

## ПРИЛОЖЕНИЕ 2

### Основные понятия ядерной спектрометрии с применением амплитудного анализа

#### 1. Спектры и амплитудные распределения

В дальнейшем речь пойдет об измерении энергетических спектров *ядерных* излучений. В ядерной физике под энергетическим спектром подразумевается закон распределения по энергии частиц или  $\gamma$ -квантов, а измерение энергетического спектра – это восстановление функции плотности распределения  $P_E(E)$  по результатам обработки экспериментальных данных ( $E$  – энергия излучения). Эти данные получают с помощью спектрометров *ядерных* излучений ( $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ -излучения).

Мы рассмотрим такие спектрометры, основу которых составляют детекторы ядерных излучений, использующие взаимодействие частиц или квантов с веществом. В результате такого взаимодействия на выходе детектора возникают электрические сигналы. По параметрам распределения этих сигналов судят о спектре излучений.

Блок-схема типичного спектрометра представлена на рисунке 1. Головной частью спектрометра является детектор ядерных излучений, вырабатывающий электрический импульс, амплитуда которого определяется энергией, **потерянной частицей или квантом в детекторе**. Таким образом, экспериментальное исследование энергетических спектров сводится к регистрации и анализу распределения по амплитудам выходных сигналов детектора  $P_a(u)$ , где  $u$  – амплитуда сигнала.

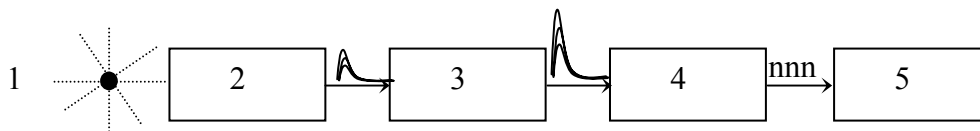


Рис. 1. Блок-схема спектрометра

1 – источник излучений, 2 – детектор излучений, 3 – линейный усилитель, 4 – амплитудно-цифровой преобразователь (АЦП), 5 – компьютер.

ческих спектров сводится к регистрации и анализу распределения по амплитудам выходных сигналов детектора  $P_a(u)$ , где  $u$  – амплитуда сигнала.

В дальнейшем мы будем рассматривать только дискретные (линейчатые) энергетические спектры. Примеры таких спектров показаны на рисунках 2а и 2в. Однако, при регистрации амплитудного распределения, как сам детектор, так и электронная аппаратура, применяемая для передачи его сигналов, вносят свои искажения (шум). В результате распределение амплитуд на выходе спектрометра всегда непрерывно.

На рисунке 2а показано распределение, состоящее из одной спектральной линии, а на рисунке 2б – соответствующее ему распре-

деление амплитуд на выходе спектрометра. Во многих случаях такое распределение описывается функцией Гаусса. Полная ширина этой функции на половине высоты (*ПШПВ*) является одной из важнейших характеристик спектрометра (англ. *fwhm* – *Full Width at Half Maximum*). *ПШПВ*, выраженная в энергетических единицах, например в *кэВ*, называется **энергетическим разрешением**. Часто используется также отношение *ПШПВ* к энергии соответствующей линии, обычно выраженное в процентах, которое **называется относительным энергетическим разрешением**. *Энергетическое разрешение* определяет, насколько близко могут находиться в спектре две линии, которые спектрометр позволяет идентифицировать как разные. На рисунке 2в показан случай двух близко расположенных линий. Как видно из рис. 2г, пики амплитудного распределения в этом случае частично перекрываются и идентификация линий по ним затруднена, а иногда и невозможна. В некоторых случаях, используя соответствующий математический аппарат, такие плохо разрешенные линии можно разделить.

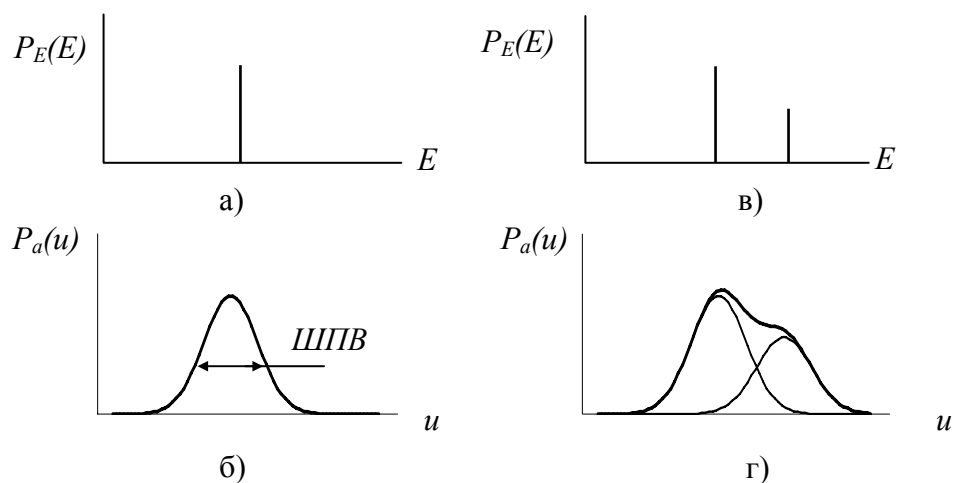


Рис.2. Энергетический спектр и амплитудное распределение:  
 а) мономонхромный спектр (синглет), б) амплитудное распределение одиночной линии, в) две близкие линии (дублет), г) амплитудное распределение дублета.

Вероятно, Вы уже знакомы с основами теории информации и в частности с важнейшим ее понятием «*отношение сигнал-шум*» или с его оптическим аналогом «*разрешающая способность*». Соответствующие понятия ядерной спектроскопии принципиально не отличаются; так, под разрешающей способностью спектрометра энергий подразумевается отношение энергии к *ПШПВ*. Однако, для решения задач спектроскопии ядерных излучений изложенный выше подход удобнее. Например, сигналы с выхода детектора во многих случаях настолько велики, что задачи выделения их из шумов не существует. Зато весьма актуальна проблема различения двух близких по энергии линий.

В действительности взаимодействие частиц и квантов с веществом имеет сложный статистический характер, в результате чего амплитуды сигналов на выходе детектора связаны с энергией не од-

нозначно. Например, при регистрации  $\gamma$ -квантов, наличие трех процессов взаимодействия (фотоэффект, комптон-эффект и образование пар) приводит к тому, что амплитудное распределение для монохроматического излучения может состоять из плавной части с тремя пиками. Поэтому распределение амплитуд на выходе спектрометра обычно описывается сложной функциональной зависимостью. Эта зависимость называется *функцией отклика*. Ее характеристики определяются типом детектора, видом излучения и техническими данными измерительной аппаратуры.

Обращаем также внимание на то, что, независимо от типа применяемого детектора, амплитуда на его выходе в итоге определяется величиной заряда, пропорциональной числу образовавшихся в детекторе носителей заряда, и соответственно зависит от статистических флуктуаций числа этих зарядов. Поэтому *энергетическое разрешение* зависит от энергии излучения.

Обычно соответствие между амплитудой и энергией устанавливается путем измерения и обработки спектра с известными параметрами. Установление такого соответствия называется *градуировкой*. В дальнейшем зависимость  $E=F(u)$ , где  $E$  – энергия,  $u$  – амплитуда, будем называть градуировочной функцией или градуировочной кривой, а пару соответствующих друг другу значений  $E$  и  $u$  – градуировочной точкой.

Выходные сигналы детекторов излучений имеют, как правило, импульсный характер. Эти сигналы распределены статистически, как по амплитуде, так и по времени. Однако мощность этих сигналов, как правило, мала, что затрудняет их регистрацию и анализ. Поэтому в спектрометрическом тракте имеется усилитель. Его основное назначение – согласование параметров детектора и последующих измерительных устройств. Одновременно он служит для формирования импульсов по длительности и для подавления шумов. Существенным свойством усилителя является *линейность*. Усилитель называется линейным, если  $u_{\text{вых}}=K \cdot u_{\text{вх}}$ , где  $u_{\text{вх}}$  – амплитуда входного сигнала,  $u_{\text{вых}}$  – амплитуда выходного сигнала,  $K$  – константа.

Подключим к выходу усилителя осциллограф в ждущем режиме. Выберем длительность развертки такой, чтобы по оси  $X$  каждый импульс укладывался полностью. Мы увидим (рис. 3), что на экране появляются сигналы самых разных

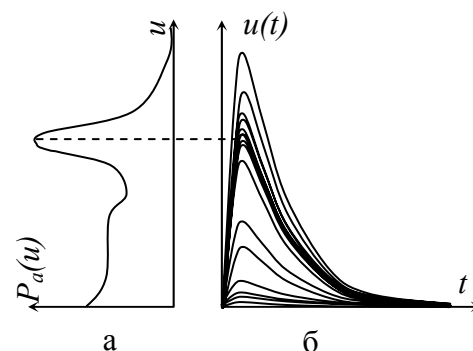


Рис. 3. Амплитудное распределение (а) и соответствующие осциллограммы (б).

амплитуд в случайном порядке. Приглядевшись внимательнее, мы заметим, что по вертикали картина состоит из сгущений и разрежений линий, очерчивающих отдельные импульсы. Сгущениям соответствуют амплитуды импульсов, которых больше в распределении (пик распределения  $P_a(u)$ ), а разрежениям – минимум распределения.

## 2. Принцип многоканального амплитудного анализа

Амплитудные распределения регистрируются и обрабатываются с помощью цифровой электронной техники, в частности, компьютеров. Исследуемый диапазон амплитуд разбивается на конечное число интервалов, обычно равных, каждому из которых присваивается порядковый номер. Эти интервалы принято называть **каналами**. За одинаковое для всех каналов время подсчитывается число импульсов, амплитуда которых лежит в пределах каждого из интервалов. Таким образом, непрерывное амплитудное распределение  $P_a(u)$  представляется в виде дискретного распределения  $C_n(n)$ , где  $n$  – номер канала, а  $C_n$  – число отсчетов в канале. Другими словами, распределение представляется гистограммой (рис. 4).

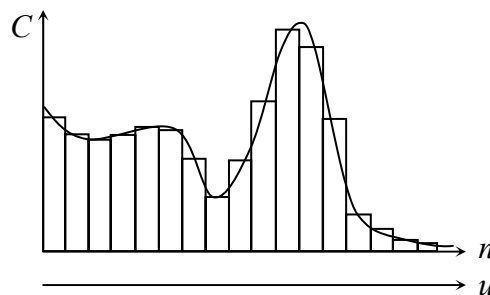


Рис. 4. Гистограмма амплитудного распределения.

Преобразование аналоговых сигналов на выходе линейного усилителя в цифровые коды, с которыми может работать компьютер, осуществляется амплитудно-цифровым преобразователем (АЦП), в котором амплитуда каждого импульса измеряется и определяется соответствующий ей номер канала. Затем компьютер считывает номер канала и прибавляет единицу к содержимому элемента массива, выделенного для каждого канала. Такой метод регистрации амплитудного распределения получил название **«многоканальный амплитудный анализ»**.

(Разумеется, это не единственный способ технической реализации амплитудного анализатора, например, АЦП может иметь собственную память, а в компьютер передавать массивы накопленных данных.)

Число каналов анализатора определяется техническими характеристиками АЦП. Обычно амплитудный анализатор имеет линейную характеристику, т.е. номер канала пропорционален амплитуде на входе АЦП, а максимальный номер канала соответствует максимальному значению амплитуд, которое возможно измерить с помощью АЦП. На практике используются анализаторы с числом каналов  $100 \div 20000$  в зависимости от поставленной задачи.

Итак, учитывая сказанное выше, можно считать, что связь номера канала с энергией линейна. В этом случае часто применяется такая характеристика, как **цена канала**, выраженная в энергетических единицах, например, кэВ/канал. Цена канала, а, следовательно, и диапазон энергий регистрируемого излучения, определяются характеристиками детектора и коэффициентом усиления спектрометрического тракта, с одной стороны, и числом каналов АЦП, с другой стороны. На рисунке 5 показаны амплитудные распределения двух энергетических линий, причем, нижнее распределение зарегистрировано при коэффициенте усиления в 3 раза большем, чем верхнее. Из этого рисунка видно, что положения максимумов пиков сдвигаются пропорционально увеличению коэффициента усиления, что соответствует уменьшению цены канала в три раза; ширина пиков, выраженная числом каналов, также пропорционально увеличивается. Особо обращаем Ваше внимание на то, что ПШПВ может характеризовать *разрешение* спектрометра только в том случае, если она выражена энергетическими единицами, но не числом каналов. Именно это демонстрирует рисунок 5: ширина пиков на гистограммах зависит от коэффициента усиления, но *относительное разрешение* спектрометра ( $fwhm/E$ ) от него не зависит, а определяется техническими данными детектора и спектрометрического тракта.

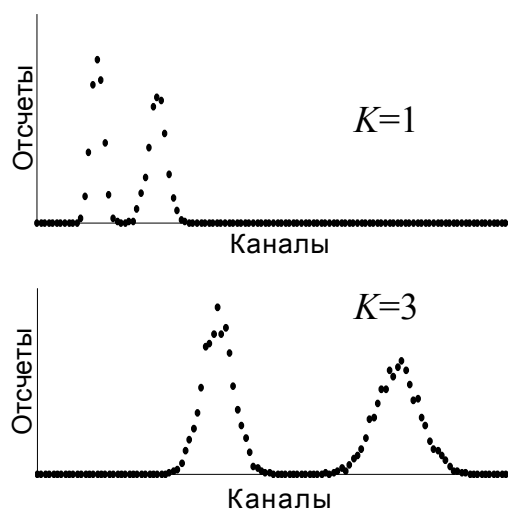


Рис. 5. Амплитудное распределение двух линий при разных коэффициентах усиления.  $K$  – коэффициент усиления.

### 3. Математическая обработка данных

В дальнейшем речь пойдет о математической обработке амплитудных распределений применительно к спектрометрии  $\gamma$ -излучений. Как уже было сказано, мы рассматриваем линейчатые энергетические спектры. Их амплитудное распределение чаще всего состоит из плавной части с отдельными пиками. В большинстве методов обработки информацию о спектре излучения извлекают из параметров пиков. К таким параметрам относятся: положение максимума пика, ширина пика и площадь пика (полное число событий в пике, пропорциональное интенсивности  $\gamma$ -линии, причем коэффициент пропорциональности сильно зависит от энергии).

Поскольку в многоканальном амплитудном анализаторе распределение представлено гистограммой, положение максимума пика не может быть определено по номеру канала с максимальным числом отсчетов, а должно вычисляться методами математической статистики. При этом положение максимума и другие параметры определяются с точностью до долей канала. В таком случае вместо номера канала будем использовать величину  $p$  – положение максимума пика на непрерывной оси каналов, а под градуировочной функцией мы будем подразумевать зависимость  $E=F(p)$ .

Очевидно, что для правильного описания формы пика и его положения необходимо, чтобы он был определен, по крайней мере, несколькими каналами. Обычно достаточно 5÷10 каналов на ПШПВ. Увеличение числа каналов на пике незначительно повышает точность определения параметров распределения. Однако их существенное уменьшение может привести даже к потере пика. На практике число точек на пике чаще всего определяется условиями проведения измерений, в частности диапазоном энергий, и техническими данными аппаратуры.

Применяются различные варианты обработки участков распределения, содержащих пики. Наиболее последовательный метод состоит в том, что для обрабатываемого участка выбирают математическую модель, описывающую распределение. Тем или иным методом ищутся такие значения параметров, чтобы модель наилучшим образом описывала экспериментальные данные. Во многих случаях модель, соответствующая одиночному пику, имеет вид:

$$Y(p) = A_1 + A_2 p + A_3 e^{-\frac{(p-p_1)^2}{2\sigma^2}}, \text{ где}$$

$p$  – амплитуда зарегистрированных импульсов (положение точки на непрерывной оси каналов);

$p_1$  – положение максимума пика;

$\sigma$  – величина, связанная с полной шириной пика на половине высоты соотношением  $fwhm = 2.355\sigma$ ;

$A_1, A_2$  – параметры, определяющие фон в окрестности пиков;

$A_3$  – параметр, определяющий высоту пика.

То есть предполагается, что амплитудное распределение представлено пиком гауссовой формы на «фоне», линейном в окрестностях пика (в данном случае термином «фон» обозначается непрерывное распределение в ближайшей окрестности пика, и его не следует путать с сопутствующим  $\gamma$ -излучением, не связанным с исследуемым источником). Наиболее существенные параметры пика: положение

максимума (или центра тяжести), площадь и ПШПВ определяются после вычитания «фона» (рис.6).

Выше мы предполагали, что между энергией, поглощенной детектором, и положением максимума пика в каналах существует линейная зависимость. В действительности так бывает далеко не всегда.

Во-первых, амплитудно-цифровой преобразователь (АЦП) может обрабатывать аналоговые сигналы только в ограниченном диапазоне. В частности, имеется порог, ниже которого амплитуды входных импульсов в номер канала не преобразуются. Это приводит к тому, что градуировочная линия должна быть представлена функцией  $E=G_0+G_1 \cdot p$ , где  $G_0$  и  $G_1$  – константы, и, следовательно, градуировка может быть выполнена не менее чем по двум точкам, т.е. должны быть известны энергии, по крайней мере, двух линий.

Во-вторых, амплитуды сигналов на выходе усилителя пропорциональны энергии лишь приблизительно. Это связано с характеристиками и режимом работы детектора и усилителя. Даже при удачном выборе этих режимов зависимость положения пика от энергии может быть нелинейной. В таких случаях для градуировки используется столько известных линий, сколько возможно. При наличии большого числа реперов градуировочная линия может быть аппроксимирована другой зависимостью, например параболой; часто используется и какая-либо иная интерполяция.

В тех случаях, когда отклонением от линейности можно пренебречь, для повышения точности также следует применять по возможности большое число точек, а прямую проводить, например, методом наименьших квадратов. В любом случае нужно иметь в виду, что наиболее точный результат получается, когда в качестве реперных используются линии, расположенные вблизи исследуемых.

**Обращаем внимание на важность процедуры градуировки, так как зачастую именно она определяет точность полученного результата.**

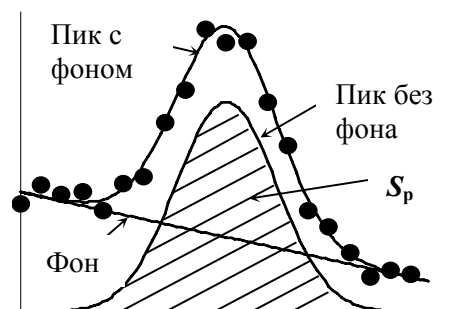


Рис. 6. Результат аппроксимации пика.