

Тема 4. АТОМНАЯ И ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

Вопросы:

1. Опыт Резерфорда по рассеянию альфа-частиц. Ядерная модель атома. Постулаты Бора
2. Объяснение спектра атома водорода
3. Непрерывный и линейчатый спектры. Спектральный анализ. Лазер
4. Состав ядра атома. Изотопы. Энергия связи атомных ядер. Ядерные реакции.
5. Радиоактивность. Альфа-, бета-, гамма-излучения. Методы регистрации ионизирующих излучений.
6. Деление и синтез ядер

Вопрос 1. Опыт Резерфорда по рассеянию альфа-частиц. Ядерная модель атома. Постулаты Бора

Эксперименты Резерфорда по рассеянию положительно заряженных альфа-частиц (ядер гелия), проведенные в 1911 г., помогли составить правильное представление о строении атома. Источником α -частиц служили крупцы радия 1, находящиеся в свинцовом контейнере 2 (рис. 5.1). Выходящий из узкого канала контейнера пучок частиц попадал на тонкую фольгу 3 из золота. За ней помещался спинтарископ 4, устройство для наблюдения и подсчета α -частиц, рассеянных под определенным углом.

Опыты Резерфорда показали:

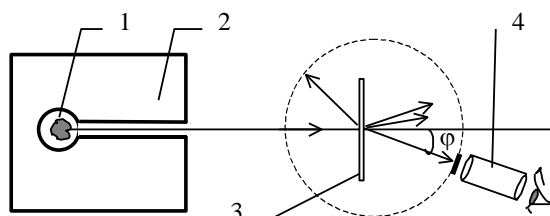


Рис. 5.1

а) большинство α -частиц проходит через слой тонкой фольги, отклоняясь не более, чем на $1-2^\circ$;

б) с увеличением угла рассеяния число рассеивающихся альфа-частиц резко уменьшается;

в) имеются отдельные альфа частицы (около 0,01% всех частиц), отбрасываемые атомами фольги назад, против их первоначального направления движения.

На основании результатов опытов Резерфорд сделал следующие выводы: атом имеет массивное положительно заряженное ядро, малое по сравнению с размером атома. Именно оно отбрасывает назад альфа частицы, летящие прямо на него. Остальную часть атома занимают электроны, не влияющие существенным образом на движение альфа частиц. Резерфорд предположил, что атом устроен подобно планетной системе: вокруг ядра по орбитам вращаются электроны.

Однако такая модель противоречила классической физике. Вращающиеся электроны должны терять энергию из-за излучения электромагнитной волны. При этом они должны "упасть" на ядро, чего на самом деле не происходит.

Первую попытку разрешить противоречия между классической теорией и моделью атома Резерфорда предпринял датский физик Н. Бор. Анализ результатов опытов Резерфорда, а также выявленные к тому времени закономерности в спектре атома водорода позволили Бору предложить квантовые постулаты:

1. Атомы могут находиться длительное время в устойчивых (стационарных) состояниях, в которых не излучается энергия; в каждом из стационарных состояний атом может обладать только вполне определенной энергией.

2. Излучение или поглощение энергии атомами происходит в момент скачкообразного перехода атома из одного стационарного состояния в другое (при этом электрон скачком переходит с одной стационарной орбиты на другую). Атомы излучают и поглощают энергию дискретными порциями - квантами, энергия которых $\varepsilon = h\nu$ равна разности энергий тех стационарных состояний, между которыми происходит данный переход, а частота излучения:

$$\nu = \frac{E_n - E_k}{h}, \quad (5.3)$$

где E_n , E_k - энергия стационарных состояний. Если $E_n > E_k$, излучается квант энергии (фотон), если $E_n < E_k$, квант энергии поглощается.

Вопрос 2. Объяснение спектра атома водорода

Модель атома Резерфорда-Бора позволила объяснить происхождение линейчатых спектров излучения и поглощения атома водорода, открытых еще в начале XIX века.

Обычно атомы находятся в невозбужденном состоянии с минимально возможным значением энергии. Энергия фотона, поглощаемого атомом при переходе из основного состояния с энергией E_1 в возбужденное состояние с энергией E_n , где $n = 2, 3, 4, \dots$, в точности равна энергии фотона, излучаемого атомом при обратном переходе.

Частота излучения при этом: $\nu = \frac{E_n - E_1}{h}$, однако переход в основное состояние возможен через несколько промежуточных состояний при испускании нескольких фотонов с меньшей энергией и частотой: $\nu = \frac{E_n - E_k}{h}$, где $n > k > 1$. При этом возбужденные атомы химического элемента испускают совокупность дискретных частот - линейчатый спектр, характерный только для данного элемента.

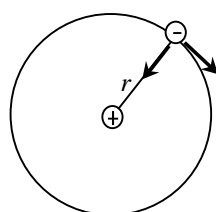


Рис. 5.2

Согласно представлениям Бора движение \vec{v} электронов вокруг ядра подчиняется законам классической механики (рис. 5.2). Из анализа спектра атома водорода следовало, что в дискретных стационарных состояниях орбитальный момент импульса электрона (см. раздел 1.16) должен

принимать следующие дискретные значения:

$$m_e v r = n \hbar, \quad (5.4)$$

где $n = 1, 2, 3, \dots$

Связь между радиусом орбиты r и скоростью электрона v может быть найдена, если учесть, что центростремительное ускорение при движении по

круговой орбите $a = \frac{g^2}{r}$, а по второму закону Ньютона $a = \frac{F}{m_e}$.

Центростремительное ускорение сообщается электрону силой притяжения со стороны ядра (см. раздел 3.1): $F = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2}$. Здесь учтено, что заряд ядра атома водорода (протона) равен $+e$. Из этих выражений можно найти связь r и g , а с использованием (5.4) можно определить радиусы первой, второй и всех последующих орбит. Расчет показал, что радиус первой боровской орбиты равен $0,53 \cdot 10^{-10}$ м.

Вследствие орбитального движения электрон обладает кинетической энергией, а вследствие электрического взаимодействия с положительно заряженным ядром - потенциальной. Вычисление значений энергии электрона на стационарных орбитах и определение возможных частот излучения по формуле (5.3) дает поразительно точное совпадение с экспериментом, поразительное еще и потому, что уже для следующего по порядку атома гелия теория Бора дает неверные результаты. Причиной этого является то, что наряду с новыми представлениями о квантовании энергии она оперирует классическими представлениями о законах движения микрочастиц.

Действительно, как было установлено позже, электрон обладает волновыми свойствами и его движение должно описываться уравнениями квантовой механики. После открытия волн де Бройля было замечено, что постулируемое Бором утверждение о квантовании момента импульса электрона в атоме (5.4) естественным образом вытекает из волновых свойств электрона.

Для того, чтобы орбита была стационарной, на ее длине должно укладываться целое число волн де Бройля: $2\pi r = n\lambda$. Подставляя сюда значение длины волны из (5.1), получаем выражение (5.4).

Теория Бора была первым шагом в развитии представлений о строении атома и уступила место более совершенной квантовой теории атома.

Вопрос 3. Непрерывный и линейчатый спектры.

Спектральный анализ. Лазер

Теория Бора объясняет спектр излучения атома водорода. Это линейчатый спектр, характерный только для данного элемента. Линейчатые спектры дают разреженные газы, где атомы практически не взаимодействуют между собой, полосатые спектры излучаются отдельными возбужденными молекулами, сплошные спектры - раскаленными твердыми и жидкими телами и сжатыми газами. Сплошной непрерывный спектр испускания представляет собой непрерывную последовательность частот, плавно переходящих друг в друга.

Спектр поглощения можно наблюдать, пропуская через вещество лучи света от внешнего источника со сплошным спектром. На фоне этого сплошного спектра наблюдаются черные линии поглощения точно в том месте, где наблюдались линии излучения данного газа в раскаленном состоянии.

Спектральным анализом называется изучение химического состава и концентрации атомов и молекул, входящих в состав вещества по его спектру. Этим методом удается определить наличие весьма малого количества вещества порядка 10^{-13} кг.

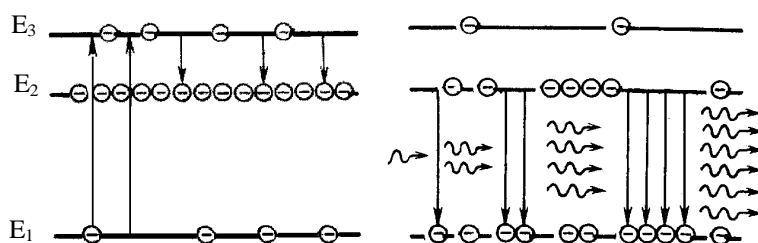
Лазер (квантовый генератор) - источник когерентного светового излучения строго определенной частоты и высокой направленности. Принципы усиления и генерации электромагнитного излучения были разработаны Н.Г. Басовым, А.М. Прохоровым и Ч. Таунсом.

Основой действия лазера является вынужденное (индуцированное) излучение, происходящее под влиянием внешнего излучения с частотой, в точности равной собственной частоте перехода. При этом испускаемая волна совпадает с вынуждающей волной не только по частоте, но и по направлению, фазе и поляризации. В итоге получается волна с амплитудой больше, чем у исходной.

Для того чтобы мощность светового излучения увеличилась после прохождения через вещество, больше половины атомов вещества должно

находиться в возбужденном состоянии. Такое состояние называется состоянием с *инверсной* населенностью уровней, поскольку обычно число атомов тем меньше, чем больше их энергия - состояние с нормальной населенностью.

Перевод вещества в состояние с инверсной населенностью энергетических уровней трудно выполним, так как в возбужденном состоянии атомы обычно находятся лишь 10^{-9} - 10^{-7} с, а затем самопроизвольно переходят в основное состояние. Однако некоторые атомы имеют возбужденные состояния, в которых они могут находиться довольно длительное время, например 10^{-3} с. Такие состояния называются *метастабильными*. Вещество, в котором имеются метастабильные уровни, может использоваться для усиления света.



a

Рис. 5.3

б

Для этого атомы вещества в результате поглощения фотонов от внешнего источника света (накачки) переводятся из основного состояния с энергией E_1 в возбужденное состояние с энергией E_3 с коротким временем жизни (рис. 5.3*a*). Затем совершается самопроизвольный переход этих атомов на метастабильный уровень с энергией E_2 . В результате таких процессов на метастабильном уровне можно создать инверсную населенность. При прохождении в веществе излучения с частотой $\nu = \frac{E_2 - E_1}{h}$ происходит лавинообразный процесс усиления света за счет индуцированного излучения (рис. 5.3*б*).

Для работы такой системы в режиме генератора необходима положительная обратная связь, при которой часть сигнала с выхода устройства подается на его вход. Для этого среда располагается в резонаторе, состоящем из двух параллельных полупрозрачных зеркал.

Лазеры широко применяются в оптике и голографии как источник когерентного излучения, в научных исследованиях, при обработке деталей, резке сверхтвердых материалов, в медицине, связи, вычислительной технике и др.

Вопрос 4. Состав ядра атома. Изотопы. Энергия связи атомных ядер. Ядерные реакции.

Ядра атомов состоят из протонов (положительно заряженные частицы) и нейтронов, не имеющих заряда. Эти частицы называют **нуклонами**. Число протонов в ядре равно порядковому номеру Z элемента в таблице Менделеева, и заряд ядра равен Ze . Число нейтронов $N=A-Z$, где A – массовое число (число нуклонов). Ядра, содержащие одинаковое число протонов, но различное число нейтронов, называют **изотопами**. Все изотопы одного и того же элемента имеют очень близкие химические свойства, что свидетельствует об одинаковом строении их электронных оболочек, а следовательно, и об одинаковом заряде ядер.

Между нуклонами в ядре помимо сил отталкивания электрической природы существуют силы притяжения, природа которых неэлектрическая, они называются **ядерными силами**.

Ядерные силы имеют следующие свойства:

а) заряженные и незаряженные частицы притягиваются друг к другу с одинаковой силой;

б) ядерные силы обладают короткодействием, они действуют на расстоянии около $2 \cdot 10^{-15}$ м (т.е. в пределах ядра), при этом они больше кулоновских в 100 раз;

в) ядерные силы обладают насыщением, т.е. могут удерживать друг возле друга не любое количество нуклонов, а лишь определенное.

Энергию, которую необходимо затратить, чтобы, преодолев ядерные силы притяжения, расщепить ядро на составные части - протоны и нейтроны, называют **энергией связи** атомного ядра. Энергию связи ядра можно

определить путем точного измерения его массы, применяя соотношение Эйнштейна между массой и энергией: $E = mc^2$.

Масса покоя ядра всегда меньше суммы масс покоя слагающих его протонов и нейтронов: $M_{\text{я}} < Zm_p + Nm_n$. Дефект массы ΔM (разность масс) положителен: $\Delta M = Zm_p + Nm_n - M_{\text{я}}$.

Уменьшение массы при образовании ядра из нуклонов означает, что при этом уменьшается полная энергия системы нуклонов на величину энергии связи: $E_{\text{св}} = \Delta Mc^2$

Ядерной реакцией называют превращение исходного атомного ядра при взаимодействии с легкой частицей в другое ядро, отличное от исходного. При образовании ядра продукта могут испускаться другие легкие частицы или гамма-кванты. В качестве легких частиц могут фигурировать нейтрон, протон, альфа частицы и др.

При ядерных реакциях выполняются законы сохранения энергии и импульса, а также зарядового и массового чисел. Исторически первой ядерной реакцией была реакция превращения ядра азота в ядро кислорода под действием альфа частицы (ядра гелия): ${}^{14}_7\text{N} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{17}_8\text{O} + {}^1_1\text{H}$.

В этой реакции массовое число частиц до и после реакции равно 18. Заряд частиц до и после реакции - 9e.

Вопрос 5. Радиоактивность. Альфа-, бета-, гамма- излучения.

Методы регистрации ионизирующих излучений.

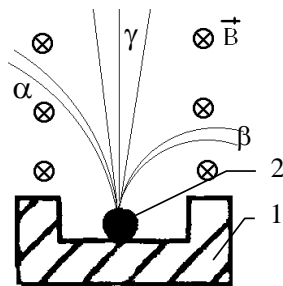


Рис. 5.4

- 1 - толстостенный сосуд из свинца;
2 - радиоактивный источник

Радиоактивность - самопроизвольный распад ядер некоторых атомов с испусканием особого рода излучений, называемых радиоактивными. Состав излучений был установлен по их отклонению в магнитном поле индукцией B (рис. 5.4).

По направлению отклонения и радиусу кривизны траектории было определено, что **альфа** лучи несут положительный заряд, равный по абсолютному значению удвоенному заряду электрона, и представляют собой поток ядер атомов гелия. **Бета** лучи (бета частицы) являются потоком быстрых электронов с энергией, достигающей 10 МэВ. **Гамма** лучи, не отклоняющиеся магнитным полем, представляют собой жесткое электромагнитное излучение, они обладают наибольшей из всех радиоактивных излучений проникающей способностью.

При испускании ядром α -частицы его массовое число уменьшается на четыре единицы, а зарядовое - на две: ${}^A_ZX \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}Y + {}^4_2\text{He}(\alpha)$. Элемент смещается на две клетки к началу таблицы Менделеева. При β -распаде массовое число не меняется, а зарядовое увеличивается на единицу: ${}^A_ZX \rightarrow {}^A_{Z+1}Y + {}^0_1e(\beta)$. Элемент смещается на одну клетку в противоположном направлении.

При радиоактивном распаде количество атомов исходного элемента уменьшается, а атомов - продуктов распада - увеличивается. Время, за которое исходное количество атомов уменьшается вдвое, называют **периодом полураспада T** . **Закон радиоактивного распада** - закон изменения

числа атомов исходного элемента: $N = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T}}$. Здесь N_0 - число атомов в момент времени $t=0$.

При взаимодействии быстрых заряженных частиц и гамма-излучения с веществом наблюдается ионизация атомов вещества. Это явление

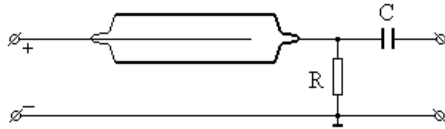


Рис. 5.5

используется в различных устройствах регистрации излучений. **Счетчик**

Гейгера - один из наиболее простых и удобных приборов для регистрации гамма- и бета- излучения. Счетчик

(рис. 5.5) состоит из стеклянной трубки, заполненной газом, покрытой изнутри металлическим слоем (катод), и тонкой металлической нити (анод). Заряженная частица, пролетая в газе, отрывает от атомов электроны, которые ускоряются электрическим полем между анодом и катодом до энергий, при которых начинается ударная ионизация. Возникает лавина заряженных частиц, и на сопротивлении R нагрузки образуется импульс напряжения, который через конденсатор С подается на вход регистрирующего устройства.

Действие **камеры Вильсона** основано на конденсации пересыщенного пара на ионах, образовавшихся в рабочем объеме камеры вдоль траектории заряженной частицы. Состояние пересыщенного пара в камере достигается при резком увеличении объема (с помощью поршня), при котором газ охлаждается.

Действие **пузырьковой камеры** основано на возникновении пузырьков в перегретой жидкости вдоль траектории частицы. Из-за большей плотности рабочего вещества в пузырьковой камере пробеги частиц оказываются достаточно короткими.

Метод толстослойных эмульсий позволяет регистрировать редкие явления. Быстрая заряженная частица при своем движении в фотоэмульсии создает центры скрытого изображения. При проявке цепочка зерен серебра создает трек частицы.

Вопрос 6. Деление и синтез ядер

Энергия связи - это энергия, которую необходимо сообщить ядру, чтобы расщепить его на отдельные нуклоны. Наибольшей энергией связи на один нуклон, а следовательно, и наибольшей устойчивостью обладают ядра элементов, находящихся в середине таблицы Менделеева, с массовыми числами от 40 до 100. Тяжелые ядра, перегруженные нейтронами, являются неустойчивыми, и захват ядром еще одного нейтрона может привести к делению ядра на две части (осколка). При этом освобождается несколько нейтронов. Если каждый из нейтронов деления взаимодействует с соседними ядрами и вызывает в них реакцию деления, происходит лавинообразное нарастание числа делений - *цепная реакция*. Такая реакция используется в атомной бомбе. При делении одного ядра урана выделяется огромная энергия - около 200 МэВ.

Практическое осуществление цепной реакции - непростая задача. При поглощении нейтронов делятся лишь ядра изотопа урана $^{235}_{92}\text{U}$, на долю которого приходится лишь 0,7% всего природного урана. Остальную часть составляет изотоп $^{238}_{92}\text{U}$, ядра которого не испытывают реакции деления, а просто захватывают нейтроны.

Отношение числа нейтронов, возникших на некоторой стадии реакции, к числу нейтронов в предшествующей стадии называют коэффициентом размножения K . Необходимым условием цепной реакции является значение $K \geq 1$. Необходимым условием является также наличие достаточно большого количества урана, так как в образцах малых размеров большинство нейтронов вылетает из образца, не попав ни в одно ядро. Минимальная масса вещества, при которой цепная реакция идет с коэффициентом $K=1$, называется *критической массой*. Для урана-235 она составляет около 50 кг.

Управляемая ядерная реакция при $K=1$ с постоянным выделением энергии осуществляется в ядерном реакторе (рис. 5.6). *Медленные* нейтроны, обладающие скоростями около 10^3 м/с, почти не поглощаются ядрами урана-238, поэтому в активную зону реактора вносят замедлитель нейтронов - обычно

графит. Для уменьшения утечки нейтронов активную зону окружают отражателем нейтронов (графит, бериллий). Управление реактором осуществляется с помощью специальных регулирующих стержней, вводимых в активную зону реактора для поглощения избыточных нейтронов.

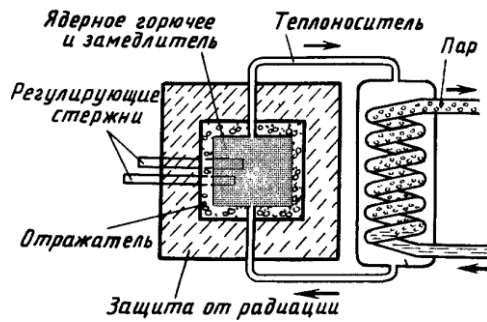
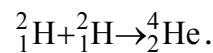
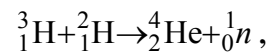


Рис. 5.6

Выделение энергии наблюдается также при **термоядерной реакции** синтеза легких ядер. Возможные реакции:



Соединение одноименно заряженных протонов возможно при

высокой скорости сталкивающихся частиц, поэтому термоядерные реакции протекают при высоких температурах плазмы порядка $10^7 - 10^8$ К. Выделяемая энергия на один нуклон при термоядерной реакции в 5 раз больше, чем при реакции деления. В природных условиях термоядерные реакции протекают в недрах Солнца и звезд. В водородной бомбе высокая температура для начала термоядерной реакции получается за счет взрыва атомной бомбы.

Работы, проводимые по осуществлению управляемой термоядерной реакции, в случае успеха могут решить энергетическую проблему, поскольку запасы водорода на Земле практически неисчерпаемы.