

ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЕ СПОКОЙНОГО СОЛНЦА: ЛИНИИ ~ 0.84 МэВ и ~ 1.2 МэВ

Васильев Г.И.¹, Ковальцов Г.А.¹, Остряков В.М.²

¹Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

GAMMA EMISSION OF THE QUIESCENT SUN: ~ 0.84 MeV and ~ 1.2 MeV lines

Vasilyev G.I.¹, Kovaltsov G.A.¹, Ostryakov V.M.²

¹Ioffe Institute, St. Petersburg, Russia

²Peter the Great St. Petersburg State Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

Intensity of the most powerful lines emitted by quiescent Sun around ~ 0.84 MeV and ~ 1.2 MeV, originated from ^{22}Na , ^{54}Mn and ^{56}Co isotopes decay, were simulated. We have updated the relevant nuclear cross sections according to EXFOR/CSISRS data base (<https://www.nndc.bnl.gov/exfor>) and with the help of GEANT4.10 code extended our modeling up to incident particle energies $E \sim 10$ GeV, where the secondary atmospheric cascading becomes important. So, we combine semi-analytical approach (valid at $E < 0.5$ GeV) and numerical calculations ($0.5 \text{ GeV} < E < 10 \text{ GeV}$) using GEANT4.10 package. Also, the yield function for the production of these isotopes has been obtained allowing one to consider any kind of the energy spectra of incident particles (mainly protons).

<https://doi.org/10.31725/0552-5829-2024-49-52>

Введение

Хотя самые мощные выделения энергии на Солнце происходят во время сильных солнечных вспышек (генерация ударных волн, корональные выбросы массы, ускорение частиц, нагрев плазмы и т.д.), но и в более спокойные периоды также возможны события, сопровождающиеся (в том числе) и ускорением частиц. Во время таких слабых (нано)вспышек имеет место генерация долгоживущих радиоактивных изотопов, которые копятя в солнечной атмосфере и выходят в межпланетное пространство вместе с солнечным ветром. Эти изотопы при распаде дают гамма излучение от спокойного Солнца. Изучение этих явлений может дать информацию о среднем потоке энергичных протонов в солнечной атмосфере, ускоренных не только в мощных вспышках, но и в возможных более многочисленных слабых событиях. Впервые на это было обращено внимание в работах [1, 2]. Оценки показали, что наиболее интенсивные гамма линии в спектре спокойного Солнца должны проявляться в области энергий квантов ~ 0.84 МэВ и ~ 1.2 МэВ. Появление их связано с накоплением в солнечной атмосфере таких изотопов как натрий-22 (период полураспада 2.6 года, гамма линия 1.275 МэВ), марганец-54 (312.3 дня, гамма линия 0.835 МэВ)

и кобальт-56 (78.8 дня, гамма линии 0.845 и 1.24 МэВ). В данной работе нами с использованием современных данных выполнены расчёты генерации указанных изотопов в ядерных реакциях ускоренных протонов с энергиями от 10 МэВ до 10 ГэВ, взаимодействующих с ядрами солнечной атмосферы.

Производящая функция образования изотопов в атмосфере Солнца

Мы произвели расчеты, так называемой, производящей функции (Yield Function), Y , генерации изотопов. По определению Y – это такое количество ядер, генерируемое на один падающий протон данной начальной энергии E . Первичные протоны тормозятся в солнечном веществе вследствие ионизационных потерь; при больших энергиях они могут давать в ядерных реакциях вторичные частицы, которые также генерируют интересные нас изотопы. При энергии первичных протонов менее нескольких сотен МэВ, когда ионизационные потери превалируют над ядерными, а развития вторичного нуклонного каскада не происходит, производящая функция может быть рассчитана аналитически:

$$Y(E) = n_{Si} \int_0^E \frac{1}{dE/dx(E')} S(E') dE',$$

где dE/dx – ионизационные потери протона (МэВ/(г/см²)), n_{Si} – содержание ядер кремния в 1 грамме вещества солнечной атмосферы. Здесь также $S(E)$ – суммарное сечение (см²) всех ядерных реакций генерации данного изотопа, отнесённое к содержанию кремния:

$$S(E) = \sum_i \frac{n_i}{n_{Si}} \sigma_i(E),$$

где n_i – содержание ядер сорта i в 1 грамме солнечного вещества, $\sigma_i(E)$ – сечение генерации изотопа протоном с энергией E на ядре сорта i . Функция $S(E)$ для рассматриваемых изотопов приведена на рис. 1. Содержание элементов и их изотопный состав в солнечном веществе взяты из работы [3], а сечения ядерных реакций – из базы данных EXFOR/CSISRS: <https://www.nndc.bnl.gov/exfor>. При расчётах учитывалась также генерация короткоживущих предвестников обсуждаемых изотопов: ²²Mg для ²²Na и ⁵⁶Ni для ⁵⁶Co. Для высоких энергий, когда нельзя пренебречь ядерными потерями первичных протонов и генерацией ими вторичных нуклонов, производящая функция была рассчитана при помощи пакета GEANT4.10 [4]. Результаты этих расчётов хорошо согласуются с аналитическим подходом в переходной области энергий. На рис. 2 показаны полученные нами про-

изводящие функции. Обращает на себя внимание практическая идентичность $Y(^{22}\text{Na})$ и $Y(^{54}\text{Mn})$ по крайней мере в области энергий $E > 30$ МэВ.

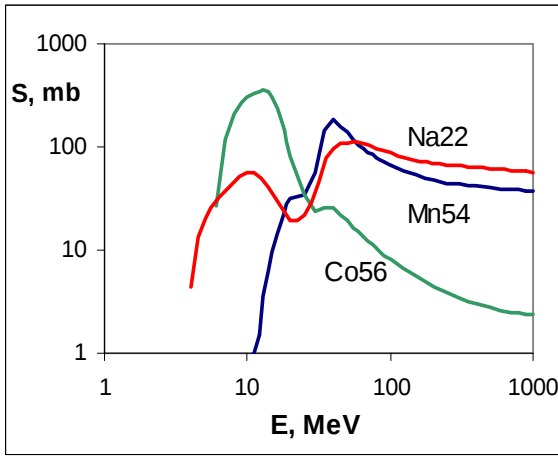


Рис. 1.

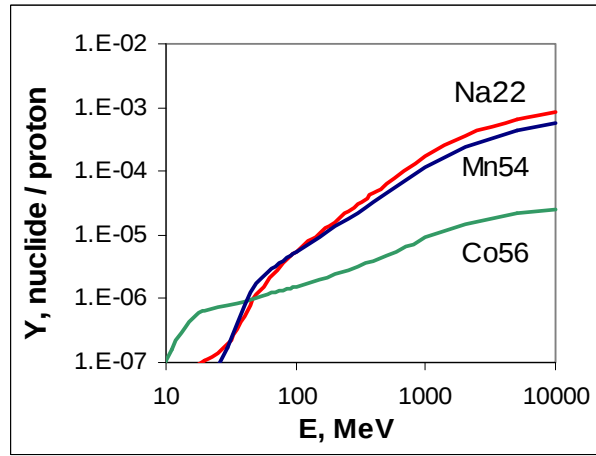


Рис. 2.

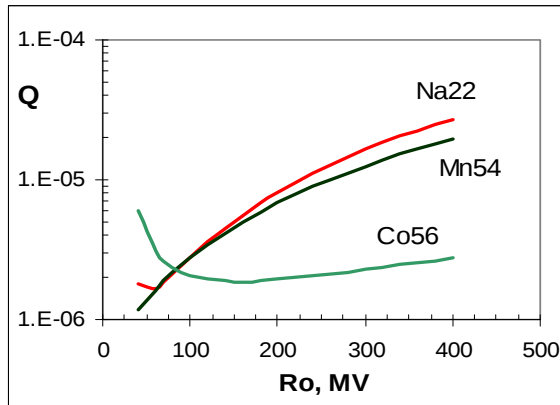


Рис. 3.

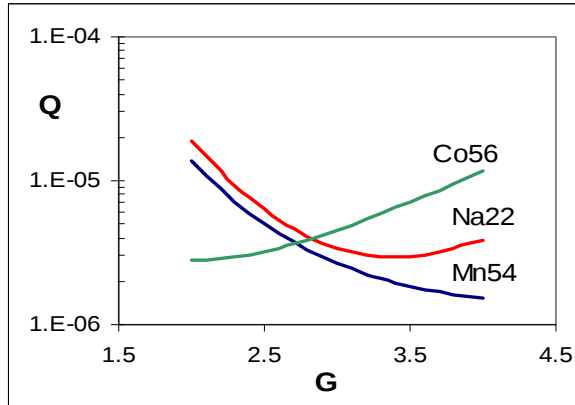


Рис.4.

Оценка интенсивности гамма линий

При спектре первичных протонов $N(E)$ генерация изотопа Q , рассчитывается по следующей формуле:

$$Q = \int Y(E)N(E)dE$$

На рис. 3 и 4 показаны скорости генерации изотопов, рассчитанные для двух видов спектров протонов при нормировке $N(>30 \text{ МэВ}) = 1$. Рис. 3 получен для спектра вида $N(E) \sim \exp(-R/R_0)$, где R – магнитная жесткость протона, а рис. 4 – для степенного спектра $N(E) \sim E^{-G}$. На рисунках Q является безразмерной величиной. Для оценки возможного потока излучения в интересующих нас гамма линиях примем, что средний поток протонов, взаимодействующих с веществом солнечной атмосферы, равен потоку протонов, инжектированных в межпланетное пространство, хотя это пред-

положение нуждается в дополнительном обосновании. Есть данные, что отношение этих двух популяций частиц может составлять 100:1 в пользу потока, направленного к Солнцу. По наблюдениям на орбите Земли за последние циклы солнечной активности [5] средний поток протонов солнечных космических лучей $F(>30 \text{ МэВ})$ составляет $30 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ при $R_0 = 100 \text{ МВ}$. При диффузионном распространении протонов в межпланетном пространстве с длиной пробега 0.1 а.е. это приводит к оценке среднего потока протонов, инжектированных из солнечной поверхности $\sim 5 \times 10^4 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Используя наши расчеты величины Q , можно оценить средний поток излучения на орбите Земли в области энергий $\sim 0.84 \text{ МэВ}$ и $\sim 1.2 \text{ МэВ}$ как $2 \times 10^{-6} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Заметим, что поток этого гамма излучения должен существенно зависеть от фазы солнечного цикла и в минимуме активности может быть в несколько раз ниже среднего.

Выводы

Результатом нашего рассмотрения является обновление и расширение (в область больших энергий) проведённых ранее расчётов генерации линейчатого излучения от спокойного Солнца. Важным дополнением было бы сравнение с экспериментальными данными (например, с аппарата RHESSI). Предварительные поиски уверенно идентифицируют sdвоенные линии от ^{54}Mn и ^{56}Co , анализ которых может дать абсолютные потоки направленных к Солнцу частиц и, значит, прояснить роль (нано)вспышек.

Литература

1. Кужевский Б.М. // Письма в Астрон. Журнал. 1977. Т. 3. С. 26.
2. Ковальцов Г.А. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1981. Т. 45. № 7. С. 1155.
3. Asplund M. et al. // Ann. Rev. Astron. Astrophys. 2009. V. 47. P. 481.
4. Allison J. et al. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. 2016. V. A835. P. 186.
5. Nishiizumi K. et al. // Geochim. et Cosmochim. Acta. 2009. V. 73. P. 2163.