



**Абрамов Александр Анатольевич**

Доктор физико-математических наук, профессор  
Московского института электронной техники.

## О могуществе законов сохранения

Обсуждаются вопросы и проблемы, связанные с законами сохранения энергии и импульса в применении к некоторым задачам физики и химии. Приводятся примеры, когда использование одних только законов сохранения позволяет дать ответ на возможность или невозможность определённых процессов.

Никто не знает, кто и когда запустил эту удивительную «машинку» под названием наша Вселенная и кто сообщил ей вечное движение и наполнил её загадочными субстанциями, называемыми массой и энергией. Однако законы, управляющие этой «машинкой», может и должна изучать наука – физика.

### Введение

Энергия и импульс являются одними из самых фундаментальных понятий физики. Законы сохранения энергии (ЗСЭ) и импульса (ЗСИ) остаются справедливыми даже в квантовой механике, описывающей поведение микрочастиц (электроны, протоны, мезоны и другие), где оказываются несправедливыми законы Ньютона. Как установила немецкий математик Эмми Нёттер (если самым крупным физиком-женщиной была Мария Кюри, то самым крупным ма-

тематиком-женщиной была Эмми Нёттер), ЗСЭ и ЗСИ следуют из однородности времени и пространства. Однородность времени означает, что все моменты времени равнозначны, однородность пространства означает равнозначность всех точек пространства. Это, в свою очередь, означает, что один и тот же физический эксперимент можно проводить в разных точках пространства в разные моменты времени, и итог эксперимента будет всегда одним и тем же.

## Различные виды энергии



Природа энергии, так же как и природа времени, пространства, массы и электрического заряда, до конца не понята. Если отвлечься от проблем ядерной физики, физики элементарных частиц и астрофизики, где сейчас активно обсуждаются такие понятия, как тёмная масса и тёмная энергия, то в повседневной жизни мы сталкиваемся со следующими формами энергии. Это гравитационная, электромагнитная, химическая, тепловая, энергия излучения и энергия покоя тел, имеющих массу, кинетическая и потенциальная. Все виды энергии тесно связаны друг с другом и способны превращаться из одного вида в другие. Несомненно, что ЗСЭ, согласно которому энергия любой замкнутой системы при всех процессах, происходящих в системе, сохраняется, энергия при этом только превращается из одной формы в другую, в ряде случаев служит путеводной нитью при анализе появляющихся в эксперименте новых фактов. В то же время попытка кратко сформулировать ЗСЭ, чтобы его можно было использовать для решения конкретных задач для всех видов энергии и всех возможных видов

её превращений, заведомо обречена на неудачу. Разные виды энергии обладают различными свойствами, для описания которых существует обширная литература. Отметим, в частности, что механическая энергия молекул, а также энергия их взаимодействия, при увеличении числа молекул до макроскопических величин приобретает новое качество, описываемое законами термодинамики.

Гравитационная энергия характеризует гравитационное поле, которое создают вокруг себя тела, имеющие массу. Аналогично, электрической энергией обладает электрическое поле, порождаемое электрическими зарядами. Электрическая энергия обнаруживает себя во взаимодействии электрических зарядов друг с другом, так же как гравитационная – во взаимодействии массивных тел. Энергия таких взаимодействий является потенциальной энергией. Движущиеся заряды порождают магнитное поле, с которым связана магнитная энергия.



Можно провести аналогию между процессами, протекающими при колебаниях пружинного маятника, и процессами, протекающими при ко-



лебаниях в электрическом колебательном контуре. Подобно тому, как кинетическая энергия груза переходит в потенциальную энергию пружины, энергия магнитного поля катушки с током в колебательном контуре превращается в потенциальную энергию конденсатора. Это позволяет сказать, что энергия электрического поля в конденсаторе похожа на потенциальную энергию сжатой пружины, а энергия тока в катушке индуктивности похожа на кинетическую энергию движущегося груза. Если то, что электрическая энергия в конденсаторе действительно является потенциальной, – это непреложный факт, то энергия магнитного поля катушки, строго говоря, кинетической энергией не является.



Согласно специальной теории относительности (СТО) каждая неподвижная материальная частица имеет энергию покоя, связанную с её массой соотношением Эйнштейна

$$E_0 = mc^2, \quad (1)$$

где  $c$  – скорость света в вакууме. Кинетическая энергия частицы, движущейся со скоростью  $v$ , определяется как разность полной энергии движущейся частицы

$$E = mc^2 / \sqrt{1 - v^2/c^2}$$

и энергии покоя  $E_0$ :

$$T = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - mc^2. \quad (2)$$

Эта формула в нерелятивистском случае (при  $v \ll c$ ) переходит в обычное выражение

$$T = mv^2/2.$$

Отметим, что в последнее время выдвинуты серьёзные аргументы против использования понятия массы покоя и такой зависящей от скорости величины, как релятивистская масса

$$m/\sqrt{1 - v^2/c^2}.$$

Должно использоваться только понятие массы, фигурирующей в формуле (1), а также определяемое соотношением

$$\frac{E^2}{c^2} - p^2 = m^2 c^2, \quad (3)$$

где  $\vec{p} = m\vec{v}/\sqrt{1 - v^2/c^2}$  – релятивистский импульс. Эта масса релятивистски инвариантна (т. е. не меняется при переходе от одной инерциальной системы отсчёта к другой) и для неё выполняется закон сохранения массы.

Особенностью кинетической энергии и магнитной энергии является то, что величина этих энергий зависит от выбора инерциальной системы отсчёта (СО), где они определяются. Если перейти в СО, в которой материальная частица или заряд покоятся, то эти энергии обращаются в нуль. При преобразовании от СО, относительно которой заряд движется, в СО, в которой заряд покойится и его магнитное поле равно нулю, изменяется и величина энергии электрического поля этого заряда. То есть деление энергии заряженной частицы на электрическую и магнитную составляющие является относительным. Оно зависит от выбора СО,

что указывает на единую природу этих энергий.

Деление механической энергии на кинетическую и потенциальную не всегда возможно. В квантовой механике это невозможно из-за принципа неопределенности Гейзенберга, согласно которому для микрочастиц невозможно одновременно точно определить координаты и скорости таких частиц. В то же время,

потенциальную энергию нельзя обратить в нуль никаким преобразованием системы отсчета.

Тепловая и химическая энергии не могут рассматриваться в качестве фундаментальных видов энергии, поскольку они складываются из кинетических и потенциальных энергий отдельных атомов и молекул, а также из энергий их взаимодействия.

## Неупругие процессы и дефект масс

Согласно релятивистским формулам, количество энергии, которое поглощается либо выделяется в процессе некоторой химической реакции, равно разности масс реагентов, вступающих в реакцию, и масс продуктов реакции, умноженной на квадрат скорости света. В ядерной физике масса ядра меньше суммы масс протонов и нейтронов, из которых это ядро состоит. Разность этих величин называется дефектом масс. Это означает, что масса в релятивистской физике не аддитивна, в отличие от классической физики, в которой две гири массой в один килограмм, положенные на весы, дают массу строго два килограмма.



Соотношение (3) применимо как к отдельным частицам, так и к составным телам. Энергия составного

тела содержит также энергию внутреннего движения составляющих элементов, а также энергию их взаимодействия друг с другом. Эта последняя энергия трактуется в классической физике как внутренняя энергия тела, а при процессах, в которых участвует данное тело, изменение такой энергии трактуется как количество тепла, полученного или отданного телом. Рассмотрим абсолютно неупругое соударение двух одинаковых шариков с массами  $m \neq 0$ , двигающихся навстречу друг другу с одинаковыми скоростями. После столкновения образуется покоящееся тело с массой  $m^*$ . Из закона сохранения энергии можно записать

$$\frac{2mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = m^* c^2. \quad (4)$$

В нерелятивистском приближении ( $v \ll c$ ) левая часть (4) приближенно равна

$$\frac{2mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \approx 2mc^2 \left(1 + \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2}\right),$$

и тогда соотношение (4) перепишем как

$$2 \frac{mv^2}{2} = (m^* - 2m)c^2 = \Delta mc^2 = Q. \quad (5)$$

Из формулы (5) видно, что нерелятивистская кинетическая энергия



соударяющихся частиц превращается после такого соударения в тепло-

ту  $Q$ , которая на языке СТО выражается через дефект масс  $\Delta m$ .

## Об энергии излучения

Энергия излучения есть сумма энергий отдельных фотонов. Неаддитивность релятивистской массы приводит к интересным следствиям. Действительно, согласно формуле (3) и соотношению

$$p = E/c = \hbar v/c, \quad (6)$$

связывающему импульс  $p$ , энергию  $E$ , частоту  $v$  фотона, его масса равна нулю. При этом два идентичных фотона, движущихся в одном направлении, также имеют массу, равную нулю. А вот если эти фотоны двигаются навстречу друг другу,

то, поскольку их суммарный импульс в этом случае равен нулю, то в соответствии с формулой (3) их масса уже отлична от нуля. Это обстоятельство, а также существование процессов образования электронно-позитронных пар при взаимодействии гамма-квантов (гамма-кванты – это фотоны очень больших энергий и частот) и аннигиляции таких пар с образованием гамма-квантов, указывают на существование глубокого родства между всеми видами масс.

## О предсказательной силе законов сохранения

В некоторых случаях ЗСЭ и ЗСИ позволяют дать ответ на весьма нетривиальные вопросы. Например, можно задать следующий важный вопрос: возможен ли процесс, единственным конечным результатом которого будет рождение электронно-позитронной пары из единственного фотона. Ответ такой: нет, невозможен, т. к. в таком процессе невозможно одновременное выполнение ЗСЭ и ЗСИ. Действительно, у фотона обязательно есть энергия  $E = \hbar v$  и импульс  $p = E/c$ . У электронно-позитронной пары тоже есть энергия, но для неё можно указать СО (это система центра масс), в которой у электронно-позитронной пары импульс равен нулю. Согласно принципу относительности физические процессы можно рассматривать в любой инерциальной СО. Следовательно, по ЗСИ в системе центра масс электронно-позитронной пары и у исходного фотона импульс должен быть равен нулю, что заведомо не выполняется. Заметим, что скорость фотона согласно постулату специальной теории относительности одинакова в любой инерциальной системе отсчёта. Ясно, что по

тем же причинам невозможен и обратный процесс аннигиляции электронно-позитронной пары с образованием только одного фотона. Более того, приведённые аргументы позволяют сразу сказать, что в газовой фазе в обычной химической кинетике невозможны процессы диссоциации двухатомной молекулы на два атома и обратный процесс рекомбинации двух атомов в одну молекулу.



Именно поэтому многие химические реакции, невозможные в газовой фазе, легко идут на твёрдой по-

верхности, на которой всегда есть возможность у реагирующих атомов и молекул обменяться импульсом с атомами поверхности. Этим и объясняется применение в химической кинетике таблеток катализатора с развитой внутренней поверхностью пор.

Замечательный пример, когда ЗСЭ помог предсказать существование новой частицы, связан с созданием теории бета-распада. Непрерывный энергетический спектр электронов, образующихся при бета-распаде, не согласовывался с необходимостью ядрам атомов иметь дискретный энергетический спектр согласно законам квантовой механи-

ки. В этой связи датский физик Нильс Бор даже выступал с идеей о несохранении энергии! Однако было и другое объяснение – «потерянную» энергию уносит какая-то неизвестная и незаметная частица. И с такой идеей выступил другой замечательный физик – Вольфганг Паули в 1930 г. Предсказанная Паули частица в работах 1933 – 1934 г.г. итальянца Энрико Ферми на итальянский манер была названа «нейтрино». Надо сказать, что нейтрино практически не взаимодействует с веществом, поэтому экспериментальные поиски этой частицы растянулись на десятки лет!

## Юмор Юмор Юмор Юмор Юмор Юмор

### Правила физики

В день стипендии действует правило правой руки: студент закрывает правой рукой цены в меню, выбирает названия блюд, покупает их и с удовольствием съедает. Через неделю после стипендии вступает в действие правило левой руки: он закрывает левой рукой названия блюд, выбирает низкие цены и покупает еду. В дни перед стипендией наступает время действия правила буравчика: студент входит в столовую, вертится около меню и уходит.

### Студенческая угроза

– Ну, формула, погоди! Я тебя запомнил!

### Подготовительные переговоры

Абитуриент телеграфирует маме: «Экзамен не сдал. Подготовь папу». Спустя некоторое время получает ответ: «Папа подготовлен. Подготовься сам».

### Энциклопедист, однако...

Встречаются два друга. Один спрашивает:

- Куда ты спешишь?
- На экзамен.
- А по какому предмету?
- Да там скажут.

