

УДК 372.853

ШКОЛЬНАЯ ФИЗИКА: ТРЕТИЙ ЗАКОН НЬЮТОНА

Кычкин И.С., Сивцев В.И.

ФГАОУ ВПО «Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова», Якутск,
e-mail: kof_fti@mail.ru.

В статье рассматриваются случаи нарушения третьего закона Ньютона. Показывается, что более общим является закон изменения импульса. Статья будет полезна учителям общеобразовательных школ и преподавателям высших учебных заведений.

Ключевые слова: физика в школе, третий закон Ньютона, сила Лоренца, закон изменения импульса, преобразования Лоренца

SCHOOL PHYSICS: NEWTON'S THIRD LAW

Kychkin I.S., Sivtsev V.I.

North-Eastern Federal University, Yakutsk, e-mail: kof_fti@mail.ru

In the article we consider violations of Newton's third law. We show that the law of momentum conversion is more general. The article will be useful for school and higher education institutions teachers.

Keywords: physics at school, Newton's third law, Lorentz force, law of momentum conversion, Lorentz conversion

Третий закон Ньютона в его собственной формулировке гласит, что [1-3] действию всегда есть равное и противоположное противодействие – взаимные действия двух тел друг на друга равны и направлены в противоположные стороны.

Сегодня формулировка этого закона несколько иная, но эквивалентная: силы, с которыми два тела действуют друг на друга, одинаковы по модулю, но направлены противоположно:

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}, \quad (1)$$

где $\vec{F}_{12}$ ($\vec{F}_{21}$) – сила, действующая на первое (второе) тело, со стороны второго (первого) тела. Мы знаем, что тела могут взаимодействовать друг с другом непосредственно при соприкосновении или на расстоянии через поля.

Но можно показать, что и взаимодействие при соприкосновении является частным случаем взаимодействия через поля (полевого взаимодействия). Взаимодействие на расстоянии осуществляется гравитационными, электромагнитными и другими (в мире элементарных частиц) полями. Например, какое-то тело создает вокруг себя какое-то поле (гравитационное, электрическое, магнитное и т.д.), которое воздействует на другое тело, находящееся на расстоянии, с какой-то силой. И наоборот. Взаимодействие при соприкосновении тел также проявляется из-за полевого взаимодействия – взаимодействия через молекулярные поля. Молекула, находящаяся

близко от поверхности тела, создает свое поле, которое проявляется на очень небольшом расстоянии (порядка 10^{-9} м), и поэтому взаимодействие «пограничных» молекул двух тел проявляется на расстоянии порядка 10^{-9} м, что и происходит практически при соприкосновении тел.

Есть случай, когда третий закон Ньютона в виде формулы (1) нарушается [4]. Рассмотрим (см. рис. 1) две частицы с зарядами e_1 и e_2 , движущиеся в непараллельных направлениях со скоростями $\vec{v}_1$ и $\vec{v}_2$. Для определенности рисунок заряды положительные (от этого выводы не меняются).

Подвижный заряд создает вокруг себя не только электрическое, но и магнитное поле. Силы взаимодействия за счет электрического поля (кулоновские силы) равны по величине, направлены противоположно по линии, соединяющей частицы (это силы $\vec{F}_{1e}$ и $\vec{F}_{2e}$), т.е. они подчиняются третьему закону Ньютона. Но силы $\vec{F}_{1m}$ и $\vec{F}_{2m}$, возникающие за счет того, что подвижные заряды (т.е. токи) создают магнитные поля $\vec{B}_1$ и $\vec{B}_2$, направления которых определяются правилом правого буравчика и показаны на рисунке символами $\odot$ ($\vec{B}_1$ направлена к нам) и $\oplus$ ($\vec{B}_2$ направлена от нас), не направлены вдоль линии, соединяющей частицы. Это силы Лоренца, определяемые по формулам

$$\vec{F}_{1m} = \frac{e_1}{c} [\vec{v}_1 \times \vec{B}_1], \quad \vec{F}_{2m} = \frac{e_2}{c} [\vec{v}_2 \times \vec{B}_2].$$

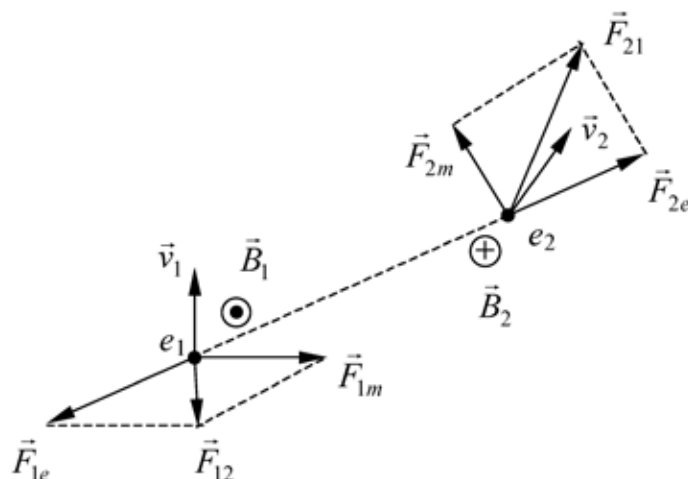


Рис. 1

Их направления (опять!) определяют по правилу правого буравчика (вспомните определение векторного произведения), и они показаны на рисунке. Из рисунка видно, что силы взаимодействия $\vec{F}_{12}$ и $\vec{F}_{21}$ подвижных зарядов не подчиняются третьему закону Ньютона:

$$\vec{F}_{12} \neq -\vec{F}_{21}. \quad (2)$$

Но (см. определение сил Лоренца) отношение силы Лоренца к кулоновской силе имеет величину порядка $\left(\frac{v}{c}\right)^2$:

$$\frac{F_{1m}}{F_{1e}} \approx \left(\frac{v_1}{c}\right)^2, \quad \frac{F_{2m}}{F_{2e}} \approx \left(\frac{v_2}{c}\right)^2,$$

т.е. в случае нерелятивистских скоростей

$$\left(\frac{v}{c}\right)^2 \ll 1$$

отклонением от третьего закона Ньютона можно пренебречь.

Да, в виде (1) третий закон Ньютона в электродинамике нарушается. Если воспользоваться законом изменения импульса

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F}, \quad (3)$$

то неравенство (2) принимает вид:

$$\frac{d\vec{p}_1}{dt} \neq -\frac{d\vec{p}_2}{dt} \implies$$

$$\frac{d}{dt}(\vec{p}_1 + \vec{p}_2) \neq 0 \implies \vec{p}_1 + \vec{p}_2 \neq \text{Const}, \quad (4)$$

где $\vec{p}_1$ ($\vec{p}_2$) – импульс первой (второй) частицы. Получили неожиданный (на первый взгляд) результат – полный импульс изолированной системы из 2-х электрически заряженных частиц не сохраняется! Но дело в том, что эти частицы электрически заряженные и создают вокруг себя электромагнитные поля, которые также обладают импульсом, плотность которого определяется формулой

$$\frac{d\vec{p}_{em}}{dV} = \frac{1}{\mu_0 c^2} [\vec{E} \times \vec{B}]. \quad (5)$$

Поэтому полный импульс рассмотренной системы сохраняется:

$$\vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \vec{p}_{em} = \text{Const}, \quad (6)$$

т.е., закон сохранения импульса не нарушается.

Здесь

$$\vec{p}_{em} = \int d\vec{p}_{em} \quad (7)$$

импульс электромагнитного поля, создаваемого этими зарядами.

Мы видим, что третий закон Ньютона сводится к закону сохранения импульса и, поэтому, хотя в электродинамике этот закон в виде (1) нарушается, но в виде закона сохранения импульса выполняется.

Приведем еще один пример, который был бы полезен учителям физики. Имеем в виду мысленный опыт академика, лауреата Нобелевской премии П. Капицы. Пусть за двумя одноименными положительными зарядами e наблюдают Коля и Вася, находящиеся в системах отсчета K и K' , причем относительно системы отсчета K заряды покоятся, а система отсчета K' движется вниз со скоростью v , т.е., заряды e движутся относительно K' (относительно Васи) вверх со скоростью v (см. рис. 2).

Дело в том, что это релятивистский эффект (множитель $(1 - \frac{v^2}{c^2})$ всегда говорит о наличии релятивистского эффекта), поэтому при переходе с одной системы отсчета (например, K) в другую (например, K') необходимо воспользоваться преобразованиями Лоренца для $\vec{E}$ и $\vec{H}$, тогда никаких парадоксов не получается – сила взаимодействия между зарядами не зависит от того, где мы находимся.

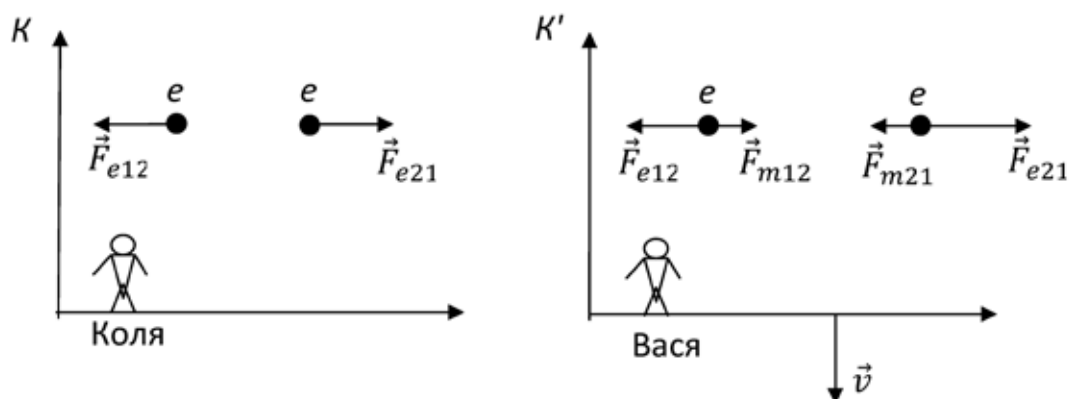


Рис. 2

Коля скажет, что заряды отталкиваются по закону Кулона:

$$\text{Коля} \Rightarrow F_{\text{лэз}} = F_{e12} = F_{e21}, \quad (8)$$

а Вася скажет, что заряды образуют параллельные токи, которые притягиваются друг к другу, поэтому их сила взаимодействия уменьшится на величину силы их притяжения:

$$\text{Вася} \Rightarrow F_{2\text{эз}} = F_{e12} - F_{m12} = F_{e21} - F_{m21} \quad (9)$$

и, на первый взгляд, оба правы. Легко оценить отношение этих сил:

$$\frac{F_{2\text{эз}}}{F_{\text{лэз}}} \approx 1 - \frac{v^2}{c^2}, \quad (10)$$

которое не равно единице, т.е., получается, что сила взаимодействия зарядов зависит от того, где мы находимся, чего не должно быть. Получается парадокс. В чем дело?

Заключение

В статье постарались обратить внимание преподавателей физики (в школах, вузах) на некоторые моменты в третьем законе Ньютона, на которые в школьных учебниках по физике (и не только в школьных) не уделяется достаточного внимания, хотя преподаватели (учителя) должны все это «держать в уме» в процессе преподавания физики или даже постараться объяснить (в школах с углубленным изучением физики).

Список литературы

1. Пурешева Н.С., Важеевская Н.Е., Исаев Д.А. Физика 10 класс. – М.: Дрофа, 2013. – 272 с.
2. Перышкин А.В., Гутник Е.М., Физика 9. – М.: Дрофа, 2014. – 320 с.
3. Мякишев Г.Я., Буховцев Б.Б., Сотский Н.Н. Физика 10. – М.: Просвещение, 2014. – 416 с.
4. Кычкин И.С. Механика: Учеб. пособие для вузов. – Якутск: Изд. ЯГУ, 2003. – 357 с.