

## МЕТОДИЧЕСКИЕ ЗАМЕТКИ

Астрофизика космических лучей  
(история и общий обзор)<sup>1</sup>

В.Л. Гинзбург

*Освещена история открытия и исследования космических лучей вплоть до рождения астрофизики космических лучей. Приведены некоторые сведения о космических лучах у Земли и во Вселенной. Основная часть космических лучей, наблюдаемых у Земли, образуется в нашей Галактике, причем их источниками являются вспышки сверхновых звезд. Важнейшей нерешенной проблемой в области астрофизики космических лучей является происхождение частиц со сверхвысокой энергией.*

PACS numbers: 98.70.Sa

## Содержание

1. Краткая история открытия космических лучей (1107).
  2. Об астрофизике космических лучей (1109).
  3. Космические лучи и физика высоких энергий (1110).
  4. Космические лучи у Земли. Оценка времени жизни космических лучей и мощности их источников в Галактике (1110).
  5. Космические лучи во Вселенной (1112).
  6. Происхождение космических лучей (1115).
  7. Космические лучи со сверхвысокой энергией. Заключительные замечания (1117).
- Дополнение (1118).
- А. О 24-й Международной конференции по космическим лучам (24th International Cosmic Ray Conference) (1118).
  - Б. Несколько замечаний (1118).
- Список литературы (1120).

## 1. Краткая история открытия космических лучей

Историю открытия космических лучей можно считать начинающейся в 1900 г., когда Эльстер и Гейтль [1] и независимо Вильсон [2] пришли к заключению о наличии некоторой электропроводности у чистого воздуха, находящегося в закрытых сосудах. При этом какие-либо видимые источники ионизации воздуха отсутствовали. Тогда уже было известно, что электропроводность газов увеличивается под действием рентгеновских лучей и

радиоактивных излучений. Поэтому наблюдаемый эффект — "темновой" ток, обусловленный остаточной ионизацией воздуха, — связывался с действием радиоактивных загрязнений как в самом воздухе, так и в окружающей среде (стенки сосуда, земля). Правда, еще в 1901 г. Вильсон высказал мысль [3], что остаточная ионизация вызвана каким-то сильно проникающим излучением, приходящим из-за пределов земной атмосферы. Но это была чистая спекуляция, и Вильсон сам от нее вскоре отказался [4, 5]. Впрочем, гипотеза о каком-то проникающем излучении внеземного происхождения не была полностью забыта, хотя и считалась невероятной [6].

Итак, наблюдаемая ионизация связывалась с радиоактивностью и, конкретно, с гамма-излучением радиоактивных веществ. Результаты при этом длительное время оставались противоречивыми и неясными. Так, экранирование прибора (электроскопа) даже довольно толстым слоем свинца хотя и привело к уменьшению скорости ионизации, но она все же оставалась равной 6 парам ионов в см<sup>3</sup> в секунду [7]. Отсюда, казалось бы, следовало, что источником ионизации являются стенки приборов. Оставались, однако, какие-то неясности, совершенствовалась аппаратура, и для выяснения роли излучения, идущего от земли, стали поднимать прибор повыше — сначала поместили его на Эйфелеву башню, а затем совершали полеты с ним на воздушных шарах. Именно на этом последнем пути Виктору Гессу (1883–1964 гг.) и удалось внести ясность в вопрос. Всего Гесс совершил 10 полетов (два в 1911 г., семь в 1912 г. и один в 1913 г.). Наблюдения в открытой кабине (гондоле), в которой находилось три человека, вел сам Гесс, причем иногда приходилось дышать кислородом. Во время наиболее удачного полета, происшедшего 7 августа 1912 г., была достигнута высота в 5350 м над уровнем моря и получены вполне определенные результаты, свидетельствующие о довольно сильном возрастании скорости ионизации, начиная с высоты примерно 2000 м [8]. Конкретно, если в одном из двух использовавшихся

<sup>1</sup> Доклад на конференции по космическим лучам, физике и астрофизике частиц (Флоренция, 11–13 сентября 1995 г.). В публикуемый здесь текст доклада не вносилось изменений, но в конце его помещено дополнение, написанное специально для УФН.

Гессом приборов, давление в которых поддерживалось постоянным (это было важным методическим моментом), на уровне моря и вплоть до высоты в 2000 м образовывалось в среднем 15–16 ионов/см<sup>3</sup>, то среднее значение скорости ионизации для высот 4000–5200 м составляло уже около 34 ионов/см<sup>3</sup>; показания второго прибора были аналогичны.

На основании своих измерений во время нескольких полетов Гесс сделал такой вывод [8]: "Результаты наблюдений лучше всего могут быть объяснены в предположении, что излучение с высокой проникающей способностью входит в нашу атмосферу сверху. Даже в нижних слоях атмосферы это излучение производит часть наблюдаемой ионизации в закрытых сосудах... Поскольку я не наблюдал уменьшения интенсивности излучения ни ночью, ни во время солнечного затмения, Солнце трудно рассматривать в качестве источника гипотетического излучения, по крайней мере, если иметь в виду непосредственно гамма-излучение с прямолинейным распространением".

7 августа 1912 г. — дату указанного наиболее успешного полета Гесса принято, пусть это и условно, считать датой открытия космических лучей.

Результаты Гесса представляются нам сейчас вполне убедительными. Но фактически это было не так, измерения Гесса вызвали возражения, в первую очередь, со стороны немецкого физика Кольхерстера, связывавшего изменение скорости ионизации с высотой с изменениями температуры. Кольхерстер создал более совершенный прибор и в 1913–1914 гг. совершил пять полетов на шарах, причем достиг высоты 9300 м [9]. Вопреки желанию "закрыть" открытие Гесса, Кольхерстер полностью его подтвердил. На высоте 9000 м скорость ионизации достигла уже 80 ионов/см<sup>3</sup>, что примерно в 40 раз превосходило скорость ионизации на уровне моря. Кольхерстер назвал источник ионизации "высотным излучением" (Hohenstrahlung), употреблялось также название "гессовское излучение" (Hess'sche Strahlung). Сам Гесс пользовался термином "ультрагамма-излучение" (Ultragammastrahlung). Современное название "космические лучи" было дано в 1925 г. Милликоном [10]. Кстати сказать, Милликен и его сотрудники довольно долгое время сомневались в том, что повышенная ионизация действительно вызвана каким-то излучением, приходящим из мирового пространства. Предполагалось, что источником ионизации являются радиоактивные вещества, скапливающиеся в верхних слоях атмосферы. Эта гипотеза была окончательно опровергнута лишь в 1925 г. [10] (подробнее см. [4]).

Итак, только к 1925–1926 гг. сомнения в существовании космических лучей окончательно отпали. Вместе с тем, с самого начала [8] считалось, что речь идет о гамма-лучах, пусть и более жестких, чем известные гамма-лучи радиоактивного происхождения. Такое предположение вполне понятно, ибо именно гамма-лучи являются наиболее проникающими из числа известных радиоактивных излучений. О возможности того, что ультрарелятивистские заряженные частицы также могут обладать высокой проникающей способностью, тогда не знали. Об этом речь пойдет ниже. Сейчас же заметим, что в настоящее время космическими лучами называют исключительно быстрые заряженные частицы космического происхождения. Космическое гамма-излучение также существует, но его называют космическими

гамма-лучами, изучение которых составляет предмет гамма-астрономии.

Отметим также, что Гесс получил Нобелевскую премию по физике только в 1936 г. "за открытие космического излучения" ("for his discovery of cosmic radiation"). Точнее, Гесс получил половину премии, вторая ее половина досталась Андерсону за открытие позитрона [11]. Кстати сказать, по статусу Нобелевских премий они должны присуждаться за "самые последние достижения...", а за более старые работы только, если их значение не было выяснено до последнего времени". Присуждение Гессу премии только через 24 года после открытия космических лучей, несомненно, отражает тот факт, что это открытие сравнительно длительное время оспаривалось, а затем его значение не было должным образом оценено. Впрочем, в наши дни упомянутое условие присуждения Нобелевских премий соблюдается скорее как исключение, чем как правило.

Первое указание на то, что в составе первичных космических лучей у Земли имеются заряженные частицы, было фактически получено Клеем [12] в 1927 г. Именно, был обнаружен геомагнитный эффект на уровне моря — зависимость интенсивности космических лучей (скорости ионизации) от геомагнитной широты. На геомагнитном экваторе интенсивность на 10–15% меньше, чем на высоких широтах. Очевидно, гамма-лучи за широтный эффект ответственны быть не могут. Однако Клей наблюдаемый эффект никак не объяснил. Его правильная интерпретация была дана лишь Боте и Кольхерстером в 1929 г. в работе, посвященной обнаружению с помощью счетчиков Гейгера-Мюллера, работавших на совпадениях, высокопроникающих заряженных частиц, явно входивших в состав космических лучей [13]. Впрочем, такие частицы с высокой энергией, несомненно, еще раньше наблюдал Скобельцын [14].

Итак, наблюдение быстрых заряженных частиц на уровне моря и геомагнитного эффекта позволило предполагать, что по крайней мере часть первичных космических лучей, попадающих в атмосферу, состоит из заряженных частиц [13]. Важное значение в дальнейшем сыграли опыты Росси [15], усовершенствовавшего метод совпадений и выяснившего, что в составе космических лучей имеются частицы с очень высокой проникающей способностью; была доказана также способность заряженных частиц в космических лучах создавать вторичные частицы [15, 4, 5].

Изучению геомагнитных эффектов и, в первую очередь, широтного эффекта было посвящено большое число работ, на это были затрачены огромные усилия [4, 5]. Дело в том, что результаты измерений во многом казались противоречивыми. Сейчас мы понимаем, что это в значительной мере было связано с тем обстоятельством, что на высоких широтах (выше примерно 50°) геомагнитный широтный эффект на уровне моря не может наблюдаться. Причина проста — частицы с энергией меньше  $4 \times 10^9$  эВ (и их продукты) поглощаются в атмосфере, и ожидаемое увеличение их потока на границах атмосферы до уровня моря "не доходит". Окончательная ясность в вопрос о широтном эффекте была в 1932 г. внесена Комптоном, организовавшим ряд экспедиций, проводивших измерения по единой методике в 69 пунктах, разбросанных по всему миру [16]. В результате широтный эффект был выявлен со всей определенностью. Однако тем самым еще не было доказано, что

все первичное космическое излучение имеет корпускулярную природу, часть первичных космических лучей могла бы состоять из гамма-фотонов. Именно такой точки зрения придерживался Комптон [16], пришедший к выводу (на основании сравнения теории геомагнитных эффектов с наблюдениями), что энергия заряженной компоненты первичных космических лучей лежит в пределах от  $5 \times 10^9$  до  $1,3 \times 10^{10}$  эВ.

Помимо широтного эффекта под действием магнитного поля Земли происходит некоторое разделение положительно и отрицательно заряженных частиц, попадающих на атмосферу. В результате, если количество положительных и отрицательных частиц неодинаково, должна наблюдаться так называемая восточно-западная асимметрия — потоки частиц с востока и с запада будут неодинаковы [17] (см. также [5]). Вначале Росси не удалось обнаружить этот эффект, но в дальнейшем (в 1933 г.) в опытах Джонсона [18], Альвареса и Комптона [19] и того же Росси [20] восточно-западная асимметрия была установлена, причем оказалось, что преобладают положительно заряженные частицы. Если бы этот вывод был сделан всего на год-два раньше, то сочли бы, что первичные космические лучи состоят, в основном, из протонов или более тяжелых ядер. Но как раз в 1932 г. был открыт позитрон [11], и поэтому вначале склонялись к мысли, что речь идет о позитронах. Однако более детальный анализ геомагнитных эффектов на уровне моря и вообще на земной поверхности привел Джонсона в 1938 г. к выводу [21] о, в основном, протонной природе первичных космических лучей. Это предположение было в 1940 г. подтверждено группой Шайна [22], проводившей измерения на шарах-зондах вплоть до высоты в 20000 м, где регистрируются, в основном, первичные частицы. К этому времени уже были открыты ливни в космических лучах и в основном выяснен характер поглощения в веществе протонной и электронно-позитронной компонент. Конкретно, электронно-позитронная компонента создает ливни, в то время как протоны с такой же энергией их не образуют. Поэтому в установке с несколькими счетчиками, разделенными свинцом [22], удалось выяснить, что первичные частицы почти не образуют ливней и являются протонами.

Забегая несколько вперед, заметим, что дальнейшее изучение первичной компоненты путем регистрации ливней в камере Вильсона на большой высоте показало [23], что ливнеобразующих частиц (электронов, позитронов, фотонов) меньше 1 % от числа протонов (речь идет об электронах с энергией больше  $10^9$  эВ). Этот результат относится к 1950–1952 гг. Лишь в 1961 г. Ирль впервые обнаружил [24] в составе первичных космических лучей электроны с энергией больше  $5 \times 10^8$  эВ.

Еще до выяснения роли электронной компоненты [23] была применена новая методика — осуществлен подъем в стратосферу фотографических эмульсий. Таким методом удалось в 1948 г. установить [25, 26], что в составе первичных космических лучей имеются ядра целого ряда элементов вплоть до ядер железа. Некоторые сведения о ядерной компоненте приведены ниже. Сейчас же отметим лишь, что, грубо говоря, протоны составляют около 90 % от всех первичных космических лучей, на долю ядер гелия (речь идет об  $\alpha$ -частицах, т.е. ядрах  $\text{He}^4$ ) приходится приблизительно 10 % потока и, наконец, поток всех остальных ядер составляет только порядка 1 % от полного потока.

## 2. Об астрофизике космических лучей

Таким образом, лишь примерно через 40 лет после полетов Гесса было выяснено, что из мирового пространства к Земле приходят космические лучи — ионизирующее "излучение", состоящее из протонов и ядер с высокой энергией. Однако никаких источников космических лучей мы непосредственно не видим и, более того, космические лучи у Земли изотропны — приходят со всех сторон с одинаковой интенсивностью (действие земного магнитного поля считается исключенным)<sup>2</sup>. Поэтому, хотя космические лучи являются, так сказать, астрономическим объектом, ни о какой астрофизике космических лучей не могло быть и речи. Ситуация была аналогична той, которая имела бы место, если бы наблюдалось вместе лишь интегральное оптическое излучение Солнца, всех звезд и туманностей, но сами эти источники не были бы видны (такую картину можно вообразить для гипотетической планеты с очень толстой рассеивающей атмосферой). Астрофизика космических лучей родилась тогда, в начале 50-х годов, когда стало возможным наблюдать космические лучи вдали от Земли. Мы, очевидно, имеем в виду развитие радиоастрономических методов и, конкретно, наблюдений космического радиоизлучения синхротронной природы. Останавливаться на истории этого направления здесь никакой возможности. Ограничимся ссылками на пионерские работы [27–30], статьи в сборниках [5, 31] и монографии [32, 33].

Суть же дела хорошо известна и очень кратко будет затронута ниже. Сейчас достаточно отметить, что релятивистские электроны, образующие электронную компоненту космических лучей (у Земли интенсивность этой компоненты составляет лишь порядка процента от интенсивности протонно-ядерной компоненты), двигаясь в космических магнитных полях, излучают радиоволны (синхротронный механизм). Поскольку радиоволны распространяются прямолинейно, прием космического радиоизлучения позволяет получить сведения об электронной компоненте космических лучей вдали от Земли, в нашей Галактике и в других галактиках и квазарах. Ценой некоторых предположений таким образом получают также данные о всех космических лучах во Вселенной. Другими словами, методом радиоастрономии удалось "увидеть" космические лучи в межзвездном пространстве, в различных туманностях (в частности, в оболочках сверхновых звезд) и в других галактиках. Иногда синхротронное излучение заметно также в оптическом и рентгеновском диапазонах.

Начиная с 1972 г., удалось принимать на спутниках гамма-излучение (с энергией больше 30–50 МэВ), образующееся в результате распада  $\pi^0$ -мезонов, генерируемых в космосе при столкновениях протонно-ядерной компоненты космических лучей с ядрами атомов межзвездной среды. Тем самым стали получать информацию непосредственно об основной части космических лучей вдали от Земли. Вообще, рождение гамма-астрономии существенно обогатило возможности изучения космических лучей во Вселенной, ибо космические гамма-фотоны

<sup>2</sup> Фактически, некоторая анизотропия  $\delta$ , измеряемая долями процента, наблюдается. Но речь при этом идет либо о частицах с высокой энергией, либо о мягких космических лучах солнечного происхождения [4, 5].

с достаточно высокой энергией генерируются только космическими лучами, в частности, в результате упомянутого образования  $\pi^0$ -мезонов. Космические лучи должны также генерировать нейтрино. Регистрация таких нейтрино космического происхождения (в отличие от нейтрино, рождающихся космическими лучами в атмосфере и в толще Земли) еще не осуществлена, но это дело близкого будущего [33, 34].

Итак, астрофизика космических лучей базируется сейчас на изучении первичных космических лучей у Земли, на радио- и гамма-астрономии. Используется, конечно, и вся другая астрономическая информация.

Состояние астрофизики космических лучей к 1990 г. отражено в монографии [33] и цитируемой там литературе. Более полные, а также более новые сведения содержатся в первую очередь в трудах происходящих каждые два года международных конференций по космическим лучам (International cosmic ray conferences); 23-я такая конференция происходила в Калгари (Канада) в июле 1993 г., 24-я конференция состоится в Риме в августе–сентябре 1995 г. (см. дополнение в конце доклада).

### 3. Космические лучи и физика высоких энергий

Как хорошо известно, интерес к космическим лучам еще до рождения астрофизики космических лучей в 1950–1953 гг. был очень большим. Это было связано с тем, что до создания современных ускорителей только в космических лучах наблюдались частицы с высокой энергией. Тем самым, физика высоких энергий долгое время, вплоть до середины 50-х годов, была самым тесным образом связана с космическими лучами. В космических лучах были обнаружены ливни [14, 15, 35, 36, 4, 5], в 1932 г. открыт позитрон [11], в 1937 г. обнаружены  $\mu^\pm$ -лептоны (мюоны) [37, 38, 4, 5] и в 1947 г. открыты  $\pi^\pm$ -мезоны [39, 4, 5]. В дальнейшем в космических лучах были впервые (в период 1947–1953 гг.) обнаружены  $K^+$ - и  $K^0$ -мезоны,  $\Lambda^0$ -,  $\Xi^-$ - и  $\Sigma^+$ -гипероны [4].

С середины 50-х годов интерес к космическим лучам в физике высоких энергий резко упал по двум причинам: во-первых, появились достаточно совершенные ускорители; во-вторых, хотя это и менее важно, родилась астрофизика космических лучей, отвлекшая в какой-то мере внимание от физики космических лучей. Однако изучение космических лучей в их, как говорят, ядерном аспекте, продолжалось и продолжается [41].

В этой связи нам представляется уместным сделать здесь лишь одно замечание.

Космические лучи не могут конкурировать с ускорителями, как только на ускорителе достигается соответствующая энергия. Сейчас наивысшая достигнутая на ускорителе энергия протонов составляет 900 ГэВ (лаборатория Ферми). Но там имеются встречные пучки, и поэтому 900 ГэВ — это энергия  $E_c$  протона в системе центра масс. Для протона в составе космических лучей, сталкивающегося с покоящимся протоном, такая энергия  $E_c$  в системе центра масс достигается при энергии ( $M$  — масса протона)

$$E = \frac{2E_c^2}{Mc^2} - Mc^2 \approx \frac{2E_c^2}{Mc^2} \approx 2 \times 10^6 \text{ ГэВ} = 2 \times 10^{15} \text{ эВ.} \quad (1)$$

Таким образом, сейчас использовать космические лучи для целей физики высоких энергий можно, вообще говоря, лишь для энергий  $E > 2 \times 10^{15}$  эВ. Лет через десять, с пуском ускорителя ЛНС в ЦЕРНе, энергия  $E_c$  вырастет на порядок, и речь уже может идти об использовании космических лучей только с  $E > 10^{17}$  эВ.

Наибольшая энергия частицы, зафиксированная в космических лучах, составляет  $3 \times 10^{20}$  эВ [42]. Поэтому может показаться, что для использования космических лучей имеются еще большие резервы. Но фактически это не так, ибо частиц со сверхвысокими энергиями крайне мало. Так, согласно [43] интенсивность частиц с энергией больше  $10^{20}$  эВ порядка одной частицы в столетие на  $\text{км}^2$  на телесный угол в стерадиан. Для частиц с энергией больше  $10^{18}$  эВ интенсивность равна уже 60 частиц/ $\text{км}^2 \cdot \text{ср} \cdot \text{год}$ , а при меньших энергиях интенсивность  $I$ , конечно, возрастает (грубо говоря, интегральная интенсивность  $I(> E = 3 \times 10^{15} \text{ эВ})$  обратно пропорциональна  $E^2$ ). Но все равно интенсивность космических лучей представляется слишком малой, чтобы надеяться зафиксировать какие-то единичные элементарные акты соударений с  $E > 10^{16} - 10^{17}$  эВ. Однако все же можно надеяться на получение какой-то информации косвенно, по широким атмосферным ливням. Так или иначе, в области энергий больше  $2 \times 10^{15}$  эВ космические лучи все еще остаются интересными для физики высоких энергий.

### 4. Космические лучи у Земли.

#### Оценка времени жизни космических лучей и мощности их источников в Галактике

Одним из основных источников информации о космических лучах является, очевидно, изучение первичных космических лучей, т.е. частиц, наблюдаемых за пределами атмосферы. Измеряется при этом дифференциальная интенсивность  $I(E)$  или интегральная интенсивность

$$I(> E) = \int_E^\infty I(E) dE,$$

причем  $I(E) dE$  есть число частиц с энергией в интервале  $(E + dE, E)$ , падающих на единицу поверхности в единичном телесном угле в единицу времени в направлении перпендикулярном поверхности. Таким образом, например,

$$[I(E)] = \frac{\text{число частиц}}{\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{ср} \cdot \text{эВ}}.$$

В силу изотропности космических лучей (очень малой анизотропией пренебрегаем)  $I$  от углов не зависит. Но  $I$  зависит, конечно, от сорта частиц, т.е.  $I = I_{Z,A}$  для протонно-ядерной компоненты ( $Z$  — порядковый номер,  $A$  — массовое число) и  $I = I_e = I_{e^-} + I_{e^+}$  для электронно-позитронной компоненты. Используются также суммарные интенсивности

$$I_{\text{cr}} = \sum_{Z,A} I_{Z,A}, \quad I_{\text{cr},Z} = \sum_A I_{Z,A},$$

а также потоки через полусферу направлений:

$$F_i = \int I_i d\Omega = \pi I_i$$

(для изотропного излучения;  $\Omega$  — телесный угол). Концентрация таких частиц со скоростью  $v_i$  равна

$$N_i = \frac{4\pi}{v_i} I_i,$$

плотность энергий —

$$w_i = \int E_k N_i(E) dE,$$

где  $E_k = E - Mc^2$  — кинетическая энергия. Можно ввести также интенсивность энергетического потока:

$$J_i = \int E_k I_i(E) dE.$$

Для первичных космических лучей у Земли

$$I_{cr} \sim 0,2-0,3 \frac{\text{частиц}}{\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{ср}}, \quad N_{cr} \sim \frac{4\pi I_{cr}}{c} \sim 10^{-10} \frac{\text{частиц}}{\text{см}^3},$$

$$w_{cr} \sim 10^{-12} \frac{\text{эрг}}{\text{см}^3} \sim 1 \frac{\text{эВ}}{\text{см}^3}, \quad J_{cr} \sim \frac{c w_{cr}}{4\pi} \sim 10^{-3} \frac{\text{эрг}}{\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{ср}}. \quad (2)$$

Здесь учтено, что скорость частиц космических лучей  $v \sim c$ , так как частицы в космических лучах в основном релятивистские. К сожалению, вдаваться в подробности, в частности, касающиеся модуляционных эффектов в солнечной системе, здесь невозможно. Заметим, кстати, что первичные частицы поверхности Земли практически не достигают. На уровне моря, т.е. под слоем атмосферы (около  $1000 \text{ г/см}^2$ ), наблюдаются лишь вторичные космические лучи (около 70 % составляют  $\mu^\pm$ -лептоны (мюоны) и около 30 % — электроны и позитроны). Для первичных космических лучей поток равен

$$F_{cr} = \pi I_{cr} \sim 1 \frac{\text{частиц}}{\text{см}^2 \cdot \text{с}},$$

а на уровне моря  $F \sim 10^{-2}$  частиц/см<sup>2</sup>·с.

Изучению первичных космических лучей было посвящено и посвящается огромное число работ, это целая область исследований (некоторые данные и литературу см. в [33] и особенно в [41]). Здесь мы должны ограничиться лишь немногими сведениями и замечаниями.

Интегральный спектр (интенсивность) всех космических лучей в интервале энергий  $10^{10} < E < 3 \times 10^{15}$  эВ неплохо описывается выражением

$$I_{cr}(> E) = 1 \cdot [E (\text{ГэВ})]^{-1,7} \frac{\text{частиц}}{\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{ср}}. \quad (3)$$

При кинетической энергии  $\epsilon_k \lesssim 10^{10}$  эВ/нуклон уже сказывается влияние солнечной системы, и этой области мы касаться не будем. Для энергий  $E > 3 \times 10^{15}$  эВ

$$I_{cr}(> E) = 3 \times 10^{-10} \left[ \frac{E (\text{ГэВ})}{10^6} \right]^{-2} \frac{\text{частиц}}{\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{ср}}. \quad (4)$$

"Колено" (излом) в спектре при  $E \sim 3 \times 10^{15}$  эВ весьма характерно. Спектр типа (4) справедлив до энергий  $E \sim 3 \times 10^{17}-10^{18}$  эВ. Затем спектр изменяется [42]; об области сверхвысоких энергий с  $E > 10^{18}$  эВ речь еще пойдет в конце доклада.

Для электронно-позитронной компоненты без разделения на электроны и позитроны в области

$$5 \times 10^9 < E < 10^{11} \text{ эВ}$$

$$I_{e}(> E) \equiv I_{e^-+e^+}(> E) = 1,5 \times 10^{-2} [E (\text{ГэВ})]^{-2} \frac{\text{частиц}}{\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{ср}}. \quad (5)$$

Плотность энергии в этой компоненте есть

$$w_{cr,e} \sim 10^{-2} w_{cr} \sim 10^{-14} \frac{\text{эрг}}{\text{см}^3}. \quad (6)$$

Количество позитронов составляет величину порядка 10 % от полного числа электронов и позитронов, т.е.  $I_{e^+} \sim 0,1 \cdot I_e$ . Помимо позитронов в 1979 г. были обнаружены также антипротоны, их на 3–4 порядка меньше, чем протонов.

О химическом составе космических лучей уже упоминалось. Спектры для различных ядер, как ясно из рис. 1, аналогичны (в области энергий  $\epsilon_k < 10^3$  МэВ/нуклон, они искажены в результате солнечной модуляции). На рис. 2 показана средняя распространенность элементов в Галактике и в космических лучах. В общем и целом, как следует из рис. 2 и более полных данных, распространенность ядер в космических лучах повторяет их распро-

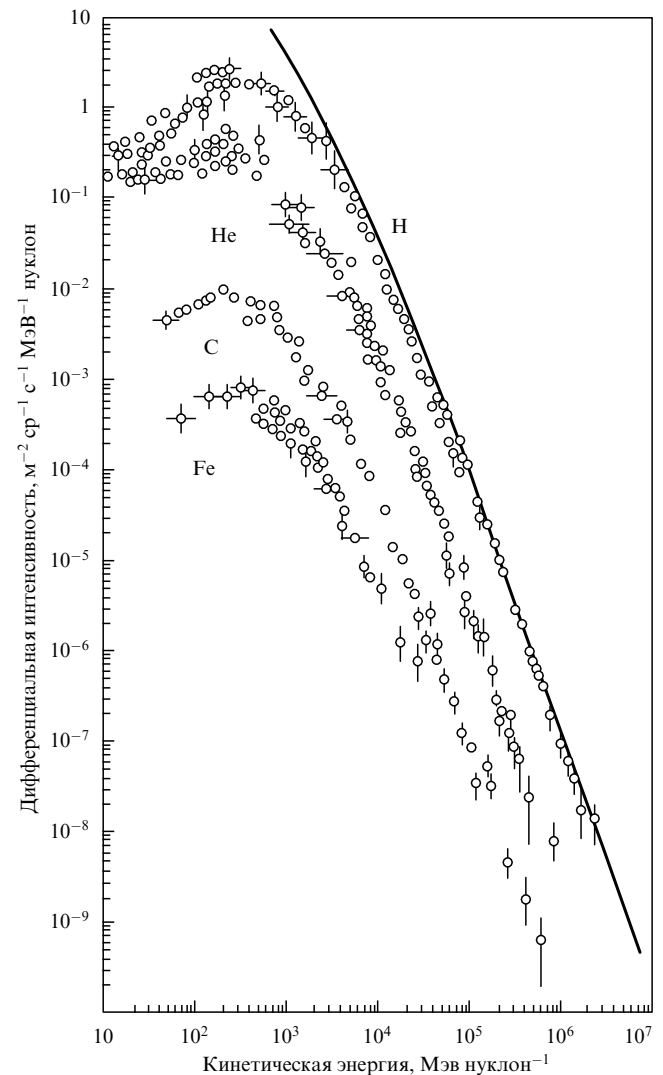


Рис. 1

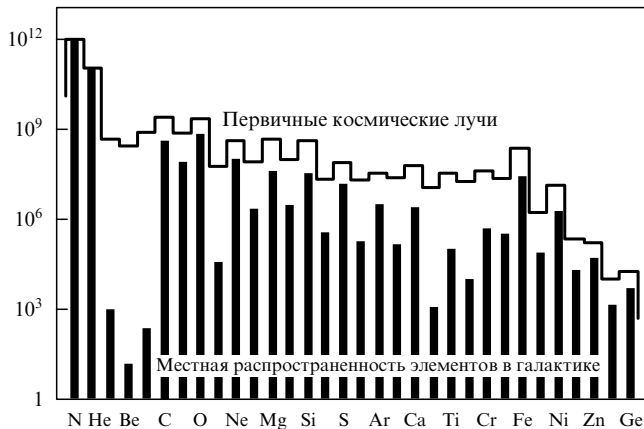


Рис. 2

страненность в космосе. Имеется, однако, ряд отклонений, важнейшее из которых состоит в резком различии в распространенности легких элементов Li, Be и B. Именно, в космических лучах этих элементов немногим меньше, чем других, скажем, элементов C, N и O. В природе же элементов Li, Be и B очень мало. Эти различия, как и ряд других, объясняются тем, что блуждая в межзвездной среде ядра космических лучей соударяются с ядрами атомов межзвездного газа (в основном, с протонами), в результате чего их состав трансформируется. В частности, в качестве продуктов трансформации более тяжелых ядер появляются ядра Li, Be и B. Анализ данных о химическом (элементном) и изотопическом составе космических лучей [33] приводит к выводу, что толща межзвездного газа, проходимого космическими лучами, достигающими Земли, равна примерно  $x \sim 5-10$  г/см<sup>2</sup>. С другой стороны, очевидно,

$$x = v\rho T_{\text{cr}} \approx c\rho T_{\text{cr}}, \quad (7)$$

где  $v \approx c$  — скорость частиц в космических лучах, а  $\rho$  и  $T_{\text{cr}}$  — соответственно некоторая средняя плотность среды и время блуждания.

Межзвездная среда весьма неоднородна, и поэтому значение плотности  $\rho$  в области захвата (заполнения) космических лучей в Галактике заранее неизвестно. Как мы увидим ниже, имеются основания полагать, что космические лучи заполняют довольно большое гало со средним значением концентрации межзвездного газа  $n \sim 10^{-2}$  см<sup>-3</sup>, что отвечает плотности  $\rho \sim 2 \times 10^{-24}$  г·см<sup>-3</sup> (в основном присутствуют водород и гелий). При таком значении  $\rho$  и  $x \sim 5-10$  получаем

$$T_{\text{cr}} \approx \frac{x}{c\rho} \sim 10^{14} \text{ с} \sim 3 \times 10^8 \text{ лет}. \quad (8)$$

Легко оценить мощность (светимость)  $L_{\text{cr}}$  источников космических лучей в Галактике, а именно,

$$L_{\text{cr}} \sim \frac{w_{\text{cr}} V}{T_{\text{cr}}} \sim \frac{c w_{\text{cr}} M_{\text{g}}}{x} \sim 3 \times 10^{40} \frac{\text{эрг}}{\text{с}}, \quad (9)$$

где  $M_{\text{g}} = \rho V \sim 5 \times 10^{42}$  г — полная масса газа в Галактике (объем  $V$ ), а для плотности энергии космических лучей  $w_{\text{cr}}$  использовано значение, указанное в (2); кроме того, использовано выражение (7) с  $x \sim 5-10$  г·см<sup>-2</sup>.

Разумеется, при подобной оценке картина считается квазистационарной. Весьма важно, что оценка (9) не зависит от выбора значения  $T_{\text{cr}}$  и опирается лишь на следующие из наблюдений величины  $w_{\text{cr}}$ ,  $x$  и  $M_{\text{g}}$ .

Здесь мы, конечно, вышли за пределы сведений о первичных космических лучах у Земли, а использовали галактическую модель происхождения космических лучей. В этой модели, речь о которой еще пойдет ниже, космические лучи, наблюдаемые у Земли в основной своей массе, образуются в нашей Галактике и выходят в межгалактическое пространство с характерным временем  $T_{\text{cr}}$  (см. (8)). До такого выхода космические лучи блуждают в межзвездных магнитных полях, в какой-то доле теряют энергию и, так сказать, выходят из игры.

## 5. Космические лучи во Вселенной

Непосредственные сведения о космических лучах вдали от Земли получаются в результате наблюдения создаваемого ими электромагнитного излучения различных диапазонов. Особенно большое значение имеют радио-астрономия и гамма-астрономия. Однако некоторые данные поступают также и в оптическом, и в рентгеновском частях спектра.

Основы теории синхротронного излучения достаточно хорошо известны (см., например, [32, 33, 44]), но тем не менее здесь представляется необходимым кое-что напомнить. Частица заряда (заряд  $e$ , масса  $m$ ) с полной энергией  $E$  в однородном магнитном поле с напряженностью  $H$  движется по винтовой линии с угловой частотой

$$\omega_H = \frac{|e|H mc^2}{mc E} = 1,76 \times 10^7 \frac{mc^2}{E}, \quad (10)$$

где при переходе к последнему выражению имеются в виду электроны, а поле  $H$  измеряется в эрстедах (гауссах). То же предполагается ниже. Такая частица, если она является ультррелятивистской, излучает в направлении своей скорости в угле порядка  $mc^2/E$ . Если угол  $\chi$  между  $v$  и  $H$  не слишком мал (т.е.  $\chi \gg mc^2/E$ ), то частица излучает спектр частот, являющихся обертонами частоты  $\omega_H/\sin^2 \chi$ . Практически (при  $E \gg mc^2$ ) спектр является непрерывным, причем максимум в спектре приходится на частоту

$$\begin{aligned} \nu_m &\equiv \frac{\omega_m}{2\pi} = 0,07 \frac{|e|H_{\perp}}{mc} \left( \frac{E}{mc^2} \right)^2 = 1,2 \times 10^6 H \left( \frac{E}{mc^2} \right)^2 = \\ &= 1,8 \times 10^{18} H_{\perp} [E(\text{эрг})]^2 = \\ &= 4,6 \times 10^{-6} H_{\perp} [E(\text{эВ})]^2 \text{ Гц}, \end{aligned} \quad (11)$$

$$\hbar\omega_m = 1,9 \times 10^{-20} H_{\perp} [E(\text{эВ})]^2 \text{ эВ},$$

где  $H_{\perp} = H \sin \chi$  — составляющая поля  $H$ , перпендикулярная скорости частицы  $v$ .

В характерном межзвездном поле  $H \sim H_{\perp} \sim 3 \times 10^{-6}$  Э для частиц с  $E \sim 10^9-10^{11}$  эВ частота  $\nu_m$  лежит в интервале  $10^7-10^{11}$  Гц, что отвечает длине волны  $\lambda_m = c/\nu_m \sim 30$  м — 0,3 см. Таким образом, электронная компонента космических лучей с  $E > 10^9$  эВ будет в межзвездных полях излучать в основном в радиодиапазоне. На частоте  $\nu_m$  спектральная плотность мощности

радиоизлучения есть

$$p_m \equiv p(v_m) = 1,6 \frac{|e|^3 H}{mc^2} = 2,16 \times 10^{-22} H_{\perp} \frac{\text{эрг}}{\text{с} \cdot \text{Гц}}. \quad (12)$$

Если мы имеем дело с областью, в которой излучающие электроны с концентрацией  $N_e$  распределены изотропно по скоростям, то соответствующая излучательная способность (спектральная мощность излучения, отнесенная к единице объема и единичному телесному углу) выражается как

$$\varepsilon_{v_m} = \frac{p_m N_e}{4\pi} = 1,7 \times 10^{-23} H_{\perp} N_e \frac{\text{эрг}}{\text{см}^3 \cdot \text{с} \cdot \text{ср} \cdot \text{Гц}}, \quad (13)$$

где  $H_{\perp}$  — среднее значение составляющей поля, перпендикулярной скорости частицы, для излучающего объема. Из (13) ясно, что максимальная интенсивность излучения для монохроматических электронов есть

$$J_{v_m} = \int \varepsilon_{v_m} dl = 1,7 \times 10^{-23} H_{\perp} N_e L \frac{\text{эрг}}{\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{ср} \cdot \text{Гц}}, \quad (14)$$

где  $L$  — характерный размер радиоизлучающей области вдоль луча зрения (таким образом,  $N_e L = \int N_e dl$ ).

В случае некоторого дискретного источника радиоизлучения (скажем, оболочки сверхновой), находящегося от нас на расстоянии  $R$ , поток радиоизлучения (см. (13)) равен

$$\Phi_{v_m} = \frac{p_m N_e V}{4\pi R^2} = 1,7 \times 10^{-23} \frac{H_{\perp} N_e V}{R^2} \frac{\text{эрг}}{\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{Гц}}, \quad (15)$$

где  $V$  — объем источника.

Согласно (11), энергия электронов  $E = 0,75 \times 10^{-9} \sqrt{v_m/H_{\perp}}$  эрг. Отсюда и из (15) следует, что полная энергия электронов в источнике равна

$$W_e = EN_e V = 4,4 \times 10^{13} \frac{v_m^{1/2} \Phi_{v_m} R^2}{H_{\perp}^{3/2}}. \quad (16)$$

Поток радиоизлучения  $\Phi_{v_m}$  может непосредственно быть измерен и, если известны также значения  $R$  и  $H_{\perp}$  для источника, то мы находим и  $W_e$ .

К сожалению, приведенные выражения не имеют отношения к реальности, поскольку в природе, вообще говоря, не приходится иметь дело с моноэнергетическими электронами. Весьма часто можно, однако, считать спектр электронов довольно простым, а именно степенным, когда концентрация электронов в интервале  $dE$  имеет вид

$$N_e(E) dE = K_e E^{-\gamma_e} dE. \quad (17)$$

Для этого случая также вычисляется интенсивность [32, 33, 44]

$$J_v = \text{const} \cdot K_e L H^{(\gamma_e+1)/2} v^{(1-\gamma_e)/2}, \quad (18)$$

где  $H$  — некоторое среднее значение магнитного поля вдоль луча зрения; из (18) ясно, что измеряя зависимость  $J_v$  от частоты  $v$  мы сразу же узнаем показатель  $\gamma_e$ , а само значение  $J_v$  позволяет найти (при известных  $L$  и  $H$ ) и коэффициент  $K_e$ , т.е. найти электронный спектр в источ-

нике, а затем и связанную с ними плотность энергии

$$w_{cr,e} = \int EN_e(E) dE.$$

Размеры радиоизлучающей области, расстояния  $R$  до дискретных источников и объем этих источников  $V$  определяются астрономическими методами, в частности, из радионаблюдений. Труднее определить поле  $H$ . Кстати, один из методов определения  $H$  основан на том же выражении (18). Именно, если считать, что концентрация релятивистских электронов известна (конкретно, полагают, что их столько же, сколько в первичных космических лучах у Земли; см. (5) и (6)), то магнитное поле  $H$  оценивается по измеренной интенсивности  $J_v$  в предположении, что известен размер излучающей области  $L$  вдоль луча зрения (см. (18)).

В Галактике, по различным оценкам  $H \sim 3 \times 10^{-6}$  Э, и это значит, что плотность энергии космических лучей (см. (2)) порядка плотности энергии магнитного поля:

$$w_{cr} \sim w_H = \frac{H^2}{8\pi} \sim 10^{-12} \frac{\text{эрг}}{\text{см}^3}. \quad (19)$$

В квазистационарных условиях такую ситуацию и следует ожидать. Космические лучи "вморожены" в хорошо проводящий межзвездный газ и, если  $w_{cr} \gg H^2/8\pi$  (а значит, давление космических лучей  $p_{cr} \approx w_{cr}/3$  сильнее давления магнитного поля), космические лучи будут вытекать из рассматриваемой области. Если же  $w_{cr} \ll H^2/8\pi$ , то ничто не мешает накоплению космических лучей, а значит, не будет иметь место квазиравновесие.

Несколько обобщая соотношение (19), можно полагать

$$\kappa_H w_{cr} = w_H, \quad \kappa_H W_{cr} = W_H. \quad (20)$$

Здесь  $W_{cr} = \int w_{cr} dv$  и  $W_H = \int w_H dv$  — соответственно полные энергии космических лучей и поля в рассматриваемом объеме. Аналогично, естественно положить

$$\kappa_e w_{cr,e} = w_{cr} = \frac{w_H}{\kappa_H}, \quad \kappa_e W_{cr,e} = W_{cr}. \quad (21)$$

Как сказано, у Земли и, вероятно, для Галактики в целом (см. (19) и (6))

$$\kappa_H \sim 1, \quad \kappa_e \sim 10^2. \quad (22)$$

Задаваясь значениями  $\kappa_H$  и  $\kappa_e$ , мы из одних лишь радиоданных находим энергии  $W_{cr,e}$ ,  $W_{cr}$  и  $W_H$ . Так часто поступают и приходят к выводу (см., например, [32]), что для оболочек сверхновых  $W_{cr} \sim 3 \times 10^{46} - 5 \times 10^{49}$  эрг. Для нормальных галактик  $W_{cr} \sim 10^{55} - 10^{57}$  эрг и для радиогалактик  $W_{cr} \sim 10^{58} - 10^{60}$  эрг (заметим, что  $10^{60}$  эрг — это уже  $10^6 M_{\odot} c^2$ ).

Для нашей Галактики, принимая значение (19) и характерный объем, заполненный космическими лучами  $V_h \sim 10^{68} \text{ см}^3$ , имеем

$$W_{cr} \sim w_{cr} V_h \sim 10^{56} \text{ эрг}. \quad (23)$$

Принятое значение  $V_h$  отвечает гало Галактики с характерным размером  $h \sim 10 \text{ кпк} \sim 3 \times 10^{22} \text{ см}$ . Само понятие о гало космических лучей и радиогало возникло в связи с развитием радиоастрономии, ибо "оптическая" Галак-

тика представляет собой диск с характерной полутолщиной  $h_d \sim 3 \times 10^{20}$  см. Естественно, космические лучи не удерживаются в таком диске и вместе с магнитными полями образуют некоторое гало. В радиодиапазоне можно говорить о радиогало, т.е. о гало электронной компоненты космических лучей. К сожалению, с Земли, находящейся внутри системы, исследовать гало трудно. Поэтому о радиогало долгие годы шли споры, пока такое гало не было в 1977 г. выявлено [45] в видных "с ребра" галактик, в первую очередь у галактики NGC 4631 (рис. 3, на котором черные линии — это изофоты на волне  $\lambda = 49,2$  см, т.е. на частоте  $\nu = 610$  МГц).

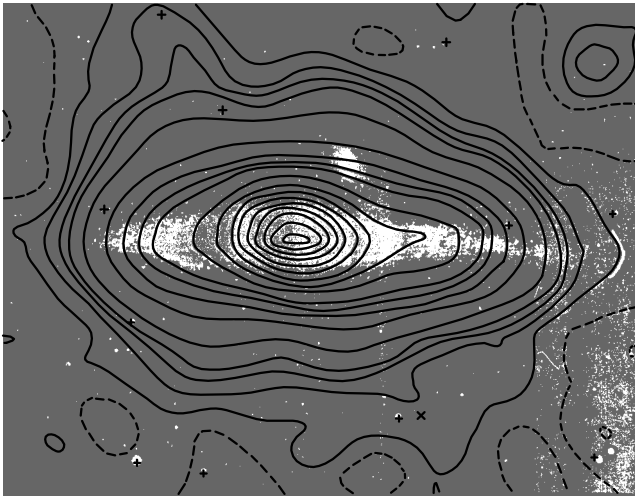


Рис. 3

Развитие радиоастрономии показало, во-первых, что космические лучи — это универсальный феномен: они присутствуют в межзвездном пространстве нашей Галактики, в туманностях (в оболочках сверхновых и других), в других галактиках и особенно в радиогалактиках и квазарах. Во-вторых, как выяснилось, космических лучей во Вселенной много в том смысле, что они являются существенным энергетическим и динамическим фактором. Именно, плотность их энергии порядка плотности магнитной энергии, велико и давление  $p_{cr} \approx w_{cr}/3$  (в космических лучах, которые изотропны, доминируют релятивистские частицы). Плотность энергии  $w_{cr} \sim 10^{-12}$  эрг см<sup>-2</sup> одного порядка и с плотностью энергии реликтового теплового излучения с температурой 2,7 К. Наконец, тот же порядок имеет, вообще говоря, и плотность энергии межзвездного газа

$$w_g = \frac{3}{2} nk_B T$$

(например, при концентрации газа  $n \sim 1$  см<sup>-3</sup> и температуре  $T \sim 10^4$  К как раз  $w_g \sim 10^{-12}$  эрг см<sup>-3</sup>).

Оба эти вывода находятся в согласии с современными представлениями физики плазмы: в разреженной космической плазме при наличии пучков частиц и ударных волн частицы должны ускоряться. "Хвост" распределения частиц в космосе по энергиям, отвечающий высокой энергии, и представляет собой космические лучи.

Синхротронный механизм действует, конечно, во всех диапазонах — все зависит от значений  $H$  и  $E$ . Так, например, при  $H_{\perp} \sim 10^{-3}$  Э и  $E = 10^{12}$  эВ, согласно (11),

$\nu_m \sim 10^{15}$  Гц и  $\lambda_m = c/\nu_m \sim 10^{-5}$  см = 1000 Å. Поэтому, вообще говоря, неудивительно, что в некоторых случаях синхротронное излучение даже протяженных объектов, таких как Крабовидная туманность (остаток сверхновой 1054 г.), оказывается лежащим также в оптической и рентгеновской частях спектра. Оптическое синхротронное излучение наблюдается и в случае радиогалактики Дева А (галактика NGC 4486). При этом синхротронная природа излучения устанавливается в первую очередь по поляризации. Дело в том, что синхротронное излучение может быть сильно поляризованным. Так, синхротронное излучение отдельного электрона, вообще говоря, эллиптически поляризовано, причем величина электрического вектора излучения максимальна в направлении ускорения. Поэтому преимущественное направление колебаний перпендикулярно проекции магнитного поля  $H_{\perp}$  на плоскость, перпендикулярную лучу зрения. Разумеется, если магнитное поле в источнике в среднем хаотично по направлениям, то поляризация отсутствует. Но фактически она довольно часто наблюдается, что свидетельствует о наличии упорядоченного поля (подробнее см. [32]).

В пульсарах, когда поля достигают значений  $H \sim 10^{12}-10^{13}$  Э, особенно эффективно родственное синхротронному изгибное излучение (curvature radiation). В первом приближении изгибное излучение можно описать формулами, относящимися к синхротронному излучению, если заменить в них ларморов радиус  $r_H$  на радиус кривизны силовых линий поля  $R_H$ . Поступая таким образом, можно видеть, что в полях  $H \sim 10^{12}$  Э релятивистские электроны с доступной энергией излучают даже весьма жесткие гамма-лучи. Гамма-излучение пульсаров наблюдается и, по всей вероятности, представляет собой изгибное излучение электронов и позитронов, ускоряемых вблизи пульсара, т.е. намагниченной и вращающейся нейтронной звезды.

Гамма-излучение с непрерывным спектром генерируется релятивистскими электронами также в результате тормозного излучения и обратного эффекта Комптона на фоновом мягком электромагнитном излучении (на микроволновом излучении с температурой 2,7 К, а также на оптическом и инфракрасном излучениях). Мы не можем здесь останавливаться на этих механизмах (см., например, [33, 44]). С точки зрения астрофизики космических лучей особый интерес представляет уже упоминавшееся гамма-излучение, генерируемое протонно-ядерной компонентой космических лучей в результате соударений с ядрами газа с рождением  $\pi^0$ -мезонов, а также некоторых других частиц, быстро распадающихся с образованием гамма-фотонов. Важность такого гамма-излучения очевидна — в этом случае мы получаем сведения о протонно-ядерной компоненте непосредственно, а не с помощью дополнительных предположений, связывающих эту компоненту с электронной компонентой (см. (21)).

Распад  $\pi^0$ -мезонов (среднее время жизни составляет  $0,84 \times 10^{-16}$  с) с вероятностью 98,8% происходит по каналу  $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ . Поэтому при распаде покоящегося  $\pi^0$ -мезона образуются гамма-фотоны с энергией

$$E_{\gamma} = \frac{m_{\pi^0} c^2}{2} = 67,5 \text{ МэВ.}$$

Другие реакции и распады с образованием гамма-лучей (например, распад  $\Sigma^0 \rightarrow \Lambda + \gamma$ ) играют значительно



меньшую роль, и для простоты мы упоминаем лишь распад  $\pi^0$ -мезонов.

Интенсивность образующихся таким образом гамма-лучей пропорциональна концентрации  $n$  ядер в газе (в межзвездном пространстве или, скажем, в оболочке сверхновой) и интенсивности космических лучей  $I_{cr}$ . Конкретно, дифференциальная интенсивность гамма-лучей по числу фотонов (спектр гамма-лучей) вдоль луча зрения равна

$$I_{\gamma}(E_{\gamma}) = \int \sigma(E_{\gamma}, E) n(l) I_{cr}(E, l) dl, \quad (24)$$

где  $\sigma(E_{\gamma}, E)$  — соответствующее эффективное сечение для образования космическими лучами с энергией  $E$  гамма-лучей с энергией  $E_{\gamma}$  (сечение должно, конечно, быть усреднено с учетом элементного и изотопного состава космических лучей и ядер в газе).

Для потока гамма-лучей от дискретного источника на основе (24) имеем

$$F_{\gamma}(> E_{\gamma}) = \int_{\Omega} I_{\gamma}(> E_{\gamma}) d\Omega = \frac{(\overline{\sigma I_{cr}}) \tilde{n}(V)}{R^2} \frac{\text{фотонов}}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}, \quad (25)$$

где  $\Omega$  — телесный угол, под которым виден источник, находящийся на расстоянии  $R$ ,  $(\overline{\sigma I_{cr}})$  — усредненное по спектру космических лучей сечение и  $\tilde{n}(V)$  — количество ядер газа в источнике объемом  $V$ .

Если не говорить о возможности исследования космических гамма-лучей с энергией  $E > 10^{11}-10^{12}$  эВ на поверхности Земли по их оптическому излучению Вавилова-Черенкова в атмосфере, для приема гамма-излучения приходится использовать тяжелые спутники. Но запуск таких гамма-обсерваторий — дело сложное и трудное. За всю историю гамма-астрономии работали только спутник SAS II (1972–1973 гг.), спутник COS-B (1975–1982 гг.,  $E_{\gamma} > 30-70$  МэВ) и продолжает действовать Compton Gamma Ray Observatory (CGRO), запущенная в апреле 1991 г. На CGRO имеется четыре независимых прибора, действующих в разных областях гамма-спектра. Нас сейчас интересует работа прибора EGRET, принимающего гамма-лучи с  $E_{\gamma} > 30-50$  МэВ, т.е. фиксирующего, в частности, гамма-лучи от распада  $\pi^0$ -мезонов.

Быть может, не лишним будет подчеркнуть, что по своей величине потоки космических гамма-лучей с высокой энергией весьма малы. Например, для мощного галактического источника (пульсара) Геминга  $F_{\gamma}(> E_{\gamma} = 100 \text{ МэВ}) = 4,8 \times 10^{-6}$  фотонов  $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$ . Такой поток на 6 порядков меньше потока первичных космических лучей у Земли (см. (2)). Поэтому-то исследования в области гамма-астрономии, особенно при высоких энергиях, весьма трудны. Как результат, с 1982 г. по 1991 г. не работала ни одна гамма-обсерватория, а сейчас действует лишь обсерватория CGRO.

Здесь, конечно, невозможно сколько-нибудь подробно останавливаться на результатах гамма-астрономии даже в диапазоне высоких энергий  $E_{\gamma} > 30-50$  МэВ. Отметим лишь колоссальную светимость некоторых гамма-источников. Так, галактические источники (пульсары, молекулярные облака) имеют светимость  $L_{\gamma} \sim 10^{34}-10^{36}$  эрг/с, причем светимость определяется

на основании измерений потока выражением

$$L_{\gamma} = 4\pi R^2 \int E_{\gamma} F_{\gamma}(E_{\gamma}) dE_{\gamma}, \quad (26)$$

т.е. в предположении об изотропности излучения (множитель  $4\pi$ ); если излучение не изотропно, то светимость, конечно, меньше. Если, например,  $F_{\gamma}(> E = 100 \text{ МэВ}) \sim 5 \times 10^{-6}$  фотонов/см<sup>2</sup> · с при спектре  $F(> E_{\gamma}) \sim E_{\gamma}^{-2}$ , то при расстоянии  $R = 1000 \text{ пк} \sim 3 \times 10^{21} \text{ см}$   $L_{\gamma} \sim 10^{35}$  эрг/с. Конкретно, для Краба (пульсар PSR 0531)  $L_{\gamma}(50 \text{ МэВ} < E_{\gamma} < 10 \text{ ГэВ}) \approx 2 \times 10^{35}$  эрг/с. Полная гамма-светимость нашей Галактики  $L_{\gamma}(> 70 \text{ МэВ}) \sim 10^{39}$  эрг/с, что отвечает при наблюдаемом спектре потоку примерно  $2 \times 10^{42}$  фотонов/с. Для квазара 3C 279, находящегося на расстоянии  $R \sim 5000 \text{ Мпк}$ , на приборе EGRET получено рекордное значение  $L_{\gamma}(50 \text{ МэВ} < E_{\gamma} < 3 \text{ ГэВ}) \sim 10^{48}$  эрг/с. Для известного квазара 3C 273  $L_{\gamma}(50 \text{ МэВ} < E_{\gamma} < 0,5 \text{ ГэВ}) \approx 2 \times 10^{46}$  эрг/с (принято расстояние  $R = 790 \text{ Мпк}$ ). Полная светимость этого квазара, видимо, не превышает значения  $L = (2-5) \times 10^{47}$  эрг/с, а его рентгеновская светимость  $L_X(0,5 \text{ кэВ} < E_X < 4,5 \text{ кэВ}) \approx 1,7 \times 10^{46}$  эрг/с. Для сравнения напомним, что полная в основном оптическая светимость Солнца  $L_{\odot} = 3,8 \times 10^{33}$  эрг/с, а для Галактики  $L_G \sim 10^{44}$  эрг/с. Кстати, полная светимость Галактики в радиодиапазоне  $L_{G,r} \sim 3 \times 10^{38}$  эрг/с.

Поскольку гамма-лучи с высокой энергией создаются космическими лучами, из сказанного особенно ясно, сколь велика роль космических лучей во Вселенной.

## 6. Происхождение космических лучей

В широком плане проблема происхождения космических лучей — это вопрос об ускорении и распространении космических лучей в различных условиях. Обычно, однако, речь идет о происхождении космических лучей, наблюдаемых у Земли и в солнечной системе. Такие космические лучи, конечно, выделены, поскольку относительно их мы имеем богатую информацию, получаемую непосредственно физическими методами. Именно в таком смысле мы и будем ниже говорить о происхождении космических лучей. При этом не принимаются во внимание мягкие космические лучи солнечного происхождения, вклад которых в основную часть космического излучения у Земли с  $\epsilon_k \gtrsim 10^8$  эВ/нуклон весьма невелик. Не будем сейчас касаться и космических лучей со сверхвысокой энергией  $E \gtrsim 10^{17}$  эВ, о них еще пойдет речь в следующем разделе.

В отношении происхождения рассматриваемой основной части космических лучей, наблюдаемых у Земли, нужно ответить на такие вопросы:

Какую область эти космические лучи заполняют?

Как они распространяются и трансформируются в межзвездной среде?

Каковы их источники?

Каков механизм их ускорения?

Исторически существовали три модели или, как принято было говорить, теории происхождения космических лучей: солнечная, галактическая и метagalacticкая. В солнечной или локальной модели принимается, что космические лучи образуются на Солнце и заполняют гелиосферу. Конечно, то же самое может происходить около других звезд, но в галактическом пространстве космических лучей относительно мало. Такая точка

зрения могла как-то серьезно обсуждаться лишь до понимания связи между космическими лучами и космическим радиоизлучением [27–31], т.е. условно, скажем, до 1953 г. (впрочем, ее пытались защищать и позже [5]). Но с тех пор, как стало ясно, что космические лучи более или менее равномерно заполняют всю Галактику, о локальной модели происхождения космических лучей говорить не приходится (впрочем, локальная модель представляется неправдоподобной и независимо от радиоастрономических данных).

В галактических моделях космические лучи считаются образующимися и сосредоточенными в Галактике, из которой они могут вытекать в метагалактическое пространство. Наконец, в метагалактических моделях считается, что космические лучи заполняют всю Метагалактику и втекают в Галактику. При этом, для того чтобы космические лучи в Галактике и, в частности, у Земли имели в основном метагалактическое происхождение, нужно, чтобы их концентрация, спектр и плотность энергии  $w_{\text{cr}}^{\text{M}}$  вблизи Галактики были такими же, как соответствующие величины для первичных космических лучей у Земли. Это значит, что в метагалактических моделях

$$w_{\text{cr}}^{\text{M}} \approx w_{\text{cr}}^{\text{G}} \equiv w_{\text{cr}}, \quad (27)$$

где  $w_{\text{cr}} \sim 10^{-12}$  эрг/см<sup>3</sup> — уже неоднократно упоминавшаяся плотность энергии космических лучей вблизи Земли (см. (2)).

Плотность энергии (27) весьма велика, и обеспечить ее получение (очевидно, за счет генерации в галактиках, включая радиогалактики и квазары) довольно трудно. Таково, можно сказать, энергетическое возражение против метагалактических моделей (см., например, [32]). Тем не менее метагалактические модели находили сторонников не столь уж давно [46].

Хотелось бы опровергнуть метагалактические модели непосредственно. И это теперь можно сделать. После открытия в 1965 г. реликтового теплового излучения с температурой 2,7 К стало ясно, что все пространство заполнено микроволновым излучением, причем соответствующая плотность энергии  $w_{\text{ph},\text{T}} = 4 \times 10^{-13}$  эрг/см<sup>3</sup>. В пространстве имеется и немало оптических и инфракрасных фотонов. Релятивистские электроны, движущиеся в магнитном поле и поле излучения, претерпевают потери энергии на синхротронное излучение и в силу обратного эффекта Комптона, причем эти потери пропорциональны плотности энергии  $H^2/8\pi + w_{\text{ph}}$ , где плотность энергии излучения  $w_{\text{ph}} > w_{\text{ph},\text{T}}$ . Межгалактическое магнитное поле в среднем, вероятно, довольно слабо ( $H < 10^{-7} - 10^{-8}$  Э), но потери на обратный эффект Комптона эквивалентны синхротронным потерям в поле  $H_{\text{eqv}} = \sqrt{8\pi w_{\text{ph}}} \gtrsim 10^{-6}$  Э. Поэтому, как легко видеть (см., например, [33]), релятивистские электроны с  $E > 10^{10}$  эВ, а вероятно, и  $E > 10^9$  эВ, не могли бы до нас дойти даже от ближайшей радиогалактики Центавр А (расстояние  $R \approx 4$  Мпк). Кроме того, электроны по пути генерировали бы за счет обратного эффекта Комптона недопустимо сильное рентгеновское и гамма-излучение. Таким образом, электронная компонента космических лучей в Галактике должна в ней и образовываться.

Трудно в таких условиях считать, что протонно-ядерная компонента приходит, тем не менее, из других

галактик [46]. Непосредственно же такое заключение о несправедливости метагалактических моделей следует из гамма-астрономических данных. В самом деле, в метагалактических моделях, опираясь на соотношение (27), можно предсказать поток гамма-лучей, генерируемых протонно-ядерной компонентой в Магеллановых Облаках [40, 47, 48]. Например, в Малом Облаке

$$F_{\gamma}^{\text{SMC}} (> E_{\gamma} = 100 \text{ МэВ}) = (2-3) \times 10^{-7} \frac{\text{фотонов}}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}. \quad (28)$$

Измерения же на CGRO привели к оценке [49]

$$F_{\gamma}^{\text{SMC}} (> E_{\gamma} = 100 \text{ МэВ}) < 0,5 \times 10^{-7} \frac{\text{фотонов}}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}. \quad (29)$$

Таким образом, пусть и не со слишком большим запасом, устанавливается неравенство

$$w_{\text{cr}}^{\text{M}} \ll w_{\text{cr}}, \quad (30)$$

опровергающее метагалактические модели.

Той же цели могли бы послужить гамма-астрономические измерения градиента концентрации космических лучей в Галактике [50]. К сожалению, данные COS-B на этот счет недостаточно точны, а данных CGRO мы не знаем.

Итак, метагалактические модели неприемлемы, и остаются лишь галактические модели. Именно модели, а не модель, ибо космические лучи могут быть по-разному распределены в Галактике и т.д. Основное различие существует между галактическими дисковыми моделями и моделями с гало. В дисковых моделях космические лучи считаются сосредоточенными в некотором галактическом диске с характерной полутолщиной  $h_{\text{d}}$ , много меньшей радиуса диска или, скажем, расстояния от Солнца до галактического центра  $R \sim 3 \times 10^{22}$  см. В моделях с гало, напротив, космические лучи образуют (заполняют) гало — квазисферическую или несколько сплюснутую область, окружающую звездную Галактику (Млечный Путь) и имеющую характерный размер (радиус)  $h \sim 3 \times 10^{22}$  см. Выше мы уже касались моделей с гало, в пользу которых свидетельствуют как физические соображения, так и радиоастрономические данные. В пользу же дисковых моделей не говорит ничего кроме простоты некоторых расчетов в предположении об однородном заполнении космическими лучами какого-то диска (так называемая "leak-box" модель).

Некоторые параметры галактической модели с гало уже приводились (см. (8), (9), (23)). Для удобства сопоставим эти параметры вместе:

— Размеры гало космических лучей  $h \sim (3-5) \times 10^{22}$  см = 10–15 кпс. Радиогало несколько меньше, его характерные размеры зависят от частоты наблюдаемого радиоизлучения (т.е. от энергии электронов), причем увеличиваются с уменьшением частоты.

— Объем  $V_{\text{h}} \sim 10^{68}$  см<sup>3</sup>.

— Полная энергия космических лучей  $W_{\text{cr}} \sim w_{\text{cr}} V_{\text{h}} \sim 10^{56}$  эрг  $\sim 100 M_{\odot} c^2$ .

— Полная энергия электронной компоненты  $W_{\text{cr},\text{e}} \sim 10^{-2} W_{\text{cr}} \sim 10^{54}$  эрг.

— Характерное время жизни космических лучей (протонов) в Галактике (в гало)  $T_{\text{cr}} \sim (1-3) \times 10^8$  лет  $\sim (3-10) \times 10^{15}$  с.

— Мощность (светимость) источников космических лучей  $U_{\text{cr}} \equiv L_{\text{cr}} \sim W_{\text{cr}}/T_{\text{cr}} \sim (1-3) \times 10^{40}$  эрг/с.

— Мощность источников электронной компоненты  $U_{\text{cr,e}} \sim W_{\text{cr,e}}/T_{\text{cr,e}} \sim 10^{39}$  эрг/с.

Здесь учтено, что характерное время жизни электронов  $T_{\text{cr,e}}$  меньше, чем  $T_{\text{cr}}$ , поскольку электроны претерпевают синхротронные потери энергии, а также теряют энергию за счет обратного эффекта Комптона. Оценка времени  $T_{\text{cr}}$  была приведена выше (см. (8)). Аналогичный результат получается также при расчетах, учитывающих диффузию космических лучей, приводящую к их выходу из гало [33]. К сожалению, здесь нет возможности обсуждать диффузию и трансформацию химического состава космических лучей при их блуждании в галактических магнитных полях. То же касается механизма ускорения космических лучей. Всем этим вопросам посвящена огромная литература, цитируемая в обзорах [32, 33, 51, 52] и трудах [41].

Однако одной проблемы, а именно, вопроса об источниках космических лучей в Галактике невозможно не затронуть даже в настоящем докладе, не рассчитанном, разумеется, на специалистов.

Поскольку Солнце генерирует, особенно во время солнечных вспышек, космические лучи, естественно думать, что и другие звезды также являются их источниками. Однако мощность генерации космических лучей Солнцем составляет в среднем  $L_{\text{cr},\odot} \sim 10^{24}$  эрг/с (см. [53], где приводится мощность генерации по числу частиц  $q_{\text{cr},\odot} \sim 10^{26}$  с<sup>-1</sup>; к указанному значению  $L_{\text{cr},\odot}$  приходим, принимая среднюю энергию частиц равной  $10^{10}$  эВ  $\sim 10^{-2}$  эрг)<sup>3</sup>. Поэтому, как можно думать, даже все  $10^{11}$  звезд в Галактике могут обеспечить лишь мощность  $L_{\text{cr}} \sim 10^{35}$  эрг/с вместо необходимой мощности  $(1-3) \times 10^{40}$  эрг/с. Конечно, некоторые звезды значительно активнее Солнца, но их не так много. Таким образом, очень трудно считать, что обычные звезды являются основным источником космических лучей. Напротив, имеются все основания полагать этими источниками вспышки сверхновых звезд. Такая гипотеза и была высказана еще в 1934 г. Бааде и Цвикки [54].

При вспышке сверхновой выделяется в виде кинетической энергии и в виде излучения энергия  $W_{\text{SN}} \sim 10^{49} - 10^{51}$  эрг (кстати, на примере сверхновой SN 1987A известно, что при этом энергия нейтрино  $W_{\text{SN},\nu} \sim 10^{53}$  эрг). В среднем, как считается, время между вспышками сверхновых в Галактике  $t_{\text{SN}} \sim 30$  лет. Отсюда средняя мощность, отвечающая вспышкам сверхновых:

$$L_{\text{SN}} \sim \frac{W_{\text{SN}}}{t_{\text{SN}}} \sim 10^{40} - 10^{42} \frac{\text{эрг}}{\text{с}}. \quad (31)$$

Поскольку сверхновые бывают разных типов и значения  $W_{\text{SN}}$  и  $t_{\text{SN}}$  оценены достаточно грубо, значение (31) также имеет лишь ориентировочный характер. Других столь мощных источников энергии в Галактике нет. Далее,

<sup>3</sup> Приведенная оценка некорректна. Как любезно сообщил автору Л.И. Дорман, средняя светимость Солнца в космических лучах  $L_{\text{cr},\odot} \sim 10^{25}$  эрг/с, причем испускаются в основном мягкие лучи с  $E_k > 10$  МэВ. Отсюда приходим к светимости всех "обычных" звезд в Галактике  $L_{\text{cr}} \sim 10^{36}$  эрг/с. Таким образом, обычные звезды не могут обеспечить как нужную мощность генерации космических лучей в Галактике, так и их ускорение до энергий  $E > 10^9 - 10^{10}$  эВ.

радиоастрономические наблюдения свидетельствуют о довольно мощном радиоизлучении оболочек сверхновых, т.е. о заведомом присутствии в них релятивистских электронов. Обычные расчеты, основанные на предположении (22), приводят при этом к заключению о присутствии в оболочках протонно-ядерной компоненты с  $W_{\text{cr,SN}} \sim 3 \times 10^{46} - 5 \times 10^{49}$  эрг [32]. Но космические лучи вытекают из оболочек, а ускорение ударными волнами идет и вне оболочек. Поэтому полная энергия, переходящая в космические лучи при вспышке, вполне может быть  $W_{\text{cr,SN}} \sim 10^{49} - 10^{50}$  эрг. Это значит, что оценка типа (31) без труда дает для  $L_{\text{cr,SN}}$  нужные значения мощности  $L_{\text{cr}} \sim (1-3) \times 10^{40}$  эрг/с. Совокупность всех этих соображений не оставляет, на наш взгляд, никаких сомнений в том, что именно вспышки сверхновых являются основным источником космических лучей в Галактике. Дополнительные сведения на этот счет могут быть и, вероятно, будут получены гамма-астрономическим методом в результате наблюдения гамма-лучей от оболочек сверхновых и их окрестностей [51, 52, 55, 56]. Однако мы не видим никаких реальных оснований считать [56], что до проведения подобных измерений сделанное заключение о роли сверхновых недостаточно доказательно. Сказанное не означает, однако, что генерация космических лучей звездами (особенно новыми звездами, звездами типа OB и некоторыми другими) не представляет интереса. Напротив, это одна из весьма важных проблем (см., например, [57]).

## 7. Космические лучи со сверхвысокой энергией. Заключительные замечания

Выше было прослежено изучение космических лучей с начала века. Поражает грандиозность затраченных усилий и полученных результатов. Если вначале речь шла о скромных измерениях "темнового" тока в ионизационных камерах, то сейчас используются многочисленные сложные приборы на земле и на тяжелых спутниках. Отразить достигнутое и правильно выявить современное состояние астрофизики космических лучей очень нелегко. Автору трудно судить, в какой мере удалось это сделать выше. Можно надеяться, однако, что одно ясно: астрофизика космических лучей занимает в современной астрономии место, аналогичное месту радиоастрономии и гамма-астрономии. Все эти направления тесно связаны между собой и развиваются совместно.

Возвращаясь к истории, отметим, что еще сорок лет назад (и тем более тридцать лет назад [32]) с привлечением радиоастрономических данных вырисовывалась такая картина (здесь мы допускаем некоторое повторение уже сказанного):

космические лучи являются универсальным феноменом и играют существенную энергетическую и динамическую роль во Вселенной;

основная часть космических лучей, наблюдаемых у Земли, имеет галактическое происхождение и заполняет галактическое гало (галактическая модель с гало);

основными источниками космических лучей в Галактике являются сверхновые звезды.

Некоторые элементы этой картины долгое время оставались гипотетическими, но затем полностью подтвердились. Так, многолетние споры о существовании радиогало практически разрешились в 1977 г. [45]. Метагалактические модели были окончательно опро-

вергнуты после открытия реликтового излучения (1965 г.) и измерений потока гамма-лучей от Магеллановых Облаков (1993 г.; см. [48, 49]). Существенным достижением явилось также рассмотрение (в 1977–1978 гг.) механизма диффузионного ускорения частиц в ударных волнах (оригинальные ссылки см. в [33, 52]).

В результате, по нашему убеждению, в настоящее время проблема происхождения космических лучей может считаться в хорошем приближении решенной за исключением области космических лучей со сверхвысокой энергией. Точнее, достаточно ясна ситуация в области энергий меньше  $E \sim 3 \times 10^{15} - 3 \times 10^{16}$  эВ, т.е. ниже "колена" (см. (4)). В этой области, кстати, нет сомнений в возможности эффективно ускорять частицы ударными волнами от сверхновых в межзвездном пространстве (см., например, [56], а также [58] и указанную там литературу). Правда, сверхновые (включая сюда и пульсары) могут, в принципе, обеспечить ускорение и до значительно больших энергий, но уже ценой дополнительных предположений [33, 51, 58]. Природа "колена" окончательно еще не выяснена, и вообще, в области энергий выше "колена" имеется ряд нерешенных вопросов [59]. Особенно это относится к области энергий  $E \gtrsim 3 \times 10^{18}$  эВ. Дело в том, что при энергии  $E \sim 3 \times 10^{18}$  эВ в спектре космических лучей имеется еще один излом [42] (рис. 4). Создается впечатление, что при  $E > 3 \times 10^{18}$  эВ начинает доминировать какая-то новая компонента космических лучей. Естественно думать, что эта компонента метагалактического происхождения. Действительно, ускорять такие частицы в Галактике, хотя, быть может, и возможно, но очень трудно, а в радиогалактиках и квазарах (в активных галактических ядрах) такие энергии сравнительно легко достижимы [33, 58]. Но здесь возникает трудность: протоны, не говоря уже о ядрах, не могут свободно распространяться в межгалактическом пространстве. Именно, в результате столкновений с фотонами реликтового излучения ( $T = 2,7$  К), а также с инфракрасными и оптическими фотонами ядра расщепляются, а протоны тормозятся за счет рождения  $e^+e^-$ -пар, затем  $\pi$ -мезонов и т.д. В результате спектр должен резко укрупняться (см. [33] и указанную там оригинальную литературу). Конкретно, протон с самой высокой наблюдавшейся энергией  $3 \times 10^{20}$  эВ [42] не может иметь возраст больше примерно  $10^8$  лет, т.е. прийти с расстояния большего, чем приблизительно  $10^{26}$  см  $\sim 30$  Мпк. Вместе с тем, частицы с такой энергией почти не отклоняются в галактических и межгалактических магнитных полях, и поэтому направление на

источники известно, но подходящего источника в этом направлении не видно [60, 61]. То же относится к немногим другим известным событиям с  $E \gtrsim 10^{20}$  эВ. Таким образом, вопрос об источниках космических лучей со сверхвысокой энергией совершенно открыт. Возникла даже гипотеза [61], что эти источники представляют собой так называемые топологические дефекты (topological defects), быть может, возникающие на ранних стадиях космологической эволюции.

Сделанные замечания фрагментарны и преследуют только одну цель: показать, что передний фронт исследований космических лучей переместился в область сверхвысоких энергий. Только здесь существуют неясности фундаментального характера и можно ожидать подлинных открытий. Конечно, такие утверждения несколько рискованны, но целесообразность относиться к космическим лучам со сверхвысокой энергией с особым вниманием представляется несомненной. В частности, вполне оправданы проекты [41, 59] создания новых установок с большой площадью для наблюдения широких атмосферных ливней. Желательно устанавливать энергию, направление прихода и заряд каждой первичной частицы.

Другое особенно актуальное направление исследований — это детектирование космических нейтрино с энергией большей примерно  $10^{12}$  эВ. Речь идет, таким образом, о становлении астрономии нейтрино высоких энергий [33, 34, 62]. Источниками таких нейтрино являются космические лучи, и, таким образом, связь нейтринной астрономии высоких энергий с астрофизикой космических лучей очевидна. Эта связь аналогична имеющей место в случае гамма-астрономии и, по всей вероятности, окажется весьма плодотворной. В настоящее время строятся четыре установки для наблюдения нейтрино с высокой энергией [34]. Результаты можно ожидать в недалеком будущем.

## Дополнение

Астрофизика космических лучей в настоящее время представляет собой очень широкую область исследований, тесно связанную со многими другими направлениями (гамма- и рентгеновской астрономией, радиоастрономией, ядерной физикой, физикой высоких энергий, физикой Солнца и т.д.). Поэтому в помещенном выше докладе, хотя он не так уж короток, не удалось даже упомянуть о многих вопросах и проблемах, связанных с астрофизикой космических лучей. В этой связи представляется целесообразным остановиться хотя бы на содержании 24-й Международной конференции по космическим лучам (24 ICRC), происходившей в Риме с 28 августа по 8 сентября 1995 г.<sup>4</sup>. Кроме того, будет сделано несколько замечаний по существу дела.

### А. О 24-й Международной конференции по космическим лучам (24th International Cosmic Ray Conference)

Для того чтобы были ясны масштабы конференции, отметим, что в ней участвовало около 800 человек и было представлено примерно 1100 докладов. К началу

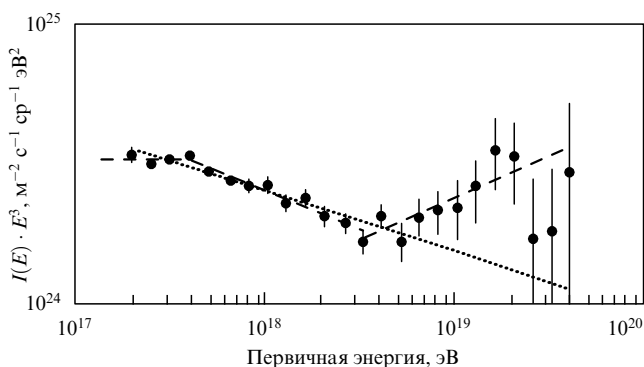


Рис. 4

<sup>4</sup> В статье [63] аналогичная информация была сообщена в отношении 20 ICRC (Москва, 1987). Такие конференции происходят каждые два года.

работы конференции были подготовлены четыре тома с докладами общим объемом около 4000 страниц. Два из этих томов (второй и третий) посвящены, условно говоря, происхождению космических лучей (по принятой терминологии это проблема ОГ). Весь материал по ОГ разделен на следующие разделы:

1. Рентгеновские лучи. Наблюдения.
2. Рентгеновские лучи. Теории и модели.
3. Рентгеновские лучи. Техника (т.е. методика).
4. Гамма-всплески. Наблюдения. Малые энергии.
5. Гамма-всплески. Наблюдения. Высокие энергии.
6. Гамма-всплески. Теории и модели.
7. Гамма-лучи. Наблюдения галактических источников.
8. Гамма-лучи. Наблюдения диффузных и внегалактических источников.
9. Гамма-лучи. Теории и модели.
10. Наблюдения Крабовидной туманности.
11. Гамма-лучи. Поиски и наблюдения источников.
12. Внегалактические источники гамма-лучей.
13. Гамма-лучи. Техника.
14. Состав космических лучей. Малые энергии.
15. Изотопный состав. Малые энергии.
16. Спектры космических лучей. Малые энергии.
17. Состав космических лучей. Высокие энергии.
18. Спектры космических лучей. Высокие энергии.
19. Анизотропия космических лучей. Высокие энергии.
20. Интенсивность и спектры электронов и позитронов.
21. Происхождение и распространение электронов и позитронов.
22. Антипротоны и антиядра.
23. Распространение космических лучей.
24. Сечения для ядерного взаимодействия.
25. Ускорение космических лучей ударными волнами.
26. Распространение (транспортировка) космических лучей.
27. Происхождение космических лучей со сверхвысокой энергией.
28. Сверхновые и источники космических лучей.
29. Происхождение космических лучей и их состав в источниках.
30. Черенковские телескопы.
31. Установки для наблюдения широких атмосферных ливней (ШАЛ).
32. Установки на баллонах.
33. Разное, вычисления, общая астрофизика и физические процессы.

Для экономии места не будем столь же подробно освещать содержание первого (HE — ядерный аспект физики космических лучей) и четвертого (SN — космические лучи от Солнца и в гелиосфере) томов. Часто деление материала между томами чисто условное. Так, в первом томе многие доклады посвящены ШАЛ и установкам для наблюдения гамма-лучей в ШАЛ. Здесь же помещены некоторые результаты работ, выполненных на ускорителях, в частности, касающиеся фрагментации ядер. Много места занимают исследования мюонов и нейтрино — атмосферных нейтрино и космических нейтрино с высокими и сверхвысокими энергиями (речь идет о проектах соответствующих установок).

В четвертом томе помещены данные об излучении Солнца в рентгеновском и гамма-диапазонах, генерации

на Солнце различных частиц, о солнечных нейтрино. Далее освещаются вопросы о распространении и ускорении частиц в гелиосфере, а также некоторые другие.

Помимо подобных оригинальных (по идее) докладов на конференции было сделано несколько "приглашенных" (invited), а по существу обзорных докладов:

1. Перспективы и результаты гамма-астрономии с использованием ШАЛ.
2. Гамма-всплески.
3. Солнечные нейтрино.
4. Сверхновые.
5. Палеоастрофизика и космические лучи.
6. Физика частиц, связанная с астрофизикой (astroparticle physics).
7. Комптоновская обсерватория (CGRO).
8. Антивещество во Вселенной.
9. История открытия и изучения космических лучей.

Проводились также "специальные сессии", посвященные наземной гамма-астрономии, влиянию явлений на Солнце и в гелиосфере на человека и его окружение, миссии Ulysses (речь идет о космическом зонде, проводившем измерения вне плоскости эклиптики), взаимодействиям в космических лучах со сверхновой энергией. Наконец, были организованы десять рабочих совещаний (Workshops) по различным вопросам. Конференция завершилась одиннадцатую репортерскими докладами. В общем, все десять рабочих дней конференции были плотно заполнены (разумеется, нельзя было избежать ряда параллельных заседаний).

Обзорные и репортерские доклады, а также материалы "специальных сессий" будут опубликованы в Nuovo Cimento.

Следующая ICRC 25 будет организована в Южной Африке в 1997 г.

Заметим, что между Международными конференциями по космическим лучам (ICRC) проводятся различные конференции и совещания меньшего масштаба и, естественно, с более узкой тематикой. Вместе с тем организация больших периодических конференций ICRC оправданна, она выдержала проверку временем.

#### **Б. Несколько замечаний**

Нужно подчеркнуть, что в моем докладе история изучения космических лучей прослежена только до начала пятидесятых годов, когда, собственно, и родилась астрофизика космических лучей. В отношении истории дальнейшего развития мы ограничиваемся ссылками на обзорную литературу. Поэтому, например, не упомянута даже работа Ферми [64], послужившая в 1949 г. началом рассмотрения ускорения частиц в космической плазме.

Как подчеркнуто в докладе, в принципиальном отношении особенно важно сейчас исследование космических лучей со сверхвысокой энергией  $E > 10^{15} - 10^{16}$  эВ. Для этой цели служат в первую очередь установки для регистрации широких атмосферных ливней (ШАЛ), увеличение и усовершенствование которых является, таким образом, очень актуальной задачей. В этой связи отметим российский проект (руководитель Г.Б. Христиансен) создания установки площадью в 1000 км<sup>2</sup> ([59], см. также [416], т. 1, с. 466) и международный проект [65] установки площадью до 5000 км<sup>2</sup> (точнее, предполагается создать две такие установки — одну в

северном и другую в южном полушариях; руководители этого проекта Дж. Кронин и А. Ватсон). Для сравнения заметим, что сейчас работают установки ШАЛ с площадью, не превосходящей примерно  $100 \text{ км}^2$ .

Так называемое "колени" (излом) в спектре космических лучей, упоминавшееся в докладе, приходится на область энергий  $10^{15}$ – $10^{16}$  эВ. Чаще всего это колени связывают с условиями распространения космических лучей в Галактике или с процессом их ускорения в источниках. Существует, однако, и другая точка зрения [66], согласно которой колени обусловлено изменением при соответствующих энергиях процесса рождения частиц при образовании ливня в атмосфере в результате соударений первичного ядра с ядрами в атмосфере. В силу случайного совпадения колени приходится как раз на область энергий, где существующие ускорители уже перестают "работать" (см. формулу (1) в докладе). Поэтому судьба этой гипотезы может быть выяснена либо в результате дальнейших изменений в космических лучах, либо на ускорителе LHC, который должен вступить в строй в начале следующего века.

Совершенно очевидно, что здесь невозможно хотя бы даже упомянуть все конкретные результаты, сообщенные на 24 ICRC, ибо во всех перечисленных выше направлениях получено что-либо новое. Главный вывод, который можно сделать, однако, таков: не было сообщено ничего фундаментально нового или как-то изменяющего картину, нарисованную в докладе.

Обсерватория CGRO продолжает работать, а уже полученные данные еще не полностью обработаны. Природа гамма-всплесков продолжает оставаться неясной, четкие новые сведения о космических лучах в Галактике еще не сообщены.

В отношении гамма-астрономии нужно отметить, что в 1983 г. было, как казалось, сделано важное открытие — обнаружено гамма-излучение некоторых космических источников с энергией, превышающей даже  $10^{14}$ – $10^{15}$  эВ (в первую очередь речь шла об источнике Суг Х-3). Это утверждение начали проверять на ряде установок, причем на некоторых из них получался положительный результат, в других же измерениях гамма-лучи со сверхвысокими энергиями, большими  $10^{14}$  эВ, обнаружены не были. Сейчас ясно, что "открытие" не состоялось — гамма-фотоны со сверхвысокой энергией при достигнутой чувствительности установок (наблюдаются ШАЛ) не детектируются. Самая высокая зафиксированная энергия фотонов достигает  $2 \times 10^{13}$  эВ (излучение Крабовидной туманности; см. [41б], т. 2, с. 315). Исследование гамма-лучей с еще большими энергиями составляет одну из основных задач проектируемых установок с очень большими площадями [59, 65], о которых мы упоминали.

Большое число работ посвящено ускорению космических лучей. Отметим в частности попытки конкретизировать процесс ускорения как электронной, так и протонно-ядерной компонент в ударных волнах в результате вспышек сверхновых [67]. Что касается ускорения частиц с самой высокой энергией, то мы уже упоминали сообщение [58], где имеется ряд ссылок на литературу. Ряд новых предложений имеется в [41б] (см. т. 3, с. 329–368). Отметим, что в работе [68] указана корреляция направлений наблюдавшихся ШАЛ с самыми высокими энергиями с направлениями на плоскость Местного Сверхскопления. Тем не менее вопрос об источниках частиц со

сверхвысокими энергиями нужно в целом считать совершенно открытым.

Антипротоны в космических лучах были впервые обнаружены только в 1979 г. [69]. Сейчас данные уточнены [70]. Так, отношение потока антипротонов  $\bar{p}$  к потоку протонов  $p$  в интервале энергий 4–19 ГэВ составляет  $1,52 \times 10^{-4}$ . Такой результат согласуется с оценками, получаемыми в предположении того, что антипротоны образуются в Галактике в результате соударений космических лучей с ядрами межзвездного газа.

В литературе и в частности в [41] нет никаких сведений об обнаружении антиядер, скажем, ядер антигелия. При этом в [71] указывается, что на границе атмосферы  $\bar{\text{He}}/\text{He} < 8 \times 10^{-6}$ .

В последнее время приходилось слышать о проекте поиска антиядер с помощью большой установки, помещаемой на космической станции (Space Station). В этой связи заметим, что вероятность положительного результата кажется нам ничтожной. В самом деле, сечения для образования антиядер космическими лучами в Галактике очень малы. Что же касается антиядер в космических лучах, приходящих из других галактик, то об этом речь могла бы идти только в том случае, если бы существовали галактики из антивещества (на это, насколько можно понять, и рассчитывают авторы проекта поиска антивещества в космических лучах). Однако на существование таких антигалактик нет никаких ни теоретических, ни наблюдательных оснований (антигалактики в результате аннигиляции антивещества с веществом на их границах могли бы быть источниками интенсивного гамма-излучения).

Сделанные выше немногие замечания имеют частично критический оттенок. Поэтому подчеркнем еще раз, что в целом большие успехи в области астрофизики космических лучей и близких направлений совершенно несомненны и впечатляющи. Не приходится сомневаться в том, что в близком будущем мы будем свидетелями еще многих достижений и открытий (достаточно упомянуть предстоящее вскоре появление результатов наблюдений космических нейтрино с высокими энергиями).

Пользуюсь возможностью поблагодарить В.С. Птушкина за замечания, сделанные при чтении рукописи.

## Список литературы

1. Elster J, Geitel H *Phys. Zs.* **2** 116, 560 (1900)
2. Wilson C T R *Proc. Camb. Phys. Soc.* **11** 32 (1900)
3. Wilson C T R *Proc. Roy. Soc. A* **68** 151 (1901)
4. Дорман И В *Космические лучи* (М.: Наука, 1981)
5. *Early History of Cosmic Ray Studies* (Eds Y Sekido, H Elliot) (Dordrecht: D. Reidel Publ. Co., 1985)
6. Kurz K *Phys. Zs.* **10** 834 (1909)
7. Rutherford E, Cooke H L *Phys. Rev.* **16** 183 (1903)
8. Hess V *Phys. Zs.* **13** 1084 (1912)
9. Kolhorster W *Phys. Zs.* **14** 1066, 1153 (1913)
10. Millikan R A, Cameron G H *Phys. Rev.* **28** 851 (1926)
11. Anderson C D *Science* **76** 238 (1932); *Phys. Rev.* **43** 491 (1933)
12. Clay J *Proc. Roy. Acad. Amsterdam* **30** 1115 (1927), **31** 1091 (1928), **33** 711 (1930)
13. Bothe W, Kolhorster W *Zs. Phys.* **56** 751 (1929)
14. Skobeltzyn D *Zs. Phys.* **43** 354 (1927), **54** 686 (1929)
15. Rossi B *Nature* **125** 636 (1930); *Naturwissenschaften* **20** 65 (1932); *Zs. Phys.* **82** 151 (1933); *Phys. Zs.* **33** 304 (1933)
16. Compton A H *Phys. Rev.* **41** 681 (1932), **43** 387 (1933)
17. Rossi B *Nature* **128** 408 (1931)

18. Johnson T H *Phys. Rev.* **43** 834, **44** 856 (1933)
19. Alvarez L, Compton A H *Phys. Rev.* **43** 835 (1933)
20. Rossi B *Phys. Rev.* **45** 212 (1934)
21. Johnson T H *Rev. Mod. Phys.* **10** 193 (1938)
22. Schein M, Jesse W P, Wollan E O *Phys. Rev.* **59** 615 (1941)
23. Critchfield C L, Nay E P, Oleksa S *Phys. Rev.* **79** 402 (1950), **85** 461 (1952)
24. Earl J A *Phys. Rev. Lett.* **6** 125 (1961)
25. Freier P et al. *Phys. Rev.* **74** 213, 1818 (1948)
26. Bradt H, Peters B *Phys. Rev.* **74** 1828 (1948)
27. Alfvén H, Herlofson N *Phys. Rev.* **78** 616 (1950)
28. Kiepenhewer K O *Phys. Rev.* **79** 738 (1950)
29. Гинзбург В Л *ДАН СССР* **76** 377 (1951)
30. Гинзбург В Л *УФН* **51** 343 (1953)
31. *The Early Years of Radioastronomy* (Eds W T Sullivan) (Cambridge Univ. Press, 1984)
32. Ginzburg V L, Syrovatskii S I *Origin of Cosmic Rays* (Oxford: Pergamon Press, 1964)
33. Березинский В С и др. *Астрофизика космических лучей* (ред. В Л Гинзбург) (М.: Наука, 1990)
34. Bahcall J N et al. *Nature* **375** 29 (1995)
35. Rossi B *Phys. Zs.* **33** 304 (1932)
36. Blackett P M S, Occhialini G P S *Proc. Roy. Soc. A* **139** 699 (1933)
37. Neddermeyer S H, Anderson C D *Phys. Rev.* **51** 884 (1937)
38. Street J C, Stevenson E C *Phys. Rev.* **52** 1003 (1937)
39. Lattes C et al. *Nature* **159** 694, **160** 453 (1947)
40. Ginzburg V L *Nature Phys. Sci.* **238** 8 (1972)
41. *Proc. International Cosmic Ray Conference (ICRC): a) 23 ICRC (Calgary, 1993), 6) 24 ICRC (Rome, 1995)*
42. Bird D J et al. *Phys. Rev. Lett.* **71** 3401 (1993); *Astrophys. J.* **441** 144 (1995)
43. Lawrence M A, Reid R, Watson A A J. *Phys. G* **17** 733 (1991)
44. Гинзбург В Л *Теоретическая физика и астрофизика* (М.: Наука, 1987)
45. Ekers R D, Sancisi R *Astron. Astrophys.* **54** 973 (1977)
46. Burbidge G *Phil. Trans. R. Soc. London A* **277** 481 (1975)
47. Ginzburg V L, Ptuskin V S *Astrophys. Astron. (India)* **5** 99 (1984)
48. Гинзбург В Л *УФН* **163** (7) 45 (1993)
49. Streekumar P et al. *Phys. Rev. Lett.* **70** 127 (1993)
50. Dodds D, Strong A W, Wolfendale A *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **171** 569 (1975)
51. Ptuskin V S, in *Proc. Second Compton Symp.* (Eds C Fichtel et al.) (New York: AIP, 1994)
52. Drury L O'C *Contemp. Phys.* **35** 231 (1994)
53. Хаякава С *Физика космических лучей* Ч. 2 (М.: Мир, 1974)
54. Vaade W, Zwicky F *Nat. Acad. Sci. USA* **20** 259 (1934); *Phys. Rev.* **46** 76 (1934)
55. Berezinskii V S, Ptuskin V S *Astron. Astrophys.* **215** 399 (1989)
56. Drury L O'C, Aharonian E A, Volk H J *Astron. Astrophys.* **287** 959 (1994) (см. также Drury L O'C *Space Sci. Rev.*) (in press)
57. Biermann P L *Cosmic Winds and the Heliosphere* (Eds J R Jokipii et al.) (The University of Arizona Press, 1994)
58. Ginzburg V L, Ptuskin V S, in *Proc. 24 ICRC* (1995) Vol. 3, p. 345
59. Kristiansen G B *Nuclear Phys. B* (Proc. Suppl.) **39A** 257 (1995)
60. Elbert J M, Sommers P *Astrophys. J.* **441** 151 (1995)
61. Sigl G, Schramm D N, Bhattacharjee P *Astroparticle Phys.* **2** 401 (1994)
62. Szabo A P, Protheroe P J *Astroparticle Phys.* **2** 375 (1994)
63. Гинзбург В Л *УФН* **155** 185 (1988)
64. Fermi E *Phys. Rev.* **75** 1169 (1949)
65. *The Pierre Auger Project* (leaders J Cronin, A Watson) (1995)
66. Nikolsky S I *Nuclear Phys. B* (Proc. Suppl.) **39A** 228 (1995); см. также [416] Vol. 1, p. 251
67. Wiebl-Sooth B, Biermann P L, Meyer H *Proc. 24 ICRC* (1995) Vol. 2, p. 658; Vol. 3, p. 45
68. Biermann P L, Rachen J P, Stanev T *Proc. 24 ICRC* (1995) Vol. 2, p. 809
69. Golden R L et al. *Phys. Rev. Lett.* **43** 1196 (1979)
70. Hof M et al. *Proc. 24 ICRC* (1995) Vol. 3, p. 60
71. Ormes J F et al. *Proc. 24 ICRC* (1995) Vol. 3, p. 92

## COSMIC RAY ASTROPHYSICS (HISTORY AND GENERAL REVIEW)

### V.L. Ginzburg

*P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences  
Leninsky Prospekt 53, Moscow 117924 GSP, Russia  
Tel. (7-095) 135-85 70  
Fax (7-095) 938-22 51*

The history of the discovery and investigation of cosmic rays prior to the advent of the cosmic ray astrophysics is presented. Some data about cosmic rays near the Earth and in the Universe are given. The main part of cosmic rays observed near the Earth are generated in our Galaxy by supernova explosions. The most important problem yet to be solved in cosmic ray astrophysics is the origin of cosmic rays of superhigh energy.

PACS numbers: 98.70.Sa

Bibliography — 71 references

*Received 27 September 1995*