

Моделирование комптоновского поляриметра СГС/Чибиc-АИ

А.А. Мкртчян^{1,2,*}, А.С. Позаненко^{1,2,†}, 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 10.06.2024; подписана в печать 19.09.2024)

Несмотря на многолетние исследования космических гамма-всплесков, остается много открытых вопросов о модели генерации гамма-излучения этими источниками. Предполагается, что измерение линейной поляризации излучения гамма-всплесков может дать ответ на ряд нерешенных вопросов физики явления. Принцип регистрации линейной поляризации гамма-излучения основан на анизотропии комптоновского рассеяния. Это свойство используется для разработки комптоновских поляриметров, которые представляют собой массив сегментированных сцинтилляционных детекторов. В работе проведено моделирование комптоновского поляриметра СГС/Чибиc-АИ, разрабатываемого в ИКИ РАН, с помощью программного пакета Geant4. Исследуется эффективность регистрации поляризации гамма-излучения таким детектором.

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

Ключевые слова: гамма-всплески (GRB), комптоновский поляриметр, моделирование, Geant4.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время особое внимание уделяется измерению поляризации гамма-излучения от различных астрофизических источников. Точное измерение степени линейной поляризации может быть использовано для выбора моделей излучения с различными предсказаниями степени поляризации. Например, до сих пор остается невыясненным механизм излучения космических гамма-всплесков — одних из самых ярких электромагнитных явлений во Вселенной. Предполагается, что измерение линейной поляризации гамма-всплесков может дать ответ на ряд нерешенных вопросов о происхождении этого явления. А измерения поляризационного угла помогут выяснить геометрию излучающей области.

Принцип регистрации линейной поляризации гамма-излучения основан на анизотропии комптоновского рассеяния. Согласно формуле Клейна–Нишины, характеризующей дифференциальное сечение комптоновского рассеяния, фотоны рассеиваются преимущественно перпендикулярно плоскости поляризации падающих фотонов [1]. Это свойство используется для создания комптоновских поляриметров, которые представляют собой массив сегментированных сцинтилляционных детекторов [2]. Ранее авторами была проделана работа [3] по упрощенному моделированию комптоновского поляриметра. В настоящей статье большое внимание уделено развитию метода регистрации поляризации. Усложненная модель комптоновского поляриметра уже в большей степени приближена к реальным усло-

виям работы детектора. Детали устройства комптоновских поляриметров можно найти в статье [3], опубликованной ранее в Ученых записках физического ф-та Московского ун-та.

1. МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕТЕКТОРА В GEANT4

В институте космических исследований (ИКИ РАН) разрабатывается сегментированный гамма-спектрометр (СГС), который входит в состав микроспутника Чибиc-АИ. Моделирование комптоновского поляриметра СГС осуществляется с помощью Geant4 — инструмента для моделирования прохождения элементарных частиц через вещество с использованием методов Монте–Карло. В Geant4 подключены необходимые библиотеки для описания физических процессов взаимодействия излучения с веществом: фотоэффект, комптоновское рассеяние, рождение электронно-позитронных пар и др. Также включена библиотека, основанная на формуле Клейна–Нишины, для учёта поляризации фотонов.

СГС состоит из 32 сцинтилляционных брусков, каждый из которых сопряжен с кремниевым фотоумножителем. Размер одного бруска $17 \times 17 \times 60$ мм³. Расстояние между брусками 4 мм. Материал сцинтиллятора Y₂SiO₅ (ортосиликат иттрия). Фотоны падают на детектор перпендикулярно торцам брусков. Точка падения фотонов разыгрывается случайным образом так, чтобы на каждый брусок приходился одинаковый поток. Поляризация фотонов линейная. Степень поляризации фотонов определяется как отношение числа поляризованных фотонов и полного числа упавших фотонов, которое складывается из числа поляризованных и неполяризованных фотонов. Здесь под неполяризованными фотонами имеются в виду те фотоны, для которых вектор поляризации разыгрывается случайным

* mkr.aa@phystech.edu

† apozenen@iki.rssi.ru

‡ minaevp@mail.ru

образом. Пример симуляции взаимодействия фотонов с детектором СГС представлен на рис. 1.

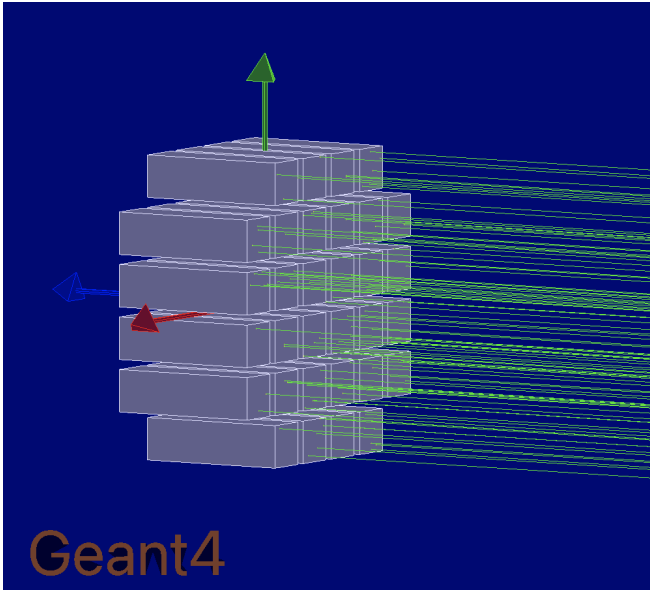


Рис. 1. Моделирование сегментированного детектора

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УГЛА РАССЕЯНИЯ

Информация о векторе поляризации падающего фотона содержится в азимутальном угле рассеяния фотона. Для регистрации азимутального угла рассеяния падающий фотон должен испытать взаимодействия в двух брусках детектора: комптоновское рассеяние в первом бруске, затем фотопоглощение или повторное комптоновское рассеяние во втором бруске. Таким образом, используя геометрию положений двух брусков детектора, можно зарегистрировать азимутальный угол комптоновского рассеяния, после чего сделать вывод о поляризации. На рис. 2 схематично показана сборка брусков детектора в сечении. В случае, если ненулевая энергия зарегистрирована только в двух брусках, можно определить угол ϕ . Здесь азимутальный угол рассеяния ϕ — это угол между линией, соединяющей два бруска, и вертикальной осью детектора. Угол поляризации излучения — это угол между плоскостью поляризации падающего излучения и вертикальной осью детектора. В моделировании угол поляризации задается вектором поляризации падающего фотона. Далее будем понимать под комптоновскими такие фотоны, которые произвели ненулевую энергию в двух брусках сегментированного сцинтилляционного детектора.

3. ЭТАЛОННЫЕ МОДУЛЯЦИОННЫЕ КРИВЫЕ

Регистрируя азимутальные углы рассеяния ϕ , можно построить модуляционную кривую. Она представ-

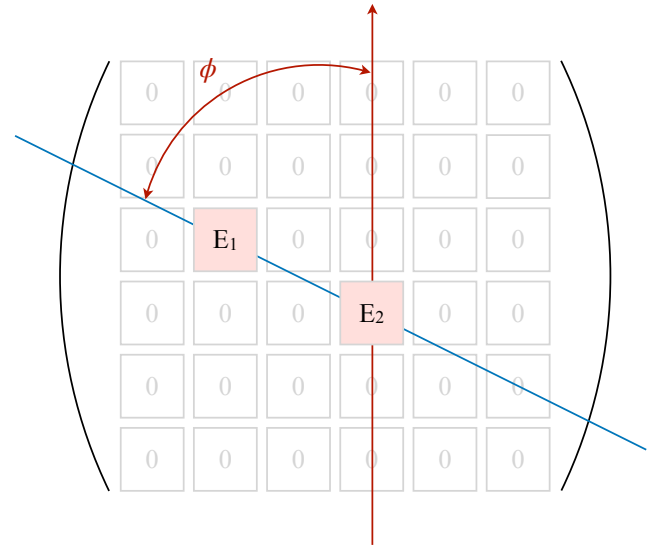


Рис. 2. Матрица зарегистрированных энергий

ляет собой распределение углов рассеяния ϕ . Для идеального поляриметра модуляционная кривая в случае неполяризованного потока фотонов не зависит от угла ϕ и представляет собой горизонтальную прямую. В случае 100% поляризованного потока фотонов модуляционная кривая описывается идеальной синусоидальной функцией с периодом 180° согласно формуле Клейна–Нишины. Под идеальным комптоновским поляриметром понимается детектор, состоящий из тонких брусков. Такие бруски позволяют регистрировать углы ϕ с большей точностью. Однако, если бруски имеют большие поперечные размеры, модуляционная кривая может сильно исказиться. В этом случае кривую уже нельзя описать синусоидальной функцией.

Для восстановления истинной степени поляризации падающего излучения необходимо иметь эталонные модуляционные кривые, полученные для большого числа падающих фотонов. Эталонные кривые являются откликом детектора на определенную степень и угол поляризации падающего излучения. На рис. 3 изображен пример эталонной кривой для фотонов с энергией 0.5 МэВ, 100% степенью поляризации и углом поляризации -90° . Например, согласно этому графику около 40% комптоновских фотонов рассеиваются под углом $\phi = 0^\circ$. Погрешность числа отсчетов принимается равной корню из отсчетов. При этом на графике отсчеты нормированы на суммарное число отсчетов во всех бинах. Т.к. эталонные кривые получены для большого количества падающих фотонов, то для них погрешностью нормированного числа отсчетов можно пренебречь.

С помощью моделирования в Geant4 было построено множество эталонных модуляционных кривых для разных углов поляризации и для разных степеней поляризации монохроматического излучения. Выяснено, что число отсчетов в каждом бине модуляционной кривой описывается функцией вида: $f(\phi) = a + \text{dop} \cdot b \cdot$

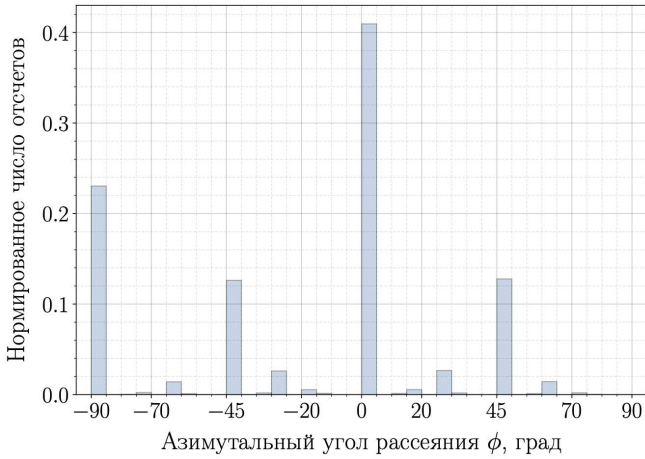


Рис. 3. Эталонная модуляционная кривая для 1 млн фотонов

cos $2(\phi + \phi_0)$, где $\text{dop} \in [0, 1]$ — степень поляризации. Параметры аппроксимации a , b , ϕ_0 являются уникальными для каждого бина на модуляционной кривой. Функция $f(\phi)$ имеет такой вид из-за угловой зависимости дифференциального сечения Клейна–Нишины: $\frac{d\sigma}{d\Omega} \propto 1 - \mu \cos(2\phi)$. При уменьшении степени поляризации среднее значение a функции $f(\phi)$ остается неизменным, но амплитуда колебаний $\text{dop} \cdot b$ уменьшается пропорционально степени поляризации. Отметим, что эталонные кривые отличаются для фотонов разных энергий. В частности, это связано с тем, что модуляционный фактор μ , характеризующий амплитуду колебаний, зависит от энергии падающих фотонов. Итак, для работы комптоновского поляриметра необходимо иметь эталонные кривые. В реальных условиях, имея наблюдаемую модуляционную кривую, можно сопоставить ей эталонную кривую и таким образом определить степень и угол поляризации излучения.

4. ДОВЕРИТЕЛЬНАЯ ОБЛАСТЬ ПАРАМЕТРОВ ИЗЛУЧЕНИЯ

Заключительным шагом при сопоставлении наблюдаемой модуляционной кривой с эталонными кривыми является построение доверительной области поляризационных параметров излучения. На рис. 4 и 5 изображены примеры таких областей для разного числа фотонов, упавших на детектор. Цвет характеризует вероятность того, что определенные параметры излучения соответствуют действительности. Ромб — это истинное значение поляризационных параметров, которое было задано в действительности. Круглая точка — это наиболее вероятное значение, полученное в результате сопоставления наблюдаемой модуляционной кривой с эталонными. При сопоставлении кривых использовался метод минимума хи-квадрат. Для каждой точ-

ки на графике значение χ^2 вычислялось по формуле:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{N_{\text{observed}} - N_{\text{model}}}{\sigma_{\text{observed}}} \right)^2,$$

где n — число бинов на модуляционной кривой, N_{observed} и N_{model} — нормированное число отсчетов на наблюдаемой и эталонной модуляционной кривой, σ_{observed} — погрешность для N_{observed} . Наиболее вероятное значение поляризационных параметров определяется наименьшим χ^2_{min} . Рис. 4 и 5 представляют собой цветные карты $\Delta\chi^2 = \chi^2 - \chi^2_{\text{min}}$. Также на рисунках изображены контуры вероятности, соответствующие $\Delta\chi^2 = 2.28, 4.61, 9.21$. Эти значения являются верхними квантилями с вероятностями 32%, 10%, 1% для χ^2 -распределения с 2 степенями свободы. Подробное описание применения метода $\Delta\chi^2$ можно найти в статьях [4, 5].

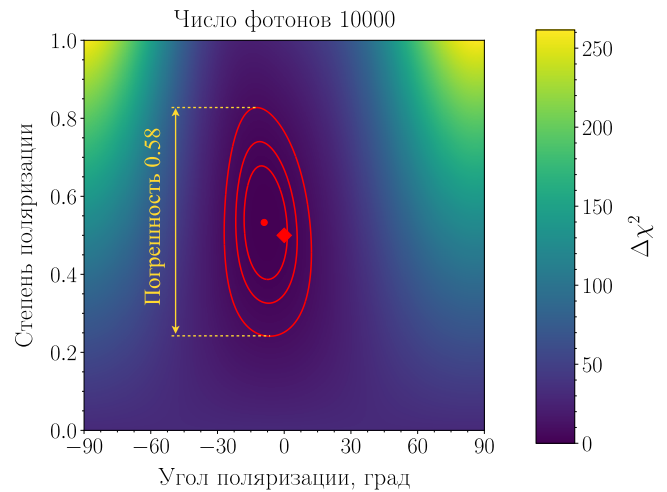


Рис. 4. Двумерный функционал угла и степени поляризации для 10 тыс. фотонов с энергией 0.5 МэВ

В обоих случаях (рис. 4, 5) истинная степень поляризации падающего излучения 50%, угол поляризации 0°. Видно, что с увеличением числа фотонов, падающих на детектор, контуры вероятности сужаются. Таким образом, погрешность определения степени поляризации уменьшается с ростом числа фотонов. Здесь под погрешностью будем понимать полный размер внешнего контура, который соответствует $\Delta\chi^2 = 9.21$.

5. ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ СТЕПЕНИ ПОЛЯРИЗАЦИИ

В работе была исследована зависимость погрешности определения степени поляризации излучения от числа падающих фотонов. На рис. 6 изображены результаты, полученные с помощью моделирования для

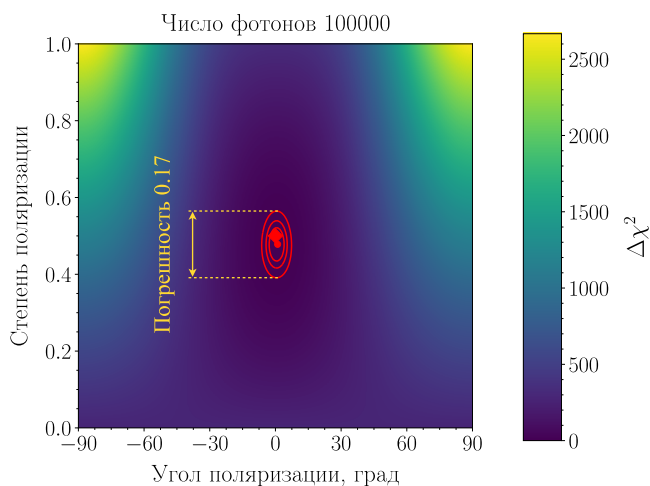


Рис. 5. Двумерный функционал угла и степени поляризации для 100 тыс. фотонов с энергией 0.5 МэВ

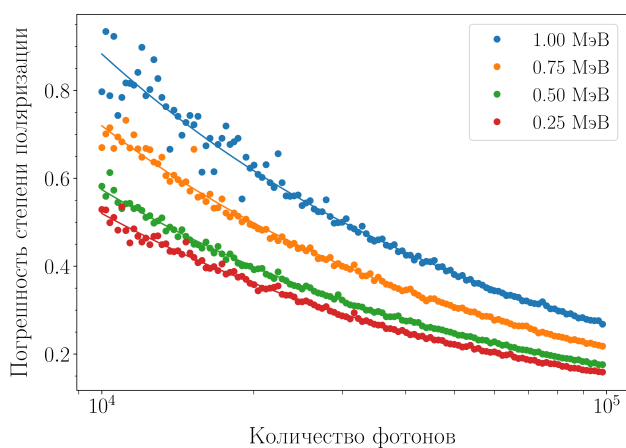


Рис. 6. Погрешность определения степени поляризации излучения

фотонов разных энергий. Точность определения степени поляризации растёт с увеличением числа фотонов. Данные хорошо описываются степенной функцией вида $y = ax^b$. Причем для фотонов разных энергий показатель степени одинаков: $b \approx -0.52$.

Точность измерения поляризации зависит от эффективности регистрации комптоновских фотонов. Эффект Комптона наиболее вероятен при энергиях порядка $m_e c^2$. На более низких энергиях доминирует фотопоглощение. Фотоны с энергией выше $2m_e c^2$ уже могут вызывать образование электрон-позитронной пары. Например, на энергиях 0.25 МэВ доминирует фотопоглощение, а на энергиях 0.5 МэВ — комптоновское рассеяние. Однако, несмотря на это, для фотонов с энергией 0.25 МэВ погрешность определения степени поляризации оказывается меньше, чем для фотонов с энергией 0.5 МэВ. Это связано с тем, что с уменьшением энергии согласно формуле Клейна–Нишины возрастает модуляционный фактор [6]. Т.е. из-за большей амплитуды колебаний на модуляционной кривой для фотонов с энергией 0.25 МэВ легче зарегистрировать поляризацию. Однако при дальнейшем уменьшении энергии комптоновское рассеяние уже будет маловероятным, и погрешность определения степени поляризации наоборот возрастет.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе разработана методика определения степени и угла поляризации излучения для детектора СГС/Чибис-АИ. Построены эталонные модуляционные кривые и доверительные области поляризационных параметров излучения. Получена зависимость погрешности степени поляризации от числа фотонов. Выяснено, что точность измерения поляризации зависит не только от числа падающих фотонов, но и от их энергии, которая влияет на амплитуду модуляции при комптоновском рассеянии.

[1] Klein O., Nishina Y. // Zeitschrift fur Physik. **52**, Iss. 11-12. 853 (1929).
 [2] Kole M., de Angelis N., Burgess J.M. et al. // Mission and Future Prospects / 37th Intern. Cosmic Ray Conference (ICRC 2021). 12–23 July, Berlin, Germany. 2021.
 [3] Мкртчян А. А., Позаненко А. С., Минаев П. Ю. // Учен. зап. физ. фак-та Моск. ун-та. **44**. (2023).
 [4] Lampton M., Margon B., Bowyer S. // Astrophys. J. **208**. 177 (1976).

[5] Avni Y. // Astrophys. J. **210**. 642 (1976).
 [6] Мкртчян А. А., Позаненко А. С., Минаев П. Ю. // 20-я Конф. молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования». сб. тр. М.: ИКИ РАН. (2023).

Simulation of the Compton polarimeter SGS/Chibis-AI

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

¹*Moscow Institute of Physics and Technology, Landau School of Physics and Research, Department of Space Physics, Dolgoprudny 141701, Russia*

²*Space 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 many years of research on cosmic gamma-ray bursts, there are still many open questions about the model of gamma-ray generation by these sources. It is assumed that measuring the linear polarization of radiation can provide an answer to a number of unresolved questions in the physics of phenomena. The principle of registration of linear polarization of gamma radiation is based on the anisotropy of Compton scattering. This property is used to develop Compton polarimeters, which are an array of segmented scintillation detectors. In this paper, the authors conducted a simulation of the Compton polarimeter SGS/Chibis-AI, developed at the Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences, using the Geant4 software package. The efficiency of detecting the polarization of gamma radiation with such a detector is being investigated.

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

Keywords: gamma-ray bursts (GRB), compton polarimeter, simulation, Geant4.

Received 10 June 2024.

Сведения об авторах

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