

Конспект лекций по курсу общей физики. Часть III
“Оптика. Квантовые представления о свете.
Атомная физика и физика ядра”
Лекция № 14

9. СТРОЕНИЕ ЯДРА (продолжение)
9.5. Радиоактивность

Радиоактивностью называется *самопроизвольное превращение одних атомных ядер в другие*, сопровождающееся испусканием элементарных частиц. Такие превращения претерпевают только нестабильные ядра.

Естественная радиоактивность наблюдается у ядер в природных условиях, искусственная радиоактивность возникает в результате ядерных реакций. Эти процессы подчиняются единым законам.

Беккерель, выполняя программу своих исследований, открыл радиоактивность урановой соли. В 1898г Мария и Пьер Кюри открыли два новых радиоактивных элемента – полоний и радий. За эту работу они получили Нобелевскую премию. Активность радия более чем в миллион раз превышает активность такой же массы урана.

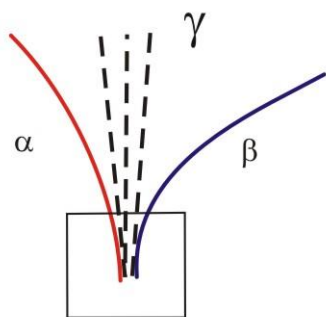


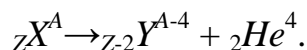
Рис.6

Вслед за открытием радиоактивности была установлена неоднородность излучения. Под действием магнитного поля излучение разделилось на 3 части, которые получили название α , β и γ лучей (рис.6). α -лучи тождественны потоку ядер гелия ${}^4_2\text{He}$, β -лучи являются потоком отрицательно заряженных частиц электронов, γ -лучи не отклоняются ни магнитным, ни электрическим полем, не несут электрического заряда. По своей природе γ -лучи аналогичны рентгеновским лучам с еще

большой величиной квантов энергии.

Радиоактивный распад происходит в соответствии с законом сохранения электрических зарядов и законом сохранения масс и энергии, что позволяет установить правила смещения, по которым осуществляются ядерные реакции.

Обозначим ядро символом X , а возникающее – символом Y , запишем процесс α -распада в виде схемы:

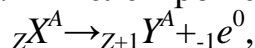


По законам сохранения остается неизменным зарядовое число и массовое число до и после реакции.

Так как зарядовое число определяет место элемента в периодической системе Менделеева, то из схемы следует правило:

в результате α -распада возникает новый элемент, стоящий в периодической системе элементов на два места раньше исходного элемента.

В схеме β -распада, если обозначить электрон символом ${}_{-1}e^0$:



т. е. выполняются те же законы сохранения.

Из схемы следует правило: в результате β -распада возникает новый элемент, стоящий в периодической системе элементов на одно место позже исходного элемента.

Естественно задать вопрос: как из ядра вылетают частицы, которых в ядре нет? На современном уровне вопрос о происхождении α - и β -частиц в ядре решен следующим образом.

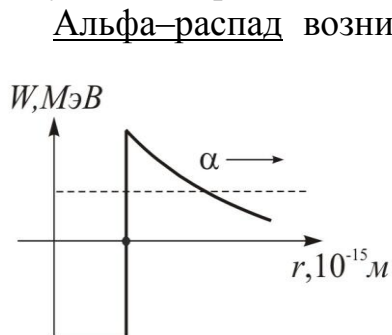


Рис.7

Альфа-распад возникает в момент радиоактивного распада ядра. Высота потенциального барьера системы ядро урана – α -частица больше 8,8 МэВ (рис.7). Чтобы выйти из ядра α -частица должна обладать большей энергией. Однако обнаружилось, что испускаемые α -частицы имеют энергию 4 МэВ. Квантовая механика допускает вероятность того, что α -частица формируется внутри ядра из 2-х p и 2-х n и просочится через барьер, через запрещенную область, проходит по туннелю, имеющемуся в барьере. Это явление называется **туннельным эффектом**.

Вероятность туннельного эффекта является чувствительной функцией энергии частицы. Большим энергиям соответствует малая ширина барьера, малым – большая ширина и глубина ямы. Вероятность туннельного эффекта является экспоненциальной функцией произведения ширины барьера на его высоту и в первом случае вероятность больше, а период полураспада меньше.

Бета-распад. На рисунке 8 показан ход потенциальной энергии для электрона вблизи ядра. Если бы электрон присутствовал внутри ядра, то его энергия должна быть или ($E < 0$) меньше нуля (в том случае ядро стабильно, β -распад отсутствует), или больше ($E > 0$) нуля, что означает немедленное испускание, β -распад не обладает измеримым временем полураспада. Т. о. в ядре электрона нет.

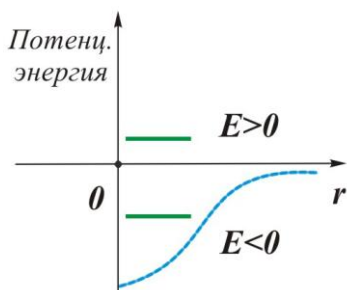
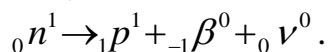


Рис.8

Как объяснить β – распад?

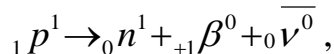
Наиболее простой процесс β – распада – распад нейтрона на протон и электрон с появлением новой частицы, **антинейтрино** $\bar{\nu}^0$:



Это так называемый электронный распад.

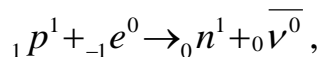
$\bar{\nu}^0$ – частица не имеет ни заряда, ни массы покоя, спин ее равен $1/2$. Таким образом, кроме закона сохранения зарядового и массового числа для ядерной реакции характерен и закон сохранения спина.

Возможен позитронный распад (или β^+ распад) – протон исходного ядра превращается в нейтрон, испуская при этом позитрон и нейтрино



позитрон является античастицей по отношению к электрону и отличается от электрона знаком заряда, природных источников позитронов не существует.

Ядра, неустойчивые по отношению к β^+ распаду, почти всегда могут также распадаться путем *электронного захвата*. В этом процессе ядро поглощает один из внутренних электронов (обычно из K -оболочки)



в результате чего один из протонов превращается в нейтрон, испуская при этом нейтрино.

После этой ядерной реакции вакансия во внутренней атомной оболочке заполняется другими электронами, что сопровождается испусканием характеристического рентгеновского излучения.

γ -излучение и внутренняя конверсия.

Атомные ядра подчиняются законам *квантовой механики*, поэтому можно предполагать, что в ядре, вне зависимости от точного вида действующих в нем сил, как и в любой квантовой системе, связанным состояниям должны соответствовать дискретные уровни энергии. Данными, подтверждающими это заключение, физики располагали еще до создания квантовой механики.

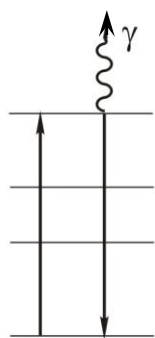


Рис.9

Например, некоторые α -излучатели испускают несколько групп α -частиц с различными энергиями. После испускания ядро находится в *возбужденном состоянии*, переход в основное состояние сопровождается испусканием γ -квантов – фотонов с высокой энергией (рис.9). Этот процесс, в принципе, сходен с испусканием фотона атомом при переходе последнего из возбужденного состояния в менее возбужденное или основное состояние.

Нередко γ -излучение сопровождает β -распад. Для большинства β -излучателей испускание γ -лучей практически мгновенно вслед за вылетом β -частиц. Однако известны сотни примеров ядер, которые находятся в возбужденном состоянии в течение вполне измеримых промежутков времени – от 10^{-10} с до многих лет. Возникает так называемое *изомерное ядро*, такое ядро (Br^{80m}) снабжается дополнительным индексом m .

С γ -излучением связан другой процесс уменьшения степени возбуждения ядра без изменения его Z и A , называемый *внутренней конверсией*. В этом процессе ядро не излучает энергию возбуждения, а передает ее одному из атомных электронов из K - или L -оболочки и выбрасывает его из атома, возникают линейчатые спектры.

9.6. Закон радиоактивного распада

Радиоактивный распад – явление статистическое, поэтому для его описания используется вероятность события. Такой вероятностью является величина λ , или *постоянная распада*, которая описывает вероятность распада за единицу времени. Смысл λ состоит в том, что если взять большое число N одинаковых нестабильных ядер, то за единицу времени в среднем будет распадаться λN ядер. Величина $A = \lambda N$ называется *активностью*. Единицей активности является внесистемная единица *кюри*

$$1 \text{ кюри} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ распад/с.}$$

Теперь сформулируем основной закон радиоактивного распада. Если в момент времени t число радиоактивных ядер N , то за промежуток dt распадется dN ядер. В соответствии с определением величины λ ,

$$dN = -\lambda N dt.$$

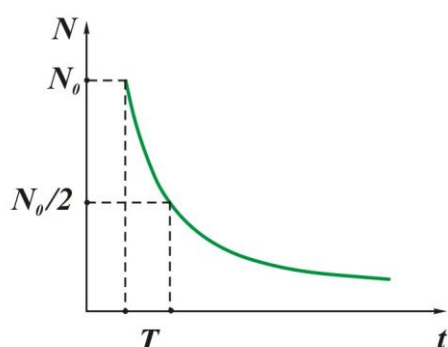


Рис.10

Знак минус означает уменьшение числа ядер в процессе распада. Результатом интегрирования является основной закон радиоактивного распада:

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda t},$$

где N_0 – число ядер в момент $t = 0$, e – основание натуральных логарифмов.

Согласно этому закону число N распадающихся атомов убывает со временем по экспоненциальному закону (рис.10).

Интенсивность процесса распада характеризуют: *период полураспада* T и среднее

время жизни ядра τ .

Периодом полураспада называется время, за которое число ядер уменьшается вдвое

$$\frac{N_0}{2} = N_0 \cdot e^{-\lambda T},$$

откуда

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda}.$$

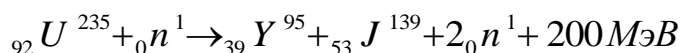
Средняя продолжительность жизни радиоактивного ядра

$$\tau = \frac{1}{\lambda}.$$

9.7. Деление ядер

Среди ядерных процессов особое место занимает деление тяжелых ядер на осколки приблизительно равной массы, имеющее огромное значение в современной науке и технике. В 1934г Э.Ферми установил, что ядра урана при бомбардировке нейтронами, распадаются на осколки радиоактивных изотопов. Позднее экспериментально было обнаружено выделение огромной энергии при делении.

Рассмотрим последовательные стадии деления тяжелого ядра ${}_{92}\text{U}^{235}$. В момент *a* (рис.11) ядро имеет почти сферическую форму. При его возбуждении (например, бомбардировке *нейтронами*) оно приходит в сильное колебание, принимает форму *б* или *в*, поверхностная энергия в этом случае больше, чем при форме *a*, вследствие большего отношения поверхности к объему для этих конфигураций. Следствием этого является возникновение энергетического барьера для деления ядер высотой 6МэВ. Однако образующееся составное ядро ${}_{92}\text{U}^{236}$ получило добавку энергии от влетевшего нейтрона и способно перевалить через барьер. Сразу же возникает конфигурация *в*, на поверхности ядра образуется перемычка, как при дроблении капли воды. Поверхностная энергия резко уменьшается, возникают осколки (*г*) почти сферической формы, их энергия 170 МэВ. При этом выбрасываются два или три *нейтрона*. Типичная реакция имеет вид



Осколки деления радиоактивны и распадаются по схемам:

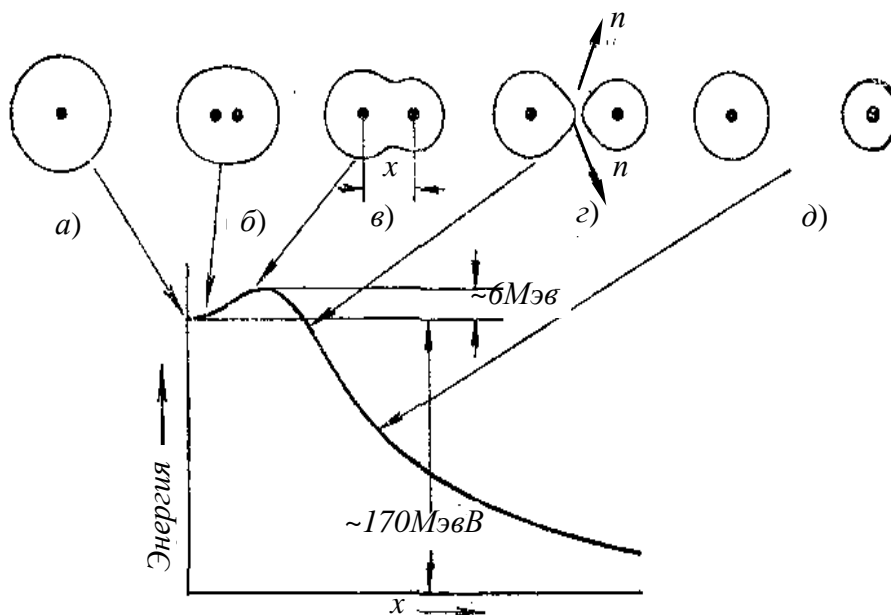
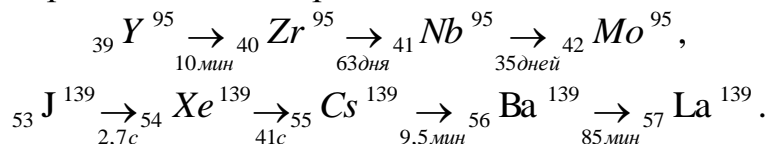


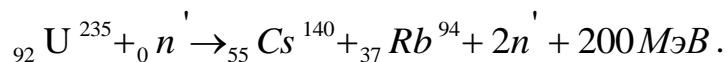
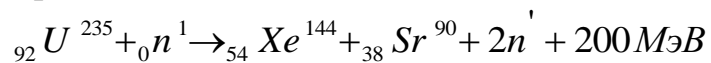
Рис.11. Схема процесса деления тяжелого ядра. Ядро U^{235} характеризуется приведенными на графике значениями кинетической энергии осколков деления 170 Мэв и высоты энергетического барьера 6 Мэв. Параметр *x* является мерой пространственного разделения двух осколков; до наступления этапа *г* реакции деления его определить трудно.

Цепочки распадов заканчиваются стабильными ядрами (*Mo* и *La*).

Радиоактивные ядра в цепочке и стабильные ядра называются продуктами деления. На каждом этапе цепочки испускаются β – частицы и нейтроны. Величины периодов полураспада указаны под стрелками.

Следует обратить внимание на чрезвычайно важные факты:

1. Заранее предсказать элементы, которые будут продуктами распада, невозможно, так как каждый раз ядро урана разбивается по-разному. В качестве примера:



2. Важнейшим практическим свойством реакции деления является то, что для деления ядра урана достаточно одного нейтрона, а в результате деления появляется несколько новых. Если они попадают в ядра, то появится большее количество нейтронов, происходит лавинообразное нарастание актов деления. Возникает *цепная реакция*, которая может привести к взрыву.

3. Энергия нейтронов, испускаемых при реакции деления, различна—от долей электрон-вольта до 10 МэВ. Соответственно нейтроны называются *медленными (тепловыми) и быстрыми*.

Деление изотопа ${}_{92}\text{U}^{235}$ вызывают лучше всего медленные нейтроны.

9.8. Ядерные реакторы

Основное применение управляемой реакции деления—в ядерных реакторах.

В качестве ядерного топлива используется природный уран, в котором 99,27% изотопа ${}_{92}\text{U}^{238}$, 0,72% ${}_{92}\text{U}^{235}$ и ~0,01% ${}_{92}\text{U}^{234}$. На каждое делящееся под действием медленных нейтронов ядро ${}_{92}\text{U}^{235}$ приходится 140 ядер ${}_{92}\text{U}^{238}$, не участвующих в реакции деления.

Следовательно, цепкая реакция деления в природном уране не возникает. Условием, обеспечивающим развитие цепной реакции, является применение замедлителя. Тепловые нейтроны захватываются ядром ${}_{92}\text{U}^{235}$ в 200 раз больше, чем ядром ${}_{92}\text{U}^{238}$. В качестве замедлителя используется графит, тяжелая вода (D_2O), бериллий (Be).

Активная зона графитового реактора (рис.12) состоит из решетки урановых стержней диаметром 2,5см, расположенных в чистом графите в правильном порядке на расстоянии 20см друг от друга. Такое расположение выбрано для сохранения нейтронов. Нейтроны процесса деления обладают энергией 2МэВ, столкновение с ядрами графита уменьшает энергию до 1/40эВ, такой тепловой энергией обладают ядра графита. В урановые стержни возвращаются уже тепловые нейтроны, развивается реакция деления.

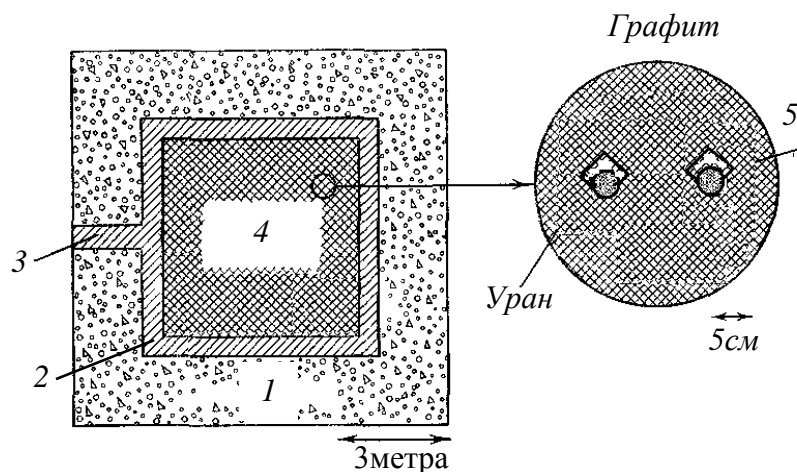


Рис.12. Поперечный разрез графитового реактора. Справа изображены стержни с природным урановым топливом, погруженные в квадратные каналы в графитовом замедлителе. 1-бетонная защита; 2-графитовый отражатель; 3-тепловая колонна; 4-уран-графитовая решетка активного объема; 5-каналы для воздушного охлаждения.

Тепловая колонна предназначена для вывода из реактора медленных нейтронов в целях различных экспериментов. В атомных электростанциях энергия из активной зоны передается теплоносителем воде, превращая ее в пар, вращающий турбину.

Основное требование при конструировании ядерного реактора заключается в том, что потеря нейтронов в других ядерных реакциях (кроме деления) и вследствие их вылета из объема реактора должна быть достаточно мала, так чтобы при каждом акте деления оставался один лишний электрон для нового акта деления.

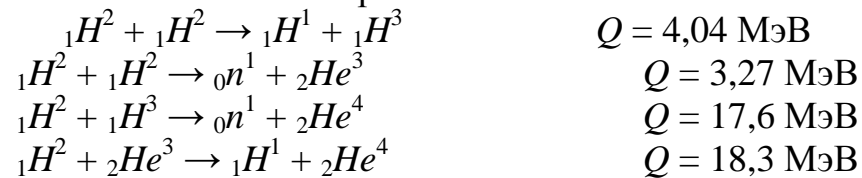
Для поглощения нейтронов, и тем самым для регулирования уровня мощности реактора, в его активную зону вводятся или из нее выводятся *управляющие стержни*. Они изготовлены из стали, содержащей 1,5% бора.

Есть и *аварийные стержни*, они автоматически сбрасываются в активную зону реактора, когда уровень мощности достигает угрожающего значения.

Практическое применение ядерной энергии имеет огромное значение. Сравним: энергия при делении всех ядер в 1кг урана заменит энергию сгорания $2,5 \cdot 10^6$ кг каменного угля, $2 \cdot 10^6$ кг бензина.

9.9. Термоядерные реакции

Заключенная в ядрах энергия может также освободиться и при синтезе, т. е. слиянии, легких ядер в одно ядро. Рассмотрим реакции, с которыми связана многообещающая возможность *создания управляемой термоядерной реакции*, получения огромного количества энергии.



Во всех этих реакциях освобождается энергия. В двух последних, в расчете на нуклон, энергии выделяется больше, чем в реакции деления.

Однако, чтобы получить эту энергию, необходимо решить ряд исключительно трудных проблем. В основе всех этих проблем лежит тот факт, что все ядра *электрически заряжены*. Чтобы сблизить ядра до радиуса действия ядерных сил, они должны обладать значительной кинетической энергией. Развитие реакции синтеза потребует энергии, соответствующей 10^9К . Поэтому реакции синтеза называют *термоядерными реакциями*. Такие реакции происходят в недрах Солнца и звезд и являются главным источником солнечной и звездной энергии.

Другая проблема: газ при высоких температурах образует высокотемпературную плазму. Для продолжения реакции плазму необходимо удерживать в активном объеме. Совершенно ясно, никакой материал стенок не в состоянии выдержать подобную температуру. Эффективно удержать горячую плазму можно с помощью электрических и магнитных полей. В создании соответствующих полей добились лишь частичного успеха.