ГАММА ИЗЛУЧЕНИЕ, ВЫЗВАННОЕ ЯДЕРНЫМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ ПРОТОНОВ, УСКОРЕННЫХ ВО ВРЕМЯ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК

Васильев Г.И., Богомолов Э.А., Лысенко А.Л., Овчинникова Е.П.

ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

GAMMA RADIATION CAUSED BY NUCLEAR INTERACTION OF PROTONS ACCELERATED DURING SOLAR FLARES

Vasilyev G.I., Bogomolov E.A., Lysenko A.L., Ovchinnikova E.P.

Ioffe Institute, St. Petersburg, Russia

We consider solar flares recorded in the period 2006–2014 in PAMELA experiment. In 30 events the spectra of protons with energies above 80 MeV were determined. In the Konus-Wind experiment 19 flashes with gamma-ray energies of more than 1 MeV were registered during the period under consideration. Only 1 flare was registered in both experiments, and the 2.223 MeV line was not observed in them. In this event gamma rays with higher and lower energies were. The results of simulation for protons interaction with the solar photosphere and deeper layers are presented. The dependence on the proton energy of gamma rays entering the interplanetary space at various angles is obtained. It was shown that the ratio of the intensities of the gamma lines 2.223 MeV and 511 keV substantially depends on the proton energy. The absence of the 2.223 MeV line in solar flares can be explained by the hard spectrum of protons.

DOI: 10.31725/0552-5829-2019-75-78

Введение

При изучении процессов, происходящих во время солнечных вспышек существенную информацию можно получить, проводя одновременное измерение спектров фотонов в энергетическом диапазоне от радиоволн до гамма-излучения, а также спектров ускоренных ионов. Часть ионов выходит в межпланетное пространство и может быть зарегистрирована космическими аппаратами. Возвращающиеся ионы в ядерных взаимодействиях с солнечным веществом производят мгновенные гамма-кванты и гамма-кванты от распада образующихся радиоактивных ядер с периодом полураспада от долей секунды до многих лет. Наиболее интенсивные линии в спектре – 511 кэВ (аннигиляция электронов и позитронов) и 2.223 МэВ (образование дейтронов при взаимодействии замедленных нейтронов с протонами). Линии наблюдаются на фоне непрерывных гладких спектров от тормозного излучения электронов и фотонов после комптоновского рассеяния. Во время вспышек также образуются изотопы ^2H , ^3H и ^3He , которые могут дополнительно ускоряться на ударных волнах, что подтвердилось в эксперименте [1].

В настоящей работе мы рассматриваем солнечные вспышки, зафиксированные одновременно в экспериментах Konus-Wind (жесткий рентген и мягкий гамма диапазон) и PAMELA (протоны, ^2H , ^3H , ^3He , ^4He , нейтроны).

Эксперименты PAMELA и Konus-Wind

Магнитный спектрометр PAMELA, установленный на спутнике Ресурс ДК1 был запущен в космос в июне 2006 г. и проработал около 10 лет. Он состоит из отклоняющего постоянного магнита, трековой системы, позволяющей определять траекторию заряженной частицы в магнитном поле, управляющего телескопа, системы охранных счетчиков. Для сепарации протонов от электронов использовался калориметр, состоящий из 44 слоев кремниевых стриповых детекторов и 22 слоев вольфрама. Для этой же цели использовался нейтронный детектор. Сочетание метода времени пролета и анализа энерговыделений в слоях калориметра дает возможность провести разделение потоков изотопов водорода, гелия и легких ядер в диапазоне 60–1000 МэВ/нуклон. В период проведения эксперимента были зарегистрированы 30 солнечных протонных событий [2]. В 14 из них зафиксировано превышение потока нейтронов над фоновым значением [3]. Во вспышках 13.12.2006, 14.12.2006, 07.03.2012, 06.01.2014 зарегистрированы изотопы ^2H и во вспышке 13.12.2006 изотопы ^3He и ^4He [1].

Прибор Konus размещен на космическом аппарате Wind, запущенном в 1994 г., и находится вблизи точки Лангранжа [4]. В 2006–2014 гг. Konus зарегистрировал 19 вспышек с энергиями гамма-квантов более 1 МэВ. Одна из них (табл. 1) совпала с протонным событием PAMELA. Статистически значимого превышения над фоном в энергетическом диапазоне около 2.22 МэВ не обнаружено, но при этом были зарегистрированы солнечные нейтроны [3].

Таблица 1. Солнечная вспышка, зарегистрированная одновременно в экспериментах PAMELA и Konus-Wind.

Konus-Wind триггер	SEP	GOES class	Location
06.07.2012, 23:04:30	07.07.2012, 00:05	X1.1	S13W59

Моделирование взаимодействия протонов с фотосферой и более глубокими слоями Солнца

С помощью пакета GEANT4 [5] проведено моделирование взаимодействия ускоренных в солнечной вспышке протонов с фотосферой и более глубокими слоями Солнца. На рис. 1. представлена зависимость от энергии падающих изотропно на фотосферу протонов числа выходящих в межпланетное пространство гамма-квантов с энергиями 511 кэВ и 2.223 МэВ.

Рис. 1. Число выходящих в межпланетное пространство гамма-квантов на 10^3 падающих на Солнце протонов.

Рис. 2. Угловые распределения потоков гамма-квантов.

При энергиях протонов более 600 МэВ преобладает линия 511 кэВ, так как увеличивается число образующихся нейтральных пионов, распадающихся на гамма-кванты, которые, в свою очередь, производят электрон-позитронные пары. Соотношение интенсивности линий существенно зависит от формы спектра протонов. При степенном энергетическом спектре с энергией протонов более 30 МэВ при показателе спектра $\gamma = 4$ отношение интенсивностей равно 22.5, при $\gamma = 3$ 2.75 0.37, а при $\gamma = 2$ 0.92.

Проведенные расчеты при различных фиксированных углах падения протонов показали слабую зависимость отношения интенсивностей линий от этих углов [6]. На рис. 2 изображены расчетные угловые распределения гамма-квантов при изотропном падении на солнечную фотосферу $2 \cdot 10^9$ протонов с энергией более 10 МэВ и $\gamma = 3$. Хорошо видно, что регистрация лимбовых вспышек затруднена из-за низкой интенсивности.

Выводы

Из 30 солнечных вспышек с наблюдением в эксперименте PAMELA спектров протонов СКЛ в диапазоне ~ 80 –2000 МэВ ни в одном случае KONUS-WIND достоверно не наблюдал линию 2.223 МэВ. Отсутствие этой линии при наличии гамма-квантов с меньшими и большими энергиями может быть объяснено жестким спектром падающих на солнечную атмосферу протонов и при этом относительно низким потоком протонов при энергиях менее нескольких сот МэВ. В результате протоны малых энергий, при которых преобладает выход этой линии, не дают статистически значимого превышения над измеренным в эксперименте фоном гамма-квантов.

Работа частично поддержана грантом РФФИ N°18-02-00583.

Литература

1. *Bogomolov E.A., Vasilyev G.I., Men W.* // Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys. 2019, **83**, 523.
2. *Bruno A. et al.* // Astrophys. J. 2018, **862** 97.
3. *Bogomolov E.A. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys. 2015, **81**, 132.
4. *Aptekar R. L., Frederiks D. D., Golenetskii S. V. et al.* // SSRv. 1995, **71**, 265.
5. *Allison J. et al.* // 2016, Nucl. Instrum. Meth., **A835**, 186.
6. *Vasilyev G.I., Chakchurina M.E.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2017, **929**, 012008.