

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 АНТИНЕЙТРИНО

Научный руководитель
д.ф.-м.н

_____ М. И. Криворученко

Студент

_____ П. А. Скворцов

Москва 2024

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
1 Обоснование резонансных реакций с антинейтрино	5
1.1 Дискретные значения энергии антинейтрино	5
1.2 Возбуждение ядра	5
2 Поиск резонансных реакций	6
2.1 Поиск резонансной реакции для I-131	6
2.2 поиск резонансной реакции для Se-141	6
Заключение	8
Список литературы	9

ВВЕДЕНИЕ

Бета-распад нейтрона

Свободный нейтрон вне ядра самопроизвольно распадается с испусканием электрона и электронного антинейтрино, превращаясь в протон.



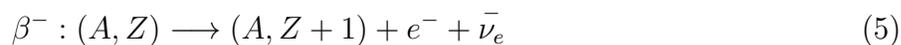
Из-за этого процесса нейтроны не наблюдаются в свободном виде, а лишь в составе ядер. Из-за кроссинг-симметрии также возможны реакции:



Реакции идут в обе стороны, если достаточно энергии, как и в случае бета-распада нейтрона.

Аналогичные процессы происходят с участием ядер с сохранением барионного числа. Два ядра должны иметь заряды, отличающиеся на единицу. Реакции обусловлены бета-процессами на связанных в ядре нуклонах.

В результате бета-распада родительское ядро излучает электрон и антинейтрино и увеличивает свой заряд на единицу, не меняя массового числа.

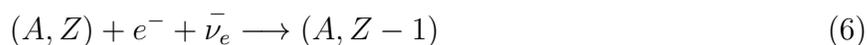


Энергией бета распада (Q -величиной распада) называется разность масс покоя атомов в основном нейтральном состоянии. Например, для бета-распада нейтрона Q -величина равна разности масс нейтрона и атома водорода.

Энергия бета-распада распределяется между вылетевшими электроном и антинейтрино, из-за чего они могут обладать кинетическими энергиями из непрерывных спектров, ограниченных сверху величиной энергии распада.

Электронный захват

Электронный захват – реакция обратная бета-распаду. Ядро захватывает электрон с одной из оболочек (обычно, ближайшей к нему К-оболочки), понижая свой заряд на единицу.



В качестве источника антинейтрино в данной работе рассматривается атом, испытывающий бета-распад. Энергетический спектр антинейтрино содержит дискретную компоненту, связанную с возможностью захвата бета-электрона свободным уровнем образованного иона. В любом ионе имеется бесконечно много свободных дискретных уровней с энергией связи меньше энергии ионизации (меньше 2-5 эВ). Испущенное антинейтрино налетает

на атом, испытывающий электронный захват при рассеянии на нем антинейтрино. Для прохождения такой реакции необходимо, чтобы энергия антинейтрино была равна энергии, требуемой для электронного захвата. Антинейтрино обладают непрерывным спектром энергий с некоторой дискретной составляющей, в результате чего антинейтрино с необходимой энергией будут наблюдаться достаточно редко. В дополнение к этому, антинейтрино обладают малым сечением взаимодействия, что сводит число событий электронного захвата к малым значениям. Единственная возможность – указать резонансный процесс, ведущий к усилению вероятности захвата. 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 вакансии в электронной оболочке атома

1. ОБОСНОВАНИЕ РЕЗОНАНСНЫХ РЕАКЦИЙ С АНТИНЕЙТРИНО

1.1 Дискретные значения энергии антинейтрино

Рассматривалась ситуация, при которой в результате бета-распада электрон вылетал из ядра вместе с антинейтрино, из-за чего они обладали непрерывным спектром кинетических энергий. Однако возможна ситуация, когда электрон не покидает атом, а переходит на одну из его электронных оболочек. В результате электрон будет обладать определенной энергией связи, что дает и определенную энергию антинейтрино [3]. Энергия эта будет равна сумме энергии бета-распада и энергии связи электрона. Тогда антинейтрино будет обладать непрерывным спектром энергий с некоторой дискретной составляющей (для электронов на разных электронных оболочках).

1.2 Возбуждение ядра

При бета-распаде дочернее ядро может остаться в возбужденном состоянии. В таком случае, энергия антинейтрино будет равна разности Q -величины и энергии возбуждения. При рассеянии антинейтрино на атоме так же возможна не только реакция электронного захвата, но и переход ядра в возбужденное состояние. Тогда энергия антинейтрино будет расходоваться на эти два процесса. Если энергия требуемая для электронного захвата совпадет с разностью энергии антинейтрино и энергии возбуждения ядра, то произойдет резонансная реакция электронного захвата. Именно такие резонансные реакции и ищутся в данной работе.

2. ПОИСК РЕЗОНАНСНЫХ РЕАКЦИЙ

Поиск пока что осуществляется по таблице изотопов и таблице энергий связи для электронов[3]. Рассматриваются два элемента испытывающих бета-распад: I-131 и Ce-141, которые используются ядерных реакторах в качестве топлива.

2.1 Поиск резонансной реакции для I-131

В результате бета-распада $^{131}_{53}\text{I}_{7/2+}$ переходит в возбужденное состояние $^{131}_{54}\text{Xe}_{11/2-}$ (состояние с минимальной энергией относительно нормального состояния)[2]. Q-величина равна 970.8 кэВ. А кинетическая энергия электрона и антинейтрино в таком распаде равна разности Q-величины и энергии возбужденного состояния: $E_{\nu_e^-} + E_{e^-} = 970.8 \text{ кэВ} - 163.931 \text{ кэВ} = 806.869 \text{ кэВ}$.

$$\beta^- : ^{131}_{53}\text{I} \longrightarrow ^{131}_{54}\text{Xe} + e^- + \bar{\nu}_e \quad (7)$$

$$Q_{\beta^-} = 970.8 \text{ кэВ} \quad (8)$$

$$E_{\nu_e^-} + E_{e^-} = 806.869 \text{ кэВ} \quad (9)$$

Также ядро в результате распада может оказаться в другом возбужденном состоянии с большей энергией, что сделает энергию вылетевших частиц меньше. Например, в результате распада может образоваться $^{131}_{54}\text{Xe}_{9/2-}$, энергия которого выше энергии нормального состояния на 364.49 кэВ. Таким образом, энергия электрона и антинейтрино будет равна $E_{\nu_e^-} + E_{e^-} = 970.8 \text{ кэВ} - 364.49 \text{ кэВ} = 606.31 \text{ кэВ}$. Если электрон не вылетает из атома, а оказывается на одной из внешних оболочек, то энергия антинейтрино будет приблизительно равна энергии распада, так как энергия связи для электронов на внешних оболочках тяжелых элементов мала 1. Значит энергия вылетающего антинейтрино $E_{\nu_e^-} = 606.31 \text{ кэВ}$. В результате поиска подходящего элемента для детектирования этого антинейтрино в таблице изотопов был найден $^{47}_{22}\text{Ti}_{5/2-}$, который электронным захватом переходит в $^{47}_{21}\text{Sc}_{7/2-}$.

$$^{47}_{22}\text{Ti} + e^- + \bar{\nu}_e \longrightarrow ^{47}_{21}\text{Sc} \quad (10)$$

Энергия необходимая для захвата равна 600.1 кэВ. Энергия связи электрона на K-оболочке для $^{47}_{21}\text{Sc}_{7/2-}$ равна 4.49 кэВ. Тогда энергия антинейтрино для прохождения такой реакции должна быть равна сумме этих энергий $Q_{\beta^-} + E_{\text{св}} = 600.1 \text{ кэВ} + 4.49 \text{ кэВ} = 604.59 \text{ кэВ}$. Расхождение с энергией налетающего антинейтрино $606.31 \text{ кэВ} - 604.59 \text{ кэВ} = 1.72 \text{ кэВ}$.

2.2 поиск резонансной реакции для Ce-141

В результате бета-распада $^{141}_{58}\text{Ce}_{7/2-}$ переходит в $^{141}_{59}\text{Pr}_{5/2+}$ Q-величина равна 580.7 кэВ[1]. Здесь также возможен переход в возбужденное состояние в результате распада. Например, в результате распада может образоваться $^{141}_{59}\text{Pr}_{7/2+}$, энергия которого выше энергии нормального состояния на 145.440 кэВ. Кинетическая энергия электрона и антинейтрино в таком распаде равна разности Q-величины и энергии возбужденного состояния: $E_{\nu_e^-} + E_{e^-} = 580.7 \text{ кэВ} - 145.440 \text{ кэВ} = 435.26 \text{ кэВ}$.

$$\beta^- : ^{141}_{58}\text{Ce} \longrightarrow ^{141}_{59}\text{Pr} + e^- + \bar{\nu}_e \quad (11)$$

$$Q_{\beta^-} = 580.7 \text{ кэВ} \quad (12)$$

$$E_{\bar{\nu}_e} + E_{e^-} = 435.26 \text{ кэВ} \quad (13)$$

Энергия антинейтрино при том, что электрон не вылетает из атома, так же примерно равна энергии распада 1. В результате поиска подходящего элемента для детектирования этого антинейтрино в таблице изотопов был найден ${}^{45}_{21}\text{Sc}_{7/2-}$, который в результате электронного захвата переходит в ${}^{45}_{20}\text{Ca}_{7/2-}$.



Q-величина для этого захвата 256.8 кэВ. Энергия связи электрона на К-оболочке для ${}^{45}_{20}\text{Ca}_{7/2-}$ равна 4.04 кэВ. Также ${}^{45}_{20}\text{Ca}_{7/2-}$ имеет возбужденное состояние с энергией 174.269 кэВ. Таким образом, если энергия налетающего антинейтрино будет равна сумме энергии необходимой для захвата, энергии связи электрона и энергии возбуждения, то произойдет резонансная реакция. $256.8 \text{ кэВ} + 174.269 \text{ кэВ} + 4.04 \text{ кэВ} = 435.109 \text{ кэВ}$. Расхождение с энергией налетающего антинейтрино $435.26 \text{ кэВ} - 435.109 \text{ кэВ} = 0.151 \text{ кэВ}$.

Таблица 1 — Энергии связи электрона для атома I и Ce на внешних оболочках (в кэВ)

Элемент	O_1	O_2	O_3
53 I	0.0136	0.0033	0.0033
58 Ce	0.0378	0.0198	0.0198

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исходя из вышеописанного, можно сделать вывод, что для процессов с антинейтрино возможны резонансные реакции, которые наилучшим образом подходят для изучения свойств антинейтрино. Были найдены принципиально возможные резонансные реакции. В дальнейшем планируется более точно определить резонансные реакции при помощи компьютерных технологий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] L.K. Peker. «Nuclear data sheets update for $A = 141$ ». В: Nuclear Data Sheets 63 (январь 1991), с. 573—646. ISSN: 0090-3752. URL: [http://dx.doi.org/10.1016/S0090-3752\(05\)80010-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0090-3752(05)80010-9).
- [2] Yu.V. Sergeenkov и др. «Nuclear Data Sheets Update for $A = 131$ ». В: Nuclear Data Sheets 72.4 (август 1994), с. 487—616. ISSN: 0090-3752. URL: <http://dx.doi.org/10.1006/ndsh.1994.1035>.
- [3] Kenneth D. Sevier. «Atomic electron binding energies». В: Atomic Data and Nuclear Data Tables 24.4 (октябрь 1979), с. 323—371. ISSN: 0092-640X. URL: [http://dx.doi.org/10.1016/0092-640X\(79\)90012-3](http://dx.doi.org/10.1016/0092-640X(79)90012-3).