

ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЕ СПОКОЙНОГО СОЛНЦА

Ковальцов Г.А.¹, Остряков В.М.²

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

²СПбПУ Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

GAMMA EMISSION OF THE QUIESCENT SUN

Kovaltsov G.A.¹, Ostryakov V.M.²

¹Ioffe Institute, St. Petersburg, Russia

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

We consider the possibility of detecting gamma-line emission from quiescent Sun. This emission can arise due to the production of long-lived radionuclides by solar flare particles in the solar atmosphere. Since such radioisotopes have life time much longer than the solar flare itself their emission can be observed during the quiescent solar periods. High energy gamma continuum has been also detected in these periods by Fermi LAT (100 MeV – 10 GeV) caused by the inverse Compton scattering of energetic Galactic electrons on the visual solar photons.

DOI: 10.31725/0552-5829-2018-223-226

Введение

Известно, что во время солнечных вспышек генерируются вторичные частицы, которые образуются в ядерных взаимодействиях ускоренных ядер с солнечной атмосферой. Среди таких вторичных частиц присутствуют, в том числе, и радиоактивные изотопы. Короткое время их жизни позволяет наблюдать характерные линии от этих изотопов непосредственно во время вспышки или же некоторое время спустя (см. обзор в [1]). В то же время в ядерных реакциях могут образовываться изотопы, имеющие времена жизни тысячи и даже миллионы лет. Снятие возбуждений у таких изотопов может привести к регистрации характерного линейчатого излучения даже в спокойные периоды истории Солнца [2]. Заметим, что в такие периоды также возможна регистрация и непрерывного спектра благодаря обратному комптоновскому рассеянию высокоэнергичных Галактических электронов на тепловых фотонах [3].

В настоящей работе мы рассчитаем скорость образования долгоживущих изотопов в атмосфере Солнца под действием среднего потока космических лучей, падающих на солнечную поверхность. В свою очередь, это позволяет получить потоки выходящего излучения в линиях от этих изотопов и сравнить с возможностями современных детекторов гамма-излучения в диапазоне энергий от сотен кэВ до десяти МэВ.

Методика расчёта скорости генерации радиоизотопов в солнечной атмосфере

Для расчёта образования изотопа сорта i в солнечном веществе в рамках приближения толстой мишени, Q_i (ат/см²с), воспользуемся методикой, изложенной в работе [4]:

$$Q_i = \frac{N_A}{\sum n_k A_k} \int_0^\infty \sum_k n_k \sigma_{ik}(E) I(>E) \left(\frac{dE}{dx} \right)^{-1} dE,$$

где n_k – концентрация ядер мишени с атомной массой A_k , N_A – число Авогадро, $I(>E)$ – интегральный спектр падающих на атмосферу частиц (принимался экспоненциальным по жёсткости с характеристической жёсткостью R_0), σ_{ik} – сечение взаимодействия и (dE/dx) – энергетические потери при движении в солнечном веществе. Характеристики рассматриваемых изотопов (их периоды полураспада и характерные линии) представлены в таблице 1. При этом позитрон-активные изотопы дают аннигиляционную линию 0.511 МэВ (жирное выделение в таблице), а производство радиоизотопов, не дающих при своём распаде линий, рассчитано для оценки их содержания в потоках солнечного ветра (СВ). Измерения малых компонентов СВ (каковыми они и являются) одновременно с регистрацией линий важно с точки зрения диагностики этой плазмы и моделирования процессов зарождения и образования СВ.

Таблица 1.

изотоп	$T_{1/2}$	E_γ , МэВ
^3H	12.3 лет	
^7Be	53.3 дня	0.477
^{10}Be	$1.5 \cdot 10^6$ лет	
^{14}C	5730 лет	
^{22}Na (^{22}Mg)	2.6 лет	0.511 1.274
^{26}Al (^{26}Si)	$7.4 \cdot 10^5$ лет	0.511 1.130 1.809
^{53}Mn (^{53}Fe)	$1.9 \cdot 10^6$ лет	
^{54}Mn	312.3 дня	0.835
^{56}Co (^{56}Ni)	78.8 дня	0.511 ; 0.847, 1.038, 1.238, 1.36, 1.771, 2.035, 2.599, 3.254

Имея теперь скорость генерации конкретного изотопа, можно подсчитать и интенсивность выходящего из Солнца излучения для конкретной

линии. Это было сделано в некотором приближении с учётом поглощения гамма-квантов при прохождении ими солнечного вещества [4].

Результаты и обсуждение

Результаты расчётов скорости генерации для ^3H , ^7Be , ^{10}Be , ^{14}C , ^{22}Na , ^{26}Al , ^{53}Mn , ^{54}Mn и ^{56}Co при нормировке на один падающий протон с энергией >30 МэВ представлены на рисунках 1 и 2 в зависимости от формы спектра частиц, задаваемого параметром R_0 . Эти величины представляют собой интегральное производство соответствующих изотопов в толще солнечного вещества, x (г/см²). Их дальнейший выход в межпланетное пространство с потоками СВ рассчитывался, исходя из простых соображений

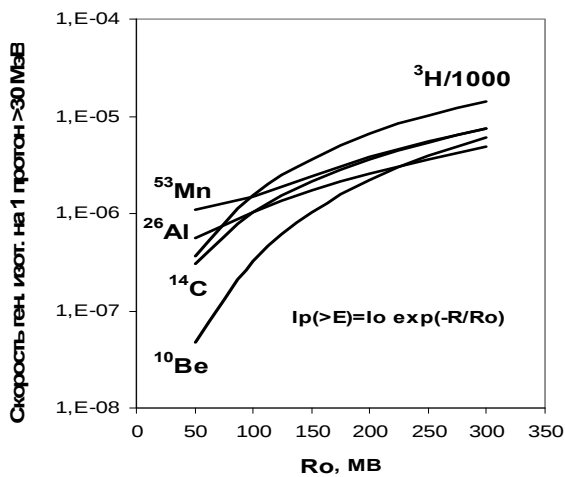


Рис. 1.

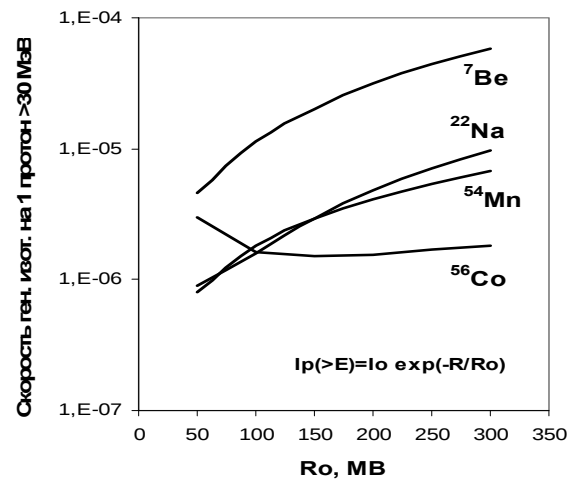


Рис. 2.

баланса образования и потерь частиц (см., например, [5]). В нашем случае такой баланс сводится к следующему уравнению:

$$Q_i = \lambda_i \int_0^{\infty} n_i(x) dx + j n_i(0),$$

где λ_i – постоянная радиоактивного распада, $n_i(x)$ – содержание изотопа на 1 г вещества на глубине x и j – средний поток СВ, оцениваемый величиной $2.3 \cdot 10^{-11}$ г/см²с и подхватывающий соответствующий изотоп с уровня $x = 0$. Процесс перемешивания поверхностных слоёв Солнца не до конца ясен, т.к. не сводится к простой диффузии, поэтому мы предположим, что пространственное распределение частиц подчиняется экспоненциальному закону с характерным масштабом d , $n_i(x) = n_i(0) \exp(-x/d)$, ось x направлена вглубь Солнца. В этих предположениях можно рассчитать содержание рассматриваемых изотопов в СВ относительно водорода. Графики приведены на рисунке 3.

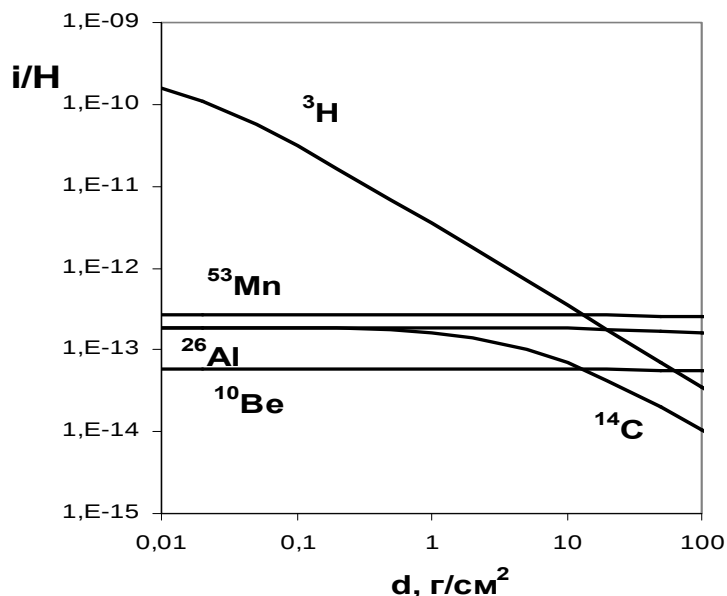


Рис. 3.

Выводы

1. Рассчитаны интенсивности гамма-линий от долгоживущих радиоактивных изотопов, генерируемых в солнечных вспышках, а также выход образованных изотопов в межпланетное пространство вместе с потоками солнечного ветра.

2. Наибольшую интенсивность имеют аннигиляционная линия 0.511 МэВ (вместе с линией 0.447 МэВ от ^7Be), а также линии в области энергий 0.835 и 0.847 МэВ от изотопов ^{54}Mn и ^{56}Co , соответственно.

3. Все расчёты проведены в предположении, что средний поток и спектр падающих на атмосферу Солнца частиц (главным образом, протонов) совпадает с параметрами частиц, выходящих в межпланетное пространство. Свойства же последних определяются в экспериментах по лунным и марсианским грунтам.

Литература

1. Vilmer N. et al. // Space Sci. Rev. 2011. V. 159. P. 167.
2. Кужевский Б.М. // Письма в Астрон. Журнал. 1977. Т. 3. С. 26.
3. Raino S. et al. // EPJ Web of Conference. 2017. V. 136. 03007.
DOI: 10.1051/epjconf/201713603007
4. Ковальцов Г.А. // Известия АН СССР. Сер. физическая. 1981. V. 45. № 7. P. 1155.
5. Kotov Yu.D. et al. // Astrophys. J. 1996. V. 473. P. 514.