



ОТЧЕТ О НАУЧНО- ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

РЕЗОНАНСНЫЕ РЕАКЦИИ С УЧАСТИЕМ АНТИНЕЙТРИНО

Научный руководитель д.ф.-м.н: М. И. Криворученко
Студент: Н. А. Кривошеев



Этапы работы

1. Изучение теории бета-распада и индуцированного электронного захвата вместе с научным руководителем
2. Изучение таблицы изотопов для нахождения резонансных реакций
3. Нахождение скорости “самолета”
4. Оценка сечения реакции
5. Написание программы
6. Подведение результатов

Бета-распад нейтрона — спонтанное превращение свободного нейтрона в протон с излучением β -частицы (электрона) и электронного антинейтрино:



Q -величина - важнейшая характеристика бета-распада. Значение $Q_{\beta-}$, или энергия, выделяющаяся во время бета-распада, определяет кинетическую энергию испускаемых бета-частиц и нейтрино. Знание значения $Q_{\beta-}$ позволяет предсказать поведение ядра после распада, распределение энергии среди продуктов распада и выяснить вопрос о стабильности изотопов.

$$Q_{\beta-} = (M_{parent} - M_{daughter})c^2, \quad (7)$$

Где M_{parent} , $M_{daughter}$ - массы родительского и дочернего нейтрального атома, c - скорость света в вакууме

Для резонансного захвата необходимо выполнение баланса энергии: энергия антинейтрино должна быть равна сумме энергии, требуемой для электронного захвата, энергии возбуждения ядра и энергии образованной в результате захвата электрона.

$$E_{\bar{\nu}_e} = Q_{EC} + E + E_{vacancy}$$

После захвата электрона, дочернее ядро заберет на себя часть энергии электрона, в виде кинетической энергии. Что бы не учитывать эту энергию, можно например, проводить эксперимент в какой-нибудь движущейся относительно наблюдателя системе отсчета со скоростью u , назовем ее скоростью "самолета".

$$p_e + p = p_\nu$$

$$\frac{p_e^2}{2m_e} + \frac{p^2}{2M} + Q = p_\nu c$$

Захват электрона происходит с К оболочки из связанного состояния, поэтому можно считать, что импульс электрона нулевой. Тогда:

$$\frac{u}{c} = (1 - \sqrt{1 - 2\frac{Q}{Mc^2}}) \approx \frac{Q}{Mc^2}$$

Например для He-3 величина распада равна $Q = 18.591 \text{ кэВ}$, а масса покоя $M = 2.8 \text{ ГэВ}$, тогда скорость нашего "самолета" равна:

$$u \approx 7174 \frac{\text{км}}{\text{ч}}$$

Энергия отдачи ядра

$v = 7000$ км/час, **детектор из ${}^3\text{He}$** под крылом СУ-57 вместо ракеты,
резонансная реакция
 ${}^3\text{T} \rightarrow {}^3\text{He} + \text{антинейтрино } 18.6 \text{ кэВ}$ (авианосец)
 $\text{антинейтрино } 18.6 \text{ кэВ} + {}^3\text{He} \rightarrow {}^3\text{T}$ (СУ-57)



1. Определить поправки первого приближения к собственному значению и правильные функции нулевого приближения для двукратно вырожденного уровня.

Решение. Уравнение (39,2) имеет здесь вид

$$\begin{vmatrix} V_{11} - E^{(1)} & V_{21} \\ V_{12} & V_{22} - E^{(1)} \end{vmatrix} = 0$$

(индексы 1, 2 соответствуют двум произвольно выбранным невозмущенным собственным функциям $\psi_1^{(0)}$ и $\psi_2^{(0)}$ данного вырожденного уровня). Решая его, находим

$$E^{(1)} = \frac{1}{2} [V_{11} + V_{22} \pm \hbar\omega^{(1)}], \quad (1)$$

где введено обозначение

$$\hbar\omega^{(1)} = \sqrt{(V_{11} - V_{22})^2 + 4|V_{12}|^2}$$

для разности двух значений поправки $E^{(1)}$. Решая, далее, уравнения (39,1) с этими значениями $E^{(1)}$, получим для коэффициентов в нормированных правильных функциях нулевого приближения $\psi^{(0)} = c_1^{(0)}\psi_1^{(0)} + c_2^{(0)}\psi_2^{(0)}$ значения

$$\begin{aligned} c_1^{(0)} &= \left\{ \frac{V_{12}}{2|V_{12}|} \left[1 \pm \frac{V_{11} - V_{22}}{\hbar\omega^{(1)}} \right] \right\}^{1/2}, \\ c_2^{(0)} &= \pm \left\{ \frac{V_{21}}{2|V_{12}|} \left[1 \mp \frac{V_{11} - V_{22}}{\hbar\omega^{(1)}} \right] \right\}^{1/2}. \end{aligned} \quad (2)$$

При резонансном поглощении антинейтрино веществом детектора, уровень его энергии становится вырожденным, так как в этом случае может произойти и обратная реакция. Взаимодействие антинейтрино с веществом детектора идет за счет обмена W-бозонами, в потенциале Юкавы $U(r) = \frac{\alpha}{r} e^{-\frac{r}{a}}$, где $\alpha = -\frac{\hbar c g^2}{4\pi} \approx -1.166 \cdot 10^{-26} \text{Дж} \cdot \text{м}$, a - комптоновская длина волны для W-бозона. ($a \approx 2.45 \cdot 10^{-18} \text{м}$)

$$\sigma \leq 10^{-37} \text{м}^2$$

Так же сечение можно оценить используя унитарный предел сечения при рассеянии:

$$\sigma \leq \pi R^2$$

Где R - наибольший прицельный параметр. Значение R - нетрудно найти вводя ограничение на орбитальный момент, это делается для сохранения унитарности рассеяния $Rp = L_{max}$. Тогда:

$$\sigma \leq \pi \frac{\hbar^2 l_{max}^2}{p_\nu^2} \frac{1}{k^2} \approx \left(\frac{\hbar c}{Q}\right)^2 \approx 10^{-22} \text{ м}^2 \quad (14)$$

Как видно, поиск резонансных реакций довольно трудоемкая работа, так как искать энергии атомов в таблице вручную требует больших временных затрат. Для автоматизации процесса отбора реакций была написана программа на Fortran, которая перебирает каждый изотопы для реакций на детекторе и на источнике. С учетом скорости нашего "самолета" программа правильно выдает значения нужных для резонанса энергий антинейтрино.

Исходя из всего вышеперечисленного, нетрудно понять что резонансные реакции действительно можно поставить, а это значит, что если выбирать как источник антинейтрино $Sb-126$, и детектора $He-129$, а также множество других реакций, найденных программой, то с большой долей вероятности сечение образованных антинейтрино будет достаточным, для их изучения.

Для усовершенствования модели, в работе требуется рассмотреть случай непрерывного спектра антинейтрино, который возникает при удалении электрона на бесконечность. А также придумать более точную модель взаимодействия антинейтрино с веществом для лучшей оценки сечения.

Спасибо за внимание!