



# ОТЧЕТ О НАУЧНО- ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

## Расчет сечения при индуцированном электронном захвате

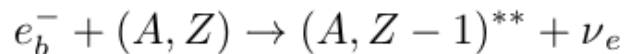
Научный руководитель д.ф.-м.н.: А. Л. Барабанов  
Научный консультант д.ф.-м.н.: М. И. Криворученко  
Студент: Н. А. Кривошеев(Б22-102)



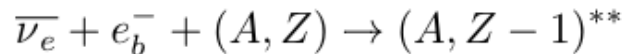
# Этапы работы

1. Мотивация поиска резонансов
2. Вычисление ширины распада дочернего атома
3. ЕС в материнском атоме
4. Сечение IEC
5. Про унитарный предел

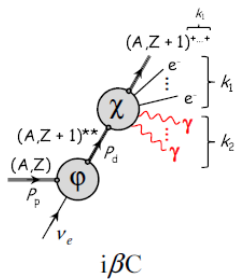
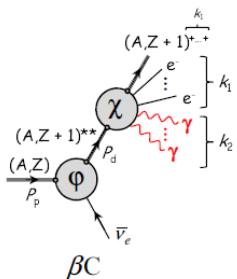
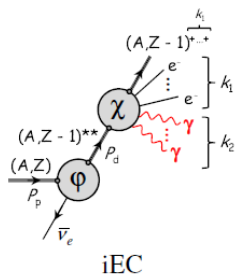
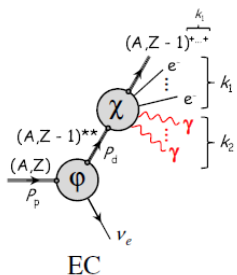
Электронный захват- захват одним из протонов ядра орбитального электрона, который сопровождается превращением протона в нейтрон с испусканием антинейтрино. Заряд ядра при этом уменьшается на единицу. Чтобы проиллюстрировать описанную методику подсчёта сечения, рассматриваются процессы электронного захвата (ЕС)



и индуцированного электронного захвата (ИЕС).



# Поиск ширины распада дочернего атома

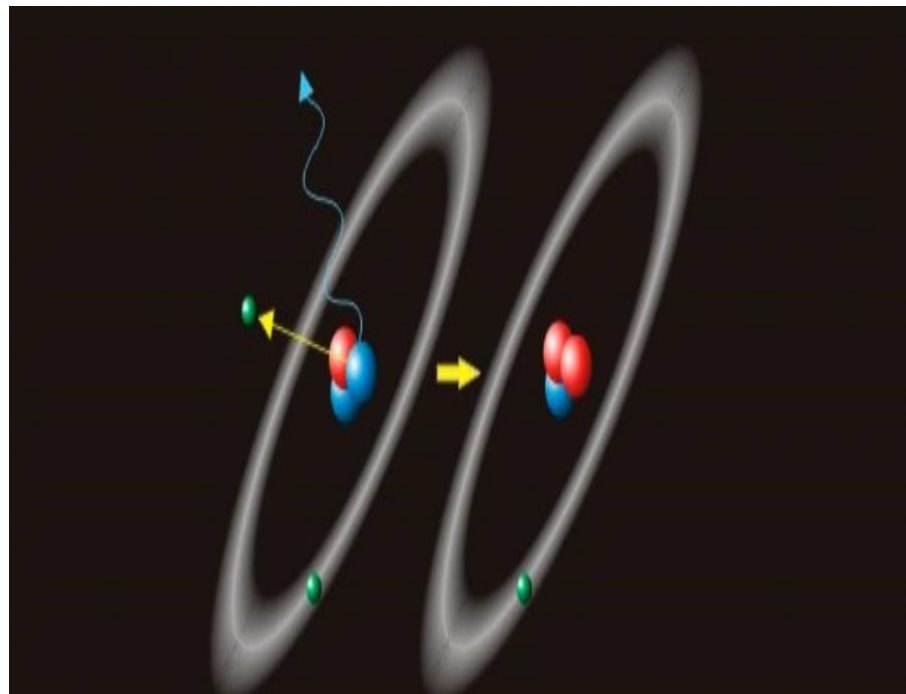


$$\begin{aligned}
 e_b^- + (A, Z) &\rightarrow (A, Z - 1)^{**} + \nu_e, & (\text{EC}) \\
 \bar{\nu}_e + e_b^- + (A, Z) &\rightarrow (A, Z - 1)^{**}, & (\text{iEC}) \\
 (A, Z) &\rightarrow (A, Z + 1)^{**} + e_b^- + \nu_e, & (\beta\text{C}) \\
 \bar{\nu}_e + (A, Z) &\rightarrow (A, Z + 1)^{**} + e_b^-, & (\text{i}\beta\text{C})
 \end{aligned}$$

EC and betaC take place for  $M_p > M_d$ , while the iEC and ibetaC channels are open for  $M_p \leq M_d$ .

Известным примером резонансного усиления сечения регистрации антинейтрино является пара атомов тритий - гелий-3. Атом трития испытывает распад в связанное состояние, при котором электрон захватывается на К оболочку.

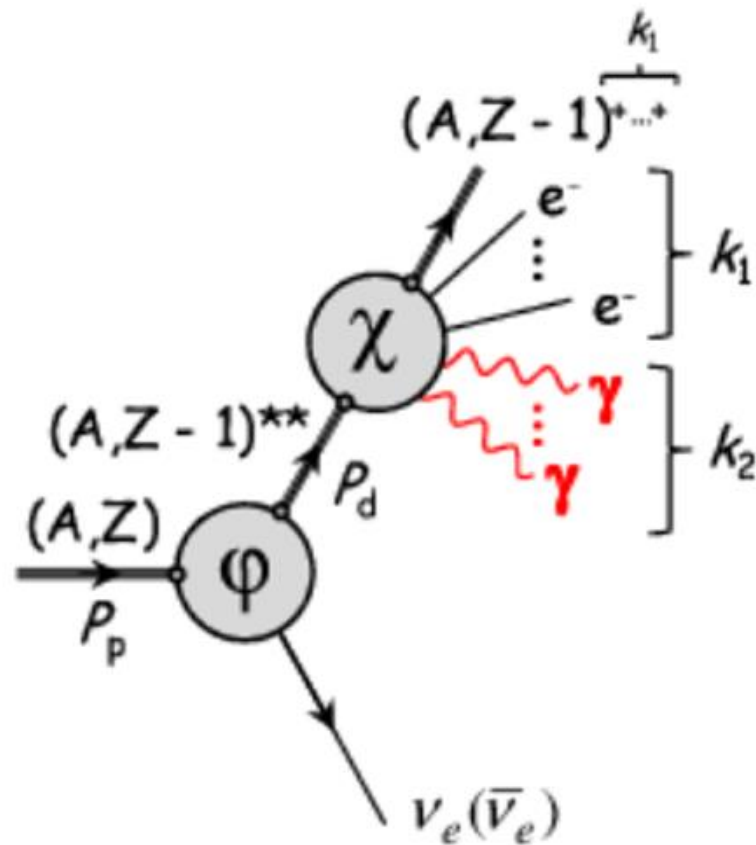
Индукированный электронный захват (iEC) на гелии-3 принимает резонансный характер, если детектор помещается на движущуюся с определенной скоростью платформу.



Бета-распад трития на гелий-3, электрон и антинейтрино. Рисунок с сайта [nist.gov](http://nist.gov)

# Диаграмма распада

Для отбора наиболее эффективных резонансных пар требуется знание вероятности регистрации событий, которая в нашем случае регулируется сечением индуцированного электронного захвата.



Бета-процессы описываются гамильтонианом слабого взаимодействия:

$$H_{\beta}(x) = \frac{G_{\beta}}{\sqrt{2}} J_h^{-\mu}(x) J_{l\mu}^{+}(x) + \text{H.c.}$$

Где  $G_{\beta} = G_F \cos \theta_C$ ,  $G_F$  - константа Ферми,  $\theta_C$  - угол Кабиббо

$$J_h^{-\mu}(x) = \bar{d}(x) \gamma^{\mu} (1 - \gamma_5) u(x),$$

$$J_{l\mu}^{+}(x) = \bar{\nu}_e(x) \gamma_{\mu} (1 - \gamma_5) e(x)$$

$$\begin{aligned} M(q) &= -i \int d^4x \langle f | H_\beta(x) S_{em+strong} | i \rangle \\ &= -i(2\pi)^4 \delta^{(4)}(P_p - P_f - q_\nu) F. \end{aligned} \quad (13)$$

В нем  $P_p$  — четыре-импульс материнского атома,  $P_f$  — суммарный четыре-импульс продуктов распада,  $q$  — импульс нейтрино. Гамильтониан  $H_\beta(x)$  учитывается в первом порядке теории возмущений, а матрица рассеяния  $S_{em+strong}$  описывает электромагнитные и сильные взаимодействия. Амплитуда ИЕС имеет тот же вид при замене  $q$  на  $-q$ . Возбужденный дочерний атом  $(A, Z - 1)^{**}$  рассматривается как резонанс с массой  $M_d$ , шириной  $\Gamma_d(s)$

В окрестности полюса амплитуда представляется в резонансной (Брейт-Вигнеровской) форме

$$F = \varphi^{\sigma_1 \dots \sigma_n} \frac{i(-1)^n \Theta_{\sigma_1 \dots \sigma_n}^{\tau_1 \dots \tau_n}(P_d)}{s - M_d^2 + i\sqrt{s}\Gamma_d(s)} \chi_{\tau_1 \dots \tau_n} \quad (14)$$

Далее, после интегрирования по фазовому объему продуктов распада дочернего атома и использования (18), ширина  $\Gamma_p$  сводится к следующему выражению, содержащему импульс в системе покоя материнского атома и усреднение по направлениям импульса нейтрино

$$\Gamma_p = \frac{p^*(M_p, M_d, m_\nu)}{8\pi M_p^2} \frac{1}{2J_p + 1} \left\langle \sum_{M_p} \sum_{J_d M_d} \sum_{\alpha_\nu} \varphi^{J_d M_d} \varphi_{J_d M_d}^* \right\rangle_n \quad (25)$$

Где

$$p^*(\sqrt{s}, m_1, m_2) = \frac{\sqrt{(s - (m_1 + m_2)^2)(s - (m_1 - m_2)^2)}}{2\sqrt{s}}$$

# Сечение индуцированного электронного захвата(ИЭС)

В ситуациях, когда в пучке присутствуют правые антинейтрино то сечение следует умножить на 2 (с поправкой порядка  $m/E_{res}$ ). Интегрирование по фазовому объему продуктов распада дочернего атома дает компактное выражение для  $\sigma$  через  $\Gamma_d(s)$  и резонансный знаменатель:

$$\sigma = \frac{1}{8p^*(\sqrt{s}, M_p, m_\nu)\sqrt{s}} \frac{1}{2J_p + 1} \left\langle \sum_{M_p \alpha_\nu} \sum_{J_d M_d} \varphi_{J_d M_d} \varphi_{J_d M_d}^* \right\rangle_n \frac{2\sqrt{s}\Gamma_d(s)}{(s - M_d^2)^2 + s\Gamma_d^2(s)}$$

Типичным значением ширины для атомов является величина  $\Gamma_d(s) \approx 10$  эВ. В случае точного резонанса  $s = M_d^2$  фактор усиления сечения оценивается как  $Q/\Gamma_d(s) \approx 10^5$ , где  $Q \approx 1$  МэВ - энергия реакции.

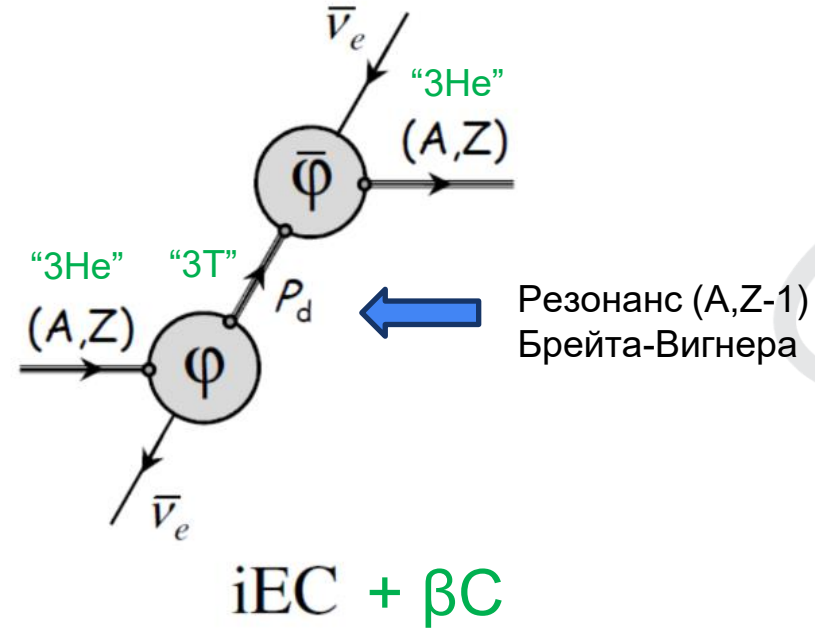
Предыдущие оценки относились к случаю, когда захват электрона идет из низших оболочек. Ширина атомов, полученных в таких процессах, определяется электромагнитными процессами и составляет величину порядка 10 эВ.

Число событий, регистрируемых для отобранных резонансных пар, мало. Однако существует другой класс событий, связанных с захватом электрона из валентной оболочки, который приводит к образованию атомов, электромагнитная ширина которых равна нулю.

Тем не менее, эти атомы распадаются по тому каналу, по которому образовались в результате захвата антинейтрино. Эта ширина определяется слабыми взаимодействиями и пропорциональна константе Ферми во второй степени.

# Сечение индуцированного электронного захвата (ИЕС)

Индукцированный захват электрона с валентной оболочки с образованием в промежуточном состоянии дочернего атома с нулевой электромагнитной шириной. Атом распадается в результате слабых взаимодействий по тому каналу, по которому он был образован.



# Сечение индуцированного электронного захвата (ИЕС)

ЛЛ 3 том.

$$f_e(\theta) = f^{(0)}(\theta) - \frac{2l+1}{2k} \frac{\Gamma_e}{E - E_0 + \frac{1}{2}i\Gamma} e^{2i\delta_l} P_l(\cos \theta),$$

$$\Gamma = \Gamma_e \quad \& \quad E = E_0 \quad \Rightarrow \quad f_e(\theta)^{\text{res}} \propto \frac{2l+1}{k}$$

Согласно формуле Брейта-Вигнера при резонансной энергии сечение

$$\sigma = \frac{4\pi}{k^2} \sum_{l=0}^{\infty} (2l+1) \sin^2 \delta_l.$$

выходит на унитарный предел, который равен

$$\sigma_{l,\text{max}} = (4\pi/k^2)(2l+1).$$

Четырех-фермионное взаимодействие является контактным, поэтому в рассматриваемом случае имеем рассеяние в s волне, то есть  $l = 0$ .

# Сечение индуцированного электронного захвата (ИЭС)

Для оценок примем энергию налетающего антинейтрино **3 кэВ**, что соответствует импульсу электрона  $\alpha m_e$  на первой боровской орбите атома водорода. Боровский радиус атома водорода  $a_B = 1/\alpha m_e$ . С другой стороны, как известно, радиусы всех атомов приближенно равны  $a_B$ . Сечение рассеяния при резонансной энергии равно

$$\sigma_{0,\max} = \frac{4\pi}{k^2} = 4\pi a_B^2$$

Данные оценки показывают, что уже один слой атомов, нанесенный на поверхность образца, является непрозрачным для антинейтрино, если пучок имеет в точности резонансную энергию, и разброс в энергии пучка не превышает слабую ширину дочернего атома.

Выполнен расчет iEC сечения для произвольных ядерных переходов  $J_p^{PC} \rightarrow J_d^{PC}$  и всех схем электронного захвата. В промежуточном состоянии реакции образуется атом с вакансией в электронной оболочке, то есть резонанс. Дочернее ядро также может перейти в возбужденное состояние. Сечение рождения резонанса, по определению - это сечение рождения продуктов его распада. Соответственно, iEC процесс описывается диаграммой, представленной на Рис. 1. Суммирование по всем продуктам распада позволяет выразить iEC сечение через единственный дополнительный параметр - ширину резонанса. В общем случае сечение содержит фактор Брейта-Вигнера:

$$\sigma_{\bar{\nu}_e + (A, Z) \rightarrow (A, Z-1)^{**}} \sim \frac{2\sqrt{s}\Gamma_d(s)}{(s - M_d^2)^2 + s\Gamma_d^2(s)}$$

- Для поиска резонансных пар атомов автоматизировали процесс отбора взаимодействий с помощью программного комплекса RESONANCE, который перебирает изотопы на детекторе и источнике.
- Проведён расчёт вероятности процессов спонтанного и индуцированного  $\beta$ -распада атомов с последующим захватом  $\beta$ -электрона в связанное состояние ( $\beta C$ ).
- Полученные формулы встроены в программный комплекс RESONANCE. Для резонансных пар атомов, отобранных в ходе предшествующих исследований, выполнены оценки числа событий  $iEC$  в детекторе - с захватом на внутренние и внешние валентные уровни электронной оболочки. Второй тип процессов позволяет выйти на унитарный предел в сечении поглощения антинейтрино для строго резонансных пучков, что ведет к значительному увеличению эффективности регистрации нейтрино.

Спасибо за внимание

