ОПРЕДЕЛЕНИЕ СПЕКТРА ПРОТОНОВ ПО СПЕКТРАМ ГАММА-КВАНТОВ ВО ВРЕМЯ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК

Васильев Г.И.

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

DETERMINATION OF THE PROTON SPECTRUM FROM GAMMA-RAY SPECTRA DURING SOLAR FLARES

Vasilyev G.I.

Ioffe Physical-Technical Institute, St. Petersburg, Russia

The gamma-quanta, arising during solar flares in the interaction of accelerated protons with the photosphere and deeper layers of the Sun, emerge into interplanetary space from a thickness of several tens of g/cm^2 . A large contribution to the formation of the spectra is made by the 2.223 MeV line formed during the formation of ^2H . A gamma quantum can leave the Sun without interaction or after one or more Compton scattering. The thermalization time of neutrons forming ^2H depends on the temperature and density of the environment. Calculations of the angular, energy and time distributions of gamma quanta escaping into interplanetary space have been carried out. A technique is being considered for the determination of the proton spectrum by the spectra of gamma quanta, taking into account gamma quanta with energies above 0.5 MeV

DOI: 10.31725/0552-5829-2020-37-40

Введение

В данной работе рассматриваются солнечные вспышки, в которых основной вклад в формирование спектров гамма-квантов, выходящих в межпланетное пространство, дают ядерные взаимодействия протонов с фотосферой и более глубокими слоями фотосферы. Для определения спектров протонов используется моделирование взаимодействия с подбором параметров энергетического спектра дающих максимальное совпадения интенсивностей расчетных и экспериментальных гамма-линий (см., например, [1]) без учета температуры окружающей среды. Такой метод не всегда применим. Так, например, в период с 2006–2015 гг. в космических экспериментах с магнитными спектрометрами PAMELA и AMS2 зарегистрировано 35 солнечных протонных вспышек с энергиями выше ~ 80 МэВ. Только в одной вспышке наблюдалась линия 2.223 МэВ [2]. В настоящей работе описывается метод определения спектра протонов по соотношению интенсивностей потоков гамма-квантов в заданных энергетических диапазонах. При этом обеспечивается более полное использование экспериментальных данных, т.к. учитываются не только гамма-кванты в линиях, но и в континууме. При таком подходе можно использовать экспериментальные данные, полученные приборами с относительно низким энергетическим разрешением.

Метод

С помощью пакета GEANT4 [3] выполнены расчеты спектров выходящих в межпланетное пространство гамма-квантов, образованных в результате взаимодействия протонов солнечных космических лучей с фотосферой и более глубокими слоями Солнца. Гамма кванты, образованные в результате снятия возбуждения ядер и распада нейтральных пионов, могут проходить без взаимодействия толщ в несколько десятков г/см². Достоверные данные о плотности и температуре Солнца ниже фотосферы отсутствуют, поэтому они считались постоянными. От плотности и температуры зависят скорость и глубина образования ²H. При большей плотности уменьшается время термализации нейтронов, а при больших температурах увеличивается интервал времени между образованием нейтрона и образованием ²H. При Монте-Карло моделировании энергия протонов задавалась в виде степенных распределений с показателями спектра 2, 3 и 4 [4]. Расчеты выполнены и при 38 фиксированных значениях энергии протонов от 10 МэВ до 10 ГэВ при температуре 6000 К. При показателе спектра 3 моделирование выполнено для 8 значений температуры от 4000 до 100000 К. При розыгрыше энергии протона при определенных показателях спектра получены аналоги массивов экспериментальных данных. Во всех случаях на основе совокупности значений энергий всех выходящих в межпланетное пространство фотонов определялась вероятность попадания в энергетические интервалы (11) от 0.5 МэВ до 10 ГэВ. Вероятности попадания в эти интервалы энергии фотонов при фиксированных значениях энергии первичных протонов использовались при поиске значения показателя спектра на основе полученных энергий при моделировании непрерывных спектров. Ширины интервалов должны определяться энергетическим разрешением прибора и статистической значимостью измерений. Уже после моделирования при промежуточных значениях энергии падающих протонов при вычислении вероятностей использовалась линейная интерполяция. Эти вычисления выполнены для последовательного ряда значений показателя спектра. Критерием правильного значения показателя являлось достижение минимума средней суммы квадратов отклонений вероятностей попадания в энергетические интервалы при непрерывных спектрах (аналог экспериментальных данных) от полученных вероятностей при фиксированных энергиях первичных протонов и их интерполяции.

Результаты расчетов

На рис. 1 показана зависимость вероятности выхода в межпланетное пространство фотона с энергией 2.223 МэВ от толщи вещества внутри Солнца относительно внешней границы фотосферы в месте образования ²H. Вероятность для этой и других энергий определяется сечениями комптоновского рассеяния и образования электрон-позитронных пар, которые не зависят от температуры.

Рис. 1.

Рис. 2.

На рис. 2 представлена зависимость от температуры вероятности P выхода фотона с энергией 2.223 МэВ в межпланетное пространство на один падающий протон с показателем степенного спектра 3 и энергиями от 7.8 МэВ до 10 ГэВ. С ростом температуры эта вероятность уменьшается. Это может быть объяснено увеличением числа упругих соударений с ядрами, что приводит к проникновению нейтронов в более глубокие слои Солнца и более вероятными их распадом и выходом в межпланетное пространство. На рис. 3 показаны среднеквадратичные отклонения вероятностей попадания в заданные интервалы энергий фотонов от 0.5 до 10 МэВ при моделировании непрерывного спектра протонов (аналог эксперимента) и полученных вероятностей вычисленных для показателей спектра протонов γ с использованием данных, полученных при моделировании взаимодействий протонов с дискретными энергиями. На рис. 4 результаты для энергий фотонов в интервалах от 2.3 до 10 МэВ, где исключается зависимость от температуры выхода фотонов с энергиями 2.223 МэВ и более низкими после их комптоновского рассеяния. При этом точность определения показателя спектра снижается.

Примененная методика может быть использована не только при степенных представлениях спектров протонов, но и для других.

Рис. 3.

Рис. 4.

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

Литература

1. *Murphy R. and Share G.* // Solar Phys. 2018. 293:163.
2. *Vasil'ev G.I., Bogomolov E.A.* // Geomagn. Aeron. 2020. V. 60. № 7.
3. *Allison J. et al.* // Nucl. Instrum. Meth. 2016. A835. 186.
4. *Vasilyev G.I., Chakchurina M.E.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2017. 929. 012008.