

524.1

**АСТРОФИЗИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ
КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ
(Первые 75 лет и перспективы на будущее) *)**

В. Л. Гинзбург

СОДЕРЖАНИЕ

1. Введение	185
2. Первичные космические лучи у Земли	188
3. Космические лучи во Вселенной	195
4. Происхождение космических лучей. Галактическая модель с гало	202
5. Некоторые перспективы дальнейших исследований	209
Дополнение	212
Список литературы	216

1. ВВЕДЕНИЕ

Космические лучи не были открыты в каком-то одном эксперименте. Напротив, существование космических лучей — заряженных частиц с высокой энергией — было установлено в результате длительных исследований, начавшихся в первом десятилетии нашего века. Всякие же сомнения в том, что к нам из космического пространства приходит проникающее излучение — космические лучи, исчезли лишь примерно в 1927—1928 гг. Тем не менее, пусть и несколько условно, датой открытия космических лучей можно считать 7 августа 1912 г., когда Виктор Гесс совершил свой наиболее успешный полет на воздушном шаре. При этом было убедительно показано, что скорость ионизации воздуха в герметически закрытых сосудах при удалении от земной поверхности (выше примерно двух километров) растет с высотой. На достигнутой 7 августа 1912 г. высоте около 5 км скорость ионизации возрастала уже в несколько раз. Таким образом, можно считать, что настоящая конференция проводится как раз через 75 лет после открытия космических лучей. Такого срока, весьма большого в масштабах человеческой жизни, оказалось недостаточно, чтобы всесторонне изучить космические лучи — богатая программа конференции свидетельствует об этом вполне красноречиво. Разумеется, космические лучи не являются в этом отношении каким-то исключением. Например, сверхпроводимость была открыта в 1911 г., а ее изучение не только продолжается, но и расширяется, так сказать, вширь и вглубь. Достаточно сказать, что в 1986—1987 гг. произошло выдающееся событие — открыта высокотемпературная сверхпроводимость. (Кстати сказать, непосредственно за настоящей конференцией по космическим лучам в Японии состоится столь же представительная 18-я Международная конференция по физике низких температур — космические лучи и низкие температуры, можно сказать, ровесники.)

*) Доклад, подготовленный для 20-й международной конференции по космическим лучам (Москва, 2—15 августа 1987 г.). В публикуемый в УФН текст доклада изменения практически не вносились. В конце помещено, однако, дополнение, в какой-то мере отражающее работу конференции.

Изучение космических лучей можно в грубом приближении разделить на два направления, или раздела: астрофизический и ядерно-физический. Был период, когда особое значение имело второе направление — исследование космических лучей для решения задач физики элементарных частиц. Достаточно сказать, что именно в космических лучах были открыты позитрон, мюоны и π^\pm -мезоны, а также некоторые другие частицы. В настоящее время космические лучи также отнюдь не утратили значения для физики высоких энергий. Так, для изучения взаимодействия частиц с энергиями E больше 10^{15} эВ и вплоть до 10^{18} эВ, которые сейчас недостижимы на ускорителях, на горе Арагац (СССР) строится установка АНИ («адрон-нуклонные исследования»; должна начать работать в 1989 г.). Но все же, начиная примерно с 50-х годов, все большее место занимает астрофизический аспект, или, как я буду говорить, астрофизика космических лучей. Сюда относится изучение первичных космических лучей (наблюдаемых в основном у Земли) *) и проблема их происхождения (ускорение в источниках, распространение космических лучей в Галактике и за ее пределами, солнечные космические лучи и т. д.). В настоящее время, как это ясно уже из программы конференции (см. дополнение), с астрофизикой космических лучей особенно тесно связана также гамма-астрономия.

Мой доклад задуман как некоторое введение, рассчитанное не только на основных участников конференции, но и на гостей. Кроме того, я даже не буду пытаться перечислить все вопросы, относящиеся к астрофизике космических лучей (заряженных частиц) и в той или иной мере связанных с ней радио-, рентгеновской и гамма-астрономии, а также астрономии нейтрино высокой энергии. Нет возможности подробно останавливаться здесь и на истории изучения космических лучей (см. ¹⁻³). Но все же уместно упомянуть некоторые вехи на этом длинном пути (касаемся лишь астрофизического аспекта).

1912 г. Открытие космических лучей (см. выше). На первом этапе их изучения (около 15 лет) не было полной уверенности в неземном происхождении наблюдавшегося излучения. Независимо от этого предполагалось, что речь идет о жестких гамма-лучах.

1927—1928 гг. К этому времени сомнения в существовании идущего из космоса хорошо проникающего «излучения» (космических лучей) окончательно отпали. Появились указания на присутствие широтного эффекта (зависимости скорости ионизации от геомагнитной широты). Поэтому стало ясно, что первичные космические лучи (частицы, попадающие из космоса в атмосферу) по крайней мере частично являются заряженными частицами.

1936 г. Примерно в это время было окончательно признано, что космические лучи — это заряженные частицы.

1939—1941 гг. Выяснилось, что космические лучи имеют положительный заряд и в основном представляют собой релятивистские протоны.

1948 г. В составе космических лучей обнаружены ядра ряда элементов. В этот же период (до 1951—1952 гг.) было установлено, что поток электронов в космических лучах меньше приблизительно процента их общего потока. (Кстати сказать, электроны в составе первичных космических лучей впервые были зарегистрированы лишь в 1961 г.).

Таким образом, только через 40 лет после открытия космических лучей стал, хотя бы в первом приближении, известен их состав у Земли. Но об источниках космических лучей и вообще о космических лучах вдали от Земли практически ничего не было известно до 1950—1953 гг., когда была установлена связь между электронной компонентой космических лучей и нетепловым космическим радиоизлучением. До этого космические лучи относились,

*) Под первичными понимаются космические лучи, находящиеся за пределами земной атмосферы. Ниже речь идет только о первичных космических лучах, а не о продуктах их распада и размножения в атмосфере. Поэтому прилагательное «первичные» будет обычно опускаться.

так сказать, к физике и изучались только физиками. Поэтому, как мне представляется, не будет преувеличением установить такую историческую веху:

1950—1953 гг. Рождение астрофизики космических лучей. Поскольку нетепловое космическое радиоизлучение имеет в основном синхротронную природу — излучается релятивистскими электронами (электронной компонентой космических лучей), движущимися в космических магнитных полях, стали ясны два очень важных обстоятельства. Во-первых, электронная компонента присутствует в межгалактическом пространстве, в оболочках сверхновых звезд, в других галактиках. Естественно предполагать, что это же относится и к основной — протонной (и вообще ядерной) — компоненте космических лучей. Во-вторых, оценки свидетельствуют в пользу того, что космические лучи являются существенным энергетическим и динамическим фактором в упомянутых областях (межзвездная среда, оболочки сверхновых и т.д.). Таким образом, космические лучи действительно «вошли» в астрономию наряду с другими ее объектами — галактиками, звездами, межзвездным газом и т.д.

1953 г. На основе радиоастрономических данных получили обоснование частично обсуждавшиеся и ранее представления о происхождении космических лучей, наблюдающихся у Земли. Предложена и развита галактическая модель с гало. В этой модели галактические космические лучи заполняют большую область, окружающую галактический диск («гало космических лучей»), а их основными источниками являются вспышки сверхновых звезд (подробнее см. ^{4,5} и ниже).

С тех пор (с 1953 г.) прошло уже 34 года, галактическую модель с гало я считаю (и, вероятно, многие считают) наиболее вероятной и обоснованной. Тем не менее не все лежащее в ее основе надежно доказано (недостаточно ясен размер гало космических лучей, все же нет полной уверенности в доминирующей роли вспышек сверхновых как источников космических лучей). Таким образом, как нередко бывало и бывает в физике и астрономии, проблема происхождения космических лучей (конкретно имеем здесь в виду выбор модели) оказалась «твердым орешком», сделать вполне надежные выводы препятствует целый ряд трудностей. Вместе с тем многое уже выяснено и достаточно определены пути, на которых возможен дальнейший прогресс. Об этом еще пойдет речь ниже. Сейчас же отсылаем к табл. I, в какой-то

Таблица I. Астрофизика космических лучей (объекты, проблемы, связи)

<p><i>Первичные космические лучи у Земли:</i> Химический (элементный) и изотопный состав Энергетические спектры протонов и ядер Электроны и позитроны (e^{\pm}) Антипротоны (\bar{p}) Анизотропия космических лучей (δ)</p>	<p>Космические лучи в Галактике, в оболочках сверхновых звезд, в других галактиках и квазарах Источники космических и гамма-лучей (в частности, проблема CugX-3)</p>	<p>Радиоастрономия Оптическая и рентгеновская астрономия Гамма-астрономия Нейтринная астрономия высоких энергий</p>
<p>Солнечные космические лучи Распространение космических лучей в солнечной системе, вариации космических лучей</p>	<p>Происхождение космических лучей Галактическая модель с гало Распространение космических лучей в межзвездной среде Механизмы ускорения космических лучей</p>	

мере, пусть и схематически, освещающей область исследований, относящуюся к астрофизике космических лучей. В таблице указаны также некоторые ветви астрономии, непосредственно примыкающие к астрофизике косми-

ческих лучей. При этом имеется в виду, конечно, не вся радиоастрономия, а лишь радиоастрономические исследования, приносящие информацию о космических лучах в различных областях Вселенной. Аналогичное замечание можно сделать в применении и к другим перечисленным в таблице областям астрономии. В отношении нейтринной астрономии высоких энергий (имеется в виду регистрация на Земле нейтрино с энергиями, превосходящими, скажем, 10^2 эВ, которые генерируются в космосе космическими лучами) нужно также отметить, что реальных измерений еще нет, мы пока имеем дело, к сожалению, лишь с небольшими установками и с проектами. Последней из уже, так сказать, родившихся и действующих ветвей астрономии, представляющих особый интерес для изучения космических лучей, является гамма-астрономия.

Очевидно, регистрация космических гамма-лучей приносит информацию о космических лучах в тех случаях, когда последние генерируют гамма-фотоны при ядерных соударениях и иными путями. Соответствующие идеи появились еще в 1952 и 1958 гг., а первые наблюдения (использовались баллоны) были опубликованы в 1962 г. (ссылки см. в⁴). Однако лишь на гамма-спутниках SAS II (1972–1973 гг.) и COS-B (1975–1982 гг.) было получено значительное количество сведений о космических гамма-фотонах с энергиями $35 \text{ МэВ} < E_\gamma < 5 \text{ ГэВ}$. Именно подобные данные особенно важны для изучения протонно-ядерной компоненты космических лучей вдали от Солнечной системы (речь идет в первую очередь о гамма-фотонах, образующихся от распада π^0 -мезонов). Но все же результаты, полученные на двух этих спутниках, — это лишь первые шаги, и на некоторые важнейшие вопросы (например, о градиенте концентрации космических лучей в Галактике) четких ответов не получено. Между тем, несмотря на всю очевидную важность и перспективность гамма-астрономических исследований, вот уже 5 лет (с 1982 г.) не работает ни один гамма-спутник. Печальная страница в истории физики и астрономии, особенно учитывая тот факт, что нужно пытаться пронаблюдать гамма-излучение от происшедшей в феврале 1987 г. вспышки сверхновой звезды в Большом Магеллановом Облаке.

Возникновение гамма-астрономии (его условно можно отнести к 1972 г.) — последняя важная веха в изучении космических лучей, которую мы можем здесь зафиксировать.

Итак, прошло уже 75 лет со времени открытия космических лучей. Сделано очень многое (см. в особенности⁶), но видны и ясны еще многие задачи, ждущие своего решения. Возникнут, конечно, и новые задачи.

Осветить в настоящем докладе уже накопленный гигантский материал, разумеется, невозможно. Ниже, в разделе 2, мы попытаемся привести основные сведения о космических лучах, наблюдаемых у Земли. В разделе 3 остановимся на некоторых данных о космических лучах во Вселенной, полученных радио- и гамма-астрономическими методами. Раздел 4 посвящен происхождению космических лучей и конкретно галактической модели с гало. В разделе 5 попытаемся перечислить важнейшие задачи дальнейших исследований космических лучей в расчете примерно на 25 лет, т.е. к столетнему юбилею со времени открытия космических лучей.

2. ПЕРВИЧНЫЕ КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ У ЗЕМЛИ

Космические лучи наиболее полно можно охарактеризовать дифференциальной интенсивностью $I_{Z,A}(\mathbf{r}, E, \theta, \varphi) dE$, измеряемой числом частиц с энергиями в интервале $(E + dE, E)$, проходящих в единицу времени через единичную площадку, перпендикулярную направлению наблюдения; измеряется I , скажем, в единицах: число частиц/(см²·с·ср-интервал энергий). Выше Z — порядковый номер (заряд) ядра, A — его массовое число, \mathbf{r} — точка наблюдения, $E = E_\kappa + Mc^2$ — полная энергия ($M = AM_p$ — масса ядра, M_p — масса протона) и θ, φ — углы, отвечающие направлению наблю-

дения. Если не касаться солнечных космических лучей и считать исключенным действие земного магнитного поля, то первичные космические лучи в высокой степени изотропны; поэтому зависимость θ от φ обычно пренебрегают, а анизотропию характеризуют введенным ниже коэффициентом δ . Таким образом, у Земли мы имеем дело с интенсивностью $I_{Z_A}(E)$ или для электронно-позитронной компоненты с $I_{e^\pm}(E)$. Используется также интегральная интенсивность

$$I_i(>E) = \int_{E_{\min}}^{\infty} I_i(E) dE,$$

где, очевидно, роль индекса i играют Z , A , e^\pm и т.д. Наконец, далеко не всегда определяется изотопный состав, а часто, особенно при больших энергиях, не разделяются и элементы; поэтому используются интенсивности $I_Z = \sum_A I_{Z,A}$ и $I = \sum_{Z,A} I_{Z,A}$. Для изотропного излучения поток частиц из полусферы направлений,

$$F_i = \int I_i \cos \theta \cdot \sin \theta d\theta d\varphi = \pi I_i$$

(в литературе потоком часто называют интенсивность I), а концентрация частиц, имеющих скорость v_i , равна $N_i = \frac{4\pi}{v_i} I_i$. Плотность энергии космических лучей

$$w_i = \int E_{\text{к}} N_i(E) dE$$

и «энергетическая интенсивность»

$$J_i = \int E_{\text{к}} I_i(E) dE.$$

Для космических лучей у Земли (вне действия земного магнитного поля) для ориентировки можно привести такие значения, относящиеся ко всем космическим лучам:

$$\begin{aligned} I_{\text{ср}} &\sim 0,3 - 0,3 \text{ частиц/см}^2 \cdot \text{ср}, \\ N_{\text{ср}} &\sim \frac{4\pi I_{\text{ср}}}{c} \sim 10^{-10} \text{ частиц/см}^3, \\ w_{\text{ср}} &\sim 10^{-12} \text{ эрг/см}^3 \sim 1 \text{ эВ/см}^3, \\ J_{\text{ср}} &\sim \frac{c w_{\text{ср}}}{4\pi} \sim 10^{-3} \text{ эрг/см}^2 \cdot \text{ср}. \end{aligned} \tag{1}$$

В силу модуляционных эффектов в Солнечной системе интенсивность космических лучей в области энергий $\mathcal{E}_{\text{к}} = E_{\text{к}}/A \lesssim 1$ ГэВ/нуклон изменяется в зависимости от солнечной активности и, в частности, в течение цикла солнечной деятельности. Поэтому приведенные выше значения, отвечающие энергиям $E_{\text{к}} \gtrsim 100$ МэВ, имеют ориентировочное значение (максимум в спектре протонов отвечает энергии $E_{\text{к}} \sim 250$ МэВ и все интегральные величины сходятся). Из (1) ясно, что к Земле приходит поток $F \sim 1$ частиц/см² с. Он состоит (по числу частиц) примерно на 90 % из протонов (p). Ядер ⁴He приблизительно в 10 раз меньше, все более тяжелые элементы вносят в общий поток около 1 %. До поверхности Земли (на уровне моря) первичные протоны, не говоря уже о ядрах, практически не доходят. В атмосфере (толща около 1000 г/см²) образуются вторичные частицы; на уровне моря их поток состав-

ляет около 10^{-2} частиц/см² ср·с (70 % μ^\pm -лептоны, 30 % e^\pm -лептоны, т.е. электроны и позитроны *).

Изучение первичных космических лучей — одна из центральных задач астрофизики космических лучей. На ее решение уже были потрачены колоссальные усилия, эта работа продолжается как на высотных баллонах, так

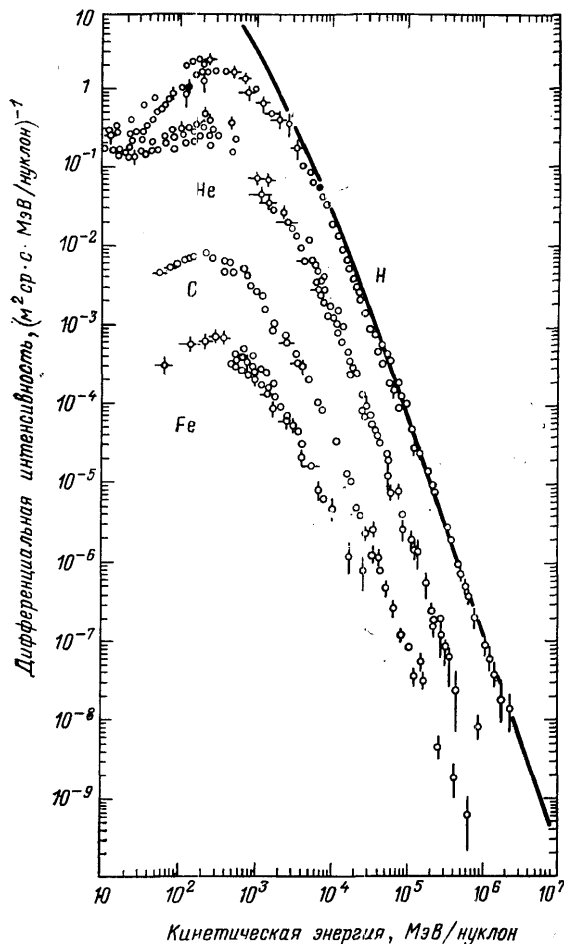


Рис. 1

и на спутниках. Чтобы охарактеризовать масштаб крупнейших установок, укажем, что на космической лаборатории («Spacelab-2»), летавшей в июле 1985 г. на «Шаттле», находилась установка Чикагского университета (ее название «The Egg» — яйцо) весом около 2 т, предназначенная для изучения ядер с энергией от 50 ГэВ/нуклон до нескольких ТэВ/нуклон. Результаты, касающиеся состава и спектра космических лучей, представлены на всех Международных конференциях по космическим лучам (ICRC), включая настоящую; этому посвящены как оригинальные, так и обзорные доклады⁶. Исключительно для иллюстрации приведем несколько графиков. Так, на рис. 1 представлены⁷ энергетические спектры (так называется обычно дифференциальная интенсивность $I_i(E)$, именуемая также потоком) для ядер H, He, C и Fe. Спектры относятся к периоду вблизи минимума солнечного цикла. Сплошная линия для спектра водорода (H) отвечает экстраполяции к межзвездному пространству (т.е. за границу солнечной системы), полученной путем исключения эффекта модуляции в солнечной системе. Где находится максимум в спектре в межзвездном пространстве — неизвестно, и поэтому оценки (1) для Галактики (вблизи Солнца), возможно, нужно увеличить в несколько раз. На рис. 2 показан⁸ элементный состав космических лучей у Земли (линия отвечает космическим лучам, а «столбики» — химическому составу вещества в Галактике вблизи Солнечной системы по астрофизическим данным). Обращает на себя внимание уже давно (с самого начала изучения

и на спутниках. Чтобы охарактеризовать масштаб крупнейших установок, укажем, что на космической лаборатории («Spacelab-2»), летавшей в июле 1985 г. на «Шаттле», находилась установка Чикагского университета (ее название «The Egg» — яйцо) весом около 2 т, предназначенная для изучения ядер с энергией от 50 ГэВ/нуклон до нескольких ТэВ/нуклон. Результаты, касающиеся состава и спектра космических лучей, представлены на всех Международных конференциях по космическим лучам (ICRC), включая настоящую; этому посвящены как оригинальные, так и обзорные доклады⁶. Исключительно для иллюстрации приведем несколько графиков. Так, на рис. 1 представлены⁷ энергетические спектры (так называется обычно дифференциальная интенсивность $I_i(E)$, именуемая также потоком) для ядер H, He, C и Fe. Спектры относятся к периоду вблизи минимума солнечного цикла. Сплошная линия для спектра водорода (H) отвечает экстраполяции к межзвездному пространству (т.е. за границу солнечной системы), полученной путем исключения эффекта модуляции в солнечной системе. Где находится мак-

*) У поверхности Земли наблюдается также вторичная нейтронная компонента космических лучей; ее поток составляет примерно 1 % от потока мюонной компоненты. Нейтронная компонента генерируется в основном первичными частицами с энергией, значительно меньшей энергии доходящих до Земли мюонов. Кроме того, поток нейтронной компоненты, в отличие от потока мюонов, практически не зависит от распределения температуры в атмосфере. Все это делает изучение нейтронной компоненты удобным для регистрации временных вариаций интенсивности первичных космических лучей с энергией в несколько ГэВ. Непрерывная регистрация интенсивности нейтронной компоненты космических лучей ведется сетью станций, расположенных во многих пунктах земного шара.

элементного состава космических лучей в конце 40-х годов) установленное обстоятельство — в космических лучах довольно много ядер, которые редки на звездах и в межзвездной среде. Наиболее типичные примеры — ядра Li, Be и B. Их в космических лучах примерно на 5 порядков больше (по отношению к H), чем в Галактике. Другой яркий пример — изотоп ^3He . В космических лучах при $\mathcal{E}_k \approx 40\text{--}150$ МэВ/нуклон отношение интенсивностей $^3\text{He}/^4\text{He} \approx 7,5 \cdot 10^{-2}$ (см. ⁹), в то время как в природе $^3\text{He}/^4\text{He} \sim 10^{-7} - 10^{-4}$ в зависимости от источника (образца). Для отношения дейтерия к водороду примерно то же: $(^2\text{H}/^1\text{H})_{\text{сг}} \approx 0,13$, а $(^2\text{H}/^1\text{H})_{\text{в природе}} \approx 1,5 \cdot 10^{-2}$. Обилие в космических лучах редких в природе элементов и изотопов объясняется тем, что приходящие к нам космические лучи долго блуждали в межзвездной среде, а возможно, и в их источниках. Поэтому более

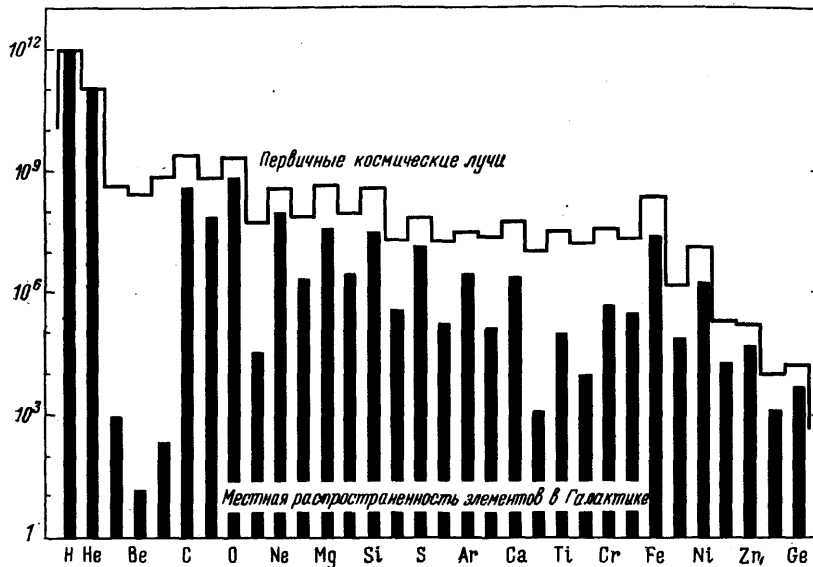


Рис. 2

тяжелые ядра из-за ядерных соударений успели частично превратиться в более легкие. Из данных об элементном и изотопном составе космических лучей следует, что они в среднем прошли в веществе пусть $x \sim 5\text{--}10$ г/см². Для релятивистских ядер скорость v можно считать равной скорости света c и $x = c\rho T$, где ρ — плотность среды и T — время. Для межзвездной среды с концентрацией $n \sim 1$ см⁻³ ($\rho \sim 2 \cdot 10^{-24}$ г/см³, в основном присутствует водород) при $x \sim 5$ г/см² время $T \sim 10^4$ с $\approx 3 \cdot 10^6$ лет *). Весьма важно, что доля вторичных ядер с ростом энергии убывает (к сожалению, данные имеются лишь для энергии $\mathcal{E} \lesssim 100$ ГэВ/нуклон).

В космических лучах обнаружены тяжелые ядра вплоть до урана. Относительное количество тяжелых ядер (их обычно именуют даже сверхтяжелыми ядрами) в космических лучах примерно такое же, как в солнечной системе (см. рис. 3, взятый из ¹⁰). В литературе появились сообщения о регистрации в метеоритном материале следов ядер с $Z \sim 110$; однако, насколько нам известно, присутствие в космических лучах таких ядер не может еще считаться установленным.

Электронная компонента космических лучей изучается обычно без разделения на электроны (e^-) и позитроны (e^+). При заданной энергии

*) Введенное здесь время T определено соотношением $T = x/c\rho$ и имеет физический смысл лишь при конкретизации модели. Так, если расщепление ядер происходит практически лишь в газовом диске (т. е. вклад гало с этой точки зрения незначителен), то время T есть время, проведенное космическими лучами в диске.

(скажем, $E \sim 1-3$ ГэВ) интенсивность электронной компоненты составляет порядка 1 % от интенсивности протонов. Таким образом, плотность энергии электронов (см. (1))

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

Интегральный спектр электронов в интервале $5 < E < 100$ ГэВ приближенно имеет вид

$$I_e(>E) = 1,5 \cdot 10^{-2} [E (\text{ГэВ})]^{-2} \text{ частиц/см}^2 \cdot \text{ср}. \quad (3)$$

В то же время для всех космических лучей (при $10 < E < 3 \cdot 10^6$ ГэВ) ориентировочно

$$I_{\text{cr}}(>E) = [E (\text{ГэВ})]^{-1,7} \text{ частиц/см}^2 \cdot \text{ср}, \quad (4)$$

и при $E > 3 \cdot 10^6$ ГэВ

$$I_{\text{cr}}(>E) = 3 \cdot 10^{-10} [E (\text{ГэВ}) \cdot 10^{-6}]^{-2,1} \text{ частиц/см}^2 \cdot \text{ср}. \quad (5)$$

Укручение («излом») спектра космических

лучей при $E \sim 10^6$ ГэВ обычно связывают с более быстрым выходом из Галактики космических лучей с высокой энергией.

Только в последние годы получены более полные и точные данные о спектре электронов; они отражены на рис.4¹¹, на котором представлена дифференциальная интенсивность, умноженная на E^3 , т.е. величина $E^3 I(E)$ в единицах (частиц/м² с·ср) (ГэВ)². Очевидно, показателю γ в степенном дифференциальном спектре $I(E) = KE^{-\gamma}$ отвечает показатель $\gamma - 1$ в интегральном спектре $I(>E)$. Таким образом, рис. 4 находится в общем согласии со спектром (3), но при $E > 100$ ГэВ спектр электронов укрущается. Интенсивность позитронов I_e^+ в составе электронной компоненты при $E > 1$ ГэВ составляет примерно 10 % от всей интенсивности $I_{e^-+e^+}$.

К сожалению, имеющиеся данные еще недостаточно точны (рис. 5¹¹). Начиная с 1979 г. появились данные об антипротонах \bar{p} . При энергиях частиц

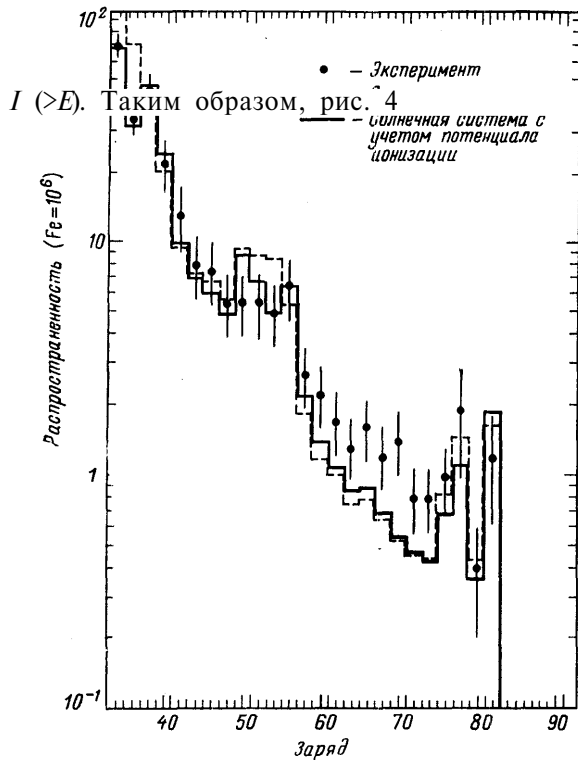


Рис. 3

$E \sim 5-10$ ГэВ отношение $I_{\bar{p}}/I_p \sim 5 \cdot 10^{-4}$ (см. ¹² и рис. 6). При меньших энергиях ($E_R \approx 130-320$ МэВ) измеренная интенсивность антипротонов значительно выше той, которую можно было бы ожидать при естественном предположении об их образовании в качестве вторичных частиц при распространении космических лучей в межзвездной среде (см. нижнюю кривую на рис. 6). Антиядра (более тяжелые, чем \bar{p}) в космических лучах не обнаружены.

Долгие годы шли споры о величине анизотропии космических лучей. Поскольку эта анизотропия, по крайней мере при $E < 10^5$ ГэВ, весьма мала.

ее обычно характеризуют амплитудой первой гармоники, т.е. отношением $\delta = I_1/I_0$. При этом полная интенсивность считается зависящей от углов по закону $I = I_0 + I_1 \cos \theta$ ($I_1 \ll I_0$, угол θ отсчитывается от направления

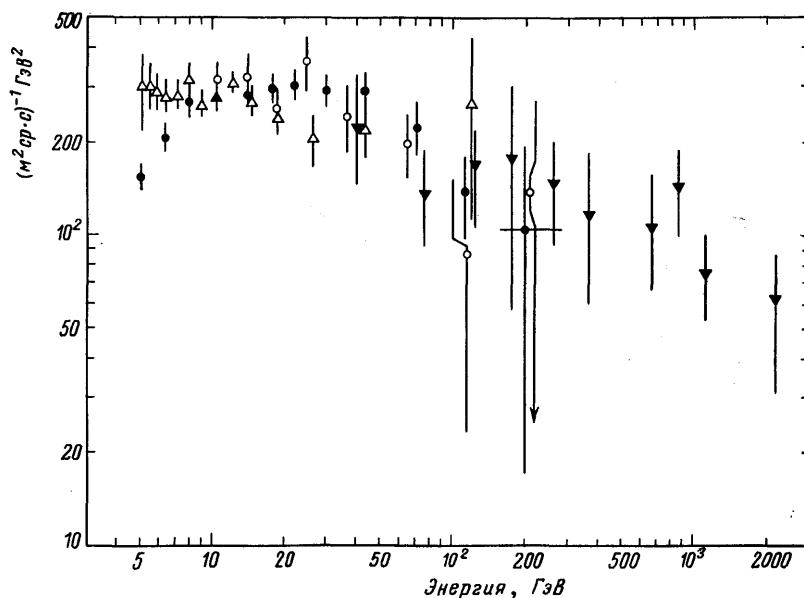


Рис. 4 (по оси ординат — дифференциальная интенсивность $\times E^3$)

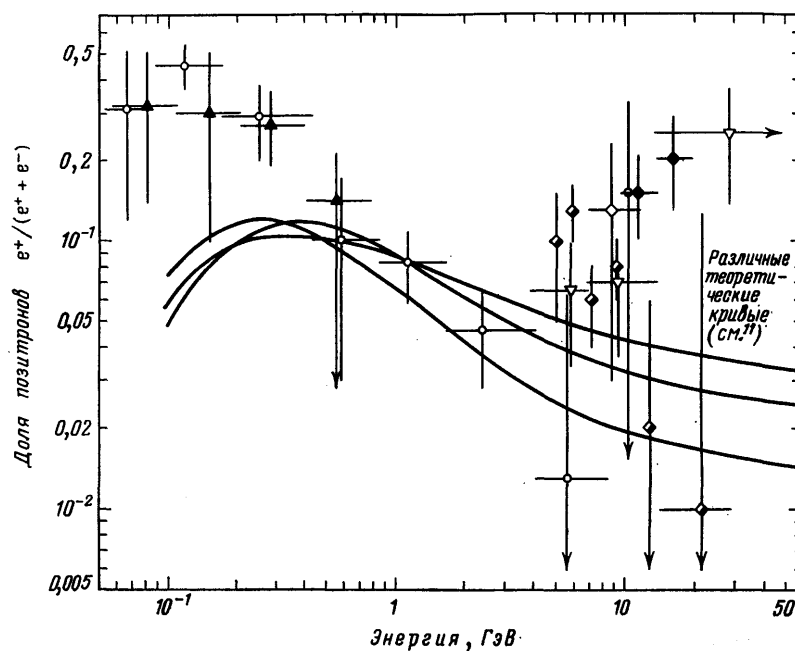


Рис. 5

максимальной интенсивности). При $E \lesssim 10^5$ ГэВ амплитуда $\delta \lesssim 10^{-3}$ и возрастает с энергией (см. ¹³ и рис. 7; на этом рисунке λ — широта места, на котором проводились измерения).

Особой, в некотором смысле, является область изучения космических лучей со сверхвысокими энергиями $E \gtrsim 10^{17}$ эВ (см. ^{5,13,14}). Источником информации в этой области являются широкие атмосферные ливни, наблю-

даемые на земной поверхности. Наблюдаются частицы с энергией, достигающей $E \sim 10^{20}$ эВ и, возможно, даже $E \sim 3 \cdot 10^{20}$ эВ. Характер спектра всех космических лучей ясен из рис. 8 (на оси ординат отложена величина

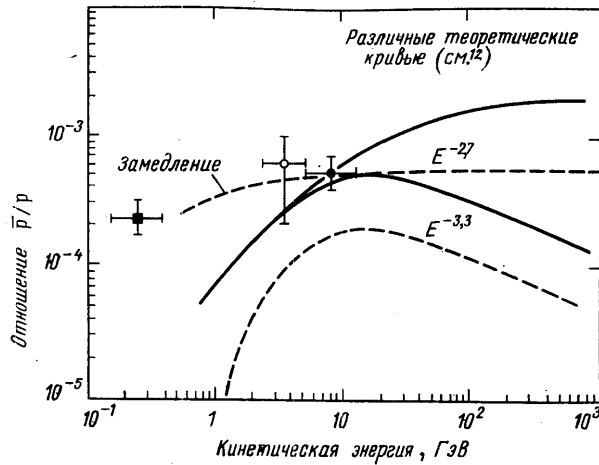


Рис. 6

$E^{2,5} I(E)$; см. 14). Элементный состав в этой области известен плохо, неясно, остается ли он (особенно при самых высоких энергиях $E \geq 10^{19}$ эВ) таким же, как при меньших энергиях. Неясен и вопрос о возможном «обрезании»

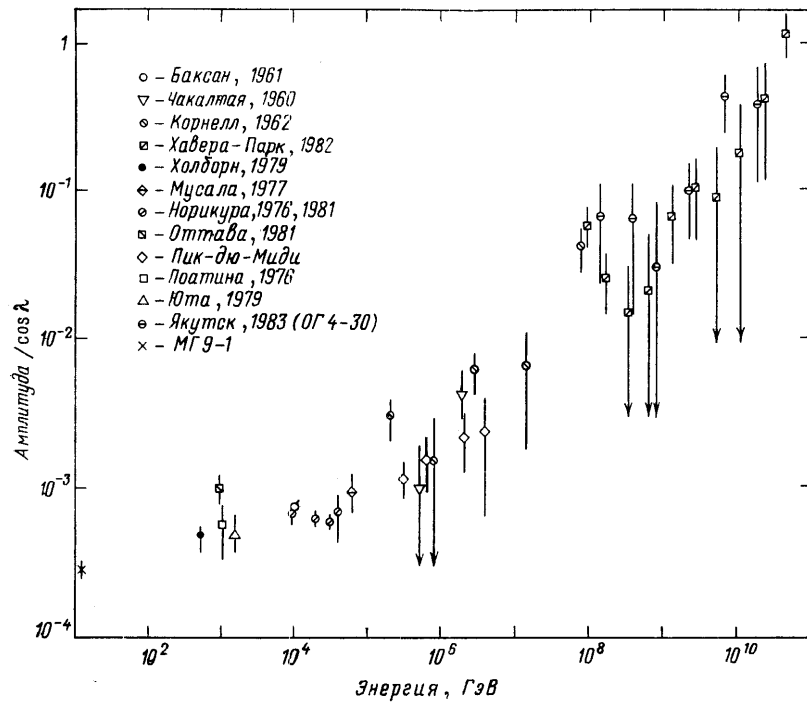


Рис. 7

спектра при $E \sim 3 \cdot 10^{19}$ эВ (такое обрезание должно иметь место, если соответствующие частицы приходят к нам с метагалактических расстояний в результате «торможения» частиц при столкновении с фотонами реликтового излучения с температурой 2,7 К).

Приведенными сведениями мы должны здесь ограничиться. Они не могут заменить подробного обзора (см. ⁶⁻¹⁵). Их цель одна — продемонстрировать в какой-то мере современное состояние вопроса (present state of art), показать, сколь много сделано в результате многолетнего очень тяжелого труда целой армии физиков — «космиков». Вместе с тем ясно, что картина еще далеко не полна, наши данные о первичных космических лучах у Земли

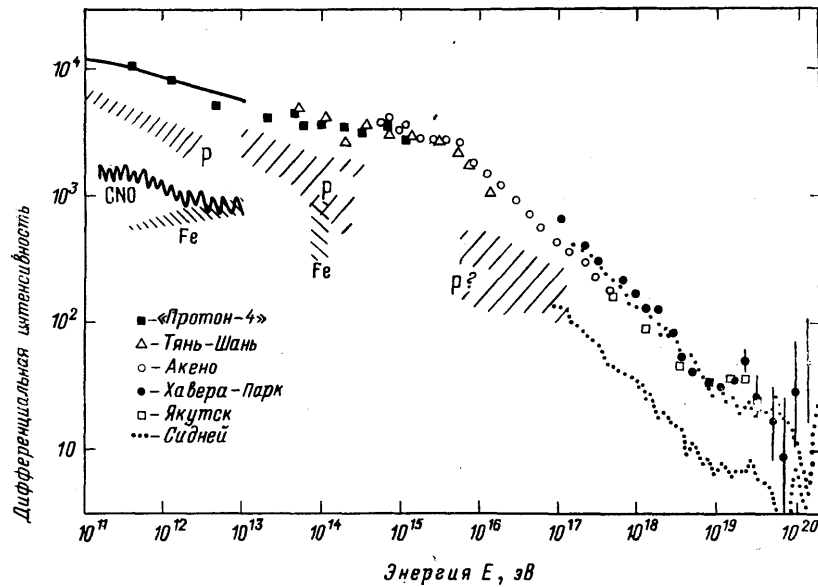


Рис. 8 (по оси ординат—ед.м⁻²с⁻¹ср⁻¹ ГэВ^{1.5})

должны быть существенно пополнены. Это касается буквально всего, но особенно элементного состава при высоких их энергиях, изотопного состава, спектра позитронов и антипротонов, космических лучей сверхвысокой энергии (элементный состав, спектр, анизотропия).

3. КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ ВО ВСЕЛЕННОЙ

Информация о космических лучах во Вселенной, вдали от Солнечной системы, приходит к нам во всех диапазонах электромагнитных волн, но особенно важны радиоизлучение и гамма-излучение. Электронная компонента космических лучей является основным источником нетеплового космического радиоизлучения. Механизм излучения — синхротронный, т.е. речь идет об излучении зарядов, движущихся с релятивистскими скоростями в магнитном поле. Как известно, частица с зарядом e и массой m в однородном магнитном поле \mathbf{H} (речь идет практически о вакууме, так что магнитное поле \mathbf{H} отождествляем с магнитной индукцией \mathbf{B}) движется по винтовой линии, причем частота обращения равна

$$\omega_H^* = \omega_H \frac{mc^2}{E} = \frac{|e|H}{mc} \frac{mc^2}{E} = 1,76 \cdot 10^7 H \frac{mc^2}{E} \text{ с}^{-1}, \quad (6)$$

где при переходе к численному множителю частица считается электроном (или позитроном) и поле измеряется в эрстедах. Ультрарелятивистская частица ($E \gg mc^2$), движущаяся со скоростью v , образующей с полем \mathbf{H} угол $\chi \gg mc^2/E$, излучает волны с многими частотами, кратными $\omega_H^*/\sin^2 \chi$. Практически спектр непрерывен, и для отдельного электрона максимум интенсивности излучения приходится на частоту ($H_{\perp} = H \sin \chi$ — составляющая

поля, перпендикулярная скорости v):

$$v_m = \frac{\omega_m}{2\pi} = 0,07 \frac{|e| H_{\perp}}{mc} \left(\frac{E}{mc^2} \right)^2 = 4,6 \cdot 10^{-6} H_{\perp} [E (\text{эВ})]^2 \text{ Гц.} \quad (7)$$

В типичном межзвездном поле $H \sim 10^{-6} - 10^{-5}$ Э для электронов с $E \sim 10^9$ эВ частота $v_m \approx 1,5 \cdot 10^7$ Гц (длина волны $\lambda = \frac{c}{v_m} \approx 2 \mu$; для определенности мы положили $H_{\perp} \approx 3 \cdot 10^{-6}$ Э). Таким образом, электронная компонента космических лучей в межзвездном пространстве излучает как раз в радиодиапазоне. Разумеется, в областях с сильным магнитным полем и (или) для электронов с достаточно высокими энергиями синхротронное излучение может попадать в оптический, рентгеновский и даже гамма-диапазон. Так, в Крабовидной туманности, например, при $H \sim 10^{-3}$ Э и $E \sim 10^{18}$ эВ (электроны инжектируются пульсаром PSR 0531), согласно (7), $v_m \sim 5 \cdot 10^{17}$ и $\lambda_m \sim 10 \text{ \AA}$. Оптическое и рентгеновское излучение Краба с непрерывным спектром действительно имеет синхротронную природу, о чем особенно наглядно свидетельствует высокая степень поляризации излучения (последнее типично именно для синхротронного излучения, причем электрическое поле в волнах максимально в направлении, перпендикулярном проекции магнитного поля на картинную плоскость). В пульсарах, для полей $H \sim 10^{12}$ Э, особенно эффективно родственное синхротронному изгибное излучение (curvature radiation). Здесь не место, конечно, подробнее останавливаться на теории синхротронного излучения (см., например, ^{4,5,16}). Достаточно отметить, что интенсивность такого излучения вдоль луча зрения для монохроматических электронов на частоте v_m (см. (7)) равна

$$J_{v,m} = 1,7 \cdot 10^{-23} H_{\perp} \tilde{N}_e \text{ эрг/см}^2 \text{с} \cdot \text{ср} \cdot \text{Гц}, \quad (8)$$

где $\tilde{N}_e = \int N_e(r) dr = N_e L$ — полное число изотропно распределенных излучающих электронов вдоль луча зрения (N_e — их средняя концентрация и L — размер излучающей области). Для электронов с изотропным распределением по направлениям и степенным спектром $N_e(E) dE = KE^{-\gamma_e} dE$ интенсивность

$$J_v = 1,35 \cdot 10^{-22} a(\gamma_e) L K_e H^{(\gamma_e+1)/2} \left(\frac{6,26 \cdot 10^{18}}{v} \right)^{(\gamma_e-1)/2} \text{ эрг/см}^2 \text{ср} \cdot \text{с} \cdot \text{Гц} \quad (9)$$

(здесь при обычных значениях $\gamma_e \sim 1,5-5$ коэффициент $a(\gamma_e) \sim 0,1$ и значения K_e и $H^{(\gamma_e+1)/2}$ — некоторые средние величины вдоль луча зрения, поле H считается при этом в среднем изотропным).

Таким образом, спектр радиоизлучения тоже степенной:

$$J_v \propto v^{-\alpha}, \quad \alpha = \frac{1}{2}(\gamma_e - 1). \quad (10)$$

Как ясно из (8) и (9) и из самой сути дела, измерение интенсивности радиоизлучения J_v позволяет найти концентрацию электронов вдоль луча зрения (скажем, из измерений α получаем γ_e , а сама величина интенсивности J_v позволяет найти произведение LK_e).

При этом, однако, необходимо из независимых соображений определить поле H . Для этого имеется ряд способов *). Здесь остановимся на одном из них, хотя и косвенном, но имеющем большое значение в астрофизике космических лучей. В магнитной гидродинамике и физике плазмы в применении

*) Один из таких способов, еще редко употребляемый, но перспективный, таков: спектр электронной компоненты можно определить по спектру рентгеновского излучения, которое она создает в результате так называемого обратного комптоновского рассеяния на известном поле излучения, скажем на реликтовом излучении с температурой 2,7 К. Тогда в (9) величина LK_e известна, и измерение интенсивности радиоизлучения J_v от той же области позволит найти поле H в этой области из той же формулы (9).

к квазистационарным условиям как из теоретических соображений, так и из экспериментальных данных представляется естественным примерное равенство плотности энергии космических лучей и плотности энергии магнитного поля:

$$w_{\text{сг}} \sim w_{\text{H}} = \frac{H^2}{8\pi}. \quad (11)$$

В более общем случае можно положить $w_{\text{H}} = \kappa_{\text{H}} w_{\text{сг}}$. К сожалению, из радиоданных плотность $w_{\text{сг}}$ нам неизвестна и, если не привлекать другие данные (в первую очередь гамма-астрономические, см. ниже), то приходится опираться на связь между плотностями $w_{\text{сг,е}}$ и $w_{\text{сг}} = \kappa_{\text{е}} w_{\text{сг,е}}$. Вблизи Земли $\kappa_{\text{е}} \sim 10^2$ (см. (1), (2)). Если задаться значениями κ_{H} и $\kappa_{\text{е}}$, то из радиоданных можно найти $w_{\text{сг}}$, $w_{\text{сг,е}}$ и $H^2/8\pi$ (или, точнее, их средние значения вдоль луча зрения; для дискретных источников, например оболочки сверхновой, таким же способом можно определить интегральные по объему энергии $W_{\text{сг}}$, $W_{\text{сг,е}}$ и $W_{\text{H}} = \int (H^2/8\pi) dV$). Таким путем еще 30 лет назад (см. ⁴ и указанную там литературу), полагая $\kappa_{\text{H}} \sim 1$ и $\kappa_{\text{е}} \sim 10^2$, получили сведения о космических лучах в Галактике, оболочках сверхновых, в радиогалактиках и т.д.

Общие выводы сейчас общеизвестны.

Космические лучи — универсальный феномен, они присутствуют в космической плазме не как исключение, а как правило. И это вполне понятно, ибо в плазме возможно существование целого ряда неустойчивостей и процессов, включая движение неоднородностей и ударные волны. В результате происходит ускорение частиц всех сортов; релятивистские «хвосты» распределения этих частиц по энергиям и представляют собой космические лучи. Ускорение происходит, вообще говоря, до тех пор, пока не начинает сильно сказываться обратное действие ускоренных частиц на нерелятивистскую космическую плазму с «вмороженными» в нее магнитными полями. Поэтому естественно уже отмеченное примерное равномерное распределение (11) между энергией космических лучей и магнитного поля. Заметим, что и плотность внутренней энергии межзвездного газа часто того же порядка, что $w_{\text{сг}}$ и w_{H} . Например, в областях с концентрацией $n \sim 1 \text{ см}^{-3}$ и $T \sim 10^4 \text{ К}$ плотность энергии $w_{\text{г}} = (3/2) k_{\text{B}} n T \sim 10^{-12} \text{ эрг/см}^3$, т.е. такая же, как плотность $w_{\text{сг}}$ у Земли (см. (1)) и вообще в галактическом диске.

В мощных радиогалактиках энергия космических лучей $W_{\text{сг}}$, оцененная указанным способом, достигает 10^{60} эрг или даже $10^{61} \text{ эрг} \sim 10^7 M_{\odot} c^2$. Наша Галактика является «нормальной». Ее газовый диск имеет толщину $2h_{\text{г}} \sim 200 n \sim 6 \cdot 10^{20} \text{ см}$, а его радиус $R \sim 5 \cdot 10^{22} \text{ см}$. В таком объеме $V \sim 5 \cdot 10^{66} \text{ см}^3$ полная энергия космических лучей $W_{\text{сг}} \sim w_{\text{сг}} V \sim 5 \cdot 10^{54} \text{ эрг} \sim 3 M_{\odot} c^2$. Нет сомнений, однако, что космические лучи занимают значительно большую область, ибо выходят из диска. Как минимум речь идет о радиодиске с толщиной $2h_{\text{р}} \sim 5 \cdot 10^{21} \text{ см}$. Но по крайней мере с 1953 г. ряд авторов, в том числе и я ¹⁷, считают, что Галактика имеет достаточно выраженное радиогало (его, конечно, можно называть и толстым радиодиском, особенно если гало уплощено). Объем квазисферического гало $V_{\text{h}} \sim \frac{4\pi}{3} R^3 \sim 5 \cdot 10^{68} \text{ см}^3$ и, даже учитывая падение плотности $w_{\text{сг}}$ с удалением от галактической плоскости, в Галактике $W_{\text{сгГ}} \sim 10^{56} \text{ эрг}$. Проблема гало много дискутировалась, ибо его параметры при наблюдениях с Земли трудно определить. Этого вопроса я довольно подробно касался 10 лет назад в своем докладе на 15-й ICRC (см. ⁶, а также ¹⁸). Тогда новостью были наблюдения «с ребра» галактик NGC 4631 и NGC 891. Радиоизофоты галактики NGC 4631 на волне $\lambda = 49,2 \text{ см}$ ($\nu = 610 \text{ МГц}$) показаны на рис. 9 (белый цвет — изображение галактики в видимом свете; рисунок был любезно предоставлен Р. Сансизи). Тот факт, что радиогало значительно больше оптического изображения, очевиден. К сожалению, за последние годы изучение гало

галактик не продвинулось особенно далеко. Одна из причин, как мне кажется, — отсутствие современных радиотелескопов с достаточно высоким угловым разрешением, работающих на волнах длиннее 1 м. Между тем чем длиннее волна, тем радиогало должно быть больше, ибо при удалении от галактической плоскости энергия электронов и напряженность магнитного поля, вообще говоря, уменьшаются (поэтому, очевидно, излучаются все более длинные волны). Здесь, кстати, необходимо подчеркнуть, что помимо радиогало^{4,5} можно говорить о газовом гало, магнитном гало¹⁹ и гало космических лучей⁵. В последнем случае имеется в виду соответствующая область

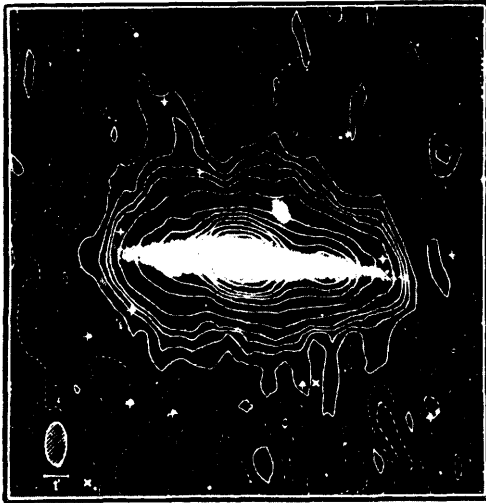


Рис.9

занятия космическими лучами. В этой области, особенно на ее периферии, электронов с достаточно высокой энергией может быть уже мало (в связи с потерей энергии) и магнитное поле может сильно уменьшиться. Поэтому радиогало может быть незаметно, а плотность энергии $w_{сг}$ будет еще значительна.

Радиоастрономические данные свидетельствуют о том, что радиогало у разных галактик, даже близкого типа, может быть ярким и слабым. С этой точки зрения пример галактик NGC 4631 и NGC 891, обладающих явно выраженным радиогало, нельзя еще считать доказательством существования радиогало у Галактики (подробнее см.¹⁵, р. 208). Однако анализ радиоизлучения Галактики также приводит к заключению о наличии у нее радиогало с размером $R \sim 10$ кпк (см.⁵ и приведенную там литературу).

Если за последнее десятилетие радиоастрономия не обогатила астрофизику космических лучей существенной новой информацией, то гамма-астрономия, напротив, принесла важные и иногда неожиданные сведения. Правда, хотелось бы узнать больше, но уже отмеченное длительное отсутствие гамма-спутников этому помешало. Несмотря на молодость, гамма-астрономия успела уже довольно широко разветвиться (табл. II). Гамма-излучение с непрерывным спектром создается как электронной, так и протонно-ядерной компонентами космических лучей. Особенно интересна роль протонной компоненты, поскольку релятивистские электроны могут изучаться и изучаются по их излучению в радио-, оптическом и рентгеновском диапазонах. Какой-то вклад в излучение в этих диапазонах могут дать и протоны, но обычно он незначителен или даже вообще отсутствует (например, в поле $H \sim 10^{-5}$ Э синхротронное излучение протонов с энергией $E \lesssim 10^{-12}$ эВ приходится на частоту $\nu_m \lesssim 10^4$ Гц; см. (7) с $m = M_p$). Вместе с тем протоны и ядра, входящие в состав космических лучей, при соударениях с ядрами в газе порождают π^0 -мезоны, которые очень быстро (среднее время жизни π^0 -мезона $0,84 \cdot 10^{-16}$ с) распадаются с образованием гамма-лучей. Распад π^0 -мезона с вероятностью 98,8% происходит по каналу $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$, в силу чего при распаде покоящегося π^0 -мезона образуются гамма-лучи с энергией $E_\gamma = (1/2) m_{\pi^0} c^2 = 67,5$ эВ. Другие реакции и распады (например, распад $\Sigma^0 \rightarrow \Lambda + \gamma$) играют значительно меньшую роль, и для краткости будем упоминать лишь образование и распад π^0 -мезонов. Интенсивность образующихся таким образом гамма-лучей, естественно, пропорциональна концентрации ядер в газе n и интенсивности космических лучей $I_{сг}$. Конкретно, дифференциальная интенсивность

Таблица II. Гамма-астрономия

Гамма-излучение с непрерывным спектром	Источники и механизмы излучения
$E_\gamma < 30-50$ МэВ (баллоны и спутники) $E_\gamma > 30-50$ МэВ и до нескольких ГэВ (баллоны и спутники) $E_\gamma > 10^{11}-10^{12}$ эВ (излучение Вавилова—Черенкова в атмосфере) $E_\gamma > 10^{14}$ эВ и до 10^{16} эВ (широкие атмосферные ливни)	Диффузионный фон (галактический и метagalacticкий) Дискретные источники (пульсары, квазары, молекулярные облака, Суг X-3) Механизмы излучения (тормозное, синхротронное и изгибное излучения, комптоновское рассеяние, $\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$ и т. п.)
<i>Гамма-линии:</i> Гамма-линии ядер, $E_\gamma \sim 1-10$ МэВ (линии от покоящихся ядер, «полосы» от ядер КЛ) Аннигиляция $e^+ + e^- \rightarrow \gamma + \gamma$, $E_\gamma = 0,511$ МэВ Циклотронное излучение в очень сильных магнитных полях ($\omega_H^* = (eH/mc) mc^2/E$; при $H = 10^{13}$ Э $\hbar\omega_H^* \sim 0,1$ МэВ)	
<i>Гамма-всплески</i> (первые публикации 1973 г.): Источники: вероятно, нейтронные звезды. Природа?	

по числу частиц гамма-лучей (спектр гамма-лучей) вдоль луча излучения (координата r)

$$I_\gamma(E_\gamma) = \int \sigma(E_\gamma, E) n(r) I_{cr}(r, E) dE dr, \quad (12)$$

где $\sigma(E_\gamma, E)$ — соответствующее эффективное сечение для образования космическими лучами с энергией E гамма-лучей с энергией E_γ (сечение должно быть, конечно, усреднено с учетом элементного и изотопного состава космических лучей и ядер в газе). Для потока гамма-лучей от дискретного источника, на основе (12), имеем

$$F_\gamma(> E_\gamma) = \int_\Omega I_\gamma(> E_\gamma) d\Omega \approx \frac{(\overline{\sigma I_{cr}}) \tilde{n}(V)}{R^2}, \quad (13)$$

где Ω — телесный угол, под которым виден источник, $(\overline{\sigma I_{cr}})$ усредненное по спектру космических лучей сечение (см. (12)) и $\tilde{n}(V)$ — количество ядер газа в источнике с объемом V , находящемся на расстоянии R (подробнее см., например, ^{5,16}). Из сказанного очевидно (см. (12), (13)), что изучение гамма-лучей от распада π^0 -мезонов позволяет найти интенсивность космических лучей (их протонно-ядерной компоненты) вдали от Земли. При этом нужно, конечно, знать количество газа (в основном атомарного и молекулярного водорода) в соответствующих областях (множители n и \tilde{n} в (12) и (13)), но как раз концентрация межзвездного газа (точнее, это относится к атомарному водороду) хорошо определяется радиоастрономическим методом (линия $\lambda = 21$ см от атомов водорода).

В этом — в возможности непосредственно исследовать основную, протонно-ядерную компоненту космических лучей во Вселенной — и состоит важнейшая роль гамма-астрономии для астрофизики космических лучей. Другими словами, гамма-астрономия в отношении изучения протонно-ядерной компоненты занимает такое же место, как радио-астрономия в отношении электронной компоненты. В частности, гамма-астрономическим методом в результате приема гамма-излучения Магеллановых Облаков ²⁰ и определения градиента интенсивности космических лучей в направлении, скажем, на антицентр Галактики ²¹ можно, в принципе, получать сведения о косми-

ческих лучах в Метагалактике (более конкретно речь идет о способе опровержения метагалактических моделей происхождения космических лучей в Галактике; см. ниже).

К сожалению, как уже отмечалось, гамма-астрономия развивается медленнее, чем хотелось бы и, в принципе, было бы вполне возможно. Особенно это относится как раз к исследованию гамма-лучей от распада π^0 -мезонов, порожденных основной частью протонно-ядерной компоненты космических лучей. Вся надежда сейчас на советскую гамма-обсерваторию «Гамма» и американскую GRO, которые должны начать работать в ближайшие годы (есть надежда на то, что «Гамма» будет запущена в 1988 г.). Основной на обсерватории «Гамма» телескоп «Гамма-1» массой 1500 кг должен регистрировать гамма-излучение в интервале 50–5000 МэВ, ее угловое разрешение 2° и со

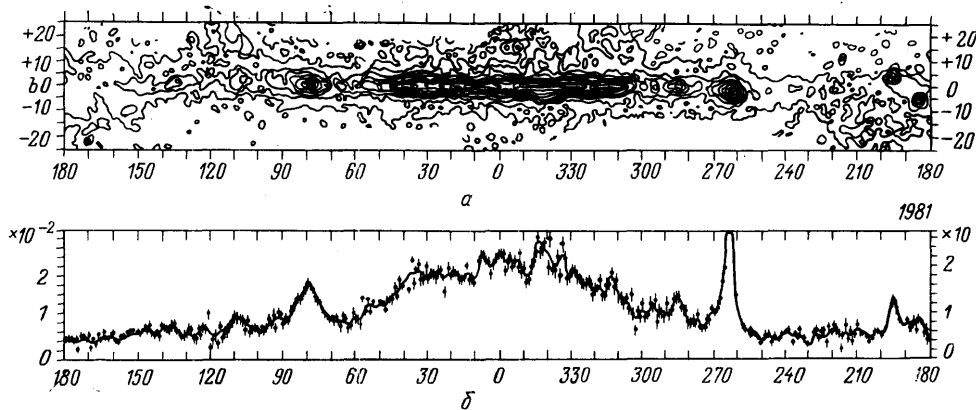


Рис. 10

специальной «маской» $17'$, минимальный фиксируемый поток $F_\gamma \sim 5 \cdot 10^{-8}$ фотонов/см² с. В будущем необходимо все время иметь гамма-обсерваторию на орбите, и желательно не одну, а несколько. Необходим и комплексный «патруль» для изучения вспыхивающих сверхновых²², чтобы не повторилась история со сверхновой 1987 А в Большом Магеллановом Облаке. Нельзя пренебрегать и возможностями гамма-астрономии на высотных баллонах (укажем, например, на работу²³, в которой исследовались гамма-лучи от радиогалактики Центавр А \equiv Cen А в диапазоне 0,7–20 МэВ).

Вернусь, однако, к уже сделанному, ибо вовсе не собираюсь преуменьшать достижений спутника SAS II и особенно COS-B. В качестве примера на рис. 10 приведены некоторые результаты COS-B²⁴ для гамма-фотонов с энергией $E_\gamma = 70$ МэВ — 5 ГэВ (на рис. 10, а показана карта интенсивности в зависимости от различных галактических долгот для галактических широт $|b| \leq 20^\circ$; на рис. 10, б указано распределение интенсивности по долготе, причем произведено усреднение в интервале широт $|b| < 5^\circ$). К сожалению, градиент космических лучей в Галактике надежно еще не установлен, на этот счет идут споры (см. последние известные нам статьи по этому вопросу²⁵, где имеются соответствующие ссылки). Важно отметить, что наблюдения не противоречат предположению, что плотность энергии космических лучей спадает в направлении антицентра (и вообще по радиусу, отсчитываемому от галактического центра) по закону типа $w_{cr} \sim e^{-r/R}$, где $R \sim 10$ –15 кпк (при этом в качестве расстояния от центра до Солнца выбрано расстояние 10 кпк; сейчас принято расстояние 8 кпк). Такой вывод (если, конечно, градиент реален, что, строго говоря, еще нужно доказать) вполне отвечает галактической модели с гало; при этом гало космических лучей должно иметь характерный размер $R \sim 15$ кпк. Об этом еще пойдет речь в следующем разделе доклада.

На COS-B (при чувствительности $F_\gamma > 10^{-6}$ фотонов/см²с) зарегистрировано около 20 дискретных источников гамма-лучей. В их числе пульсары PSR 0531 (Краб) и PSR 0833 (Вела), квазар 3C273 и водородное облако (молекулярное облако) ρ -Знаменосца (ρ -Orphiuchi). Остальные источники еще не идентифицированы, среди них Геминга (Geminga \equiv 2 CG 195 + 04), один из мощнейших в γ -диапазоне (поток от него $F_\gamma (> E_\gamma = 100 \text{ МэВ}) = 4,8 \cdot 10^{-6}$ фотонов/см²с). Довольно вероятно, что некоторые из неидентифицированных источников представляют собой молекулярные облака или пульсары. Помимо гамма-источников, изучавшихся COS-B, отметим уже упоминавшуюся радиогалактику Сеп-А, сейфертовскую галактику NGC 4151 и галактический рентгеновский источник Суг Х-3 (Лебедь Х-3). Типичная светимость галактических гамма-источников $L_\gamma \sim 10^{34} - 10^{36}$ эрг/с (например, для спектра $F_\gamma(E_\gamma) = K_\gamma E_\gamma^{-3}$ в предположении об изотропности излучения светимость

$$L_\gamma = 4\pi R^2 \int E_\gamma F_\gamma dE_\gamma = \frac{4\pi R^2 K_\gamma}{E_\gamma};$$

если $F_\gamma (> F_\gamma = 100 \text{ МэВ}) = 1/2 K_\gamma E_\gamma^{-2} \sim 5 \cdot 10^{-6}$ фотонов/см²с, то при расстоянии 1000 пк $\approx 3 \cdot 10^{21}$ см $L_\gamma \sim 10^{35}$ эрг/с. Для пульсара PSR 0531 (Краб) L_γ ($50 \text{ МэВ} < E_\gamma < 10 \text{ ГэВ}$) = $2 \cdot 10^{35}$ эрг/с. Полная гамма-светимость Галактики $L_\gamma (> E_\gamma = 70 \text{ МэВ}) \sim 10^{39}$ эрг/с, что отвечает при наблюдаемом спектре примерно $2 \cdot 10^{42}$ фотонов/с. Кстати, полная светимость Галактики в радиодиапазоне $L_r \sim 3 \cdot 10^{38}$ эрг/с.

Для квазара 3C273 L_γ ($50 < E_\gamma < 500 \text{ МэВ}$) = $2 \cdot 10^{46}$ эрг/с (принято расстояние 790 Мпк; красное смещение $z = 0,158$). Полная светимость этого квазара, видимо, не превосходит $L = (2-5) \cdot 10^{47}$ эрг/с, а его рентгеновская светимость L_x ($0,5 < E_x < 4,5 \text{ кэВ}$) = $1,7 \cdot 10^{46}$ эрг/с.

Особенно поражает, пожалуй, очень высокая гамма-светимость в области энергий $E_\gamma > (1-5) \cdot 10^{11}$ эВ (наземные наблюдения по излучению Вавилова — Черенкова в атмосфере) и в области $E_\gamma > 10^{14}$ эВ (наземные наблюдения по ШАЛ — широким атмосферным ливням). Наибольшее внимание в этих областях привлекает источник Суг Х-3, возможно молодой пульсар в двойной системе с орбитальным периодом 4,8 часа²⁶. Для Суг Х-3 светимость $L_\gamma (> E_\gamma = 40 \text{ МэВ}) \approx 3 \cdot 10^{38}$ эрг/с, $L_\gamma (> E_\gamma = 2 \cdot 10^{12}) \approx 5 \cdot 10^{36}$ эрг/с, $L_\gamma (> E_\gamma = 2 \cdot 10^{15} \text{ эВ}) \approx 1 \cdot 10^{36}$ эрг/с (по другим оценкам, считая, что расстояние до Суг Х-3 составляет $R \approx 13$ кпк, светимость $L_\gamma (> E_\gamma = 10^{12} \text{ эВ}) \approx (2-5) \cdot 10^{37}$ эрг/с, а в интервале $3 \cdot 10^{15} < E_\gamma < 10^{16}$ эВ светимость $L_\gamma \approx 3 \cdot 10^{36}$ эрг/с, причем, как и в других случаях, излучение считается изотропным). Для источника Vela X-1 приводится оценка $L_\gamma (> E_\gamma = 3 \cdot 10^{15} \text{ эВ}) \approx 2 \cdot 10^{34}$ эрг/с. Правда, светимость понижается в $4\pi/\Omega$ раз, если гамма-излучение имеет направленный характер и сосредоточено внутри телесного угла Ω . Столь мощное гамма-излучение может, вероятно, генерироваться лишь протонами, для мощности (светимости) которых в случае Суг Х-3 приходим к оценкам типа $L_p (> E_p = 10^9 \text{ эВ}) \sim 10^{40}$ эрг/с и $L_p (10^{16} < E_p < 10^{17} \text{ эВ}) \sim 10^{39}$ эрг/с (здесь, как и везде в докладе, мы не стремимся к большой точности и не оговариваем всех сделанных при оценках предположений, см. также дополнение).

К сожалению, у нас нет сейчас возможности подробнее остановиться на гамма-астрономии и ее связи с космическими лучами. Можно надеяться, однако, что даже сделанные довольно фрагментарные замечания ясно показывают, сколь мощным и перспективным является гамма-астрономический метод изучения космических лучей во Вселенной. Этот факт нашел, естественно, отражение в программе настоящей конференции — гамма-астрономии будет на ней посвящено около 130 сообщений, т.е. примерно 15 % всех докладов.

4. ПРОИСХОЖДЕНИЕ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ. ГАЛАКТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ С ГАЛО

Под проблемой происхождения космических лучей принято понимать комплекс вопросов, связанных с происхождением первичных космических лучей у Земли и вообще в солнечной системе. Конечно, можно говорить и о происхождении космических лучей, скажем, в радиогалактиках. Очевидно, однако, что космические лучи у Земли выделены в том отношении, что только о них мы имеем богатую, так сказать непосредственную информацию. Итак, нас будет интересовать только происхождение космических лучей, достигающих Земли.

Для решения проблемы нужно указать «область захвата» — область, из которой приходят космические лучи, где они блуждают. Нужно указать, источники космических лучей, механизмы их ускорения, характер распространения в межзвездном пространстве. Совокупность всех этих сведений и их интерпретация составляют теорию происхождения космических лучей. При этом центральное место занимает выбор модели, для чего необходимо в первую очередь выбрать упоминавшуюся «область захвата». Когда-то обсуждалась, например, солнечная модель — в ней космические лучи, приходящие к нам (только о них и будет идти речь без дальнейших оговорок), считались ускоренными на Солнце и захваченными в некоторую околосолнечную область (скажем, с размером $R \sim 10^{16} - 10^{18}$ см). Но сейчас мы знаем, что космические лучи примерно в том же количестве заполняют по крайней мере область галактического диска и в основной своей части приходят к нам из Галактики. Другое дело, что и солнечные космические лучи представляют интерес и широко исследуются⁶. Но говорить о солнечной модели происхождения космических лучей (в указанном выше смысле), конечно, не приходится. Другая, можно сказать, крайность — это метагалактические модели происхождения космических лучей. В этих моделях предполагается, что космические лучи в основной своей части втекают в Галактику извне — из метагалактического пространства. Метагалактические модели критиковались уже давно (см., в частности,^{4,17}). После открытия в 1965 г. реликтового теплового радиоизлучения с температурой $T \approx 2,7$ К стало очевидно, что электронная компонента космических лучей не может иметь метагалактического происхождения и должна генерироваться в самой Галактике. Дело в том, что потери, обусловленные рассеянием (так называемым обратным эффектом Комптона) электронов на тепловых фотонах, столь сильны, что даже от ближайшей к нам радиогалактики Центавр А до нас не дойдут электроны с энергией $E > 10^9 - 10^{10}$ эВ, как раз ответственные за значительную часть синхротронного галактического радиоизлучения. Вероятно, не могут, в связи с ядерными потерями, дойти до нас из Метагалактики и самые тяжелые ядра. Что же касается протонов и легких ядер, то столь прямого и однозначного опровержения метагалактических моделей их происхождения еще нет. По-видимому, лишь гамма-астрономические наблюдения — исследование Магеллановых Облаков²⁰ и градиента $w_{сг}$ в Галактике^{21,25,27-29} способны внести здесь полную ясность. По нашему мнению, однако, совокупности всех имеющихся данных уже достаточно для отказа от метагалактических моделей (это не относится к частицам с самой высокой энергией $E > 10^{17}$ эВ или, скорее, даже с $E \gtrsim 10^{19}$ эВ, которые, по-видимому, имеют метагалактическое происхождение^{13,14}).

Остаются, таким образом, галактические модели — в них космические лучи (наблюдаемые у Земли) генерируются в Галактике и захватываются в ней, хотя в основном и вытекают в метагалактическое пространство. Галактические модели можно разделить на дисковые и модели с гало. В дисковых моделях космические лучи сосредоточены в некотором диске, если и более толстом, чем газовый диск Галактики (полутолщина $h_g \sim 100$ пк), но все же достаточно плоском, скажем с полутолщиной радиодиска $h_r \sim 500-1000$ пк

(см. рис. 11). В моделях с гало предполагается, что существует гало (корона) космических лучей с характерным размером $R \sim h_h \sim 10-15$ кпк. Из физических соображений (имеется в виду, сколь трудно удержать релятивистские частицы в диске) и из радиоданных (тогда, правда, неубедительных) я с самого начала (с 1953 г.;¹⁷) являюсь сторонником моделей с гало (об этом уже упоминалось в разделе 3). Как мне представляется, все данные либо подтверждают эту модель, либо, во всяком случае, не противоречат ей. Другое дело, что размер гало космических лучей еще не установлен. Кроме того, иногда гало космических лучей отождествляют с радиогало, что, конечно, неверно (см. выше раздел 3). В этой связи возникли чисто словесные расхождения (например, сплюснутое радиогало с полутолщиной $h_h \sim 3$ кпк можно называть толстым диском и т.п.).

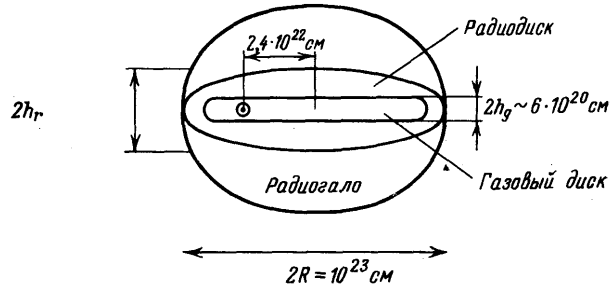


Рис. 11 ($2h_r \sim 5 \cdot 10^{21}$ см)

Гамма - астрономические данные, свидетельствующие о малости градиента плотности энергии w_{cr} , при существующей низкой точности, пусть еще не полностью, опровергают метagalacticкие модели. Но, во всяком случае, если речь идет о галактических моделях, то малость градиента совместима лишь с большим гало²⁸. Кстати сказать, если в работе²⁷ делается попытка как-то возродить возможность использовать метagalacticкую модель, то в²⁵ на основе более тщательного анализа данных того же COS-B метagalacticкая модель считается уже маловероятной. Фактически же она очень маловероятна и по ряду других соображений (см. ^{4,5} и указанную там литературу)*).

Таблица III. Галактическая модель с гало

Размеры гало космических лучей $R \sim 10-15$ кпк $\sim 3-5 \cdot 10^{22}$ см (радиогало несколько меньше, его размеры зависят от частоты и увеличиваются с уменьшением частоты)
Объем $V_h \sim 10^{68}$ см ³
Полная энергия космических лучей $W_{cr} \sim w_{cr} V_h \sim 10^{56}$ эрг $\sim 100 M_{\odot} c^2$
Полная энергия электронной компоненты $W_{cr,e} \sim w_{cr,e} V_h \sim 10^{54}$ эрг
Характерное время жизни космических лучей $T_{cr} \sim (1-3) \cdot 10^8$ лет $\sim (3-10) \cdot 10^{15}$ с (протонов, легких ядер)
Мощность (светимость) источников космических лучей $U_{cr} \equiv L_{cr} \sim W_{cr}/T_{cr} \sim (1-3) \times 10^{40}$ эрг/с
Мощность источников электронной компоненты $U_{cr,e} \sim W_{cr,e}/T_{cr,e} \sim 10^{39}$ эрг/с

Итак, остановимся на галактической модели с гало. Характерные параметры этой модели (речь идет только о порядке величин) приведены в таблице III.

Характерное время жизни космических лучей T_{cr} оценивается из различных соображений. Самый простой путь основан на выражении для про-

*) Как это часто бывает, положительный и отрицательный результаты не приводят к прямо противоположным заключениям. Так, наличие ясно выраженного градиента концентрации космических лучей в Галактике (с падением этой концентрации с удалением от галактического центра) явно свидетельствовало бы о галактической модели и противоречит метagalacticким моделям. Если же градиент, скажем, вообще незаметен, то это еще не противоречит галактическим моделям в предположении о «замкнутости» (закрытости) этой модели (имеется в виду наличие сильного отражения космических лучей на границах или, точнее, на периферии гало). Таким образом, для уточнения модели с гало, несомненно, нужно знать величину градиента.

денной толщии вещества $x = c\bar{\rho}T_{cr}$ (см. выше), определяемой из данных о химическом составе космических лучей. Для межзвездной среды $\rho \sim 2 \cdot 10^{-24} n$ г·см⁻³, где n — концентрация газа. Для Галактики в целом, с учетом пребывания космических лучей в гало, грубо говоря, $n \sim 10^{-2}$ см⁻³ и $T_{cr} \sim 10^{16}$ с $\sim 3 \cdot 10^8$ лет (при $x \approx 5-7$ г·см⁻³). В связи с ненадежностью принятого значения n (концентрацию газа в гало мы знаем плохо) несколько убедительнее более подробные расчеты, базирующиеся на анализе распространения космических лучей в Галактике *). Их источники концентрируются в диске, блуждают же они не только в диске, но выходят в гало, вновь возвращаются в диск и т.д. Разумеется, движение космических лучей в межзвездных полях не тождественно диффузии нейтральных атомов в какой-то неоднородной среде. Однако по целому ряду причин при рассмотрении распространения космических лучей диффузионное приближение широко применяется, причем с достаточным основанием. К сожалению, для обсуждения всего этого обширного круга вопросов здесь нет места. Ограничимся ссылками на обзоры^{4,5,16,30}, в которых указано большое количество других обзорных и оригинальных статей. В качестве примера приведем также довольно общее диффузионное уравнение для концентрации частиц сорта i ($N_i(\mathbf{r}, t, E) d\mathbf{r} dE$ — количество частиц в элементе объема и энергии $d\mathbf{r} dE$):

$$\frac{\partial N_i}{\partial t} - \text{div}(D_i \nabla N_i) + \frac{\partial}{\partial E}(b_i N_i) = Q_i - P_i N_i + \mathcal{P}_i; \quad (14)$$

здесь коэффициент диффузии $D_i(\mathbf{r}, t, E)$ в еще более общем случае можно считать анизотропным; коэффициент $b_i(\mathbf{r}, t, E)$ определяет потери энергии, Q_i — «внешние» источники космических лучей сорта i , член $-P_i N_i$ учитывает «катастрофические» процессы ухода частиц сорта i из рассматриваемого интервала $d\mathbf{r} dE$ и, наконец, член \mathcal{P}_i учитывает поступление в этот интервал частиц также за счет «катастрофических» потерь частиц других сортов. Для ядер роль катастрофических потерь играют соударения с ядрами газа (концентрация n) с превращением в другие ядра или существенным изменением энергии, т. е. $P_i = \sigma_i v_i n$ (σ_i — соответствующее среднее сечение и v_i — скорость ядра сорта i). Вместе с тем непрерывные потери для ядер — это в основном ионизационные потери, которые в релятивистской области для межзвездной среды весьма малы; поэтому в (14) для релятивистских ядер обычно полагают $b_i = 0$. Часто возможны и другие упрощения, но и при их учете уравнения типа (14) весьма богаты содержанием **).

В простейшем диффузионном приближении вводится постоянный коэффициент диффузии $D_i = D$ и, если время жизни космических лучей T_{cr}

*) Заметим, что такой важнейший параметр, как мощность генерации космических лучей в Галактике $U_{cr} \equiv L_{cr} \sim (1-3) \cdot 10^{40}$ эрг/с, лишь слабо зависит от выбора модели. Дело в том, что

$$U_{cr} \sim \frac{W_{cr}}{T_{cr}} \sim \frac{w_{cr} \bar{V}_{cr}}{x} \sim \frac{c w_{cr} M_g}{x} \sim 5 \cdot 10^{-3} M_g \sim 5 \cdot 10^{40} \text{ эрг/с},$$

где $x = c\bar{\rho}T_{cr} \sim 5$ г·см⁻² — проходимая космическими лучами толща газа, $\bar{\rho}$ — его средняя плотность и $M_g = \bar{\rho}V \sim 10^{43}$ г — полная масса газа в Галактике (для массы атомарного и молекулярного водорода в литературе фигурируют соответственно значения $M_H \sim 2 \cdot 10^{42}$ г и $M_{H_2} \sim 10^{42}$ г; учитывая другие элементы и особенно ионизированный водород, доминирующий в гало, принятое значение $M_g \sim 10^{43}$ г представляется вполне разумным). Заметим, что мощность генерации космических лучей называют иногда светимостью в космических лучах (отсюда и обозначение $L_{cr} \equiv U_{cr}$).

**) С другой стороны, в уравнении (14) не учтена возможность движения среды (межзвездного газа). При учете таких движений в левую часть уравнения (14) нужно добавить член $\text{div}(N_i \mathbf{u})$, где \mathbf{u} — скорость среды (нужно добавить также член, учитывающий изменение энергии частиц при их движении в неоднородном потоке). В Галактике имеются различные потоки, в частности конвективного типа. Не исключено и существование «галактического ветра» — потока газа, уходящего из Галактики или, скажем, вытекающего в одних направлениях и втекающего в других (речь, таким образом, идет о крупномасштабной конвекции или циркуляции).

определяется выходом из системы (из гало), то $T_{cr} \sim R^2/2D$. При $R \sim 3 \cdot 10^{22}$ см времени $T_{cr} \sim (1-3) \cdot 10^8$ лет отвечает значение $D \sim 10^{28} - 10^{29}$ см² с⁻¹. Анализ данных о химическом составе космических лучей на основе диффузионной модели приводит именно к таким коэффициентам D , а тем самым оправдывает и использованную оценку для T_{cr} . Как сказано, это целая область — здесь и учет зависимости диффузии (и химического состава) от энергии, и рассмотрение радиоактивных вторичных ядер (в первую очередь ядер ¹⁰Be), и многое другое. Другой аспект проблемы — выход за пределы диффузионного приближения, получение диффузионных уравнений из более общих кинетических уравнений, описывающих движение заряженных частиц (в частности, космических лучей) в электромагнитных полях и, более конкретно, в галактическом магнитном поле с учетом регулярной и хаотической составляющих этого поля. Это тоже целое направление (см., например, ⁵ гл. 8, ³⁰ и указанную там литературу). К нему примыкает еще одна обширная область исследований — анализ механизмов и процессов ускорения заряженных частиц.

Ускорение заряженных частиц в космосе, как и почти во всех известных случаях, имеет электромагнитную природу*). Другими словами, ускорение происходит под действием электрических полей, но роль магнитного поля обычно тоже не менее существенна, хотя энергию заряженной частицы это поле само по себе и не изменяет. В зависимости от ситуации и условий различают бетатронное ускорение (оно обусловлено индукционным электрическим полем, возникающим при изменении магнитного поля во времени), ускорение в двойных электрических слоях, ускорение при перезамыкании магнитных силовых линий, набор энергии при взаимодействии частиц с плазменными волнами (с плазменной турбулентностью) и, наконец, регулярное и статистическое ускорение на движущихся магнитных неоднородностях, в частности на фронтах ударных волн. Отсылая к обзорам (см. ⁵, гл. 9, ^{6,32,33}), сделаем здесь лишь несколько замечаний.

Особенно существенной для анализа проблемы ускорения космических лучей оказалась работа Ферми (1949, 1954 г., ³⁴). При этом вначале внимание было сосредоточено на статистическом ускорении (ускорении второго порядка). Конкретно, рассматривались столкновения заряженной частицы с хаотически движущимися магнитными неоднородностями («облаками»). Тогда среднее статистическое ускорение связано, в частности, с большей вероятностью «встречных» столкновений по сравнению с «догоняющими» столкновениями. В результате усреднения по всем столкновениям с неоднородностями, распределенными изотропно по скоростям, изменение энергии частиц равно (см. ^{4,5,32,34})

$$\frac{dE}{dt} = \alpha E, \quad \alpha = \xi \frac{u^2 v}{c^2 l}, \quad (15)$$

где u — средняя скорость «облаков», v — скорость ускоряемой частицы, l — длина свободного пробега между столкновениями и ξ — численный множитель, зависящий от конфигурации магнитных полей и т. п. (в ⁵, гл. 9 приводится значение $\xi = 4$). Наблюдаемые степенные спектры космических лучей можно объяснить при предположении, что частицы ускоряются некоторое независимое от энергии время T . Тогда, без учета потерь, из уравнения $dN/dt = -\alpha N - (N/T)$ получаем спектр $N(E) = KE^{-\gamma}$, $\gamma = 1 + (1/\alpha T)$. В качестве времени ускорения T , в связи с независимостью γ

*) В качестве важного исключения нужно упомянуть об ускорении частиц в ударной волне, распространяющейся в отсутствие магнитного поля в направлении убывания плотности вещества в атмосфере звезды. В таких условиях скорость волны может стать релятивистской, а следовательно, и все частицы за фронтом волны приобретают большую энергию³¹. Конечно, на микроскопическом уровне именно электрическое поле определяет передачу импульса при соударениях частиц, но макроскопическое электромагнитное поле может отсутствовать.

от сорта ядер, нужно взять время выхода космических лучей из системы. Полагая $\gamma \sim 3$ и $T = T_{\text{сг}} \sim 10^8$ лет, получаем $\alpha \sim 1/T_{\text{сг}} \sim 3 \cdot 10^{-16} \text{ с}^{-1}$. Но $\alpha \sim 4u^2/Cl$ (см. (15)), скорость неоднородностей магнитного поля («облаков») в Галактике $u \sim 10^6 \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$, и, следовательно, нужно, чтобы было $l \sim 4u^2/c\alpha \sim 3 \cdot 10^{17} \text{ см}$. Между тем, для крупных неоднородностей в Галактике скорее $l \sim 3-10 \text{ пк} \sim (1-3) \cdot 10^{19} \text{ см}$. Такое же примерно значение следует, если принять коэффициент диффузии $D \sim cl/3 \sim 10^{29} \text{ см}^2 \text{ с}^{-1}$. Главное, при малых значениях a частица за время $T_{\text{сг}}$ не успеет существенно ускориться. Из таких соображений межзвездное ускорение было в свое время признано заведомо неэффективным⁴. Фактически ситуация значительно сложнее, поскольку имеется целый спектр неоднородностей, и, в принципе, роль межзвездного ускорения могла бы быть существенной. Для оценки этой роли нужно связать ускорение частиц с их диффузией, происходящей на тех же неоднородностях, и опираться на данные наблюдений, касающиеся зависимости доли вторичных ядер в космических лучах (Li, Be, B и т. д.) от их энергии. Если межзвездное ускорение существенно, то с ростом энергии можно ожидать³⁵ повышения относительного количества вторичных ядер. Между тем наблюдается противоположная зависимость. Кроме того, даже с учетом ускорения на фронтах ударных волн, о чем пойдет речь ниже, межзвездное ускорение представляется невозможным при энергиях $E \gtrsim 10^{14} \text{ эВ}$ или даже энергиях $E \gtrsim 10^{12} \text{ эВ}$ ³⁶.

Вместе с тем из сути дела и формально из формулы (15) очевидно, что статистический механизм (механизм Ферми) особенно эффективен в областях с мелкомасштабными (малость l) и быстрыми движениями неоднородностей (большие значения скорости u). Именно таким условиям отвечает, вообще говоря, ускорение в оболочках сверхновых звезд. Поэтому-то, и по другим причинам, оболочки сверхновых как раз и рассматривались и рассматриваются^{4-6, 17, 29} в качестве наиболее вероятных источников галактических космических лучей. К этому вопросу мы еще вернемся.

Сейчас же упомянем о наиболее важном за последнее десятилетие достижении в области изучения механизма ускорения космических лучей. Речь идет об ускорении ударными волнами, распространяющимися в магнитотурбулентной плазме (см. ³⁷; обзоры ^{32, 33}). При отражении частиц от движущихся «стенок» (областей с сильным магнитным полем) энергия частицы в пренебрежении членами порядка u^2/c^2 изменяется по закону

$$\frac{dE}{dt} = -2 \frac{(\mathbf{uv})v}{c^2 l} E, \quad (16)$$

где u — скорость стенки. При одном соударении ускорение пропорционально u/c (ускорение или, правильнее сказать, изменение энергии, первого порядка), но при усреднении по углу между \mathbf{u} и \mathbf{v} ускорение первого порядка в изотропном случае отсутствует и остается лишь ускорение второго порядка (15). Разумеется, если частица «заперта» между двумя сближающимися стенками, то ускорение первого порядка имеет место, но оно ограничено временем, нужным для столкновения стенок. Поэтому ранее ускорение первого порядка считалось в астрофизике имеющим лишь весьма ограниченное значение. Ситуация изменяется, если ударная волна (стенка) движется в магнитотурбулентной плазме. Тогда на фронте волны происходит ускорение первого порядка*). Затем такая частица в результате рассеяния на магнитных неоднородностях перед или за фронтом ударной волны снова попадает на фронт, опять увеличивает свою энергию и т. д. В результате возникают ускоренные частицы с некоторым степенным спектром. В межзвездном пространстве распространяются ударные волны, возникающие в результате взрывов сверх-

*) На фронте ударной волны скорость газа \mathbf{u} , по которому бежит волна, изменяется, причем происходит сжатие газа на фронте. Поэтому в области фронта (который при учете вязкости и других факторов несколько размыт) $\text{div } \mathbf{u} < 0$, что отвечает ускорению (подробнее, например, см. ⁵, гл. 9).

новых и по другим причинам. Поэтому-то ускорение в межзвездном пространстве, в принципе, могло бы оказаться весьма эффективным. Но, как указывалось, фактически это не так, если не говорить о некотором «доускорении» частиц³⁸, ускоренных в основном в компактных источниках.

У нас есть возможность, и это необходимо, кратко остановиться в рамках галактической модели с гало лишь еще на одном очень важном вопросе о том, каковы основные источники космических лучей в Галактике. Начиная с пионерской работы Бааде и Цвикки (1934 г.,³⁹) в качестве источников космических лучей стали рассматриваться вспышки сверхновых звезд. Во вспышке сверхновой выделяется кинетическая энергия в оболочке $\sim 10^{49} - 10^{52}$ эрг, а вспышки в Галактике происходят каждые 10—30 лет. Поэтому средняя мощность энерговыделения для сверхновых $L_{\text{сн}} > 10^{40}$ эрг/с и, вероятно, $L_{\text{сн}} \sim 10^{41} - 10^{42}$ эрг/с. Для обеспечения же квазистационарности в отношении космических лучей в Галактике нужно (см. табл. III) инжектировать космические лучи с мощностью (светимостью) $U_{\text{сг}} \equiv L_{\text{сг}} \sim (1-3) \cdot 10^{40}$ эрг/с. Таким образом, с энергетической точки зрения сверхновые могут обеспечить нужное ускорение космических лучей. Гипотеза о такой роли сверхновых получила сильное подкрепление в 1951—1953 гг., когда по данным о радиоизлучении стало ясно, что в оболочках сверхновых имеется большое количество релятивистских электронов. Наконец, вскоре после открытия в 1967 г. пульсаров выяснилось, что некоторые из них находятся в оболочках сверхновых. В частности, пульсар PSR 0531 несомненно является нейтронной звездой, оставшейся от взрыва сверхновой в 1054 г., приведшего к образованию Крабовидной туманности. Этот пульсар и ответственен за наблюдающуюся активность Крабовидной туманности.

Итак, несомненно, сверхновые являются мощными источниками космических лучей. Звезды различных типов также генерируют космические лучи, однако, как правило, с несравненно меньшей мощностью. Так, средняя мощность генерации космических лучей Солнцем $L_{\text{сг},\odot} \sim 10^{25}$ эрг/с. Следовательно, даже 10^{11} звезд с такой генерацией обеспечат только мощность $L_{\text{сг}} \sim 10^{36}$ эрг/с, что на 4—5 порядков меньше требуемой мощности $L_{\text{сг}} \sim (1-3) \cdot 10^{40}$ эрг/с. Разумеется, некоторые звезды (звезды типа O и другие) значительно активнее Солнца, но их не так много. В общем, хотя это строго и не доказано, представляется весьма вероятным, что невзрывающиеся звезды, а также новые звезды не могут конкурировать со сверхновыми в качестве основных источников космических лучей.

Особое место занимает проблема источника Лебедь X-3 (Cyg X-3). Как уже упоминалось, этот источник генерирует космические лучи с мощностью $L_{\text{сг}} \sim 10^{39} - 10^{40}$ эрг/с *). Поэтому один или несколько таких источников способны обеспечить необходимую мощность генерации для всей Галактики. Поскольку от Cyg X-3 наблюдаются фотоны с энергией, достигающей по крайней мере 10^{16} эВ, ясно, что генерирующие их протоны (это наиболее вероятно) имеют энергию, достигающую до $10^{17} - 10^{18}$ эВ. Это обстоятельство также весьма важно, поскольку ускорение в Галактике частиц с энергией $E \gtrsim 10^{15}$ эВ даже в сверхновых всегда было и, собственно, остается проблемой. Мы не знаем, однако, сколько существует источников типа Cyg X-3 в данное время (возможно, всего один) и как долго они излучают. Нужно подчеркнуть, что сама по себе мощность $L_{\text{сг}} \sim 10^{40}$ эрг/с, хотя она, конечно, огромна (напомним, что полная светимость Солнца $L_{\odot} = 3,86 \cdot 10^{33}$ эрг/с) вполне сопоставима с мощностью сверхновых. В самом деле, при переходе при вспышке сверхновой в кинетическую энергию $10^{49} - 10^{52}$ эрг в космические лучи может переходить до 10^{51} эрг. Если процесс ускорения длится даже 3000 лет, то как раз и приходим к мощности $L_{\text{сг}} \sim 10^{40}$ эрг/с. В случае Крабо-

*) По-видимому, мощность источника Cyg X-3 сильно изменяется по времени. С этим обстоятельством, а также с рядом других связаны сомнения, имеющиеся в отношении данных о Cyg X-3 (см. дополнение).

видной туманности известно, что генерация космических лучей продолжается уже около 1000 лет, происходит сейчас с мощностью $L_{\text{cr}} > 10^{38}$ эрг/с (мощность электромагнитного излучения $L \sim 10^{38}$ эрг/с) и связана с активностью пульсара PSR 0531. Источник Суг X-3 представляет собой, видимо, молодой пульсар*), находящийся в двойной системе. Вполне возможно, что это продукт какой-то вспышки сверхновой. Таким образом, новое, что вносит в этом отношении источник Суг X-3 состоит в указании на возможность генерации протонов пульсаром с мощностью до 10^{40} эрг/с и с энергией $E \sim 10^{17} - 10^{18}$ эВ. Раньше же казалось, что такая мощность генерации космических лучей связана с оболочкой или, во всяком случае, не с самим пульсаром. Впрочем, подобное мнение не встречает возражений и сейчас, поскольку источники типа Суг X-3 и вообще двойные источники с пульсарами образуются, видимо, лишь для небольшой доли вспышек сверхновых.

Так или иначе, изучение сверхновых, их эволюции и излучения теснейшим образом связано с астрофизикой космических лучей и гамма-астрономией. Многие здесь еще не ясно. Например, почему затухает светимость источника? Одно из объяснений — уменьшение скорости вращения пульсара, оставшегося после вспышки. Однако для сверхновой SN 1972 E (галактика NGC 5253) обнаружено экспоненциальное падение светимости, что более естественно объяснить радиоактивным распадом продуктов взрыва. Эти радиоактивные продукты должны излучать гамма-линии. Например, ядра ^{56}Co путем К-захвата переходят в ^{56}Fe с излучением линии с $E_{\gamma} = 0,847$ МэВ. Регистрация таких линий на будущих спутниках может многое прояснить (так, имеется проект прибора, способного зарегистрировать гамма-линии от сверхновых, вспыхивающих в других галактиках вплоть до расстояний $R \sim 10$ Мпк).

В свете сказанного очевидна особая важность изучения вспышек близких сверхновых — в Галактике и в Магеллановых Облаках. Тем более достойна сожаления уже отмеченная неподготовленность к таким исследованиям (выявившаяся на примере вспыхнувшей 23 февраля 1987 г. сверхновой 1987 A) в отношении гамма-астрономических и нейтринных измерений. Как заметил в разговоре со мной один известный физик, наблюдения SN 1987 A были лишь «генеральной репетицией» и приведут к совершенствованию всей системы наблюдений вспышек в будущем. Будем надеяться, что так и произойдет, но, к сожалению, представители моего поколения до «премьеры» вполне могут вообще не дожить. Разумеется, вероятность вспышки еще одной сверхновой в Галактике или в Магеллановых Облаках в связи со вспышкой SN 1987 A не уменьшилась, но она не превосходит одной вспышки за 10 лет, а возможно, и за 30 лет. Тем важнее попытаться еще что-то получить для SN 1987 A, находящейся в Большом Магеллановом Облаке⁴⁰. Взорвавшаяся звезда имела большую массу $M \sim 15M_{\odot}$, масса оболочки того же порядка, скорость оболочки также велика — достигала $(2-4) \cdot 10^9$ см/с (для внешних слоев), кинетическая энергия оболочки составляла $(1-3) \cdot 10^{51}$ эрг. Космические лучи в оболочке могут ускоряться за счет трех механизмов: ускорения на фронте внешней ударной волны, статистического ускорения на турбулентных движениях внутри оболочки и ускорения пульсаром (если он образовался при взрыве, что вполне вероятно). В силу довольно большой массы оболочки и ее высокой скорости можно ожидать большой светимости в космических лучах (в протонах), достигающей $L_{\text{cr}} \sim 10^{42} - 10^{43}$ эрг/с. Не только при такой, но и при на один-два порядка меньшей мощности в оболочке образуется много π^0 -мезонов и, следовательно, гамма-фотонов. Гамма-светимость L_{γ} зависит от L_{cr} , спектра космических лучей (естественно считать, что он степенной, т.е. $N_p(E) = KE^{-\gamma}$, причем имеет максимум, а грубо говоря, обрывается на некоторой энергии E_{min}) и некоторых

*) Имеются указания на то, что этот пульсар излучает гамма-лучи с $E_{\gamma} > 10^{12}$ эВ с периодом 12,6 мс.

других факторов^{22,41}. Даже при $L_{\text{сг}} = 10^{40}$ эрг/с и $\gamma = 2,1-2,6$, $E_{\text{min}} \sim 1$ ГэВ поток гамма-фотонов с $E_{\gamma} > 70$ МэВ на Земле может составлять $F_{\gamma} (>E_{\gamma} = 70 \text{ МэВ}) \sim (3-6) \cdot 10^{-6}$ фотонов/см²·с. При той же мощности $L_{\text{сг}}$ фотоны с $E_{\gamma} > 1000$ ГэВ, которые можно регистрировать по излучению Вавилова — Черенкова, должны иметь поток $F_{\gamma} (>E_{\gamma} = 1000 \text{ ГэВ}) \sim 10^{-11} - 10^{-10}$ фотонов/см²·с. Подобные потоки и даже несколько меньшие могут регистрироваться существующими в южном полушарии установками. В отношении же гамма-лучей с $E_{\gamma} > 70$ МэВ, быть может, еще удастся запустить приборы на баллонах. Время для всех подобных гамма-измерений составляет один-два года после вспышки. Что касается гамма-лучей с $E_{\gamma} > 10^{15}$ эВ, то даже при $L_{\text{сг}} \sim 10^{41}$ эрг/с их поток на Земле от SN 1987 А составил бы порядка 10^{-14} фотонов/см²·с (при $\gamma = 2,1$) и 10^{-15} фотонов/см²·с (при $\gamma = 2,3$), но без учета поглощения на реликтовом тепловом излучении. Поглощение уменьшит поток в 10—30 раз, да и мощности $L_{\text{сг}} \sim 10^{41}$ эрг/с трудно ожидать на длительное время. Мала вероятность и регистрации нейтрино с высокой энергией $E_{\nu} \gtrsim 10^{14}$ эВ, генерируемых в оболочке SN 1987 А космическими лучами. Отсылая за подробностями к⁴¹, можем заметить, что наиболее реальным представляется регистрация от SN 1987 А гамма-лучей с $E_{\gamma} > 1000$ ГэВ. Мы не касаемся здесь регистрации гамма-линий. Так, согласно⁴⁰, через год после вспышки от SN 1987 А можно ожидать от распада ⁵⁶Со потока $F_{\gamma} (E_{\gamma} = 0,847 \text{ МэВ}) \gtrsim 3 \cdot 10^{-3}$ фотонов/см²·с. Будем надеяться, что соответствующие измерения успеют осуществить.

В будущем, несомненно, должна работать система (см., в частности,²²), при которой следующая вспышка сможет быть своевременно изучена во всех диапазонах электромагнитных волн, а также нейтринными телескопами (нужно иметь в виду как область малых энергий $E_{\nu} \sim 1-10$ МэВ, так и нейтрино с $E_{\nu} \gtrsim 10^{12}$ эВ) и гравитационными антеннами.

5. НЕКОТОРЫЕ ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Изучение космических лучей как прямыми методами (скажем, с использованием баллонов или спутников), так и косвенными способами (например, из радиоастрономических данных) происходит довольно медленно по сравнению с целым рядом исследований в физике. Так или иначе, долгие годы не удавалось получить ответ на многие вопросы — это ясно из исторического введения, сделанного в начале доклада, и последующих комментариев. Например, вопрос об оценке роли метагалактических космических лучей гамма-астрономическим методом по наблюдениям Магеллановых Облаков и из измерений градиента гамма-светимости в Галактике был поставлен соответственно в 1972 и 1975 гг.^{20,21}. Однако даже более простой метод измерения градиента еще не дал вполне определенных результатов и будет дебатироваться на настоящей конференции. При этом обсуждение не может здесь решить задачу — нужны новые измерения, а они уже несколько лет не проводятся из-за отсутствия гамма-спутников. Придется подождать еще минимум несколько лет до обработки данных планируемых запусков обсерваторий «Гамма» и GRO. Годами и даже десятилетиями ждут осуществления и другие проекты (например, проект нейтринного телескопа DUMAND).

Несмотря на подобные трудности, изучение космических лучей происходит широким фронтом. Настоящая конференция, на которую представлено более 800 докладов, лучшее тому свидетельство. Международные конференции по космическим лучам (ICRC) проходят каждые два года и длятся две недели; составляющие несколько томов оригинальные доклады заранее (к началу конференции) печатаются, через какое-то время публикуются «приглашенные» и раппортерские доклады. Все эти труды конференций ICRC составляют подлинные анналы исследования космических лучей⁶. Разумеется, участникам конференции ICRC-20 сказанное хорошо известно. Я же упомянул об этом в качестве примера для других. Более плодотворных и эффек-

тивных конференций я не знаю, хотя знаком с рядом областей физики и астрофизики.

Каковы важнейшие достижения в области астрофизики космических лучей за последние 10 лет? Такой срок я выбрал потому, что доклад, аналогичный настоящему, делал на 15-й конференции в 1977 г. (ICRC-15, Пловдив, Болгария¹⁸). Разумеется, какие результаты отнести к важным, а какие — к менее существенным, обычно является спорным и субъективным делом. Я это понимаю и вовсе не претендую на многое, к тому же в течение последнего десятилетия я меньше занимаюсь космическими лучами, чем раньше. Итак, как мне кажется, можно выделить такие достижения.

1. Более детальное изучение элементного и изотопного состава первичных космических лучей.

2. Обнаружение и начало изучения антипротонов.

3. Гамма-астрономические наблюдения на COS-B (1975—1982), которые только сейчас детально обработаны. Имеется в виду изучение как дискретных источников, так и галактического фона.

4. Обнаружение фотонов с $E_\gamma > 10^{14}$ эВ и вплоть до $E_\gamma \sim 10^{16}$ эВ от Суг Х-3 и, возможно, некоторых других источников. По этому поводу продолжаются споры. Но ведь то же можно сказать почти по каждому вопросу.

5. Теоретический анализ ускорения частиц на фронтах ударных волн.

Несомненно, список можно расширить, но тогда он может превратиться в перечисление очень многих ведущихся исследований.

Что нас ожидает в будущем? Я имею в виду не очень далекие перспективы (ибо, кстати сказать, как-то равнодушен к футурологии), а планы до начала следующего века (формально до 1 января 2001 г.) или до столетия со времени открытия космических лучей (7 августа 2012 г.). Подобная экстраполяция не представляется особенно смелой или чисто спекулятивной. Мы ведь знакомы с историей изучения космических лучей в течение 75 лет. Знаем мы и планы создания ряда крупных установок, осуществление которых и эксплуатация занимают долгие годы. Трудно сомневаться в том, что нас ждут и неожиданности, возможно, даже существенные открытия. Примером такой неожиданности явилось обнаружение в 1983 г. широких ливней, которые считаются порожденными гамма-фотонами с энергией до 10^6 эВ, испускаемыми источником Суг Х-3.

Перечислим некоторые направления и задачи, в достаточной мере ясные и определенные.

1. Дальнейшее изучение элементного и изотопного свойства космических лучей у Земли. В этом направлении все время ведется и продолжается большая работа. Она довольно полно освещается на ICRC, в частности на настоящей конференции. Поскольку я сам как-то далек от этой тематики, ограничусь упоминанием особой актуальности изучения радиоактивных вторичных ядер (^{10}Be , ^{14}C , ^{26}Al и др.), а также энергетического спектра различных вторичных ядер. Проекты «Advanced Composition Explorer» (ACE), «Astromag» и, вероятно, некоторые другие обещают достижение существенного прогресса в обсуждаемой области^{12,42}.

2. Изучение электронной и позитронной компонент, несмотря на успехи, остается вполне актуальным.

3. Неясен вопрос об антипротонах. Необходимо повторить измерения их спектра. Если при низких энергиях $E_k \sim 0,1$ ГэВ антипротонов действительно много (значительно больше, чем вторичных антипротонов при $x = 5 \text{ г}\cdot\text{см}^{-2}$), то проблема образования антипротонов остается нерешенной (состояние вопроса на 1985 г. см. ⁴³; насколько я знаю, с тех пор существенных новых результатов не было).

4. Вся область сверхвысоких энергий $E > 10^7$ эВ и особенно $E \gtrsim 10^{19}$ эВ уже давно остается выделенной: здесь неясны спектр (в частности, имеется ли обрезание спектра при $E \gtrsim 3 \cdot 10^{19}$), химический состав, анизотропия. Открыт, по сути дела, и вопрос о происхождении таких частиц, хотя при

$E \gtrsim 10^{19}$ эВ метагалактический вариант наиболее правдоподобен (подробнее см. ⁵ гл. 5; ^{6,13,14}). Для изучения космических лучей с энергией по крайней мере до 10^{20} эВ целесообразно создание гигантских установок на площади, достигающей 10^3 км² ⁴⁴.

5. О значении для астрофизики космических лучей гамма-астрономии уже много было сказано выше. Помимо запуска обсерваторий «Гамма» и GRO, нужно иметь и новые обсерватории примерно в том же диапазоне $30 \text{ МэВ} < E_\gamma < 5\text{--}30 \text{ ГэВ}$, а также создать прибор для диапазона $5 \text{ ГэВ} < E_\gamma < 100\text{--}400 \text{ ГэВ}$ ⁴⁵. Только тогда будет заполнен существующий сейчас «провал» в исследуемом спектре между измерениями на спутниках (COS-B, «Гамма-1», GRO) и наземными измерениями по свечению Вавилова — Черенкова ($E_\gamma > 10^{11} - 10^{12}$ эВ). К тому же наземные измерения (по свечению атмосферы) могут фиксировать лишь дискретные источники. Программа измерений на обсерваториях «Гамма» и GRO известна. В большой мере, и это естественно, речь идет о повторении, уточнении и расширении исследований, начатых на спутниках SAS-II и COS-B. Здесь хочу подчеркнуть необходимость проведения измерений также на высоких галактических широтах с целью выявления гамма-гало Галактики, за которое ответственно в основном рассеяние релятивистских электронов (обратный эффект Комптона) на тепловых фотонах в гало (см. ⁵ гл. 6 и ⁴⁶). Очевидна актуальность изучения различных дискретных гамма-источников (молекулярных облаков, пульсаров и др.), выяснения для них спектра и вариаций интенсивности. То же можно сказать об измерениях в области $E_\gamma \gtrsim 10^{11} - 10^{12}$ эВ (свечение Вавилова — Черенкова в атмосфере) и в области $E_\gamma \gtrsim 10^{14}$ эВ (широкие ливни) ^{*}. Для источника Суг X-3, да и для других, оправданы наблюдения во всех электромагнитных диапазонах, а также подземные наблюдения, служащие для выявления какого-то нефотонного излучения (его существование представляется весьма сомнительным, но нельзя же исходить из предвзятого мнения, нужно искать и кажущееся невероятным).

6. Если иметь в виду и косвенное влияние, то почти все направления астрофизики взаимосвязаны. Заниматься здесь подробным перечислением представляется бессмысленным. Из того, что ближе к астрофизике космических лучей (или даже составляет ее часть), упомянем лишь изучение солнечных космических лучей, модуляцию космических лучей в солнечной системе, радиоастрономические исследования гало галактик (особенно на длинных волнах $\lambda \gtrsim 1$ м) и оболочек сверхновых, некоторые совместные рентгеновские и радионаблюдения галактик (имеется в виду измерение магнитного поля по сопоставлению обратного комптоновского рентгеновского излучения и синхротронного радиоизлучения).

7. Важнейшим новым направлением исследования космических лучей вдали от Земли является регистрация генерируемых космическими лучами нейтрино с очень высокими энергиями $E_\nu \gtrsim 10^{12}$ эВ. К сожалению, хотя соответствующий проект ДЮМАНД (DUMAND) обсуждается начиная с 1975 г., он, видимо, еще довольно далек от реализации. То же относится и к другим известным проектам, кроме, возможно, установки на озере Байкал. Обзор ситуации на 1984 г. содержится в гл. 7 монографии ⁵, ряд данных приводился и на всех последних ICRC ⁶, настоящая конференция не составляет исключения. Поскольку я сам являюсь соавтором лишь одной работы в этой области ⁴⁷ и нейтринная астрофизика в целом не «моя епархия», то могу претендовать на известную объективность. Так вот, изучение нейтрино с высокими энергиями представляется мне исключительно интересным и важным направлением астрофизики. И просто слепотой со стороны организаторов науки кажется то обстоятельство, что столько лет не удастся получить довольно скромные средства, необходимые для осуществления

^{*} Для этой цели нужны установки с большой площадью ($S \sim 1$ км²), снабженные достаточным количеством детекторов мюонов (последнее необходимо для выделения бедных мюонами ливней, которые генерируются гамма-лучами).

проекта DUMAND или ему подобных. Трудно сомневаться, однако, в том, что еще до упомянутых юбилейных дат нейтринная астрономия высоких энергий начнет жить не только на бумаге, или, точнее, вступит в фазу наблюдений.

8. Астрофизика космических лучей, как и вся астрофизика, немыслима без теории. В этом отношении еще Ферми преподавал нам хороший урок³⁴. В области теории сделано много, в частности, за последнее десятилетие. Мы имеем в виду анализ, распространения и ускорения релятивистских частиц в турбулентной намагниченной плазме и многое другое. Тормозом обычно является, однако, недостаточная полнота и точность данных наблюдений. В общем, здесь достаточно отметить, что астрофизика космических лучей имеет надежное теоретическое обеспечение и, в целом, не теория замедляет ее развитие.

Сказанное в настоящем разделе доклада — это, конечно, не программа работы и даже не проект такой программы. Были лишь перечислены некоторые известные задачи. Наша цель — подчеркнуть, что астрофизика космических лучей и примыкающие к ней направления в настоящее время представляют собой широко разветвленную и развитую область исследований. Совершенно ясно, вместе с тем, что многое еще нужно сделать и можно сделать. Но продвижение вперед требует больших усилий, и в этом отношении важны понимание и помощь со стороны сообщества физиков и астрономов, организаторов космических исследований и, собственно, всех, от кого зависит развитие науки. Хотелось бы, чтобы настоящая конференция и, в частности, мой вводный доклад способствовали такому пониманию.

Пользуюсь возможностью поблагодарить за замечания и советы В. С. Березинского, В. А. Догеля и В. С. Птускина.

ДОПОЛНЕНИЕ

Цель публикации настоящего доклада — ознакомить достаточно широкий круг физиков и представителей близких специальностей с развитием астрофизики космических лучей и ее современным состоянием. Эта область физики и астрономии так разрослась и в целом столь быстро прогрессирует, что, как и в ряде других случаев, неспециалисту все труднее быть в курсе дела, видеть лес за деревьями. В то же время многие (и, как мне кажется, с полным основанием) стремятся следить за замечательными успехами астрономии, в том числе астрофизики космических лучей и гамма-астрономии.

В докладе я стремился, не входя в детали, продемонстрировать, сколь многое уже сделано, как широк спектр обсуждаемых проблем и каковы перспективы и задачи дальнейших исследований. Но материала так много, что картина поневоле оказалась несколько обедненной. Поэтому кажется целесообразным в настоящем дополнении сначала хотя бы перечислить разделы, на которые была разбита программа конференции. Это разбиение было отражено, естественно, в тех шести томах материалов, которые были розданы участникам конференции непосредственно перед ее началом. Затем будет сделано несколько замечаний, касающихся обсуждавшихся вопросов.

1. О 20-й Международной конференции по космическим лучам (20th ICRC)

Весь материал был разделен на три части (это касается как опубликованных трудов конференции, так и ее программы).

Происхождение космических лучей и галактические явления (шифр OG; тт. 1 и 2):

1. Гамма-вспышки.

2. Гамма-лучи от точечных источников и диффузное излучение с энергией $E_\gamma \leq 3 \cdot 10^{11}$ эВ.

3. Гамма-излучение с энергией $E_\gamma > 3 \cdot 10^{11}$ эВ.
 4. Ядра в космических лучах с энергией $E \leq 10^{12}$ эВ/нуклон (состав, спектры, анизотропия).
 5. Ядра в космических лучах с энергией $E > 10^{12}$ эВ/нуклон (состав, спектры, анизотропия).
 6. Электроны, позитроны, антипротоны.
 7. Распространение в межзвездном пространстве и ядерные взаимодействия.
 8. Ускорение и источники космических лучей.
 9. Техника и аппаратура.
 10. Разное.
- Явления на Солнце и в гелиосфере (SH; тт. 3 и 4):
1. Ускорение частиц на Солнце.
 2. Заряженные частицы с высокой энергией и нейтральное излучение в солнечных вспышках.
 3. Распространение солнечных космических лучей в короне и в межпланетном пространстве.
 4. Ускорение частиц и их распространение в гелиосфере.
 5. Состав (элементный и изотопный состав, ионизация) частиц солнечного и гелиосферического происхождения.
 6. Долговременная модуляция галактических космических лучей и аномальная компонента.
 7. Переходные и атмосферные эффекты для первичных и вторичных космических лучей.
 8. Геомагнитные и атмосферные эффекты для первичных и вторичных космических лучей.
 9. Ядерная космогония (cosmogenic nuclides).
 10. Солнечные нейтрино.
 11. Техника и аппаратура.
 12. Разное.
- Процессы при высоких энергиях (HE; тт. 5 и 6):
1. Взаимодействия при высоких энергиях.
 2. Адронные и электромагнитные каскады.
 3. Широкие атмосферные ливни.
 4. Мюоны.
 5. Нейтрино.
 6. Новые частицы и процессы.
 7. Техника и аппаратура.
 8. Разное.

Объем каждого тома от 420 до 530 страниц (общий объем 2890 страниц), всего в этих томах опубликовано 852 сообщения (в некоторых случаях опубликованы лишь тезисы). На самой конференции был сообщен и целый ряд новых данных. Напротив, опубликованные доклады, авторы которых не приехали, как правило, не обсуждались. Последние три дня конференции (а всего она заняла 12, частично неполных, рабочих дня) были посвящены раппортерским докладам (всего их было 19). Кроме того, состоялись «приглашенные» (invited) доклады:

- В. Л. Гинзбург (помещенный выше доклад);
 М. М. Шапиро, «75 лет изучения космических лучей»;
 Д. Н. Шрамм, «Нуклеосинтез в звездах»;
 К. де Ягер, «Процессы с высокой энергией в солнечных вспышках»;
 Я. Б. Зельдович, «Вселенная — вчера и сегодня»;
 Л. Б. Окунь, «Фундаментальные взаимодействия: от пионов до вионов»;
 Е. С. Стоун, «Межпланетные исследования вне плоскости эклиптики»;
 П. Повинец, «Исследование космических лучей с использованием «космогонических» радиоактивных ядер»,
 Г. Рубинштейн, «Состояние квантовой хромодинамики в плане изучения космических лучей»;

Г. Фолк, «Ускорение частиц в астрофизических ударных волнах».

К числу таких докладов можно отнести также сообщения Дж. Симпсона «Ускорение космических лучей во внешней гелиосфере» и Р. З. Сагдеева «Процессы вблизи кометы Галлея как модель ферми-ускорения галактическими ударными волнами», хотя они фигурировали под названием «highlight» докладов. Кроме того, были проведены заседания, посвященные соударениям релятивистских ионов, гамма-астрономии сверхвысоких энергий и нейтрино от сверхновой SN 1987 А. Наконец, состоялись различные так называемые «рабочие обсуждения» (workshops).

Приглашенные и раппортерские доклады, а также некоторые другие сообщения будут в дальнейшем опубликованы — составят еще три тома.

Все эти данные приводятся здесь как для информации, так и с целью проиллюстрировать масштаб и широту обсуждаемого круга проблем и всей той области, которой была посвящена конференция. Такие конференции происходят примерно каждые два года (следующая конференция, ICRC-21, должна состояться в Аделаиде (Австралия) в январе 1990 г.

Важно подчеркнуть также следующее: астрофизике космических лучей (или, точнее, той ее части, которой был посвящен мой доклад) отвечает только примерно одна треть всей проблематики, обсуждающейся на этой и других подобных конференциях (ICRC). Разумеется, все три части (OG, SH и HE), о которых шла речь выше, в той или иной мере взаимосвязаны. Характер связей различен в разных случаях и не всегда сразу очевиден. Например, не раз задавался такой вопрос: почему на конференции по космическим лучам столько внимания уделяется Солнцу и гелиосфере? Казалось бы, это более уместно на специальных конференциях, посвященных физике Солнца и космическим исследованиям. Ответ здесь таков. Солнечные космические лучи, как и другие «продукты» солнечной активности и процессы на Солнце и в гелиосфере, несомненно, характеризуются значительно меньшими энерговыделением и энергией испускаемых заряженных частиц и фотонов. Но, с другой стороны, близость Солнца и гелиосферы позволяет проводить столь детальные наблюдения и измерения, о которых в отношении межзвездной среды, звезд и оболочек сверхновых, не говоря уже о квазарах, галактических ядрах и радиогалактиках, можно лишь мечтать. Таким образом, изучение Солнца и гелиосферы для галактической и метagalacticкой астрофизики космических лучей, радиоастрономии и гамма-астрономии играет роль, аналогичную лабораторным исследованиям для физики космической плазмы или роли лабораторной спектроскопии для оптической астрономии. Более конкретной иллюстрацией сказанного может служить изучение ударных волн в гелиосфере (и даже, скажем, вблизи кометы Галлея) с целью проверки теории ускорения частиц в ударных волнах. Если же говорить о связи астрофизики космических лучей (OG) с физикой высоких энергий, изучаемой в космических лучах (HE), то она тоже достаточно очевидна. Например, исследование широких атмосферных ливней (ШАЛ — EAS), с одной стороны, служит для выявления ряда процессов взаимодействия и их особенностей при высоких энергиях. С другой стороны, те же ШАЛ используются для анализа состава, спектра и анизотропии первичных космических лучей с высокой и сверхвысокой энергией.

Коротко говоря, комплексный подход, совместное (до известных пределов) обсуждение всех проблем, связанных с космическими лучами, плодотворно и вполне оправдано. Другое дело, что «нельзя объять необъятное», чем-то приходится жертвовать, что-то отбирать. Понятно поэтому смещение акцентов, постепенно происходящее от конференции к конференции. Например, еще десять лет назад, на 15 ICRC, специальный подраздел был посвящен рентгеновской астрономии, сейчас же такого подраздела уже нет. На ICRC конференциях довольно широко обсуждаются проекты различных новых установок и приборов. По мере осуществления этих проектов начинают, естественно, обсуждаться и полученные результаты.

В целом международные конференции по космическим лучам (ICRC) играют огромную роль для развития всей области. В этом отношении ICRC могут служить примером и для других направлений физики и астрономии.

2. Несколько замечаний по итогам конференции в отношении астрофизики космических лучей

На регулярно проводимых, заранее подготовляемых конференциях в центре внимания находятся обычно не сенсации, а сопоставление новых данных, сообщение и обсуждение деталей и проектов новых установок. Происходило это и на настоящей конференции. Вместе с тем не были забыты, естественно, наблюдения SN 1987 A. Что касается гамма-астрономических наблюдений оболочки этой сверхновой, то они еще не произведены, а открывающиеся возможности кратко освещены в тексте моего доклада. Что же касается сенсационных наблюдений нейтрино от SN 1987 A, то это особая тема, на которой останавливаться здесь не будем, хотя на конференции ей было уделено много внимания (можно думать, что в УФН будет опубликован соответствующий обзор).

Другой наиболее широко обсуждавшийся вопрос — наблюдения гамма-лучей с высокой ($E_\gamma > 3 \cdot 10^{11}$ эВ) и сверхвысокой ($E_\gamma > 10^{14} - 10^{15}$ эВ) энергией. Особое внимание привлекают двойные источники: Суг X-3, Нег X-1, Vela X-1, «кандидат в черные дыры» Суг X-1 и некоторые другие. Все это — тема для особого обзора (частично такую задачу предполагается решить в готовящемся обзоре В. А. Догеля и автора). Сейчас ограничимся несколькими замечаниями, касающимися Суг X-3, т.е. наиболее известного источника обсуждаемого типа. Источник этот явно нестационарный, в силу чего сравнение наблюдений, проводившихся в разное время, весьма затруднительно или, лучше сказать, мало о чем говорит. В последние года два уровень гамма-излучения Суг X-3 при $E_\gamma > 10^{14} - 10^{15}$ эВ, по-видимому, был весьма низким. Это породило даже сомнения в том, наблюдалось ли вообще такое излучение от Суг X-3. Однако, по мнению раппортера (Р. Прозеро), сравнение различных измерений, производившихся в одно и то же время за ряд лет, позволяет считать излучение Суг X-3 при сверхвысоких энергиях вполне реальным (хотя, повторим это, происходящим не все время). То обстоятельство, что нужны дальнейшие наблюдения, в особенности на больших установках, не вызывает сомнений. При этом особенно важно выделение широких ливней (ШАЛ), создаваемых именно гамма-лучами. Сделать это пытаются, учитывая, что ШАЛ, генерируемые гамма-лучами, должны быть относительно бедны мюонами, а также отличаться от ШАЛ ядерного происхождения по некоторым своим параметрам. К сожалению, как раз в этих направлениях надежных данных еще не получено. Таким образом, если подходить к задаче очень строго, то существование гамма-излучения сверхвысоких энергий от Суг X-3, а возможно, и от других источников еще не доказано. Очевидно, что без последующих наблюдений никаких далеко идущих утверждений сделать нельзя. Если же говорить о впечатлениях и мнениях, то я разделяю мнение о том, что спорадическое гамма-излучение некоторых двойных источников в области сверхвысоких энергий ($E_\gamma > 10^{14} - 10^{15}$ эВ) имеет место.

Продолжающееся обсуждение данных COS-B делает весьма вероятным существование пусть и небольшого, но заметного градиента концентрации космических лучей в Галактике. Во всяком случае, утверждения о явном отсутствии градиента и даже о метагалактическом происхождении космических лучей на конференции не повторялись. Только новые наблюдения могут привести к надежному измерению градиента и, вообще, распределения и спектра космических лучей (в основном протонов) в Галактике.

Новые наблюдения (Е. А. Богомолов и др., доклад ОГ 6. 1—1) и расчеты (В. Вебер, доклад ОГ 6. 1—5) делают проблему антипротонов менее острой —

они свидетельствуют о том, что в области энергий $E_p^- > 1$ ГэВ количество антипротонов, возможно, не является аномально большим (т. е. может оказаться согласующимся с ожидаемым при прохождении космическими лучами межзвездного газа с толщей $x \approx 5-7$ г см⁻²). Аномально большой поток антипротонов в области энергий $E_p^- \sim 0,1 - 0,3$ ГэВ (речь идет, конечно, о кинетической энергии) был сообщен лишь в одной работе (Buffington A. et al.//Astrophys. J. 1981. V. 248. P. 1179) и не может считаться установленным до независимой проверки (подобные измерения, насколько известно, в настоящее время как раз проводятся в США).

На конференции были сообщены первые результаты обработки данных, полученных с помощью установки «Egg», летавшей в течение 191 часа на «Шаттле» («Spacelab-2») в 1985 г. (см. текст моего доклада и доклады OG 4. 1-5, OG 9. 2-1). Характерно, что даже самая совершенная современная установка позволила получить, да и то предварительные, сведения о спектре при энергии, достигающей 10⁶ ГэВ/нуклон, только через два года после полета. Уже отсюда ясно, сколь сложны соответствующие наблюдения и трудоемка их обработка. Для получения спектров ядер вплоть до энергий порядка 10⁴ — 10⁵ ГэВ/нуклон нужны еще большие установки весом в десятки тонн. Это — дело будущего (вряд ли такие результаты будут получены раньше, чем лет через десять).

В отношении элементного и изотопного состава космических лучей при меньших энергиях (скажем, при $E \lesssim 10$ ГэВ/нуклон), а также спектра позитронов на конференции был сообщен и обсуждался ряд результатов. Однако в моем докладе этот важный круг вопросов был лишь затронут, а чего-либо драматически нового на конференции сообщено не было. Поэтому здесь нецелесообразно касаться как проблемы состава и спектра космических лучей, так и ряда других, отраженных в трудах конференции (они, кстати сказать, у нас достаточно доступны, поскольку конференция происходила в СССР, а все ее многочисленные участники получили полный комплект трудов).

Таким образом, ограничусь в заключение лишь замечанием, что участие в конференции не дало мне оснований изменить что-либо существенное в тексте помещенного выше доклада. В пределах ограниченных целей, которые преследовал этот доклад (и, разумеется, моих возможностей), он отражает современное состояние астрофизики космических лучей (помимо вопросов, связанных с солнечными космическими лучами и процессами в гелиосфере).

Физический институт им. П. Н. Лебедева
АН СССР

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ *)

1. Early History of Cosmic Ray Studies/Eds Y. Sekido, H. Elliot.— Dordrecht, Holland: D. Reidel, 1985. См. также: Xu Q., Brown L. M.//Am J. Phys. 1987. V. 55. P. 23.
2. Hillas A. M. Cosmic Rays.— Oxford: Pergamon Press, 1972.
3. Дорман И. В. Космические лучи.— М.: Наука, 1981.
4. Ginzburg V. L., Surovatskii S. I. Origin of Cosmic Rays.— Oxford: Pergamon Press, 1964.
5. Астрофизика космических лучей/Под ред. В. Л. Гинзбурга.— М.: Наука, 1984.
6. International Cosmic Ray Conferences 15—20. Conferences papers: 15th—Plovdiv, Bulgaria, 1977; 16th—Kyoto, Japan, 1979; 17th—Paris, 1981; 18th—Bangalore, India, 1983; 19th—La Jolla, USA, 1985; 20th—Moscow, 1987.
7. Simpson J. A.//Ann. Rev. Nucl. and Part. Sci. 1983. V. 33. P. 323.
8. Lund N.//Cosmic Radiation in Contemporary Astrophysics/Ed. M.M. Shapiro.— Dordrecht, Holland: D. Reidel, 1986. —P. 1.

*) Цитируемая литература не только не претендует на полноту (это очевидно), но, более того, приведена лишь для ориентировки (кроме того, указаны источники, из которых автор заимствовал некоторые рисунки).

9. Kroeger R.//Astrophys. J. 1987. V. 303. P. 816.
- Weber W. R., Golden R. L., Mewaldt R. A.//Ibidem. V. 312. P. 178.
10. Silberberg R., Tsao C. H., Letaw J. R.//⁸.— P. 113.

11. Müller D.//Astrophys. J. 1987. V. 312. P. 183.
12. Astromagnetism: Interim Report of the Astromagnetic Definition Team.— 1986.
13. Fichtel C. E., Linsley J.//Astrophys. J. 1186. V. 300. P. 474.
14. Hillas A. M.//Ann. Rev. Astron. and Astrophys. 1984. V. 22. P. 425.
15. Origin of Cosmic Rays: IAU Symposium No. 94/Eds G. Setti., G. Spada, A. W. Wolfendale.— Dordrecht, Holland: D. Reidel, 1981.
16. Гинзбург В. Л. Теоретическая физика и астрофизика.— М., Наука, 1987; также:
17. Ginzburg V. L. Theoretical Physics and Astrophysics.— Oxford: Pergamon Press, 1979; Fortschr. Phys. 1954. Bd 1. S. 659; Progress in Elementary Particle and Cosmic Ray Physics.— Amsterdam: Elsevier, 1958.— V. 4. P. 339.
18. Гинзбург В. Л.//УФН. 1978. Т. 124. С. 307 (Sov. Phys.— Uspekhi. 1978. V. 21. P. 155); ⁶.—ICRC-15.—1977.
19. Sofue Y., Fujimoto M., Wielebinski R.//Ann. Rev. Astron. and Astrophys. 1986. V. 24. P. 459.
20. Ginzburg V. L.//Nature. Phys. Sci. 1972. V. 239. P. 8.
- Ginzburg V. L., Ptuskin V. S.//Astrophys. and Astron. 1984. V. 5. P. 99.

21. Dodds D., Strong A. W., Wolfendale A. W.//Mon. Not. RAS. 1975. V. 171. P. 569.
22. Березинский В. С., Гинзбург В. Л., Прилуцкий О. Ф.//Письма Астрон. ж. 1984. Т. 10. С. 98 (Sov. Astron. Lett. 1984. V. 10. P. 38); ⁶.—ICRC-19.—1985. — V. 1. P. 305.
23. Von Ballmoos P., Diehl R., Schönfelder V.//Astrophys. J. 1987. V. 312. P. 134.
24. Mayer-Hasselwander H. A., Bennet K., Bingami G. F. et al.//Astron. and Astrophys. 1982. V. 105. P. 164.
25. Bloemen H.//Astrophys. J. Lett. 1987. V. 317. P. L15.
- Strong A. W. et al.//⁶.—ICRC-20.—1987. Paper OG2.2-6.
- Mayer C. J. et al.//Astron. and Astrophys. 1986. V. 180. P. 73.
26. Владимирский Б. М., Гальпер А. М., Лучков Б. И., Степанян А. А.//УФН. 1985. Т. 145. С. 255.
- Watson A. A.//⁶.—ICRC-19.—1985. —V. 9. P. 111.
27. Bloemen J. B. G. et al.//Astron. and Astrophys. 1984. V. 135. P. 12.
28. Ginzburg V. L.//Cosmic Pathways/Ed. R. Cowsik.— New Delhi: Tata; McGraw-Hill, 1986. —P. 141.
29. Bhat C. L. et al.//J. Phys. Ser. G. 1986. V. 12. P. 1067, 1087.
30. Ginzburg V. L., Ptuskin V. S.//Rev. Mod. Phys. 1976. V. 48. P. 161, 675; Astrophys. and Space Phys. Rev. (So. v. Sci. Rev. Sec. E), Amsterdam: OPA. 1985. V. 4. P. 161.

31. Colgate S. A., Johnson M. H.//Phys. Rev. Lett. 1960. V. 5. P. 235.
- Colgate S. A., Shite R. H.//Astrophys. J. 1966. V. 143. P. 626.
32. Топтыгин И. Н. Космические лучи в межпланетных магнитных полях.— М., Наука, 1983.
- Drury L.//Rep. Prog. Phys. 1983. V. 46. P. 973.
33. Axford W. I.//⁶.—ICRC-15.—1977.—P. 339.
34. Fermi E.//Phys. Rev. 1949. V. 75. P. 1169; Astrophys. J. 1954. V. 119. P. 1.
35. Cowsik R.//Astrophys. J. 1980. V. 241. P. 1195.
- Giler M. et al.; Cowsik R.; Ptuskin V. S.//⁶.—ICRC-19.—1985.—Rapporter paper; см. ⁴.
36. Ginzburg V. L., Ptuskin V. S.//⁶.—ICRC-17.—1981.—V. 2. P. 336; см. также: ⁵.— Гл. 8.
37. Крымский Г. Ф.//ДАН СССР. 1977. Т. 234. С. 1306.
- Axford W. T. et al. Ссылка в ⁶.—ICRC-15.—1977.—V.11. P.132.
- Bell A. R.//Mon. Not. RAS. 1978. V.182. P. 147, 443.
- Blanford R. D., Ostriker J. R.//Astrophys. J. Lett. 1978. V. 221. P. L29.
38. Osborne J. L., Ptuskin V. S.//⁶.—ICRC-20.—1987.—Paper OG8.2-8.
- Wandel A. et al.//Astrophys. J. 1987. V. 316. P. 676.
39. Baade W., Zwicku F.//Nat. Acad. Sci. USA 1934. V. 20. P. 259; Phys. Rev. 1934. V. 46. P. 76.
40. Woosley S. E., Pinto P. A., Ensmann L. Supernova 1987a: Six Weeks Later: Preprint;//Astrophys. J. (in press).

41. Berezhinsky V. S., Ginzburg V. L.//Nature. 1987. V. 329. P. 807; Письма Астрон. ж. 1987. Т. 13. С. 931.
42. Mewald R. A.//Proc. of the 13th Texas Symposium on Relativistic Astrophysics.— 1986 (in press).
43. Ptuskin V. S.//⁶—ICRC-19.—1985.—V. 9. P. 215.
44. Христиансен Г. Б.//УФН. 1987. Т. 152. С. 341.
45. Dogiel V. A., Fradkin M. I. et al.//⁶— ICRC-20.—1987.—OC2. 9-32.
46. Dogiel V. A., Uryson A. V.//Astron. and Astrophys. (in press);⁶—ICRC-20.— 1987.—OG2.2-9.
Догель В. А.//Изв вузов. Сер. «Радиофизика». 1987. Т. 30. С. 187.
47. Berezhinsky V. S., Ginzburg V. L.//Mon. Not. RAS. 1981. V. 194. P. 3.