

Рис. 6. Высокотемпературный турбулентный токовый слой [6] в качестве физической модели области прямого тока в пересоединяющем токовом слое.

формы на рис. 6) (см. [6, гл. 6]). Эта двумерная самосогласованная модель основывается на законах сохранения массы, импульса и энергии, а также законе Ома, записанных в виде порядковых соотношений.

Температура токового слоя столь высока, что кулоновскими столкновениями в нём можно пренебречь. Доминирующими физическими процессами в таком "сверхгорячем" слое являются прямой нагрев электронов и ионов в результате взаимодействия частица – волна внутри турбулентного слоя и охлаждение электронов аномальными тепловыми потоками из слоя [27, 28]. Модель позволяет оценить характерные значения толщины $2a_{\text{tur}}$ и ширины $2b_{\text{tur}}$ турбулентного слоя (см. рис. 6), плотность плазмы, температуру электронов и ионов в нём, а также мощность выделения энергии и другие параметры, представляющие интерес с точки зрения астрофизических приложений теории магнитного пересоединения.

Однако существенным преимуществом аналитических моделей является возможность исследовать общие закономерности, не зависящие от детальных предположений той или иной физической модели пересоединения в сильных магнитных полях. Это вполне аналогично тому, что адиабата Гюгонио описывает начальное и конечное состояние газа при переходе через фронт ударной волны, вне зависимости от того, как именно осуществляется этот переход.

Список литературы

1. Сыроватский С И *Астрон. журн.* **39** 987 (1962) [Syrovatskii S I *Sov. Astron. J.* **6** 768 (1963)]
2. Syrovatskii S I *Solar Phys.* **76** 3 (1982)
3. Сыроватский С И *ЖЭТФ* **50** 1133 (1966) [Syrovatskii S I *Sov. Phys. JETP* **23** 754 (1966)]
4. Имшенник В С, Сыроватский С И *ЖЭТФ* **52** 990 (1967) [Imshennik V S, Syrovatskii S I *Sov. Phys. JETP* **25** 656 (1967)]
5. Сомов Б В, Сыроватский С И *УФН* **120** 217 (1976) [Somov B V, Syrovatskii S I *Sov. Phys. Usp.* **19** 813 (1976)]
6. Somov B V *Plasma Astrophysics Pt. II Reconnection and Flares* (New York: Springer, 2006)
7. Сыроватский С И *ЖЭТФ* **60** 1727 (1971) [Syrovatskii S I *Sov. Phys. JETP* **33** 933 (1971)]
8. Petschek H E, in *The Physics of Solar Flares, Proc. of the AAS–NASA Symp., 28–30 October, 1963, Greenbelt, MD* (Ed. W N Hess) (Washington, DC: NASA, 1964) p. 425
9. Брушлинский К В, Заборов А М, Сыроватский С И *Физ. плазмы* **6** 297 (1980) [Brushlinskii K V, Zaborov A M, Syrovatskii S I *Sov. J. Plasma Phys.* **6** 165 (1980)]
10. Biskamp D *Phys. Fluids* **29** 1520 (1986)
11. Марковский С А, Сомов Б В, в сб. *Физика солнечной плазмы* (Отв. ред. Б В Сомов, В В Фомичев) (М.: Наука, 1989) с. 45

12. Безродных С И, Власов В И, Сомов Б В *Письма в Астрон. журн.* **33** 153 (2007) [Bezrodnykh S I, Vlasov V I, Somov B V *Astron. Lett.* **33** 130 (2007)]
13. Лаврентьев М А, Шабат Б В *Методы теории функций комплексного переменного* (М.: Наука, 1973)
14. Somov B V *Physical Processes in Solar Flares* (Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 1992)
15. Сомов Б В, Сыроватский С И *Изв. АН СССР. Сер. физ.* **39** 375 (1975) [Somov B V, Syrovatskii S I *Bull. Acad. Sci. USSR Phys. Ser.* **39** (2) 109 (1975)]
16. Безродных С И, Власов В И, Сомов Б В *Письма в Астрон. журн.* **36** (10) (2010) [Bezrodnykh S I, Vlasov V I, Somov B V *Astron. Lett.* **36** (10) (2010)]
17. Безродных С И, Власов В И *Журн. вычисл. мат. мат. физ.* **42** 277 (2002) [Bezrodnykh S I, Vlasov V I *Comput. Math. Math. Phys.* **42** 263 (2002)]
18. von Koppenfels W, Stallmann F *Praxis der Konformen Abbildung* (Berlin: Springer, 1959) [Коппенфельс В, Штальман Ф *Практика конформных отображений* (М.: ИЛ, 1963)]
19. Somov B V *Plasma Astrophysics Pt. I Fundamentals and Practice* (New York: Springer, 2006)
20. Леденцов Л С, Сомов Б В *Письма в Астрон. журн.* **36** (10) (2010) [Ledentsov L S, Somov B V *Astron. Lett.* **36** (10) (2010)]
21. Markovskii S A, Somov B V *J. Plasma Phys.* **55** 303 (1996)
22. Chen P F et al. *Astrophys. J.* **513** 516 (1999)
23. Ugai M *Phys. Plasmas* **15** 082306 (2008)
24. Somov B V et al. *Adv. Space Res.* **32** 2439 (2003)
25. Сыроватский С И *УФН* **62** 247 (1957)
26. Сомов Б В, Сыроватский С И, в сб. *Нейтральные токовые слои в плазме* (Труды ФИАН, Т. 74, Под ред. Н Г Басова) (М.: Наука, 1974) с. 14 [Somov B V, Syrovatskii S I, in *Neutral Current Sheets in Plasmas* (Proc. (Trudy) of the P N Lebedev Phys. Inst., Vol. 74, Ed. N G Basov) (New York: Consultants Bureau, 1976) p. 13]
27. Somov B V, Titov V S *Письма в Астрон. журн.* **9** 48 (1983) [*Sov. Astron. Lett.* **9** 26 (1983)]
28. Орешина А В, Сомов Б В *Письма в Астрон. журн.* **26** 870 (2000) [Oreshina A V, Somov B V *Astron. Lett.* **26** 750 (2000)]

PACS numbers: 96.50.S–, 97.60.Bw, 98.62.Nx
DOI: 10.3367/UFNr.0180.201009k.1000

Происхождение космических лучей

В.С. Птускин

1. Введение

Исследования по проблеме происхождения космических лучей составляют важную часть научного наследия Сергея Ивановича Сыроватского. Знаменитая монография В.Л. Гинзбурга и С.И. Сыроватского *Происхождение космических лучей* [1], опубликованная в 1963 г., стала "библией" для специалистов по астрофизике высоких энергий. Уже в этой монографии, которая была написана до открытия квазаров, реликтового излучения и пульсаров, в те времена, когда сведения о космических лучах вне солнечной системы основывались главным образом на данных радиоастрономии, были сформулированы основные положения модели происхождения космических лучей, которые остаются неизменными до сих пор. Развита в [1] модель основана на следующих предположениях: основная доля космических лучей имеет галактическое происхождение, они диффунди-

В.С. Птускин. Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Троицк, Московская обл., РФ
E-mail: vptuskin@izmiran.ru

руют в межзвёздных магнитных полях и заполняют обширное гало, источниками космических лучей являются взрывы сверхновых, частицы самых высоких энергий (сейчас к ним относят космические лучи с энергиями выше $10^{18} - 10^{19}$ эВ) имеют внегалактическое происхождение. Вскоре после смерти Сергея Ивановича, в 1979 г., Виталий Лазаревич Гинзбург предложил нескольким сотрудникам, работавшим в этой области, совместно написать новую книгу, посвящённую той же тематике. Два издания книги *Астрофизика космических лучей* под редакцией В.Л. Гинзбурга вышли в 1984 г. и 1990 г. [2]. В неё вошли такие новые разделы, как гамма-астрономия, нейтринная астрономия и описание процессов ускорения и переноса космических лучей на кинетическом уровне. В определённом смысле был подведён итог многолетней совместной работе В.Л. Гинзбурга, С.И. Сыроватского и их коллег по астрофизике космических лучей.

В настоящем кратком сообщении изложены некоторые последние результаты исследований по проблеме происхождения космических лучей.

2. Галактические космические лучи — ускорение в сверхновых и распространение в галактических магнитных полях

По энергетическим характеристикам сверхновые и их остатки являются наиболее подходящими источниками космических лучей в Галактике [1]. Требуется перевести примерно 10–20 % кинетической энергии выброса сверхновой в энергию релятивистских частиц, для того чтобы обеспечить наблюдаемую плотность энергии космических лучей, $\approx 1,5$ эВ см⁻³. При этом предполагается, что кинетическая энергия взрыва сверхновой составляет 10^{51} эрг и вспышки сверхновых в Галактике в среднем происходят каждые 30 лет. Прямые свидетельства наличия релятивистских частиц в остатках сверхновых следуют из наблюдений нетеплового излучения в радиодиапазоне, рентгеновском и гамма-диапазонах. Данные по синхротронному радиоизлучению указывают на наличие электронов с энергиями 50 МэВ–30 ГэВ в таких остатках сверхновых, как Cas A, IC 433, Cygnus Loop и многих других (см. [3]). В случае Cas A это синхротронное излучение было зарегистрировано в инфракрасном диапазоне, что свидетельствует о наличии электронов с энергиями примерно до 200 ГэВ. Обнаружение нетеплового рентгеновского излучения с характерным степенным спектром, с энергией вплоть до значений в несколько десятков кэВ от ярких "ободков" в примерно десяти молодых галактических остатках сверхновых, включая SN1006, Cas A, RXJ 1713.7-3946, RX J08852-46/Vela Jr, RCW 86, G266.2-1.2 и др., объясняется синхротронным излучением электронов очень высоких энергий, вплоть до 10–100 ТэВ (см. обзор [4]). Обратное комптоновское рассеяние фоновых фотонов электронами со столь высокой энергией и генерация гамма-излучения через производство и распады π^0 -мезонов в процессе взаимодействия протонов и ядер с энергиями до ~ 100 ТэВ с ядрами газа объясняют наличие ТэВ-ного гамма-излучения, зарегистрированного от ряда молодых оболочечных остатков сверхновых [5]. Пространственное распределение нетеплового излучения во всех диапазонах свидетельствует о том, что ускорение частиц в оболочечных остатках сверхновых происходит непосредственно на ударной волне, порождённой взрывом сверхновой.

Данные о составе космических лучей также подтверждают, что ускорение частиц происходит на ударной волне, распространяющейся по межзвёздной среде или в ветре предсверхновой звезды (см. подробнее [6]). Оказывается, в частности, что после учёта таких атомных свойств, как первый потенциал ионизации или летучесть (от последней зависит состав вещества, осаждённого на межзвёздных пылинках), химический состав источников космических лучей оказывается близким к нормальному составу локальной межзвёздной среды и солнечной фотосферы. Возможно, ускорение ионов и пылинок идёт в частично ионизованном межзвёздном газе и/или в горячих "пузырях" межзвёздного газа с высокой частотой вспышек сверхновых. Относительно высокое отношение содержаний изотопов $^{59}\text{Co}/^{56}\text{Fe}$ в материале источников космических лучей показывает, что большая часть синтезированных при взрыве сверхновой изотопов ^{59}Ni успевает распасться в изотопы ^{59}Co за счёт захвата орбитального электрона до начала ускорения частиц. Отсюда следует, что ускорение происходит не менее чем через 10^5 лет после процесса нуклеосинтеза.

Механизм ускорения космических лучей в остатках сверхновых является версией ускорения Ферми первого рода. Ускорение быстрых частиц происходит в сжимающемся на ударной волне потоке газа благодаря многократному пересечению фронта ударной волны диффундирующими быстрыми частицами [7, 8] (см. также обзоры [6, 9]). Диффузия частиц обеспечивается их рассеянием неоднородностями магнитного поля. Это рассеяние имеет резонансный характер, так что частица с гирорадиусом r_g в основном взаимодействует с неоднородностями, имеющими волновое число $k \sim 1/r_g$. При этом коэффициент диффузии частиц можно оценить как $D \approx v r_g B^2 (3B_{\text{res}}^2)^{-1}$, где v — скорость частицы, B — полное магнитное поле, B_{res} — случайное магнитное поле в резонансном масштабе $1/k \sim r_g$. Функция распределения ускоренных частиц по импульсам имеет степенной вид $f(p) \propto p^{-3r/(r-1)}$, где r — степень сжатия газа на ударной волне (функция $f(p)$ связана с интенсивностью космических лучей $I(E)$ как $p^2 f(p) = I(E)$, где E — энергия частицы). Предельное сжатие газа в сильной ударной волне, идущей по одноатомному газу без высвечивания, равно $r = 4$, что при ультрарелятивистских энергиях приводит к спектру ускоренных частиц $I(E) \sim E^{-2}$. Этот результат справедлив для случая ускорения пробных частиц. При эффективном ускорении на ударной волне, порождённой вспышкой сверхновой, давление релятивистских частиц оказывается столь большим, что профиль ударной волны модифицируется и возникающий самосогласованный спектр ускоренных частиц существенно отличается от такового в случае пробных частиц — он укрупняется при нерелятивистских энергиях и может уплотняться вплоть до $\sim E^{-3/2}$ в области самых высоких энергий.

Необходимым условием ускорения является выполнение условия $D \leq 0,1 u_{\text{sh}} R_{\text{sh}}$, где u_{sh} и R_{sh} — скорость и радиус ударной волны соответственно, численный коэффициент 0,1 вычислен приближённо. Выражение в правой части этого неравенства достигает максимальной величины $\sim 10^{27} (W_{51}/n)^{2/5}$ [см² с⁻¹] в начале стадии Седова эволюции остатка сверхновой, где энергия взрыва сверхновой $W_{\text{sn}} = 10^{51} W_{51}$ [эрг], n — концентрация межзвёздного газа в [см⁻³]. Вместе с тем типичный

коэффициент диффузии космических лучей в Галактике, который составляет $D_G \sim 10^{28} \text{ см}^2 \text{ с}^{-1}$ при энергии частиц 1 ГэВ на нуклон и возрастает с увеличением энергии, оказывается слишком большим, для того чтобы обеспечить ускорение релятивистских частиц. Таким образом, для ускорения необходим аномально малый коэффициент диффузии вблизи фронта ударной волны, включая область непосредственно перед фронтом. Это обеспечивается самими ускоряемыми частицами, которые выходят из области ускорения и создают повышенный уровень магнитогиродинамической (МГД) турбулентности за счёт потоковой неустойчивости. Теория слабой турбулентности предсказывает значительное усиление случайного магнитного поля δB для ударных волн с большим числом Маха, но она не может адекватно описать возрастание поля до величины, сравнимой с фоновым межзвёздным магнитным полем $B_0 = 5 \text{ мкГс}$. Предполагая, что $\delta B = B_0$, можно получить так называемый бомовский коэффициент диффузии $D_{B0} = vr_g/3 \sim 6 \times 10^{21} \beta R_m [\text{см}^2 \text{ с}^{-1}]$, который является нижним пределом для коэффициента диффузии частиц вдоль магнитного поля (здесь $\beta = v/c$, $R_m = pc/Z$ — магнитная жёсткость частицы с зарядом Z). Бомовский коэффициент диффузии позволяет ускорять частицы до максимальной энергии $E_{\text{max}} \sim 2 \times 10^{14} Z (W_{51}/n)^{2/5} [\text{эВ}]$, которая достигается в момент начала седовской стадии эволюции остатка сверхновой. Предположение о бомовском коэффициенте диффузии D_{B0} в окрестности ударной волны в остатке сверхновой до недавнего времени являлось стандартным при анализе ускорения космических лучей (см. [10]).

Развитие теории сильной потоковой неустойчивости космических лучей в предвестнике ударной волны в последние несколько лет [11–14] показало, что использование гипотезы о бомовском пределе ускорения в межзвёздном поле некорректно. Оказалось, в частности, что при $u_{\text{sh}} \geq 10^3 \text{ км с}^{-1}$ случайное поле усиливается до уровня $\delta B \gg B_0$, а при $u_{\text{sh}} < 10^3 \text{ км с}^{-1}$ случайное поле $\delta B < B_0$ быстро уменьшается с возрастом остатка сверхновой из-за диссипации турбулентности. В экстремальных условиях, по-видимому, применимых к начальной стадии разлёта оболочек сверхновых, случайное поле может достигать величины $\delta B_{\text{max}} \sim 10^3 (u_{\text{sh}}/3 \times 10^4 [\text{км с}^{-1}])^{1/2} [\text{мкГс}]$, а максимальная энергия ускоренных частиц — величины $E_{\text{max}} \sim 10^{17} Z (u_{\text{sh}}/3 \times 10^4 [\text{км с}^{-1}])^2 M_{\text{ej}}^{1/3} n^{1/6} [\text{эВ}]$ (здесь M_{ej} — масса сброшенной оболочки, измеренная в массах Солнца). Наличие сильного магнитного поля подтверждается наблюдениями нетеплового рентгеновского излучения от молодых остатков сверхновых. Большое усиление поля в молодых остатках является косвенным свидетельством ускорения протонов, которое сопровождается сильной потоковой неустойчивостью. Предсказываемая теорией потоковой неустойчивости более сильная зависимость $E_{\text{max}}(t)$, по сравнению с зависимостью $E_{\text{max}} \sim t^{-1/5}$, полученной в предположении о бомовской диффузии с коэффициентом D_{B0} , позволяет понять, почему ТэВ-ное гамма-излучение наблюдается только от сравнительно молодых остатков сверхновых. Ещё одним следствием наличия сильного магнитного поля является укрупнение спектра ускоренных частиц вследствие эффекта альвеновского дрейфа частиц за фронтом ударной волны (сноса частиц потоком альвеновских волн, распространяющихся преимущественно в

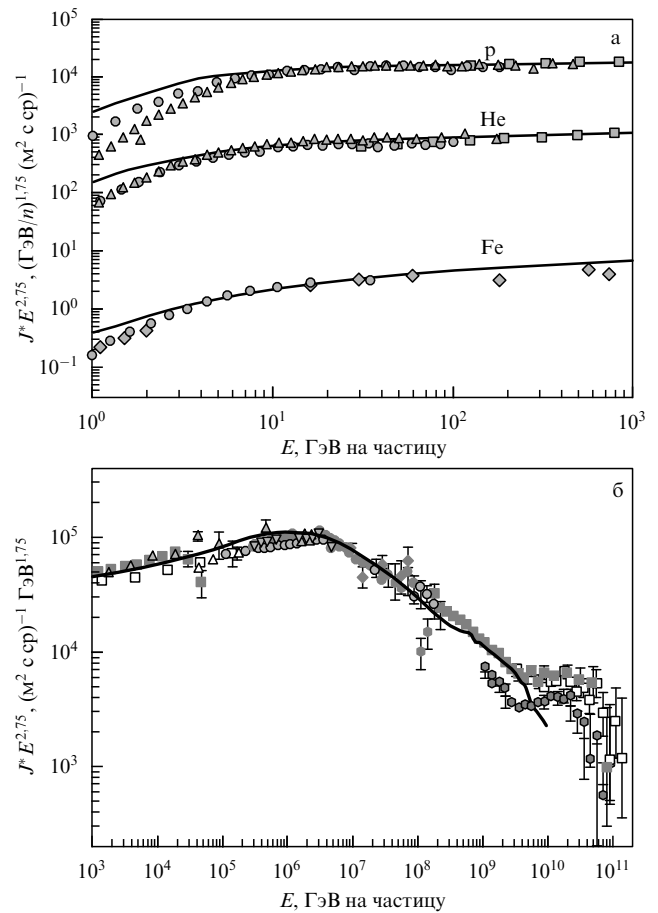


Рисунок. (а) Рассчитанные спектры протонов, гелия и железа в межзвёздной среде (без учёта эффекта модуляции солнечным ветром при малых энергиях). Данные наблюдений взяты из работы [15]. (б) Рассчитанный суммарный спектр всех частиц с энергиями, большими 10^3 ГэВ. Данные наблюдений взяты из работы [16].

направлении от фронта ударной волны), что, по-видимому, приводит спектр источников галактических космических лучей в согласие с эмпирической моделью происхождения космических лучей.

На рисунке показан рассчитанный в [15] спектр космических лучей в межзвёздной среде. Приведены спектры протонов, гелия и железа в диапазоне кинетической энергии от 1 ГэВ на нуклон до 10^3 ГэВ на нуклон, в котором имеются надёжные данные по отдельным типам ионов, и суммарные спектры протонов и всех ионов, вплоть до ионов железа, при энергиях на частицу $E \geq 10^3$ ГэВ. Абсолютная нормировка источников различных ионов проведена согласно условию совпадения с наблюдениями интенсивности и состава космических лучей при одной и той же энергии частиц 10^3 ГэВ. Расчёт выполнен с помощью численного кода, который позволяет моделировать эволюцию сферической ударной волны, порождённой взрывом сверхновой, и ускорение частиц с учётом обратного влияния их давления на гидродинамическое течение. Учитывается ускорение космических лучей в остатках сверхновых типа Ia, IP, Ib/c и Ib. Трансформация кинетической энергии взрыва сверхновой в энергию ускоренных космических лучей становится эффективной с момента начала седовской (адиабатической) стадии эволюции ударной волны, т.е. когда масса выброса сверхновой становится равной массе

"нагрёбённого" ударной волной газа. В результате, в усреднённом за всё время ускорения эволюционирующей ударной волной спектре частиц возникает характерный излом — "колени". Энергия колена приближённо оценивается, как $p_{\text{кnee}}c/Z \sim 1 \times 10^{15} W_{51} n^{1/6} M_{\text{ej}}^{-2/3}$ [эВ]. Рассчитанные спектры хорошо согласуются с наблюдениями при энергиях вплоть до значений примерно 5×10^{18} эВ (до этой максимальной энергии ускоряются ядра железа в остатках сверхновых типа IIb). Благодаря суммированию по различным типам сверхновых и различным типам ядер, воспроизводится форма "колени" в спектре всех частиц при энергии 3×10^{15} эВ. В целом, в космические лучи переходит примерно 1/3 кинетической энергии взрыва сверхновой.

В описанных выше расчётах предполагается, что во всей рассматриваемой области энергий коэффициент диффузии ультрарелятивистских частиц в межзвёздной среде вне области источников зависит от импульса как $D \propto (p/Z)^{0.54}$ [17]. Фактически эта зависимость может быть установлена лишь до энергий порядка нескольких сотен ГэВ на нуклон, для которых имеются данные о содержании вторичных ядер в составе космических лучей. (Редкие в природе вторичные ядра, такие как дейтерий, тритий, литий, бериллий, бор и ряд других, возникают в космических лучах в результате ядерной фрагментации более тяжёлых первичных ядер, которые до выхода из Галактики проходят толщину межзвёздного вещества плотностью примерно 10 г см^{-2} .) Из физических соображений, основанных на рассмотрении диффузии частиц в галактических магнитных полях, можно рассчитывать, что требуемая степенная зависимость коэффициента диффузии от импульса сохраняется до значений энергии порядка $E/Z \sim 10^{17}$ эВ [2]. Уточнение особенностей распространения космических лучей при более высоких энергиях требует дополнительных траекторных расчётов при различных предположениях о структуре галактического магнитного поля, включая возможное наличие галактического ветра с вмороженным магнитным полем и с характерными размерами в несколько сотен килопарсеков.

Остатки сверхновых являются основными, но, конечно, не единственными источниками релятивистских частиц в межзвёздной среде. В частности, пульсары, генерирующие высокоэнергичные электрон-позитронные пары, могут быть ответственны за наличие в наблюдаемых в космических лучах позитронов. Измеренный поток позитронов с энергиями более 10 ГэВ [18] оказался выше, чем ожидаемый поток вторичных позитронов, возникающих при взаимодействии космических лучей с атомами межзвёздного газа, и вклад пульсаров, в принципе, объясняет это расхождение. Окончательное выяснение природы высокого потока позитронов в космических лучах очень важно, поскольку в альтернативном объяснении предполагается, что эти позитроны являются продуктами распада тёмной материи (см. обсуждение в [19, 20]).

3. Космические лучи сверхвысоких энергий

Центральной проблемой астрофизики космических лучей остаётся вопрос о происхождении частиц самых высоких энергий, $E > 10^{19}$ эВ. Наблюдаемое резкое уменьшение потока частиц при энергиях, больших примерно 5×10^{19} эВ [21, 22], свидетельствует о том, что эти частицы испытывают взаимодействие с фото-

нами фонового излучения Вселенной в течение более 3×10^9 лет и имеют внегалактическое происхождение. При этом протоны сверхвысоких энергий теряют энергию на рождение электрон-позитронных пар и на рождение пионов (эффект Грейзена–Зацепина–Кузьмина [23, 24]), а ядра дополнительно подвергаются фоторасщеплению. Наблюдаемые у Земли космические лучи с энергиями менее 10^{17} эВ имеют галактическое происхождение и ускоряются в остатках сверхновых. Дискуссионной является величина характерной энергии E_c , находящейся в интервале $10^{17} \text{ эВ} < E_c < 10^{19} \text{ эВ}$, при которой галактическая компонента сменяется внегалактической (см. [25]).

Простые оценки [16, 26, 27] показывают, что с точки зрения энергетических характеристик джеты галактик с активными ядрами могут быть источниками наблюдаемых космических лучей сверхвысоких энергий. Для поддержания в межгалактической среде интенсивности космических лучей, наблюдаемой при энергиях, больших 10^{19} эВ, требуется мощность источников порядка $3 \times 10^{36} \text{ эрг с}^{-1} \text{ Мпк}^{-3}$. Это значение, по-видимому, увеличивается не менее чем на порядок при учёте вклада частиц с меньшими энергиями. В то же время джеты галактик с активными ядрами выделяют кинетическую энергию на уровне около $10^{40} \text{ эрг с}^{-1} \text{ Мпк}^{-3}$, и примерно 2% этой энергии заключено в джетах с мощностью $L_{\text{jet}} = 10^{44} - 10^{46} \text{ эрг с}^{-1}$, типичной для радиогалактик и квазаров с большой светимостью в радиодиапазоне. Значение $L_{\text{jet}} = 10^{40} - 10^{44} \text{ эрг с}^{-1}$ характерно для многочисленных менее мощных джетов.

Не конкретизируя механизм ускорения космических лучей в джетах, можно использовать критерий Хилласа [28] для оценки максимальной энергии E_{max} , которую могут приобрести частицы с зарядом Ze в области ускорения размером l , магнитным полем B и скоростью переноса магнитного поля $u = \beta c$: $E_{\text{max}} = Ze\beta Bl$. Отметим, что с точностью до численного коэффициента эта оценка справедлива, например, для случая диффузионного ускорения частиц на фронте ударной волны в остатке сверхновой в предположении о боровской диффузии энергичных частиц в поле B вблизи фронта ударной волны. Для оценки величины магнитного поля предположим, что поток энергии вмороженного статистически изотропного магнитного поля в джете связан с потоком кинетической энергии соотношением $L_{\text{jet}} = \beta c (B^2/6\pi) \pi R^2$, где $R = l/2$ — радиус сечения джета, βc — его скорость.

В результате получаем следующую оценку максимальной возможной энергии ускоренных частиц [29–32]:

$$E_{\text{max}} = Ze \left(\frac{6\beta}{c} L_{\text{jet}} \right)^{1/2} \approx 2,7 \times 10^{20} Z \beta^{1/2} L_{\text{jet},45}^{1/2} [\text{эВ}], \quad (1)$$

где используется обозначение $L_{\text{jet},45} = L_{\text{jet}} [(10^{45} \text{ эрг с}^{-1})^{-1}]$. Зарегистрированная максимальная энергия событий в космических лучах составляет примерно 2×10^{20} эВ.

Приведённые оценки показывают, что по общим энергетическим характеристикам и по величине максимальной возможной энергии ускоренных частиц джеты галактик с активными ядрами могут быть основными источниками наблюдаемых космических лучей самых высоких энергий. Более подробное обсуждение можно найти в обзорах [16, 27].

Список литературы

1. Гинзбург В Л, Сыроватский С И *Происхождение космических лучей* (М.: Изд-во АН СССР, 1963) [Ginzburg V L, Syrovatskii S I *The Origin of Cosmic Rays* (Oxford: Pergamon Press, 1964)]
2. Гинзбург В Л (Ред.) *Астрофизика космических лучей* (М.: Наука, 1984); 2-е изд. (М.: Наука, 1990) [Ginzburg V L (Ed.) *Astrophysics of Cosmic Rays* (Amsterdam: North-Holland, 1990)]
3. Лозинская Т А *Сверхновые звезды и звездный ветер: взаимодействие с газом Галактики* (М.: Наука, 1986) [Lozinskaya T *Supernovae and Stellar Wind in the Interstellar Medium* (New York: AIP, 1992)]
4. Vink J *Adv. Space Res.* **33** 356 (2004)
5. Aharonian F et al. *Astrophys. J.* **636** 777 (2006)
6. *Space Sci. Rev.* **99** (1–4) (2001)
7. Крымский Г Ф *ДАН СССР* **234** 1306 (1977) [Krymskii G F *Sov. Phys. Dokl.* **22** 327 (1977)]
8. Bell A R *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **182** 147 (1978)
9. Berezhko E G *Adv. Space Res.* **41** 429 (2008)
10. Бережко Е Г, Елшин В К, Ксенофонтов Л Т *ЖЭТФ* **109** 3 (1996) [Berezhko E G, Elshin V K, Ksenofontov L T *JETP* **82** 1 (1996)]
11. Bell A R, Lucek S G *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **321** 433 (2001)
12. Ptuskin V S, Zirakashvili V N *Astron. Astrophys.* **403** 1 (2003)
13. Bell A R *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **353** 550 (2004)
14. Zirakashvili V N, Ptuskin V S *Astrophys. J.* **678** 939 (2008)
15. Ptuskin V S, Zirakashvili V N, Seo E-S *Astrophys. J.* **718** 31 (2010)
16. Blümer J, Engel R, Hörandel J R *Prog. Part. Nucl. Phys.* **63** 293 (2009)
17. Jones F C et al. *Astrophys. J.* **547** 264 (2001)
18. Adriani O et al. *Nature* **458** 607 (2009)
19. Profumo S, arXiv:0812.4457
20. Katz B et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **405** 1458 (2010)
21. Abbasi R U et al. (High Resolution Fly's Eye Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **100** 101101 (2008)
22. Abraham J et al. (The Pierre Auger Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **101** 061101 (2008)
23. Greisen K *Phys. Rev. Lett.* **16** 748 (1966)
24. Зацепин Г Т, Кузьмин В А *Письма в ЖЭТФ* **4** 114 (1966) [Zatsepin G T, Kuz'min V A *JETP Lett.* **4** 78 (1966)]
25. Aloisio R et al. *Astropart. Phys.* **27** 76 (2007)
26. Torres D F, Anchordoqui L A *Rep. Prog. Phys.* **67** 1663 (2004)
27. Sigl G *New J. Phys.* **11** 065014 (2009)
28. Hillas A M *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **22** 425 (1984)
29. Lovelace R V E *Nature* **262** 649 (1976)
30. Blandford R D *Phys. Scripta* **T85** 191 (2000)
31. Waxman E *New J. Phys.* **6** 140 (2004)
32. Farrar G R, Gruzinov A *Astrophys. J.* **693** 329 (2009)