

РАСЧЁТ ЧИСЛА ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ НЕЙТРИНО ОТ СВЕРХНОВОЙ В ДЕТЕКТОРЕ БОРЕКСИНО

Жутиков И.Н.

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

23 декабря 2019 г.

Введение

Цель работы: расчёт числа взаимодействий нейтрино от стандартной сверхновой в детекторе Борексина по реакциям на углероде.

Сверхновая звезда - явление возникающее в конце эволюции некоторых звезд. Взрыв сверхновой сопровождается выделением энергии порядка $E_{\text{tot}} \sim 10^{53}$ эрг, 99% от которой уносятся нейтрино, по которому можно заранее её обнаружить, как это и произошло в 1987 году, что позволяет в реальном времени наблюдать это астрофизическое явление.



Рис.: Сверхновая SN 1987A

Детектор Борексино

Борексино - нейтринный детектор на основе жидкого органического сцинтиллятора, созданный для спектроскопии низкоэнергетических нейтрино от Солнца. Особенностью детектора является высокая степень радиохимической чистоты сцинтиллятора и конструкционных материалов. Благодаря этому энергетический порог Борексино составляет всего 200 кэВ.

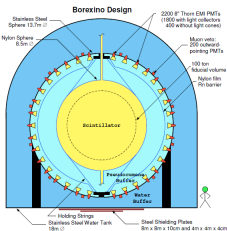
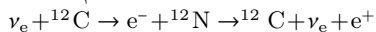


Рис.: Устройство детектора Борексино

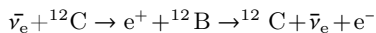
Реакции на углероде

Для нейтрино с энергиями ~ 10 МэВ одним из перспективных путей регистрации являются реакции нейтрино с ядрами углерода ^{12}C . Для сечения этих будем использовать параметризацию $\sigma = \beta(E_\nu - E_{\text{th}}) \cdot 10^{-44} \text{см}^2$, где E_ν берётся в МэВ, E_{th} - порог реакции.

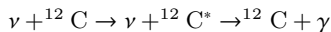
Реакции на ^{12}C



$$E_{\text{th}} = 13.37 \text{ МэВ}, \beta = 71.1$$

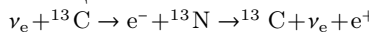


$$E_{\text{th}} = 17.3 \text{ МэВ}, \beta = 28.7$$

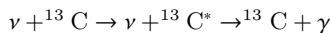


$$E_{\text{th}} = 15.1 \text{ МэВ}, \beta = 32.1$$

Реакции на ^{13}C



$$E_{\text{th}} = 2.22 \text{ МэВ}, \beta = 85.7$$



$$E_{\text{th}} = 5 \text{ МэВ}, \beta = 26$$

Расчёт числа событий для реакций на ^{12}C

Поток нейтрино от сверхновой хорошо описывается двумя распределениями, распределением Больцмана и распределением Ферми-Дирака.

Распределение Больцмана

$$F_i(E_\nu) = \frac{E_{\text{tot}i}}{\langle E_i \rangle 4\pi D^2} \frac{E_\nu^{\alpha_i} e^{-E_\nu/T_i}}{T_i^{\alpha_i+1} \Gamma(\alpha_i + 1)}$$

Распределение Ферми-Дирака

$$F_i(E_\nu) = \frac{E_{\text{tot}i}}{\langle E_i \rangle 4\pi D^2} \frac{0.5546}{T^3} \frac{E_\nu^2}{1 + e^{E_\nu/T}}$$

Где $i = \nu_e, \bar{\nu}_e, \nu_x$, $\nu_x = \nu_{\mu,\tau}, \bar{\nu}_{\mu,\tau}$, E_ν - энергия нейтрино, $\Gamma(x)$ - гамма функция Эйлера, α - момент распределения, будем считать $\alpha = 2$, T_i - равновесная температура (она в три раза меньше средней энергии), D - расстояние до сверхновой, считаем его равным 10 кпк, $E_{\text{tot}i}$ - полная энергия излученная данным ароматом нейтрино, примем $E_{\text{tot}i} \approx 5 \cdot 10^{52}$ эрг. Средние энергии примем равными $\langle E_{\bar{\nu}_e} \rangle = 12$ МэВ, $\langle E_{\nu_e} \rangle = 9.5$ МэВ, $\langle E_{\nu_x} \rangle = 15.6$ МэВ.

Расчёт числа событий для реакций на ^{12}C

Подставив данные распределения в формулу

$$N_i = \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} N^* F_i(E_\nu) \sigma_i(E_\nu) dE_\nu,$$

где N^* -число атомов в мишени, для Борексина $N^* = 1.251 \cdot 10^{31}$.
 Получаем следующие значения, где значения без скобок для распределения Больцмана, а в скобках для распределения Ферми-Дирака.

	$^{12}\text{C} \rightarrow ^{12}\text{N}$	$^{12}\text{C} \rightarrow ^{12}\text{B}$	$^{12}\text{C} \rightarrow ^{12}\text{C}^*$
N_{ν_e}	0.32 (0.39)	-	0.63 (0.34)
$N_{\bar{\nu}_e}$	-	4.12 (4.92)	1.39 (1.67)
$N_{\nu_x, \bar{\nu}_x}$	-	-	2.46 (2.93)

Полное число событий будет равно $N_{\text{tot}}(\text{B}) = 16.3$ и $N_{\text{tot}}(\text{Ф-Д}) = 19.04$, что находится в согласии с расчётами сделанными ранее для Борексина.

Расчёт числа событий для реакций на ^{13}C

Рассмотрим реакции на ^{13}C . Так как содержание изотопа ^{13}C в естественной смеси порядка 1% зафиксировать хоть какое-нибудь событие на них при взрыве сверхновой маловероятно. Однако, например, если бы сцинтиллятор Борексина был полностью сделан из ^{13}C то было бы получено следующие количество взаимодействий.

	$^{13}\text{C} \rightarrow ^{13}\text{N}$	$^{13}\text{C} \rightarrow ^{13}\text{C}^*$
N_{ν_e}	20.6 (22)	4.1 (4.43)
$N_{\bar{\nu}_e}$	-	5.03 (5.41)
$N_{\nu_x, \bar{\nu}_x}$	-	5.76 (6.16)

Где значения без скобок для распределения Больцмана, а в скобках для Ферми-Дирака. В итоге получаем $N_{\text{tot}}(\text{Б}) = 52.7$ и $N_{\text{tot}}(\text{Ф-Д}) = 56.5$, что примерно в 3 раза больше чем на ^{12}C .

Заключение

В работе было рассчитано ожидаемое количество взаимодействий нейтрино от стандартной сверхновой на ^{12}C для детектора Борексина. Среднее для разных способов расчёта даёт значение порядка 20 событий, что находится в согласии с результатами полученными для Борексина ранее. При этом, если бы в нем вместо ^{12}C был бы изотоп ^{13}C , то он зафиксировал бы примерно в 3 раза больше событий.