

Член-корреспондент АН СССР В. Л. ГИНЗБУРГ

О ПРОИСХОЖДЕНИИ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

В последние годы особенно часто обсуждается теория межзвездного происхождения космических лучей, предложенная Ферми ⁽¹⁾. Согласно ⁽¹⁾, показатель степени в спектре космических лучей равен

$$\gamma = 1 + \frac{1}{\alpha T}, \quad (1)$$

где T — время жизни космических частиц в Галактике и α — коэффициент в уравнении, определяющем ускорение частиц:

$$\frac{dE}{dt} = \alpha E \approx \frac{u^2}{c^2 \tau} E = \frac{u^2 v}{c^2 l} E. \quad (2)$$

Здесь u — скорость движения намагниченных областей межзвездного газа; τ — среднее время между «соударениями» частицы с этими областями; v — скорость поступательного движения частицы и l — соответствующая длина свободного пробега*.

На опыте $\gamma \approx 2 \div 3$ (в зависимости от области энергии), и полагая, например, $\gamma = 2,5$, получаем

$$\alpha T \approx 0,7. \quad (3)$$

Если время жизни частиц определяется ядерными потерями, то для протонов, согласно ⁽²⁾, $T \approx 4 \cdot 10^8$ лет $\approx 1,25 \cdot 10^{16}$ сек., а для ядер Fe $T_{\text{Fe}} \approx 2 \cdot 10^7$ лет; при этом, разумеется, приведенные значения могут претендовать лишь на точность не большую 100%. Используя (3) и значение $T = 4 \cdot 10^8$ лет, получаем

$$\alpha \approx 5 \cdot 10^{-17} \text{ сек}^{-1}, \quad (4)$$

но для ядер Fe то же α вместо показателя $\gamma = 2,5$ приводит к значению $\gamma \approx 40$. И вообще, если время T определяется ядерными соударениями, то спектры протонов и ядер должны быть совершенно различны. Между тем, из опыта следует, что, по крайней мере для энергий $\leq 10^{11}$ эв, спектры протонов и ядер одинаковы (они, по некоторым данным, одинаковы и для энергий $\leq 10^{13}$ эв). Помимо этого очень серьезного затруднения, теория межзвездного ускорения сталкивается со вторым затруднением: при $\alpha \approx 5 \cdot 10^{-17}$ (см. (4)) кинетическая энергия инжекции $E_{\text{и}}$ весьма велика и составляет для протонов $\sim 10^8$ эв, а для ядер Fe достигает $\sim 10^{11}$ эв. В силу сказанного ясно, что межзвездное ускорение может иметь место лишь в области очень больших энергий ($E > 10^{11} \div 10^{13}$ эв/нуклон), т. е. несущественно для

* Подробнее вывод формул (1) и (2) приведен, помимо ⁽¹⁾, также в ⁽²⁾.

основной массы космических частиц; более того, по ряду соображений⁽²⁾ можно думать, что межзвездное ускорение не играет роли ни при каких энергиях. В пользу такого заключения говорит, в частности, тот факт, что для предположения о наличии межзвездного ускорения нет никакой необходимости, так как частицы, образующиеся при вспышках сверхновых звезд*, вполне могут получить энергию, достигающую самых больших значений, наблюдающихся в космических лучах^(2, 5).

Однако в появившихся в самое последнее время статьях^(6, 7) делается попытка сохранить теорию межзвездного ускорения путем ее модификации. Остановиться на этих попытках и является нашей целью.

Для того чтобы устранить трудность, связанную с разным значением времени жизни для протонов и ядер, в^(6, 7) предполагается, что время жизни частиц определяется не ядерными соударениями, а выходом из Галактики. В⁽⁶⁾ положено $T = 10^7$ лет и в⁽⁷⁾ $T = 10^6$ лет. Для определенности мы положим ниже $T = 4 \cdot 10^6$ лет (как указано выше, $T_{\text{Fe, ядерное}} \approx 2 \cdot 10^7$ лет, а время T должно быть существенно меньше $T_{\text{Fe, яд}}$). Такое время в 100 раз меньше используемого в⁽²⁾ (см. также выше) времени жизни протонов при учете только ядерных соударений. Отсюда следует, что для соблюдения равенства (3) ускорение также должно быть более эффективным, так что

$$\alpha \approx 5 \cdot 10^{-15} \text{ сек.}^{-1} \quad (5)$$

в⁽⁷⁾ α еще больше и равно $\approx 2 \cdot 10^{-14} \text{ сек.}^{-1}$.

Увеличение α приводит к существенному снижению энергии инжекции $E_{\text{и}}$, и таким образом и с этой точки зрения схема^(6, 7) более благоприятна, чем⁽¹⁾. Но, с другой стороны, новая схема также сталкивается с серьезными затруднениями.

Время выхода частиц из Галактики в результате диффузии

$$T \sim \frac{R^2}{6D} \sim \frac{R^2}{lv}, \quad (6)$$

где R — размер Галактики, а величины l и v естественно считать теми же, что и в (2). Согласно^(8, 11, 2), космические лучи, как и разреженный межзвездный газ, образуют квазисферическую систему с незначительной концентрацией к центру** и с размерами $R \gtrsim 3 \cdot 10^{22}$ см.

Поэтому из (2) при $T = 4 \cdot 10^6$ следует, что $l \sim \frac{R^2}{Tv} \gtrsim \frac{R^2}{Tc} \sim 3 \cdot 10^{20}$ см.

Но тогда, согласно (2), $\alpha \lesssim u^2 c / c^2 l \sim 10^{-31} u^2$, и для получения выражения (5) нужно, чтобы $u \gtrsim 2 \cdot 10^8 = 2 \cdot 10^3$ км/сек. Между тем, известная из наблюдательных данных скорость движения в межзвездной среде не превышает ~ 10 км/сек и, вероятно, не превышает 50 км/сек в самых разреженных галактических областях. Даже если, следуя⁽⁷⁾, положить $R \sim 10^{21}$, с чем никак нельзя согласиться^(8, 11, 2), получаем скорость $u \sim 2 \cdot 10^3$ км/сек, которая также слишком велика

* В⁽²⁾ и ниже мы, в соответствии с^(3, 4), считаем, что источниками космических лучей являются сверхновые и, возможно, новые звезды. Согласно⁽⁹⁾ мощный дискретный источник радиоизлучения в Кассиопее является не сверхновой 369^(3, 10), а туманностью особого типа. Предположение о том, что Кассиопея есть сверхновая 369 г., представляется более естественным и убедительным, но еще важнее для нас тот факт, что все выводы, сделанные в^(5, 2), совершенно не зависят от того, является ли турбулизованная оболочка остатком сверхновой или образовалась каким-либо другим путем (важно лишь наличие интенсивных внутренних движений в оболочке, что заведомо имеет место⁽⁹⁾).

** Это предположение получило недавно непосредственное экспериментальное подтверждение⁽¹²⁾ в результате изучения радионизотоп туманности М 31.

(на это указывают и сами авторы работы (7)). Вообще, как ясно из (2) и (6), значительное увеличение α и уменьшение T суть требования, исключаящие друг друга. Преодоление этой трудности в (6) достигается, по сути дела, лишь ценой отказа от предложенной ранее тем же автором (1) схемы статистического ускорения, сопровождающего диффузию в магнито-турбулентной среде. Именно, в (6) предполагается, что магнитное поле в Галактике квазиоднородно в пределах галактической спирали, образующей силовую трубку линий магнитного поля. И лишь весьма редко, по прохождении пути $l \sim 2 \cdot 10^{23}$ см (1) частица в результате своеобразных «соударений типа а» (1, 6) приобретает значительные порции энергии. При этом вопрос о вероятности «соударений типа а» в Галактике остается совершенно открытым, и никаких прямых наблюдательных указаний на то, что такой механизм достаточно эффективен, не существует. Кроме того, принятое в (6) распределение поля не обеспечивает изотропии космических лучей, а также встречает некоторые другие возражения.

Еще более важно то обстоятельство, что затруднения, связанные с вариантами (6, 7), отнюдь не ограничиваются указанным моментом. Дело в том, что как в (6), так и в (7) среднее значение $\alpha \sim 10^{-14}$ (см. (5)), что должно приводить (2, 11) к ускорению не только протонов и ядер, но и электронов с $E > 10^9$ эв. Между тем, на опыте заметного количества таких электронов нет и вообще спектры протонов и электронов не одинаковы. Преодолеть это затруднение в рамках схемы (6, 7) можно, повидимому, лишь путем пока еще необоснованного допущения о наличии каких-то причин, затрудняющих инжекцию электронов. Далее, увеличение α облегчает инжекцию частиц, но все же и в условиях (5) энергия инжекции $E_{\text{и}}$, например для ядер Fe, довольно значительна (в областях с плотностью межзвездного водорода $n \sim 1$ $E_{\text{и}} \sim 10^9 - 10^{10}$ эв). Поэтому наличие каких-то инжекторов все равно необходимо. Более того, уменьшение времени жизни космических частиц T примерно в 100 раз приводит к тому, что мощность инжекторов должна, как и в (1), быть очень большой. Согласно (2), при $T \sim 4 \cdot 10^8$ лет источники космических лучей в Галактике должны иметь мощность $Q = W/T \sim 10^{40}$ эрг/сек; при $T \sim 4 \cdot 10^6$ получаем $Q \sim 10^{42}$, в то время как Солнце испускает в среднем 10^{24} частиц/сек с энергией $E \sim 10^9$ эв, т. е. передает в космические лучи $\sim 10^{21}$ эрг/сек. Таким образом, даже 10^{11} звезд типа Солнца могут внести лишь энергию на 10 порядков (!) меньше необходимой. Правда, точность величины Q быть может не больше 2 порядков, и инжекторы, согласно (7), должны давать лишь 10^{-3} часть энергии космических лучей (это отвечает для протонов энергий $E_{\text{и}} \sim 10^6 \div 10^7$ эв). Однако и с учетом этих моментов 10^{11} звезд типа Солнца внесут энергии на 5 порядков меньше, чем нужно.

Другая трудность связана с тем, что основная энергия космических лучей в (6, 7) черпается из кинетической энергии турбулентного движения межзвездной среды. Но плотность кинетической энергии — порядка плотности магнитной энергии и такая же, как плотность энергии космических лучей. Это значит, что кинетическая энергия межзвездной среды также должна все время пополняться, причем время «полного положения» составляет $T \approx 4 \cdot 10^6$ лет. В то же время механизм столь энергичной турбулизации межзвездной среды остается совершенно неясным и сама такая возможность представляется мало вероятной. Время $T \approx 4 \cdot 10^6$ лет противоречит также времени $T \gtrsim 2 \cdot 10^7$ лет, получающемуся (см. (2), стр. 362) из требований, чтобы в первичном потоке присутствовали ядра Li, Be и B (такие ядра, повидимому, наблюдаются).

Мы видим, таким образом, что модифицированная теория межзвездного ускорения (6, 7) действительно сталкивается с очень серьезными

трудностями и, кроме того, связана с введением чисто гипотетических и весьма искусственных предположений. Отрицательное отношение к схеме (⁶, ⁷) еще более усиливается в связи с тем, что теория, связывающая возникновение космических лучей со вспышками сверхновых и аналогичных им звезд (²⁻⁵), опирается на радиоастрономические данные и лишена трудностей, возникающих при развитии гипотезы о межзвездном ускорении космических лучей. Поэтому мы считаем, что работы (⁶, ⁷) а также последний обзор (¹³) ничего по существу не изменили в той оценке состояния теории происхождения космических лучей, которая дана в (²). Это, конечно, не означает, что картина, нарисованная в (²), совершенно строго обоснована и не может претерпеть изменений под давлением новых экспериментальных данных. Но пока что вновь появляющиеся данные (¹²) только говорят в пользу этой картины и поэтому имеются все основания рассчитывать на то, что она отвечает действительности.

Физический институт им. П. Н. Лебедева
Академии наук СССР

Поступило
2 VII 1954

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ E. Fermi, Phys. Rev., 75, 1169 (1949). ² В. Л. Гинзбург, Усп. физ. наук, 51, 343 (1953). ³ И. С. Шкловский, ДАН, 91, 475 (1953). ⁴ В. Л. Гинзбург, ДАН, 92, 1133 (1953). ⁵ В. Л. Гинзбург, ДАН, 92, 727 (1953). ⁶ E. Fermi, Ap. J., 119, 1 (1954). ⁷ P. Morrison, S. Olbert, B. Rossi, Phys. Rev., 94, 440 (1954). ⁸ С. Б. Пикельнер, ДАН, 88, 229 (1953). ⁹ W. Baade, R. Minkowski, Ap. J., 119, 206 (1954). ¹⁰ И. С. Шкловский, ДАН, 94, 417 (1954). ¹¹ В. Л. Гинзбург, М. И. Фрадкин, ДАН, 92, 531 (1953). ¹² J. E. Baldwin, Nature, 174, 320 (1954). ¹³ E. Geller, Reports on Progress in Physics, 17, 154 (1954).