

Министерство науки и высшего образования Российской  
Федерации Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский ядерный университет  
«МИФИ»

ОТЧЕТ О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

**РЕЗОНАНСНЫЕ РЕАКЦИИ С УЧАСТИЕМ АНТИНЕЙТРИНО**

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

Москва 2025

# Содержание

|   |          |
|---|----------|
| <b>1 Введение в резонансные реакции с антинейтрино</b>      | <b>2</b> |
| 1.1 Введение . . . . .                                      | 2        |
| 1.1.1 Бета-распад . . . . .                                 | 2        |
| 1.1.2 Индуцированный электроны захват . . . . .             | 3        |
| 1.2 Резонансные реакции . . . . .                           | 3        |
| 1.3 Возбуждение ядра . . . . .                              | 4        |
| <b>2 Изучение и выбор резонансных реакций</b>               | <b>5</b> |
| 2.1 Отдача ядра . . . . .                                   | 5        |
| 2.2 Сечение реакции . . . . .                               | 5        |
| <b>3 Поиск резонансных реакций с помощью программы</b>      | <b>6</b> |
| 3.1 Алгоритм работы программы . . . . .                     | 6        |
| 3.2 Результат для некоторых элементов . . . . .             | 6        |
| <b>4 Проверка резонансных реакций, найденных программой</b> | <b>7</b> |
| <b>5 Заключение</b>   | <b>8</b> |

## 1 Введение в резонансные реакции с антинейтрино

### 1.1 Введение

#### 1.1.1 Бета-распад

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



Так же справедливы и следующие похожие реакции



Такие превращения могут идти в обе стороны, а самое важное, эта реакция может протекать не только с нейтронами, но и в общем случае, не нарушая известные законы сохранения



$Q$ -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

### 1.1.2 Индуцированный электронный захват

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. Реакция довольно схожа с предыдущей



Или в общем виде



Для этой реакции тоже можно ввести свою величину  $Q_{EC}$ , следуя тем же соображениям.

Теоретическое исследование захвата бета-электрона в связанное состояние проводилось в работе [D18]. Бета-распад в связанное состояние наблюдался экспериментально для полностью ионизованных ионов  ${}^{163}_{66}\text{Dy}_{66+}$  в ловушке тяжелых ионов ESR в GSI, Darmstadt. Время захвата 47 дней, другие каналы распада отсутствуют [MJS92]. Захват в связанное состояние наблюдался также для иона  ${}^{207}\text{Tl}_{81+}$  [Boust].

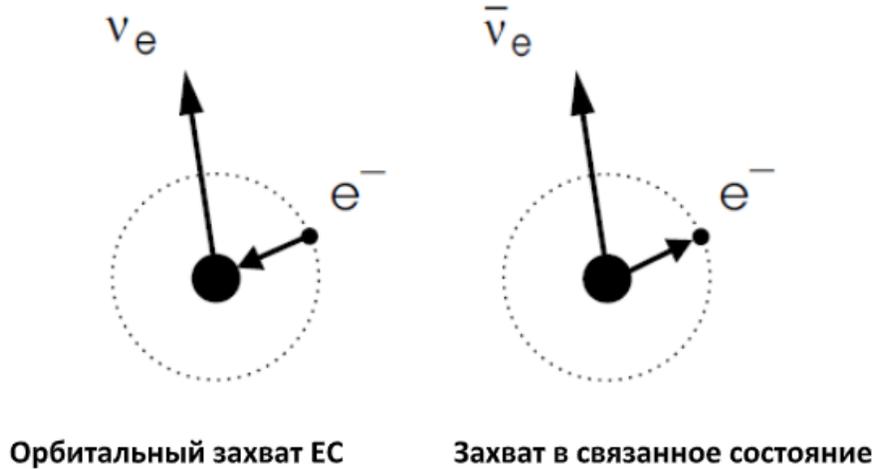


Рис. 1: Схематическое представление захвата орбитального электрона ядром (слева). В процессе излучается нейтрино, дочерний атом получает отдачу. Справа – иллюстрация бета-распада с захватом электрона в связанное состояние. Выделенная энергия делится между антинейтрино и дочерним атомом.

Сечения поглощения нейтрино чрезвычайно малы. Чувствительные детекторы для регистрации нейтрино могли бы быть созданы на основе резонансных процессов. Задача № 1 к параграфу 39 [LL 3] о двухуровневой системе показывает элементарно, например, что при наличии вырождения бесконечно малое возмущение приводит к сильному перемешиванию. Известно, что безнейтринный двойной электронный захват при выполнении условия вырождения по энергии испытывает резонансное усиление. Этот вопрос тщательно исследовался [KBS20].

## 1.2 Резонансные реакции

Энергетический спектр антинейтрино содержит дискретную компоненту, связанную с возможностью захвата электрона на свободный уровень образованного иона. В работе использовались изотопы ксенона и нептуния, испытывающие бета-распад, как источники антинейтрино. При

протекании реакции индуцированного электронного захвата у антинейтрино должна быть определенная допустимая энергия, так как он имеет в своем непрерывном спектре дискретную составляющую, что усложняется описание этой реакции. Так же, у антинейтрино очень маленькое сечение взаимодействия, что вместе с вышесказанным, дает понять насколько его трудно анализировать, поэтому мы будем подбирать наиболее благоприятные условия, а именно резонансные реакции. 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.

### 1.3 Возбуждение ядра

Иногда может произойти так, что дочернее ядро после бета-распада будет находиться в возбужденном состоянии, что абсолютно схоже и с электронным захватом. Когда так происходит, энергия антинейтрино расходуется частично на саму реакцию, и на переход атома в возбужденное состояние. Если энергии будут подобраны таким образом, то произойдет резонансный индуцированный электронный захват. Именно такие резонансные реакции и ищутся в данной работе.

## 2 Изучение и выбор резонансных реакций

### 2.1 Отдача ядра

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". Предположим, что скорость мала по сравнению со скоростью света  $c$ .  $M$  - Масса покоя родительского ядра. Тогда, запишем законы сохранения:

$$p_e + p = p_\nu$$

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

Где  $p_\nu$  - импульс нейтрино,  $p$  - импульс родительского ядра,  $M$  - его масса,  $p_e$  - импульс электрона. Захват электрона происходит с  $K$  оболочки из связанного состояния, поэтому можно считать, что  $p_e = 0$ . Тогда:

$$\frac{p^2}{2M} + Q - pc = 0$$

Решая это уравнение относительно  $p$ , получим,

$$p = M(c - \sqrt{c^2 - \frac{4Q}{2M}}) = Mc(1 - \sqrt{1 - 2\frac{Q}{Mc^2}})$$

Откуда безразмерная скорость искомой системы отсчета равна:

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

Например для  ${}^3\text{He}$  величина распада равна  $Q = 18.591 \text{ кэВ}$ , а масса покоя  $Mc^2 = 2.8 \text{ ГэВ}$ , тогда скорость нашего "самолета" равна:

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

То есть предположение о малости скорости - подтвердилось.

### 2.2 Сечение реакции

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. ( $a \approx 2.45 \cdot 10^{-18} \text{ м}$ )

В Борновском приближение сечение в таком потенциале находится по формуле [LL 3] (не подойдет, чья масса  $m$ ?? условия применимости)

$$\sigma = 16\pi a^2 \left(\frac{\alpha m a}{\hbar^2}\right)^2 \frac{1}{1 + 4\left(\frac{p_\nu}{\hbar}\right)^2 a^2} \quad (12)$$

Потенциал Юкавы действует на расстояниях не более  $a$ , а значит сечение не более чем  $a^2$ , тогда

$$\sigma \leq 10^{-37} \text{ м}^2$$

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

$$\sigma \leq \pi R^2 \quad (13)$$

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

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

Что конечно больше чем, в предыдущей оценке.

## 3 Поиск резонансных реакций с помощью программы

### 3.1 Алгоритм работы программы

Программа должна считать энергии в реакциях, выдавая наиболее близкие к идеальному совпадению результаты. Для этого в начале требуется загрузить в программу библиотеки с данными об энергиях ядер, их возбуждений, также об энергиях связи электронов, четности ядер и спиновых числах. [Ken79] Для этого в программе есть три блока считывающих файлы в самом начале работы программы: readmasses(считывает дефект массы), readatoms(считывает энергии связи электронов) и readdatabase(считывает энергии возбуждения ядер). Поиск элементов для резонансных реакций осуществляется путем циклов. В программе также есть дополнительные этапы проверки, например, она проверяет спин и четность для протекающих процессов. Сначала программа по очереди берет элементы, испытывающие бета-распад (элемент в реакторе), и считает энергию распада как разность масс атомов в основном состоянии, с учетом энергии возбуждения ядра и энергии отдачи ядра. Потом для каждого элемента создается еще один цикл, в котором так же берутся элементы, но уже испытывающие электронный захват (элементы в детекторе), и считается энергия этого процесса, с учетом энергий возбуждения ядра и энергии связи электрона. Если разность энергий этих реакций меньше определенного значения, то программа признает реакцию резонансной и записывает эти элементы в отдельный файл вместе с разностью энергий, энергиями возбуждений и экспериментальной ошибкой.



Рис. 2: Блок-схема алгоритма программы

### 3.2 Результат для некоторых элементов

Далее приведена часть выходного файла программы в виде таблицы.

| $El_R$ | $El_D$ | $E_R^*$ | $E_D^*$ | $E_{e^-}$        | $Q_{diff}$        | $\Delta Q$ | $v_{pl}$        |
|--------|--------|---------|---------|------------------|-------------------|------------|-----------------|
| 111 Ag | 107 Ag | 620.18  | 381.80  | $6.69 * 10^{-1}$ | $-7.79 * 10^{-4}$ | 7.15       | $0.427 * 10^4$  |
| 111 Ag | 111 In | 620.18  | 1274.68 | $3.73 * 10^0$    | $2.82 * 10^{-3}$  | 6.82       | $-0.798 * 10^4$ |
| 111 Ag | 105 Ag | 680.48  | 1700.60 | $5.59 * 10^{-1}$ | $-4.12 * 10^{-3}$ | 12.41      | $0.992 * 10^4$  |
| 111 Ag | 124 I  | 736.00  | 3460.35 | $3.98 * 10^{-2}$ | $-4.13 * 10^{-3}$ | 11.14      | $0.913 * 10^4$  |
| 113 Cd | 118 Te | 0.00    | 568.23  | $3.05 * 10^2$    | $-2.93 * 10^{-3}$ | 15.90      | $0.788 * 10^4$  |
| 123 Sn | 131 Ba | 0.00    | 2779.40 | $2.31 * 10^0$    | $-5.19 * 10^{-3}$ | 6.69       | $0.995 * 10^4$  |
| 124 Sb | 134 Ba | 0.00    | 839.81  | $5.71 * 10^1$    | $4.47 * 10^{-3}$  | 2.57       | $-0.914 * 10^4$ |
| 124 Sb | 106 Cd | 1746.96 | 961.76  | $3.73 * 10^0$    | $1.03 * 10^{-3}$  | 8.11       | $-0.494 * 10^4$ |
| 124 Sb | 133 Ba | 1746.96 | 1674.62 | $1.72 * 10^0$    | $-1.29 * 10^{-3}$ | 2.74       | $0.492 * 10^4$  |
| 124 Sb | 118 Te | 1882.92 | 1299.61 | $9.84 * 10^{-2}$ | $-1.25 * 10^{-4}$ | 15.55      | $0.163 * 10^4$  |
| 124 Sb | 139 Ce | 1957.90 | 1218.96 | $6.27 * 10^1$    | $-1.87 * 10^{-3}$ | 8.14       | $0.580 * 10^4$  |
| 124 Sb | 103 Pd | 2153.29 | 1293.99 | $4.79 * 10^{-2}$ | $4.87 * 10^{-4}$  | 4.78       | $-0.344 * 10^4$ |
| 124 Sb | 124 Xe | 2182.41 | 426.70  | $3.30 * 10^{-2}$ | $-2.56 * 10^{-3}$ | 4.05       | $0.719 * 10^4$  |
| 124 Sb | 130 Ba | 2224.95 | 318.10  | $2.27 * 10^{-2}$ | $-1.39 * 10^{-3}$ | 9.18       | $0.517 * 10^4$  |
| 124 Sb | 136 Ce | 2326.60 | 140.00  | $6.27 * 10^1$    | $8.03 * 10^{-5}$  | 54.70      | $-0.122 * 10^4$ |
| 124 Sb | 126 I  | 2349.47 | 2704.49 | $4.34 * 10^1$    | $-2.07 * 10^{-3}$ | 4.76       | $0.641 * 10^4$  |
| 124 Sb | 132 Cs | 2641.15 | 2353.10 | $3.46 * 10^2$    | $-4.48 * 10^{-3}$ | 3.34       | $0.922 * 10^4$  |
| 124 Sb | 124 I  | 2693.68 | 3370.15 | $1.16 * 10^{-2}$ | $1.96 * 10^{-3}$  | 3.78       | $-0.629 * 10^4$ |
| 124 I  | 124 Xe | 0.00    | 0.00    | $3.30 * 10^{-2}$ | $-3.67 * 10^{-3}$ | 4.23       | $0.861 * 10^4$  |
| 125 Sn | 124 I  | 1889.87 | 3622.07 | $4.61 * 10^1$    | $4.62 * 10^{-3}$  | 4.09       | $-0.965 * 10^4$ |
| 125 Sn | 118 Te | 1894.00 | 741.24  | $9.84 * 10^{-2}$ | $3.53 * 10^{-3}$  | 18.55      | $-0.866 * 10^4$ |
| 126 Sb | 103 Pd | 2013.17 | 2196.00 | $4.79 * 10^{-2}$ | $2.76 * 10^{-3}$  | 32.15      | $-0.818 * 10^4$ |
| 126 Sb | 129 Xe | 2911.90 | 559.62  | $6.19 * 10^0$    | $-5.33 * 10^{-4}$ | 32.05      | $0.322 * 10^4$  |
| 126 Sn | 126 Sb | 0.00    | 0.00    | $1.10 * 10^{-2}$ | $-1.71 * 10^{-3}$ | 47.51      | $0.582 * 10^4$  |
| 126 Sn | 107 Ag | 40.40   | 302.78  | $6.69 * 10^{-1}$ | $3.99 * 10^{-4}$  | 34.12      | $-0.306 * 10^4$ |
| 126 Sb | 109 Ag | 1873.40 | 673.49  | $3.17 * 10^1$    | $4.24 * 10^{-3}$  | 32.20      | $-0.987 * 10^4$ |

Рис. 3: табл.1 выходные данные программы

Где  $El_R$  - элемент в реакторе,  $El_D$  - элемент в детекторе,  $E_R^*$  - энергия возбуждения ядра конечного элемента в реакторе,  $E_D^*$  - энергия возбуждения ядра конечного элемента в детекторе,  $E_{e^-}$  - энергия возбуждения электронной оболочки,  $Q_{diff}$  - разность энергий процессов,  $Q$  - экспериментальная ошибка,  $v_{pl}$  - скорость системы реактора.

## 4 Проверка резонансных реакций, найденных программой

Вычислим насколько совпадают энергии реакций для элементов, полученных в результате работы программы. Возьмем в качестве элемента испытывающего бета-распад в реакторе  $^{126}_{51}\text{Sb}$ . Реакция распада тогда:



$$Q_{\beta^-} = 3670 \text{ кэВ} \quad (16)$$

Энергия возбуждения дочернего ядра  $E_R^* = 2911.90 \text{ кэВ}$ . Тогда энергия вылетающих антинейтрино и электрона с учетом отдачи ядра равна

$$E_{\bar{\nu}_e} + E_{e^-} = Q - \frac{(Q - E_R^*)^2}{2Mc^2} E_R^* = 3670 \text{ кэВ} - 2911.90 \text{ кэВ} = 758.1 \text{ кэВ} \quad (17)$$

Если электрон в результате распада не вылетает из атома, а садится на одну из внешних оболочек, то энергия антинейтрино будет примерно равна энергии распада, так как энергия связи электронов на внешних оболочках тяжелых элементов мала.

$$E_{\bar{\nu}_e} \approx 758.1 \text{ кэВ} \quad (18)$$

В детекторе согласно таблице должен быть  $^{129}_{54}\text{Xe}$ . Реакция индуцированного электронного захвата для этого элемент:



Энергия необходимая для электронного захвата  $Q_- = 194 \text{ кэВ}$ . Энергия связи электрона  $E_{e^-} = 5.1881 \text{ кэВ}$ . У ядра  $^{129}_{53}\text{I}$  есть возбужденное состояние с энергией  $E_D^* = 559.62 \text{ кэВ}$ . Тогда энергия необходимая для резонанса.  $Q_- + E_D^* + E_{e^-} = 194 \text{ кэВ} + 5.1881 \text{ кэВ} + 559.62 \text{ кэВ} = 758.8 \text{ кэВ}$ . Разность энергий составляет  $758.1 \text{ кэВ} - 758.8 \text{ кэВ} = -0.7 \text{ кэВ}$ . В таблице же это значение намного меньше  $Q_{diff} = -5.33 \cdot 10^{-4} \text{ кэВ}$ . Это вызвано тем, что использовались разные базы данных. Однако в пределах экспериментальной ошибки  $32.05 \text{ кэВ}$  значения совпадают.

## 5 Заключение

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 **Xe-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 лучших оценок сечения.

## Список литературы

- [Boust] David Boutin. First direct observation of bound-state beta-decay: Measurements of branching and lifetime of  $^{207}\text{tl}_{81+}$ . Fragments, Dissertation Justus-Liebig Universität/Gießen. 2005 - 10 August.
- [D18] A. Babic D. Štefánik, M. I. Krivoruchenko and F. Šimkovic. Bound-state double- decay. Phys. Rev. C 98, 065501 (2018).
- [KBS20] F. Danevich V. I. Tretyak S. Kovalenko M. I. Krivoruchenko Yu. N. Novikov K. Blaum, S. Eliseev and J. Suhonen. Rev.Mod. Phys. 92, 045007 (2020).
- [Ken79] Kenneth D. Sevier. Atomic electron binding energies. pages 323–371, 24.4(окт.1979).
- [LL 3] L.D. Landau and E.M. Lifschitz. Quantum mechanics: Non-relativistic theory. course of theoretical physics, 3rd ed. Pergamon, London (1977), v. 3.
- [MJS92] K. Beckert H. Eickhoff H. Folger B. Franzke A. Gruber P. Kienle O. Klepper W. Koenig C. Kozhuharov R. Mann R. Moshhammer F. Nolden U. Schaaf G. Soff P. Spädtke M. Steck Th. Stöhlker M. Jung, F. Bosch and K. Sümmerer. Phys. Rev. Lett. 69, 2164 (1992).