

РАСЧЁТ ВЛИЯНИЯ АДИАБАТИЧЕСКОГО МСВ-ЭФФЕКТА НА НЕЙТРИННЫЕ СПЕКТРЫ ОТ ВЗРЫВА ГОЛУБОГО СВЕРХГИГАНТА С ПЕРЕХОДОМ В ГИБРИДНУЮ ЗВЕЗДУ

Чуева Е.А.

Научный руководитель:

Литвинович Е.А.

2020г.

Введение

Цель работы: учёт адиабатического МСВ-эффекта для взрыва голубого сверхгиганта массой 50 масс Солнца для последующего расчёта отклика детектора Борексино

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.

Используемая модель

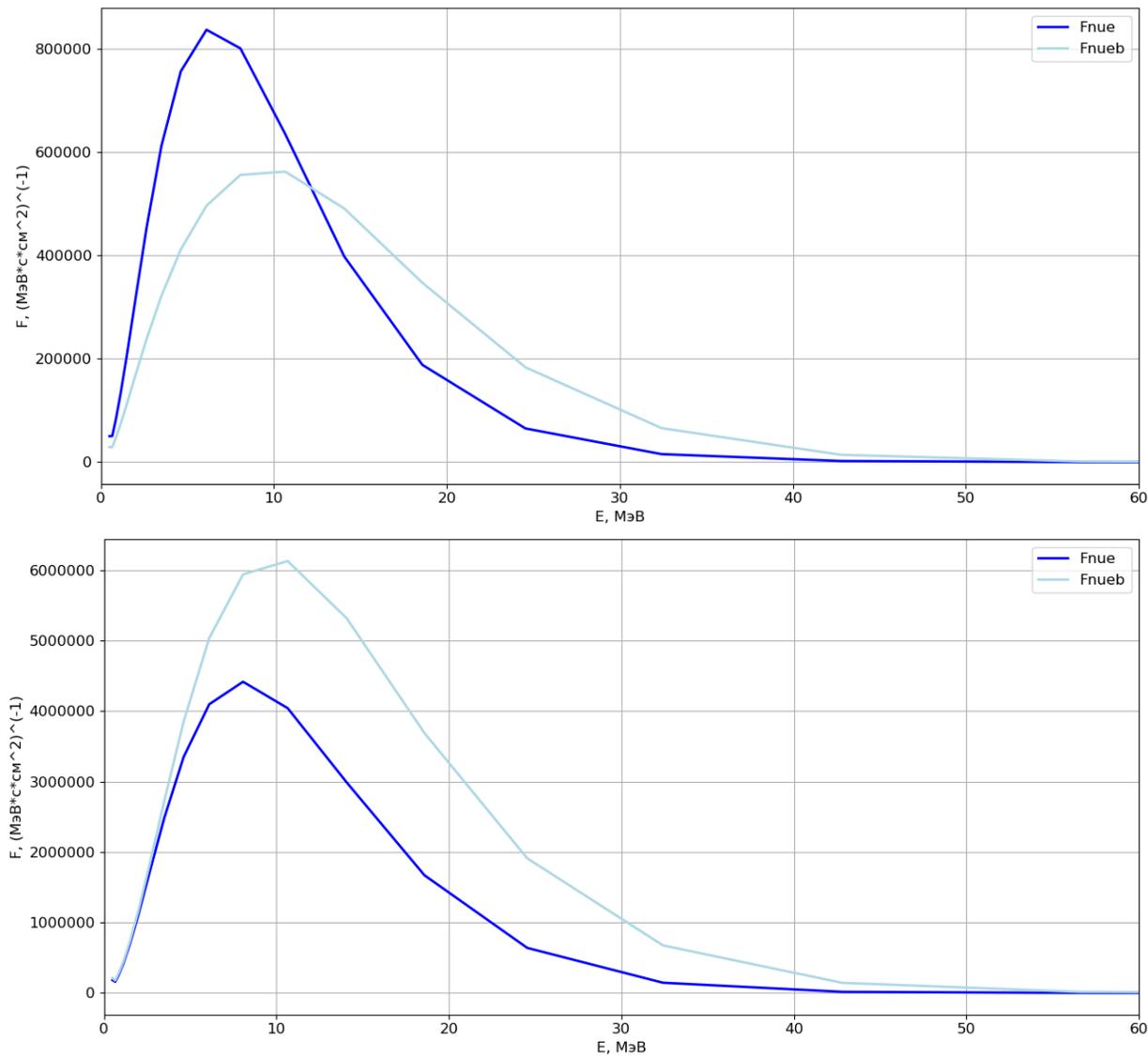


Рис.1. Спектр нейтрино во время процесса, аналогичного вспышке сверхновой II типа (сверху), и во время перехода в гибридную звезду (снизу)

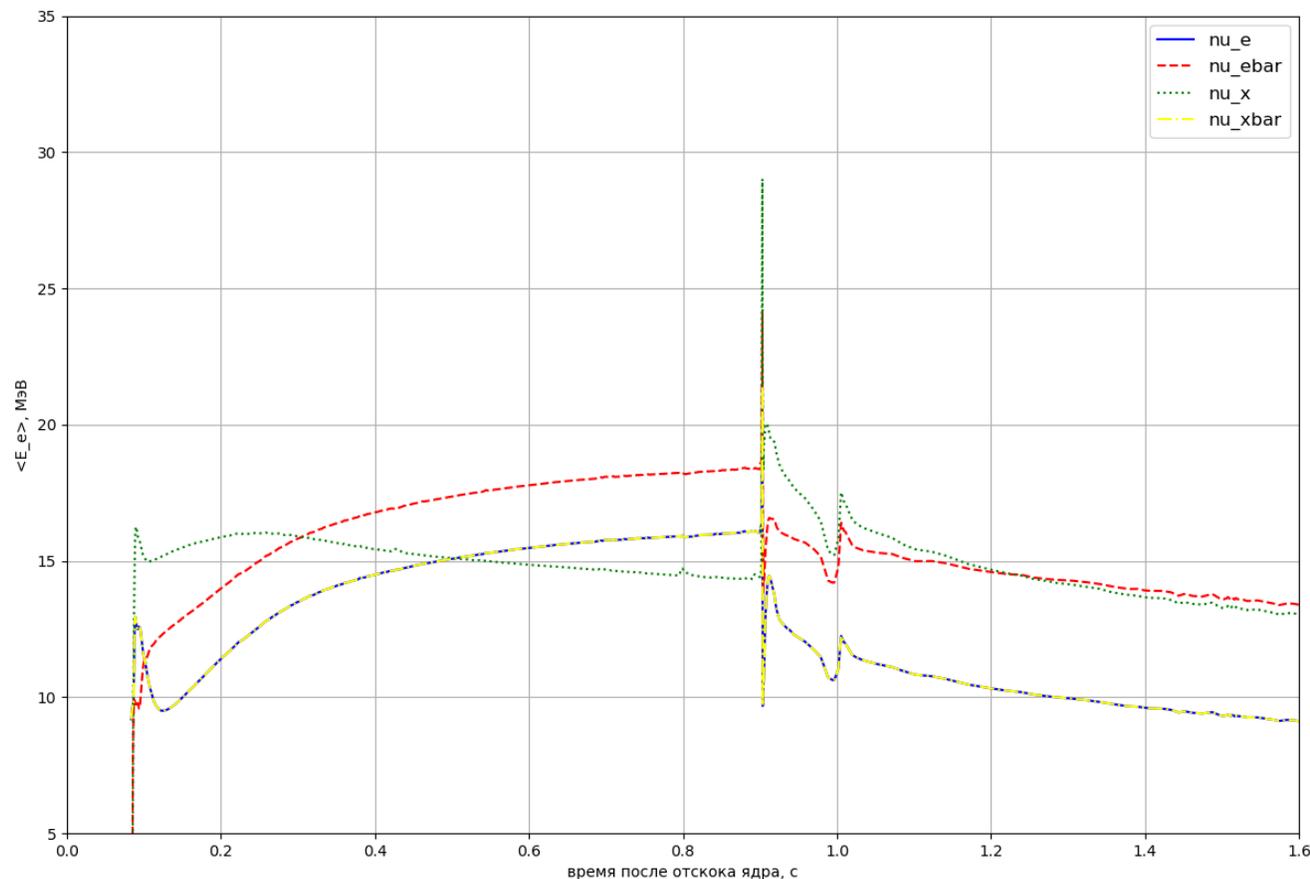


Рис.2. Средняя энергия нейтрино во время взрыва голубого сверхгиганта

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)

Эффективный гамильтониан и представление матрицы смешивания

$$|\nu_\alpha\rangle_t = \sum_j U_{\alpha j} \exp(-iE_j t) |\nu_j\rangle \quad (\alpha = e, \mu, \tau, j = 1, 2, 3) \quad H = U \frac{M^2}{2E} U^\dagger$$

$$H = \frac{1}{2E} \begin{pmatrix} m_{ee}^2 + 2EV & m_{e\mu}^2 & m_{e\tau}^2 \\ m_{e\mu}^2 & m_{\mu\mu}^2 & m_{\mu\tau}^2 \\ m_{e\tau}^2 & m_{\mu\tau}^2 & m_{\tau\tau}^2 \end{pmatrix} \longrightarrow H = \frac{1}{2E} \begin{pmatrix} m_{ee}^2 + 2EV & m_{e\mu}^2 & m_{e\tau}^2 \\ m_{e\mu}^2 & m_{\mu\mu}^2 & 0 \\ m_{e\tau}^2 & 0 & m_{\tau\tau}^2 \end{pmatrix}$$

$$V = \sqrt{2} G_F n_e(r) \text{diag}(1, 0, 0)$$

$$U = R_{13} R_{12}$$

Мюонное и тау-нейтрино неотличимы при взрыве сверхновой, так как оба этих типа нейтрино взаимодействуют посредством нейтрального тока.

Диаграммы переходов нейтрино при МСВ-эффекте

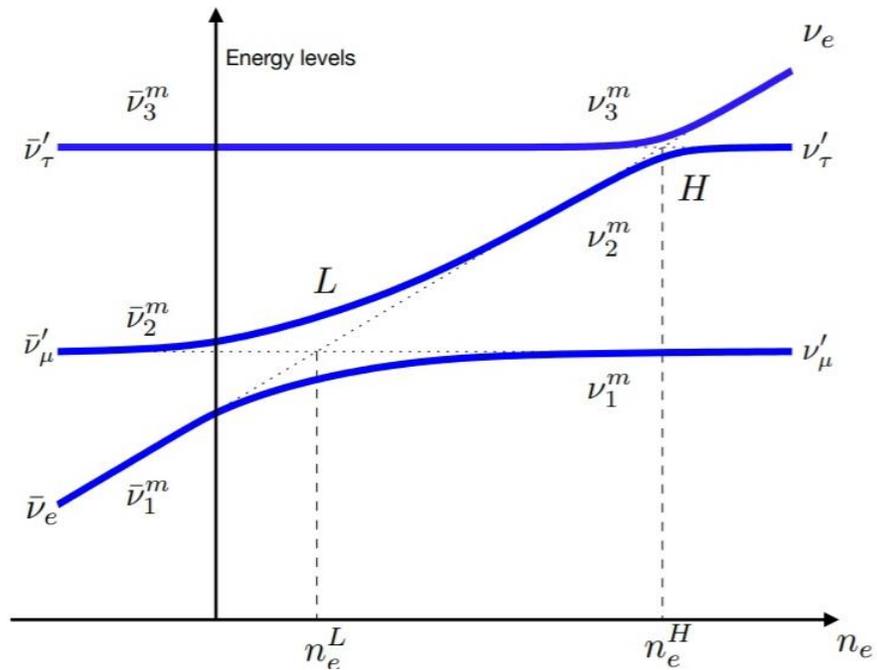


Рис. 3. Нормальная массовая иерархия (NO)

$$\begin{aligned} \nu_{3m} &= \nu_e, & \nu_{2m} &= \nu_\tau, & \nu_{1m} &= \nu_\mu, \\ \bar{\nu}_{1m} &= \bar{\nu}_e, & \bar{\nu}_{2m} &= \bar{\nu}_\mu, & \bar{\nu}_{3m} &= \bar{\nu}_\tau, \end{aligned}$$

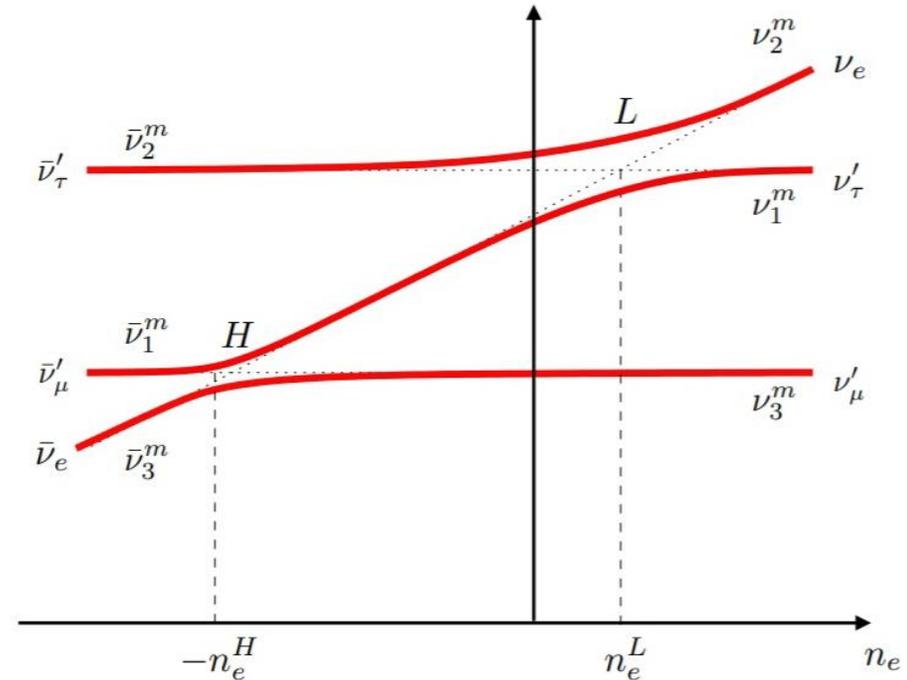


Рис. 4. Обратная массовая иерархия (IH)

$$\begin{aligned} \nu_{1m} &= \nu_\mu, & \nu_{2m} &= \nu_e, & \nu_{3m} &= \nu_\tau, \\ \bar{\nu}_{1m} &= \bar{\nu}_\tau, & \bar{\nu}_{2m} &= \bar{\nu}_\mu, & \bar{\nu}_{3m} &= \bar{\nu}_e \end{aligned}$$

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

Учёт МСВ-эффекта

$f_\nu(t, E, r)$ – угловое распределения для нейтрино, усреднённые по азимутальному углу

$$\frac{dn_\nu}{dE} = \frac{E^2}{(2\pi)^2} f_\nu(t, E, r) \quad \text{– плотность числа частиц на единицу энергии}$$

Авторами статьи были предоставлены угловые распределения для нейтрино в виде 1074 текстовых файлов, которые отвечают различным временам после отскока ядра.

Для каждого файла был учтён адиабатический МСВ-эффект по приведённым ранее формулам для нормальной и обратной массовых иерархий, получен спектр на Земле. Все спектры были записаны в текстовые файлы.

Расстояние до звезды было взято равным 10 кпк.

Графический результат расчётов на примере выбранного спектра

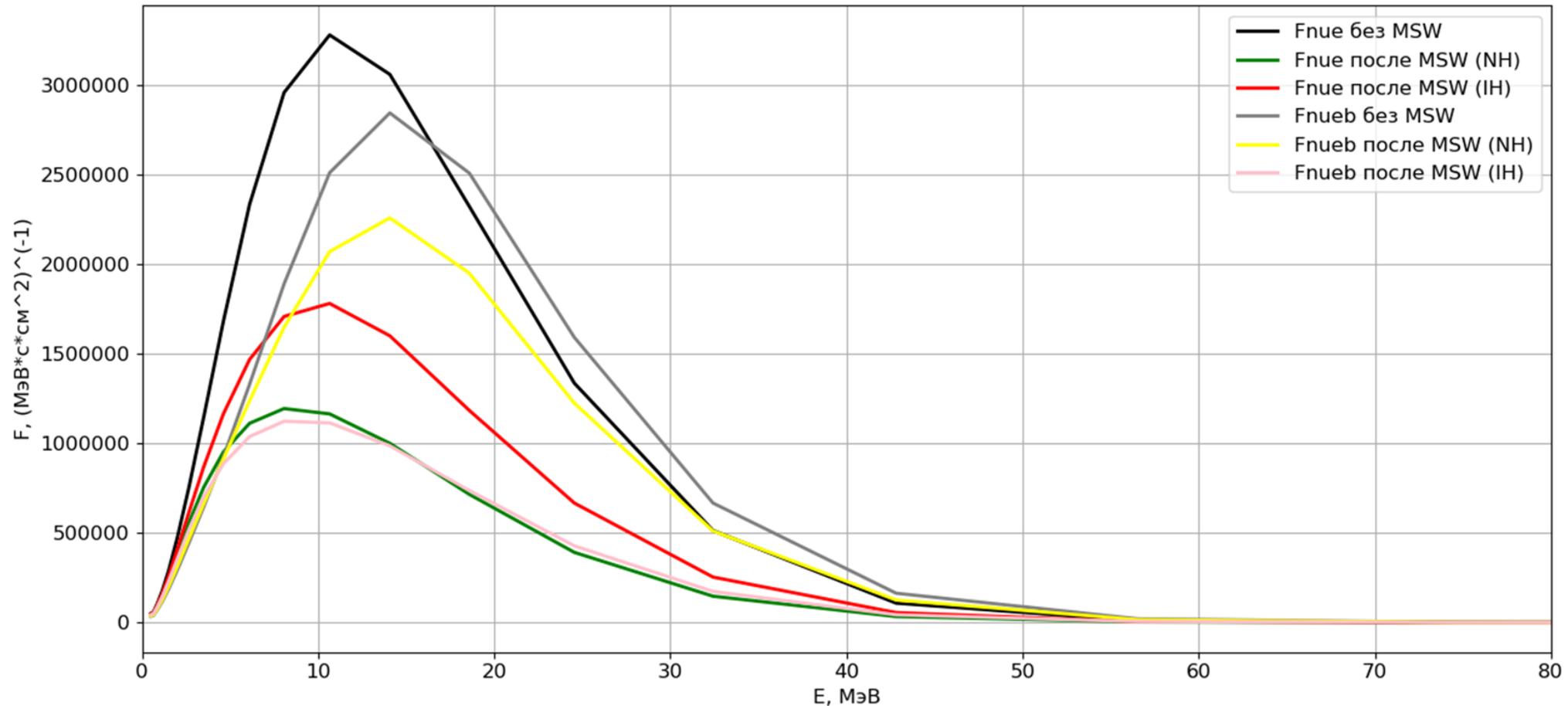


Рис. 5. Спектры для электронных нейтрино и антинейтрино для выбранного времени для обеих массовых иерархий

Заключение

- Для модели взрыва голубого сверхгиганта с переходом в гибридную звезду получены спектры нейтрино всех сортов (для μ и τ нейтрино/антинейтрино – суммарный) для нормальной и обратной массовых иерархий
- Было показано, что в случае нормальной массовой иерархии в среднем по спектру выход электронного антинейтрино выше, чем электронного нейтрино, для обратной массовой иерархии – наоборот
- В дальнейшем планируется рассчитать возможный эффект в Борексине от данного взрыва