

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 Программа для поиска резонансных реакций	4
1.1 Алгоритм работы программы	4
1.2 Результат для некоторых элементов	5
2 Проверка найденных резонансных реакций	6
Заключение	7
Список литературы	8

ВВЕДЕНИЕ

В данной работе осуществляется поиск резонансных реакций с антинейтрино. 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[3]. Антинейтрино налетает на атом, испытывающий электронный захват (элемент в детекторе) при рассеянии на нем антинейтрино. Для прохождения такой реакции необходимо, чтобы энергия реакций совпадала (произошел резонанс энергий). Но, в отличие от прошлого семестра, этой работе теоретическая часть резонансных реакций была дополнена энергией отдачи ядра, а также была написана программа на языке Fortan, которая будет искать эти самые резонансные реакции за нас.

1. ПРОГРАММА ДЛЯ ПОИСКА РЕЗОНАНСНЫХ РЕАКЦИЙ

1.1 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. 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 и другие данные о ядрах). 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.

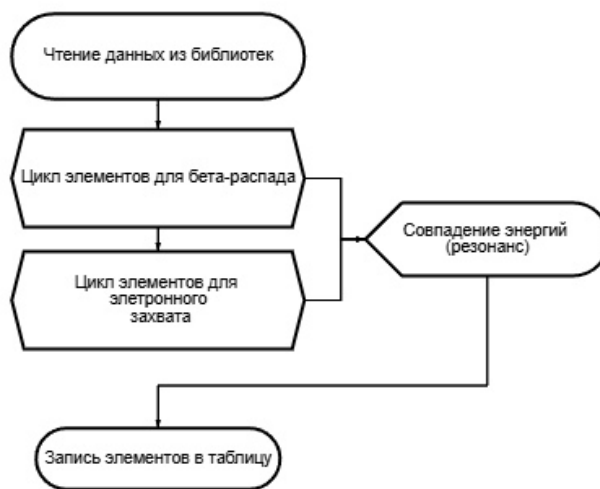


Рисунок 1 — Блок-схема алгоритма программы

1.2 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}	ΔQ	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	$-0.987 * 10^4$

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, ΔQ - экспериментальная ошибка, v_{pl} - скорость системы реактора.

2. ПРОВЕРКА НАЙДЕННЫХ РЕЗОНАНСНЫХ РЕАКЦИЙ

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



$$Q_{\beta^{-}} = 3670 \text{ кэВ} \quad (2)$$

Энергия возбуждения дочернего ядра $E_R^* = 2911.90 \text{ кэВ}[1]$ Тогда энергия вылетающих антинейтрино и электрона с учетом отдачи ядра равна

$$E_{\bar{\nu}_e} + E_{e^{-}} = Q_{\beta^{-}} - \frac{(Q_{\beta^{-}} - E_R^*)^2}{2M_{Te}c^2} - E_R^* = 758.1 \text{ кэВ} \quad (3)$$

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.

$$E_{\bar{\nu}_e} = 758.1 \text{ кэВ} \quad (4)$$

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



Энергия необходимая для электронного захвата $Q_{\beta^{-}} = 194 \text{ кэВ}[2]$. Энергия связи электрона $E_{e^{-}} = 5.1881 \text{ кэВ}[4]$. У ядра $^{129}_{53}\text{I}$ есть возбужденное состояние с энергией $E_D^* = 559.62 \text{ кэВ}$. Тогда энергия необходимая для резонанса. $Q_{\beta^{-}} + E_D^* + E_{e^{-}} = 194 \text{ кэВ} + 5.1881 \text{ кэВ} + 559.62 \text{ кэВ} = 758.8 \text{ кэВ}$. 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 кэВ значения совпадают.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе была написана программа на языке программирования Fortran для автоматического нахождения резонансных процессов с антинейтрино, которые наилучшим образом подходят для изучения их свойств. При помощи нее были найдены некоторые элементы для резонансных реакций, для одной пары из которых резонанс энергий был проверен "вручную и резонанс возможен в пределах указанной экспериментальной ошибки. Таким образом, эта программа облегчает и ускоряет поиск, а также находит возможные резонансные реакции с любой заданной точностью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] R.L. Auble. «Nuclear data sheets for $A = 126$ ». В: Nuclear Data Sheets 9.1 (янв. 1973), с. 125—155. ISSN: 0090-3752. URL: [http://dx.doi.org/10.1016/s0090-3752\(73\)80031-6](http://dx.doi.org/10.1016/s0090-3752(73)80031-6).
- [2] D.J. Horen. «Nuclear data sheets for $A = 129$ ». В: Nuclear Data Sheets 8.2 (авг. 1972), с. 123—163. ISSN: 0090-3752. URL: [http://dx.doi.org/10.1016/S0090-3752\(72\)80018-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0090-3752(72)80018-8).
- [3] Kenneth S. Krane и William G. Lynch. «Introductory Nuclear Physics». В: Physics Today 42.1 (янв. 1989), с. 78—78. ISSN: 1945-0699. URL: <http://dx.doi.org/10.1063/1.2810884>.
- [4] Kenneth D. Sevier. «Atomic electron binding energies». В: Atomic Data and Nuclear Data Tables 24.4 (окт. 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).