

И. С. ШКЛОВСКИЙ

О ПРИРОДЕ ДИСКРЕТНЫХ ИСТОЧНИКОВ КОСМИЧЕСКОГО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ

(Представлено академиком Г. А. Шайном 12 V 1954)

В настоящее время, повидимому, можно считать установленным, что механизм радиоизлучения дискретных источников сводится к тормозному излучению релятивистских электронов в магнитных полях (¹⁻³). В. Л. Гинзбург применил предложенный впервые Ферми статистический механизм ускорения к ускорению заряженных частиц в расширяющихся оболочках Сверхновых и Новых звезд (^{4,5}). Однако вопрос о первоначальной стадии ускорения из нерелятивистской области пока остается открытым. Нам представляется, что благоприятные условия для такого ускорения реализуются за фронтом ударной волны, связанной с движущимися с огромными скоростями газами, где при скорости $V = 1,5 \cdot 10^8$ см/сек $T_{\text{кин}} \approx 10^8$ °. Средняя кинетическая энергия частиц будет около 11 000 эв, а 10^{-4} — 10^{-5} частиц будет обладать энергией большей, чем 100 000 эв. Скорость таких электронов v будет больше $1,6 \cdot 10^{10}$ см/сек. Согласно (⁵) энергия «инжекции» $E_{\text{и, кин}} = 4 \cdot 10^{-19} m Z^4 n^2 / M \alpha^2$ эв. Параметр Ферми $\alpha = u^2 v / c^2 l$. Полагая $l = \kappa \lambda$, где $\lambda = 1 / n \sigma$ — длина свободного пробега, найдем условие «инжекции»

$$E_{\text{и, кин}} = \frac{4 \cdot 10^{-19} c^4 \kappa^2}{u^4 v^2 \sigma^2} . \quad (1)$$

Подставляя $\kappa = 15$ $\sigma = 10^{-16}$ см², $u = 10^8$ см/сек, $v = 1,6 \cdot 10^{10}$ см/сек, найдем, что $E_{\text{и, кин}} \approx 10^5$ эв. Мы приходим, таким образом, к основному выводу, что за фронтом сильной ударной волны, распространяющейся в межзвездном газе, определенная доля заряженных частиц (порядка 10^{-4} — 10^{-5}) может перейти в космические лучи.

Как известно, на месте мощного источника Кассиопея А Бааде и Минковский обнаружили замечательную туманность, состоящую из отдельных «узлов». Спектры указывают на беспорядочную скорость движения материи в «узлах», доходящую до 3300 км/сек (⁶). В (⁷) эта туманность и связанный с нею мощный источник радиоизлучения были отождествлены с остатками вспышки Сверхновой 369 г. н. э. Однако Минковский, найдя из наблюдений, что скорость расширения туманности невелика (по сравнению с беспорядочными скоростями в «узлах»), делает вывод, что наблюдаемый объект не связан со вспышкой Сверхновой, так как оболочка не может быть заторможена (⁶). Такой вывод, как нам представляется, является ошибочным и основывается на сильно завышенной оценке массы оболочки Сверхновой 1054 г., сделанной в свое время Минковским (⁸) и недавно уточненной Минковским и Гринштейном (⁸). Мы недавно показали, что M — массы оболочек Сверхновых несравненно меньше (⁹). Примем, что $M = 3 \cdot 10^{-2} M_{\odot}$. Приводим основные формулы, описы-

вающие торможение оболочки Новой и Сверхновой межзвездной средой ⁽¹⁰⁾:

$$\frac{V}{V_0} = \frac{M}{\frac{4}{3}\pi r^3 \rho + M}; \quad \frac{1}{3} \pi r^4 \rho + Mr = MV_0 t, \quad (2)$$

где V_0 — начальная скорость оболочки, V — скорость спустя время t после вспышки, r — радиус оболочки, ρ — плотность межзвездной среды.

Первоначальная скорость V_0 должна быть около 5000 км/сек, так как она не может быть меньше турбулентных скоростей в «узлах». Скорости порядка $5 \cdot 10^8$ см/сек обычны для Сверхновых звезд ⁽¹¹⁾. Коль скоро оболочка Сверхновой 369 г. уже сильно затормозилась, $\frac{4}{3} \pi r^3 \rho > M$. Тогда

$$\frac{V}{V_0} = \frac{M}{\frac{4}{3}\pi r^3 \rho + M} \approx \frac{M}{\frac{4MV_0 t}{r} + M} \approx \frac{rM}{4MV_0 t}; \quad r = 4Vt. \quad (3)$$

Эта формула позволяет определить радиус расширяющейся сильно заторможенной оболочки, если только известны «мгновенная» скорость расширения и время, прошедшее после вспышки. Далее, имеем

$$r = \left(\frac{3(k-1)}{4\pi} \frac{M}{\rho} \right)^{1/3}, \quad \frac{V_0}{V} \equiv k = \frac{\frac{4}{3}\pi r^3 \rho + M}{M}. \quad (4)$$

Формула (3) дает возможность определить расстояние до расширяющейся туманности. Полагая $V_0 = 5 \cdot 10^8$ см/сек и зная таким образом k , из (4) можно определить M/ρ . Если, например, $V = 100$ км/сек, $k = 50$, $r = 2 \cdot 10^{18}$ см, $M/\rho = 0,65 \cdot 10^{54}$ и при $M = 3 \cdot 10^{-2} M_\odot$, $\rho \approx 10^{-22}$ г/см³, что соответствует плотности облаков межзвездного газа. Повидимому, Сверхновая 369 г. вспыхнула в одном из облаков межзвездного газа, в то время как Сверхновая 1054 г. вспыхнула в межоблачной среде и для нее торможение только начинается.

Источник Лебедь А интерпретируется сейчас как результат лобового столкновения двух галактик — позднего типа спиралей (см., например, ⁽⁶⁾). Недавно были получены радиоастрономические данные, которые, как нам представляется, подтверждают такую интерпретацию ⁽¹²⁾. Согласно ^(6, 12) Лебедь А разрешается на два близких источника примерно одинаковой величины и яркости, схематическое изображение которых приводится на рис. 1 А. Характерно, что области оптического излучения (сталкивающиеся галактики, на рис. 1 А зачернены) совершенно не совпадают с областями радиоизлучения (на рис. 1 А эти области заштрихованы). Между тем симметрия картины не оставляет сомнения, что здесь мы наблюдаем два взаимодействующих объекта. Картина станет ясней, если мы учтем, что согласно ⁽¹³⁾ межзвездный газ образует почти сферическую «корону» вокруг галактик поздних типов. Так как в этом весьма разреженном газе длина свободного пробега все же в тысячи раз меньше размеров галактики, то при столкновении галактик сферическую межоблачную среду следует считать сплошной. Допустим, что удар двух таких газовых «корон» является частично упругим. Обоснованием этому являются огромное значение скорости столкновения ($V \approx 2000$ км/сек) и намагниченность межзвездной среды. Каждая из «корон» — это клубок исключительно запутанных силовых линий, который при столкновении сохраняет «автономность», более или менее сильно деформируясь. Между тем при такой скорости столкновения звезды одной галактики пройдут через звезды другой галактики, не испытав значительных возмущений. Кроме того, нужно иметь в виду, что межзвездная разреженная среда не оказывает сопротивления движению звезд. На рис. 1 Б схематически дано относительное положение сталкивающихся галактик для различных моментов времени ($a - d$). Этот рисунок позволяет понять наблюдаемую картину (ср. рис. 1 Б, д и

рис. 1 А). Можно себе представить, что при столкновении галактик через их газовые «короны» прошла ударная волна, после чего они по причине частичной упругости удара разошлись, между тем как звезды и сравнительно плотные облака газа, образующие «плоскую» подсистему, продолжали сближаться и в настоящее время уже прошли друг через друга.

Согласно ⁽⁶⁾ R — расстояние до сталкивающихся галактик в Лебеде — около $7 \cdot 10^7$ пс (по новой шкале). Диаметр каждой из галактик (в оптических лучах!) около 12 000 пс, размер наблюдаемой области столкновения около 43 000 пс. С «момента расхождения» звезд и межзвездной газовой «короны» галактики прошли 16 500 пс. Двигаясь со скоростью $V = 2 \cdot 10^8$ см/сек, они потратили на это $2,5 \cdot 10^{14}$ сек. $= 0,8 \cdot 10^7$ лет. До того как газовые «короны» стали (из-за упругости) расходиться, сквозь газ прошла ударная волна, скорость которой $\frac{4}{3} V$. Время прохождения ударной волны через галактику $\sim 0,44 \cdot 10^7$ лет. Значит, можно принять, что от начала столкновения до настоящего времени прошло $1,2 \cdot 10^7$ лет.

Таким образом, источники радиоизлучения в Лебеде А являются совершенно новым типом космических тел. Это огромных (галактических) размеров разреженные, очень горячие, намагниченные облака газа, лишенные звезд. Поверхностная яркость их в оптических лучах должна быть очень низка: мера эмиссии около 100, в то время как для волокнистых туманностей она около 1000.

Поток радиоизлучения от Лебеда А на частоте $\nu = 100$ МГц $F_\nu = 1,3 \cdot 10^{-19}$ эрг/см² сек·Гц.

Полный поток $\int_{\nu_1=20 \text{ МГц}}^{\nu_2=10000 \text{ МГц}} F_\nu d\nu = 10^{-10}$ эрг/см²·сек, что почти в 15 раз

больше, чем поток оптического излучения от сталкивающихся галактик.

Абсолютная светимость галактик в радиочастотах

$$L_\nu = 4\pi R^2 F_\nu = 7,6 \cdot 10^{34} \text{ эрг/сек} \cdot \text{Гц}, \quad \int L_\nu d\nu = 6 \cdot 10^{43} \text{ эрг/сек}.$$

Источником радиоизлучения может быть только кинетическая энергия сталкивающихся газовых «корон». При средней плотности газа в «короне» $\rho \approx 10^{-25}$ г/см³ масса «короны» каждой из галактик будет $\sim 10^{43}$ г. Кинетическая энергия столкновения $E_{\text{кин}} = MV^2/2 = 2 \cdot 10^{59}$ эрг. Можно считать, что радиоизлучение происходит с наблюдаемой теперь мощностью уже около 10^7 лет. За это время было излучено энергии

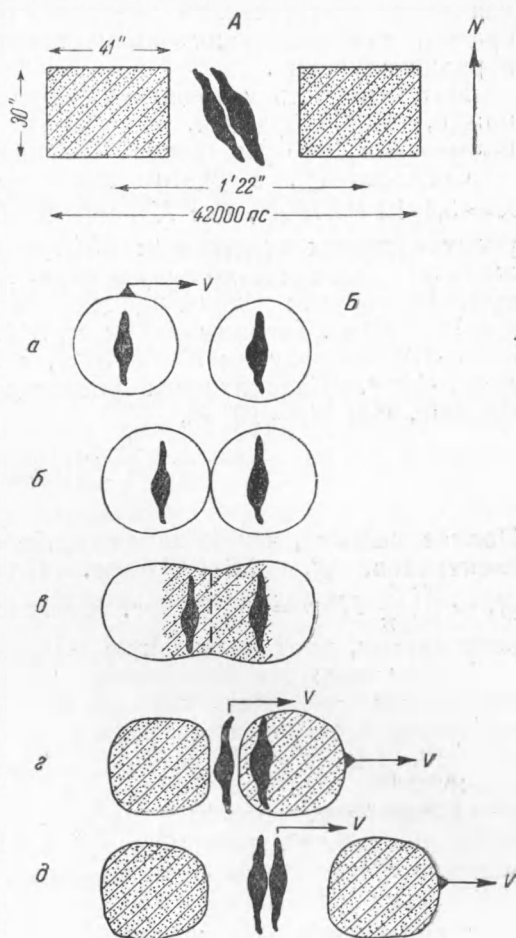


Рис. 1

около $2 \cdot 10^{58}$ эрг. Этот грубый расчет показывает, что наблюдаемую картину, исходя из закона сохранения энергии, можно объяснить столкновением двух галактик. При этом надо принять, что значительная часть кинетической энергии столкновения перешла в энергию сравнительно небольшого количества релятивистских частиц, а затем — в радиоизлучение.

Интенсивность источника в Лебеде $I_\nu = F_\nu / \Omega$, где $\Omega = 0,72$ кв. мин. или $6,1 \cdot 10^{-8}$ стерадиан. $I_\nu = 2,1 \cdot 10^{12}$ эрг/см²·сек·гц·стерадиан или примерно в 1000 раз больше спокойного Солнца.

Согласно ⁽⁶⁾, с учетом характера спектра Лебеда А ($F_\nu \sim \nu^{-1}$), $I_\nu = 3,1 \cdot 10^{-15} K H^2 \bar{R} \lambda$, где K определяется энергетическим спектром релятивистских электронов: $N_e(E) = K/E^\gamma$, $\gamma = 3$, $\bar{R} \approx 10^4$ пс — протяженность Лебеда А по лучу зрения, H — напряженность беспорядочно ориентированных движущихся магнитных полей. Примем, что $\rho = 10^{-25}$ г/см³. Тогда из $H^2/8\pi = \rho V^2/2$, $V = 10^8$ см/сек, $H = 10^{-4}$ гаусс, $\lambda = 3 \cdot 10^2$ см получим $K = 6 \cdot 10^{-15}$, в то время как в нашей Галактике $K = 3 \cdot 10^{-19}$. Концентрация релятивистских электронов с энергией больше, чем $E_0 = 10^8$ эв,

$$\bar{n} = \int_{E_0}^{E_1} \frac{K}{E^3} dE \approx 10^{-6} \text{ см}^{-3}.$$

Полная энергия, заключенная в Лебеде А в форме релятивистских электронов, $\mathcal{E}_1 = 6,6 \cdot 10^{58}$ эрг. Полная магнитная энергия равна $\mathcal{E}_2 = \iiint \frac{1}{8\pi} H^2 dV = 8 \cdot 10^{58}$ эрг. Хотя расчеты наши весьма грубы, они, повидимому, дают правильную модель явления.

Естественно считать причиной ускорения частиц в сталкивающихся галактиках статистический механизм Ферми — Гинзбурга. Характеристическая постоянная этого механизма α определится из соотношения: $\alpha T \approx 10$, где $T = 10^7$ лет $= 3 \cdot 10^{14}$ сек. — время ускорения. Отсюда $\alpha \approx 3 \cdot 10^{-14}$ сек⁻¹. С другой стороны, $\alpha = u^2 v / c^2 l$. Полагая $u = 10^8$ см/сек, $v = 10^{10}$ см/сек, $l = 2 \cdot 10^{18}$ см (т. е. 20 длин свободного пробега), найдем, что $\alpha = 5 \cdot 10^{-14}$ сек⁻¹, что обосновывает применение статистического механизма.

Энергия релятивистских электронов, находящихся в сталкивающихся галактиках, должна быть ограничена условием: $\alpha E_1 = (dE/dt)_{E=E_1}^{изл}$, где $(dE/dt)^{изл}$ — потеря энергии релятивистским электроном за единицу времени из-за радиоизлучения. При $H = 10^{-4}$ гаусс, $\alpha = 10^{-13}$ сек⁻¹ (для релятивистских электронов!) $E_1 \approx 2 \cdot 10^9$ эв. Энергетический спектр релятивистских электронов в области $5 \cdot 10^8 < E < 2 \cdot 10^9$ будет более пологим, чем при меньших энергиях, что, повидимому, подтверждается наблюдаемым радиоспектром. Следует ожидать довольно резкого обрыва спектра радиоизлучения у частоты, соответствующей E_1 . При $H = 10^{-4}$ гаусс эта частота будет у $\nu_1 \approx 2 \cdot 10^{10}$ гц. Было бы весьма желательно проверить наблюдениями этот вывод теории.

Государственный астрономический институт
им. П. К. Штернберга

Поступило
12 V 1954

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ В. Л. Гинзбург, ДАН, 76, 377 (1951). ² И. С. Шкловский, Астр. журн. 30, 15 (1953). ³ И. С. Шкловский, ДАН, 91, 475 (1953). ⁴ В. Л. Гинзбург ДАН, 92, 727 (1953). ⁵ В. Л. Гинзбург, Усп. физ. наук, 51, 343 (1953). ⁶ R. Humpbry Brown, Observatory, 73, 185 (1953). ⁷ И. С. Шкловский П. П. Паренаго, Астр. журн., № 131 (1952). ⁸ R. Minkowski, Ap. J., 97 128 (1943); R. Minkowski, J. Greenstein, ibid., 118, 1 (1953). ⁹ И. С. Шкловский, ДАН, 90, № 6 (1953). ¹⁰ В. А. Амбарцумян, Э. Р. Мустель и др., Теоретическая астрофизика, 1952, стр. 473. ¹¹ Б. А. Воронцов-Вельяминов, Газовые туманности и новые звезды, 1948, стр. 438. ¹² R. Jernisson, M. Das Gupta, Nature, 172, 996 (1953). ¹³ С. Б. Пикельнер, Изв. Крымск. астр. obs., 10, 74 (1953).