

Лекция 1. Современная физика – основа научного мировоззрения. Открытие электрона. Модели атома

1 Современная физика – основа научного мировоззрения на строение и движение материального мира

Наиболее фундаментальной частью знаний, их ядром является мировоззрение, то есть количественное представление о том, как устроен окружающий нас мир, каковы его структура, устойчивые (долгоживущие, стационарные) состояния и как происходит движение. Под движением в физике понимают изменение состояний во времени – эволюцию. Знание структуры и законов движения природы и общества и есть мировоззрение. Иметь научное мировоззрение чрезвычайно важно для человека. Во-первых, наиболее общие законы едины для природы и общества. Во-вторых, они объективны и в значительной мере не зависят от воли людей. Если человек соотносит свою деятельность с объективными законами, он может рассчитывать на успех. Длительная деятельность вопреки объективным законам неизбежно заканчивается крахом.

Почему мы считаем, что из всех разделов современной науки о природе – естествознания именно физика является основой научного мировоззрения на структуру, устойчивость и движение (эволюцию) материального мира? Так сложилось исторически разделение предметов исследования различных наук. Окружающий нас материальный мир имеет **иерархическую** структуру подобно вооруженным силам всех стран: из простых объектов складываются более сложные, из них – еще более сложные и т.д. У каждого раздела естествознания имеется наименьший, базовый элемент. Из этих элементов строятся более сложные объекты.

Ниже в таблице 1.1 названы основные разделы естествознания и их базовые элементы.

Таблица 1.1

Основные разделы естествознания и их базовые элементы

Раздел естествознания	Базовый элемент
1 Медицина	Клетка
2 Зоология	Клетка
3 Ботаника	Клетка
4 Молекулярная биология	Большие биологические молекулы, включая ДНК и РНК
5 Химия	Молекулы, включая одноатомные
6 Физика	Атомы, ядра, элементарные частицы, фундаментальные частицы вещества и квантованных полей

Таково разделение труда внутри естествознания. Двигаясь вглубь строения материи, медицина, зоология и ботаника доходят до клетки; молекулярная биология – до крупных биологических молекул, включая ДНК (дезоксирибонуклеиновая кислота) и РНК (рибонуклеиновая кислота), которые являются носителями наследственной генетической информации; химия – до молекул и атомов, из которых состоят молекулы. А дальше физика

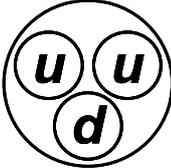
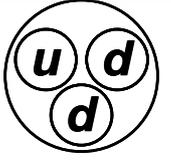
остается в одиночестве, изучая структуру атомов, ядер, элементарных и, наконец, фундаментальных частиц вещества, которые сегодня считаются простейшими и неделимыми, а также частиц квантованных полей, которые обеспечивают взаимодействие между частицами вещества.

Несомненным достижением современной физики являются ясные представления о иерархической структуре **устойчивого** вещества от простейших фундаментальных частиц до Вселенной. Устойчивое вещество построено всего из трех фундаментальных частиц: двух кварков – *u*, *d* и электрона *e*.

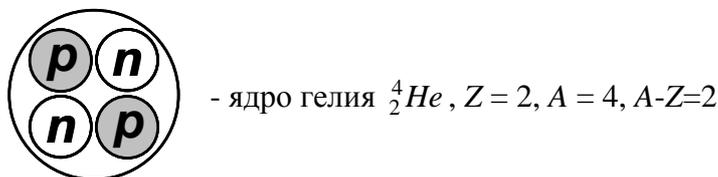
Первая ступень иерархической структуры вещества – фундаментальные частицы:

			
Название	<i>u</i> -кварк	<i>d</i> -кварк	электрон
Электрический заряд в единицах $ e $	+2/3	-1/3	-1

Вторая ступень иерархической структуры вещества – частицы, состоящие из кварков, в частности, нуклоны:

		
Название	$p = u u d$ – протон	$n = u d d$ – нейтрон
Электрический заряд в единицах $ e $	+1	0

Третья ступень иерархической структуры вещества – ядра, состоят из нуклонов – нейтронов и протонов. Примеры. Ядра: гелия ${}^4_2\text{He}$, углерода ${}^{12}_6\text{C}$, урана ${}^{238}_{92}\text{U}$. Верхний индекс *A* – число нуклонов, нижний индекс *Z* – число протонов, (*A* - *Z*) – число нейтронов.

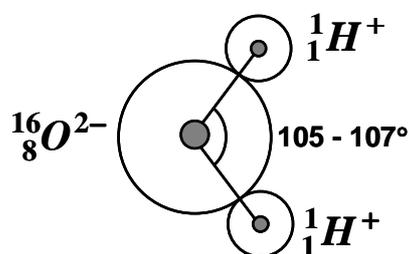


Четвертая ступень иерархической структуры вещества – атомы. Состоят из ядер и электронов.



Верхний правый индекс дает суммарный заряд атома Q_a . Разность $(Z - Q_a)$ – число электронов в атоме (ионе). Например, ${}^4_2\text{He}^{1+}$ содержит $2 - 1 = 1$ электрон, это однозарядный ион гелия. Ион кислорода ${}^{16}_8\text{O}^{2-}$ содержит $8 - (-2) = 10$ электронов.

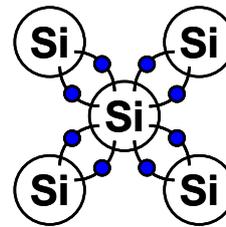
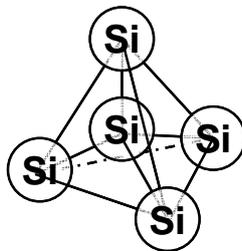
Пятая ступень иерархической структуры вещества – молекулы. Состоят из атомов. Пример: молекула воды H_2O



Шестая ступень иерархической структуры вещества – газы. Состоят из молекул, в том числе одноатомных. Пример: земная атмосфера, которой мы дышим. Состоит из молекул N_2 , O_2 , H_2O , CO_2 и других.

Седьмая ступень иерархической структуры – конденсированные вещества. К ним относятся жидкости и твердые тела, которые являются плотными упаковками молекул. Например, вода – плотная упаковка молекул H_2O . Медь – плотная упаковка одноатомных молекул или просто атомов Cu . **Конденсированные вещества бывают двух главных типов – упорядоченные и неупорядоченные.** Упорядоченные вещества называют кристаллами. Бывают жидкие и твердые кристаллы. В кристаллах ядра атомов и молекул расположены в строгом геометрическом порядке, который распространяется по всему объему. В неупорядоченных веществах такого дальнего порядка в расположении ядер атомов нет. **Например, из молекул SiO_2 – двуокиси кремния состоит кристалл кварца (упорядоченное вещество) и кварцевое стекло (неупорядоченное вещество).** Вода – неупорядоченное жидкое вещество. Но есть жидкие кристаллы. Некоторые из них широко используют в жидкокристаллических экранах: мониторах компьютеров, телевизоров и т.д.

В качестве примера рассмотрим структуру кристалла кремния Si , который является абсолютным рекордсменом среди материалов по масштабам применения в микроэлектронике. Элементарная ячейка кристалла Si представляет собой тетраэдр, все четыре грани которого – правильные треугольники. В вершинах тетраэдра и в его центре расположено по одному атому Si . Таким образом центральный атом имеет четыре ближайших соседа, с которыми устанавливает ковалентную химическую связь путем обмена электронами.



Восьмая ступень иерархической структуры вещества – объекты астрофизики. К ним относятся метеориты, астероиды, планеты, звезды, галактики, скопления галактик и другие.

Таковы восемь основных ступеней иерархической структуры вещества. Они кратко перечисляются еще раз в итоговой таблице 1.2.

Таблица 1.2

Иерархическая структура устойчивого вещества

Ступень (уровень) иерархии	Название объектов	Примеры
1	Фундаментальные частицы: кварки u , d и электрон e	u -кварк, d -кварк, электрон
2	Элементарные частицы, состоящие из кварков – нуклоны	протон $p = u u d$, нейтрон $n = u d d$
3	Ядра атомов: A – число нуклонов, Z – протонов, $(A - Z)$ - нейтронов	${}^{12}_6\text{C}$, ${}^{238}_{92}\text{U}$
4	Атомы (ионы): ядро плюс электроны	${}^4_2\text{He}^0$, ${}^4_2\text{He}^{1+}$, ${}^{16}_8\text{O}^{2-}$
5	Молекулы: состоят из атомов	N_2 , O_2 , H_2O , CO_2
6	Газ молекул	Атмосфера
7	Конденсированные вещества – жидкости и твердые тела	Вода, жидкие кристаллы, металлы, полупроводники
8	Объекты астрофизики	Планеты, звезды, галактики

2 Современная физика – основа научно-технического прогресса

Сегодня, в начале 21 века, можно назвать огромное число достижений человечества, которые достойны восхищения. Попробуйте вспомнить известные Вам достижения архитектуры и строительства, сельского хозяйства, медицины и технологии производства товаров. Если раньше в 19 веке и начале 20 века технические и технологические новинки были плодами изобретательности и умелых рук, то в наше время технические и технологические достижения – прямой результат научных открытий. Они рождаются в экспериментальных лабораториях и теоретических исследованиях. Именно поэтому передовые фирмы по производству товаров и услуг, стремясь победить в конкурентной борьбе, выделяют большие средства на научные исследования. К самым высоким достижениям в области техники и технологии можно причислить освоение космоса, создание ядерной энергетики, изобретение и производство лазеров, расшифровку генома человека. Но наивысшим из всех считается создание микроэлектроники,

оптоэлектроники, наноэлектроники, и на их основе – компьютерной техники, которая полностью преобразила нашу жизнь и прогрессирует самыми высокими темпами. Какова же история создания современных компьютеров? Отправной точкой считаются 1925 – 1930 гг, когда была создана **квантовая механика** – один из разделов современной теоретической физики. Эксперты всего мира, отвечая на вопрос: какой из разделов науки принес наивысшую **практическую** пользу человечеству, поставили на первое место (и с большим отрывом от других) именно этот раздел, а более конкретно: квантовое уравнение Шредингера, решение которого дает стационарные (устойчивые) состояния электрона в атомах, молекулах, твердых телах и жидкостях. Великий австрийский физик Эрвин Шредингер опубликовал свое знаменитое уравнение в 1926 г. Алгоритм Шредингера, основанный на решении его уравнения, позволяет найти характеристики стационарных состояний электронов в различных физических системах. Стационарным (долгоживущим, устойчивым) состоянием называется ситуация, в которой энергия электрона сохраняется: время бежит, а энергия остается постоянной (рис. 1).

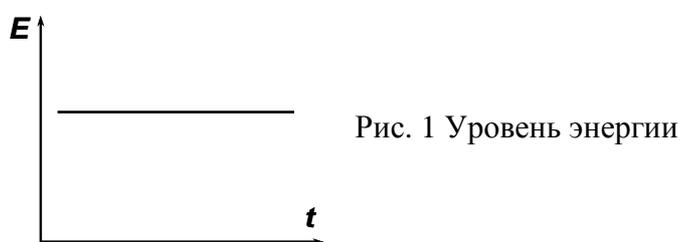


Рис. 1 Уровень энергии

Поэтому ее называют «уровнем энергии». Используя уравнение Шредингера, вначале нашли уровни энергии электрона в атоме, затем в молекуле и в кристалле. Оказалось, что энергетический спектр (множество энергий стационарных состояний) электрона в атоме является дискретным, то есть состоит из отдельных уровней. В молекуле эти уровни расщепляются на два, три и больше из-за взаимодействия электрона с несколькими атомами. А энергетический спектр электрона в кристалле оказался зонным. Он состоит из интервалов энергии двух типов – разрешенных и запрещенных зон. Разрешенные зоны покрыты огромным числом близко расположенных уровней, разделенных микроскопическими интервалами ($10^{-22} \dots 10^{-19}$ эВ), а в запрещенных – нет уровней (рис. 2).

Зонный спектр является важнейшей характеристикой электронных свойств твердых тел и жидкостей. Для объяснения и вычисления проводимости твердых тел особенно важны **верхние** три зоны. Сверху вниз: зона проводимости, запрещенная зона и валентная зона.



Рис. 2 Энергетический спектр электрона в атоме, молекуле и кристалле

Следующий важный вопрос: как электроны твердого тела заполняют спектр? Два основных принципа управляют этим процессом: принцип минимума энергии и принцип Паули.

Согласно первому электроны стремятся занять самый нижний из возможных уровней в основном состоянии твердого тела. Однако согласно второму в одном квантовом состоянии может быть не больше одного электрона, то есть среднее число заполнения принимает значение: $\langle \eta \rangle = 0 \dots 1$. Так как число уровней неограниченно, а число электронов конечно, то весь спектр разделяется на две части – **нижнюю**, где все уровни заняты и число заполнения каждого квантового состояния $\langle \eta \rangle = 1$, и **верхнюю**, где все уровни свободны и $\langle \eta \rangle = 0$. Их естественно разделяет уровень, для которого среднее число заполнения $\langle \eta \rangle = 1/2$. Его называют «уровень Ферми» в честь великого итальянского физика 20 века – Энрико Ферми. Открытие зонной структуры электронного спектра твердого тела позволило сразу многое объяснить и многое предсказать. Очень просто объяснилось гигантское различие электропроводности разных классов твердых тел. Электропроводность металлов $10^7 \dots 10^8 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$. А электропроводность диэлектриков $10^{-13} \dots 10^{-16} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$. Прямо перед Вами, например на авторучке, физическая величина изменяется астрономически, в $10^{20} \dots 10^{24}$ раз. Как это объяснить? Возможны два случая – уровень Ферми попадает в разрешенную или запрещенную зону. В первом случае, твердое тело или жидкость – металл (рис. 3). А эта зона называется **зоной проводимости металла**. Самого незначительного электрического поля достаточно, чтобы перевести электроны вверх с уровня Ферми на ближайший незанятый, и он свободно побежит по металлу. Огромное число свободных электронов обеспечивает металлу огромную электропроводность. Во втором случае твердое тело – диэлектрик или полупроводник (рис. 4). При температуре абсолютного нуля это изоляторы. Валентная зона полностью заполнена, все состояния заняты и электрон не может перемещаться. А зона проводимости пуста. Но с ростом температуры появляется вероятность, что электрон из валентной зоны перейдет в зону проводимости. И тогда сразу появляются два типа подвижных носителей заряда – электроны зоны проводимости и дырки валентной зоны.

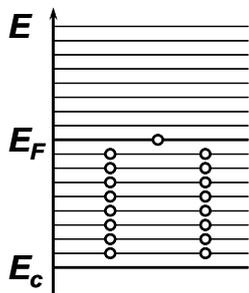


Рис. 3 Зона проводимости металла: E_c – дно зоны, E_F – уровень Ферми

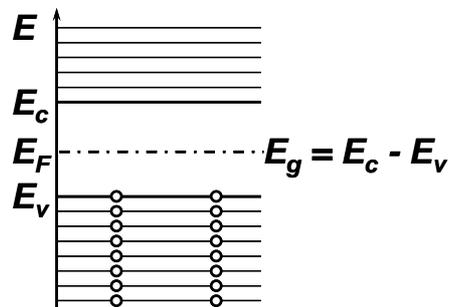


Рис. 4 Валентная, запрещенная и зона проводимости диэлектрика и полупроводника. E_c – дно зоны проводимости, E_v – потолок валентной зоны, E_F – уровень Ферми, E_g – ширина запрещенной зоны

Зонная структура спектра позволила предсказать, как изготовить электронный полупроводник (*n*-типа), в котором ток переносят только отрицательно заряженные (negative)

электроны зоны проводимости, и как изготовить дырочный полупроводник (*p*-типа), в котором ток переносят только положительно заряженные (positive) дырки. Если в кристалл кремния Si, состоящий из четырехвалентных атомов, заменить часть атомов Si на пятивалентные атомы фосфора P, то они создают в запрещенной зоне **донорные уровни** вблизи зоны проводимости. Уже при средних температурах 200...300 К пятый «лишний» электрон P уйдет вверх в зону проводимости и получится полупроводник *n*-типа. Если в кристалле кремния заменить часть атомов Si на трехвалентные атомы Al, то они создадут в запрещенной зоне **акцепторные уровни** вблизи потолка валентной зоны. При тех же температурах электрон валентной зоны будет захвачен атомом Al, в зоне появится дырка и получится полупроводник *p*-типа. Если соединить полупроводники *n* и *p* – типа, то получим *n-p* или *p-n* переход, который выполняет функции выпрямителя тока, светодиода, детектора и т.д. А если соединить два таких перехода, то получается транзистор *n-p-n* или *p-n-p* – типа, который способен выполнять множество операций по преобразованию электрических сигналов. Транзисторы были изобретены и изготовлены в 1946 г. в США, и три американских физика: Шокли, Бардин и Браттейн удостоены Нобелевской премии за это открытие.

Схема современного, так называемого «полевого» МОП-транзистора (металл-окисел-полупроводник) показана на рис. 5. Найдите по литературе описание принципа его действия. Сегодня это один из массовых элементов больших интегральных схем, которые являются основой компьютерной техники.

Такова история возникновения компьютерной техники от уравнения Шредингера до современной электроники.



Рис. 5 Устройство МОП-транзистора

3 Открытие электрона и ядра

Идея о том, что окружающий нас материальный мир имеет мелкозернистую структуру и состоит из невидимых глазом устойчивых малых частичек, возникла очень давно, в глубокой древности, возможно в Китае, Индии или другой человеческой цивилизации. Первое описание этой идеи, дошедшее до нас, дал древнеримский поэт Лукреций Кар в своей знаменитой поэме «О природе вещей». Авторами гипотезы об атомном строении вещества являются древнегреческие философы Левкипп и Демокрит. Именно Демокрит ввел термин $\alpha\tau\omicron\mu\alpha$ (атом), что в переводе с древнегреческого означает «неделимый». Сущность идеи в том, что число различных атомов невелико, а их всевозможные сочетания обеспечивают гигантское разнообразие мира, в котором

мы живем. Сегодня теория атомного строения вещества причислена к важнейшим достижениям земной цивилизации. В своем развитии и становлении эта теория прошла долгий и непростой путь. Экспериментальное доказательство реального существования атомов было получено только в начале 20 века. А эксперименты по прямому наблюдению атомов были выполнены во второй половине 20 века. Сегодня в распоряжении ученых имеются приборы, например, туннельный электронный микроскоп, которые позволяют наблюдать атомы с разрешением $0,1 \text{ \AA}$ ($1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ м}$) и видеть не только отдельные атомы, диаметры которых $1 \dots 6 \text{ \AA}$, но и их внутреннюю оболочечную структуру. Принцип действия туннельных микроскопов будет рассмотрен в дальнейшем.

Следует отметить относительность понятия «неделимый». В предыдущих лекциях по ядерной физике рассмотрено понятие энергии связи ($E_{\text{св}}$) сложной структуры, состоящей из более простых, базисных элементов. Для ядер это нуклоны – протоны и нейтроны. Энергия связи ($E_{\text{св}}$) ядра равна минимальной работе, которую надо совершить, чтобы разделить его на базисные единицы – нуклоны. Понятие энергии связи переносится на все сложные структуры, которые всегда подвергаются внешним воздействиям – ударам. Если энергия удара больше энергии связи на один базисный элемент: $E_{\text{удара}} > E_{\text{св}}/N$, где N – число базисных элементов, то сложная система будет разделена, от нее отделиться один базисный элемент, например, из ядра выбит один нуклон, и т.д. Если $E_{\text{удара}} < E_{\text{св}}/N$, то вся сложная система является устойчивой, неделимой. На рис. 1 приведена диаграмма неделимости, устойчивости различных объектов в зависимости от энергии удара.

При энергиях удара меньше 10^{24} эВ неделимыми (бесструктурными, устойчивыми) являются фундаментальные фермионы и антифермионы – кварки и лептоны, антикварки и антилептоны. Достижение энергии удара больше 10^{24} эВ в прямых экспериментах – нереальная, фантастическая задача для ускорительной техники в земных условиях. Но если бы удалось хотя бы косвенно исследовать кварки и лептоны при энергиях больше 10^{24} эВ, то возможно они оказались бы состоящими из субкварков, или партонов (от английского слова *part* – часть целого). Это одна из проблем современной физики.

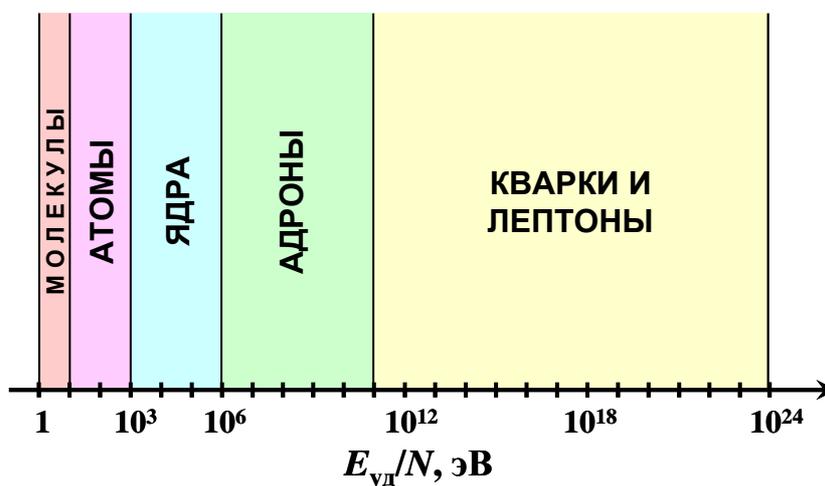


Рис. 1 Неделимость различных объектов иерархической структуры материи в зависимости от удельной энергии удара ($E_{уд}/N$), представленной в логарифмической шкале

Интервал $10^{11} \dots 10^{24}$ эВ энергий удара называют большой пустыней. При энергии удара меньше 10^{11} эВ неделимыми оказываются адроны, состоящие из кварков.

При энергиях удара меньше удельной энергии связи ядра на нуклон $E_{св}/A \approx 10^6$ эВ устойчивыми и неделимыми оказываются ядра атомов. Здесь $N = A$ (числу нуклонов).

При энергии удара меньше энергии связи электрона в атоме ($10 \dots 10^5$ эВ) неделимыми становятся атомы.

Наконец, при энергии удара меньше энергии связи атомов в молекуле ($1 \dots 10$ эВ) неделимыми становятся молекулы.

4 Структура атомов

Атом состоит из ядра и заряженных лептонов: e , μ , τ , где e – электрон, μ – мюон, τ – таон. Ядро заряжено положительно $Q_{яд} = +Z|e|$, где Z – число протонов. Каждый из лептонов e , μ , τ несет отрицательный заряд, равный $(-|e|)$. Атомы обозначаются так же, как их ядра. Добавляется правый верхний показатель ζ , который дает результирующий заряд атома в $|e|$. Число лептонов в атоме равно $(Z - \zeta)$. Например, ${}^4_2\text{He}^0$ имеет число электронов: $2 - 0 = 2$; ${}^{16}_8\text{O}^{2-}$ имеет $8 - (-2) = 10$ электронов. Если $\zeta = 0$, то имеем нейтральный атом. Если $\zeta \neq 0$, то имеем ион. Соответственно трем видам фундаментальных заряженных лептонов различают электронные, мюонные и таонные атомы. Устойчивое вещество состоит из электронных атомов, так как время жизни электрона бесконечно. Время жизни мюона $2 \cdot 10^{-6}$ с, а время жизни таона порядка 10^{-13} с. Чем массивнее частица, тем менее она устойчива: запас энергии покоя m_0c^2 позволяет ей превращаться в более легкие частицы.

5 Открытие электрона

Идею о том, что существует «атом электричества» (неделимое количество заряда), высказывали в 19 веке различные ученые. Но экспериментальное доказательство этого, а самое главное, определение величины кванта электрического заряда $|e|$ было сделано в 70 – 80-годах 19 века, когда соединили, во-первых, законы электролиза, которые экспериментально открыл великий английский физик Майкл Фарадей в 1830-х годах, и, во-вторых, атомную гипотезу строения вещества.

Электролиз – процесс разделения (разложения) вещества под действием электрического поля. Схема опытов Фарадея показана на рис. 2.

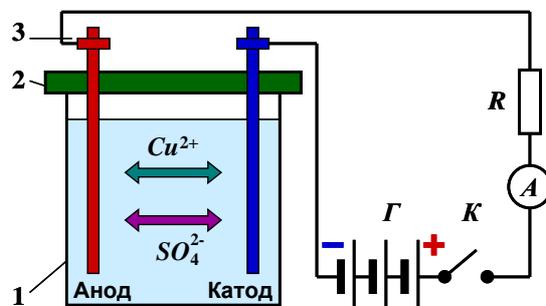


Рис. 2 Схема опытов Фарадея по электролизу водных растворов солей: 1 – стеклянный стакан с раствором соли (электролитом); 2 – диэлектрическая крышка; 3 – клеммы для соединения медных электродов, погруженных в электролит, со внешней электрической цепью, элементами которой являются: Γ – гальваническая батарея, K – ключ (коммутатор), A – амперметр, R – нагрузочное сопротивление для защиты от короткого замыкания

Электрод, на который подан положительный потенциал, называют **анодом**, а отрицательный – **катодом**. Вода – сильнейший растворитель солей, кислот и щелочей благодаря тому, что молекула воды есть диполь. Диполь – это нейтральная структура (атом, молекула), у которой центры симметрии положительного и отрицательного зарядов (полюса) разнесены в пространстве:

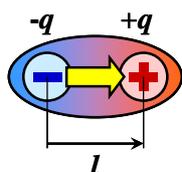


Рис. 3 Схематическое изображение диполя: l – плечо диполя – вектор, направленный из центра отрицательного заряда ($-q$) в центр положительного ($+q$); $|l|$ – расстояние между центрами зарядов (полюсами); $p_e = ql$ – электрический (дипольный) момент

Когда молекула соли, например, медного купороса $CuSO_4$, погружается в воду, полярные молекулы H_2O (диполи) обволакивают ее с двух сторон, притягиваясь к Cu^{2+} отрицательными полюсами, а к SO_4^{2-} – положительными полюсами, и таким образом разделяют молекулу $CuSO_4$ на ионы Cu^{2+} и SO_4^{2-} , окутанные «шубами» из дипольных молекул воды. Этот процесс называется гидратацией, а в общем случае, сольватацией. Ионы, окутанные шубой из диполей, называют гидратами, если диполи – молекулы воды, или сольватами в общем случае (рис. 4).



Рис. 4 Сольватированные ионы в водном растворе медного купороса $CuSO_4$

В электролитах подвижными носителями заряда являются сольваты. Они переносят электрический ток в жидкостях. Положительные ионы называют катионами, так как они перемещаются в сторону катода, а отрицательные – анионами.

Вернемся к опытам Фарадея по электролизу. Вначале медную пластину, которая служит катодом, высушивают, зачищают наждачной бумагой до металлического блеска, взвешивают и

определяют начальную массу m_0 . Затем устанавливают катод, ключом К замыкают цепь и включают секундомер. Измеряют ток I амперметром и время t его протекания через электролит секундомером. После размыкания цепи катод извлекают из раствора, высушивают, взвешивают и определяют конечную массу m_t . Масса меди, выделившаяся на катоде за время опыта

$$m = m_t - m_0.$$

Первый закон Фарадея: масса выделившегося вещества в результате электролиза прямо пропорциональна количеству электричества, протекшему через электролит:

$$m = k I t \equiv k Q, \quad (1)$$

где $Q = I t$. Первый закон представлен графически на рис. 5.

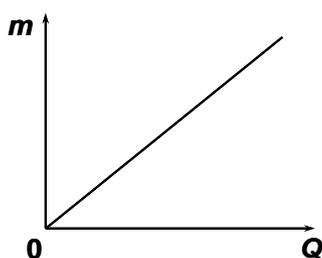


Рис. 5 Первый закон Фарадея для электролиза: масса вещества, выделившегося из электролита на электрод, пропорциональна заряду, протекшему через электролит за время электролиза

Второй закон Фарадея. Проведя огромное число опытов с различными электролитами, Фарадей выразил коэффициент k через характеристики вещества и константы:

$$k = \frac{\mu}{z F}, \quad (2)$$

где μ - моль вещества, например, $\mu_{Cu} = 64$ г/моль, $z = 1, 2, 3, \dots$ - целое безразмерное число, F - постоянная Фарадея, универсальная для всех электролитов, то есть для всех веществ:

$$F \approx 96450 \text{ Кл/г-эквив.}$$

Если через электролит пропустить заряд, равный F , то на электрод выделится μ/z граммов вещества и эту величину называют грамм-эквивалентом. С другой стороны, чтобы выделить моль вещества, необходимо пропустить через электролит заряд равный zF . Ниже мы увидим, что z заряд иона в единицах $\pm|e|$. Для Cu^{2+} , $z = 2$ и 1 г-эквив. = $(64/2)$ г = 32 г. Оба закона Фарадея можно объединить одной формулой:

$$m = \frac{\mu}{z F} Q. \quad (3)$$

Теперь соединим атомную гипотезу с законами электролиза Фарадея. Вещество состоит из атомов. Массу выделившегося вещества можно представить

$$m = N m_a, \quad (4)$$

где m_a - масса атома (иона). Моль можно представить

$$\mu = N_A m_a, \quad (5)$$

где $N_A = 6,022 \cdot 10^{23}$ (моль)⁻¹ - число Авогадро. Подставим в закон электролиза (3) и получим

$$N = \frac{N_A}{z F} Q.$$

Теперь найдем заряд, который переносит каждый ион

$$q_i = \frac{Q}{N} = z \frac{F}{N_A}. \quad (6)$$

Это главный результат: заряд иона кратен некоторому **универсальному кванту электричества** $|e|$, равному

$$|e| = \frac{F}{N_A}, \quad (7)$$

F , N_A – **универсальные постоянные, не зависящие от вида атомов**. Подставляем числа и находим

$$|e| = \frac{96450}{6,022 \cdot 10^{23}} \approx 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл.}$$

Основной вывод: существует универсальная частица, которая входит в структуру всех без исключения атомов и является носителем наименьшего количества (кванта) заряда. Поэтому заряды ионов кратны $|e|$

$$q_i = \pm z |e|.$$

Вывод о том, что из совокупности законов электролиза Фарадея и атомной гипотезы следует существование элементарного заряда (кванта электричества) впервые сделали английский физик Дж. Стони в 1874 - 1881 г. и немецкий физик Г. Гельмгольц в 1881 г., который так сформулировал результат: «Если применить атомистическую гипотезу к электрическим процессам, то она в соединении с законом Фарадея приводит к поразительным следствиям. Если мы допускаем существование химических атомов, то мы вынуждены заключить, что и электричество разделяется на определенные элементарные количества, которые играют роль атомов электричества». Несколько позднее в 1891 г. Дж. Стони предложил термин «электрон» для обозначения элементарного заряда.

6 Открытие электрона как частицы

Открытию электрона как частицы предшествовало изобретение катодной пушки во второй половине 19 века. Работа катодной пушки основана на явлении термоэлектронной эмиссии: электроны вылетают из вещества под действием тепловых флуктуаций энергии. Рассмотрим термоэлектронную эмиссию из металла. На рис. 6 схематично показано распределение электронов по энергетическим уровням зоны проводимости металла (Распределение Ферми-Дирака).

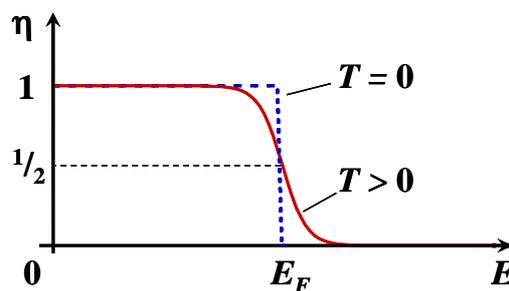


Рис. 6 Вероятность (η) заполнения энергетического уровня (E) электроном

Уровень, вероятность заполнения которого равна $1/2$, называется энергией (уровнем) Ферми (E_F). Ниже E_F все уровни заполнены с вероятностью $\eta > 1/2$, а выше с вероятностью $\eta < 1/2$. При температуре абсолютного нуля E_F является резкой границей, отделяющей нижние полностью заполненные уровни ($\eta = 1$) от верхних пустых уровней ($\eta = 0$). Но с ростом температуры электроны могут приобретать дополнительную энергию в результате тепловых флуктуаций и вероятность того, что электрон имеет энергию E равна

$$\eta = \frac{1}{e^{(E-E_F)/kT} + 1}. \quad (8)$$

Эта формула называется распределением Ферми-Дирака. Внутри металла электроны зоны проводимости свободны.

Но чтобы выйти в вакуум они должны преодолеть барьер, то есть иметь энергию $E > E_F + A_{\text{вых}}$, где $A_{\text{вых}}$ – известная работа выхода электронов из металла.

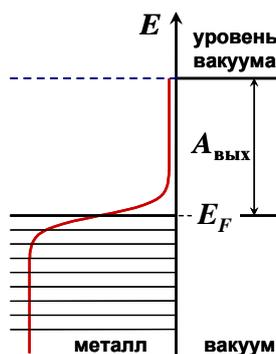


Рис. 7 К вычислению вероятности выхода электрона из металла в вакуум поверх барьера

Практически всегда $A_{\text{вых}} \gg kT$, и из формулы (8) получаем вероятность того, что энергия электрона $E > E_F + A_{\text{вых}}$

$$\eta_{\text{вых}} = e^{-A_{\text{вых}}/kT}. \quad (9)$$

Из этой простой формулы видно, что вероятность выхода электрона из металла в вакуум за счет тепловых флуктуаций энергии растет очень быстро с температурой. Поэтому сильно нагретый металл становится **термокатодом** – источником электронов.

Устройство термокатодной пушки схематично показано на рис. 8

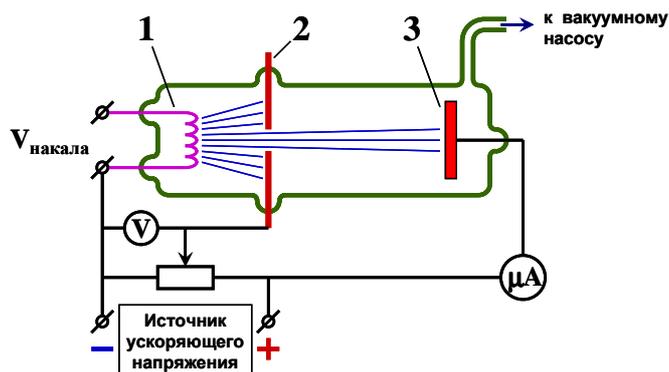


Рис. 8 Термокатодная электронная пушка: 1 – термокатод, на который подается напряжение накала $V_{\text{накала}}$; 2 – анод с коллимирующим отверстием, на анод подается ускоряющее напряжение $V_{\text{ускор.}}$, которое измеряется вольтметром V ; 3 – антикатод, приемник пучка ускоренных электронов, ток которых измеряется милли- или микроамперметром μA . Внутри ускорительной камеры поддерживается вакуум либо с помощью непрерывно работающего вакуумного насоса, либо во время откачки камера запаивается

Термокатодная электронная пушка – одно из выдающихся «вечных» достижений приборостроения. Широко используется в электронных мониторах компьютеров, телевизоров и осциллографов, электронных микроскопах, а также как инжектор (источник) электронов в ускорителях. Дж. Дж. Томсон (Joseph John Thomson) поместил катодную пушку в однородное магнитное поле. Известно, что в однородном магнитном поле, перпендикулярном вектору скорости частицы ($\mathbf{B} \perp \mathbf{v}$), она перемещается по окружности. Измерив радиус окружности R и магнитную индукцию поля B , можно найти знак заряда и удельный заряд частицы (q/m). Если известен заряд q , то определяется масса частицы m . Схема опыта Томсона представлена на рис. 9.

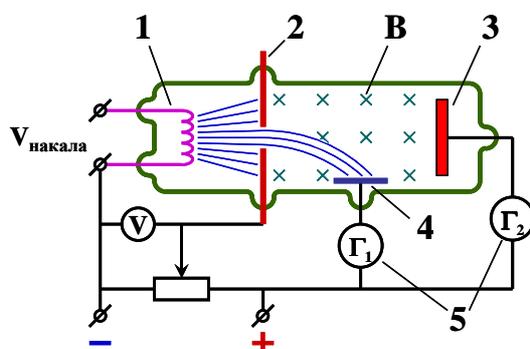


Рис. 9 Схема опыта Дж. Дж. Томсона по отклонению катодных лучей в однородном магнитном поле \mathbf{B} , перпендикулярном скорости частиц \mathbf{v} : 1 – термокатод; 2 – анод с коллимирующим отверстием; 3 – антикатод; 4 – боковой коллектор (сборщик частиц); V – вольтметр, измеряющий ускоряющее напряжение $V_{\text{ускор.}}$; $\Gamma_{1,2}$ – гальванометры, измеряющие ток антикатада и бокового коллектора, соответственно; $V_{\text{накала}}$ – напряжение, подаваемое на термокатод для его нагрева за счет джоулева тепла

Частица, вылетающая из катода, ускоряется электрическим полем в промежутке катод-анод до кинетической энергии

$$\frac{mv^2}{2} = q V_{\text{ускор.}} \quad (10)$$

В однородном магнитном поле на нее действует сила Лоренца

$$\mathbf{F} = q [\mathbf{v} \times \mathbf{B}]. \quad (11)$$

Положительно заряженные частицы должны отклоняться вверх, а отрицательно заряженные – вниз на рис. 9. Катодные лучи отклонились вниз. Следовательно, частицы заряжены отрицательно.

Так был определен знак заряда электрона: $q = -e$. Так как $\mathbf{B} \perp \mathbf{v}$, то $F = q v B$ и согласно 2-ому закону Ньютона для кругового движения

$$\frac{mv^2}{R} = q v B. \quad (12)$$

Из (10) и (12) следует

$$\frac{q}{m} = \frac{2V_{\text{ускор.}}}{R^2 B^2}, \quad (13)$$

где $V_{\text{ускор.}}$ измеряется вольтметром, R – радиус окружности определяется из геометрии опыта, магнитная индукция определяется различными методами, в частности, по углу поворота рамки с током в магнитном поле в соответствии с законом Ампера, который изучается в разделе «Электричество и магнетизм». Опыт производится в следующей последовательности. Включают источник напряжения накала $V_{\text{накала}}$. Включают источник анодного напряжения и, регулируя переменным сопротивлением, устанавливают ускоряющее напряжение $V_{\text{ускор.}}$ по вольтметру V . Вначале электромагнит выключен и магнитное поле близко к нулю $B \approx 0$. Электронный луч, не отклоняясь, попадает на антикатод 3 и наблюдается максимум тока на гальванометре Γ_2 . Включается электромагнит и, постепенно увеличивая ток в его обмотках, наращивают поле B до тех пор, пока станет максимальным ток электронного луча на боковом коллекторе 4, измеряемый гальванометром Γ_1 . В этом состоянии измеряют магнитное поле B . Современное значение массы покоя электрона

$$m_0 = 0,911 \cdot 10^{-30} \text{ кг}$$

Таким образом Дж. Дж. Томсон «взвесил» электрон в 1897 г. Через несколько лет ему была присуждена Нобелевская премия по физике за «открытие электрона». В конце 19 века уже были известны две важнейшие характеристики электрона: заряд $q = -e$ и масса покоя m_0 .

7 Электростатическая модель атома (модель Томсона)

Сразу после открытия электрона Дж. Дж. Томсон попытался представить структуру атома. Первое, на что он обратил внимание: масса электронов составляет незначительную часть, приблизительно 10^{-4} массы атома. Массу атома легко определить: $m_a = \mu/N_A$. Для меди $m_{Cu} = 64/6,022 \cdot 10^{23} \approx 10^{-22} \text{ г} = 10^{-25} \text{ кг}$, что в 10^5 раз больше массы одного электрона. Атом электронейтрален. Следовательно, практически вся масса атома принадлежит положительному заряду. Так была установлена фундаментальная асимметрия вещества по удельному заряду: отрицательный заряд **легкий**, положительный заряд **тяжелый**. Атомной физике предстояло решить проблему: **как распределен в атоме положительный заряд и вместе с ним практически вся масса**, за исключением массы электронов? Томсон предположил, что положительный заряд равномерно распределен по объему атома, то есть, внутри шара диаметром в несколько ангстрем ($1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ м}$). А точечные легкие электроны плавают в этой положительно заряженной материи. Образное название модели Томсона: «Булка с изюмом». В дальнейшем опытами Резефорда модель Томсона была опровергнута: распределение положительного заряда и массы атома оказалось совершенно другим – сосредоточенным в крошечном ядре диаметром в несколько фемтометров, вокруг которого перемещаются электроны. Там не менее, модель Томсона дает правильные порядки некоторых величин: размера атома, частоты электромагнитного

излучения атомов и др. Что же в модели Томсона правильно? **В атоме доминирует электромагнитное взаимодействие между электронами и положительным зарядом.** Этот вывод – одно из основных положений современной атомной физики.

Следует отметить, что чуть позднее Томсона французский физик Перрен в 1901 г. и японский физик Нагаока в 1904 г. предположили, что атом представляет собой крошечную Солнечную систему: электроны вращаются вокруг массивного центра подобно планетам вокруг Солнца. Они правильно угадали пространственную структуру атома. Но в то время это было чистой нищей не обоснованной фантазией, чего Томсон – один из самых профессиональных физиков конца 19 начала 20 века – не мог себе позволить. Были известны два вида фундаментальных взаимодействий – электромагнитное и гравитационное. И не было ответа на вопрос: как можно сосредоточить положительный заряд в малом объеме в центре атома вопреки огромному кулоновскому отталкиванию одноименных зарядов. Выбор Томсона соответствовал уровню знаний того времени. И неправильная модель Томсона сыграла большую роль в развитии физики. Обнаружив опытным путем ядро у атома, Резерфорд одновременно открыл могущественные, но короткодействующие ядерные силы, которые удерживают положительный заряд в ядре, так как в 10^2 раз превосходят силы кулоновского отталкивания.