

сообщения
Объединенного
института
ядерных
исследований
Дубна

4587/2-81

7/9-81

P10-81-358

+

С.А.Тележников

МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ СПЕКТРОВ
 γ -КВАНТОВ РАСПАДА
ИЗОЛИРОВАННЫХ НЕЙТРОННЫХ РЕЗОНАНСОВ

1. ВВЕДЕНИЕ

Радиационный захват резонансных нейтронов ядрами является одним из основных источников информации о спинах нейтронных резонансов и низколежащих уровнях ядра, а также о свойствах и структуре ядра в области высоких возбуждений. За последние годы существенно увеличилась роль таких экспериментов по захвату нейтронов, которые дают детальную информацию о спектрах γ -квантов большого числа изолированных нейтронных резонансов. Такого рода эксперименты стали возможны благодаря мощным источникам нейтронов. Современные проекты экспериментальных установок для изучения радиационного захвата не обходятся без подключения электронных вычислительных машин. Одно из возможных решений этой проблемы, предназначенное для изучения реакции (n_{res}, γ) на нейтронном пучке импульсного быстрого реактора ИБР-30 Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ, дано в работе /1/.

В настоящей статье приведена методика обработки большого количества спектров γ -квантов, применяемая для получения физической информации в экспериментах на установке, описанной в /1/.

2. АНАЛИЗ СВОЙСТВ СПЕКТРОВ γ -КВАНТОВ

2.1. Наблюдается большое количество /30-60/ спектров γ -квантов из захвата нейтронов в резонансах определенного изотопа. Спектры имеют следующие особенности:

2.1.1. Спектры зарегистрированы одним детектором;

2.1.2. Спектры получены одновременно;

2.1.3. Набор статистики в спектрах занимает продолжительное время /2-3 недели/.

2.2. В спектрах есть две существенно различные области энергий γ -квантов: мягкие γ -кванты с энергией от 100 до 800 кэВ и жесткие - с энергией от 3 до 7 МэВ. В результате использования "амплитудных окон" /см. /1/ / область мягких γ -квантов может разбиваться на несколько участков. Области мягких и жестких γ -квантов имеют следующие качественные различия:

2.2.1. Пики в области мягких γ -квантов представляют вторичные переходы между низколежащими уровнями ядра-продукта. Поз-

тому спектры из разных резонансов одного изотопа схожи между собой. Пики в области жестких γ -квантов - это обычно первичные γ -переходы, интенсивность которых существенно флюктуирует от резонанса к резонансу. Поэтому спектры жестких γ -квантов из разных резонансов одного изотопа значительно отличаются друг от друга;

2.2.2. Второе различие связано с тем, что для низких энергий пики в спектре отражают фотопоглощение γ -квантов в детекторе. Поэтому их энергия равна полной энергии γ -квантов. Для жестких γ -квантов основной процесс поглощения в детекторе - рождение пары (e^+ , e^-) с последующей аннигиляцией e^+ . При аннигиляции рождаются два γ -кванта с энергией 511,006 кэВ, которые могут или поглотиться в детекторе, или уйти из чувствительной его области. В результате при регистрации детектором жесткого γ -кванта в спектре наблюдается триплет или три пика: F-пик - пик полного поглощения с энергией, равной энергии γ -кванта (E_γ); S-пик - пик с вылетом одного аннигиляционного γ -кванта с энергией пика $E_\gamma - 511,006$ кэВ; D-пик - пик с вылетом двух аннигиляционных γ -квантов, энергия которого $E_\gamma - 1022,012$ кэВ.

Для детекторов с чувствительным объемом 15 ± 40 см³, обычно используемых в экспериментах ($n_{\text{гес}}, \gamma$), при регистрации γ -квантов с $E_\gamma > 3$ МэВ наибольшую площадь имеет D-пик.

Вследствие таких различий область жестких γ -квантов существенно сложнее для обработки. В связи с этим основное внимание в настоящей работе уделяется методике обработки спектров жестких γ -квантов.

3. ФОРМА ПИКА

Для описания формы всех пиков вводятся два параметра. Исходной формой считается гауссово распределение:

$$f(x) = s \times \sqrt{\frac{4 \times \ln 2}{\pi \times w^2}} \times \exp\left[-\frac{4 \times \ln 2 \times (x-p)^2}{w^2}\right],$$

где s - площадь пика, w - его ширина на половине высоты; p - положение пика.

На форму пика влияет только параметр w . Далее проводится интегрирование исходной кривой по ширине канала в спектре. После этого пик представляется уже в виде массива чисел, пропорциональных количеству отсчетов в каждом канале /рис. 1а/. Пики в спектрах не являются симметричными, а имеют более крутой спад справа, чем слева. Надо получить асимметричный пик, более плавно спадающий налево. Для этого каждый канал "размазывается" на-

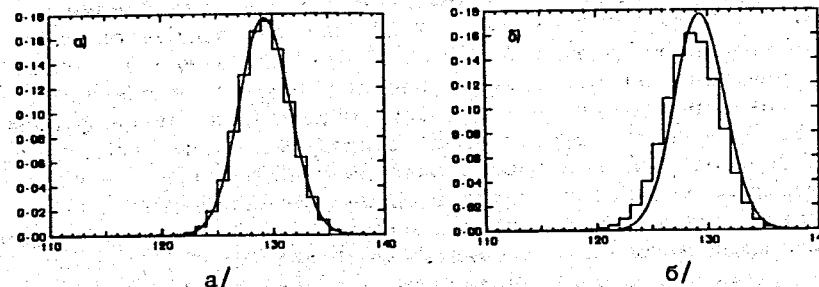


Рис. 1. Форма пика. Плавная кривая - исходное гауссово распределение, гистограмма изображает массив чисел, используемый в программах для построения теоретических пиков. а/ Случай симметричного пика; б/ случай асимметричного пика.

лево по экспоненциальной кривой:

$$\phi(x) = \frac{1}{z} \times \exp\left[-\frac{x}{z}\right],$$

где z - параметр асимметрии пика.

Эта кривая тоже интегрируется по ширине канала и представляется в виде массива чисел, которые используются для "размазывания". Пример несимметричного пика представлен на рис. 1б. Плавными кривыми на рис. 1а и 1б изображено исходное гауссово распределение.

Таким образом, для каждого пика вводятся два параметра, отвечающие за его форму: w и z , а также параметры: s - площадь пика и p - его положение.

4. ПРЕДПОЛОЖЕНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНО ПОДЛОЖКИ

Пики в спектрах находятся на подложке, относительно которой делается предположение, что она есть плавная функция и имеет плавную производную. В связи с этим существенную сложность представляет обработка спектров с яркими комптоновскими ступеньками. В таких случаях приходится обрабатывать спектры по частям, исключая область ступеньки.

5. ФОРМУЛИРОВКА ЗАДАЧИ

На всех спектрах надо найти положения и площади D-пиков. Для правильного нахождения нужных параметров D-пика от γ -кванта с энергией E_γ необходимо учитывать S-пики от переходов с

энергиями в районе $E_\gamma = 511,006$ кэВ и F-пики с энергиями в районе $E_\gamma = 1022,012$ кэВ /см. 2.2.2/. Поэтому требуется найти положения и площади трех пиков D, S и F для каждого γ -перехода. Следовательно, каждый γ -переход имеет 12 параметров, по 4 параметра на пик /см. п.3/. Из общих предположений можно сделать следующее предположение: сокращение числа параметров в многопараметрической задаче позволяет получить более стабильное решение. Кроме того, на основании многолетнего опыта обработки спектров можно констатировать, что использование дополнительной информации о связях между параметрами для сокращения их числа повышает надежность результатов. Поэтому рассмотрим вопрос о сокращении числа параметров.

6. ЗАВИСИМОСТЬ ПАРАМЕТРОВ И СВЯЗЬ МЕЖДУ НИМИ

Для сокращения числа параметров рассмотрим, от чего они зависят. Параметры можно разделить на несколько групп:

6.1. Параметры, зависящие только от свойств детектора:

6.1.1. Отношение площадей S-пика и D-пика одного γ -перехода любой энергии есть константа, зависящая только от объема детектора,

$$s_S / s_D = d.$$

6.1.2. Отношение площадей F-пика и D-пика одного γ -перехода есть плавная функция энергии γ -кванта

$$s_F / s_D = y(E_\gamma).$$

6.2. Параметры, зависящие от настройки измерения: расстояния между D-пиком и S-пиком и между S-пиком и F-пиком в энергетической шкале 511,006 кэВ. Таким образом, расстояния между этими пиками на всех спектрах определяются кривой энергетической калибровки спектров $E_\gamma = q(p)$. Поэтому можно найти функцию $p_S = t(p_D)$, справедливую для всех спектров. Та же функция определяет $p_F = t(p_S)$.

6.3. Параметры, зависящие от свойств спектрометрического тракта /т.е. свойств детектора и аналоговой части электронной аппаратуры/, а также от стабильности аппаратуры в период измерения /см. 2.1.3/. Такими параметрами являются w и z . Их можно представить в виде функций от p , т.е. как $w = v(p)$ и $z = h(p)$, причем эти функции монотонные и не убывающие.

6.4. Параметры, зависящие от свойств мишени. В спектрах зарегистрированы переходы на нижние состояния одного ядра /см. 2.1/. Поэтому существует один список энергий переходов для всех спектров.

7. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

В целях калибровки эффективности детектора проводятся дополнительные измерения реакции радиационного захвата тепловых нейтронов на хлоре, для которой хорошо известны в широком диапазоне энергий интенсивности γ -переходов. Для более детальной калибровки эффективности в районе низких энергий проводятся измерения спектров γ -квантов из распада радиоактивных изотопов, например, ^{226}Ra . Так как разрешение детектора может ухудшаться в течение эксперимента в результате радиационных повреждений детектора, в каждом эксперименте проводится измерение реакции радиационного захвата тепловых нейтронов на железе, и по виду дублета 7643 и 7629 кэВ из захвата нейтронов ядром ^{56}Fe оценивается состояние детектора. Результаты обработки этих дополнительных измерений можно использовать для получения параметров, зависящих только от свойств детектора /6.1/. Отсюда находим значение константы d и вид функции $y(E_\gamma)$.

8. ВИД ФУНКЦИЙ СВЯЗИ МЕЖДУ ПАРАМЕТРАМИ

Все функции ищутся в виде полиномов невысоких степеней /от нулевой до седьмой/.

9. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ОБРАБОТКИ

Если найти функции $w = v(p)$, $z = h(p)$ /см. 6.3/, $p_S = t(p_D)$ /см. 6.2/, $y(E_\gamma)$ и константу d /см. 6.1/, для каждого γ -перехода вместо 12 параметров останутся два: p_D и s_D . Остальные параметры определяются через перечисленные связи. Первыми надо находить функции $w = v(p)$ и $z = h(p)$, т.к. они определяют индивидуальные свойства отдельных пиков и от остальных функций связи никак не зависят. Остальные функции определяют взаимные соотношения между параметрами разных пиков и зависят от $v(p)$ и $h(p)$. Поэтому их надо определять, когда $v(p)$ и $h(p)$ уже известны.

Параметры v и z одного пика взаимно зависимы. Опытным путем установлено, что параметр z слабее зависит от параметра w , чем наоборот. Это позволяет достаточно точно находить параметр z , если задано предварительное неточное значение параметра w . С учетом этого факта была создана программа SPANAL, которая находит пики на спектре и методом итераций подгоняет положение и площадь пиков в трех режимах:

9.1. - с подгонкой параметров w и z ;

9.2. - с фиксированным параметром z и подгонкой параметра w ;

9.3. - с фиксированными w и z .

Кроме того, в качестве исходного параметра в программе SPANAL задается чувствительность алгоритма поиска к величине пика. Мерой чувствительности является отношение $s/\Delta s$, где Δs - ошибка площади пика. Если задана чувствительность $ALEV = 3,0$, программой будут найдены только пики с $s/\Delta s > 3,0$.

Для того, чтобы осуществлять поиск пиков на всем спектре одновременно, в программе SPANAL подложка подгоняется в виде большого числа отрезков парабол. Длина интервала для одной параболы задается в исходных данных. На границах интервалов сшиваются значения парабол и их первых производных. Такой алгоритм подгонки подложки существенно стабильнее, чем подгонка полиномом высокой степени на широком участке. Качественно это легко объясняется тем, что в алгоритме кусочно-непрерывной подгонки каждый параметр имеет ограниченную область влияния $1/3$ интервала/, а все параметры полинома высокой степени зависят от всех точек участка, что ухудшает стабильность решения. Максимальное количество интервалов для подгонки подложки - 32.

С помощью программы SPANAL проводится поиск параметров функций связи. Первыми находятся функции $w = v(p)$ и $z = h(p)$. Для нахождения этих функций из всех спектров выбираются 20-30 наиболее ярких пиков, рассредоточенных по всему диапазону возможных положений. Для их нахождения используется программа SPANAL с плохой чувствительностью: $ALEV = 10 \div 50$ / в зависимости от статистической точности обрабатываемых спектров/. Все остальные подгонки делаются с $ALEV = 2,0$.

В режиме 9.1 подгоняются выбранные пики. По полученным значениям z_1 строится функция $z = h(p)$. Эта функция задается в программе, и пики подгоняются в режиме 9.2. По полученным значениям w_1 строится функция $w = v(p)$. Теперь из всех спектров выбираются наиболее яркие триплеты (D, S и F). Функция $w = v(p)$ задается в программе, и члены триплетов подгоняются в режиме 9.3. По полученным значениям положений членов триплетов строится функция t /см. 6.2/. Результаты этих подгонок могут использоваться для уточнения значения d и функции u /см. 7/. Для этого надо получить энергетическую калибровку $E_\gamma = q(p)$. Функции t и u и константа d полностью определяют положения и площади пиков S и F по отношению к D-пику. Эти данные задаются в программе SPANAL, которая имеет режим поиска пиков с вычитанием из спектра после нахождения D-пика соответствующих S и F-пиков. В таком режиме проводится поиск пиков во всех спектрах. Это самый трудоемкий с точки зрения использования времени ЭВМ этап обработки.

Далее проводится анализ положений найденных пиков, делается группировка пиков из разных спектров, усреднение положений, и составляется список положений пиков, общий для всех спектров.

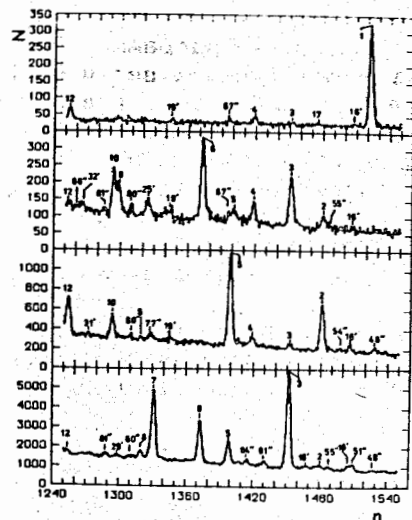


Рис.2. Пример подгонки участка спектров с помощью программы LINFIT. Для наглядности теоретические спектры изображены плавными кривыми с помощью интерполяции между теоретическими значениями в каждом канале.

Окончательная обработка спектров осуществляется с помощью программы LINFIT^{1/2}. В качестве исходных в программу вводятся данные для получения функции q /6.2/, параметры функций v , h /6.3/, u и константа d /6.1/, а также список положений пиков. Площади D-пиков находятся по

методу наименьших квадратов в последовательных интервалах каждого спектра. Каждый интервал может содержать до 40 пиков. Подложка в интервале ищется как полином невысокой степени. Опытным путем установлено, что если ширина интервала не больше 200 каналов, удовлетворительные результаты получаются при задании полинома третьей степени, если ширина интервала порядка 400 каналов, надо задавать полином пятой степени для подгонки подложки в интервале.

Задание перекрывающихся участков в последовательных интервалах помогает лучшему сшиванию подложки на границе интервалов. После того как найдены площади D-пиков в интервале, из спектра вычитаются соответствующие S и F-пики. В программе LINFIT можно задавать параметры функции эффективности. Тогда кроме площадей D-пиков программа выдает значения соответствующих интенсивностей. На этом обработка спектров жестких γ -квантов заканчивается.

На рис.2 приведен пример подгонки участка в четырех спектрах с помощью программы LINFIT. Для наглядности теоретические спектры изображены плавными кривыми с помощью интерполяции между теоретическими значениями в каждом канале.

10. ОБРАБОТКА СПЕКТРОВ МЯГКИХ γ -КВАНТОВ

Особенности спектров мягких γ -квантов изложены в п.2. Так как эти спектры похожи между собой /см. 2.2.1/, для нахождения функций h и v /6.3/ обрабатывается один или несколько спектров, имеющих наибольшую статистику. Последовательность

обработки следующая: программой SPANAL в режиме 9.1 подгоняются выбранные спектры. По полученным значениям z_i строится функция h . Эта функция задается в программе, и спектры подгоняются в режиме 9.2. По полученным значениям w_i строится функция v . Если область мягких γ -квантов состоит из нескольких участков /см. 2.2./, функции h и w находятся для всех участков одновременно с учетом их правильного взаимного расположения. После задания h и v проводится поиск пиков без вычитания соответствующих S и F-пиков во всех спектрах. Далее делается усреднение положений пиков из разных спектров и используется программа LINFIT для окончательной подгонки. Единственное отличие задания параметров в этом случае от задания параметров для подгонки спектров жестких γ -квантов - задается $d=0$ и функция $u \equiv 0$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бечварж Ф. и др. ОИЯИ, Б1-13-11351, Б1-13-11352, Дубна, 1977.
2. Vesvar F., Chrien R.E., Wasson O.A. Nucl.Phys., 1974, A236, p.175.

Рукопись поступила в издательский отдел
28 мая 1981 года.