

Заключение. Предложенные таблицы могут быть использованы как опорные конспекты при подготовке к экзамену по разделу «оптика» (в курсе общей физики для физических специальностей) или по дисциплине «физика» (для нефизических специальностей). Можно также предлагать учащимся составление подобных таблиц в виде творческих заданий.

Список цитируемых источников

1. Сивухин, Д. В. Общий курс физики : учеб. пособие для вузов : в 5 т. / Д. В. Сивухин. — М. : Наука, 1980. — Т. 4 : Оптика. — 752 с.
2. Барышевский, В. Г. Ядерная оптика поляризованных сред / В. Г. Барышевский. — М. : Энергоатомиздат, 1995. — 320 с.
3. Теоретическая физика : учеб. пособие для вузов : в 10 т. / Л. Д. Ландау ; 2-е изд., перераб. — М. : Наука, 1980. — Т. IV : Квантовая электродинамика. — 704 с.
4. Физическая энциклопедия : в 5 т. / гл. ред. А. М. Прохоров ; редкол.: Д. М. Алексеев [и др.]. — М. : Большая рос. энцикл., 1992. — Т. 3 : Магнитноплазменный — Пойнтинга теорема. — 672 с.
5. Савельев, И. В. Курс общей физики : учеб. пособие для вузов : в 3 т. / И. В. Савельев. — М. : Наука, 1987. — Т. 3 : Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц. — 320 с.

УДК 372.853+537.2

А. И. Серый, З. Н. Серая, Н. В. Силаев

Учреждение образования «Брестский государственный университет имени А. С. Пушкина», Брест, Республика Беларусь

О ПОПРАВКАХ К ЗАКОНУ КУЛОНА В ВУЗОВСКОМ КУРСЕ ФИЗИКИ

Введение. Раздел «Электричество и магнетизм» является неотъемлемой составляющей школьного и вузовского курсов физики. При этом одним из фундаментальных законов, изучаемых в рамках данного раздела, является закон Кулона. Несмотря на то, что после его открытия прошло уже более 200 лет, вокруг различных вариантов его формулировки в учебной литературы до сих пор то и дело возникают дискуссии методического характера [1, с. 194—196]. Кроме того, на малых расстояниях возникает необходимость модифицировать этот закон [2, с. 555—557, 635], но вычисление соответствующих поправок в рамках классической электродинамики уже невозможно. Более того, для адронов с электрическим зарядом вычисление таких поправок невозможно даже в рамках квантовой электродинамики [2, с. 556].

В силу сказанного выше представляется интересным провести систематизацию сведений, связанных с законом Кулона. Для краткости можно предложить подход к изложению, основанный на использовании параллелей (аналогий) между идентичными вопросами в виде сравнительных таблиц и Р-схем [3]. Такие таблицы и Р-схемы не призваны заменить существующие учебники (тем более, что учебник [2] в вузовском курсе физики на I ступени обучения, как правило, не используется, особенно на нефизических специальностях), но призваны дополнять их.

Основная часть. Формулировка закона Кулона, применимая не только в макромире, но и в микромире (прежде всего при построении волновых уравнений), может быть записана не для силы, а для энергии. В [1, с. 195] был предложен следующий вариант:

Энергия взаимодействия между двумя неподвижными точечными зарядами в вакууме прямо пропорциональна величине этих зарядов и обратно пропорциональна расстоянию между ними. При этом указанное расстояние не может быть меньше классического радиуса электрона.

По отношению к данной формулировке можно сделать замечания (таблица 1).

С учетом перечисленных замечаний улучшенный (по сравнению с [1, с. 195]) вариант формулировки может быть следующим.

Энергия взаимодействия в вакууме между двумя точечными заряженными частицами, которые не являются тождественными фермионами с сонаправленными спинами, при стремлении скорости их относительного движения к нулю прямо пропорциональна величине этих зарядов и обратно пропорциональна расстоянию между ними. При этом указанное расстояние не может быть меньше комптоновской длины волны электрона.

Вместе с тем при рассмотрении дополнительных поправок к закону Кулона, вычисляемых в рамках квантовой электродинамики, указанный закон можно сформулировать также для потенциала, создаваемого отдельным точечным зарядом.

Потенциал электростатического поля, создаваемого неподвижным точечным зарядом в некоторой точке, прямо пропорционален величине этого заряда и обратно пропорционален расстоянию между этим зарядом и указанной точкой. При этом указанное расстояние не может быть меньше комптоновской длины волны электрона.

Т а б л и ц а 1 — Замечания по формулировке закона Кулона через энергию

Замечания относятся	Содержание замечаний
К неподвижности зарядов	1.1. Если заряды взаимодействуют, то в отсутствие других сил они будут двигаться с ускорением и уже не будут неподвижными. 1.2. Если заряды неподвижны, то, согласно нерелятивистской формулировке соотношения неопределенностей [2, с. 18], импульсы (и их неопределенности) равны нулю, и тогда неопределенность расстояния между частицами $\Delta r = \hbar / \Delta p \rightarrow \infty$. 1.3. С точки зрения релятивистской формулировки соотношения неопределенностей [2, с. 18—19], импульсы (и их неопределенности) могут быть равны нулю только при неограниченно большом времени измерения: $\Delta p = \hbar / (c \Delta t) \rightarrow 0$ при $\Delta t \rightarrow \infty$
К нижнему ограничению на расстояние	2.1. Нижнее ограничение на расстояние сформулировано в классической электродинамике, в рамках которой традиционно формулируется закон Кулона. Между тем с точки зрения релятивистской формулировки соотношения неопределенностей [2, с. 18—19], координата электрона не может быть определена точнее, чем его комптоновская длина волны, а эта величина на два порядка превосходит классический радиус электрона: $e_0^2 / (m_e c^2) = \alpha \hbar / (m_e c) \approx (1/137) \hbar / (m_e c)$, где e_0 — элементарный заряд, m_e — масса электрона, $\alpha = e_0^2 / (\hbar c)$ — электромагнитная константа связи. 2.2. Поправки к закону Кулона, вычисляемые в рамках квантовой электродинамики, для электронов начинают проявляться уже не расстояниях порядка комптоновской длины волны [2, с. 555—557, 635]
К отсутствию упоминания о принципе Паули	3.1. В классической физике (в том числе в классической электродинамике, в рамках которой традиционно формулируется закон Кулона) принцип Паули не используется, но для электронов в атомах, кристаллах он уже играет важную роль, в том числе при учете энергии кулоновского взаимодействия

Замечание по поводу комптоновской длины волны электрона связано с тем, что электрон является самой легкой частицей, обладающей электрическим зарядом, вследствие чего его комптоновская длина волны, в пределах которой поправки к закону Кулона уже заметны, больше, чем у других заряженных частиц.

Ниже (таблица 2) дана сравнительная характеристика двух основных типов поправок к закону Кулона (с точки зрения его формулировки для потенциала), вычисляемых методами квантовой электродинамики. При этом подразумевается, что потенциал создается точечным зарядом e_1 , который, вообще говоря, отличен от элементарного заряда e_0 , но по порядку величины сравним с ним.

Т а б л и ц а 2 — Два основных типа поправок к закону Кулона

Поправка	Поправка, обусловленная поляризацией вакуума (поправка Юлинга—Сербера [2, с. 555])	Поправка, обусловленная нелинейностью уравнений Максвелла [2, с. 635]
Пропорциональна α	Точно в степени 1 (т. е. линейна)	Приближенно в степени 2 (т. е. нелинейна)
Пропорциональна e_1	Точно в степени 1 (т. е. линейна)	Приближенно в степени 3 (т. е. нелинейна)
Убывает с расстоянием	Медленнее, чем вторая поправка, на малых (по сравнению с комптоновской длиной волны) расстояниях и экспоненциально (т. е. быстрее, чем вторая поправка) на больших расстояниях	Приближенно как r^5
Знак поправки	Положительный	Отрицательный
Общее выражение (m — масса частицы)	См. таблицу 3	$-2\alpha^2 e_1^3 \hbar^3 / (225 \pi m^4 r^4 c^5)$ (приближенно)

Т а б л и ц а 3 — Три случая для первой поправки из таблицы 2

Случай	Формула
1. Общий (произвольные расстояния)	$\frac{e_1}{r} f(m)$, где $f(m) = \frac{2\alpha}{3\pi} \int_1^\infty \exp(-2m\tau) \left(1 + \frac{1}{2\tau^2}\right) \frac{\sqrt{\tau^2 - 1}}{\tau^2} d\tau$ [2, с. 555]
2. Малые расстояния ($r \ll \frac{\hbar}{mc}$)	$\frac{e_1}{r} f_1(m)$, где $f_1(m) = \frac{2\alpha}{3\pi} \left(\ln\left(\frac{\hbar}{mcr}\right) - C - \frac{5}{6} \right)$, где C — постоянная Эйлера [2, с. 555]
3. Большие расстояния ($r \gg \frac{\hbar}{mc}$)	$\frac{e_1}{r} f_2(m)$, где $f_2(m) = \frac{\alpha}{4\sqrt{\pi}} \left(\frac{\hbar}{mcr}\right)^{3/2} \exp(-2mr)$ [2, с. 556]

Помимо электронов (когда $m = m_e$), указанные поправки могут применяться также к мюонам (когда $m = m_\mu$, где m_μ — масса мюона). В силу того, что масса мюона значительно меньше массы электрона, на расстояниях порядка комптоновской длины волны электрона мюонные поправки пренебрежимо малы. На расстояниях порядка комптоновской длины волны пиона методы квантовой электродинамики для вычисления соответствующих поправок уже не вполне пригодны, поскольку пионы являются сильновзаимодействующими частицами. Алгоритм выбора соответствующих поправок отображен в виде блок-схемы (рисунок 1) и в виде Р-схемы (рисунок 2).

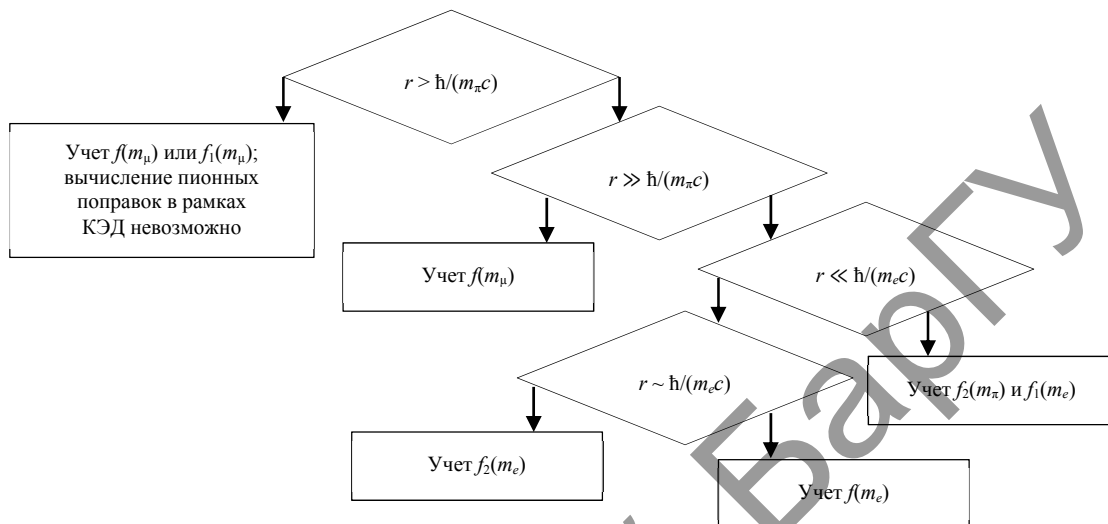


Рисунок 1 — Блок-схема алгоритма выбора поправок к закону Кулона в зависимости от расстояния

Учет поправок к закону Кулона при различных расстояниях



Рисунок 2 — Р-схема алгоритма выбора поправок к закону Кулона в зависимости от расстояния

Заключение. Предложенные таблицы и Р-схемы могут быть использованы в образовательном процессе как опорные конспекты, в том числе при подготовке к экзамену по разделу «Электричество» (в курсе общей физики для физических специальностей; для нефизических специальностей углубление в такие вопросы на сегодня не характерно). Внедрение подобных таблиц и схем в образовательный процесс возможно и в виде творческих заданий учащимся на составление таких таблиц и схем по отдельным вопросам курса «Электричество и магнетизм».

Список цитируемых источников

1. Серый, А. И. О точности формулировки закона Кулона в учебной литературе / А. И. Серый, З. Н. Серая // Формирование готовности будущего учителя математики к работе с одаренными учащимися : сб. материалов Междунар. науч.-практ. конф., Брест, 10—11 апр. 2018 г. / Брест. гос. ун-т им. А. С. Пушкина ; редкол.: Н. А. Каллаур [и др.] ; под общ. ред. Е. П. Гринько. — Брест : БрГУ, 2018. — С. 194—196.
2. Теоретическая физика : учеб. пособие для вузов : в 10 т. / Л. Д. Ландау [и др.]. — 2-е изд., перераб. — М. : Наука, 1980. — Т. IV : Квантовая электродинамика. — 704 с.
3. Силаев, Н. В. Программирование (алгоритмизация с визуализацией средствами Р-схем) : курс лекций / Н. В. Силаев, А. И. Серый, З. Н. Серая ; Брест. гос. ун-т им. А. С. Пушкина. — Брест : БрГУ, 2018. — 141 с.