

УДК 524.1

## О ДИФФУЗИИ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ С ОБРАТНЫМ ВЛИЯНИЕМ НА КАСКАД МАГНИТОЗВУКОВЫХ ВОЛН В МЕЖЗВЕЗДНОЙ СРЕДЕ

© 2021 г. В. С. Птускин<sup>1</sup> \*, В. Н. Зиракашвили<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн имени Н.В. Пушкова  
Российской академии наук, Москва, Россия

\*E-mail: vptuskin@izmiran.ru

Поступила в редакцию 19.10.2020 г.

После доработки 19.11.2020 г.

Принята к публикации 28.12.2020 г.

Уравнение переноса космических лучей в Галактике решается совместно с уравнением для плотности энергии магнитогидродинамической турбулентности. Полученные спектры ядер в космических лучах с энергиями  $10^6$ – $10^{11}$  эВ согласуются с данными наблюдений, включая пик в отношении потоков вторичных ядер к первичным при энергии порядка 1 ГэВ/нуклон.

DOI: 10.31857/S0367676521040311

### ВВЕДЕНИЕ

Одной из особенностей энергетических спектров галактических космических лучей являются наблюдаемые при энергии порядка 1 ГэВ/нуклон пики в отношениях потоков вторичных ядер, возникающих в результате фрагментации первичных ядер в межзвездной среде, к соответствующим потокам первичных ядер, непосредственно ускоряемых в источниках. Эта особенность возникает при переносе космических лучей в Галактике, но ее конкретный механизм остается не ясным [1]. Возможное объяснение может быть связано с обменом энергией между заряженными частицами и рассеивающими их магнитогидродинамическими (МГД) волнами. Взаимодействие носит резонансный характер – частицы с гирорадиусом  $r_g$  в основном рассеиваются волнами с волновыми числами  $k \sim r_g^{-1}$ . Спектр частиц, вышедших из источников, искажается в межзвездной среде за счет стохастического дополнительного ускорения частиц турбулентностью. Это искажение существенно при малых энергиях и мало при энергиях выше 10–30 ГэВ/нуклон, что объясняет наблюдаемые формы энергетических спектров первичных и вторичных частиц [2]. В расчетах предполагалось, что турбулентность имеет спектр колмогоровского типа. Имеются указания [3] на то, что эта модель встречается с трудностями при интерпретации наблюдений диффузного синхротронного галактического радиоизлучения, генерируемого электронной компонентой космических лучей. Еще одна трудность состоит в том, что в современной теории межзвездной турбулентности [4] нелинейный колмогоровский каскад относится к альфвеновским волнам, распространяющимся преимущественно поперек

среднего магнитного поля. Такие волны не эффективны для рассеяния частиц космических лучей. Последняя трудность снимается для быстрых магнитозвуковых волн, которые могут обеспечить рассеяние и диффузию космических лучей [5]. В модели [6] рассматривалось взаимодействие космических лучей с каскадом магнитозвуковых волн – каскадом Ирошникова–Крейкнана. Этот каскад сравнительно медленный и взаимодействие волна-частица приводит к его сильному затуханию в коротковолновой области, что приводит к снижению эффективности рассеяния частиц ГэВ-ных энергий, быстрому выходу космических лучей из Галактики и уменьшению производства вторичных ядер. Это позволяет объяснить наблюдения при энергиях выше нескольких сотен МэВ/нуклон. Последующие измерения потоков вторичных ядер бора (В, вторичные ядра) и углерода (С, первичные ядра) в межзвездной среде в эксперименте Voyager 1 [7] показали, что предсказываемое отношение В/С сильно завышено при малых энергиях  $E < 150$  МэВ/нуклон. В представленных ниже расчетах мы используем уточненное уравнение для описания нелинейного взаимодействия магнитозвуковых волн, что позволяет получить согласие с экспериментальными данными. Начальная стадия этой работы была описана в [8].

### МОДЕЛЬ С САМОСОГЛАСОВАННЫМ КОЭФФИЦИЕНТОМ ДИФФУЗИИ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

Самосогласованный коэффициент диффузии космических лучей рассчитывается с помощью совместного решения диффузионного уравне-

ния переноса космических лучей и дифференциально-интегрального уравнения для плотности энергии случайных магнитозвуковых волн в межзвездной среде.

Мы используем упрощенный одномерный вариант диффузионной модели распространения космических лучей в Галактике с бесконечно тонкими галактическим диском, расположенным в плоскости  $z = 0$ , где  $z$  – координата поперек диска. Предполагается, что диффузия космических лучей происходит в Галактике с плоским гало и поглощающей границей при  $|z| = H$ , что соответствует условию свободного выхода космических лучей в межгалактическую среду на границах гало. Уравнение переноса для стабильных ядер космических лучей в этом случае имеет вид [2, 9, 10]:

$$\frac{\Psi}{X} + \frac{\sigma}{m} \Psi + \frac{\partial}{\partial E} \left[ \left( \frac{dE}{dx} \right)_{ion} \Psi \right] = \frac{q(p)}{\mu v}, \quad X = \frac{\mu v H}{2D}. \quad (1)$$

Здесь  $\Psi(p, z)$  – функция распределения частиц по импульсам  $p$ ,  $v$  – скорость частицы,  $D(p, z)$  – коэффициент диффузии космических лучей; второй член в уравнении (1) описывает ядерное взаимодействие с межзвездным газом ( $\sigma$  – сечение ядерной фрагментации), член  $\left( \frac{dE}{dx} \right)_{ion} < 0$  описывает ионизационные потери частиц, проходящих толщину вещества  $x$ ,  $m$  – масса протона,  $\mu$  – поверхностная плотность газа галактического диска,  $q$  – производство космических лучей в источниках и в процессе ядерной фрагментации. Коэффициент диффузии определяется формулой  $D = 0.3 v r_g B^2 / k_{res} W(k_{res})$ , где  $W(k_{res})$  – плотность энергии волн с резонансным волновым числом  $k_{res} = r_g^{-1}$ ,  $r_g = pc / ZeB$  ( $Ze$  – заряд частицы,  $c$  – скорость света,  $B$  – напряженность магнитного поля). Для спектра случайных магнитозвуковых волн в инерционной области  $W(k) \sim k^{-3/2}$ , что дает зависимость  $D \sim v r_g^{1/2}$ .

Для плотности энергии магнитозвуковых волн в межзвездной среде используем уравнение

$$C_m V_a \frac{d}{dk} \left( k W(k) \int_0^k dk_1 \frac{k_1 W(k_1)}{\left( \frac{B^2}{4\pi} \right)} \right) = -2 \Gamma_{cr} W(k), \quad (2)$$

$$\Gamma_{cr}(k) = \frac{\pi Z^2 e^2 V_a^2}{2 \gamma_{obs} c^2 k} \Psi(k).$$

Здесь  $C_m$  – численная константа,  $V_a$  – альфвеновская скорость. Левая часть уравнения (2) основана на сильном упрощении выражений, полученных в расчетах нелинейных трехволновых процессов распадов и слияний МГД волн [11–13].

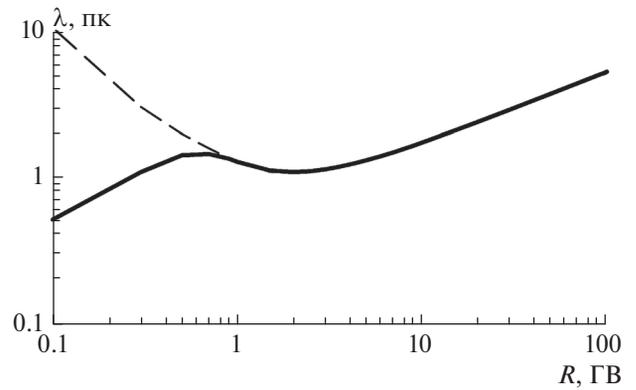


Рис. 1. Рассчитанная длина свободного диффузионного пробега космических лучей в Галактике  $\lambda = 3D/v$  как функция магнитной жесткости  $R$ : численный расчет (сплошная линия); аналитическое решение без учета ионизационных потерь в межзвездной среде (штриховая линия).

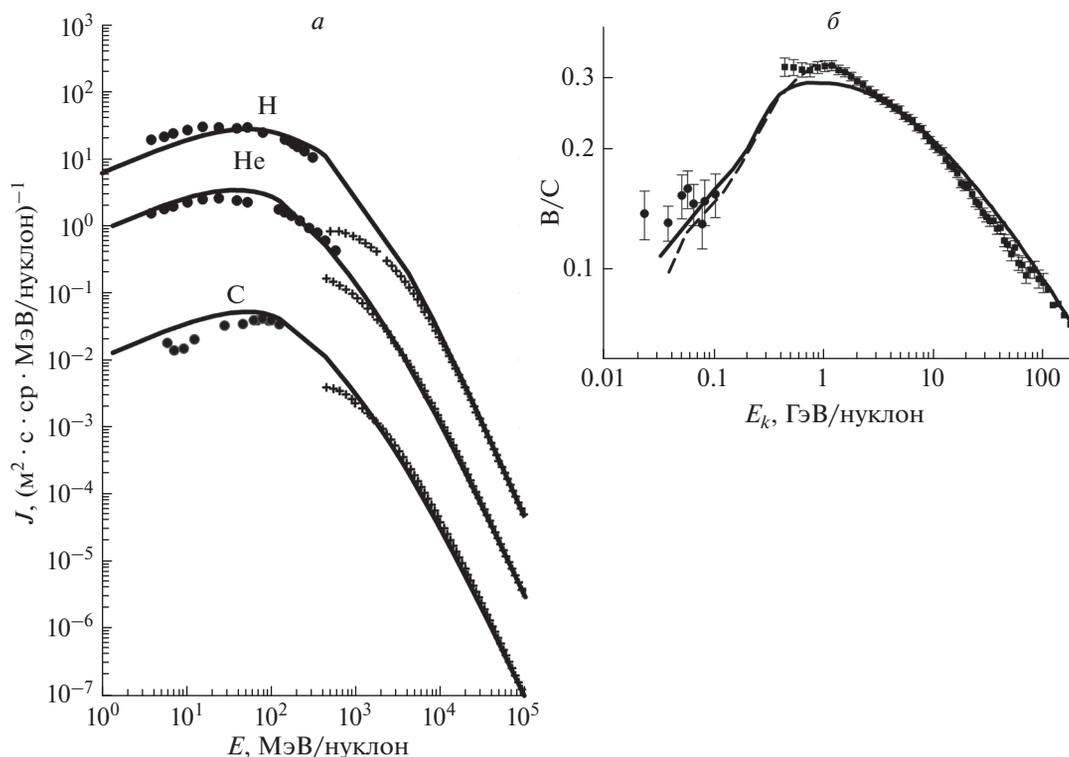
Интегральный член обеспечивает перекачку волн из длинноволновой в коротковолновую области. Правая часть уравнения содержит декремент затухания волн за счет взаимодействия с частицами  $\Gamma_{cr}$  ( $\gamma_{obs}$  – показатель спектра космических лучей при его степенной аппроксимации) [8].

Если энергетическими потерями в уравнении (1) можно пренебречь (это условие выполняется для частиц с энергией выше нескольких сотен МэВ/нуклон), то система уравнений (1), (2) допускает аналитическое решение и приводит к следующему выражению для коэффициента диффузии:

$$D = D_0 \frac{\int_0^k dk_1 (1 + 0.5 \alpha_{k_1})}{(k k_L)^{1/2}} \times \exp \left[ -\frac{1}{2} \int_{k_L}^k \frac{dk_2}{\int_{k_L}^{k_2} dk_1 (1 + 0.5 \alpha_{k_1})} \right], \quad \alpha_k = \frac{3 \pi e^2 V_a q(p)}{2 C_m c^2 v k}. \quad (3)$$

Здесь  $D_0$  – коэффициент диффузии, не искаженный диссипацией волн на космических лучах,  $k = r_g^{-1}$ ,  $k_L^{-1}$  – основной масштаб турбулентности.

Штриховая линия на рис. 1 показывает рассчитанную по формуле (3) длину свободного диффузионного пробега  $\lambda = 3D/v$  как функцию магнитной жесткости  $R = pc/Z$ . Численное решение с учетом ионизационных потерь показано сплошной линией. Предполагается, что спектр протонов в источниках космических лучей имеет вид  $q \sim p^{-2.4}$  при  $R \geq 1$  ГВ, и  $p^{-1.4}$  при  $R < 1$  ГВ, спектр остальных ядер  $p^{-2.25}$  и  $p^{-1.25}$  соответственно;  $\mu =$



**Рис. 2.** Рассчитанные и экспериментальные потоки ядер в космических лучах: спектры протонов, гелия и углерода (а); отношение потоков  $V/C$  (б). Показаны данные экспериментов Voyager 1 [7] при малых энергиях и AMS-02 [14] при высоких энергиях. Для сравнения штриховой линией показано отношение  $V/C$  в межзвездной среде, полученное в работе [15].

$= 2.4 \text{ мг см}^{-2}$ , высота гало  $H = 4 \text{ кпк}$ , концентрация газа в гало  $- 0.006 \text{ см}^{-3}$ , величина магнитного поля  $B = 5 \text{ мкГ}$ . Рассчитанные спектры протонов и ядер согласуются с наблюдениями при энергиях  $10 \text{ МэВ/нуклон}-100 \text{ ГэВ/нуклон}$ . Отношение потоков ядер  $V/C$  показано на рис. 2.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе, развивающей нашу работу [6], показано, что нелинейный каскад магнитозвуковых волн к большим волновым числам, описываемый уравнением (2), затухает в области коротких длин волн благодаря резонансному взаимодействию с частицами космических лучей. Это приводит к характерной энергетической зависимости коэффициента диффузии космических лучей в Галактике с минимумом при магнитной жесткости частиц порядка нескольких ГВ, что согласуется с измерениями содержания первичных и вторичных ядер.

Работа была частично поддержана РФФИ (проект № 19-02-00043). Авторы благодарны И.В. Москаленко и Е.С. Сею за сотрудничество.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Strong A.W., Moskalenko I.V., Ptuskin V.S. // Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. 2006. V. 57. No. 1. P. 285.
2. Seo E.S., Ptuskin V.S. // Astrophys. J. 1994. V. 431. No. 2. P. 705.
3. Orlando E. // Month. Not. Royal Astron. Soc. 2018. V. 475. No. 2. P. 2724.
4. Goldreich P., Sridhar S. // Astrophys. J. 1995. V. 438. No. 2. P. 763.
5. Xu S., Lazarian A. // Astrophys. J. 2020. V. 894. No. 1. Art. No. 63.
6. Ptuskin V.S., Moskalenko I.V., Jones F.C. et al. // Astrophys. J. 2006. V. 642. P. 902.
7. Cummings A.C., Stone E.C., Heikkila D.C. et al. // Astrophys. J. 2016. V. 831. P. 18.
8. Птускин В.С., Зиракашвили В.Н., Сею Е.С. // Изв. РАН. Сер. физ. 2017. Т. 81. № 4. С. 474; Ptuskin V.S., Zirakashvili V.N., Seo E.S. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2017. V. 81. No. 4. P. 437.
9. Ptuskin V.S., Soutoul A. // Astron. Astrophys. 1998. V. 337. No. 2. P. 859.
10. Jones F.C., Lukasiak A., Ptuskin V.S., Webber W. // Astrophys. J. 2001. V. 547. No. 1. P. 264.
11. Chandran B.D.G. // Phys. Rev. Lett. 2005. V. 95. P. 265004.
12. Захаров В.Е., Сагдеев Р.З. // ДАН СССР. 1970. Т. 192. № 2. С. 297; Zakharov V.E., Sagdeev R.Z. // Sov. Phys. Doklady. 1970. V. 15. No. 2. P. 439.
13. Чауей И.В., Шишов В.И. // Геомагн. и аэроном. 1961. Т. 25. № 1. С. 1.

14. *Aguilar M., Ali Cavazonza L., Alpat B. et al. // Phys. Rev. Lett.* 2018. V. 120. P. 021101.
15. *Boschini M.J., Della Torre S., Gervasi M. et al. // Astrophys. J.* 2020. V. 889. No. 1. P. 167.

## **On the diffusion of cosmic rays with a back reaction on the cascade of magnetosonic waves in the interstellar medium**

**V. S. Ptuskin<sup>a,\*</sup>, V. N. Zirakashvili<sup>a</sup>**

*<sup>a</sup>Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation,  
Russian Academy of Sciences, Moscow, 108840 Russia*

*\*e-mail: vptuskin@izmiran.ru*

The transport equation of cosmic rays in the Galaxy is solved simultaneously with the equation for the energy density of the turbulence. The obtained cosmic ray spectra of nuclei with energies  $10^5$  to  $10^{11}$  eV are consistent with observational data including the peak in the ratio of secondary to primary nuclei fluxes at about 1 GeV/nucleon.