

Министерство образования и науки РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
(ФГБОУ ВО «АмГУ»)

ЯДЕРНЫЕ И НЕЙТРОННЫЕ МЕТОДЫ
сборник учебно-методических материалов
для направления подготовки
03.04.01 – Прикладные математика и физика

Благовещенск 2017

*Печатается по решению
редакционно-издательского совета
инженерно-физического факультета
Амурского государственного
Университета*

Составитель: Верхотурова И.В.

Ядерные и нейтронные методы: сборник учебно-методических материалов для направления подготовки 03.04.01.– Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2017.

© Амурский государственный университет, 2017

© Кафедра физики, 2017

© Верхотурова И.В., составление

ВВЕДЕНИЕ

Дисциплина «Ядерные и нейтронные методы» направлена на освоение некоторых методов исследования твердых веществ по их радиоактивности с целью определения состава или различных физических свойств.

Принципиальная особенность ядерных и нейтронных методов состоит в том, что они дают информацию непосредственно о вещественном составе целого ряда элементов таблицы Менделеева непосредственно в естественных условиях. В отличие от методов лабораторной химической аналитики, ядерные и нейтронные методы являются чисто инструментальными, следовательно, более объективными, экспрессными, что делает их незаменимым средством более полного комплексного исследования состава и свойств твердых веществ.

Для формирования умений и навыков в учебной программе дисциплины предусмотрены лекции и практические занятия, а также самостоятельная работа студентов.

В процессе обучения происходит закрепление и систематизация знаний, углубление теоретических знаний, развитие умений работать с различными источниками информации и как результат – освоения основных компетенций.

1 КРАТКИЙ КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ

1.1 Общие рекомендации по организации работы на лекции

В высшем учебном заведении лекция является важной формой учебного процесса и представляет собой в основном устное систематическое и последовательное изложение материала по какой-либо проблеме, методу, теме вопроса и т. д.

Основные функции, которые осуществляет вузовская лекция – это информативная, ориентирующая и стимулирующая, методологическая, развивающая и воспитывающая, поскольку на лекции студенты получают глубокие и разносторонние знания, развивают свои творческие способности.

Лекции могут быть вводными, обзорными, тематическими (лекции по изучению нового материала), итоговыми.

Вводные лекции готовят студента к восприятию данной дисциплины (физики) или ее раздела. На вводной лекции излагаются цели и задачи дисциплины, ее актуальность, практическая значимость, методы научного исследования и т.д. для того, чтобы дать целостное представление о дисциплине и вызывать интерес к предмету.

Тематические лекции посвящены глубоко осмысленному и методически подготовленному систематическому изложению содержания курса (дисциплины).

Итоговая лекция содержит основные идеи и выводы по курсу, выводы о достижении поставленных учебных целей.

На обзорных лекциях рассматриваются наиболее сложные, проблемные вопросы курса или новейшие достижения в данной области, что позволит установить взаимосвязь учебного материала с производством и новейшими научными достижениями.

Подготовка к самостоятельной работе над лекционным материалом должна начинаться на самой лекции. На лекции студент должен совместить два момента: внимательно слушать лектора, прикладывая максимум усилий для понимания излагаемого материала и одновременно вести его осмысленную запись. И как бы внимательно студент не слушал лекцию, большая часть информации вскоре после восприятия будет забыта. Поэтому при изучении дисциплины студентам рекомендуется составлять подробный конспект лекций, так как это обеспечивает полноценную систематизацию и структурирование материала, подлежащего изучению. Конспект лекций должен отражать специфику данного курса, которая состоит в обобщении физической теории,

рассматривающей процессы обмена энергией в макроскопических системах, на случай сложных, полифункциональных систем.

Очень важным является умение правильно конспектировать лекционный материал и работать с ним. Ниже приведены *рекомендации по конспектированию лекций и дальнейшей работе с записями*.

1. Конспект лекций должен быть в отдельной тетради. Ее нужно сделать удобной, практичной и полезной, ведь именно она является основным информативным источником при подготовке к различным отчетным занятиям, зачетам, экзаменам. Возможно ее сочетание с записями по практическим занятиям, иллюстрирующим применение теоретических законов и соотношений в решении практических задач.

2. Конспект должен легко восприниматься зрительно (чтобы максимально использовать «зрительную» память), поэтому он должен быть аккуратным. Выделяйте заголовки, отделите один вопрос от другого, соблюдайте абзацы, подчеркните термины.

3. При прослушивании лекции обращайтесь внимание на интонацию лектора и вводные слова «таким образом», «итак», «необходимо отметить» и т.п., которыми он акцентирует наиболее важные моменты. Не забывайте пометать это при конспектировании.

4. Не пытайтесь записывать каждое слово лектора, иначе потеряете основную нить изложения и начнете писать автоматически, не вникая в смысл. Не нужно просить лектора несколько раз повторять одну и ту же фразу для того, чтобы успеть записать. Лекция не должна превращаться в своеобразный урок-диктант. Техника прочтения лекций преподавателем такова, что он повторяет свою мысль два-три раза. Постарайтесь вначале понять ее, а затем записать, используя сокращения.

Конспектируйте только самое важное в рассматриваемом параграфе: формулировки определений и законов, выводы основных уравнений и формул, то, что старается выделить лектор, на чем акцентирует внимание студентов.

Старайтесь отфильтровывать и сжимать подаваемый материал. Научитесь в процессе лекции разбивать текст на смысловые части и заменять их содержание короткими фразами и формулировками. Более подробно записывайте основную информацию и кратко – дополнительную.

5. По возможности записи ведите своими словами, своими формулировками. Используйте общепринятую в данном разделе физики аббревиатуру и систему сокращений. Придумайте собственную систему сокращений, аббревиатур и символов, удобную только вам (но не забудьте сделать словарь, иначе существует угроза не расшифровать текст). Однако при дальнейшей ра-

боте с конспектом символы лучше заменить обычными словами для быстрого зрительного восприятия текста.

6. Конспектируя лекцию, надо оставлять поля, на которых позднее, при самостоятельной работе с конспектом, можно сделать дополнительные записи, отметить непонятные места. Полезно после каждой лекции оставлять одну страницу свободной, она потребуется при самостоятельной подготовке. Сюда можно будет занести дополнительную информацию по данной теме, полученную из других источников: чертежи, графики, схемы, и т.п.

7. После прослушивания лекции необходимо проработать и осмыслить полученный материал. Насколько эффективно студент это сделает, зависит и прочность усвоения знаний, и, соответственно, качество восприятия предстоящей лекции, так как он более целенаправленно будет её слушать. В процессе изучения лекционного материала рекомендуется использовать опорные конспекты, учебники и учебные пособия.

1.2 Краткое содержание курса лекций

ТЕМА 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О РАДИОАКТИВНОСТИ.

Естественная радиоактивность, т.е. самопроизвольный распад неустойчивых атомных ядер, спонтанно превращающихся в ядра других элементов, сопровождается испусканием альфа-, бета-частиц, гамма-квантов и другими процессами.

Известно более 230 радиоактивных изотопов различных элементов, называемых радиоактивными нуклидами или радионуклидами. Радиоактивность тяжелых элементов с порядковым номером в таблице Менделеева, большим 82, сводится к последовательным превращениям одних элементов в другие и заканчивается образованием устойчивых нерадиоактивных изотопов.

Основными радиоактивными рядами, или семействами, тяжелых элементов являются ряды урана-238, урана-235, тория-232. Перечисленные элементы (их называют материнскими радионуклидами) являются родоначальниками семейств и относятся к долгоживущим: у них период полураспада, т.е. время, необходимое для того, чтобы число атомов уменьшилось вдвое, составляет $4,5 \cdot 10^9$; $7,13 \cdot 10^8$; $1,39 \cdot 10^{10}$ лет соответственно. В состав семейств урана входят такие дочерние нуклиды, как радий ($T_{1/2} = 1620$ лет) и самый долгоживущий радиоактивный газ - радон ($T_{1/2} = 3,82$ сут). Конечным продуктом превращений урана является нерадиоактивный так называемый радиогенный свинец.

Кроме радиоактивных семейств имеются одиночные радионуклиды, в которых радиоактивный распад ограничивается одним актом превращений. Среди них наиболее распространен калий-40.

Радиоактивный распад, как процесс превращения одних изотопов в другие, обусловлен внутренним, независимым от внешних условий состоянием атомных ядер. Характеризуют радиоактивный распад периодом полураспада ($T_{1/2}$), который у различных элементов изменяется в очень широких пределах - от 10^{-6} сек до 10^{10} лет. Для каждого элемента $T_{1/2}$ является определенной и постоянной величиной и может служить его диагностическим признаком.

Все одиночные радиоактивные изотопы характеризуются весьма большими периодами полураспада ($T > 10^9$ лет). За исключением самария и вольфрама они распадаются путем α -захвата и β -распада, превращаясь в устойчивый изотоп нового элемента.

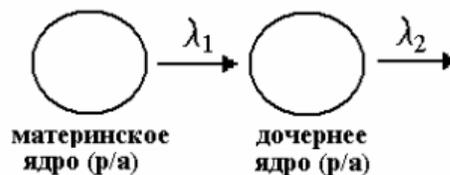
Содержание в природе большинства из перечисленных радиоактивных изотопов, как правило, очень мало. Наибольший интерес представляет изотоп $K40$, т.к. распространенность элемента $Ca40$ в природе огромно – этот элемент входит в состав породообразующих минералов (например кальцит, известняк, доломит и др.). Другие радиоактивные элементы, не входящие в ряды, за исключением вольфрама, относятся к группе редкоземельных, и их вклад в естественную радиоактивность пород ничтожен. В ядерной геофизике эти элементы используются при определении абсолютного возраста пород.

Радиоактивный распад подчиняется экспоненциальному закону:

$$N = N_0 \exp(-\lambda t) .$$

Величина λ есть отношение числа распадающихся в единицу времени ядер к имеющемуся к этому времени нераспавшимся ядер. Размерность λ обратная времени. Зная величину λ , легко вычислить среднюю продолжительность жизни радиоактивного ядра.

Для каждого радиоактивного элемента постоянная распада λ и период полураспада являются характерными величинами и имеют строго определенные значения. Для различных же элементов эти параметры резко изменяются.



В тех случаях, когда рассматривается распад не отдельно взятого радиоактивного элемента, а образующего при этом радиоактивного продукта его распада (дочернего элемента), за-

кон изменения содержания последнего во времени характеризует такое состояние, когда число распадающихся атомов исходного радиоактивного вещества равно числу распадающихся атомов продукта его распада. Убыль дочернего вещества вследствие распада полностью компенсируется его образованием из исходного. *Это состояние называется устойчивым равновесием.*

Классическим примером устойчивого радиоактивного равновесия является равновесие между ураном ($T = 4,49 \cdot 10^9$ лет) и радием ($T = 1540$ лет), которое наступает по истечении длительного промежутка времени и наблюдается только в древних хорошо сохранившихся горных породах и минералах.

Наличие устойчивого радиоактивного равновесия в радиоактивных семействах имеет важное значение, так как позволяет судить о содержании в породах радиоактивных элементов по результатам измерений других элементов рассматриваемого семейства.

Процессы радиоактивного распада носят статистический характер, т. е. число атомов радиоактивного элемента, распадающихся в единицу времени, не строго постоянно, а колеблется около некоторого среднего значения. Высокая статистическая точность измерений радиоактивности обеспечивается лишь в случае, когда количество распадов в единицу времени достаточно велико или когда измерения проводятся на протяжении достаточно большого промежутка времени.

Для сравнительной оценки радиоактивности горных пород применяются два вида единиц *единицы активности* или содержания в породах радиоактивных элементов, и *единицы дозы*, определяющие меру воздействия радиоактивных излучений на вещество.

Для оценки γ -активности пород используют единицу грамм-эквивалент радия, соответствующую такому количеству любого радиоактивного вещества, интенсивность γ -излучения которого эквивалентна интенсивности γ -излучения 1 г радия, заключенного в платиновый фильтр толщиной 0,5 мм. Эта единица весьма удобна для практического использования, однако ее численные значения зависят от соответствия спектрального состава измеряемого γ -излучения спектру γ -излучения эталона - радия, а также от индивидуальных особенностей измерительной аппаратуры.

Единицы дозы излучения позволяют проводить количественную оценку воздействия радиоактивных излучений на облучаемую среду. Поглощенная доза определяется как энергия излучения любого вида, поглощенная единицей массы любого вещества.

Поле ядерных излучений характеризуется плотностью, плотностью потока и интенсивностью излучения.

Плотность частиц – это число частиц (γ -квантов), находящихся в данный момент времени в единице объема среды.

Плотность потока частиц – это число частиц (γ -квантов), падающих в 1 секунду на единичную площадку, перпендикулярную направлению параллельного потока частиц (γ -квантов).

Интенсивность излучения - плотность лучистого потока, определяемая количеством лучистой энергии, падающей за единицу времени на единицу площади, перпендикулярную лучам.

ТЕМА 2. ЭФФЕКТ МЕССБАУЭРА. ОСНОВНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ И ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ.

Эффект Мёссбауэра – оно состоит в испускании гамма-луча радиоактивным атомом, находящимся в связанном состоянии, без потери части энергии гамма-излучения за счет эффекта отдачи ядра и резонансном поглощении испущенного гамма-луча ядром стабильного атома, также находящегося в связанном состоянии.

Существование ядерного изомерного перехода, при котором находящееся в источнике (s) радиоактивное ядро, испуская гамма-квант, переходит в стабильное состояние. Этим излучением облучают поглотитель (a), содержащий соответствующие ядра в стабильном состоянии, с целью их перевода в возбужденное состояние (образование изомера, распавшегося в источнике). Когда этот переход удается осуществить, имеет место «ядерный гамма-резонанс». Сказанное схематически изображено на рис. 1.

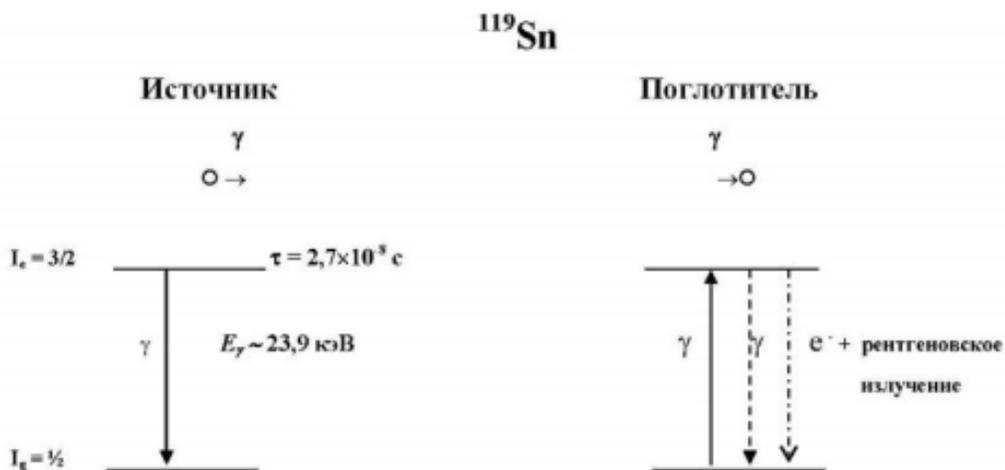


Рис. 1. Схематическая иллюстрация принципа ядерного гамма-резонанса на примере ^{119}Sn .

Ядра атомов могут находиться в основном и возбужденном состояниях. Переход ядра из одного состояния в другое сопровождается либо поглощением, либо испусканием гамма-кванта коротковолнового рентгеновского излучения. Энергия гамма-кванта определяется разностью энергий между основным и возбужденным состояниями ядра атома (E_T), энергией отдачи ядра ($R \sim 10^{-1}$ эВ для свободных атомов) и допллеровским сдвигом (D), вызванным поступательным движением ядра:

$$E_{\text{испускания}} = E_T - R \pm D \text{ (энергия гамма-квантов, испускаемых источником),}$$

$$E_{\text{поглощения}} = E_T + R \pm D \text{ (энергия гамма-квантов, поглощаемых образцом).}$$

Условие резонанса достигается тогда, когда испускаемый возбужденным ядром гамма-квант будет поглощен ядром, находящимся в основном состоянии:

$$E_{\text{испускания}} \approx E_{\text{поглощения}}$$

Графически такое условие может быть представлено в виде области перекрывания площадей кривых распределения по энергиям испускаемых и поглощаемых квантов. Вероятность резонансного процесса возрастает, если ядро-излучатель и ядро-поглотитель фиксированы в жесткой кристаллической решетке. В этом случае при поглощении фотона энергия отдачи превращается в энергию колебаний кристаллической решетки, т. е. отдачу испытывает все твердое тело. Принимая во внимание, что масса тела бесконечно велика по сравнению с массой отдельного атома, энергия отдачи становится пренебрежимо малой ($R \sim 10^{-4}$ эВ).

Эффект резонанса, как правило, наблюдается только в твердом теле для ядер стабильных изотопов (их насчитывается около 80), наиболее широкое применение среди которых нашли Fe^{57} и Sn^{119} .

Измерения вероятности эффекта Мёссбауэра и ее зависимости от температуры позволяют получить сведения об особенностях взаимодействия атомов в твердых телах и колебаниях кристаллической решетки.

Мессбауэровские эксперименты могут осуществляться различными способами (рис. 2). На практике их чаще всего проводят «в геометрии пропускания». Источник s (спрессованный радиоактивный порошок или фольга, помещенные в герметически закрытую кювету) закрепляют на штоке, приводимом в движение вибратором (генератором механических колебаний). Процесс испускания гамма-квантов источником происходит изотропно, т.е. с равной вероятностью во всех направлениях. С помощью свинцового экрана, имеющего отверстие, пучок гамма-квантов «коллимируют» в направлении детектора. На пути пучка устанавливают поглотитель a . Поглотитель чаще всего представляет собой небольшое количество анализируемого порошко-

образного вещества, равномерно распределенного по поверхности (объему) измерительной ячейки.

Если исследуемого вещества недостаточно для заполнения поверхности ячейки (так, чтобы на ней не осталось незаполненных участков), перед проведением измерений образец смешивают с подходящим инертным наполнителем, не содержащим мессбауэровского элемента. В качестве такого инертного наполнителя при съемке спектров ^{57}Fe можно использовать, например, сахарную пудру, растертый порошок активированного угля, порошок нитрида бора и другие вещества, лишь незначительно ослабляющие проходящий через них пучок гамма-квантов за счет нерезонансного поглощения (обусловленного фотоэффектом).

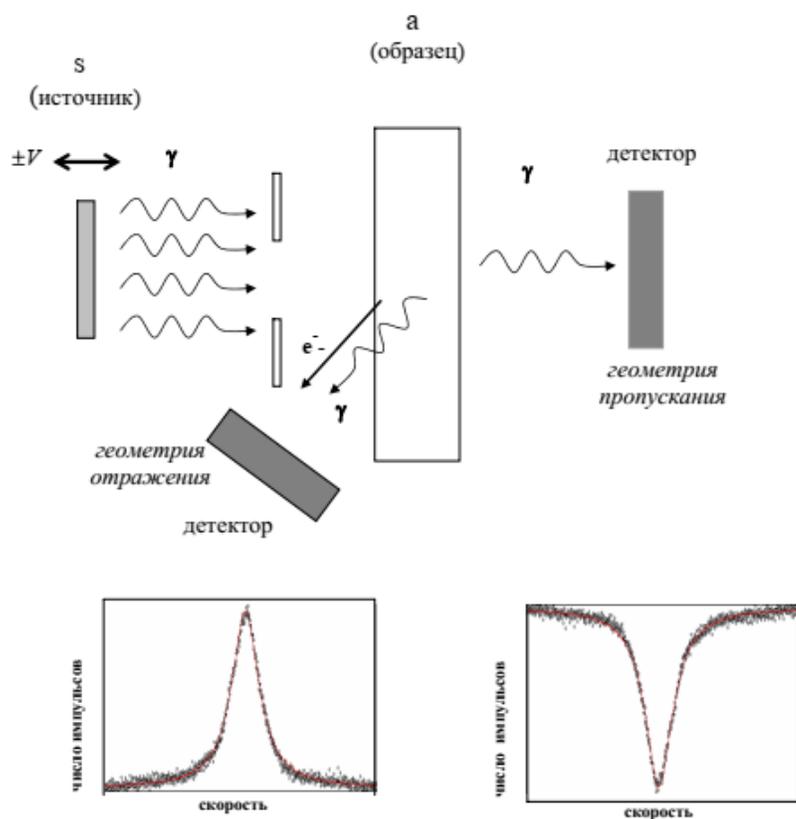


Рис. 2. Варианты проведения мессбауэровских измерений.

Регистрация мессбауэровского спектра состоит в измерении скорости счета γ -квантов (или их относительного поглощения в образце) в зависимости от скорости движения источника (или от номера канала в памяти накопителя информации). Предположим, что источник и поглотитель идентичны с кристаллохимической точки зрения (источник $^{119\text{m}}\text{SnO}_2$; поглотитель $^{119}\text{SnO}_2$). В этом случае значения энергии γ -перехода в источнике и поглотителе равны, вслед-

ствие чего максимум резонансного поглощения будет наблюдаться при $v = 0$ мм/с. После резонансного поглощения γ -кванта, испущенного в направлении детектора (ядро перешло в возбужденное состояние (см. рис. 1), его повторное испускание в поглотителе вновь происходит изотропно (т.е. доля вторичных гамма-квантов, испущенных в направлении детектора, будет мала), что приведет к уменьшению эффективной скорости счета гамма-квантов N_γ , регистрируемой детектором.

Эффект уменьшения N_γ дополнительно усиливается тем, что в поглотителе переход ядер из возбужденного в основное состояние может происходить (как и в источнике) не только посредством испускания γ -кванта, но за счет передачи энергии электронам конверсии, фактически не регистрирующимся детектором гамма-излучения.

Если в рассматриваемом эксперименте источник s привести в движение, энергия γ -лучей перестанет совпадать с энергией перехода в поглотителе, что приведет к ослаблению резонанса и, соответственно, к увеличению скорости счета, которая в конечном итоге перестанет зависеть от величины v .

Если при съемке спектров в геометрии пропускания исследуемое вещество является поглотителем, получаемые спектры называют *«мессбауэровскими спектрами поглощения»* или просто *«мессбауэровскими спектрами»*. В случае, когда исследуемым веществом является источник, их называют *«эмиссионными мессбауэровскими спектрами»*.

В некоторых случаях вместо того, чтобы измерять скорость счета гамма-квантов, прошедших через поглотитель, в зависимости от скорости движения источника, исследуют изменение интенсивности излучения, отраженного под большим углом к первоначальному направлению пучка гамма-квантов (рис. 2). В данном случае речь идет о проведении мессбауэровских измерений *«в геометрии отражения»*.

Резонансное поглощение гамма-квантов в поглотителе, (приводившее к уменьшению скорости счета детектором, установленным за поглотителем), при том же значении частоты вызовет, напротив, усиление отражения (рассеяния) гамма-квантов. Измерения в геометрии отражения требуют затраты большего времени, однако они позволяют исследовать массивные образцы, которые не удастся «просветить насквозь» для получения спектров поглощения.

Благодаря этому *мессбауэровский эффект широко применяется* как метод исследования твердых тел. Применение мессбауэровской гамма-резонансной спектроскопии оказалось чрезвычайно успешным во многих областях науки таких как структурная неорганическая химия, химия твердого тела, радиохимия, аналитическая химия и др.

Мессбауэровскую спектроскопию, по меньшей мере, в наиболее распространенном варианте ее применения (регистрация спектров поглощения), никак нельзя отнести к поверхностно-чувствительным методам диагностики. Это обусловлено тем, что γ -излучение обладает высокой проникающей способностью и по этой причине спектральный вклад поверхностных атомов, за исключением веществ, находящихся в сверхвысокодисперсном состоянии, оказывается пренебрежимо мал по сравнению с тем, который создается внутренними атомами.

Ситуация становится иной, когда мессбауэровские атомы являются примесными и их удается поместить в позиции непосредственно на поверхности частиц. Понятно, что в этом случае информация, содержащаяся в мессбауэровских спектрах, будет избирательно характеризовать локальное окружение поверхностных зондовых атомов и происходящие с ними изменения в результате химических реакций на границе раздела фаз. Для локализации зондовых атомов в позициях поверхностного типа, в принципе, можно воспользоваться различными методами. Одним из них является пропитка изучаемого вещества-субстрата раствором, содержащим мессбауэровский элемент. Пропитанное вещество высушивают, а затем прокаливают для того, чтобы мессбауэровский атом имел возможность «внедриться в структуру поверхности». Однако эту стадию трудно контролировать: при недостаточно высокой температуре часть нанесенного вещества может остаться вне субстрата; напротив, если температура прокаливания чрезмерно высока, часть нанесенного вещества проникнет в кристаллиты на слишком большую глубину.

Распределения примесных атомов по поверхностным позициям иногда удается добиться другим способом. Можно воспользоваться тем, что взаимодействие с газовой атмосферой в ряде случаев приводит к изменению валентного состояния и, соответственно, координационных предпочтений атомов, образующих границу раздела фаз. Было установлено, что в некоторых веществах примесные атомы способны «самопроизвольно» мигрировать из объема на поверхность с тем, чтобы завершить ее формирование. Это позволяет получать образцы, имеющие одинаковый химический состав, в одних из которых примесные атомы сосредоточены в объеме, а в других – непосредственно на границе раздела фаз. При исследовании таких систем спектры мессбауэровских зондовых атомов позволяют не только охарактеризовать распределение соответствующих примесных добавок в изучаемом веществе, но и исследовать механизм их модифицирующего действия на поверхностночувствительные свойства вещества.

Мелкокристаллические (рентгеноаморфные) и крупнокристаллические образцы, имеющие одинаковый химический состав, могут различаться мессбауэровскими параметрами. Это обусловлено как неодинаковым относительным содержанием поверхностных атомов, имеющих

специфическое локальное окружение, так и особыми свойствами «наноразмерного» вещества в целом.

Применение мессбауэровской спектроскопии для исследования кристаллохимии магнитно упорядоченных соединений. По этой тематике выполнено наибольшее число мессбауэровских работ, относящихся к неорганической химии твердого тела. Основные методические приемы, используемые для получения кристаллохимической информации в целом о веществе основаны на анализе данных, относящихся лишь к одному (мессбауэровскому) компоненту изучаемой системы.

ТЕМА 3. ПРОХОЖДЕНИЕ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ И ГАММА-КВАНТОВ ЧЕРЕЗ ВЕЩЕСТВО.

При прохождении излучения с энергией до нескольких мегаэлектронвольт через вещество возможно его взаимодействие с атомными электронами, электрическим полем ядра атома и с ядерным полем нуклонов ядра.

Следствием этих взаимодействий может явиться:

1. *Упругое (когерентное) рассеяние*, т.е. изменение направления движения частицы без изменения суммарной кинетической энергии движущейся частицы и атома.

2. *Неупругое (некогерентное) рассеяние* - всякое другое рассеяние, связанное с изменением кинетической энергии частицы и атома, а также с возбуждением и ионизацией атомов.

3. *Поглощение частицы* - процесс, в результате которого частица поглощается, а ее энергия полностью передается взаимодействующей системе.

Эти элементарные акты взаимодействия (т. е. первичные акты взаимодействия, не учитывающие многократное рассеяние излучения в источнике и защите) определяют картину взаимодействия излучения с веществом.

В веществе, облучаемом ионизирующим излучением может произойти:

- 1) ионизация атомов и молекул;
- 2) возбуждение атомов и молекул;
- 3) возбуждение ядер;
- 4) ядерные реакции, приводящие к изменению химического состава вещества и возможному появлению радиоактивных изотопов;
- 5) образование радиационных дефектов в кристаллических решетках и т. д.;
- 6) нагрев среды;
- 7) испускание вторичного излучения.

Несмотря на то, что характер взаимодействия с веществом заряженных частиц отличается от процессов взаимодействия γ -излучения и нейтронов, в конечном счете энергия ионизирующих излучений расходуется на реализацию вышеуказанных процессов.

Если выбрать направление X для распространения коллимированного пучка частиц и принять некоторую постоянную величину Σ (постоянную для данного вида и энергии излучения и материала среды), равную величине отношения убыли числа частиц $dn(x)/dx$ на отрезке dx к концентрации этих частиц $n(x)$ в пределах того же отрезка dx , то можно записать равенство:

$$-\frac{1}{n(x)} \cdot \frac{dn(x)}{dx} = \Sigma$$

Решение этого уравнение имеет вид:

$$n(x) = n_0 \exp(-\Sigma x)$$

и представляет собой *закон ослабления узкого пучка излучения (нерассеянного излучения) материалом среды*.

Величина Σ имеет размерность обратной длины для фотонного излучения, определяет вероятность взаимодействия фотонов с атомами вещества и *называется линейным коэффициентом ослабления γ -излучения*, обозначается μ , измеряется в сантиметрах в минус первой степени.

Так как линейный коэффициент ослабления γ -излучения μ для данного элемента характеризует относительное уменьшение интенсивности излучения после прохождения 1 см среды и, следовательно, пропорционален плотности среды ρ , то удобно ввести понятие массового коэффициента ослабления γ -излучения единицей массы вещества:

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho}, \text{ см}^2 / \text{Г}$$

Для вещества сложного химического состава:

$$\mu_m = \mu_{m1} \cdot P_1 + \mu_{m2} \cdot P_2 + \dots = \sum_i \frac{\mu_i}{\rho_i} \cdot P_i$$

где μ_{m1}, μ_{mi} - массовые коэффициенты ослабления γ -излучения отдельными составными частями вещества; P_1, P_i - относительные массовые количества составных частей вещества.

В дозиметрии и физике защиты используют понятия атомного μ_a и электронного μ_e коэффициентов ослабления γ -излучения. Они характеризуют ослабление излучения, отнесенное к одному атому или к одному электрону и определяются следующим образом:

$$\mu_a = \frac{\mu}{N} = \frac{\mu A}{\rho N_A} \quad \mu_e = \frac{\mu}{N_e} = \frac{\mu A}{\rho N_A Z}$$

где A – атомная масса; N – число атомов в 1 см^3 вещества; N_e – число электронов в 1 см^3 вещества; N_A – число Авогадро; Z – число электронов в атоме.

В общем виде связь между этими коэффициентами определяется соотношениями:

$$\mu = \mu_m \rho = \mu_a \frac{N_A}{A} = \mu_e \frac{N_A}{A} \rho Z$$

При прохождении через среду пучка γ -квантов, имеющего дискретный спектр интенсивность излучения пучка будет определяться суммой интенсивностей составляющих пучка:

$$I = I' + I'' + \dots + I^n = I'_0 \exp(-\mu' d) + I''_0 \exp(-\mu'' d) + \dots + I^n_0 \exp(-\mu^n d)$$

Для нейтронов вероятность взаимодействия с атомами будет пропорциональна количеству ядер N в 1 см^3 вещества:

$$N = \frac{\rho N_A}{A}$$

Тогда

$$\Sigma = N \cdot \sigma_t,$$

где σ_t – коэффициент пропорциональности, имеющий размерность площади, называется микроскопическим полным сечением взаимодействия.

Величина Σ для нейтронов называется макроскопическим полным сечением взаимодействия.

Величины $1/\Sigma$ и $1/\mu$ имеют размерность длины и называются *длиной свободною пробега*. На расстоянии, равном одной длине свободною пробега, интенсивность коллимированного пучка нейтронов или γ -квантов уменьшается в e раз.

К тяжелым заряженным частицам относят ядра, ионы атомов (протоны, дейтроны, α -частицы и др.) и осколки деления. Для всех заряженных частиц физические процессы взаимодействия с веществом однотипны (некоторые отличия имеются у осколков деления).

Тяжёлые заряженные частицы взаимодействуют главным образом с электронами атомных оболочек, вызывая ионизацию атомов. Проходя через вещество, заряженная частица совершает десятки тысяч соударений, постепенно теряя энергию.

Если энергия заряженной частицы теряется на ионизацию среды, то говорят об удельных ионизационных потерях. Удельные потери энергии возрастают с уменьшением энергии частицы и особенно резко перед остановкой в веществе.

Удельные ионизационные потери энергии для тяжёлых заряженных частиц при энергиях $E \ll (Mc)^2/m_e$:

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{иониз.}} = -\frac{4\pi Z^2}{\beta^2} n_e r_0^2 m_e c^2 \left[\ln\left(\frac{2m_e c^2 \beta^2}{I}\right) - \ln(1-\beta^2) - \beta^2 \right],$$

где m_e – масса электрона; c – скорость света; $\beta = v/c$; v – скорость частицы; Z – заряд частицы в единицах заряда позитрона; n_e – плотность электронов вещества; I – средний ионизационный потенциал атомов вещества среды, через которую проходит частица: $I = 13.5Z'$ эВ, где Z' – заряд ядер вещества среды в единицах заряда позитрона; $r_0 = e^2/m_e c^2 = 2.818 \cdot 10^{-13}$ см – классический радиус электрона.

Тогда формула *удельных ионизационных потерь тяжелых частиц* преобразуется к виду, более удобному для вычислений:

$$-\frac{dE}{dx} = 3.1 \cdot 10^5 \frac{Zz^2 \rho}{A\beta^2} \left[11.2 + \ln \frac{\beta^2}{Z(1-\beta^2)} - \beta^2 \right], \frac{\text{эВ}}{\text{см}}$$

Прохождение электронов через вещество отличается от прохождения тяжёлых заряженных частиц. Это приводит к относительно большому изменению импульса электрона при каждом его столкновении с частицами среды, что вызывает заметное изменение направления движения электрона и как результат - электромагнитное радиационное излучение

Удельные потери энергии электронов с кинетической энергией являются суммой ионизационных и радиационных потерь.

В области низких энергий электронов ($E < 1$ МэВ) определяющий вклад в потери энергии дают неупругие ионизационные процессы взаимодействия с атомными электронами, включающие ионизацию атомов.

Передаваемая в одном столкновении энергия в среднем очень мала и при движении в веществе потери складываются из очень большого числа таких малых потерь.

В нерелятивистской области ионизационные потери быстро уменьшаются при увеличении энергии и достигают минимума при энергии $E \approx 1.5$ МэВ. Далее потери очень медленно (логарифмически) растут с энергией, выходя на плато. Причиной такой зависимости является *поляризация среды пролетающим электроном (эффект плотности)*. В результате ослабляется кулоновское поле релятивистского электрона, и в плотных средах (твёрдые тела, жидкости) потери не растут. Ионизационные потери электронов преобладают в области относительно небольших энергий.

Радиационные потери энергии электронов. С ростом энергии электрона E растут радиационные потери. Согласно классической электродинамике, заряд, испытывающий ускорение a , излучает энергию. Энергия, излучаемая при торможении протона, меньше энергии, излученной электроном в том же поле, примерно в $(m_p/m_e)^2 \approx 3.4 \cdot 10^6$ раз.

Сравнительно небольшая масса электронов существенно сказывается на характере их движения в веществе. При столкновении с атомными электронами и ядрами электроны часто и значительно отклоняются от первоначального направления движения и двигаются по извилистой траектории. Таким образом, *для электронов процесс многократного рассеяния на атомах вещества должен существенно сказываться на их пробеге*

При больших энергиях ($E \gg m_e c^2 = 511$ кэВ) рассеяние сравнительно невелико и основная часть электронов движется в первоначальном направлении. Их интенсивность на начальных отрезках пути практически не меняется, что соответствует участкам плато на кривых поглощения. Это похоже на поведение слаборассеивающихся альфа-частиц. По мере увеличения пройденного расстояния и уменьшения энергии угол рассеяния электронов растёт, и их интенсивность в первоначальном направлении уменьшается. *При малых энергиях направления движений электронов приобретают хаотический характер, а распространение пучка - характер диффузии.*

Взаимодействие позитронов в веществе описывается теми же соотношениями, что и для электронов. Необходимо также дополнительно учесть эффекты аннигиляции налетающего позитрона с электроном вещества и исключить из расчётов эффект обмена. Сечение аннигиляции обратно пропорционально скорости позитронов: $\sigma_{\text{анниг}} \sim 1/v$, поэтому позитроны аннигилируют, практически потеряв всю свою энергию.

При аннигиляции позитрона могут образовываться два и более фотона. Наиболее вероятный процесс – двухфотонная аннигиляция. Этот процесс приводит к образованию монохроматических фотонов.

Образование большего числа фотонов, например трех, приводит к непрерывному энергетическому распределению. Однако в связи с тем, что сечение трехфотонной аннигиляции мало, ею можно пренебречь (трехфотонная аннигиляция происходит примерно в 370 раз реже, чем двухфотонная). Наиболее вероятно испускание двух фотонов в противоположных направлениях под углами, близкими к 0 и 180° относительно направления движения позитрона.

При прохождении γ -излучения через вещество происходит ослабление интенсивности пучка γ -квантов, что является результатом их взаимодействия с атомами вещества.

Вторым по величине вклада в полное сечение в этой же области энергий гамма-квантов является *когерентное рассеяние фотонов на атомах вещества (релеевское рассеяние)*. Ни ионизации, ни возбуждения атомов при релеевском рассеянии не происходит, гамма-квант рассеивается упруго. При энергиях гамма-кванта выше ~ 0.1 МэВ в веществе с малыми значениями Z и выше ~ 1 МэВ в веществах с большим Z главным механизмом ослабления первичного пучка гамма-квантов становится *некогерентное рассеяние фотонов на электронах вещества (эффект Комптона)*.

Если энергия гамма-кванта превышает удвоенную массу электрона $2m_e c^2 = 1.02$ МэВ, становится возможным *процесс образования пары, состоящей из электрона и позитрона*. Сечение рождения пары в поле ядра доминирует в области высоких энергий фотонов. Перечисленные выше механизмы взаимодействия гамма-квантов с веществом не затрагивали внутренней структуры атомных ядер.

При больших энергиях гамма-квантов ($E > 10$ МэВ) увеличивается вероятность процесса взаимодействия фотона с ядрами вещества с возбуждением ядерных состояний. Если энергия кванта больше энергии связи нуклона в ядре, поглощение гамма-кванта высокой энергии будет сопровождаться вылетом нуклона из ядра. При энергиях гамма-квантов около 20-25 МэВ для легких ядер ($A < 40$) и 13-15 МэВ для тяжелых ядер в эффективном сечении ядерного фотопоглощения наблюдается максимум, который называется *гигантским дипольным резонансом*.

В области энергий гамма-квантов, излучаемых возбужденными ядрами при переходах в основное и низшие возбужденные состояния, т. е. при E_γ от 10 кэВ до примерно 10 МэВ *наиболее существенны три процесса взаимодействия фотонов с веществом: комptonовское (некогерентное) рассеяние, фотоэффект и образование пар электрон-позитрон*.

Свойства нейтронов различных энергий. Проходя сквозь вещество, нейтроны вызывают различные ядерные реакции и упруго рассеиваются на ядрах. Интенсивностью этих микроскопических процессов, в конечном счете, определяются все макроскопические свойства прохождения нейтронов через вещество, такие, как замедление, диффузия, поглощение и т. д.

Так как нейтрон имеет нулевой электрический заряд, он практически не взаимодействует с электронами атомных оболочек. Поэтому атомные характеристики среды не играют никакой роли в распространении нейтронов в веществе. Это чисто ядерный процесс. Сечения различных нейтрон-ядерных реакций зависят от энергии нейтронов, сильно и нерегулярно изменяются от ядра к ядру при изменении A или Z . Сечения взаимодействия нейтронов с ядрами в среднем растут по закону " $1/v$ " при уменьшении энергии нейтрона.

Так как у нейтронов отсутствует электрический заряд, они взаимодействуют главным образом с ядрами атомов вещества. В отличие от протонов, которые не могут эффективно взаимодействовать с ядром при малых энергиях из-за кулоновского барьера, *нейтроны даже при низких энергиях способны подойти к ядру на расстояние порядка радиуса действия ядерных сил*. Явления, происходящие при взаимодействии нейтронов с ядрами, зависят от кинетической энергии нейтронов. Нейтроны с энергиями десятки кэВ и более передают энергию в основном в результате прямых столкновений с атомными ядрами.

Средняя длина замедления нейтронов определяется способностью ядер рассеивать нейтроны и равна расстоянию, на котором энергия нейтронов уменьшается от исходной (у быстрых нейтронов энергия превышает 0,5 МэВ) до тепловой (0,025 эВ). Наименьшей длиной замедления < 10 см обладают минералы, в которых имеются бериллий, углерод, железо и водородсодержащие породы, насыщенные водой, нефтью или газом. В других породах, особенно содержащих тяжелые химические элементы длина замедления составляет первые десятки сантиметров. Ослабленные до тепловой энергии нейтроны перемещаются в породе путем диффузии до тех пор, пока не поглотятся какими-нибудь ядрами, этот процесс захвата сопровождается излучением вторичных гамма-квантов. Способность горных пород поглощать тепловые нейтроны выражают через среднюю длину диффузии или пропорциональное ей среднее время жизни тепловых нейтронов. На изменении перечисленных нейтронных свойств химических элементов основаны нейтронные методы поэлементного анализа горных пород и их водонефтегазонасыщенности. Они базируются на изучении плотности (интенсивности) тепловых нейтронов или вторичного гамма-излучения.

ТЕМА 4. АППАРАТУРА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ЯДЕРНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ.

Для обнаружения и измерения интенсивности ядерных излучений применяются приборы, называемые *радиометрами*.

Радиометры подразделяются:

1. Интегральные – измеряют суммарную интенсивность γ -излучения (или потока частиц) вне зависимости от их энергии.

2. Спектрометрические – измеряют распределение γ -квантов (частиц) по энергиям.

Радиометры состоят из:

- индикаторов (детекторов) излучения,
- блока регистрации излучения,
- источников,

- фильтров и других специфических устройств ядерных и нейтронных методов исследования.

Детектор ионизирующих излучений – это устройство, преобразующее энергию излучения в другие виды энергии, удобные для регистрации, чаще всего в электрическую энергию.

Детекторы, применяемые в радиометрах, различают:

1. *По принципу действия*, т.е. по эффекту, используемому для преобразования энергии излучения. Подразделяются на ионизационные и сцинтилляционные: ионизационные детекторы основаны на ионизирующей способности излучения; сцинтилляционные.

2. *По состоянию среды*, в которой происходит эффект от действия излучения. По этому признаку сцинтилляционные детекторы относятся к твердотельным. По состоянию среды ионизационные детекторы подразделяются на газовые (счетчики Гейгера-Мюллера, пропорциональные счетчики и др.), жидкостные (некоторые типы ионизационных камер) и твердотельные (полупроводниковые детекторы).

3. *По возможности регистрировать энергетическое распределение излучения* детекторы подразделяются на интегральные и спектрометрические.

Для спектрометрических детекторов характерно прямо пропорциональная зависимость выходного сигнала от энергии регистрируемого излучения. Для интегральных детекторов, вне зависимости от энергии излучения, выходной сигнал остается постоянным. Примером интегрального детектора может служить газоразрядный счетчик Гейгера-Мюллера, у которого выходной сигнал не зависит от энергии регистрируемого излучения.

Спектрометрические детекторы: сцинтилляционные, полупроводниковые, пропорциональные.

Основными характеристиками детекторов являются: эффективность регистрации, чувствительность, счетная характеристика, уровень собственного фонового излучения, разрешающее время и энергетическое разрешение.

ТЕМА 5. ИСТОЧНИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКИХ И НЕЙТРОННЫХ МЕТОДАХ АНАЛИЗА

В ядерно-физических методах анализа используются разнообразные источники ядерных излучений. Среди них выделяют: радиоизотопные источники, для которых характерны небольшие размеры, ограниченная энергия частиц и обычно невысокая интенсивность излучений; ускорители заряженных частиц и ядерные реакторы, имеющие сложное устройство, но позво-

ляющие получать интенсивные потоки излучения с разнообразной, при необходимости и очень высокой, энергией частиц.

Источники α -частиц. Из-за малого пробега α -частиц источники α -излучения изготавливают в виде тонкого слоя (меньше 0,1 мг/см) изотопа на плоской подложке. Для получения высокой удельной активности период полураспада изотопа должен быть не слишком велик.

Изотоп	Период	Энергия	Выход излучения
Pu ²³⁸	86 лет	5,45	28
Pu ²³⁹	24360 лет	5,10	11,5
		5,14	15,1
		5,16	73,0
Pu ²⁴⁰	6580 лет	5,12	24
		5,17	76
Po ²¹⁰	138 дней	5,30	100

Наиболее широко применяют изотопы Pu²³⁸, Pu²³⁹, Pu²⁴⁰, U²³⁴ и Po²¹⁰.

Источники β -излучения обычно представляют препарат с в-активным изотопом, помещенный в герметичную ампулу. Поскольку спектр в-излучения сплошной, в таблице указывается максимальная энергия частиц E_{\max} .

Изотоп	Период полураспада	Энергия излучения, Кэв	Выход излучения на 100 распадов
H ³	12,3 года	18	100
C ¹⁴	5760 лет	155	100
S ³⁵	87,2 дня	167	100
Sr ⁹⁰	28 лет	546	100
Y ⁹⁰	64,3 часа	2260	100
Ni ⁶³	125 лет	67	100

Изотоп Y⁹⁰, являющийся продуктом распада Sr⁹⁰, имеет малый период полураспада. Поэтому через одну - две недели после изготовления источника Sr⁹⁰, между последним и Y⁹⁰ устанавливается радиоактивное равновесие, т. е. получается смешанный источник Sr + Y с периодом полураспада 28 лет.

Источники γ -излучения представляют собой радиоактивный препарат, помещенный в герметичные ампулы из нержавеющей стали или алюминия; в некоторых случаях используются источники в виде металлических подложек с тонким слоем изотопа.

Изотоп	Период полураспада	Энергия излучения, Кэв	Выход излучения на 100 распадов
Co ⁶⁰	5,25 лет	1330	100
Cs ¹³⁷	29,6 лет	661	82,5
Tm ¹⁷⁰	129 дней	84,2	3
Se ⁷⁵	120 дней	121	20
		136	61
		265	71
		279	29
		400	16
Cd ¹⁰⁹	1,3 года	22,6	100

Источники обычно испускают сложный спектр из нескольких интенсивных линий. Большинство α -активных препаратов испускает и γ -излучение, однако оно поглощается в корпусе ампулы или может быть легко исключено дополнительной экранировкой. Чистое α -излучение, без сопровождающего γ -излучения, получается при изомерных переходах или К-захвате.

Изотопные источники нейтронов чаще всего представляют собой смесь или сплав α -излучателя с бериллием или бором. При бомбардировке последних α -частицами происходит реакция (α, n) , например $\text{Be}^9 (\alpha, n) \text{C}^{12}$; $\text{B}^{11} (\alpha, n) \text{N}^{14}$. Спектр нейтронов этих реакций сплошной, в основном за счет потери части энергии α -частиц на ионизацию в веществе самого источника. В качестве α -излучателя чаще всего применяют Po^{210} или Pn^{239} . Достоинством первого является практически полное отсутствие α -излучения, не считая γ -квантов, сопровождающих часть реакций (α, n) ; недостатком — слишком малый период полураспада.

Источник	Период полураспада	Энергия излучения, Мэв	Ядерная реакция
$\text{Pu}^{239} + \text{Be}$	24360 лет	До 10,8	$\text{Be}^9 (\alpha, n)$
$\text{Pu}^{238} + \text{Be}$	86,4 года	До 11	$\text{Be}^9 (\alpha, n)$
$\text{Po}^{210} + \text{Be}$	138 дней	До 10,9	$\text{Be}^9 (\alpha, n)$
$\text{Po}^{210} + \text{B}$	138 дней	До 5 - 6	$\text{B}^{11} (\alpha, n)$
$\text{Sb}^{124} + \text{Be}$	54 дня	0,024	$\text{Be}^9 (\gamma, n)$
Cf^{252}	2,2 года	До 7 - 8	Спонтанное деление

Достоинством Pn^{239} является большой период полураспада, недостатком — большой вес на единицу активности, обуславливающий большой размер и большую стоимость по сравнению с источниками с Po^{210} . Источники с бором дают более мягкий спектр нейтронов, чем источники с бериллием. Конструктивно Po-Be и Po-B источники представляют собой герметичные двой-

ные ампулы из нержавеющей стали или хромированной латуни, внутри которых расположена стеклянная ампула с порошком карбида бериллия (керамическая таблетка) или карбида бора с осажденным на нем Po. Pu-Be источники представляют собой двойные ампулы, заполненные сплавом Pu-Be. К ампульным источникам относится источник из спонтанно делящегося материала, в первую очередь из Cf, с наиболее вероятной энергией нейтрона 1,3 МэВ. Ограниченное применение, в основном при градуировке приборов, имеют фотонейтронные источники, чаще всего $Sb^{124} + Be$. Их недостатком является большой фон γ -излучения.

ТЕМА 6. ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЕ И НЕЙТРОННЫЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА.

Как отмечалось выше, ядерно-физические методы—это методы элементного экспрессного химического анализа веществ, основанные на изучении физических явлений, происходящих при искусственном их облучении нейтронами или гамма-квантами разных энергий.

По технологии проведения анализа ЯФМА делятся на *мгновенные* (эмиссионные), когда регистрируют вторичные излучения, являющиеся непосредственно продуктом ядерной реакции (в этом случае облучение образца и регистрация вторичного излучения совпадают по времени), и *активационные*, основанные на регистрации излучений радионуклидов, возникающих под воздействием возбуждающего излучения (облучение образца и регистрация его наведенной активности во времени разнесены).

Для практических целей применяется почти исключительно относительный вариант ЯФМА, при котором сведения о содержании в образце того или иного элемента получают в результате сравнения вторичного излучения исследуемого и стандартного образцов, облученных в идентичных условиях.

В настоящее время арсенал ЯФМА насчитывает много разновидностей, определяемых как типом излучений, воздействующих на анализируемое вещество, так и способом регистрации эффектов, явившихся следствием этого воздействия. Все эти разновидности обладают рядом преимуществ и недостатков, а следовательно, и определенными границами их применимости в общем диапазоне аналитических задач.

В искусственных ядерно-физических методах облучение образцов проводят с помощью ампульных источников из тех или иных радиоактивных элементов и их смесей или генераторов нейтронов. Для получения излучений разных энергий источники помещают в экраны-замедлители, ослабляющие излучения (свинцовые — для гамма-излучений, кадмиевые или парафиновые — для нейтронов). Наибольшее практическое применение ядерно-физические методы получили при геофизических исследованиях скважин.

1. *Активационный анализ.* Сущность активационного анализа сводится к облучению образцов быстрыми или медленными нейтронами и изучению наведенной искусственной радиоактивности. При этом изменяется как время облучения, так и время изучения наведенной альфа-, бета- или гаммаактивности. Например, измерив интенсивность вторичного гамма-излучения для разных времен после окончания облучения, по графику можно оценить период полураспада и содержание радиоактивного элемента в образце.

Активационный метод характеризуется повышенной чувствительностью к элементам, отличающимся высокой активационной способностью, таким как Al, Cd, Cl, Cu, K, Mn, Na, P, Si и др.

2. *Нейтронный анализ.* Нейтронный анализ сводится к облучению образцов медленными нейтронами и определению плотности потока тепловых нейтронов или интенсивности вторичного гамма-излучения. Графики зависимости этих параметров от расстояния до источника характеризуют поглощающие свойства вещества. По ним выделяют элементы, ядра которых обладают аномально высоким сечением поглощения медленных нейтронов (B, Fe, Cd, Cl, Li, Mn, Hg, редкоземельные элементы и др.). Широко используют автомобильную и пешеходную борометрические съемки для выявления бора в слое толщиной до 25 см.

3. *Гамма-спектральный метод.* Гамма-спектральным методом изучают спектральный энергетический состав вторичного гамма-излучения радиационного захвата. Возможность таких исследований основана на том, что каждый элемент облучаемой породы, захватывая тепловые нейтроны, дает интенсивности вторичного гамма-излучения определенной энергии и спектра. Гамма-спектральный метод применяют для анализа руд, содержащих Fe, Cu, Ni, Al, K, Na и другие элементы.

4. *Фотонейтронный анализ.* Основан на облучении образцов жесткими гамма-квантами высоких энергий (свыше 1-2 МэВ) и определении интенсивности вторичных нейтронов. Повышение этого параметра наблюдается в присутствии бериллия и дейтерия, поэтому фотонейтронный анализ находит наибольшее применение при анализе содержания этих элементов и, в частности, при изучении водоносных и нефтеносных пород, в которых много дейтерия.

5. *Плотностной гамма-гамма метод.* Если горные породы облучать гаммаквантами с энергией свыше 0,3 МэВ, то в них преобладает комптоновское рассеяние, которое слабо зависит от состава породообразующих минералов, но определяется их плотностью. Интенсивность интенсивности вторичных гаммаквантов на расстоянии свыше 20 см от источника изменяется по экспоненциальному закону в зависимости от плотности.

6. *Селективный гамма-гамма метод.* Если образцы облучать гаммаквантами слабых энергий (меньше 0,3 МэВ), то происходит их фотоэлектрическое поглощение. Определяемый по $I_{\gamma\gamma}$ коэффициент ослабления лучей зависит от эффективного атомного номера породы. На использовании этого явления основан селективный гамма-гамма-метод (ГГМ-С) для определения содержания в образцах, обнажениях и стенках горных выработок тяжелых элементов (Fe, Hg, Sb, Pb, W и др.).

7. *Рентгенорадиометрический метод.* При облучении горных пород мягким гаммаизлучением (энергия меньше 0,1 МэВ) можно наблюдать характеристическое рентгеновское излучение. На его изучении основан рентгенорадиометрический метод (РРМ) определения содержания в породах многих элементов (Fe, Pb, Mn, Mo, Sb, Sn, Cr, W, Zn и др.).

2 МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ К ПРАКТИЧЕСКИМ ЗАНЯТИЯМ

Практические занятия основаны на проведении семинаров по изучаемым темам, что существенно дополняет лекции по дисциплине. В процессе анализа изучаемого материала студенты расширяют и углубляют знания, полученные из лекционного курса и учебников, учатся глубже понимать законы и формулы, разбираться в их особенностях, границах применения, приобретают умение применять общие закономерности к конкретным случаям.

Тема 1. Общие сведения о радиоактивности.

Семинар: Опрос на знание основных понятий ядерной физики и законов радиоактивного распада; энергии связи, удельной энергии связи; спин ядра, магнитный и электрический момент ядра

Контрольные вопросы:

Где может происходить нарушение равновесия в рядах урана и тория?

Как можно определить возраст горной породы по содержащимся в ней радиоактивным элементам?

Как называются единицы активности и единицы дозы, дайте их определения.

Почему по α -активности 1 г Ra^{226} эквивалентен примерно 3 тоннам U^{238} ? Чему будет равна активность источника, содержащего 10 мг Co^{60} ($T_{1/2} = 5.25 \text{ лет}$).

Назовите основные α -излучатели в рядах урана и тория.

Тема 2. Эффект Мессбауэра. Основные закономерности и области применения.

Семинар: Опрос на понимание эффекта Мессбауэра, отличие γ -излучения от внутренней конверсии. Описание основного применения Мессбауэровской спектроскопии.

Контрольные вопросы:

В чем заключается эффект Мессбауэра?

Приведите схематическую иллюстрацию принципа ядерного гамма-резонанса на примере ^{119}Sn .

Каково условие резонанса? Как может быть представлено это условие графически?

В каких веществах наблюдается эффект резонанса?

Какие существуют варианты проведения мессбауэровских измерений?

Применение мессбауэровского эффекта.

Тема 3. Прохождение заряженных частиц и гамма-квантов через вещество

Семинар: Опрос на знание и понимание процессов прохождения тяжелых и легких заряженных частиц и гамма-квантов через вещество. Понимание особенностей этих процессов и их основных закономерностей.

Контрольные вопросы

Что такое макроскопическое сечение взаимодействия? Дайте определение эффективному сечению взаимодействия.

Классификация нейтронов по энергиям.

Как зависит тип взаимодействия нейтронов с веществом от энергии нейтронов?

Чем отличается рентгеновское излучение от гамма-излучения?

Чем отличается комптоновское рассеяние гамма-квантов от томсоновского? Какой вид рассеяния будет преобладать при взаимодействии мягкого рентгеновского излучения с веществом?

Какой тип взаимодействия гамма-кванта с веществом преобладает при энергии гамма-кванта: а) до 300 КэВ; б) свыше 1 МэВ?

Используя какое взаимодействие нейтронов с веществом, можно проводить поэлементный анализ вещества?

Почему водород является аномальным замедлителем нейтронов?

Назовите основные характеристики взаимодействия нейтронов с веществом.

Тема 4. Аппаратура для изучения ядерных излучений.

Семинар: Опрос на знание основных видов радиометров, их характеристик и принципа работы.

Контрольные вопросы

Перечислите основные характеристики детекторов излучений.

Перечислите типы детекторов. Какие детекторы используются для спектрометрии излучения и почему?

Из каких компонент состоит сцинтилляционный детектор (СД)? Какие сцинтилляторы используются при регистрации гамма-квантов и нейтронов?

Каков диапазон энергий и каково энергетическое разрешение сцинтилляционного детектора при регистрации гамма-квантов?

Почему эффективность регистрации гамма-квантов для сцинтилляционного детектора выше, чем для полупроводникового (ППД)?

Из каких компонент будет состоять спектр, зарегистрированный сцинтилляционным детектором от моноэнергетического гамма-излучения? Назовите энергии каждой компоненты при регистрации излучения от источника Co^{60} ($E_{\gamma} = 1.2 \text{ МэВ}$).

Сравните характеристики ППД и СД при регистрации гамма-квантов.

Каково принципиальное отличие блок-схемы интегрального радиометра от блок-схемы спектрометра?

Перечислите основные источники погрешностей измерения при радиометрии.

Методика эталонирования радиометров.

Тема 5. Источники излучения, применяемые в ядерно-физических и нейтронных методах анализа

Семинар: Опрос на знание источников излучений, применяемых в ядерно-нейтронных методах анализа. Опрос на понимание какие источники необходимо использовать для исследования определенного рода веществ.

Контрольные вопросы

Какие источники ядерных излучений используются в ядерно-физических методах анализа?

Что относится к источникам α -частиц? Для исследования каких веществ они применяются? И в каких методах ЯФНА используются?

Что относится к источникам β -излучения? Для исследования каких веществ оно применяется? И в каких методах ЯФНА используется?

Что относится к источникам γ -излучения? Для исследования каких веществ оно применяется? И в каких методах ЯФНА используется?

Что относится к изотопным источникам нейтронов? Для исследования каких веществ они применяются? И в каких методах ЯФНА используется?

3 МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ К САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЕ

3.1 Общие рекомендации по организации внеаудиторной самостоятельной работы

В высшей школе студент должен прежде всего сформировать потребность в знаниях и научиться учиться, приобрести навыки самостоятельной работы, необходимые для непрерывного самосовершенствования, развития профессиональных и интеллектуальных способностей.

Самостоятельная работа – это процесс активного, целенаправленного приобретения студентом новых для него знаний и умений без непосредственного участия преподавателей.

Для успешной самостоятельной работы студент должен планировать свое время и за основу рекомендуется брать рабочую программу учебной дисциплины.

При организации самостоятельной работы следует взять за правило:

- учиться ежедневно, начиная с первого дня семестра, пропущенные дни будут потеряны безвозвратно;
- чтобы выполнить весь объем самостоятельной работы, необходимо заниматься по 3–5 часов ежедневно;
- начиная работу, надо выбрать что-нибудь среднее по трудности, затем перейти к более трудной работе, и напоследок оставить легкую часть, требующую не столько больших интеллектуальных усилий, сколько определенных моторных действий.

Виды заданий для внеаудиторной самостоятельной работы, их содержание и характер могут иметь вариативный и дифференциальный характер, учитывать специфику специальности, изучаемой дисциплины, индивидуальные особенности студента.

3.2 Работа с учебно-методическим и информационным обеспечением

Важной составляющей самостоятельной внеаудиторной подготовки по всем типам занятий является работа с литературой. Умение работать с литературой означает научиться осмысленно пользоваться учебно-методическим и другим информационным обеспечением дисциплины.

Для изучения дисциплины вся рекомендуемая литература подразделяется на основную и дополнительную и приводится в п. 10 рабочей программы дисциплины.

К основной литературе относятся источники, необходимые для полного и твердого усвоения учебного материала (учебники и учебные пособия).

Поскольку в учебной литературе (учебниках) зачастую остаются неосвещенными современные проблемы, а также не находят отражение новые документы, события, явления, научные

открытия последних лет, то рекомендуется для более углубленного изучения программного материала дополнительная литература.

Прежде чем приступить к чтению, необходимо запомнить или записать выходные данные издания: автор, название, издательство, год издания, название интересующих глав.

Содержание (оглавление) дает представление о системе изложения ключевых положений всей публикации и помогает найти нужные сведения.

Предисловие или введение книги поможет установить, на кого рассчитана данная публикация, какие задачи ставил перед собой автор, содержится краткая информация о содержании глав работы. Иногда полезно после этого посмотреть послесловие или заключение. Это помогает составить представление о степени достоверности или научности данной книги.

Изучение научной учебной и иной литературы требует ведения рабочих записей. Форма записей может быть весьма разнообразной: простой или развернутый план, тезисы, цитаты, конспект. Такие записи удлиняют процесс проработки, изучения книги, но способствуют ее лучшему осмыслению и усвоению, выработке навыков кратко и точно излагать материал. При изучении литературы особое внимание следует обращать на новые термины и понятия. Записи позволяют восстановить в памяти ранее прочитанное без дополнительного обращения к самой книге.

Процесс изучения дисциплины предполагает также активное использование информационных технологий при организации своей познавательной деятельности.

Наличие огромного количества материалов в Сети и специализированных поисковых машин делает Интернет незаменимым средством при поиске информации в процессе обучения.

Однако при использовании интернет-ресурсов следует учитывать следующие рекомендации:

- необходимо критически относиться к информации;
- следует научиться обрабатывать большие объемы информации, представленные в источниках, уметь видеть сильные и слабые стороны, выделять из представленного материала наиболее существенную часть;
- необходимо избегать плагиата, поэтому, если текст источника остается без изменения, необходимо сделать ссылки на автора работы.

3.3 Самостоятельное изучение и конспектирование отдельных тем

Для подготовки конспекта рекомендуется использовать основную и дополнительную литературу.

При написании конспекта придерживайтесь следующих рекомендаций.

1. Прежде чем приступить к чтению, необходимо записать выходные данные издания: автор, название, издательство, год издания.
2. Внимательно прочитайте текст.
3. Уточните в справочной литературе непонятные слова. При записи не забудьте вынести справочные данные на поля конспекта.
4. Выделите главное, составьте план.
5. Кратко сформулируйте основные положения текста, отметьте аргументацию автора.
6. Законспектируйте материал, четко следуя пунктам плана.

При конспектировании старайтесь выразить мысль своими словами. Записи следует вести четко, ясно. Грамотно записывайте цитаты, учитывайте лаконичность, значимость мысли. В тексте конспекта желательно приводить не только тезисные положения, но и их доказательства. При оформлении конспекта необходимо стремиться к емкости каждого предложения.

3.4 Подготовка к текущему и промежуточному контролю

Подготовка к промежуточной аттестации. Формой промежуточной аттестации (контроля) является зачет. Зачет может проводиться в виде письменного опроса с последующим собеседованием или с применением тестирования.

Зачет – форма проверки полученных теоретических и практических знаний, их прочность, развитие творческого мышления, приобретение навыков самостоятельной работы, умения синтезировать полученные знания.

Основная цель подготовки к зачету – достичь понимания физических законов и явлений, а не только механически заучить материал.

Рекомендации по подготовке к зачетному тесту представлены выше.

Подготовка к устной сдаче зачета включает в себя несколько основных этапов:

- просмотр программы учебного курса;
- определение необходимых для подготовки источников (учебников, дополнительной литературы и т.д.) и их изучение;
- использование конспектов лекций, материалов практических занятий;
- консультирование у преподавателя.

Для успешной сдачи экзамена рекомендуется соблюдать несколько правил.

1. Подготовка к зачету начинается с первого занятия по дисциплине, на котором студенты получают общую установку преподавателя и перечень основных требований к текущей и промежуточной аттестации. При этом важно с самого начала планомерно осваивать материал,

руководствуясь, прежде всего перечнем вопросов к экзамену, конспектировать важные для решения учебных задач источники.

2. Интенсивная подготовка должна начаться не позднее, чем за месяц-полтора до зачета. В течение этого времени нужно успеть повторить и систематизировать изученный материал.

3. За несколько дней перед зачетом распределите вопросы равномерно на все дни подготовки, возможно, выделив последний день на краткий повтор всего курса.

4. Каждый вопрос следует проработать по конспекту лекций, по учебнику или учебному пособию. В процессе подготовки к зачету при изучении того или иного закона, кроме формулировки и математической записи закона, следует обратить внимание на опыты, которые обнаруживают этот закон и подтверждают его справедливость, границы и условия его применимости.

Для лучшего запоминания материала целесообразно работать с карандашом в руках, записывая выводимые формулы, изображая рисунки, схемы и диаграммы в отдельной тетради или на листах бумаги.

5. После повтора каждого вопроса нужно, закрыв конспект и учебники, самостоятельно вывести формулы, воспроизвести иллюстративный материал с последующей самопроверкой.

6. Все трудные и не полностью понятые вопросы следует выписывать на отдельный лист бумаги, с последующим уточнением ответов на них у преподавателя на консультации.

7. При ответе на вопросы билета студент должен продемонстрировать знание теоретического материала и умение применить при анализе качественных и количественных задач. Изложение материала должно быть четким, кратким и аргументированным.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1 Рекомендации по организации самостоятельной работы обучающихся [Электронный ресурс]: учеб. пособие / Е.М. Емышева [и др.].– Москва: Изд-во РГТУ, 2013.– 125 с. – Режим доступа:

<https://www.rsuh.ru/upload/iblock/c70/c70c10002f5932ab48798aae10f5a351.do>

2 Методические рекомендации при подготовке к занятиям по физике (лекциям практике, решения задач, лабораторным работам) [Электронный ресурс]: учебно-метод. пособие / Е. А. Попкова.– Рыбинск: ООО Изд-во «РМП», 2009. – 54 с. – Режим доступа:

<http://www.rsatu.ru/sites/physics/?doc=1491334469>

3 Кесаманлы, Ф.П. Физика. Как правильно организовать самостоятельную работу при выполнении учебных экспериментов[Электронный ресурс]: метод. пособие / Ф.П. Кесаманлы, В.М. Коликова. –СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2007.– 56 с.– Режим доступа:

http://window.edu.ru/catalog/pdf2txt/048/37048/14061?p_page=2

4 Лызь, Н.А. Тенденции развития высшего образования [Электронный ресурс]: учебно-метод. пособие / Н.А Лызь, А.Е. Лызь. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2012. – 48 с. – Режим доступа: <http://www.twirpx.com/file/2332317/>

5 Глаголев С.Н. Проблемы инженерного образования в области техники и технологий [Электронный ресурс]: учебное пособие / С.Н. Глаголев, Т.А. Дуюн, Н.С. Севрюгина. – Электрон. текстовые данные.– Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, ЭБС АСВ, 2013. – 109 с. – 978-5-361-00098-2. – Режим доступа:

<http://www.iprbookshop.ru/28387.html>

6. Деменков, В.Г. Начала электронных методов ядерной физики [Электронный ресурс] : учеб. пособие / В.Г. Деменков, П.В. Деменков. — Электрон. дан. — Санкт-Петербург : Лань, 2016. — 384 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/71708>. — Загл. с экрана.

7. Мухин, К.Н. Экспериментальная ядерная физика. В 3-х тт. Т. 1. Физика атомного ядра [Электронный ресурс] : учеб. — Электрон. дан. — Санкт-Петербург : Лань, 2009. — 384 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/277>. — Загл. с экрана.

8. Мухин, К.Н. Экспериментальная ядерная физика. В 3-х тт. Т. 2. Физика ядерных реакций [Электронный ресурс] : учеб. — Электрон. дан. — Санкт-Петербург : Лань, 2009. — 326 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/279>. — Загл. с экрана.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
1 Краткий конспект лекций	4
1.1 Общие рекомендации по организации работы на лекции	4
1.2 Краткое содержание курса лекций	6
2 Методические рекомендации к практическим занятиям	27
3 Методические рекомендации к самостоятельной работе	30
3.1 Общие рекомендации по организации внеаудиторной самостоятельной работы	30
3.2 Работа с учебно-методическим и информационным обеспечением	30
3.3 Самостоятельное изучение и конспектирование отдельных тем	31
3.4 Подготовка к текущему и промежуточному контролю	32
Библиографический список	34

Верхотурова Ирина Владимировна,
доцент кафедры Физики АмГУ, канд. физ. – мат. наук