



ВОЗМОЖНОСТЬ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ НАДТЕПЛОВЫХ ЧАСТИЦ, УСКОРЕННЫХ ОБРАТНЫМИ УДАРНЫМИ ВОЛНАМИ В ОСТАТКАХ СВЕРХНОВЫХ



Шишкина Дарья Алексеевна^{1,2}, Кропотина Ю.А.², Быков А.М.²

¹ СПбАУ РАН им. Ж.И. Алфёрова, ² ФТИ им. А.Ф. Иоффе

НАША МОДЕЛЬ

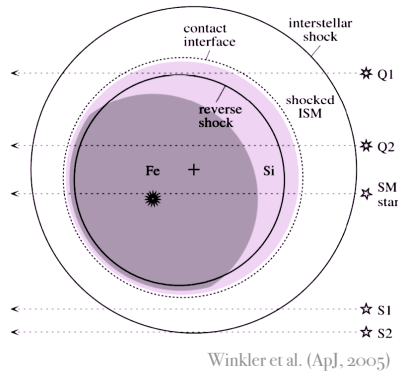
Постановка задачи

Остатки сверхновых считаются одними из основных источников ускоренных частиц, наблюдаемых как космические лучи. Известно, что частицы межзвездной среды могут эффективно ускоряться, многократно пересекая фронт головной ударной волны.

В этой работе рассматривается возможность регистрации ускоренных ионов эжекты на фронте обратной ударной волны через гамма-излучение в широких линиях.

Начальное предположение:

- Кинетическая энергия вспышки
 $SN \rightarrow W \rightarrow 0.1W \rightarrow \tau \cdot 0.1W \rightarrow \text{nuclei}$
- Ионы имеют распределение
 $Q_s(p) \sim n_s E_s(p) p^{-\alpha}$
- $\text{nucleus} + p \rightarrow \text{nucleus}^* + p$
 $\downarrow$
 $\text{nucleus} + \gamma (\text{MeV})$
- Первый возбужденный уровень ядра:



Winkler et al. (ApJ, 2005)

s	¹² C	¹⁴ N	¹⁶ O	²⁰ Ne	²⁴ Mg	²⁸ Si	³² S	⁴⁰ Ca	⁴⁰ Ar	⁵⁶ Fe	⁵⁹ Ni
ε , МэВ	4.44	2.31	6.13	1.63	1.37	1.78	2.23	3.35	1.46	0.85	0.34

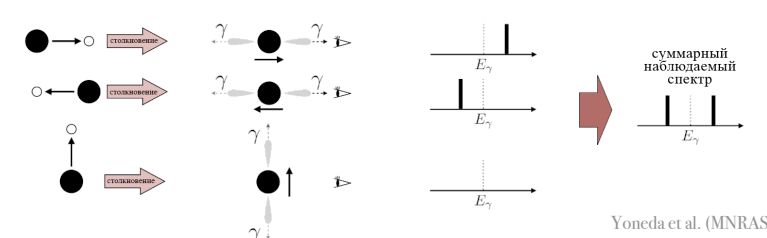
- Испускание фотона происходит вдоль линии движения ядра. Функцию анизотропии раскладываем по полиномам Лежандра.

Эффект Доплера для движущихся частиц приводит к расщеплению линии излучения

Ускоренные протоны + неподвижные ядра



Ускоренные ядра + неподвижные протоны

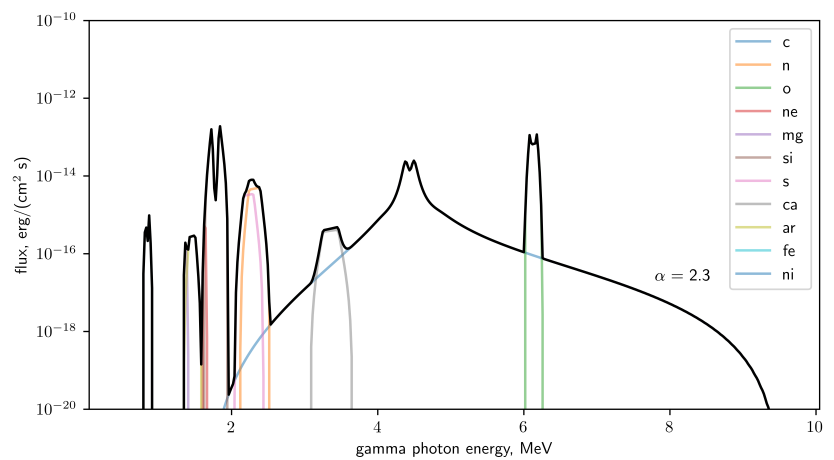


Yoneda et al. (MNRAS, 2023)

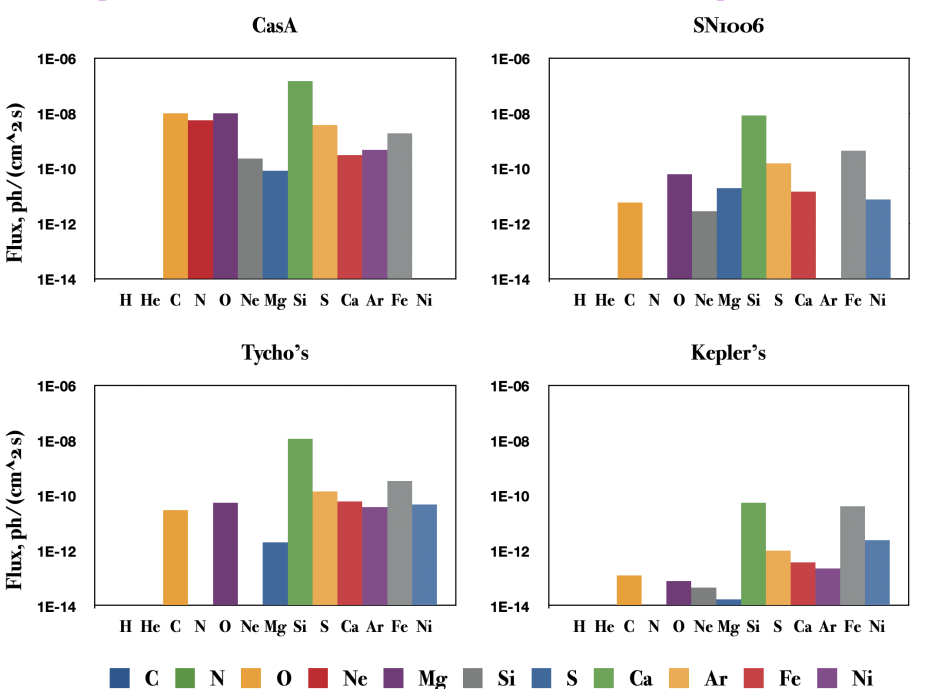
- Сечения неупругого рассеяния рассчитаны с помощью TALYS
- При данном значении кинетической энергии E_s рассчитывается функция распределения фотонов $\rho(\varepsilon_\gamma, E_s)$ в соответствии с [1]
- Поток от ансамбля частиц сорта s можно найти, усредняя по $Q(p)$:
$$\frac{dF_s}{d\varepsilon_\gamma} = \int n_p \rho(\varepsilon_\gamma, E_s) \sigma_s(E_s) v_s Q_s dE_s$$
- Ускоренными считаем частицы с кинетической энергией $E_s > 10 E_{shock}$ кинетическая энергия фронта обратной ударной волны [4]

РЕЗУЛЬТАТЫ

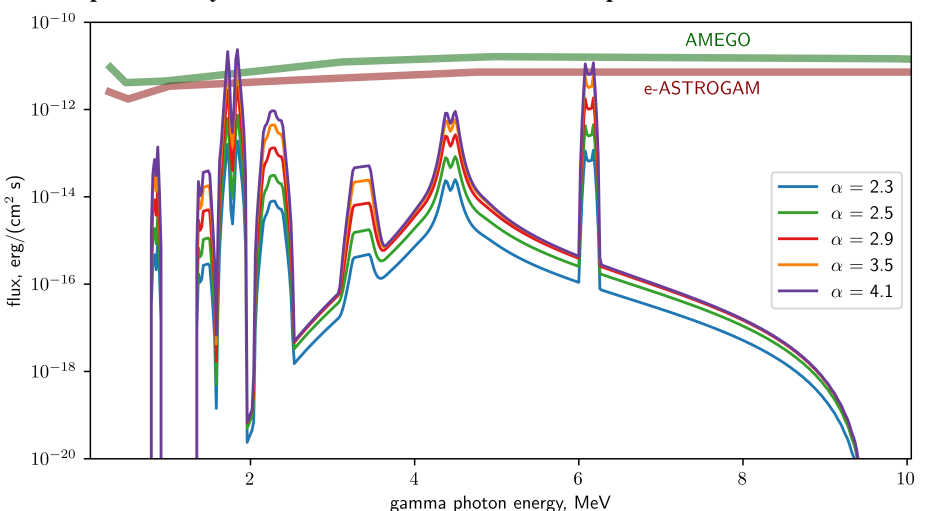
Спектр гамма-излучения от надтепловых частиц в остатке сверхновой CasA



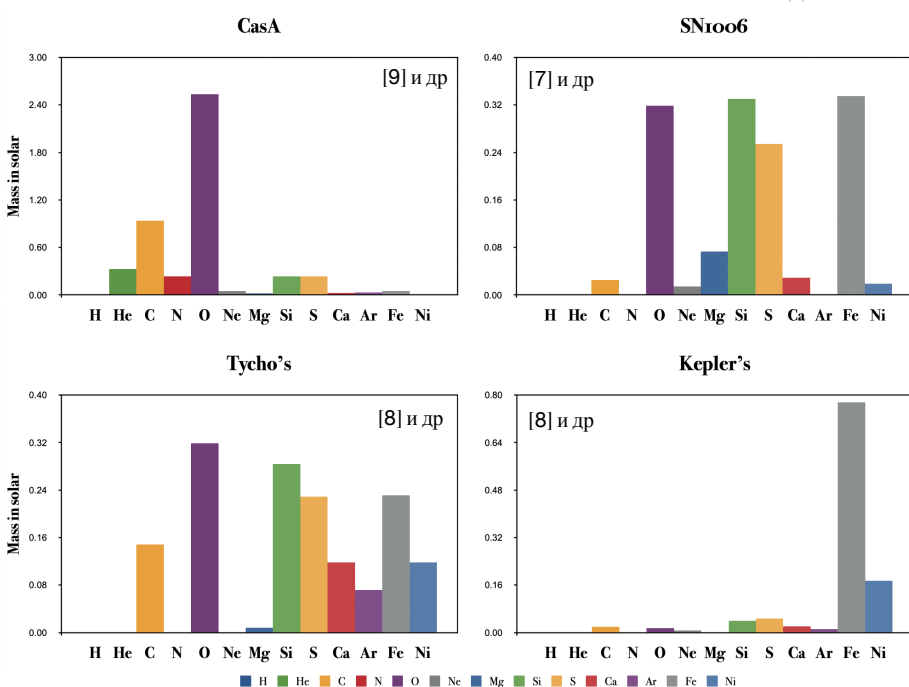
Интегральные гамма потоки в линиях для остатков (фотонов/см^2 с)



Сравнение моделей спектров с разными спектральными индексами и пороговых чувствительностей гамма-детекторов нового поколения



Химический состав остатков из оптических и ИК наблюдений



Список литературы

- Bozhokin & Bykov "Modeling of the spectra of broad gamma-ray lines in astrophysical objects", AstL (1997)
- A.Koning et al. "TALYS: modeling of nuclear reactions", EPJA (2023)
- J.K. Truelove & C.F. McKee "Evolution of Nonradiative Supernova Remnants", ApJS (1999)
- D. Caprioli "Simulations of Ion Acceleration at Non-relativistic Shocks. I. Acceleration Efficiency", ApJ (2014)
- A. De Angelis et al. "Science with e-ASTROGAM: A space mission for MeV-GeV gamma-ray astrophysics", JHEAP (2018)
- J. McEnery, AMEGO team "All Sky Medium Energy Gamma-ray Observatory (AMEGO): Exploring the Extreme Multimessenger Universe" (2020)
- Jiang-Tao Li et al. "XMM-Newton large program on SN1006 - I. Methods and initial results of spatially resolved spectroscopy", MNRAS (2015)
- D. Leahy et al. "Emission Measures and Emission-measure-weighted Temperatures of Shocked Interstellar Medium and Ejecta in Supernova Remnants", AJ (2019)
- B. Liu et al. "New estimation of the nuclear de-excitation line emission from the supernova remnant Cassiopeia A", MNRAS (2023)