

и не должна меняться фаза вектора анизотропии. Модель пересоединения может давать лишь некоторый добавочный эффект к рассмотренному выше основному механизму глобальной модуляции за счет дрейфовых потоков в рамках теории анизотропной диффузии.

Поскольку размеры области модуляции значительны (50—100 а. е.; это следует из наземных наблюдений гистерезисных эффектов, а также из прямых измерений радиального градиента ГКЛ по данным синхронных измерений на различных космических аппаратах), то необходим учет нелинейного взаимодействия солнечного ветра и космических лучей (предсказывается радиальное торможение солнечного ветра и поперечное обжатие скоростных потоков космическими лучами)<sup>19,20</sup>.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Дорман Л. И. Вариации космических лучей.— М.: Гостехиздат, 1957.
2. Дорман Л. И. Вариации космических лучей и исследование космоса.— М.: Наука, 1963.
3. Паркер Е. Н. Динамические процессы в межпланетной среде.— М.: Мир, 1965.
4. Крымский Г. Ф. Модуляция космических лучей в межпланетном пространстве.— М.: Наука, 1969.
5. Дорман Л. И. Экспериментальные и теоретические основы астрофизики космических лучей.— М.: Наука, 1975.
6. Дорман Л. И. Вариации галактических космических лучей.— М.: Изд-во Моск. ун-та, 1975.
7. Дорман Л. И. Метеорологические эффекты космических лучей.— М.: Наука, 1972.
8. Дорман Л. И., Смирнов В. С., Тясто М. И. Космические лучи в магнитном поле Земли.— М.: Физматгиз, 1971.
9. Dorman L. I. Principles of Cosmic Ray Astrophysics and Geophysics.— Amsterdam: D. Reidel Publ. Co. (in press).
10. Dorman L. I. Cosmic Rays: Variations and Space Explorations.— Amsterdam: North-Holland, 1974.
11. Дорман Л. И. — Изв. АН СССР. Сер. физ., 1967, т. 31, с. 1273.
12. Dorman L. I.— In: Proc. of 9th Intern. Cosmic Ray Conference — Lnd., 1965.— V. 1, p. 292.
13. Dorman L. I., Milovidova N. P.— In: Proc. of 13th Intern. Cosmic Ray Conference.— Denver, 1973.— V. 2, p. 713.
14. Чарахчян А. Н., Базилевская Г. А., Свиржевская А. К., Стожков Ю. И., Чарахчян Т. Н.— Изв. АН СССР. Сер. физ., 1973, т. 37, с. 1258.
15. Чарахчян А. Н., Чарахчян Т. Н. Изменчивость общего магнитного поля Солнца как источник модуляции космических лучей: Препринт ФИАН СССР.— Москва, 1981.
16. Алания М. В., Дорман Л. И.— Изв. АН СССР. Сер. физ., 1979, т. 43, № 4.
17. Alania M. V., Dorman L. I.— In: Proc. of 16th Intern. Cosmic Ray Conference.— Kyoto, 1979.— V. 3, p. 57.
18. Ahluwalia H. S.— Ibid.— V. 12, p. 216.
19. Дорман Л. И., Дорман Л. И.— Геомагн. и аэронаом., 1968, т. 8, с. 817. 1008; Изв. АН СССР, Сер. физ., 1969, т. 33, с. 1908.
20. Vabayan V. Kh., Dorman L. I.— In: Proc. of 15th Intern. Cosmic Ray Conference.— Plovdiv, 1977.— V. 3, p. 107; Proc. of 16th Intern. Cosmic Ray Conference.— Kyoto, 1979.— V. 3, p. 117, 123; Proc. of Intern. Cosmic Ray Conference.— Paris, 1981.— V. 3, p. 373.

523 [1.165+747] (048)

**Г. Е. Кочаров.** Новые данные о генерации ядерных частиц и излучений во время солнечных вспышек. а) *Солнечные вспышки, богатые гелием-3.* Главной отличительной особенностью обсуждаемого класса солнечных событий является исключительно сильное обогащение солнечных космических лучей редким изотопом — гелием-3. Коэффициент обогащения гелия-3 относительно гелия-4 достигает даже  $10^4$ . Известна только одна возможность столь сильного обогащения, и она основана на преимущественном прудускорении гелия-3 за счет плазменных эффектов<sup>1-3</sup>. Согласно разработанной модели при вторжении ускоренных во вспышке горячих электронов в холодную плазму хромосферы появляется электрическое поле и неизбежно возникает ток холодных электронов. Если число энергичных

электронов так велико, что токовая скорость холодных электронов больше скорости звука, в плазме возникает ионно-звуковая турбулентность. Высокоэнергичные ( $E \geq 20$  кэВ) электроны пролетают ионно-звуковой фронт без рассеяния и создают в области перед фронтом пучок, который эффективно генерирует ленгмюровскую турбулентность. Эта турбулентность быстро затухает, сильно нагревая электроны холодной плазмы. Таким образом, ионно-звуковой фронт распространяется через среду, в которой имеется высокая неизотермия. Ионы окружающей плазмы интенсивно взаимодействуют с ионно-звуковой турбулентностью, и при этом они ускоряются. Примечательным здесь является то, что скорость нагрева ионов зависит от их заряда ( $Z$ ) и массы ( $A$ ) и пропорциональна  $a = Z^4/A^2$ , т. е. протоны и ядра гелия-4 нагреваются с одинаковой скоростью ( $a = 1$ ), а гелий-3 нагревается быстрее ( $a \approx 1,8$ ). В результате, в области надтепловых скоростей имеет место обогащение гелием-3. Если в этой области начинает действовать ускорительный механизм, то доля ускоренных ядер гелия-3 оказывается больше, чем доля гелия-4. Причем, преимущество гелия-3 будет тем больше, чем больше пороговая скорость ( $v_{\text{п}}$ ) ускорительного механизма. Если в качестве  $v_{\text{п}}$  взять скорость звука, то с ростом неизотермии будет увеличиваться коэффициент обогащения гелия-3 относительно гелия-4.

В рамках теории о преимущественном преднагреве гелия-3 удастся объяснить все основные свойства богатых гелием-3 вспышек: большое отношение потоков гелия-3 и гелия-4 и отсутствие детектируемых потоков дейтерия и трития в рамках плазменной теории получают непринужденное объяснение; по экспериментальным данным коэффициент обогащения гелия-3 относительно гелия-4 падает с ростом потока протонов и ядер гелия-3 по закону  $I(p)^{-0,4}$  и  $I(^3\text{He})^{-0,8}$ . Плазменная теория предсказывает именно такую связь; согласно предложенной модели вспышки, богатые гелием-3, должны сопровождаться рентгеновским и микроволновым излучением. Причем предсказывается количественная связь между абсолютными и относительными потоками гелия-3 и гелия-4 и потоком рентгеновского и микроволнового излучения. Анализ всех имеющихся данных показывает, что действительно такая связь имеется. Это принципиально важно, так как этим доказывается генетическая связь между ускорением электронов и тяжелых частиц; плазменный механизм в принципе объясняет и наблюдаемое на опыте одновременное обогащение тяжелыми ядрами, однако конкретная теория еще не разработана. Важным предсказанием теории является излучение области преднагрева гелия-3 в линии He II. Регистрация этой линии позволит непосредственно увидеть область преднагрева гелия-3.

б) *Солнечные  $\gamma$ -кванты*. В экспериментах по программе Года Солнечного Максимум в 1980 г. получены очень интересные результаты. Здесь мы рассмотрим главным образом результаты по рентгеновскому и гамма-излучению от солнечной вспышки 7 июня 1980 г. <sup>4,5</sup>

Анализ имеющихся <sup>4-5</sup> данных позволяет сделать следующие выводы: для всех энергетических интервалов от 10 до 350 кэВ, измеренных с высоким разрешением по времени (1,02 с), имеются серии импульсных всплесков в начале событий (около 03.12 UT). Первая серия длится примерно 70 с. Число субимпульсов в сериях 7. Глубина модуляции  $\sim 4$ . Кроме первой имеются еще две серии при 03.14 UT и 03.16 UT. Сравнение зависимостей для низкоэнергичных ( $\leq 20$  кэВ) и высокоэнергичных ( $\geq 20$  кэВ) X-лучей показывает наличие медленной компоненты при низких энергиях, которая исчезает при высоких энергиях. Эта компонента, по-видимому, имеет тепловую природу. Энергетический интервал 4,1—6,5 МэВ, охватывающий мгновенные гамма-линии 4,43 и 6,15 МэВ, также подвержен глубокой модуляции подобно  $\gamma$ -лучам, по крайней мере для первых пяти всплесков.

Таким образом, высокоэнергичные электроны и ионы взаимодействуют с солнечной атмосферой одновременно (в пределах 1 с) с несколькими субимпульсами длительностью 4 с каждый и с квазипериодом между субимпульсами 10 с. Это можно естественно объяснить ускорительным процессом, который одновременно или с задержкой менее 1 с ускоряет электроны и ионы. Этот результат является наиболее неожиданным. Неожиданность связана с существовавшим мнением о том, что для солнечной вспышки 4 августа 1972 г. задержка (несколько минут) между мгновенными гамма-квантами и рентгеновским излучением была экспериментально установлена. Более тщательный анализ показывает, что это не так. Во вспышке 4.VIII 1972 г. времена начала нарастания интенсивности рентгеновского и микроволнового излучения и гамма-квантов были одинаковыми. Разница была в величине времени фронта, а именно, интенсивность гамма-квантов нарастала медленнее. Как показано в <sup>6</sup>, такое отличие можно объяснить в рамках предположения об одновременном ускорении электронов и тяжелых частиц, если генерация гамма-квантов имела место в области с относительно низкой концентрацией частиц (например,  $10^9$  —  $10^{10}$  см<sup>-3</sup>). При таком рассмотрении с увеличением плотности среды время нарастания интенсивности  $\gamma$ -лучей падает, приближаясь к времени нарастания X-лучей (случай вспышки 7 июня 1980 г.). Отметим, что основная доля ускоренных протонов вылетела в межпланетное пространство для вспышки

4.VIII 1972 г.<sup>7</sup>, в то время как для вспышки 7 июня 1980 г. только очень малая доля протонов покинула Солнце<sup>8</sup>. Эти данные также свидетельствуют в пользу рассмотренной возможности, так как генерация  $\gamma$ -лучей для вспышки 4.VIII 1972 г. имела место в области с малой плотностью, а для вспышки 7.VI 1980 г. — в области большой плотности.

Рассмотренная выше возможность не означает, конечно, что электроны и протоны должны быть генерированы одновременно во всех вспышках. Мы хотели лишь подчеркнуть, что одновременное ускорение реально и что мнение о наличии большой временной задержки между ускорением электронов и тяжелых частиц необоснованно.

Совпадение профилей рентгеновского и  $\gamma$ -излучения во вспышке 7 июня 1980 г. свидетельствует в пользу того, что ускорение протонов и электронов происходило близко во времени и пространстве. Связь ускорения протонов, дающих  $\gamma$ -излучение, с потоками электронов подтверждается и анализом отношения потоков протонов и релятивистских электронов, наблюдаемых в межпланетном пространстве<sup>9</sup>.

Таким образом, как по локализации области ускорения протонов, дающих  $\gamma$ -излучение в атмосфере Солнца, так и по связи ускорения этих протонов с ускорением электронов ситуация напоминает ту, которая имеет место в богатой гелием-3 вспышке. В рамках такой модели с увеличением порога инжекции частиц в режим ускорения уменьшается полное число ускоренных частиц, соответственно уменьшается и число генерированных гамма-квантов, но растет коэффициент обогащения гелия-3. Наоборот, чем меньше порог, тем больше число ускоренных частиц и тем больше количество гамма-квантов и меньше коэффициент обогащения гелия-3. Все эти качественные соображения, естественно, нуждаются в количественном рассмотрении с анализом всех вытекающих следствий.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ibragimov I. A., Kocharov G. E.— In: Proc. of 15th Intern. Cosmic Ray Conference, 1977, V. 12, p. 221.
2. Кочаров Л. Г.— Изв. АН СССР. Сер. физ., 1979, т. 43, с. 730, 2529.
3. Кочаров Л. Г., Кочаров Г. Е.— Препринт ФТИ АН СССР, № 722.— Ленинград, 1981.
4. Chupp E. L., Forrest D. J., Ryan J. M. et al.— Astrophys. J., 1981, v. 244, p. L171.
5. Forrest D. J., Chupp E. L., Ryan J. M. et al.— In: Proc. of 17th Intern. Cosmic Ray Conference.— 1981.— SH 1.2-2.
6. Кочаров Г. Е., Кочаров Л. Г., Ковальцов Г. А. Препринт ФТИ АН СССР № 744.— Ленинград, 1981.
7. Ramaty R., Colgate S. A., Dulk P. et al In: Solar Flares/Ed. P. A. Sturrock,— Colorado Associated University Press, 1980.— P. 117.
8. Rosenvinge T. T., Ramaty R., Reames D. V.— In: Proc. of 17th Intern. Cosmic Ray Conference.— 1981.— V. 3, p. 28.
9. Evenson P., Meyer P., Yanagita S.— Ibid. — V. 3, p. 32.