

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 2024

# 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	2
1.2 Резонансные реакции	3
1.3 Возбуждение ядра	4
<b>2 Изучение и выбор резонансных реакций</b>	<b>5</b>
2.1 Поиск элемента для резонансной реакции для бета-распада <b>Xe-133</b>	5
2.2 Поиск элемента для резонансной реакции с участием <b>Np-239</b>	5
2.3 Дальнейшие исследования	5

## 1 Введение в резонансные реакции с антинейтрино

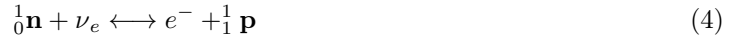
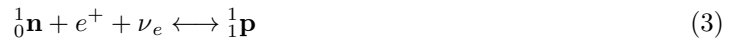
### 1.1 Введение

#### 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



$Q_{\beta_-}$ -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 электроны 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



$${}^1_1\text{p} + \bar{\nu}_e \rightarrow e^+ + {}^1_0\text{n} \quad (10)$$

Или в общем виде

$${}^A_Z\text{X} + e^- + \bar{\nu}_e \rightarrow {}^A_{Z-1}\text{Y}. \quad (11)$$

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  ${}^{207}_{81}\text{Tl}_{81+}$  [Boust].

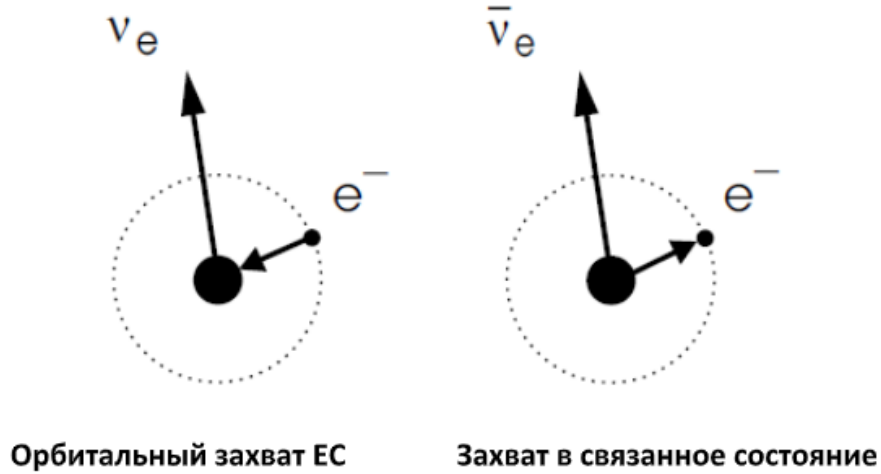


Рис. 1: Схематическое представление захвата орбитального электрона ядром (слева). В процессе излучается нейтрино, дочерний атом получает отдачу. Справа – иллюстрация бета-распада с захватом электрона в связанное состояние. Выделенная энергия делится между антинейтрино и дочерним атомом.

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 Поиск элемента для резонансной реакции для бета-распада Хе-133



$$Q_{\beta^{-}} = 427,4 \text{ кэВ}$$

Атом  ${}_{55}^{133}\text{Cs}_{7/2+}$  -стабилен, тогда кинетическая энергия антинейтрино и электрона можно найти как

$$E_{\bar{\nu}_e} + E_{e^{-}} = Q_{\beta^{-}} = 427,4 \text{ кэВ}$$

В последнем равенстве энергией элетрона можно пренебреч, так как он оказывается на внешней оболочке атома.

При подборе реакции на детекторе рассмотрим реакцию индуцированного элетронного захвата на  ${}_{34}^{77}\text{Se}$



$$Q_{\beta^{-}} = 682,9 \text{ кэВ}$$

Энергия возбуждения ядра,  $E_w = 264,4 \text{ кэВ}$ , тогда энергия антинейтрино вычисляется как

$$E_{\bar{\nu}_e} = Q_{\beta^{-}} - E_w = 418,5 \text{ кэВ}$$

Расхождение в энергии тогда получается  $427,4 \text{ кэВ} - 418,5 \text{ кэВ} = 8,9 \text{ кэВ}$ , что в качестве начальной оценки вполне приемлемо.

### 2.2 Поиск элемента для резонансной реакции с участием Np-239



$$Q_{\beta^{-}} = 721,9 \text{ кэВ}$$

При распаде дочерний атом может перейти в возбужденное состояние  ${}_{94}^{239}\text{Pu}_{11/2-}$  с энергией  $E = 487,0 \text{ кэВ}$ . Если состояние образуется с большей вероятностью чем, не возбужденное  ${}_{94}^{239}\text{Pu}_{1/2+}$ , тогда энергия антинейтрино и электрона можно найти как

$$E_{\bar{\nu}_e} + E_{e^{-}} = Q_{\beta^{-}} - E = 234,9 \text{ кэВ}$$

В последнем равенстве энергией элетрона снова можно пренебреч, так как он оказывается на внешней оболочке атома.

При подборе реакции на детекторе рассмотрим реакцию элетронного захвата на  ${}_{45}^{103}\text{Rh}$



$$Q_{\beta^{-}} = 763,3 \text{ кэВ}$$

Энергия возбуждения ядра  $E_w = 535,4 \text{ кэВ}$ , тогда энергия антинейтрино вычисляется как

$$E_{\bar{\nu}_e} = Q_{\beta^{-}} - E_w = 227,9 \text{ кэВ}$$

Расхождение в энергии тогда получается  $234,9 \text{ кэВ} - 227,9 \text{ кэВ} = 7,0 \text{ кэВ}$ , что так же приемлемо.

### 2.3 Дальнейшие исследования

Как видно, поиск резонансных реакций довольно трудоемкая работа, так как искать энергии атомов в таблице вручную требует больших временных затрат[Ken79]. Дальнейшая цель это автоматизировать данный процесс с использованием компьютерных технологий

## Заключение

Исходя из всего вышперечисленного, нетрудно понять что резонансные реакции действительно можно поставить, а это значит, что если выбирать как источник антинейтрино Хе-133 или Np-239, а в качестве вещества детектора Se-77 и Rh-103 соответственно, то с большой долей вероятности сечение образованных антинейтрино будет достоточным, для их изучения.

## 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] KennethD.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).