

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	3
<b>2 Изучение и нахождение резонансных реакций</b>	<b>4</b>
2.1 Поиск элемента для резонансной реакции для Хе-133	4
2.2 Поиск элемента для резонансной реакции для Np-239	4
2.3 Дальнейшие исследования	4

## 1 Введение в резонансные реакции с антинейтрино

### 1.1 Введение

#### 1.1.1 Бета-распад

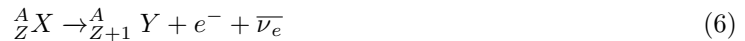
Бета-распад нейтрона — спонтанное превращение свободного нейтрона в протон с излучением  $\beta$ -частицы (электрона) и электронного антинейтрино:



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 - важная 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 некоторых 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 нейтрона в протон 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  $Q_{EC}$ , по той же идее.

## 1.2 Резонансные реакции

Энергетический спектр антинейтрино содержит дискретную компоненту, связанную с возможностью захвата электрона свободным уровнем образованного иона. В работе использовались изотопы, испытывающие бета-распад, как источники антинейтрино. При протекании реакции ЭЗ у антинейтрино должна быть определенная допустимая энергия, так как он имеет в своем непрерывном спектре дискретную составляющую, что усложняется протеканием этой реакции. Также, у антинейтрино очень маленькое сечение взаимодействия, что вместе с вышесказанным, дает понять насколько её трудно 'щёлкнуть', 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 ровно так, то произойдет резонансный ЭЗ. Именно такие резонансные реакции и ищутся в данной работе.

## 2 Изучение и нахождение резонансных реакций

### 2.1 Поиск элемента для резонансной реакции для Хе-133



Атом  ${}_{55}^{133}\text{Cs}_{7/2+}$  -стабилен, тогда 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 элетронного захвата на  ${}_{20}^{41}\text{Ca}$



Энергия связи электрона, находящегося на К-оболочке равна  $E_c = 4,49 \text{ кэВ}$ , тогда энергия антинейтрино вычисляется как

$$E_{\bar{\nu}_e} = Q_{EC} + E_c = 425,9 \text{ кэВ}$$

Расхождение в энергии тогда получается  $427,4 \text{ кэВ} - 425,9 \text{ кэВ} = 1,5 \text{ кэВ}$ , что давольно приемлемо.

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



При распаде дочерний атом может перейти в возбужденное состояние  ${}_{94}^{239}\text{Pu}_{11/2-}$  с энергией  $E = 487,0 \text{ кэВ}$ , такое состояние образуется вероятней 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  ${}_{32}^{71}\text{Ge}$



Энергия связи электрона, находящегося на К-оболочке равна  $E_c = 10,37 \text{ кэВ}$ , тогда энергия антинейтрино вычисляется как

$$E_{\bar{\nu}_e} = Q_{EC} + E_c = 239,8 \text{ кэВ}$$

Расхождение в энергии тогда получается  $239,8 \text{ кэВ} - 234,9 \text{ кэВ} = 4,9 \text{ кэВ}$ , что так же приемлемо.

### 2.3 Дальнейшие исследования

Как видно, поиск резонансных реакций давольно долгая работа, так как искать энергии атомов в таблице в ручную требует много времени[Ken79]. Дальнейшая цель это автоматизировать данный процесс с использованием компютерных 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 Са-41 и Ge-71 соответственно, то с большой долей вероятности сечение образованных антинейтрино будет достоточным, для их изучения.

## Список литературы

[Ken79] KennethD.Sevier. Atomic electron binding energies. pages 323–371, 24.4(окт.1979).