

## Спектральный анализ длинных гамма-всплесков как инструмент исследования ранней Вселенной

А. С. Никулина<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра физики космоса

<sup>2</sup>Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

(Поступила в редакцию 09.06.2025; подписана в печать 16.03.2026)

В статье рассмотрен спектр длинного и яркого гамма-всплеска GRB 180720B с целью нахождения особенностей в спектре в областях ядерных резонансов. С помощью метода резонансного гамма-поглощения GRAM проведён их дальнейший анализ с учётом возможного наличия поглотителей на пути распространения гамма-квантов от источника до наблюдателя. Полученное в ходе работы спектральное распределение энергии свидетельствует о наличии в спектре линии поглощения в районе 300 МэВ. На основании работ, посвящённых взаимодействию гамма-квантов с веществом, сделан вывод о том, что обнаруженная линия может соответствовать  $\Delta$ -резонансу, рассеянному на одном или нескольких поглотителях, либо являться комбинацией двух линий в разных энергетических диапазонах, слившихся в одну в силу наличия энергетического расширения.

PACS: 98.70.Rz, 95.85.Pw, 25.20.Dc, 95.75.Fg

УДК: 52-732, 539.172.3

Ключевые слова: гамма-всплески, спектральный анализ, резонансное поглощение, дельта-резонанс, линии поглощения в гамма-диапазоне, ранняя Вселенная, гамма-спектроскопия.

### ВВЕДЕНИЕ

Гамма-всплески (GRB) — наиболее яркие электромагнитные события, происходящие во Вселенной. Гамма-всплеском называется взрывоподобный выброс фотонов гамма-излучения за короткий промежуток времени.

Первоначальная, наиболее яркая фаза гамма-всплеска называется «быстрой» (prompt). Помимо нее существует долгоживущее «послесвечение» (afterglow), как правило, это излучение в более длинноволновом спектре. Быстрая фаза является бимодальной, в соответствии с этим гамма-всплески делятся на короткие (длительностью до 2 с) и длинные (более 2 с). Эти две категории отличаются спектрально: короткие гамма-всплески имеют более жесткий спектр гамма-излучения (больше фотонов высокой энергии), тогда как для длинных характерен мягкий спектр. Различают также и способы формирования коротких и длинных гамма-всплесков [1].

Анализ гамма-всплесков является ценным инструментом для получения информации о ранней Вселенной. В силу своей яркости в гамма-диапазоне, а также больших значений красных смещений, гамма-всплески могут служить «стандартными свечами» [2] вместо, например, сверхновых типа Ia. С помощью гамма-всплесков возможно изучение эволюции темной энергии [3], реконструкции истории звездообразования во Вселенной [4]. Наконец, благодаря исследованию линий поглощения в спектрах гамма-всплесков становится возможным получение информации о химическом

составе и металличности на больших красных смещениях, а значит, и о звездообразовании [5].

### 1. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДА РЕЗОНАНСНОГО ГАММА-ПОГЛОЩЕНИЯ

В настоящей работе для исследования эволюции ранней Вселенной используется метод резонансного гамма-поглощения GRAM (gamma-ray absorption method) [6–8]. Этот метод позволяет изучить эволюцию ранней Вселенной и роль звезд III поколения (Pop III) в этой эволюции:

- Анализ особенностей поглощения гамма-лучей в спектре GRB позволяет обнаружить легкие элементы, например,  $^{14}\text{N}$ ,  $^{12}\text{C}$  и  $^{16}\text{O}$  [9], выделившиеся при взрыве парно-нестабильных сверхновых (PISN), которым завершается эволюция звезд Pop III;
- Измерение глубины линии поглощения при известном красном смещении позволяет узнать содержание барионов и металличность галактики-хозяина гамма-всплеска [6];
- Может быть оценено красное смещение объектов с неизвестной идентификацией [7];
- При различных красных смещениях  $z$  линии поглощения может быть изучена эволюция межгалактической среды, то есть по распределению  $z$  гамма-всплесков может быть восстановлена зависимость скорости космического звездообразования от  $z$  [7];

\* nikulina.as21@physics.msu.ru

- Обнаружение GRB при  $z > 6$  в больших количествах открывает границу эпохи «темных веков» в эволюции Вселенной [6];
- При сохранении гравитационной связи между барионной и темной материями возможно использование GRB для изучения гало темной материи [10] и распределения темной материи [11].

Для приведения в действие описанного выше плана по исследованию ранней Вселенной необходимо в первую очередь разобраться в физике процесса резонансного поглощения.

### 1.1. Резонансы

Рассмотрим процессы взаимодействия электромагнитного излучения с веществом. Преобладающим способом взаимодействия гамма-излучения с веществом при энергиях менее 100 кэВ является фотоэффект, в диапазоне 100 кэВ–10 МэВ — комптон-эффект, а при энергиях больше 10 МэВ — в основном образование электрон-позитронных пар на ядрах вещества. Тогда при энергиях гамма-квантов более 100 кэВ, которые и будут рассматриваться в нашем методе, наблюдается довольно плавная функциональная зависимость поперечного сечения от энергии, поэтому становится возможным обнаружить различные особенности в спектрах гамма-квантов.

Помимо хорошо известных процессов взаимодействия фотонов высокой энергии с веществом (комptonовское рассеяние и образование пар) в поперечном сечении взаимодействия фотонов с ядрами вещества наблюдаются еще дополнительные резонансные пики — ядерные резонансы. Зависимость от энергии сечения поглощения фотонов на атомных ядрах имеет три области с характерными пиками в поперечном сечении:

1.  $\sim 7$  МэВ в области «карликового» («rugby») дипольного резонанса (PDR);
2.  $\sim 20$ –30 МэВ в области гигантского дипольного резонанса (GDR);
3.  $\sim 325$  МэВ в области дельта-резонанса ( $\Delta$ -резонанс).

Для легких ядер существует также небольшой скачок при энергии  $\sim 800$  МэВ — так называемый  $N^*$ -резонанс, который наиболее выражен при фотонно-адронных взаимодействиях [12].

В нашей задаче изучения эволюции ранней Вселенной наиболее доступными для обнаружения линиями поглощения являются:  $\Delta$ -резонанс в поглотителе H, как в самом распространенном во Вселенной веществе, составляющем 94% от общей доли атомов, и GDR в поглотителе He, который составляет около 4% от обычного барионного вещества во Вселенной. Кроме того,

может наблюдаться и PDR, объясняющийся слабым колебанием оболочек в нейтронно-избыточных тяжёлых ядрах.

Линии поглощения, соответствующие данным ядерным резонансам, при достаточном энергетическом разрешении прибора и хорошей статистике фотонов могут быть легко обнаружены на фоне относительно гладкого спектра в гамма-диапазоне. Это выделяет метод GRAM на фоне других методик спектрального анализа Вселенной.

### 1.2. Описание метода GRAM

Метод резонансного гамма-поглощения GRAM основывается на обнаружении линий поглощения в энергетическом спектре «rpoint»-фазы гамма-всплеска или другого яркого в диапазоне энергий от МэВ до ГэВ объекта и дальнейшем их анализе. При прохождении гамма-квантов через вещество происходит их резонансное поглощение ядрами атомов, если энергия гамма-кванта соответствует энергии ядерного перехода. Пучок гамма-квантов исследует все поглотители вдоль прямой линии видимости от точечного источника в направлении наблюдателя. В результате последующего анализа определяются величины колонн поглощения и красные смещения, в том числе галактики-хозяина объекта и вещества в гало Млечного пути.

Дифференциальный поток фотонов от точечного источника, наблюдаемый на Земле, может быть записан как функция энергии фотона и красного смещения поглотителя [8]:

$$\frac{dN}{dE} = \left(\frac{dN}{dE}\right)_{\text{unabsorbed}} \times e^{-\tau(E,z)},$$

где  $\tau$  — оптическая глубина поглощения гамма-квантов,  $E$  — энергия фотонов,  $z$  — красное смещение.  $(dN/dE)_{\text{unabsorbed}}$  при этом является полностью сформированным спектром, не связанным с объемным движением струи. Зависимость  $\tau$  от  $E$  и  $z$  довольно сложная, поэтому в качестве самой простой гипотезы предполагается наличие двух поглотителей, один из которых находится на красном смещении галактики-хозяина гамма-всплеска, а другой — при нулевом красном смещении, то есть в гало или диске Млечного Пути. Для разложения по линиям поглощения более сложной комбинации поглотителей с разными красными смещениями потребовалось бы большое количество фотонов и достаточное энергетическое и угловое разрешение гамма-телескопа.

Из такого анализа может быть найдено, например, красное смещение галактики-хозяина, поскольку поглотитель на красном смещении  $z$  имеет линию поглощения на энергии  $E_{\text{absorb}}$  [6]:

$$E_{\text{absorb}} = \frac{E_{\text{res}}}{(1+z)}, \quad (1)$$

где  $E_{\text{res}}$  — энергия рассматриваемого резонанса.

Также может быть обнаружено и измерено содержание определенных ядер вещества. Так, при взрыве звезд III поколения выделяется большое количество  $^{14}\text{N}$ ,  $^{12}\text{C}$  и  $^{16}\text{O}$ , и, следовательно, ожидаются линии поглощения в высокоэнергетическом спектре гамма-всплеска из-за поглощения гамма-квантов на одном уровне возбуждения соответствующего ядра. Тем не менее, в настоящей работе в качестве основных поглотителей рассматриваются водород и гелий, поскольку всех тяжелых элементов очень мало и они не играют роли при анализе сечений поглощения.

### 1.3. Преимущества метода GRAM

Резонансное поглощение лежит в основе спектроскопического анализа не только в гамма-диапазоне энергий. Это явление аналогично, например, резонансной флуоресценции в ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах (10–100 эВ и 100 эВ–10 кэВ соответственно). Зачастую в астрофизике рассматриваются не ядерные, а электронные резонансы, такие как линии Лаймана, и другие спектральные переходы, например, линии поглощения от высокоионизированных O VII и O VIII.

В отличие от ультрафиолетового, оптического и рентгеновского диапазонов энергии, где интерпретация результатов зависит от учёта параметров окружающей среды, таких как температура или ионизационные состояния атомов, в гамма-диапазоне рассматриваются только процессы поглощения на атомных ядрах. Значит, поглощение гамма-излучения нечувствительно к ионизации или химическому состоянию поглотителя, как в работах [13, 14].

Диапазон гамма-излучения с МэВ–ГэВ энергиями представляется наиболее подходящим для анализа спектров гамма-всплесков на больших красных смещениях и для получения данных о составе и эволюции ранней Вселенной, поскольку в случае этого диапазона можно говорить об однозначности эксперимента. Например, обнаружив две-три линии поглощения в спектре, можно уже довольно точно найти красное смещение для гамма-всплеска по формуле (1).

Кроме этого, метод GRAM полезен и в качестве вспомогательного метода для анализа в других диапазонах энергий. При анализе спектров квазаров ранние фазы эволюции активных ядер галактик и роста сверхмассивных черных дыр затемнены в рентгеновском, оптическом и ультрафиолетовом диапазоне. Большая часть линий поглощения насыщенные (или черные), и величины колонн поглощения, полученные на основании глубины соответствующих линий поглощения, являются лишь нижними пределами. Известно, что столбцы поглощения в ультрафиолете и оптике обычно примерно в 100 раз меньше, чем в рентгеновском диапазоне, что является следствием разницы длин волн линий поглощения для одного и того же иона. Аналогично в гамма-диапазоне столбцы погло-

щения больше, чем в рентгеновском диапазоне: поглощение рентгеновского излучения чувствительно к величине колонны поглощения от  $10^{19}$  до  $5 \times 10^{24} \text{ см}^{-2}$ , поглощение гамма-излучения же чувствительно к ещё более высокой величине вплоть до  $2 \times 10^{27} \text{ см}^{-2}$  [7]. За счёт этого свойства метод GRAM позволяет проверить насыщение рентгеновских линий поглощения [14].

## 2. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА GRAM ПРИ АНАЛИЗЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СПЕКТРА ГАММА-ВСПЛЕСКА GRB 180720B

В качестве объекта исследования выбран гамма-всплеск GRB 180720B, зарегистрированный в широком диапазоне энергий и в том числе покрывающий интересующие нас области ядерных резонансов [15, 16]. Этот гамма-всплеск был зарегистрирован 20 июля 2018 г. космической обсерваторией Swift [17] и спутником Fermi Gamma-ray Space Telescope [18], а также другими обсерваториями, включая INTEGRAL [19] и Konus-Wind [20]. Длительность события — более 2 с, а красное смещение галактики-хозяина объекта составляет  $z = 0.653$  [21], то есть источник всплеска находится на расстоянии около 6 млрд световых лет от Земли, что позволяет отнести его к длинным и относительно близким гамма-всплескам.

Гамма-всплеск с такими характеристиками может быть связан со взрывом гиперновой [22], в результате которого могла образоваться черная дыра. Таким образом, спектральный анализ дает возможность идентифицировать химические элементы, выброшенные во время взрыва, и изучить события, играющие ключевую роль в формировании этих элементов.

Кроме того, GRB 180720B является одним из самых ярких зарегистрированных гамма-всплесков. Его изотропная энергия излучения оценивается как  $6 \times 10^{53}$  эрг [23, 24]. После «prompt»-фазы гамма-всплеска (первичного гамма-излучения) в течение нескольких недель наблюдалось также мощное рентгеновское, оптическое и радиопослесвечение [23]. Поскольку исследуемый гамма-всплеск был достаточно ярким относительно других подобных объектов и в гамма-диапазоне, появилась возможность рассмотреть GRB 180720B с помощью метода спектрального анализа GRAM.

Данные для анализа были взяты из базы данных гамма-телескопа Fermi-LAT, для построения графиков использовался Fermi Science Tools [25] — набор инструментов для анализа данных, полученных с помощью Large-Area Telescope (LAT) или с помощью Gamma-ray Burst Monitor (GBM).

### 2.1. Кривая блеска GRB 180720B

В первую очередь был осуществлен выбор временного интервала, используемого в спектральном анализе

энергий. Этот шаг необходим, чтобы обеспечить необходимую для наших исследований статистику фотонов и при этом держаться в рамках правдоподобия. Энергетические спектры гамма-всплесков могут быть описаны степенным законом, но чаще наблюдаются экспоненциальные спектры. При переходе гамма-всплеска от начальной стадии к последующим спектр может сильно видоизменяться за счет формирования спектров более мягкого излучения и быстрого затухания жёсткого.

Для гамма-всплеска GRB 180720B был построен временной профиль (кривая блеска), представленный на рис. 1. По оси ординат отложена интенсивность всплеска, определяемая по скорости счёта фотонов, по оси абсцисс — время, отсчитываемое от начала всплеска. Для исследований был выбран интервал от 0 до 300 с, где  $t = 0$  с — момент срабатывания детектора.

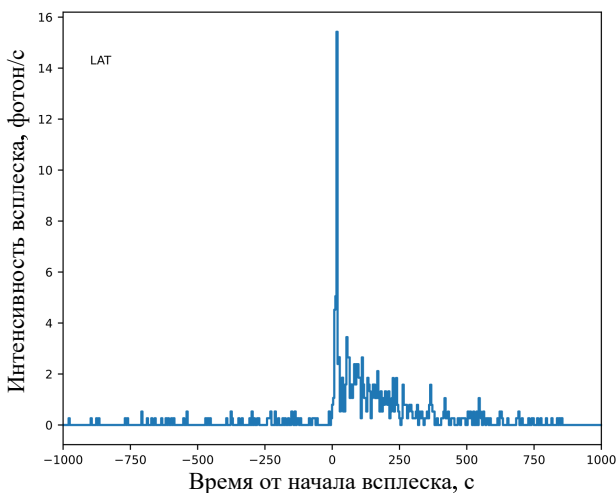


Рис. 1. Кривая блеска GRB 180720B по данным телескопа Fermi-LAT [18]

## 2.2. Энергетический спектр GRB 180720B

На следующем этапе по выбранным ранее данным был построен энергетический спектр гамма-всплеска GRB 180720B (рис. 2).

На полученном графике наблюдалась особенность в спектре при энергии около 300 МэВ. Для того, чтобы можно было сделать более точный вывод о наличии или отсутствия линии поглощения в этой части спектра, было принято решение о более аккуратном анализе и проведении дополнительного бинирования спектра. Для этого было использовано распределение гамма-квантов по энергии за первые 300 с с момента срабатывания (рис. 3). На рисунке цветными точками обозначены различные классы событий — гамма-квантов, зарегистрированных телескопом Fermi-LAT. Поскольку рассматриваемый гамма-всплеск — явление короткоживущее, и зарегистрированных событий мало, в спектральном анализе энергий были использованы

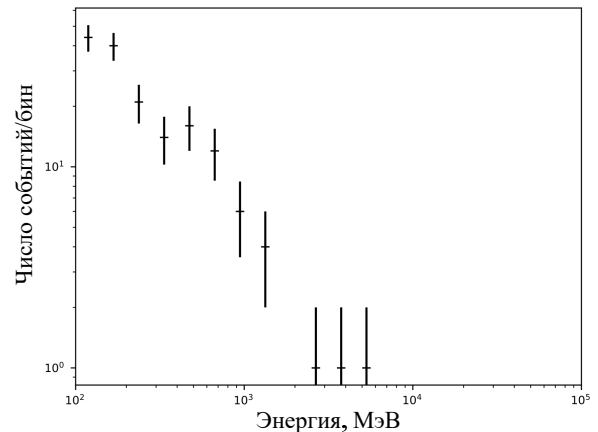


Рис. 2. Энергетический спектр GRB 180720B по данным телескопа Fermi-LAT [18]

ны все классы данных для реализации максимальной статистики гамма-квантов.

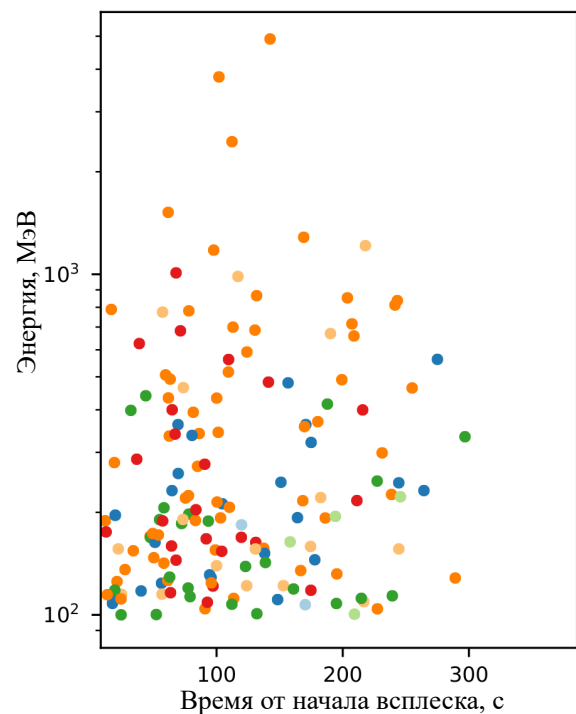
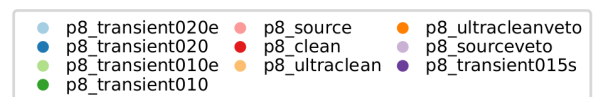


Рис. 3. Распределение гамма-квантов  $E(t)$  по данным телескопа Fermi-LAT [18]

**2.3. Линия поглощения Δ-резонанса GRB 180720B**

Для построения спектрального распределения энергий нашего гамма-всплеска была написана программа на Python 3.9.6 [26]. Исходные данные для обработки сигнала в нужном нам временном диапазоне были взяты также из промежуточного анализа данных в Fermi Science Tools на этапе, предшествующем построению энергетического спектра. В качестве оптимального разбиения на бины был принят размер бина в 30 МэВ. Результат построения представлен на рис. 4. Известно, что спектры гамма-излучения космического происхождения обычно являются степенными с показателем спектра от  $-2$  до  $-2.5$ . Выровняв спектр путем умножения на квадрат энергии фотонов, было получено сглаженное спектральное распределение энергии зарегистрированных фотонов от рассматриваемого источника, что облегчило обнаружение резонансных особенностей спектра.

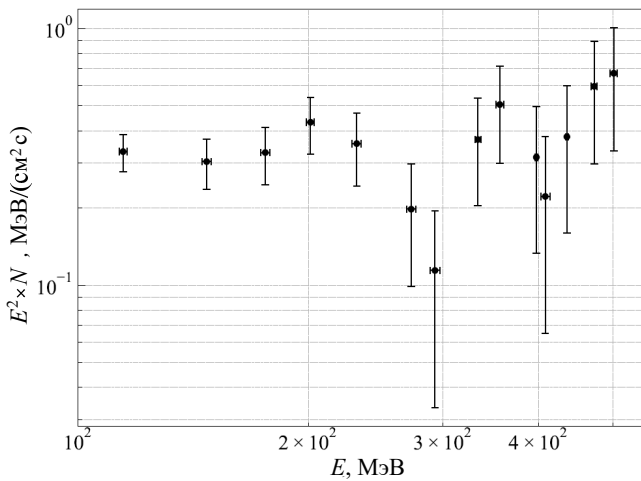


Рис. 4. Линия поглощения в спектре GRB 180720B

В районе 300 МэВ присутствует особенность в спектре. Можно предположить, что эта линия поглощения соответствует Δ-резонансу, энергия которого для водорода составляет 325 МэВ. Поскольку линия поглощения, соответствующая Галактике с красным смещением  $z = 0.654$ , в которой находится GRB 180720B, должна была бы находиться примерно на 200 МэВ в соответствии с формулой (1), то эта особенность может объясняться промежуточным поглотителем на пути гамма-квантов от источника к наблюдателю или комбинацией различных поглотителей.

Энергетическое разрешение прибора Fermi LAT в диапазоне энергий 100–500 МэВ составляет примерно 15% [18], а ширина самой линии поглощения для Δ-резонанса равна приблизительно 40% [27]. Таким образом, в нашем случае две близкие линии одного резонанса в разных поглотителях могли слиться в одну, и можно сделать вывод, что энергетического разрешения прибора не хватает для применения метода GRAM

с достаточной точностью.

Кроме этого, на энергии около 400 МэВ обнаружена еще одна линия поглощения, которая может соответствовать, например, N\*-резонансу [12].

**3. ПЕРСПЕКТИВА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДА GRAM**

В работе с методом резонансного гамма-поглощения мы стремимся к выполнению двух важных аспектов: во-первых, чтобы спектр покрывал достаточно широкий диапазон энергий, а во-вторых, чтобы статистика фотонов была как можно больше. Таким образом, метод GRAM требует чувствительной спектроскопии в диапазоне гамма-излучения для успешного его применения. Кроме того, для обнаружения гамма-всплесков требуется большое поле зрения.

**3.1. Расчет численных значений характеристик эксперимента Fermi-LAT**

В настоящей работе был приведен анализ яркого гамма-всплеска в диапазоне энергий Δ-резонанса по данным с детектора Fermi LAT [18], обладающего высокой чувствительностью в диапазоне энергий выше 100 МэВ. Была обнаружена линия поглощения в области энергии около 300 МэВ. Для определения достоверности этого события воспользуемся оценкой статистической значимости, требуемый уровень которой составляет не менее  $5\sigma$ , где  $\sigma$  — стандартное отклонение числа событий. Для процесса, подчиняющегося пуассоновской статистике, стандартное отклонение выражается через среднее количество фотонов как:

$$\sigma = \sqrt{N}$$

Критерий обнаружения линии поглощения выражается как:

$$N_{\text{фон}} - N_{\text{абсорб}} \geq 5\sigma = 5\sqrt{N_{\text{фон}}}$$

При  $N < 30$  для оценки статистической значимости следует использовать точное пуассоновское распределение:

$$P(N_{\text{изм}}; N_0) = \frac{N_0^{N_{\text{изм}}} e^{-N_0}}{N_{\text{изм}}!},$$

где  $N_0$  — среднее ожидаемое число фотонов в бине,  $N_{\text{изм}}$  — измеренное число фотонов.

Для бина 280–310 МэВ было зафиксировано  $N_{\text{абсорб}} = 2$  фотона, для более точной оценки фона были использованы бины, расположенные через один от предполагаемой линии поглощения (из-за размытия вследствие неидеального энергетического разрешения), где зафиксировано 10 и 6 фотонов соответственно. Примем, что ожидаемое количество фотонов без

поглощения в бине 280–310 МэВ примерно 8 фотонов. Оценим, насколько велико отклонение в терминах стандартных отклонений  $\sigma$ :

$$S = \frac{N_{\text{фон}} - N_{\text{абсорб}}}{\sqrt{N_{\text{фон}}}} = \frac{8 - 2}{\sqrt{8}} = \frac{6}{2.83} \approx 2.12,$$

где  $S$  — статистическая значимость,  $N_{\text{фон}}$  — ожидаемое количество фотонов без поглощения,  $N_{\text{абсорб}}$  — измеренное количество фотонов в линии,  $\sqrt{N_{\text{фон}}}$  — стандартное отклонение по Пуассону.

Это стандартная оценка для пуассоновских флуктуаций. Таким образом, зарегистрированное уменьшение количества фотонов в бине 280–310 МэВ в GRB 180720B объективно существует, но его статистическая значимость составляет около  $2.12\sigma$ , что недостаточно для уверенного ( $5\sigma$ ) утверждения об обнаружении линии поглощения.

В идеальном случае предположим, что поглощение полное, тогда фотонов в линии поглощения практически нет. Тогда в соответствии с формулами выше:

$$N_{\text{фон}} = 5\sqrt{N_{\text{фон}}} = 25$$

То есть, чтобы потенциально зафиксировать линию с  $5\sigma$  значимостью, требуется не менее 25 фотонов в бине.

С учетом этого оценим эффективность детектора Fermi-LAT. Рассчитаем минимальный поток гамма-квантов, необходимый, чтобы зарегистрировать достаточное количество фотонов для выделения линии резонансного поглощения в спектре GRB 180720B с требуемой статистической точностью:

$$F = \frac{N_{\text{фотонов}}}{S_{\text{эфф}} t_{\text{экспоз}} \Delta E}, \quad (2)$$

где  $F$  — необходимый поток гамма-квантов (фотонов/см<sup>2</sup>/с),  $N_{\text{фотонов}}$  — требуемое число зарегистрированных фотонов,  $S_{\text{эфф}}$  — эффективная площадь детектора (см<sup>2</sup>),  $t_{\text{экспоз}}$  — время экспозиции (с),  $\Delta E$  — ширина энергетического бина (МэВ).

Эффективная площадь Ферми в рассматриваемом диапазоне равна для наших энергий примерно 5000 см<sup>2</sup> [18]. Время экспозиции было выбрано в Разделе 2 и составляет соответственно 300 с. Ширина энергетического бина была выбрана в Разделе 2 и равна соответственно 30 МэВ. Тогда по формуле (2):

$$F = \frac{25}{5000 \times 300 \times 30} = 5.56 \times 10^{-7} \text{ фотонов/см}^2/\text{с/МэВ}$$

Для гамма-всплесков, подобных GRB 180720B, характерный поток гамма-квантов в районе 300 МэВ составляет порядка  $10^{-5}$  фотонов/см<sup>2</sup>/с/МэВ. Таким образом, линия поглощения действительно могла быть зарегистрирована.

### 3.2. Оценка эффективности применения приборов для спектроскопического анализа гамма-всплесков на больших красных смещениях

В качестве оценки перспектив использования метода GRAM для исследования ранней Вселенной были проанализированы планируемые в ближайшем будущем эксперименты, охватывающие МэВ-диапазон. Среди них: AMEGO (All-sky Medium Energy Gamma-ray Observatory) [28], COSI (Compton Spectrometer and Imager) [29], e-ASTROGAM (enhanced ASTROGAM) [30], APT (The Advanced Particle-astrophysics Telescope) [31], VLAST (The Very Large Area gamma-ray Space Telescope) [32], GECCO (The Galactic Explorer with a Coded Aperture Mask Compton Telescope) [33].

Для уверенного детектирования сигнала необходимо выделить его из фоновых процессов. Чтобы статистика фотонов удовлетворяла требованиям на достоверность обнаружения линий поглощения (значимость не менее  $5\sigma$ ), на выходе эксперимента нужен хороший спектр в диапазоне энергий чуть шире, чем сама энергия резонансных линий поглощения.

Рассмотрим космические миссии APT [31] и GECCO [33], находящиеся в настоящий момент на стадии планирования. Эффективные площади этих детекторов в диапазоне энергий 100–300 МэВ равны соответственно 7 м<sup>2</sup> при энергиях  $\Delta$ -резонанса и 500–2000 см<sup>2</sup> в зависимости от энергии гамма-квантов.

Тогда минимально необходимые потоки, оцененные по формуле (2), для них равны соответственно:

$$F_{\text{APT}} = 3.97 \times 10^{-8} \text{ фотонов/см}^2/\text{с/МэВ}$$

$$F_{\text{GECCO}} = 1.39 - 5.56 \times 10^{-6} \text{ фотонов/см}^2/\text{с/МэВ}$$

Характерные потоки для гамма-всплесков в этом диапазоне энергий составляют порядка:  $F_{\text{GRB}} \sim 10^{-5}$  фотонов/см<sup>2</sup>/с/МэВ, то есть минимальные потоки для детекторов меньше или сопоставимы с характерными потоками гамма-всплесков.

Следовательно, можно сделать вывод, что заявленные характеристики детекторов APT и GECCO позволят применять метод GRAM для спектроскопического анализа гамма-всплесков на больших красных смещениях с достаточной статистической точностью.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение метода GRAM для анализа спектров длинных гамма-всплесков представляет собой сложную и многоуровневую задачу. Тем не менее, простота идентификации линий поглощения и однозначность метода являются его важнейшими преимуществами при исследовании ранней Вселенной.

В ходе работы был проанализирован яркий гамма-всплеск GRB 180720B, построена его кривая блеска и энергетический спектр, подобрано оптимальное значение ширины бина энергии для наблюдения линии поглощения, написана программа для построения спектрального распределения энергий в диапазоне 100–500 МэВ.

В спектре обнаружено указание на возможную линию поглощения вблизи 300 МэВ с уровнем статистической значимости  $2.12\sigma$ . На основании работ, посвященных взаимодействию гамма-квантов с веществом (например, [12, 27, 34]), сделано предположение о том, что обнаруженная линия может соответствовать  $\Delta$ -резонансу, рассеянному на одном или нескольких поглотителях, либо являться комбинацией двух линий в разных энергетических диапазонах, слившихся в одну в силу наличия энергетического расширения.

Приведенные в настоящей работе расчеты характеристик существующих приборов для спектроскопического анализа гамма-всплесков на больших красных смещениях указывают на необходимость эксперимен-

тов с большей эффективной площадью детектора. Планируемые к запуску в ближайшем будущем эксперименты АРТ и GECCO по заявленным в документах [31] и [33] характеристикам удовлетворяют нашим требованиям, которые представлены в виде расчетов теоретических значений, необходимых для уверенного детектирования линий поглощения. Получение первых данных с этих космических аппаратов позволит проверить наши предположения.

Дальнейший анализ линий поглощения гамма-излучения в спектрах длинных гамма-всплесков дает возможность изучить эволюцию ранней Вселенной и получить частоту образования сверхмассивных звезд III поколения в зависимости от красного смещения.

Автор выражает благодарность доктору физ.-мат. наук А.Ф. Июдину за научное руководство и плодотворные обсуждения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (грант РНФ № 23-42-10005).

- 
- [1] Gill R., Granot J. // *Galaxies*. **10**, N3. (2022).
- [2] Dirirsa F.F., Razzaque S., Piron F. et al. // *Astrophys. J.* **887**, N1. 13 (2019).
- [3] Muccino M., Izzo L., Luongo O. et al. // *Astrophys. J.* **908**, N2. 181 (2021).
- [4] Abdollahi S., Ackermann M., Ajello M. et al. // *Science*. **362**, N6418. 1031 (2018).
- [5] Robertson B.E., Ellis R.S. // *Astrophys. J.* **744**, N2. 95 (2011).
- [6] Iyudin A.F. // *AIP Conf. Proc.* **1085**. 597 (2008).
- [7] Iyudin A.F., Reimer O., Burwitz V. et al. // *Astron. Astrophys.* **436**. 763 (2005).
- [8] Iyudin A.F., Greiner J., Larsson S., Ryde F. // *AIP Conf. Proc.* **906**, N1. 89 (2007).
- [9] Капитонов И.М. // *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3. Физ. Астрон.* N3. 3 (2020). (I.M. Kapitonov // *Moscow Univ. Phys. Bull.* **75** 3, 181 (2020).)
- [10] Oaknin D.H., Zhitnitsky A. // *Phys. Rev. D.* **71**. 023519 (2005).
- [11] Iyudin A.F., Burwitz V., Greiner J. et al. // *PoS. BDMH2004*. 098 (2004).
- [12] Miyahara F., Kasagi J., Nakabayashi T. et al. // *Prog. Theor. Phys. Suppl.* **168**. 90 (2007).
- [13] Dehghanian M., Arav N., Sharma M. et al. // *Astron. Astrophys.* **695**. A4 (2025).
- [14] Laloux B., Georgakakis A., Alexander D.M. et al. // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **532**, N3. 3459 (2024).
- [15] Fraija N., Dichiaro S., Caligula do E.S.P.A.C. et al. // *Astrophys. J.* **885**, N1. 29 (2019).
- [16] Ronchi M., Fumagalli F., Ravasio M.E. et al. // *Astron. Astrophys.* **636**. A55 (2020).
- [17] Gehrels N., Chincarini G., Giommi et al. // *Astrophysical Journal* **611**. 1005 (2004).
- [18] Rando R. *Handbook of X-ray and Gamma-ray Astrophysics*. Springer, (2022).
- [19] Winkler C., Courvoisier T.J.-L., Di Cocco G. et al. // *Astronomy & Astrophysics* **411**. L1 (2003).
- [20] Aptekar R. L., Frederiks D. D., Golenetskii S. V. et al. // *Space Science Reviews* **71**. 265 (1995).
- [21] Vreeswijk P.M., Kann D.A., Heintz K.E. et al. // *GRB Coordinates Network*. **22996**. 1 (2018).
- [22] Rueda J.A., Li L., Moradi R. et al. // *Astrophys. J.* **939**, N2. 62 (2022).
- [23] Abdalla H., Adam R., Aharonian F. et al. // *Nature*. **575**, N7783. 464 (2019).
- [24] Khangulyan D. // *PoS. Gamma2022*. 013 (2023).
- [25] Goldstein A. // *Fermi Gamma-ray Data Tools*. 2023.
- [26] Python Core Team. *Python: A dynamic, open source programming language*. Python Software Foundation, 2019.
- [27] Ahrens J. // *Nucl. Phys. A.* **446**, N1. 229 (1985).
- [28] McEnery J., Barrio J.A., Agudo I. et al. // *Bull. Am. Astron. Soc.* **51**, N7. (2019). arXiv:1907.07558 [astro-ph.IM].
- [29] Tomsick J.A., Bandstra M., Boggs S.E. et al. // *Bull. Am. Astron. Soc.* **55**, N6 (2023). arXiv:2308.12362 [astro-ph.HE].
- [30] De Angelis A., Tatischeff V., Grenier I.A. et al. // *J. High Energy Astrophys.* **19**. 1 (2018). arXiv:1711.01265 [astro-ph.HE].
- [31] Buckley J., Bergstrom L., Binns B. et al. // *Bull. Am. Astron. Soc.* **51**, N7 (2019).
- [32] Liu J., Dong T.-K., Zhang S.-N. et al. // *Acta Astron. Sin.* **63**, N3. 027 (2022). DOI:10.15940/j.cnki.0001-5245.2022.03.027. Bibcode:2022AcASn.63..27F.
- [33] Orlando E., Bottacini E., Moiseev A.A. et al. // *J. Cosmol. Astropart. Phys.* **2022**, N07. 036 (2022).
- [34] MacCormick M., Habermann J., Ahrens J. et al. // *Phys. Rev. C.* **55**. 1033 (1997).

## Spectral analysis of long gamma-ray bursts as an instrument to investigate the early Universe

A. S. Nikulina<sup>1a</sup>

<sup>1</sup>*Department of Space Physics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University*

<sup>2</sup>*Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University  
Moscow, 119991 Russia*

*E-mail: <sup>a</sup>nikulina.as21@physics.msu.ru*

This paper presents an analysis of the spectrum of the long and bright gamma-ray burst GRB 180720B with the aim of identifying features in the spectral region associated with nuclear resonances. The resonant gamma-ray absorption method (GRAM) is applied to investigate these features, accounting for the possible presence of absorbers along the line of sight between the GRB source and the observer. The resulting spectral energy distribution indicates the presence of an absorption-like feature around 300 MeV. Based on previous studies of gamma-ray interactions with matter, we suggest that the observed feature may correspond to the  $\Delta$ -resonance, either scattered by one or multiple intervening absorbers, or represented a blend of two separate absorption lines at different energies, merged due to spectral broadening effects.

PACS: 98.70.Rz, 95.85.Pw, 25.20.Dc, 95.75.Fg.

*Keywords:* gamma-ray bursts, spectral analysis, resonant absorption, delta resonance, gamma-ray absorption lines, early Universe, gamma-ray spectroscopy

*Received 09 June 2025.*

### Сведения об авторе

Никулина Анастасия Сергеевна — студентка кафедры физики космоса физического факультета МГУ; e-mail: nikulina.as21@physics.msu.ru.