

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 2025

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
1 Наложение фильтров	4
1.1 Отбор разрешенных переходов	4
1.2 Добавление позитронного распада	5
2 Сечение	6
2.1 Принцип расчета сечения	6
2.2 Работа программы	7
Заключение	8
Список литературы	9

ВВЕДЕНИЕ

В данной работе был усовершенствован процесс поиска резонансных реакций с антинейтрино, изложенный в предыдущих семестрах. В качестве источника антинейтрино рассматривается атом, испытывающий бета-распад (элемент в реакторе). Испущенное антинейтрино обладает непрерывным спектром энергий с выраженными пиками дискретной части спектра, образующейся в результате того, что электрон может не вылететь из атома, а сесть на его внешнюю оболочку, тогда антинейтрино будет обладать определенной энергией[4]. Антинейтрино налетает на атом, испытывающий электронный захват (элемент в детекторе) при рассеянии на нем антинейтрино. Для прохождения такой реакции необходимо, чтобы энергия реакций совпадала с учетом энергии отдачи ядра (произошел резонанс энергий). Сначала эти реакции искались вручную. В прошлом семестре была написана программа на языке Fortan, которая искала эти самые резонансные реакции за нас. В этом же семестре программа была дополнена возможностью считать сечение реакций и условиями отбора по квантовым числам, что значительно уменьшило выдаваемое программой количество реакций, оставив только наиболее вероятные.

1. НАЛОЖЕНИЕ ФИЛЬТРОВ

1.1 Отбор разрешенных переходов

Вначале был добавлен отбор по изменению углового момента ядра и четности. Известно, что амплитуда реакции зависит от полного момента электрона и антинейтрино как

$$M_{EC} \sim (p_e R)^{j_e} (p_\nu R)^{j_\nu},$$
$$p_e R \sim p_\nu R \sim 40 \text{ keV } 5 \text{ fm} = \frac{40 \text{ keV} \times 5}{200 \text{ MeV}} = 10^{-3} \ll 1.$$

Из этого видно, что вероятность электронного захвата будет максимальной при минимальных моментах электрона и антинейтрино. Минимальными моментами для электрона и антинейтрино являются значения их спинов, то есть орбитальные моменты в таком случае равны 0, полный орбитальный момент, который имеют электрон и нейтрино так же равен 0. Такие переходы называются разрешенными. В зависимости от ориентации спинов электрона и нейтрино друг относительно друга, спин ядра может меняться либо на 0 (противонаправленные спины), либо на 1 (сонаправленные спины). В программу было добавлено именно такое условие: $\Delta I = 0, \pm 1$. Переходы для спина ядра 0 в 0 запрещены, что также учитывается в программе. Для отбора еще более вероятных событий в программе были отключены возбуждения ядер в начальном и конечном состоянии (рассматривались только распады ядер из основного состояния и распады в основное состояние), что уменьшило количество реакций в 300 раз, давая намного более вероятные реакции.

1.2 Добавление позитронного распада

Далее были рассмотрены дочерние элементы в детекторе (элементы, получаемые в результате вынужденного электронного захвата). Добавлено условие на возможность распада конечного ядра с испусканием позитрона.

$$(A, Z + 1) + e^- + \bar{\nu}_e \longrightarrow (A, Z) \quad (1)$$

$$(A, Z) \longrightarrow (A, Z - 1) + e^+ + \nu_e \quad (2)$$

В результате последней реакции заряд одного из электронов остается нескомпенсированным и он вылетает из оболочки. Добавленное в программу условие заключается в превышении энергии начального ядра (образуемого в результате вынужденного электронного захвата) над суммой энергий конечного ядра (образуемого в результате позитронного распада) и вылетевшего позитрона и электрона.

$$M(A, Z) > M(A, Z - 1) + 2m_e \quad (3)$$

Такие реакции являются эффективным способом регистрации событий за счет аннигиляции вылетевшего позитрона с образованием гамма-квантов.

Примеры подобных реакций в детекторе, посчитанных программой:

$${}^{168}_{70}\text{Yb} + e^- + \bar{\nu}_e \longrightarrow {}^{168}_{69}\text{Tm} \quad (4)$$

$${}^{168}_{69}\text{Tm} \longrightarrow {}^{168}_{68}\text{Er} + e^+ + \nu_e \quad (5)$$

$${}^{112}_{50}\text{Sn} + e^- + \bar{\nu}_e \longrightarrow {}^{112}_{49}\text{In} \quad (6)$$

$${}^{112}_{49}\text{In} \longrightarrow {}^{112}_{48}\text{Cd} + e^+ + \nu_e \quad (7)$$

Возможность этих реакций была проверена по таблицам [1], [5]

2. СЕЧЕНИЕ

2.1 Принцип расчета сечения

Основное добавление в программу в этом семестре - это расчет сечения реакции вынужденного электронного захвата. Программа работает со всеми возможными полными моментами переданными ядру

$$|j_\nu - j_e| \leq J_t \leq j_\nu + j_e \quad (8)$$

Рассматриваются электроны только с S орбиталями (1S, 2S и т.д.), для которых орбитальный момент равен 0. С учетом того, что суммарный спин электрона и антинейтрино может быть равен 0 или 1 ($s = 0, 1$), программа перебирает орбитальный момент L_t в пределах:

$$|J_t - s| \leq L_t \leq J_t + s \quad (9)$$

Для каждого случая считается сечение по формуле [3]

$$\sigma = \frac{1}{4} G_\beta^2 C_x \beta_x^2 \quad (10)$$

где $G_\beta = G_F \cos \theta_C$, G_F - константа Ферми, θ_C - угол Кабиббо, C_x - shape-factor

$$C_x(p_{\nu_x}) = \sum_{K, k_\nu} M_K(k_x, k_\nu) + \text{sign}(\kappa_x) m_K(k_x, k_\nu)^2 \quad (11)$$

$$M_k(k_x, k_\nu) + \text{sign}(\kappa_x) m_K(k_y, k_\nu) = (p_x R)^{k_x-1} (p_y R)^{k_\nu-1} \sum_{Ls} F_{KLS} C_{KLS}(k_x, k_\nu) \quad (12)$$

$$\begin{aligned} C_{KLS}(k_x, k_\nu) = & \delta_{k_x+k_\nu-2, L} \sqrt{\frac{(2K-2)!!}{(2k_x-1)!(2k_\nu-1)!(2K-1)!!}} \\ & \times \left[\delta_{L, K-1} \delta_{s, 1} + \delta_{L, K} \delta_{s, 0} \sqrt{\frac{2K(K+1)}{(2k_x-1)(2k_\nu-1)(2K+1)}} \right. \\ & \left. + \delta_{L, K} \delta_{s, 1} (k_x - k_\nu) \sqrt{\frac{2}{(2k_x-1)(2k_\nu-1)(2K+1)}} \right] \end{aligned}$$

Для волновых функций электронов в нуле используются значения рассчитанные методом Дирака-Фока-Слатера из таблиц [2]

2.2 Работа программы

Ниже приведена блок-схема программы, отображающая основные участки ее алгоритма.

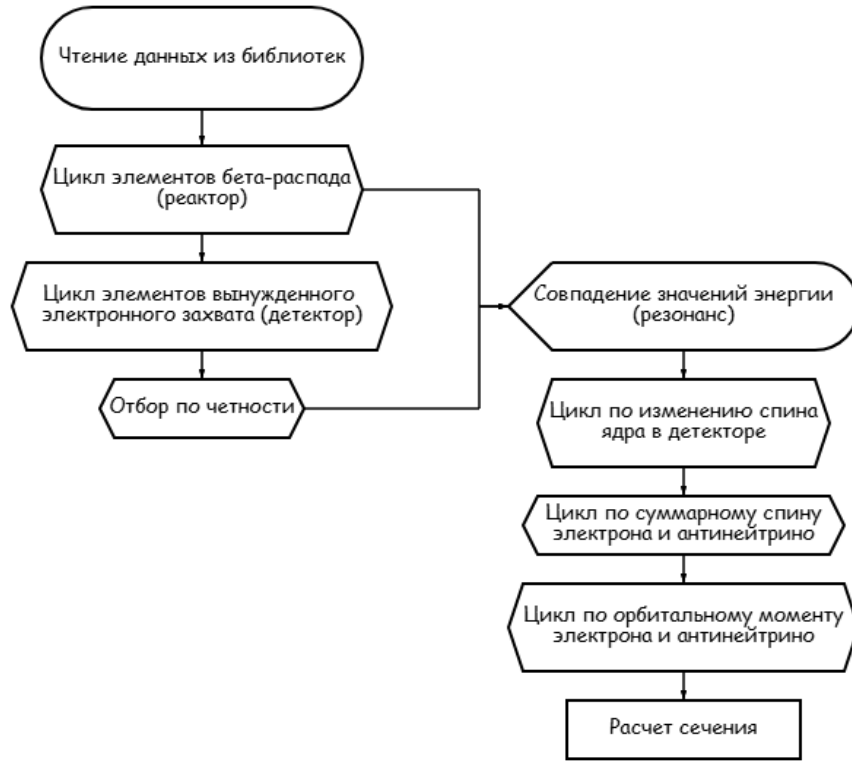


Рисунок 1 — Блок-схема алгоритма программы

Далее идет таблица с результатами работы программы для некоторых элементов

El_R	El_D	Q_{diff}	ΔQ	σ	K	L	s
127SB	81BR	$-0.60015220 * 10^1$	$0.61276021 * 10^1$	$0.37169409 * 10^{-40}$	1	1	0
32SI	106CD	$0.36378856 * 10^1$	$0.77036629 * 10^1$	$0.33976341 * 10^{-40}$	1	1	0
129I	106CD	$-0.18580020 * 10^1$	$0.83579807 * 10^1$	$0.56779853 * 10^{-42}$	1	1	0
141CE	64ZN	$0.13105929 * 10^1$	$0.36022062 * 10^1$	$0.39219057 * 10^{-42}$	1	1	0
151SM	63CU	$0.13062281 * 10^1$	$0.35577135 * 10^1$	$0.35553723 * 10^{-42}$	1	1	0
147PM	32P	$-0.20132034 * 10^1$	$0.34140401 * 10^1$	$0.19563427 * 10^{-42}$	1	1	0

Таблица 1 — Примеры нескольких реакций, рассчитанных программой

Где El_R - элемент в реакторе, El_D - элемент в детекторе, Q_{diff} - разность энергий процессов (кэВ), ΔQ - экспериментальная ошибка (кэВ), σ - сечение реакции, K - изменение спина ядра, L - орбитальный момент электрона и антинейтрино, s - спин электрона и антинейтрино

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе была усовершенствована программа на языке программирования Fortran для автоматического нахождения резонансных процессов с антинейтрино, которые наилучшим образом подходят для изучения их свойств. Были проверены реакции с образованием в детекторе ядра, распадающегося с образованием позитрона, которые могут служить эффективным способом регистрации событий. Были добавлены условия для разрешенных переходов, отбор по четности и разности спинов конечного и начального ядра, что позволяет выбирать наиболее вероятные реакции. Был добавлен расчет сечения реакции вынужденного электронного захвата. В дальнейшем планируется включить вероятность бета-распада в связанное состояние, чтобы рассчитать вероятность всей цепочки реакций и выяснить сколько ожидается событий в день на каждую пару на один килограмм источника и один килограмм детектора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Coral M. Baglin. «Nuclear Data Sheets for $A = 168$ ». В: Nuclear Data Sheets 111.7 (июль 2010), с. 1807—2080. ISSN: 0090-3752. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.nds.2010.07.001>.
- [2] I.M. Band и M.B. Trzhaskovskaya. «Electron-wave-function expansion amplitudes near the origin calculated in the Dirac-Fock-Slater and Dirac-Fock potentials». В: Atomic Data and Nuclear 35.1 (июль 1986), с. 1—13. ISSN: 0092-640X. URL: [http://dx.doi.org/10.1016/0092-640X\(86\)90027-6](http://dx.doi.org/10.1016/0092-640X(86)90027-6).
- [3] Alfredo G. Cocco, Gianpiero Mangano и Marcello Messina. «Low energy antineutrino detection using neutrino capture on electron capture decaying nuclei». В: Physical Review D 79.5 (апрт 2009). ISSN: 1550-2368. URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.79.053009>.
- [4] Kenneth S. Krane и William G. Lynch. «Introductory Nuclear Physics». В: Physics Today 42.1 (январь 1989), с. 78—78. ISSN: 1945-0699. URL: <http://dx.doi.org/10.1063/1.2810884>.
- [5] L.K. Peker. «Nuclear Data Sheets for $A = 112$ ». В: Nuclear Data Sheets 29.4 (апр. 1980), с. 587—651. ISSN: 0090-3752. URL: [http://dx.doi.org/10.1016/S0090-3752\(80\)80040-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0090-3752(80)80040-8).