

ЛЕКЦИЯ 5

Структурные уровни организации материи. Структура микромира.

§5.1 Структурные уровни организации материи

Существует два подхода к определению понятия «материя»: философский и естественнонаучный.

Согласно философскому подходу материя имеет одно единственное свойство, она существует как «объективная реальность».

Согласно естественнонаучному подходу материя имеет бесконечный ряд свойств: всеобщность, неуничтожимость, неисчерпаемость и т.д. ...

Развитие представлений о строении материи

<i>Натурфилософия</i>	<i>Классическая механика</i>	<i>Электродинамика</i>	<i>Квантовая механика</i>
<p>1. Концепция созерцательного материализма: материя есть конкретное вещество (вода, огонь, земля, воздух). Фалес (625-547 до н.э.) Гераклит (540-480 до н.э.) и др.</p> <p>2. Концепция атомистического материализма: материя состоит из атомов и пустоты. Демокрит (460- ок.370 до н.э.)</p>	<p>Концепция дискретного строения материи: материя есть субстанция, состоящая из отдельных частиц – атомов или корпускул. Атомы абсолютно прочны, неделимы, непроницаемы, характеризуются наличием массы и веса. И. Ньютон (1643-1727)</p>	<p>Концепция континуального (непрерывного) строения материи: материя существует в двух видах – вещество и поле. Они строго разделены, и их превращение друг в друга невозможно. Главным является поле, а значит, основным свойством материи является непрерывность в противовес дискретности. Д. Максвелл (1831-1879)</p>	<p>Концепция корпускулярно-волнового дуализма: материя как физическая реальность едина, и нет пропасти между веществом и полем. Поле подобно веществу обладает корпускулярными свойствами, а частицы вещества, подобно полю, - волновыми, т.е. каждый элемент материи обладает свойствами волны и частицы. М. Планк (1858-1949) В. Гейзенберг (1901-1976) Э. Шредингер (1887-1961) Н. Бор (1885-1962)</p>

Материя во Вселенной структурируется в высшей степени разнообразно. Если упорядочить материю по возрастанию размеров материальных объектов, то можно выделить три уровня организации материи:

Микромир. Мир предельно малых размеров. Размеры: от 10^{-6} м до 10^{-18} м. Характерное время: от 10^{-24} с до бесконечности. Это мир элементарных частиц, атомов, молекул.

Макромир. Мир макрообъектов, размерность которых сопоставима с масштабами жизни на Земле. Размеры: мм, см, м, км. Характерное время: сек, мин, часы, годы.

Мегамир. Мир больших космических масштабов и скоростей. Размеры: астрономические единицы, световые годы, парсеки. Характерное время: миллионы и миллиарды лет.

Мир планет и планетных систем, звезд и звездных систем, галактик, систем галактик и Вселенной в целом.

Не относятся к какому-то отдельному уровню организации, но неотъемлемо присутствуют на любом уровне еще два особых вида материи: различные физические поля и физический вакуум.

Структура микромира.

Структурные уровни вещества в микромире:

1. **молекулярный**, молекула – единая квантово-механическая система, объединяющая атомы.
2. **атомный**, атом – структурный элемент микромира, состоящий из ядра и электронной оболочки.
3. **нуклонный**, нуклон (лат. nucleus - ядро) – общее название протона и нейтрона, являющихся составными частями атомных ядер.
4. **кварковый**, уровень кварков и лептонов.

Уже обсуждается возможный облик пятого уровня вещества - **суперструнного**. Каждый вновь открываемый уровень качественно отличается от ранее известных, его характеризуют другие свойства соответствующих частиц.

Любой объект микромира условно можно называть «микрообъект» или «микрочастица». Тем не менее, нужно понимать, что структура и свойства различных микрообъектов могут весьма отличаться.

§5.2 Развитие представлений о строении материи.

Слово «атом» — греческого происхождения, и переводится оно как «неделимый». Принято считать, что первым идею о том, что кажущаяся гладкой и непрерывной материя на самом деле состоит из великого множества мельчайших и потому невидимых частиц, выдвинул древнегреческий философ Демокрит. По представлениям Демокрита атомы были вечными, неизменными и неделимыми. Изменения во Вселенной происходили исключительно из-за изменений в связях между атомами, но не в них самих. Ясно, что между древнегреческой теорией и современными научными исследованиями мало общего: идеи Демокрита не основывались ни на каких наблюдениях или практических опытах. Демокрит, подобно

всем натурфилософам античности, просто рассуждал и делал умозрительные заключения относительно природы мира.

Идея об атомном строении материи так и оставалась чисто философским умопостроением вплоть до начала XIX века, когда сформировались основы химии как науки. Химики первыми и обнаружили, что многие вещества в процессе реакций распадаются на более простые компоненты. Например, вода распадается на водород и кислород. Однако некоторые вещества — те же водород и кислород — разложению на составляющие при помощи химических реакций не поддаются. Такие вещества называли химическими элементами. К началу XIX века было известно около 30 химических элементов (на момент публикации этой лекции в периодической таблице описано 118 элементов, включая искусственно полученные в лабораторных условиях). Кроме того, было установлено, что в процессе химических реакций количественное соотношение веществ, участвующих в данной реакции, не изменяется. Так, для получения воды неизменно берутся восемь массовых долей кислорода и одна доля.

Первым осмысленную интерпретацию этих фактов предложил Джон Дальтон. Дальтон предположил, что осмыслить и интерпретировать последние достижения экспериментальной химии можно только приняв, что каждому химическому элементу в этих опытах соответствует уникальный для него атом, и что именно смешение и объединение в различных пропорциях этих атомов приводит к образованию наблюдаемых в природе химических веществ. Например, вода, по Дальтону, состоит из сочетания двух атомов водорода и одного атома кислорода (общеизвестная формула H_2O). Тот факт, что все атомы одного вида неразличимы между собой, удачно объяснял, почему при химических реакциях они всегда обнаруживаются в неизменных пропорциях. Так, в случае с водой, два атома водорода всегда одни и те же, где бы мы ни взяли эту воду, и всегда находятся в одной и той же связи с единственным атомом кислорода.

Для Дальтона, как и для Демокрита, атомы оставались неделимыми. В черновиках и книгах Дальтона мы находим рисунки, где атомы представлены в виде шариков. Однако основное положение его работы — что каждому химическому элементу соответствует особый тип атома — легло в основу всей современной химии. Этот факт остается непреложным и теперь, когда мы знаем, что каждый атом сам по себе является сложной структурой.

Дальнейшее развитие представлений о строении материи связано с открытием электрона. В 1897 году молодой английский физик Дж. Дж. Томсон выясняет природу таинственных катодных лучей (эти лучи легко получались в простейших опытах, но происхождение их было не ясно). Катодные лучи оказываются не электромагнитным излучением (их скорость гораздо меньше скорости света), а частицами. 30 апреля 1897 года — дата доклада Томсоном полученных им результатов на заседании Лондонского королевского общества — считается днем рождения электрона. И в этот день отошло в прошлое представление о «неделимости» атомов.

Открытие электрона, изучение его уникальных свойств, стимулировало исследования строения атома. Очевидно, что электроны должны существовать в атомах, иначе откуда бы они могли взяться.

По современным представлениям электрон — это элементарная частица, имеющая массу $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг и электрический заряд (условно «отрицательный») $q_e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл. Заряд электрона носит название элементарного заряда, как наименьший заряд, возможный в природе, по традиционным представлениям.

Раз в атомах есть электроотрицательный электрон, значит, есть и положительный заряд в атоме, так как атом в целом электрически нейтрален.

1911 год – эксперимент Эрнеста Резерфорда приводит ученых к заключению, что атом состоит из ядра и электронов (**планетарная модель атома**).

На момент проведения эксперимента Резерфорда считалось, что атомы представляют собой нечто, похожее на «пудинг с изюмом» (или «сетку с изюмом»), где среди положительно заряженного «желе» как изюмины распределены отрицательно заряженные электроны. Группа Резерфорда пропускала поток альфа-частиц (ядер атома гелия) сквозь золотую фольгу и отслеживала траектории альфа-частиц после прохождения фольги. Большинство альфа-частиц свободно проходили сквозь преграду, но некоторые отклонялись на различные углы, вплоть до углов в 180° (см. рисунок). Объяснить этот результат эксперимента можно было лишь отвергнув бытовавшее представление и предположив, что основная масса атома сосредоточена в компактной области в его центре – в атомном ядре. При попадании в ядро атома альфа-частица «рикошетит» и меняет свою траекторию движения.

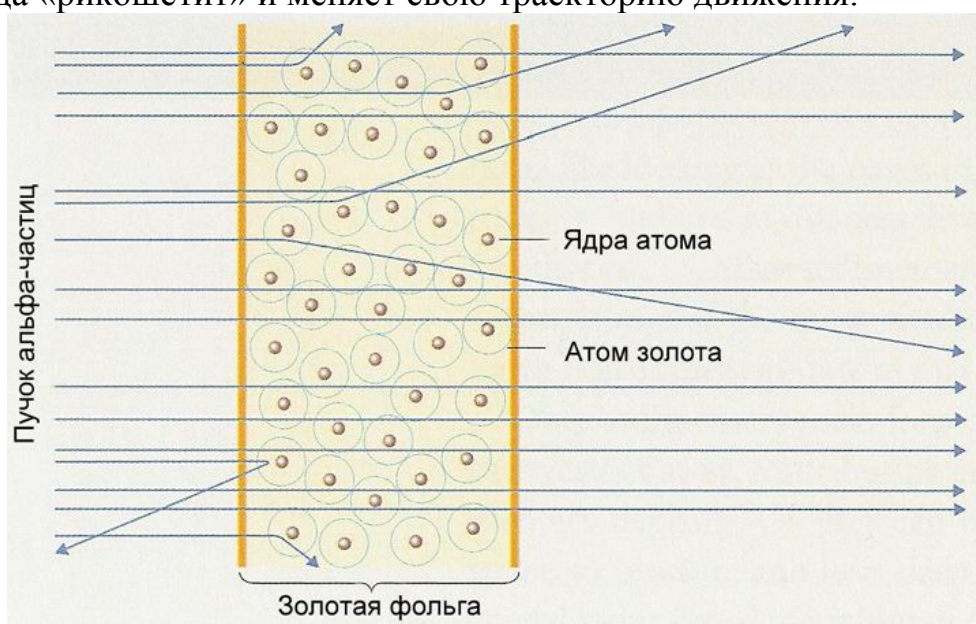


Схема опыта Резерфорда

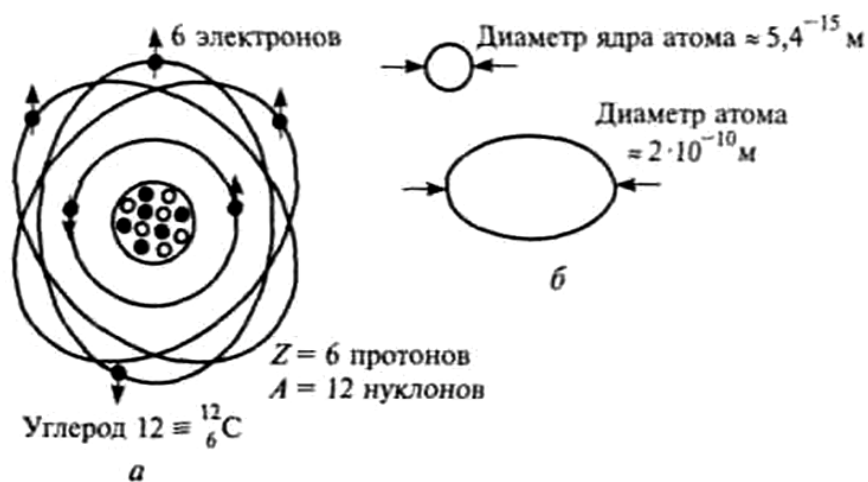
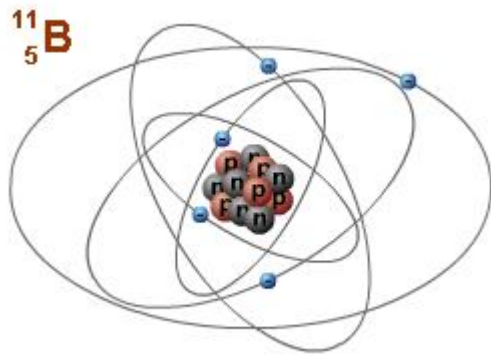
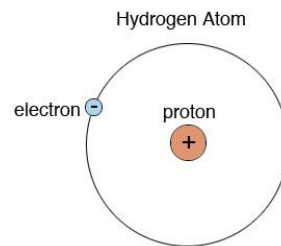


Схема строения атома углерода: планетарная модель (а) и относительные размеры ядра и атома (б)

Мы получаем известную со школы планетарную модель атома: в середине ядра находится положительное ядро атома, вокруг которого вращаются электроны, каждый

по своей орбите. Ядро атома характеризуется зарядом и массой. Z – зарядовое число, совпадает с порядковым номером элемента в таблице Менделеева.

Сейчас мы знаем, что ядра атомов не являются цельными частицами, а сами состоят из других частиц: протонов и нейтронов. Самый простой атом – атом водорода представляет собой протон, вокруг которого вращается один электрон. Открытие протона относится к 1917 году, когда Резерфорд своими экспериментами доказал, что ядро водорода



присутствует также в других атомах. Открытия Резерфорда показали, что не весь атом водорода, а только ядро водорода, является наименьшей и универсальной частицей, входящей в состав каждого ядра. Эта частица и была названа протоном (с греч. «первый»¹).

В 1930 г. советские физики В. А. Амбарцумян и Д. Д. Иваненко показали, что ядро не может, как считалось в то время, состоять из протонов и электронов, и в ядре атома должны существовать нейтральные (незаряженные) частицы. Открытие нейтрона (1932) принадлежит физика Джеймсу Чедвику, за это открытие он получил Нобелевскую премию по физике в 1935 году.

Протоны и нейтроны, как частицы, из которых состоят атомные ядра, вместе называются нуклонами (nucleus – ядро).

Все известные химические элементы пронумерованы в периодической таблице Менделеева. Порядковый номер каждого элемента Z соответствует зарядовому числу соответствующего атома. Заряд атомного ядра = eZ , где e – заряд электрона. Второе число элемента в таблице – A – массовое число, примерно совпадает с массой ядра, равно числу нуклонов в ядре. Число протонов = число электронов = Z . Число нейтронов в ядре = $A - Z$ (см. рисунок).

1913 год – создание теории атома Нильса Бора.

С простой планетарной моделью атома сразу же после ее создания возникли проблемы. Прежде всего, согласно физическим законам того времени, такой атом не мог бы просуществовать дольше доли мгновения — на наше счастье, мы имеем все основания утверждать, что этот факт опытом не подтверждается. Аргументация была такова: в соответствии с законами механики Ньютона, электрон, находящийся на орбите, движется с ускорением. Следовательно, согласно уравнениям Максвелла, он должен излучать электромагнитные волны и, как следствие, терять энергию и вскоре сойти с орбиты и упасть на ядро. Это стандартная задачка по физике для студентов-первокурсников, и любой из них легко докажет путем таких рассуждений, что планетарный атом не просуществует и секунды. Очевидно, что-то было не так в этой простой модели строения атома, раз реальные атомы, окружающие нас, просуществовали миллиарды лет.

Разрешить эту проблему и направить физиков по верному пути понимания атомной структуры удалось молодому датскому теоретику Нильсу Бору, недавно прибывшему на стажировку в Англию после защиты докторской диссертации у себя

¹ Интересный факт: отношение масс протона и электрона, равное $1836,152\ 672\ 1(14)$, с точностью до 0,002 % равно значению $6\pi^2 = 1836,118\dots$

на родине. За отправную точку Бор принял новые постулаты квантовой механики, согласно которым на субатомном уровне энергия испускается исключительно порциями, которые получили название «кванты».

Бор показал, что в этом случае электрон не может находиться на произвольном удалении от атомного ядра, а может быть лишь на ряде фиксированных орбит, получивших название «разрешенные орбиты» (**первый постулат Бора**). Электроны, находящиеся на таких орбитах, не могут излучать электромагнитные волны произвольной интенсивности и частоты, иначе им, скорее всего, пришлось бы перейти на более низкую, неразрешенную орбиту. Поэтому они и удерживаются на своей более высокой орбите, подобно самолету в аэропорту отправления, когда аэропорт назначения закрыт по причине нелетной погоды.

Однако электроны могут переходить с одной «разрешенной» орбиты на другую. Здесь важно выполнение соотношения: $h\nu = E_m - E_n$ (**второй постулат Бора**), E_m и E_n — энергии орбит, ν — частота испускаемого или поглощаемого излучения.

Как и большинство явлений в мире квантовой механики, этот процесс не так просто представить наглядно. Электрон просто исчезает с одной орбиты и материализуется на другой, не пересекая пространства между ними. Этот эффект назвали «квантовым прыжком», или «квантовым скачком». Позже этот термин обрел широкую популярность и вошел в наш лексикон со значением «внезапное, стремительное улучшение» («Настоящий квантовый скачок в технологии производства наручных часов!»). Если электрон перескакивает на более низкую орбиту, он теряет энергию и, соответственно, испускает квант света — фотон фиксированной энергии с фиксированной длиной волны. На глаз мы различаем фотоны разных энергий по цвету — раскаленная на огне медная проволока светится синим, а натриевая лампа уличного освещения — желтым. Для перехода на более высокую орбиту электрон должен, соответственно, поглотить фотон.

В картине атома по Бору, таким образом, электроны переходят вниз и вверх по орбитам дискретными скачками — с одной разрешенной орбиты на другую, подобно тому, как мы поднимаемся и спускаемся по ступеням лестницы. Каждый скачок обязательно сопровождается испусканием или поглощением кванта энергии электромагнитного излучения, который мы называем фотоном.

Со временем интуитивная гипотеза Бора уступила место строгой систематической формулировке в рамках законов квантовой механики и, в частности, концепции двойственной природы элементарных частиц — корпускулярно-волновой (см. Принцип дополнительности). Сегодня электроны представляются нам не микроскопическими планетами, обращающимися вокруг атомного ядра, а волнами вероятности, плещущимися внутри своих орбит — подобно приливам и отливам в тороидальном бассейне — и подчиняющимся уравнению Шрёдингера. Современные физики, как само собой разумеющееся, рассчитывают характеристики этих волн для самых сложных по структуре атомов и используют их для объяснения свойств и поведения этих атомов. Однако основополагающую картину всей современной квантовой механики нарисовал в своем великом прозрении Нильс Бор — в далеком теперь 1913 году.

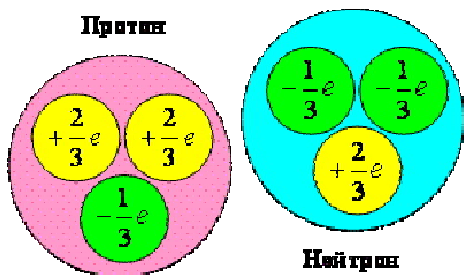
Еще одно интересное свойство атома — это так называемый **дефект массы**. Масса ядра атома любого химического элемента не равна сумме масс протонов и нейтронов, из которых это ядро состоит. оказалась меньше суммы масс входящих в него частиц. Эту разницу можно выразить формулой $\Delta m = [Zm_p + (A-Z)m_n] - m_{\text{я}}$, в которой

Δm - и есть дефект массы. Наличие дефекта массы связано с тем, что при объединении нуклонов в ядро выделяется энергия их связи друг с другом. Как известно из СТО, энергия покоя частицы связана с ее массой соотношением: $E = mc^2$. Это означает, что энергия покоящегося ядра меньше суммарной энергии невзаимодействующих нуклонов. Эта разница составляет величину: $E_{св} = c^2[Zm_p + (A-Z)m_n - m_я]$ или $E_{св} = \Delta m \cdot c^2$. Она называется **энергией связи** в ядре и равна работе, которую нужно совершить для того, чтобы разделить нуклоны в ядре и разнести их на расстояния, где они бы не взаимодействовали. Энергия связи, приходящаяся на один нуклон, $E_{св}/A$ называется *удельной энергией связи* в ядре.

Атомная теория строения вещества показала, что не все в мире устроено так, как кажется на первый взгляд, и что сложности на одном уровне легко объясняются на следующем уровне детализации. На протяжении всего XX века, после открытия структуры атома (то есть после появления модели атома Бора), усилия ученых были сосредоточены на разгадке структуры атомного ядра.

К середине 60-х годов XX века было открыто уже очень большое количество микрочастиц, возникло предположение, что, по крайней мере, часть из них не является элементарными, а состоит из более мелких частиц. В 1963 году американские физики-теоретики М. Геллман и Дж. Цвейг выдвинули гипотезу, согласно которой частицы, называемые **адронами** (см. ниже), являются составными частицами. В частности, протоны, нейтроны (которые относятся к адронам) состоят из трех фундаментальных, электрически заряженных частиц, названных **кварками**.

Экспериментальное подтверждение кварковой структуры нуклонов пришло в 1969 г. из Стэнфорда, где изучалось рассеяние электронов очень высоких энергий (20 ГэВ) на протонах и нейтронах. Подобно тому как в опыте Резерфорда по рассеянию α -частиц было обнаружено атомное ядро в центре атома, так в Стэнфордском эксперименте было обнаружено пространственное распределение электрического заряда в нуклоне. Было



установлено существование трех точечных зарядов в нуклонах. Эти частички, свободно перемещающиеся внутри нуклона, как три пчелы в стакане, и есть кварки. Протон состоит из двух положительно заряженных кварков и одного отрицательного, нейтрон – из двух отрицательно заряженных и одного положительно заряженного.

установлено существование трех точечных зарядов в нуклонах. Эти частички, свободно перемещающиеся внутри нуклона, как три пчелы в стакане, и есть кварки. Протон состоит из двух положительно заряженных кварков и одного отрицательного, нейтрон – из двух отрицательно заряженных и одного положительно заряженного.

§5.3 Мир элементарных частиц

1920-е годы — после введения принципов квантовой механики — субатомный мир представлялся крайне простым. Всего два вида элементарных частиц — протоны и нейтроны — составляли ядро атома (хотя экспериментально существование нейтронов и было подтверждено лишь в 1930-е годы), и один вид частиц — электроны — существовали за пределами ядра, вращаясь вокруг него на орбитах. Казалось, всё многообразие Вселенной выстроено из этих трех частиц.

Увы, столь простой картине мира суждено было просуществовать недолго. Ученые, оборудовав высокогорные лаборатории по всему миру, принялись за изучение состава космических лучей. **Космические лучи** представляют собой потоки быстрых частиц (в основном протонов), образующиеся в результате различных процессов во

Вселенной и постоянно изливаемые в земную атмосферу. В верхних слоях атмосферы часть из этих частиц, взаимодействуя с атомами атмосферы, образуют новые частицы. Исследуя потоки частиц, бомбардирующих нашу планету, ученые начали открывать всевозможные частицы, не имеющие ни малейшего отношения к вышеописанной идилической триаде. В частности, были обнаружены совершенно немыслимые по своей природе **античастицы**.

Мир античастиц — своего рода зеркальное отражение знакомого нам мира. Масса античастицы в точности равняется массе частицы, которой она вроде бы соответствует, но все ее остальные характеристики противоположны прообразу. Например, электрон несет отрицательный электрический заряд, а парная ему античастица — **«позитрон»** (производное от «позитивный электрон») — положительный. Эти частицы во всем идентичны кроме электрического заряда. Дальше, у протона заряд положительный, а у **антипротона** — отрицательный. И так далее. При взаимодействии частицы и парной ей античастицы происходит их взаимная аннигиляция — обе частицы прекращают свое существование, а их масса преобразуется в энергию, которая рассеивается в пространстве в виде вспышки фотонов и прочих сверхлегких частиц.

Существование античастиц впервые предсказал Поль Дирак в статье, опубликованной им в 1930 году. А в 1932 году Андерсон открыл позитрон.

Все следующие за позитроном античастицы были экспериментально обнаружены уже в лабораторных условиях — на ускорителях. Сегодня физики-экспериментаторы имеют возможность буквально штамповать их в нужных количествах для текущих экспериментов, и чем-то из ряда вон выходящим античастицы давно не считаются.

К началу 1950-х годов изучение этих элементарных, как их назвали, частиц вышло на передний край физической науки. Основной метод изучения элементарных частиц состоит в том, что ядро-мишень бомбардируется мощным пучком протонов или электронов, а ученые ведут наблюдения за осколками ядра, образующимися в результате столкновений. Согласно теории относительности, кинетическая энергия быстрых частиц может быть преобразована в массу по знаменитой формуле $E = mc^2$, так что новые виды частиц могут образовываться (и реально образуются) в изобилии.

По такому принципу устроен один из самых известных на данный момент ускорителей заряженных частиц — Большой Адронный Коллайдер (БАК).

За исключением протона и электрона все эти вновь обнаруженные частицы нестабильны, то есть очень скоро распадаются на другие элементарные частицы (за пределами ядра быстрому распаду подвержен даже нейтрон). Однако для участия во внутриядерных процессах частице хватает и мизерного времени существования, достаточного для перемещения в пределах границ ядра.

Поиск самых простых частиц привел исследователей к пониманию того, что **абсолютной элементарности не существует**, что частица любого уровня сложна в своей сущности и проявлениях. Условно принято считать элементарными те частицы, у которых сегодня не обнаружена внутренняя структура, а их размеры недоступны измерению.

Сейчас элементарных частиц уже более трехсот. К ним относят и те частицы, которые получают на мощных циклотронах, синхротронах и других ускорителях. Есть элементарные частицы, возникающие при прохождении через атмосферу космических лучей, они существуют несколько миллионных долей секунды, потом распадаются,

видоизменяются, превращаясь в другие элементарные частицы, или испускают энергию в форме излучения.

Основными характеристиками элементарных частиц являются масса, электрический заряд, спин, среднее время жизни, магнитный момент, пространственная четность, барионный заряд и квантовые числа.

Огромное количество и разнообразие объектов микромира привело к необходимости классифицировать их. Элементарные частицы можно разделить на два класса:

Лептоны

К классу лептонов относятся частицы, которые, подобно электрону, не участвуют в водовороте внутриядерных взаимодействий. На сегодня известно шесть таких частиц. К одному семейству с электроном относятся *мюоны* и *тау-частицы*, которые похожи на электрон, но массивнее его. Обе эти тяжелые частицы нестабильны и со временем распадаются на несколько продуктов, включая электрон. Также имеется три электрически нейтральные частицы с нулевой (или близкой к нулю, на этот счет ученые до конца не определились) массой, получившие название *нейтрино*. Каждая из трех разновидностей нейтрино парна одной из трех частиц электронного семейства. Слово «лептон» происходит от греческого *leptos*, что значит «маленький».

Адроны

К адронам относят частицы, существующие внутри атомного ядра. Самые известные из них — это протон и нейтрон, но быстро распадающихся родственников у них сотни (в буквальном смысле). За исключением протона все они нестабильны, и их можно классифицировать по составу частиц, на которые они распадаются. Если среди конечных продуктов распада частицы имеется протон, ее называют «*барион*» (от греческого *barys* — «тяжелый»); если же протона среди продуктов распада нет, частица называется «*мезон*» (от греческого *mesos* — «средний»). Сам термин «адрон» происходит от греческого *hadros* («большой»).

Сумбурная картина субатомного мира, усложнявшаяся с открытием каждого нового адрона, уступила место новой простой картине с появлением концепции. Согласно кварковой модели все адроны (но не лептоны) состоят из «еще более элементарных» частиц. Барионы состоят из трех кварков, а мезоны — из пары кварк-антикварк.

Вышеописанные элементарные частицы являются своего рода строительным материалом атомного ядра — кирпичиками, из которых сложена Вселенная. Другая группа частиц, *калибровочные бозоны* (к их числу относятся и фотоны), — носители сил, удерживающих элементарные частицы вместе; это своего рода цемент, которым скреплена Вселенная.

§5.4 Фундаментальные физические взаимодействия.

Движение – это способ существования материи!

Виды движений в порядке усложнения:

- физическое; - химическое; - биологическое; - социальное.

Любые формы движения материи, изучаемые физикой, определяются **фундаментальными взаимодействиями.**

Физическое взаимодействие – разворачивающийся во времени и пространстве процесс воздействия одних объектов на другие путем обмена движением и материей. Все свойства тел являются производными от взаимодействий.

Не существует движения без взаимодействия.

Не существует взаимодействия без движения.

Виды взаимодействий:

- гравитационное; - электромагнитное; - сильное; - слабое.

Гравитационное взаимодействие.

Оно описывается законом тяготения И.Ньютона $F = G \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$. В макромире оно тем сильнее, чем больше массы взаимодействующих тел. В микромире гравитационное взаимодействие теряется на фоне более мощных сил (Например, для электронов $F_{грав}$ в 10^{40} меньше силы электростатического отталкивания).

Силы гравитации обуславливают образование всех космических систем, а также концентрацию рассеянной материи звезд и галактик.

В ОТО существует понимание гравитации как проявления кривизны пространства. Чем больше масса тела, тем больше искривление пространства создает поле тяготения.

Электромагнитное взаимодействие.

Обладает универсальным характером и существует между любыми телами. Проявляется в притяжении разноименных электрических зарядов или отталкивании одноименных (закон Кулона).

Благодаря электромагнитному взаимодействию возникают атомы, молекулы и макроскопические тела. Все химические реакции – это проявление электромагнитных взаимодействий, которые приводят к перераспределению химических связей между атомами и молекулами.

Электричество и магнетизм - это силы одного и того же феномена. *Электродинамика Д. Максвелла* является законченной классической теорией электромагнетизма, сохраняющей свое значение и в наши дни.

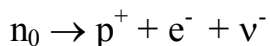
В современной физике создана более совершенная и точная *квантовая электродинамика*, которая утверждает, что заряд создает поле, квантом которого является безмассовая частица *фотон*.

Электрический заряд проявляется в двух разновидностях: заряд электрона назван отрицательным, а заряд, которым обладают протон и позитрон – положительным. Взаимодействие положительных и отрицательных зарядов обеспечивается обменом фотонов.

Сильные и слабые ядерные взаимодействия — короткодействующие и проявляются только в пределах размеров атом. ядра, т. е. в областях порядка 10^{-14} м.

Слабое взаимодействие - это фундаментальное физическое взаимодействие, существующее только в микромире. Оно способствует превращению одних частиц (фермионов) в другие.

Примером такого взаимодействия является β -распад. В ходе этого процесса свободный нейтрон в среднем за 15 минут распадается на протон, электрон и антинейтрино.

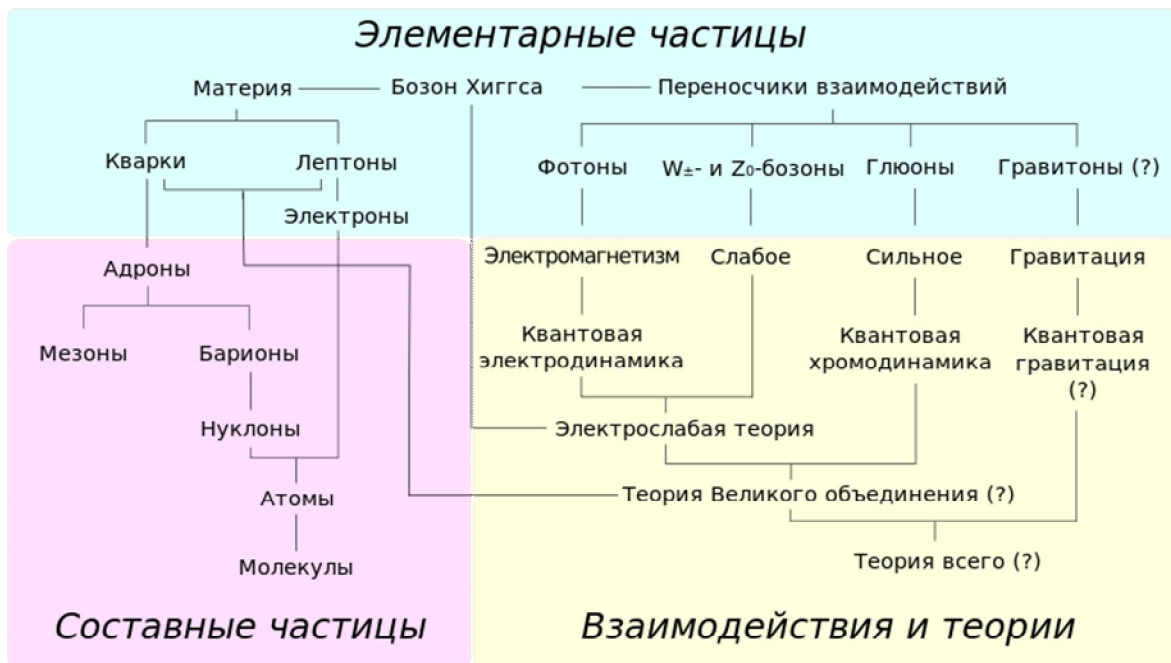


Сильное взаимодействие соединяет элементарные частицы - кварки и антикварки в адроны, обеспечивающее связь нуклонов в ядре. Теория сильных взаимодействий находится в стадии становления. Сильное ядерное взаимодействие препятствует распаду атомных ядер, и не будь его, ядра распались бы из-за сил электрического отталкивания протонов.

Чтобы понять обратную сторону медали — характер сил взаимодействия между кварками и лептонами, — нужно понять, как современные физики-теоретики интерпретируют само понятие силы. В этом нам поможет аналогия. Представьте себе двух лодочников, гребущих на встречных курсах по реке Кэм в Кэмбридже. Один гребец от щедрости душевной решил угостить коллегу шампанским и, когда они проплывали друг мимо друга, кинул ему полную бутылку шампанского. В результате действия закона сохранения импульса, когда первый гребец кинул бутылку, курс его лодки отклонился от прямолинейного в противоположную сторону, а когда второй гребец поймал бутылку, ее импульс передался ему, и вторая лодка также отклонилась от прямолинейного курса, но уже в противоположную сторону. Таким образом, в результате обмена шампанским обе лодки изменили направление.

Согласно законам механики Ньютона это означает, что между лодками произошло силовое взаимодействие. Но ведь лодки не вступали между собой в прямое соприкосновение? Здесь мы и видим наглядно, и понимаем интуитивно, что сила взаимодействия между лодками была передана носителем импульса — бутылкой шампанского. Физики назвали бы ее *переносчиком взаимодействия*.

В точности так же и силовые взаимодействия между частицами происходят посредством обмена частицами-переносчиками этих взаимодействий. Фактически, различие между фундаментальными силами взаимодействия между частицами мы и проводим лишь постольку, поскольку в роли переносчиков этих взаимодействий выступают разные частицы. Таких взаимодействий четыре: *сильное* (именно оно удерживает кварки внутри частиц), *электромагнитное*, *слабое* (именно оно приводит к некоторым формам радиоактивного распада) и *гравитационное*. Переносчиками сильного цветового взаимодействия являются **глюоны**, не обладающие ни массой, ни электрическим зарядом. Этот тип взаимодействия описывается квантовой хромодинамикой. Электромагнитное взаимодействие происходит посредством обмена квантами электромагнитного излучения, которые называются **фотонами** и также лишены массы. Слабое взаимодействие, напротив, передается массивными *векторными* или **калибровочными бозонами**, которые «весят» в 80-90 раз больше протона, — в лабораторных условиях их впервые удалось обнаружить лишь в начале 1980-х годов. Наконец, гравитационное взаимодействие передается посредством обмена не обладающими собственной массой **гравитонами** — этих посредников пока что экспериментально обнаружить не удалось.

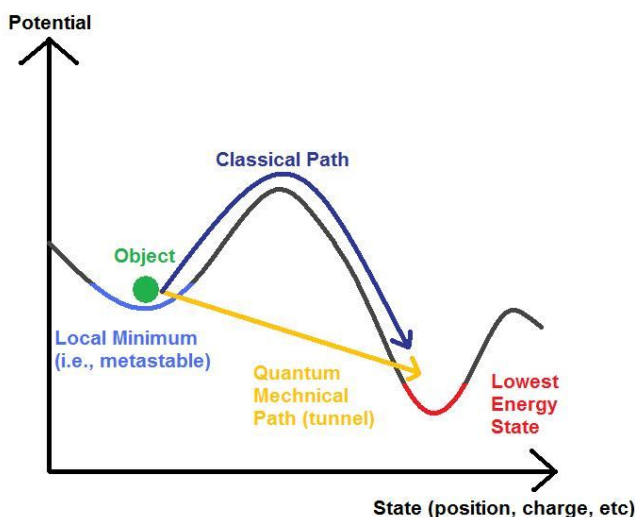


Краткий обзор различных семейств элементарных и составных частиц, и теории, описывающие их взаимодействия. Фермионы — слева, бозоны — справа.

Туннельный эффект

Основа для описания поведения микрочастиц – уравнение Шредингера. Оно играет здесь ту же роль, что и уравнения Ньютона в классической механике, и позволяет предсказать вероятностным образом результаты измерений. Законы квантовой механики – фундамент изучения строения вещества и большинства макроявлений.

Известным примером вероятностного поведения микрочастиц является так называемый **туннельный эффект**.



Представьте шарик, катающийся внутри сферической ямки, вырытой в земле. В любой момент времени энергия шарика распределена между его кинетической энергией и потенциальной энергией силы тяжести в пропорции, зависящей от того, насколько высоко шарик находится относительно дна ямки. При достижении шариком борта ямки возможны два варианта развития событий. Если его совокупная энергия превышает потенциальную энергию гравитационного поля, определяемую высотой точки нахождения шарика, он выпрыгнет из ямки.

Если же совокупная энергия шарика меньше потенциальной энергии силы тяжести на уровне борта лунки, шарик покатится вниз, обратно в ямку, в сторону противоположного борта; в тот момент, когда потенциальная энергия будет равна совокупной энергии шарика, он остановится и покатится назад. Во втором случае шарик никогда не выкатится из ямки, если не придать ему дополнительную кинетическую энергию — например, подтолкнув. Согласно законам механики

Ньютона, шарик никогда не покинет ямку без придания ему дополнительного импульса, если у него недостаточно собственной энергии для того, чтобы выкатиться за борт.

В мире квантовой механики дело обстоит иначе. Представим себе, что в чем-то вроде такой ямы находится квантовая частица. В этом случае речь идет уже не о реальной физической яме, а об условной ситуации, когда частице требуется определенный запас энергии, необходимый для преодоления барьера, мешающего ей вырваться наружу из того, что физики условились называть «потенциальной ямой». У этой ямы есть и энергетический аналог борта — так называемый «потенциальный барьер». Так вот, если снаружи от потенциального барьера уровень напряженности энергетического поля ниже, чем энергия, которой обладает частица, у нее имеется шанс оказаться «за бортом», даже если реальной кинетической энергии этой частицы недостаточно, чтобы «перевалить» через край борта в ньютоновском понимании. Этот механизм прохождения частицы через потенциальный барьер и назвали квантовым туннельным эффектом. Работает он так: в квантовой механике частица описывается через волновую функцию, которая связана с вероятностью местонахождения частицы в данном месте в данный момент времени. Если частица сталкивается с потенциальным барьером, уравнение Шрёдингера позволяет рассчитать вероятность проникновения частицы через него, поскольку волновая функция не просто энергетически поглощается барьером, но очень быстро гасится — по экспоненте. Иными словами, потенциальный барьер в мире квантовой механики размыт. Он, конечно, препятствует движению частицы, но не является твердой, непроницаемой границей, как это имеет место в классической механике Ньютона.

Квантовый туннельный переход можно рассматривать как своего рода «утечку» или «просачивание» частицы через потенциальный барьер, после чего частица движется прочь от барьера. В природе достаточно примеров такого рода явлений, равно как и в современных технологиях.

§5.5 Развитие квантовых представлений о строении материи

В 1900 году Макс Планк предлагает **квантовую гипотезу**.

Макс Планк — один из основоположников квантовой механики — пришел к идеям квантования энергии, пытаясь теоретически объяснить процесс взаимодействия между недавно открытыми электромагнитными волнами и атомами и, тем самым, разрешить проблему излучения черного тела. Он понял, что для объяснения наблюдаемого спектра излучения атомов нужно принять за данность, что атомы излучают и поглощают энергию порциями (которые ученый назвал **квантами**) и лишь на отдельных волновых частотах. Энергия, переносимая одним квантом, равна:

$$E = h\nu,$$

где ν — частота излучения, а h — *элементарный квант действия*, представляющий собой новую универсальную константу, получившую вскоре название **постоянная Планка**. Планк же первым и рассчитал ее значение на основе экспериментальных данных $h = 6,548 \times 10^{-34}$ Дж·с (в системе СИ); по современным данным $h = 6,626 \times 10^{-34}$ Дж·с. Соответственно, любой атом может излучать широкий спектр связанных между собой дискретных частот, который зависит от орбит электронов в составе атома.

Опубликовав свои результаты в конце 1900 года, сам Планк — и это видно из его публикаций — сначала не верил в то, что кванты — физическая реальность, а не удобная математическая модель (Планк предполагал, что этот феномен как-то связан со строением атомов, но не с природой света). Однако, когда пять лет спустя Альберт Эйнштейн опубликовал статью, объясняющую фотоэлектрический эффект на основе *квантования энергии* излучения, в научных кругах формулу Планка стали воспринимать уже не как теоретическую игру, а как описание реального физического явления на субатомном уровне, доказывающее квантовую природу энергии.

1905 год – объяснение явления фотоэффекта А.Эйнштейном.

Фотоэффект – испускание с поверхности некоторых металлов электронов под воздействием света. Проявляется фотоэффект только начиная с определенной частоты света, свойственной данному металлу. Законы фотоэффекта, установленные А.Г.Столетовым и Ф.Ленардом, объяснил А.Эйнштейн, рассматривая свет как поток частиц (названных впоследствии **фотонами**) не только при испускании, но и при распространении и поглощении света. при взаимодействии с электроном фотон может вести себя как частица, и буквально выбивать электрон из атома (это соударение фотона с атомом можно уподобить столкновению двух бильярдных шаров). Причем для выбивания электрона при таком соударении достаточно единственного фотона. Далее, повышение интенсивности света приводит к увеличению числа фотонов (и, следовательно, числа выбитых электронов), но не энергии отдельно взятого фотона. Следовательно, и энергия, и скорость отдельно взятого выбитого фотоэлектрона не зависят от интенсивности света — но только от его частоты.

Фотон – материальная, электрически нейтральная частица с энергией $E = h\nu$. Фотон – это квант электромагнитного поля, движется в вакууме со скоростью c , остановить его невозможно, он существует только в движении, его масса покоя равна нулю. Импульс фотона $p = mc = E/c = h/\lambda$, так как $c = \lambda\nu$. Наличие импульса у фотона, предсказанное Дж. Максвеллом (1873), было подтверждено экспериментально П.Н.Лебедевым (1900) измерением светового давления.

На основе закона сохранения энергии он записал уравнение: $h\nu = A_{\text{вых}} + \frac{mv^2}{2}$,

где A – это работа выхода, необходимая для преодоления силы, удерживающей электроны в металле. Наименьшая частота, вызывающая фотоэффект называется **красной границей фотоэффекта**.

Постоянная Планка фигурирует во всех уравнениях и формулах квантовой механики. Она, в частности, определяет масштабы, начиная с которых вступает в силу принцип неопределенности Гейзенберга. Грубо говоря, постоянная Планка указывает нам нижний предел пространственных величин, после которого нельзя не принимать во внимание квантовые эффекты. Для песчинок, скажем, неопределенность произведения их линейного размера на скорость настолько незначительна, что ею можно пренебречь. Иными словами, постоянная Планка проводит границу между макромиром, где действуют законы механики Ньютона, и микромиром, где вступают в силу законы квантовой механики. Будучи получена всего лишь для теоретического описания единичного физического явления, постоянная Планка вскоре стала одной из фундаментальных констант теоретической физики, определяемых самой природой мироздания.

Дальнейшее развитие квантовой гипотезы произошло в работах де Бройля.

В 1924 году – французский физик Луи де Бройль теоретически показал, что любую частицу, обладающую импульсом p можно представить в виде волны, длина которой (λ) равна:

$$\lambda = h/p$$

Далее (после открытий квантовой природы света) Луи де Бройль, исходя из идеи симметрии мира, приписал подобные свету свойства любой частице. Из формул $E = mc^2$ и $E = h\nu$ вывел соотношение, показывающее, что любой частице соответствует своя длина волны:

$$\lambda_b = h/(mv) = h/p \quad (\text{длина волны де Бройля}).$$

Физические величины, описывающие поведение частиц могут быть разными по сути. Энергия E и импульс p отражают корпускулярные свойства частиц, в то же время длина волны λ и частота ν отражают волновые свойства.

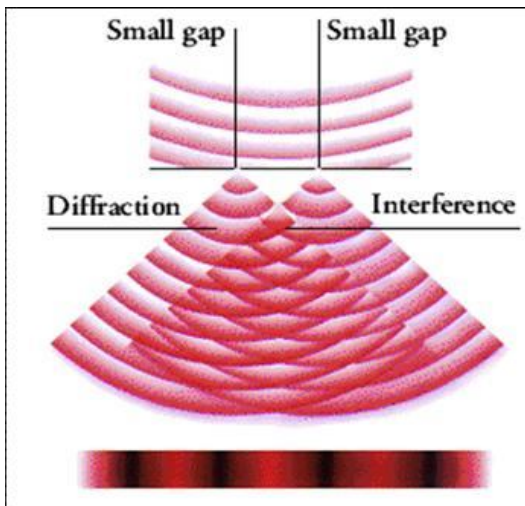
Подтверждение идеи де Бройля было получено в 1927 году с открытием **дифракции электронов**. В физике рождается крайне необычный (с точки зрения классической науки) принцип – принцип квантово-волнового дуализма.

§5.6 Квантово-волновой дуализм

В повседневной жизни имеется два способа переноса энергии в пространстве — посредством частиц или волн. Чтобы, скажем, скинуть со стола костяшку домино, балансирующую на его краю, можно придать ей необходимую энергию двумя способами. Во-первых, можно бросить в нее другую костяшку домино (то есть передать точечный импульс с помощью частицы). Во-вторых, можно построить в ряд стоящие костяшки домино, по цепочке ведущие к той, что стоит на краю стола, и уронить первую на вторую: в этом случае импульс передастся по цепочке — вторая костяшка завалит третью, третья четвертую и так далее. Это — волновой принцип передачи энергии. В обыденной жизни между двумя механизмами передачи энергии видимых противоречий не наблюдается. Так, баскетбольный мяч — это частица, а звук — это волна, и всё ясно.

Однако в квантовой механике всё обстоит отнюдь не так просто. Даже из простейших опытов с квантовыми объектами очень скоро становится понятно, что в микромире привычные нам принципы и законы макромира не действуют. Свет, который мы привыкли считать волной, порой ведет себя так, будто состоит из потока частиц (*фотонов*), а элементарные частицы, такие как электрон или даже массивный протон, нередко проявляют свойства волны.

Теперь давайте проведем несложный эксперимент для иллюстрации вышесказанного. Предположим, у нас есть замкнутая камера с двумя тонкими горизонтальными прорезями — одна выше средней линии, другая ниже. Теперь представим, что на эти прорези направлен параллельный пучок световых лучей. Естественно предположить, что частицы света будут проходить через оба отверстия прямо, и на задней стенке камеры (на экране) будут наблюдаться две отчетливые световые полосы напротив каждой из прорезей, а посередине между ними свет попадать не должен.

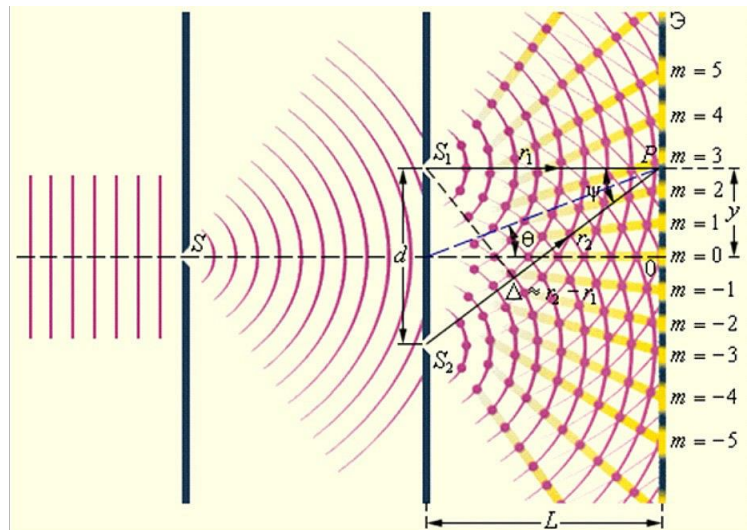


Однако на практике мы наблюдаем совершенно иную картину (см. рисунок). Согласно принципу Гюйгенса, каждая из прорезей играет роль независимого источника вторичных световых волн, и на экране на средней линии между двумя прорезями мы, напротив, должны наблюдать максимум амплитуды их колебаний. В частности, звуковые волны, исходящие из двух стереодинамиков, как раз и дают пик громкости на линии равного удаления между ними. То же самое касается и двух равноудаленных источников световых волн, проецируемых на экран. Иными

словами, пик амплитуды волны приходится как раз на ту пространственную зону, куда, согласно корпускулярной теории, должно попадать минимальное число частиц.

(Напомним, что под **дифракцией** мы понимаем свойство света огибать препятствия и попадать в область геометрической тени. **Интерференция** в свою очередь, - это взаимное усиление или ослабление двух (или более) взаимодействующих волн.)

Если направить на подобную камеру пучок электронов, на экране будут отчетливо прослеживаться свойства волнам полосы пиков и спадов интенсивности излучения, то есть электрон будет вести себя как волна. С другой стороны, если «выстреливать» электроны по одному, каждый из них будет оставлять четкий след на экране — то есть вести себя как частица. Самое интересное, что то же самое будет, если вместо пучка электронов вы возьмете пучок фотонов: в пучке они будут вести себя как волны, а по отдельности — как частицы.



Подытожим сказанное. Если фотоны или электроны направлять в такую камеру по одному, они ведут себя как частицы; однако если собрать достаточную статистику таких одиночных экспериментов, то выяснится, что по совокупности эти же электроны или фотоны распределяются на задней стенке камеры так, что на ней будет наблюдаться знакомая картина чередующихся пиков и спадов интенсивности, свидетельствующая об их волновой природе. Иными словами, в микромире объекты, которые ведут себя как частицы, при этом как бы «помнят» о своей волновой природе, и наоборот. Это странное свойство объектов микромира получило название **квантово-волнового дуализма**. Проводилось множество экспериментов с целью «разоблачить истинную природу» квантовых частиц: использовались различные экспериментальные методики и установки, включая такие, которые позволили бы на полпути к приемнику выявить волновые свойства отдельной частицы или, напротив, определить волновые свойства светового пучка через характеристики отдельных квантов. Всё тщетно. Судя по всему, квантово-волновой дуализм объективно присущ квантовым частицам.

В микромире нет пропасти между волновыми и квантовыми (корпускулярными) свойствами объектов (микрочастиц). В одних условиях частицы проявляют свои волновые свойства, а в других условиях – квантовые. Такова двойственная природа материи в микромире.

§5.7 Принцип неопределенности и принцип дополнительности

Принцип неопределенности В.Гейзенберга – получение информации об одних величинах, описывающих микрообъект, неизбежно ведет к уменьшению информации о других величинах, дополнительным к первым.

Пытаясь изучить объект, мы вносим искажения в этот объект. Принцип описывается двумя основными формулами:

$$\Delta p \Delta x \geq \hbar \text{ и } \Delta E \Delta t \geq \hbar .$$

Совершенствуя приборы измерения, можно уменьшить погрешности, т.е. повышать точность измерения. Но Гейзенберг показал, что существуют *сопряженные характеристики* микрочастицы, точное одновременное измерение которых принципиально невозможно. Т.е. неопределенность – свойство самого состояния, оно не связано с точностью прибора.

Принцип Гейзенберга вообще играет в квантовой механике ключевую роль хотя бы потому, что достаточно наглядно объясняет, как и почему микромир отличается от знакомого нам материального мира. Чтобы понять этот принцип, задумайтесь для начала о том, что значит «измерить» какую бы то ни было величину. Чтобы отыскать, например, эту книгу, вы, войдя в комнату, окидываете ее взглядом, пока он не остановится на ней. На языке физики это означает, что вы провели визуальное измерение (нашли взглядом книгу) и получили результат — зафиксировали ее пространственные координаты (определили местоположение книги в комнате). На самом деле, процесс измерения происходит гораздо сложнее: источник света (Солнце или лампа, например) испускает лучи, которые, пройдя некий путь в пространстве, взаимодействуют с книгой, отражаются от ее поверхности, после чего часть из них доходит до ваших глаз, проходя через хрусталик, фокусируется, попадает на сетчатку — и вы видите образ книги и определяете ее положение в пространстве. Ключ к измерению здесь — взаимодействие между светом и книгой. Так и при любом измерении, представьте себе, инструмент измерения (в данном случае, это свет) вступает во взаимодействие с объектом измерения (в данном случае, это книга).

В классической физике, построенной на ньютоновских принципах и применимой к объектам нашего обычного мира, мы привыкли игнорировать тот факт, что инструмент измерения, вступая во взаимодействие с объектом измерения, воздействует на него и изменяет его свойства, включая, собственно, измеряемые величины. Включая свет в комнату, чтобы найти книгу, вы даже не задумываетесь о том, что под воздействием возникшего давления световых лучей книга может сдвинуться со своего места, и вы узнаете ее искаженные под влиянием включенного вами света пространственные координаты. Интуиция подсказывает нам (и, в данном случае, совершенно правильно), что акт измерения не влияет на измеряемые свойства объекта измерения. А теперь задумайтесь о процессах, происходящих на субатомном уровне. Допустим, нам нужно зафиксировать пространственное местонахождение

электрона. Мне по-прежнему нужен измерительный инструмент, который вступит во взаимодействие с электроном и возвратит моим детекторам сигнал с информацией о его местопребывании. И тут же возникает сложность: иных инструментов взаимодействия с электроном для определения его положения в пространстве, кроме других элементарных частиц, у нас нет. И если предположение о том, что свет, вступая во взаимодействие с книгой, на ее пространственных координатах не сказывается, относительно взаимодействия измеряемого электрона с другим электроном или фотонами такого сказать нельзя.

Определить положение электрона в пространстве мы можем по взаимодействию светового луча с электроном. Мы направим на него свет и по отраженному свету определим положение. Очевидно, что определить положение частицы нам желательно так, чтобы в наименьшей степени исказить это положение. Сделать это можно уменьшив интенсивность света до минимума. Минимум – это отдельный фотон. Таким образом, мы облучаем электрон (вернее, то место, где электрон предположительно находится) фотоном. Но здесь наши трудности не заканчиваются. Поскольку фотон – волновой объект, то он позволяет определить местоположение электрона с точностью до своей длины волны. Соответственно, чем ниже длина волны, тем более точно можно определить положение (координату) частицы.

Природа фотонов такова, что энергия отдельного фотона зависит от соответствующей частоты ($E = h\nu$), а его частота связана с его длиной волны следующим соотношением: $\nu = c/\lambda$. Следовательно, при выборе фотонов с меньшими длинами волн, мы вынуждены выбирать фотоны с большими энергиями. А фотон с большей энергией в большей степени искажает положение и другие параметры (скорость, импульс, энергия) исследуемой частицы.

Почему же мы не можем одновременно измерить точное положение и точную скорость частицы? Измерение скорости объекта – это, в действительности, просто измерение его положения в два последовательных момента времени, чтобы выяснить, насколько значительно он переместился за это время. Если можно измерить положение частицы один раз, то, естественно (как нам кажется), это можно сделать дважды.

Но мы приходим к парадоксальному выводу. У нас два варианта дальнейших действий:

1. Либо мы облучаем электрон длинноволновыми фотонами, в результате чего его координату мы узнаем с большей **неопределенностью**, но в меньшей степени искажаем его состояние (например, в меньше степени изменяем его скорость);
2. Либо мы облучаем электрон коротковолновыми (высокоэнергетичными) фотонами, в результате чего мы с большей точностью узнаем координату электрона в момент взаимодействия, но информация о его последующем положении в большей степени искажается, так как мы оказали более сильное воздействие на электрон в момент измерения. Следовательно, скорость (импульс) электрона мы узнаем с большей неопределенностью.

Таким образом, мы можем сказать, что справедливо соотношение $\Delta p \Delta x \geq h$: произведение неопределенности импульса и неопределенности координаты (то есть погрешностей измерения соответствующих величин) – есть величина постоянная, которая не может быть меньше величины постоянной Планка. Минимальное значение такого произведения неопределенностей, то есть сама постоянная Планка характеризует минимальные возможные значения точности измерений

соответствующих величин. Обойти этот предел мы не можем, так как здесь уже вступают в силу квантовые эффекты (квантово-волновой дуализм).

С помощью соотношения неопределенностей можно объяснить туннельный эффект. При ограничении квантовой частицы по координате, то есть увеличении её определённости по x , её импульс p становится менее определённым. Случайным образом неопределённость импульса Δp может добавить частице энергии для преодоления барьера. Таким образом, с некоторой вероятностью квантовая частица может проникнуть через барьер, а средняя энергия частицы останется неизменной.

Фактически обобщением двух принципов устройства объектов микромира: квантово-волнового дуализма и принципа неопределенности является принцип, сформулированный Нильсом Бором, создателем первой квантовой теории атома. Принцип Бора получил название «принцип дополнительности».

Принцип дополнительности Н.Бора – для полного описания объектов микромира необходимо использование двух противоположных, но дополняющих друг друга представлений.

Принцип дополнительности — простая констатация факта двойственности природы объектов микромира. Согласно этому принципу, если мы измеряем свойства квантового объекта как частицы, мы видим, что он ведет себя как частица. Если же мы измеряем его волновые свойства, для нас он ведет себя как волна. Оба представления отнюдь не противоречат друг другу — они именно *дополняют* одно другое, что и отражено в названии принципа.

§5.8 Явление радиоактивности

1896 год – открытие явления радиоактивности при изучении люминесценции в солях урана (А.Беккерель).

Далее последовало открытие еще одного излучающего химического элемента – радия (М. Склодовская-Кюри, “radio” – с лат. испускаю лучи). Дальнейшее изучение радиоактивности приводит к заключению, что радиоактивное излучение бывает трех видов:

α -излучение – поток ядер гелия ($X_m^n - He_2^4 = Y_{m-2}^{n-4}$ - превращение химического элемента с испусканием ядра гелия.);

β -излучение – поток электронов (теория β -распада была разработана в 1936 году);

γ -излучение – высокоэнергетичное электромагнитное излучение (было подробно изучено при исследовании космических лучей).

Параллельно с открытием видов радиоактивности было открыто явление превращения одних химических элементов в другие.

1921 год – получена первая искусственная ядерная реакция (Резерфорд и Чедвик).

Большинство атомных ядер нестабильно. Рано или поздно они самопроизвольно (или, как говорят физики, *спонтанно*) распадаются на более мелкие ядра и элементарные частицы, которые принято называть *продуктами распада* или *дочерними элементами*. Распадающиеся частицы принято именовать *исходными материалами* или *родителями*. У всех нам хорошо знакомых химических веществ (железо, кислород, кальций и т. п.) имеется хотя бы один стабильный изотоп. (*Изотопами* называются разновидности химического элемента с одним и тем же числом протонов в ядре — это число протонов соответствует

порядковому номеру элемента, — но разным числом нейтронов.) Тот факт, что эти вещества нам хорошо известны, свидетельствует об их стабильности — значит, они живут достаточно долго, чтобы в значительных количествах накапливаться в природных условиях, не распадаясь на составляющие. Но у каждого из природных элементов имеются и нестабильные изотопы — их ядра можно получить в процессе ядерных реакций, но долго они не живут, поскольку быстро распадаются.

Распад ядер радиоактивных элементов или изотопов может происходить тремя основными путями, и соответствующие реакции ядерного распада названы тремя первыми буквами греческого алфавита. При *альфа-распаде* выделяется атом гелия, состоящий из двух протонов и двух нейтронов, — его принято называть альфа-частицей. Поскольку альфа-распад влечет за собой понижение числа положительно заряженных протонов в атоме на два, ядро, испустившее альфа-частицу, превращается в ядро элемента, отстоящую на две позиции ниже от нее в периодической системе Менделеева. При *бета-распаде* ядро испускает электрон, а элемент продвигается на одну позицию *вперед* по периодической таблице (при этом, по существу, нейтрон превращается в протон с излучением этого самого электрона). Наконец, *гамма-распад* — это распад ядер с излучением фотонов высоких энергий, которые принято называть гамма-лучами. При этом ядро теряет энергию, но химический элемент не видоизменяется.

Однако сам по себе факт нестабильности того или иного изотопа химического элемента отнюдь не означает, что, собрав воедино некоторое число ядер этого изотопа, вы получите картину их одномоментного распада. В реальности распад ядра радиоактивного элемента чем-то напоминает процесс жарки кукурузы при изготовлении попкорна: зерна (нуклоны) отпадают от «початка» (ядра) по одному, в совершенно непредсказуемом порядке, пока не отвалятся все. Закон, описывающий реакцию радиоактивного распада, собственно, только констатирует этот факт: за фиксированный отрезок времени радиоактивное ядро испускает число нуклонов, пропорциональное числу нуклонов, остающихся в его составе. То есть чем больше зерен-нуклонов всё еще остается в «недожаренном» початке-ядре, тем больше их выделится за фиксированный интервал времени «жарки». При переводе этой метафоры на язык математических формул мы получим уравнение, описывающее радиоактивный распад:

$$dN = \lambda N dt$$

где dN — число нуклонов, испускаемых ядром с общим числом нуклонов N за время dt , а λ — экспериментально определяемая *константа радиоактивности* исследуемого вещества. Вышеприведенная эмпирическая формула представляет собой линейное дифференциальное уравнение, решением которого является следующая функция, описывающая число нуклонов, остающихся в составе ядра на момент времени t :

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

где N_0 — число нуклонов в ядре на начальный момент наблюдения.

Константа радиоактивности, таким образом, определяет, насколько быстро распадается ядро. Однако физики-экспериментаторы обычно измеряют не ее, а так называемое *время полураспада* ядра (то есть срок, за который исследуемое ядро испускает половину содержащихся в нем нуклонов). У различных изотопов различных радиоактивных веществ время полураспада варьируется (в полном соответствии с теоретическими предсказаниями) от миллиардных долей секунды до миллиардов лет.

То есть некоторые ядра живут практически вечно, а некоторые распадаются буквально моментально (тут важно помнить, что по истечении времени полураспада остается половина совокупной массы исходного вещества, по истечении двух сроков полураспада — четверть его массы, по истечении трех сроков полураспада — одна восьмая и т. д.).

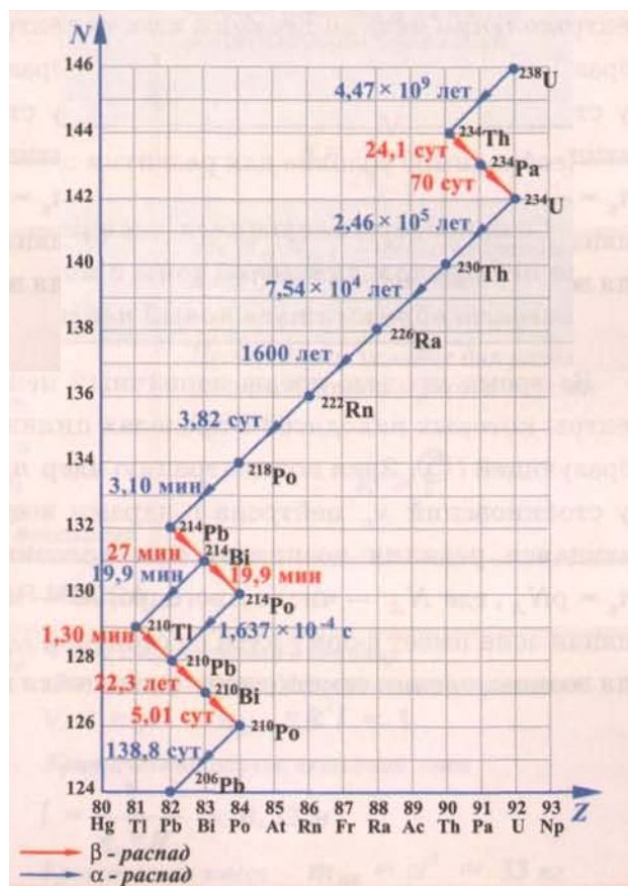
Объяснить механизм радиоактивного распада можно, вспомнив понятие туннельного эффекта. Тяжелое ядро излучает альфа-частицу, состоящую из двух протонов и двух нейтронов. С одной стороны, можно представить себе этот процесс таким образом, что тяжелое ядро удерживает внутри себя альфа-частицу посредством сил внутриядерной связи, подобно тому как шарик удерживался в ямке. Однако даже если у альфа-частицы недостаточно свободной энергии для преодоления барьера внутриядерных связей, всё равно имеется вероятность ее отрыва от ядра. И, наблюдая спонтанное альфа-излучение, мы получаем экспериментальное подтверждение реальности туннельного эффекта.

Распад

В природе уран встречается в форме нескольких изотопов, один из которых — уран-235 (^{235}U) — самопроизвольно распадается с выделением энергии. В частности, при попадании достаточно быстрого нейтрона в ядро атома ^{235}U последнее распадается

на два крупных куса и ряд мелких частиц, включая, обычно, два или три нейтрона. Однако, сложив массы крупных фрагментов и элементарных частиц, мы недосчитаемся определенной массы по сравнению с массой исходного ядра до его распада под воздействием удара нейтрона. Эта-то недостающая масса и выделяется в виде энергии, распределенной среди получившихся продуктов распада — прежде всего, *кинетической энергии* (энергии движения). Стремительно движущиеся частицы разлетаются от места распада и сталкиваются с другими частицами вещества, разогревая их.

Они представляют собой стремительно разлетающиеся от места распада частицы, при этом далеко они не улетают, врезаясь в соседние атомы вещества и разогревая их. Таким образом, энергия, порождаяемая ядерным распадом, преобразуется в теплоту окружающего вещества. На рисунке



изображена серия радиоактивных превращений урана-238.

Синтез

Термоядерный синтез — реакция прямо противоположная реакции распада по своей сути: более мелкие ядра объединяются в более крупные. Самая распространенная во Вселенной реакция вообще — это реакция термоядерного синтеза ядер гелия из ядер водорода: она непрерывно протекает в недрах практически всех видимых звезд. В чистом виде она выглядит так: четыре ядра водорода (протона) образуют атом гелия (2 протона + 2 нейтрона) с выделением ряда других частиц. Как и в случае реакции распада атомного ядра совокупная масса образовавшихся частиц

оказывается *меньше* массы исходного продукта (водорода) — она и выделяется в виде кинетической энергии частиц-продуктов реакции, за счет чего звезды и разогреваются.

В недрах звезд реакция термоядерного синтеза происходит не одновременно (когда сталкиваются 4 протона), а в три этапа. Сначала из двух протонов образуется ядро дейтерия (один протон и один нейтрон). Затем, после попадания в ядро дейтерия еще одного протона, образуется гелий-3 (два протона и один нейтрон) плюс другие частицы. И наконец, два ядра гелия-3 сталкиваются, образуя гелий-4, два протона, а также другие частицы. Однако по совокупности эта трехэтапная реакция дает чистый эффект образования из четырех протонов ядра гелия-4 с выделением энергии, уносимой быстрыми частицами, прежде всего фотонами (см. Эволюция звезд).

Естественная реакция термоядерного синтеза происходит в звездах; искусственная — в водородной бомбе. Увы, человек до сих пор не сумел найти средств для того, чтобы направить термоядерный синтез в управляемое русло и научиться получать за счет него энергию для использования в мирных целях. Однако ученые не теряют надежды на достижение положительных результатов в области получения «мирной и дешевой» термоядерной энергии уже в обозримом будущем — для этого главное научиться удерживать высокотемпературную плазму либо посредством лазерных лучей, либо посредством сверхмощных тороидальных электромагнитных полей.

Согласно теории относительности, масса представляет собой особую форму энергии, о чем и свидетельствует известная формула Эйнштейна $E = mc^2$. Из нее следует возможность преобразования массы в энергию и энергии в массу. И такие реакции на внутриатомном уровне вещества реально имеют место. В частности, часть массы атомного ядра может превращаться в энергию, и происходит это двумя путями. Во-первых, крупное ядро может распасться на несколько мелких — такой процесс называется реакцией *распада*. Во-вторых, несколько более мелких ядер могут объединиться в одно более крупное — это так называемая реакция *синтеза*. Реакции ядерного синтеза во Вселенной распространены очень широко — достаточно упомянуть, что именно из них черпают энергию звезды. Ядерный распад сегодня служит одним из основных источников энергии для человечества — он используется на атомных электростанциях. И при реакции распада, и при реакции синтеза совокупная масса продуктов реакции меньше совокупной массы реагентов. Эта-то разница в массе и преобразуется в энергию по формуле $E = mc^2$.

Рекомендуемая литература:

1. Кожевников Н.М. Концепции современного естествознания.
2. Айзек Азимов. Путеводитель по науке: От египетских пирамид до космических станций.
3. Ричард Фейнман. Характер физических законов.
4. Джеймс Трейфил. 200 законов мироздания.
5. Радиоактивность вокруг нас. Кто открыл дверь в ядерный век? <http://www.enintech.ru/materials/articles/06-305.html>

Современная естественнонаучная картина мира. Лекция 5.
Подымов Л.И. УВАУ ГА (И). 2014
podymovl.narod.ru