

УДК 524.1–352

ДОЛГОЖИВУЩИЕ РЕКУРРЕНТНЫЕ ПОТОКИ ЭНЕРГИЧНЫХ ИОНОВ ИЗ КОРОНАЛЬНЫХ ДЫР НА СОЛНЦЕ

© 2024 г. М. А. Зельдович^{1, *}, Ю. И. Логачев¹

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына, Москва, Россия

*E-mail: ms.zeldovich@mail.ru

Поступила в редакцию 24.05.2023

После доработки 16.10.2023

Принята к публикации 31.10.2023

Представлены результаты изучения относительного содержания и энергетических спектров надтепловых ионов ${}^4\text{He}$, С, О и Fe в потоках частиц из долгоживущих приэкваториальных корональных дыр. Установлено, что энергетические спектры ионов имели степенную либо экспоненциальную форму и, в ряде событий, в области малых энергий ионов ($\sim 0.2\text{--}1.5$ МэВ/нуклон) наблюдались повышенные потоки частиц, создавая излом в спектрах, что может быть обусловлено добавочными ионами, ускоренными за пределами 1 а.е.

DOI: 10.31857/S0367676524020274, EDN: RPVZCU

ВВЕДЕНИЕ

Межпланетное пространство – область распространения заряженных частиц, как пришедших из Галактики, так и из Солнца. В работе рассматриваются потоки энергичных ионов и ионов солнечного ветра из отдельных областей с очень низким излучением мягкого рентгена, корональных дыр (КД) из приэкваториальных областей при спокойном Солнце в отсутствие различных возмущающих факторов. За распространение заряженных частиц отвечает магнитное поле, которое формируется в пространстве солнечным ветром, во всяком случае, вблизи Солнца (от 0.1 до 10 а.е.), где главную роль играет направление и скорость движения солнечного ветра. Особо выделяются разноскоростные потоки солнечного ветра, коротирующие области взаимодействия (coronal interaction regions – CIR), образующие в пространстве различные области усиленного и разреженного магнитного поля, изучению поведения частиц в которых посвящены работы [1–4].

В ряде работ рассматривается связь коротирующих потоков ионов солнечного ветра из корональных дыр и энергичных (0.04–1.5 МэВ/нуклон) ионов. Устойчивый поток энергичных ионов в замыкающей области взаимодействия, или так называемой области разрежения, всегда наблюдался в условиях отсутствия ударных волн [5–7].

В данной работе изучались спектры ионов, ускоренных на конечной стадии развития потока

энергичных ионов из КД, в области разрежения, где ударные волны отсутствовали. Интенсивности ионов ${}^4\text{He}$, С, О и Fe с энергиями 0.04–2 МэВ/нуклон и содержание тепловых (максвелловских) ионов в солнечном ветре вблизи 1 а.е. получены по данным приборов ULEIS и SWICS, установленных на к.а. ACE [8]. Ранее было получено [9,10], что во время понижения солнечной активности в 23 и 24 циклах величины надтепловых С/О и Fe/О из КД соответствовали соотношениям ионов теплового солнечного ветра из этих КД. На спаде активности 23 цикла в 2006–2009 г. на Солнце были обнаружены несколько коротирующих корональных дыр (КД), наблюдавшихся в течение более одного солнечного оборота [11]. Наиболее длительные рекуррентные КД (C H1 и C H2), наблюдавшиеся в этот период, существовали в течении 38 и 27 солнечных оборотов, соответственно. Эти корональные дыры за время своего существования полностью не исчезали и не сильно изменяли свое расположение на поверхности Солнца [11]. Потоки солнечного ветра и частиц надтепловых энергий из этих дыр также существовали постоянно без перерывов. Одной из характеристик этих потоков являются энергетические спектры ионов, особенности которых отмечаются в этой статье. В распространения частиц в межпланетном пространстве важную роль играет межпланетное магнитное поле и его вариации, управляющие движением заряженных частиц [12].

ОТНОСИТЕЛЬНЫЕ СОДЕРЖАНИЯ ТЕПЛОВЫХ И НАДТЕПЛОВЫХ ИОНОВ В ПОТОКАХ ЧАСТИЦ ИЗ ДОЛГОЖИВУЩЕЙ КД

Величины относительного содержания тепловых и надтепловых (0.04–0.08 МэВ/нуклон) ионов He/O, C/O и Fe/O, являющиеся маркерами источников ионов, в потоках частиц из КД *СН1* в 23 цикле изучались в зависимости от максимальной скорости солнечного ветра из КД, которая приведена в [13]. Как видно из рис. 1, величины C/O и Fe/O в потоках надтепловых ионов из КД в среднем соответствуют значениям C/O и Fe/O в тепловых потоках солнечного ветра на 28 оборотах приэкваториальной КД *СН1*, и не демонстрируют видимую зависимость от скорости солнечного ветра. Отметим, что подобная картина наблюдалась для величин относительного содержания C/O и Fe/O в спокойное время солнечной активности в 23 цикле солнечной активности [14–16]. Полученный результат согласуется с предположением [9,10,14,15], что надтепловые ионы в потоке из КД являются высокотемпературным продолжением теплового (максвелловского) солнечного ветра из этой КД. В то же время величина отношений надтепловых ионов He/O в потоках частиц из некоторых КД превышала эти величины для тепловых ионов He/O (верхняя панель на рис. 1), что, возможно, является следствием притока добавочных ионов He из другого источника.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ ИОНОВ ИЗ КД

Энергетические спектры потоков ионов ^4He , C, O и Fe дают важную информацию об источниках частиц. В работе изучены спектры ионов с энергиями 0.04–2 МэВ/нуклон в потоках солнечного ветра из долгоживущих приэкваториальных корональных дыр на спаде солнечной активности в 23 цикле. Полученные нами ранее результаты [14–16] показали, что надтепловые ионы из КД являются высокотемпературным продолжением «максвелловского» энергетического распределения тепловых ионов солнечного ветра, т.е. представляют собой ускоренные тепловые ионы солнечного ветра. Как правило, спектры всех ионов описывались либо степенными законами, либо комбинацией степенного и экспоненциального законов [17,18], в то же время спектры ионов в потоках энергичных частиц из долгоживущей КД *СН1* в 2006–2007 гг., не следующих друг за другом периодов существования ионов из этой КД, имели некоторые особенности, наиболее очевидные в спектрах ^4He , представленных на рис. 2а. Видно, что на оборотах КД *СН1* в спектрах ионов ^4He в области энергий >100 кэВ/нуклон наблюдаются повышенные потоки частиц, создающие выраженный излом в спектрах.

На рис. 2б даны спектры ионов из корональной дыры на 14 обороте КД *СН2* [11]. Видно, что подобный излом наблюдается в спектрах всех ионов: ^4He , C, O и Fe. Эта особенность спектров может быть объяснена дополнительным приходом малоэнергичных ионов, ускоренных в областях гелиосферы, лежащих за пределами 1 а.е., и проникающих

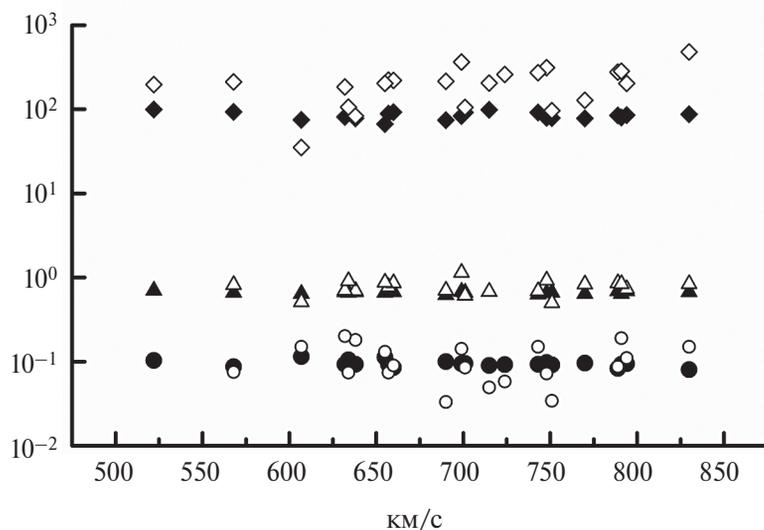


Рис. 1. Относительное содержание тепловых ионов солнечного ветра He/O (сплошные ромбы), C/O (сплошные треугольники) и Fe/O (сплошные кружки) и надтепловых ионов He/O (серые ромбы), C/O (пустые треугольники) и Fe/O (пустые кружки) с энергиями 0.04–0.08 МэВ/нуклон в потоках частиц из долгоживущей КД *СН1* [12] на 29 оборотах Солнца с начала ее существования (38 оборотов Солнца) в зависимости от максимальной скорости солнечного ветра из этой КД, по данным [14].

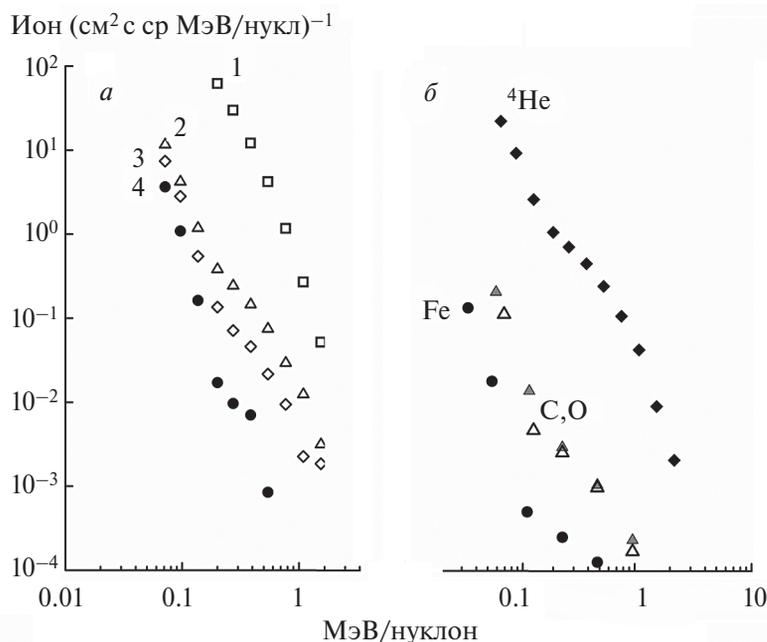


Рис. 2. Энергетические спектры надтепловых ионов ^4He , ускоренных в рекуррентных потоках частиц из изучаемой здесь долгоживущей КД *CH1* [12] (а) на четырех разных оборотах ее существования: 1) № 19 18–19/12/2007, 2) № 15 3/9/2007, 3) № 14 7/8/2007, 4) № 12 14–15/6/2007. Энергетические спектры надтепловых ионов ^4He (ромбы), С (серые треугольники), О (пустые треугольники) и Fe (черные кружки) в потоках ионов из КД на 14-м обороте существования *CH2* [12] (б), наблюдавшихся 15–16.08.2008.

во внутреннюю гелиосферу в результате диффузии, аналогичной при распространении различных заряженных частиц.

пределами 1 а.е., проникающих во внутреннюю гелиосферу в результате разных видов диффузии.

ОБСУЖДЕНИЕ

Ранее проведенное нами в [11] сравнение состава тепловых ионов в потоках СВ с составом надтепловых ионов из КД позволило предположить, что ускорение ионов до надтепловых энергий происходит в процессе движения потоков частиц от Солнца не только в момент создания и выхода потоков ионов из корональных дыр, но и на всем пути в межпланетном пространстве.

Результаты данной работы показывают, что надтепловые ионы из корональных дыр являются ионами максвелловского солнечного ветра, ускоренными на Солнце и/или в межпланетном пространстве и образующими постоянно существующий высокоэнергичный вклад в ионы солнечного ветра (надтепловой «хвост» в энергетическом распределении этих ионов). Энергетические спектры ускоренных ионов «хвоста» имеют разную зависимость от энергии, что говорит о различных механизмах их ускорения. Особое внимание обращается на зарегистрированный в энергетических спектрах добавок ионов малых энергий, который мог быть обусловлен частицами из областей гелиосферы за

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования потоков энергичных ионов из КД показали, что ускорение тепловых ионов солнечного ветра до надтепловых энергий наблюдается для всех КД во всей внутренней гелиосфере. В данной работе в низкоэнергичной части спектров ионов ^4He , С, О и Fe в потоках из долгоживущих корональных дыр *CH1* и *CH2* на нескольких оборотах Солнца обнаружены изломы, которые обеспечиваются дополнительным ускорением ионов, возможно, за пределами 1 а.е.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Neugebauer M., Snyder C.W.* // *Science*. 1962. V. 138. P. 1095.
2. *Barnes C.W., Simpson J.A.* // *Astrophys. J.* 1976. V. 210. P. 91.
3. *Gosling J., Pizzo V.* // *Space Sci. Rev.* 1999. V. 89. P. 21.
4. *Richardson I.G.* // *Space Sci. Rev.* 2004. V. 111. No. 3. P. 267.
5. *Fisk L.A., Gloeckler G.* // *Space Sci. Rev.* 2007. V. 130. P. 153.

6. *Ebert R.W., Dayeh M.A., Desai M.I., Mason G.M.* // *Astrophys. J.* 2012. V. 749. No. 1. P. 73.
7. *Lepri S.T., Landi E., Zurbuchen T.H.* // *Astrophys. J.* 2013. V. 768. P. 94.
8. *Зельдович М.А., Ишков В.Н., Логачев Ю.И. и др.* // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2011. Т. 75. № 6. С. 825; *Zeldovich M.A., Ishkov V.N., Logachev Yu.I. et al.* // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2011. V. 75. No. 6. P. 776.
9. *Зельдович М.А., Логачев Ю.И., Сурова Г.М. и др.* // *Астрон. журн.* 2014. Т. 91. № 5. С. 474; *Zel'dovich M.A., Logachev Yu.I., Surova G.M. et al.* // *Astron. Reports.* 2014. V. 58. No. 5. P. 399.
10. <https://ACE.level2.data>.
11. *Зельдович М.А., Логачев Ю.И.* // *Космич. исслед.* 2023. Т. 61. № 1. С. 3; *Zeldovich M.A., Logachev Yu.I.* // *Cosmic Research.* 2023. V. 61. No. 1. P. 1.
12. *Кузнецов С.Н., Мягкова И.Н.* // *Изв. РАН. Сер. физ.* 1998. Т. 62. С. 1269.
13. https://solen.info/solar/coronal_holes.html.
14. *Zeldovich M.A., Kecskemety K., Logachev Yu I.* // *Month. Not. Royal. Astron. Soc.* 2021. V. 502. No. 2. P. 2961.
15. *Зельдович М.А., Логачев Ю.И.* // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2015. Т. 79. № 5. С. 657; *Zeldovich M.A., Logachev Yu.I.* // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2015. V. 79. No. 5. P. 603.
16. *Зельдович М.А., Логачев Ю.И., Сурова Г.М. и др.* // *Астрон. журн.* 2016. Т. 93. С. 675; *Zel'dovich M.A., Logachev Yu.I., Surova G.M. et al.* // *Astron. Reports.* 2016. V. 60. P. 687.
17. *Zhao L., Zurbuchen T.H., Fisk L.A.* // *Geophys. Res. Lett.* 2009. V. 36. Art. No. L14104.
18. *Fisk L.A., Gloeckler G.* // *Space Sci. Rev.* 2012. V. 173. No. 1–4. P. 433.
19. *Зельдович М.А., Логачев Ю.И.* // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2017. Т. 81. № 2. С. 159; *Zel'dovich M.A., Logachev Yu.I.* // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2017. V. 81. No. 2. P. 140.
20. *Зельдович М.А., Логачев Ю.И., Кечкемети К.* // *Астрон. журн.* 2019. Т. 96. № 6. С. 523; *Zel'dovich M.A., Logachev Yu I., Kecskemety K.* // *Astron. Reports.* 2019. V. 96. No. 6. P. 508.

Long-lived recurrent fluxes of energetic ions from solar coronal holes

M. A. Zeldovich¹ *, Yu. I. Logachev¹

Lomonosov Moscow State University, Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics Moscow, 119991 Russia

**e-mail: ms.zeldovich@mail.ru*

The results of studying the relative abundances and energy spectra of ⁴He, C, O, and Fe suprathermal ions in particle fluxes from a long-lived near-equatorial coronal holes are presented. It was found that the ion energy spectra had a power or exponential form and, in a number of events, increased particle fluxes were observed in the region of ion energies (~0.2–1.5 MeV/nucleon), creating a fracture in the spectra, which may be due to additional ions accelerated beyond 1 au.