

А.И. СЕРЫЙ, З.Н. СЕРАЯ

УО «БрГУ имени А.С. Пушкина» (г. Брест, Беларусь)

О ТОЧНОСТИ ФОРМУЛИРОВКИ ЗАКОНА КУЛОНА В УЧЕБНОЙ ЛИТЕРАТУРЕ

В связи с тем, что изучение закона Кулона входит не только в школьные, но и вузовские курсы физики, следует признать, что его формулировка в учебной литературе не всегда обладает достаточной точностью. В связи с этим можно дать следующую формулировку.

1. Сила взаимодействия между двумя неподвижными точечными зарядами, находящимися в вакууме на макроскопических расстояниях, прямо пропорциональна величине этих зарядов, обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними и направлена вдоль прямой, соединяющей эти заряды.

Данную формулировку можно проанализировать с помощью таблиц, которые представлены ниже и могут быть полезными при обобщении и закреплении учебного материала (таблица 1, 2).

Источником может служить [1, с. 17, 34].

Таблица 1 – Дискуссионные фрагменты в формулировке закона Кулона

Фрагмент	Почему это может быть предметом дискуссий	Результаты на данный момент
1. Авторство, приписываемое Кулону	Кавендиш проводил опыты раньше Кулона, но результаты были опубликованы через 100 лет, а Кулон опубликовал результаты сразу; более простые формулировки предлагались до Кулона и другими исследователями	Существуют сторонники (хотя их не большинство) использования других фамилий помимо (или вместо) Кулона
2. Обратная пропорциональность квадрату расстояния	Расстояние может быть и в степени, немного отличной от 2; в последующие столетия проводились уточняющие опыты	Возможная поправка к степени 2 в знаменателе стала меньше 10^{-15}
3. Направление вектора силы вдоль вектора, соединяющего заряды	С открытием ядерных сил выяснилось, что силы взаимодействия могут быть не только векторными, но и тензорными, когда их направление не совпадает с вектором, направленным от одной частицы к другой	Пока нет серьезных экспериментальных оснований говорить о наличии тензорных поправок (в вакууме)

Таблица 2 – Условия, которые должны выполняться для применимости закона Кулона

Условие	Что будет в случае невыполнения условия	Примечание
Заряды должны быть неподвижными	Сила взаимодействия будет включать еще и силу Лоренца	При достаточно малых скоростях силой Лоренца можно пренебречь по сравнению с кулоновской
Заряды должны быть точечными	Для нахождения силы взаимодействия необходимо будет совершать интегрирование по областям, в которых распределены оба заряда	Указанная необходимость отпадает, если: а) заряды распределены сферически-симметрично; б) расстояние между заряженными областями значительно превышает линейные размеры самих областей
Заряды должны находиться в вакууме	В неоднородной анизотропной среде, когда ϵ становится тензорной величиной, все существенно усложняется	В случае однородной изотропной диэлектрической среды приведенная выше формулировка остается в силе (но сила взаимодействия уменьшается в ϵ раз)
Масштаб расстояний должен быть классическим (макроскопическим)	На меньших расстояниях (для некоторых частиц уже на атомных, от 10^{-8} см) вместо законов классической физики применимы законы квантовой физики	В квантовой механике понятие силы как градиента потенциальной энергии (со знаком «минус») не применяется, т.к. операция дифференцирования по координате начинает терять смысл, поэтому закон Кулона формулируется не для силы, а для энергии взаимодействия двух зарядов

Исходя из последнего пункта таблицы 2, возможна иная формулировка закона Кулона, пригодная как в макромире, так и в микромире:

2. 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.

Не будем усложнять данную формулировку требованием того, чтобы частицы не были тождественными с полужелым спином, т. к. необходимость обменных поправок к энергии, вызванная принципом Паули, относится в таком случае не только к заряженным частицам.

Основные замечания по двум формулировкам смотрите в таблице 3.

Таблица 3 – Сравнение двух формулировок закона Кулона

Формулировка	1	2
Достоинства	легче подвергается прямой экспериментальной проверке	применима не только в классической, но и в квантовой физике
Формулировка применима для составления	классических уравнений движения	как классических уравнений движения, так и волновых уравнений
Расстояния снизу ограничены, по крайней мере	величиной $r_0 = \frac{e^2}{mc^2} = 2,82 \cdot 10^{-13}$ см (классический радиус электрона), когда при взаимодействии любых объектов (даже если их комптоновская длина волны еще меньше) начинают проявляться эффекты квантовой электродинамики [2, с. 562–565]	
Это приводит к тому, что	любые законы классической электродинамики (а не только закон Кулона) уже вообще не применяются	закон Кулона еще не отвергается, но у него появляются поправки, вычисляемые в рамках квантовой электродинамики
Но в ряде случаев ограничения «снизу» наступают уже на расстояниях порядка	атомных ($\sim 10^{-8}$ см) или ядерных ($\sim 10^{-12}$ см), когда вступают в силу законы квантовой механики	комптоновской длины волны (если она больше r_0 ; например, у электронов $\lambda_C = \frac{\hbar}{mc} = \frac{e^2}{mc^2} \cdot \frac{\hbar c}{e^2} \approx 137r_0 = 3,86 \cdot 10^{-11}$ см), когда положение частицы нельзя в принципе найти точнее

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сивухин, Д. В. Общий курс физики : учеб. пособие для вузов : в 5 т. / Д. В. Сивухин. – 4-е изд., стер. – М. : Физматлит : Изд-во МФТИ, 2004. – Т. 3 : Электричество. – 656 с.
2. Берестецкий, В. Б. Теоретическая физика : учеб. пособие для вузов : в 10 т. / В. Б. Берестецкий, Е. М. Лифшиц, Л. П. Питаевский. – 4-е изд., испр. – М. : Физматлит, 2002. – Т. IV : Квантовая электродинамика. – 720 с.