

Виктор Ганкин

Принцип эквивалентности масс

Принцип эквивалентности масс за всю историю физики является самым удивительным. Поразительно, но этот принцип продолжает экспериментально уточняться, начиная с конца 19 века по настоящее время. Принцип эквивалентности, согласно которому поле тяготения в небольшой области пространства и времени по своему проявлению тождественно ускоренной системе отсчёта, лежит в основе общей теории относительности и имеет следствием равенство инертной и гравитационной масс.

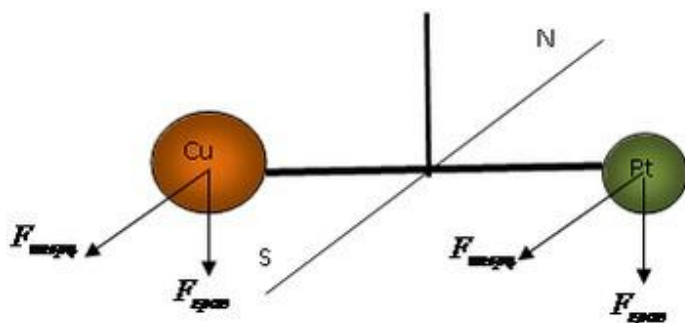
Впервые принцип эквивалентности масс был выдвинут Ньютоном и проверен им экспериментально. Этот принцип позволял объяснить парадокс, почему все тела падают на землю с одним ускорением. Парадоксальное открытие сделал Галлей, сбрасывая тела разного веса с Пизанской башни. Чтобы объяснить это явление Ньютон ввел массу - новую внутреннюю сущность материи.

В разных законах Ньютона масса выступает то как мера инерции, то как мера гравитационных свойств. Ньютон впервые обратил внимание на равенство инертной и гравитационной масс и доказал, что они отличаются не более чем на 0,1 % (иначе говоря, равны с точностью до 10^{-3}).

В более позднее время Р. Этвеш в серии весьма точных опытов, проведенных с 1890 по 1910 г. и продолженных в 1922 г., показал, что принцип эквивалентности гравитационной и инертной масс соблюдается с точностью выше одной двадцатимиллионной. Опыты Этвеша рассматривают поведение отвеса, на который действуют сила притяжения Земли и центробежная сила. Сила притяжения Земли зависит от гравитационной массы, центробежная сила, вызванная вращением Земли, зависит от инертной массы.

Опыт Этвеша по проверке принципа эквивалентности масс

Опыт ставился следующим образом. На нити подвешивался стержень с 2 грузами на краях: из меди и платины (см.рис.). Стержень ориентировался перпендикулярно к меридиану (меридиан - прямая с севера на юг на рисунке обозначена как NS). Плечи стержня равны. Грузы по весу также равны.



Если бы эти (гравитационная и инерционная) массы не были одинаковы, то направление отвеса зависело бы от материала (медь, платина, свинец, железо, стекло и т. д.), из которого сделан шар отвеса. Однако Этвеш с помощью этих крутильных весов установил, что отвес не меняет своего направления независимо от материала, из которого он изготовлен. Таким образом, устанавливалось равенство гравитационной и инертной масс. Причину этого явления классическая механика даже не пыталась объяснить. Введенный Ньютоном принцип эквивалентности позволил говорить, что мы имеем дело с новой сущностью, обладающей гравитационными и инерционными свойствами. Так, принцип эквивалентности закрепил существование массы.

Наука, занимающаяся электрическими зарядами и их взаимодействием, была во времена Ньютона в зачаточном состоянии. Было известно, что существует два вида зарядов и, что заряды одного вида отталкиваются, а противоположного вида притягиваются. В те времена их называли смоляным и янтарным электричеством. Впоследствии названия зарядов изменились на положительный и отрицательный. С точки зрения математического подхода притяжение и столкновение разноименных зарядов заканчивается их взаимной нейтрализацией и заряд исчезает. Все космические и обычные материальные тела рассматривались в механике как электрически нейтральные тела. Ньютон, соответственно, не мог объяснить физический смысл принципа эквивалентности масс.

После выяснения строения атомов и состава атомного ядра (после открытий Резерфорда) стало ясно, что все элементы и соответственно вся материя состоят из одинаковых устойчивых заряженных частиц: электронов, протонов и нейтронов. Заряженные частицы имеют либо положительный, либо отрицательный заряд.

При любом силовом воздействии заряженная частица отвечает силой инерции, природа которой электрическая (см. В.Ю. и Ю.В. Ганкины «Как образуется химическая связь и протекают химические реакции»). Сила в физике является аддитивным понятием. Полная сила инерции материального тела складывается из сил инерции отдельных заряженных частиц. Сила $F_{инерц_i}$, действующая на каждую частицу пропорциональна ускорению a , согласно электродинамическому механизму инерции заряженных частиц. Следовательно, и полная сила, действующая на все макроскопическое тело, пропорциональна ускорению a , что и является содержанием 2 закона Ньютона $F = m a$.

Также обстоят дела и с силой гравитации. Полная сила складывается из гравитационных сил отдельных частиц. Каждая сила $F_{грав_i}$ пропорциональна ускорению g , согласно 4 закону Ньютона $F = m g$.

Отношение $F_{инерц_i}/a = F_{грав_i}/g$ есть величина постоянная. В этом и выражается принцип эквивалентности масс.

Принцип эквивалентности неоднократно уточнялся и проверялся. В 1959 - 1963 гг. американским физиком Р. Дикке точность измерений была увеличена до 10^{-11} , а в 1971 г. советские физики В.П. Брагинский и В.И. Панов довели точность измерения этих величин до 10^{-12} .

Природа принципа эквивалентности масс

Мы провели сравнение веществ, различающихся по плотности, электропроводности и др. параметрам. В таблице 1 приведен расчет количества нуклонов в 1 грамме элемента.

Устойчивые изотопы некоторых элементов	Кол-во протонов Z	Кол-во нейтронов N	атомный вес расчет по формуле (3)	атомный вес справочник гр/моль	1 гр. вещества содержит атомов *10 ²¹	1 гр. вещества содержит нуклонов *10 ²³
¹ H	1	0	1,0153282	1,007947	593,12272	5,9738362
¹⁶ O	8	8	16,12816	15,9994	37,33928	5,974063
²⁷ Al	13	14	27,21696	26,98153863	22,12423	5,9735674
⁶³ Cu	29	34	63,50815	62,9295975	9,48247	5,9739561
⁶⁵ Cu	29	36	65,52548	64,9277895	9,19053	5,9738445
¹⁹⁴ Pt	78	116	195,58016	193,9626803	3,07911	5,9734734
¹⁹⁵ Pt	78	117	196,58886	194,9647911	3,06332	5,9734744
¹⁹⁷ Au	79	118	198,60488	196,9665687	3,003222	5,9734782

Атомный вес рассчитывался по формуле

$$M=1,00732*Z+1,0087*N, \quad (3)$$

в которой Z-количество протонов, N-количество нейтронов, а коэффициенты 1,00732 и 1,0087 учитывают внутриядерные взаимодействия. В таблице представлены расчеты только для нескольких устойчивых изотопов элементов, различающихся по химическим и физическим свойствам. Количество нуклонов в 1 грамме вещества совпадает до 4-го знака, расхождение составляет менее 10⁻³%. Поэтому мы считаем, что равное количество заряженных частиц определяет одинаковые инерционные и гравитационные свойства. Это происходит в следствии аддитивности сил инерции и гравитации, и отсутствия других составляющих в любом веществе.

Мы полагаем что,

- инерционные и гравитационные свойства зарядов обусловлены электромагнитной индукцией (см. статьи 'Закон гравитации' и 'Индуктивность электрона') и
- принцип эквивалентности заключается в проявлении электродинамических взаимодействий элементарных зарядов, составляющих тело, с окружающими это тело другими зарядами. (что будет рассмотрено в отдельной статье). Почему же остальные свойства 1 грамма вещества столь различны? Потому что эти свойства определяются химическими связями, образуемыми атомами или молекулами этого вещества.

Инерциальные свойства, приписываемые механической массе, существуют только как факт, обусловленный верой в авторитеты и инерцией человеческого мышления.

В школьных учебниках законы Ньютона излагаются как истина в последней инстанции, притом, что в ходе открытия этих законов, было введено пять новых сущностей. Эти пять сущностей: масса, как мера материи, инерциальные и гравитационные свойства массы, сила гравитации, силы инерции. Все эти пять сущностей были введены **Ad hoc, ad hoc** (от лат. *ad hoc* — к этому, для данного случая, для этой цели). Так, например, силы гравитации и гравитационные свойства масс были введены для объяснения падения тел на Землю, а центробежные силы (частный случай сил инерции) объясняли, почему космические тела вращаются вокруг общего центра масс и не падают под действием гравитации. Соответственно, очередной задачей науки являлось независимое подтверждение существования каждой из введенных сущностей. Самым существенным шагом в этом направлении был принцип эквивалентности, провозглашенный Ньютоном.

Экспериментально было доказано, что при свободном движении тела в поле центральных сил центробежная сила наглядно проявляется, что ее величина равна по величине центростремительной силе, вызывающей движение тела с ускорением, т.е. $F_{цс} = F_{цб} = MV^2/R$ где **M**, **V** и **R** масса, скорость и радиус круга вращения.

Давайте рассмотрим легко осуществимый и широко известный эксперимент рис.1.

В этом эксперименте шарик, имеющий массу **M**, вращается на пружине. К нему присоединен динамометр, измеряющий силу натяжения пружины. В этой системе мы можем измерить орбитальную скорость движения шарика, центростремительную (**F_{цс}**) и центробежную силу (**F_{цб}**) и радиус орбиты (**R**).



Рисунок 1

В ходе эксперимента мы можем менять скорость вращения шарика на орбите и, соответственно, радиус орбиты. При увеличении скорости вращения увеличивается радиус орбиты, скорость движения шарика по орбите и возрастает центростремительная и центробежная сила.

$$F_{цс} = M V^2 / R \quad , \quad F_{цб} = M V^2 / R \quad \text{условие устойчивости} \quad F_{цс} = - F_{цб}$$

Во времена Ньютона единственной центростремительной силой, действующей на расстоянии, существование которой признавалось Коперником, Галлилеем, Гуком и

Ньютоном, была сила гравитации. Масса являлась мерой количества вещества. Соответственно, равенство массы инерционной и массы гравитационной между собой и массой как мерой количества вещества, являлось и является самым весомым во всей истории физики, доказательством реального существования всех перечисленных выше сущностей. Как говорилось выше, принцип эквивалентности был провозглашен 320 лет назад. В это время в решении физических проблем доминировал математический подход. Согласно этому подходу основной задачей науки является составление математического уравнения, описывающего наблюдаемые явления. Значимость теории определялась возможностью в рамках теории, объяснить и рассчитать явления до этой поры количественно не описанные.

Так, например, принцип эквивалентности позволял и позволяет до настоящего времени рассчитывать силу притяжения планет к Солнцу без знания физической природы сил гравитации. В рамках принципа эквивалентности рассчитывались и рассчитываются первая, вторая и третья космические скорости тел.

Поэтому вопросы: *почему центробежная сила равна центростремительной и, почему масса инерциальная равна массе гравитационной*, даже не возникали. Т.е. принцип эквивалентности являлся фактически пятым законом Ньютона. Однако, хочется отметить, что решение этих вопросов во времена Ньютона вряд ли было возможно. Между тем внутреннее противоречие законов, предложенных Ньютоном, даже в те времена были очевидны. К инерциальным силам Ньютон относил, как силы, возникающие в прямолинейном движении, так и центробежные силы. Основанием для этого положения было то, что эти силы рассчитываются по аналогичным уравнениям. В современной механике принято говорить, что вращающееся под действием силы гравитации тело всё время падает на источник гравитации, но поскольку инерция сопротивляется изменению скорости падающего тела, оно вынуждено двигаться по круговой (а в общем случае эллиптической, гиперболической или параболической) траектории. При круговом движении центробежная сила, была равна силе, вызвавшей движение тела с ускорением, что подтверждалось экспериментально. Соответственно, ожидалось, что и в случае линейного ускоренного движения сила инерции должна быть равна силе, вызвавшей ускорение. Однако в этом случае тело, двигающееся линейно, нельзя было бы ускорить в принципе. Т.е. непонятно, почему пара сил, во всякий момент времени в точности равных и противоположных друг другу вызывают неравномерное движение.

В Законе всемирного тяготения (универсальное взаимодействие между любыми видами материи), открытом Ньютоном в 1678 г., предполагалось мгновенное дальнедействие между телами. Основным недостатком этого закона являлось то, что в этом случае системы (в первую очередь, Солнечная система), построенные согласно этому закону (и всем остальным законам Ньютона) будут неустойчивыми, т.е. не могут вечно существовать в принципе. Поскольку возмущения орбит со стороны метеоритов, комет, других гравитирующих тел будут приводить в конце концов либо к падению тел на центр гравитации, либо к их отрыву и разбеганию. Это противоречило представлениям о вечности и неизменности движений небесных тел.

Как известно механике различают три состояния равновесия: безразличного равновесия, устойчивого и неустойчивого равновесия (см. статью «О гравитации»).

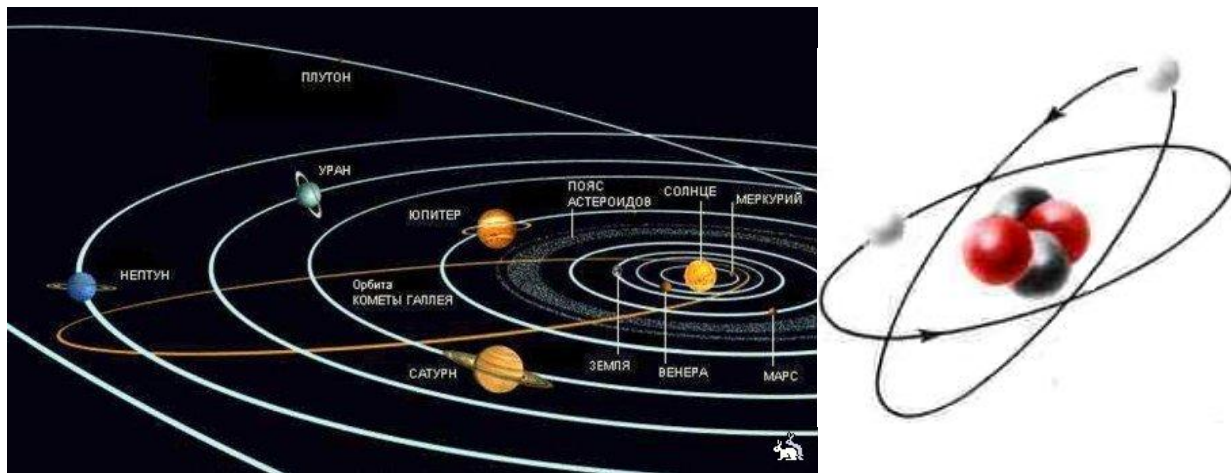


Рисунок 2

В космических и атомных системах, описываемых только законами Ньютона, при малом отклонении тела от положения равновесия возникают силы, стремящиеся увеличить это отклонение, т.к. и гравитационные силы и Кулоновские обратно пропорциональны квадрату расстояния между планетами для космических объектов и атомов, а центробежные силы обратно пропорциональны первой степени расстояния. Т.е. казалось бы, при малейшем отклонении электрона вращающегося вокруг протона (увеличение или уменьшение расстояния между протоном и электроном) центростремительные силы увеличивают это отклонение. И только учёт формальных законов сохранения (энергии, импульса и момента импульса) позволяет в рамках механики решить эту проблему, да и то, лишь в ограниченном числе простых случаев. Но даже и в этих случаях физический механизм, стабилизирующий орбиты остаётся таинственным и непонятным.

Как считают авторы Википедии, Ньютон знал об этом противоречии и поэтому в своей теории гравитации ограничился следующей фразой: “...поддержание настоящего вида Солнечной системы требует вмешательства каких-то посторонних **сверхъестественных сил**”.

Попытки разрешения этого противоречия предпринимаются в течении последних 300 лет. Обзор работ на эту тему описан в книге Демина В.Г. (Демин В.Г. - Судьба солнечной системы. Популярныe очерки по небесной механике. [1969,]). В предисловии к этой книге мы читаем: “Немногим менее двух столетий отделяет нас от поры, когда выдающиеся французские ученые Жозеф Луи Лагранж и Пьер Симон Лаплас, чьи имена вызывают почтительное и восхищенное уважение ученых всех времен, продолжая великое дело Исаака Ньютона и славной плеяды его последователей, создали величественное здание небесной механики. Около полувека, поддерживая непрерывную связь друг с

другом, в духе постоянного творческого соперничества самозабвенно трудились Лагранж и Лаплас над общей проблемой построения теории движения больших планет. Им обоим по праву принадлежит постановка знаменитой задачи механики — задачи об устойчивости Солнечной системы, породившей ряд более частных задач об эволюции орбит и фигур небесных тел. Лагранж и Лаплас пробили первую брешь в неприступной математической крепости, какой оказалась задача об устойчивости Солнечной системы, получив первое приближенное ее решение.

Многие десятилетия виднейшие математики и механики штурмовали проблему Лагранжа—Лапласа. Медленно, шаг за шагом ученые шли вперед, вынужденные преодолевать постоянно встававшие на их пути сложнейшие математические преграды, одну за другой вырывая у природы тайны движения небесных тел. Одна за другой решались частные задачи об эволюции движений отдельных тел Солнечной системы. Но строгое решение знаменитой проблемы оставалось по-прежнему столь же далеким, как и во времена Лагранжа и Лапласа“.

Прошло 100 лет, и было доказано, что все материальные тела состоят из заряженных частиц (электронов протонов и нейтронов), и их количество в каждом теле прямо пропорционально весу тела.

За эти годы возникла и прочно обосновалась новая наука - электродинамика, которая открыла новые сущности и новые закономерности. Новыми силами стали электростатические и электромагнитные силы.

В рамках электродинамики было доказано, что заряд,двигающийся с ускорением, вызывает появление электродвижущей силы (далее ЭДС), действующей на этот заряд:

1) С силой равной по величине силе, вызвавшей движение заряда с ускорением.

2) Прямо противоположной этой силе по направлению. (правило Ленца)

Величина электродвижущей силы не зависит от вида силы, вызвавшей движение заряда с ускорением. Этой силой может быть и Ньютоновская сила гравитации (притяжение масс), и Кулоновская сила (взаимодействие зарядов), и сила Лоренца (взаимодействие движущихся с ускорением зарядов с магнитным и электрическим полем). Ускорение также может быть любым (центростремительным или линейным).

Электродинамика дает нам ответ на вопрос: *Почему центробежная сила равна гравитационной?*

В экспериментах, демонстрирующих равенство центробежной центростремительной сил, заряды, из которых состоит тело, двигаются с ускорением. Это приводит к появлению ЭДС, действующее на эти заряды с силой **равной** по величине и противоположной по направлению действию центростремительной силы. Ответ на вопрос, почему центробежная сила равна центростремительной, можно дать без привлечения массы и ее свойств. *Поскольку тяготение вызывает ускорение заряженных частиц, составляющих любое тело, а результатом этого ускорения является самоиндукция, в точности равная и противоположная по направлению силе, вызвавшей ускорение, то инерция тела, вызванная тяготением, находится в причинно-следственной связи с этим тяготением. Причина и следствие всегда разделены пусть и ничтожно малым, но отличным от нуля промежутком времени. Именно поэтому гравитация, несмотря на противодействие инерции, способна-таки изменять траектории тел!*

Это является не только качественным, но **количественным** доказательством того, что масса, как сущность и, соответственно, ее гравитационные и инерционные свойства не являются исходными (фундаментальными) понятиями.

Наше объяснение принципа эквивалентности является иллюстрацией широко известного высказывания Бэкона, что новая теория дитя времени, а не авторитета.

В результате работ, проведенных в течении последних 15 лет, мы пришли к выводу, что такая сущность как масса (гравитационная или инерционная) является данью времени как флогистон и теплород. Законы и принцип эквивалентности, открытые Ньютоном, появились за двести лет до законов Фарадея, атомарно-молекулярного строения веществ и выяснения природы химической связи. Об этом мы пишем уже в течении 15 лет на английском и русском языках. Трудности с восприятием наших объяснений связаны в первую очередь с инерцией мышления. Надеемся, что простые и понятные объяснения могут сократить время для преодоления инерции мышления научного сообщества.

За 20 лет нам удалось объяснить целый ряд физических явлений без использования такой сущности как масса. Эти объяснения были опубликованы в виде книг помещенных на сайт «amazon.com» и на нашем сайте. За это время мы поняли, что такой фундаментальной сущности как масса не существует. Однако, даже у нас это открытие не сразу перешло в веру, отчасти из-за существования принципа эквивалентности. Только три года назад (примерно в 2007г.) нам удалось понять физический смысл принципа эквивалентности. Как обычно, объяснение оказалось очень простым. Оно пришло, когда мы поняли и обосновали идею, что инерционные (в т.ч. и центробежные) силы имеют электродинамическую, а не механическую природу. С одной стороны, мы получили объяснение физического смысла уравнения 3-го закона Ньютона, а с другой - объяснение принципа эквивалентности, т.к. равенство центробежных сил и сил, вызвавших движение заряда с ускорением, не зависело от природы сил (это Ньютоновская гравитация, или Кулоновские силы, или силы Лоренца) и от вида ускорения. Т.е принцип эквивалентности уже 100 лет назад мог быть сформулирован следующим образом: *При движении материальных тел под действием любых центростремительных сил центробежная сила равна центростремительной и вызывается инерцией зарядов, из коих состоит любое тело.* В свою очередь инерция определяется самоиндукцией этих элементарных зарядов.