

Эквивалентность массы и энергии

Текст этого поста должен бы быть в статье о специальной теории относительности. Но здесь идет речь о самой известной формуле современной физики, и она, на мой взгляд, стоит несколько особняком от выводов СТО о движении и времени, а последствия её так поразительны, что я пишу о ней в отдельной статье.

Итак, Эйнштейн при участии других умных людей разобрался с новыми экспериментами со скоростью света, создал специальную теорию относительности (СТО). А ней все объекты двигались прямолинейно и равномерно, не было ускорений-торможений, не было массы, играли только со светом. В этой теории использовался тезис, что скорость света одинакова при измерениях в любой системе отсчёта, а измерения время и расстояния напротив, будут зависеть от того, из какой системы отсчёта их измеряют. Эйнштейн (да и другие толковые физики) стали размышлять дальше. Я, чтобы не запутывать тему, буду говорить только об Эйнштейне.

Наш Альберт любил проводить «мысленные эксперименты». То есть реально он опытов не ставил, да и сложно ему было разогнать поезд до половины скорости света, но можно было рассуждать, «что произойдет, если...». Он стал рассматривать, что произойдет с телом некоторой массы, если оно во время покоя или движения будет испускать свет. И он увидел, что тело, излучающий свет, должно терять массу. И даже написал формулу, на сколько. Это и было по сути одним из видов знаменитой ныне формулы

$$E = mc^2$$

Заметим, что это энергия, заключённая исключительно в составе вещества, без учёта кинетической, и называется энергией покоя.

Результат Эйнштейн опубликовал в сентябре 1905 года, через пару месяцев после статьи о специальной теории относительности.

Расчёты Эйнштейна несколько мудрёные для старшеклассника, но впоследствии этот вывод сделали более элегантным, более очевидным, чем у Эйнштейна. Вы и сами можете покопаться в интернете. Эйнштейн при выводе формулы использует предположение Планка о том, свет испускается порциями (забавно, сам Планк при этом считал, что это просто математический трюк). Планк впервые употребил для этих порций термин «квант». Сейчас используется очень простая формула, $E=hv$, которая выражает энергию одного кванта через частоту света, которая составляет эту порцию (v - частота, h - константа, называемая постоянной Планка). Поскольку эту порцию еще может себя вести как частица (об этом как-нибудь напишу попозже), то для неё используют название «фотон».

Вообще мне этот вывод (формулы $E=mc^2$) показался каким-то фокусом. Исходные данные – постулат о том, что свет, в какой системе не меряй, имеет одну и ту же скорость. Ну ладно, отсюда специальная теория относительности, где поначалу никакой массы нет. Ещё пусть фотоны несут определенную энергию. Начинаем мысленно двигать массу, испускающую свет, в какую-нибудь сторону, используем эффект Доплера, при котором для наблюдателя изменяется частота (ну, очевидный механизм), считаем энергию фотона в одну и другую сторону, и опа, как чёрт из табакерки, выскакивает формула $E = mc^2$!

Но что же следует из этой формулы?

Во-первых, что энергия и масса – это одна и та же сущность. Современные физики сейчас предпочитают выражать и массу, и энергию в единицах энергии. Это позволяет сравнивать даже совершенно непонятные вещи. Например, недавно, в конце 20 века, обнаружили два нечто, которые назвали тёмной материи и тёмной энергией, причём тёмная материя обнаружена по гравитационному проявлению, типа она обладает массой, а тёмная энергия – по силовому, то есть по гравитационному проявлению. А может быть, это свойство пространства!. И ничего, физики говорят, что темная энергия – это 68.3 процента всей Вселенной, тёмная материя – 26.8 процента, а обычная материя, то есть все звезды, планеты, а также свет и прочие излучения, гуляющие между ними – 4.9 процента. Забавно, что совсем недавно, 50 лет назад мы воспринимали только около 5 процентов сущности Вселенной, и не подозревали об остальных 95.

Во-вторых, что в малом по нашим меркам количестве массы заключена огромная внутренняя энергия. Ведь там множитель – скорость света в квадрате, а скорость света – это

300000000 метров в секунду (если энергию будем вычислять в джоулях). Для примера, в одном грамме вещества (любого – железа, бумаги, азота) скрыта энергия, которая могла бы выделиться при сгорании 2 630 000 литров бензина. Если вы едете на автомобиле, который потребляет 6 с половиной литра на 100 км, то вы бы могли проехать на эквиваленте грамма любого вещества вокруг Земли 1000 (тысячу) раз!

Но в 1905 году знали о строении вещества гораздо меньше, чем сейчас, квантовая физика появится ещё лет через 20, и о том, что каким-то неведомым образом внутри атомов (о протонах и прочих кварках ничего не знали) сидит такая офигительная энергия, было совершенно непонятно. Обычные химические реакции давали ничтожнейшую часть величины этой энергии. Это потом разберутся с радиоактивностью, сотворят (не к ночи будь помянуто) атомную бомбу, которая да, высвободит часть этой скрытой энергии. Причём при всей своей ужасающей мощи атомный заряд, хотя потеряет таки уже осозаемую часть своей массы, но меньше одного процента. Да, введут понятие антиматерии, в ускорителях сейчас она нередко рождается и проявляется, и только соединение материи и антиматерии может высвободить в виде излучения все 100 процентов внутренней энергии вещества.

И современники Эйнштейна поначалу особо не впечатлились ни формулой $E = mc^2$, ни специальной теорией относительности. И если Вы думаете, что Эйнштейн придумывал свои теории, сидя в дорогом кожаном кресле в уютном кабинете, в полном финансовом благополучии, то ошибаетесь. Ему было 26 лет, он сочинял свои первые теории в маленькой квартирке, одной рукой покачивая ляльку с хнычащим сыном, другой рукой делая записи. Он работал на скромной должности в патентном бюро. Попытался устроиться в Бернском университете – отказ (это уже после публикации СТО и формулы полной энергии!). Откликнулся на объявление о вакансии преподавателя математики в школе – не прошёл по конкурсу! Конечно, понемножку его идеи стали овладевать умами физиков, но даже Нобелевскую премию, которую ему присудили в 1922 году, спустя 17 лет после СТО и формулы полной энергии, через 7 лет после публикации общей теории относительности, когда игнорировать Эйнштейна стало уже просто неприлично, так вот премию ему дали за теорию фотоэффекта. Безусловно, значимую работу, один из первых шагов по созданию квантовой механики, но несравнимую по эпохальности с теорией относительности. По хорошему, Эйнштейн достоин трёх нобелевских премий 😊

Продолжим про массу и энергию. Ведь когда объект с массой начинает двигаться, то он дополнительно приобретает ещё и кинетическую энергию. И когда эта скорость близится к световой, то начинают ярко проявляться эффекты, которые называют релятивистскими. Согласно Эйнштейну, полная энергия объекта массой m при скорости v состоит из энергии покоя и кинетической энергии, и равна

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

Формула простая, можно её легко анализировать. Так, если скорость $v = 0$, то как и положено, формула превращается в энергию покоя $E = mc^2$. А вот при скорости 0.8 скорости света полная энергия в 2.236067977 раз больше, чем энергии покоя. А при скорости 0.98 скорости света полная энергия в уже 7.071067812 раз больше, чем энергии покоя.

С тех пор, как для исследований вещества стали строить ускорители частиц, эту формулу стало необходимым рассматривать с другой точки зрения. А именно, чтобы разогнать частицы до околосветовых скоростей, им нужно эту энергию передать. Это делается при помощи электромагнитов, потребляющих, естественно, электричество.

Я в Excel посчитал, какую энергию нужно придать, чтобы увеличить скорость частиц на один процент. Так вот, чтобы увеличить скорость с 0.8 до 0.81 скорости света, нужно передать частице 0.058089361 доли энергии покоя. А чтобы увеличить с 0.98 до 0.99 скорости света, нужно передать 2.928932188 от энергии покоя. В 50 раз больше! И чем ближе к скорости света, тем быстрее будет рост количества необходимой энергии, как говорится, до бесконечности. К скорости света можно будет приближаться сколь угодно близко, но достичь всё равно будет невозможно.

Вы сами можете легко поиграться с этими величинами, считая, что нужно достичь доли k от скорости света ($0 \leq k < 1$). Для того, чтобы ваши вычисления были точнее (Excel округляет очень

большие и очень маленькие величины), советую использовать приведённое, более удобное выражение сомножителя в вышеприведенной формуле (собственно, это Лоренц-фактор, о котором мы упоминали в предыдущем посте), которая даёт необходимую долю от энергии покоя, которую нужно сообщить частицам:

$$\frac{1}{\sqrt{(1-k)(1+k)}}$$

Замечание. Вышеприведённый пример, честно говоря, содержит лукавство. Он был бы верен для линейных ускорителей, но они не разгоняют частицы до околосветовых скоростей, по прямой путь всё равно ограничен, и разгоняющие электромагниты дают пинка частицам только один раз. А могут синхрофазотроны, которые раскручивают частицы по кольцу. Но если заряженные частицы движутся не по прямой, то они теряют энергию на производство некоего синхротронного излучения, которое тоже нужно учитывать при расчёте потребной энергии разгона частиц.

Энергию могут переносить и безмассовые частицы, те же самые фотоны. И взаимодействуя с другими частицами, превращать её в «обычную» массу. Что интересно, у фотона нет массы, но есть импульс, который для вещества, имеющего массу (вспомним школьную физику), равен произведению массы на скорость. А для фотона формула тоже проста – обратная величина частоте волны (с коэффициентом – постоянной Планка). Это позволяет рассчитывать совместное движение обычной массы и взаимодействующего с ним света с учетом закона сохранения импульса, например, конструировать космические корабли с солнечными парусами или так называемые фотонные двигатели (существующие пока ещё в фантастике).

В заключение этого поста ещё раз хочу выразить изумление – нет, не открывшимися особенностями природы, а удивительной гениальности учёных, в частности, Эйнштейна, которые почти из ничего могут вывести такие невероятные выводы. Ведь в источнике – постоянство скорости света относительно любой системы измерений, и значение энергии кванта. И всё! Массы нет и в помине, и вдруг – какая-то её полная энергия! Слабо понимая, в чём она может скрываться, и совсем не представляя, как ею можно воспользоваться. А спустя несколько десятилетий эти формулы становятся самыми базовыми и как бы тривиальными.

А Эйнштейн после СТО продолжает напряжённо размышлять над сущностью пространства, времени, гравитации. Впереди ОТО – общая теория относительности...

Дополнение 1.

Я немного склонялся, когда сказал, что 50 лет назад не подозревали о тёмной материи и темной энергии. Подозревали, о тёмной материи больше, о тёмной энергии – только в виде теоретических коэффициентов в уравнениях Эйнштейна, но убедительные наблюдательные данные появились только к концу 20 века. При этом остаются сомнения, то ли это на самом деле реальные сущности, или законы физики не так выполняются на больших расстояниях.

Дополнение 2.

О релятивистском увеличении энергии при околосветовых скоростях в современных ускорителях. Так, самый большой и поэтому самый известный ускоритель, Большой адронный кеоллайдер, имеет длину кольца 26,7 км. Разгоняет пучки протонов (по несколько тысяч штук) до 99.9999991 процентов скорости света. Во время работы потребляет 180 мегаватт электрической энергии. Для сравнения, если этой энергией запитывать бытовые электроплитки средней мощности в полтора киловатта, то они при плотном размещении заполнят два футбольных поля. Разгоняемые пучки протонов изначально весят меньше одной миллиардной доли грамма, в конце разгона имеют кинетическую энергию примерно как сверхзвуковой реактивный истребитель.

Дополнение 3.

Вначале ускорители направляли пучок разогнанных частиц на неподвижную мишень. В 1964 году советский физик, Будкер Г.И. в Новосибирском академгородке придумал, и под его

руководством создали ускоритель на встречных пучках. То есть протоны разгоняются по кольцам (в последующих ускорителях в одном кольце) навстречу друг другу и затем направляются так, чтобы сталкиваться на встречных направлениях. Этот трюк позволяет для данной скорости столкновений вдвое уменьшить затрачиваемую энергию. В последующем большинство ускорителей в мире, включая Большой адронный коллайдер, работают по этому принципу.

Дополнение 4.

В популярной литературе и в роликах Интернет вам может встретиться понятие реляционной массы. Часть физиков и популяризаторов науки используют это понятие, которое использовалось изначально, чтобы объяснить релятивистское увеличение энергии вещества увеличением массы. Собственно, и Эйнштейн использовал это понятие, чтобы вывести формулу полной энергии. Но, поскольку имеем эквивалентность энергии и массы, то большинству физиков удобнее всё выражать в значениях энергии. Тем более при релятивистской массе нужно различать её значения по направлению и поперек движения, нет так называемой инвариантности значений массы для различных систем отсчёта. А нам это нужно?

Алсынбаев Камиль Салихович, Калининград, август 2023 г.
kamil.alsynbaev@mail.ru