

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ**

«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

**ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ**

Направление подготовки: 14.04.02 Ядерные физика и технологии
Основная профессиональная образовательная программа: Программная инженерия и
анализ данных для физики высоких энергий

**«Прогнозирование энергетического спектра из реакции рассеяния
дейтрона на ядре ${}^9\text{Be}$ »**

Выполнил:
студент гр. М23-112

(подпись, дата)

Райдун С.К.

Руководитель НИРС:

(подпись, дата)

Старостин В.И.

Москва, 2023 г.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
Глава 1 $\Delta E - E$ метод идентификации заряженных частиц	5
Глава 2 Разработка расчетной программы	7
Глава 3 Результаты работы программы	12
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	19
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	20

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время большой научный интерес представляют так называемые "экзотические" ядра. Данный термин впервые относился к ядрам, обладающим гало [1, 2], однако сегодня этот термин включает в себя ядра, лежащие на границе стабильности и вне ее. Ядра, в которых обнаружено нуклонное гало, обладают увеличенным радиусом. Они представляют собой двухкомпонентную систему из остова и одного или нескольких валентных нуклонов, находящихся от него на расстоянии 2-3 его радиусов [2, 3, 5].

Одним из способов изучения свойств ядер являются эксперименты по рассеянию частиц. Существует множество методов регистрации продуктов реакции. При исследовании реакций с легкими частицами часто используется хорошо известный метод $\Delta E - E$, суть которого заключается в измерении удельных потерь энергии в прострельном (ΔE) детекторе и детекторе полного поглощения. В результате измерений получают двумерный спектр, состоящий из семейств гипербол, каждая из которых соответствует частице с определенным значением массового числа и заряда. Сумма событий в ΔE и E детекторах позволяет получить одномерный спектр.

Одной из основных проблем при анализе одномерного спектра является идентификация энергетических уровней в сплошном спектре. Это связано с достаточно большой шириной энергетических уровней, что приводит к их перекрыванию.

Решением данной проблемы может являться моделирование одномерных энергетических спектров. Сопоставление таких спектров с экспериментальными позволит узнать расположение энергетических уровней, получить информацию о наличии примесей в детекторах, произвести калибровку детекторов, а также оценить фон в расчетной программе.

Целью данной работы является построение одномерного энергетического спектра. В качестве тестовой реакции была выбрана реакция

рассеяния дейтронов с энергией 23 МэВ на ядре ${}^9\text{Be}$. Для достижения поставленной цели необходимо решить ряд задач, а именно:

1. Разработать схему работы программы, генерирующей спектр реакции;
2. Написать расчетную программу с помощью разработанной схемы;
3. Сравнить результаты работы программы с известными значениями спектров реакции.

Практическая значимость результатов работы заключается в возможности определения положения энергетических уровней, наличия примесных элементов в составе мишени и правильной калибровки детекторов. Данная программа позволит увеличить скорость обработки полученных данных.

Глава 1 $\Delta E - E$ метод идентификации заряженных частиц

При взаимодействии достаточно энергичных частиц с ядрами мишени всегда открыто множество каналов, число которых сильно возрастает при переходе к более тяжелым налетающим частицам. В этом случае регистрацию интересующих продуктов реакций и рассеяния приходится вести в условиях большого фона других заряженных частиц. Для этого нужна система надежного разделения изотопов H, He, Li и т.д., при помощи которой можно выделить интересующий сорт частиц.

Апробацию работы программы было решено сделать на основе расчетных спектров с имеющимися экспериментальными данными по рассеянию дейтронов на ядре ${}^9\text{Be}$. Набор экспериментальных данных был получен в [4]. Выбор детекторов определялся особенностями эксперимента. Для определения дифференциального сечения рассеяния $d + {}^9\text{Be}$ при энергии 23 МэВ был использован широко известный метод идентификации заряженных частиц, основанный на одновременном измерении двух параметров – удельной потери энергии на ионизацию dE/dx (ΔE) в прострельном детекторе и полной энергии E в детекторе полного поглощения [5].

В качестве ΔE -детектора используют тонкие кремниевые детекторы, а также ионизационные камеры и пропорциональные счетчики, в качестве детектора полного поглощения - кремниевые детекторы или детекторы из сверхчистого германия HpGe . Потери энергии в ΔE детекторе:

$$\Delta E = (dE/dx)d \quad (1)$$

где dE/dx - удельные потери энергии в ΔE детекторе, d - его толщина.

В основе ΔE - E – метода лежит приближенное соотношение между энергией заряженной частицы и удельной ионизацией:

$$dE/dx = k * M * Z^2/E \quad (2)$$

Здесь M и Z – масса и заряд налетающей частицы, k – постоянная, которая приблизительно одинаковая для всех сортов частиц, E – энергия рассеянной частицы. Из формулы видно, что если одновременно измерять E и $(dE/dx)d$, то каждый сорт частиц в соответствии с M и Z ложится на свою гиперболу в координатном пространстве $E - dE/dx$. В качестве мишеней использовались тонкие самоподдерживающиеся пленки ${}^9\text{Be}$ толщиной 100 мкг/см^2 . Мишени содержат примеси ${}^{12}\text{C}$ и ${}^{16}\text{O}$. Общее содержание примесей не превышает 5%.

В качестве ΔE детектора использовался 16-полосный стриповый детектор размером $50 \times 50 \text{ мм}$ толщиной 300 мкм , а в качестве E – использовался полупроводниковый детектор толщиной $1,5 \text{ мм}$. Типичное энергетическое разрешение полупроводниковых детекторов составляет не менее 1,0% для α -частиц с энергией $5,49 \text{ МэВ}$, в результате общее энергетическое разрешение составило около $200\text{-}300 \text{ кэВ}$.

Глава 2 Разработка расчетной программы

В качестве языка программирования был выбран язык Python, как широко используемый при обработке экспериментальных данных в лаборатории. Рассмотрим принципиальную схему программы.

2.1 Принципиальная схема расчетной программы

Блок-схема программы, осуществляющей построение одномерных спектров, представлена на рисунке 1:

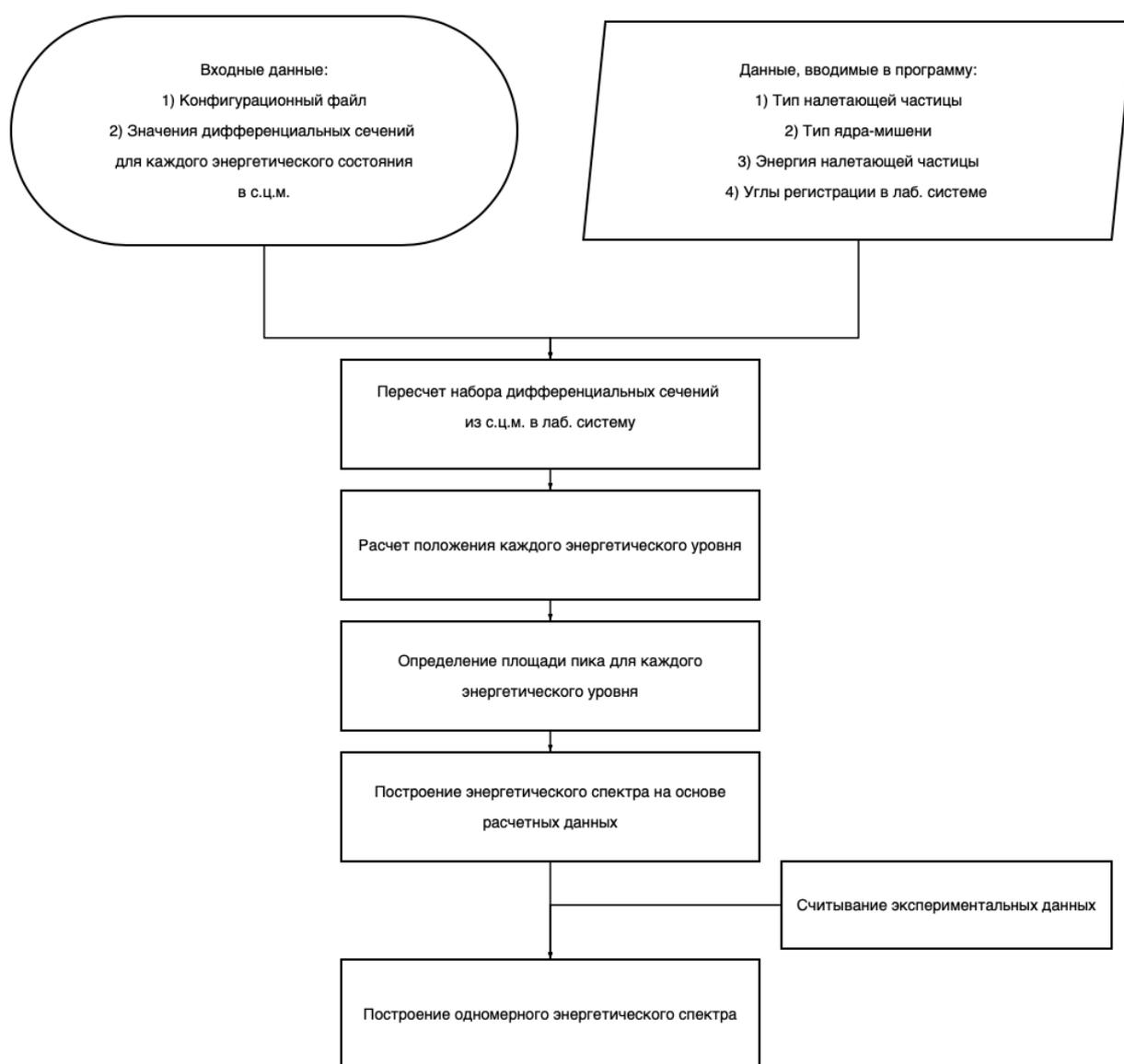


Рисунок 1. Блок-схема расчетной программы

где с.ц.м. - система центра масс, лаб. - лабораторная система.

Рассмотрим каждую из составляющих блок схемы.

2.1.1 Входные данные

В качестве входных данных для программы выбираются угловые распределения дифференциальных сечения для каждого энергетического уровня. Ими могут быть как литературные сечения при близкой энергии, так и рассчитанные теоретически в том или ином модельном представлении. Для рассеяния ${}^9\text{Be}(d,d){}^9\text{Be}^*$ набор дифференциальных сечений для упругого рассеяния был получен в рамках оптической модели в программе "SPI-GENOA An Optical Model Code". Угловые распределения для неупругого рассеяния были рассчитаны с помощью метода искаженных волн (DWBA) в [4].

Конфигурационный файл содержит полную информацию об эксперименте:

1. Интенсивность пучка налетающих частиц;
2. состав и толщина мишени;
3. диапазон углов, в которых производилась регистрация частиц;
4. собственная ширина состояний ${}^9\text{Be}$ и аппаратная ширина эксперимента;
5. телесный угол детекторов.

Конфигурационный файл позволяет найти площадь пика под графиком каждого энергетического уровня.

2.1.2 Данные, вводимые в программу

Функционал программы позволяет смоделировать большое количество реакций. Это достигается следующим:

1. Пользователь имеет возможность выбора типа налетающих частиц, использующихся в качестве пучка в эксперименте;
2. пользователь имеет возможность выбора типа мишени;
3. пользователь может выбрать энергию налетающей частицы;
4. пользователь имеет возможность задать область углов, в которой будут регистрироваться продукты взаимодействия налетающей частицы с частицами мишени.

На основе введенных данных производится расчет энергетического спектра реакции. Сам выбор взаимодействующих частиц основан на библиотеках легких ядер, подготовленных в лаборатории ядерных структур НИЦ «Курчатовский институт». С помощью них удается спрогнозировать возможные каналы реакции, а также рассчитать энергии рассеянной частицы и мишени.

2.1.3 Пересчет угловых распределений из с.ц.м. в лабораторную систему

Набор дифференциальных сечений был получен в системе центра масс. Одной из особенностей программы является возможность пересчета дифференциальных сечений, получаемых в ходе реальных экспериментов, в лабораторную систему координат. Релятивистские поправки, из-за малых энергий налетающих ядер, в программе не учитываются.

Конвертирование дифференциальных сечений из системы центра масс в лабораторную систему производился с помощью следующих формул:

$$\sigma_{сцм}(\theta_{сцм}) = \sigma_{лск}(\theta_{лск}) \cdot G(x, \theta_{лск}) \quad (3)$$

где G - переводной коэффициент для дифференциальных сечений:

$$G(x, \theta_{лск}) = \left[1 - x^2 \sin^2(\theta_{лск}) \right]^{\frac{1}{2}} \cdot \left[x \cdot \cos(\theta_{лск}) + \left[1 - x^2 \sin^2(\theta_{лск}) \right]^{\frac{1}{2}} \right]^{-2} \quad (4)$$

параметр x определяется следующим образом:

$$x = \left(\frac{V_{aA}}{v_{aцм}} \right)^2 = \frac{ab}{AB} \cdot \left[1 + \frac{a + A}{A} \cdot \frac{Q}{E_0} \right]^{-1} \quad (5)$$

где под a, b, A, B подразумеваются атомные массы частиц в реакции $a + A \rightarrow b + B$, Q – энергетический выход реакции, E_0 – энергия налетающей частицы в лабораторной системе координат.

Угол между осью рассеяния и импульсом рассеянной частицы в лабораторной системе координат имеет вид:

$$\theta_{лск} = \arctg \left(\frac{\sin(\theta_{цм})}{x + \cos(\theta_{цм})} \right) \quad (6)$$

Рассмотрим следующий блок программы.

2.1.4 Расчет положения каждого энергетического уровня

Как упоминалось выше, расчет энергетического выхода реакции производился на основе написанных ранее библиотек для легких частиц. Они содержат информацию о атомных массах ядер, энергии отделения нуклонов, а также информацию о каждом энергетическом уровне ядра. Блок расчета положения энергетических уровней является ключевым в данной программе, так как расчетное положение уровней позволяет правильно проанализировать

экспериментальные данные. Проверка корректности определения положения уровня определялась сравнением результатов с программой Lise++[6].

2.1.5 Определение площади пика для каждого энергетического уровня

Определение площади каждого пика под графиком энергетических уровней осуществлялось по следующей формуле:

$$\Sigma = \frac{d\sigma}{d\Omega} * I * \Omega * N * 10^{-27} \quad (7)$$

где Σ - количество событий в пике, I - интенсивность пучка, Ω - телесный угол, N - число ядер в мишени.

2.1.6 Построение энергетического спектра

Для описания возбужденных состояний в энергетическом спектре было использовано распределение Гаусса. Это связано с хорошей сходимостью с экспериментальными данными по критерию χ^2 . Формула для описания возбужденного состояния в энергетическом спектре:

$$y = y_0 + \frac{A}{w * \sqrt{\pi/2}} * \exp(-2 * (\frac{x - x_c}{w})^2) \quad (8)$$

где A - площадь пика, w - суммарная ширина энергетического уровня и аппаратной ширины, x_c - положение пика на энергетическом спектре.

Положение пика определяется из кинематических расчетов.

2.1.7 Картина энергетического спектра

Энергетический спектр для каждого возбужденного состояния частиц определяется наложением соответствующих гауссовых распределений на один график. Полный энергетический спектр возбужденных состояний получается в результате фитирования по всем возбужденным состояниям. В программе предусмотрена возможность считывания экспериментальных данных, что позволяет сразу сравнить результаты работы программы с экспериментальными данными.

Глава 3 Результаты работы программы

В качестве тестовой реакции для проверки работы программы было выбрано рассеяние дейтронов с энергией 23 МэВ на ядре ${}^9\text{Be}$. Набор угловых распределений дифференциальных сечений рассеяния был получен как для основного состояния, так и для возбужденных состояний ядра ${}^9\text{Be}$ в [4] и использован нами.

Экспериментальные данные для угла рассеянной частицы 31.2 град. показаны на рисунке 2.

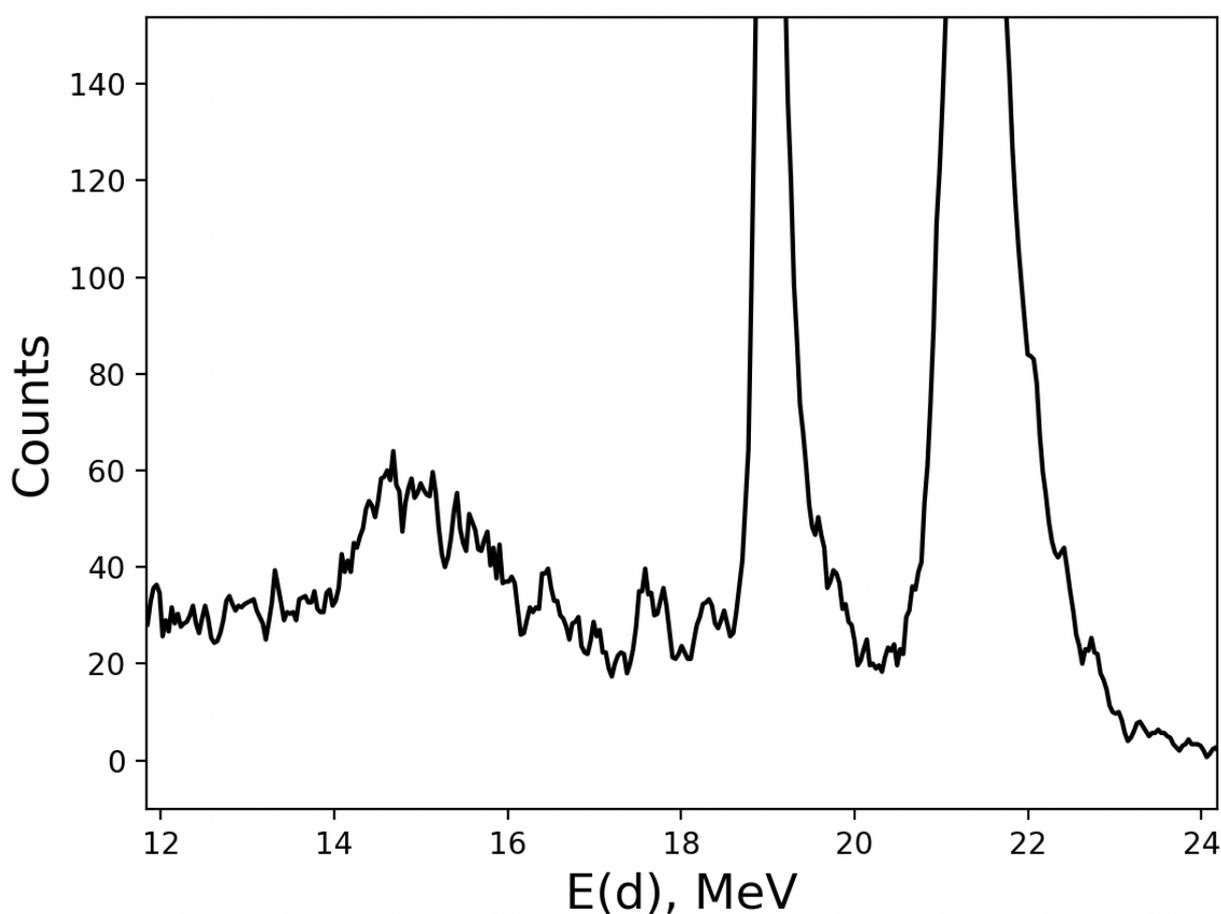


Рисунок 2. Экспериментальный одномерный энергетический спектр рассеяния дейтронов с энергией 23 МэВ и угле регистрации 31.2 град.

Как видно из рисунка 2, определение площади пика каждого возбужденного состояния вручную достаточно затруднительно. Приведем пример обработанного энергетического спектра. Картина спектра представлена на рисунке 3.

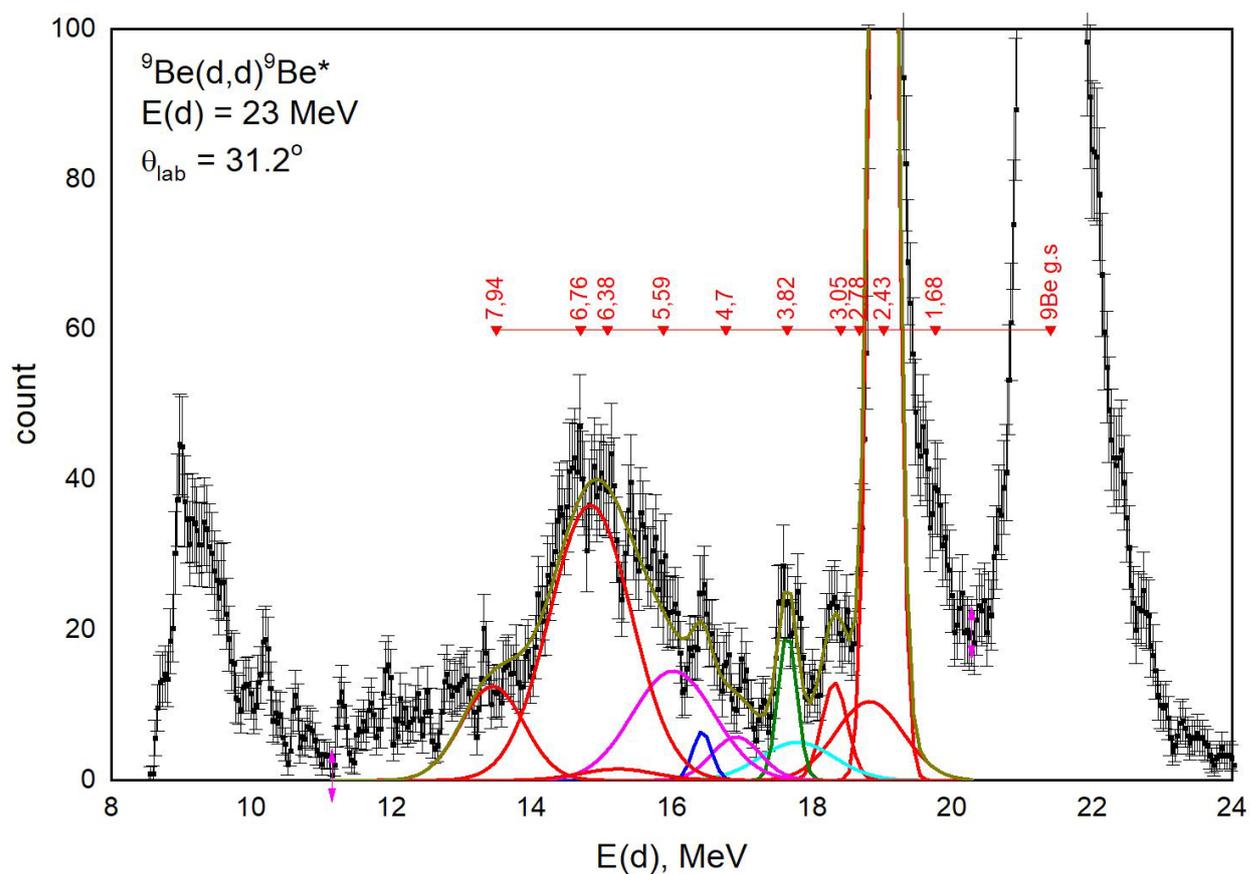


Рисунок 3. Обработанный вручную экспериментальный энергетический спектр рассеяния
 Источник: [4]

Рассмотрим результаты работы программы. Полученный при угле 31.2° энергетический спектр представлен на рисунке 4.

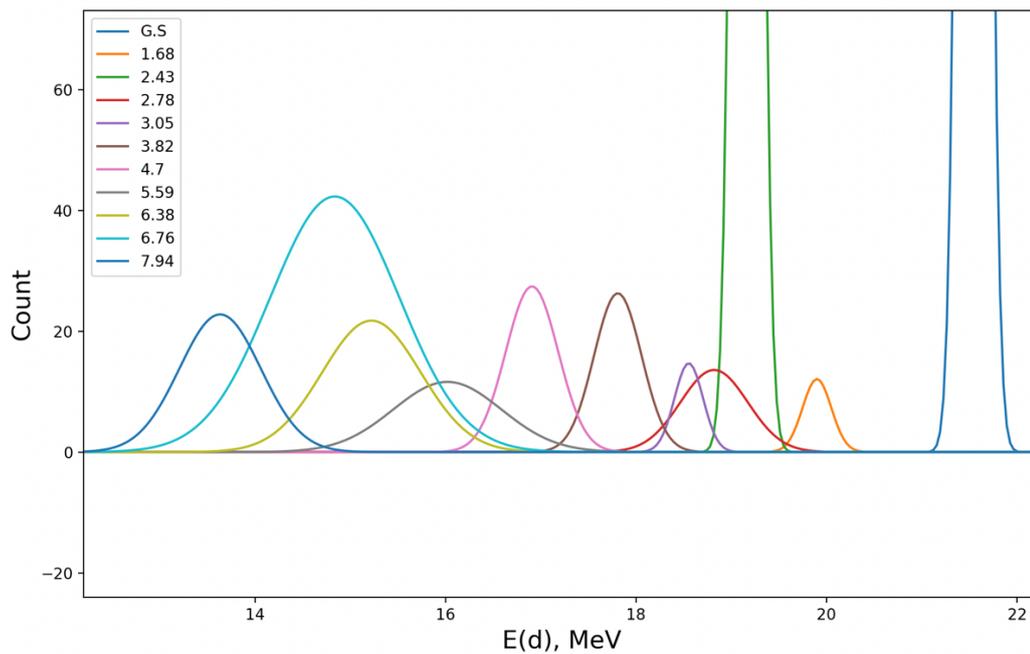


Рисунок 4. Энергетический спектр реакции ${}^9\text{Be}(d,d){}^9\text{Be}^*$

Суммарный спектр по отдельным пикам (результатирующий) представлен на рисунке 5. Ширина основного возбужденного состояния отличается из-за наличия примесных элементов.

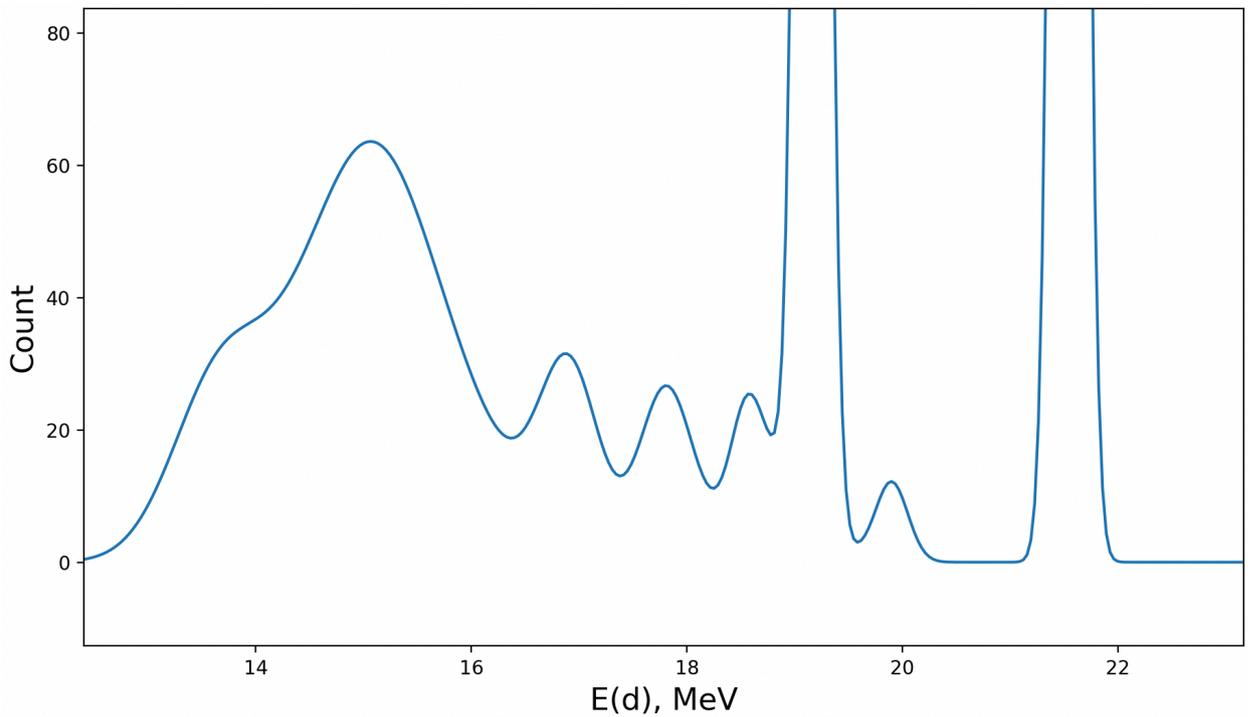


Рисунок 5. Результатирующий энергетический спектр

Рассмотрим, как накладывается результирующий энергетический спектр, полученный в ходе работы программы, на экспериментальный спектр. Результат представлен на рисунке 6.

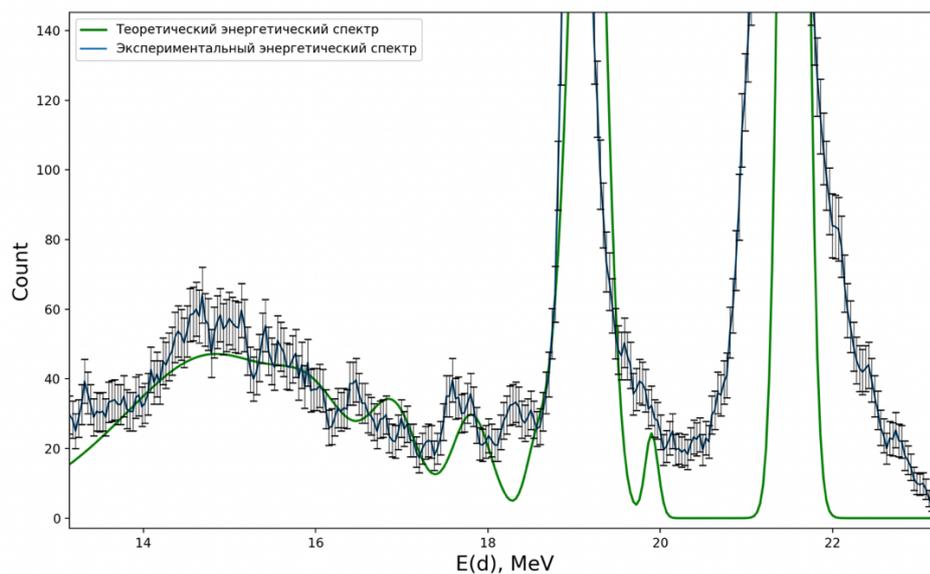


Рисунок 6. Наложение экспериментального энергетического спектра на расчетный.

Отклонения в ширине в основном состоянии обусловлены наличием примесных составляющих.

Обработанный вручную энергетический спектр при другом угле 40.5° имеет вид, представленный на рисунке 7.

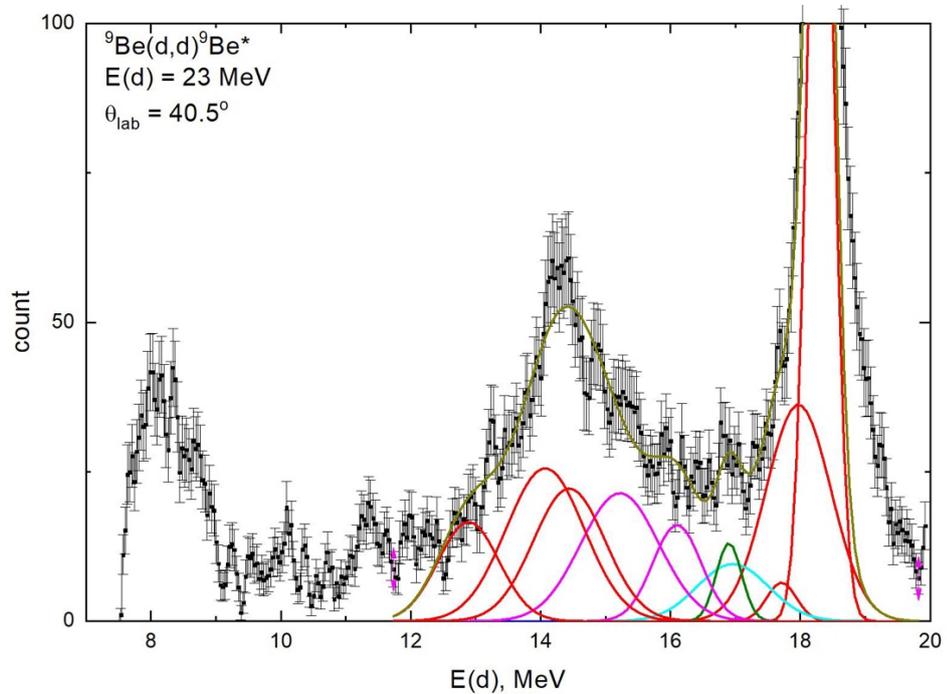


Рисунок 7. Обработанный вручную экспериментальный энергетический спектр при угле регистрации 40.5° . Источник: [4]

Рассмотрим результаты работы программы при угле регистрации 40.5° .

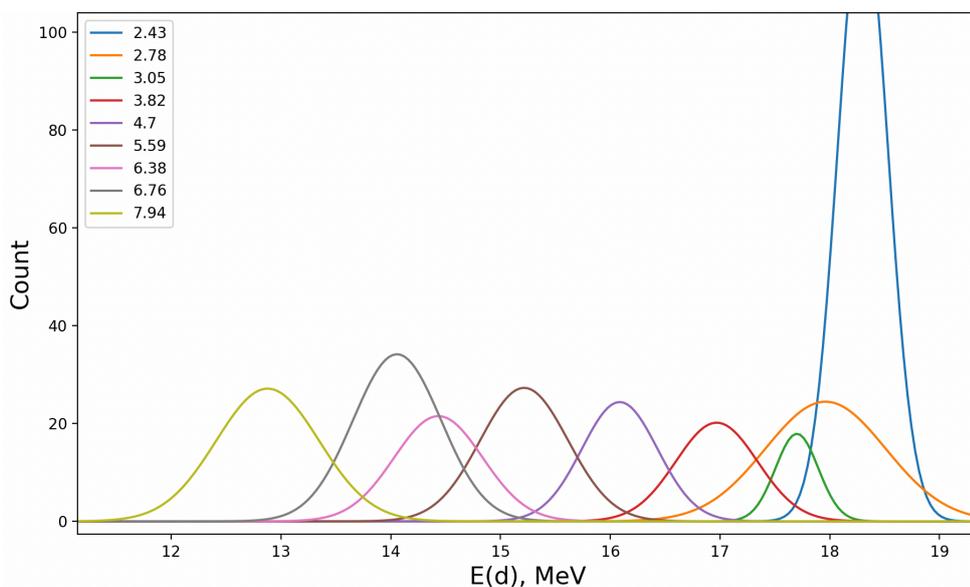


Рисунок 8. Результаты работы программы при угле 40.5°

Наложение полного энергетического спектра на экспериментальные данные показано на рисунке 9.

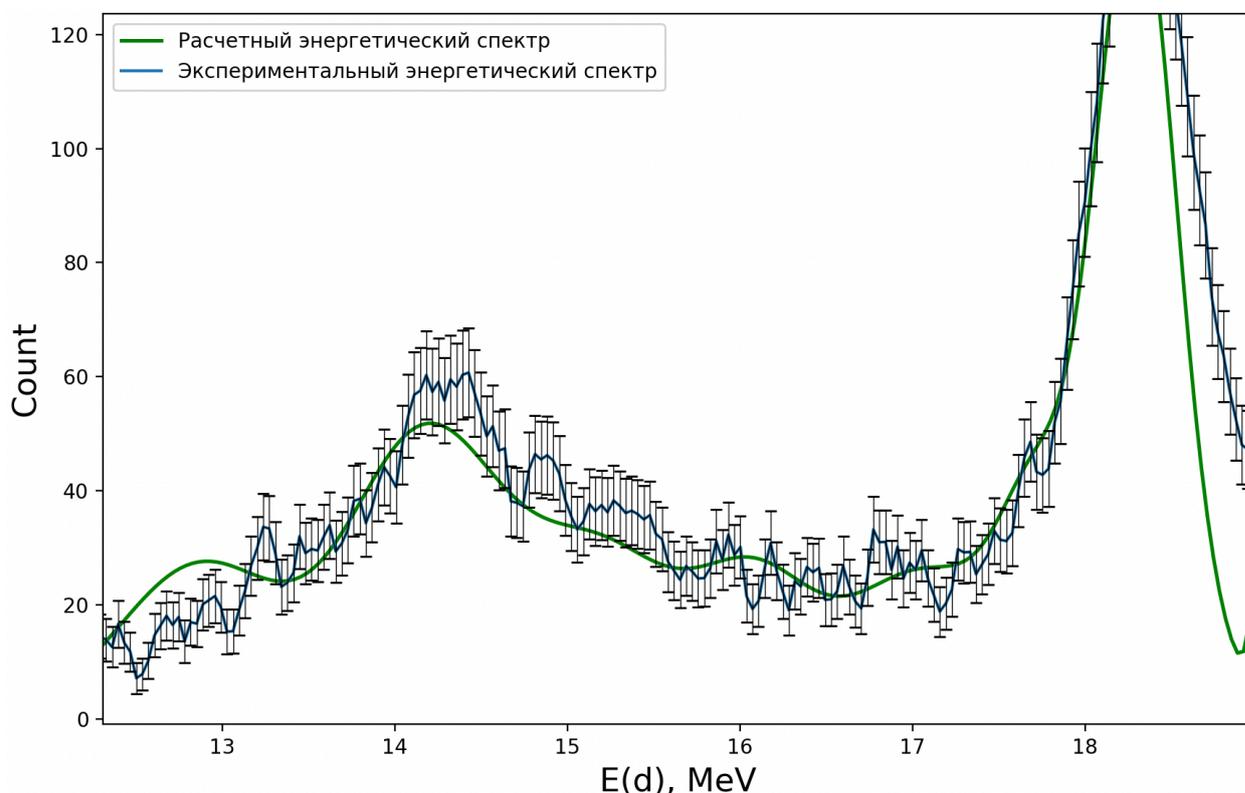


Рисунок 9. Наложение экспериментального энергетического спектра на расчетный при угле регистрации 40.5°

Как видно из рисунка, ход кривой и положения пиков с хорошей точностью совпадают с экспериментальными данными. Незначительные различия между экспериментальными данными и результатами, полученными с помощью расчетной программы, объясняются тем, что энергетические пики, обнаруженные в ходе эксперимента, имеют некоторое смещение по сравнению с теоретическими значениями, что вызвано наличием примесей в мишени. Однако основной задачей данной работы является точное установление положения этих пиков.

Таким образом, обработанные с помощью программы экспериментальные данные имеют вид, представленный на рисунке 10.

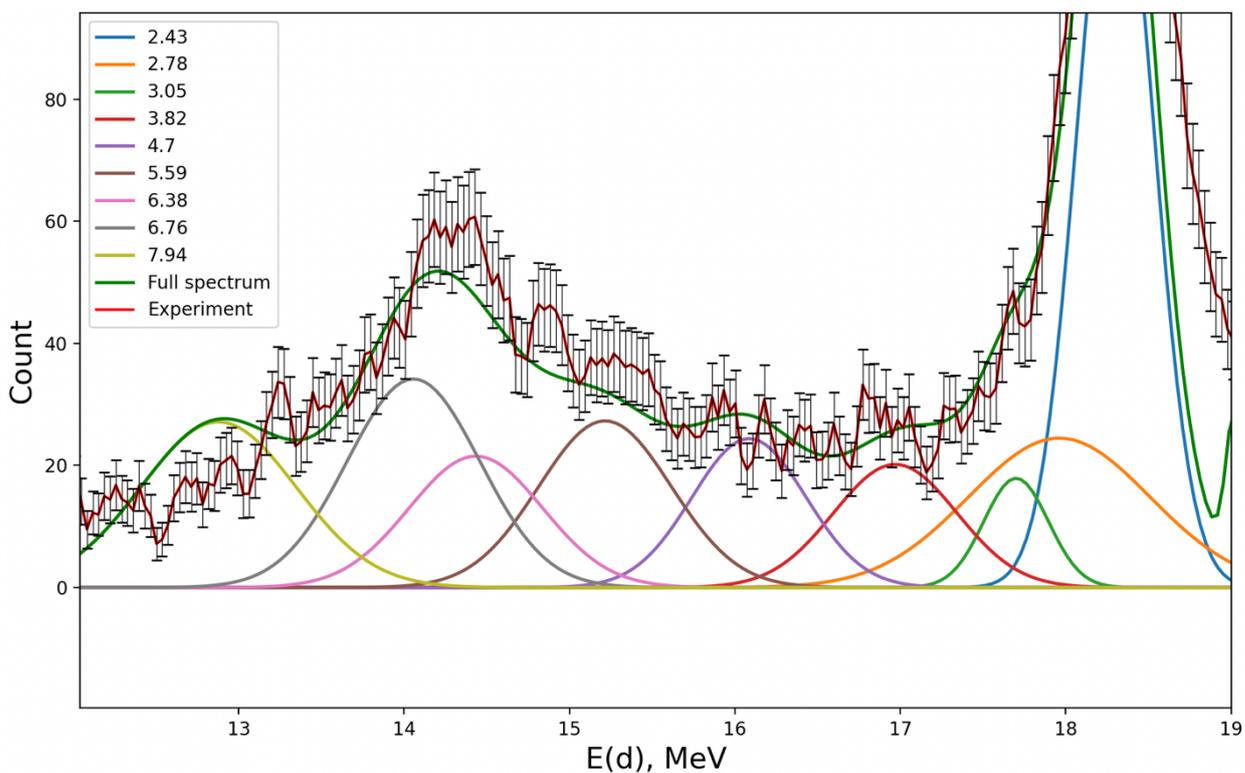


Рисунок 10. Результаты работы программы

Таким образом, программа позволяет точно определять положения энергетических уровней, а также предсказывать ход кривой энергетического спектра. Как было показано выше, для работы программы необходимы только значения дифференциальных сечений рассеяния для заданной реакции, а также параметры эксперимента. Используя эти данные, расчетная программа позволяет составить картину одномерного энергетического спектра, которая с хорошей степенью точности совпадает с экспериментальными энергетическими спектрами, обработанными вручную.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведем основные результаты научно-исследовательской работы:

1. Была разработана схема работы предлагаемой программы;
2. С помощью построенной блок-схемы была написана расчетная программа;
3. Был проведен сравнительный анализ результатов работы программы с экспериментальными значениями расчетных спектров.

Расчетная программа продемонстрировала свою эффективность и точность в анализе одномерных энергетических спектров. В процессе работы программа сравнивала расчетные результаты с экспериментальными данными и достигла хорошей степени совпадения. Это позволило получить детальную информацию о форме энергетического спектра.

Полученные результаты позволят проводить качественный анализ экспериментальных данных, выявлять особенности энергетического спектра и определять наличие примесей и фона сигнала. Это необходимо для повышения эффективности обработки экспериментальных данных.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Isao Tanihata, Herve Savajols, Rituparna Kanungo // Recent experimental progress in nuclear halo structure studies, Progress in Particle and Nuclear Physics, Volume 68, 2013, Pages 215-313;
2. W. von Oertzen, M. Freer, and Y. Kanada-En'yo, Phys. Rept. **432**, 43 (2006).
3. Ядерные состояния с аномально большими радиусами (изомеры размеров) / А. А. Оглоблин, А. С. Демьянова, А. Н. Данилов [и др.] // Ядерная физика. – 2016. – Т. 79, № 4. – С. 328;
4. Starastin, V., Demyanova, A., Danilov, A. et al. Structures of the excited states in Be studied by scattering of 23 MeV deuterons. Eur. Phys. J. A 57, 334 (2021);
5. Hansen P. G., Jensen A. S., Jonson B. Nuclear Halos // Annu. Rev. Nucl. Part. Sci. 1995. V. 45. № 1. P. 591 – 634;
6. O.Tarasov, D.Bazin, NIM **B** 266 (2008) 4657-4664;