

Размышления о массе

Я. А. Смородинский,
*Квант*¹, 1990, № 2, 27–30.

Вы читали учебник физики и, конечно, знаете, как можно сравнивать массы двух тел. Пусть вы проделали нужные операции и убедились, что два тела A и B имеют одинаковые массы. Обозначив массы тел через $m(A)$ и $m(B)$, мы можем записать этот результат в форме равенства

$$m(A) = m(B). \quad (*)$$

Теперь представим себе, что мы сравнили массу одного из этих тел — например, тела B — с массой третьего тела — тела C — и нашли, что у тела C такая же масса, как у тела B . Иными словами, мы убедились на опыте, что

$$m(B) = m(C). \quad (**)$$

Спросим же теперь: можно ли из равенств $(*)$ и $(**)$ заключить, что тело C имеет такую же массу, что и тело A , т. е. что

$$m(C) = m(A)? \quad (?)$$

Казалось бы, это очевидно. Достаточно сослаться на основной закон логики или даже просто закон арифметики, согласно которым из утверждений $(*)$ и $(**)$ следует справедливость утверждения $(?)$. Но попробуем все же доказать, что если $m(A) = m(B)$ и $m(B) = m(C)$, то $m(C) = m(A)$.

А что значит в физике «доказать»? Это значит убедиться на опыте в том, что данное утверждение (предположение) не противоречит никаким известным (доказанным, проверенным опытом) законам. При этом надо соблюдать определенные «правила игры». И

¹«Квант» — научно-популярный физико-математический журнал.

первое правило — нельзя пользоваться словом «очевидно».

Итак, приступим к доказательству. Произведем мысленно такой опыт (его обсуждал еще Э. Мах²). Согнем колечко из проволоки и насадим на него три шарика A , B и C . Массы этих шариков удовлетворяют равенствам $(*)$ и $(**)$. Толкнем теперь шарик A , сообщив ему скорость \vec{u} . Если трение отсутствует, то шарик будет двигаться по колечку, не изменяя величины скорости (по модулю), пока он не столкнется с шариком B . После столкновения шарик A остановится, а B начнет двигаться с той же скоростью u (опять же по модулю), с которой до столкновения двигался шарик A . (Если бы мы не знали заранее, что массы A и B одинаковые, то можно было бы об этом узнать, сравнив скорости A и B до и после столкновения — это вполне хороший способ, или же проверив, что шарик A остановился³.)

Двигаясь, шарик B через некоторое время столкнется с шариком C . Результат столкновения также предскажем: B остановится, а C начнет двигаться со скоростью u (ведь $m(B) = m(C)$).

Следующим событием будет столкновение шарика C с шариком A . Мы не проверили опытом, что $m(C) = m(A)$, а потому не можем утверждать заранее, что A начнет двигаться с той же скоростью u , с которой он двигался сначала. Для такого заключения мы должны привлечь на помощь закон сохранения энергии⁴. Ес-

²Эрнст Мах (1838–1916) — крупный австрийский физик и философ-идеалист. Занимался механикой, акустикой, оптикой.

³Эти утверждения не очевидны. Их можно оправдать ссылкой на то, что шарики A и B одинаковы. Но не будем придираться!

⁴Надо признаться, что закон сохранения энергии (или импульса) мы молчаливо использовали раньше, когда утверждали, что шарики A и B поменялись ролями после

ли бы скорость шарика A после столкновения оказалась больше u , то эту бóльшую скорость A сообщил бы при соударении шарик B и таким способом можно было бы получать энергию из ничего: после каждого столкновения с шариком C шарик A двигался бы все быстрее и быстрее!

Если бы скорость A оказалась меньше u , то шарики со временем остановились бы и их кинетическая энергия бесследно исчезла (напомним, что шарики двигаются без трения). Оба вывода ложны, а следовательно, утверждение о том, что после столкновения с C шарик A будет двигаться со скоростью u , истинно.

Теперь уж все стало на свои места. Закон сохранения энергии потребовал, чтобы скорость шарика A после столкновений $A \rightarrow B$, $B \rightarrow C$, $C \rightarrow A$ вернулась к своему исходному значению.

Мы видим, что для строгого доказательства почти очевидного равенства масс одной логики не хватает, необходимо привлечь на помощь физический закон — закон сохранения энергии. Без этого нельзя заключить, что $m(C) = m(A)$!

Но для практических целей строгое определение нужно не везде. В обыденной жизни нам достаточно не столь строгое, но более понятное определение.

Ньютон на первых страницах своей великой книги «Математические начала натуральной философии» объяснял, что такое масса, таким образом: «Количество материи есть мера таковой, пропорциональная плотности и объему ее⁵». Если, не задумыв-

столкновения: A остановился, а B «принял на себя» скорость A . Хотя это и «очевидно», но без законов сохранения доказать нельзя. (Остерегайтесь слова «очевидно»!)

⁵Поскольку почти всегда это определение дается с ошибками, приведем его на том языке, на котором писал Ньютон — на доброй латыни (латыни ведь сейчас учат в гимназиях):

ваясь, считать, что количество материи обозначает у Ньютона массу, то такое определение представляется лишенным содержания: для того чтобы узнать плотность ρ , надо разделить массу m на объем V , и потому формула $m = \rho V$ есть следствие формулы $\rho = m/V$! Надо сказать, что многие так и воспринимали сказанное Ньютоном. И это было ошибкой. Надо понять смысл того, что писал Ньютон, а не обвинять его в тривиальной нелогичности. Определяя массу до введения понятия импульса, не зная о существовании закона сохранения энергии (само понятие «энергия» появилось спустя сто с лишним лет), Ньютон оказался в трудном положении. И он нашел единственный выход, придумав свое *Definitio*.

Сам Ньютон слово масса не употреблял и вкладывал в свое определение другой смысл. В 17–18 веках считалось, что все тела состоят из одинаковых очень маленьких частиц — их называли монадами. Монады все были одинаковыми, а разные тела отличались друг от друга только тем, что монады в них упакованы с разной плотностью. Как выглядят монады, какие у них свойства — узнать из опытов никак нельзя; но ученых в то время не очень волновали опыты, они считали, что законы природы можно открыть одними рассуждениями. Теорией монад занимались Лейбниц, Эйлер и другие ученые.

Крупным специалистом по монадам считался немецкий философ Христиан Вольф, популяризатор идей Лейбница. По учебникам Вольфа училась почти вся Европа. Ломоносов перевел один из учебников Вольфа, и это был первый учебник физики в России. Тогда о монадах все знали и, говорят,

“*Definitio I. Quantitas materiae est mensura ejusdem orta ex illius densitate et magnitudine conjunctim*”.

даже придворные дамы при Прусском дворе любили о них рассуждать. Поэтому для читателя 18 века определение Ньютона было исполнено смысла.

Теория монад, конечно, давно ушла из науки. В 19 веке уже говорили об атомах с разными химическими и физическими свойствами, но, как это ни удивительно, в нашем 20 веке полезно вернуться к идее Ньютона и говорить, что масса тела пропорциональна количеству нуклонов — нейтронов и протонов, в нем содержащихся, — или даже пропорциональна объему тела и «нуклонной плотности» — среднему числу нуклонов в 1 см^3 .

Какие возражения может вызывать такое определение? Масса нейтрона больше, чем масса протона, примерно на 0,2%. Можно, конечно, учесть это различие, считая нейтроны и протоны отдельно; но, с другой стороны, ошибка в десятые доли процента нас во многих случаях не беспокоит (по крайней мере, при решении школьных задач).

Более принципиальная ошибка связана с тем, что нуклоны в ядрах «легче» нуклонов в свободном состоянии. Дело в том, что энергия связанной системы частиц (ядра атома) меньше суммарной энергии этих частиц в свободном состоянии. Чтобы разделить ядро на составляющие его нуклоны, нужно затратить энергию, равную разности этих энергий (ее называют энергией связи). А поскольку между энергией и массой существует связь, выражаемая формулой Эйнштейна — $E = mc^2$, — разность энергий означает разность масс. Значит, масса атомного ядра меньше суммы масс составляющих его нуклонов. Это уменьшение массы достаточно велико и составляет почти 1% (точнее, 0,6–0,8%).

Мы знаем, что атомная масса водорода⁶ равна 1,0078 атомных единиц

⁶Это масса нейтрального атома водорода

массы, а масса атома основного изотопа урана равна 238 а. е. м., т. е. меньше, чем сумма масс 92 протонов и 146 нейтронов, из которых состоит ядро этого изотопа. Можно сделать поправку на «энергию связи», но не стоит усложнять задачу.

Итак, определение Ньютона — отнюдь не «пустое». Правильно понятое, оно определяет массу с ошибкой меньше процента.

Но мы еще не кончили наш рассказ.

Масса, о которой мы говорим, измеряется не в килограммах и не в граммах — единицей измерения служит атомная единица массы (напомним, что а. е. м. определяют в физике как $1/12$ массы атома углерода ^{12}C). Перевести атомные единицы массы в килограммы оказалось не так легко, хотя никаких фундаментальных трудностей в этой части задачи, конечно, нет. Идея измерения самая простая — надо поделить массу (в килограммах) образца элемента на число атомов в этом образце. Трудности и состоят в том, что надо «поштучно» пересчитать атомы. Такая точность сегодня необходима и физикам, и химикам.

Мы не будем подробно рассказывать о хитроумных опытах, в которых производились подсчеты. Скажем только, что для этого изготовили очень хороший кристалл, измерили очень точно его размеры, потом с помощью рентгеновского анализа определили расстояние между атомами... Каждая операция потребовала большой изобретательности — ведь речь шла об очень большой точности.

В проблеме массы это была самая трудная часть.

Еще одно замечание в заключение.

В популярных книжках, да и в учебниках бытует понятие, от которого

 (протон + электрон). Пользуясь атомной массой, не надо делать поправку на массу электрона.

давно пора отказаться. От него пользы нет никакой, и живет оно только по старой привычке. Понятие это — масса движущегося тела, которая растет со скоростью. В действительности массу движущегося тела никто не измеряет, измеряют его энергию (например, энергию протона в ускорителе). Массу же вычисляют по формуле $m = E/c^2$. Физики давно такую массу не используют и ведут все вычисления только

с энергией. Массой же теперь называют только «массу покоя» — массу покоящейся частицы. И в таблицах элементарных частиц собраны значения именно масс покоя (хотя слово «покоя» и опущено).

Так что постарайтесь забыть, что «масса растет со скоростью», — эта фраза сейчас имеет мало смысла. Со скоростью увеличивается энергия.