

ровых до декаметровых волн начинается излучение вспышечного континуума, переходящее затем в широкополосный длительный и многокомпонентный всплеск IV типа. Такое континуальное излучение — следствие заполнения энергичными электронами магн. структур, находящихся на разных высотах над активной областью. При этом в магнитных ловушках формируются неравномерные распределения электронов, развиваются конусные неустойчивости и реализуется плазменный механизм излучения. Часть энергичных электронов оказывается захваченной внутри облаков плазмы или петлеобразных корональных транзитов, наблюдаемых в видимом диапазоне. В частности, изолированные движущиеся источники всплесков типа IVM удалось отождествить с наиб. яркими и плотными образованиями вблизи вершины транзита, где электронная плотность повышена по сравнению с фоновой в 20—70 раз. Это даёт возможность интерпретировать метровые IVM-всплески на расстояниях от фотосферы  $r \sim 1-1,5 R_{\odot}$  также в рамках плазменного механизма. При удалении источников IVM-всплесков на большие расстояния преобладающим становится гиротронное излучение субрелятивистских электронов в облаках плазмы с частотой магн. поля  $H \sim 1-3$  Гс.

Всплески IV типа, особенно на дециметровых волнах, обладают богатой тонкой структурой. Здесь наблюдаются широкополосные пульсации с характерным временем  $\sim 1$  с, всплески в поглощении, дрейфующие волокна, зебра-структура и т. д. Появление такого своеобразного радиоизлучения отражает структуризацию самой корональной плазмы, а также указывает на сложный характер взаимодействий между разл. типами волн и частиц, к-рые происходят в короне на разл. стадиях вспышки.

Радиоизлучение С. широко используется в качестве индекса солнечной активности (напр., поток на  $\lambda = 10,7$  см), а также для диагностики вспышек и краткосрочного прогнозирования тех эффектов, к-рые они вызывают на Земле ( радиац. условия в ближнем космосе, геомагн. бури, ионосферные возмущения и т. д.).

Лит.: Железяков В. В., Радиоизлучение Солнца и планет, М., 1964; его же, Электромагнитные волны в космической плазме, М., 1977; Каплан С. А., Пикельнер С. Б., Цытович В. Н., Физика плазмы солнечной атмосферы, М., 1977; Крюгер А., Солнечная радиоастрономия и радиофизика. Введение, пер. с англ., М., 1984.

И. М. Черток.

Гамма-излучение Солнца регистрируется совр. приборами только во время вспышек (уровень  $\gamma$ -излучения спокойного С. слишком низок). Зарегистрировано 140 солнечных вспышек, сопровождающихся эмиссией измеримых потоков  $\gamma$ -квантов с энергией более 300 кэВ. Для 100 вспышек измерен энергетич. спектр  $\gamma$ -излучения и в 50 случаях обнаружены ядерные  $\gamma$ -линии. По длительности фронта (нарастания) и спада импульсов  $\gamma$ -излучения вспышки удаётся разделить на импульсные (общая длительность не более 1 мин при длительности фронта и спада отд. импульсов неск. секунд) и постепенные (до 10—20 мин и неск. десятков секунд соответственно).

В результате взаимодействия ускоренных во вспышках протонов,  $\alpha$ -частиц и более тяжёлых ядер с веществом солнечной атмосферы происходят возбуждение ядерных уровней, расщепление ядер, генерация новых элементов и изотопов (нуклидов). Возбуждённые ядра быстро излучают избыток энергии и переходят в осн. состояние. При этом каждый изотоп излучает свой характерный  $\gamma$ -квант (см. Гамма-излучение). Наиб. важные с астрофиз. точки зрения линии: 6,13 МэВ ( $^{16}\text{O}$ ); 4,44 МэВ ( $^{12}\text{C}$ ); 2,31 МэВ ( $^{14}\text{N}$ ); 1,78 МэВ ( $^{28}\text{Si}$ ); 1,63 МэВ ( $^{20}\text{Ne}$ ); 1,37 МэВ ( $^{24}\text{Mg}$ ); 1,24 МэВ и 0,85 МэВ ( $^{56}\text{Fe}$ ). Эти линии образуются путём прямого возбуждения указанных ядер. Кроме того, имеются сильные линии 0,48 МэВ ( $^7\text{Li}$ ) и 0,43 МэВ ( $^7\text{Be}$ ), к-рые образуются в реакциях синтеза  $^4\text{He}$  ( $\alpha$ , p)  $^7\text{Li}$  и  $^4\text{He}$  ( $\alpha$ , n)  $^7\text{Be}$ . Пре-

мена жизни возбуждённых уровней пренебрежимо малы ( $\lesssim 10^{-9}$ ) по сравнению с временами ускорения и торможения частиц и ядер. Поэтому приведённые  $\gamma$ -линии, называемые мгновенными, служат прекрасными хронометрами процессов ускорения и взаимодействия частиц.

Кроме мгновенных  $\gamma$ -линий в солнечной атмосфере генерируются т. н. задержанные  $\gamma$ -линии 2,22 МэВ и 0,51 МэВ. Задержка обусловлена конечным временем захвата нейтронов (см. Радиационный захват) водородом (линия 2,22 МэВ) и аннигиляции позитронов (линия 0,51 МэВ). Нейтроны образуются в осн. в ядерных реакциях  $^4\text{He}(p, pn)^3\text{He}$  и  $^4\text{He}(p, 2pn)^3\text{D}$ . Эти нейтроны сначала тормозятся в солнечном веществе до тепловых скоростей, а затем поглощаются протоном с генерацией  $\gamma$ -линии 2,22 МэВ либо ядром гелия-3 ( $^3\text{He}(n, p)^3\text{H}$ ) без генерации  $\gamma$ -квантов. Время торможения порядка неск. минут, и, как следует из теории, захват нейтронов имеет место в достаточно плотной среде (концентрация атомов более  $10^{18}$  см $^{-3}$ ). Интенсивность  $\gamma$ -линии 2,22 МэВ даёт уникальную информацию о концентрации гелия-3 в фотосфере. Источником другой задержанной линии — аннигиляц. линии 0,51 МэВ являются позитронно-активные ядра  $^{11}\text{C}$ ,  $^{12}\text{N}$ ,  $^{13}\text{N}$ ,  $^{14}\text{O}$ ,  $^{15}\text{O}$ ,  $^{19}\text{Ne}$ , к-рые генерируются в ядерных реакциях в солнечной атмосфере во время вспышки. Позитроны генерируются также путём распада  $\pi^+$ -мезонов, образующихся в ядерных реакциях с участием высокоэнергичных протонов. Прежде чем произойдёт аннигиляция позитронов, они замедляются за счёт ионизац. и радиац. потерь от нач. энергий (сотни кэВ — десятки МэВ) до тепловых. Время задержки линии 0,51 МэВ определяется периодом полураспада радиоактивных ядер и временем замедления позитронов. Последнее зависит от плотности и величины магн. поля в области, где аннигилируют позитроны. Аннигиляция может быть свободной с генерацией двух  $\gamma$ -квантов с энергией каждого 0,51 МэВ или протекать через состояние квазиатома позитрония. Вероятность образования позитрония в состоянии со спином 0 составляет 25%, со спином 1—75%. В первом случае позитроний аннигилирует на два  $\gamma$ -кванта с энергией 0,51 МэВ каждый, во втором случае — на три  $\gamma$ -кванта, к-рые формируют непрерывный спектр в области энергии ниже 0,51 МэВ. Относит. вероятность двухфотонной и трёхфотонной аннигиляций определяется плотностью вещества в области генерации излучения. Ширина аннигиляц. линии определяется темп-рой этой области. Т. о., измерив временной ход и энергетич. спектр аннигиляц. квантов, можно определить характеристики области замедления и аннигиляции позитронов.

$\gamma$ -Спектрометрия солнечных вспышек позволяет определить изотопный и элементный состав не только той области солнечной атмосферы, где протекают ядерные реакции, но и состав потоков ускоренных частиц. Ширина ядерной  $\gamma$ -линии определяется кинематикой реакции, в к-рой данная линия генерируется. При возбуждении ядер солнечной атмосферы протонами и  $\alpha$ -частицами линии уширяются от 1 до 2%. Однако когда линия генерируется при взаимодействии ускоренного ядра с водородом и гелием солнечной атмосферы, уширение достигает 25%. На рис. 8 приведён расчётный энергетич. спектр мгновенных  $\gamma$ -линий. В верх. части рисунка дан полный спектр (а); в нижней — только уширенный спектр  $\gamma$ -излучения ускоренных ядер (б). Полный спектр содержит разл. узкие линии, наиб. интенсивными из к-рых являются линии  $^{16}\text{O}$ ,  $^{12}\text{C}$ ,  $^{20}\text{Ne}$ ,  $^{24}\text{Mg}$ ,  $^{56}\text{Fe}$  и  $^7\text{Be}$ . В уширенном спектре выделяются только две особенности между 4 и 5 МэВ (в осн. от  $^{12}\text{C}$ ) и между 1 и 2 МэВ (от  $^{20}\text{Ne}$ ,  $^{24}\text{Mg}$ ,  $^{28}\text{Si}$  и  $^{56}\text{Fe}$ ). Вклад уширенного компонента в общий спектр не большой. Однако во вспышках с обогащением ускоренных частиц тяжёлыми элементами вклад уширенного компонента оказывается существенным. На рис. 9 приведён пример измеренного в космич. эксперименте спек-