

В. Л. ГИНЗБУРГ

КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ КАК ИСТОЧНИК ГАЛАКТИЧЕСКОГО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ

(Представлено академиком М. А. Леонтьевичем 24 XI 1950)

В последнее время выяснилось, что радиоизлучение Галактики не может объясняться в основном тепловым излучением межзвездных электронов, как это предполагалось ранее (см., например, обзор ⁽¹⁾). В этой связи особого внимания заслуживает предположение о том, что галактическое радиоизлучение есть тормозное излучение релятивистских электронов (т. е. электронной компоненты космических лучей) в межзвездных и околозвездных магнитных полях ^{(2), (3)}.

Предполагая, что наблюдаемое общее радиоизлучение Галактики или излучение отдельных дискретных источников обусловлено указанным механизмом и зная напряженность магнитного поля, можно указать, какой должна быть интенсивность соответствующих космических частиц. Вопрос о приемлемости или неприемлемости получаемых на этом пути данных о космических электронах составляет уже проблему теории происхождения космических лучей. Поскольку сформулированная задача, представляющаяся нам основной, в ⁽²⁾ не рассматривалась, а в ⁽³⁾ решена недостаточно корректно, нам казалось уместным привести здесь результаты подобного анализа.

§ 1. Спектр излучения частиц с энергией $E \gg mc^2$, движущихся в однородном магнитном поле, наиболее детально рассмотрен в ⁽⁴⁾. Энергия, излучаемая в 1 сек. в единице спектрального интервала, равна

$$P(v) = 2\pi P(\omega) = 16 \frac{e^3 H}{mc^2} p\left(\frac{\omega}{\omega_1}\right);$$

при $\frac{\omega}{\omega_1} \ll 1$: $p\left(\frac{\omega}{\omega_1}\right) = 0,256 \left(\frac{\omega}{2\omega_1}\right)^{1/2}$; (1)

при $\frac{\omega}{\omega_1} \gg 1$: $p\left(\frac{\omega}{\omega_1}\right) = \frac{1}{16} \left(\pi \frac{\omega}{\omega_1}\right)^{1/2} e^{-2\omega/3\omega_1}$,

где $\omega_1 = \frac{eH}{mc} \left(\frac{E}{mc^2}\right)^2$, $\frac{\omega}{2\pi} = v$ — частота излучения и H — перпендикулярная скорости частицы проекция магнитного поля.

В интервале $0,18 < \omega/\omega_1 < 16$ функция p протабулирована в ⁽⁴⁾, причем она максимальна при $\omega/\omega_1 = 0,5$ и $p(0,5) = 0,10$, $p(0,18) = 0,09$, $p(2) = 0,055$, $p(4,05) = 0,018$, $p(6,5) = 0,004$, $p(10,4) = 4 \cdot 10^{-4}$, $p(16) = 10^{-5}$, где все цифры округлены, так как точность, большая нескольких процентов, нам не нужна. Вне указанного интервала с такой же точностью можно использовать указанные в ⁽¹⁾ предельные формулы*.

* Некорректность расчета, проведенного в ⁽³⁾, в первую очередь связана с неточным вычислением $P(v)$ (при $\omega > \omega_1$ используется формула, пригодная лишь при $\omega \ll \omega_1$).

В максимуме

$$P(\nu_{\max}) = 1,6 \frac{e^3 H}{mc^2} = 2,15 \cdot 10^{-22} H \frac{\text{эрг}}{\text{сек.герц}},$$

$$\nu_{\max} = 0,5 \frac{\omega_1}{2\pi} = 1,4 \cdot 10^6 H \left(\frac{E}{mc^2} \right)^2 \text{герц},$$
(2)

где при переходе к числам принято, что излучающая частица есть электрон. Как видно из дальнейшего, допущение о том, что излучают протоны, представляется нереальным и даже не будет обсуждаться подробнее.

Удельная интенсивность радиоизлучения в данном направлении равна $I_\nu = \frac{1}{4\pi} \int P(\nu) N e^{-\kappa_\nu x} dx$, где x — расстояния от точки наблюдения (т. е. от Земли), κ — коэффициент поглощения в межзвездном газе и N — концентрация излучающих частиц (точнее, $P(\nu) N = \int P(\nu, E) N_1(E) dE$, где $N_1 dE$ — концентрация частиц в интервале энергий dE). Кроме того, принимается, что радиоизлучение элемента объема в среднем изотропно в силу изотропности космического излучения и хаотичности в направлении поля H вдоль луча зрения (при этих предположениях в I_ν , вообще говоря, вносится ошибка, характеризуемая лишь множителем порядка единицы). Для волн с длиной волны $\lambda \leq 15$ м Галактика является еще оптически тонкой, т. е. $\int \kappa_\nu dx \ll 1$ ⁽¹⁾. Поэтому

$$I_\nu = \frac{P(\nu)}{4\pi} NR,$$
(3)

где $P(\nu)$ и N усреднены по пути и по энергиям космических частиц и R — размеры системы в данном направлении. Значение I_ν будет, очевидно, максимально, если данная частота ν есть частота ν_{\max} в (2).

Таким образом,

$$I_{\nu, \max} = 1,7 \cdot 10^{-23} HNR \frac{\text{эрг}}{\text{сек.см}^2 \cdot \text{герц.стериан}},$$

$$\nu = 1,4 \cdot 10^6 H \left(\frac{E}{mc^2} \right)^2 \text{герц}.$$
(4)

На опыте установлено, что при $\lambda = c / \nu \leq 15$ м I_ν падает с увеличением частоты. Принимая, для примера, что излучение максимально на волне 20 м, из (4) находим, что $H(E/mc^2)^2 \approx 10$, т. е. при $H \sim 10^{-6}$ $E \sim 10^9$ эв. Интенсивность радиоизлучения при $\lambda \sim 10 \div 15$ м, как следует из опыта, соответствует излучению черного тела с температурой $T_{\text{эфф}} \approx 1 \div 2 \cdot 10^5$ °. Для черного тела

$$I_\nu = \frac{2kT_{\text{эфф}}}{\lambda^2} = \frac{2,76 \cdot 10^{-16} T_{\text{эфф}}}{\lambda^2 (\text{в см})} \frac{\text{эрг}}{\text{сек.см}^2 \cdot \text{герц.стериан}}.$$
(5)

Сравнивая (4) и (5), мы видим, что при $T_{\text{эфф}} = 10^5$, $\lambda = 10^3$ и $R = 10^{22}$ ($1/10$ диаметра Галактики)

$$HN \approx 10^{-16}.$$
(6)

Отсюда при $H \sim 10^{-6}$ $N \sim 10^{-10}$ см⁻³. Как ясно из характера проведенной оценки, она дает максимальное допустимое значение HN . На границе земной атмосферы в вертикальном направлении интенсивность космических лучей (в основном протонов) $I_k \approx 0,12 \frac{\text{частиц}}{\text{см}^2 \cdot \text{сек.стериан}}$, откуда при изотропии $N \approx \frac{4\pi}{c} I_k \approx 5 \cdot 10^{-11}$ см⁻³. Число электронов, падающих на Землю, по крайней мере в 100 раз меньше ⁽⁵⁾, но в межзвезд-

ном пространстве значение $N \sim 10^{-10}$ для электронов с $E \sim 10^9$ не представляется недопустимым. Таким образом, наблюдаемая интенсивность общего галактического излучения может быть объяснена излучением космических электронов, если только какие-либо независимые соображения не заставят усомниться в значениях $H \sim 10^{-6}$ на пути $R \sim 10^{22}$ при $N \sim 10^{-10}$.

Как показывает рассмотрение ряда других возможных источников радиоизлучения (тормозного излучения и излучения радиоволны, связанного с рассеянием света на электронах), объяснить наблюдаемую картину они не могут. Поэтому в настоящее время, помимо обсуждаемого механизма общего галактического радиоизлучения, не видно никаких других его источников. Другая возможность сводится по сути дела к отрицанию самого существования источников излучения в межзвездном пространстве и к сведению общего галактического радиоизлучения к радиоизлучению дискретных источников, связанных со звездами.

Происхождение радиоизлучения дискретных источников также еще неясно и в (2) связывается с рассмотренным механизмом излучения релятивистских электронов в магнитном поле, окружающем звезду.

§ 2. Переходя к вопросу о дискретных источниках, напомним, что соответствующая дискретным источникам полная интенсивность при $\lambda \approx 3 \div 5$ м достигает значения (1)

$$J_v = I_v \Delta\Omega \sim 10^{-19} \frac{\text{эрг}}{\text{см}^2 \text{сек} \cdot \text{герц}}, \quad (7)$$

где $\Delta\Omega$ — телесный угол, под которым виден источник. Из опыта известно лишь, что угловой размер источников меньше $6' \div 8'$. В наиболее благоприятных условиях, т. е. используя (4), имеем:

$$J_v \approx \frac{P(v)}{4\pi} N \Delta\Omega D = 1,7 \cdot 10^{-23} H N \Delta\Omega D, \quad (8)$$

где D — диаметр источника.

Используя (7), полагая $\Delta\Omega = (6')^2 = 3 \cdot 10^{-6}$ стерадиана и расстояние до источника равным $R = 5 \cdot 10^{22}$ (откуда $D = R 6' \approx 10^{20}$), имеем:

$$(H N)_{\min} \sim 10^{-11}, \quad (9)$$

откуда даже при $H \sim 10^{-4}$ $N_{\min} \sim 10^{-7}$. Если же, как в (2), принять, что $D \sim 0,1$ св. года $\approx 10^{17}$, то при $H \sim 10^{-4}$ $N_{\min} \sim 10^{-4}$ см $^{-3}$, т. е. необходима концентрация электронов примерно в 10^8 раз большая, чем концентрация всех космических частиц вблизи Земли. Отсюда ясно, что рассматриваемые в (2) дискретные источники радиоизлучения никак не могут быть подобны нашей «солнечной космической системе» (с $D \sim 10^{17}$, $H \sim 10^{-5}$, $N_{\text{электронов}} < 5 \cdot 10^{-13}$, $N_{\text{протонов}} \sim 5 \cdot 10^{-11}$ (6)).

С точки зрения проверки правильности обсуждаемого механизма возникновения космических лучей особенно важно выяснение спектра общего галактического излучения в первую очередь при $\lambda > 10$ м, а также спектра радиоизлучения и размеров дискретных источников (определение размеров особенно трудно, но известные возможности в этом направлении имеются (7)).

§ 3. В связи с обсуждавшимся материалом естественно возникает также вопрос о радиоизлучении космических лучей в земном магнитном поле $H \sim 0,5$ эрст. Легко видеть, что излучение отдельной частицы в этом случае слишком слабо, чтобы его можно было бы наблюдать (полная излучаемая энергия по порядку величины не больше, чем $P(v_{\max}) \rho / c \sim 10^{-24}$ эрг / герц, где ρ — радиус Земли). Слишком слабо также радиоизлучение, возникающее при торможении и рождении космических частиц. В этом случае (см., например, (9)):

$$P(v) = \frac{2e^2\beta^2}{c} \left\{ \frac{\beta^2 + 1}{2\beta^3} \ln \frac{1+\beta}{1-\beta} - \frac{1}{\beta^2} \right\} \approx \frac{4e^2}{c} \left(\ln \frac{2E}{mc^2} - \frac{1}{2} \right), \quad (10)$$

где $\beta = v/c$ и переход ко второму выражению справедлив при $E \gg mc^2$. Поэтому даже большой ливень Оже, в котором образуется, скажем, 10^8 частиц, излучает энергию $\sim 10^{-20}$ эрг / герц, причем это излучение распределено на площади порядка площади ливня*.

Однако оба указанных эффекта могут быть существенны для объяснения «всплесков» радиоизлучения неба (10) и радиоизлучения, связанного с полярными сияниями (11). Так например, в силу (10) поток любых частиц с единичным зарядом и $\beta \sim 1$ (при одном резком изменении скорости на частицу потока) излучают на волне $\lambda = 10$ см энергию, отвечающую подъему температуры радиоизлучения неба на $\sim 30^\circ$ (см. формулу (5) и (10)), если на 1 см^2 поверхности атмосферы в 1 сек. падает 10^{13} частиц, что отвечает плотности тока в $\sim 10^{-6} \text{ а / см}^2$. В случае достаточно быстрых электронов, излучающих в земном магнитном поле, то же повышение эффективной температуры достигается, если поток частиц равен $\sim 10^8$ электронов / см^2 сек. Вопрос о возможности допустить такие потоки с точки зрения всех других геофизических данных требует специального анализа, который еще не произведен. Нужно также иметь в виду, что, кроме упомянутых, мыслимы и другие источники радиоизлучения неба и сияний. Задача усложняется также в силу крайней скучности соответствующих экспериментальных данных.

Поэтому мы ограничимся еще только одним замечанием.

В (11) указывается, что излучение во время сияний приходит в виде отдельных «толчков» длительностью в $\Delta t \sim 1 \div 5 \cdot 10^{-6}$ сек. и, повидимому, отстоящих друг от друга на расстоянии $T \sim 10^{-3}$ сек. Любопытно в этой связи отметить, что движущийся в магнитном поле электрон (или достаточно малое облако релятивистских электронов) излучает именно таким же образом. Действительно, электроны излучают только в направлении, составляющем угол $\theta_0 \sim mc^2/E$ с их мгновенной скоростью v . Поэтому неподвижный наблюдатель, расположенный в плоскости орбиты, «видит» отдельные вспышки с длительностью $\Delta t \sim \theta_0/\omega_0 = mc/eH$, повторяющиеся через время $T = 2\pi/\omega_0$, где $\omega_0 = eH/(mc^2/E)$ — частота обращения в магнитном поле. В магнитном поле $H \sim 0,1$ эрст. для излучения частоты $v_{\max} \sim 3 \cdot 10^9$ (см. (2); в (11) $\lambda = c/v = 10$ см) нужно, чтобы $E/mc^2 \sim 10^2$. В этом случае $\Delta t \sim 10^{-6}$ сек. и $T \sim 3 \cdot 10^{-4}$ сек. Разумеется, получение таким образом правильного порядка величины еще далеко не доказывает, что наблюданное радиоизлучение полярных сияний связано с излучением электронов в земном магнитном поле. Но, как нам кажется, предлагаемый механизм заслуживает обсуждения.

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

Поступило
31 X 1950

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ A. Unsöld, Zs. f. Astrophys., **26**, 176 (1949). ² H. Alfven and N. Herlofson, Phys. Rev., **78**, 616 (1950). ³ K. O. Kierpeneier, Phys. Rev., **79**, 738 (1950).
- ⁴ Б. В. Владимирский, ЖЭТФ, **18**, 392 (1948). ⁵ Б. Россия, Усп. физ. наук, **38**, 222 (1949). ⁶ H. Alfven, Phys. Rev., **77**, 375 (1950). ⁷ Г. Г. Гетманцев и В. Л. Гинзбург, ЖЭТФ, **20**, 347 (1950). ⁸ В. Л. Гинзбург и И. М. Франк, ЖЭТФ, **16**, 15 (1946). ⁹ P. M. S. Blackett and A. C. B. Lovell, Proc. Roy. Soc., **177**, 183 (1941). ¹⁰ A. E. Covington, Journ. Geophys. Res., **55**, 33 (1950).
- ¹¹ R. A. Forsyth, W. Petrie and B. W. Currie, Nature, **164**, 453 (1949).

* Заметим в этой связи, что указание на возможность наблюдения отражения радиосигналов от ливней Оже⁽⁸⁾ ошибочно (точнее, в ⁽⁹⁾ коэффициент отражения завышен в 10^5 раз).