
*Еще об эквивалентности
массы и энергии*

Вытекающая из теории относительности эквивалентность массы и энергии настолько противоречит старым классическим представлениям, что кажется целесообразным подробнее обсудить общие следствия из нее. К тому же опыт преподавания показывает, что студенты часто сталкиваются с большими трудностями при глубоком изучении эйнштейновских понятий массы и энергии. У них возникают вопросы типа: значит, масса то же самое, что и энергия?, состоит ли мир из одной только энергии?, что есть масса, если ее можно превратить в энергию, и наоборот? и, наконец, что такое *энергия*?

Начнем с выяснения того, откуда происходят обычные представления о телах с определенной и неизменной массой. Очевидно, эти представления основываются на наблюдении, что мир состоит из большого числа предметов и сущностей, которые можно сравнивать по их размерам, форме, весу и т. д. и которые можно рассматривать как состоящие из определенных количеств или массы некоторых веществ, например камня, земли, воды, металла, дерева и т. д. Конечно, оказывается, что эти предметы изнашиваются, ломаются, плавятся, подвергаются коррозии, распадаются, испаряются или сгорают так, что при этом остаются только газы. Ясно, таким образом, что они фактически сами по себе не неизменны и масса их не постоянна, хотя их видимые свойства могут не испытывать заметных изменений за малый или большой промежуток времени.

Однако в процессе мышления мы почему-то считаем, что должна существовать какая-то абсолютно неизменная основа для всего сущего.

Например, на раннем этапе развития науки ученые предполагали, что атомы являются абсолютно неизменными сущностями, простейшими «кирпичиками» мироздания, так что постоянно изменяющийся характер вещества в больших масштабах считался не чем иным, как следствием движений лежащих в основе всего неизменных атомов. Затем было обнаружено, что сами атомы обладают переменной структурой, поскольку они состоят из «элементарных частиц» (электронов, протонов и нейтронов). Таким образом, атомы могут изменяться, превращаясь в другие атомы, достраиваясь или распадаясь на части и т. д. Но при этом предполагалось, что все же существует нечто абсолютно неизменное — элементарные частицы. Однако, как мы знаем, были открыты ядерные и другие процессы, при которых эти частицы превращаются друг в друга, рождаются и взаимно аннигилируют, причем выделяется или поглощается соответствующее количество энергии. Таким образом, вновь потерпели провал поиски абсолютно неизменных сущностей и веществ. Более того, стало ясно, что как в нашем жизненном опыте, так и при научных исследованиях реально воспринимаемые и наблюдаемые нами предметы, сущности, вещества и т. д. всегда (насколько мы знаем) проявляют лишь *относительную неизменность* своих свойств, и эту относительную неизменность часто по ошибке принимают за абсолютную.

Если человечество не встречало никогда ничего абсолютно неизменного, то спрашивается, как могла возникнуть эта идея — идея чрезвычайно стойкая, к которой мы неизменно возвращаемся, несмотря на все новые опыты и наблюдения, снова и снова показывающие ее несовместимость с известными нам фактами? В этот вопрос можно внести некоторую ясность, рассмотрев проблему развития понятия объекта у людей в младенческом и детском возрасте. (Исследование этой проблемы было проведено в ходе анализа развития представлений о пространстве и времени у человека как личности и более подробно обсуждается в приложении.) Установлено, что у очень маленьких детей, по-видимому, на самом деле отсутствует понятие неизменного объекта. Более того, их отношение к объектам таково, как если

бы эти последние начинали свое существование, когда были впервые замечены, и прекращали существовать при выходе из поля восприятия. У ребенка лишь постепенно складываются представления об объекте, существующем, даже когда ребенок его не воспринимает. Понятие постоянного количества вещества развивается еще позднее, и даже трех- или четырехлетние дети часто совершенно не разбираются в этом вопросе. Но с течением времени эти представления формируются и постепенно входят в привычку, так что мы начинаем непроизвольно при любых обстоятельствах выделять тела, сущности или субстанции с фиксированными характеристиками. Мы начинаем даже чувствовать, что не способны представить себе мир, который не был бы построен из неизменных сущностей или веществ того или иного рода.

Представление о том, что должны существовать какие-то абсолютно неизменные сущности, основывается не только на привычке мыслить определенным образом, появляющейся в раннем детстве. Подобно аналогичным представлениям об абсолютном пространстве и времени, оно возникает также, по крайней мере частично, в структуре нашего разговорного языка. Увидев нечто, обладающее *относительно неизменными* свойствами, мы даем ему название. Это название остается, однако, тем же, даже если наш объект изменяется. Ввиду сохранения названия мы склонны думать о нем теперь как о прежнем предмете. Самым ярким примером может служить сам человек. Ведь каждый продолжает носить одно и то же имя, которое он носил и 10, и 20, и 30 лет назад. Но ведь очевидно, что это совсем другое лицо как в физическом, так и в умственном отношении. Фактически оно сейчас уже другое, чем было вчера или даже минуту назад. В подобном же процессе постоянного изменения находится и слиток металла — его атомы движутся, он окисляется, устает и т. д. В определенных пределах и для коротких интервалов времени такими изменениями можно пренебречь. Итак, неизменность названия объекта дает адекватное представление о нем лишь в определенных узких границах. Источником наших трудностей является привычка, уходящая своими корнями в эпоху,

когда человечество только начинало пользоваться языком (и равным образом в соответствующий период детства каждого из нас). Мы отождествляем вещи, т. е. бессознательно принимаем, что все, носящее одно и то же название, — это, по меньшей мере, по своей сути одна и та же вещь.

Вернемся теперь к проблеме массы и энергии в физике. Термин «масса» был дан определенным свойствам, наблюдаемым на опыте. В физике эти свойства приобрели более точный смысл. Масса, понимаемая в обыденной жизни как «неизменное количество вещества», соответствует в физике двум более точно определенным свойствам. Одним из них является инертность, т. е. способность тел сопротивляться ускорению, а другим — гравитация.

Рассмотрим сначала *инертный аспект* понятия массы. Уравнение Ньютона $ma = F$ показывает, что сила, требующаяся для сообщения телу определенного ускорения, пропорциональна массе тела. Смысл этой массы не совпадал бы с обычно принятым, если бы она не была постоянной. Иными словами, уравнения Ньютона (18.1) и (18.2) не образуют полной системы, если к ним не добавить уравнения (18.3), т. е. $dm/dt = 0$, или $m = \text{const}$. Часто забывают о важной роли этого последнего уравнения именно из-за нашей обыденной привычки думать о массе как о «неизменном» свойстве вещества. В действительности факт постоянства коэффициента пропорциональности m между силой и ускорением данного объекта следует не из житейских *представлений* о массе. Наблюдения подтверждают, что этот коэффициент пропорциональности является *неизменным* при всех опытах, проводимых в области применимости механики Ньютона.

Вторым важным проявлением массы объекта в физике является ее присутствие в качестве постоянного коэффициента пропорциональности в законе тяготения, действующего между данным объектом и некоторым другим:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}.$$

Здесь r — расстояние между объектами, а G — гравитационная постоянная. При этом важно еще отметить, что

из всех экспериментов, доступных в настоящее время, следует пропорциональность массы, фигурирующей в этом законе, инертной массе, стоящей в уравнениях движения. Ввиду постоянства отношения гравитационной и инертной масс возникла тенденция их отождествлять, т. е. им было дано одно и то же название, и поэтому их склонны были рассматривать как одно и то же. При этом мы, вероятно бессознательно, заменяем точный физический смысл гравитационной и инертной масс обыденным понятием массы как «неизменного количества вещества».

Мы нашли в релятивистской области (см. гл. 20), когда отношение v/c близко к единице, что законы движения Ньютона следует заменить законами Эйнштейна:

$$\frac{dp}{dt} = F, \quad \text{где} \quad p = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} = mv.$$

Таким образом, масса в этой более широкой области уже не является неизменной. Следовательно, ясно, что масса фактически является *относительно неизменной* в том смысле, что ее изменениями можно пренебречь лишь в области применимости теории Ньютона.

Гравитационный аспект понятия массы невозможно рассматривать в специальной теории относительности, он требует привлечения общей теории. Здесь достаточно кратко упомянуть о том, что в общей теории относительности Эйнштейна строгая пропорциональность гравитационной и инертной масс, неизменно подтверждаемая опытом, рассматривается как указание на то, что оба эти вида массы отражают разные, но взаимно связанные аспекты некоторого единого, более широкого круга понятий и законов, из которых вытекают *как* свойства инерции, *так* и законы тяготения. Это представление и было положено Эйнштейном в основу его «принципа эквивалентности» влияния ускорения системы отсчета и влияния гравитационного поля. Здесь понятие эквивалентности имеет смысл, аналогичный смыслу «эквивалентности» массы и энергии, т. е. оно относится к глубокой взаимосвязи между двумя разными величинами, заключающейся в том, что одна из величин должна быть

пропорциональна другой. Исходя из этого предположения, Эйнштейну удалось развить стройную и единую теорию — общую теорию относительности, в которой гравитационная и инертная массы рассматриваются как разные аспекты единого физического процесса. Таким образом, специальная теория относительности оказалась частным и приближенным предельным случаем общей, более или менее напоминая положение механики Ньютона как соответствующего предельного и приближенного случая специальной теории относительности.

Из сказанного ясно, что мы употребляем одно и то же слово «масса», говоря о совершенно разных свойствах, когда мы выходим за рамки области применимости теории Ньютона. Действительно, так как в релятивистской области масса тела не является неизменной, релятивистское понятие массы находится в противоречии с обыденным понятием массы как «неизменного количества вещества». Это обыденное понятие имеет разумный смысл лишь в области применимости теории Ньютона; следовательно, понятие «массы», используемое в теории относительности, не может соответствовать его обыденному значению. А именно в теории относительности под массой понимают главным образом некий коэффициент пропорциональности, фигурирующий в законах инерции и гравитации.

В связи с этим полезно вспомнить, что в любом случае обыденное представление о массе не является единственно возможным; оно сформировалось в ходе развития человечества и усвоено нами еще в детстве в такой мере, что вошло в привычку и кажется поэтому совершенно неизбежным и не подлежащим изменению. Как и в случае обыденных представлений о пространстве и времени, эта привычка мышления оказывается адекватной лишь в определенных границах. Важно, однако, суметь отказаться от этой привычки при выходе за рамки тех явлений, для которых она еще разумна.

Рассмотрим теперь смысл понятия энергии. Первоначально энергия определялась в физике как «количество движения». Это привело, однако, к горячим спорам на заре развития науки о том, что есть «истинное» количество движения — энергия или импульс. Позднее

выяснилось, что весь этот спор был беспредметным, так как единого понятия «количество движения» не существует. Более того, как энергия, так и импульс являются *сохраняющимися величинами* в том смысле, что полные их значения (просуммированные по всем составным частям рассматриваемой изолированной физической системы) не изменяются с течением времени.

При взаимодействии разных частей системы друг с другом между ними происходит обмен энергией и импульсом. При этом соответствующие полные значения сохраняются, однако энергия и импульс каждой из частей, конечно, претерпевают изменения. Одно уже это обстоятельство говорит о том, что полная энергия системы является величиной только *относительно неизменной*, и ее постоянство имеет место лишь тогда, когда рассматриваемая система изолирована и не вступает во взаимодействие со своим окружением.

Взаимодействия не ограничиваются одними лишь механическими обмeнами, к ним относятся также превращения разных видов энергии друг в друга. Например, механическая энергия может перейти в соответствующее количество электрической энергии, и наоборот; подобным же образом оба эти вида энергии могут переходить в эквивалентные им количества теплоты, и наоборот (последняя представляет собой энергию хаотического движения молекул — движения, которое перестает быть явно заметным, когда мы рассматриваем физическую систему на макроскопическом уровне). Такая способность превращения друг в друга взаимно эквивалентных количеств различных видов энергии является, безусловно, наиболее характерным физическим свойством энергии.

Так как полная энергия изолированной физической системы сохраняется, возникает тенденция вообще представлять энергию как некую *неизменную субстанцию*, подобную жидкости, перетекающей из одной части системы в другую. Но никто никогда и ни при каких обстоятельствах не наблюдал такой «жидкости». К тому же энергия всегда проявляет себя при движении как *относительно неизменная функция*. Таким образом, в случае

изолированного тела «инвариантом»¹⁾ является функция $mv^2/2$ в том смысле, что она остается постоянной, пока данное тело изолировано, и что в системе таких тел, взаимодействующих друг с другом, остается постоянной сумма энергий этих тел (в то время как, например, функция $m^2v^5/2$ не обладает подобными свойствами). Аналогичным образом протекающий через катушку с индуктивностью L электрический ток I обладает энергией $LI^2/2$, сохраняющейся в отсутствие сопротивления. Эта энергия может быть превращена в соответствующее количество механической энергии с помощью мотора или в соответствующее количество тепловой энергии с помощью сопротивления. Здесь мы подчеркнем, что энергия, хотя и обладает способностью превращаться из одного вида в другой, *всегда* является неизменной характеристикой или функцией некоторого вида движения и никогда не выступает в виде независимо существующей субстанции. Потенциальная энергия даже определяется как способность совершать работу, т. е. производить соответствующее движение, выражаемое через механическую, электрическую, тепловую или иную форму энергии.

На ранних этапах развития физики в принципе можно было еще представлять себе любое движение как некоторое качество или свойство каких-то частиц. Когда же было сделано открытие, что масса (и даже сами частицы) может «аннигилировать» и при этом освобождается эквивалентное количество энергии, эти представления оказались несостоятельными. Но если энергия уже не является свойством частиц, то как ее следует понимать? Что теперь могут означать понятия «энергия» и «движение», если энергия, например, оказалась всего лишь относительно неизменной характеристикой движения и если во Вселенной не существует никаких фундаментальных и неизменных носителей этого движения?

¹⁾ По-английски «invariant» означает и «инвариант», и «неизменный». В переводе используется как первый, так и второй термин в зависимости от контекста. В данном случае, как поясняет сам автор, он говорит о законе сохранения (неизменности), а не о какой-либо инвариантности при преобразовании координат. — Прим. перев.

Чтобы ответить на эти вопросы, мы сначала проведем различие между двумя видами энергии. С одной стороны, существует *энергия внешнего движения*, происходящего в крупных масштабах, когда, например, тело изменяет свое положение или ориентацию как целое. С другой стороны, существует *энергия внутреннего движения*, например теплового движения составляющих тело молекул, которое само по себе незаметно в крупных масштабах. Для внутреннего движения характерно, что оно обычно совершается в виде колебаний, когда движение в одну сторону сменяется движением в противоположную сторону (нечто подобное отражению) и т. д. В уже рассмотренном нами эйнштейновском примере с ящиком, заполненным излучением, последовательно отражающийся свет можно рассматривать как внутреннее движение.

Очевидно, понятия «внешний» и «внутренний» — чисто относительные по своему смыслу. Так, молекулярные движения, если их рассматривать в крупных масштабах, нужно отнести к «внутренним», так как в своей сумме они в этих масштабах взаимно уничтожаются. На молекулярном же уровне эти движения оказываются «внешними», так как молекулы изменяют свое пространственное положение заметным на *этом уровне* образом. Однако на том же молекулярном уровне движения электронов и ядер еще остаются «внутренними», хотя на более глубоких уровнях нам придется говорить о них как о «внешних», когда *эти* движения станут приводить к заметным перемещениям в пространстве.

Имея в виду эти замечания, вернемся теперь к вопросу: *что такое масса?* Отметим прежде всего, что в теории Эйнштейна масса и энергия не рассматриваются как *в корне различные понятия*. Более того, там они считаются двумя разными, но взаимно связанными сторонами единого общего процесса движения. В таком движении проявляется относительно неизменная способность совершать работу, осуществлять взаимодействие с другими системами и приводить эти системы в движение за счет движения исходной системы. Тогда мы и говорим об *энергии*. Кроме того, рассматриваемая система обладает определенной инертностью, т. е. способ-

ностью сопротивляться ускорению, равно как и определенным гравитационным притяжением к другим телам. Оба эти свойства определяются той величиной, которую называют «массой». Однако мы уже видели, что внутреннее движение тела (пусть это будет хаотическое движение молекул или движение света, отражающегося между стенками) дает вклад в инертную массу тела, равный Δm и определяемый по закону $\Delta m = \Delta E/c^2$, где ΔE — энергия, связанная с этим движением. Более того, как мы уже упоминали, Эйнштейн показал в своей общей теории относительности, что *эта энергия вносит вклад в гравитационную массу тела*, определяемый этим же законом. Так как теория относительности в любом случае требует отказа от представлений о массе как о «неизменном количестве вещества», то тем самым она утверждает, что если физическая система приобретает (в некоторой форме) добавок энергии ΔE к ее полной величине E , то это *во всех отношениях* отвечает тому, что данная система приобретает и соответствующий добавок массы $\Delta m = \Delta E/c^2$ (как инертной, так и гравитационной), которая будет частью полной массы $m = E/c^2$.

В связи с этим нужно сказать, что *все виды энергии* (как кинетической, так и потенциальной) равным образом дают вклад в массу. Однако «энергия покоя» тела играет особую роль, так как, даже если тело в целом и не совершает видимого движения, в нем все же протекают движения внутренние (излучения, перемещения молекул, электронов, ядер и пр.). Из этих внутренних движений складывается некоторая «энергия покоя» E_0 , которой и соответствует «масса покоя» $m_0 = E_0/c^2$. Пока эта энергия остается «внутренней», масса покоя, конечно, не изменяется. Если же на молекулярном, атомном или ядерном уровне происходят внутренние изменения, то, как мы уже видели, при этом могут измениться и «внутренние» колебательные движения, и часть их может перейти во «внешние» движения, заметные в более крупных масштабах. Когда это происходит, соответственно уменьшается «энергия покоя», а вместе с ней и «масса покоя». Мы видим, однако, что такое изменение массы несколько не удивительно, если помнить, что

инертная и гравитационная массы — это всего лишь один аспект единого процесса движения, другим аспектом которого является эквивалентное количество энергии, понимаемой как возможность совершения работы в крупных масштабах. Иначе говоря, превращение «вещества» в «энергию» — это лишь переход от одной формы движения (внутренней, хаотической, колебательной) к другой его форме (например, к поступательному движению в пространстве).

Здесь особенно поучительно разобраться в том, как с этой точки зрения следует понимать возможность существования объектов с равной нулю массой покоя, т. е. движущихся со скоростью света. Если считать, что масса покоя целиком обязана «внутренним» движениям, совершающимся, даже когда тело, видимо, покоится (при рассмотрении его на определенном уровне), то следует признать, что объект, не имеющий «массы покоя», лишен внутренних движений и может обладать *лишь* внешними движениями в том смысле, что ему свойственно лишь перемещение в пространстве. Тогда свет (а также все, что движется с этой скоростью) может рассматриваться как нечто, в принципе не способное находиться в состоянии «покоя» ни на каком уровне вообще ввиду полного отсутствия у него внутренних движений. Следовательно, свет может существовать лишь в форме «внешнего движения» со скоростью c . Вспомним в связи с этим, что движение со скоростью света инвариантно относительно преобразований Лоренца, так что чисто «внешний» характер движения при этом не связан с выбором системы отсчета наблюдателя. (Напротив, от движения со скоростью, меньшей c , всегда можно перейти к состоянию покоя, выбрав систему отсчета, движущуюся с той же скоростью, что и рассматриваемый объект.)