

Моделирование регистрации гамма-излучения сегментированными сцинтилляционными детекторами

А.А. Мкртчян^{1,*}, А.С. Позаненко^{2,†}, П.Ю. Минаев^{2,‡}

¹Московский физико-технический институт, физтех-школа физики и исследований им. Л.Д. Ландау, кафедра космической физики
Россия, 141701, Долгопрудный, Институтский переулок, д. 9

²Институт космических исследований РАН
Россия, 117997, Москва, ул. Профсоюзная, д. 84/32

(Поступила в редакцию 31.05.2023; подписана в печать 04.09.2023)

Несмотря на многолетние исследования космических гамма-всплесков (GRB) и гамма-вспышек земного происхождения (TGF), остается много открытых вопросов о модели генерации гамма-излучения этими источниками. Предполагается, что измерение линейной поляризации излучения может дать ответ на ряд нерешенных вопросов физики явлений. При регистрации гамма-излучения сцинтилляционными детекторами также возникает проблема мертвого времени, в течение которого прибор не способен зарегистрировать вновь поступивший квант излучения. Оно начинает играть существенную роль, когда поток гамма-излучения приближается к обратной величине мертвого времени детектора. Такие проблемы и возникают при регистрации гамма-вспышек земного происхождения и наиболее мощных космических гамма-всплесков. Однако с помощью сегментирования детектора можно с одной стороны уменьшить влияние мертвого времени, а с другой стороны измерить поляризацию излучения. В работе проведено моделирование регистрации поляризации излучения сегментированным сцинтилляционным детектором с помощью программного пакета Geant4.

PACS: 95.30.Gv, 95.55.Ka, 95.55.Qf. УДК: 52-17, 520.622, 520.627.

Ключевые слова: линейная поляризация, комптоновский поляриметр, Geant4, мертвое время, космические гамма-всплески (GRB), гамма-вспышки земного происхождения (TGF).

ВВЕДЕНИЕ

Космические гамма-всплески GRB (Gamma-ray burst) являются одними из самых мощных электромагнитных явлений во Вселенной. До сих пор известно о двух моделях происхождения гамма-всплесков: взрыв сверхновой типа Ic с коллапсирующим ядром и слияние двух нейтронных звезд. Несмотря на многолетние исследования, остается много открытых вопросов о происхождении гамма-излучения этих объектов.

Гамма-вспышки земного происхождения TGF (Terrestrial gamma-ray flash) — это короткие импульсы гамма-излучения, возникающие в областях грозовой активности в верхней атмосфере. Гамма-излучение от них эффективно регистрируется теми же самыми детекторами, размещенными на орбите Земли и предназначенными для регистрации гамма-всплесков. Известно, что гамма-излучение TGF обусловлено тормозным излучением релятивистских электронов, однако детали излучения не известны.

Предполагается, что измерение линейной поляризации излучения космических гамма-всплесков и гамма-вспышек земного происхождения может дать ответ на ряд нерешенных вопросов модели излучения.

При регистрации гамма-излучения, в т.ч. сцинтилляционными детекторами, возникает проблема мерт-

вого времени, в течение которого прибор не способен зарегистрировать вновь поступивший квант излучения. Оно препятствует измерению истинного потока и энергетического спектра мощных событий гамма-всплеском, например, [1], и мощных вспышек TGF, например [2]. Однако влияние мертвого времени можно уменьшить путем сегментирования детектора, т.е. разделения детектора на элементы меньшего размера, при том, что суммарный объем всех сегментированных элементов останется таким же, как при использовании единого детектора. Одновременно, сегментированные детекторы можно использовать для измерения поляризации гамма-излучения с помощью комптоновского рассеяния, например [3].

1. КОМПТОНОВСКИЙ ПОЛЯРИМЕТР

Сегментированные детекторы гамма-излучения используются для регистрации поляризации с помощью комптоновского рассеяния. Рассмотрим принцип работы комптоновских поляриметров на примере сегментированного гамма-спектрометра (СГС) в составе полезной нагрузки малого космического аппарата Чибис-АИ, который разрабатывается в институте космических исследований (ИКИ РАН). Он состоит из множества стержней, представляющих собой сцинтилляторы из германата висмута (BGO), каждый из которых сопряжен с кремниевым фотоумножителем.

Пусть, например, падающий поляризованный фотон испытал комптоновское рассеяние в одном из стержней и фотопоглотился в другом стержне (рис. 1). Исполь-

* mkr.aa@phystech.edu

† apozenen@iki.rssi.ru

‡ minaevp@mail.ru

зую геометрию положений двух стержней детектора, можно зарегистрировать азимутальный угол комптоновского рассеяния ϕ , после чего можно сделать вывод о поляризации.

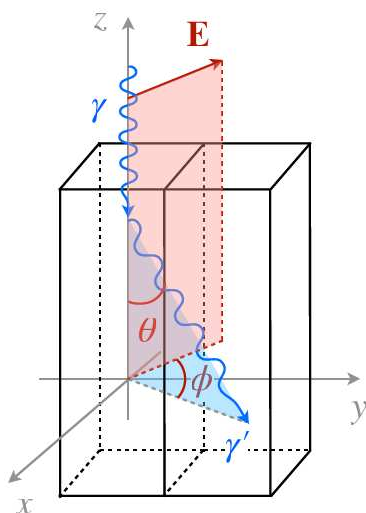


Рис. 1. Принцип работы комптоновского поляриметра

Рассмотрим подробнее, куда отклоняется фотон после упругого рассеяния на свободном электроном. Для линейно поляризованных фотонов дифференциальное сечение комптоновского рассеяния даётся формулой Клейна–Нишины [4]:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{1}{2} r_e^2 \frac{E_{\gamma'}^2}{E_{\gamma}^2} \left(\frac{E_{\gamma'}}{E_{\gamma}} + \frac{E_{\gamma}}{E_{\gamma'}} - 2 \sin^2 \theta \cos^2 \phi \right).$$

Согласно формуле Клейна–Нишины, наиболее вероятный азимутальный угол рассеяния равен $\frac{\pi}{2}$, т.е. когда плоскость комптоновского рассеяния перпендикулярна плоскости поляризации (рис. 2).

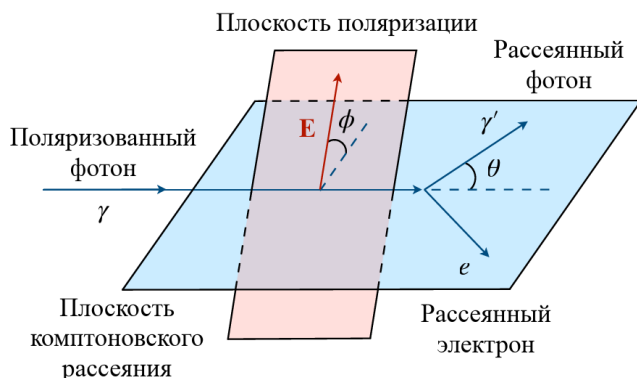


Рис. 2. Иллюстрация комптоновского рассеяния

На модуляционной кривой, представляющей собой зависимость дифференциального сечения от азимутального угла рассеяния, видно, что в результате эф-

фекта Комптона фотоны рассеиваются преимущественно перпендикулярно плоскости поляризации падающих фотонов (рис. 3).

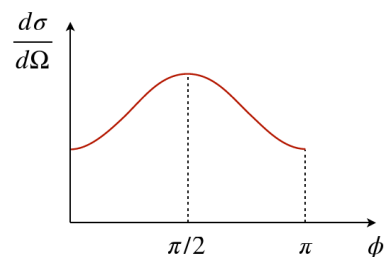


Рис. 3. Модуляционная кривая

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕТЕКТОРА С ПОМОЩЬЮ GEANT4

Моделирование сегментированного сцинтилляционного детектора для регистрации гамма-излучения осуществляется с помощью Geant4 — инструмента для моделирования прохождения элементарных частиц через вещество с использованием методов Монте-Карло. Так, была создана симуляция взаимодействия фотонов с сцинтилляционным детектором из германата висмута (рис. 4). Размер стержня: $17 \times 17 \times 60$ мм³. Также были подключены необходимые библиотеки для описания физических процессов взаимодействия излучения с веществом, в т.ч. библиотека, основанная на формуле Клейна–Нишины для учёта поляризации фотонов.

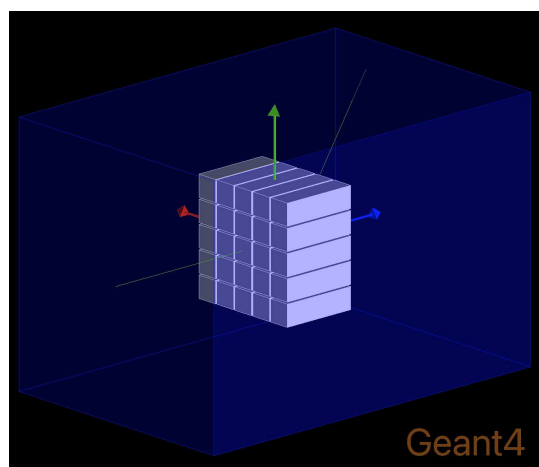


Рис. 4. Моделирование сегментированного детектора

В результате с помощью Geant4 были построены модуляционные кривые при разных энергиях и при разном количестве падающих фотонов в результате взаимодействия с сцинтилляционным стержнем (рис. 5).

На основе таких модуляционных кривых было найдено минимальное количество фотонов для статистически достоверной регистрации поляризации (рис. 6).

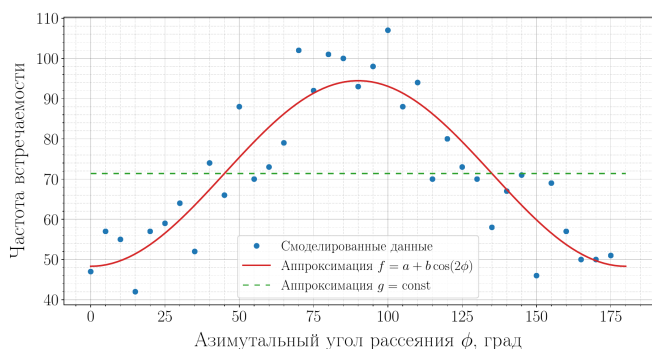


Рис. 5. Модуляционная кривая для 3000 падающих фотонов с энергией 400 кэВ и 100% степенью поляризации

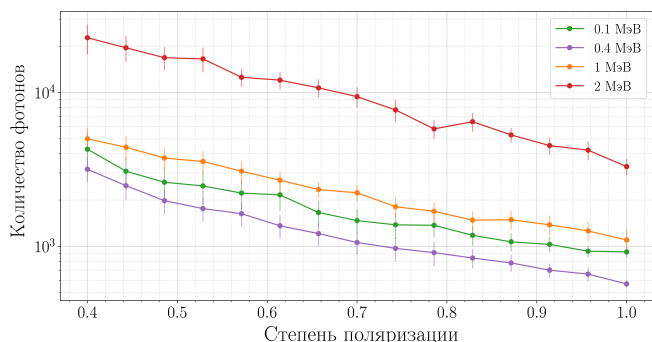


Рис. 6. Минимальное количество фотонов для статистически достоверной регистрации поляризации

Полученные с помощью критерия Пирсона кривые соответствует 99.8% вероятности отвергнуть гипотезу об отсутствии поляризации ($g = \text{const}$).

Видно, что меньше всего фотонов для регистрации их поляризации требуется для фотонов с энергией 400 кэВ, т.к. при таких энергиях эффект Комптона наиболее вероятен. Фотоны с энергией 100 кэВ чаще испытывают фотопоглощение, т.е. лишь небольшая часть из этих фотонов будет испытывать комптоновское рассеяние, благодаря которому можно было бы зарегистрировать поляризацию излучения.

При построении модуляционных кривых и определении минимального количества фотонов для регистрации поляризации не учитывалась регистрация фотонов в соседних стержнях, поэтому это нижняя оценка количества фотонов. Азимутальный угол рассеяния определялся по направлению движения фотона после взаимодействия с одним стержнем, хотя в реальности фотон считается зарегистрированным, если он провзаимодействовал как минимум с двумя стержнями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате моделирования сегментированного сцинтилляционного детектора с помощью Geant4 были построены модуляционные кривые при разных энергиях и при разном количестве падающих фотонов. На их основе было найдено минимальное количество фотонов для статистически достоверной регистрации поляризации излучения. Данные методики будут использованы для калибровки сегментированного гамма-спектрометра в составе полезной нагрузки малого космического аппарата Чибис-АИ, который разрабатывается в ИКИ РАН.

- [1] Frederiks D., Svinkin D., Lysenko A. L. et al. // The Astrophysical Journal Letters **949**. L7. (2023).
 [2] Fishman G.J., Bhat P.N., Mallozzi R. et al. // Science. **264**, Iss. 5163. 1313. (1994).

- [3] Kole M., de Angelis N., Burgess J.M. et al. [Gamma-Ray Polarization Results of the POLAR Mission and Future Prospects / 37th Intern. Cosmic Ray Conference \(ICRC 2021\). 12–23 July, Berlin, Germany. 2021.](#)
 [4] Klein O., Nishina Y. // Zeitschrift für Physik. **52**. Iss. 11–12. 853. (1929).

Simulation of gamma radiation detection by segmented scintillation detectors

A.A. Mkrtchyan^{1,a}, A.S. Pozanenko^{2,b}, P.Yu Minaev^{2,c}

¹Moscow Institute of Physics and Technology, Landau School of Physics and Research, Department of Space Physics, Dolgoprudny 141701, Russia ²Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow 117997, Russia E-mail: ^amkr.aa@phystech.edu, ^bapozanen@iki.rssi.ru, ^cminaevp@mail.ru

Despite years of research, there are still many open questions about the model of gamma-ray generation by these sources. It is assumed that the measurement of the linear polarization of radiation can provide an answer to a number of unresolved questions in the physics of phenomena. When registering gamma radiation with scintillation detectors, the problem of dead time also arises, during which the device is not able to register a newly received quantum of radiation. It begins to play a significant role when the gamma-ray flux approaches the inverse of the dead time of the detector. Such problems arise when registering terrestrial gamma-ray flashes and the most powerful cosmic

gamma-ray bursts. However, by segmenting the detector, it is possible on the one hand to reduce the effect of dead time, and on the other hand to measure the polarization of radiation. In this paper, a simulation of the registration of radiation polarization by a segmented scintillation detector using the Geant4 software package is carried out.

PACS: 95.30.Gv, 95.55.Ka, 95.55.Qf.

Keywords: linear polarization, compton polarimeter, Geant4, dead time, gamma-ray bursts (GRB), terrestrial gamma-ray flashes (TGF).

Received 31 May 2023.

Сведения об авторах

1. Мкртчян Аркадий Ашотович — студент; e-mail: mkr.aa@phystech.edu.
2. Позаненко Алексей Степанович — канд. физ.-мат. наук, e-mail: apozenen@iki.rssi.ru.
3. Минаев Павел Юрьевич — канд. физ.-мат. наук, e-mail: minaevp@mail.ru.