

ЦИКЛИЧЕСКИЙ УСКОРИТЕЛЬ ЭЛЕКТРОНОВ КАК МАКРОМОДЕЛЬ АТОМА (ТИПА ВОДОРОДА ИЛИ ПОЗИТРОНИЯ)

А. А. ВОРОБЬЕВ

Ускоренные электроны идут потоками на землю из космоса и регистрируются, как одна из разновидностей космических лучей. Их действие на все живущее и живое, действие на вещество, представляет жизненный интерес, особенно для космонавтики. Электронные лучи обрабатывают тела, например, сваривают куски металла, плавят его, в больших дозах убивают живые организмы, а в малых, могут стимулировать их жизнедеятельность. При торможении электронов их энергия переходит в тепло, а часть энергии электрона излучается в виде рентгеновских лучей. Чем больше была энергия затормозившихся электронов, тем более проникающими через тела получатся рентгеновские лучи. Практическое применение тормозного излучения лучей, как и ускоренных электронов, в науке и практике все увеличивается.

Ускорение электронов в лабораторных условиях производится в вакууме с помощью электрического поля. Простейшим ускорительным устройством является пролетный промежуток между двумя заряженными электродами. Так как рабочее напряжение между электродами, ускоряющее электроны, ограничено конечной величиной электрической прочности промежутка, то в одном промежутке электрон может получить только ограниченное приращение энергии. Для значительного увеличения энергии ускоряемого электрона надо поставить на пути электрона много промежутков. Такой ускоритель получается очень длинным. Например, в США построен ускоритель, общая длина которого составляет около четырех километров. Такое сооружение и работа со многими ускорительными промежутками по одной прямой, связаны со многими трудностями. Можно соорудить установку с одним ускорительным промежутком, который электрон будет проходить много раз. Для этого нужно электрон, вышедший из ускорительного промежутка, завернуть, провести по круговой траектории и вновь пропустить через ускорительный промежуток. И так сделать много раз. Такой механизм реализуется в современных циклических ускорителях типа синхротрон.

Электрон, двигаясь по кругу, будет ускоряться только пролетая промежуток, который занимает малую часть окружности, а в современных ускорителях на большие энергии, даже очень малую часть пути. По остальной части кругового пути электрон будет двигаться с постоянной скоростью.

В природе есть аналогия такой системы в виде водородоподобных атомов. Простейшая модель атома водорода состоит из протона

и электрона, а модель атома позитрония — из позитрона и электрона, которые вращаются вокруг общего центра тяжести этих двух тел. Такие системы обладают многими интересными свойствами, хорошо изученными теоретически и экспериментально. Одним из важных свойств атома водорода является устойчивое движение электрона по орбите и отсутствие потерь энергии при этом.

Движение электрона по устойчивым орбитам в модели водородоподобного атома вообще, атома водорода и позитрония в частности, представляет собой типичную задачу на движение в поле центральных сил. Энергия взаимодействия электрона с полем зависит только от расстояния электрона от центра, в котором расположено ядро атома. Проблема движения одного электрона в поле точечного положительного заряда представляет собой разновидность задачи Кеплера. Движение электрона по устойчивой орбите в атоме совершается под действием кулоновского притяжения и центральной силы. В квантовой механике состояние электрона в атоме водорода, согласно уравнению Шредингера, описывается волновой функцией

$$\psi_{nlm} = C_{nlm} R_{nl}(\rho) Q_{ml}(\nu) e^{im\varphi},$$

где C_{nlm} нормировочный множитель, определяемый из условия:

$$\int_{\infty} |\psi_{nlm}|^2 d\nu = 1,$$

$$R_{nl} = e^{-\frac{1}{2}\rho} \frac{d^{2l+1}}{d\rho^{2l+1}} \left\{ e^{\rho} \frac{d^{n+l}}{d\rho^{n+l}} (\rho^{n+l} e^{-\rho}) \right\},$$

$$Q_{ml}(x) = (1+x^2)^{\frac{|m|}{2}} \cdot \frac{d^{l+|m|}}{dx^{l+|m|}} (x^2-1)^l,$$

$$\rho = \frac{r}{na_0}, \quad a_0 = \frac{h^2}{\mu e^2}, \quad x = \cos \nu, \quad h = 1,05 \cdot 10^{-2} \text{ эрг} \cdot \text{сек.}$$

μ — приведенная масса электрона и протона $n = 1, 2, 3, \dots$; $l = 0, 1, 2, \dots, n-1$; $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm l$.

В этих стационарных состояниях электрон обладает энергией

$$E_n = -\frac{\mu e^4}{2h^2} \cdot \frac{1}{n^2},$$

квадратом момента импульса: $M^2 = l(l+1)h^2$, проекцией момента импульса $M_z = mh$ и создает ток со средней плотностью;

$$\bar{j} = -\frac{ieh}{2\mu} (\psi_{nlm}^* \nabla \psi_{nlm} - \psi_{nlm} \nabla \psi_{nlm}^*),$$

причем в сферических координатах $j_z = j_\nu = 0$. $j_\varphi = \frac{ehm}{\mu r \cdot \sin \nu} |\psi_{nlm}|^2$.

С этим током связано магнитное поле, проекция магнитного момента которого равна

$$M_z^1 = \frac{eh}{2\mu c} m.$$

Из теории атома, представленной этими формулами, в частности, следует, что в нормальном состоянии атома (ψ_{100})

1. $E_1 = -13,6$ эв,
2. $M^2 = 0$,
3. $M_z = 0$,
4. $\bar{j} = 0$,
5. $M'_z = 0$.

Следовательно, нормальное состояние атома является безмоментным ($M=0$). Оно не имеет классического аналога. Объемная плотность вероятности местопребывания электрона записывается в виде

$$|\psi_{100}|^2 = \frac{1}{\pi a_0^3} e^{-\frac{2r}{a_0}}.$$

Расстояние электрона от протона в любом направлении, соответствующем максимуму вероятности, равно $r_1 = a_0 = 0,529 \cdot 10^{-8}$ см; среднее расстояние $\bar{r}_1 = \frac{3}{2} a_0$.

Если в связанном состоянии, возникающем в результате взаимодействия электрона с протоном в атоме водорода, продолжает действовать закон Кулона в том же виде, как и макрофизике, то на расстоянии r_1 удерживающее электрон кулоновское поле протона будет иметь напряженность

$$\varepsilon_1 = \frac{e}{r_1^2} = 3,5 \cdot 10^{16} \text{ C.G.S.E.}$$

В синхротроне ускорение электрона происходит в резонаторе, ускорительный промежуток которого занимает малую часть окружности. Большую часть кругового пути электрон движется с постоянной скоростью. Устойчивое движение частицы в циклическом ускорителе и электрона в водородоподобном атоме одинаково рассматриваются с помощью потенциальной функции вида

$$U(r) = r^{-q},$$

где r — радиус орбиты. Для циклического ускорителя индукция управляющего поля меняется по закону: $B(r) \approx r^{-q}$.

В водородоподобном атоме и в циклическом ускорителе частица совершает устойчивое движение по равновесной орбите в случае, когда удовлетворяются одинаковые энергетические соотношения вида:

$$U(r) \cdot r^q = \text{const.} \quad (1)$$

В зависимости от величины константы в (1) излучение будет иметь квантовый характер, когда квантовые числа малы, а уровни энергии дискретны, и классический — когда квантовые числа велики, а уровни энергии непрерывны.

Эта внешняя аналогия, а также аналогия математической теории движения электрона в поле центральных сил по замкнутому кругу в случае простейшей модели атома водорода и циклического ускорителя привела меня еще четверть века назад к мысли рассматривать циклический ускоритель как большую модель атома водорода. При таком рассмотрении казалось возможным ожидать, что во время ускорения будут наблюдаться явления, присущие атому водорода, например, атом водорода излучает свет в виде отдельных линий. При внешних воздействиях (с помощью магнитного, электрического полей, большим давлением) можно изменить спектр излучения водорода.

Электрон, движущийся по окружности в однородном магнитном поле, непрерывно излучает электромагнитные волны, вследствие наличия центростремительного ускорения. Излучение сопровождается уменьшением энергии электрона и переходом его на орбиту меньшего радиуса. В модели водородоподобного атома, электрон, двигаясь по кругу в электростатическом неоднородном поле, не теряет свою энергию на непрерывное излучение. Излучение в водородном атоме происходит при переходе электрона на орбиту меньшего радиуса и сопровождается освобождением кванта энергии.

Еще в начале нашего века делалась попытка объяснить спектры излучения атомов с помощью классической теории излучения электрона, движущегося в однородном магнитном поле. Эту теорию можно рассматривать как попытку найти аналогию описания излучения атома и электрона в циклическом ускорителе.

Обратим внимание на следующее. Излучение электрона, движущегося в постоянном магнитном поле, сопровождается уменьшением энергии электрона. В случае кругового движения электрона в нарастающем вихревом магнитном поле осевой симметрии, энергия электрона растет за счет этого поля. Часть своей энергии электрон непрерывно излучает. Следовательно, электрон в циклическом ускорителе будет излучать энергию, полученную им от внешнего источника.

Квантовый, дискретный характер излучения является особенностью атома водорода, хорошо изученной теоретически и экспериментально. В работах А. А. Соколова, И. М. Тернова и Д. Д. Иваненко методами квантовой электродинамики было показано, что электрон, движущийся в циклическом ускорителе, начиная от энергии 500 Мэв, может излучать кванты энергии. Испуская фотон в какой-либо точке орбиты, электрон испытывает толчок отдачи, который выводит его с равновесной орбиты. В результате излучения фотона электрон испытывает радиальные и осевые колебания около равновесной орбиты. Теория Соколова А. А. позволила найти величину интенсивности излучения и величины амплитуды колебаний электрона. Оказалось, что эти величины пропорциональны планковской постоянной, что является следствием квантовой природы явления так же как и в атоме водорода. Поэтому циклический ускоритель при высокой энергии электронов можно рассматривать как макроскопическую модель атома водорода. Таким образом, аналогия между водородоподобными атомами и циклическими ускорителями оказывается не только внешней, но и по физическому существу.

При разработке теории возникли противоречия. В. В. Владимирский и другие сначала считали, что в циклических ускорителях квантовыми эффектами следует пренебречь в области, когда полная энергия электрона значительно больше энергии испускаемого фотона. Поэтому квантовые поправки будут играть практически заметную роль только в области энергии электрона 10^{13} эв, что на несколько порядков превышает предел энергии, указанный по теории А. А. Соколова (около 600 Мэв).

Существенным является то, что атому водорода присущ только дискретный, квантовый характер излучения. Электрон, ускоряемый в циклическом ускорителе, излучает непрерывно в области всех энергий, а фотоны — только в области высоких энергий. Классическое непрерывное излучение электрона в ускорителе вызывает уменьшение его энергии, радиуса орбиты и амплитуды бетатронных колебаний. Квантовое излучение электрона на орбите в ускорителе вызывает уменьшение его энергии, а следовательно, и радиуса орбиты и затухание колебаний, а возникновение отдачи при испускании квантов сопровождается увеличением амплитуды колебаний. Так как рассматриваемые явления

исследуются применительно к синхротрону, то следует еще учитывать изменение энергии из-за фазовых колебаний. Результирующий эффект должен складываться из затухания бетатронных колебаний за счет влияния классического излучения и увеличения амплитуды бетатронных и фазовых колебаний за счет излучения квантов.

Квантовый характер излучения электронов в циклическом ускорителе был открыт и исследован в теоретических работах А. А. Соколова и И. М. Тернова. В этих же работах были сделаны расчеты, при каких условиях ускорения, за счет излучения квантов, электроны будут сильно отходить от равновесной орбиты, попадать на стенки ускорительной камеры и, следовательно, выпадать из пучка. Были определены физические пределы, до которых практически возможно ускорение в таких установках. Это был очень важный результат, трактуемый о физическом пределе действия синхротронов. В работах других ученых выводы А. А. Соколова вызвали серьезные возражения.

При ускорении электронов в однородном магнитном поле отсутствует автоматическая стабилизация движения. Ускорение электронов получается вообще неустойчивым. Излучение кванта электронов нарушает устойчивость и при отсутствии поперечной устойчивости системы приводит к раскачке колебаний и потере электронов из пучка.

А. А. Коломенский и А. Н. Лебедев рассмотрели ускорение электронов в фокусирующем неоднородном магнитном поле, автоматически обеспечивающем поперечную устойчивость движения электронов в некоторых пределах отклонения орбиты от равновесной. По их данным, в фокусирующих полях происходит затухание колебаний электронов, возникающих при испускании кванта излучения. Дискуссия позволила уточнить многие вопросы и, в частности, был указан новый, более высокий предел энергий ускорения электронов в синхротронах.

Из представлений классической теории следовало ожидать, что при увеличении энергии электронов пучок электронов в результате сложения магнитных полей параллельных токов должен сжиматься. С другой стороны, взаимодействие релятивистских электронов в пучке приводит к поперечной неустойчивости в движении электронов и уширению пучка. По модели макроатома и квантовой теории Соколова А. А., пучок в области высших энергий должен расширяться при испускании квантов света так же как и в атоме водорода, смещаться с устойчивой орбиты и, таким образом, уширяться. Важно было проверить формулы теории ускорения электронов и установить, что в области высоких энергий сжимается пучок электронов, как это следует из классической теории взаимодействия магнитных полей параллельных токов, или расширяется, как это следует из теории макроатома.

При сооружении Томского синхротрона на энергию 1500 Мэв предполагалось исследовать приведенные выше противоречия в теории ускорения электронов; проверить гипотезу макроатома, определить физический предел достижимых энергий электронов в циклических ускорителях синхротронов с мягкой фокусировкой типа «Сириус».

Практически изменение амплитуды колебаний должно сказаться на величине диаметра пятна. С увеличением полной энергии электрона, движущегося на равновесной орбите, классическое непрерывное излучение, а равно и квантовое излучение, сопровождается уменьшением его энергии, уменьшением амплитуды колебаний и радиуса орбиты. Отдача, которую испытывает электрон, вызывает увеличение амплитуды колебаний с ростом полной энергии электрона. Результирующая амплитуда радиальных колебаний электрона с ростом его полной энергии будет складываться из составляющей, которая уменьшается с рос-

том энергии, и составляющей, величина которой растет с увеличением полной энергии электрона. Сложение двух таких зависимостей в некоторой области энергии может дать постоянную величину. Амплитуда радиальных колебаний электронов в некотором интервале энергии может оказаться величиной постоянной, не зависящей от полной энергии электрона. Область энергии, при которой начинаются квантовые флуктуации излучения, может смещаться путем регулирования параметров ускорителя. Таким путем может смещаться и область энергии, в которой будет наблюдаться независимость от энергии амплитуды радиальных колебаний электронов.

В синхротроне «Сириус» А. В. Кожевников оптическими методами измерял ширину пучка ускоренных электронов. В согласии с теорией А. А. Соколова до энергии 600 Мэв наблюдалось уменьшение поперечных размеров пучка электронов. В интервале энергий электронов от 600 до 700 Мэв поперечные размеры пучка сохранялись примерно постоянными. Дальнейшее увеличение полной энергии электронов, вследствие преобладания роли квантового характера излучения, сопровождалось уширением пучка электронов. Результаты эксперимента в широкой области энергий соответствуют теоретическим ожиданиям. Это позволяет рассматривать циклический ускоритель как квантовую систему и как макроскопическую модель водородоподобного атома. В этой системе одновременно могут моделироваться как постулаты Бора о наличии дискретного набора орбит (в области малых энергий), так и положения более поздней квантовой механики о размытии боровских орбит (в области высоких энергий).

Синхротрон является плодом творения человека. Следовательно, явления в атоме водорода могут моделироваться по заданной программе с помощью синхротрона. Например, аксиальные и радиальные колебания электронов в синхротроне или накопителе, вероятно, будут действовать на спектр излучения электронов в циклических ускорителях, моделируя действие внешнего электрического и магнитного поля на спектр излучения водородоподобного атома.

Представляет интерес более подробно исследовать аналогию при более низких энергиях частиц в циклических ускорителях, когда не сказывается квантовый характер излучения и потеря энергии частицами происходит непрерывно. Поэтому интересно выяснить, какому явлению в атоме водорода будет аналогично это явление: или процессам перехода с одного уровня энергии на другой при очень больших главных квантовых числах, когда энергия измеренных квантов будет мала, или в циклических ускорителях возможны такие условия, при которых электроны будут двигаться не излучая, как при их движении по боровским орбитам. Если справедливо второе, то возможно создание безызлучательного циклического ускорителя.

В рассматриваемых двух системах — атоме и макроатоме — следует говорить не только об аналогиях при соблюдении масштабных соотношений, но и об отличии, когда масштабы не соблюдены. В атоме движение совершается в трехмерном пространстве в кулоновском поле центральных сил. Для такой атомной системы справедлив постулат, что электрон, двигаясь по орбите, не излучает, несмотря на наличие центростремительного ускорения, весьма большой величины.

Согласно приведенных рассуждений при высоких энергиях возможно ожидать излучение гравитонов массами, движущимися по законам Кеплера — Ньютона при переходе частицы с одной орбиты на другую. В области малых энергий массы, движущиеся в циклическом ускорителе, должны излучать волны гравитации непрерывно.

В циклических ускорителях на большие энергии спектр излучения электронов будет квазинепрерывным и два соседних энергетических состояния электрона будут мало отличаться одно от другого. Так как энергия электрона велика, то это малое значение энергии электрона оказывается достаточно большим и будет соответствовать энергии квантов в видимой или ультрафиолетовой областях спектра.

Известно, что волновая и корпускулярная природа электромагнитного излучения длительное время противопоставляется друг другу.

В случае циклического ускорителя имеется интересная особенность, что электрон, ускоренный до высокой энергии, излучает энергию непрерывно, а в некоторые моменты своего движения испускает также и отдельные кванты.

В циклическом ускорении с увеличением энергии электронов на фоне их непрерывного излучения появляется дискретное, квантовое излучение. Накопление параметра—энергии электрона—приводит к возникновению нового качества системы в виде дискретного излучения.

Таким образом, этой системе присущи классические и квантовые свойства. Соответственно можно говорить об единстве корпускулярных и волновых свойств излучения этой материальной системы.

В данном случае имеется пример, что дискретное и непрерывное—это свойства системы, не исключают одно другое. В рассматриваемом случае прерывное и непрерывное излучения могут появляться вместе.

Непрерывное излучение наблюдается в области меньших энергий. Возможно высказать предположение, что в области высоких параметров системы, как и в случае атома ($\varepsilon \approx 10^{16}$ с. д. с. е.), ускоряемый электрон не будет излучать непрерывно. Излучающая система будет давать только дискретное излучение. Электрон в ускорителе будет свободен от непрерывной потери энергии. В такой системе электроны должны размещаться по состояниям, удовлетворяя принципу Паули. При малых главных квантовых числах и большом количестве ускоряемых электронов это может привести к тому, что пучок ускоряемых электронов будет иметь конечный радиальный размер, обусловленный конечностью состояний с разными n , в которых находятся электроны.

Автор выражает благодарность доктору ф. м. н. А. Н. Диденко, профессору А. А. Соколову и профессору И. М. Тернову за участие в обсуждении рассматриваемых в статье вопросов и сделанные ими замечания.