

## ОБ УСКОРЕНИИ ТЯЖЕЛЫХ ЯДЕР НА СОЛНЦЕ

С. С. Коняхина, Л. В. Курносова, В. И. Логачев,  
Л. А. Разоренов, М. И. Фрадкин

В литературе указывается на различные возможные механизмы ускорения частиц на Солнце до энергий от десятков Мэв до нескольких Гэв. Однако многие из них встречаются с определенными трудностями /1/. В последние годы С. И. Сыроватским был предложен механизм "динамической" диссипации магнитного поля, приводящий к непосредственному переходу магнитной энергии в энергию ускоряемых частиц /2/. Этот механизм может, например, действовать, когда при смещении солнечных пятен вблизи нулевых линий магнитного поля возникают области разреженной плазмы с большими градиентами магнитных полей.

Сильное электрическое поле, возникающее в таких областях, ускоряет заряженные частицы. При сильном сближении пятен, если возникающий градиент магнитного поля в области разреженной плазмы достаточно велик, ускорение может оказаться весьма эффективным, и ускоряются практически все заряженные частицы в данной области. При этом ядерный состав солнечных космических лучей будет тот же, что и химический состав атмосферы Солнца в этой области. При меньшем сближении пятен, когда градиент магнитного поля не столь велик, непосредственная роль этого механизма может оказаться небольшой по сравнению со статистическим процессом ускорения ядер в результате их столкновений с возникающими мелкомасштабными неоднородностями магнитного поля.

Существенную роль в процессах ускорения играет скорость увеличения энергии ускоряемых частиц. При большой скорости роста энергии ионизационные потери энергии не существенны, и частицы ускоряются резинжекционно. В случае же более медленного

роста энергии из-за наличия ионизационных потерь ускоряются только те частицы, энергия которых превышает пороговую энергию инжекции. В случае теплового распределения частиц по скоростям некоторая доля частиц будет иметь энергию, превышающую пороговую энергию инжекции и будет, следовательно, ускоряться. обеднение спектра быстрыми частицами вблизи порога инжекции будет происходить вследствие столкновений частиц. При достаточно медленном процессе ускорения возникает стационарный поток частиц в "сверхтепловую" область энергий. Расчет величины этого потока в случае статистического механизма ускорения проведен в /3/. Для ионов с концентрацией  $N_1$  этот поток равен /4/

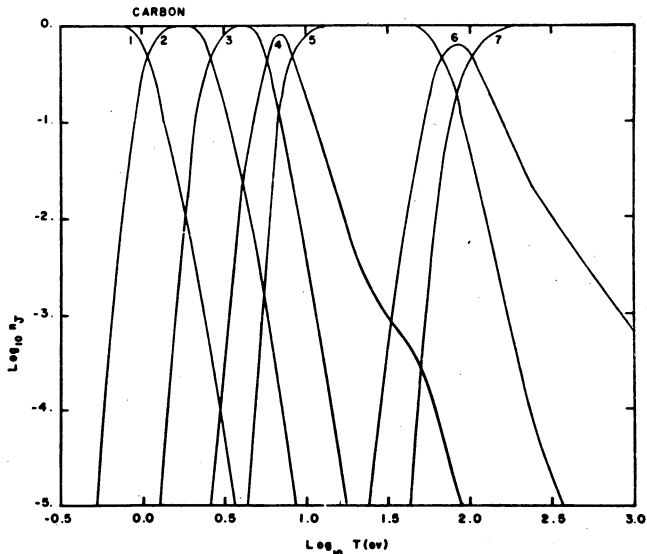
$$I = V z_1^2 A_1^{1/2} \exp(-C z_1^2 / A_1) N_1, \quad (I)$$

где  $A_1$  - массовое число такого иона,  $z_1$  - его заряд, а величины  $V$  и  $C$  зависят от скорости набора энергии в процессе ускорения, энергии инжекции, а также от температуры и плотности среды. Из формулы (I) видно, что при условии неполной ионизации ядер имеет место преимущественное ускорение более тяжелых ядер.

Таким образом, на Солнце имеются возможности для ускорения заряженных частиц в процессе динамической диссипации магнитного поля, когда ускоряются все частицы и ядерный состав ускоренных частиц повторяет состав солнечной атмосферы, и для статистического механизма ускорения, когда преимущественно ускоряются более тяжелые ядра. Первой из этих возможностей ответ. ют солнечные космические лучи, наблюдавшиеся во время крупных солнечных вспышек /5/. Случай с преимущественной обогащенностью тяжелыми ядрами наблюдались в работах /6-8/ и недавно в /9/.

Случай, наблюдавшийся в /6-8/, относится к ядрам с энергией  $E \geq 400 \div 600$  Мэв/нуклон и сопровождался только сравнительно слабыми проявлениями солнечной активности. В /8/ мы попытались применить к ним соотношение (I), рассчитав постоянные  $V$  и  $C$  на основании данных для двух групп ядер и вычислив поток ядер третьей группы. При этом принимались эффективные значения  $A$  и  $z$  для каждой из групп. Расчеты были сделаны для разных температур среды и, следовательно, для разных значений  $z_1$ . В качестве исходных данных принимались потоки ядер средней

группы (точнее ядер с зарядом  $20 > Z \geq 5$ ) и ядер группы железа ( $Z > 20$ ). Вычислялись потоки  $\alpha$ -частиц и протонов.



Р и с. I. Зависимость относительной концентрации ионов с различной кратностью ионизации от  $\lg T$  для углерода /Ю/. Индекс у кривых равен  $z + 1$ , где  $z$  - кратность ионизации.

При расчетах использовались кратности ионизации различных ядер, приведенные в /Ю/. В этой работе представлены графики, указывающие кратность ионизации в зависимости от температуры, полученные для условий ионизационного равновесия, с учетом процессов ионизации и рекомбинации в результате столкновений и рекомбинации под действием излучения и в пренебрежении ионизации излучением. На рис. I приведен пример графика, заимствованный из /Ю/, дающий зависимость относительной концентрации ионов с различной кратностью ионизации от температуры для углерода. По оси абсцисс отложен  $\lg T$ , где  $T$  - температура среды, выраженная в электрон-вольтах. По оси ординат - относительное содержание компонент с разной кратностью ионизации. Для каждой компоненты приведена отдельная кривая, причем цифры у кривых отвечают значению  $z + 1$ , где  $z$  - крат-

ность ионизации (неионизованному состоянию соответствует индекс I). Значения температуры могут быть легко приведены в градусную шкалу исходя из того, что I эв соответствует 11603°K.

Оказалось, что экспериментальные данные лучше всего отвечают температурам 150000-200000°K. Условия, использованные в /10/, и такие температуры имеют место в верхней хромосфере и короне Солнца. Электронные плотности при таких температурах составляют  $10^9$ - $10^{11}$  см<sup>-3</sup> /11-13/, когда условия, использованные в /10/, можно считать выполняющимися.

При температуре 180000°K, для которой проводились расчеты, ядра водорода и гелия практически полностью лишены электронов, углерод ионизован четырехкратно, кислород ионизован на ~ 50% четырехкратно и на 50% - пятикратно, железо на 40% - пятикратно и на 60% - шестикратно и т.д.

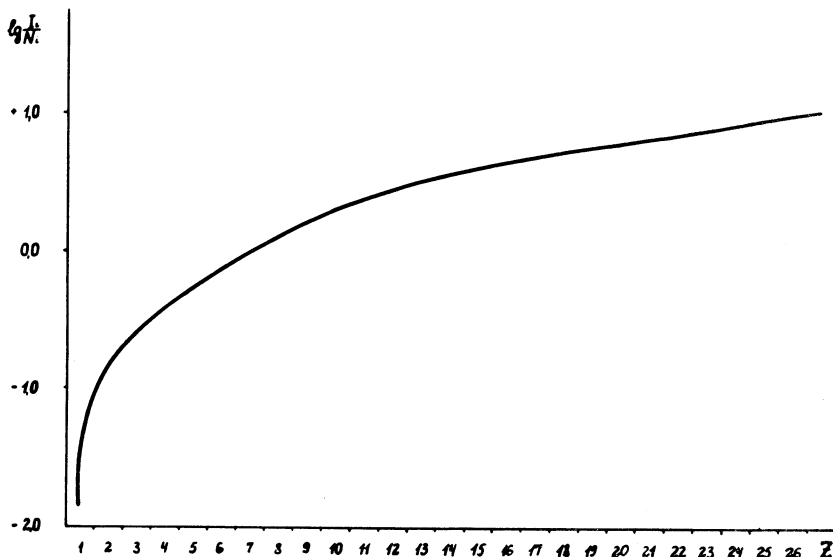
Полученные в результате расчетов /8/ потоки протонов и  $\alpha$ -частиц оказались в удовлетворительном согласии с имеющимися данными.

Разумеется, можно было бы проводить вычисления и в другом порядке, т.е. по потокам  $\alpha$ -частиц и средней группы ядер находить ожидаемый поток ядер железа и сравнивать его значение с результатом эксперимента.

Здесь мы приведем результаты расчетов для потоков различных ядер, основывающиеся на данных /9/ для углерода и кремния, и сопоставим их с данными /9/ для других элементов, а также с данными, полученными в /8/. Поскольку температура 180000°K оказалась наиболее подходящей для случаев, приведенных в /8/, мы проводили расчеты для тех кратностей ионизации различных элементов, которые соответствуют этой температуре. При этом углерод и кремний почти полностью ионизованы четырехкратно, что упрощает вычисление постоянных B и C.

На рис. 2 показаны значения  $\lg(I_1/N_1)$ , полученные для различных элементов из (I). На рис. 3 показаны экспериментальные значения относительной величины потоков различных групп ядер, полученные в /9/ (зачерненные квадраты). Для кислорода поток принят равным I. Ломаная прямая соединяет расчетные точки. Кружками показаны эти же экспериментальные данные с учетом поправок на энергетический спектр, приведенных в /9/. Пунктиром

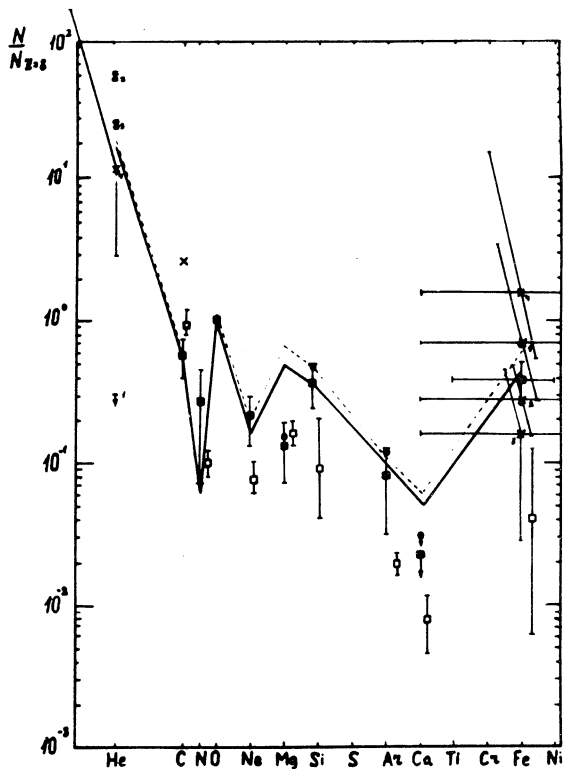
показаны соответствующие расчетные данные. Крестиками показаны данные для четырех случаев, описанных в /8/. Три из них (1,2,3) были длительными (более суток) и один (4) продолжался



Р и с. 2. Зависимость  $\lg(I_1/N_1)$  от  $Z$ , полученная из (1).

ся 3,5 часа. Для того, чтобы сопоставить эти случаи с данными /8/, была произведена нормировка по группе ядер с  $20 > Z > 5$ . Суммарный поток ядер этой группы по данным /9/ обозначен крестиком и условно отнесен к  $Z = 6$ . С этим значением совпадают данные /8/ для ядер с  $20 > Z \geq 5$ .

Показаны также данные /8/ для  $\alpha$ -частиц. Из рисунка 3 видно удовлетворительное согласие результатов эксперимента с расчетами. Разумеется, полученное согласие не следует рассматривать как доказательство реализации механизма, приводящего к (1), так как имеются и другие возможности обогащения спектра тяжелыми ядрами, и это согласие может носить случайный характер. По мере накопления данных о случаях наблюдения солнечных космических лучей, обогащенных тяжелыми ядрами, интересно будет проследить, насколько они будут отвечать соотношению (1). Одна-



Р и с. 3. Экспериментальные значения относительной величины потоков различных групп ядер, полученные в /9/ (зачерненные квадраты), и расчетные данные, полученные из (I) (ломаная линия). Кругами показаны те же экспериментальные значения с поправкой /9/, учитывавшей энергетический спектр ядер. Соответствующие расчеты - пунктирная кривая. Крестиками показаны данные /8/, для четырех случаев (I - 4), причем поток ядер средней группы нормирован по суммарным данным /9/ для ядер этой группы. Незачерненные квадраты - данные о естественной распространенности элементов, использованные в /9/.

ко, по-видимому, уже сейчас становится достаточно достоверным, что реализуются различные механизмы образования солнечных космических лучей. В частности, возможно образование солнечных космических лучей с ядерным составом, обогащенным тяжелыми ядрами.

Поступила в редакцию 24 апреля 1972 г.

После переработки 12 июня 1972 г.

### Л и т е р а т у р а

1. Л. И. Дорман. Вариации космических лучей и исследование космоса. Из-во АН СССР, М., 1963 г., стр. 670.
2. С. И. Сыроватский. Астрон. ж. 43, 340 (1966); ЖЭТФ, 50, 1133 (1966); *Solar Terrestrial Physics, Part I*, 119 (1970).
3. А. В. Гуревич. ЖЭТФ, 38, 1597 (1960).
4. В. Л. Гинзбург, С. И. Сыроватский. Происхождение космических лучей. Изд-во АН СССР, 1963 г. стр. 172.
5. S. Biswas, C. E. Fichtel. *Space Sci. Rev.*, 4, 709 (1965).
6. Л. В. Курносова, В. И. Логачев и др. Труды ФИАН, 46, 226 (1970).
7. С. С. Конякина, Л. В. Курносова и др. Изв. АН СССР, 35, 2446 (1971).
8. Л. В. Курносова, Л. А. Разоренов и др. Космические исследования 5, вып. 6, 863 (1967).
9. A. Mogro-Campero, J. A. Simpson. *Enrico Fermi Institute Preprint N 71-67* (1971).
10. L. L. House. *Astrophys. J. Suppl.*, Ser. 8, N 81, 307 (1964).
11. Г. С. Иванов-Холодный, Г. М. Никольский, *Астрон. ж.*, 39, 777 (1962).
12. К. У. Аллен. *Астрономические величины*. И. Л., 1960 г. стр. 170.
13. Р. Томас, Р. Атей. *Физика солнечной атмосферы*. Изд-во "Мир", 1965 г. стр. 292.