации концентрации озона, связанные с изменением потока ГКЛ.

Однако существует еще один источник изменения концентрации озона —высыпающиеся из радиационных поясов релятивистские электроны — спорадические потоки частиц, длительностью до нескольких часов. Обычно они появляются во время магнитных возмущений. Замечено, что их всплес-

210

ки в радиационных поясах связаны с увеличением скорости солнечного ветра. Воздействие релятивистских электронов на озон может временами превышать эффект солнечных вспышек.

ГКЛ проникают глубже в атмосферу, чем все остальные компоненты космической радиации, поэтому их эффект будет наблюдаться на более низких высотах.

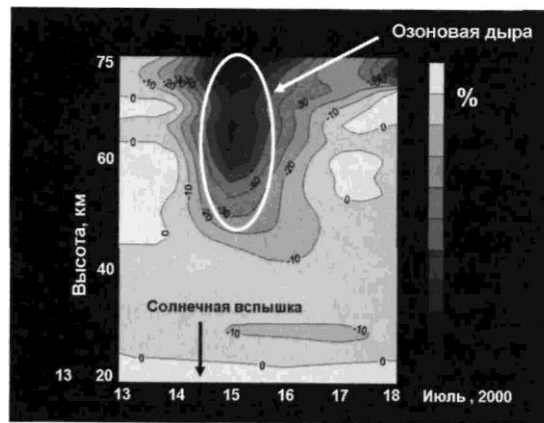
Солнечные протоны влияют на разрушение в стратосфере и мезосфере. Здесь же свое разрушительное действие оказывают и релятивистские электроны.

Каков же эффект бомбардировки космическими частицами озонового слоя?

Форбуш-понижение космических лучей вызывает увеличение концентрации озона на ~10%. Что же касается СКЛ, то можно привести следующие примеры.

В сентябре-октябре 1989 г., при одной из наиболее мощных вспышек прошлого столетия, понижение концентрации озона в высокоширотных областях Арктики и Антарктики достигло ~20%. Данные спутника UARS по измерению концентрации озона после сильной вспышки 14 июля 2000 г. (рис. 14.8) также

Рис. 14.8. Изменение концентрации озона после вспышки 14 июля 2000 г. — наиболее обширные и значительные изменения концентрации (формирование озонной дыры) произошли через несколько часов после вторжения солнечных частиц.



211

показало образование большой «озоновой дыры» после вторжения солнечных протонов.

Становится понятным, что космические частицы, наряду с солнечным ультрафиолетом и антропогенным воздействием (тот же фреон) на атмосферу, являются источником изменения озонового слоя Земли и, как показывают модельные оценки и наблюдения, - весьма существенным.

14.5. Салют космическим лучам

Заканчивая эту главу, хотелось бы остановиться еще на одном атмосферном явлении, обнаруженном недавно с борта космических кораблей. Это - свечение атмосферы в ее верхних слоях - кратковременные всплески в ультрафиолете или в красном свете. Они разнообразны по форме и поэтому получили различные названия — спрайтов — эльфов и голубых джетов. Но есть у них общее название - транзиентные световые явления.

Вслед за их обнаружением появилась и модель, позволяющая понять их суть. И здесь вновь не обошлось без космических лучей.

Во всем «виноваты» молнии и грозы. Оказалось, что в районе скопления грозовых облаков, где атмосферные электрические поля чрезвычайно велики, создаются условия для ускорения электронов окружающей среды. Более того, показано, что этот процесс носит лавинообразный характер. Электроны, стремясь покинуть область молниевых разрядов, становятся «убегающими». Их энергия может достигать 1 МэВ и более. Получается, что грозовая активность действует как импульсный ускоритель электронов с длительностью импульсов в наносекунды. Именно они и создают светящиеся разряды — электрические пробой воздуха — над грозовыми облаками, получившие название фей, проказников и голубых джетов (рис. 14.9).

Длительность самих оптических разрядов — от десятков до сотен миллисекунд, происходят они на высотах от 25 до 100 км и, возможно, несколько выше. Горизонтальный их

212

Рис. 14.9. Механизм формирования транзиентных атмосферных явлений при молниевом разряде.

Лавина убегающих электронов, ускоренная электрическим полем, создает атмосферный пробой выше грозовой облачности, вызывая кратковременное свечение атмосферы - спрайты.



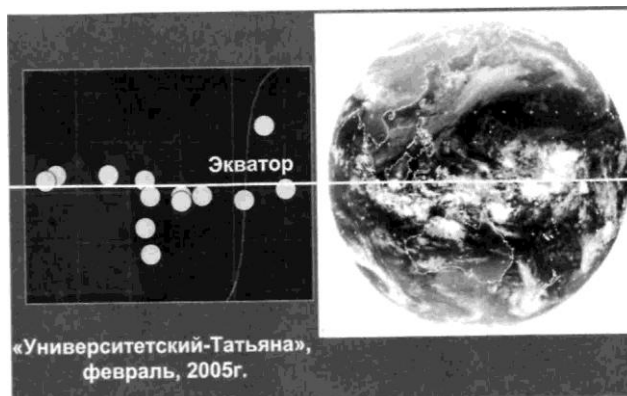
размер - 10-50 км, а занимаемый ими общий объем - более тысячи км³. Транзиентные оптические явления не надо путать с полярными сияниями. Это совершенно особый класс атмосферных явлений.

На рис. 14.10 вы можете видеть пространственное распределение таких транзиентных световых явлений, наблюдавшихся недавно, в феврале 2005 г., с борта спутника «Университетский-Татьяна» с помощью ультрафиолетового детектора. Все наблюдавшиеся всплески ультрафиолета длительностью в миллисекунды и энергией до 10¹²-10¹³ эрг (!) были расположены вблизи экваториальной плоскости. Именно здесь и располагалась область интенсивной облачности.

Так причем же здесь космические лучи? Оказывается, именно они создают «стартовые» условия для молниевых разрядов, а электроны ШАЛ являются исходными частицами для формирования лавин убегающих электронов, выстреливаемых из грозовых облаков (см. рис. 14.9). Атмосферные разряды могут возникнуть на разных высотах. Отсюда появление

213

Рис. 14.10. Пространственное распределение всплесков ультрафиолетового свечения по наблюдениям на спутнике «Университетский-Татьяна» и облачный покров в феврале 2005 г.



красных спрайтов или голубых джетов: в зависимости от высоты, из-за разного состава атмосферы, разряд будет вызывать различное свечение. Помимо оптического свечения из области пробоя «вырывается» и гамма-излучение. Такие всплески гамма-квантов, идущие от Земли, действительно наблюдались на космической обсерватории «*Compton*», а совсем недавно, на спутнике RHESSY.

Так Земля «салютует» космическим лучам, вторгшимся в ее атмосферу. Но наша планета и сама является, как теперь это понятно, источником космических лучей: электроны достаточно высоких энергий - 1 МэВ и более, а также гамма-кванты могут вырваться из атмосферы и уйти в космическое пространство.

Здесь уместно вспомнить Нобелевского лауреата Ч.Вильсона, который еще в 1900г. выдвинул идею, что большой остаточный ток в его электроскопе (см. главу 2) может быть связан с ускоренными в электрических полях грозовых облаков электронами. И хотя эта интерпретация была не применима к обнаруженному им явлению, сама идея через 100 лет получила свое развитие в открытых транзиентных световых явлениях...

Глава 15. РАДИОАКТИВНЫЙ КОСМОС

Не дорог талант, права та дорога Спасает ученого истинный путь.

Нгуен Чай

Космические лучи — галактические и солнечные — создают радиационную среду в космосе. Ее параметры, как мы видели, зависят не только от расстояния до Земли, от местоположения космического аппарата, но и от солнечной активности. Изменения радиационной обстановки, связанные с космическими лучами, нельзя не учитывать при конструировании спутников, межпланетных аппаратов и орбитальных станций. Однако присутствием только космических лучей не исчерпываются все параметры радиационной космической среды.

Открытие, сделанное в начале космических исследований советскими и американскими учеными, осуществлявшими эксперименты на первых искусственных спутниках Земли, существенно изменило наши представления о космическом пространстве.

15.1. Космический «ТОКАМАК».

На 1-м советском искусственном спутнике Земли не было никакой научной аппаратуры, за исключением, пожалуй, самого радиопередатчика, посылавшего первые рукотворные сигналы с орбиты. Радиоволны передатчика «просвечивали» ионосферу, предоставляя сведения о распределении плотности ионизированной оболочки Земли.

Но уже на 2-м советском спутнике стояла специальная аппаратура (это были простые газоразрядные счетчики) для

215

изучения космических лучей. Эти приборы создал Сергей Верное с сотрудниками из Московского университета. По сути, это была первая в мире научная аппаратура, запущенная человеком в космическое пространство. Какие задачи выполняла эта аппаратура?

Будучи «космиком», С.Вернов, естественно, поставил задачу исследования космических лучей за пределами атмосферы. Что можно было ожидать из этих измерений?

Поток космических лучей должен возрасти по мере удаления от Земли из-за наличия магнитного поля. Помимо этого, должна наблюдаться широтная зависимость потока: вблизи полюсов его величина должна быть больше, чем в районе экватора. Должен меняться и состав космических лучей, т.к. измерения проводятся вне атмосферы, где нет вторичных частиц. Пожалуй, все...

Спутник был запущен в канун праздника, дня Революции. И уже на первых витках он зарегистрировал нечто необычное — поток частиц не следовал широтной зависимости, испытывая сильные флуктуации. Что бы это могло быть? «Взглянув» на Солнце, ученые обнаружили проявление солнечной активности — как раз в это время наблюдалась вспышка. Естественно было предположить вторжение солнечных частиц в окрестности Земли (рис. 15.1).

Вслед за С.Верновым, американский ученый Дж. Ван-Аллен для изучения космических лучей установил на первом американском искусственном спутнике Земли «Эксплорер-1» такой же газоразрядный детектор, как и на 2-м советском спутнике. Каково же было удивление американских ученых, когда они, взглянув на первую полученную информацию, обнаружили, что их счетчик «захлебывался» от большого потока частиц. Один из сотрудников Дж.Ван-Аллена, Э.Рэй даже воскликнул: «Боже мой, ведь космос радиоактивен!» (рис. 15.2).

Американские специалисты поняли, что они обнаружили что-то необычное. Интерпретация последовала довольно быстро: это авроральные частицы, которые приходят от Солнца и внедряются в высокоширотные области, вызывая полярные сияния.

216

Рис. 15.1. Скорость счета газоразрядного детектора, установленного на 2-м советском спутнике (справа вверху).

Всплески потоков радиации, превышающие ожидаемую широтную зависимость космических лучей, были приняты за солнечные частицы, пришедшие от вспышки. На самом деле, это были частицы, выпадающие из радиационных поясов Земли.



Это была настоящая драма первооткрывателей космоса. И С.Вернов и Дж.Ван-Аллен столкнулись, на самом деле, с совершенно новым природным явлением — захваченными в магнитное поле Земли потоками заряженных частиц большой энергии. Позднее это явление было названо радиационными поясами. Однако в первых экспериментах они этого не осознали.

Понимание нового явления пришло немного позднее, спустя несколько месяцев, когда был запущен 3-й советский спутник с обширным набором экспериментальной аппаратуры, позволивший детально исследовать пространственные распределения частиц на больших высотах; когда Ф.Зингер (ученый не из группы Дж. Ван-Аллена) опубликовал статью, правильно интерпретировавшую американские результаты и когда появился первый механизм для объяснения существования гигантской ловушки для заряженных частиц.

217

Рис. 15.2. Сотрудники Дж.Ван-Аллена, увидевшие первые данные прибора, установленного на спутнике «Эксплорер-1» и «захлебывавшегося» от огромных потоков радиации...

Последовавшая за этим интерпретация явления - наблюдение низкоэнергичных частиц, вызывающих полярные сияния, — оказалась неверной. Это были частицы, захваченные магнитным полем — радиационные пояса.



Так часто бывает в науке, когда изначальная цепь эксперимента приводит совершенно к другим результатам. А интерпретация полученных результатов порой находится под прессом существующих представлений.

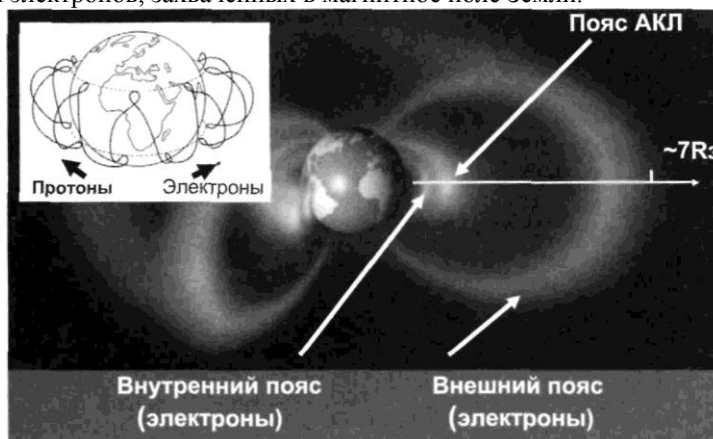
Подробное рассмотрение радиационных поясов выходит за рамки данной книги. Здесь мы ограничимся лишь необходимыми для дальнейшего изложения общими сведениями.

Что же такое радиационные пояса Земли? Гигантский тор заряженных частиц (рис. 15.3) с энергиями от самых малых — «плазменных» — в десятки-сотни кэВ, до энергий в ГэВ'ы, т.е. сопоставимых с энергиями космических лучей. Частицы радиационных поясов, захваченные в магнитной ловушке, совершают 3 характерных вида движений (рис. 15.4), в результате которых собственно и «рождаются» их долгоживущие потоки. Это вращательное движение частиц вокруг магнитной силовой линии (ларморовское движение с радиусом, определяемым жесткостью частиц), колебания вдоль магнитной силовой линии и азимутальный дрейф вокруг Земли. Времена

218

Рис. 15.3. Структура внутреннего и внешнего электронного радиационного пояса Земли.

Также показано расположение пояса, состоящего из аномальных космических лучей. Пространственная протяженность радиационных поясов в плоскости экватора от $1R_3$ до $7R_3$. На врезке показаны дрейфовые траектории протонов и электронов, захваченных в магнитное поле Земли.



этих видов движения сильно отличаются: от долей секунды для ларморовского движения — до часа для азимутального дрейфа.

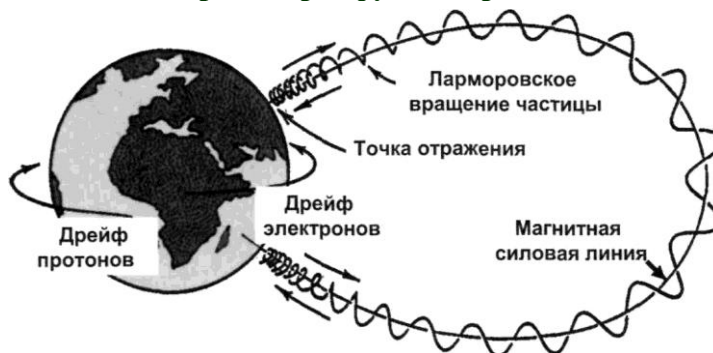
Что напоминает эта картина?

...Вскоре после успешной реализации атомного проекта и у нас в СССР, и в США ученые приступили к решению проблемы создания термоядерного реактора. Для этого надо было создать условия для устойчивого удержания плазмы. Это можно сделать с помощью магнитного поля. Было предложено много различных видов магнитных ловушек, среди них — «ТОКАМАК». До сих пор термоядерный реактор не

реализован. Проблема удержания плазмы оказалась более сложной, чем это представлялось в начале исследований... Природа создала то, что не удалось пока сделать человеку. Внутри магнитного поля Земли реализуются условия для устойчивого захвата заряженных частиц.

219

Рис. 15.4. Основные виды движений заряженных частиц радиационных поясов: ларморовское (вращательное) — вокруг магнитной силовой линии; колебательное — вдоль поля с отражением на малых высотах и азимутальный дрейф частиц вокруг Земли (протоны и электроны дрейфуют в противоположные стороны).



15.2. Родители пленников магнитной ловушки

Откуда же появились частицы радиационных поясов?

Безусловно, космические лучи ответственны за появление частиц радиационных поясов, но сами они не могут быть захваченными, по крайней мере, в течение длительного времени. Здесь уместно отметить, что «время жизни» протонов с энергиями в сотни МэВ и более в самой ближней к Земле области поясов достигает сотен лет!

Оказывается, космические лучи (протоны), достигая атмосферы и взаимодействуя с ней, образуют вторичные частицы

— продукты ядерных реакций. Среди них есть нейтроны, часть которых летит в космическое пространство. Нейтроны

— нестабильные частицы. Их время жизни ~15мин. Они распадаются по уже известной читателю схеме:

$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$ Как мы видим, продукт распада - заряженные частицы

220

— протоны и электроны. Они и являются частицами, пополняющими радиационный пояс.

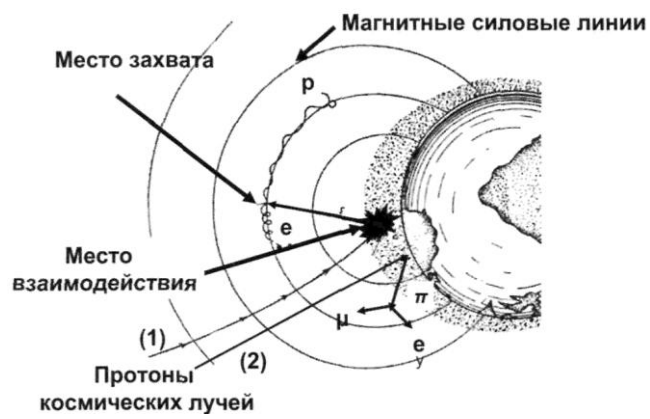
Этот был первый механизм образования поясов, который предложили С.Вернов и А. Лебединский сразу после их открытия в 1958 г. (см. рис. 15.5).

Однако, оказалось, что этот механизм, связанный с генерацией нейтронов (нейтронов альbedo) космическими лучами, не может обеспечить заполнения частицами всех радиационных поясов.

Необходимо было найти другие. Конечно, взоры исследователей обратились к солнечному ветру — постоянному потоку плазмы в межпланетной среде. Но... эти частицы, во-первых, каким-то образом должны проникнуть внутрь магнитосферы, а во-вторых — значительно увеличить свою энергию. Ведь энергия частиц солнечной плазмы (~1 кэВ) значительно меньше энергии частиц радиационных поясов. Вкратце, картина

Рис. 15.5 Механизмы образования протонами ГКЛ электронов с энергиями до сотен кэВ и протонов в сотни МэВ в радиационных поясах (1) и высокоэнергичных электронов в сотни МэВ под радиационными поясами (2).

В обоих случаях частицы создаются в результате ядерных реакций космических лучей с атмосферой. Новые частицы радиационных поясов являются продуктом распада нейтронов, а электроны под поясами образуются в результате распада пи-мезонов.



221

заполнения магнитосферы частицами солнечного ветра и их ускорения выглядит следующим образом.

Та доля частиц солнечного ветра, которая «сумела просочиться» внутрь магнитного поля, заполняет внешние области: между ударной волной и границей магнитосферы, хвост магнитосферы, полярные области... (см. рис. 13.6).

Особенно активную роль в пополнении частицами радиационных поясов выполняет хвост магнитосферы. Во время магнитных бурь именно здесь происходят мощные деформации магнитного поля, приводящие к генерации индукционных электрических полей, которые и ускоряют частицы солнечной плазмы. Часть этих частиц, уже ускоренных в хвосте, достигает внешних границ радиационного пояса, и здесь начинается другой процесс, процесс их переноса внутрь, в направлении Земли. «Движущей силой» этого процесса также является солнечный ветер, вернее, его флуктуации, как крупномасштабные (типа СМЕ), так и более слабые, практически постоянно существующие в межпланетной среде. Флуктуации солнечного ветра создают колебания магнитного поля Земли, которые, собственно, и «загоняют» частицы внутрь магнитной ловушки. В процессе их переноса к Земле, они еще больше увеличивают свою энергию.

Итак, уже два источника — космические лучи высокой энергии и солнечная плазма могут пополнять радиационные пояса.

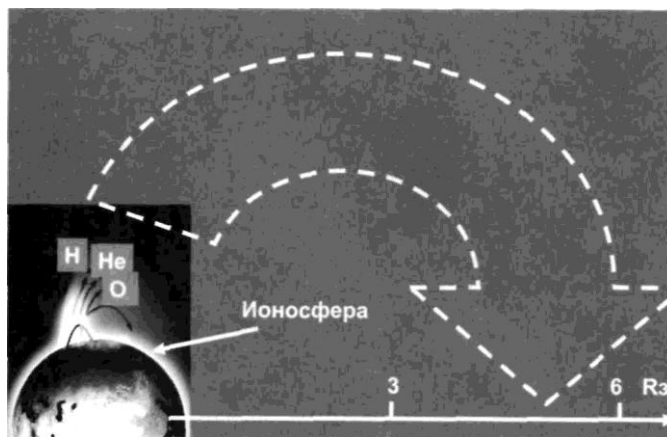
Но это еще не все источники.

Велико было удивление ученых в начале 70-х годов, когда среди частиц во внутренней магнитосфере они увидели частицы земного происхождения — ионосферные! Как отличили эти частицы от солнечных? С помощью приборов, которые разделяют частицы по их энергиям, массе и заряду. В ходе экспериментов на спутниках было обнаружено, что ионосфера «фонтанирует» в окружающее пространство кислород (рис. 15.6). Причем этот кислород имеет заряд $1+$ — он слабоионизирован, в отличие от солнечного, который полностью, как говорят, «ободран» — у него отсутствуют электронные оболочки. Солнечный кислород (по существу, это голые ядра)

222

Рис. 15.6. Ионосферная плазма — источник радиационных поясов.

Однократно заряженные ионы инжектируются и ускоряются по время магнитных бурь из ионосферы, распространяясь вдоль магнитных силовых линий пополняя, тем самым, кольцевой ток.



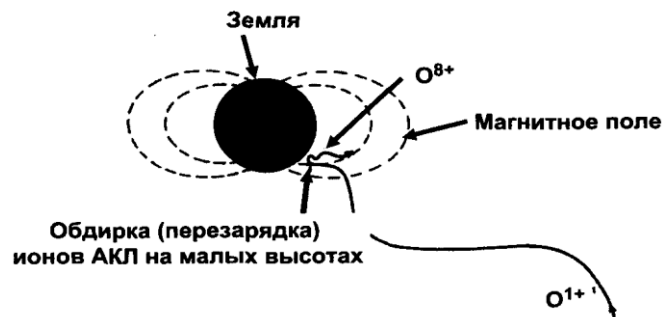
имеет заряд $8+$. Так отличили солнечное вещество от земного. Таким образом, был обнаружен еще один источник частиц радиационных поясов - ионосферный.

А в начале 90-х годов нашли еще один - межзвездное вещество. Уже упоминалось об аномальной компоненте космических лучей. Эти частицы (кислород, гелий, неон и др.) с энергией $\sim 10-20$ МэВ/нукл имеют заряд, близкий к $1+$ и, следовательно, большую жесткость. Такие частицы не могут захватываться магнитной ловушкой: слишком велик у них радиус кривизны траекторий в магнитном поле. Однако был предложен механизм, который получил экспериментальные подтверждения, обеспечивающий заполнение радиационного пояса частицами межзвездного вещества.

Этот механизм состоит в следующем (рис. 15.7). АКЛ проникают в глубь магнитосферы и в верхних слоях атмосферы происходит их перезарядка на нейтральных атомах. В результате их заряд увеличивается, радиус кривизны траектории резко уменьшается и, тем самым,

обеспечиваются условия для устойчивого захвата. Такой пояс действительно был
223

Рис. 15.7. Механизм формирования захваченных частиц аномальных космических лучей представляет собой проникновения однократно заряженных ионов АКЛ внутрь магнитного поля, их перезарядку на атомах атмосферы - и последующий захват в магнитное поле.



обнаружен в ходе отечественных экспериментов на спутниках серии «Космос». Оказалось (см. рис. 15.3), что он располагается на расстояниях, немного превышающих 2 радиуса Земли (R_3) от ее поверхности (в плоскости экватора).

Однако этим механизмом не ограничивается роль галактических космических лучей в формировании радиационного окружения Земли. Дело в том, что первичная компонента ГКЛ, взаимодействуя с атмосферой, генерирует поток вторичных нейтральных пи-мезонов (π^0). Эти частицы короткоживущие и распадаются на мю-мезоны (μ) и электроны. Некоторая часть электронов может выходить вверх, в открытый космос, создавая альбедный поток (см. рис. 15.5). Расчеты показывают, что энергия этих электронов достигает сотен МэВ, и они создают на малых высотах своеобразный ореол альбедных частиц вокруг Земли, внося дополнительный вклад в радиационное окружение Земли.

В целом, радиационные пояса заполняют довольно обширную область вокруг Земли — их внешняя граница расположена на расстоянии до $\sim 7R_3$ (рис. 15.3). Внешняя зона поясов заполнена менее энергичными частицами по сравнению с внутренней. Именно во внутренней зоне, на расстоянии менее

224

$2,5R_3$ обнаружены протоны с энергиями до 1 ГэВ. Во внешней зоне энергии протонов не превышают МэВ'ов. Магнитная ловушка, помимо протонов, заполнена другими ядрами и электронами. Энергия электронов в поясах достигает релятивистских значений — несколько МэВ.

Мы познакомились с радиационными поясами Земли. История их открытия и последующие исследования — яркий пример успешного решения научной проблемы, во многом базирующейся на физике плазмы. Этому значительно способствовали интеллектуальный потенциал ученых, полученный в ходе реализации атомного проекта и начального периода термоядерных исследований, а также космические исследования, которые были особенно интенсивными в начальном периоде космической эры.

15.3. Нейтронный ореол Земли

Несмотря на свою короткую жизнь, нейтроны, безусловно, присутствуют в межзвездной среде, Галактике и в Солнечной системе. Но зарегистрировать мы можем лишь те, которые рождаются близко от нас. Где?

Солнце — мощный источник многих элементарных частиц, ядер и, конечно, нейтронов. Последние образуются в результате ядерных реакций СКЛ с веществом солнечной короны. Однако наблюдать нейтроны от Солнца достаточно трудно. В первую очередь, дело в том, что из-за короткого времени жизни лишь небольшая часть их достигает Земли. А те, которые все же попадают в атмосферу, начинают взаимодействовать с ядрами воздуха, превращаясь вновь в другие частицы. И все же шансы их зарегистрировать специальными детекторами есть.

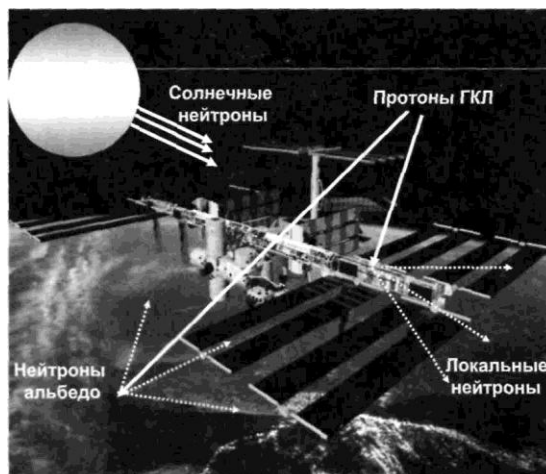
Во время мощных солнечных событий самые энергичные электроны могут достичь окрестности Земли, и приборы на спутниках могут их зарегистрировать. Но приборы должны быть чувствительны к нейтронам приходящим именно от Солнца. А этому мешает сам спутник, точнее те конструкционные материалы, из которого он построен. Оказывается, чем

225

Панасюк М. И. Странники Вселенной или эхо Большого взрыва. Фрязино: «Век 2», 2005. - 272 с. - (Наука для всех).

тяжелее (массивнее) спутник, тем больше образуется нейтронов местного, локального происхождения, как результат взаимодействия заряженных космических частиц с материалом, из которого сделан аппарат. Поэтому нейтронный детектор будет «захлебываться» от избытка лишних, локальных нейтронов, рожденных самим спутником. Однако, если поток солнечных нейтронов достаточно мощный и эксперимент проводится на достаточно легком спутнике, шанс зарегистрировать солнечные частицы есть. И это было сделано уже много раз. Солнечные нейтроны несут важную информацию о генерации частиц на Солнце. Ведь они, будучи нейтральными, не следуют вдоль спиралей Архимеда межпланетного магнитного поля как заряженные частицы, а летят по прямым траекториям. Этот путь требует меньше времени и может дать информацию ученым о начале и месте инжекции частиц на Солнце, а заодно и сведения о параметрах вещества солнечной короны, где они сами и рождаются.

Рис. 15.8. Нейтронные потоки в ближнем космосе состоят из трех компонент: нейтронов от солнечных вспышек, а также локальных и альбедных нейтронов, рождающихся в результате взаимодействий ГКЛ соответственно с материалом космического корабля и атомами азота и кислорода атмосферы.



А есть ли шансы зарегистрировать солнечные нейтроны на Земле? Шансов еще меньше, чем в космосе. Этому мешает атмосфера, в толще которой должны погибнуть эти частицы. Однако во время очень мощных извержений (так, например, было в конце октября 2003 г.) на наземной станции, обращенной к Солнцу, в районе полудня был зарегистрирован сигнал о приходе солнечных нейтронов с очень высокой (~100 МэВ) энергией. В этом был элемент везения: если бы извержение произошло раньше или позже, солнечным нейтронам пришлось бы преодолевать значительно большую толщу атмосферы, и они вряд ли достигли бы поверхности Земли. Именно поэтому события, связанные с приходом солнечных нейтронов, чрезвычайно трудно экспериментально исследовать.

Уже рассказывалось об альбедных нейтронах в окружающей космической среде. Это те частицы, которые являются продуктами ядерных реакций космических лучей с атмосферой. Они вылетают из атмосферы и создают дополнительный радиационный «фон» в ближнем космосе.

Поэтому космический аппарат, запущенный в ближний космос, испытывает тройную радиационную нагрузку от нейтронов. Среди них локальные, альбедные, а иногда, и солнечные (рис. 15.8)

Глава 16. РАДИАЦИОННЫЕ БУРИ В КОСМОСЕ

Небо и земля разделены, но они делают одно дело.

Конфуций

Присутствие радиации в космосе создает немало проблем не только конструкторам космических аппаратов, но и космонавтам, летающим на орбитальных станциях и космических кораблях.

Еще на заре космических полетов создатели спутников столкнулись с проблемой живучести солнечных батарей. Оказалось, что под действием интенсивных потоков частиц радиационных поясов они довольно быстро деградировали: их электрический ток, необходимый для питания бортовых систем, уменьшался. Пришлось их защищать от радиации — предохранять слой кремния стеклом, поглощающим большую долю радиации. Так начиналась эра «борьбы» с космической радиацией. Впоследствии ученые, изучая ее, узнали довольно много нового и, пожалуй, даже неожиданного...

16.1. Радиация на ближних подступах к Земле

Перед первым полетом в космос человека, вопросы радиационной безопасности тщательно изучались. В космосе были проведены эксперименты по определению доз радиации на предполагаемых орбитах. Оказалось, что на орбитах 300-400 км (именно на таких орбитах летают пилотируемые космические корабли) потоки радиации сравнительно

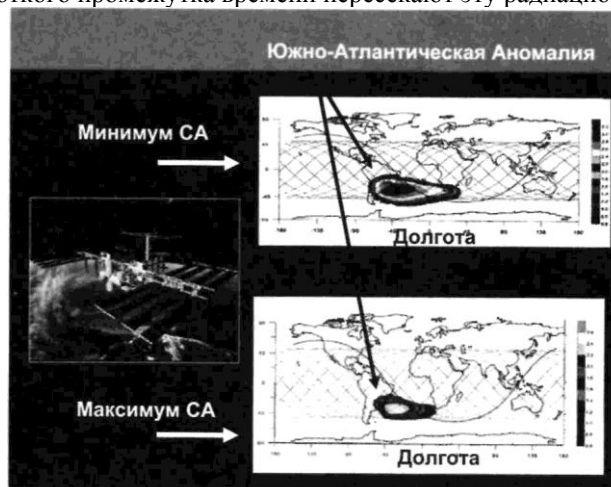
228

невелики. Так, по данным приборов, установленных внутри орбитальной станции «Мир», дозы радиации изменялись в довольно широких пределах: от 100 и до 800 мкГрей (10^{-6} Гр) в сутки, что является допустимой величиной для человека, но все же больше, чем получает персонал атомных станций в нормальных условиях.

Эта величина создается, в основном, за счет частиц радиационных поясов, причем лишь в одном месте: в районе Южной Атлантики. Именно здесь радиационные пояса «провисают» над Землей из-за наличия глубоко под Землей магнитной аномалии. Космические корабли, летающие над Землей, как бы «чиркают» пояса радиации в течение очень непродолжительного времени (рис. 16.1) на витках, проходящих район аномалии. На других витках потоки радиации отсутствуют и не создают хлопот участникам космических экспедиций.

Рис. 16.1. Пространственные распределения радиации в районе Южно-Атлантической магнитной аномалии. Дозы радиации увеличиваются в минимуме цикла солнечной активности.

На рисунке приводится набор витков орбиты Международной космической станции, которые, как это видно, лишь в течение короткого промежутка времени пересекают эту радиационно-опасную область.



229

Однако впоследствии оказалось, что район радиационной аномалии «дышит». Периодичность дыхания аномалии -изменение потоков частиц — соответствует циклу солнечной активности: в минимуме активности потоки увеличиваются, а в максимуме, наоборот, уменьшаются. Казалось бы, парадокс? В годы, когда наше светило с особой щедростью извергает в пространство мощные потоки солнечной плазмы и частиц, радиационная аномалия... затихает. Это — так. И происходит это за счет поглощения частиц атмосферой, которая нагревается и охлаждается в соответствии с активностью Солнца. В годы максимума она разогревается, плотность ее частиц на орбите пилотируемых кораблей увеличивается. В эти периоды частицы радиационных поясов начинают все чаще и чаще сталкиваться с молекулами, атомами атмосферы и терять свою энергию. Они прекращают свою жизнь как энергичные частицы радиационных поясов. В годы минимума наблюдается обратная картина: потоки и дозы радиации значительно увеличиваются.

Однако магнитная аномалия в районе Южной Атлантики — не единственная радиационная «напасть» для космонавтов. Солнечные вспышки, генерирующие подчас весьма энергичные частицы (вспомнили? — вплоть до ГэВ'ов), могут создать большие сложности для полетов космонавтов. Какая доза радиации может быть получена космонавтом в случае прихода солнечных частиц к Земле — во многом воля случая. Эта величина определяется, в основном, двумя факторами: степенью искажения дипольного магнитного поля Земли во время магнитных бурь и параметрами орбиты космического аппарата в течение солнечного события. Депрессия магнитного поля во время бурь уменьшает минимальный порог обрезания по жесткости СКЛ, позволяя им проникать на низкие широты. С другой стороны, влияние географического положения космического аппарата — действительно немаловажный фактор. Экипажу может повезти, если орбиты в момент вторжения СКЛ не проходят опасных высокоширотных участков.

Выше рассказано о возможной опасности, которую может вызвать космическая радиация. Насколько защищены от

230

радиации космические станции, спутники и сами космонавты? Давайте рассмотрим эту проблему на примере некоторых наиболее сильных проявлений солнечной активности.

Одно из наиболее мощных протонных извержений — радиационная буря солнечных извержений, вызвавшая радиационную бурю вблизи Земли, произошло совсем недавно — 20 января 2005 г. Аналогичное по мощности солнечное извержение было 16 лет назад, в октябре 1989 г. Множество протонов с энергиями, превышающими сотни МэВ, достигло магнитосферы Земли.

Кстати, такие протоны способны преодолеть защиту толщиной, эквивалентной примерно 11 сантиметрам воды. Скафандр космонавта — тоньше. Биологи считают, что если в это время космонавты оказались бы вне Международной космической станции, то, безусловно, воздействие радиации сказалось бы на здоровье космонавтов. Но они находились внутри нее.

Защита МКС достаточно велика, чтобы обезопасить экипаж от неблагоприятного воздействия радиации во многих случаях. Так было и во время данного события.

Как показали измерения с помощью радиационных дозиметров, «схваченная» космонавтами доза радиации не превышала той дозы, которую человек получает при обычном рентгеновском обследовании. Космонавты МКС получили 0,01 Гр или ~ 0,01 Зиверт (для биологических объектов целесообразней использовать биологические эквиваленты доз в единицах, учитывающих различие в степени поглощения различных видов излучений в биологических тканях (см. словарь терминов в конце книги)).

Правда, столь малые дозы связаны и с тем, что, как об этом написано ранее, станция находилась на «магнитно-защищенных» витках, что может случиться не всегда.

Несколько Зивертов — опасная доза. Однако и эта доза, если она получена человеком не мгновенно, а постепенно, может и не привести к неблагоприятному исходу. К тому же, не надо забывать о возможной медицинской помощи в случае радиационного заболевания.

231

В таблице 1 приводятся значения доз радиации, приводящих к возникновению определенных радиационных эффектов.

Таблица 16.1. Таблица радиационных рисков

Доза,Зв	Вероятные эффекты
0-0,25	Нет эффекта, за исключением умеренных изменений в крови
0,25-1	Радиационные заболевания у 5-10% облученных людей
1-1,5	Радиационные заболевания у ~25% облученных людей
1,5-2	Радиационные заболевания у ~50% облученных людей
2-3,5	Радиационные заболевания почти у всех людей, ~20% с летальным исходом
4	50% летальных исходов
7	~100% летальных исходов

Можно заключить, что радиационная среда на высотах орбитальных станций при самых неблагоприятных гелио-физических условиях вряд ли может привести к последней черте — дозам в несколько Зв.

Теперь посмотрим какова радиационная обстановка подальше от нашей планеты.

16.2. Радиационные бури на окраине околоземного пространства

До сих пор мы рассматривали относительно малые высоты над Землей. Гораздо более опасными с точки зрения радиационного влияния оказываются высоты выше «пилотируемых» орбит. Здесь космонавты сейчас не летают. Но эта область, вплоть до $7R_3$ очень сильно «населена» автома-

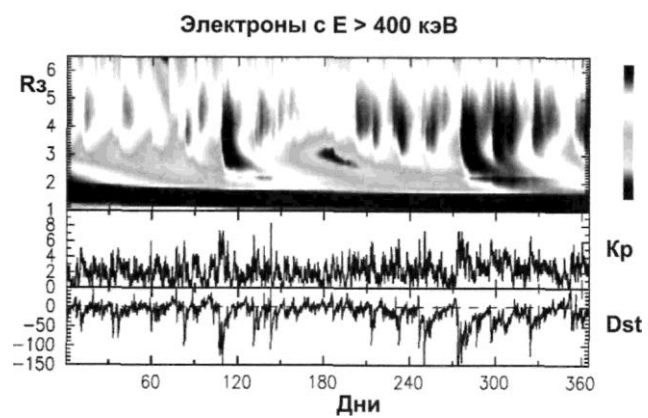
232

тически космическими аппаратами. Как они «выживают»? В основном за счет применения специальной защиты для электроники, использования материалов наименее чувствительных к радиации. Однако, проблема радиационной безопасности автоматических аппаратов все же существует. Перед конструкторами стоит задача создания нового поколения околоземных спутников со сроком активного существования до 15 лет. Согласитесь, это — немало, больше, чем солнечный цикл. Такой аппарат должен в полной мере испытать на себе воздействие космических радиационных бурь.

Помимо вторжения СКЛ, радиационные бури создают и частицы радиационных поясов. Потoki последних существенно меняются во время магнитных бурь и солнечных возмущений. В качестве примера можно привести поведение релятивистских электронов в радиационных поясах. На рис. 16.2 показано «поведение» электронов во всей области поясов в течение одного года. Согласитесь, амплитуды их вариаций

Рис. 16.2. Изменения потоков электронов с энергией >400 кэВ в радиационных поясах в течение 1 года.

Оттенки серо-черного цвета демонстрируют изменение потока частиц: чем чернее оттенок, тем больше поток частиц. Видно, что наибольшие потоки частиц наблюдаются во время магнитных бурь. В эти моменты времени они также заполняют зазор между внутренней и внешней зонами радиации на расстояниях $\sim 2,5 R_3$.



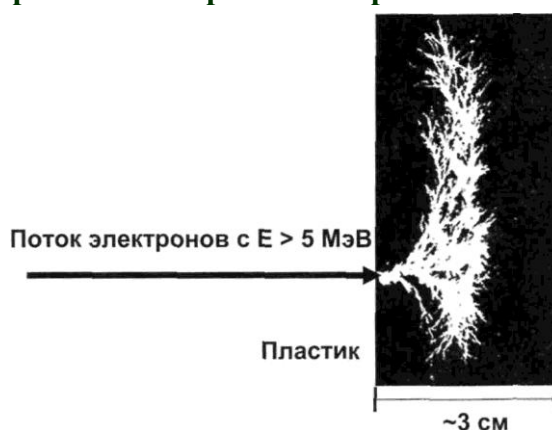
233

во время магнитных бурь очень значительны как по интенсивности, так и по пространству. Вы можете видеть, что во время бурь потоки частиц «сползают» ближе к Земле, заполняя ранее пустовавшие области захваченной радиации.

Обнаружено, что их потоки сильно увеличиваются во время магнитных бурь и в периоды увеличения скорости солнечного ветра. Они создают реальную угрозу спутникам, находящимся в зоне всплесков. Подчас это заканчивается весьма плачевно для спутников. Уже отмечено довольно много случаев, когда выход из строя отдельных систем спутников или даже прекращение их функционирования связано с резким усилением потока релятивистских электронов. Представьте себе мощный поток электронов с энергией в несколько МэВ, способный насквозь пробить оболочку спутника и создать большой поток вторичного тормозного излучения, состоящего из низкоэнергичных гамма-квантов. Электроника спутника может не выдержать...

Один из эффектов воздействия энергичных электронов показан на рис. 16.3. Электронный пучок таких частиц, проникая внутрь неметаллических конструкций (например, пластика) вызывает в нем внутренний электрический пробой.

Рис. 16.3. Радиационный эффект воздействия релятивистских электронов — внутренний электрический пробой в пластике.

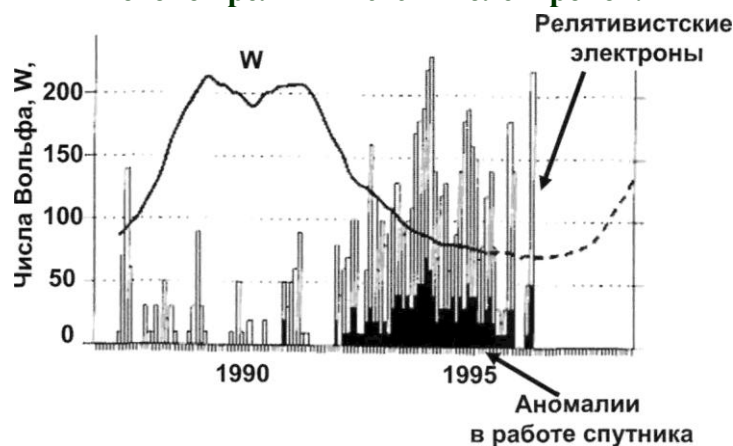


Внутри образуются повреждения — очень красивая фигура Лихтенберга. Можно, представить последствия воздействия такой «красоты» на бортовую электронику спутника, где много пластиковых деталей. Недаром энергичные электроны назвали киллерами спутников.

На рис. 16.4 наглядно демонстрируется связь наблюдающихся аномалий функционирования спутника и изменения потока релятивистских электронов. Спутники терпят бедствия, когда в космосе появляются мощные потоки этих частиц.

Именно потому, что радиация в космосе является одним из наиболее неблагоприятных факторов, влияющих на выполнение полетных заданий — будь то экипаж или сам космический корабль, ей уделяется особое внимание еще на этапе проектирования. Помимо поиска и применения различных радиационно стойких защитных материалов, дублирования и даже «троирования» электроники, на борту практически всех космических аппаратов устанавливают дозиметричес-

Рис. 16.4. Изменения потоков релятивистских электронов ($>5\text{МэВ}$) в радиационных поясах, частота наблюдаемых аномалий в работе спутника и изменения солнечной активности. Аномалии в работе космического аппарата увеличиваются с ростом потоков релятивистских электронов.



кую аппаратуру, которая позволяет операторам на Земле отслеживать радиационную обстановку в космосе и, если это необходимо, проводить изменения в полетном задании, чтобы минимизировать возможный ущерб. Иногда даже простое выключение энергопитания всего спутника или отдельных его систем позволяет сохранить ему жизнь.

Радиационные поля вокруг Земли создают не только СКЛ и частицы радиационных поясов. Ведь есть еще и частицы сверхвысоких энергий — космические лучи. Их поток очень мал по сравнению с остальными компонентами космической радиации. Казалось бы, что они не могут представлять собой угрозу космической технике и живым организмам. Однако...

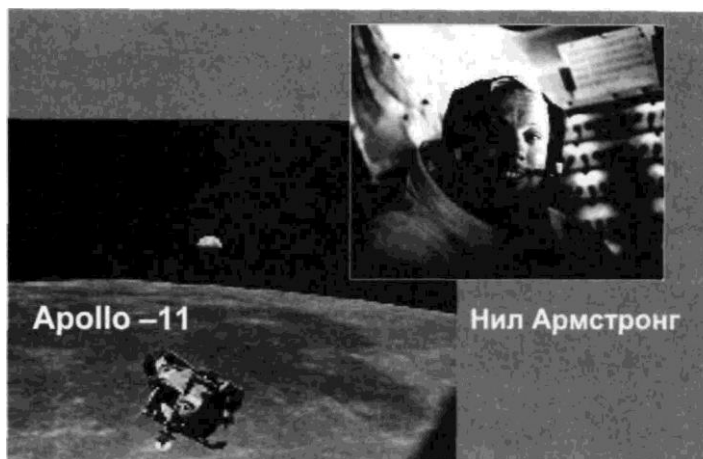
16.3. Вспышки в глазах и в электронных чипах

Читатель хорошо знает о космической одиссее американских астронавтов на Луну. Земляне в течение нескольких экспедиций путешествовали на Луну на космических аппаратах «Apollo». Несколько дней астронавты находились в космическом пространстве, в том числе длительный промежуток времени — вне пределов земной магнитосферы.

Нил Армстронг (первый астронавт, ступивший на Луну) сообщил на Землю о своих необычных ощущениях во время полета: порой он наблюдал яркие вспышки в глазах. Иногда их частота достигала около сотни в день (рис. 16.5). Ученые стали разбираться в этом явлении и быстро пришли к выводу, что ответственны за это... галактические космические лучи. Именно эти частицы высокой энергии, проникая в глазное яблоко, вызывают черенковское свечение при взаимодействии с веществом, из которого состоит глаз. В результате астронавт и видит яркую вспышку. Наиболее эффективно с веществом взаимодействуют не протоны, которых в составе космических лучей больше всех остальных частиц, а тяжелые частицы — углерод, кислород, железо. Эти частицы, обладая большой массой, теряют значительно больше своей энергии на единицу пройденного пути, чем их более легкие собратья.

236

Рис. 16.5. Нил Армстронг — первый человек на Луне.



Именно они и ответственны за генерацию черенковского свечения и возбуждение сетчатки — чувствительной оболочки глаза. Теперь это явление широко известно. Оно, вероятно, наблюдалось и до Н. Армстронга, только не все космические пилоты об этом сообщали на Землю.

Сейчас на борту Международной космической станции проводится специальный эксперимент по более глубокому изучению этого явления. Выглядит он так: на голову космонавта одевается шлем с детекторами для регистрации заряженных частиц. Космонавт должен фиксировать момент прохождения частицы по наблюдаемым им вспышкам, а детекторы делают независимую «экспертизу» их пролета через глаз и детектор. Световые вспышки в глазах космонавтов и астронавтов — пример того, как орган зрения человека — глаз — может служить детектором космических частиц.

Однако на этом неприятные последствия присутствия в космосе космических лучей высокой энергии не заканчиваются...

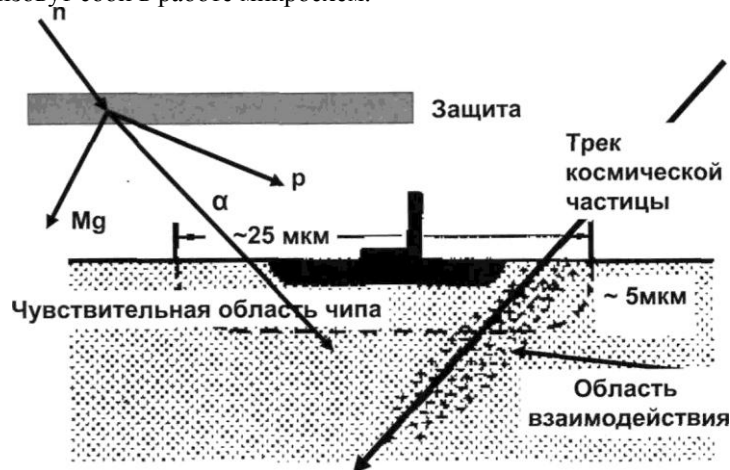
Где-то лет двадцать назад было замечено, что работа бортовых компьютеров спутников может нарушаться. Эти нарушения могут быть двух типов: компьютер может «зависнуть»,

237

а через некоторое время восстановиться, но иногда и выйти из строя. Опять-таки, изучая это явление, ученые пришли к выводу, что ответственны за него тяжелые частицы ГКЛ. Так же, как и в случае с яблоком, они проникают внутрь чипа и вызывают локальные, микроскопические нарушения в его «сердце» — чувствительной области полупроводникового материала, из которого он изготовлен. Механизм этого эффекта показан на рис. 16.6. В результате довольно сложных процессов, связанных с нарушением движения носителей электрических токов в материале чипа и происходит сбой в его работе (их называют «одиночными сбоями»). Это неприятное явление для бортовой аппаратуры современных спутников, напичканных компьютерными системами,

Рис. 16.6. Механизм формирования одиночного сбоя в микросхеме: тяжелая заряженная частица космических лучей, проникая внутрь чувствительной области, создает локальные нарушения электропроводности, что приводит к сбою в работе.

Другой вариант — заряженная частица, взаимодействуя с конструкционными материалами спутника, создает нейтроны, которые, в свою очередь, могут создать тяжелые заряженные частицы (например, α -частицы). Они тоже вызовут сбой в работе микросхем.



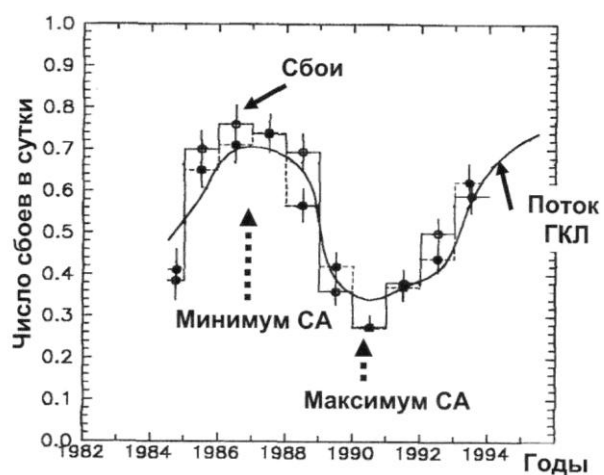
238

управляющими его работой. Как результат — спутник может потерять ориентацию или не выполнить необходимую команду оператора с Земли. В худшем случае, если нет на борту необходимой дублирующей компьютерной системы, можно спутник и потерять.

Обратите внимание на рис. 16.7. На нем изображена частота сбоев, наблюдающаяся на одном из спутников в течение ряда лет. Здесь также нанесена кривая солнечной активности. Налицо высокая корреляция обоих явлений. В годы минимума солнечной активности, когда поток ГКЛ максимален (вспомните явление модуляции), частота сбоев нарастает, а падает она в максимуме, когда поток ГКЛ минимален. Невозможно бороться с этим неприятным явлением. Никакая защита не спасает спутник от этих частиц. Уж слишком велика их громадная энергия и проникающая способность.

Даже наоборот, увеличение толщины обшивки приводит к обратному эффекту. Нейтроны, образующиеся в результате ядерных реакций ГКЛ с веществом защиты, создают сильный

Рис. 16.7. Доказательство связи между изменением потока ГКЛ и одиночными сбоями в компьютерных системах спутника: модуляция ГКЛ в течение цикла солнечной активности приводит к аналогичным изменениям частоты сбоев.



239

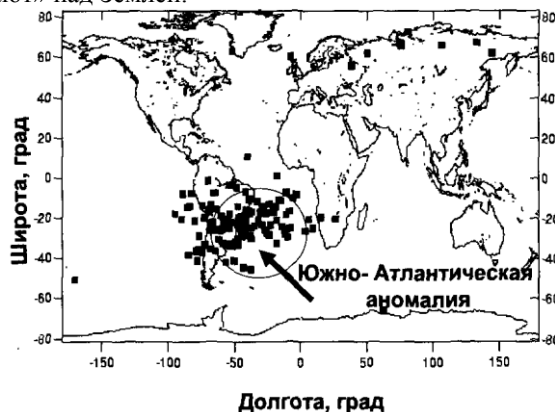
радиационный фон внутри корабля. Эти вторичные нейтроны, взаимодействуя с материалом расположенным вблизи чипа, генерируют, в свою очередь, тяжелые частицы, которые, проникая внутрь чипов, создают сбои.

Здесь необходимо напомнить читателю, что тяжелые заряженные частицы встречаются не только в космических лучах. Они присутствуют и в составе радиационных поясов, особенно много их во внутренней, ближней к Земле, части. Здесь есть и протоны, и более тяжелые ядра. И энергия их может превышать сотни МэВ. Теперь вспомним про Южно-Атлантическую аномалию, которая «провисает» над Землей. Электроника корабля, летающего на высоте километров в 500 должна «чувствовать» эти частицы. Так оно и есть. Взгляните на рис 16.8: на нем можно увидеть, что наибольшая частота сбоев наблюдается как раз в районе аномалии.

Аналогичное явление происходит и при мощных солнечных вспышках. Протоны и тяжелые ядра в составе СКЛ могут

Рис. 16.8. Так выглядит пространственное распределение одиночных сбоев в микросхемах по измерениям на высоте ~500 км.

Большая часть сбоев происходит в районе магнитной аномалии в Южной Атлантике. Именно здесь радиационные пояса «провисают» над Землей.



вызвать в чипах такие же одиночные сбои. И они действительно наблюдаются. Один из таких примеров показан на рис. 16.9. Во время мощной солнечной бури 2000 г. (ввиду того, что она произошла 14 июля, в день взятия Бастилии, ей присвоили имя «День Бастилии») на магнитосферу Земли «обрушились» интенсивные потоки солнечных протонов, вызвавших сбои в работе спутников. Единственное спасение от ГКЛ — киллеров чипов — это технические средства, связанные с дублированием особо важных электронных элементов бортовой аппаратуры.

Не только инженеры, создатели бортовой электронной аппаратуры, обеспокоены присутствием в космосе высокоэнергичных космических лучей. Биологи также изучают механизмы воздействия этих частиц. Вкратце они выглядят следующим образом.

Вода, основное вещество биологических тканей, под действием радиации ионизируется, образуются свободные радикалы, которые могут разрушить молекулярные связи ДНК. Не исключен и сценарий прямого повреждения молекулы ДНК при торможении тяжелой заряженной частицы (рис. 16.10).

Рис. 16.9 Энергичные солнечные частицы тоже воздействуют на функционирование спутников на орбите.

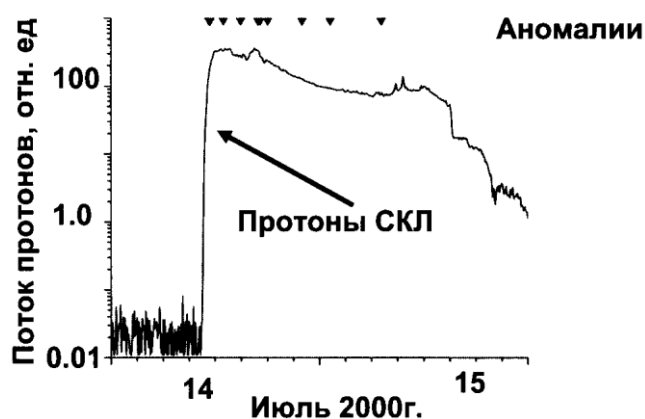
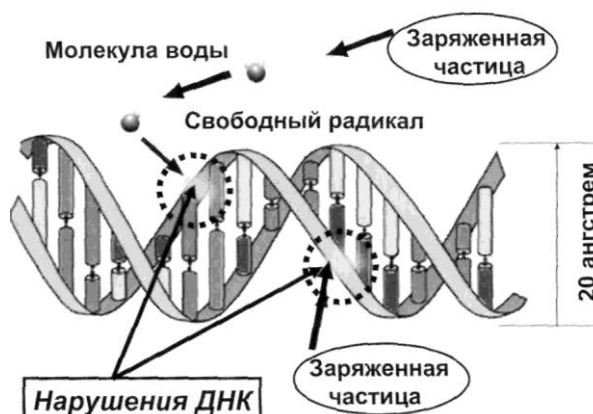


Рис. 16.10. Взаимодействие тяжелых частиц ГКЛ с молекулой ДНК в пределах ее линейных размеров (~20 ангстрем) может приводить к нарушениям в ее структуре двумя путями: либо через образование свободных радикалов, либо напрямую — путем повреждения самой молекулы.



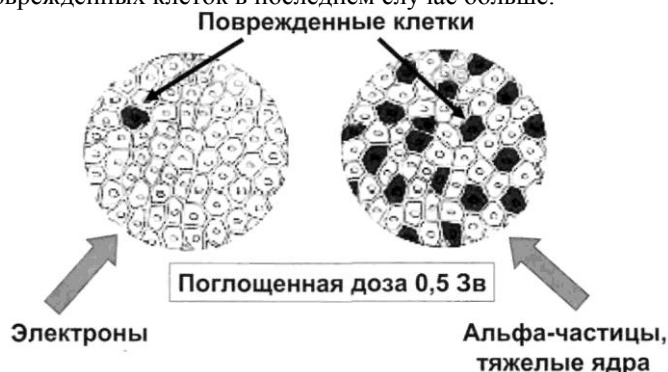
Результат? Неприятные генетические последствия, в том числе канцерогенные. На рис 16.11 наглядно демонстрируется эффект воздействия тяжелых частиц на биологическую ткань: число поврежденных клеток в случае воздействия частиц, более тяжелых, чем протоны, резко возрастает.

Безусловно, нельзя считать, что тяжелые элементы в составе космических лучей — единственный агент, способный вызвать рак. Биологи, напротив, полагают, что среди всех прочих факторов внешней среды, способных воздействовать на ДНК, радиации принадлежит отнюдь не лидирующая роль. Скажем, некоторые химические соединения способны вызвать куда более чувствительные нарушения, чем радиация. Однако в условиях длительного космического полета, вне магнитного поля Земли, человек оказывается наедине, в основном, именно с радиацией. Причем это не совсем обычная, привычная для человека радиация. Это галактические космические лучи, в составе которых, как мы теперь знаем, есть тяжелые заряженные частицы. Они, действительно, вызывают нарушения ДНК.

242

Рис. 16.11. Альфа-частицы и другие тяжелые частицы воздействуют на клетки более эффективно, чем легкие электроны. Тяжелые частицы теряют в веществе гораздо больше энергии на единицу пути, нежели более легкие.

Это наглядно демонстрируется на этом рисунке: при одной и той же дозе радиации от электронов и тяжелых частиц число поврежденных клеток в последнем случае больше.



Это — очевидно. Не вполне очевидны последствия этого взаимодействия. Что значит утверждение о возможных, например, канцерогенных, последствиях такого взаимодействия?

Здесь надо отметить, что на сегодняшний день специалисты по космической медицине и биологии не способны дать исчерпывающий ответ. Есть проблемы, которые надо решать в будущих исследованиях. Само по себе нарушение ДНК не обязательно приводит к раку. Молекулы ДНК, получив сигнал о нарушении своей структуры, стараются включить «программу ремонта» самостоятельно. И это происходит, порой, небезуспешно. Любая физическая травма, тот же удар молотком по телу, вызывает гораздо больше нарушений на молекулярном уровне, чем радиация. Но клетки восстанавливают ДНК, и организм «забывает» об этом событии.

Стабильность ДНК чрезвычайно велика: вероятность мутации не превышает 1 на 10 миллионов вне зависимости от локальных условий. Это фантастическая надежность биологической структуры, ответственной за воспроизводство жизни.

Даже сверхсильные радиационные поля не могут ее нарушить. Есть ряд бактерий, которые не мутируют в огромных по мощности радиационных полях, достигающих многих тысяч Гр. Такую дозовую нагрузку не выдерживает даже кристаллический кремний и многие конструкционные материалы.

Проблема здесь, как это представляется биологам, состоит в том, что может быть сбой в программе ремонта: например, хромосома в результате может оказаться в совсем ненужном месте в структуре ДНК. Вот эта ситуация становится уже опасной. Однако и здесь возможна многовариантность последовательности событий.

Во-первых, надо учесть, что процесс мутации — размножение «неправильных клеток» занимает большой промежуток времени. Биологи полагают, что могут пройти десятилетия между первичным неблагоприятным воздействием и негативной реализацией этого эффекта. Это время необходимо, чтобы сформировать новообразование клеток, подвергнутых мутациям, состоящее из многих миллиардов. Поэтому прогноз развития неблагоприятных последствий — дело очень проблематичное.

Другая сторона проблемы воздействия радиации на биологические структуры состоит в том, что недостаточно изучен процесс воздействия малых доз. Не существует прямой связи между величиной дозы и радиационными повреждениями. Как полагают биологи, разные типы хромосом различным образом реагируют на радиацию. Одним из них для проявления эффекта «требуется» значительные дозы, а другим достаточно и сверхмалых. В чем здесь причина?

Ответа на это пока нет. Более того, не вполне ясны последствия воздействия на биологические структуры одновременно двух или нескольких видов радиации: скажем, ГКЛ и СКЛ, или ГКЛ, СКЛ и радиационных поясов. Состав этих видов космического излучения разный, и каждый из них может приводить к своим последствиям. Но не ясен эффект их совместного воздействия. Окончательный ответ на эти вопросы — лишь в результатах будущих экспериментов.

244

16.4. «Человечество не останется вечно на Земле...»

Так писал К.Циолковский. Человек уже побывал на Луне. Недалеко время, когда вновь возобновятся полеты на нашу спутницу, а затем, вероятно, и на Марс.

При дальних космических полетах возрастает роль галактических и солнечных космических лучей как радиационно-опасных факторов. Подсчитано, что при полете на Марс именно ГКЛ становятся основной радиационной опасностью. Полет на Марс длится порядка 6 месяцев, и суммарная доза радиации от ГКЛ и СКЛ за этот период в несколько раз выше дозы радиации на МКС за то же время. Поэтому риск радиационных последствий, связанных с выполнением дальних космических миссий, значительно возрастает. Так, за год полета на Марс, поглощенная доза, связанная с ГКЛ, составит 0,2-0,3 Зв (без защиты). Ее можно сравнить с дозой от одной из самых мощных вспышек прошлого столетия — августа 1972 г. Во время этого события она была в несколько раз меньше: ~0,05 Зв.

Радиационную опасность, создаваемую ГКЛ, можно оценить и предсказать. Сейчас накоплен богатый материал по временным вариациям ГКЛ, связанным с солнечным циклом. Это позволило создать модель, на основе которой удастся предсказать поток ГКЛ на любой период времени.

Гораздо сложнее обстоят дела с СКЛ. Солнечные вспышки возникают случайным образом, и не очевидно, что мощные солнечные события возникают в годы, обязательно близкие к максимуму активности. По крайней мере, опыт последних лет показывает, что они происходят и во времена затихшего светила.

Протоны солнечных вспышек несут реальную угрозу космическим экипажам дальних миссий. Взяв вновь в качестве примера вспышку августа 1972 г., можно показать, что через 10 часов после начала события, она превысила летальное значение для экипажа космического корабля, если бы он оказался вне корабля на Марсе или, скажем, на Луне.

245

Здесь уместно вспомнить полеты американского «Apollo» к Луне в конце 60-х - начале 70-х. В 1972 г., в августе, была такая же по мощности вспышка на Солнце, как и в октябре 1989 г. «Apollo-16» приземлился после своего лунного путешествия в апреле 1972 г., а следующий — «Apollo-17» стартовал в декабре. Повезло экипажу «Apollo-16»? Безусловно. Расчеты показывают, будь астронавты «Apollo» в августе 1972 г. на Луне, они бы подверглись облучению с дозой радиации в ~43в. Это очень много. Если... если быстро не возвратиться на Землю для экстренного лечения. Другой вариант - перейти в кабину лунного модуля «Apollo». Здесь доза радиации уменьшилась бы в 10 раз. Для сравнения скажем, что защита МКС в 3 раза толще, чем лунного модуля «Apollo».

Обычно толщину защиты оценивают в единицах, представляющих собой произведение плотности вещества ρ (г/см³) на его геометрическую толщину в см, т.е. в г/см². Таким образом, удобно сравнивать длину пробега частицы, зависящую от ρ , для разных веществ. В таблице 16.2 приводятся типичные величины защиты для разных космических аппаратов и скафандров.

Таблица 16.2. Толщины защит космических аппаратов и скафандра космонавта.

Космический аппарат	Толщина, г/см ²
Командный модуль «Apollo»	7-8
«Shuttle»	до 10-11
МКС	до 15
Скафандр космонавта	0,25

Возможный сценарий неприятных последствий сверхмощной вспышки типа августа 1972 г. показан на рис. 16.12. Только убежище на Луне или жилой отсек на орбитальной станции может спасти космонавтов от губительного воздействия радиации такой вспышки.

Будущие исследователи Марса (эта планета практически без магнитного поля и атмосферы) также должны заблаговре-

246

Рис. 16.12. Если бы на Солнце произошла такая же грандиозная вспышка, как это было в августе 1972 г., то космонавты, находящиеся в это время в открытом космосе или на поверхности Луны, могли бы получить летальные дозы радиации.

Защита современной орбитальной станции и будущих жилищ-убежищ на Луне значительно снижает риск радиационных облучений даже от таких мощных вспышек.



менно позаботиться об укрытии в убежищах от космической радиации, обусловленной солнечными вспышками.

Из того, что сказано выше, следует, что свести риск радиационного поражения к нулю в течение такого длительного космического полета, каким является путешествие на Марс, нельзя. Но можно его минимизировать. Каким образом это можно сделать? Во-первых, необходимо правильно спланировать полет на Марс. Как известно, во время максимума цикла солнечной активности поток ГКЛ будет меньше из-за солнечной модуляции (см. главу 12). Поэтому старт надо выбирать именно в это время. Во-вторых, необходимо обеспечить надежную защиту корабля. Правильно выбранная защита, безусловно, значительно снизит радиационные дозы от СКЛ, даже во время сильных вспышек. Ну, а если конс-

247

Панасюк М. И. Странники Вселенной или эхо Большого взрыва. Фрязино: «Век 2», 2005. - 272 с. - (Наука для всех).

трукторы космического корабля предусмотрят специальный отсек-укрытие с более мощной защитой, это еще больше снизит риск радиационного поражения. Но, в основном, только от относительно низкоэнергичной компоненты космических лучей — солнечной.

Из какого материала может быть создана защита корабля? Наиболее распространенный в космических кораблях материал - алюминий, в силу своего малого удельного веса и достаточной прочности. Расчеты показывают, что можно создать межпланетный корабль с разумным весом и достаточно эффективной защитой от СКЛ.

Разрабатываются новые виды защитных материалов. К ним относятся, например, водородосодержащие пластики (например, типа полиэтилена). С помощью таких материалов можно создать защиту, которая при толщине 7 см будет уменьшать дозу радиации на 30-35%. Но и этого мало, и следует либо увеличивать толщину защиты, либо уменьшать длительность полета. И первое, и второе - нереально.

Есть еще один способ борьбы с этой проблемой — медико-ментозный. Вполне вероятно, что будущие марсианские пилоты будут снабжены эффективными противорадиационными препаратами.

И все же: как уменьшить риск радиационного поражения при длительном космическом полете от ГКЛ? Неужели нет никаких вариантов? На самом деле, еще на заре космических полетов ученые и инженеры думали о технических средствах борьбы с радиацией. И в этом плане изучение возможности использования искусственных магнитных и электрических полей играло первостепенную роль.

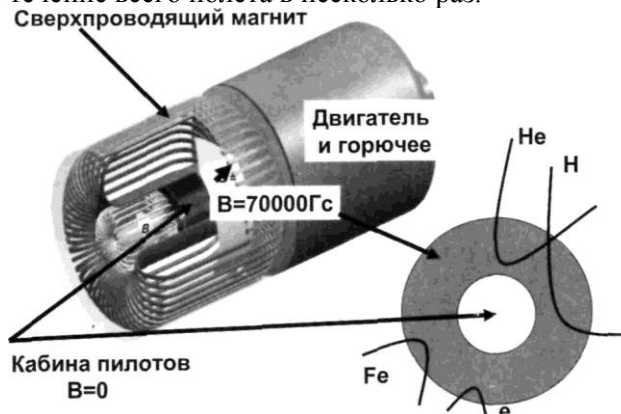
Вспомните нашу планету с ее магнитным полем. Именно магнитное поле не позволяет большей доле космических лучей достигнуть Земли. Ну, а если вокруг космического корабля создать искусственное магнитное поле?

Такие проекты есть. Посмотрите на рис. 16.13. На нем изображен магнит с максимальной напряженностью поля 70 000 Гс. Внутри и вне этого магнита поле приближается к нулю (это обеспечивается специально разработанной конструкцией).

248

Рис. 16.13. Космический корабль с магнитной защитой для полета на Марс.

Тороидальный сверхпроводящий магнит не позволит большей части космических лучей проникнуть в кабину пилотов, расположенную внутри магнита, и, тем самым, снизит суммарные дозы радиации от ГКЛ в течение всего полета в несколько раз.



Поле такого магнита «отметет» большую долю ГКЛ — как протонов, так и ядер. Расчеты показывают, что применение такого магнита позволит снизить в 3-4 раза дозу радиационного облучения за 2,5-летнюю экспедицию на Марс. Это немало. Аналогичное снижение дозы возможно, конечно, и с использованием алюминиевой защиты. Но такая защита будет весить 800 тонн! Корабль с магнитной защитой — 30 тонн. Но... как создать такое мощное магнитное поле? Это можно сделать только с использованием сверхпроводящих магнитов.

Вы скажете - фантастика? Нет. Прототип такого магнита уже создан, и он будет использован в эксперименте AMS-02 (рис. 10.3) для исследования космических лучей на борту Международной космической станции. Так что, казалось бы, от фантастической идеи до ее реализации, путь не такой уж и большой.

249

16.5. Трансконтинентальные авиарейсы вблизи полюса

Солнечные вспышечные протоны могут создать проблемы не только для космонавтов и самих спутников.

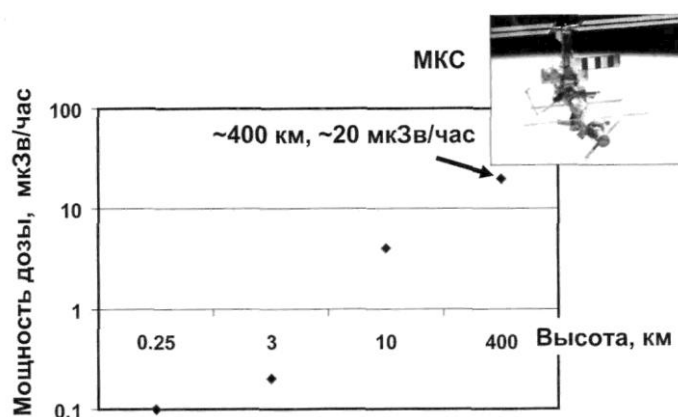
Если бы мы с дозиметром полетели от поверхности Земли вверх (помните? - впервые это сделал В.Гесс, но только с электрометром в руках в 1912 г.), то увидели бы увеличение количества радиации: дозы будут возрастать примерно вдвое каждые 2,2 км. Вначале, до высот в 20-30 км, это в основном связано с частицами ШАЛ (рис. 16.14).

На высотах орбитальных станций (~400 км) дозы радиации превышают величины, наблюдающиеся на поверхности Земли, в ~200 раз! В основном за счет частиц радиационных поясов.

Некоторые трассы межконтинентальных самолетов проходят вблизи северной полярной области. Эта область наименее защищена от вторжения энергичных частиц, и поэтому во

Рис. 16.14. С увеличением высоты дозы радиации растут: на высоте орбитальной станции МКС они в 200 раз превышают типичные дозы на поверхности Земли.

На высотах полетов самолетов они безопасны, но до тех пор, пока не произойдет мощная солнечная вспышка.



250

время солнечных вспышек опасность радиационного облучения экипажа и пассажиров возрастает. Солнечные вспышки увеличивают дозы радиации на высотах полетов самолетов в 20-30 раз.

В последнее время экипажи некоторых авиалиний информируются о начале наступления вторжения солнечных частиц. Одно из недавних мощных солнечных извержений, случившееся в ноябре 2003 г., заставило экипаж «Дельты» рейса Чикаго — Гонг-Конг свернуть с пути и лететь к пункту назначения более низкоширотным маршрутом. В результате было сожжено много лишнего горячего. А это немалые деньги. Это нельзя не принимать во внимание. Сейчас Европейский Союз принял даже новый закон для беременных женщин-пилотов самолетов — им запрещается налет часов с суммарной дозой радиации более, чем 1-6 мЗв в год. А некоторые исследовательские группы приступили к разработке моделей, которые позволят делать прогноз возрастания доз радиации на высотах полетов самолетов во время солнечных вспышек.

ПОСЛЕСЛОВИЕ

Заканчивая эту книгу, автор постарался убедить читателя в том, что астрофизика космических лучей находится сейчас на подъеме. Почти за 100-летнюю историю исследований частиц из Вселенной были не только изучены свойства этих частиц и открыты новые, но с их помощью исследованы многие физические процессы и объекты Вселенной. До сих пор космические лучи остаются уникальным инструментом изучения далеких просторов космоса. И чем дальше развивается эта наука, тем очевиднее становится ее связь не только с астрономией и космологией, но и с физикой элементарных частиц, базирующейся на наземных ускорительных экспериментах.

Задача ускорительной физики элементарных частиц — проникнуть в глубь вещества, познать строение кажущихся неделимыми частиц, изучить характер их взаимодействий. Но, проникая в глубь вещества, мы, тем самым, изучаем прошлое Вселенной. Те новые частицы, которые обнаруживаются в наземных экспериментах, их физические взаимодействия сродни тем, что существовали в зародыше Вселенной сразу после Большого взрыва. Астрофизика и физика элементарных частиц уже ряд лет идут в одном направлении с целью познания строения не просто вещества, а познания строения нашего мира.

В связи с этим, вернемся вновь к вопросу о максимально достижимых энергиях частиц на Земле и во Вселенной. Можно ли подвергнуть экспериментальной проверке теорию Великого Объединения? Лишь частично. Проблема заключается в гигантской энергии Великого Объединения — 10^{24} - 10^{25} эВ.

252

Подсчитано, что если создать ускоритель, охватывающий по периметру всю нашу Землю, то из-за синхротронных потерь энергия протона не превысит 10^{17} эВ (здесь указаны энергии частиц, соответствующие столкновениям протонов с неподвижной мишенью). Вселенная способна предоставить в распоряжение исследователей частицы гораздо больших энергий, чем созданные человеком наземные ускорители. Вполне возможно, что космические лучи ультравысокой энергии как раз и являются «носителями информации» о самых ранних фазах эволюции Вселенной после Большого Взрыва. Их изучение поможет детально разобраться в справедливости гипотез о сотворении мира.

И наземная физика высоких энергий может внести значительный вклад в астрофизику космических частиц.

Мы видели, что пока еще не все ясно с составом частиц в районе «колена» спектра ГКЛ. А ведь это, пожалуй, одна из самых значимых проблем космических лучей. Вопрос ставится достаточно просто: есть ли экспериментальные доказательства ускорения частиц на остатках сверхновых? Ответ лежит в точных измерениях отдельных компонент космических лучей. Интерпретация данных наземных установок, обладающих пока значительно большими «светосилами», чем приборы космического базирования, наталкивается на трудности. Это связано с недостаточными знаниями в области моделирования взаимодействия частиц, необходимыми, как мы видели ранее, для восстановления энергетического спектра первичных частиц.

Именно здесь и могут сыграть решающую роль будущие эксперименты на строящемся ускорителе в CERN. Энергия ускоренных там частиц перекроет «колено» космических лучей и позволит детально исследовать характер взаимодействий частиц при таких высоких энергиях. На ускорителе LHC будет можно изучать столкновения не только легких частиц с тяжелыми (например, протонов с кислородом) но даже и свинца со свинцом. Для этого строятся гигантские детекторы, которые будут размещены в подземном кольце LHC). Один из них - ATLAS, который показан на рис. 1.9 .

253

Таким образом, эксперименты на новом ускорителе могут сыграть важную роль и в развитии астрофизики космических лучей.

Однако сейчас большинство ученых, работающих в области ускорительной физики высоких энергий, сходятся во мнении, что в долгосрочной перспективе - будущее за космическими экспериментами. Безусловно, результативность экспериментов будет зависеть от степени совершенства теоретических моделей, описывающих явления во Вселенной. Именно поэтому в настоящее время нет недостатка как в предлагаемых проектах для исследования Вселенной, так и многочисленных теориях, пытающихся объяснить наблюдаемые явления и заглянуть в неизведанное.

У астрофизики космических лучей, как это показано выше, есть и важная прикладная составляющая. Космические частицы постоянно бомбардируют околоземное пространство и, несомненно, могут оказывать влияние не только на процессы, происходящие в этой среде, но также на технику, созданную человеком, на самого человека, другие живые организмы и биологические структуры. И здесь не все ясно. Предстоят еще годы упорных исследований для решения стоящих перед учеными проблем.

Автор старался заинтересовать читателя этими увлекательными проблемами. Если это удалось, то можно сказать, что цель достигнута.

Дополнительная литература

Б.Росси. Космические лучи. Атомиздат, Москва, 1966.

В.С.Мурзин. Введение в физику космических лучей. Издательство Московского Университета, Москва, 1988.

Н.А.Добротин. Космические лучи. Издательство АН СССР, Москва, 1963.

Г.Б.Жданов. Частицы высоких энергий. Издательство «Наука», Москва, 1965.

А.М.Черепашук, А.Д. Чернин. Вселенная, жизнь, черные дыры. Издательство «Век 2», Фрязино, 2003.

Г.В.Кландор-Клайнгротхауз, К.Цюбер. Астрофизика элементарных частиц. Редакция журнала «Успехи физических наук», 2000.

В.Л.Гинзбург, С.И.Сыроватский. Происхождение космических лучей. Издательство Академии наук, Москва, 1963.

И. Д. Новиков. Как взорвалась Вселенная. Издательство «Наука», Москва, 1988.

И.М.Капитонов. Введение в физику ядра и частиц. «Едиториал УРСС», Москва, 2002.

СЛОВАРЬ

АДРОНЫ — элементарные частицы, участвующие в сильных взаимодействиях (барионы и мезоны).

АНГСТРЕМ — единица длины, равная 10^{-10} м = 10^{-8} см.

АННИГИЛЯЦИЯ — уничтожение частиц и античастиц. Один из видов аннигиляции - взаимодействия электрона и позитрона с излучением гамма-квантов.

АНТИЧАСТИЦЫ — элементарные частицы, имеющие те же значения масс, спинов и других физических характеристик, что и «обычные» частицы, но отличающиеся от них знаками некоторых характеристик взаимодействия (например, знаком электрического заряда).

АЭРОЗОЛИ — образования, состоящие из частиц твердого тела и капель жидкости во взвешенном состоянии в газовой среде (например, в атмосфере — дым, туман).

БАРИОНЫ — элементарные частицы, относящиеся к классу тяжелых, т.е. с массой не менее протонной.

Взаимодействия фундаментальные — 4 вида: ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ, в котором участвуют заряженные частицы. Оно определяет макроскопические явления: взаимодействие между ядрами и электронами в атомах и молекулах; приводит к излучению электромагнитных волн.

256

СИЛЬНОЕ, в котором участвуют адроны; имеет радиус взаимодействия 10^{-13} см (например, внутри атомного ядра);

СЛАБОЕ, в котором участвуют все частицы; имеет радиус взаимодействия 10^{-15} см (например, распад элементарных частиц);

ГРАВИТАЦИОННОЕ — самое слабое из 4-х фундаментальных взаимодействий, определяет взаимодействие всех видов материи, но, преимущественно, крупных тел, например, астрофизических объектов Вселенной.

ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЕ — область коротковолнового электромагнитного излучения с длиной волны короче 1 ангстрема ($\lambda \leq 10^{-10}$ м). Представляет собой фотоны — частицы с энергией $E_\gamma = \hbar \nu$, где \hbar — постоянная Планка, а ν — частота волны. В настоящее время этот термин применяется для обозначения жесткого электромагнитного излучения с энергией квантов $E_\gamma > 10 \text{ кэВ}$. Фотоны с более низкими энергиями относят к рентгеновскому излучению.

ГЕЛИОПАУЗА — внешняя граница гелиосферы.

ГЕЛИОСФЕРА — область космического пространства, занятая солнечным ветром.

ГЕН — часть молекулы ДНК, содержащая информацию о строении одного белка.

ГЕОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ - магнитное поле Земли, созданное внутриземными источниками. В первом приближении имеет форму диполя. На поверхности вблизи экватора оно имеет напряжённость 0,312 Гс и увеличивается до 0,62 Гс вблизи полюсов.

ДОЗА РАДИАЦИИ — количество энергии, выделенной (поглощенной) в материале в результате воздействия радиации. Измеряют в Рад. В системе СИ используется единица 1 Грей (Гр) = 100 Рад, или 1 джоуль/кг. Для измерения биологических поглощенных доз используют также Зиверты (Зв) и РЭМ'ы — биологически

257

эквивалентные дозы. Соотношения между этими единицами следующие:

1 Зв = 100 Рэм (1Зв = 1 Дж/кг)

1 Рад — 100 эрг/грамм (энергия в 100 эрг, поглощённая в 1 г вещества).

1 Рэм = 1 Рад \times Q, где Q — фактор качества, учитывающий эффект воздействия радиации на конкретную биологическую структуру. Q = 10 для протонов и Q = 3-10 для нейтронов; Q = 20 для более тяжелых частиц. Q изменяется от 1 до 20 в зависимости от вида излучений: Q=1 для гамма-квантов и электронов.

ДНК — дезоксирибонуклеиновая кислота, основа клеток живых организмов. ДНК вместе с белками образует вещество хромосом. Является носителем генетической информации, соответствующей ее отдельным участкам.

ИОНИЗАЦИЯ - превращение нейтральных атомов и молекул в ионы при воздействии электромагнитного излучения (фотоионизация), нагреве (термическая ионизация), а также при столкновении частиц с электронами и другими частицами.

КВАРКИ - элементарные частицы, входящие в состав адронов (барионов и мезонов). В рамках современных представлений кварки — точечные и бесструктурные объекты с размером менее 10^{-16} см.

КОРОНА — внешняя часть атмосферы Солнца, характеризующаяся низкой плотностью (~1 частица в кубическом метре) и высокой температурой ($>10^6$ К) плазмы.

КОРОНАЛЬНАЯ ИНЖЕКЦИЯ МАССЫ (*coronal mass ejection - CME*) - выброс солнечной плазмы в межпланетное пространство с образованием ударной волны. *CME* вызывают деформацию магнитного поля Земли и планет, и магнитные бури.

КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ — высокоэнергичные ядра атомов и элементарные частицы космического происхождения.

258

Есть еще одно определение: заряженные частицы, ларморовский радиус которых превышает размер пространственной неоднородности локального магнитного поля.

КОСМИЧЕСКОЕ ПРОСТРАНСТВО - пространство за пределами атмосферы Земли.

КОСМИЧЕСКОЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ - излучение в радио, инфракрасном, видимом, ультрафиолетовом, рентгеновском и гамма диапазонах в космическом пространстве.

КОСМОЛОГИЯ - наука о наиболее общих свойствах Вселенной.

КРАСНОЕ СМЕЩЕНИЕ — эффект увеличения длины волны в системе отсчета наблюдателя по сравнению с длиной волны в самом источнике. Такой эффект возникает при движении, например, источника света относительно наблюдателя. Он стал основным наблюдательным фактом в пользу нестационарной космологической модели расширяющейся Вселенной.

ЛЕПТОНЫ — элементарные частицы, участвующие в сильном взаимодействии (электроны, мюоны, нейтрино и их античастицы).

МАГНИТНАЯ ЖЕСТКОСТЬ (R) - мера противодействия частицы силе, отклоняющей ее в магнитном поле. Определяется как $R \text{ (Вольт)} = pc/q$, где p — импульс частицы, q — заряд и c — скорость света.

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ — силовое поле, воздействующее на объекты, обладающие магнитным моментом. Источниками магнитного поля могут быть электрические токи, переменные электрические поля и магнитные моменты. Магнитным полем обладают ряд планет Солнечной системы. Наиболее мощное магнитное поле у Юпитера. Магнитный момент Земли во много раз меньше юпитерианского.

МАГНИТНЫЕ БУРИ - изменение магнитного поля планеты под воздействием нерегулярных процессов как в межпланетной среде (вариаций давления солнечного

259

ветра и межпланетного магнитного поля), так и внутри магнитосферы планеты (вариации собственных электрических токов внутри магнитосферы). Магнитные бури сопровождаются комплексом геофизических явлений, среди которых: полярные сияния, пульсации магнитного поля, генерация электромагнитных волн и др.

МАГНИТОСФЕРА ЗЕМЛИ - область околоземного пространства, занятая геомагнитным полем.

МЕЖПЛАНЕТНОЕ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ - магнитное поле в межпланетном пространстве вне магнитосфер планет, преимущественно солнечного происхождения.

МЕЖПЛАНЕТНОЕ ПРОСТРАНСТВО - область космического пространства, ограниченного сферой радиусом, равным среднему расстоянию самой далекой планеты от Солнца.

МЕЗОНЫ — нестабильные элементарные частицы, принадлежащие к классу адронов. Это — пионы (π -мезоны), каоны (K -мезоны) и ряд других. Входят в состав вторичных частиц широких атмосферных ливней.

МОДУЛЯЦИЯ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ - изменение потока космических лучей, обусловленное воздействием солнечного ветра, межпланетного магнитного поля и солнечной активности.

НЕЙТРИНО — очень легкая (возможно, что вообще не имеет массы) стабильная элементарная частица, с электрическим зарядом, равным нулю. Принадлежит к семейству лептонов. Различают три вида нейтрино — электронные (ν_e) мюонные (ν_μ) и тау-нейтрино (ν_τ) с соответствующими античастицами.

НЕЙТРОН — частица с электрическим зарядом равным нулю и массой, соответствующей массе протона. В свободном состоянии — время жизни ~ 15 мин. В составе ядра стабильен: в связанном состоянии его время жизни не менее 10^{32} лет.

260

НЕЙТРОННАЯ ЗВЕЗДА - звезда, состоящая из нейтронов. Образуется в результате коллапса родительской звезды. Имеет чрезвычайно высокую плотность $\sim 2 \cdot 10^{14}$ г/см³ и малый радиус ~ 20 км.

ПЕРЕЗАРЯДКА ИОНОВ — процесс взаимодействия положительного иона с нейтральным атомом или молекулой, при котором один из электронов нейтральной частицы переходит к иону.

ПОЛНАЯ ЭНЕРГИЯ ЧАСТИЦЫ - сумма кинетической энергии и массы покоя $E_0 = \gamma_0 c^2 (m_0 —$ масса покоя частицы и c — скорость света). Для протона $E_0 = 938,232$ МэВ, а нейтрона $E_0 = 939,565$ МэВ и для электрона $E_0 = 510,984$ кэВ.

ПРОТОН - стабильная элементарная частица с положительным электрическим зарядом и массой в 1836 масс электрона, относящаяся к барионам. Протоны и нейтроны образуют атомные ядра.

РАДИАЦИОННЫЕ ПОЯСА — внутренние области магнитосфер планет с захваченными магнитным полем энергичными заряженными частицами. Верхний диапазон энергий захваченных частиц определяется магнитным моментом планет. Для Земли максимальная энергия протонов составляет ~ 1 ГэВ, а электронов ~ 10 МэВ.

РЕЛИКТОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ - фоновое космическое радиоизлучение с температурой 2,73 К, которое образовалось на ранних стадиях развития Вселенной. Относится к микроволновому диапазону с длиной волны 1,5 мм.

СОЛНЕЧНАЯ ВСПЫШКА — внезапная эмиссия электромагнитного излучения, частиц и плазмы в солнечной атмосфере.

СОЛНЕЧНАЯ КОРОНА - внешняя разряженная часть атмосферы Солнца с температурой от 10^6 до $2 \cdot 10^6$ К.

261

СОЛНЕЧНАЯ ПОСТОЯННАЯ - общая энергия, поступающая от Солнца на Землю в единицу времени и на единицу площади. С точностью до 0,1% эта величина ($1,37 \cdot 10^6$ эрг/см²сек) постоянна, несмотря на любые проявления солнечной активности.

СОЛНЕЧНЫЙ ВЕТЕР — плазма, постоянно истекающая из Солнца.

СПИН — момент количества вращательного движения элементарной частицы.

СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЙ СЧЕТЧИК (детектор) - прибор для регистрации заряженных частиц. Принцип действия основан на возбуждении частицами в ряде специальных материалов световых вспышек, которые регистрируются фотоумножителем.

ТЕМНАЯ ЭНЕРГИЯ (космический вакуум) - однородная по плотности среда во Вселенной, создающая эффект антигравитации и управляющая процессом расширения Вселенной.

ТЕМНОЕ ВЕЩЕСТВО (скрытая материя) - один из основных видов материи во Вселенной. Его масса на порядок больше хорошо известной формы существования материи — барионной. Состав неизвестен.

УДАРНАЯ ВОЛНА — область пространства, в которой происходит резкое изменение параметров вещества (плотности, давления, температуры). В межпланетном пространстве наблюдаются ударные волны, возникающие при солнечных вспышках. Другой пример — ударные волны от взрыва сверхновых звезд.

ФЕРМИОНЫ - элементарные частицы с полуцелым

спином. **ФОРБУШ-ЭФФЕКТ в космических лучах** — изменение потока космических лучей, связанное с прохождением межпланетных ударных волн.

262

ФОТОН — нейтральная элементарная частица с нулевой массой. Является переносчиком электромагнитного взаимодействия.

ХРОМОСФЕРА Солнца — слой солнечной атмосферы выше фотосферы и ниже короны.

ЧЕРЕНКОВСКОЕ свечение — излучение света, которое возникает при движении в веществе заряженных частиц со скоростью, превышающую фазовую скорость света в этом веществе. Открыто П.Черенковым и С.Вавиловым.

ЧЕРНАЯ ДЫРА - астрофизический объект с массой, достаточной для того, чтобы гравитационные силы смогли воспрепятствовать выходу любого количества вещества и излучения за ее пределы.

ШАЛ (широкий атмосферный ливень) — каскад вторичных частиц в атмосфере Земли, вызванный взаимодействием космических лучей с ядрами атмосферы.

ЭЛЕКТРОН — отрицательно заряженная стабильная частица с массой около 910^{28} г. Относится к лептонам. Внутри атома образует электронные оболочки вокруг ядра.

ЭЛЕКТРОНВОЛЬТ - энергия заряженной частицы, которую она приобретает при ускорении в электрическом поле с разностью потенциалов в 1 Вольт. $1\text{эВ} = 1,6 \cdot 10^{-12}$ эрг.

ЮЖНО-АТЛАНТИЧЕСКАЯ АНОМАЛИЯ - пространственная область, расположенная в Южной Атлантике вблизи берегов Бразилии (иногда называют Бразильской магнитной аномалией), характеризующаяся сильным ослаблением геомагнитного поля. Это ослабление связано с асимметрией расположения источника земного магнитного поля. Существование аномалии приводит к явлению «провисания» радиационных поясов над

263

Землей. В этой области наблюдаются повышенные потоки частиц радиационных поясов на высотах 300-500км, по сравнению с остальными областями. Аномалия вызывает увеличение радиации.

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	5
Глава 1. ПОСЛЕ БОЛЬШОГО ВЗРЫВА	8
1.1. Убегающие галактики	9
1.2. Сотворение вещества	14
1.3. Гибель звезд	17
1.4. Наш мир — темный и светлый или жизнь в вакууме	22
1.5. «Большой взрыв» на Земле	28
Глава 2. СТРАННИКИ ВСЕЛЕННОЙ	32
Глава 3. КАК ПОЙМАТЬ КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ	37
3.1. Космические лучи в атмосфере	37
3.2. Ловушки для частиц	39
Глава 4. ЧТО МЫ ЗНАЕМ О КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧАХ	54
4.1. Крутая траектория познания состава космического излучения	54
4.2. Из чего состоят космические лучи	59
4.3. Энергетические спектры ядер космических лучей	61
Глава 5. ОТКУДА ВЫ, СТРАННИКИ ВСЕЛЕННОЙ?	69
5.1. Поиск звезд на небе	69
5.2. Сверхновые старые звезды	71
Глава 6. ПУШКИ ВСЕЛЕННОЙ	75
6.1. Космический ускоритель — Пэватрон	75
6.2. Превращения звездного вещества или о возрасте космических странников	82
6.3. О чем говорят результаты экспериментов	84
6.4. Электроны в космических лучах	91
265	
Глава 7. МИСТЕРИЯ ОБРЕЗАНИЯ	93
7.1. Диаграмма Хилласа или в поисках Зэватрона	93
7.2. Реликтовое излучение и «конец» спектра космических лучей	100
7.3. Сверху — вниз, или вперед к экзотике	103
7.4. Новая астрономия?	110
Глава 8. КОСМИЧЕСКОЕ ОКО	115
8.1. Ультрафиолетовый след космической частицы	115
8.2. Зеркало на орбите	120
Глава 9. ГАММА-ИЗОБРАЖЕНИЕ ВСЕЛЕННОЙ	124
9.1. Гамма-свечение Млечного Пути	125
9.2. Загадочные всплески гамма-излучения	132
Глава 10. ЧАСТИЦЫ ИЗ ЗАЗЕРКАЛЯ	140
10.1. Другое состояние вещества	140
10.2. Погоня за антивеществом	143
Глава 11. ЧАСТИЦЫ ПОЛТЕРГЕЙСТА	149
11.1. Приключения «неуловимых»	149
11.2. Нейтринное море реликтов	151
11.3. Нейтрино сверхновых	152
11.4. Нейтринная астрономия сверхновой SN 1987A	154
11.5. Капканы для неуловимых	155
11.6. О нейтрино предельно высоких энергий	160
Глава 12. ДВУЛИКИЙ ЯНУС	164
12.1. Наша звезда на звездной шкале	164
12.2. Спринклер Солнечной системы	168
12.3. Активная жизнь нашей звезды	171
12.4. Солнечные бури	174
12.5. Плазменная бутылка солнечной системы	180
Глава 13. ПОСЛЕДНЕЕ ПРИСТАНИЩЕ СТРАННИКОВ	183
13.1. Солнечная метла	183
13.2. Аномальные частицы в гелиосфере	187
13.3. Магнитная «броня» Земли	190
13.4. Земная ловушка для космических странников	192
266	
Глава 14. СЛЕДЫ СТРАННИКОВ	199
14.1. Атмосферный след странников - климат сегодня	199
Панасюк М. И. Странники Вселенной или эхо Большого взрыва. Фрязино: «Век 2», 2005. - 272 с. - (Наука для всех).	

14.2. Гром и молнии странников	203
14.3. Климат до нашей эры и спиральные рукава Галактики	206
14.4. Солнечная бомбардировка атмосферы.....	208
14.5. Салют космическим лучам.....	212
Глава 15. РАДИОАКТИВНЫЙ КОСМОС.....	215
15.1. Космический «ТОКАМАК»	215
15.2. Родители пленников магнитной ловушки	220
15.3. Нейтронный ореол Земли	225
Глава 16. РАДИАЦИОННЫЕ БУРИ В КОСМОСЕ	228
16.1. Радиация на ближних подступах к Земле.....	228
16.2. Радиационные бури на окраине околоземного пространства.....	232
16.3. Вспышки в глазах и в электронных чипах	236
16.4. «Человечество не останется вечно на Земле...»	245
16.5. Трансконтинентальные авиарейсы вблизи полюса	250
ПОСЛЕСЛОВИЕ.....	252
Дополнительная литература	255
СЛОВАРЬ.....	256

Сканирование и форматирование: [Янко Слава](#) (Библиотека [Fort/Da](#)) || slavaaaa@yandex.ru || yanko_slava@yahoo.com || <http://yanko.lib.ru> || Icq# 75088656 || Библиотека: <http://yanko.lib.ru/gum.html> || Номера страниц - внизу

update 24.08.06

серия «Наука для всех»

Геном, клонирование, происхождение человека.

Под редакцией Л. И. Корочкина.

Что такое геном человека, чем отличается клонирование от копирования, как гены определяют развитие организма и социальное поведение человека, что такое генная инженерия и как она используется в производстве продуктов и лекарств. Последние достижения генетики, в том числе сенсационные результаты в решении проблемы происхождения и миграции человека.

А. М. Черепашук, А. Д. Чернин. **Вселенная, жизнь, черные дыры.**

Изложено современное представление о возникновении и развитии Вселенной; о том, как ведутся поиски жизни вне Земли и о результатах этих поисков; о загадочных и фантастических-свойствах черных дыр и о том, как их находят и «взвешивают»; о самых последних открытиях в астрофизике — антигравитации, «темной материи» и «темной энергии».

Е. Л. Фейнберг.

Две культуры. Интуиция и логика в искусстве и науке.

Зачем искусство нужно человечеству. Каковы взаимоотношения искусства и науки. Где кончается логика и начинается интуиция. Общие проблемы «двух культур» — естественнонаучного знания, с одной стороны, искусства и гуманитарных наук — с другой рассматриваются с философской точки зрения известным физиком, академиком Е. Л. Фейнбергом. Третье, расширенное и дополненное издание.

В. Г. Ротштейн.

Психиатрия. Наука или искусство?

Психические расстройства: что нужно знать всем, а что — пациентам и их родственникам. Как психиатры ставят диагноз и насколько он достоверен. Проблема баланса между правами личности, пользой для больного и интересами общества.

Б. М. Владимирский и др. **Космическая погода и наша жизнь.**

Научно-популярная монография, рассказывающая о влиянии солнечной активности на широкий круг биологических явлений. Приведены необходимые сведения о солнечной активности, межпланетной среде и важнейших оболочках нашей планеты, защищающих среду обитания от воздействия капризов «космической погоды». Много внимания уделено влиянию солнечной активности на бактерии, растения и человека - здорового и больного, его психику и поведение. Подробно рассказано о связи солнечной активности с явлениями общественной жизни. Изложена точка зрения авторов на происхождение астрологии и о рациональном «ядре» древней вавилонской астрологии.

М Л. Бутовская.

Тайны пола. Мужчина и женщина в зеркале эволюции.

Книга знакомит читателя с современными представлениями об эволюции полового поведения человека. Разъясняются основные преимущества полового размножения. Дается объяснение феноменов непорочного зачатия (партеногенез), гермафродитизма и гомосексуализма, подробно излагается теория полового отбора и ее актуальность для понимания стратегий сексуального поведения. Рассмотрены различия мужского и женского тела, возникшие путем полового отбора. Особое место в книге занимают представления о мужской

Панасюк М. И. Странники Вселенной или эхо Большого взрыва. Фрязино: «Век 2», 2005. - 272 с. - (Наука для всех).

и женской привлекательности и пути формирования стереотипов поведения в процессе индивидуального развития. Книга изобилует интересными сюжетами: о специфике мужского и женского поведения в условиях городской культуры, о роли сексуальных образов в рекламе.

Издание предназначено антропологам, психологам, культурологам, социологам, специалистам по рекламе и маркетингу, широкому кругу читателей.

Л. Б. Вишняцкий.

История одной случайности или происхождение человека.

Появление человека вообще и вида *Homo sapiens* в частности рассматривается, с одной стороны, как наиболее яркое проявление «магистральной» тенденции в развитии живой природы на Земле, а с другой - как случайность, произошедшая благодаря уникальному стечению столь же уникальных обстоятельств. Сколь бы естественным и само собой разумеющимся ни казался нам тот факт, что именно человек и его предки стали носителями высших форм сознания и культуры, ничто не дает оснований думать, что такой ход событий был единственно возможным.

А. И. Козлов. **Пища людей.**

Традиционная кухня — своеобразное отражение экосистемы, в которой формировалась та или иная группа обитателей планеты. В книге с точки зрения врача и антрополога рассмотрены причины возникновения различий в питании у представителей различных групп населения планеты — жителей тропиков, жарких пустынь, умеренного климата, высокогорья, Арктики.

В основу книги положены курсы лекций по экологии и антропологии питания, читаемых автором студентам и аспирантам ряда университетов России и Италии.

Ю. Н. Ефремов.

Звездные острова. Галактики звезд и Вселенная галактик.

Книга рассказывает о нашей и других галактиках, о населяющих их звездах и звездных скоплениях, о методах, которыми было достигнуто наше знание. Обсуждаются проблемы внеземного разума и горизонта науки. Книга адресована всем, интересующимся устройством мироздания.

М. Б. Менский

Человек и Квантовый мир.

Квантовая механика, самый, пожалуй, удивительный раздел физики, обсуждается в этой книге с различных точек зрения. В части I излагается история создания квантовой механики и ее основные идеи, рождавшиеся в процессе трудного преодоления привычной классической картины мира. На некоторых важных примерах (сверхпроводимость и сверхтекучесть, лазеры, нанотехнология, квантовая информатика) иллюстрируются приложения квантовой механики в современной технике.

Часть II посвящена до сих пор нерешенным концептуальным вопросам (парадоксам) квантовой механики. Показывается, как попытка их решения приводит к картине параллельных миров (так называемая интерпретация Эверетта), а ее логическое продолжение — к новому пониманию феномена сознания и к объяснению его необычных возможностей, которые на первый взгляд противоречат законам физики.

серия «Наука сегодня»

Размер 105x165, 64 с, обложка

Артур Чернин.

Космология: Большой Взрыв.

Анатолий Черепашук. **Черные дыры во Вселенной.**

Марина Бутовская.

Власть, пол и репродуктивный успех.

Марина Бутовская. **Гомосексуализм и эволюция.**

Готовятся к изданию:

Леонид Корочкин **Клонирование.**

Владимир Сурдин **Неуловимая планета.**

Юрий Ефремов **Млечный путь.**

Светлана Боринская, Николай Янковский **Нити судьбы. Люди и их гены.**

ООО «Век 2», тел. (095) 785-56-39, доб. *15-14;

E-mail: vek-2@mail.ru, www.vek2.nm.ru

Высылаем книги наложенным платежом. Заявки по адресу;

141195, Фрязино-5, Московской обл., а/я 107, ООО «Век 2»

или по E-mail: vek-2@mail.ru

Научно-популярное издание

Панасюк Михаил Игоревич

Странники Вселенной или эхо Большого взрыва

Подп. в печ. 11.11.2005. Формат 84х108/32. Усл. п. л. 14,28. Тираж 1500 экз. Заказ № 1719.

ООО «Век 2», 141195, г. Фрязино-5, Моск. обл., а/я 107. Тел. (095) 785-56-39, доб. *15-14, E-mail: vek-2@mail.ru.

Фрязино, пл. Введенского, 1, к. 102.

Изд. Лиц. ЛР № 070440 от 11.04.97.

Отпечатано в ОАО «Можайский полиграфкомбинат» 143200, г. Можайск, ул. Мира, 93.

Сканирование и форматирование: [Янко Слава](#) (Библиотека [Fort/Da](#)) || slavaaa@yandex.ru ||

yanko_slava@yahoo.com || <http://yanko.lib.ru> || Иср# 75088656 || Библиотека:

<http://yanko.lib.ru/gum.html> || Номера страниц - внизу

update 24.08.06
