

GRB 221009A, его предшественник и два послесвечения в данных Ферми

Б. Штерн⁺¹⁾, И. Ткачев^{+*}

⁺Институт ядерных исследований РАН, 117312 Москва, Россия

*Физический факультет и Лаборатория космологии и физики элементарных частиц, Новосибирский государственный университет, 630090 Новосибирск, Россия

Поступила в редакцию 24 августа 2023 г.

После переработки 20 сентября 2023 г.

Принята к публикации 21 сентября 2023 г.

Мы исследуем GRB 221009A, самый яркий гамма-всплеск в истории наблюдений, с использованием данных Ферми. Чтобы откалибровать данные для больших углов наклона, мы используем гамма-источник Vela X. Кривые блеска в различных спектральных диапазонах демонстрируют 300-секундное перекрытие послесвечения и запоздавших мягких эпизодов прямой стадии всплеска. Мы показываем, что относительно слабый предшественник (прекурсор) вспышки, происходящий за 3 мин до основного эпизода, имеет свое собственное послесвечение, т.е. предположительно, свой собственный внешний шок. Это первое наблюдение такого явления, которое исключает некоторые теоретические модели прекурсоров гамма-всплесков. Основное послесвечение является самым ярким и включает фотон с энергией 400 ГэВ через 9 ч после всплеска, мы показываем, что эмиссия прослеживается в данных LAT в течение двух суток.

DOI: 10.31857/S123456782320003X, EDN: орупуо

Введение. Недавний и самый яркий гамма-всплеск GRB 221009A был обнаружен многими космическими рентгеновскими и гамма-обсерваториями, включая Fermi [1, 2], Swift (для более детального анализа см. [3]), SRG/ART-XC [4], Konus-Wind [5] и другие.

Всплеск и его послесвечение также были зарегистрированы LHAASO на Земле в диапазоне от сотен гигаэлектронвольт до нескольких тераэлектронвольт [6]. Система детекторов Carpet-2 на Баксанской нейтринной обсерватории обнаружила атмосферный ливень фотонов с энергией 250 ТэВ из места вспышки GRB 221009A [7]. С другой стороны, сотрудничество HAWC сообщает о недетектировании фотонов из послесвечения в диапазоне тераэлектронвольт более чем через 8 ч после срабатывания [8] и дает верхний предел на поток энергии $4.16 \cdot 10^{-12}$ ТэВ см⁻² с⁻¹.

Вспышка была собственно яркой и относительно близкой, $z = 0.151$. Видимая яркость GRB 221009A является исключительной. В каталоге вспышек Fermi GBM она превышает следующую по потоку энергии в 15 раз. Однако наибольший интерес к этому событию связан с утверждениями о двух фотонах с энергией 18 ГэВ (LHAASO) и 250 ТэВ (Carpet 2), которые не могут происходить от $z = 0.15$

из-за поглощения на межгалактическом световом фоне. Для объяснения этих фотонов в ряде работ привлекалась новая физика: см., например, [9–12] and [13] (последняя работа также содержит всеобъемлющий список работ по данной теме). Изучение спектров GRB 221009A также может использоваться для установления ограничений на силу межгалактического магнитного поля [14].

В настоящей работе, опираясь на рекордную яркость GRB 221009A, мы пытаемся найти что-то новое о самих гамма-всплесках в общедоступных данных Fermi. А именно:

- Есть ли что-то интересное между прекурсором всплеска и его основным излучением через три минуты.
- Как выглядит переход от прямой фазы гамма-всплесков к послесвечению?
- Насколько яркое послесвечение и насколько долго его можно проследить в диапазоне гигаэлектронвольт.

Данные и их калибровка. На рисунке 1 показаны некоторые сырые данные Fermi для GRB 221009A. Большой телескоп с большой площадью (LAT) и детекторы NaI гамма-излучения монитора вспышек (GBM) были перенасыщены, в то время как сцинтилляционные детекторы из германата висмута (BGO) удовлетворительно воспроизводят пико-

¹⁾e-mail: stern@inr.ru

вый поток в энергетических каналах выше ~ 1 МэВ. В наиболее интересных интервалах 220–240 и 260–270 с отсутствуют данные LAT, причем не только с направления всплеска, а со всего неба.

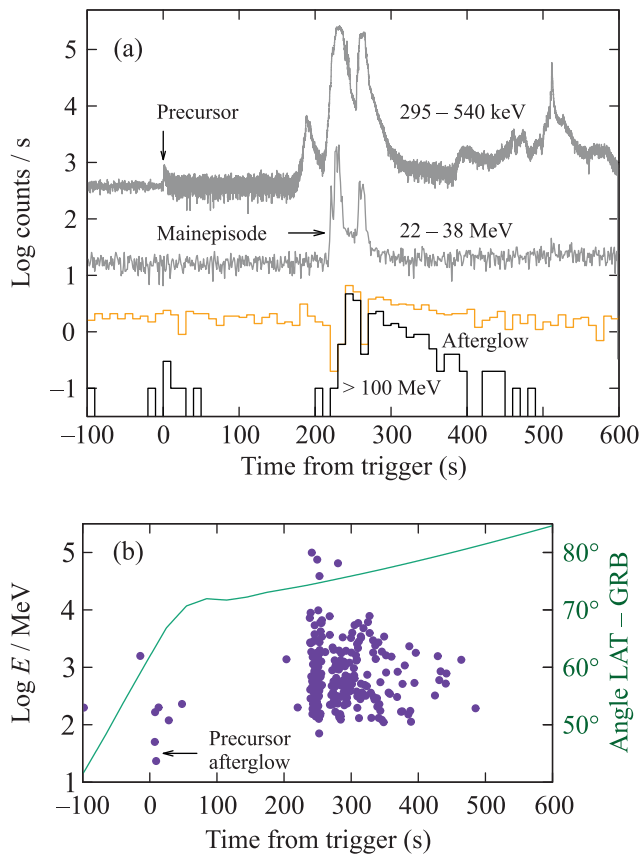


Рис. 1. (Цветной онлайн) Временная эволюция GRB 221009A в необработанных данных. Фаза предшественника и раннее послесвечение. (a) – Число событий в различных энергетических диапазонах в логарифмической шкале, верхняя кривая GBM NaI 295–540 кэВ, средняя кривая GBM BGO 22–38 МэВ, нижняя синяя кривая LAT, 8° круг вокруг местоположения GRB 221009A, желтая кривая – все фотоны LAT. Падения на 210 и 260 секундах вызваны перенасыщением детектора. (b) – Отдельные фотоны LAT в 8° круге вокруг положения GRB 221009A (левая логарифмическая шкала энергии) и угол между осью LAT и направлением вспышки (правая шкала). Обратите внимание на излучение в диапазоне 10–200 МэВ через 50 с после предшественника

Следующим обстоятельством, которое затрудняет прямую интерпретацию данных LAT, является большой угол θ между направлением оси z LAT и местоположением вспышки. Вспышка произошла на самом краю поля зрения телескопа, где эффективность обнаружения низкая. На рисунке 1b показана зависимость времени от θ во время события. Угол

наклона менялся от 75° до более 80° при $t \sim 500$ с, когда источник покинул поле зрения на час.

Зависимость угла от эффективной площади LAT приведена в [15], см. также Fermi LAT Performance. Однако эти данные имеют недостаточное разрешение для данной конкретной задачи, поэтому мы провели подробную калибровку эффективности обнаружения LAT для больших углов падения с использованием самого яркого источника гамма-излучения Vela X (как пульсара, так и туманности). Тот же объект использовался командой Fermi для калибровки функции распределения точечного источника [15].

Мы используем фотоны в окружности радиусом 8° вокруг положения Vela X в качестве калибровочной выборки. Выбор радиуса поля зрения является результатом компромисса между достаточным сбором фотонов с энергией около 100 МэВ ($> 68\%$) и загрязнением выборки фоновыми фотонами. Результаты нашей калибровки показаны на рис. 2.

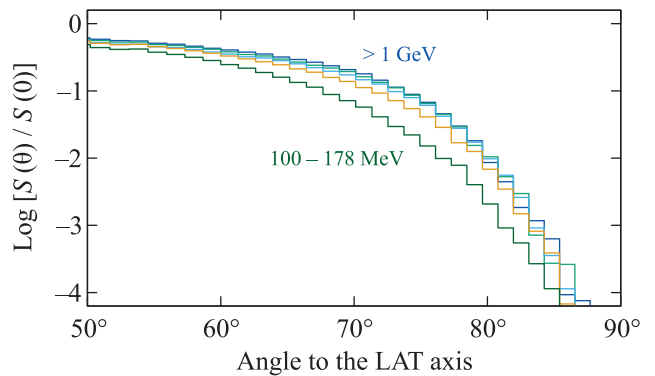


Рис. 2. (Цветной онлайн) Калибровочные данные для эффективности LAT при больших углах падения с использованием гамма-пульсара Vela-X. Показано отношение эффективной площади к эффективной площади на оси в зависимости от угла между источником фотонов и осью z LAT. Кривые сверху вниз соответствуют энергетическим интервалам: > 1 ГэВ, 1 ГэВ–562 МэВ, 562 МэВ–316 МэВ, 316 МэВ–178 МэВ, 178 МэВ–100 МэВ

Количество фотонов в нашей калибровочной выборке составляет $9.4 \cdot 10^6$, тогда как количество фоновых фотонов составляет около $2 \cdot 10^6$, как мы оценили из соседней области Млечного Пути. Таким образом, фон значителен, но его влияние должно быть умеренным, поскольку угловое рассеяние фоновых фотонов вносит вклад в эффективность обнаружения с разными знаками: количество фотонов, падающих под углом $\theta + \Delta$, сравнимо с количеством фотонов, пришедших под углом $\theta - \Delta$. Тем не менее, широкое угловое обрезание в калибровочной выборке имитирует некоторое расширение поля зрения. Мы проверили влияние углового обрезания с помощью той

же калибровки, обрезав выборку на 4° . Разница при $\theta = 78^\circ$ для фотонов с $E \gtrsim 1$ ГэВ составляет около 40 %, а для интервала 100–178 МэВ – примерно в 2.5 раза больше. Последнее большое значение, конечно, является эффектом расширения функции разброса точечного источника на краю поля зрения. Поэтому мы предпочитаем использовать калибровку с выборкой шириной 8° , так как она лучше воспроизводит мягкую часть спектра, а дополнительный фон лишь слегка влияет на его жесткую часть.

Кроме угловой зависимости эффективности регистрации, следует учитывать энергетическую зависимость. Мы используем описание, приведенное в [15]. Обратите внимание, что для самого низкого энергетического интервала 100–178 МэВ, для которого мы используем эффективность в 0.45 от максимальной эффективности. Таким образом, фотон с энергией 100 МэВ, обнаруженный LAT через 400 с после срабатывания, представляет собой примерно 300 фотонов той же энергии, пересекающих площадь детектора (см. рис. 1b и 2). В нашем анализе и калибровке мы не различаем тип преобразования и класс качества фотонов, используя общую эффективную площадь для класса “транзистентное” событие.

Основной эпизод и начало послесвечения. Нормированные данные Fermi для первых 600 секунд показаны на рис. 3. Данные LAT были нормированы с использованием наших результатов калибровки Vela X (рис. 2) и энергетической зависимости эффективной площади из [15]. Общая эффективная площадь двух детекторов BGO была установлена на уровне 200 cm^2 независимо от энергии и угла падения, так как такое предположение достаточно для качественной демонстрации. Для энергетической и угловой характеристики детекторов BGO см. [16].

Поток энергии в диапазоне BGO 22–38 МэВ в интервале 300–600 с очень чувствителен к модели фона. Мы используем трехпараметрическое описание: постоянную компоненту плюс синусоиду с полупериодом, соответствующим интервалам подгонки 300–150 с и 600–1300 с. Полученное значение χ^2 хорошее, однако ошибка в потоке энергии в BGO велика, поэтому мы не учитываем данные BGO при восстановлении спектров фотонов. Мы наблюдаем поразительное изменение временного поведения при ~ 300 с: резкое снижение основного импульса переходит в плоский плавный наклон. Исключением является другой мягкий эпизод прямой эмиссии в интервале 400–600 с, который мы обсудим ниже. Было бы разумно предположить, что высокоэнергетическое излучение после 300 с можно рассматривать как послесвечение основного всплеска.

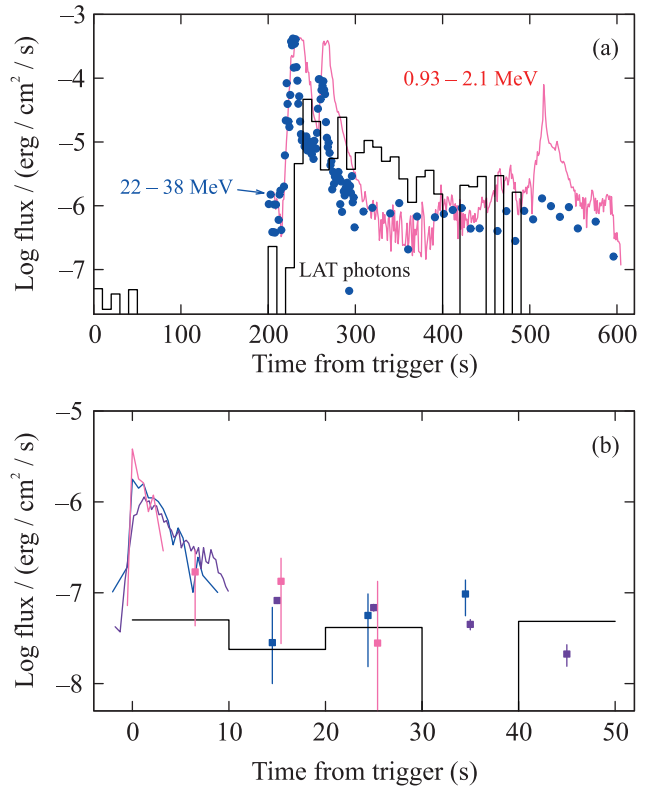


Рис. 3. (Цветной онлайн) (a) – Прямая эмиссия GRB 231009A и раннее послесвечение в различных энергетических диапазонах. Гистограмма: поток энергии фотонов LAT, нормированный на зависимость от угла эффективную площадь, откалиброванную с помощью источника Vela-X. Розовая линия: поток энергии в диапазоне 0.93–2.1 МэВ от детекторов Gamma-Burst Monitor BGO. Синие кружки: то же самое в диапазоне энергии 22–38 МэВ. (b) – Нижний левый угол панели (a) с дополнительными данными. Пурпурный: сумма 5 самых ярких детекторов NaI в диапазоне 0.1–0.3 МэВ с предположением эффективной площади 400 cm^2 . Синий: детекторы BGO в диапазоне 0.38–0.93 МэВ с предположением эффективной площади 200 cm^2 . Розовый: BGO, диапазон 0.93–2.1 МэВ. Черный: распределение потока энергии, представленное 6 фотонами LAT от 20 до 230 МэВ

Феноменологически, излучение прямой стадии гамма-всплеска обычно характеризуется очень быстрыми изменениями интенсивности и спектра, в то время как послесвечение имеет плавное длительное снижение с устойчивым широким энергетическим спектром. Прямое излучение иногда состоит из нескольких импульсов различной длительности и спектра, эти импульсы могут перекрываться во времени, порождая в некоторых случаях сложные структуры с широким временным спектром мощности Фурье [17]. Их временное поведение очень разнообразно. Напротив, все послесвечения имеют типич-

ное временное поведение: степенное убывание немного быстрее, чем t^{-1} .

Существует парадигма, согласно которой прямое излучение возникает из-за внутренних ударных волн (или магнитного пересоединения или обоих эффектов) в джете, в то время как послесвечение возникает из-за внешней ударной волны при столкновении джета с окружающей средой (см., например, [18]), главным образом, с звездным ветром прародителя GRB [19]. Физически прямое излучение во многих случаях может быть описано как излучение оптически толстой среды из-за многократной комптонизации (например, [20]), в то время как послесвечение лучше соответствует синхротронному/комптоновскому излучению электронов, ускоряемых в оптически тонкой среде, см. [21] для обзора.

В случае GRB 221009A мы можем отнести к прямому излучению предшественника, мягкий импульс при $t \sim 180\text{--}200$ с, два основных жестких импульса и мягкую длинную структуру в интервале $400\text{--}600$ с. Поток фотонов, обнаруженных LAT с момента 250 с и его спектр (см. рис. 4) и кривая блеска больше соответствуют послесвечению, а не прямому излучению. Структура при $400\text{--}600$ с, вероятно, представляет собой независимый эпизод прямого излучения, перекрывающийся во времени с ранним послесвечением.

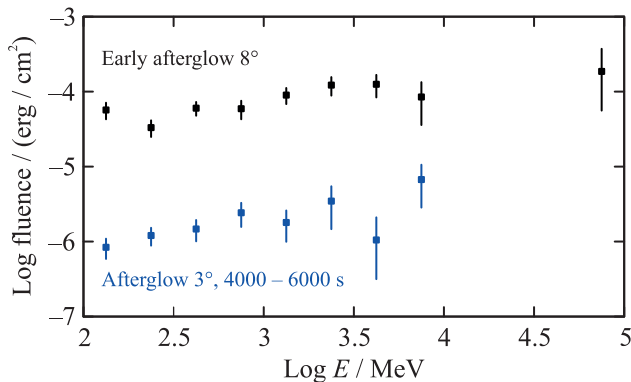


Рис. 4. (Цветной онлайн) Спектральное энергетическое распределение фотонов, обнаруженных методом LAT на временных интервалах $280\text{--}500$ с и $4000\text{--}6000$ с, восстановленное с калиброванной эффективной площадью (см. рис. 2)

Вероятно, механизм послесвечения (предположительно, внешняя ударная волна) включился немного раньше, например, при 230 с. Поэтому мы используем это время как точку отсчета для спада послесвечения по степенному закону.

Наша оценка энергетического потока, представленного 229 фотонами, зарегистрированными LAT в интервале времени $220\text{--}500$ с, составляет

$1.55 \cdot 10^{-3}$ эрг/см². Фактический поток энергии может быть несколько выше, так как мы не знаем, сколько фотонов теряется в промежутках, потерянных из-за насыщения. Предварительная нижняя оценка энергетического потока, проведенная в [2], составляет 2.9×10^{-2} эрг/см², общий энергетический поток может быть значительно выше, см. [22].

Спектральное распределение энергии в диапазоне от 100 МэВ до 100 ГэВ показано на рис. 4. Мы провели фитирование методом прямой подгонки спектральной гипотезы к количеству зарегистрированных фотонов в энергетических бинах. Мы использовали метод максимального правдоподобия с учетом статистики Пуассона, учитывая энергетическую и угловую зависимость эффективной площади детектора. Мы факторизуем фронтальную эффективную площадь (используя параметризацию PR8_TRANSIENT020_V3) и учитываем θ -зависимость, показанную на рис. 2. Полученный спектральный индекс для фотонов LAT в поле с углом обзора 8° (где фон для короткого временного интервала практически отсутствует) составляет -1.66 ± 0.07 , что является более жестким, чем оценка [23].

Основное послесвечение. Через 500 с после срабатывания источник гамма-всплеска вышел из поля зрения LAT. Следующее временное окно было открыто примерно с 4100 до 5700 с. Затем местоположение GRB221009 периодически появлялось в поле зрения с общим временем видимости около 20 %.

На рисунке 5 показано количество обнаруженных фотонов LAT в зависимости от логарифма времени. В отличие от основного эпизода, который практически не имеет фона, фон во время позднего послесвечения значителен и становится слишком большим в поле зрения 8° , которое мы приняли для описания основного эпизода. По этой причине мы анализируем послесвечение, используя круг диаметром 1° .

Фон, оцененный с использованием фотонов, обнаруженных из того же направления в течение 300 000 с до тиггера, показан на рис. 5. С использованием данного окна, послесвечение остается значимым до двух суток (см. рис. 5b). Дальнейшее сокращение поля зрения не улучшает значимость. На рисунке 5a показаны фотоны LAT в логарифмической шкале времени для поля зрения 1° . Кажется, что послесвечение становится мягче со временем, однако стоит обратить внимание на фотон с энергией 400 ГэВ при $\log(t) \sim 4.5$ (33554 с). Угловое отклонение этого фотона от местоположения GRB составляет 0.06° , вероятность случайного совпадения с таким угловым отклонением в течение суток составляет $\sim 10^{-6}$. Этот

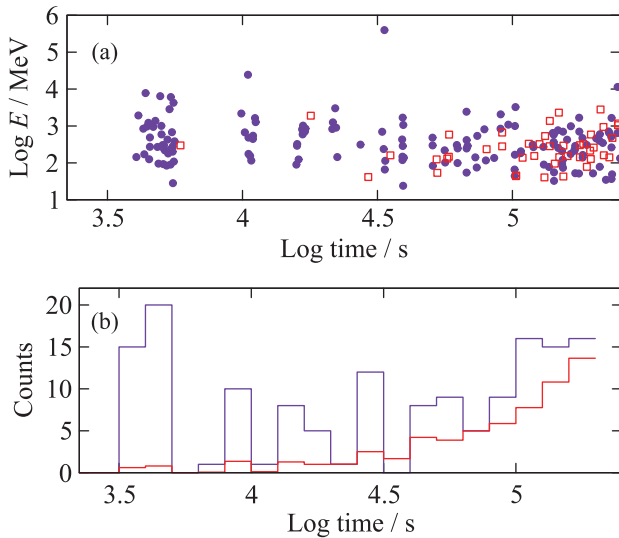


Рис. 5. (Цветной онлайн) Независимая от реакции демонстрация соотношения сигнал/фон. События в круге 1° вокруг GRB 221009A, обнаруженные LAT. (a) – Фотоны в интервале времени 10^3 – $3 \cdot 10^5$ с момента триггера (пурпурные точки) и фоновые фотоны в интервале той же длины, но до триггера (красные квадраты). (b) – То же, но в виде гистограммы. Оценка фона была сделана с использованием поля 8° вокруг местоположения гамма-всплеска за 300000 с до всплеска

фотон отсутствует в телеграмме команды Fermi, но был замечен [24]. Впечатление о смягчении спектра может быть обусловлено отсутствием мягких фотонов в основном эпизоде и их избытком при $t \sim 10^5$ с. Первое может быть объяснено более сильным подавлением мягких фотонов при больших углах падения (см. рис. 2), а второе – вкладом более мягкого фона. Статистика недостаточна для выявления эволюции спектра послесвечения.

Спектральные энергетические распределения для начала послесвечения и для второго окна показаны на рис. 4. Они согласуются друг с другом и незначительно отличаются от “канонического” спектра с плоской формой (фотонный индекс $\alpha = -2$). Мы зафиксировали фотонный индекс равным -2 при аппроксимации энергетического потока послесвечения. Рисунок 6 показывает поток фотонов послесвечения в зависимости от времени.

Мы нормируем поток, учитывая долю фотонов точечного источника в поле зрения 1° , которая зависит от энергии фотона и ориентации космического аппарата. Здесь мы опираемся на функцию отклика Fermi, используя версию PSF для “транзиентного” класса. Для сравнения мы добавили некоторые точки для других ярких всплесков: GRB 130427SA, [25], GRB 180720B [26], GRB 190114C [27] и GRB

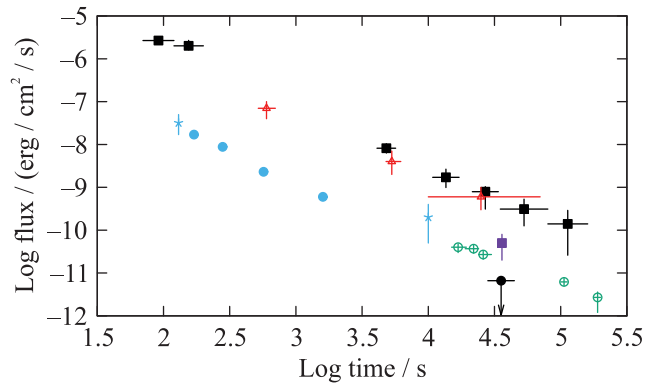


Рис. 6. (Цветной онлайн) Послесвечение нескольких гамма-всплесков. Черный цвет: GRB221009A, квадраты с погрешностями – настоящая работа, точка с верхним пределом – коллаборация HAWC. Синий цвет: GRB 190114C, точки – MAGIC (0.3–1 ТэВ), звездочки с погрешностями – Fermi LAT. Зеленый цвет: GRB 190829A – H.E.S.S. (0.2–4 ТэВ). Фиолетовый цвет: GRB 180720B – H.E.S.S. (100–440 ГэВ). Красный цвет: GRB 130427A – Fermi LAT

190829 [28]. Эти данные были суммированы и обсуждены в работе [29]. Послесвечение GRB немного ярче послесвечения GRB 130427A и почти в десять раз ярче GRB 180720B, 190114C и 190829, которые были обнаружены черенковскими телескопами. Это первый случай, когда послесвечение все еще видно в диапазоне Fermi два дня после гамма-всплеска (второе яркое послесвечение GRB 130427SA видно в данных Fermi LAT до полудня). Интригующим образом, оно не было обнаружено сотрудничеством HAWC [8], см. рис. 6. Послесвечение по-прежнему значимо на уровне 3σ : в интервале 100000–200000 с количество фотонов составляет 40 по сравнению с ожидаемыми 24.4 фотонами, измеренными в “зеркальном” интервале от -100000 до -200000 с. Кривая блеска послесвечения в диапазоне 0.1–10 ГэВ может быть описана степенным законом $F \sim t^{-\alpha_\tau}$, где $\alpha_\tau = 1.47 \pm 0.05$ или 1.36 ± 0.05 , если мы исключим первую точку данных, так как она может быть смещена неопределенностью времени начала послесвечения (для которого мы установили 230 с после срабатывания). Это затухание немного медленнее, чем то, что измерено LHAASO [6] в интервале $20 < t < 1000$ с в диапазоне энергий выше 0.2 ТэВ ($\alpha_\tau = 2.21 + 0.30 - 0.83$). Энергетический поток послесвечения в диапазоне 0.1–10 ГэВ составляет $3.6 \cdot 10^{-4}$ эрг см $^{-2}$.

Результаты коллаборации “Ферми” по регистрации гама-квантов телескопом LAT GRB 221009 все еще не опубликованы. Однако послесвечение было проанализировано другими группами на основе пуб-

лично доступных данных LAT. В частности, в работе [30] дается несколько более высокая оценка потока, чем наша, хотя разница укладывается в одно стандартное отклонение. Точки из работы [31] для времени 3000 с также совпадают с нашими результатами в пределах ошибок. Обе группы дают только верхние пределы для времени после 68000 с в то время, как мы видим 3σ сигнал после первого дня с момента события.

Послесвечение прекурсора. Fermi LAT обнаружил 6 фотонов в диапазоне от 20 до 230 МэВ в интервале времени от 7 до 50 с после триггера (рис. 1b), когда угол θ менялся от 65° до 70° , а эффективная площадь детектора LAT была несколько раз меньше, чем для фотонов, падающих по оси детектора (см. рис. 2). Следует отметить, что промгновое предшественниковое излучение уже рассеялось, когда LAT обнаружил первые из этих фотонов. Мы оцениваем энергетический поток, представленный этими 6 фотонами, как $1.5 \cdot 10^{-6}$

На рисунке 3b показана кривая блеска с детекторов GBM в канале 0.1–0.29 МэВ (детекторы NaI) и в диапазоне 0.38–2.12 МэВ (детекторы BGO), а также вклад 6 фотонов LAT-GRB, представленный в виде гистограммы. Сам прекурсор выглядит как типичный импульс с быстрым нарастанием – экспоненциальным затуханием (FRED), который обычно составляет прямое излучение гамма-всплесков. Он затухает быстрее при более высоких энергиях, что также является типичной особенностью FRED. Через несколько секунд импульс FRED переходит в плоский хвост излучения широкого спектра, похожий на типичное послесвечение гамма-всплеска. Мы предполагаем, что здесь происходит то же явление: прекурсор переходит в послесвечение прекурсора.

Насколько значимо это “пре-послесвечение”? Оно высоко значимо в диапазоне 0.1–0.29 МэВ до 50 с, маргинально значимо в диапазоне 0.38–2.12 МэВ до 40 с. В более высоких энергетических диапазонах GBM мы получаем только верхние пределы, не превышающие 10^{-7} эрг/см²/с. Однако лучший маркер прослесвечения – это эмиссия высокой энергии, предположительно, происходящая от внешней ударной волны. Мы подсчитали фотоны из круга с углом 8° , когда ориентация оси LAT к гамма-всплеску была $63^\circ < \theta < 71^\circ$ в течение 30000 с до вспышки. Результат – 302 фотона за 23400 с, что дает ожидание 0.64 фотона для интервала 50 с после прекурсора. Вероятность получить 6 фотонов случайно составляет $0.5 \cdot 10^{-4}$ (4σ). Следует отметить, что в данном случае нет “эффекта поиска в других местах”: фотоны появляются в правильном месте без манипуляции с

выборкой. Поэтому эта значимость вполне достаточна для того, чтобы утверждать, что Fermi обнаружил прослесвечение прекурсора. Это первый случай такого обнаружения. Идея, что прекурсор GRB может вызывать свое собственное послесвечение, была предложена в [32]. Спектральная подгонка к 6 фотонам, конечно, достаточно грубая, получившийся спектральный индекс составляет $\alpha = -2.5 \pm 0.5$, что согласуется со спектром основного послесвечения с $\alpha \sim -2$. Более того, если эмиссия в диапазоне 10–50 с в диапазоне сотен кэВ является частью единого широкого спектра, то энергетическое распределение спектра очень близко к плоскому (т.е. $\alpha \sim -2$).

Обсуждение и выводы. Вероятно, самый интересный факт, который мы видим в данных Fermi, – это послесвечение прекурсора. Это первое прямое доказательство такого явления, по крайней мере, если мы рассматриваем прекурсор как относительно слабое событие, отделенное от основного эпизода длительным временным интервалом. Слабый прекурсор, который происходит задолго до (до нескольких минут) основного гамма-всплеска, является особенностью многих событий. Оценки их возникновения варьируются от 3 % GRB [33] до 10 % [34] или даже 20% [35]. Полезный обзор явления представлен в работе [36]. Фактически, эта доля может быть еще выше, так как прекурсор может быть легко потерян. Прекурсор GRB 221009A имеет в несколько сотен раз более низкий пиковый поток фотонов и в несколько тысяч раз более низкое энергетическое выделение, чем основной эпизод излучения. Такой относительно слабый прекурсор может быть обнаружен только в редких случаях очень сильных всплесков, и нельзя исключать, что это явление типично для большинства событий, и мы наблюдаем только самые сильные прекурсоры. Однако этот слабый прекурсор имеет яркое послесвечение. Поток энергии прекурсора и его послесвечения составляет: $\sim 1.7 \cdot 10^{-5}$ эрг/см² (0.1–4.8 МэВ, BGO) и $\sim 1.5 \cdot 10^{-6}$ эрг/см² в диапазоне 23–230 МэВ соответственно. Кроме того, оценка [37] потока прекурсора составляет $2.38 \pm 0.04 \cdot 10^{-5}$ эрг/см². Следовательно, их соотношение составляет примерно 10^{-1} , в то время как то же самое соотношение для основного события составляет менее 10^{-2} (или 10^{-3} , если использовать оценку 0.21 эрг/см² для основного эпизода быстрого излучения в диапазоне 0.02–10 МэВ [22]). Это намек на то, что прекурсор может отличаться от основного GRB по своей природе. Если мы следуем парадигме, что быстрое излучение происходит от внутренних ударных волн в джете, а послесвечение происходит от внешнего удара в окружающей среде (см. [18]), то мы должны заключить, что в

случае прекурсора внутренний удар является патологически слабым. В принципе, нельзя исключать, что прекурсор с его послесвечением существенно отличается по своему механизму от основного эпизода гамма-всплеска.

Насколько нам известно, это первый случай обнаружения послесвечения прекурсора. К сожалению, очень маловероятно, что мы сможем наблюдать такое послесвечение непосредственно в ближайшем будущем, тем не менее, вероятно, это можно будет статистически обнаружить с использованием существующих баз данных. Если наша интерпретация высокоэнергетической эмиссии после прекурсора, как результата внешней ударной волны, верна, то можно отвергнуть некоторые теоретические модели прекурсов. Любая модель, основанная на эволюции единственной струи, описывающей и прекурсор, и основной эпизод (например, модель фотосферного излучения [38]), не удовлетворяет наблюдению двух независимых ударных волн. Что касается основного послесвечения, оно является самым ярким, как и сам GRB 221009. В других отношениях (относительный энергетический поток, спектр, закон затухания) оно выглядит типичным. Послесвечение из-за своей яркости видно в данных Fermi в течение двух дней и могло бы быть видно даже дольше с помощью черенковских телескопов, если бы не плохие условия наблюдения, включая яркую луну. Коллаборация HAWC сообщила об отсутствии сигнала через 8 ч после события и установила верхний предел $4.16 \cdot 10^{-12}$ эрг/см²/с [8]. Этот верхний предел находится в явном противоречии с данными Fermi, если не предполагать резкий спектральный завал между ~ 10 ГэВ и энергетическими диапазонами в теравольт. В принципе, такой спектральный завал в диапазоне 0.1–1 ТэВ возможен из-за γ – γ поглощения в источнике. Оптические фотоны, испускаемые на промежуточном этапе, могут играть роль поглотителя для фотонов высокой энергии. Пример численно смоделированного спектра с завалом при энергии около ТэВ приведен в [29]. Эта проблема требует отдельного исследования с использованием обширных численных симуляций, так как она очень сложна. В нее входят такие эффекты, как загрузка внешней среды парами [39], ее предускорение и динамика ударной волны [40]. Мы считаем, что в определенном диапазоне параметров возможно воспроизвести спектральный завал, который может объяснить противоречие между потоком ГэВ и верхним пределом HAWC. Однако другие гамма-всплески не имеют такого спада в своих послесвечениях, что подтверждается данными черенковских телескопов для других событий (см.

данные Fermi и MAGIC на рис. 6). Более того, фотон с энергией 400 ГэВ, обнаруженный через 9 ч, является аргументом против спектрального завала.

Благодарим команду Fermi за отличную базу данных и NASA за политику открытых данных.

Работа И. Ткачева была поддержана грантом Российского научного фонда # 23-42-00066.

1. P. Veres, E. Burns, E. Bissaldi et al. (Fermi GBM Team), GCN Circulars **32636** (2022).
2. S. Lesage, P. Veres, O. J. Roberts et al. (Fermi GBM Team), GCN Circulars **32642** (2022).
3. M. A. Williams, J. A. Kennea, S. Dichiara et al. (Collaboration), ApJ **946**, L24 (2023).
4. I. Lapshov, S. Molkov, I. Mereminsky et al. (SRG/ART-XC Team), GCN Circulars **32663** (2022).
5. D. Frederiks, A. Lysenko, A. Ridnaia et al. (Konus-Wind Team), GCN Circulars **32668** (2022).
6. Z. Cao, F. Aharonian, Q. An et al. (LHAASO Collaboration), Science **380**, 1390 (2023).
7. D. D. Dzheppuev, Y. Z. Afashokov, I. M. Dzaparova et al. (Collaboration), ATel **15669** (2022).
8. H. Ayala, R. Alfaro, J. C. Arteaga-Velazquez et al. (Collaboration), GCN Circulars **32683** (2022).
9. G. Galanti, L. Nava, M. Roncadelli, and F. Tavecchio, arXiv:2210.05659 [astro-ph.HE].
10. S. V. Troitsky, Pis'ma v ZhETF **116**, 745 (2022).
11. A. Y. Smirnov and A. Trautner, Phys. Rev. Lett. **131**, 021002 (2023).
12. J. D. Finke and S. Razzaque, ApJ **942**, L21 (2023).
13. S. Troitsky, arXiv:2307.08313 [astro-ph.HE].
14. T. A. Dzhatdov, E. I. Podlesnyi, and G. I. Rubtsov, arXiv:2306.05347 [astro-ph.HE].
15. M. Ajello, W. B. Atwood, M. Axelsson et al. (Collaboration), ApJ **256S**, 12 (2021).
16. C. Meegan, G. Lichti, P. N. Bhat et al. (Collaboration), ApJ **702**, 791 (2009).
17. A. M. Beloborodov, B. E. Stern, and R. Svensson, ApJ **535**, 158 (2000).
18. T. Piran, Rev. Mod. Phys. **76**, 1143 (2005).
19. R. A. Chevalier and Zh.-Y. Li, ApJ **520**, L29 (1999).
20. H. Ito, A. Levinson, B. E. Stern, and S. Nagataki, MNRAS **474**, 2828 (2018).
21. L. Nava, Int. J. Mod. Phys. D **27**, 1842003 (2018).
22. D. Frederiks, D. Svinkin, A. L. Lysenko, S. Molkov, A. Tsvetkova, M. Ulanov, A. Ridnaia, A. A. Lutovinov, I. Lapshov, A. Tkachenko, and V. Levin, ApJ **949**, L7 (2023).
23. R. Pilleri, E. Bissaldi, N. Omodei, G. La Mura, and F. Longo, ATel **15656** (2022).
24. Z.-Q. Xia, Y. Wang, Q. Yuan, and Y.-Z. Fan, arXiv:2210.13052 [astro-ph.HE].
25. M. Ackermann, M. Ajello, K. Asano et al. (Collaboration), Science **343**, 42 (2014).

26. H. Abdalla, R. Adam, F. Aharonian et al. (Collaboration), *Nature* **575**, 464 (2019).
27. V. A. Acciari, S. Ansoldi, L. A. Antonelli et al. (MAGIC Collaboration), *Nature* **575**, 459 (2019).
28. H. Abdalla, F. Aharonian, F. Ait Benkhali et al. (H.E.S.S. Collaboration), *Science* **372**, 1081 (2021).
29. D. Miceli and L. Nava, *Galaxies* **10**, 66 (2022).
30. T. Laskar, K. D. Alexander, R. Margutti et al. (Collaboration), *ApJ* **946**, L23 (2023).
31. R. Y. Liu, H. M. Zhang, and X. Y. Wang, *ApJ* **943**, L2 (2023).
32. F. Nappo, G. Ghisellini, G. Ghirlanda, A. Melandri, L. Nava, and D. Burlon, *MNRAS* **445**, 1625 (2014).
33. T. M. Koshut, C. Kouveliotou, W. S. Paciesas, J. van Paradijs, G. N. Pendleton, M. S. Briggs, G. J. Fishman, and C. A. Meegan, *ApJ* **452**, 145 (1995).
34. E. Troja, S. Rosswog, and N. Gehrels, *ApJ* **723**, 1711 (2010).
35. D. Lazzati, *MNRAS* **357**, 722 (2005).
36. S. Zhu, *PhD thesis, Univ. of Maryland* (2015); <https://doi.org/10.13016/M2CH9N>.
37. P. Minaev, A. Pozanenko, I. Chelovekov (GRB IKI FuN), *GCN Circulars* **32819** (2022).
38. M. Lyutikov and V. Usov, *ApJ* **543**, L129 (2000).
39. C. Thompson and P. Madau, *ApJ* **538**, 105 (2000).
40. A. M. Beloborodov, *ApJ* **565**, 808 (2002).