

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 гиротропное 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 ~ 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 γ -излучения спокойного С. слишком низок). Зарегистрировано 140 солнечных вспышек, сопровождающихся эмиссией измеримых потоков γ -квантов с энергией более 300 кэВ. Для 100 вспышек измерен энергетич. спектр γ -излучения и в 50 случаях обнаружены ядерные γ -линии. По длительности фронта (нарастания) и спада импульсов γ -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, α -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 γ -квант (см. Гамма-излучение). Наиб. важные с астрофиз. точки зрения линии: 6,13 МэВ (^{16}O); 4,44 МэВ (^{12}C); 2,31 МэВ (^{14}N); 1,78 МэВ (^{28}Si); 1,63 МэВ (^{20}Ne); 1,37 МэВ (^{24}Mg); 1,24 МэВ и 0,85 МэВ (^{56}Fe). Эти линии образуются путём прямого возбуждения указанных ядер. Кроме того, имеются сильные линии 0,48 МэВ (^7Li) и 0,43 МэВ (^7Be), к-рые образуются в реакциях синтеза ^4He (α , p) ^7Li и ^4He (α , n) ^7Be . Пре-

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

Кроме мгновенных γ -линий в солнечной атмосфере генерируются т. н. задержанные γ -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 γ -линии 2,22 МэВ либо ядром гелия-3 ($^3\text{He}(n, p)^3\text{H}$) без генерации γ -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 γ -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}C , ^{12}N , ^{13}N , ^{14}O , ^{15}O , ^{19}Ne , к-рые генерируются в ядерных реакциях в солнечной атмосфере во время вспышки. Позитроны генерируются также путём распада π^+ -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 γ -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 γ -кванта с энергией 0,51 МэВ каждый, во втором случае — на три γ -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.

γ -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 γ -линии определяется кинематикой реакции, в к-рой данная линия генерируется. При возбуждении ядер солнечной атмосферы протонами и α -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 γ -линий. В верх. части рисунка дан полный спектр (а); в нижней — только уширенный спектр γ -излучения ускоренных ядер (б). Полный спектр содержит разл. узкие линии, наиб. интенсивными из к-рых являются линии ^{16}O , ^{12}C , ^{20}Ne , ^{24}Mg , ^{56}Fe и ^7Be . В уширенном спектре выделяются только две особенности между 4 и 5 МэВ (в осн. от ^{12}C) и между 1 и 2 МэВ (от ^{20}Ne , ^{24}Mg , ^{28}Si и ^{56}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-