

Рассеяние реликтовых нейтрино в веществе Солнца

Коловертнов Даниил Дмитриевич
студент 202 группы

Научный руководитель:
кандидат физ.-мат. наук, с.н.с. ОТФ ИЯИ РАН
Демидов Сергей Владимирович

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова
Физический факультет
Кафедра физики частиц и космологии

Москва, 2024

- Отщепление от вещества через $\tau = 0.1 - 1$ с после Большого взрыва
- Температура реликтовых нейтрино $T_\nu = 1.95$ К
- Верхняя оценка массы электронного нейтрино $m_\nu \leq 0.8$ эВ (эксперимент *KATRIN*)
- Минимальная масса для кластеризации $m_\nu \geq 0.3$ эВ

- Получить спектр нейтрино, рассеявшихся на Солнце
- Вычислить частоту рассеяний

- Реликтовые нейтрино нерелятивистские
- Распределение нейтрино вдали от Солнца изотропно
- Рассеяние изотропное и упругое

Начальное распределение

Распределение, отвечающее статистике Ферми-Дирака, с учетом красного смещения:

$$f_\nu(p_\nu) = \frac{1}{\exp p_\nu c / kT_\nu + 1}$$

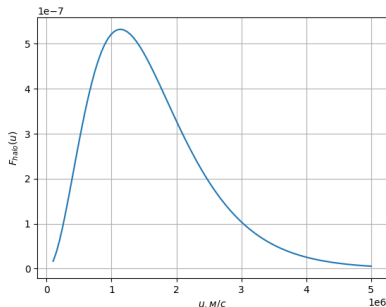


Рис. 1: Распределение нейтрино по скоростям на удалении от Солнца в системе отсчета, движущейся со скоростью 300 км/с относительно СМВ

Сечение взаимодействия с веществом Солнца:

$$\sigma_{\nu-N} = \frac{G_F^2}{4\pi} (A - Z)^2 E_\nu^2$$

$$\sigma_{\nu-e} = \frac{7G_F^2}{4\pi} k_\alpha E_\nu^2$$

$$\sigma_{\nu-p} = \frac{G_F^2}{4\pi} [Z(1 - 4 \sin^2 \theta_W)]^2 E_\nu^2,$$

где θ_W - угол Вайнберга

Рассеяние нейтрино в веществе Солнца

- Прохождение нейтрино через Солнце
- Рассеяние на оболочке
- Отсутствие взаимодействий на других оболочках

$$dS = d\Gamma dP_{scat}$$

Рассеяние нейтрино в веществе Солнца

Частота попаданий нейтрино на Солнце:

$$d\Gamma = \pi n_x f_{halo}(u) \frac{du dJ^2}{u}$$

Вероятность рассеяния на слое:

$$dP_{scat} = \frac{dr}{v_1} \left[1 - \frac{J^2}{v_1^2 r^2} \right]^{-\frac{1}{2}} \sum_i^N n_i \langle \sigma_i v_{rel} \rangle$$

Дифференциальное сечение

Учтем, что рассеяние изотропное:

$$\frac{d\sigma}{d\cos\theta} = \frac{1}{2} \sigma$$

Скорость нейтрино после рассеяния равна:

$$v' = \frac{1}{m_\nu} \left[(\mu v_{rel})^2 + \left(\frac{\mu}{m_2} |\vec{p}_\nu + \vec{p}_{target}| \right)^2 - 2 \frac{\mu^2 v_{rel}}{m_2} |\vec{p}_\nu + \vec{p}_{target}| \cos(\pi - \theta) \right]^{1/2},$$

где θ - угол между скоростью нейтрино после рассеяния в ЦСО и скоростью центра масс в ЛСО, μ - приведенная масса. Дифференциальное сечение:

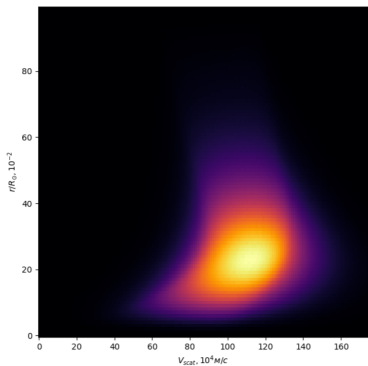
$$\frac{d\sigma}{dv'} = \frac{(m_\nu + m_{target})^2 v'}{2m_{target} v_{rel} |\vec{p}_\nu + \vec{p}_{target}|} \sigma$$

Частота рассеяния на оболочке радиуса r , при котором скорость нейтрино станет v' :

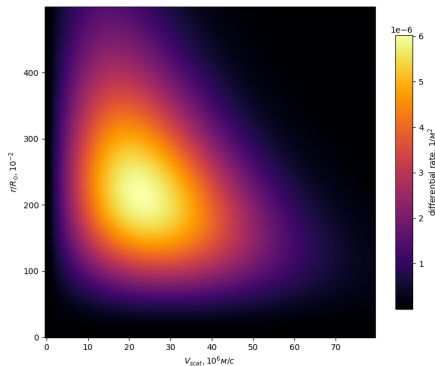
$$\frac{d^2 S}{dr dv'} = 2\pi n_x \int_0^\infty \frac{f_{halo}(u) r^2 v}{u} \sum_i^N n_i \left\langle \frac{(m_\nu + m_i)^2 v'}{2m_i v_{rel} |\vec{p}_\nu + \vec{p}_i|} \sigma_i \right\rangle du,$$

где $v = \sqrt{u^2 + v_{esc}^2(r)}$ - начальная скорость нейтрино в оболочке

Спектр рассеявшихся частиц



(1)



(2)

Рис. 2: Диаграмма частоты рассеяния нейтрино на ядрах (1) и электронах (2) в зависимости от конечных скоростей и радиуса слоя

Спектр рассеявшихся частиц

Доля частиц, подвергнувшихся захвату в единицу времени:

$$C = \int_0^{R_{\odot}} dr \int_0^{v_{\text{esc}}(r)} dv' \frac{d^2 S}{dr dv'}$$

Поток нейтрино на уровне Земли:

$$I = \frac{1}{4\pi R_{\text{Earth}}^2} \int_0^{R_{\odot}} dr \int_0^{\infty} dv' \frac{d^2 S}{dr dv'} \int_0^{v'} dv_{\text{obs}} \delta \left[v_{\text{obs}} - \sqrt{v'^2 - v_{\text{esc}}^2(r)} \right]$$

$$\frac{dI}{dv_{\text{obs}}} = \frac{1}{4\pi R_{\text{Earth}}^2} \int_0^{R_{\odot}} dr \frac{d^2 S}{dr dv_{1'}}(v_{\text{obs}}, r) \frac{v_{\text{obs}}}{\sqrt{v_{\text{obs}}^2 + v_{\text{esc}}^2(r)}}$$

Спектр рассеявшихся частиц

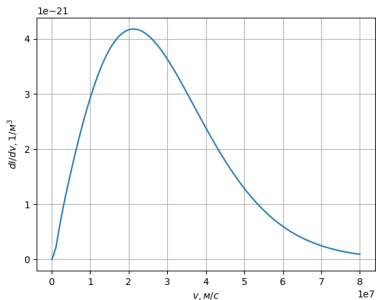


Рис. 3: График зависимости дифференциального потока нейтрино от скорости на Земле

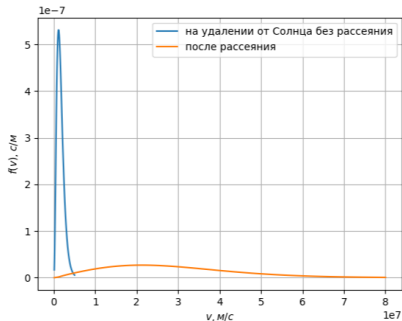


Рис. 4: Сравнение функций распределения нейтрино по скоростям в отсутствии рассеяния и при рассеянии на Солнце

Основные результаты и выводы

- Получен спектр рассеявшихся на Солнце реликтовых нейтрино
- Полный поток рассеявшихся реликтовых нейтрино на уровне Земли равен $4.7 \cdot 10^{-13} \text{ с}^{-1} \text{ м}^{-2}$
- Частоты рассеяния нейтрино на ядрах и электронах в Солнце соответственно равны $1.4 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1}$ и $1.3 \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1}$
- Взаимодействие реликтовых нейтрино с электронами происходят чаще, чем на ядрах за счет большей относительной скорости
- При взаимодействии с электроном, как с самой легкой мишенью, доля переданной энергии максимальна в сравнении с мишенями других (больших) масс
- Солнце осуществляет захват $\sim 10\%$ рассеявшихся на ядрах нейтрино

Приложение

Скорость взаимодействия одного нейтрино с веществом на фиксированном слое, в результате рассеяния скорость нейтрино изменяется от v_1 до $[v'_1, v'_1 + dv'_1]$:

$$\epsilon = \frac{m_\nu}{m_{target}}, \quad \epsilon_+ = \frac{\epsilon + 1}{2}, \quad \epsilon_- = \frac{\epsilon - 1}{2}, \quad \kappa = \sqrt{\frac{m_{target}}{2kT}}.$$

При $v' \geq v$:

$$R(v \rightarrow v') = \frac{n \epsilon_+^2 v'_1 \sigma}{\epsilon v} \left[\left((\kappa \epsilon_+ v + \kappa \epsilon_- v') - (\kappa \epsilon_- v' - \kappa \epsilon_+ v) \right) \exp(-\kappa^2 \epsilon (v'^2 - v^2)) + \right. \\ \left. + (\kappa \epsilon_+ v'_1 + \kappa \epsilon_- v_1) - (\kappa \epsilon_+ v'_1 - \kappa \epsilon_- v_1) \right]$$

При $v' \leq v$:

$$R(v \rightarrow v') = \frac{n \epsilon_+^2 v'_1 \sigma}{\epsilon v} \left[(\kappa \epsilon_+ v' + \kappa \epsilon_- v_1) + (\kappa \epsilon_+ v' - \kappa \epsilon_- v) + \right. \\ \left. + \left((\kappa \epsilon_- v' + \kappa \epsilon_+ v) + (\kappa \epsilon_- v' - \kappa \epsilon_+ v) \right) \exp(-\kappa^2 \epsilon (v'^2 - v^2)) \right]$$

- [1] N uria Vinyoles и др. “A New Generation of Standard Solar Models”. В: The Astrophysical Journal 835.2 (янв. 2017) issn: 1538-4357. doi: 10.3847/1538-4357/835/2/202.
- [2] A. Gould. “WIMP Distribution in and Evaporation From the Sun”. В: Astrophys. J. 321 560 (1987). doi: 10.1086/165652.
- [3] Jack D. Shergold. “Updated detection prospects for relic neutrinos using coherent scattering”. В: Journal of Cosmology and Astroparticle Physics 2021.11 (нояб. 2021), с. 052. issn: 1475- 7516. doi: 10.1088/1475-7516/2021/11/052. 15
- [4] J. A. Formaggio и G. P. Zeller. “From eV to EeV: Neutrino cross sections across energy scales”. В: Reviews of Modern Physics 84.3 (сент. 2012), с. 1307—1341. issn: 1539-0756. doi: 10.1103/revmodphys.84.1307.
- [5] И. М. Капитонов. Введение в физику ядра и частиц. 4-е изд. ISBN 978-5-9221-1250-5. М: ФИЗМАТЛИТ, 2010.