



ФИЗИКА

лекция 7

МИАС ИГЭС -специалисты
Новоселова О.В.

Основы квантовой физики
Волновые свойства
микрочастиц

Переход от классической физики и квантовой связан с проблемой теплового излучения и, в частности, с вопросом распределения энергии по частотам в спектре абсолютно черного тела. Изучая тему «Квантовая природа излучения», необходимо знать гипотезу Планка о квантовании энергии осцилляторов и уяснить, что на основании формулы Планка могут быть получены законы Стефана — Больцмана и Вина.

Развитие гипотезы Планка привело к созданию представлений о квантовых свойствах света. Кванты света получили название фотонов. С позиций квантовой теории света объясняются такие явления, как фотоэффект и эффект Комптона. При изучении фотоэффекта следует знать формулу Эйнштейна и на ее основании уметь объяснить закономерности, установленные Столетовым

В итоге изучения предыдущего раздела сформировывается представление о том, что электромагнитное излучение имеет двойственную корпускулярно-волновую природу (корпускулярно-волновой дуализм). Корпускулярно-волновой дуализм является проявлением взаимосвязи двух основных форм материи: вещества и поля

Известны 4 механики: классическая или ньютоновская механика, релятивистская механика (теория относительности), квантовая механика и релятивистская квантовая механика. Первые две механики изучались в I - ой части курса физики, а сейчас переходим к изучению квантовой механики.

Квантовая механика - это механика микромира, механика движения микрочастиц в микрополях - атомах, молекулах, кристаллах. Ее можно рассматривать как основную теорию атомных явлений.

Опытные факты, на которых она основывается, отражают физические процессы, почти полностью лежащие за пределами непосредственного человеческого восприятия. Поэтому нет ничего удивительного в том, что теория содержит физические понятия, чуждые повседневному опыту. Начало создания последовательной теории атомных явлений можно отнести к 1924 г., когда Луи де Бройль предположил, что природа вещества также является двойственной

Гипотеза Луи де Бройля



Louis de Broglie
(1892—1987)

В 1923 году французский физик Луи де Бройль высказал гипотезу о том, что установленный ранее для фотонов корпускулярно-волновой дуализм присущ всем частицам – электронам, протонам, атомам и т.д., причём количественные соотношения между волновыми

и корпускулярными свойствами частиц те же, что и для фотонов. Таким образом, если частица имеет энергию E и импульс p , то с ней связана волна, частота которой $\nu = \frac{E}{h}$ и длина волны $\lambda = \frac{h}{p}$, где h – постоянная Планка. Эти волны и получили название волн де Бройля.

Связь между «корпускулярными» величинами и «волновыми»

$$p = \frac{h}{\lambda};$$

$$\lambda = \frac{h}{m \cdot v}$$

Длина волны, присущая частицам вещества называется длиной волны де Бройля; сами волны – волнами де Бройля

5.5. Волны де Бройля. Волновые свойства частиц

В результате углубления представлений о природе света выяснилось, что в оптических явлениях обнаруживается **корпускулярно-волновой дуализм света.**

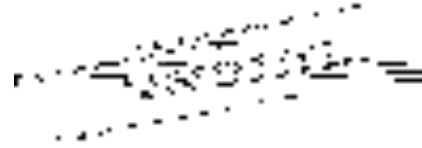
В 1924 г. Луи де Бройль выдвинул смелую гипотезу: **корпускулярно - волновой дуализм** не является особенностью одних только оптических явлений, он **имеет универсальное значение.**

Гипотеза де Бройля:

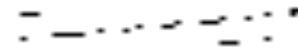
частицы вещества наряду с корпускулярными свойствами обладают свойствами волны.

Французский ученый Луи де Бройль (1892—1987), осознавая существующую в природе симметрию и развивая представления о двойственной корпускулярно-волновой природе света, выдвинул в 1923 г. гипотезу об универсальности корпускулярно-волнового дуализма. Де Бройль утверждал, что не только фотоны, но и электроны и любые другие частицы материи наряду с корпускулярными обладают также волновыми свойствами.

Итак, согласно де Бройлю, с каждым микрообъектом связываются, с одной стороны, корпускулярные характеристики — энергия E и импульс p , а с другой — волновые характеристики — частота ν и длина волны λ . Количественные соотношения, связывающие корпускулярные и волновые свойства частиц, такие же, как для фотонов



Смелость гипотезы де Бройля заключалась именно в том, что это соотношение постулировалось не только для фотонов, но и для других микрочастиц, в частности для таких, которые обладают массой покоя. Таким образом, **любой частице, обладающей импульсом, сопоставляют волновой процесс с длиной волны, определяемой по формуле де Бройля:**



Это соотношение справедливо для любой частицы с

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} = \frac{2\pi\hbar}{p}, \quad \hbar = \frac{h}{2\pi}$$

Найдем длину волны де Бройля, соответствующую движущемуся электрону. Кинетическая энергия, приобретенная электроном в ускоряющем

$$v = \sqrt{2eU/m}$$

$$\frac{mv^2}{2} = eU$$

и скорость

(учитывая, что $e=1.6 \cdot 10^{-19}$ Кл, $m=9.1 \cdot 10^{-31}$ кг, $h=6.626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с, U выражается в вольтах)

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2emU}} = \frac{1226 \cdot 10^{-9}}{\sqrt{U}} \text{ м} = \frac{12.26}{\sqrt{U}} \text{ \AA}$$

В обычных электронных приборах используют напряжение $1 \div 10^4$ В. Соответствующие длины волн летящих электронов составляют $10 \div 0.1$, т. е. изменяются в диапазоне длин волн обычных рентгеновских лучей

По гипотезе де Бройля не только фотоны , но и все "обыкновенные частицы" (электроны, протоны, нейтроны и др.) обладают волновыми свойствами, кото-рые, в частности, должны проявляться в явлениях интерференции, дифракции.

Гипотеза де Бройля вскоре была подтверждена экспериментально. Девиссон и Джермер в 1927 г. наблюдали дифракцию электронов на монокристалле никеля.

Волны де Бройля имеют специфическую квантовую природу, не

Вероятностный смысл волн де Бройля

Экспериментальное подтверждение идеи де Бройля об универсальности корпускулярно-волнового дуализма, ограниченность применения классической механики к микрообъектам, диктуемая соотношением неопределенностей, а также противоречие целого ряда экспериментов с применяемыми в начале XX в. теориями привели к новому этапу развития квантовой теории — созданию *квантовой механики, описывающей законы движения и взаимодействия микрочастиц с учетом их волновых свойств.*

Ее создание и развитие (формулировка Планком квантовой гипотезы) охватывает период с 1900 г. до 20-х годов XX в.; она связана прежде всего с работами австрийского физика Э. Шредингера (1887—1961), немецкого физика В. Гейзенберга и английского физика П. Дирака (1902—1984).

На данном этапе развития возникли новые принципиальные проблемы, в частности проблема физической природы волн де Бройля

Для выяснения этой проблемы сравним дифракцию световых волн и микрочастиц. Дифракционная картина, наблюдаемая для световых волн, характеризуется тем, что в результате наложения дифрагирующих волн друг на друга в различных точках пространства происходит усиление или ослабление амплитуды колебаний.

Согласно *волновым представлениям о природе света, интенсивность дифракционной картины пропорциональна квадрату амплитуды световой волны. $J \sim A^2$*

По представлениям *фотонной теории, интенсивность определяется числом фотонов, попадающих в данную точку дифракционной картины*. Следовательно, число фотонов в данной точке дифракционной картины задается квадратом амплитуды световой волны, в то время как для одного фотона квадрат амплитуды определяет вероятность попадания фотона в ту или иную точку.

Наличие максимумов в дифракционной картине с точки зрения волновой теории означает, что эти направления соответствуют наибольшей интенсивности волн де Бройля.

С другой стороны, интенсивность волн де Бройля оказывается больше там, где имеется большее число частиц, т. е.

интенсивность волн де Бройля в данной точке пространства определяет число частиц, попавших в эту точку.

Таким образом, дифракционная картина для микрочастиц является проявлением статистической (вероятностной) закономерности, согласно которой частицы попадают в те места, где интенсивность волн де Бройля наибольшая..

Экспериментальные подтверждения гипотезы де Бройля.

Критерием истинности любой физической теории, любой гипотезы всегда является эксперимент. Необходимость экспериментальной проверки гипотезы де Бройля была тем более актуальна, что, во-первых, эта гипотеза касалась глубинных, фундаментальных свойств материи, а во-вторых, наличие у частиц волновых свойств не соответствовало традиционным представлениям классической физики.

Первые экспериментальные исследования, подтвердившие *волновую природу частиц*, были выполнены американскими физиками *К. Дэвиссоном* и *Л. Джермером*, а также независимо английским физиком *Дж. П. Томсоном* в 1927г. В этих работах использовалась дифракция электронов на кристаллической решетке, кристалл может играть роль дифракционной решетки для электронных волн.

Опыты Девиссона и Джермера



Clinton Davisson (1881–1958),
Lester Germer (1896–1971),
George Thomson (1892–1975),
Нобелевская премия 1937
г.



Первое подтверждение гипотезы де Бройля было получено в 1927 году в опытах американских физиков К. Дэвиссона и Л. Джермера.

Пучок электронов ускорялся в электрическом поле с разностью потенциалов 100 – 150 В (энергия таких электронов соответствует длине волны де Бройля $\sim 0,1$ нм) и падал на кристалл никеля, играющий роль пространственной дифракционной решётки.

Электронный луч, отраженный от кристалла в зависимости от угла φ дает максимумы и минимумы тока электронов, попавших в детектор.

$$2d\sin\varphi = m\lambda, \quad \lambda = h / p = h / \sqrt{2meU}.$$

Идея их опытов заключалась в следующем. Если пучок электронов обладает волновыми свойствами, то можно ожидать, даже не зная механизма отражения этих волн, что их отражение от кристалла будет иметь такой же интерференционный характер, как у рентгеновских лучей.

В одной серии опытов Дэвиссона и Джермера для обнаружения дифракционных максимумов (если таковые есть) измерялись ускоряющее напряжение электронов и одновременно положение детектора D (счетчика отраженных электронов). В опыте использовался монокристалл никеля (кубической системы), сошлифованный, как показано на рисунке

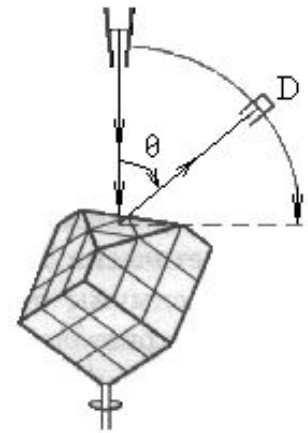


Рис 2.1

Если его повернуть вокруг вертикальной оси в положение, соответствующее рисунку, то в этом положении сошлифованная поверхность покрыта правильными рядами атомов, перпендикулярными к плоскости падения (плоскости рисунка), расстояние между которыми $d=0,215$ нм.

Детектор перемещали в плоскости падения, меняя угол θ . При угле $\theta = 50^\circ$ и ускоряющем напряжении $U=54\text{В}$ наблюдался особенно отчётливый максимум отраженных электронов, полярная диаграмма

КОТ

рис.2.2.

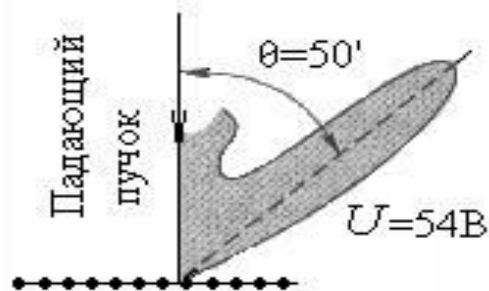


Рис 2.2



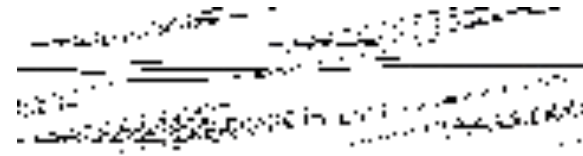
Рис 2.3

Этот максимум можно истолковать как интерференционный максимум первого порядка от плоской дифракционной решетки с периодом $d \sin\theta = m\lambda$.(2.2)

Как видно из рис.2.3. На этом рисунке каждая жирная точка представляет собой проекцию цепочки атомов, расположенных на прямой, перпендикулярной плоскости рисунка.

Период d может быть измерен независимо, например, по

Вычисленная по формуле (2.1)



дебройлевская длина волны для $U = 54\text{В}$ равна $0,167\text{ нм}$.

Соответствующая же длина волны, найденная из формулы (2.2), равна $0,165\text{ нм}$. Совпадение настолько хорошее, что полученный результат следует признать убедительным подтверждением гипотезы де Бройля.

Вскоре после опытов Дэвиссона и Джермера волновые свойства электронов были обнаружены в экспериментальных исследованиях Тартаковского в Ленинградском университете и Томпсона в Абердинском университете.

Опыты Томсона и Тартаковского



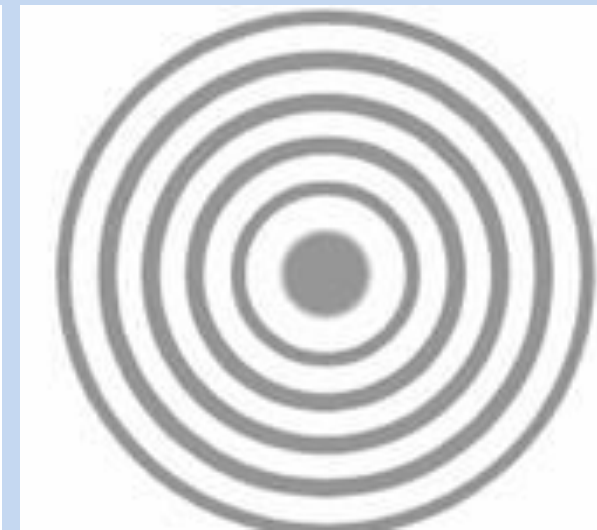
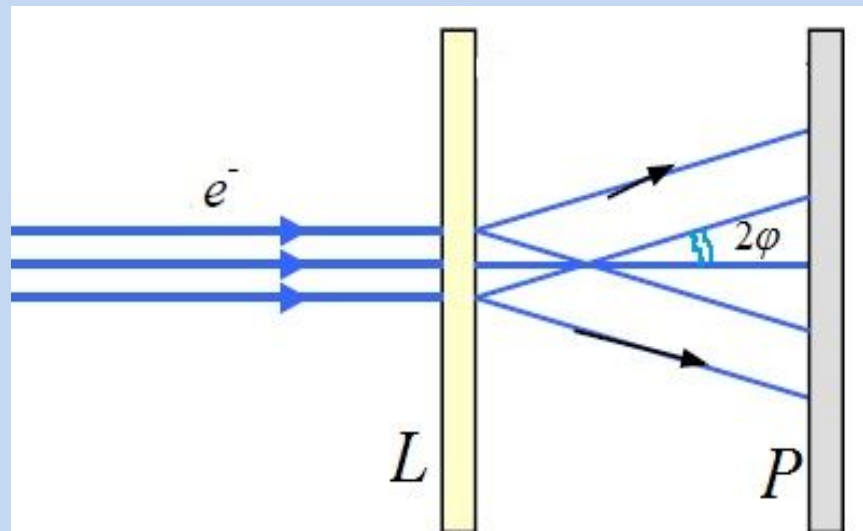
Петр Саввич Тартаковский (1895–1940)

В 1926-1927 гг. самостоятельно без соавторов ставит свои знаменитые опыты по наблюдению дифракции медленных электронов (до 1700 эВ). В 1928 г. выходит первая книга П.С. «Кванты света» а в 1932 г. вторая – «Экспериментальные основы волновой теории материи».

Джордж Томсон исследовал дифракцию быстрых электронов на тонких металлических фольгах.

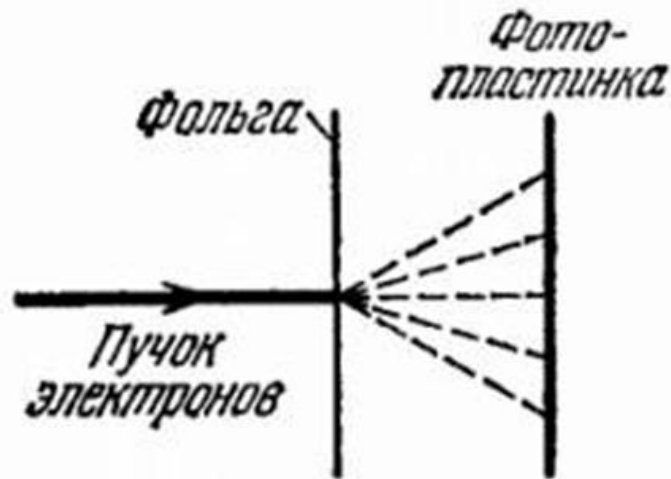


George Paget Thomson
(1892–1975)

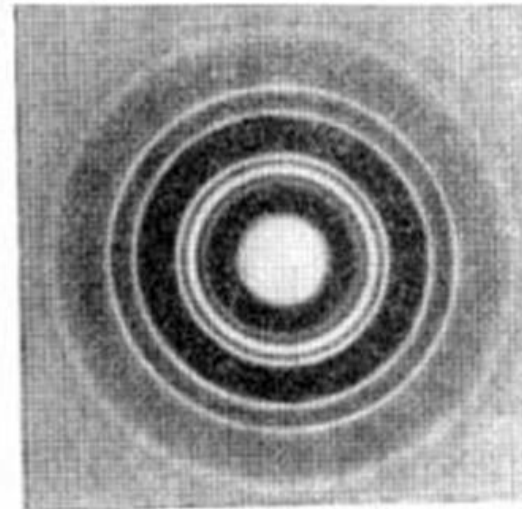


В опытах Тартаковского и Томпсона пучок электронов пропусклся через поликристаллическую фольгу (по методу Дебая при изучении дифракции рентгеновского излучения).

Как и в случае рентгеновского излучения, на фотопластинке, расположенной за фольгой, наблюдалась система дифракционных колец.



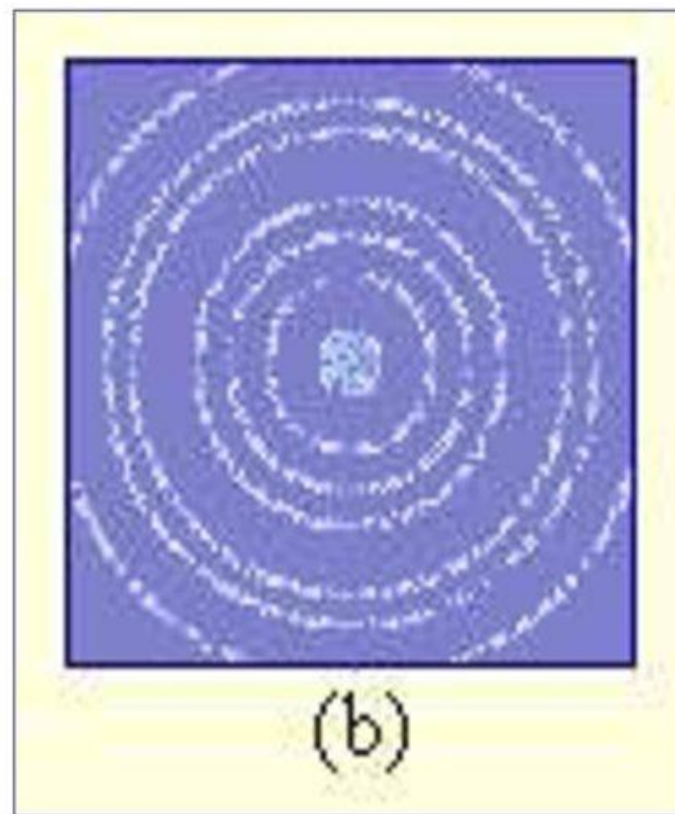
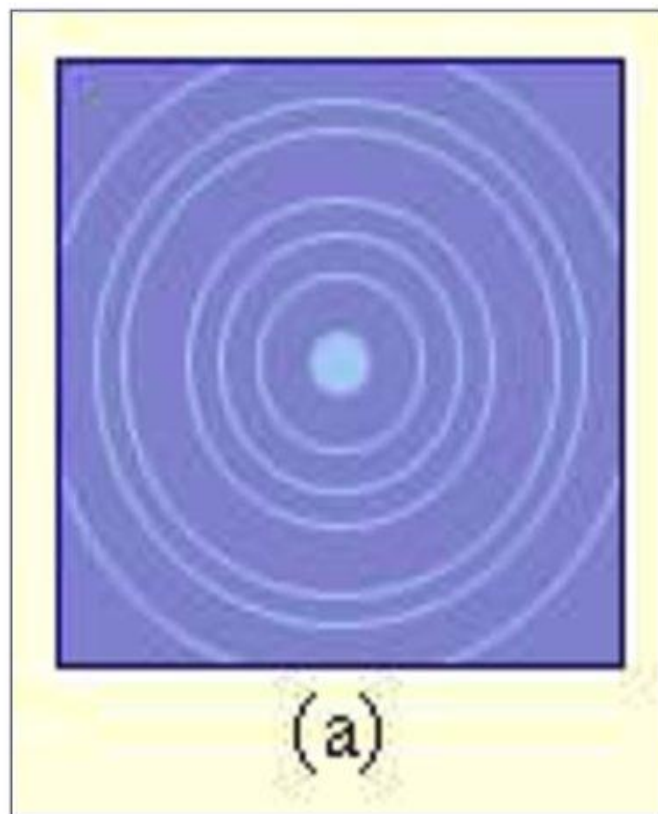
а



б

Рис. 17.4

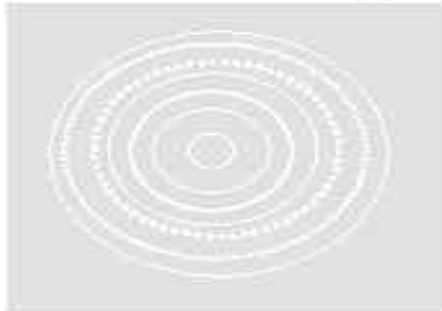
Картина дифракции электронов на поликристаллическом образце при длительной экспозиции (а) и при короткой экспозиции (б)



Опыты по дифракции более тяжелых частиц – нейтронов и молекул – на кристаллах полностью подтвердили гипотезу де Бройля.

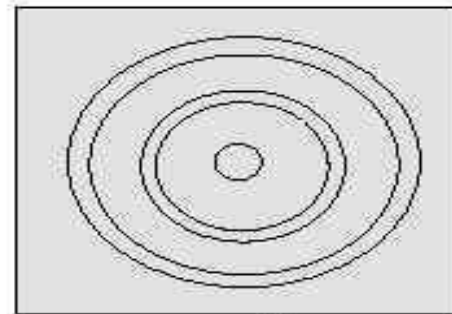
Экспериментальное подтверждение гипотезы де Бройля

- Гипотеза де Бройля получила подтверждение в опытах по дифракции пучка электронов, прошедших через тонкие металлические фольги (опыты Дэвиссона и Джермера, Томсона, П.С.Тартаковского и др.)



дифракция электронов

сравнить:



дифракция
рентгеновских лучей

Пример: электроны, прошедшие ускоряющую разность потенциалов $U = 1$ В, имеют длину волны $\lambda = 1,225$ нм

Сходство обеих картин поразительно.

Подозрение, что система этих колец порождается не электронами, а вторичным рентгеновским излучением, возникающим в результате падения электронов на фольгу, легко рассеивается, если на пути рассеянных электронов создать магнитное поле (поднести постоянный магнит). Оно не влияет на рентгеновское излучение. Такого рода проверка показала, что **интерференционная картина сразу же искажалась. Это однозначно свидетельствует, что мы имеем дело именно с электронами.**

Г. Томсон осуществил опыты с *быстрыми* электронами (десятки кэВ), П.С. Тартаковский — со сравнительно *медленными* электронами (до 1,7 кэВ).

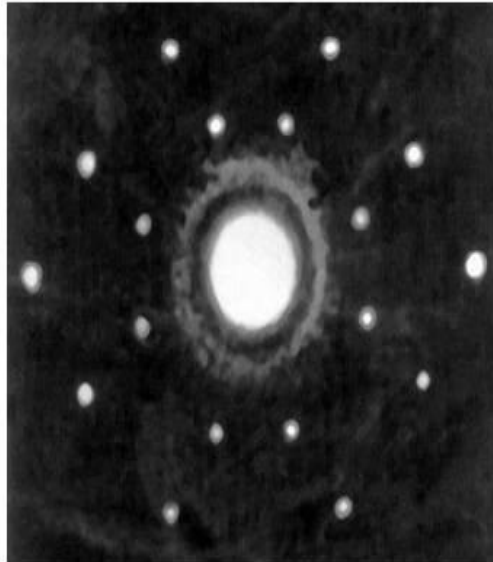
Опыты с нейтронами и молекулами

Дифракция электронов при прохождении плёнок алюминия и золота впервые исследовали

Дж. Дж. Томсон и П. С. Тартаковский. (1927 г.)

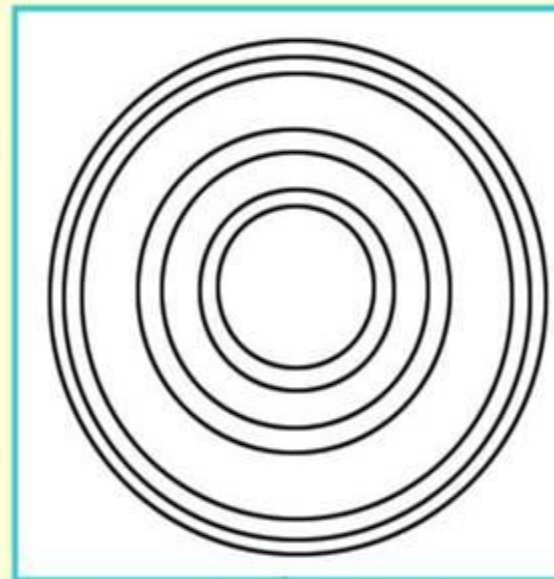
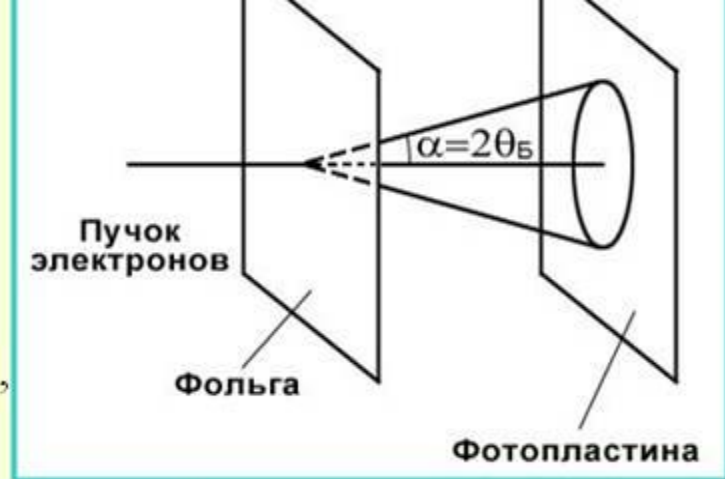
Вскоре после этого удалось наблюдать и явления дифракции атомов и молекул.

дифракция нейтронов



Для успешного наблюдения дифракции волн на кристаллах необходимо, чтобы длина волны этих волн была сравнима с расстояниями между узлами кристаллической решетки.

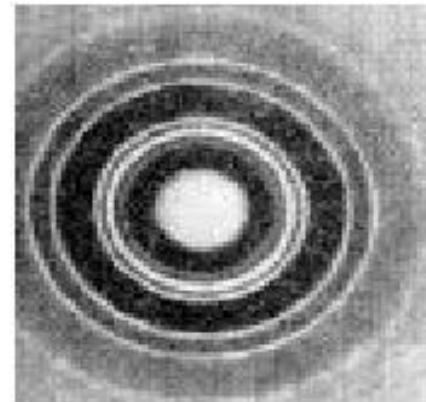
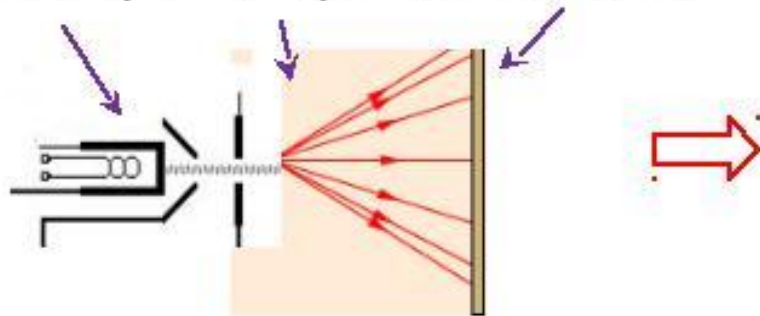
В экспериментах *Дж. Томсона* исследовалась *дифракция электронов на поликристаллическом образце*. Коллимированный пучок моноэнергетических электронов падал нормально на тонкую металлическую поликристаллическую фольгу. На фотопластине, расположенной за фольгой, электроны образовывали дифракционную картину в виде тонких концентрических колец. Поясним, почему при дифракции на поликристаллическом образце на фотопластине получаются дифракционные кольца. При анализе дифракции электронов на поликристалле возник следующий вопрос: можно было допустить, что дифракцию испытывают не электроны, а вторичное рентгеновское излучение, испускаемое атомами кристалла под действием электронного пучка. Для того чтобы однозначно установить природу дифрагировавших частиц (электроны или рентгеновские кванты), в области между фольгой и фотопластинкой было создано магнитное поле. Если дифракцию испытывают электроны, то они будут отклоняться магнитным полем, что приведет к искажению дифракционной картины. Если же дифрагирует рентгеновское излучение, то система колец должна остаться без изменений. Эксперимент с магнитным полем показал, что дифракционное отражение испытывают именно электроны.



Дальнейшие опыты по дифракции микрочастиц.

Томсон и одновременно Тартаковский: дифракция при прохождении электронного пучка через металлическую фольгу (1927).

Эл.пучка фольга фотопластинка



Электроннограмма

Полная аналогия рентгенограммой при $\lambda_{x\text{-ray}} = \lambda_e$

Штерн & К.: дифракционные явления в опытах с атомными и молекулярными пучками.

Доказаны волновые свойства частиц!

Каждой ? Или совокупности ?



$$\lambda_B = \frac{h}{mv} \propto \sqrt{\frac{1}{mE_k}}$$

Длина волны де Бройля для атомов имеет того же масштаба что и для электронов, благодаря малой (тепловой) скорости/

Если предположение де Бройля верно, то почему эти волновые свойства не обнаруживаются у движущихся тел? Например, у летящей пули? Из-за малости длины волны λ : так для пули массой 10^{-3} кг, летящей со скоростью 100 м/с длина волны де Бройля составит $6 \cdot 10^{-34}$ м.

Такая длина волны никакими дифракционными опытами не определима.

Обладают ли волновыми свойствами отдельные электроны?

Ответ на это вопрос был дан Биберманом, Сушкиным и Фабрикантом.

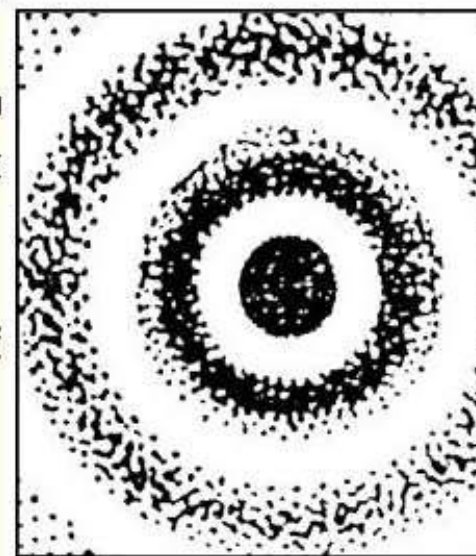
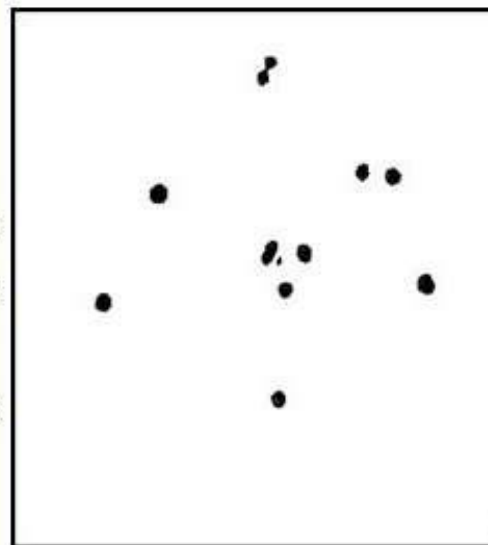
Опыты с одиночными электронами

Описанные выше опыты выполнялись с использованием пучков частиц. Поэтому возникает естественный вопрос: наблюдаемые волновые свойства выражают свойства пучка частиц или отдельных частиц?

Чтобы ответить на этот вопрос, В. Фабрикант, Л. Биберман и Н. Сушкин осуществили в 1949 г. опыты, в которых применялись столь слабые пучки электронов, что каждый электрон проходил через кристалл заведомо поодиночке и каждый рассеянный электрон регистрировался фотопластинкой. При этом оказалось, что отдельные электроны попадали в различные точки фотопластинки совершенно беспорядочным на первый взгляд образом. Между тем при достаточно длительной экспозиции на фотопластинке возникала дифракционная картина, абсолютно идентичная картине дифракции от обычного

Дифракция одиночных электронов

Рассмотренные выше эксперименты проводились с достаточно интенсивными пучками частиц, в данном случае электронов. Поэтому выявленные в них волновые свойства могли быть приписаны как ансамблю взаимодействующих между собой электронов, так и отдельному электрону. Для того, чтобы выяснить, обладает ли индивидуальная частица волновыми свойствами, группа отечественных физиков во главе с **В.А. Фабрикантом** выполнила в 1949 г дифракционные исследования с очень слабым пучком электронов. В этих опытах промежуток времени между двумя последовательными прохождениями электронов через кристалл в 30000 раз превышал время, затрачиваемое одним электроном на прохождение всего прибора. Таким образом, электроны дифрагировали в кристалле поодиночке и полностью исключалось взаимодействие электронов друг с другом как причина возникновения дифракционной картины. При небольшой длительности эксперимента точки на фотопластинке, отвечающие попаданию электронов, распределены совершенно случайным образом. Однако при достаточно



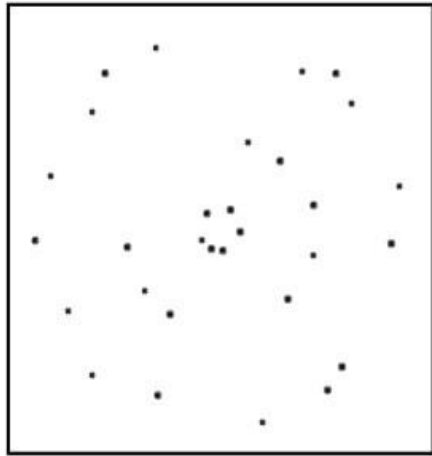
длительности эксперимента распределение точек приобретает характерный для дифракции на поликристалле вид концентрических колец. Таким образом было доказано, что волновые свойства присущи отдельному электрону.

Валентин Александрович
Фабрикант (1907—1991)

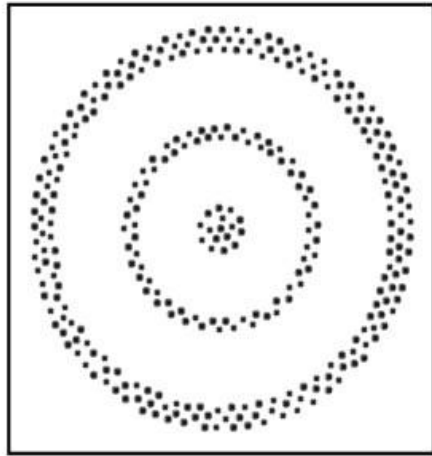


В. Фабрикант, Л. Вйберман и Н. Сушкин осуществили в 1949 г. опыты, в которых применялись столь слабые пучки электронов, что каждый электрон проходил через кристалл заведомо поодиночке и каждый рассеянный электрон регистрировался фотопластинкой. Отдельные электроны попадали в различные точки фотопластинки (рис. а) совершенно беспорядочным на первый взгляд образом.

При достаточно длительной экспозиции на фотопластинке возникала дифракционная картина (рис.б), идентичная картине дифракции от обычного электронного пучка. То есть было доказано, что волновыми свойствами обладают отдельные частицы



а)

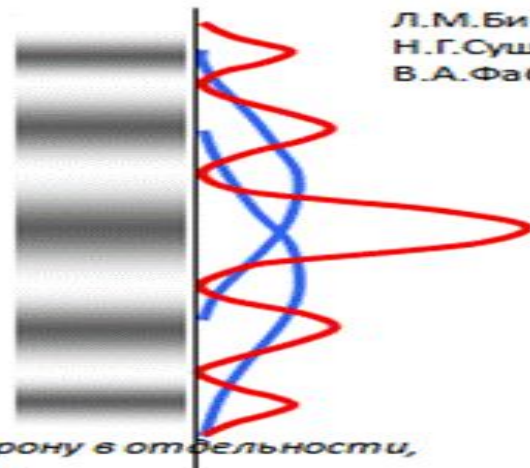
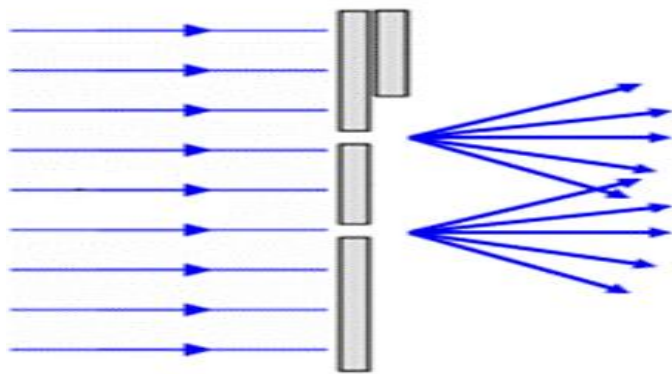


б)

Опыты Фабриканта, Бибермана, Сушкина

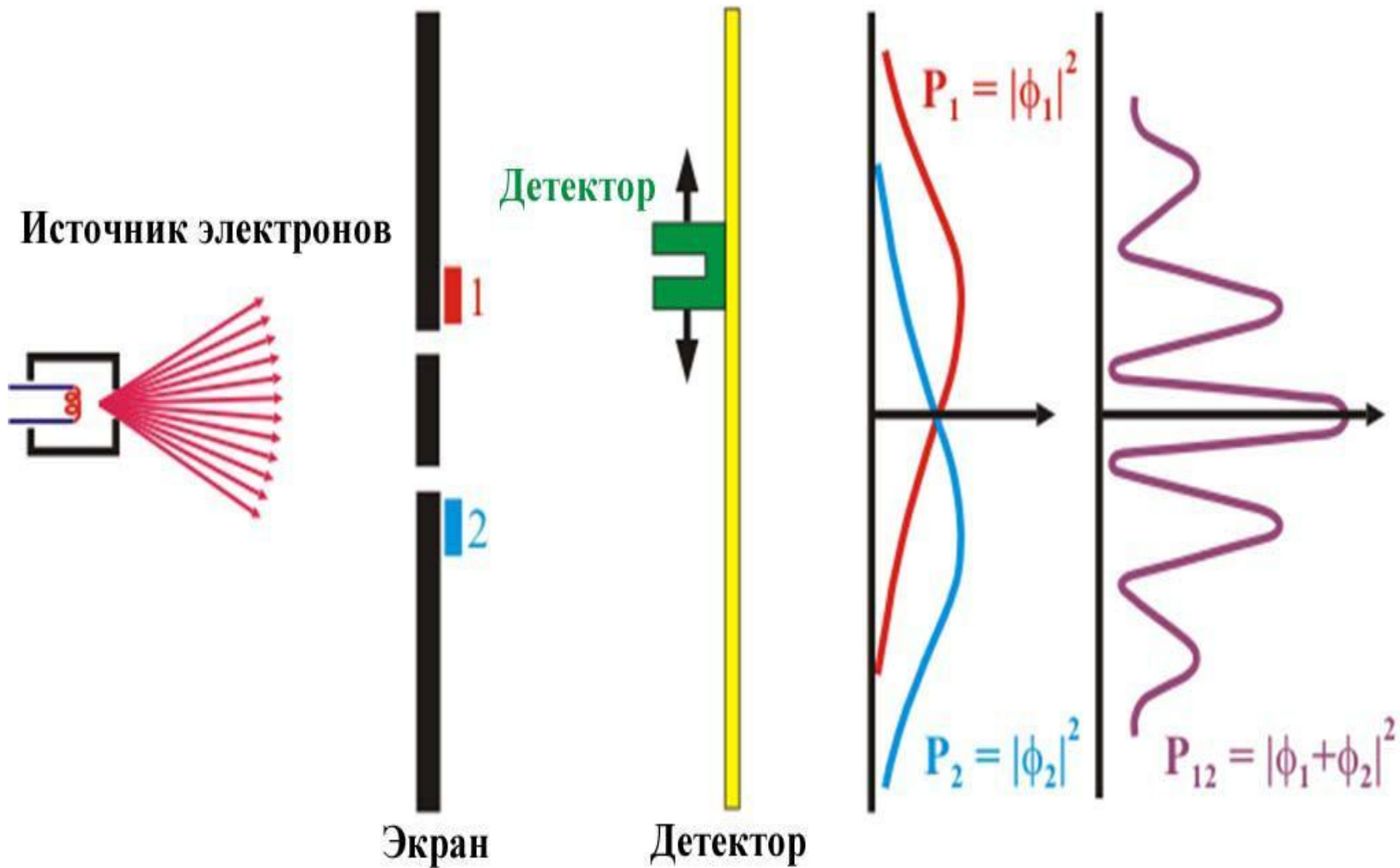
- Опыт Дж. Томсона был многократно повторен с неизменным результатом, в том числе при условиях, когда поток электронов был настолько слабым, что через прибор одновременно могла проходить только одна частица (В. А. Фабрикант, 1948 г.). Таким образом, было экспериментально доказано, что волновые свойства присущи не только большой совокупности электронов, но и каждому электрону в отдельности.

Дифракция пучков малой интенсивности

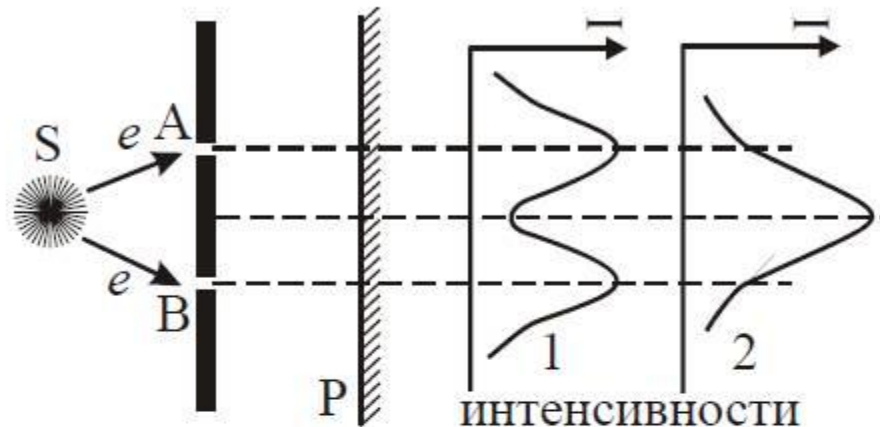


Л.М.Биберман
Н.Г.Сушкин
В.А.Фабрикант

Волновые свойства присущи *каждому электрону в отдельности*, а не только системе из большого числа частиц



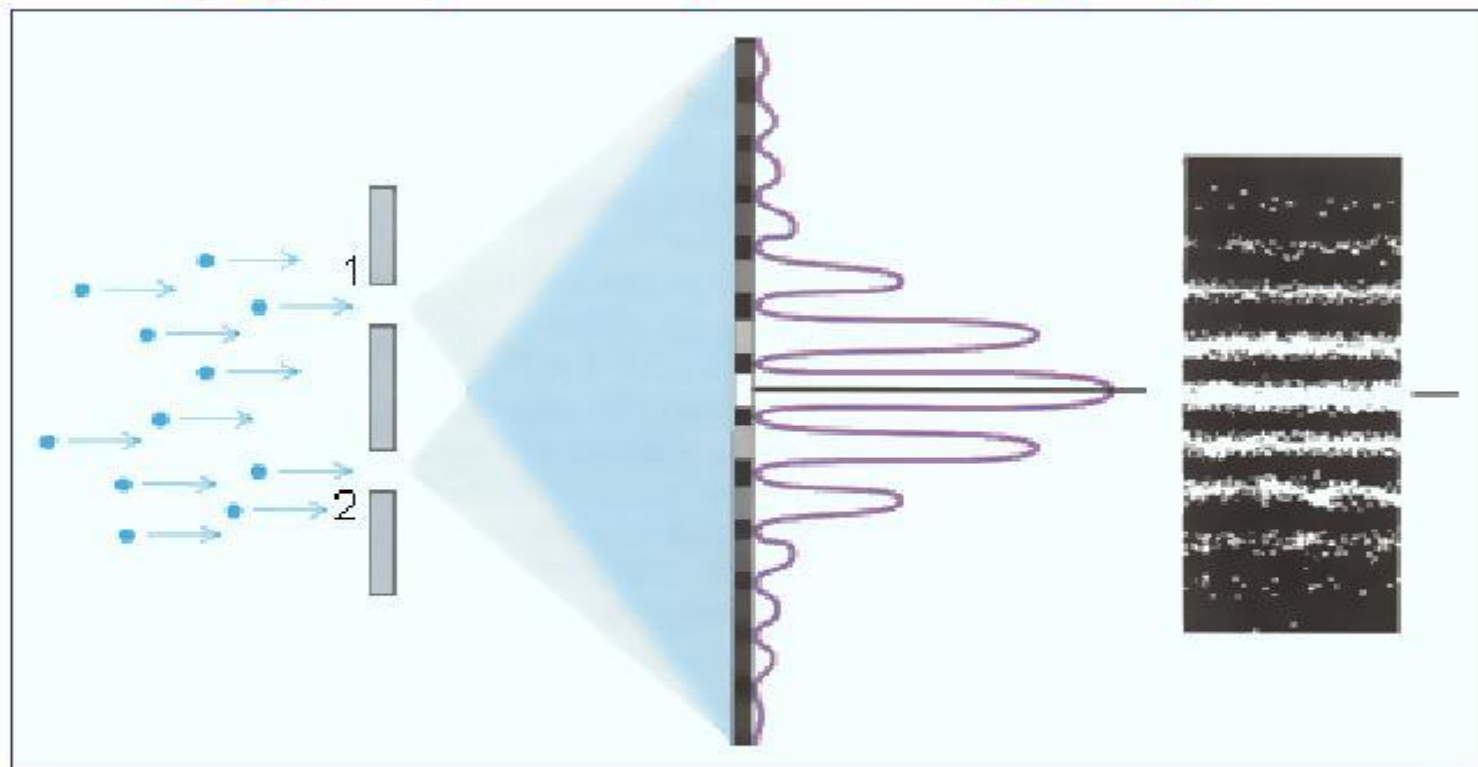
Интерференция частиц



Пучок ускоренных электронов падает на экран с двумя узкими щелями. Если закрыть одну щель, то электроны, прошедшие через другую, дадут определенное распределение интенсивности. Подобное же распределение, но несколько смещенное будет получено, если закрыть вторую щель и открыть первую. Теперь оставим открытыми обе щели. Здравый смысл подсказывает, что новое распределение частиц должно равняться сумме первых двух (распределение 1). Однако опыт свидетельствует совсем о другом (распределение 2).


Распределение электронов отвечает интерференции двух когерентных волн. Таким образом, на движение каждого отдельного электрона оказывают влияние обе щели. Этот эксперимент подтверждает тот факт, что микрочастица-волна не просто «маленькое» материальное тело.

Дифракция электронов на двух щелях



Дифракционная картина аналогична как полученной при дифракции света

Биберман, Сушкин и Фабрикант (1949): Опыты по дифракции электронов с пучками слабой интенсивности

Электрон
регистрировался как  «КОРПУСКУЛЯРНОСТЬ»
одно целое

Место прихода электрона на
фотопластинку имело **случайный
характер**. При достаточной
экспозиции **получалась
дифракционная картина**.  «ВОЛНОВЫЕ СВОЙСТВА»

Вывод. Единичная частица обладает волновыми свойствами. А именно, её положение в пространстве определяется вероятностным законом и этот вероятностный закон таков, что при усреднении (по времени или по большому числу частиц) реализуется волновая картина.

Усреднение по времени (пускаем электроны по одному и ждём пока их не придёт достаточно много) или по большому числу частиц в потоке (много электронов одновременно, видим мгновенную картину) эквивалентно.

В то же время **микрочастицы обладают свойствами корпускулярности:**
масса, размеры, заряд - неделимы.

Так было доказано, что волновыми свойствами обладают и отдельные частицы. Таким образом, мы имеем дело с микрообъектами, которые обладают одновременно как корпускулярными, так и волновыми свойствами. Это позволяет нам в дальнейшем говорить об электронах, но выводы, к которым мы придем, имеют совершенно общий смысл и в равной степени применимы к любым частицам.

Из формулы де Бройля следовало, что волновые свойства должны быть присущи любой частице вещества, имеющей массу и скорость v . В 1929г. опыты Штерна доказали, что формула де Бройля справедлива и для пучков атомов и молекул

При отражении пучков атомов и молекул от поверхностей твердых тел должны наблюдаться дифракционные явления, которые описываются теми же соотношениями, что и плоская (двумерная) дифракционная решетка. Опыты показали, что кроме частиц, рассеянных под углом, равным углу падения, наблюдаются максимумы числа отраженных частиц под другими углами, определяемыми формулами двумерной дифракционной решетки.

Формулы де Бройля оказались справедливыми также для нейтронов. Это подтвердили опыты по дифракции нейтронов на приемниках.

Таким образом, наличие волновых свойств у движущихся частиц, обладающих массой покоя, есть универсальное явление, не связанное с какой-либо спецификой движущейся частицы.

Вероятностный смысл волн де Бройля

Физический смысл волн де Бройля

Сравним дифракцию световых волн и микрочастиц.

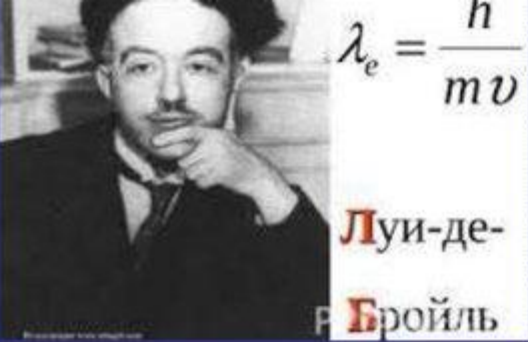
При дифракции **световых волн** происходит перераспределение энергии волны, в результате на экране наблюдаются участки различной **интенсивности**. С точки зрения квантовой теории интенсивность света больше там, куда больше попало фотонов, т.е. где больше **вероятность** попадания фотонов. Можно сделать вывод, что **интенсивность световой волны в разных точках экрана пропорциональна вероятности попадания фотона в эту точку пространства.**

Дифракционная картина, наблюдаемая для **микрочастиц**, также характеризуется неодинаковым распределением числа частиц по разным направлениям. Можно утверждать, что **вероятность попадания микрочастицы в ту или другую точку пространства пропорциональна интенсивности волн де Бройля.**

Вероятностный подход к описанию микрочастиц – важнейшая особенность квантовой теории.

Физический смысл волн де Бройля

- *Квадрат амплитуды дебройлевской волны в данной точке пространства является мерой вероятности того, что частица находится в этой области.*
- Вероятностная трактовка волн де Бройля принадлежит Макс Борну.
- Подчеркнем еще раз, что волны, связанные с движущимися частицами, не имеют никакого отношения к распространению какого-либо электромагнитного поля, к электромагнитным волнам.
- Среди известных в физике электромагнитных, акустических и других волн нет аналога «волнам вероятности», связанных с движущимися частицами вещества.



1892-1987

Длина волны де Бройля λ

Если частица массой m_0 движется со скоростью $v \ll c$, то длина волны де Бройля:

$$\lambda = \frac{h}{p} \longrightarrow \lambda = \frac{h}{m_0 v}$$

□ Если частица имеет кинетическую энергию W_k , то ее импульс p через энергию выражается как:

$$p = \sqrt{2mW_k} \longrightarrow \text{длина волны де Бройля: } \lambda = \frac{h}{\sqrt{2mW_k}}$$

□ **Вывод:** длина волны де Бройля **тем меньше**, чем **больше** масса и скорость частиц.

■ Так, для пылинки массой $m=10^{-3}$ г: $v=1$ м/с, $\lambda \sim 10^{-28}$ м.

■ При таких условиях волновые свойства проявиться не могут.

□ А вот для микрочастиц с массой $m \sim 10^{-27}$ кг длина волны де Бройля оказывает **сравнимой с расстоянием между атомами** в твердых телах $\lambda \sim 10^{-10}$ м, которое можно измерить современной аппаратурой.

□ **Вывод 2:** волновые свойства **заметно** проявляются:

■ для микрочастиц, которые обладают **малой массой m** , или

■ в случае, если длина волны де Бройля λ **становится соизмеримой с размерами** области пространства, в которой может двигаться частица.

Свойства волн де Бройля:

1) имеют специфическую **квантовую** природу, нет аналогии с волнами в классической физике;

2) волновая функция $\Psi(x, y, z, t)$ используется для расчета вероятности нахождения частицы в данной точке пространства в данный момент времени;

Физический смысл волн де Бройля

Как известно, **интенсивность пропорциональна квадрату амплитуды**. Эксперименты по отражению электронов и др. частиц от поверхности показывают, что по **некоторым направлениям обнаруживаются максимумы числа отраженных частиц**. Это означает, что в указанных направлениях отражается большее число частиц, чем в других направлениях. С волновой точки зрения наличие максимумов в некоторых направлениях означает, что **эти направления соответствуют наибольшей интенсивности волн, связанных с отражающимися частицами**.

3. Волны де Бройля несут вероятностный смысл: квадрат модуля амплитуды этих волн равен плотности вероятности нахождения частицы в заданном объёме.

4. Волны де Бройля имеют фазовую и групповую скорости.

Групповая скорость волн де Бройля классической частицы равна скорости её движения и она не может быть больше скорости света.

Фазовая скорость волн де Бройля может быть как меньше, так и больше скорости света.

5. Волны де Бройля испытывают дисперсию: скорость волн де Бройля зависит от длины волны.

Волны де Бройля – это волны вероятности

- Макс Борн:
Интенсивность волны де Бройля в каком-то месте пространства пропорциональна вероятности обнаружить частицу в данном месте

$$|\psi|^2 = \frac{dW}{dV}$$

Физический смысл волн де Бройля

Идея де Бройля о наличии у частиц вещества **волновых свойств** получила экспериментальное подтверждение.

Обнаружить волновые свойства у макроскопических тел не представляется возможным из-за присущей им малой длины волны.

Волны, связанные с движущимися частицами, не имеют никакого отношения к распространению какого-либо электромагнитного поля, к электромагнитным волнам.

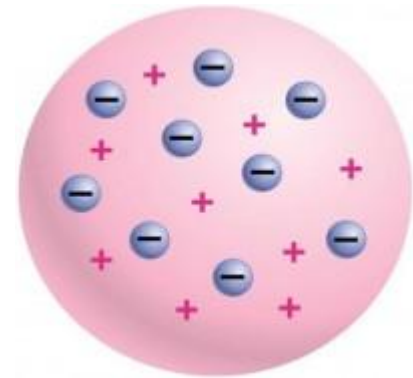
Физика атома

Модели строения атома

1. Модель Томсона

Первая модель строения атома была предложена Дж. Томсоном в 1904 г., согласно которой атом – положительно заряженная сфера с вкрапленными в нее электронами. Несмотря на свое несовершенство томсоновская модель позволяла объяснить явления испускания, поглощения и рассеяния света атомами, а также установить число электронов в атомах легких элементов.

Томсон предложил первую электронную модель атома. Согласно ей атом представляет собой шар, внутри которого находится заряженное вещество, положительный заряд которого равномерно распределён по всему объёму. А в это вещество, как изюминки в булочке, вкраплены электроны. В целом атом электрически нейтрален. Эту модель называли "моделью сливового пудинга"



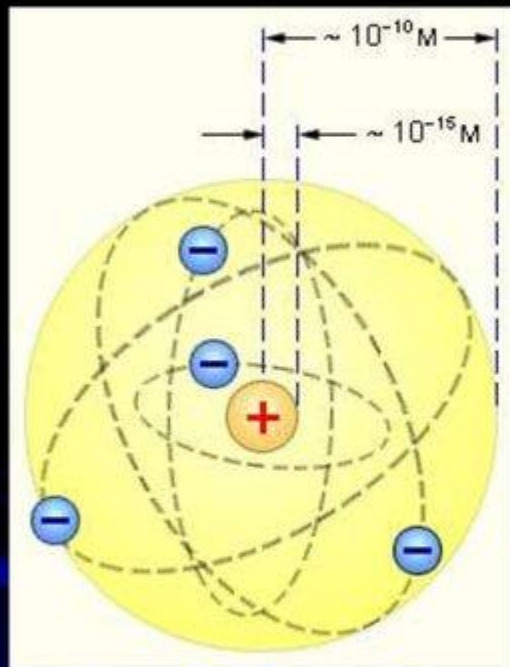
2.2 Модель Резерфорда

Модель Томсона была опровергнута Э. Резерфордом (1911 г.), который доказал, что положительный заряд и практически вся масса атома сконцентрированы в малой части его объема – ядре, вокруг которого двигаются электроны .

Эта модель строения атома известна как планетарная, т. к. электроны вращаются вокруг ядра подобно планетам солнечной системы.

Согласно законам классической электродинамики, движение электрона по окружности вокруг ядра будет устойчивым, если сила кулоновского притяжения будет равна центробежной силе. Однако, в соответствии с теорией электромагнитного поля, электроны в этом случае должны двигаться по спирали, непрерывно излучая энергию, и падать на ядро. Однако атом устойчив.

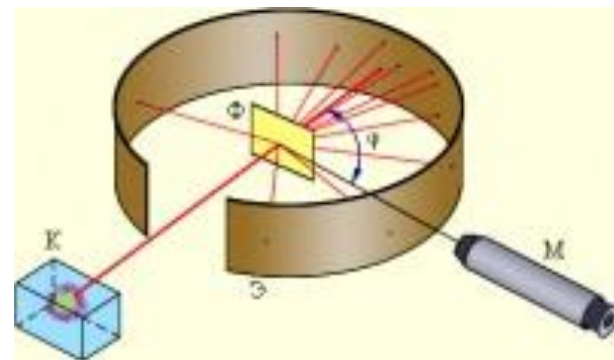
Ядерная (планетарная) модель атома Резерфорда



- Атом имеет в центре ядро, размеры которого во много раз меньше размеров самого атома.
- Почти вся масса атома сконцентрирована в его ядре.
- суммарный отрицательный заряд всех электронов равен положительному заряду ядра и компенсирует его.

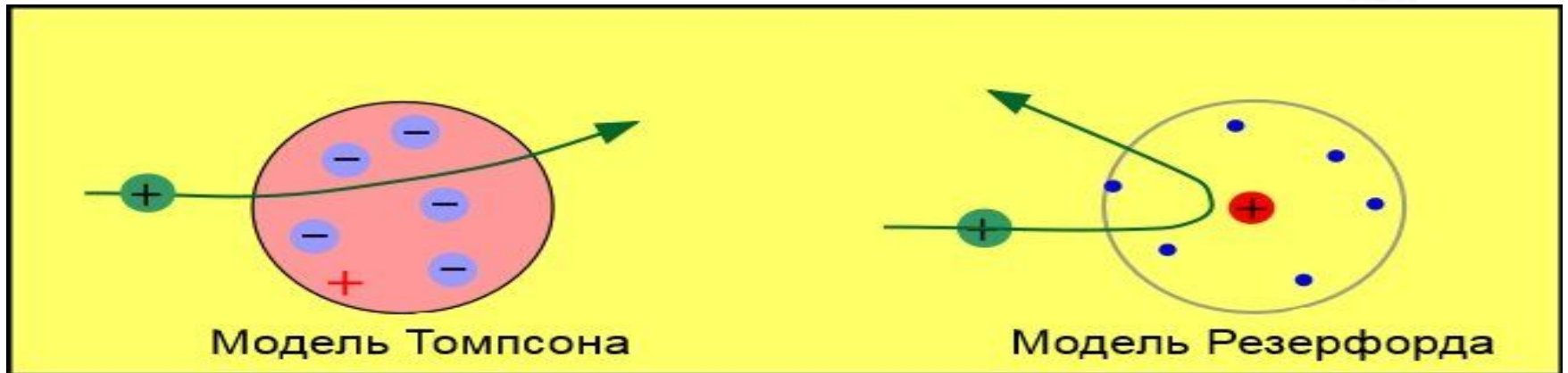
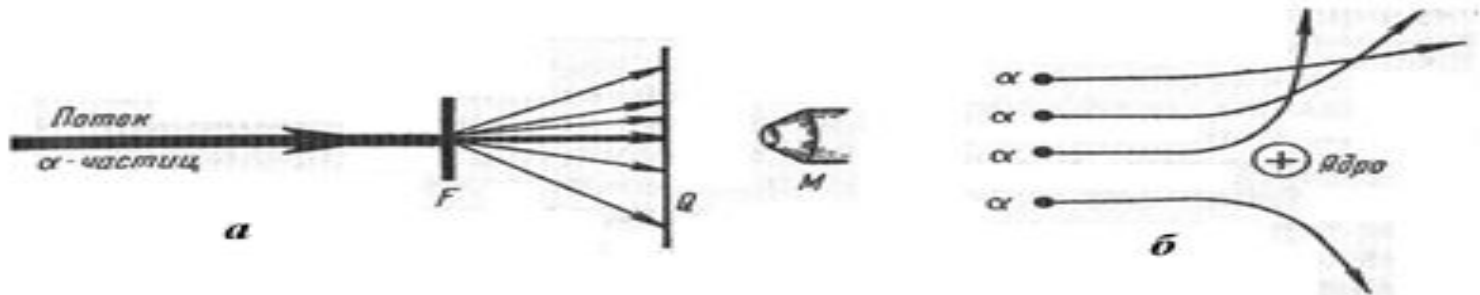
Опыт Резерфорда

В 1909 г. английский физик Эрнест Резерфорд провёл опыт с рассеиванием альфа-частиц, которые образуются при распаде химического элемента радия. Масса альфа-частиц в 8000 раз превышает массу электрона.



В эксперименте Резерфорда пучок альфа-частиц пропускался через тонкую золотую фольгу. Нужно сказать, что фольга была настолько тонка, что её толщина составляла практически один слой молекул. Если Томсон был прав, и атом состоял из некоего облака с электронами, то альфа-частицы, обладающие большой массой, должны были легко проходить через фольгу. Но на деле оказалось, что часть альфа-частиц действительно проходила, отклоняясь лишь на небольшой угол, а часть словно наталкивалась на какое-то препятствие и отскакивала назад. Это было невероятно.

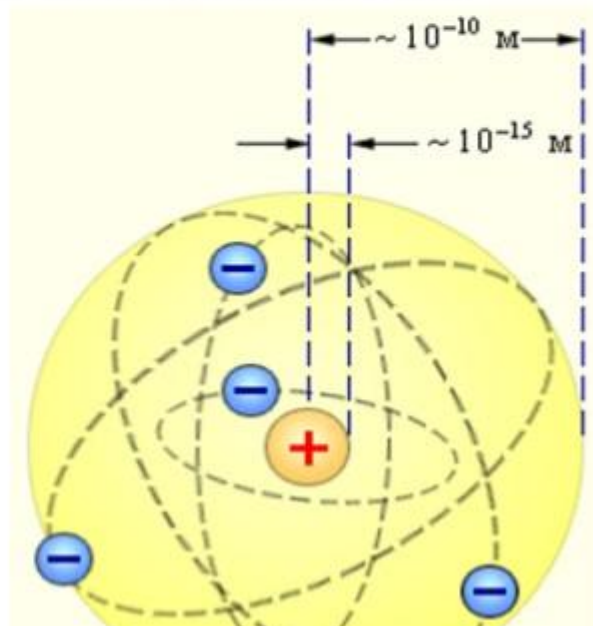
Так как альфа-частицы имели положительный заряд, то, скорее всего, они проходили мимо других частиц с положительным зарядом. И размеры этих частиц были намного меньше размеров самого атома. Атом золота должен был состоять из ядра, имеющего положительный заряд и окружающих его отрицательно заряженных электронов.



Модель Резерфорда имела и другие противоречия. Так при непрерывном излучении энергии у атома должен наблюдаться непрерывный, сплошной спектр. На самом деле спектр атома состоит из отдельных линий и серий.

Таким образом, данная модель противоречит законам электродинамики и не объясняет линейчатого характера атомного спектра.

- Таким образом, опыты Резерфорда и его сотрудников привели к выводу, что в центре атома находится плотное положительно заряженное ядро, диаметр которого не превышает 10^{-14} – 10^{-15} м. Это ядро занимает только 10^{-12} часть полного объема атома, но содержит весь положительный заряд и не менее 99,95 % его массы. Веществу, составляющему ядро атома, следовало приписать колоссальную плотность порядка $\rho \approx 10^{15}$ г/см³. Заряд ядра должен быть равен суммарному заряду всех электронов, входящих в состав атома. Впоследствии удалось установить, что если заряд электрона принять за единицу, то заряд ядра в точности равен номеру данного элемента в таблице Менделеева.
- Радикальные выводы о строении атома, следовавшие из опытов Резерфорда, заставляли многих ученых сомневаться в их справедливости. Не был исключением и сам Резерфорд, опубликовавший результаты своих исследований только в 1911 г. через два года после выполнения первых экспериментов. Опираясь на классические представления о движении микрочастиц, Резерфорд предложил планетарную модель атома. Согласно этой модели, в центре атома располагается положительно заряженное ядро, в котором сосредоточена почти вся масса атома. Атом в целом нейтрален. Вокруг ядра, подобно планетам, под действием кулоновских сил со стороны ядра вращаются электроны. Находясь в состоянии покоя электроны не могут, так как они упали бы на ядро.



2.3. Модель Бора

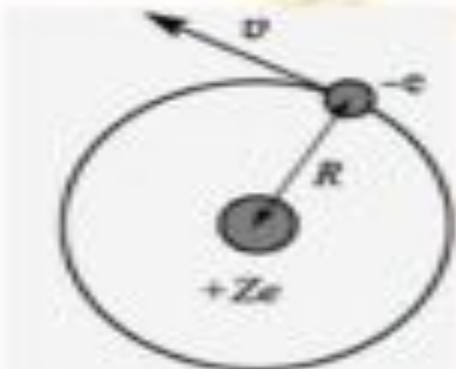
В 1913 г. Н. Бор предложил свою теорию строения атома, не отрицая при этом полностью предыдущие представления. В основу своей теории Бор положил два постулата.

Постулаты Бора

1. Электроны движутся только по определенным (стационарным) орбитам. При этом не происходит излучения энергии.

Условие для стационарных орбит:

из всех орбит электрона возможны только те, для которых момент импульса электрона, равен целому кратному постоянной Планка:



$$m_e v r = n \hbar$$

$n = 1, 2, 3, \dots$
главное
квантовое число.

§ 1.2. Квантовые постулаты Бора

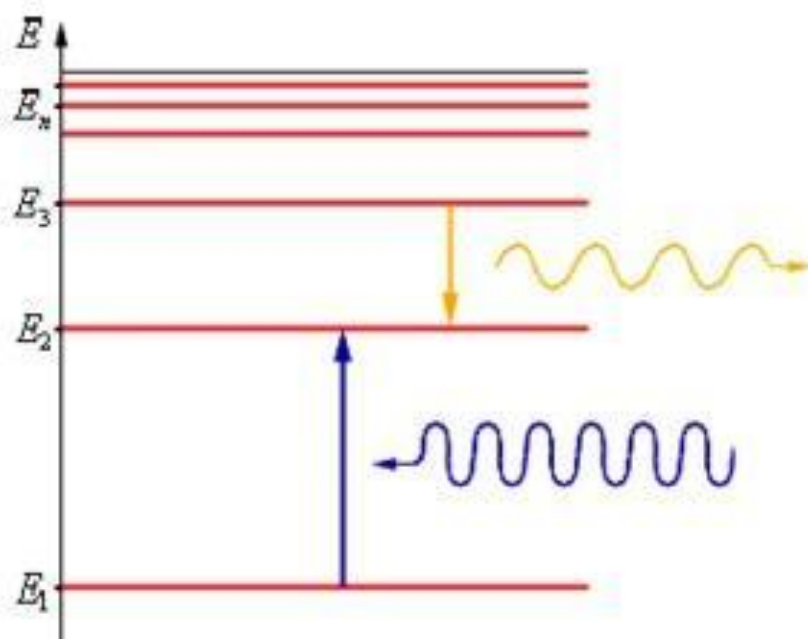
Второй постулат Бора (правило частот): при переходе атома из одного стационарного состояния с энергией в другое стационарное состояние с энергией излучается или поглощается квант, энергия которого равна разности энергий стационарных состояний.

$$h\nu_{nm} = E_n - E_m$$

где h – постоянная Планка

$$h = 6,62 \times 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

Энергетические уровни атома и условное
изображение процессов поглощения и
испускания фотонов



Постулаты Бора

1. Электрон в атоме может двигаться только по определенным стационарным орбитам, каждой из которых можно приписать номер $n = 1, 2, 3, \dots$. Двигаясь по стационарной орбите электрон не излучает и обладает неизменной полной энергией E_n .

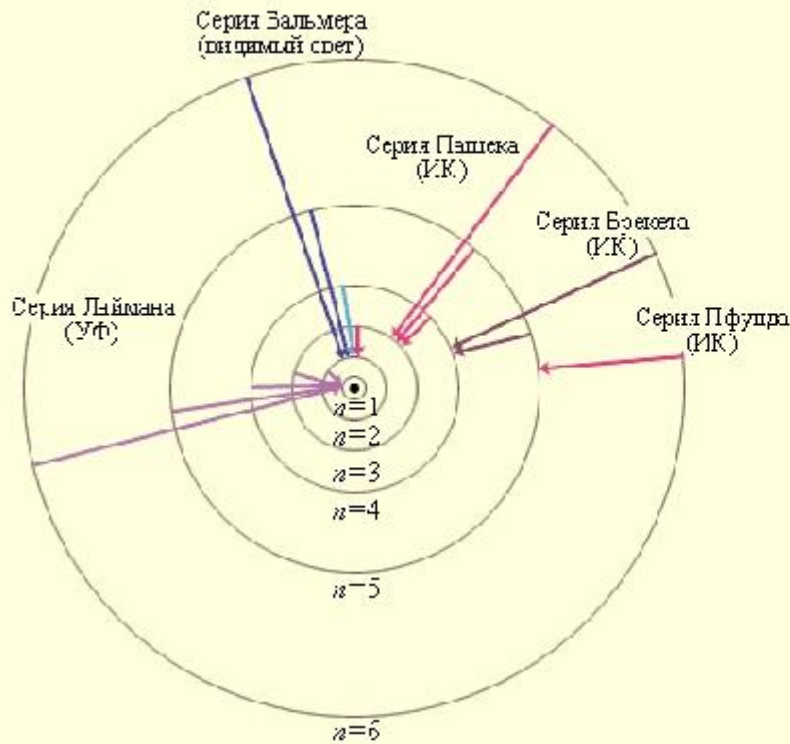
2. Разрешенными стационарными орбитами являются только те, для которых момент импульса электрона $L = mvr$ равен целому кратному постоянной Планка:

$$L = n\hbar, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

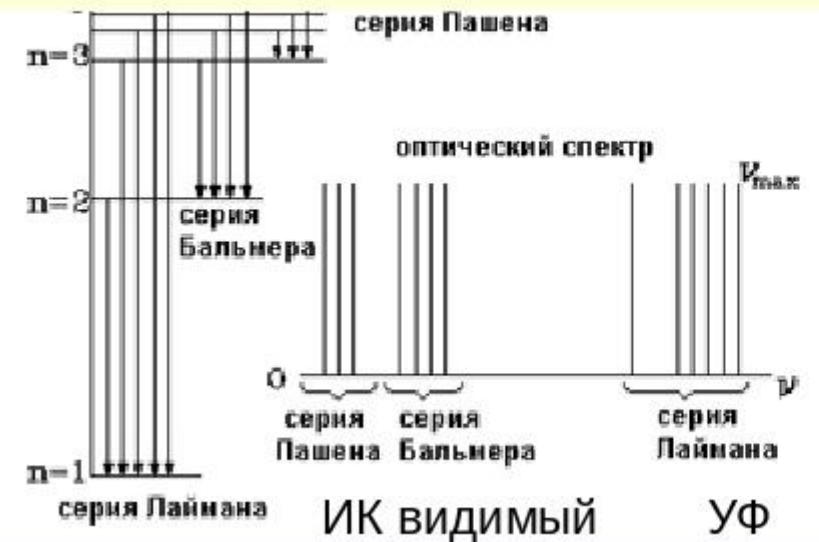
3. Испускание или поглощение кванта излучения (фотона) происходит при переходе электрона из одного стационарного состояния в другое, причем частота ω излучения определяется согласно формуле

$$\hbar\omega = E_k - E_n, \quad k > n$$

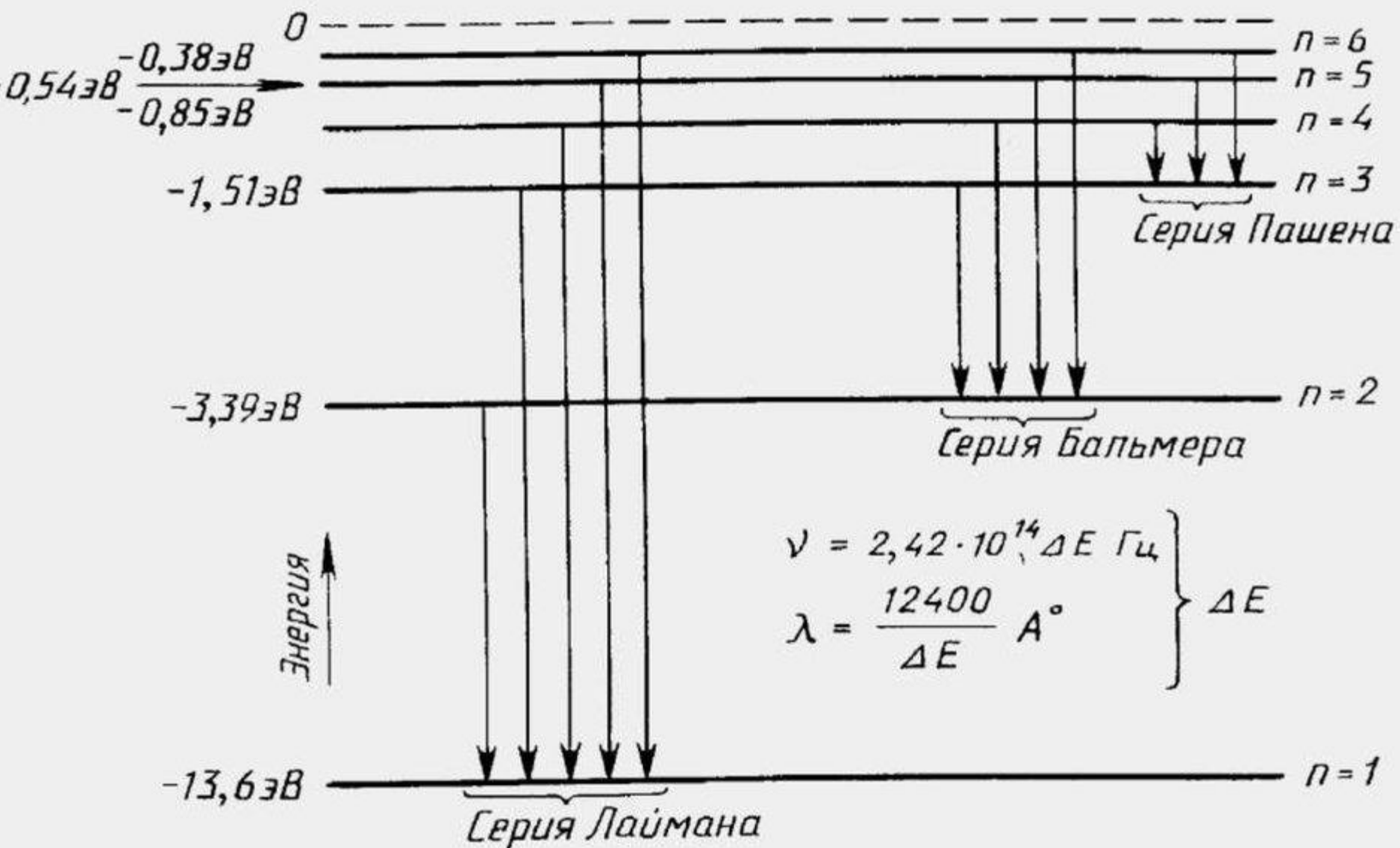
ПОСТУЛАТЫ БОРА

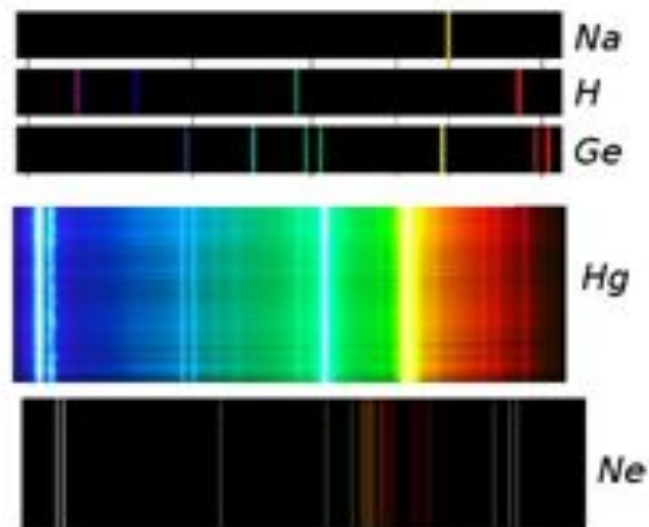
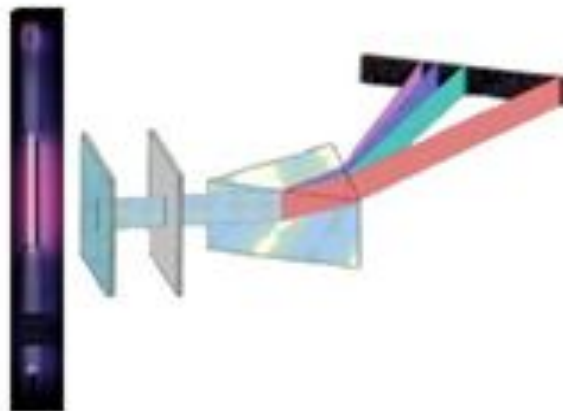


Если атом переходит в одно из возбужденных состояний, долго оставаться там он не может: атом самопроизвольно (спонтанно) переходит в основное состояние.



Постулаты Бора объясняют происхождение линейчатых спектров и их закономерности



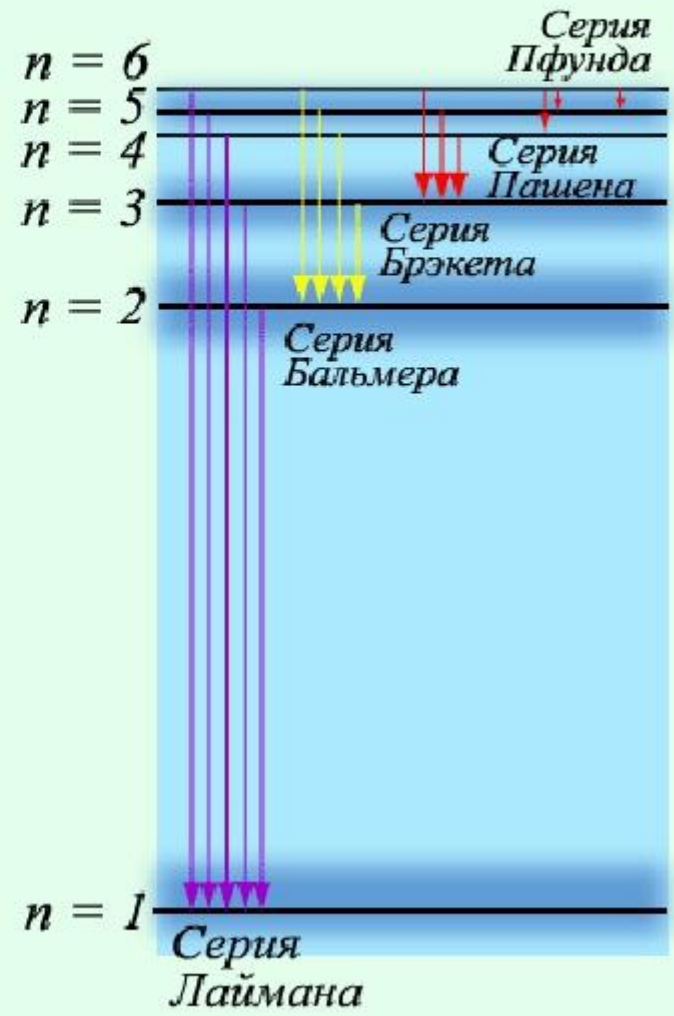
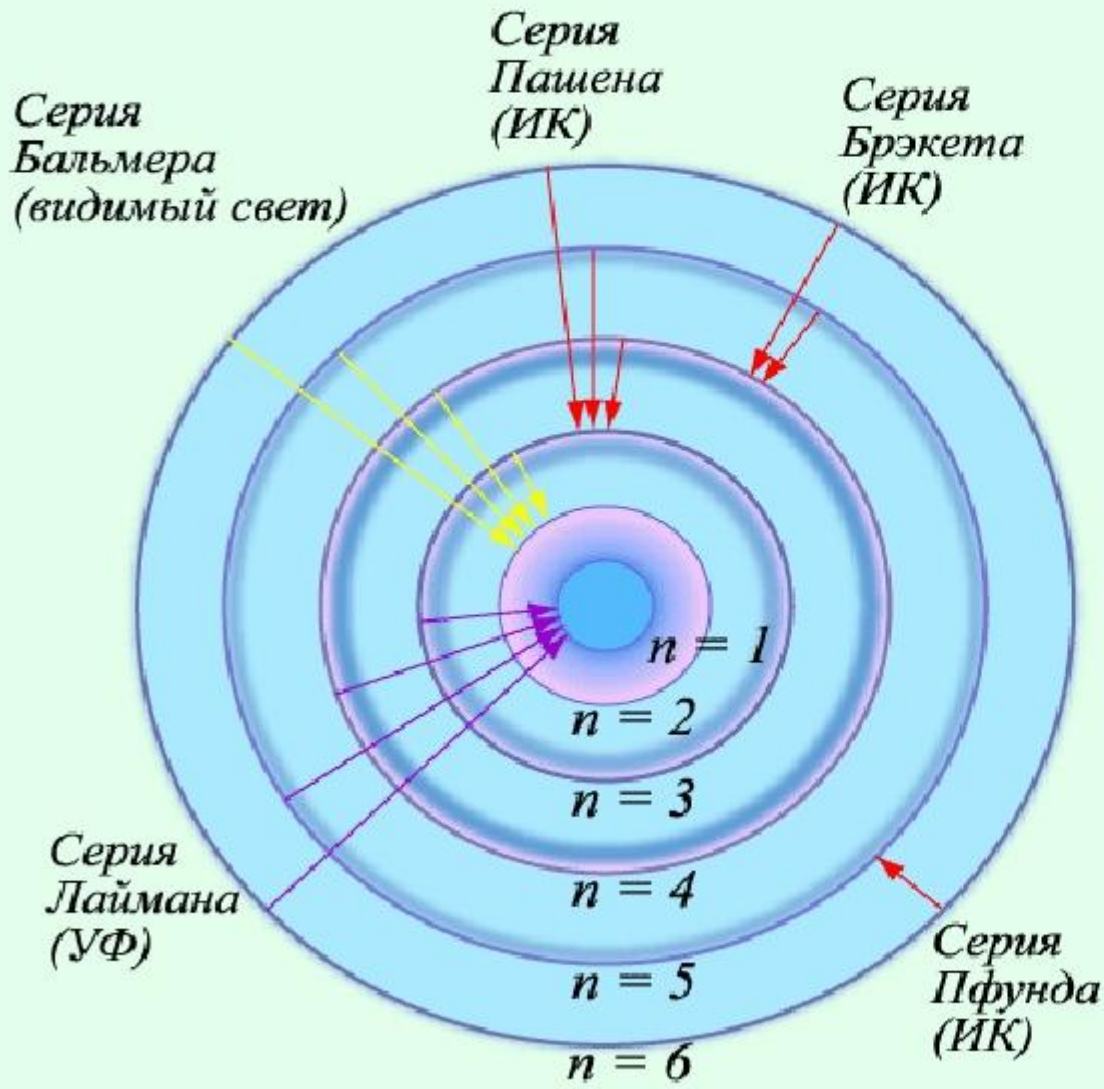


**Для атомов
каждого вещества
характерен свой
спектр.**

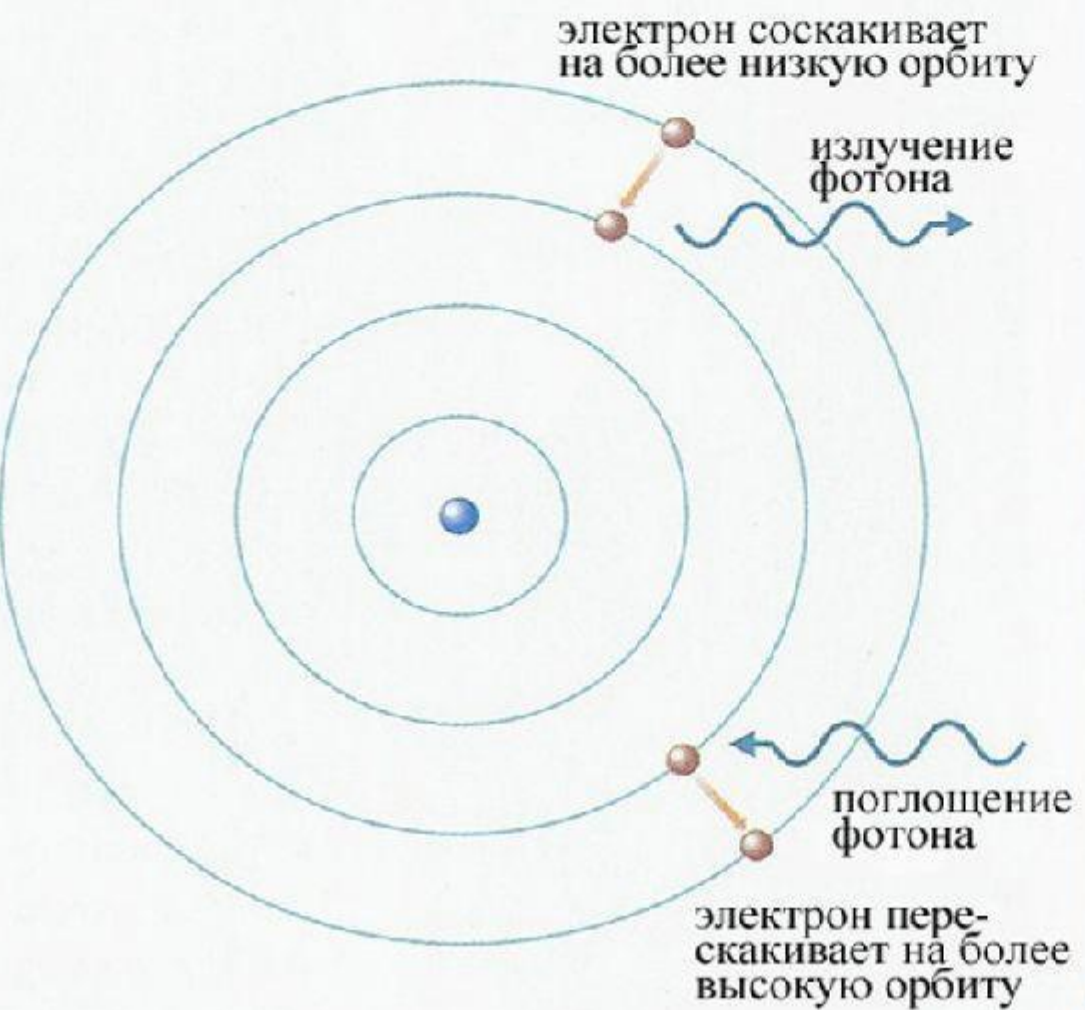


Линейчатые спектры испускания атомо
(окрашенные изображения щели)

Диаграмма энергетических состояний



поглощение света - процесс, обратный излучению. Атом, поглощая свет, переходит из низших энергетических состояний в высшие. При этом он поглощает излучение той же самой частоты, которую излучает, переходя из высших энергетических состояний в низшие.



Постулаты Бора

Постоянная Ридберга:

$$R = 109\,676,576 \text{ см}^{-1}$$

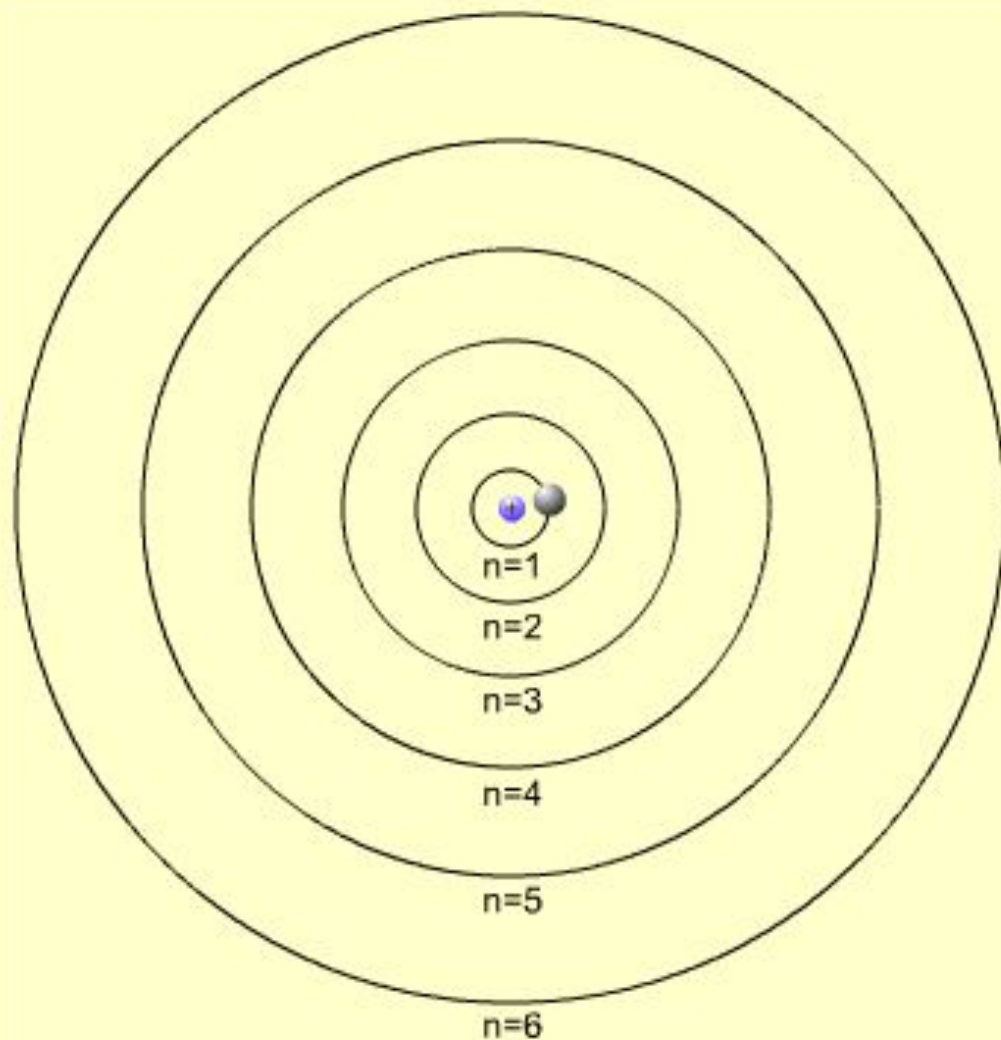
Обобщенная формула:

$$\omega = R \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad m = 1, 2, 3 \dots$$
$$n = m + 1, m + 2 \dots$$

Спектр испускания атома водорода

Серия Бальмера:

$$\omega = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad n = 3, 4, 5 \dots$$

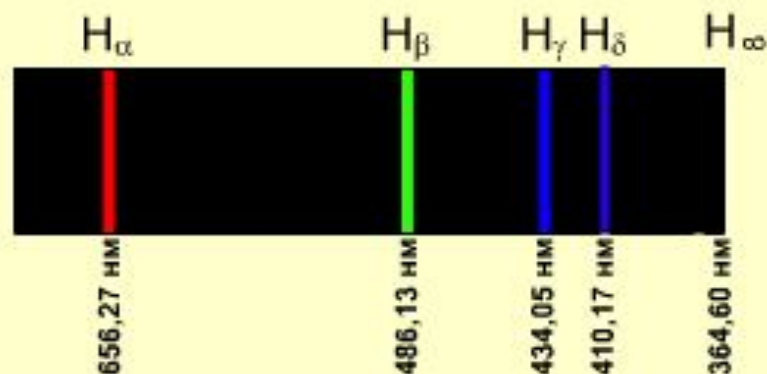


Поглощение

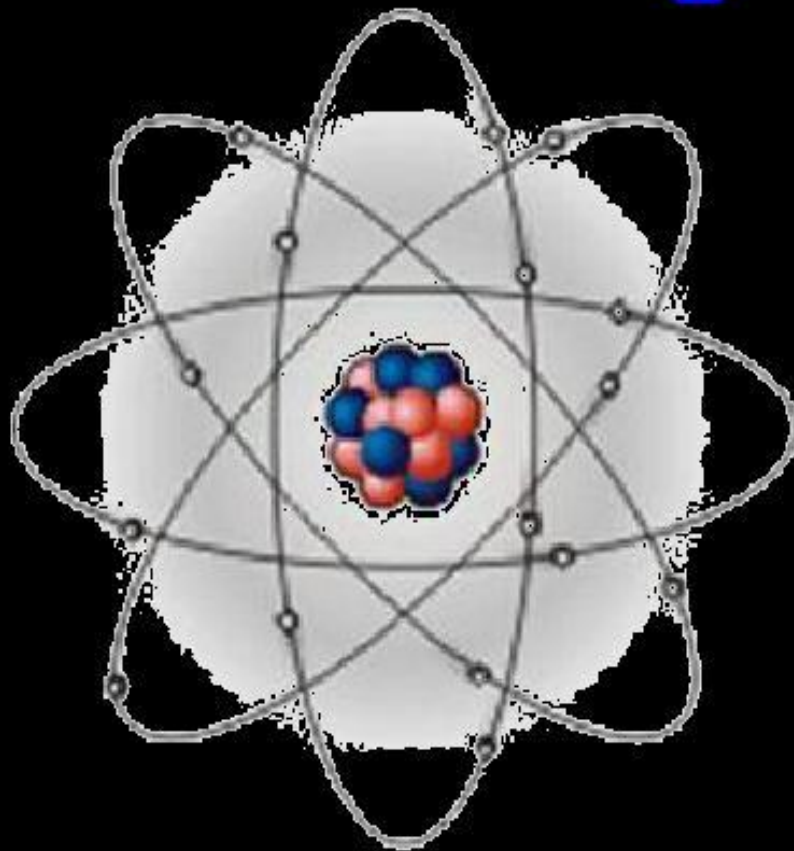
Испускание

Переход на уровней

Показать серию



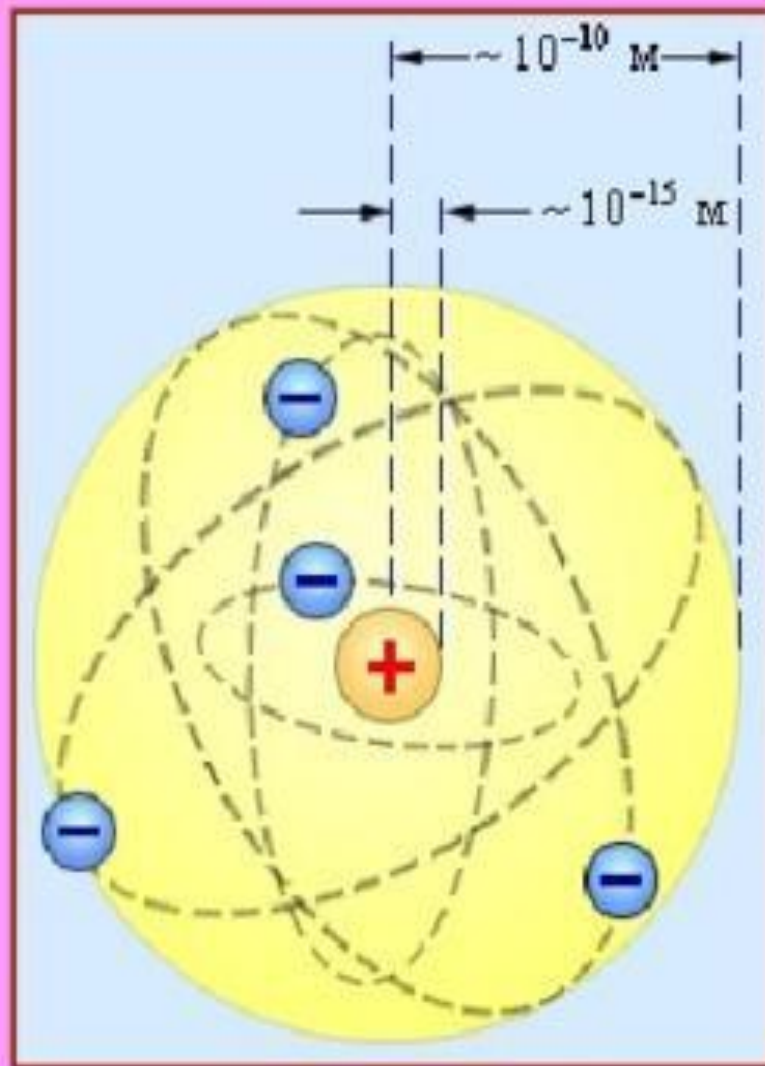
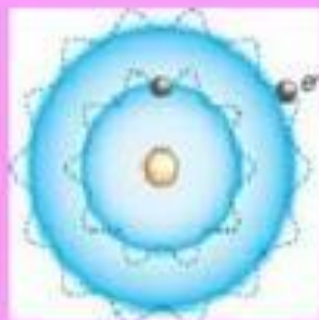
Атом Бора



Теория атома водорода



Нильс Бор
1885-1962 гг



5.2. Теория атома водорода по Бору

В основу своей теории Н.Бор положил два постулата.

Первый называется **постулатом стационарных орбит.**

Второй постулат касается вопроса **об излучении и поглощении энергии атомом.**



Нильс Бор
1885 -1962

Теория водородоподобного атома по Бору

При построении теории Бор опирался на опыт Резерфорда и данные по спектрам атомарных газов. Согласно опыту эти спектры линейчатые.

Линейчатый спектр атома водорода

- Исследования спектров излучения разряженных газов (т. е. спектров излучения отдельных атомов) показали, что каждому газу присущ определенный линейчатый спектр, состоящий из отдельных спектральных линий или групп близко расположенных линий. Самым изученным является спектр наиболее простого атома — атома водорода. Швейцарский ученый И. Бальмер (1825—1898) подобрал эмпирическую формулу, описывающую все известные в то время спектральные линии атома водорода в видимой области спектра:

$$\frac{1}{\lambda} = R' \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) (n = 3, 4, 5, \dots),$$

где $R' = 1,10 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$ — постоянная Ридберга. Так как $\nu = c/\lambda$, то формула (2.1) может быть переписана для частот, где $R = R'c = 3,29 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$:

$$\nu = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) (n = 3, 4, 5, \dots),$$

Из данных выражений вытекает, что спектральные линии, отличающиеся различными значениями n , образуют группу или серию линий, называемую серией Бальмера. С увеличением n линии серии сближаются; значение $n = 2$ определяет границу серии, к которой со стороны больших частот примыкает следующий спектр.

Атом водорода. Линейчатые спектры

Простейший из атомов, атом водорода явился своеобразным тест-объектом для теории Бора. Ко времени создания теории Бора атом водорода был хорошо изучен экспериментально. Еще в начале XIX века были открыты дискретные спектральные линии в излучении атома водорода в видимой области (так называемый *линейчатый спектр*). Впоследствии закономерности, которым подчиняются длины волн (или частоты) линейчатого спектра, были хорошо изучены количественно (И. Бальмер, 1885 г.). Совокупность спектральных линий атома водорода в видимой части спектра была названа *серией Бальмера*. Позже аналогичные серии спектральных линий были обнаружены в ультрафиолетовой и инфракрасной частях спектра. В 1890 году И. Ридберг получил эмпирическую формулу для частот спектральных линий:

$$\nu_{nm} = R \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

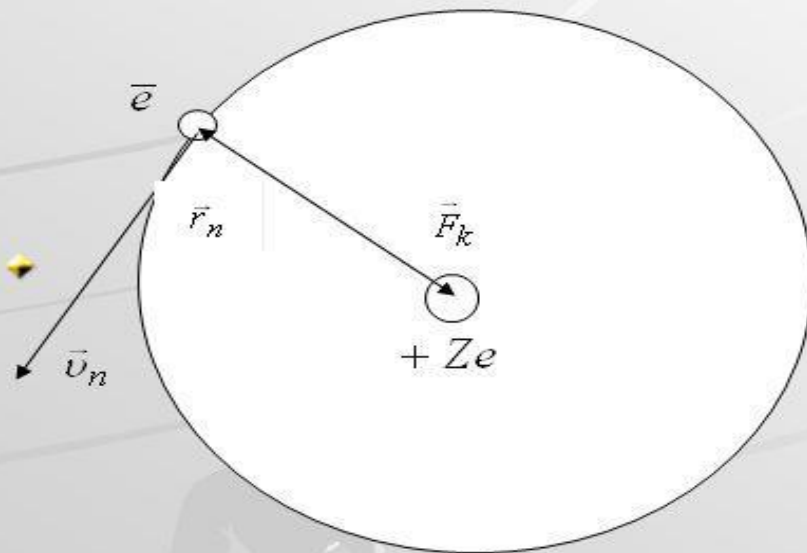
Для серии *Бальмера* $m = 2$, $n = 3, 4, 5, \dots$. Для ультрафиолетовой серии (серия Лаймана) $m = 1$, $n = 2, 3, 4, \dots$. Постоянная R в этой формуле называется *постоянной Ридберга*. Ее численное значение $R = 3,29 \cdot 10^{15}$ Гц. До Бора механизм возникновения линейчатых спектров и смысл целых чисел, входящих в формулы спектральных линий водорода (и ряда других атомов), оставались непонятными.

§ 212. Спектр атома водорода по Бору

- Постулаты, выдвинутые Бором, позволили рассчитать спектр атома водорода и **водородоподобных систем** — систем, состоящих из ядра с зарядом Ze и одного электрона (например, ионы He^+ , Li^{2+}), а также теоретически вычислить постоянную Ридберга.
- Решая совместно уравнение (208.1) и уравнение (210.1), получим выражение для радиуса n -й стационарной орбиты:

$$r_n = n^2 \frac{\hbar^2 \cdot 4\pi\epsilon_0}{m_e Z e^2}, \quad (212.1)$$

2 Теория Бора для водородоподобных систем



- \bar{e} – электрон; e – модуль заряда электрона; $+Ze$ – заряд ядра;
- \bar{r}_n – радиус n -ой круговой орбиты электрона; \bar{F}_k – сила кулоновского взаимодействия электрона и ядра;
- $\gamma = 1/4\pi\epsilon_0$ (в СИ); $\gamma = 1$ (в СГС)

- **Условие равновесия электрона на орбите** равенство силы Кулона и центростремительной силы:

$$\gamma \frac{Ze^2}{r_n^2} = \frac{mv_n^2}{r_n}$$

- **Условие стационарного движения электрона по орбите** - кратность орбитального момента импульса электрона приведённой постоянной Планка:

$$mv_n r_n = n\hbar$$

- Из этих уравнений найдём:

- **радиус орбиты** $r_n = \frac{n^2 \hbar^2}{\gamma m Z e^2}$

- **и скорость электрона** $v_n = \frac{\gamma Z e^2}{n \hbar}$

- в водородоподобной системе квантованы

водородоподобных система - система, состоящих из ядра с зарядом Ze и одного электрона (например, ионы He^+ , Li^{2+})

Атом водорода.

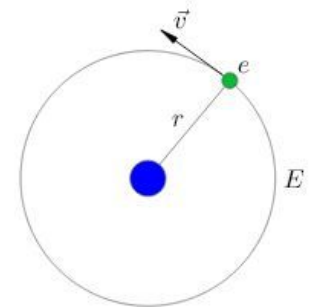
Атом водорода состоит из ядра с зарядом $+e$, которое называется протоном, и одного электрона с зарядом $-e$ (через e обозначена абсолютная величина заряда электрона). При построении своей теории атома водорода Бор сделал три дополнительных предположения.

1. Прежде всего, мы ограничиваемся рассмотрением только круговых орбит электрона. Таким образом, электрон движется вокруг протона по окружности радиуса r с постоянной по модулю скоростью v .
2. Величина mvv , равная произведению импульса электрона на радиус орбиты, называется моментом импульса электрона.

Правило квантования (третий постулат Бора).

Момент импульса электрона может принимать лишь дискретный набор значений

$$mvr = n\hbar, \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$$



3. Выше отмечалось, что классическая физика перестаёт работать внутри атома. Так оно в действительности и есть, но вопреки этому мы предполагаем, что электрон притягивается к протону с силой, вычисляемой по закону Кулона, а движение электрона подчиняется второму закону Ньютона (2)

$$\frac{mv^2}{r} = \frac{ke^2}{r^2}$$

Эти три предположения позволяют довольно просто получить формулы для уровней энергии атома водорода.

Из правила квантования выражаем "

$$v = \frac{n\hbar}{mr}$$

и подставляем в (2) :

$$\frac{n^2(\hbar)^2}{mr^2} = \frac{ke^2}{r}$$

Отсюда получаем формулу для допустимых радиусов орбит электрона (3)

$$r_n = \frac{(\hbar)^2 n^2}{k m e^2}$$

перейдём к нахождению энергии электрона. Потенциальная энергия кулоновского взаимодействия электрона с ядром равна:

$$W = \frac{k(+e)(-e)}{r} = -\frac{ke^2}{r}$$

(Она отрицательна, так как отсчитывается от бесконечно удалённой точки, где достигает максимального значения.)

Полная энергия электрон $E = \frac{mv^2}{2} - \frac{ke^2}{r}$ его кинетической и потенциальной энергий:

$$E = \frac{ke^2}{2r} - \frac{ke^2}{r} = -\frac{ke^2}{2r}$$

После преобразований получим (4)

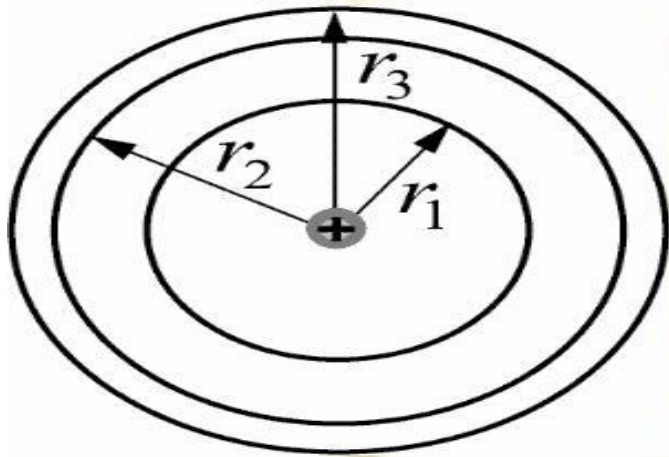
По формуле (3) легко вычислить радиус орбиты основного состояния

$$r_1 = \frac{(\hbar)^2}{kme^2} = 5 \cdot 10^{-9} \text{ м.}$$

То есть, диаметр атома оказывается равным как раз 10^{-6} м - величине, известной из опыта. Таким образом, теория Бора впервые смогла объяснить размер атома.

Радиус первой орбиты водородного атома называют **Боровским радиусом:**

При $n = 1$, $Z = 1$ для водорода имеем:



$$r_1 = 4\pi\epsilon_0 \frac{h^2}{m_e e^2} = 0,529 \text{ \AA} = 0,529 \cdot 10^{-10} \text{ м.}$$

Полная энергия, отрицательна. Если на радиус орбиты никаких ограничений не накладывається, как это имеет место в классической физике, то энергия может принимать любые по модулю значения. Но согласно (3) существует лишь дискретный набор возможных значений радиуса; подставляя их в (4), получаем соответствующий набор допустимых значений энергии атома водорода (7):

$$E = -\frac{ke^2}{2r_n} = -\frac{k^2me^4}{2(\hbar)^2n^2}, (n = 1, 2, 3, \dots)$$

Основное состояние атома водорода - это состояние с наименьшей энергией. В основном состоянии атом может находиться неограниченно долго. После вычисления:

$$E_1 = -2,18 \cdot 10^{-18} \text{ Дж} = -13,6 \text{ ЭВ.}$$

Если атом находится в основном состоянии, то для выбивания электрона нужно сообщить атому энергию, равную как минимум 13,6 эВ. Эта величина носит название энергии ионизации атома водорода.

получим уравнение для определения энергии ε , излучаемой (или поглощаемой) атомом при переходе электрона с одной орбиты на другую:

$$\varepsilon = E_n - E_k = \frac{1}{(4\pi\varepsilon_0)^2} \cdot \frac{me^4}{2\hbar^2} \left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

Удаление электрона из атома водорода (этот процесс называется ионизацией атома) требует затраты энергии, которая в соответствии с предыдущей формулой имеем величину

$$E_j = \frac{1}{(4\pi\varepsilon_0)^2} \cdot \frac{me^4}{2\hbar^2}$$

E_j - энергия ионизации атома. Для атома водорода 13,6 эВ

Возвращение атома в нормальное состояние может происходить ступенчато, как показано на схеме



Например, возможен переход с любого уровня $n \geq 2$ на нормальный уровень 1. В спектре излучения водорода это соответствует серии линий **Лаймана**. Величина испущенных квантов энергии этой серии может быть

вычислена

$$\varepsilon = E_j \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

$$n = 2, 3, 4, 5, \dots,$$

Возможен также переход с любого вышележащего

$$\varepsilon = E_j \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

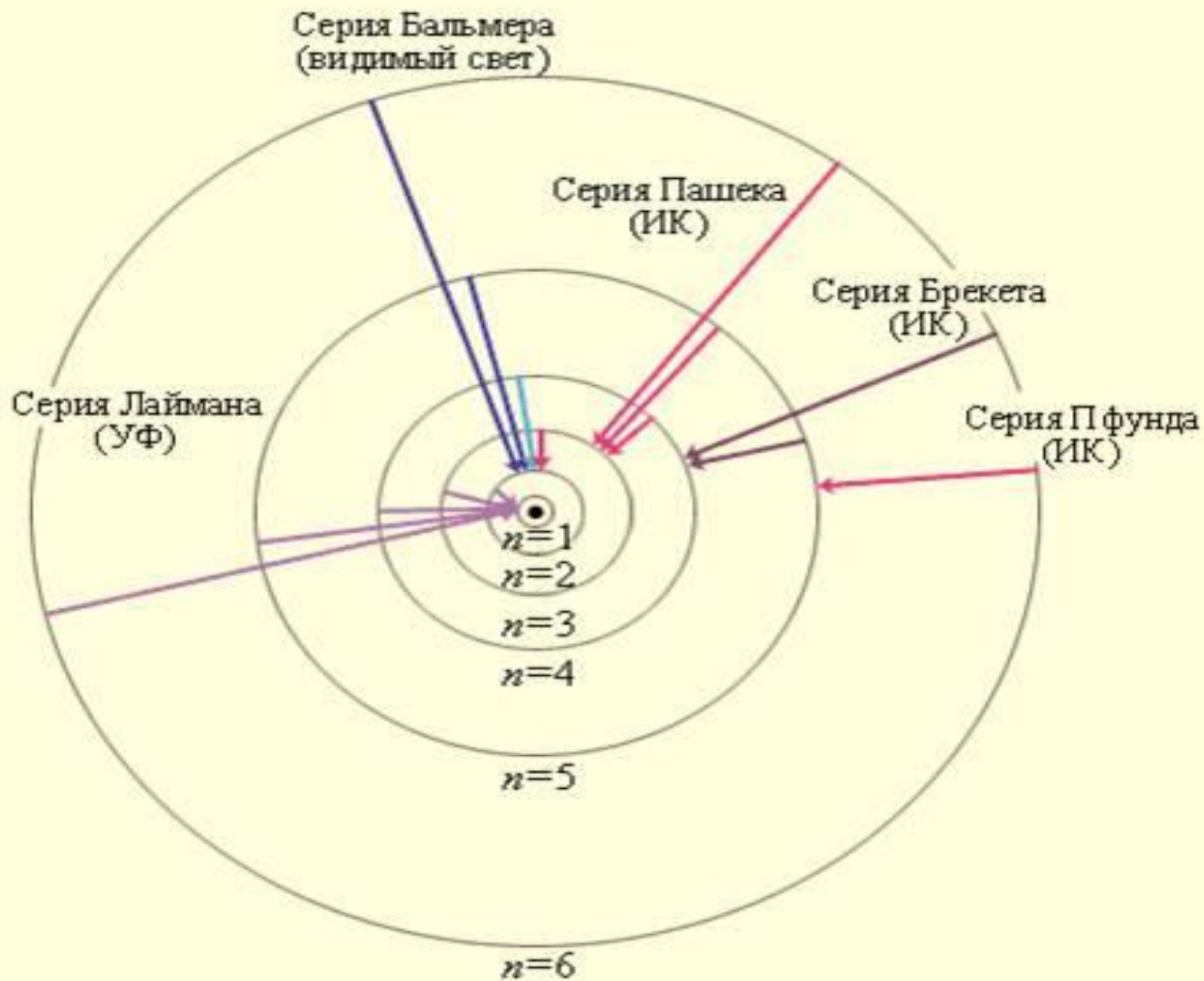
что ведет к излучению другой серии линий в спектре водорода, серии **Бальмера**. Она лежит в **видимой** области спектра.

Переход атомов с вышележащих уровней на уровни 3, 4, т.д. приводит к излучению новых серий в спектре водорода, также невидимых, лежащих уже в **инфракрасной** области. Так при $k = 3$ и $n = 4, 5, 6, \dots$, образуется серия Пашена:

Таким образом, теория Бора объяснила структуру спектра излучения атома водорода. Однако для более сложных атомов она уже не дает хороших результатов, отвечающих опытным данным. Для расчета λ можно воспользоваться формулой Бальмера:

$$\frac{1}{\lambda} = RZ^2 \left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

Постоянная Ридберга
($R = 1,1 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$ или $R = 3,29 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$)



образование спектральных серий в излучении атома водорода при переходе электрона с высоких стационарных орбит на более низкие.

диаграмма энергетических уровней атома водорода и указаны переходы, соответствующие различным спектральным сериям. Для первых пяти линий серии Бальмера в видимой части спектра указаны длины волн.



Прекрасное согласие боровской теории атома водорода с экспериментом служило веским аргументом в пользу ее справедливости. Однако попытки применить эту теорию к более сложным атомам не увенчались успехом. Бор не смог дать физическую интерпретацию правилу квантования.

Успехи теории Бора в объяснении спектральных закономерностей в изучении атома водорода были поразительны. Стало ясно, что атомы – это квантовые системы. Энергетические уровни стационарных состояний атомов дискретны.

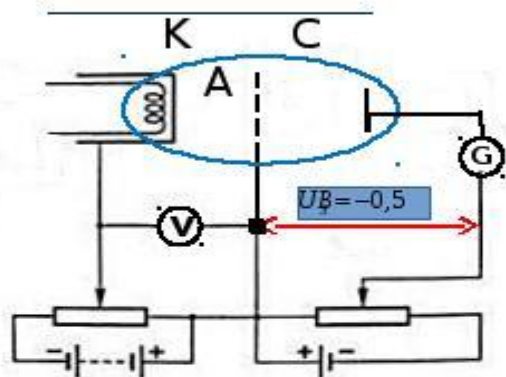
Почти одновременно с созданием теории Бора было получено прямое экспериментальное доказательство существования стационарных состояний атома и квантования энергии.

Дискретность энергетических состояний атома была продемонстрирована в опыте Д. Франка и Г. Герца (1913 г.), в котором исследовалось столкновение электронов с атомами

Опыт Франка и Герца (1914).

Цель опыта: экспериментальное доказательство существования дискретных энергетических состояний в атоме (1-ый постулат Бора).

Схема опыта:



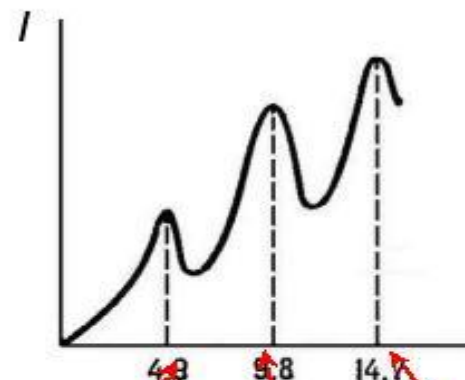
1. Пары Hg в откаченном объёме;
2. Катод-сетка: ускор. разность потенциалов
3. Сетка-анод: задерживающая разность потенциалов

Если при столкновении внутренняя энергия атома ртути не меняется (упругое столкновение), энергия электрона практически не меняется (из-за разницы масс).

Атом поглощает энергию (механическую) дискретно!

Доказательство 1-го постулата Бора.

Результат эксперимента:



Ускоряющее напряжение, В

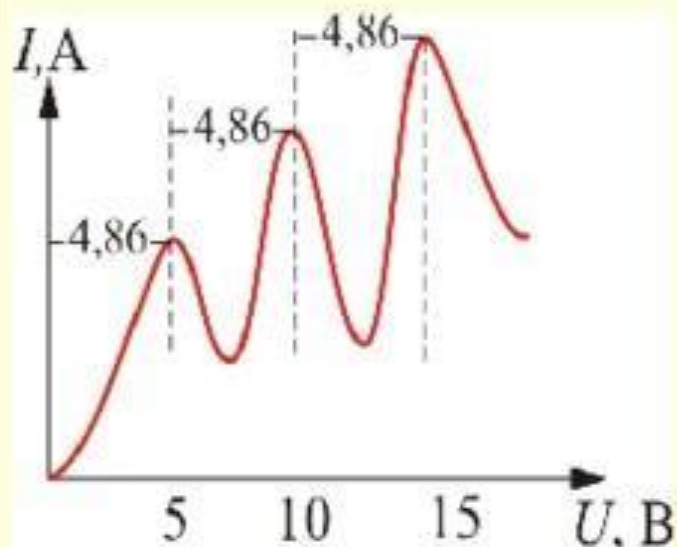


Комптон 1925. При $U > 4.9$ В атомами ртути излучается свет с $\lambda = 0.2537 \mu\text{м}$ (УФ)

$\lambda = 0.2537 \mu\text{м}$ ↔ Фотон $h\nu = 4.9$ эВ

Доказательство второго постулата Бора

Опыт Франка и Герца.



- при увеличении U вплоть до 4,86 В ток I возрастает монотонно,
- при $U = 4,86$ В ток максимален, затем резко уменьшается и возрастает вновь.
- дальнейшие максимумы тока наблюдаются при $U = 2 \cdot 4,86$ В, $3 \cdot 4,86$ В...

Согласно боровской теории, каждый из атомов ртути может получить лишь вполне определенную энергию, переходя в одно из возбужденных состояний.

Поэтому если в атомах действительно существуют стационарные состояния, то электроны, сталкиваясь с атомами ртути, должны терять энергию **дискретно, определенными порциями**, равными разности энергии соответствующих стационарных состояний атома.

Оказалось, что если энергия электронов меньше 4,9 эВ, то их столкновение с атомами ртути происходит по закону абсолютно упругого удара. Если же энергия электронов равна 4,9 эВ, то столкновение с атомами ртути приобретает характер неупругого удара, т. е. в результате столкновения с неподвижными атомами ртути электроны полностью теряют свою кинетическую энергию. Это означает, что атомы ртути поглощают энергию электрона и переходят из основного состояния в первое возбужденное состояние,

Согласно боровской концепции, при обратном самопроизвольном переходе атома ртути должна испускать кванты с частотой $1,2 \cdot 10^{15}$ Гц. Спектральная линия с такой частотой действительно была обнаружена в ультрафиолетовой части спектра в излучении атомов ртути.

Представление о дискретных состояниях противоречит классической физике. Поэтому возник вопрос, не опровергает ли квантовая теория законы классической

Квантовая физика не отменила фундаментальных классических законов сохранения энергии, импульса, электрического заряда и т. д. Согласно сформулированному Н. Бором принципу соответствия квантовая физика включает в себя законы классической физики, и при определенных условиях можно обнаружить плавный переход от квантовых представлений к классическим. Это можно видеть на примере энергетического спектра атома водорода. При больших квантовых числах $n \gg 1$ дискретные уровни постепенно сближаются, и возникает плавный переход в область непрерывного спектра, характерного для классической физики.

Половинчатая, полуклассическая теория Бора явилась важным этапом в развитии квантовых представлений, введение которых в физику требовало кардинальной осуществлено в 20-е – 30-е годы XX века.

Представление Бора об определенных орбитах, по которым движутся электроны в атоме, оказалось весьма условным. На самом деле движение электрона в атоме очень мало похоже на движение планет или спутников. Физический смысл имеет только вероятность обнаружить электрон в том или ином месте, описываемая квадратом модуля волновой функции $|\Psi|^2$. Волновая функция Ψ является решением основного уравнения квантовой механики – уравнения Шредингера.

§ 8.5. Теория атома водорода по Бору

Второй закон Ньютона

$$\frac{Ze \cdot e}{4\pi\epsilon_0 r^2} = \frac{m_e v^2}{r}$$

$$\frac{m_e v^2}{2} = \frac{1}{2} \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r}$$

Радиус n -ой стационарной орбиты электрона :

$$r_n = n^2 \frac{\hbar \cdot 4\pi\epsilon_0}{m_e Ze^2} \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

Для водорода ($Z=1$) радиус первой орбиты (первый боровский радиус) $a_0 = 5,28 \cdot 10^{-11}$ м.

$$E = \frac{m_e v^2}{2} - \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r} = -\frac{1}{2} \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r}$$

Полная энергия электрона :

$$E_n = -\frac{1}{n^2} \frac{Z^2 m_e e^4}{8h^2 \epsilon_0^2}$$

где знак минус означает, что электрон находится в связанном состоянии.

Полная энергия
электрона в атоме равна
сумме потенциальной и
кинетической энергий

$$E = \frac{mv^2}{2} - \frac{e^2}{r} = -\frac{e^2}{2r}$$

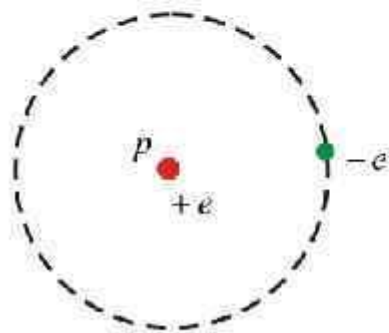
Подставляя в это выражение значение r ,
получим значения энергий электрона,
получим:

$$E_n = -\frac{me^4}{2\hbar^2} \frac{1}{n^2}$$

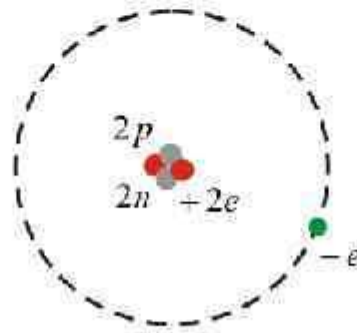
Теория Бора прекрасно описывает атом
водорода, объясняет закономерности в спектрах
атома водорода, но не работает в случае уже
второго элемента в таблице Менделеева – гелия.
Тем не менее, Бором был сделан серьезный шаг
для **перехода от классической теории к**

Водородоподобные атомы

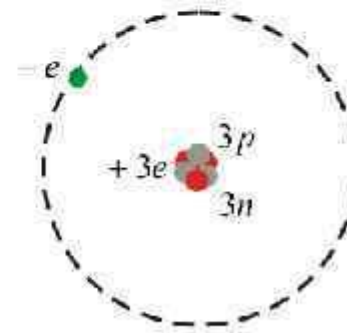
- Водородоподобные атомы (ионы) содержат один электрон, который движется в кулоновском потенциальном поле ядра с положительным зарядом, равным $+Ze$, где $Z = 1$ для атома водорода, $Z = 2$ для ионизированного атома гелия (He^+), $Z = 3$ для дважды ионизированного атома лития (Li^{++}) и т.д.



атом водорода, $Z = 1$



ион гелия, $Z = 2$



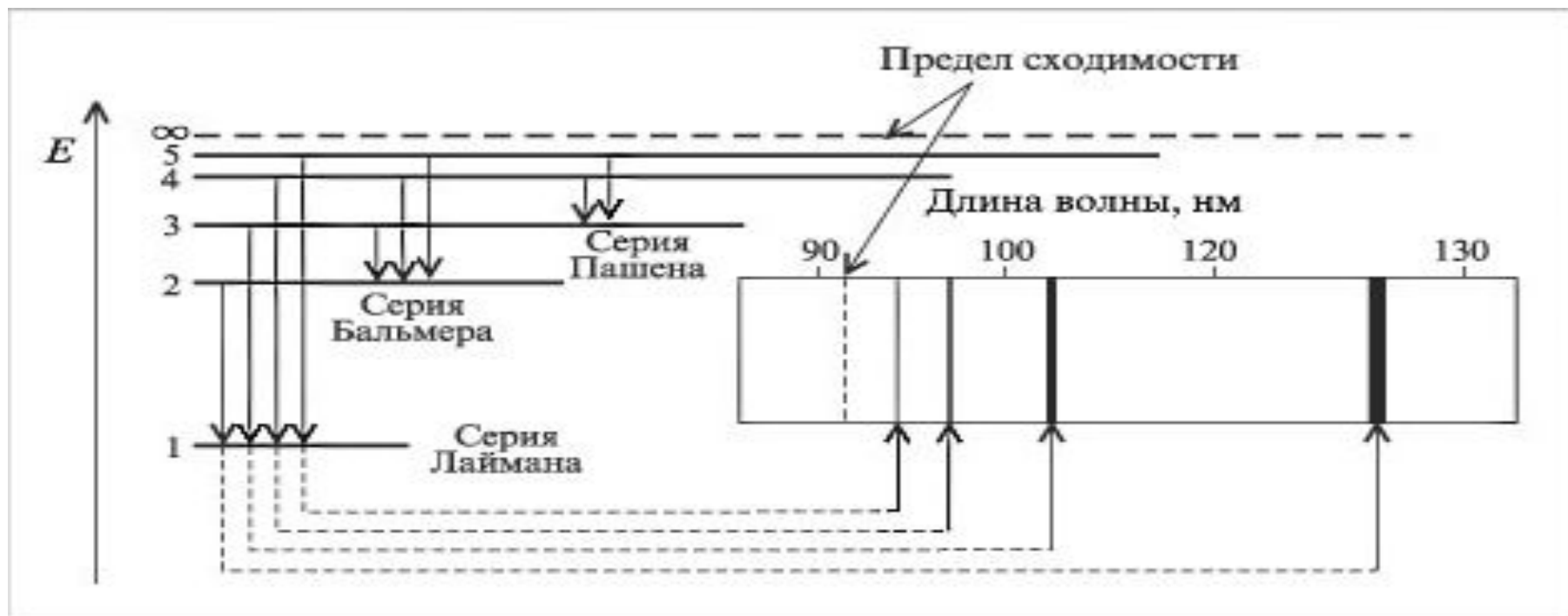
ион лития, $Z = 3$

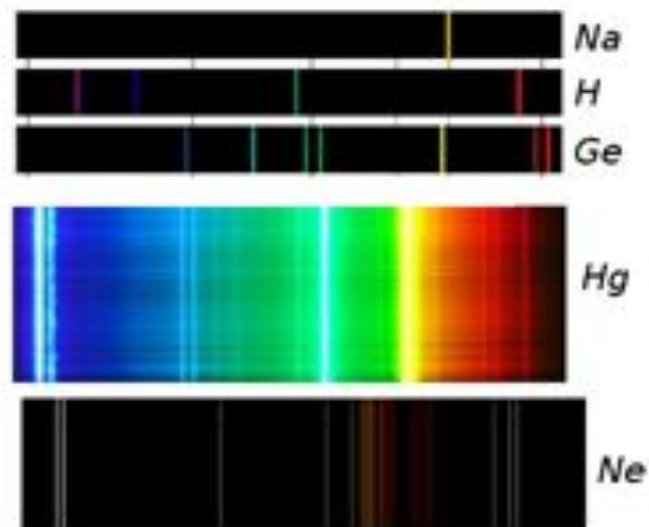
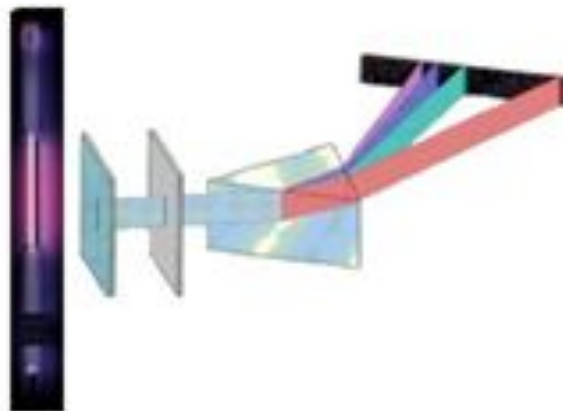
В модели атома водорода Бор использовал следующие положения (постулаты):

- При движении по любой стационарной орбите запас энергии электрона ($E_1, E_2 \dots$) остается постоянным. Чем ближе к ядру расположена орбита, тем меньше запас энергии электрона $E_1 < E_2 \dots < E_n$. Энергия электрона на орбитах определяется уравнением
- при переходе с одной орбиты на другую электрон поглощает или выделяет квант (порцию) энергии.

Если подвергнуть атомы воздействию (нагреванию, облучению и др.), то электрон может поглотить квант энергии и перейти на более удаленную от ядра орбиту. В этом случае говорят о возбужденном состоянии атома. При обратном переходе электрона (на более близкую к ядру орбиту) энергия выделяется в виде кванта лучистой энергии – фотона. В спектре это фиксируется определенной линией.

Бор рассчитал длины волн для всех серий в спектре атома водорода. Полученные результаты соответствовали экспериментальным данным. Стало ясным происхождение прерывистых линейчатых спектров. Они – результат излучения энергии атомами при переходе электронов из возбужденного состояния в стационарное. Переходы электронов на 1-ю орбиту образуют группу частот серии Лаймана, на 2-ю – серию Бальмера, на 3-ю серию Пашена



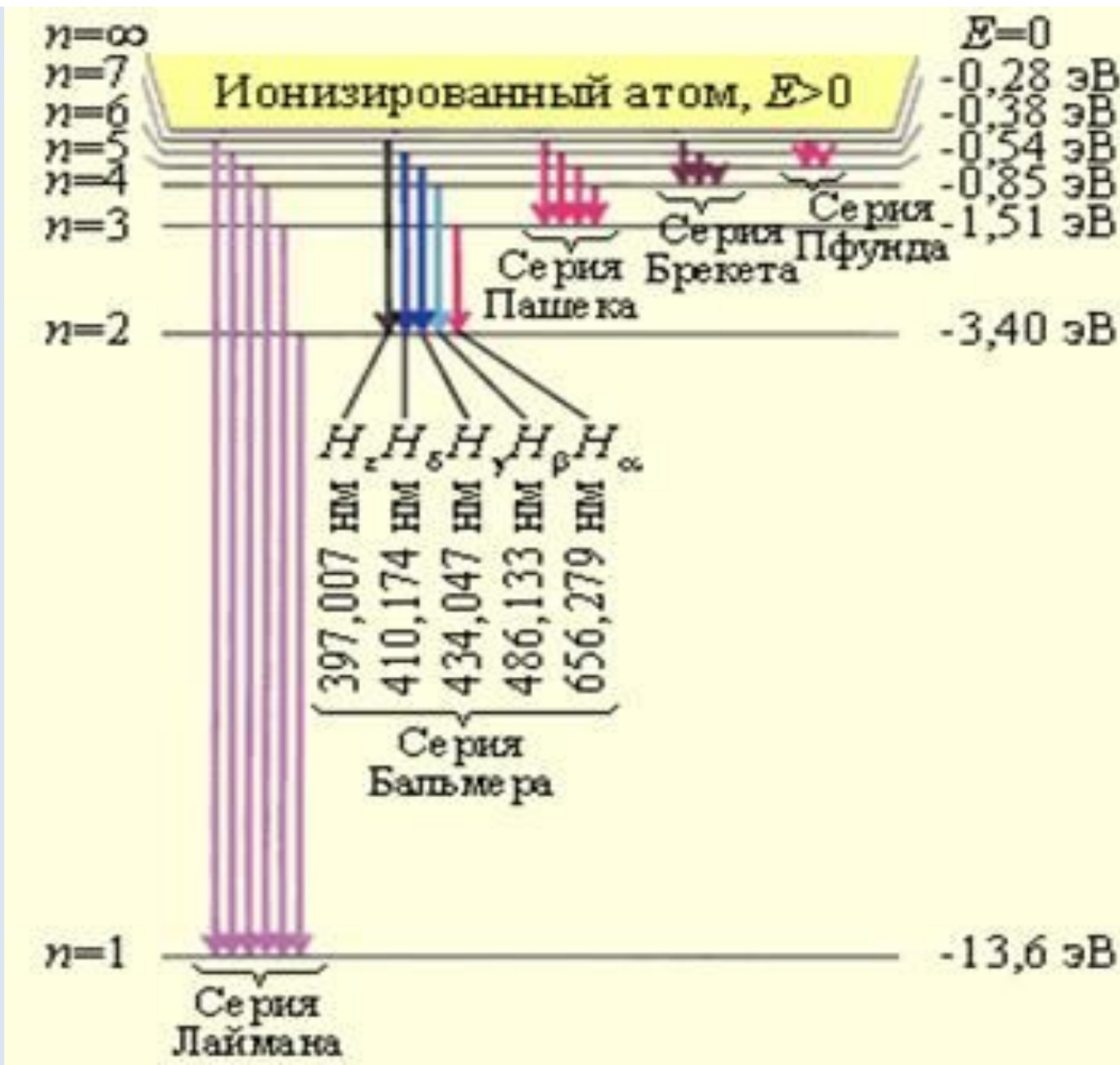


**Для атомов
каждого вещества
характерен свой
спектр.**



Линейчатые спектры испускания атомо
(окрашенные изображения щели)

Энергетические уровни электрона в атоме водорода и спектр его излучения



Спектр излучения атома водорода

Формула Бальмера, 1885 г.

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right), \text{ где } n = 3, 4, 5 \dots$$

постоянная Ридберга

$$R = 1,097 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}.$$



Johann Jakob Balmer
(1825 – 1898) швейц.



Johannes Robert Rydberg
(1854 - 1919) швед.

Видимые линии излучения водорода в серии Бальмера.
 H_{α} — красная линия справа, имеющая длину волны 656,3 нм.
Самая левая линия — H_{ϵ} , соответствует излучению уже в ультрафиолетовой области спектра на длине волны 397,0 нм.

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right), \text{ где } n_1 = 1, 2, 3 \dots, n_2 = n_1 + 1, n_1 + 2, n_1 + 3 \dots$$

Обобщенная сериальная формула Бальмера

$$\frac{1}{\lambda} = R Z^2 \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad m = (1, 2, 3 \dots), \quad n = (m+1, m+2, m+3 \dots)$$

Где R - постоянная Ридберга, m, n – главные квантовые числа, Z - порядковый номер химического элемента, λ - длина волны.

Эта формула определяет длину волны света, излучаемого или поглощаемого атомом водорода (водородоподобным ионом) при переходе из одного стационарного состояния в другое.

Название серии	λ, А Экспериментальная	λ, А Вычисленная Бором
Пашена	18751,3 12817,5 10938,0 10045,8	18756 12822 10941 10052
Бальмера	6564,66 4862,71 4102,91 3971,20 3799,00 3712,70	6564,70 4862,80 4341,70 4102,93 3971,23 3799,01 3712,62
Лаймана	1216 1028 972	1215,68 1025,73 972,5

Проверка формулы Бора для серий водородного спектра

ТЕОРИЯ АТОМА БОРА

Закономерности в атомных спектрах

$$\omega = R\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2}\right) \quad (2), \text{ где } R - \text{ постоянная Ридберга.}$$

$R = 2,07 \cdot 10^{16} \text{ с}^{-1}$, (2) – формула Бальмера, серия линий-серия Бальмера. Дальнейшие исследования – еще несколько серий:

Серия Лаймана

$$\omega = R\left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2}\right), \quad n = 2, 3, 4, \dots \quad (V\Phi)$$

Серия Пашена

$$\omega = R\left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2}\right), \quad n = 4, 5, 6, \dots \quad (ИК)$$

Серия Брэкета

$$\omega = R\left(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{n^2}\right), \quad n = 5, 6, 7, \dots \quad (ИК)$$

Серия Пфунда

$$\omega = R\left(\frac{1}{5^2} - \frac{1}{n^2}\right), \quad n = 6, 7, 8, \dots \quad (ИК)$$

Можно объединить: $\omega = R\left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2}\right) \quad (3), \quad m = 1, 2, 3, \dots ; n = m + 1.$

(3) – обобщенная формула Бальмера. При $n \rightarrow \infty$, граница серии $\Rightarrow R/m^2$.

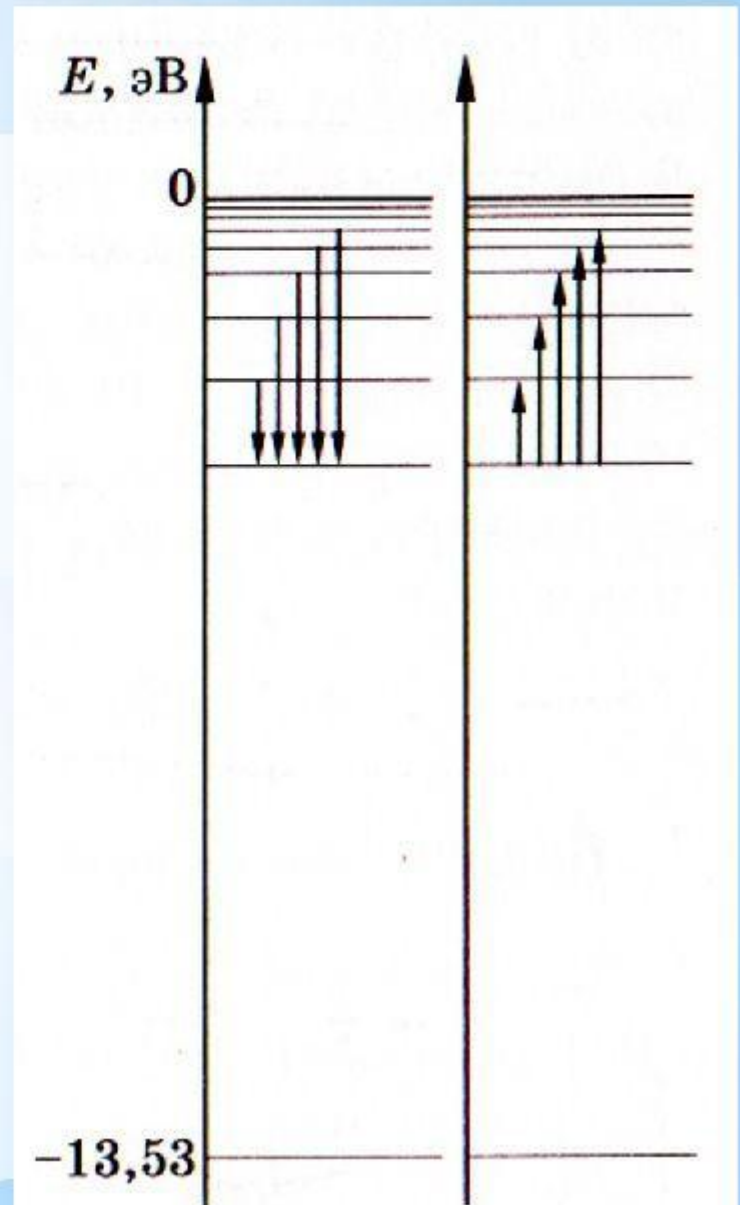
Энергия стационарных состояний

$$r_n = \frac{\hbar^2 n^2}{me^2} - \text{радиус орбит.}$$

$$E = -\frac{e^2}{2r} - \text{энергия}$$

$$E = -\frac{e^2 me^2}{2\hbar^2 n^2} = -\frac{me^4}{2\hbar^2 n^2} \quad \begin{array}{l} \text{- дискретные} \\ \text{(прерывистые)} \\ \text{значения} \end{array}$$

энергий стационарных состояний атома
(энергетические уровни).



, Теория Бора не смогла объяснить расщепление линий в спектрах многоэлектронных атомов. Бор исходил из того, что электрон – это частица, и использовал для описания электрона законы, характерные для частиц.

Вместе с тем накапливались факты, свидетельствующие о том, что электрон способен проявлять и волновые свойства.

Классическая механика оказалась не в состоянии объяснить движение микрообъектов, обладающих одновременно свойствами материальных частиц и свойствами волны. Эту задачу позволила решить квантовая механика – физическая теория, исследующая общие закономерности движения и взаимодействия микрочастиц, обладающих очень малой массой

Свойства элементарных частиц, образующих атом

Частица	Заряд		Масса	
	Кл	Условн.ед.	г	А.е.м.
Электрон	$-1,6 \cdot 10^{-19}$	-1	$9,10 \cdot 10^{-28}$	0,00055
Протон	$1,6 \cdot 10^{-19}$	+1	$1,67 \cdot 10^{-24}$	1,00728
Нейтрон	0	0	$1,67 \cdot 10^{-24}$	1,00866

Достоинства и недостатки теории Бора.

О достоинствах модели атома водорода, предложенной Бором, мы так или иначе уже сказали. Резюмируем их.

- Теория Бора продемонстрировала, что для описания атомных объектов принципиально недостаточно представлений классической физики. В микромире работают другие, совершенно новые законы. Для микромира характерно квантование - дискретность изменения величин, описывающих состояние объекта. В качестве меры квантования, как показала теория Бора, может выступать постоянная Планка h , которая является универсальной константой и играет фундаментальную роль во всей физике микромира (а не только в явлениях излучения и поглощения света).
- Теория Бора впервые и совершенно точно указала на факт

щих дискретный набор. Этот факт оказался общим свойством объектов микромира.

- В рамках модели Бора удалось получить формулы для вычисления частот спектра атома водорода и объяснить размер атома. Классическая физика была не в состоянии решить эти проблемы.

Однако теория Бора, разумеется, не могла претендовать на роль общей теории, описывающей микромир. Модель Бора обладала рядом существенных недостатков

- Теория Бора непоследовательна. С одной стороны, она отвергает описание атома на основе классической физики, так как постулирует наличие стационарных состояний и правила квантования, непонятных с точки зрения механики и электро-динамики. С другой стороны, классические законы - второй закон Ньютона и закон

- уравнения движения электрона по круговой орбите
- Теория Бора не смогла дать адекватное описание самого простого после водорода атома гелия. Подавно не могло быть и речи о распространении теории Бора на более сложные атомы.
- -Даже в самом атоме водорода теория Бора смогла описать не всё. Например, дав выражения для частот спектральных линий, модель Бора не объясняла различие в их интенсивностях. Кроме того, неясен оставался механизм образования молекулы водорода из двух атомов.

Несмотря на свои недостатки, теория Бора стала важнейшим этапом развития физики микромира. Полуклассическая-полуквантовая модель Бора послужила промежуточным звеном между классической физикой и последовательной квантовой механикой, построенной десятилетием

ЭЛЕМЕНТАРНАЯ БОРОВСКАЯ ТЕОРИЯ ВОДОРОДНОГО АТОМА

Теория Бора сыграла большую роль в развитии квантовой механики. Однако, она не лишена недостатков:

1. Она внутренне противоречива: с одной стороны, использовалась механика Ньютона, с другой – привлекались чуждые этой механике искусственные правила квантования.
2. «Полуклассическая» или «полуквантовая» теория Бора не также не смогла ответить на вопрос, как движется электрон при переходе с одного уровня энергии на другой.
3. Теория не позволяла описывать атомы с числом электронов больше единицы.

Дальнейшее развитие теории микрочастиц привело к убеждению, что движение электрона в атоме нельзя описывать с помощью законов классической механики и что необходима новая теория.

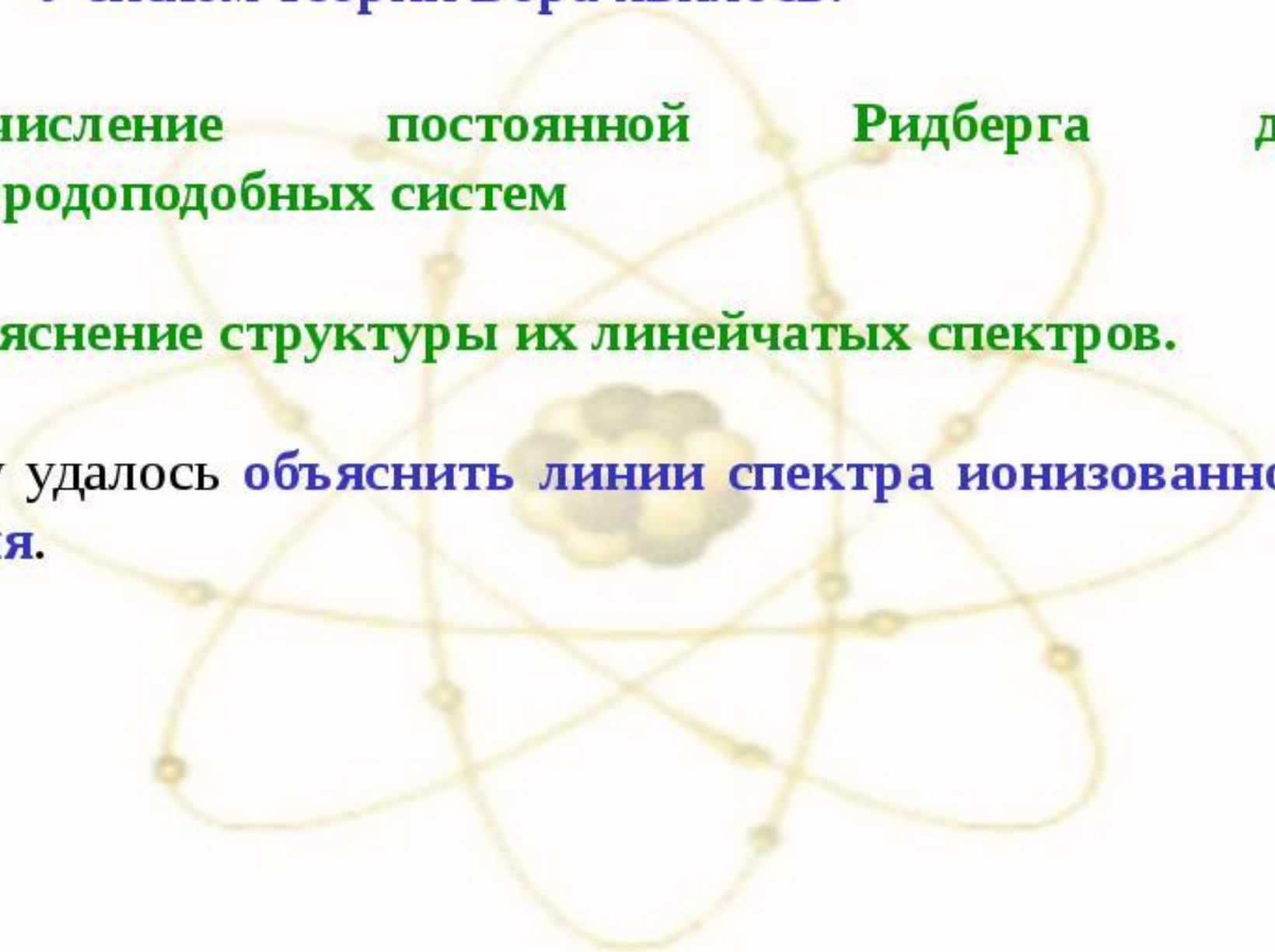
Такая (квантовая) теория была создана к 1927 году усилиями многих ученых, среди которых выдающуюся роль сыграли В.Гейзенберг, Э.Шрёдингер, М.Борн, П.Дирак.

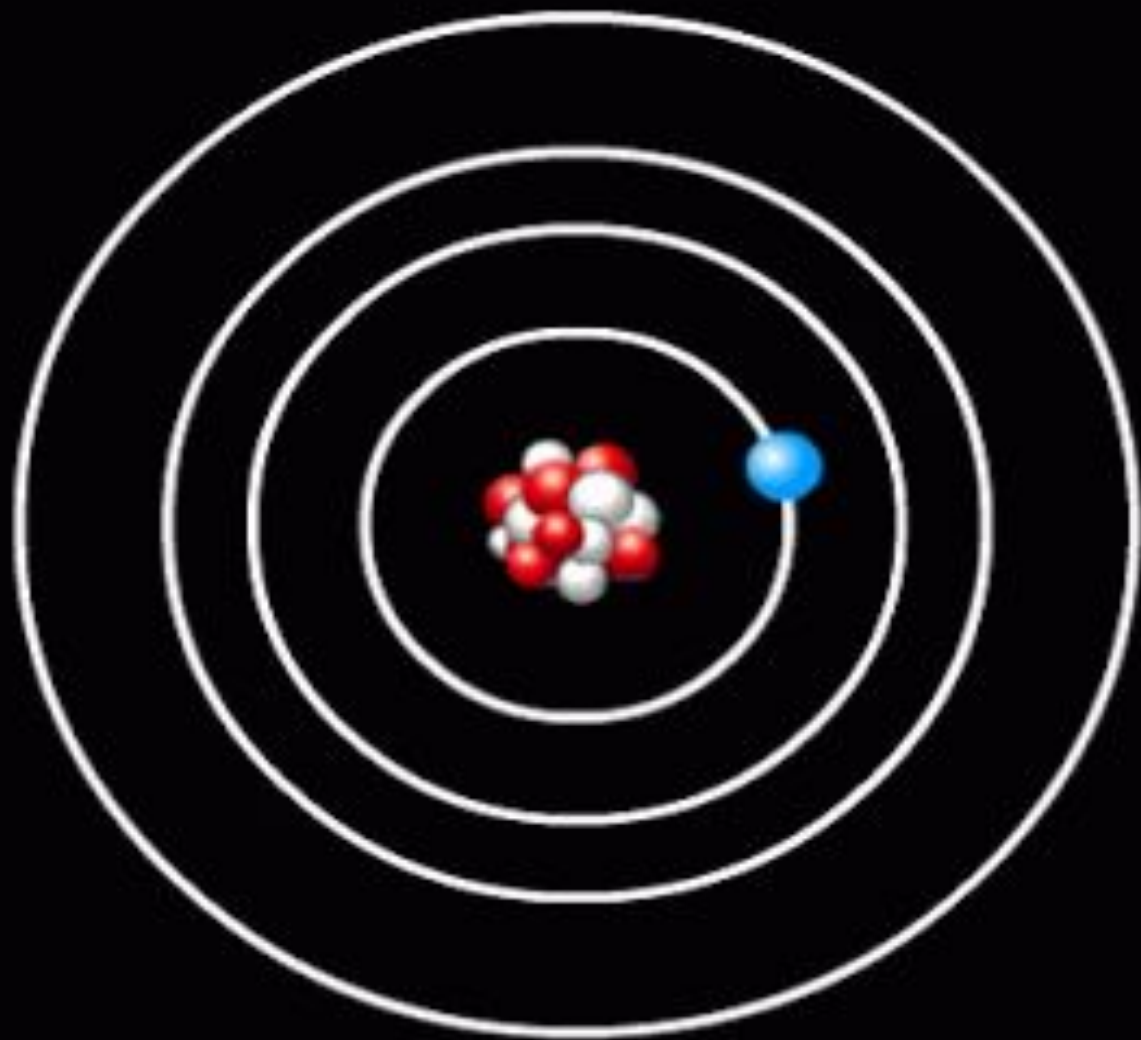
Успехом теории Бора явилось:

• вычисление постоянной Ридберга для водородоподобных систем

• объяснение структуры их линейчатых спектров.

Бору удалось объяснить линии спектра ионизованного гелия.



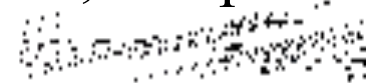


Волновая функция

Необходимость вероятностного подхода к описанию микро-частиц является важнейшей отличительной особенностью квантовой теории. Можно ли волны де Бройля истолковывать как волны вероятности, т. е. считать, что вероятность обнаружить микрочастицу в различных точках пространства меняется по волновому закону? Такое толкование волн де Бройля уже неверно хотя бы потому, что тогда вероятность обнаружить частицу в некоторых точках пространства может быть отрицательна, что не имеет смысла.

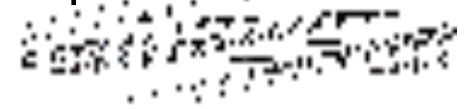
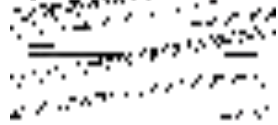
Чтобы устранить эти трудности, немецкий физик М. Борн (1882—1970) в 1926 г. предположил, что по волновому закону меняется не сама вероятность, а величина, названная амплитудой вероятности и обозначаемая $Y(x, y, z, t)$. Эту величину называют также волновой функцией (или Y -функцией).

Амплитуда вероятности может быть комплексной, и вероят-ность W пропорциональна квадрату ее модуля



Таким образом, описание состояния микрообъекта с помощью волновой функции имеет статистический, вероятностный характер: квадрат модуля волновой функции (квадрат модуля амплитуды волн де Бройля) определяет вероятность нахождения частицы в момент времени t в области с координатами x и $x+dx$, y и $y+dy$, z и $z+dz$.

Волновая функция является основным носителем информации о корпускулярных и волновых свойствах микрочастиц. Вероятность нахождения частицы в элементе объемом dV равна



Величина $|\Psi|^2$ (квадрат модуля Ψ -функции) имеет смысл плотности вероятности, т. е. определяет вероятность нахождения частицы в единичном объеме в окрестности точки с координатами x , y , z . Таким образом, физический смысл имеет не сама Ψ -функция, а квадрат ее модуля $|\Psi|^2$, которым задается интенсивность волн де Бройля.

Частица должна находиться где-то в пространстве.
Следовательно, условие нормировки вероятностей



де данный интеграл вычисляется по всему бесконечному пространству, т. е. по координатам x, y, z от $-\infty$ до ∞ . Таким образом, данное условие) говорит об объективном существовании частицы в пространстве.

Чтобы волновая функция являлась объективной характеристикой состояния микрочастиц, она должна удовлетворять ряду ограничительных условий.

- Функция Y , характеризующая вероятность обнаружения действия микрочастицы в элементе объема, должна быть конечной (вероятность не может быть больше единицы),
- однозначной (вероятность не может быть неоднозначной величиной) и
- непрерывной (вероятность не может изменяться скачком).

Величина $|\Psi|^2$ имеет смысл **плотности вероятности** ρ_w

$$\rho_w = \frac{dw}{dV} = |\Psi|^2$$

Сама волновая функция Ψ имеет смысл **амплитуды вероятности**

Условие нормировки вероятностей получается из того, что вероятность существования частицы, где-либо в пространстве равна единице (интеграл вычисляется по всему бесконечному пространству)

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |\Psi|^2 dV = 1$$

Волновая функция, характеризующая вероятность обнаружения микрочастицы в элементе объема должна быть

- 1) конечной** (вероятность не может быть больше единицы),
- 2) однозначной** (вероятность не может быть неоднозначной величиной)
- 3) непрерывной** (вероятность не может изменяться скачком).