

GRB 221009A:

подтверждённые ожидания и новые сюрпризы

Е.В. Деришев
ИПФ РАН

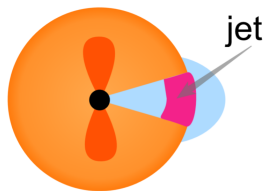
17 мая 2023 г.

При поддержке гранта РФФИ № 21-12-00416

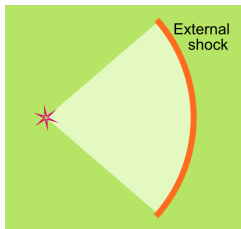
Outline

- 1 Модели гамма-всплесков: источники и послесвечение
- 2 Объявленные результаты наблюдений GRB 221009A
- 3 Рентгеновская кривая блеска
- 4 Тэв-ное излучение: наблюдения, ограничения и модель
- 5 Что стоит за сообщением о фотоне 18 Тэв?

Гамма-всплески



главный
импульс



послесвечение

Начальный лоренц-фактор
джета: $\Gamma > 100$

Baring & Harding (1997)

Торможение ударной волны в фазе послесвечения вполне предсказуемо

Blandford & McKee (1976)

Синхротронное излучение



ультррелятивистский
поперечный импульс

спектр излучения
квазинепрерывный

типичная энергия фотонов
 $\epsilon_{sy} \approx \gamma_e^2 \hbar \omega_B$

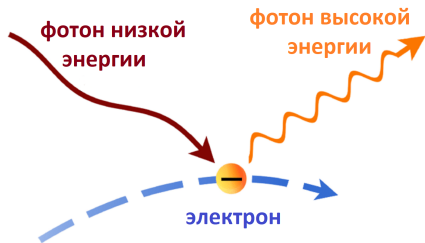
мощность излучения

$$P_{sy} = \frac{4}{3} \gamma_e^2 \sigma_T c \frac{B^2}{8\pi}$$

Излучение на пределе ускорения электронов

$$\epsilon_{sy, \max} \sim m_e c^2 / \alpha_f \approx 70 \text{ MeV}$$

Обратное комптоновское излучение



энергия передаётся
от электрона к фотону

мощность излучения

$$P_{IC} = \frac{4}{3} \gamma_e^2 \sigma_{CW} \rho_{ph}$$

Томсоновский режим $(\gamma_e \epsilon_{low} \ll m_e c^2)$

энергия рассеянных фотонов $\epsilon_{high} \approx \gamma_e^2 \epsilon_{low}$

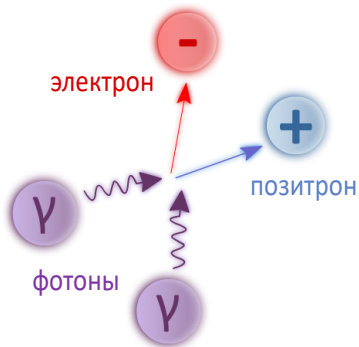
сечение рассеяния $\sigma \approx \sigma_T$

Режим Клейна-Нишины $(\gamma_e \epsilon_{low} \gtrsim m_e c^2)$

энергия рассеянных фотонов $\epsilon_{high} \approx \gamma_e m_e c^2$

сечение рассеяния $\sigma \sim \sigma_T m_e c^2 / (\gamma_e \epsilon_{low})$

Двухфотонное рождение e^-e^+ пар



кинематический порог

$$\epsilon_1 \epsilon_2 > 2m_e^2 c^4 / (1 - \cos \theta)$$

обычно $\epsilon_1 \gg \epsilon_2$ —

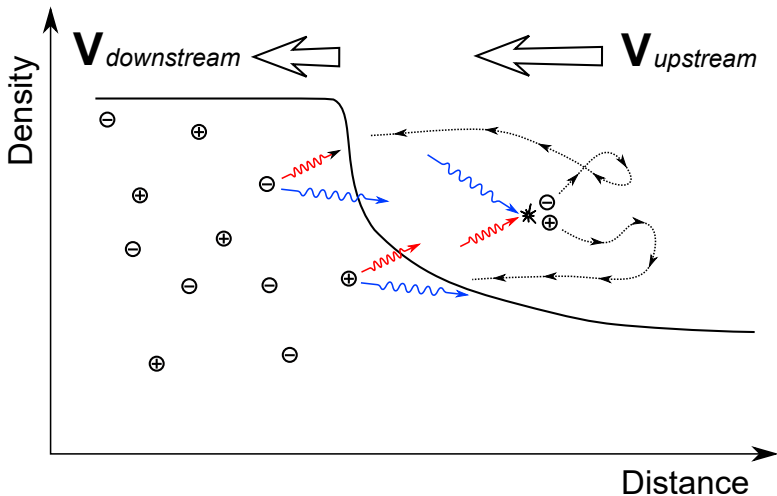
низкоэнергичных фотонов больше

при этом электрон и позитрон рождаются релятивистскими и делят энергию примерно пополам

Симметрия диаграмм Фейнмана с комптоновским рассеянием

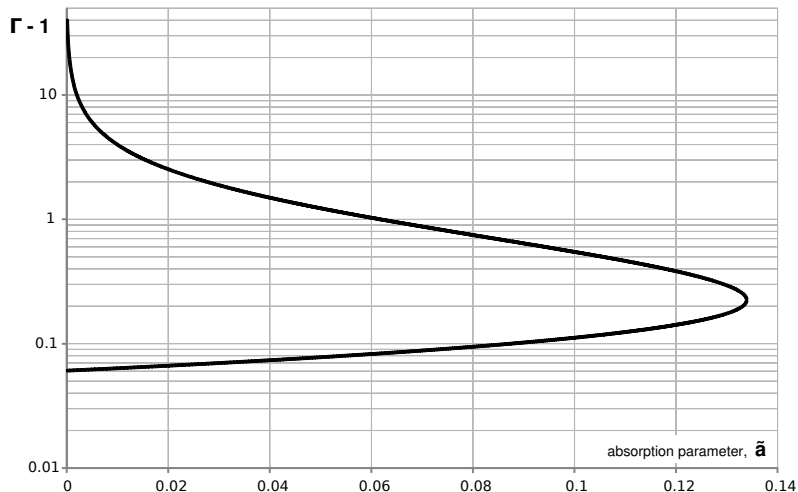
- сечения при высоких энергиях отличаются на множитель 2
- сечение рождения пар при низких энергиях подавлено кинематическим порогом

Равновесная ударная волна



$\langle \gamma \rangle > \gamma_0$ — преобладает поглощение фотонов } $\langle \gamma \rangle \simeq \gamma_0 = (B_{cr}/B_{rms})^{1/3}$
 $\langle \gamma \rangle < \gamma_0$ — преобладает ускорение электронов }

Гидродинамический лоренц-фактор в системе фронта



верхняя ветвь – набегающий поток
нижняя ветвь – отходящий поток.

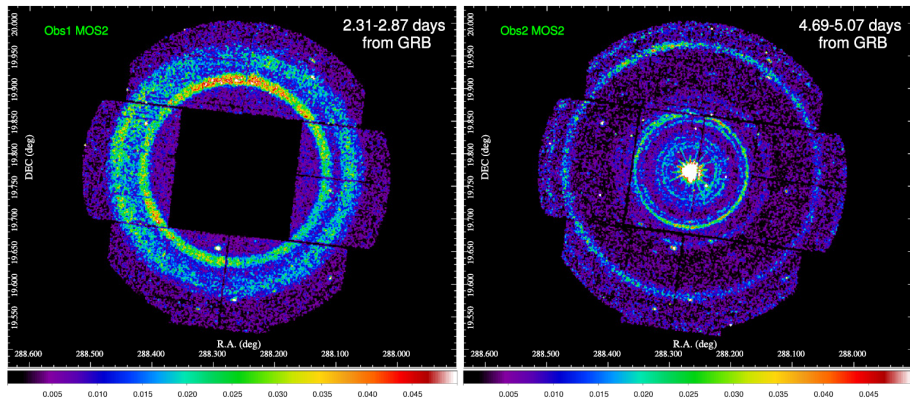
Основные предсказания

- Отношение комптоновской светимости к синхротронной ~ 1 .
- Доля поглощённого внутри источника излучения постоянна (≈ 0.1).
- Выполнение предыдущего условия требует подстройки лоренц-фактора инжектируемых электронов γ_b . При торможении ударной волны γ_b растёт, а доля ускоренных частиц уменьшается.

Особенности GRB 221009A

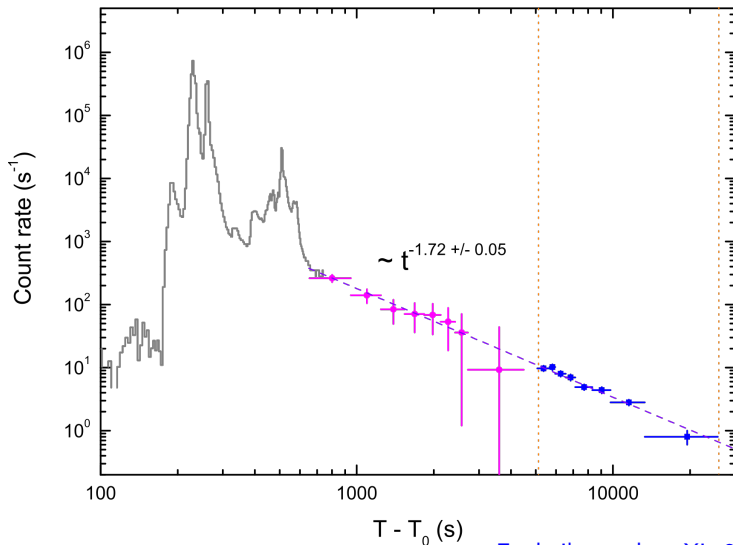
- Рекордная излучённая энергия $E_{\text{iso}} \approx 1.2 \times 10^{55} \text{ erg}$
(изотропный эквивалент)
- Сложная кривая блеска с предвестником и 3-мя импульсами сопоставимой энергетики
- Наблюдалось Тэв-ное излучение
предположительно от перекрывающегося с основным импульсом послесвечения
- Предварительное сообщение о фотоне с энергией 18 Тэв
оптическая толщина при $z = 0.151$ больше 10

Рентгеновское эхо (XMM-Newton)



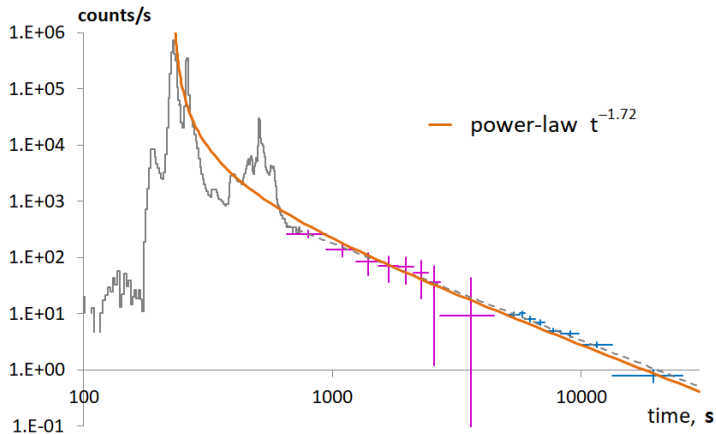
Tiengo et al., ApJ Letters 946, L30 (2023)

Традиционный диапазон (80 - 320 кэВ, Konus-WIND)



Frederiks et al., arXiv:2302.13383 (2023)

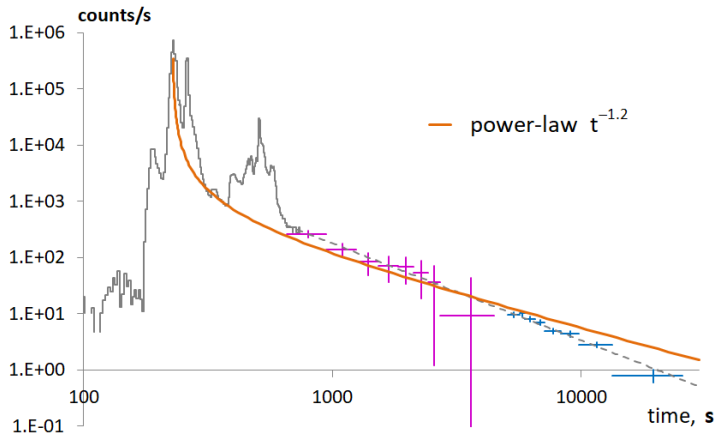
Кривая блеска послесвечения



Быстрое падение светимости трудно объяснить и согласовать

- При $t_{obs} \sim 300$ сек кривая значительно выше измеренного потока
- Закон спадания $L \propto \epsilon_r E_{kin}^{iso} / t_{obs}$ $\Rightarrow E_{kin}^{iso} \propto t_{obs}^{-0.7}$?!

Кривая блеска послесвечения



Медленное падение светимости удобно для теории, но

- Требуется излом при $t_{obs} \sim 2000$ сек с заметным укрупнением
- Можно предположить, что $\Gamma < 1/\theta_{jet}$ на больших временах

Наблюдение Тэв-ного излучения

LHAASO observed GRB 221009A with more than 5000 VHE photons up to around 18 TeV

Show affiliations

Huang, Yong ; Hu, Shicong ; Chen, Songzhan ; Zha, Min ; Liu, Cheng ; Yao, Zhiguo ; Cao, Zhen ; Experiment, The Lhaaso

We report the observation of GRB 221009A, which was detected by Swift (Kennea et al. GCN #32635), Fermi-GBM (Veres et al. GCN #32636, Lesage et al. GCN #32642), Fermi-LAT (Bissaldi et al. GCN #32637), IPN (Svinkin et al. GCN #32641) and so on. GRB 221009A is detected by LHAASO-WCDA at energy above 500 GeV, centered at RA = 288.3, Dec = 19.7 within 2000 seconds after T0, with the significance above 100 s.d., and is observed as well by LHAASO-KM2A with the significance about 10 s.d., where the energy of the highest photon reaches 18 TeV. This represents the first detection of photons above 10 TeV from GRBs. The LHAASO is a multi-purpose experiment for gamma-ray astronomy (in the energy band between 10^{11} and 10^{15} eV) and cosmic ray measurements.

Publication: GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 32677



Large
High
Altitude
Air
Shower
Observatory

Состоит из двух массивов детекторов — WCDA и KM2A

Происхождение Тэв-ных фотонов

Сигнал прослеживается до 2000 сек от начала всплеска

⇒ это послесвечение

В максимуме сигнала его значимость $\gtrsim 100 \sigma$

⇒ при типичном спадании яркости послесвечения как $t^{-1.3}$
максимум приходится на время ~ 10 сек
и перекрывается с основным импульсом всплеска

Разная оптическая толщина по двухфотонному поглощению

- источник собственно всплеска ближе к центральной машине и Тэв-ное излучение может быть поглощено
- прозрачность для послесвечения обеспечить легче

Происхождение Тэв-ных фотонов

Оптическая толщина

$$\tau = \frac{\sigma_{\gamma\gamma}}{2\Gamma^2} n_{abs} R = \frac{\sigma_{\gamma\gamma}}{2\Gamma^2} \frac{L_{iso}}{4\pi R c E_p} \left(\frac{\epsilon_{abs}}{E_p} \right)^{\alpha+1} \quad \sigma_{\gamma\gamma} \approx 10^{-25} \text{cm}^2$$

По данным Konus-WIND (Frederiks et al., arXiv:2302.13383):

$$\langle L_{iso} \rangle \approx 10^{54} \text{ эрг/с}, \quad E_p \approx 3 \text{ МэВ}, \quad \alpha \approx -0.8$$

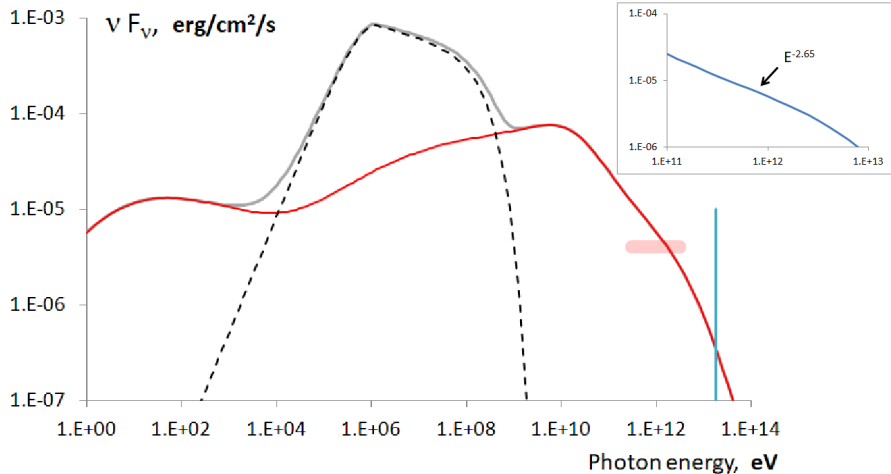
Основной всплеск — требуется слишком большой Лоренц-фактор

$$R \sim \Gamma_0^2 \times 10^8 \text{ см} \Rightarrow \Gamma_0 \gtrsim 4 \times 10^3$$

Послесвечение — работает при разумных параметрах

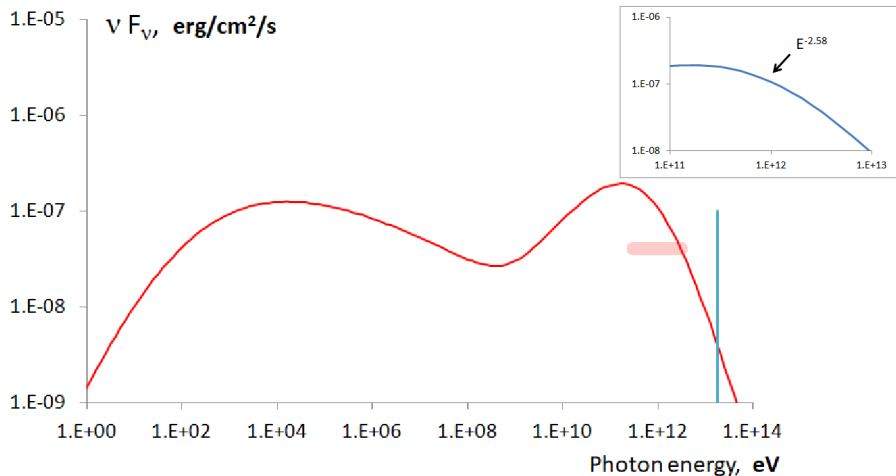
$$R \approx 4\Gamma^2 c t_{peak} \Rightarrow \Gamma \gtrsim 400 \text{ для } t_{peak} = 10 \text{ сек}$$

Раннее послесвечение (SSC + EC)



Параметры: $\epsilon_B = 3 \times 10^{-3}$, $\epsilon_e = 0.15$ — остаются неизменными
 $t_{obs} = 15 \text{ s}$, $E_{kin} = 5 \times 10^{54} \text{ erg}$, $\Gamma_{sh} = 400$, $\langle \gamma_{inj} \rangle = 600$

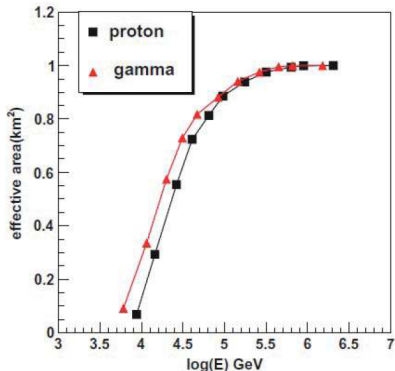
Позднее послесвечение (только SSC)



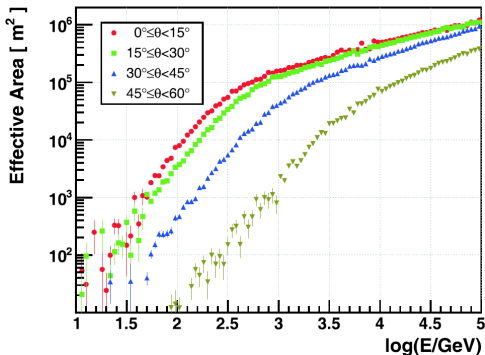
Параметры: $\epsilon_B = 3 \times 10^{-3}$, $\epsilon_e = 0.15$ — остаются неизменными

$t_{obs} = 600$ s, $E_{kin} = 5 \times 10^{53}$ erg, $\Gamma_{sh} = 100$, $\langle \gamma_{inj} \rangle = 6 \times 10^4$

Оценка поглощения энергичного фотона (18 Тэв?)



Эффективная площадь KM2A



Эффективная площадь WCDA

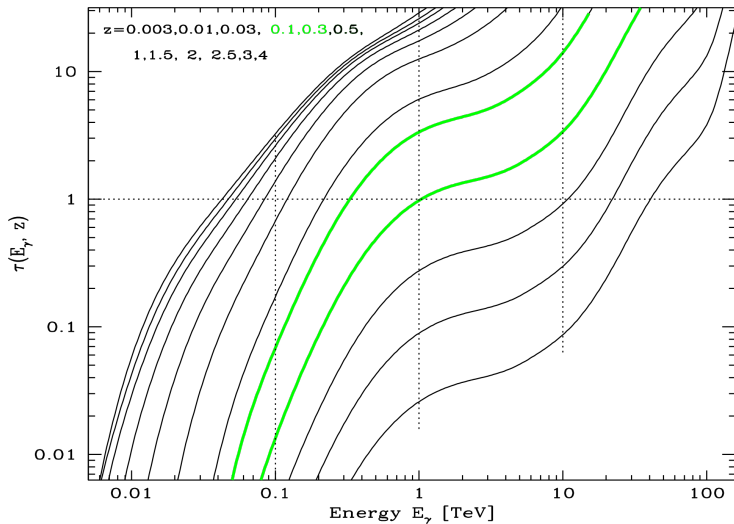
From Ma et al., Chinese Phys. C 46 (2022)

Соотношение эффективных площадей $\approx 10 : 1$

Скорректированное отношение числа фотонов $\lesssim 1 : 5 \times 10^4$

Источник со спектром $N_E \propto E^{-2.5}$ позволяет опт. толщину $\tau(1 \text{ TeV}) + 6$

Поглощение высокоэнергичных фотонов

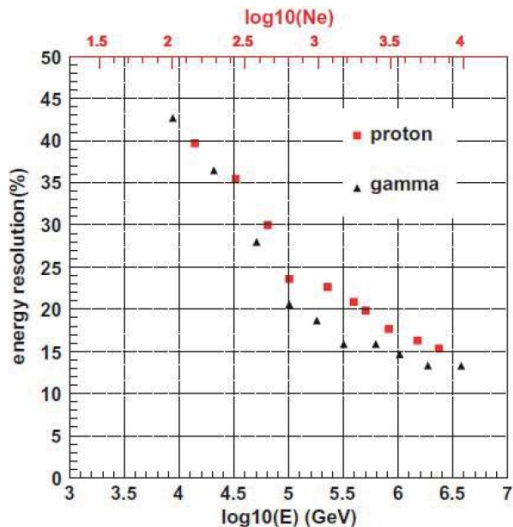


GRB 221009A

$z = 0.151$

based on Franceschini, Universe v.7 No.5 (2021)

А может 18-ти Тэв и не было?



Точность определения энергии фотона детектором KM2A

From Ma et al., Chinese Phys. C 46 (2022)

Конец спектра или конец старой физики?

✓ скорее всего

Фактическая энергия фотона $\approx 10 \text{ TeV}$, спектр источника немного "заваливается" после нескольких Тэв, а фактическое число зарегистрированных Тэв-ных фотонов значительно больше 5000

? под вопросом

Фотон с энергией 18 Тэв — настоящий, источник имеет очень жёсткий спектр $N_E \propto E^{-2}$ (без завала!), а плотность межгалактического инфракрасного излучения переоценена примерно в 1,5 раза

✗ под очень большим вопросом

Новая физика!

Что дальше?

1. Ждём официальной публикации от LHAASO по результатам наблюдений GRB 221009A
2. Удивляемся ещё раз
3. ???