

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»
ПЕТЕРБУРГСКИЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

Сообщение 3001

Л. П. Кабина, С. С. Лисин,
И. А. Митропольский, Т. М. Тюкавина

**ПРОГРАММА VARON – ИНСТРУМЕНТ
ДЛЯ ОЦЕНКИ И МОДЕЛЬНОГО ОПИСАНИЯ
ЯДЕРНЫХ ВРАЩАТЕЛЬНЫХ ПОЛОС**

2016

УДК 539.063

**COMPUTER CODE BARON – TOOL FOR EVALUATION
AND MODEL DESCRIPTION OF NUCLEAR ROTATIONAL BANDS**

L. P. Kabina, S. S. Lisin, I. A. Mitropolsky, T. M. Tyukavina

A b s t r a c t

The computer code BARON (BAndS in ROTating Nuclei) is designed for evaluation and model description of nuclear rotational bands. It serves to determine model parameters on the energies and spins of rotational levels using the method of the least squares, to calculate the rotational band spectra and to compare the results with the experimental data. The polynomial parametrization of Bohr–Mottelson and the variable moment-of-inertia model with signature corrections were chosen as the models. The code BARON has a user-friendly interface that allows the following:

- Determination of the type of nucleus (odd-mass, even-even, or odd-odd nucleus) and peculiarities of the rotational band to select the appropriate model parametrization.
- Enter and edit of input data with the ability to copy from the buffer.
- Save the prepared data for future reference.
- Determination of the model parameters, the computation of the energies of the rotational levels and standard deviations of the calculated values from experimental data.
- Ability to handle bands having levels with the same spin, for subsequent selection of “extra” levels.
- Blocking of separate levels in determining model parameters.
- Refusal of computation of the signature corrections.
- Use of the adiabatic limit for the “short” rotational bands.
- Present the calculation results in tabular and graphic forms.
- Save and print the calculation results.

The work has been performed at the Neutron Research Division (LNS).

© ФГБУ «ПИАФ» НИЦ «Курчатовский институт», 2016

А н н о т а ц и я

Программа BARON (BAnds in ROtating Nuclei) предназначена для определения модельных параметров ядерных вращательных полос по энергиям и спинам уровней, вычисления их энергий и сравнения результатов расчета с экспериментальными данными. В качестве модели выбраны полиномиальная параметризация Бора – Моттельсона и модель переменного момента инерции с сигнатурными поправками. Программа имеет дружественный интерфейс, который позволяет осуществлять:

- определение типа ядра (четно-четное, нечетное, нечетно-нечетное) и особенностей вращательной полосы для выбора соответствующей модельной параметризации;
- ввод и редактирование данных с возможностью копирования из буфера;
- сохранение подготовленных данных для последующих обращений;
- определение модельных параметров, вычисление энергий вращательных уровней и стандартных отклонений расчетных значений от экспериментальных;
- возможность обработки полос, имеющих уровни с одинаковыми спинами, для последующего отбора «лишних» уровней;
- исключение отдельных уровней при вычислении модельных параметров методом наименьших квадратов;
- отказ от вычисления сигнатурных поправок;
- выбор адиабатического предела для «коротких» полос;
- представление результатов расчета в виде таблиц и графиков;
- сохранение и печать результатов расчета.

Работа выполнена в Отделении нейтронных исследований (ЛЯС).

ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных свойств деформированных ядер является наличие характерных вращательных полос в их спектрах возбуждения. Детальное изучение вращательных спектров позволяет судить о возникновении и развитии деформации, выяснять особенности коллективной ядерной динамики, исследовать связь одночастичного и коллективного движения в ядрах.

Вращательной полосой в спектре возбуждений ядра принято называть последовательность соединенных интенсивными электромагнитными переходами состояний одинаковой четности с монотонно изменяющимся вдоль полосы спинами I с шагом, как правило, $\Delta I = 1$. В четно-четных ядрах полосы с $K^\pi = 0^+$ (в частности, вращательные полосы на основном состоянии) и полосы с $K^\pi = 1^-$ (довольно редкие случаи) всегда имеют шаг $\Delta I = 2$ по свойствам симметрии. Обычно вращательная полоса характеризуется минимальным значением спина $I_{\min} = K$, имеющим смысл проекции полного спина на ось симметрии ядра, и четностью. Энергия вращательных уровней в полосе примерно следует закону $I(I + 1)$, соответствующему вращению квантового волчка.

При построении схем ядерных уровней и в оценке данных по ядерной структуре и распадам в стандарте ENSDF [1] часто возникает задача отнесения данного уровня к вращательной полосе или выбора наиболее подходящего уровня из множества уровней с однородными свойствами (проблема «лишних» уровней). Часто фрагменты вращательных полос рассматриваются как независимые полосы, а по сути являются частями одной полосы с пропущенными уровнями. Разобраться в таких случаях помогает простая систематика. В первую очередь для этих целей и создан данный инструмент.

Вычислительное ядро программы BARON использовалось при создании базы данных [2], включающей наиболее полную компиляцию энергий ядерных вращательных состояний на базе файла ENSDF и результаты их модельного описания. Систематическое изучение больших массивов экспериментальных данных позволяет, с одной стороны, проводить их оценку, а с другой, – опираясь на физический смысл параметров модели, выяснять природу ядерного вращения, влияние на него структурных особенностей, характерных для ядер разных групп.

Модельное описание вращательных состояний

Существует обширная литература по теоретическому описанию вращения ядер. К настоящему времени можно уверенно говорить, что явление ядерного вращения достаточно изучено, т. е. создан необходимый «арсенал» ядерных моделей, описывающих все его стороны. Из феноменологических моделей, описывающих изменение энергии вращательного состояния $E_K(I)$ со спином I , наибольшее распространение получили полиномиальная параметризация Бора – Моттельсона (BM) [3]

$$E_K(I) = E_0 + A[I(I+1) - K^2] + B[I(I+1) - K^2]^2 + \dots \quad (1)$$

и обобщение модели переменного момента инерции (VMI) [4]

$$E_K(I) = E_0 + \frac{I(I+1) - K^2}{2J_I} + \frac{C}{2}(J_I - J_0)^2, \quad (2)$$

$$\frac{\partial E_K(I)}{\partial J_I} = 0, \quad (3)$$

которые и были использованы в программе BARON.

Первая параметризация является универсальной и подходит к любым типам вращательных полос. Она рекомендована к использованию при оценке ядерных данных в стандарте ENSDF [1]. В программе BARON мы ограничились квадратичным приближением в (1) с тремя подгоночными параметрами: E_0 , A и B .

Вторая параметризация, на наш взгляд, более физична и наглядна. В ней энергия вращательного уровня (2) является суммой кинетической энергии вращения и потенциальной энергии упругого центробежного растяжения ядра. Динамический параметр модели, изменяющийся момент инерции J_I , определяется для каждого уровня из условия равновесия (3).

По физическому смыслу параметр J_0 является моментом инерции «остановленного», не вращающегося ядра, а E_0 – его энергией. Как правило, момент инерции $J_{I=K}$ и энергия $E_{I=K}$ головного состояния полосы не совпадают со значениями параметров J_0 и E_0 соответственно. Положительный, по определению, параметр C имеет смысл жесткости и определяет относительное увеличение момента инерции ядра с ростом спина в полосе. Безразмерный параметр неадиабатичности $G = CJ_0^3$ не является независимым, но удобен при численном решении уравнений модели и анализе результатов.

Параметризация модели переменного момента инерции (2, 3) формально соответствует бесконечному ряду (1) с $B < 0$ [5]. Принципиально, что при одинаковом числе параметров она свободна от расходимости при больших спинах, характерной для полиномиальной параметризации (см., например, график на рис. 1). Отметим, что для «длинных» вращательных полос с десятью и более уровнями иногда используется следующее, «кубическое» приближение в (1) с дополнительным подгоночным параметром. Это «спасает» ситуацию локально, но не избавляет от степенной расходимости в целом.

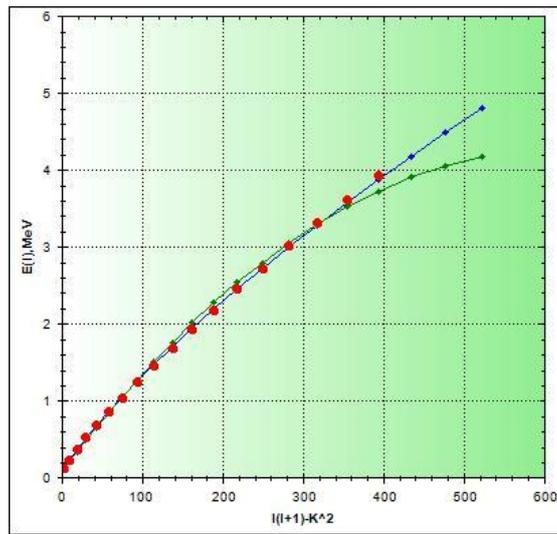


Рис. 1. Пример модельного описания полосы $V:5/2[402]$ в ядре ^{173}Re .
Верхняя кривая с точками – модель VMI; нижняя – VM;
кружки – экспериментальные значения

К сожалению, параметризация VMI не является универсальной – она применима только к полосам, имеющим отрицательную кривизну, когда параметр $B < 0$ в (1). Для полос с положительной кривизной в программе BARON используется адиабатическое приближение модели с двумя параметрами, J_0 и E_0 :

$$E_k(I) = E_0 + \frac{I(I+1) - K^2}{2J_0}, \quad (2a)$$

соответствующее пределу $C, G \rightarrow \infty$ и $J_I \equiv J_0$ в (2). Это приближение, очевидно, эквивалентно адиабатическому приближению ВМ, когда в (1) положено $B = 0$ и $A = 1/2J_0$.

Для описания сигнатурных эффектов в программе BARON обе параметризации дополнены знакопеременными поправками [3]:

$$\Delta E_K(I) = (-1)^{I+K} \begin{cases} A_{1/2}(I+1/2)\delta_{K, 1/2} \\ A_0\delta_{K, 0} \\ A_1I(I+1)\delta_{K, 1} \\ A_2(I-1)I(I+1)(I+2)\delta_{K, 2}. \end{cases} \quad (4)$$

Вводя универсальный безразмерный параметр сигнатурного расщепления a , получим формулы для энергии вращательного уровня в полиномиальной параметризации (1) с учетом сигнатурных поправок (4). В A -нечетных ядрах для полос любой четности с $K = 1/2$

$$E_{K=1/2}(I) = E_0 + A[I(I+1) - 1/4 + a(-1)^{I+1/2}(I+1/2)] + B[I(I+1) - 1/4]^2. \quad (5)$$

В нечетно-нечетных ядрах для полос любой четности с $K = 0$

$$E_{K=0}(I) = E_0 [1 + a(-1)^I] + AI(I+1) + B[I(I+1)]^2, \quad (6)$$

для полос любой четности с $K = 1$

$$E_{K=1}(I) = E_0 + A[(1 + a(-1)^{I+1})I(I+1) - 1] + B[I(I+1) - 1]^2. \quad (7)$$

В четно-четных ядрах для полос с $K^\pi = 2^+$

$$E_{K=2}(I) = E_0 + A[(1 + a(-1)^I(I-1)(I+2))I(I+1) - 4] + B[I(I+1) - 4]^2. \quad (8)$$

Для остальных полос – выражение (1).

В модели переменного момента инерции сигнатурные поправки, описывающие динамическое влияние кориолисова взаимодействия, имеют такой же, как в (4), функциональный вид. Для полос любой четности с $K = 1/2$ в A -нечетных ядрах энергия вращательного состояния

$$E_{K=1/2}(I) = E_0 + \frac{I(I+1) - 1/4 + a(-1)^{I+1/2}(I+1/2)}{2J_I} + \frac{C}{2}(J_I - J_0)^2. \quad (9)$$

Для полос любой четности с $K=0$ и с $K=1$ в нечетно-нечетных ядрах

$$E_{K=0}(I) = E_0 \left[1 + a(-1)^I \right] + \frac{I(I+1)}{2J_I} + \frac{C}{2}(J_I - J_0)^2, \quad (10)$$

$$E_{K=1}(I) = E_0 + \frac{I(I+1)-1}{2J_I} + a(-1)^{I+1} \frac{I(I+1)}{2J_I} + \frac{C}{2}(J_I - J_0)^2 \quad (11)$$

соответственно. Для полос с $K^\pi = 2^+$ в четно-четных ядрах

$$E_{K=2} = E_0 + \frac{I(I+1)-4}{2J_I} + a(-1)^I \frac{(I-1)I(I+1)(I+2)}{2J_I} + \frac{C}{2}(J_I - J_0)^2. \quad (12)$$

Сигнатурная поправка в последнем случае получена при учете $\Delta K = 2$ смешивания за счет возможной неаксиальности формы ядра. Формулы (9–12) модели VMI дополняются условием равновесия (3). Для остальных полос остаются выражения (2, 3).

Параметризация сигнатурного расщепления (9–12) в модели VMI выбрана так, чтобы в адиабатическом пределе, когда $C, G \rightarrow \infty$, она соответствовала бы полиномиальной параметризации при $B = 0$. Это полезное предельное соотношение позволяет использовать значения параметров VM (существуют всегда!) как начальные приближения при определении параметров VMI.

К сожалению, большое сигнатурное расщепление и слабость перекрестных переходов часто не дают возможность регистрировать обе последовательности, и полоса бывает представлена только одной сигнатурной последовательностью с $\Delta I = 2$ («половинкой» полосы), или две половинки одной полосы рассматриваются как независимые полосы с $\Delta I = 2$ каждая. В таком случае сигнатурные поправки могут быть включены, и определен соответствующий параметр сигнатурного расщепления («развязывания»), только после объединения половинок полос. Вычисление сигнатурного параметра по энергиям уровней с одинаковой сигатурой, по нашему мнению, лишено смысла. Поэтому в программе предусмотрено отключение сигнатурных поправок для полос с $K = 1/2, 0, 1, 2$.

Способ определения параметров является неотъемлемым элементом модели. В программе BARON параметры обеих моделей определяются методом наименьших квадратов (МНК) по экспериментальным значениям энергий уровней $E_K^{(\text{exp})}(I)$ и их спинам I . Отметим замечательное свойство полиномиальной параметризации VM – она линейна по параметрам, что превращает задачу их определения в решение системы линейных уравнений.

В процедуре определения параметров в программе BARON вместо экспериментальных погрешностей используются два набора весовых коэффициентов, с которыми энергии уровней входят в минимизируемый функционал. Один набор соответствует постоянной абсолютной ошибке (постоянные веса), другой – постоянной относительной ошибке (веса обратно пропорциональны энергиям уровней). В первом случае значения энергий уровней равноправны, во втором – нижние уровни полосы имеют больший вес по сравнению с верхними. На длинных полосах это различие становится заметно, см. рис. 2.

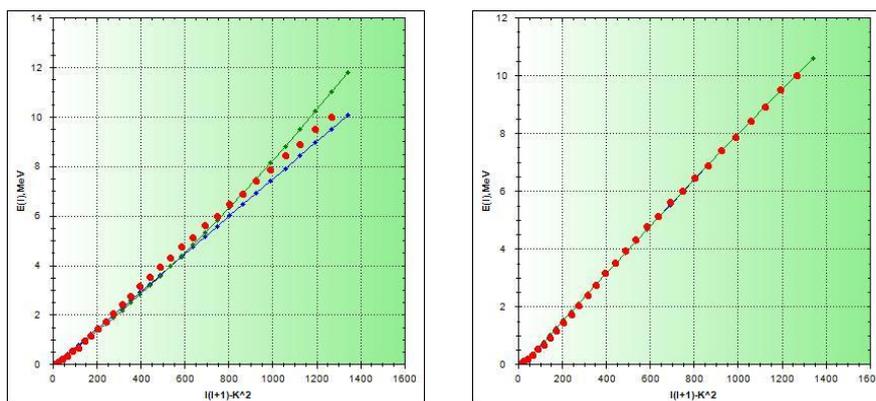


Рис. 2. Сравнение модельного описания «длинной» полосы A: 8^- в ^{156}No при использовании разных весовых коэффициентов. Слева: график для постоянной относительной ошибки (нижняя кривая – адиабатическое приближение VMI, $\Delta = 0,322$ МэВ; верхняя – VM с $B > 0$, $\Delta = 0,324$ МэВ). Справа: график для постоянной абсолютной ошибки (результаты обеих параметризаций здесь неразличимы, $\Delta = 0,070$ МэВ). Точки – экспериментальные значения

В общем случае в качестве вращательной полосы может рассматриваться последовательность не менее трех уровней одинаковой четности с различными спинами. Трех уровней достаточно для определения параметров модели. Для описания «коротких» полос с сигнатурным расщеплением (три уровня разной сигнатуры) следует пользоваться адиабатическим пределом, сокращая число параметров до трех.

После определения параметров модели программа BARON вычисляет весь спектр вращательной полосы, т. е. вычисляет энергии $E_K^{(\text{cal})}(I)$ для

всех спинов от $I_{\min} = K$ до некоторого заданного значения I_{\max} с шагом $\Delta I = 1$, кроме полос с $K^\pi = 0^+$ и $K^\pi = 1^-$ в четно-четных ядрах, где шаг $\Delta I = 2$ по соображениям симметрии. Отметим, что модельные параметры определяются по любому заданному фрагменту полосы (не меньше трех уровней). В программе BARON предусмотрено исключение отдельных уровней из процедуры определения параметров, а также совместное рассмотрение разных фрагментов одной полосы.

После вычисления спектра составляется сумма

$$\Delta = \sqrt{\sum_{i=1}^N (E_i^{(\text{cal})} - E_i^{(\text{exp})})^2 / (N - N_0)}, \quad (13)$$

где N – число наблюдаемых уровней в полосе, а N_0 – число параметров модели, изменяющееся от 2 для адиабатического приближения до 4 в полосах с сигнатурным расщеплением. Величину Δ можно назвать погрешностью или мерой точности модельного описания экспериментальных данных. Она служит для объективного контроля, сравнения и оценки вариантов модельного описания.

Описание интерфейса программы BARON и пример ее использования

Программа BARON написана на языке C# в среде разработки MS Visual Studio 10 и функционирует под ОС MS WINDOWS. Для работы программы необходимо установить на компьютер пакет Microsoft .NET FrameWork Version 2.0 или выше [6]. Для использования программы необходимо скопировать файл BARON.EXE в рабочий каталог.

Для графического представления результатов в программе использована библиотека ZedGraph.dll [7]. Соответствующий файл также должен находиться в каталоге, содержащем исполняемый файл программы BARON.

Также в рабочий каталог следует скопировать файл помощи BARON-help.chm. Для проверки работоспособности программы на компьютере пользователя служит файл test.dat.

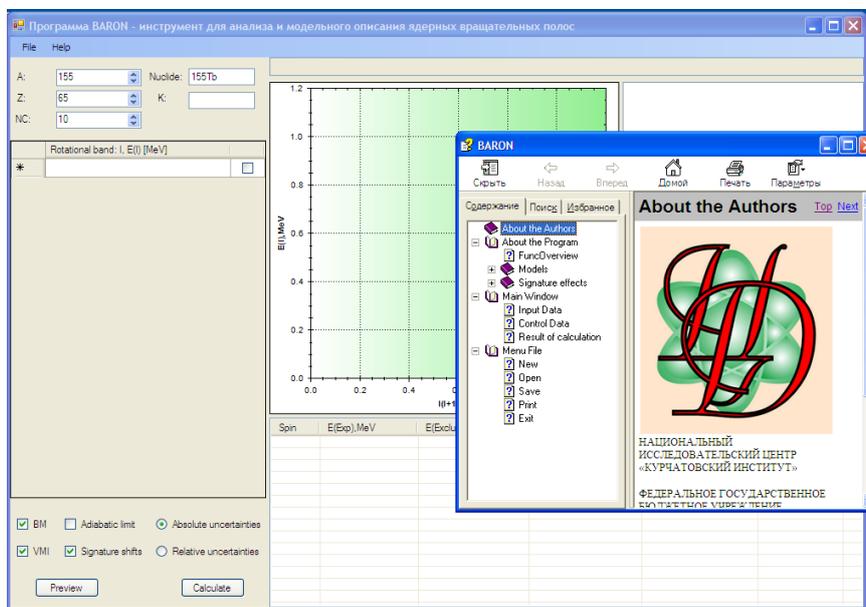


Рис. 3. Начальный вид окна программы с открытым окном помощи “Help”

Программа BARON имеет единственное окно, которое разбито на 4 рабочие зоны. Размеры окна можно менять произвольным образом, а каждая зона имеет подвижные границы. В заголовке окна указано название программы. Два пункта главного меню позволяют работать с данными – “File” или получать помощь – “Help”. Ввод данных осуществляется вручную, из заранее приготовленного файла или через буфер. При первом запуске программы или после выбора “File”/“New” устанавливаются некоторые значения, принятые по умолчанию, см. рис. 3.

Левая верхняя зона окна предназначена для ввода данных. Она содержит поля, в которые заносятся значения атомного номера “A” и заряда “Z” нуклида. Цифровые поля снабжены кнопками, понижающими или повышающими введенные значения. После ввода значений A и Z в поле “Nuclide” автоматически указывается соответствующий символ, и наоборот: ввод обозначения нуклида автоматически влечет заполнение числовых полей A и Z. Значения этих параметров определяют модель описания полосы. Они также используются при формировании отчета. В поле “K” следует указать значение проекции спина K, при этом для A-нечетных ядер достаточно указать только числитель (удвоенное значение проекции), хотя допу-

стимо использовать и обыкновенную дробь. Наконец, в поле “NC” следует указать число рассчитываемых вращательных уровней в полосе. Это поле также снабжено кнопками изменения значения.

Ниже расположено поле ввода, в котором построчно указываются спины и энергии вращательных уровней. Для A -нечетных ядер можно указывать удвоенные значения спинов или обыкновенные дроби. Энергии уровней указываются в единицах МэВ. Порядок их записи безразличен, например, сначала могут быть указаны уровни одной сигнатуры, а затем – другой.

Ввод уровней можно осуществить следующими способами:

- 1) ручным вводом в поле ввода;
- 2) меню File → Open → From File.

Производится заполнение окна ввода из текстового файла, строки которого начинаются со значений спина и энергии уровня, разделенных произвольным количеством пробелов. Информация в строке читается, включая пробел, завершающий значение энергии, остальная часть строки отбрасывается.

Пример текстового файла приведен в “Help”.

- 3) Menu → File → Open → From Clipboard.

Скопировав содержимое текстового файла в буфер, его можно дописать к данным, уже имеющимся в окне ввода данных. Удобно использовать для объединения в одну полосу фрагментов полос.

При анализе сложных полос возможно исключение некоторых уровней с помощью установки флажка (галочка) в правой колонке строки (рис. 4), уровень с $I = 4$, $E = 0,1482$ МэВ.

При вводе информации допускается использование точки или запятой в качестве разделителя целой и дробной частей.

В нижней части левой панели окна программы расположена зона ввода управляющих параметров.

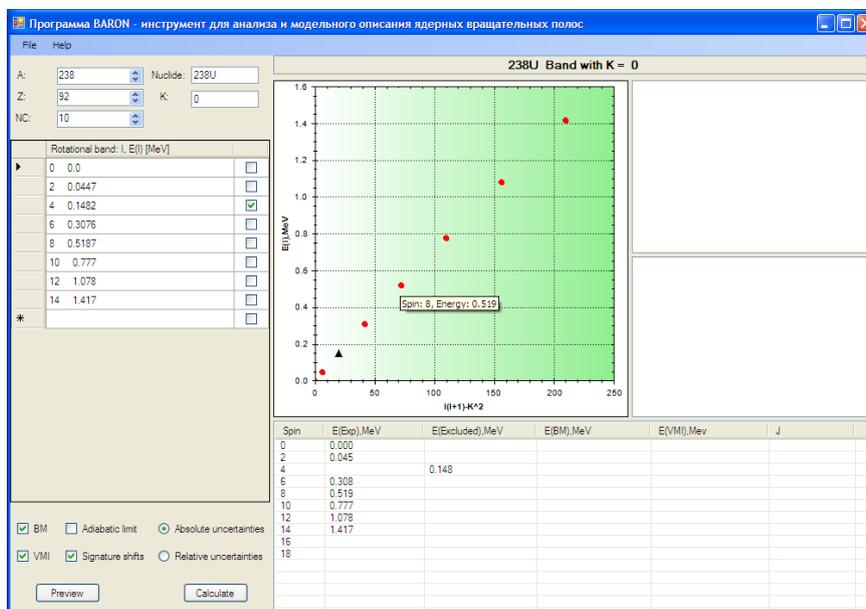


Рис. 4. Окно программы в режиме “Preview”

Установка флажка “BM” позволяет выбрать формулу Бора–Моттельсона для анализа вращательной полосы или отказаться от нее. Флажок “VMI” позволяет выбрать модель переменного момента инерции для анализа вращательной полосы или отказаться от нее. По умолчанию оба флага включены, т. е. выбраны для анализа обе модели.

Установка флажка “Adiabatic limit” позволяет принудительно произвести расчет в адиабатическом приближении. По умолчанию он выключен.

Установка флажка “Signature shifts” позволяет отказаться от учета сигнатурных эффектов. По умолчанию он включен (сигнатурные эффекты учитываются).

Радиокнопка “Absolute/Relative uncertainties” позволяет выбрать способ задания весовых коэффициентов для энергий уровней – равные относительные либо равные абсолютные неопределенности значений энергий уровней. По умолчанию включен режим равных абсолютных неопределенностей.

Кнопка “Preview” используется для контроля ввода данных. Введенные уровни изображаются точками на графике $E(I)$ как функция $I(I + 1) - K^2$.

С помощью пункта меню Menu → File → Open → “From .dat File” все поля левой панели окна могут быть заполнены из файла специального формата, который ранее был создан командой Menu → File → Save → “Input Data to File”. На рис. 4 представлен вид окна программы, когда данные загружены из файла “Test.dat” и нажата кнопка “Preview”.

В центральной части окна расположена зона графического представления исходных данных. Красными точками отмечены уровни, которые будут использоваться для определения параметров модели, а черным треугольником – уровень, который будет исключен из процесса аппроксимации по МНК. Данный уровень отмечен галочкой в правой колонке поля ввода.

Подведя указатель мыши к точке на графике, можно увидеть, каким данным точка соответствует.

Кнопка “Calculate” запускает процесс вычисления параметров модели по МНК. На рис. 5 представлен вид окна с результатами работы программы.

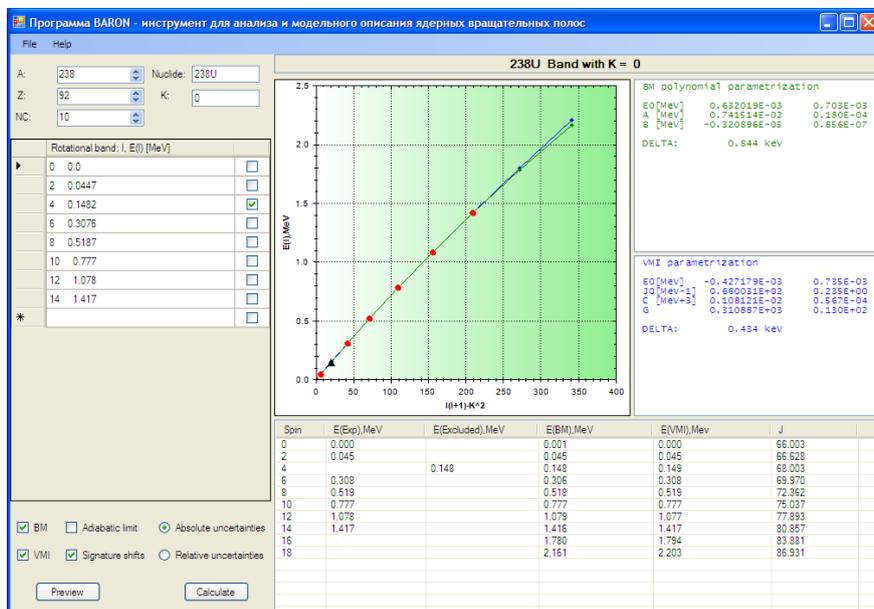


Рис. 5. Окно с результатами расчета

Результаты вычислений располагаются на правой панели окна программы. Панель разделена на 4 зоны с подвижными границами.

В двух зонах справа от графика представляются результаты вычисления параметров по моделям VM и VMI. Текстовые поля для представления результатов редактируемые. Меню, содержащее функции редактирования, можно вызвать щелчком правой кнопки мыши на поле параметров.

Под графиком расположена таблица энергий уровней. Первый столбец содержит спины, обычно изменяющиеся на 1, в данном примере спин меняется на 2, поскольку это полоса с $K = 0$ для четно-четного ядра.

Второй и третий столбцы содержат экспериментальные энергии уровней, в третий заносятся энергии уровней, исключенных из процедуры вычисления параметров модели с помощью флажка.

Последующие два столбца содержат расчетные значения энергий по моделям VM и VMI. В последнем столбце приведены значения момента инерции, полученные по модели VMI.

Строки таблицы можно выделить и скопировать в буфер с использованием клавиш “Shift, Ctrl + C” на клавиатуре.

В центре правой панели располагается зона графика. Зеленая кривая с точками – значения энергий уровней, вычисленные по модели VM. Синяя кривая с точками – энергии уровней, вычисленные по модели VMI.

С помощью мыши можно выделить на графике прямоугольную область для подробного рассмотрения. Различные функции манипулирования с графиком содержатся в меню, которое вызывается щелчком правой кнопки мыши.

Пункт меню Menu → File → Save служит для сохранения результатов и исходных данных. Menu → File → Save → “Input Data to File” позволяет сохранить состояние левой панели главного окна в файле под заданным именем для последующего восстановления командой Menu → File → Open → “From .dat File”.

Действие Menu → File → Save → “Results to File” позволяет сохранить результаты вычислений, представленные в виде таблиц.

Menu → File → Save → “Graphic to File” позволяет сохранить поле графика в виде файла. Это действие дублирует действие пункта меню, вызываемого щелчком правой кнопки на поле графика.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

За несколько лет практического использования программа BARON показала свою полезность в оценке ядерных данных по вращательным полосам. Она позволила не только определить параметры вращательных полос, но и разрешить проблемы «лишних» уровней, предсказать положение ожидаемых членов вращательных полос, объединить наблюдаемые фрагменты в единую полосу, оценить влияние сигнатурных поправок.

Программа BARON зарегистрирована в Реестре программ для ЭВМ Федеральной службы по интеллектуальной собственности (Роспатент) [8] и свободно распространяется по запросу.

В поставляемый вместе с программой BARON пакет включаются рассмотренные здесь текстовые файлы с исходными данными test.txt и test2.txt. Пакет включает также графическую библиотеку ZedGraph.dll и справочный html-файл BARON-help.

В заключение нам приятно поблагодарить сотрудников Лаборатории ядерной спектроскопии ОНИ ПИЯФ, кафедры ядерной физики физического факультета СПбГУ и особенно П. А. Сушкова, Отдел физики и техники реакторов ПИЯФ за доброжелательную критику и замечания, направленные на углубление содержания и улучшение работы этой программы.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Tuli J. K.* Evaluated Nuclear Structure Data File. NNDC, 2001. Available at: <http://www.nndc.bnl.gov/ensdf/>
2. *Митропольский И. А., Кабина Л. П., Лисин С. С., Тюкавина Т. М.* Проблемно-ориентированная база данных ROTAN для анализа вращательных состояния атомных ядер. Свидетельство о государственной регистрации базы данных для ЭВМ № 2013620994. Роспатент, 2013.
3. *Бор О., Моттelson Б.* Структура атомного ядра. М.: Мир, 1977. Т. 2. 664 с.
4. *Mariscotti M. A. J., Scharf-Goldhaber G., Buck B.* // Phys. Rev. 1969. V. 178. P. 1864.
5. *Кабина Л. П., Митропольский И. А.* // Известия РАН: сер. физ. 2007. Т. 71. С. 897.
6. Microsoft .NET Framework 2.0 (2009). Available at: <https://www.microsoft.com/ru-ru/download/details.aspx?id=1639>
7. ZedGraph (2008). Available at <http://sourceforge.net/projects/zedgraph/files/>
8. *Митропольский И. А., Кабина Л. П., Лисин С. С., Тюкавина Т. М.* Программа BARON – инструмент для анализа и модельного описания ядерных вращательных полос. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014618686. Роспатент, 2014.