УЛК 524.1:524.68

РАСПРОСТРАНЕНИЕ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В ГАЛО ГАЛАКТИКИ С УЧЕТОМ ВОЗБУЖДЕННЫХ ИМИ ВОЛН

© 2021 г. Д. О. Чернышов^{1, *}, В. А. Догель¹, А. В. Ивлев²

 $^1 \Phi$ едеральное государственное бюджетное учреждение науки Φ изический институт имени П.Н. Лебедева Российской академии наук, Отдел теоретической физики имени И.Е. Тамма, Москва, Россия ²Институт внеземной физики Общества Макса Планка, Гархинг, Германия

*E-mail: chernvshov@lpi.ru Поступила в редакцию 19.10.2020 г. После доработки 19.11.2020 г. Принята к публикации 28.12.2020 г.

Представлена самосогласованная модель галактического гало космических лучей. Демонстрируется, что размер гало зависит от энергии космических лучей, однако в пределе больших энергий данная модель переходит в модель гало с фиксированной высотой, причем высота гало определяется параметрами газа.

DOI: 10.31857/S0367676521040098

ВВЕДЕНИЕ

Задачи о происхождении, эволюции и перемещении космических лучей в Галактике требуют указать область пространства, в котором заряженные частицы проводят большую часть времени – галактическое гало. Концепция гало космических лучей была предложена в 1953 г. В.Л. Гинзбургом [1], а в 1963 г. Гинзбург и Сыроватский предложили рассматривать гало Галактики как цилиндр фиксированной высоты [2]. Эта модель до сих пор используется для большинства астрофизических задач, в том числе и в широко известном коде GALPROP [3]. Данная модель успешно описывает как наблюдаемый изотопный состав космических лучей, так и гамма-излучение, вызванное взаимодействием заряженных частиц с веществом и мягкими фотонами. Несмотря на успехи модели гало с фиксированной высотой, нерешенным остается вопрос о природе данного гало. В частности, не ясно, какой физический процесс определяет его характерную высоту и почему высота гало не зависит от энергии космических лучей. Также не очевидно, почему коэффициент пространственной диффузии должен быть постоянен по всему объему гало, параметры газа в котором сильно меняются с высотой.

В статье [4] мы показали, как в рамках самосогласованной модели можно сформировать галактическое гало, за счет взаимодействия космических лучей и турбулентности. Мы предположили, что турбулентность, ответственная за диффузию частиц, генерируется в диске Галактики, а затем выносится в галактическое гало. В процессе взаимодействия с убегающими из Галактики космическими лучами, данная турбулентность усиливается, формируя в результате самосогласованный поток космических лучей. В рамках предложенной модели, ограниченный размер гало получается автоматически из-за градиента плотности газа в Галактики и связанными с ним адиабатическими потерями. В данной статье мы представляем основные положения данной модели

ОСНОВНЫЕ ФОРМУЛЫ

Для упрощения задачи и получения аналитических оценок мы сделали следующие предположения. Во-первых, мы проигнорировали поперечную диффузию космических лучей, считая, что они распространяются строго вдоль магнитного поля, направленного вертикально относительно диска Галактики. Во-вторых, мы считали, что вне диска Галактики нет условий для генерации волн, распространяющихся по направлению к диску. Как следствие, нет условий для нелинейного взаимодействия волн и для генерации турбулентного каскада. В этом состоит существенное отличие от работы [5]. В-третьих, мы полагали, что магнитное поле меняется на масштабах, больших по сравнению с масштабом задачи.

Модель описывается следующей системой уравнений

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\upsilon_A N - D \frac{\partial N}{\partial z} \right) - \frac{1}{3} \frac{d \upsilon_A}{dz} \frac{\partial (pN)}{\partial p} = Q_0 p^{-2.3} \delta(z), \quad (1)$$
$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\upsilon_A W \right) - \frac{d \upsilon_A}{dz} \frac{\partial (kW)}{\partial k} = 2\Gamma W. \quad (2)$$

 ∂k



Рис. 1. Вычисленный в рамках самосогласованной задачи поток протонов космических лучей как функция кинетической энергии и экспериментальные данные. Названия экспериментов представлены в подписи в левом верхнем углу.

Здесь N(p) — спектр частиц в пространстве импульсов, v_A — альвеновская скорость, которая определяется плотностью газа, зависящей от высоты, D — коэффициент пространственной диффузии, k — волновое число и W(k) — спектр турбулентности. В правой части уравнения (1) стоят источники космических лучей, расположенные в диске. Для уравнения (2) источники турбулентности в диске задавались через граничное условие

$$W(k)|_{z=0} = W_0 k^{-5/3}.$$
 (3)

Важно, что коэффициент диффузии *D* в уравнении (1) и инкремент возбуждения волн Г в уравнении (2) определяются, соответственно, плотностью волн *W* и потоком частиц $D \frac{\partial N}{\partial z}$, как это, например, описано в статьях [6, 7]. Таким образом, уравнения (1) и (2) формируют нелинейную систему.

ПРОСТЕЙШИЕ РЕШЕНИЯ НЕЛИНЕЙНОЙ СИСТЕМЫ

Несмотря на то, что система уравнений (1), (2) является достаточно сложной, в работе [4] мы показали, что можно получить асимптотики решений в пределах малых и больших энергий.

На малых энергиях плотность космических лучей высока, и из-за этого члены, описывающие возбуждение волн, играют важную роль. Как следствие, коэффициент пространственной диффузии оказывается мал, и соответствующим слагаемым в уравнении (1) можно пренебречь. Таким образом, уравнение (1) сведется к обычному уравнению переноса, а плотность космических лучей в диске определяется простым выражением

$$N_0(p) = Q_0 p^{-2.3} v_A^{-1}.$$
 (4)

Размер гало в данном случае будет равен нулю, поскольку частицы убегают с альвеновской скоростью непосредственно с границы диска.

Для получения решения в пределе высоких энергий необходимо сделать предположение, о том, как альвеновская скорость зависит от высоты. Мы брали экспоненциальную зависимость плотности газа, которая хорошо согласуется с экспериментальными данными.

$$n(z) = n_0 \exp\left(-\frac{z}{z_n}\right).$$
 (5)

Магнитное поле, напомним, на масштабах задачи от высоты не зависит.

На больших энергиях возбуждение волн становится мало по сравнению с адиабатическими потерями, и членом в правой части (2) можно пренебречь. Также можно пренебречь и конвективным переносом в сравнении с диффузией. В этом случае спектр космических лучей определяется выражением

$$N_{0}(p) = \frac{Q_{0}z_{H}}{D_{0}} \exp\left(-\frac{z}{z_{H}}\right) p^{-4.3+\beta},$$
 (6)

$$z_H = \frac{2z_n}{\beta}.$$
 (7)

Здесь $\beta = \frac{5}{3}$ – показатель спектра турбулентности в лиске а D_{1} – коэффициент лиффузии в лиске

в диске, а D_0 — коэффициент диффузии в диске, определяемый через граничное условие (3).

Стоит отметить, что решение (6) совпадает с точностью до второго порядка по z со спектром частиц, получаемым в модели с фиксированным размером гало, причем размер гало оказывается равен z_H .

На промежуточных энергиях все члены в уравнениях (1) и (2) имеют одинаковый порядок. Размер гало z_{sh} при этом должен плавно меняться от нуля до z_H . Как мы показали в [4], простую аналитическую оценку решения можно получить в предположении, что при $z < z_{sh}$ в уравнении (1) работают только диффузионные члены, а при $z \ge z_{sh}$ — только конвективные. Решения в точке $z = z_{sh}$ должны гладко сшиваться. Дополнительно задача упрощается тем, что при $z < z_{sh}$ в таком случае самовозбуждением волн можно пренебречь и записать плотность турбулентности в виде

$$W = W_0 k^{-5/3} \Theta(z_{\infty} - z).$$
 (8)

Здесь $\theta(z)$ — функция Хэвисайда, а z_{∞} — некоторая высота, значение которой можно определить из

соображений, что решение должно стремиться к (6) на больших энергиях.

Как мы показали в [4] в этом случае в спектре протонов формируется характерная волнообразная особенность, которая наблюдается экспериментально. На рис. 1 показан вычисленный спектр протонов совместно с экспериментальными данными [8–11] для $z_n = 0.47$ кпк [12]. Указанная особенность проявляется в диапазоне 10 ГэВ–1 ТэВ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы показали, что в рамках самосогласованной задачи гало космических формируется за счет усиления или ослабления турбулентности, сгенерированной в диске Галактики и распространяющегося в направлении от него с альвеновской скоростью. Размер гало при этом растет от нуля на малых энергиях до некоторой фиксированной величины на больших энергиях. Предельный размер гало определяется характерным масштабом плотности ионизованного газа. Стоит отметить, что при использовании параметров газа, наблюдаемых экспериментально, положение характерных изломов в спектре протонов космических лучей согласуется с экспериментальными данными, что указывает на адекватность данной модели. Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 20-12-00047).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Гинзбург В.Л. // УФН. 1953. Т. 51. С. 343.
- 2. Гинзбург В.Л., Сыроватский С.И. Происхождение космических лучей. М.: Изд. АН СССР, 1963.
- Moskalenko I.V., Strong A.W. // Astrophys. J. 1998. V. 493. No. 2. P. 694.
- 4. Dogiel V.A., Ivlev A.V., Chernyshov D.O., Ko C.M. // arXiv: 2009.0879. 2020.
- Evoli C., Blasi P., Morlino G., Aloisio R. // Phys. Rev. Lett. 2018. V. 121. No. 2. Art. No. 021102.
- Skilling J. // Month. Not. Royal Astron. Soc. 1975. V. 172. P. 557.
- Skilling J. // Month. Not. Royal Astron. Soc. 1975. V. 173. P. 245.
- Aguilar M., Aisa D., Alpat B. et al. // Phys. Rev. Lett. 2015. V. 114. Art. No. 171103.
- Adriani O., Akaike Y., Asano K. et al. // Phys. Rev. Lett. 2019. V. 122. Art. No. 181102.
- 10. *Grebenyuk V., Karmanov D., Kovalev I. et al.* // Adv. Space Res. 2019. V. 64. P. 2546.
- 11. *Yoon Y.S., Anderson T., Barrau A. et al.* // Astrophys. J. 2017. V. 839. Art. No. 5.
- 12. *Cordes J.M., Lazio T.J.W.* // arXiv: astro-ph/0207156. 2020.

Propagation of cosmic rays in the galactic halo with self-excited waves

D. O. Chernyshov^a, *, V. A. Dogiel^a, A. V. Ivlev^b

^aLebedev Institute of Physics RAS, Theoretical Physics Division, Moscow, 119991 Russia ^bMax-Planck-Institut fur Extraterrestrische Physik, D-85748 Garching, Germany *e-mail: chernvshov@lpi.ru

We present a simple self-consistent model that allows us to obtain parameters of the Galactic cosmic rays halo. We demonstrate that the size of the halo depends on the energy of cosmic rays, monotonically approaching a constant value at high energies. In this model, the high-energy halo size is determined by the characteristic size of the ionized gas component of the Galaxy.