

И. С. ШКЛОВСКИЙ

О ПРОИСХОЖДЕНИИ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

(Представлено академиком Г. А. Шайном 26 V 1953)

Последние годы ознаменовались значительным прогрессом в изучении природы первичных космических лучей (п. к. л.). На этой основе появились новые интересные теоретические исследования о происхождении п. к. л. (см. обзор (1), а также (2, 3)). Было показано, что п. к. л. едва ли имеют «околосолнечное» или «метagalактическое» происхождение. С большой степенью вероятности можно утверждать, что п. к. л. локализованы в пределах нашей звездной системы.

Как выяснилось сравнительно недавно, радиоизлучение Галактики делится на две составляющие, имеющие существенно различную природу и пространственное распределение (4, 5). Первая составляющая концентрируется к галактической плоскости и является тепловым излучением облаков межзвездного ионизованного газа. Источники второй составляющей, согласно (4), образуют в пространстве сферическую систему, слабо концентрирующуюся к галактическому центру. Повидимому, механизмом излучения этой составляющей является тормозное излучение релятивистских электронов в межзвездных полях. Этот механизм был впервые предложен Альфвеном и Герлофсоном (6) и подробно анализировался В. Л. Гинзбургом (7). Последний показал, что для объяснения наблюдаемой интенсивности радиоизлучения Галактики при напряженности межзвездных магнитных полей $H \approx 10^{-6}$ гаусс следует принять концентрацию релятивистских электронов (с энергией порядка 10^9 эв) $N \approx 10^{-10}$ см⁻³. Весьма многообещающим является совпадение концентраций межзвездных релятивистских электронов и первичных космических частиц (преимущественно протонов). Г. Г. Гетманцев показал, что спектр радиоизлучения, возникающего при таком процессе, соответствует наблюдаемому (8). Особенность пространственного распространения источников излучения второй составляющей в (5) объясняется найденным С. Б. Ликельнером сферическим пространственным распределением весьма разреженной газовой среды, заключенной между облаками межзвездного газа и связанными с ней слабыми магнитными полями (9).

Таким образом, вторая составляющая радиоизлучения Галактики как с качественной, так и с количественной стороны вполне объясняется тормозным излучением релятивистских электронов в межзвездных магнитных полях. Это указывает на наличие глубокой связи между проблемой происхождения п. к. л. и радиоизлучением Галактики. Релятивистские межзвездные электроны (ответственные за большую часть радиоизлучения Галактики) и тяжелые частицы (п. к. л.) должны иметь общее происхождение. В принципе исследование радиоизлучения Галактики может и должно давать информацию о характере п. к. л. в отдаленных участках Галактики, между тем как существующие методы позволяют анализировать п. к. л. только в окрестностях солнечной системы. Следовательно, радиоастрономия сделала науку о природе и происхождении п. к. л. ветвью наблюдательной астрономии.

Недавно было установлено, что туманности — остатки вспышек Сверхновых звезд — являются мощными источниками радиоизлучения ⁽⁵⁾. В частности, самый мощный из дискретных источников радиоизлучения в Кассиопее был отождествлен нами (совместно с П. П. Паренаго) со Сверхновой 369 г. н. э. Согласно последним исследованиям, угловые размеры источников радиоизлучения — остатков Сверхновых — в Кассиопее и Тельце совпадают с угловыми размерами соответствующих туманностей. Это означает, что источники излучения локализованы в большом объеме, занимаемом расширяющейся туманностью (остатком Сверхновой) и не связаны со звездой — бывшей Сверхновой. В ⁽⁵⁾ обсуждался механизм радиоизлучения остатков Сверхновой и было показано, что, повидимому, он также сводится к тормозному излучению релятивистских электронов в протяженных магнитных полях.

В связи с этим возникает важный вопрос о порядке величины напряженности магнитных полей в расширяющейся туманности — остатке Сверхновой. В окружающем Сверхновую межзвездном пространстве до вспышки магнитное поле имело обычное значение $H_0 \approx 3 \cdot 10^{-6}$ гаусс. Изменится ли это поле из-за движения газовых масс с огромной скоростью в 1500 км/сек? Можно убедиться, что само по себе расширение газа с такой скоростью не изменит сколько-нибудь существенно H_0 , так как силовые линии H_0 (которое в окрестностях Сверхновой было почти однородным) из прямых деформируются приблизительно в полуокружности. При этом индуцированное магнитное поле будет примерно таким же, как и H_0 .

Однако наличие внутренних турбулентных движений в расширяющейся газовой оболочке приведет к значительному увеличению H , так как такие движения будут сильнее всего «запутывать» силовые линии. Пусть для самого большого масштаба турбулентности скорость будет V_T . Тогда, как известно, время удвоения поля $t \approx d/V_t$, где d — размеры больших вихрей, которые можно принять сравнимыми с R — внешним радиусом туманности, например $d \approx 0,1 R$. Для Крабовидной туманности V_t из спектра не определяется, так как внутренние движения маскируются общим расширением. Обычно V_t сравнимо со скоростью основного движения (в данном случае расширения), так что оно, повидимому, порядка сотен километров в секунду.

Если это так, то время удвоения поля в наибольших вихрях сравнимо со временем расширения туманности, так что поле такого масштаба сильно не увеличится. Однако удвоение поля в вихрях меньшего масштаба происходит быстрее, поэтому напряженность поля могла достигнуть равновесного значения, определяемого условием равенства плотности кинетической и магнитной энергий в этих вихрях. Кинетическая энергия вихрей среднего масштаба меньше, чем для наибольших вихрей (V_i^2 приблизительно пропорционально $r^{2/3}$), но она еще достаточно велика, так что магнитное поле в расширяющейся туманности должно быть значительно больше H_0 . Примем, что $H = 10^{-4}$ гаусс. Истинное значение H может отличаться от принятого в несколько раз в ту или другую сторону.

В ⁽⁵⁾ было обращено внимание на сравнительную краткость «радиоизлучающей фазы» у остатков Сверхновых, которая вряд ли превышает 3000 лет. В противном случае, учитывая частоту вспышек Сверхновых в нашей Галактике (приблизительно раз в 300 лет), мы наблюдали бы непомерно большое число мощных дискретных источников радиоизлучения — остатков Сверхновых. В чем причина краткости радиоизлучающей фазы? Может быть релятивистские электроны за 3000 лет затормозятся? Анализ показывает, что это не так. Вследствие ионизационных потерь релятивистский электрон в туманности с $\rho = 10^{-21}$ г/см³ затормозится только через 10^5 лет. Точно так же, как можно показать, для электронов с энер-

гией $E < 10^{10}$ эв несущественны потери на тормозное излучение в магнитных полях при всех приемлемых значениях H . Несущественен также обратный эффект Комптона.

Причиной кратковременности радиоизлучающей фазы у остатков Сверхновой может быть торможение оболочки межзвездной средой. Последний эффект рассматривался Оортом (¹⁰), согласно вычислениям которого за 4800 лет из-за торможения скорость расширения уменьшится вдвое, если масса туманности $M = 10 M_{\odot}$ *. Плотность туманности будет быстро падать и, следовательно, она будет рассеиваться в межзвездной среде. В результате торможения и рассеяния остатков Сверхновой, магнитное поле H уменьшится и приблизится опять к H_0 . При этом излучательная способность каждого электрона значительно упадет, а излучение переместится в сторону более низких частот.

Таким образом, факты указывают на появление значительного числа релятивистских электронов в процессе вспышки Сверхновых. Совершенно естественно считать, что одновременно с релятивистскими электронами появляются и релятивистские тяжелые частицы. Например, если причиной появления частиц с релятивистскими энергиями являются электромагнитные поля, заряды обоих знаков должны ускоряться одинаково. Можно показать, что эти частицы не могут быть «непосредственными» продуктами взрыва Сверхновой. В этом случае из-за обратного комптон-эффекта в поле излучения Сверхновой во время максимума ее блеска, электроны очень быстро затормозились бы. Значит, ускорение происходит после максимума. Возможно, что ускоряются ионизованные межзвездные атомы в движущихся магнитных полях, связанных с расширяющейся туманностью. После окончания радиоизлучающей фазы эти ускоренные частицы (которые в туманности почти не потеряли своей энергии) попадают в межзвездную среду, сравнительно медленно «диффундируя» через межзвездные магнитные поля.

Таким образом, открывается возможность качественно объяснить происхождение релятивистских частиц в межзвездной среде (электронов и тяжелых частиц) явлением вспышки Сверхновых. Ниже мы приведем количественные расчеты, полностью подтверждающие это предположение.

Оценим число релятивистских электронов, имеющих в туманности — остатке Сверхновой. Пусть F_{ν} — наблюдаемый поток излучения в единичном интервале частот. Тогда абсолютная светимость туманности будет равна $L_{\nu} = 4\pi R^2 F_{\nu}$, где R — расстояние до туманности. С другой стороны, в предположении, что механизмом радиоизлучения является тормозное излучение релятивистских электронов в магнитных полях, $L_{\nu} = P_{\nu} N_1$, где $P_{\nu} = \frac{16e^3 H}{mc^2} p(\nu/\nu_1)$ — излучательная способность одного электрона ($p(\nu/\nu_1)$ затабулировано в (¹¹)); N_1 — число релятивистских электронов в туманности. Для Крабовидной туманности $R = 1400$ пс, для Кассиопеи — $A 3100$ пс (⁵). Полагая, что $P(\nu/\nu_1) = 0,1$ (что справедливо для $\nu = \frac{1}{2} \nu_1 = \frac{eH}{4\pi} \left(\frac{E}{mc^2}\right)^2$), $F_{\nu} = 1,8 \cdot 10^{-20}$ и $2,1 \cdot 10^{-19}$ единиц С.Г.С., для Крабовидной туманности и Кассиопеи — A найдем, что $N_1 = 2 \cdot 10^{50}$ и 10^{52} , соответственно. H принято равным 10^{-4} гаусс.

Если вспышки Сверхновых звезд «поставляют» первичные космические частицы в нашу Галактику, то усредненное по времени число релятивистских частиц, возникающих при этом, должно равняться числу релятивистских частиц, «погибающих» в нашей звездной системе. Известно, что релятивистские протоны при столкновениях с ядрами атомов межзвездного водорода, сопровождающихся образо-

* Согласно (¹³), масса Крабовидной туманности не превышает $10^{-1} - 10^{-2} M_{\odot}$. Поэтому время торможения межзвездной средой туманностей — остатков Сверхновых будет значительно меньше.

ванием мезонов, теряют значительную часть своей энергии. Эффективное сечение такого столкновения σ , согласно ⁽²⁾, равно $2,5 \cdot 10^{-26}$ см². Следовательно, число релятивистских протонов, «гибнущих» за 1 сек. в нашей Галактике при таких столкновениях, будет порядка $Z_1 = VnNC\sigma$, где V — эффективный объем Галактики; $n = 0,1$ см⁻³ — средняя концентрация межзвездных атомов; $N = 5 \cdot 10^{11}$ см⁻³ — концентрация релятивистских протонов. Учитывая, что, согласно ⁽⁹⁾, межзвездный газ образует сферическую систему, можно принять $V \approx 10^{68}$ см³. Тогда $Z_1 = 3,7 \cdot 10^{41}$ сек⁻¹. Принимая во внимание, что в Галактике Сверхновые вспыхивают один раз в 300 лет, считая, что в среднем в процессе вспышки образуется 10^{51} релятивистских частиц, найдем, что в среднем за 1 сек. в Галактике возникает $Z_2 = 10^{41}$ релятивистских частиц.

Таким образом, действительно, вспышки Сверхновых могут поддерживать концентрацию релятивистских частиц в нашей Галактике на наблюдаемом уровне. Само по себе совпадение порядков величин Z_1 и Z_2 , определяющихся, казалось бы, совершенно независимыми процессами, поразительно. Представляется поэтому достаточно обоснованным считать вспышки Сверхновых звезд первопричиной как значительной части радиоизлучения Галактики, так и космических лучей.

В ⁽¹³⁾ было показано, что между вспышками Сверхновых и Новых нет качественного различия. Поэтому не исключено, что вспышки обычных Новых также приводят к образованию релятивистских частиц. Механизм ускорения должен быть таким же, как и в оболочках Сверхновых. Можно ожидать пропорциональности между количеством освободившейся при вспышке энергии и количеством образовавшихся релятивистских частиц. Учитывая, что в нашей Галактике обычные Новые вспыхивают примерно в 10^4 раз чаще чем Сверхновые, и что при их вспышках освобождается энергии в несколько тысяч раз меньше, чем при вспышках Сверхновых, можно ожидать, что суммарный эффект от Новых будет в несколько раз больше, чем от Сверхновых. Ожидаемое число релятивистских электронов в оболочках Новых слишком незначительно, чтобы дать измеримый поток радиоизлучения. Исключение составляет только известная Новая Орла 1918 г., где, по нашей оценке, поток радиоизлучения может быть порядка $2 \cdot 10^{-25}$ вт/м² гц, что находится на пределе чувствительности современной радиоастрономии. Представляет исключительный интерес обнаружение радиоизлучения от этого объекта.

В заключение обратим внимание на следующее обстоятельство, имеющее фундаментальное значение для всей проблемы. Представляется поразительным, почему Магеллановы облака не дают измеримого количества радиоизлучения ⁽⁵⁾. С другой стороны, в этих ближайших к нам неправильных галактиках частота вспышек Новых по крайней мере в несколько тысяч раз меньше, чем в нашей Галактике ⁽¹²⁾. Это обстоятельство как раз и объясняет отсутствие измеримого количества радиоизлучения от Магеллановых облаков. Таким образом, развитые представления о наличии глубокой связи между радиоизлучением Галактики, происхождением п. к. л. и вспышками Сверхновых и Новых звезд находят еще одно независимое подтверждение.

Государственный астрономический институт
им. П. К. Штернберга

Поступило
27 III 1953

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Я. П. Терлецкий, УФН, 41, 47 (1951). ² E. Fermi, Phys. Rev., 75, 1169 (1949). ³ A. Unsöld, *ibid.*, 82, 857 (1951). ⁴ И. С. Шкловский, Астр. журн., 29, 418 (1952). ⁵ И. С. Шкловский, там же, 30, № 1 (1953). ⁶ H. Alfvén, N. Herlofson, Phys. Rev., 79, 738 (1950). ⁷ В. Л. Гинзбург, ДАН, 76, 377 (1951). ⁸ Г. Г. Гетманцев, ДАН, 83, 557 (1952). ⁹ С. Б. Пикельнер, ДАН, 88, 229 (1953). ¹⁰ J. Oort, M. N., 106, 159 (1946). ¹¹ В. В. Владимирский, ЖЭТФ, 18, 392 (1948). ¹² Б. А. Воронцов-Вельяминов, Новые звезды и газовые туманности, 1947. ¹³ И. С. Шкловский, ДАН, 90, № 6 (1953).