ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ И ПЛОТНОСТИ ВЕРХНИХ СЛОЕВ КОНВЕКТИВНОЙ ЗОНЫ НА СПЕКТР ГАММА-КВАНТОВ ВО ВРЕМЯ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК

Васильев Г.И.

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

INFLUENCE OF TEMPERATURE AND DENSITY OF THE UPPER LAYERS OF THE CONVECTIVE ZONE ON THE GAMMA-RAY SPECTRUM DURING SOLAR FLARES

Vasilyev G.I.

Ioffe Institute, St. Petersburg, Russia

Protons accelerated during solar flares interact with the photosphere and the upper layers of the convective zone produce neutrons. Neutrons are effectively slowed down in elastic interactions with the nuclei of the surrounding atoms (mainly with protons). Neutrons can leave the Sun after several scatterings. Part of the neutrons decay. Other thermalized neutrons are captured by protons or other heavier and rarer nuclei. As the density of the medium increases, the probability of neutron capture increases and the probability of decay decreases. The thickness of the photosphere is several orders of magnitude smaller than the nuclear interaction range and the ionization range of protons, so the formation of the gamma-ray spectrum occurs in the upper layers of the convective zone. A neutron in an environment with an increased temperature can receive an increase in energy. This leads to a decrease in the probability of capture, since the cross-section is approximately inversely proportional to the speed. A gamma-ray quantum with energy of 2.223 MeV can enter interplanetary space without interaction from depths of about 20 g/cm². The temperature at such depths is several times higher than the temperature of the photosphere. This article presents the results of modeling the interaction of protons with the matter of the Sun using GEANT4. A change in temperature has a greater effect on the spectra than a change in density.

DOI: 10.31725/0552-5829-2021-67-70

Введение

Часть ускоренных во время солнечных вспышек протонов возвращается в направлении фотосферы и образует во время ядерных взаимодействий возбужденные ядра и вторичные частицы. Если энергия вторичных частиц достаточно велика, то они могут образовать последующие поколения частиц. Толща фотосферы на несколько порядков меньше длины пробега ядерного взаимодействия, поэтому ее плотность и температура мало влияют на формирование спектров гамма-квантов, которые легко ее преодолевают. Количество образующихся при снятии возбуждения ядер гамма-квантов не зависит от температуры и плотности. От параметров среды зависит вероятность захвата протоном теплового нейтрона с образования ²H. Она зависит от соотношения сечений захвата и упругого рассеяния, которое примерно обратно пропорционально скорости нейтрона, приобрета-

емой при его термализации. При упругих взаимодействиях замедленного нейтрона его энергия может как уменьшаться, так и увеличиваться. С ростом температуры среды растет вероятность возрастания энергии. Увеличение числа рассеяний и уменьшение плотности приводит к увеличению вероятности выхода нейтронов в межпланетное пространство, проникновения в более глубокие слои и распада. Это приводит к уменьшению числа образующихся в р-п реакциях гамма-квантов с энергиями 2.223 МэВ, которые могут выйти в межпланетное пространство без взаимодействий или после нескольких комптоновских рассеяний с потерей энергии. В этой работе представлены результаты расчетов вероятности образования линии 2.223 МэВ в зависимости от температуры и плотности.

Метод

С помощью пакета GEANT4 [1] выполнено моделирование взаимодействия протонов с фотосферой и верхними слоями конвективной зоны. За основу при изучении влияния вариации плотности и температуры в зависимости от расстояния от центра Солнца принята модель [2]. Расчеты выполнены для значений температуры и плотности из исходной модели и для умноженных на 0.6 и 1.4. Поглощение нейтронов более тяжелыми ядрами (например, С, N, O) учитывалось, но его отдельный вклад не рассматривался. При образовании ^2H фиксировалась глубина и таким образом определялась температура и плотность. Примененная методика ранее использовалась при расчете спектров и угловых распределений выходящих в межпланетное пространство нейтронов и гамма-квантов, но только для температуры 6000 К без вариации плотности [3].

Результаты

Расчеты выполнены для степенного спектра протонов с показателем 3 в энергетическом интервале 8 МэВ–10 ГэВ при изотропном падении. На рис. 1 и рис. 2 представлены распределения вероятности образования гамма-квантов с энергией 2.223 МэВ в зависимости от температуры и глубины их образования для базовой модели. Большая часть нейтронов захватывается при температурах ~4000–16000 К и на глубинах ~0–120 г/см². Без взаимодействий в межпланетное пространство выходит меньшая часть гамма-квантов, особенно из слоев с большими температурами и плотностями. При более жестких спектрах протонов увеличивается число вторичных нейтронов [3] и они образуются на больших глубинах, так как первичные протоны имеют большой пробег в электромагнитных взаимодействиях. При обогащении в некоторых вспышках ускоренных ядер более тяжелыми элементами число нейтронов также увеличивается, но оно не зависит от плотности и температуры.

Рис. 1.

Рис. 2.

На рис. 3 показана вероятность выхода в межпланетное пространство гамма-кванта с энергией 2.223 МэВ в зависимости от глубины его образования (не зависит от температуры и плотности).

Рис. 3.

Можно сделать вывод, что часть спектра гамма-квантов, обусловленная реакцией p-n формируется на глубинах до нескольких десятков г/см² и температурах до 16000 К.

В таблице приведена умноженная на 10^5 вероятность выхода в межпланетное пространство гамма-кванта с энергией 2.223 МэВ при масштабировании плотности и температуры модели [1].

Таблица. df и tf масштабные коэффициенты плотности и температуры.

df	0.6	1.4
tf		
0.6	1.4 ± 0.02	1.43 ± 0.02
1	1.36 ± 0.02	1.35 ± 0.02
1.4	1.25 ± 0.02	1.24 ± 0.02

Изменение температуры больше влияет на вероятность, чем изменение плотности.

Литература

1. Allison J. et al. // Nucl. Instrum. Meth., 2016, A835, 186.
2. https://phys.au.dk/~jcd/solar_models/
3. Vasilyev G.I, Chakchurina M.E. // J. Phys: Conf. Ser., 2017, v. 929, 012008.