Спад интенсивности первичного спектра послесвечения и эхо первичной фазы в спектре гамма-всплеска GRB 221009A

А. А. Семёнов, Т. А. Джатдоев, Г. И. Рубцов,

ИЯИ РАН · НИИЯФ МГУ

30 июня 2026

Препринт: https://doi.org/10.48550/arXiv.2604.10378

Использованные работы

[G12] Gilmore et al., *MNRAS*, **422**, 3189 (2012)

[S21] Saldana-Lopez et al., *MNRAS*, **507**, 5144 (2021)

[L23a] Cao et al. (LHAASO), *Science*, **380**, 1390 (2023)

[L23b] Cao et al. (LHAASO), *Science Advances*, **9**, eadj2778 (2023)

[C25] Carretti et al., *A&A*, **693**, A208 (2025)

[T24] Tjemsland, Meyer & Vazza, *ApJ*, **963**, 135 (2024)

[KM08] Krumholz & McKee, *Nature*, **451**, 1082 (2008)

[C99] Crutcher, *ApJ*, **520**, 706 (1999)

Обозначения

- **Первичный спектр** (intrinsic spectrum) - спектр до поглощения на EBL
- **Первичная фаза** (prompt phase) - начальная фаза гамма-всплеска
- **EPWL** - степенной закон с экспоненциальным обрезанием
- **PWL** - степенной закон
- **EBL** - внегалактический фоновый свет
- **SED** ($E^2\, dN/dE$) - спектральное распределение энергии
- **SSC** - синхротронная самокомптонизация

GRB 221009A — ярчайший из когда-либо зарегистрированных гамма-всплесков

Гамма-квантов зарегистрировано

$>64\,000$

Диапазон энергий

0.1–13 ТэВ

Красное смещение источника

$z = 0.151$

- Гамма-всплеск был зарегистрирован в октябре 2022
- Длинный гамма-всплеск
- Первый гамма-всплеск, от которого зарегистрировали гамма-квант с энергией более 10 ТэВ
- Исключительно яркий гамма-всплеск, $PeakFlux \approx 0.031$ эрг c^{-1-2} за временной интервал 1.024 с
- Детекторы WCDA и KM2A обсерватории LHAASO наблюдали первые 3000 с после триггера Fermi-GBM

Мотивация выбора моделей

1. **Спад в первичном спектре**
   Наблюдения гамма-квантов в области нескольких ТэВ потребовала понять, является ли спад свойством источника или распространения. Мы проверяем возможность в которой первичный спектр имеет внутренний спад, а при распространении учитывается только поглощение на EBL.
2. **Нейтронный пучок — эхо первичной фазы**
   Если гамма-кванты первичной фазы эффективно поглощаются внутри области излучения, нейтроны могут покинуть её без отклонения. Их последующие взаимодействия с окружающим веществом дают запаздывающую гамма-компоненту — эхо первичной фазы.
3. **Межгалактические адронные каскады**
   Ультравысокоэнергичные протоны могут рождать электромагнитные каскады уже на пути к наблюдателю. Поэтому нужно проверить, может ли часть ТэВ-сигнала быть не излучением источника, а следствием межгалактического распространения.

Восстановление первичного спектра

$$F_{\mathrm{obs}}(E) \;=\; F_{\mathrm{ins}}(E) \cdot \exp\Big(-\tau(E,z)\Big)$$

$\tau(E,z)$ — оптическая толщина

EPWL

$$\frac{dN}{dE} \propto E^{-\gamma} \exp\left(-\frac{E}{E_c}\right)$$

PWL

$$\frac{dN}{dE} \propto E^{-\gamma}$$

Модели EBL

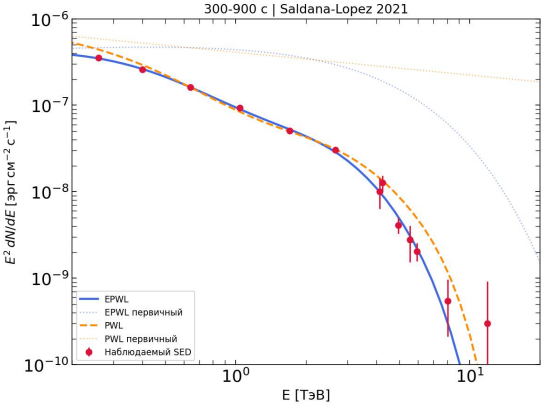
Gilmore et al. 2012 (G12)

Saldana-Lopez et al. 2021 (S21)

Критерий выбора

χ^2-фит $\rightarrow$ p-value и значимость Z

Результаты: форма первичного спектра



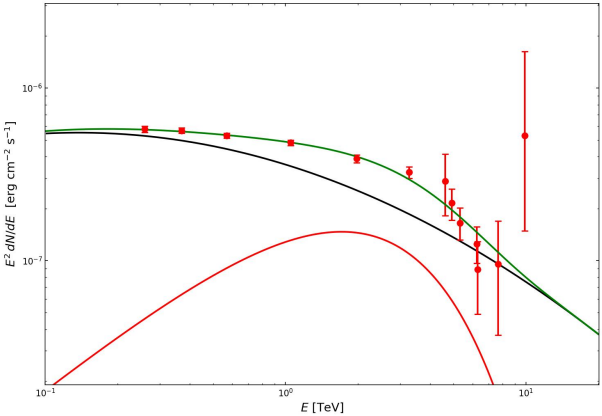
Интервал, с	EBL	Модель	p-value	Z, σ
230–300	G12	EPWL	0.633	0.34
	G12	PWL	1.1×10^{-23}	9.96
	S21	EPWL	0.120	1.18
	S21	PWL	2.6×10^{-5}	4.05
300–900	G12	EPWL	0.282	0.58
	G12	PWL	3.1×10^{-73}	18.1
	S21	EPWL	0.749	0.67
	S21	PWL	5.3×10^{-20}	9.08

Первичный спектр имеет спад при $E_c \approx 2$–3 ТэВ.

Нейтронный пучок

- Протоны ускоряются в блобе до $\sim$1 ПэВ
- $p + \gamma \rightarrow n + \pi^+$ - фотоадронные взаимодействия, от 1/3 до 1/2 доля фотоадронных взаимодействий с выходом нейтронов, которые уносят $\approx$ 0.87 энергии протона
  [S. R. Kelner and F. A. Aharonian, Phys. Rev. D, **78**, 034013 (2008)]
  Ограничение на поток нейтронов можно поставить из ненаблюдения нейтрино в IceCube
- Нейтроны свободно покидают блоб и взаимодействуют с веществом области звездообразования. Типичные значения толщины вещества в области звездообразования 1 г/см^2(KM08), значения магнитного поля $B_{SFR} \sim 1$ мГс(C99)
- Образуются электроны 100 - 200 ПэВ излучающие $\sim$ 1 ТэВ синхротронные гамма-кванты [Crutcher, ApJ, 520, 706 (1999)]

Избыток над SSC



- SSC-модель L23b
- Нейтронная компонента [S. Razzaque, O. Mena, and C. D. Dermer,ApJ 691, L37 (2009)] $dN/dE \propto E^{-\gamma} e^{-E/E_c}$ $\gamma = 1.12$, $E_c = 1.53$ ТэВ
- Сумма SSC + нейтронная компонента

Нейтронный пучок

- Протоны ускоряются в блобе до $\sim$1 ПэВ
- $p + \gamma \rightarrow n + \pi^+$ - фотоадронные взаимодействия, от 1/3 до 1/2 доля фотоадронных взаимодействий с выходом нейтронов, которые уносят $\approx$ 0.87 энергии протона
  [S. R. Kelner and F. A. Aharonian, Phys. Rev. D, **78**, 034013 (2008)]
  Ограничение на поток нейтронов можно поставить из ненаблюдения нейтрино в IceCube
- Нейтроны свободно покидают блоб и взаимодействуют с веществом области звездообразования. Типичные значения толщины вещества в области звездообразования 1 г/см^2(KM08), значения магнитного поля $B_{SFR} \sim$ 1 мГс(C99)
- Образуются электроны 100 - 200 ПэВ излучающие $\sim$ 1 ТэВ синхротронные гамма-кванты [Crutcher, ApJ, 520, 706 (1999)]

Межгалактические каскады

$$\Delta t = \frac{d_c^2}{c\,\Delta d_{\rm fil}}\,\frac{\delta^2}{12}$$ [Alcock & Hatchett, ApJ 222, 456 (1978)]

Протоны ($E > 10$ ЭэВ) отклоняются в магнитных полях межгалактических филаментов. При $B_{\rm fil} \sim 10$ нГ (C25) и $d_{\rm fil} = 1$ Мпк протоны отклоняются на одном филаменте на $\delta = 3.1 * 10^{-2}$ рад., $\Delta d_{fil} = 15 - 25$ Мпк (T24), $d_c = 647.1$ Мпк

$$\Delta t \approx 5.7 \times 10^6 \text{ лет}$$

типичная задержка каскадных гамма-квантов от UHE протонов

↑ **на 11 порядков величины превышает длительность наблюдений LHAASO (∼3000 с)**

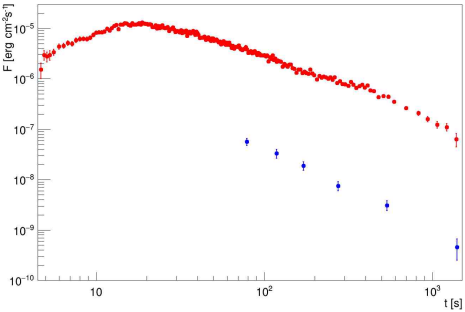
Вклад таких каскадов в наблюдаемый сигнал на ранней стадии послесвечения крайне ограничен

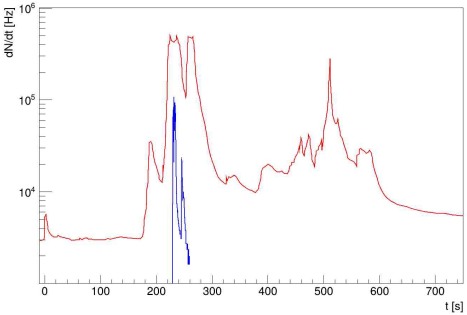
Выводы

- Описание первичного спектра с помощью PWL исключено со значимостью $> 5\sigma$ для всех ключевых временных интервалов в модели G12
- Гамма-кванты, порождённые убегающими нейтронами, могут вносить значительный вклад в спектр GRB 221009A вблизи 1 ТэВ
- Вклад гамма-квантов от межгалактических каскадов, инициированных сверхвысокоэнергетическими протонами, подавлен из-за задержки первичных протонов/ядер в филаментах внегалактического магнитного поля
- Данные LHAASO можно объяснить в рамках Стандартной модели без привлечения экзотической физики

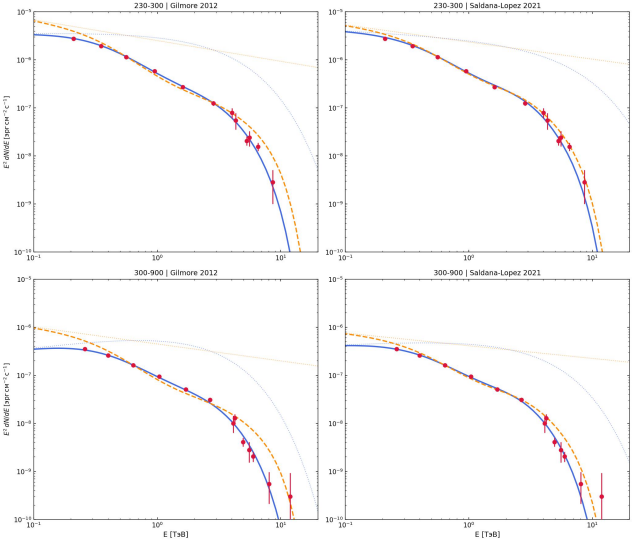
Бэкап

Кривая блеска и скорость счета





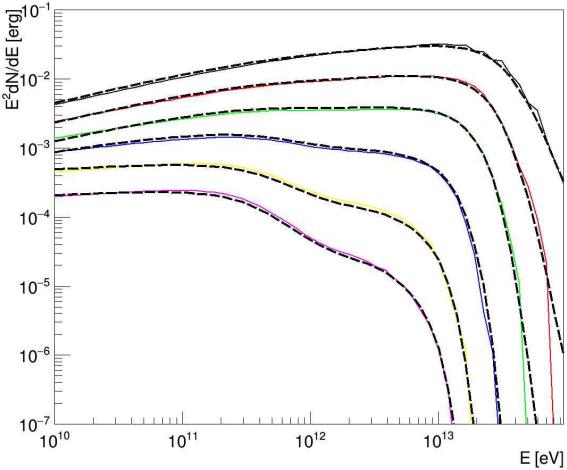
Результаты: SED по временным интервалам



Результаты: статистика фитов

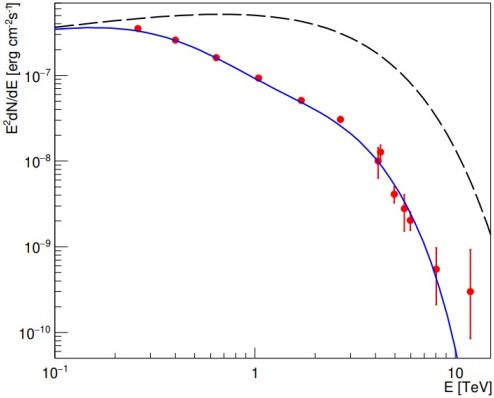
Интервал, с	EBL	Модель	χ^2/dof	p-value	Z, σ
230–300	G12	EPWL	0.78	0.633	0.34
230–300	G12	PWL	13.3	1.1×10^{-23}	9.96
230–300	S21	EPWL	1.6	0.120	1.18
230–300	S21	PWL	3.9	2.6×10^{-5}	4.05
300–900	G12	EPWL	1.2	0.282	0.58
300–900	G12	PWL	33.9	3.1×10^{-73}	18.1
300–900	S21	EPWL	0.7	0.749	0.67
300–900	S21	PWL	10.7	5.3×10^{-20}	9.08

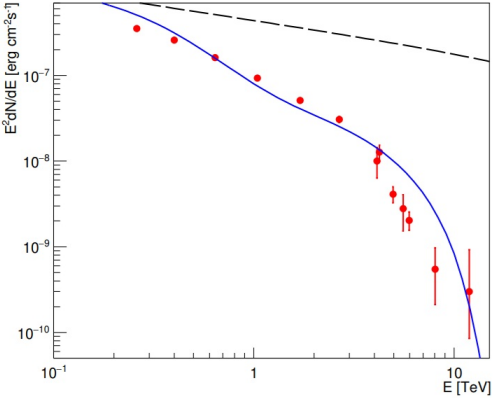
Наблюдаемые спектры электромагнитных каскадов



Наблюдаемые спектры электромагнитных каскадов, инициированных на красном смещении $z = 0.005$ (чёрный), 0.01 (красный), 0.02 (зелёный), 0.05 (синий), 0.10 (жёлтый), 0.15 (фиолетовый).

Совместный SED LHAASO-WCDA и LHAASO-KM2A в диапазоне времён 300–900 с.





Оценка характеристической энергии E_c

Оцениваем E_c через простое приближение для энергии синхротронного фотона [D. Khangulyan, M. Arakawa, and F. Aharonian, MNRAS 491, 3217 (2019).]:

$$E_{cm} = \frac{6 \times 10^7\,\text{эВ}}{1+z} \left(\frac{E_e}{1\,\text{ПэВ}}\right)^2 \left(\frac{B_{\mathrm{SFR}}}{1\,\text{мГс}}\right), \tag{3}$$

где энергия электрона:

$$E_e \sim \frac{(1-f_{p\gamma})\,E'_{p\text{-max}}\,D}{20} = 174\,\text{ПэВ}, \tag{4}$$

для протонов, ускоренных в системе покоя блоба до $E'_{p\text{-max}} = 4\,\text{ПэВ}$. Получаем $E_{cm} = 1.58\,\text{ТэВ}$ - близко к значению из фита $E_c = 1.53\,\text{ТэВ}$.