ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ, 2021, том 85, № 4, с. 482–485

УДК 524.3-6

МОЛОДЫЕ ЗВЕЗДНЫЕ СКОПЛЕНИЯ КАК ИСТОЧНИКИ ОБОГАЩЕННЫХ ^{22}Ne ГАЛАКТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

© 2021 г. М. Е. Каляшова[1, 2, *], А. М. Быков[1], С. М. Осипов[1]

[1]*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия*

[2]*Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия*

**E-mail: m.kalyashova@gmail.com*

Поступила в редакцию 19.10.2020 г.
После доработки 19.11.2020 г.
Принята к публикации 28.12.2020 г.

Избыток ^{22}Ne в изотопном составе космических лучей был обнаружен более сорока лет назад. Измеренное изотопное отношение ^{22}Ne/^{20}Ne в космических лучах выше, чем в солнечном ветре, более чем в 5 раз. Процессы в звездах типа Вольфа–Райе были предложены ранее как возможные источники данной аномалии. Рассмотрены процессы ускорения космических лучей в массивных скоплениях молодых звезд, содержащих популяцию звезд Вольфа–Райе, как потенциальные источники галактических космических лучей, обогащенных ^{22}Ne. Представлены оценки доли космических лучей от таких источников, необходимой для того, чтобы удовлетворить наблюдаемому изотопному отношению ^{22}Ne/^{20}Ne.

DOI: 10.31857/S0367676521040141

ВВЕДЕНИЕ

Изучение химического и изотопного состава космических лучей (КЛ) может предоставить важную информацию об источниках, механизмах ускорения и переноса КЛ в Галактике [1]. Химический состав галактических КЛ изучался в рамках нескольких экспериментов – IMP-7, ISEE, Voyager, ACE-CRIS и других [2]. Установлено, что распространенности изотопов большинства химических элементов в солнечной системе и в космических лучах совпадают. Однако имеются и различия: ^{12}C/^{16}O, ^{58}Fe/^{56}Fe, ^{22}Ne/^{20}Ne, последнее из которых было количественно изучено по данным ACE-CRIS в диапазоне энергий $84 \leq E/M \leq 273$ МэВ/нуклон. Было показано, что ^{22}Ne/^{20}Ne = 0.07 в солнечном ветре, тогда как ^{22}Ne/^{20}Ne = 0.387 ± 0.027 в галактических космических лучах, что соответствует их обогащению ^{22}Ne в 5.3 ± 0.3 раза.

Существует класс звезд [3], вероятно, способных производить значительно больше ^{22}Ne, чем ^{20}Ne – звезды Вольфа–Райе, а именно их углеродная последовательность. Звезды Вольфа–Райе – одна из ступеней эволюции массивных звезд, характеризующаяся мощным звездным ветром, очень высокой светимостью и температурой, а также наличием в спектре широких и интенсивных эмиссионных линий – водорода, гелия, азота, углерода, кислорода – в зависимости от того, на какой стадии находится звезда. Во время горения гелия в звезде Вольфа–Райе почти весь ^{14}N превращается в ^{22}Ne через цепь ядерных реакций ^{14}N(α, γ) ^{18}F($e^+\nu$) ^{18}O(α, γ) ^{22}Ne. Обогащенное ^{22}Ne вещество затем выбрасывается мощным звездным ветром звезды Вольфа–Райе.

Механизм ускорения частиц в таких источниках до высоких энергий остается предметом дискуссии. Например, было предложено, что ускорение космических лучей может происходить в галактических сверхкавернах на ударных волнах от многочисленных взрывов массивных O- и B-звезд как сверхновых [4, 5]. Другая идея состоит в том, что галактические космические лучи рождаются в ветрах массивных звезд, а ускоряются на ударных волнах от последующего взрыва сверхновой в стадии Седова [6].

Мы рассматриваем молодые компактные звездные скопления (такие как, например, Westerlund 1, Quintuplet) в качестве основных источников обогащенных ^{22}Ne КЛ. В таких объектах частицы могут ускоряться на взаимодействующих ударных волнах от сталкивающихся ветров массивных звезд [7, 8]. Подобные исследования уже проводились: например, Гупта и др. [9] моде-

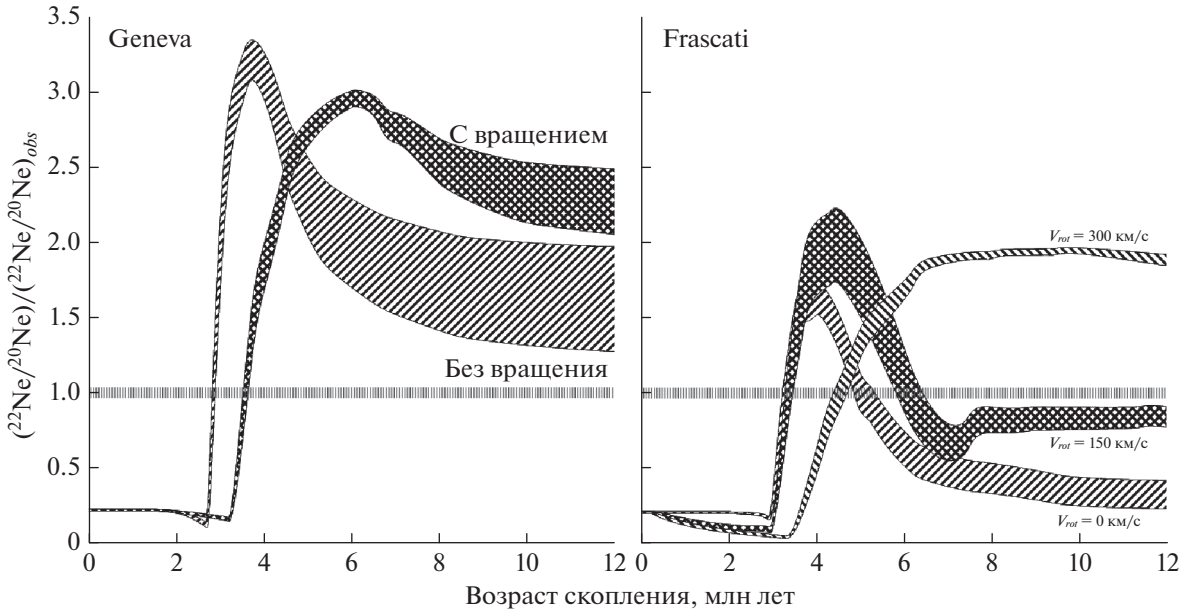

Рис. 1. Зависимость отношения (^{22}Ne/^{20}Ne), в веществе, ускоряемом в массивном звездном скоплении, к наблюдаемому в КЛ $(^{22}Ne/^{20}Ne)_{obs} = 0.387$ от возраста звездного скопления для моделей звездной эволюции Geneva и Frascati, с учетом различных скоростей вращения звезд и для интервала показателей степени начальной функции масс в скоплении 1.8–2.6 (верхний предел содержания ^{22}Ne соответствует более пологой начальной функции масс).

лировал ускорение КЛ на ударной волне коллективного ветра массивных звезд и ударных волнах остатков сверхновых в плотных и рассеянных звездных скоплениях, и соответствующее количество ^{22}Ne. В настоящей работе количественно исследовано, какая доля галактических КЛ может ускоряться в молодых массивных звездных скоплениях, чтобы обеспечить нужное количество ^{22}Ne.

МОДЕЛИРОВАНИЕ

Для получения изотопного состава ветров массивных звезд мы используем модели звездного нуклеосинтеза двух научных групп Geneva [10] и Frascati [11]. Была сделана кусочно-линейная интерполяция всех нужных величин (массовая доля изотопов неона в звездном ветре, скорость потери массы звездой, время жизни звезды) для всех масс от 15 до 120 $M_\odot$ (масс Солнца).

Чтобы найти отношение ^{22}Ne/^{20}Ne для всего скопления, необходимо проинтегрировать количество ^{22}Ne и ^{20}Ne, генерирующееся в звездах с определенной массой, вместе с начальной функцией масс (НФМ), т.е. распределением звезд по массам в скоплении, в диапазоне от 15 до 120 $M_\odot$. Показатель степени НФМ, как правило, определяется как ≈2.3–2.7 [12], но для некоторых молодых скоплений (например, Westerlund 1, Arches) НФМ может иметь куда меньший показатель: ≈1.8, что соответствует большему количеству массивных звезд [13]. Мы приводим результаты для разброса показателей НФМ от 1.8 до 2.6.

На рис. 1 приведена зависимость отношения масс изотопов неона ^{22}Ne/^{20}Ne, выброшенных звездным ветром в скоплении, от возраста скопления. Можно видеть, что массивные звездные скопления по достижении возраста ~3 млн лет могут производить и ускорять большое количество ^{22}Ne. Сравнивая с наблюдениями, можно сделать оценку количества галактических космических лучей от таких источников: 30–50% в зависимости от параметров.

РАСЧЕТ ЭНЕРГЕТИКИ

Необходимо проверить, что предложенный механизм генерации части галактических КЛ сможет обеспечить нужный поток КЛ на Земле. В работе [14] на основании интерполяций моделей звездного нуклеосинтеза [10] приводятся данные по мощности совокупности звездных ветров звезд Вольфа-Райе Галактики $L_{WR} \approx 4.1 \cdot 10^{40}$ эрг · с$^{-1}$. По оценке [15] доля звезд Вольфа–Райе, находящихся в компактных скоплениях, составляет около 22%, таким образом, мощность ветров звезд Вольфа–Райе в скоплениях равна $L \approx 9 \cdot 10^{39}$ эрг · с$^{-1}$. С учетом того, что эффективность конвертации энергии ветра в ускорение КЛ $\eta \approx 0.1$, соответствующая мощность $L_{CR} \approx 9 \cdot 10^{38}$ эрг · с$^{-1}$. Чтобы

понять, какая доля энергии приходится на интересный нам диапазон энергий около 1 ГэВ, воспользуемся степенным энергетическим спектром ускорения частиц на двух ударных волнах в области низких энергий: $f(p) \propto p^{-\alpha}$, где p – импульс частицы.

$$L_{CR} = \int_{E_{min}}^{E_{max}} \frac{dL}{dE} dE \propto \int_{p_{min}}^{p_{max}} 4\pi p^2 f(p) T(p) dp, \qquad (1)$$

где dL/dE – мощность КЛ на единицу энергии, $T(p)$ – кинетическая энергия частицы. Ускорение КЛ предполагается без участия сверхновых, на ударных волнах от ветров массивных звезд, поэтому рассматривается энергетический диапазон от $E_{min} = 10^8$ эВ до $E_{max} = 10^{10}$ эВ [7]. Для энергии 1 ГэВ $dL/dE = 1.73 \cdot 10^{38}$ эрг $\cdot$ с$^{-1}$/ГэВ при показателе степени спектра $\alpha = 4$ и $dL/dE = 1.95 \cdot 10^{38}$ эрг $\cdot$ с$^{-1}$/ГэВ для более мягкого спектра $\alpha = 5$, так что для оценки можно взять значение $dL/dE = 1.8 \cdot 10^{38}$ эрг $\cdot$ с$^{-1}$/ГэВ. Как найти наблюдаемый поток на Земле? Используя общее решение уравнения диффузии, можно найти поток на расстоянии r от источника.

$$\frac{dN_{Earth}}{dE} = \frac{1}{E_1} \frac{dJ/dE}{Dr} \frac{c}{4\pi} = \frac{1}{E_1} \frac{dL/dE}{4\pi Dr} \frac{\upsilon}{4\pi}, \qquad (2)$$

где D – коэффициент диффузии, r – среднее расстояние до источника (галактического массивного звездного скопления), υ – скорость частиц, J – поток КЛ в источнике, E_1 – исследуемая энергия 1 ГэВ.

Примем $r = 5$ кпк, $D = 10^{28}$ см$^2 \cdot$ с$^{-1}$, $\upsilon = 0.86c$ для ГэВ-ных частиц, где c – скорость света. Тогда

$$\frac{dN_{Earth}}{dE} = 1.22 \cdot 10^3 \frac{1}{\text{ГэВ} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{ср} \cdot \text{с}}. \qquad (3)$$

Наблюдаемый в спектре космических лучей поток $dN_{obs}/dE \approx 2 \cdot 10^3$ (ГэВ $\cdot$ м$^2 \cdot$ ср $\cdot$ с)$^{-1}$ [16], т.е. с энергетической точки зрения максимум ~60% галактических КЛ может быть ускоренным в молодых массивных звездных скоплениях веществом ветров звезд Вольфа–Райе.

Можно оценить [10], что отношение ^{22}Ne/^{20}Ne в веществе, выбрасываемом звездой на протяжении стадии Вольфа–Райе, примерно равно 3, тогда как наблюдаемое отношение ^{22}Ne/^{20}Ne = 0.387, т.е. достаточно, чтобы 13% всех КЛ были из вещества звезд Вольфа–Райе. Если говорить о массивных звездах в целом, оценка мощности их ветров $L_{wind} \approx 1.1 \cdot 10^{41}$ эрг $\cdot$ с$^{-1}$ [14], а доля звезд, которые входят в скопления – 42% [15], то есть их мощность $L_{wind} \approx 4.62 \cdot 10^{40}$ эрг $\cdot$ с$^{-1}$. Таким образом, проводя расчет, аналогичный данному выше, можно убедиться, что энергетики ветров массивных звезд в скоплениях хватает для нужных нам 30–50% галактических КЛ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрены звезды Вольфа–Райе в молодых массивных звездных скоплениях как источники обогащенных ^{22}Ne галактических космических лучей. Показано, что массивное скопление старше 3 млн лет при некоторых параметрах (высокая скорость вращения, пологая НФМ) может выбрасывать вещество с в 2–3 раза большим отношением ^{22}Ne/^{20}Ne, чем наблюдается в космических лучах. Основным источником обогащения КЛ ^{22}Ne являются звезды Вольфа–Райе – члены скоплений, а ускорение предполагается на взаимодействующих ударных волнах от сталкивающихся ветров массивных звезд. Чтобы удовлетворить наблюдаемому отношению ^{22}Ne/^{20}Ne в КЛ, компактные массивные скопления должны быть источником 30–50% галактических КЛ. Расчет энергетики показывает, что предложенная модель не противоречит наблюдаемым потокам КЛ.

Исследования М.Е. Каляшовой выполнены при финансовой поддержке РФФИ (проект № 20-32-90156). Работы А.М. Быкова и С.М. Осипова выполнены в рамках темы Государственного задания ФТИ им. А.Ф.Иоффе 0040-2019-0025. Результаты работы были получены с использованием вычислительных ресурсов суперкомпьютерного центра Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (scc.spbstu.ru).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Птускин В.С.* // УФН. 2007. Т. 177. С. 558.
2. *Binns W.R., Wiedenbeck M.E., Arnould M. et al.* // Astrophys. J. 2005. V. 634. P. 351.
3. *Casse M., Paul J.A.* // Astrophys. J. 1982. V. 258. P. 860.
4. *Bykov A.M.* // Space Sci. Rev. 2001. V. 99. P. 317.
5. *Higdon J.C., Lingenfelter R.E.* // Astrophys. J. 2003. V. 590. P. 822.
6. *Prantzos N.* // Astron. Astrophys. 2012. V. 538. Art. No. 80.
7. *Bykov A.M.* // Astron. Astrophys. Rev. 2014. V. 22. P. 77.
8. *Bykov A.M., Marcowith A., Amato E. et al.* // Space Sci. Rev. 2020. V. 216. Art. No. 42.
9. *Gupta S., Nath B.B., Sharma P.* // Month. Not. Royal Astron. Soc. 2020. V. 493. No. 3. P. 3159.
10. *Ekström S., Georgy C., Eggenberger P. et al.* // Astron. Astrophys. 2012. V. 537. Art. No. 146.
11. *Limongi M., Chieffi A.* // Astrophys. J. Suppl. Ser. 2018. V. 237. No. 1. P. 13.
12. *Salpeter E.E.* // Astrophys. J. 1955. V. 121. P. 161.

13. *Lim B., Chun M.-Y., Sung H. et al.* // Astron. J. 2013. V. 145. P. 46.
14. *Seo J., Kang H., Ryu D.* // J. Korean Astron. Soc. 2018. V. 51. P. 37.
15. *Rate G., Crowther P.A., Parker R.J.* // Mon. Not. Royal Astron. Soc. 2020. V. 495. No. 1. P. 1209.
16. *Evoli C.* The cosmic-ray energy spectrum. Zenodo, 2018.

Young massive star clusters as sources of ^{22}Ne-enriched galactic cosmic rays

M. E. Kalyashova[a, b, *], A. M. Bykov[a], S. M. Osipov[a]
[a] *Ioffe Institute RAS, St. Petersburg, Russia*
[b] *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia*
**e-mail: m.kalyashova@gmail.com*

There is a significant overabundance of ^{22}Ne in galactic cosmic rays – ^{22}Ne/^{20}Ne in cosmic rays exceeds 5 times the Solar System value. Young massive star clusters, containing the population of Wolf Rayet stars, are discussed as potential sources of ^{22}Ne-enriched galactic cosmic rays of GeV energies. The estimate of a fraction of cosmic rays from that sources, needed to fit the observed ^{22}Ne/^{20}Ne, is presented.