

РАСЧЁТ ОЖИДАЕМОГО ЭФФЕКТА В БОРЕКСИНО ОТ ВЗРЫВА ГОЛУБОГО СВЕРХГИГАНТА С ОБРАЗОВАНИЕМ ГИБРИДНОЙ ЗВЕЗДЫ

Чуева Е.А.

Научный руководитель:

Литвинович Е.А.

Введение

Цель работы: изучение возможного эффекта от взрыва голубого сверхгиганта в Борексино:

- 1) учёт МСВ-эффекта для нейтринных спектров;
- 2) рассмотрение основного канала регистрации нейтрино от вспышек сверхновых в Борексино;
- 3) теоретическая оценка отклика детектора;
- 4) получение числа событий обратного бета-распада с учётом эффективности регистрации детектора с помощью Монте-Карло моделирования.

Модель взрыва голубого сверхгиганта взята из:

Quark deconfinement as a supernova explosion engine for massive blue supergiant stars / T. Fischer [et al.] // Nature Astron. – 2018.

1. Используемая модель

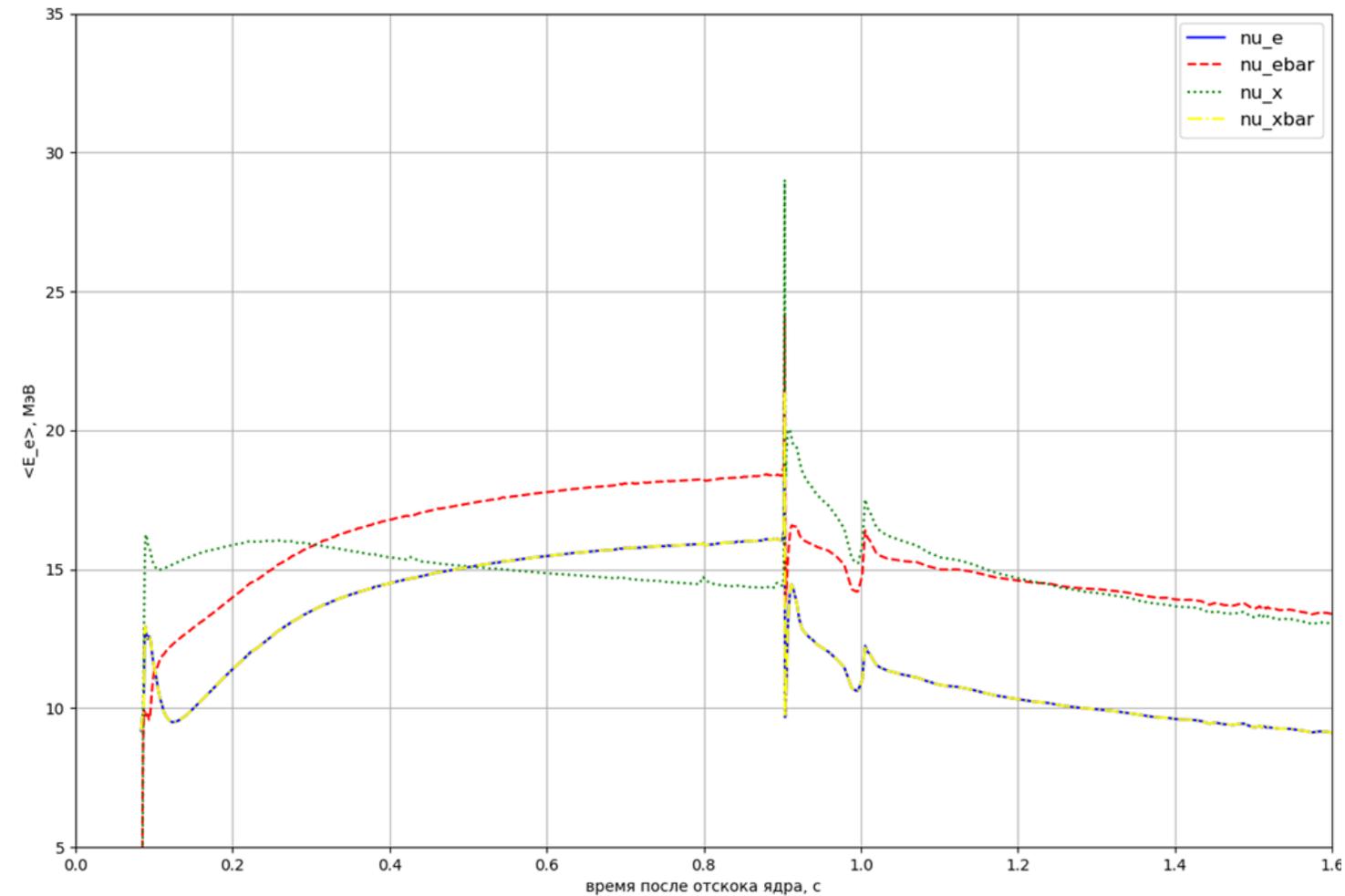


Рис.1. Средняя энергия нейтрино во время взрыва голубого сверхгиганта

Звезда-предшественница – голубой сверхгигант массой $50 M_{\odot}$

Отличия данного взрыва от вспышки сверхновой II типа:

- переход в кварковую материю

- преобладание потока электронного антинейтрино, а не электронного нейтрино (во время перехода в гибридную звезду)

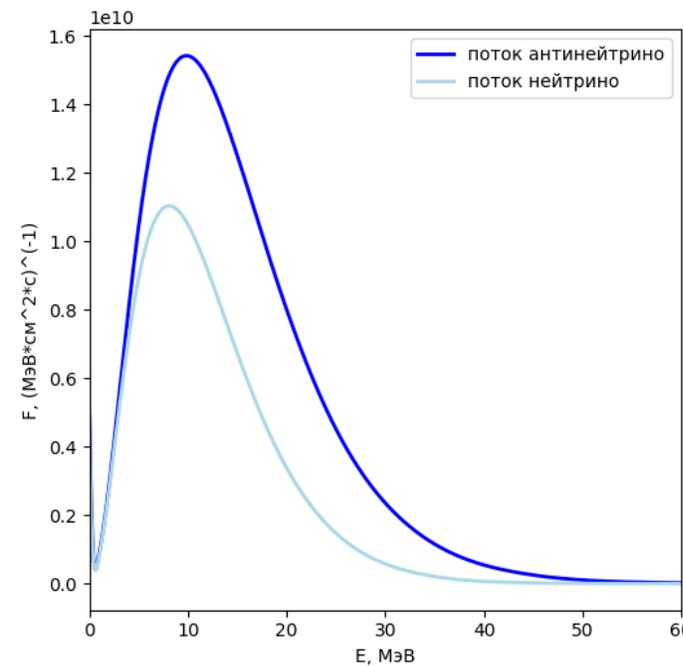
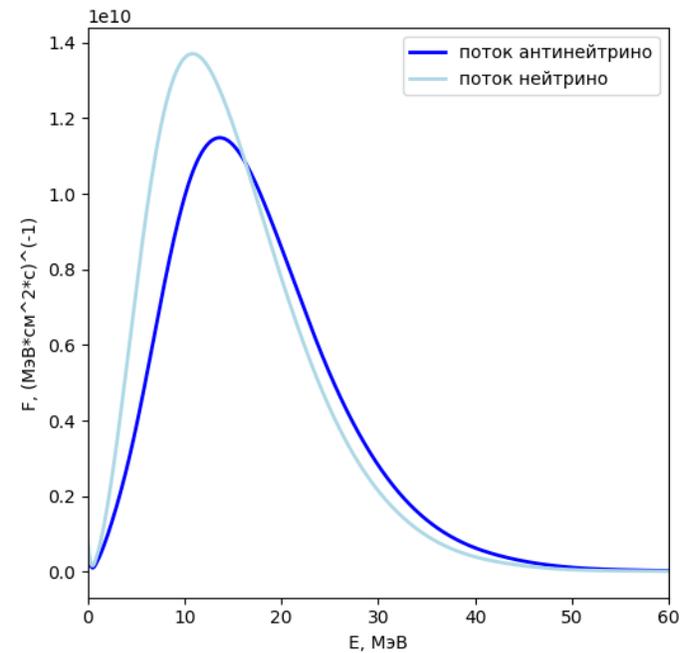


Рис.2. Спектр нейтрино во время процесса, аналогичного вспышке сверхновой II типа (сверху), и во время перехода в гибридную звезду (снизу)

2. Учёт МСВ-эффекта

Диаграммы переходов нейтрино при МСВ-эффекте

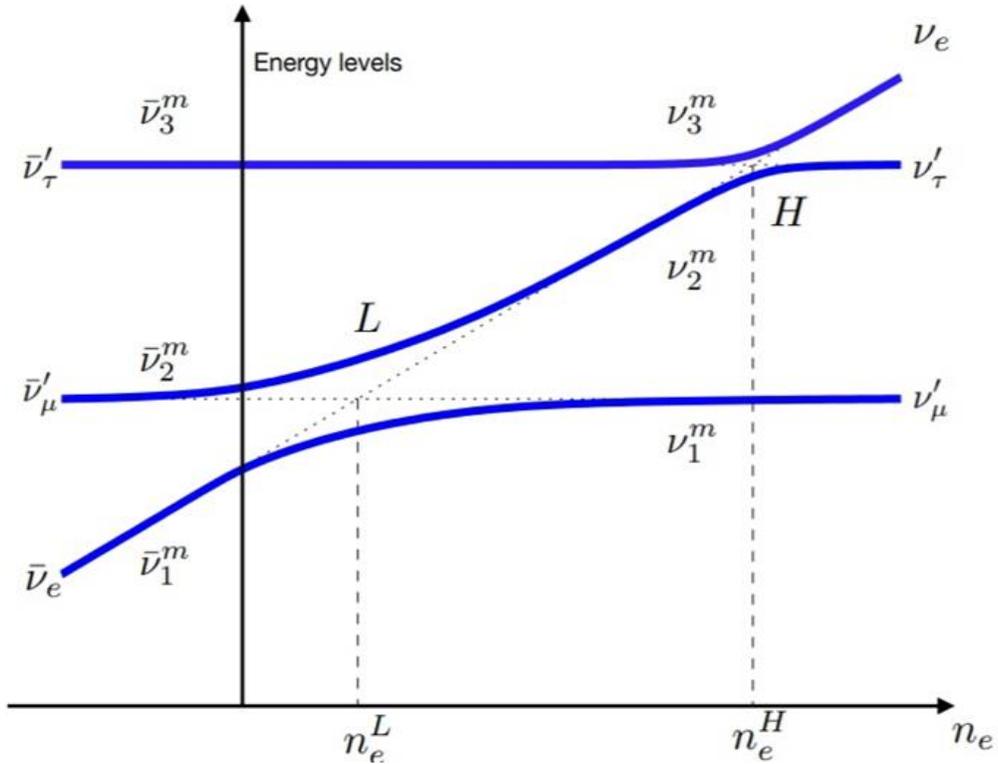


Рис. 3. Нормальная массовая иерархия (NH)

$$\nu_{3m} = \nu_e, \quad \nu_{2m} = \nu_\tau, \quad \nu_{1m} = \nu_\mu$$

$$\bar{\nu}_{1m} = \bar{\nu}_e, \quad \bar{\nu}_{2m} = \bar{\nu}_\mu, \quad \bar{\nu}_{3m} = \bar{\nu}_\tau$$

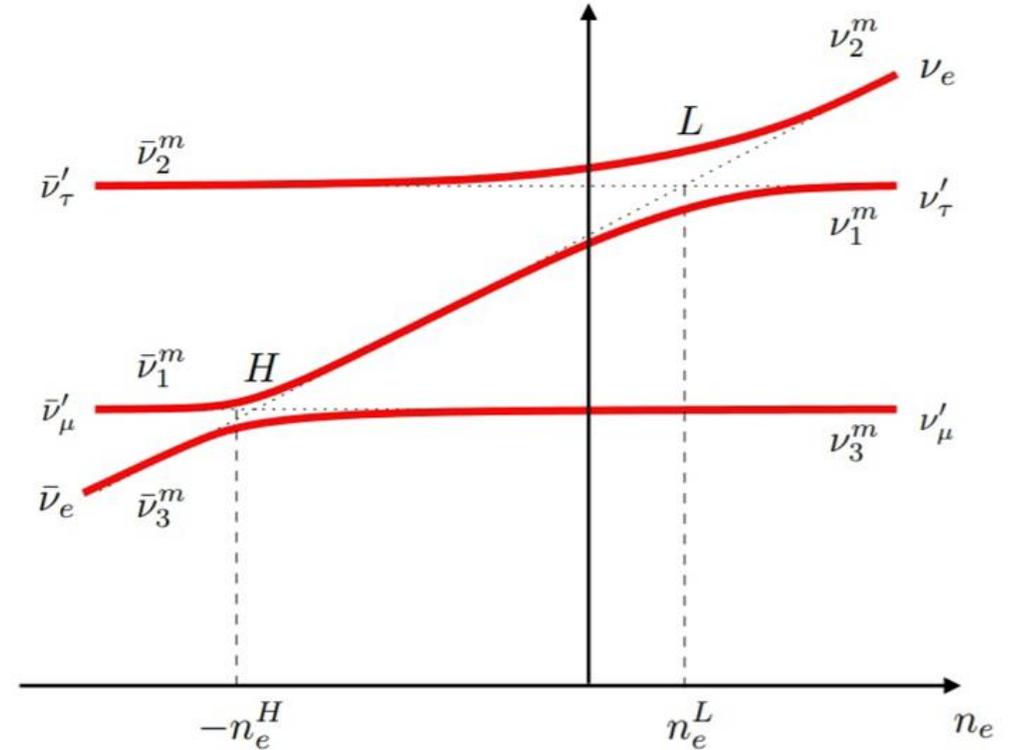


Рис. 4. Обратная массовая иерархия (IH)

$$\nu_{1m} = \nu_\mu, \quad \nu_{2m} = \nu_e, \quad \nu_{3m} = \nu_\tau$$

$$\bar{\nu}_{1m} = \bar{\nu}_\tau, \quad \bar{\nu}_{2m} = \bar{\nu}_\mu, \quad \bar{\nu}_{3m} = \bar{\nu}_e$$

Выражения для спектров при NH и IH (LMA)

$$F_e = pF_e^0 + (1 - p)F_x^0,$$

$$F_\mu + F_\tau = (1 - p)F_e^0 + (1 + p)F_x^0$$

$$F_{\bar{e}} = \bar{p}F_{\bar{e}}^0 + (1 - \bar{p})F_{\bar{x}}^0,$$

$$F_{\bar{\mu}} + F_{\bar{\tau}} = (1 - \bar{p})F_{\bar{e}}^0 + (1 + \bar{p})F_{\bar{x}}^0$$

Нормальная массовая иерархия:

$$p \approx |U_{e3}|^2 = \sin^2 \theta_{13}$$

$$\bar{p} \approx |U_{e1}|^2 = \cos^2 \theta_{12}.$$

спектр электронных *нейтрино* на Земле
практически полностью состоит из
спектра мюонного или тау-нейтрино

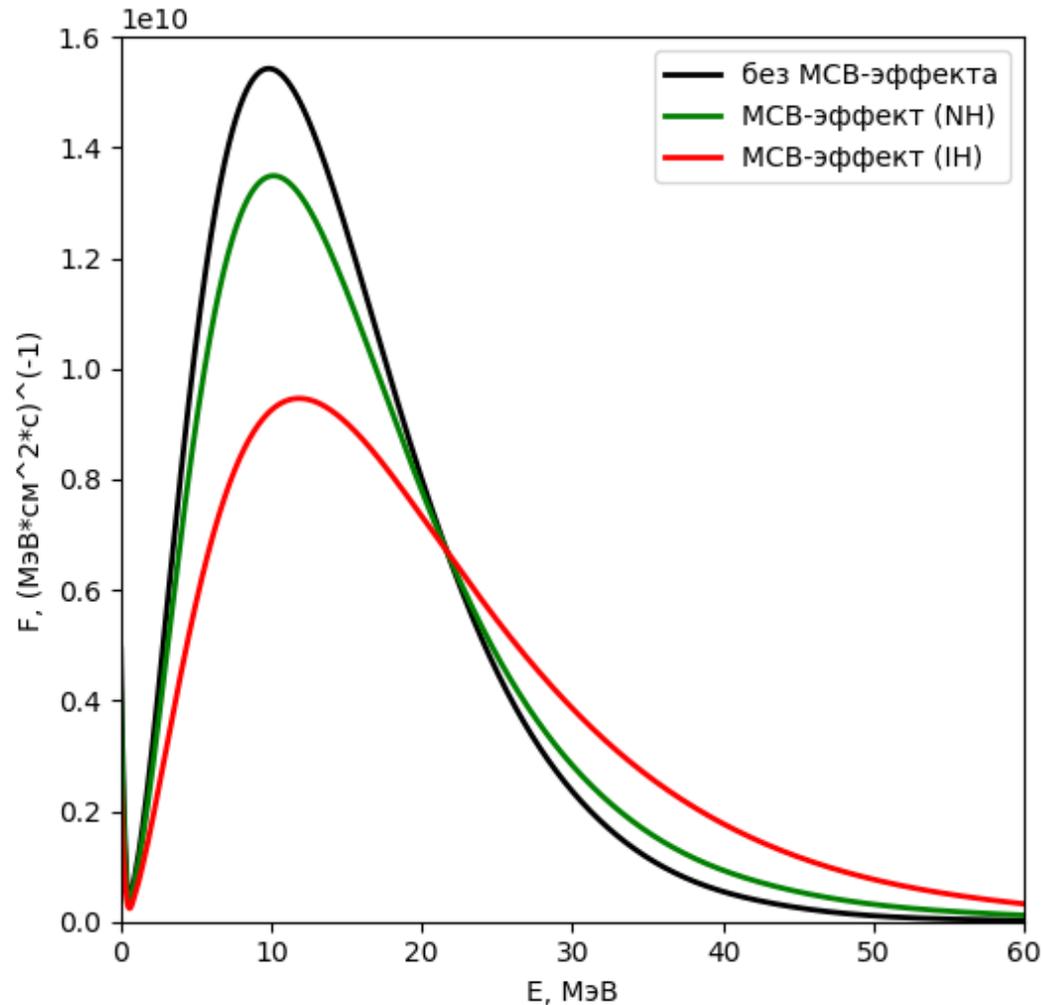
Обратная массовая иерархия:

$$p \approx \sin^2 \theta_{12},$$

$$\bar{p} \approx \sin^2 \theta_{13}$$

спектр электронных *антинейтрино* на Земле
практически полностью состоит из спектра
мюонного или тау-антинейтрино

Результат учёта МСВ-эффекта

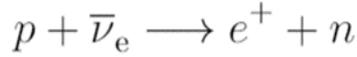


- Для каждого из 1074 файлов со спектрами учтён МСВ-эффект для обеих массовых иерархий
- Получены нейтринные спектры на Земле (расстояние до звезды — 10 кпк) для всех флейворов нейтрино (для мюонного и тау нейтрино/антинейтрино — суммарный)

Рис. 5. Спектры для электронных нейтрино и антинейтрино для выбранного времени для обеих массовых иерархий

3. Обратный бета-распад

Основной канал для регистрации нейтрино от вспышек сверхновых – реакция обратного бета-распада:



- Рассчитаны средние энергии позитронов и нейтронов:

$$\langle E_e \rangle \approx (E_1 + E_2)/2 = E_\nu - \delta - \frac{E_\nu^{CM} E_e^{CM}}{m_p} \quad , \quad \langle E_n \rangle = E_\nu + m_p - \langle E_e \rangle \quad (E_{1,2} = E_\nu - \delta - \frac{1}{m_p} E_\nu^{CM} (E_e^{CM} \pm p_e^{CM}), \delta = \frac{m_n^2 - m_p^2 - m_e^2}{2m_p})$$

- Получено сечение обратного бета-распада (методом интерполяции табличных данных из статьи Strumia A., Vissani F. Precise quasielastic neutrino/nucleon cross-section // Phys. Lett. B. — 2003.)

- Выбран шаг по энергиям 50 кэВ , он обусловлен энергетическим разрешением детектора $(\frac{\sigma}{E} = 5\% \text{ при } 1 \text{ МэВ})$

- Выбрано разбиение по времени:
 1. 0.0-0.7 с: 100 мс (7 файлов)
 2. 0.7-1.0 с: 25 мс (12 файлов, время соответствует переходу в гибридную звезду)
 3. 1.0-2 с: 200 мс (5 файлов)
 4. 2.0-10.0 с: 500 мс (16 файлов)
 Всего – 40 временных диапазонов (файлов)

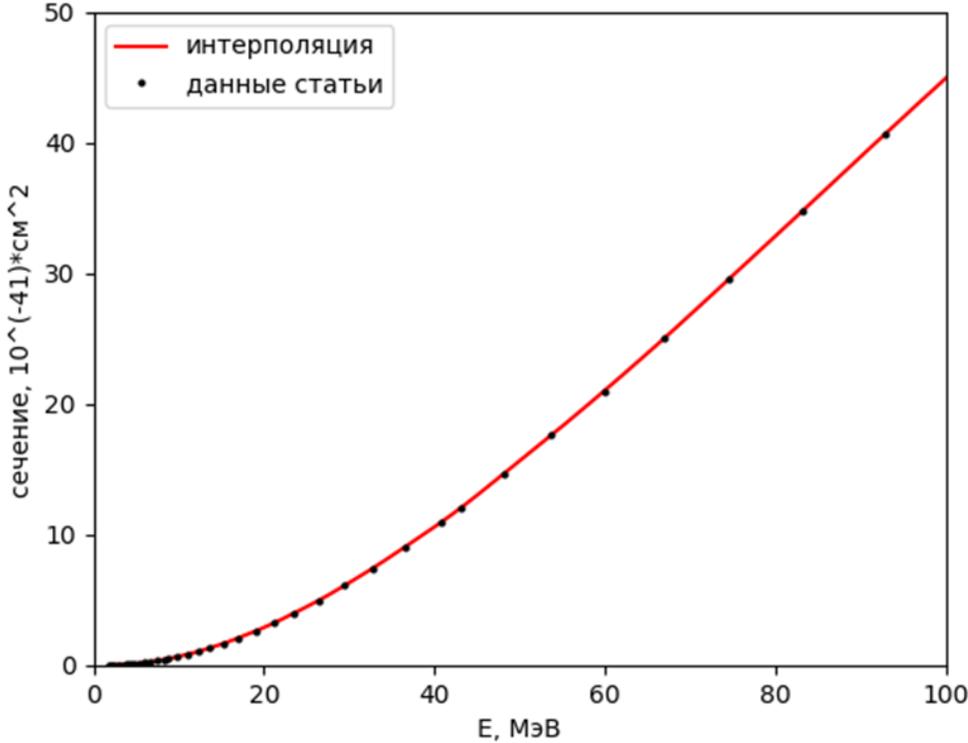
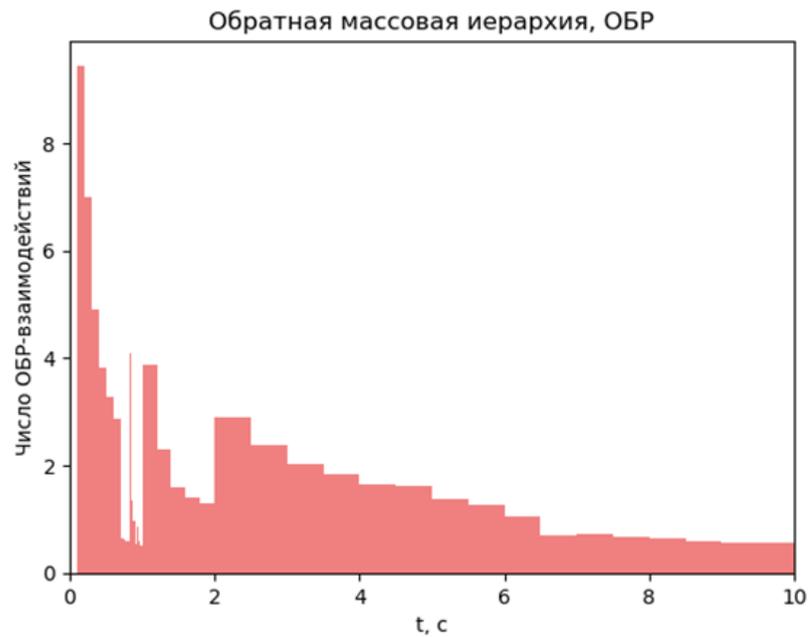
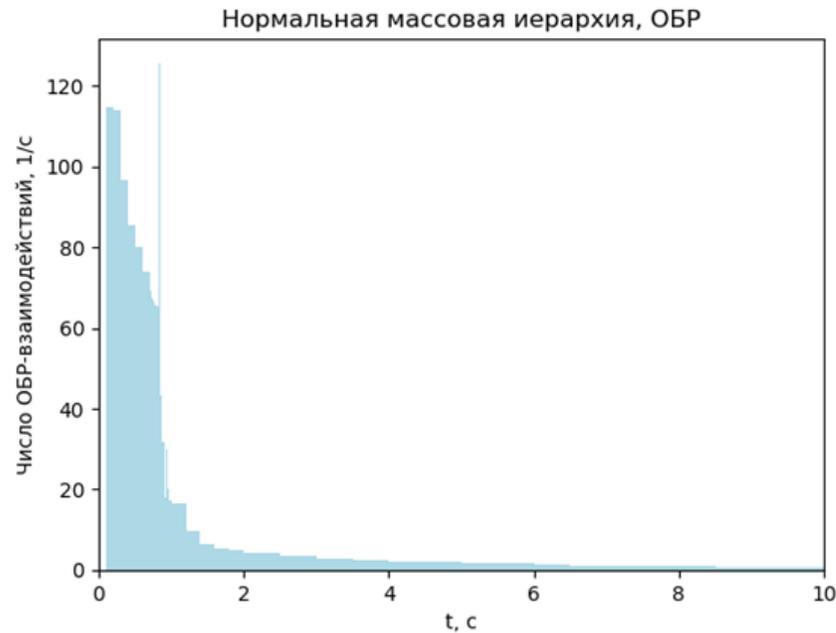
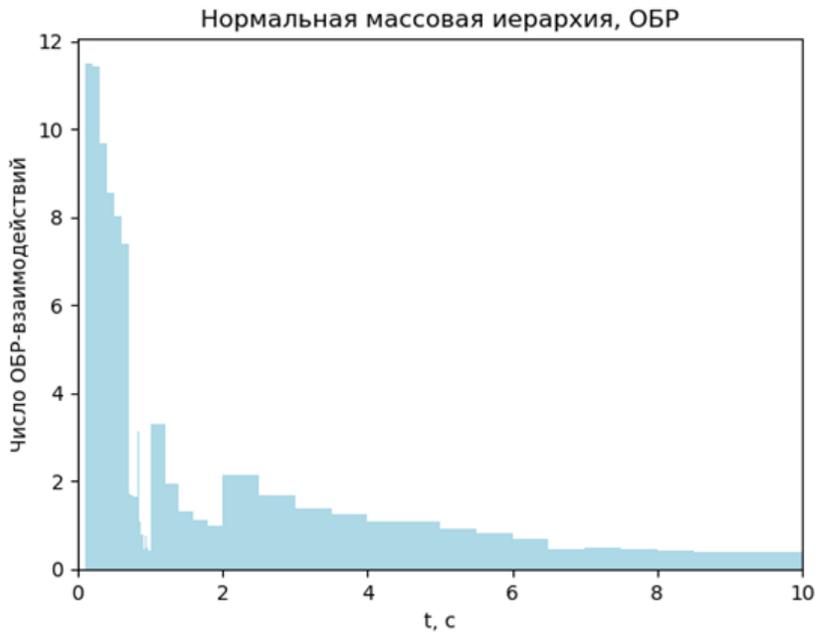


Рис.6. Сечение обратного бета-распада

4. Теоретическая оценка числа взаимодействий по реакции обратного бета- распада



$$N_{int} = N_p \int_{1.806}^{100} F(E)\sigma(E)dE$$

- Получено общее число взаимодействий по реакции обратного бета-распада:

Нормальная массовая иерархия – 95

Обратная массовая иерархия – 75

(для стандартной сверхновой
количество событий равно 54)

Рис.7. Число и скорость взаимодействий для обеих массовых иерархий

5. Монте-Карло моделирование

Модификация имеющегося Монте-Карло моделирования для детектора Борексино:

- добавлен новый источник антинейтрино – от вспышки голубого сверхгиганта
- добавлена функция «розыгрыша» энергии позитрона
- учтена кинетическая энергия нейтрона

Параметры моделирования (данные в .mac файле):

- источник антинейтрино: вспышка голубого сверхгиганта
- передача порядкового номера временного интервала (позитронного спектра)
- моделирование полной конфигурации детектора Борексино
- выбор зоны для моделирования взаимодействия антинейтрино: внутренность нейлоновой сферы радиусом 4.25 м
- сферически симметричная задача: независимость моделирования от формы нейлоновой сферы
- моделирование 5000 событий

Результаты Монте-Карло моделирования

- Произведено Монте-Карло моделирование для случая нормальной массовой иерархии
- Произведён отбор событий: диапазон 1-50 МэВ для позитронов, 1-3 МэВ для нейтронов
- Получена эффективность регистрации детектора – 83 %
- Число событий с учётом эффективности составило 78.9 ± 1.1

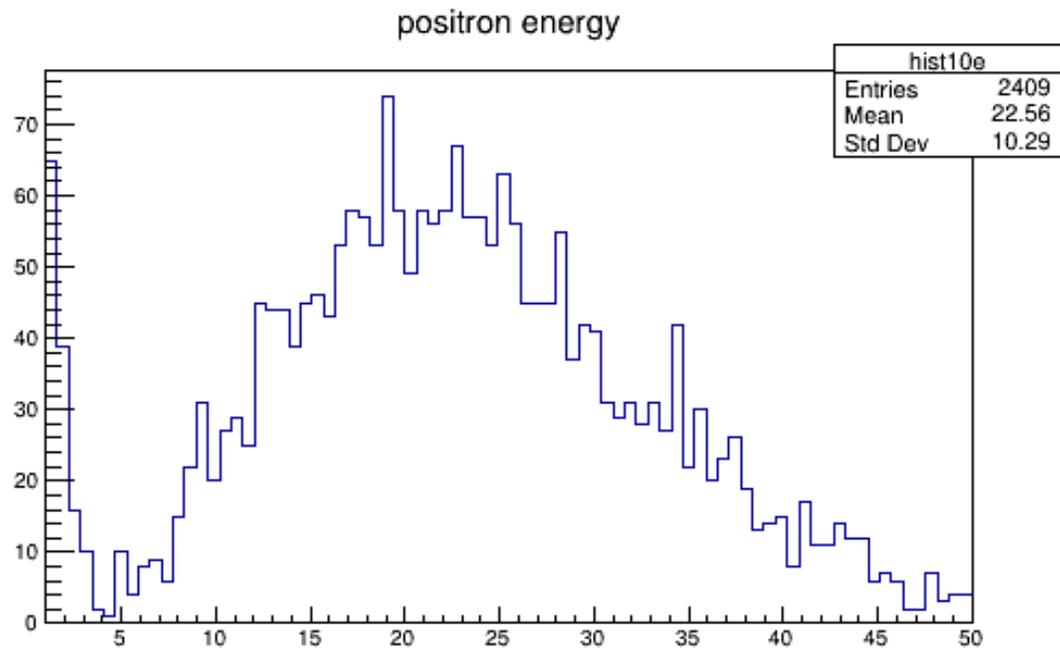


Рис.8. Энергетический спектр мгновенных событий, соответствующих поглощению позитрона и испусканию аннигиляционных гамма-квантов

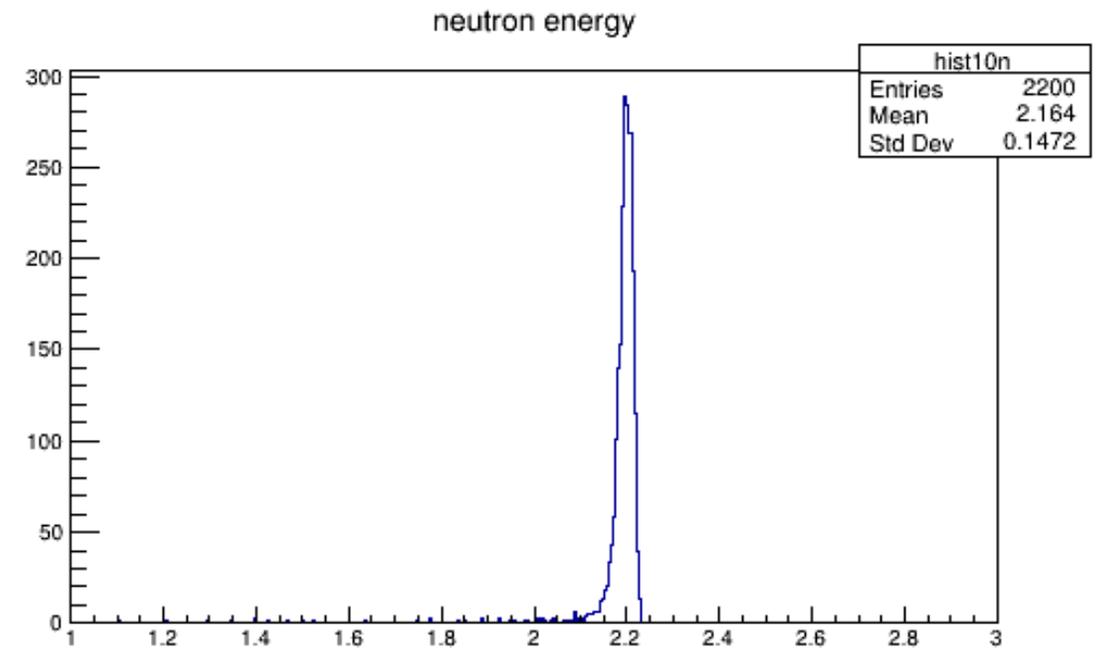


Рис.9. Энергетический спектр задержанных событий, соответствующих захвату нейтрона

Заключение

- Рассмотрена модель голубого сверхгиганта с переходом в гибридную звезду
- Учтён МСВ-эффект для обеих массовых иерархий: получены нейтринные спектры на Земле для всех флейворов нейтрино
- Получена теоретическая оценка числа событий обратного бета-распада для обеих массовых иерархий: 95 для нормальной и 75 для обратной
- Произведено Монте-Карло моделирование для случая нормальной массовой иерархии: получено значение эффективности регистрации детектора (83 %) и значение числа событий с учётом эффективности - 78.9 ± 1.1