

О ДВУХ НЕ ПОДТВЕРДИВШИХСЯ ГИПОТЕЗАХ (МОДЕЛЬ АТОМА ТОМСОНА; КЛАССИЧЕСКИЙ РАДИУС ЭЛЕКТРОНА)

Расовский М.Р., к.ф.-м.н, доцент, Климова Т.В., к.п.н.,
Оренбургский государственный университет

Для объяснения новых физических явлений, либо для истолкования уже известных, в науке нередко выдвигаются те или иные гипотезы. Впоследствии эти гипотезы подвергаются экспериментальной проверке и в случае их подтверждения приобретают статус достоверных научных положений, моделей или даже законов. Гипотезы же, не подтвержденные опытом, как правило, забываются как не представляющие более никакого научного интереса. Однако бывают и исключения: некоторые гипотезы, на проверку оказавшиеся несостоятельными, тем не менее, представляют интерес не только для историков науки, но и как полезные и поучительные попытки решить ту или иную серьезную физическую проблему. Двумя яркими примерами подобных гипотез являются, на наш взгляд, модель атома Томсона и классический радиус электрона. Эти две гипотезы, несмотря на то, что они были опровергнуты экспериментом, имеют довольно глубокий физический смысл, по своей сути довольно просты и могут, как нам представляется, будут весьма полезны в учебных целях. Их подробный разбор в университетских курсах электродинамики и атомной физики может помочь студентам лучше понять логику развития физической науки, ее «кухню», увидеть на конкретных примерах, как фундаментальные понятия применяются к решению новых задач. Посредством введения в образовательный процесс материала, содержащего попытки предложить решение вопросов важных для науки, доказательство их несостоятельности, либо, наоборот, справедливости, мы включаем студента в проблемно-ориентированную, диалоговую учебно-познавательную среду, которая усилит мотивацию к изучению научных закономерностей, рефлексия и самооценку собственных результатов деятельности в будущем. Сомнение - один из основных принципов науки, даже среди самых фундаментальных положений нет таких, которые не могут быть подвергнуты пересмотру.

Открытие Дж. Дж. Томсоном в 1897 г. первой элементарной частицы – электрона, как часто бывает, поставило перед физиками ряд новых фундаментальных вопросов, среди них – вопрос об устройстве вновь открытой частицы, а также о том, какую роль она должна играть в будущей модели атома. Ответом на эти вопросы стали, соответственно, гипотеза Х.-А. Лоренца о классическом радиусе электрона и модель атома Дж. Дж. Томсона.

Прежде чем остановится на сущности этих гипотез, напомним хорошо известную электростатическую задачу об электрическом поле равномерно заряженного шара радиусом R с общим зарядом Q . Решение задачи ищется либо на основе теоремы Гаусса, либо с помощью уравнения Пуассона/Лапласа. Как нетрудно убедиться, величина электрического поля равномерно заряженного шара дается соотношением

$$E(r) = \begin{cases} \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 R^3} r, & r < R; \\ \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2}, & r \geq R, \end{cases} \quad (1)$$

где r – радиальная координата в сферической системе, начало координат которой выбрано в центре заряженной сферы шара.

1. Модель атома Томсона.

Путь внутри равномерно и положительно заряженного шара радиусом R и зарядом Q находится электрон, отстоящий в рассматриваемый момент времени на расстоянии r от центра шара. Очевидно, что на электрон со стороны электрического поля (1) будет действовать сила, проекция которой на радиальное направление равна

$$F_r(r) = -kr, \quad (3)$$

$$k \equiv \frac{eQ}{4\pi\epsilon_0 R^3}, \quad (4)$$

Мы видим, что электрическая сила, действующая на электрон в атоме Томсона, подчиняется «закону Гука» (3) и, следовательно, является квазиупругой силой, вызывающей гармонические колебания электрона с круговой частотой:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{Q}{4\pi\epsilon_0 m R^3}}$$

Наличие таких колебаний объясняет испускание атомом электромагнитного излучения соответствующей частоты.

Как известно эксперимент Э. Резерфорда, осуществленный Г. Гейгером и Э. Марсденом в 1911 г., продемонстрировал несостоятельность томсоновской модели, которая впоследствии была заменена вначале планетарной моделью Резерфорда – Бора, а затем – квантовомеханической моделью. Однако простая и физически прозрачная модель атома, предложенная Томсоном, представляется весьма полезной и поучительной для студентов, изучающих атомную физику.

2. Классический радиус электрона.

В начале XX в., в первую очередь благодаря работам Х. Лоренца, доминировало представление об электроне как о заряженном шаре некоторого радиуса r_0 . Оценим эту величину, исходя из предположения (см. напр., [1,2]), что вся масса электрона имеет чисто электромагнитное происхождение. При таком подходе энергия покоя электрона $E_0 = mc^2$ отождествляется с его электрической энергией W .

Для нахождения последней, воспользуемся соотношением:

$$W = W_1 + W_2,$$

где W_1 и W_2 представляют собой, соответственно, энергию, сосредоточенную внутри заряженного шара, и энергию внешнего по отношению к шару электрического поля. Каждое из этих двух слагаемых можно записать в виде:

$$W_i = \int \omega dV,$$

где $\omega = \frac{\varepsilon_0 E^2}{2}$ – объемная плотность энергии, а интегрирование производится по соответствующей (внутренней либо внешней) области пространства. С учетом симметрии задачи интегрирование проведем в сферических координатах, в которых элемент объема $dV = 4\pi r^2 dr$.

Имеем:

$$W_1 = \frac{\varepsilon_0}{2} \int_0^{r_0} E^2 dV = \frac{\varepsilon_0}{2} 4\pi \frac{Q^2}{16\pi^2 \varepsilon_0^2 r^6} \int_0^{r_0} r^4 dr = \frac{Q^2}{40\pi \varepsilon_0 r_0};$$

$$W_2 = \frac{\varepsilon_0}{2} \int_{r_0}^{\infty} E^2 dV = \frac{\varepsilon_0}{2} 4\pi \frac{Q^2}{16\pi^2 \varepsilon_0^2} \int_{r_0}^{\infty} \frac{dr}{r^2} = \frac{Q^2}{8\pi \varepsilon_0 r_0}.$$

Таким образом, полная электрическая энергия заряженного шара равна

$$W = W_1 + W_2 = \frac{3Q^2}{20\pi \varepsilon_0 r_0}.$$

(Заметим, что в гауссовой системе единиц это же выражение имело бы вид

$$W = \frac{3Q^2}{5r_0}.)$$

Если встать на точку зрения Лоренца, о которой говорилось выше, то следует принять:

$$\frac{3Q^2}{20\pi \varepsilon_0 r_0} = mc^2,$$

где m – масса электрона.

Отсюда получаем выражение для классического радиуса электрона ($Q \equiv e$):

$$r_0 = W_2 = \frac{3e^2}{20\pi \varepsilon_0 mc^2} = \frac{3 \cdot (1,6 \cdot 10^{-19})^2 \cdot 9 \cdot 10^9}{5 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \cdot (3 \cdot 10^8)^2} = 1,7 \cdot 10^{-15} \text{ (м)}.$$

В настоящее время, как отмечается, например в [2], классический радиус электрона утратил свой первоначальный смысл и является лишь полезным параметром с размерностью длины, образованным из фундаментальных констант e , m и c , который с успехом применяется в ряде задач электродинамики. Его, как известно, применяют и в атомной физике для опровержения гипотезы о спине электрона как моменте вращения последнего вокруг собственной оси.

Согласно современным представлениям, электрон считается истинно элементарной частицей, линейные размеры которой заведомо меньше нижнего предела расстояний, еще доступных измерением ($\sim 10^{-18}$ м). В таком случае классический радиус электрона можно трактовать и как расстояние между двумя электронами, на котором энергия их электромагнитного взаимодействия равна энергии покоя [2]:

$$\frac{e^2}{4\pi \varepsilon_0 r_0} = mc^2 \text{ (мы здесь пренебрегли несущественным множителем 3/5)}.$$

При этом расстояния порядка r_0 представляются минимальными расстояниями, на которых еще выполняются законы классической электродинамики. На самом деле, однако, квантовая теория дает гораздо большее значение для

нижнего предела применимости классических представлений, совпадающее по порядку величины с комптоновской длиной волны электрона:

$$\lambda_e = \frac{h}{mc} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34}}{9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 3 \cdot 10^8} \approx 2,4 \cdot 10^{-12} \text{ (м)}$$

(как показывается, например, в [3], на расстояниях порядка λ_e становятся существенными квантово-релятивистские эффекты).

Подводя итог сказанному, еще раз отметим, что даже те гипотезы в физике, которые не получили экспериментального подтверждения, в методическом отношении могут оказаться весьма полезными.

Список литературы

- 1. Ландау Л.Д., Лившиц Е.М. Теория поля – М.: Наука, 1989.*
- 2. Наумов А.И. Электродинамика – М.: Прометей, 1989.*
- 3. Ландау Л.Д., Лившиц Е.М. Квантовая электродинамика. – М.: Наука, 1989.*