Занятие № 6 «Фундаментальные опыты в квантовой физике»

Оперативные цели: ученики должны знать на уровне воспроизведения имена и биографии ученых, внесших вклад в развитие квантовой физики;

Ученики должны знать и понимать (на уровне воспроизведения) смысл основных понятий квантовой механики (определение фотоэффекта, красной границы и тд).

Ученик должен уметь проводить компьютерный эксперимент и уметь прогнозировать его результат.

План занятия:

1. Теоретическая часть
2. Зарождение квантовой теории
3. Фундаментальные опыты
* Корпускулярно-волновой дуализм света
* Опыты Столетова по изучению фотоэффекта. Красная граница фотоэффекта. Теория фотоэффекта Эйнштейна
* Опыт Франка–Герца
* Эксперименты Э. Резерфорда по рассеянию альфа-частиц на атомах тяжелых элементов
1. Боровская модель атома
2. Практическая часть
* Демонстрация фотоэффекта
* Камера Вильсона (демонстрация компьютерное моделирование)
* Изучение атомных спектров (компьютерное моделирование)
* Лабораторная работа (компьютерное моделирование)

«Изучение фотоэффекта»

*Теоретическая часть*

**Учитель:**

В конце XIX в. многие ученые считали, что развитие физики завершилось по следующим причинам:

1. Больше 200 лет существуют законы механики, теория всемирного тяготения.
2. Разработана МКТ.
3. Подведен прочный фундамент под термодинамику.
4. Завершена максвелловская теория электромагнетизма.

Открыты фундаментальные законы сохранения (энергии, импульса момента импульса, массы и электрического заряда). В конце XIX -- начале XX в. открыты [В. Рентгеном](http://www.eduspb.com/node/1100) — X-лучи (рентгеновские лучи), [А. Беккерелем](http://www.eduspb.com/node/142) — явление радиоактивности, [Дж. Томсоном](http://www.eduspb.com/node/1263) —электрон. Однако классическая физика не сумела объяснить эти явления.

Теория относительности [А. Эйнштейна](http://www.eduspb.com/node/1522) потребовала коренного пересмотра понятии пространства и времени. Специальные опыты подтвердили справедливость гипотезы [Дж. Максвелла](http://www.eduspb.com/node/821) об электромагнитной природе света. Можно было предположить, что излучение электромагнитных волн нагретыми телами обусловлено колебательным движением электронов. Но это предположение нужно было подтвердить сопоставлением теоретических и экспериментальных данных. Для теоретического рассмотрения законов излучений использовали *модель абсолютно черного тела*, т. е. тела, полностью поглощающего электромагнитные волны любой длины и, соответственно, излучающего все длины электромагнитных волн. Примером абсолютно черного тела по излучающей способности может быть Солнце, по поглощающей - полость с зеркальными стенками с маленьким отверстием. Австрийские физики [И. Стефан](http://www.eduspb.com/node/1205) и [Л. Больцман](http://www.eduspb.com/node/189) экспериментально установили, что полная энергия *Е,* излучаемая за 1 с абсолютно черным телом с единицы поверхности, пропорциональна четвертой степени абсолютный температуры *Т:*

,  где s = 5,67.10-8  Дж/(м2.К-с)—постоянная Стефана-Больцмана.

Этот закон был назван *законом Стефана — Больцмана.* Он позволил вычислить энергию излучения абсолютно черного тела по известной температуре. При заданном значении температуры *Т* интенсивность излучения черного тела максимальна и соответствует  определенному значению длины волны l. Немецкий физик В. Вин обнаружил, что при изменении температуры длина волны, на которую приходится максимальная энергия Еmax, убывает обратно пропорционально температуре, поэтому  (закон Вина). Используя законы термодинамики, В. Вин получил закон распределения энергии в спектре черного тела, который совпадал с экспериментальными результатами лишь в области больших частот. Английский физик [Дж. Рэлей](http://www.eduspb.com/node/1064) сделал попытку более строгого теоретического вывода закона распределения энергии. по закон приводил к хорошему совпадению с опытами в области малых частот. По этому закону интенсивность излучения должна возрастать пропорционально квадрату частоты. Следовательно, в тепловом излучении должно быть много ультрафиолетовых и рентгеновских лучей, чего на опыте не наблюдалось. Затруднения в согласовании теории с результатами эксперимента получили название *ультрафиолетовой катастрофы.* Законы электромагнетизма, полученные Максвеллом, оказались не в состоянии объяснить форму кривой  распределения интенсивности в спектре абсолютно черного тела. При удалении от этого значения интенсивность электромагнитного излучения плавно убывает Стремясь преодолеть затруднения классической теории при объяснении излучения черного тела, [М. Планк](http://www.eduspb.com/node/990) в 1900 г. высказал гипотезу: *атомы испускают электромагнитную энергию от дельными порциями —квантами.* Энергия *Е* Иногда удобно измерять энергию и постоянную Планка вэлектронвольтах.

Тогда h=4,136.10-15 эВ.с. В атомной физике употребляется также величина. (1 эВ - энергия, которую приобретает элементарный заряд, проходя ускоряющую разность потенциалов 1 В. 1 эВ=1,6.10-19 Дж).

Таким образом, М. Планк указал путь выхода из трудностей, с которыми столкнулась теория теплового излучения, после чего начала развиваться современная физическая теория, называемая *квантовой физикой*

 

*Фундаментальные опыты*

**Ученик: Корпускулярно-волновой дуализм света**

Корпускулярно-волновой дуализм был выражен в гипотезе, предложенной Луи де Бройлем в 1924 году: *каждой микроскопической точечной частице с импульсом  и энергией  соответствует волна с волновым вектором  и частотой *,


Смысл слова «соответствует», так же как и природа волны  была не прояснена. Также не было объяснено, как должна выглядеть волна, соответствующая частице, находящейся в потенциальном поле, когда импульс начинает зависеть от координаты. Тем не менее, ожидалось, что такие волны должны интерферировать и поэтому можно проводить соответствующие опыты.

Опыт по *дифракции электронов* и был поставлен Клинтоном Дэвиссоном и Лестером Джермером тремя годами позже, т.е. в 1927 году. В качестве дифракционной решетки использовалась атомная кристаллическая решетка монокристалла никеля (см. рис. ниже).

На спиленный под углом  монокристалл направлялся пучок электронов, разогнанный в электронной пушке ***G*** до определенной энергии: с точки зрения де Бройля, такие частицы должны были обладать определенным импульсом, а, следовательно, определенной длиной волны. Для частиц, пролетевших разность потенциалов  кинетическая энергия равна , так что длина волны



После выхода из никелевого кристалла интенсивность пучка под углом  измерялась с помощью *цилиндра Фарадея****C***. Последний, по сути дела, есть металлический анод, к которому подключается источник ЭДС и последовательно с источником — амперметр. Все электроны, падающие на цилиндр, поглощаются им и посылаются ЭДС источника через амперметр, который фиксирует их количество в единицу времени. В итоге измеряется поток падающих на цилиндр электронов.

Опыт показал наличие пиков на угловой зависимости потока электронов от угла дифракции , аналогичное дифракционным пикам для световых волн. Дифракционные максимумы приходились на те углы рассеяния, для которых между электронами, отразившимися от соседних кристаллических плоскостей в кристалле никеля, было целое число длин волн (*условие Брэгга–Вульфа*):



где расстояние между плоскостями  — это не что иное, как период кристаллической решетки. Для никеля эта величина составляет 4 ангстрема. В опыте Дэвиссона–Джермера электроны разгонялись в потенциале порядка , тогда их длины волн имеют порядок одного-двух ангстрем, и дифракционные минимумы и максимумы ясно различимы.

Изменяя напряжение между катодом и анодом электронной пушки, Дэвиссон и Джермер наблюдали сдвиги интерференционной картины, что свидетельствовало об изменении длины волны пучка падающих электронов. Это изменение оказалось в полном соответствии с гипотезой де Бройля. В итоге де Бройлю была присуждена Нобелевская премия 1929 года по физике за предсказание волн материи, а Дэвиссону — премия 1937 года за открытие волн материи.

**Ученик: Опыты Столетова по изучению фотоэффекта. Красная граница фотоэффекта. Теория фотоэффекта Эйнштейна**

Опыты Столетова стали классическими экспериментами не только в рамках квантовой физики, но и всей физики вообще. Действительно, на их основе можно показать, как должен действовать чистый экспериментатор, желающий всесторонне исследовать явление и, насколько это возможно, дать ему описание в количественных категориях. В XX веке такое прямое исследование явлений стало с трудом осуществимым: для проведения и интерпретации результатов эксперимента необходимо задаться одной или несколькими теориями, претендующими на описание данного явления.

В конце XIX века хоть сколько-нибудь основательной теории фотоэффекта не существовало; даже экспериментальные данные по нему были отрывочными и в основном качественными (см. предыдуший вопрос). Поэтому Александру Григорьевичу Столетову (1839–1896) только и оставалось изучать его свойства напрямую, не подразумевая какую-либо теорию такового. Схема экспериментов Столетова 1888–1890 годов изображена на рисунке ниже.

Из герметичной камеры **B** частично или полностью откачивался воздух. Внутри этой камеры располагалось два электрода: цельный металлический катод **К** и выполненный в виде металлической сетки анод **А**. Свет от дуговой лампы проникал в камеру через кварцевое окошко **О** (стекло практически не пропускает ультрафиолет) и благодаря устройству анода свободно падал на металлическую поверхность катода. Между катодом и анодом создавалось достаточно высокое напряжение (до 250 вольт), а ток в анодной цепи измерялся с помощью чувствительного гальванометра **Г** (точность порядка A). Столетов обнаружил, что при падении света на катод в цепи начинает течь фототок, который исчезает при закрывании кварцевого окошка. Наличие фототока наблюдалось и при наличии воздуха, и при его отсутствии — поэтому эффект никак не связан с ионизацией *воздуха*электромагнитным излучением. Об отсутствии этой связи также говорит зарядовая несимметричность эффекта: при подключении к аноду*отрицательного* напряжения относительно катода ток не начинал идти и при освещении последнего (на самом деле, ничтожный ток тек, но это происходило из-за частичного поглощения света сетчатым анодом). Из опыта следовало, что источником носителей заряда фототока является не воздух, а освещаемый катод, причем заряд этих носителей отрицательный.

Таким образом, качественная сторона явления была исследована. Далее Столетов приступил к выяснению количественных характеристик фотоэффекта, освещая катод монохроматическим светом различной интенсивности  и длины волны , а также меняя напряжение батареи . Варьировалось также давление воздуха в камере, расстояние между электродами и до дуговой лампы, материал окошка и металлы, из которых выполнены катод и анод. На основе многочисленных опытов по наблюдению внешнего фотоэффекта Столетов сформулировал три эмпирических закона:

1. Фототок, возникающий при освещении отрицательного электрода светом фиксированной длины волны, пропорционален интенсивности света и площади электрода.
2. Максимальная кинетическая энергия носителей фототока линейно зависит от частоты света и не зависит от его интенсивности.
3. Фотоэффект имеет место, если частота падающего света больше некоторой пороговой частоты , зависящей только от материала катода.Данная пороговая частота называется *красной границей фотоэффекта*.

Столетов обнаружил, что у более электроотрицательных металлов (медь, золото) фотоэффект менее проявлен, чем у менее электроотрицательных (алюминий, цинк). Кроме того, он обнаружил, что фоточувствительность резко падает при намачивании катода обычной водой — несмотря на то, что она хорошо пропускает ультрафиолет. Чтобы не принимать в расчет изменения показаний гальванометра при незаметных глазу изменениях свечения электрической дуги, использовался контрольный прибор — точно такая же камера, но с не изменяемыми в течение опыта параметрами. Параметры первого прибора (напряжение между электродами, материал катода и т.д.) менялись — но перед записью новой серии данных Столетов удостоверивался в неизменности параметров дуги с помощью контрольной камеры.

Опыты Столетова явились без преувеличения *всесторонним* исследованием фотоэффекта. По сути дела, экспериментальная сторона вопроса была практически исчерпана. Оставалось построить теорию данного эффекта, что и сделал Альберт Эйнштейн (1879–1955) в 1908 году. Он обобщил введенное Максом Планком квантование энергии атомного осциллятора порциями по  на электромагнитное поле. Это был достаточно смелый шаг: Планк лишь осторожно постулировал, что энергия *передается* порциями, при этом, возможно, эта порционность связана с неизвестной науке структурой атома. Для его теории теплового излучения квантование самого электромагнитного поля было необязательным. Действительно, предположение дискретности поля — явно непрерывной субстанции с уже изученными Максвеллом и Герцем свойствами — было бы крайне неожиданным.

Эйнштейн же, придав результатам Планка фундаментальный характер и зная, что электромагнитное поле есть совокупность бесконечного числа гармонических осцилляторов, решил обобщить принцип квантования на него: каждый электромагнитный осциллятор с частотой  возбуждается порциями по . Таким образом, электромагнитная волна с частотой  может поглощаться только порциями, кратными . Отсюда возникло понятие фотона — кванта электромагнитного поля. До разработки непротиворечивого квантового описания этих частиц и состоящего из них поля должно было пройти еще не одно десятилетие — но именно Эйнштейн заложил первый камень в будущую квантовую теорию поля. Благодаря Максу Планку, разумеется.

В теории Эйнштейна фотоэффект в монохроматическом свете частоты  описывается как поглощение одного фотона с энергией  электроном проводимости внутри металлического образца. Сам по себе электрон не может вылететь из металлического кристалла: как только он постарается это сделать, на его «законном» месте возникнет нескомпенсированный положительный заряд (дырка), притяжение которого вернет электрон в кристалл. Поэтому Эйнштейн предположил, что для вылета электрона из слоя проводимости на поверхность кристалла ему необходимо передать энергию (работу) выхода . В этом случае из закона сохранения мы получаем:



т.е. энергия поглощенного фотона ушла на преодоление возвращающего потенциала кристалла и энергию отдачи электрона . Электроны вылетают из электрода со скоростью  и летят к аноду, если к последнему подведено положительное напряжение. Естественно, чем больше фотонов падает на катод в единицу времени, тем больше выбивается электронов — тем больше величина фототока. Это объясняет первый закон фотоэффекта Столетова. Второй закон также выражен формулой Эйнштейна. Наконец, при  энергии фотонов не хватает, чтобы выбить из металла электрон — поэтому взаимодействие света с электронами становится упругим, и фотоэффект исчезает. Это объяснение красной границы фотоэффекта, о которой говорит третий закон Столетова.

Несмотря на элегантность и простоту объяснения Эйнштейна, оно не может ответить на следующие вопросы:

1. Какая доля фотонов поглощается электронами катода, а не отражается от него и не уходит в его тепловую энергию. Как эта доля зависит от частоты света?
2. В каком направлении относительно кристалла вылетают электроны при различном угле падения света?
3. Чем может быть обусловлена величина работы выхода (например, как она зависит от температуры?)
4. Как реально происходит взаимодействие между фотоном, электроном и кристаллом? Если электрон вылетает из кристалла мгновенно, то какими законами (уравнениями) описывается мгновенная передача ему световой энергии?

Чтобы ответить на эти вопросы, необходимо было простроить теорию, описывающую кристаллическую решетку, атомы — но хотя бы взаимодействие электронов в потенциальной яме с фотонами. Потенциальную яму создает поле кристалла, не дающее электрону свободно вылететь из него. На решение этой проблемы ушло около 20 лет, в результате на арене физики появилась квантовая механика, соединяющая принципы ньютоновской механики и волновой оптики.

**Ученик: Опыт Франка–Герца**

В этом опыте, поставленном в 1913 году Джеймсом Франком (1882–1964) и Густавом Людвигом Герцем (1887–1975) исследовались пары ртути на предмет наличия уровней резонансного возбуждения. Согласно постулатам Бора электроны в атомах ртути должны были иметь возможность находиться на одной из дискретного набора стабильных орбит, между которыми могли происходить скачкообразные переходы. Соответственно, чтобы такой переход произошел, атому нужно передать, или наоборот, отобрать у него, энергию, равную разности энергий двух уровней:



Самый низший возбужденный уровень в атомах ртути соответствует .

В опыте Франка–Герца в длинной трубке, наполненной парами ртути, ускорялись электроны. Пока разность потенциалов между катодом и анодом была меньше , электрон разгонялся электрическим полем, но, сталкиваясь с атомами ртути, не передавал им энергию. Другими словами, столкновения были *упругими*. Действительно, электрону просто не хватало своей кинетической энергии, чтобы перевести один из связанных электронов атома ртути в возбужденное состояние. Поскольку энергия электрона ни на что не расходовалась, для него справедлив закон сохранения энергии:



где  — скорость электрона в точке  трубки,  — ее полная длина. Как видим, скорость электронов в данной точке трубки точно такая же, как если бы в ней был вакуум. Если же напряжение между катодом и анодом было больше 4.9В, то электрон достигал энергии возбуждения  в середине трубки, и в этом месте начинались его *неупругие* столкновения с атомами ртути, в результате чего электрон терял б***о***льшую часть своей кинетической энергии. Фактически, ему приходилось начинать свой разгон с начала. Таким образом, в трубке начинала рассеиваться энергия, что с точки зрения теории постоянного тока означает возникновение у нее *активного сопротивления*. В эксперименте последнее проявлялось в ослаблении тока через трубку при прохождении разности потенциалов через критическое значение 4.9В (см. рис. ниже, где изображена вольтамперная характеристика трубки). Естественно, то же самое наблюдалось и при кратных разностях потенциалов: электрон за свой путь от катода к аноду успевал *несколько раз*разогнаться до энергии возбуждения и передать ее атому ртути.

Излучение, которое, согласно Бору, должны были испускать, возвращаясь в свое основное состояние, атомы ртути, было обнаружено в 1922 году Артуром Комптоном (1892–1962). В полном согласии со вторым постулатом Бора, это излучение имело частоту , т.е. испускаемые фотоны имели энергию , равную разности энергий возбужденного и основного состояний атома.

Резонансный характер кривой возбуждения атомов ртути и свойства их вторичного излучения являлись красноречивым аргументом в пользу квантовых идей Бора — несмотря на то, что окончательной квантовой модели атома еще не было. За свою работу в 1925 году Франк и Герц были удостоены Нобелевской премии по физике.

**Ученик: Эксперименты Э. Резерфорда по рассеянию альфа-частиц на атомах тяжелых элементов**

Серия экспериментов Резерфорда, по сути дела, подтвердила его планетарную модель атома, а также пролила немного света на природу ядерных сил. В этих экспериментах исследовалось рассеяние альфа‑частиц на атомах золота. Альфа‑частица представляет собой ядро атома гелия, состоит из двух протонов и двух нейтронов, но главное — эта частица рождается в радиоактивном распаде многих нестабильных ядер и обладает очень высокой энергией, порядка нескольких МэВ. Согласно дебройлевской гипотезе, альфа-частицы с энергией , использовавшиеся в опыте Резерфорда, обладают длиной волны



что позволяет зондировать не только атом (), но и атомное ядро (). Естественно, ни о какой микроскопии, в которой наблюдается затенение параллельного пучка частиц исследуемым объектом, в данном случае не может идти речи: радиус действия сил взаимодействия этих частиц с сканирующей альфа-частицей гораздо больше размера последней. Поэтому в эксперименте исследовалось, сколько частиц, налетающих на данный атом, будет рассеяно на углы, лежащие в интервале . Относительная доля этих частиц называется *дифференциальным сечением рассеяния*:



Существует строгая математическая теория, позволяющая определить потенциал сил, в область действия которых попадает альфа‑частица, по виду дифференциального сечения . В опытах Резерфорда (см. рис. ниже) исследовалось рассеяние на фольге **Ф**из золота, меди, серебра и других тяжелых элементов.

Частицы рождались при распаде ядер радиоактивного вещества в свинцовом контейнере (слева внизу). Рассеянные частиц бомбардировали экран **Э**из сернистого цинка, вызывая в нем световые вспышки (сцинтилляции), которые можно было наблюдать глазом через микроскоп. Оказалось, что частицы отклоняются на все углы от  для , однако, малая, но существенная часть частиц отклоняется на углы, близкие к  (*рассеивается назад*). Последнее говорило, что есть центр, который способен оттолкнуть даже частицу с практически релятивистской энергией. Впоследствии данный центр был отождествлен с яром атом, но сам результат оказался поначалу неожиданным.

Дело в том, что к моменту проведения эксперимента в науке господствовала *модель атома Джозефа Джона Томсона* (1903), согласно которой точечные электроны плавают в желеобразном облаке распределенного положительного заряда (см. рис.).

Электроны именно плавали, дрейфовали внутри этого «желе», а не двигались с субсветовыми скоростями. Такая модель обладала несомненным преимуществом по сравнению со сменившей ее моделью Резерфорда: *атом Томсона был устойчив*, поскольку электроны не участвовали в ускоренном движении. В такое движение они приходили только в случае, если атом поляризовали, сместив центр отрицательного заряда относительно центра положительного облака. Более того, тот факт, что электроны являются составляющими атома, показал в своих экспериментах по измерению массы и заряда электрона сам Томсон.

Модель Томсона, однако, никак не согласовывалась с результатами экспериментов Резерфорда, поскольку даже в отсутствие электронов максимальный потенциал, который создавало положительное облако, равен



где  — заряд облака. Для атомов золота атомный номер , а эффективный радиус положительного облака в модели Томсона равен радиусу атома, . Такой отталкивающий центр мог остановить и послать обратно лишь частицу с энергией



Эксперименты же Резефорда говорили о том, что радиус положительного заряда имеет порядок



Если учесть частичную экранировку заряда ядра электронами, то получается еще более строгая оценка, порядка современных ().

Однако если ядро столь мало в размере, что же удерживает электроны от падения на него? Ответ в рамках классической физики напрашивается сам собой: центробежная сила. Другими словами, электроны должны достаточно быстро двигаться по орбитам вокруг ядра, чтобы поддерживать размер атома, на четыре-пять порядков величины превышающий размеры ядра. Данная модель атома была предложена Резерфордом в 1911 году и теперь называется *планетарной* из очевидной аналогии с Солнечной системой. Тем не менее, как показывают вычисления, скорость и ускорение электрона на орбите оказываются такими большими, что последний обязан излучать электромагнитные волны. В результате эти волны уносят часть кинетической энергии электрона, он тормозится… и падает на ядро! Более того, последний процесс происходит за время порядка  секунды!

Данное противоречие было разрешено только в рамках квантовой механики. Грубо говоря, в последней электрон может обращаться вокруг ядра, при этом находясь в *стационарном состоянии*, в котором такие величины, как плотность заряда и ток, не зависят от времени (стационарны). Поскольку электромагнитное излучение порождают именно ток и заряд, стационарные состояния не излучают волны и в результате стабильны.

<http://files.school-collection.edu.ru/dlrstore/85a43aa4-1f7a-455a-ac5a-e1a58587a7ef/9_250.swf>

*Боровская модель атома*

**Ученик: Боровская модель атома (Модель Бора)** — полуклассическая модель [атома](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D1%82%D0%BE%D0%BC), предложенная [Нильсом Бором](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9D%D0%B8%D0%BB%D1%8C%D1%81_%D0%91%D0%BE%D1%80) в 1913 г. За основу он взял планетарную модель атома, выдвинутую [Резерфордом](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A0%D0%B5%D0%B7%D0%B5%D1%80%D1%84%D0%BE%D1%80%D0%B4%2C_%D0%AD%D1%80%D0%BD%D0%B5%D1%81%D1%82). Однако, с точки зрения классической электродинамики, электрон в модели Резерфорда, двигаясь вокруг ядра, должен был бы [излучать](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D0%BE%D1%80%D0%BC%D0%BE%D0%B7%D0%BD%D0%BE%D0%B5_%D0%B8%D0%B7%D0%BB%D1%83%D1%87%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5) непрерывно, и очень быстро, потеряв энергию, упасть на ядро. Чтобы преодолеть эту проблему Бор ввел допущение, суть которого заключается в том, что электроны в атоме могут двигаться только по определенным (стационарным) орбитам, находясь на которых они не излучают, а излучение или поглощение происходит только в момент перехода с одной орбиты на другую. Причем стационарными являются лишь те орбиты, при движении по которым момент количества движения электрона равен целому числу [постоянных Планка](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%BE%D1%8F%D0%BD%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D0%9F%D0%BB%D0%B0%D0%BD%D0%BA%D0%B0)[[1]](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D0%BE%D1%80%D0%BE%D0%B2%D1%81%D0%BA%D0%B0%D1%8F_%D0%BC%D0%BE%D0%B4%D0%B5%D0%BB%D1%8C_%D0%B0%D1%82%D0%BE%D0%BC%D0%B0#cite_note-0): .

Используя это допущение и законы классической механики, а именно равенство силы притяжения электрона со стороны ядра и центробежной силы, действующей на вращающийся электрон, он получил следующие значения для радиуса стационарной орбиты  и энергии  находящегося на этой орбите электрона:



Здесь  — масса электрона, Z — количество протонов в ядре,  — [диэлектрическая постоянная](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%94%D0%B8%D1%8D%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B0%D1%8F_%D0%BF%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%BE%D1%8F%D0%BD%D0%BD%D0%B0%D1%8F), e — заряд электрона.

Именно такое выражение для энергии можно получить, применяя [уравнение Шрёдингера](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A3%D1%80%D0%B0%D0%B2%D0%BD%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5_%D0%A8%D1%80%D1%91%D0%B4%D0%B8%D0%BD%D0%B3%D0%B5%D1%80%D0%B0), решая задачу о движении электрона в центральном кулоновском поле.

Радиус первой орбиты в атоме [водорода](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%92%D0%BE%D0%B4%D0%BE%D1%80%D0%BE%D0%B4) R0=5,2917720859(36)·10−11 [м](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%B5%D1%82%D1%80)[[2]](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D0%BE%D1%80%D0%BE%D0%B2%D1%81%D0%BA%D0%B0%D1%8F_%D0%BC%D0%BE%D0%B4%D0%B5%D0%BB%D1%8C_%D0%B0%D1%82%D0%BE%D0%BC%D0%B0#cite_note-1), ныне называется [боровским радиусом](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D0%BE%D1%80%D0%BE%D0%B2%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B9_%D1%80%D0%B0%D0%B4%D0%B8%D1%83%D1%81%22%20%5Co%20%22%D0%91%D0%BE%D1%80%D0%BE%D0%B2%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B9%20%D1%80%D0%B0%D0%B4%D0%B8%D1%83%D1%81), либо [атомной единицей длины](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D1%82%D0%BE%D0%BC%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D0%B5%D0%B4%D0%B8%D0%BD%D0%B8%D1%86%D0%B0_%D0%B4%D0%BB%D0%B8%D0%BD%D1%8B) и широко используется в современной физике. Энергия первой орбиты  [эВ](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%AD%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BD%D0%B2%D0%BE%D0%BB%D1%8C%D1%82) представляет собой [энергию ионизации](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%AD%D0%BD%D0%B5%D1%80%D0%B3%D0%B8%D1%8F_%D0%B8%D0%BE%D0%BD%D0%B8%D0%B7%D0%B0%D1%86%D0%B8%D0%B8) атома водорода.

<http://files.school-collection.edu.ru/dlrstore/12512ec2-d679-4149-96a7-4cb48575c693/9_249.swf>

модели некоторых атомов

*Практическая часть*

1. Демонстрация фотоэффекта

Что такое фотоэффект? Назовите основные характеристики фотоэффекта

1. Камера Вильсона

(демонстрация компьютерное моделирование)

* Лабораторная работа «Изучение атомных спектров» (компьютерное моделирование)
* Лабораторная работа (компьютерное моделирование)

«Изучение фотоэффекта»

*Данные работы проводятся в электронном приложении*