

Моделирование ускорения космических
лучей в быстрых транзиентах методом
Particle-in-Cell

*Романский В. И., Быков А. М., Осипов С. М.
Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе*

*Всероссийская конференция космических лучей
27 июня 2022*

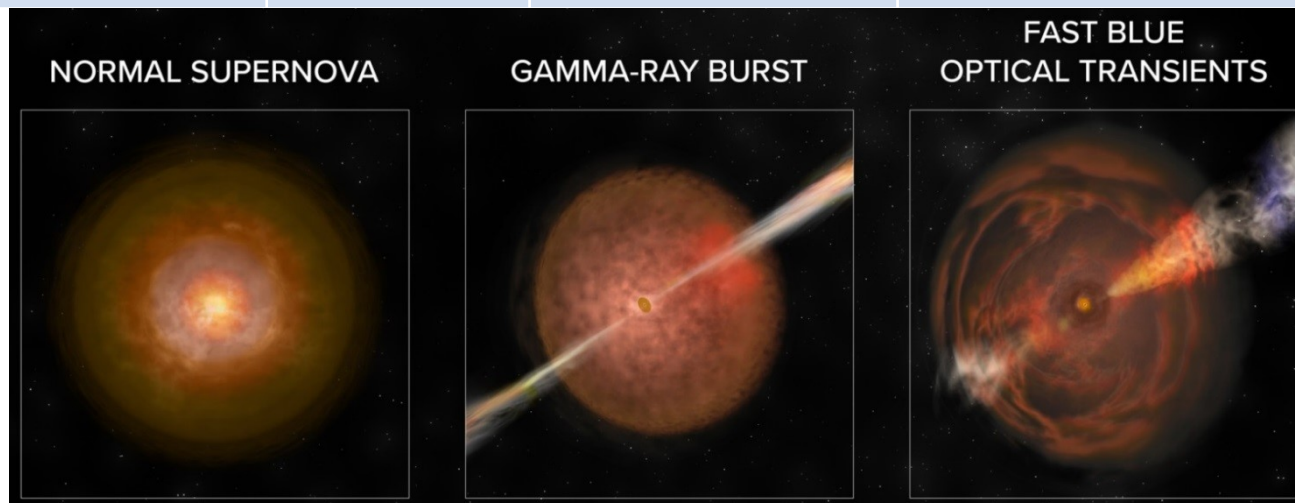
Работа поддержана Российским научным фондом (грант №21-72-20020)

Быстрые голубые оптические транзиенты (FBOTs)

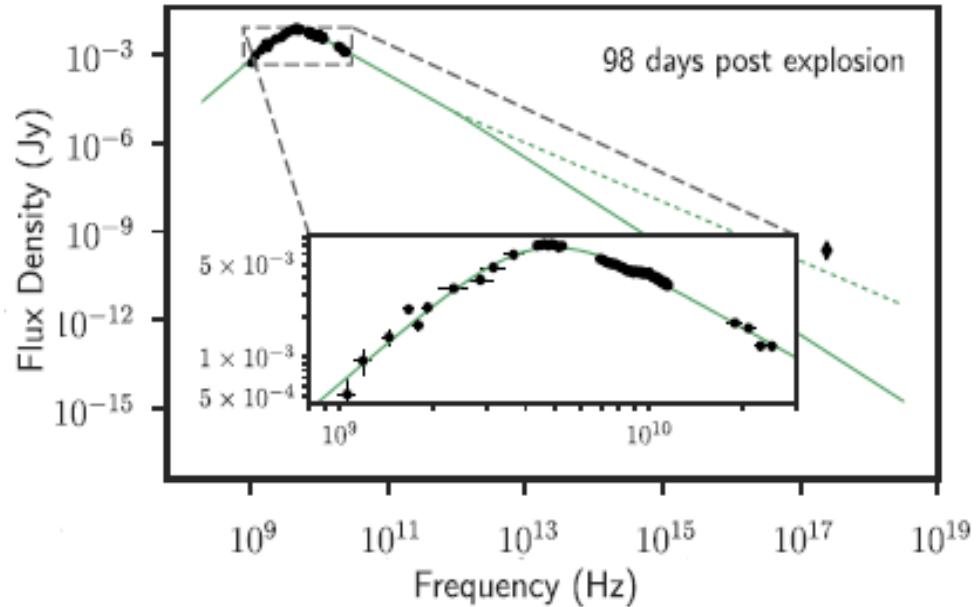
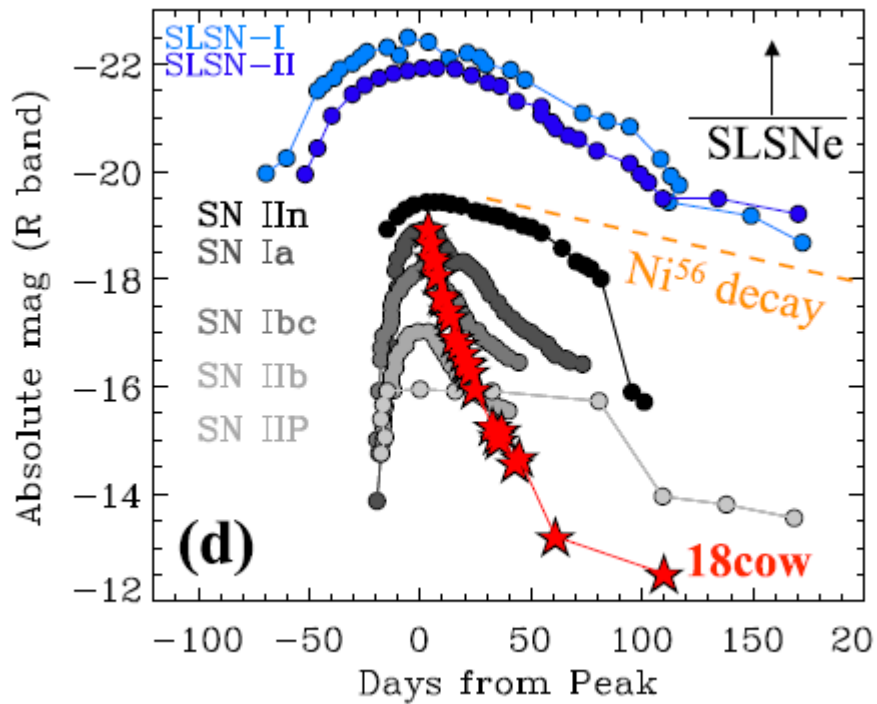
Редкий класс объектов, характеризующихся

- большой полной светимостью
- большой светимостью в оптическом и ультрафиолетовом диапазоне,
- быстрым всплеском и затуханием светимости
- наличием движущейся с субрелятивистскими скоростями эжекты. Такие объекты интересны с точки зрения ускорения космических лучей.

Название	Дата события	Скорость эжекты	Публикация
AT2018cow “The Cow”	16.06.2018	0.13c	Ho et. al ApJ 871:73 (2020)
ZTF18abvkwla “The Koala”	12.09.2018	0.3c	Ho et. Al ApJ 895:49 (2020)
CSS161010	10.10.2016	0.55c	Coppejans et. al ApJL 895:L23 (2020)
AT2020xnd	12.10.2020	0.2c	Perley et. al. MNRAS 508 4 (2021)
AT2020mrf	12.06.2020	0.08c	Yao et. al. arXiv:2112.00751v2 (2022)



Особенности излучения FBOT



Оптическая светимость AT2018cow в сравнении с типичными сверхновыми.

Margutti et. al. ApJ 872 (2019)

Спектральная плотность потока энергии радио излучения CSS161010. Спектр имеет вид характерный для синхротронного самопоглощения.


Correjas et. al, ApJL 895 (2020)

Синхротронное излучение с учетом самопоглощения


Модель Шевалье

Рассматривается излучение плоского диска, перпендикулярного лучу зрения, с учетом самопоглощения, с однородным магнитным полем и степенной функцией распределения электронов

$$I_\nu = \frac{c_5}{c_6} \cdot B_\perp^{-1/2} \left(\frac{\nu}{c_1} \right)^{5/2} \left(1 - \exp \left(- \left(\frac{\nu}{\nu_1} \right)^{-(p+4)/2} \right) \right)$$

$\nu \ll \nu_1$ 

$$I_\nu \sim \nu^{5/2}$$

$\nu \gg \nu_1$ 

$$I_\nu \sim \nu^{-(p-1)/2}$$

$$\nu_1 = 2c_1 (f c_6)^{2/(p+4)} N_0^{2/(p+4)} B_\perp^{(p+2)/(p+4)}$$

Функция распределения электронов $F(E) = N_0 E^{-p}$,

c_1, c_5, c_6 - константы Пахольчика,

B_\perp перпендикулярное магнитное поле,

f - геометрический фактор заполнения объема

Chevalier "Synchrotron self-absorption in radio supernovae" ApJ 499:810 (1998)

Определение параметров источника по излучению

$$\varepsilon_e = \frac{E_e}{(\gamma - 1)\rho c^2} - \text{доля энергии набегающего потока в электронах}$$

$$\varepsilon_B = \frac{B^2}{4\pi(\gamma - 1)\rho c^2} - \text{доля энергии в магнитном поле}$$

$$N_0 = \frac{\varepsilon_e B^2 (p - 2) E_0^{p-2}}{8\pi \varepsilon_B}, E_0 - \text{начальная энергия электронов (обычно } m_e c^2 \text{)}$$

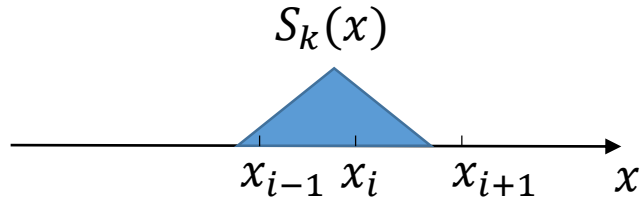
Можно определить радиус и магнитное поле в источнике, зная пиковую частоту и максимальную спектральную плотность потока

$$R = \left[\frac{6\varepsilon_B c_6^{p+5} F_{max}^{p+6} D^{2p+12}}{\varepsilon_e f (p - 2) \pi^{p+5} c_5^{p+6} E_0^{p-2}} \right]^{1/(2p+13)} \frac{2c_1}{v_{max}}$$

$$B = \left[\frac{36\pi^3 c_5 \varepsilon_B^2}{\varepsilon_e^2 f^2 (p - 2)^2 c_6^3 E_0^{2(p-2)} F_{max} D^2} \right]^{2/(2p+13)} \frac{v_{max}}{2c_1}$$

Проблема – предположение о строго степенном спектре электронов, а так же наличие в формулах неопределенных параметров ε_e , ε_B , E_0

Particle-in-Cell метод



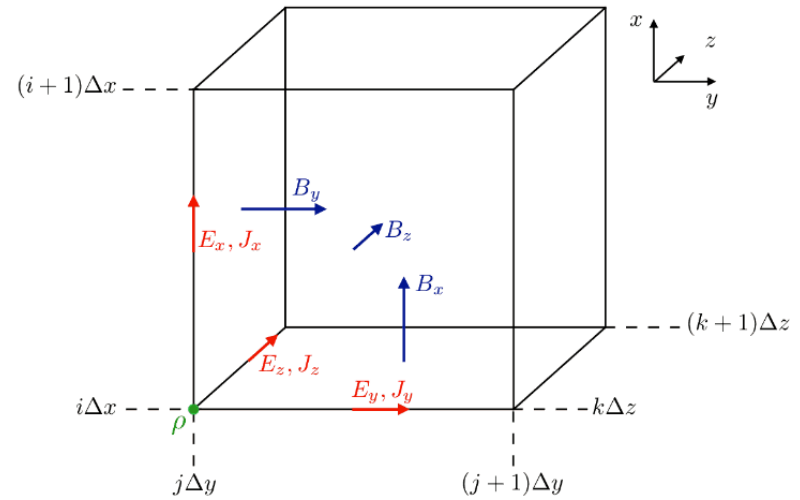
Поле, действующее на частицу

$$\vec{E}_k = \sum_i^{N_{\text{ячеек}}} \vec{E}_i \int_{V_i} S_k(x) dx$$

Ток, создаваемый частицами в данной ячейке

$$\vec{J}_i = \sum_k^{N_{\text{частиц}}} q_k \vec{v}_k \int_{V_i} S_k(x) dx$$

$$\begin{cases} \frac{\partial \vec{x}_k}{\partial t} = \vec{v}_k \\ \frac{\partial \vec{p}_k}{\partial t} = q_k (\vec{E}_k + \frac{\vec{v}_k \times \vec{B}_k}{c}) \end{cases} \quad \begin{cases} \nabla \vec{E} = 4\pi\rho, \nabla \vec{B} = 0 \\ \nabla \times \vec{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \vec{B} = \frac{4\pi}{c} \vec{J} + \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \end{cases}$$



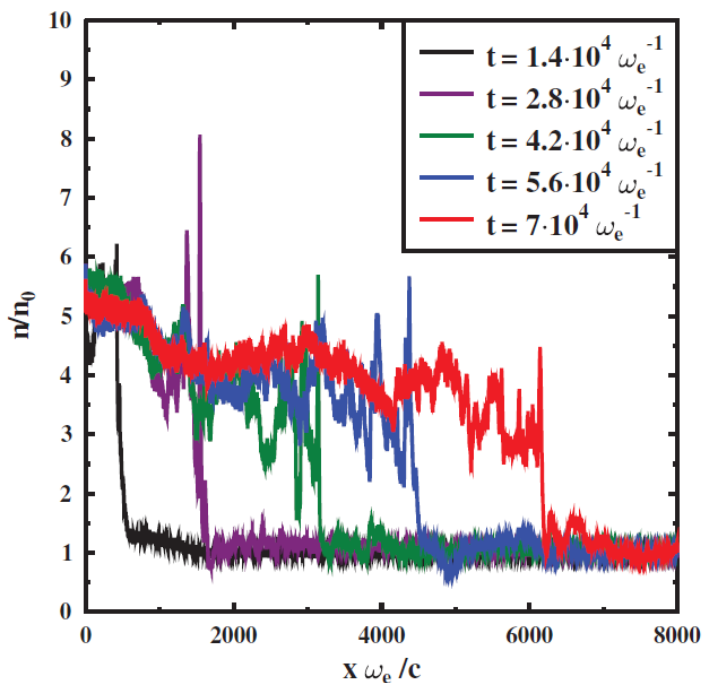
В работе используется PIC код Smilei Derouillat et. al. *Comp. Phys. Commun.* 222 (2018)

Моделирование ударной волны

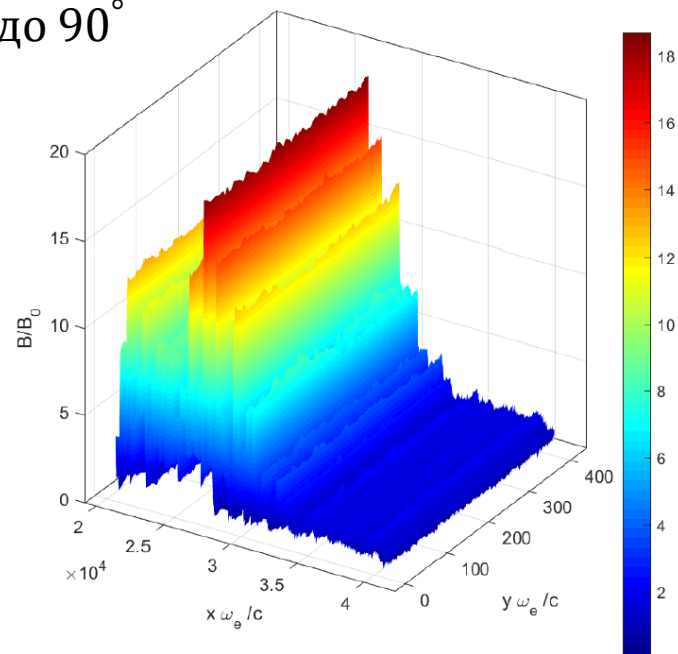
Для инициализации ударной волны используется столкновение однородного потока плазмы с идеально отражающей стенкой

Параметры втекающего потока:

- скорость $v = 0.3c$
- магнетизация $\sigma = \frac{B^2}{4\pi\gamma\rho c^2} = 0.0002$
- угол наклона поля θ варьировался от 0° до 90°

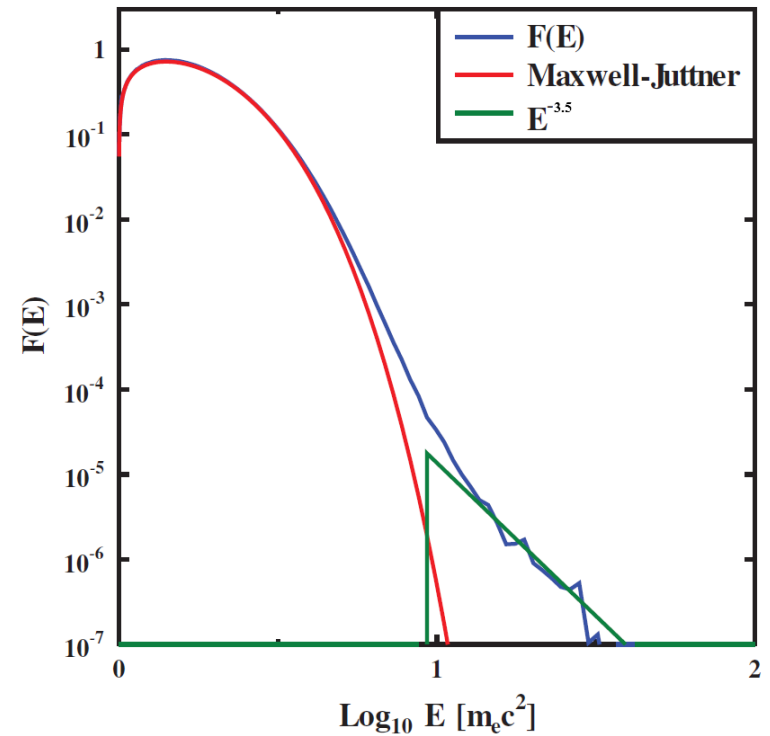
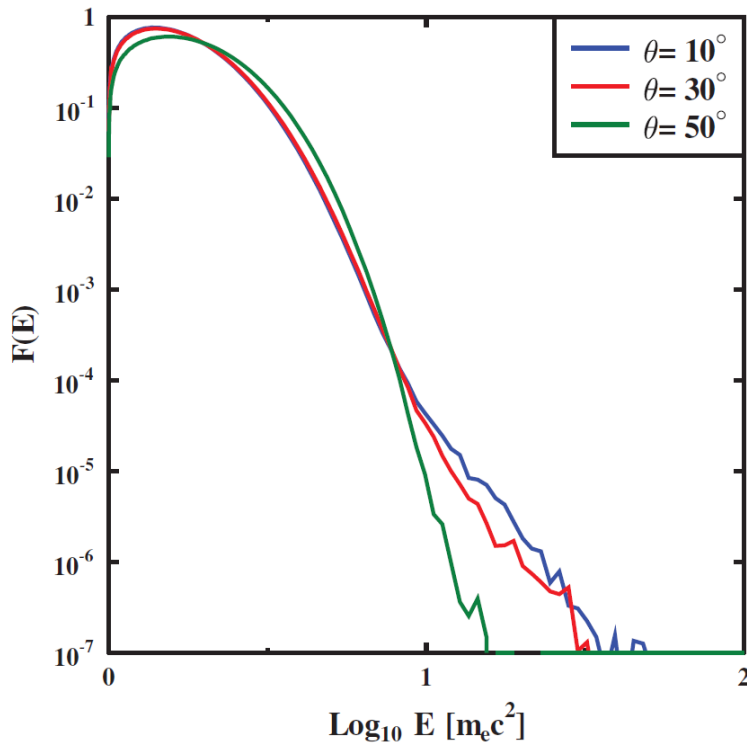


Профиль концентрации электронов в ударной волне в разные моменты времени при угле наклона поля $\theta = 30^\circ$



Магнитное поле в ударной волне при угле наклона поля $\theta = 30^\circ$ доля энергии в магнитном поле $\varepsilon_B \approx 0.03$

Функция распределения электронов

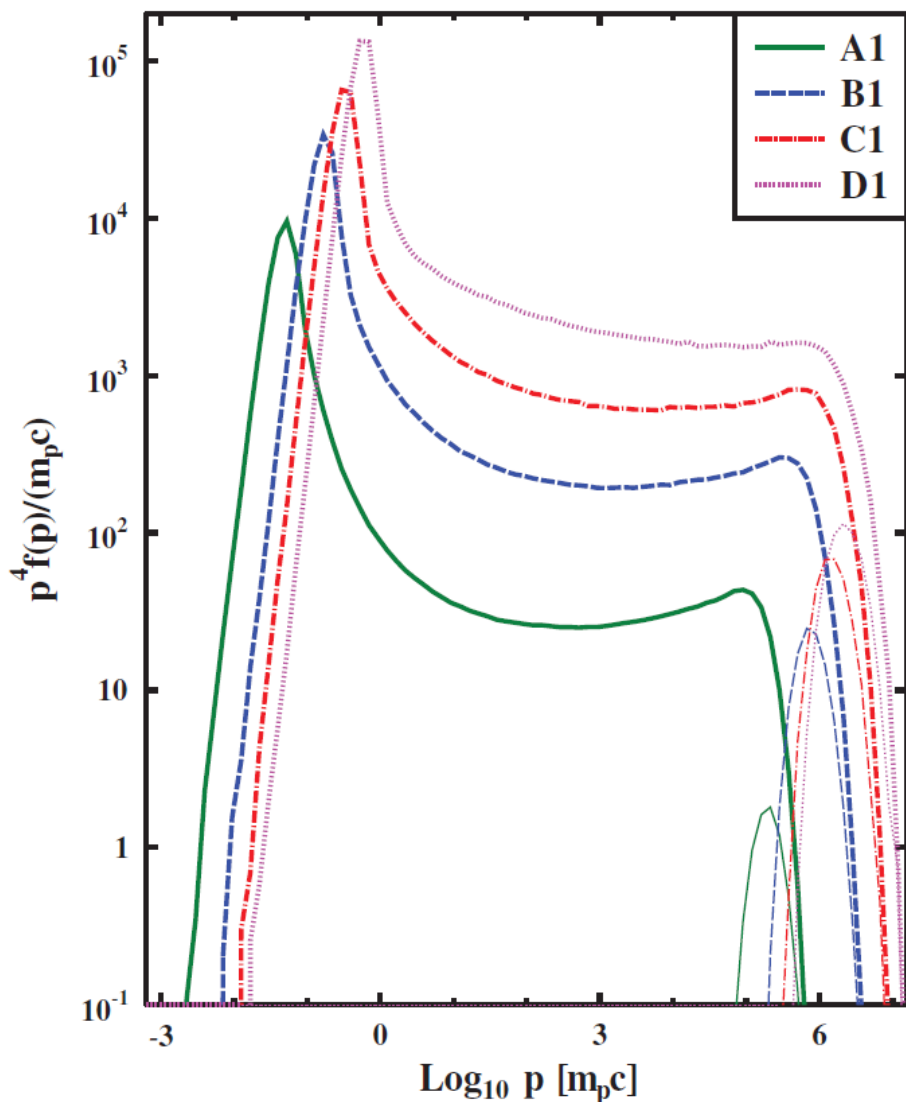


Функция распределения зависит от угла наклона поля. В квазиперпендикулярной волне ускорения практически нет

Функцию распределения можно кусочно аппроксимировать максвелловским и степенными распределениями

Вместо степенной функции и параметра ε_e можно использовать функцию распределения из моделирования для расчета излучения. Но PIC моделирование ограничено в масштабах, приходится продлевать функцию распределения

Моделирование распределение протонов с помощью Монте-Карло



Стационарная ударная волна, феноменологический закон рассеяния — возможность рассматривать большие масштабы.

модель	Скорость УВ	ε_B
A1	0.1c	0.026
B1	0.3c	0.039
C1	0.5c	0.044
D1	0.7c	0.038

Максимальная энергия протонов $\sim 10^{15}$ эВ

Модель усиления магнитного поля показывает значение $\varepsilon_B \approx 0.02 - 0.04$, что согласуется с результатами PIC моделирования

Расчет излучения

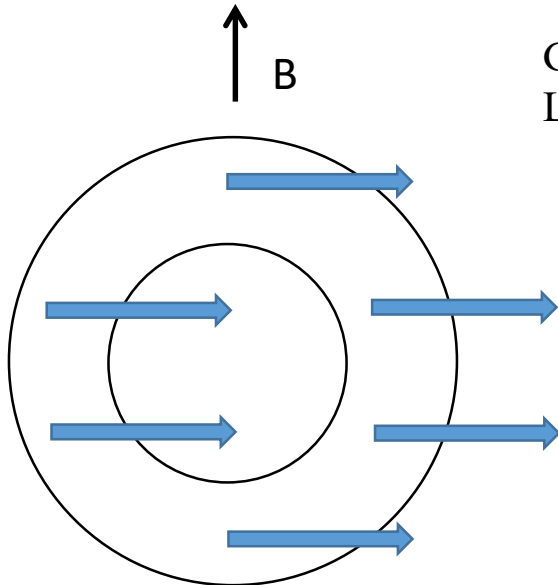
Излучательная способность единицы объема

$$I(\nu) = \int_{E_{min}}^{E_{max}} dE \frac{\sqrt{3}e^3 n F(E) B_{\perp}}{m_e c^2} \frac{\nu}{\nu_c} \int_{\frac{\nu}{\nu_c}}^{+\infty} K_{\frac{5}{3}}(x) dx$$

$$\nu_c = 3e^2 B_{\perp} E^2 / 4\pi m_e^3 c^5 \frac{\nu}{\nu_c}$$

Коэффициент поглощения

$$k(\nu) = \int_{E_{min}}^{E_{max}} dE \frac{\sqrt{3}e^3}{8\pi m_e \nu^2} \frac{n B_{\perp}}{E^2} \frac{d}{dE} E^2 F(E) \frac{\nu}{\nu_c} \int_{\frac{\nu}{\nu_c}}^{+\infty} K_{\frac{5}{3}}(x) dx$$

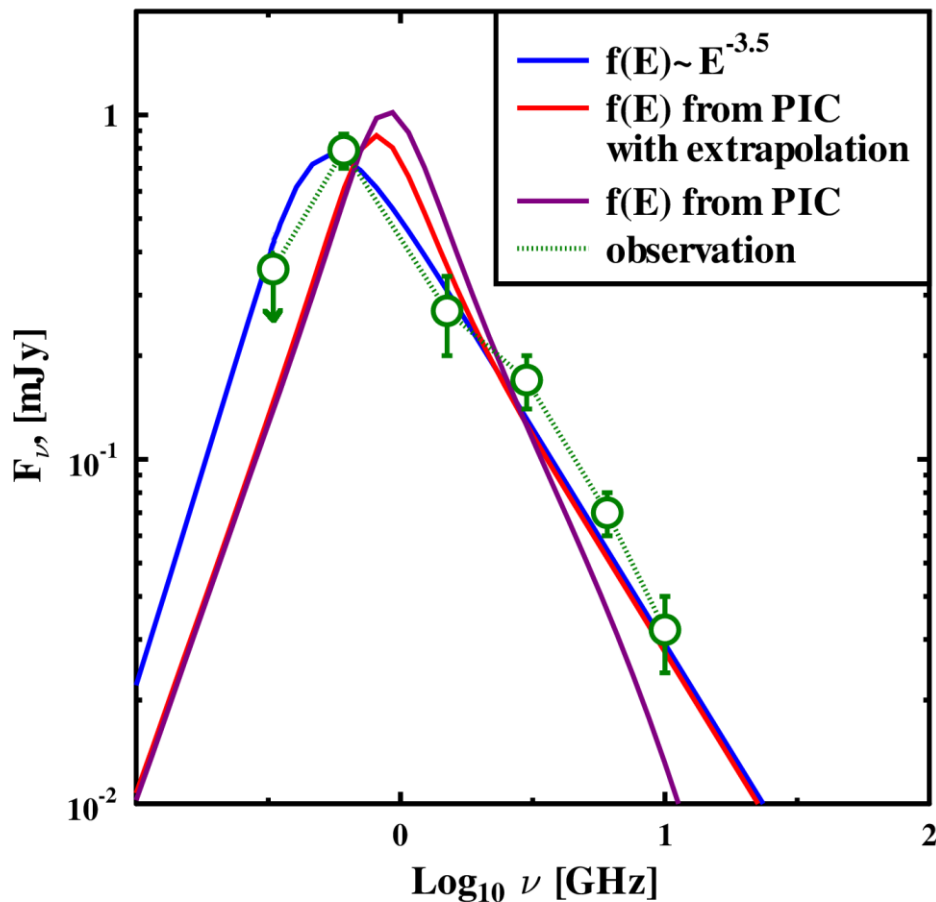


Ghisellini Radiative Processes in High Energy Astrophysics:
Lecture Notes in Physics, Volume 873 (2013)



Определение параметров источника

Наблюдаемая спектральная плотность потока излучения $F(\nu)$ – функция от магнитного поля, размера и концентрации. Можно найти минимум ошибки.



Источник CSS161010 на 357 день
Corpejans et. al ApJL 895:L23 (2020)

	Corpejans et. al.	Результаты моделирования
B	0.052 Гс	0.07 Гс
R	$3.3 \cdot 10^{17}$ см	$3.0 \cdot 10^{17}$ см
n	1.9 см^{-3}	210 см^{-3}

Сравнение спектров излучения в различных моделях с наблюдаемым
Bykov, Romansky, Osipov. Universe 8(1) (2022)

Выводы

- 1) Кинетическое моделирование позволило рассчитать спектры ускоренных частиц на ударных волнах быстрых оптических транзиентов
- 2) Получены спектры синхротронного излучения, согласующиеся с наблюдаемыми, определены параметры источника CSS161010
- 3) Результаты совместного PIC и Монте-Карло моделирования указывают, что FBOTs могут являться источниками космических лучей с энергиями до 1 ПэВ

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!



AT2018cow “The Cow”



ZTF18abvkwla “The Koala”