

никало подобных неверных представлений, лучше говорить не просто о «законах природы», а по примеру Эйнштейна о «законах, по которым происходят изменения состояний физических систем», формулируя принцип относительности следующим образом:

Законы природы, по которым изменяются состояния физических систем, не зависят от того, к какой из инерциальных систем отсчета относятся эти изменения.

Эта формулировка является более общей, чем прежняя, в которой говорилось об инвариантности законов Ньютона относительно преобразования Галилея. Во-первых, здесь идет речь об инвариантности *всех физических законов*, а не только законов механики, каковыми являются законы Ньютона. Во-вторых, здесь не указан конкретный вид преобразований координат и времени, относительно которых законы природы инвариантны. Такие преобразования надо найти из *самого принципа относительности* и некоторых дополнительных соображений. Именно так в теории относительности получают преобразования Лоренца, о которых было упомянуто выше. Законы природы инвариантны относительно преобразования Лоренца. Принцип относительности в такой формулировке называется *принципом относительности Эйнштейна*. О нем будет идти речь в последующих частях нашего курса.

§ 16. Аддитивность и закон сохранения массы

1. Пусть два тела с массами m_1 и m_2 сталкиваются между собой и соединяются в одно — составное — тело. Примером может служить слипание двух глиняных шаров при столкновении между собой. Другим примером является *химическая* или *ядерная реакция*, в которой два атома или ядра соединяются в молекулу или новое ядро. Требуется определить массу составного тела m , зная массы m_1 и m_2 соединяющихся тел. На первый взгляд ответ кажется тривиальным, а именно $m = m_1 + m_2$. Хотя это в какой-то мере и правильно, но требует обоснования. Обоснование можно дать на основе принципа относительности Галилея.

Рассмотрим процесс столкновения в какой-либо инерциальной системе отсчета S . Обозначим через \mathbf{v}_1 и \mathbf{v}_2 скорости тел до столкновения, а через \mathbf{v} — скорость составного тела после столкновения. На основании закона сохранения импульса можно написать

$$m_1 \mathbf{v}_1 + m_2 \mathbf{v}_2 = m \mathbf{v}. \quad (16.1)$$

Рассмотрим теперь тот же процесс в системе отсчета S' , движущейся относительно системы S прямолинейно и равномерно со скоростью \mathbf{V} . Согласно принципу относительности закон сохранения импульса справедлив также в системе S' и записывается в виде

$$m_1 \mathbf{v}'_1 + m_2 \mathbf{v}'_2 = m \mathbf{v}'. \quad (16.2)$$

Ввиду полного равноправия инерциальных систем отсчета массы всех тел в системе S' такие же, какими они были в системе S . В нерелятивистской физике скорости \mathbf{v}'_1 , \mathbf{v}'_2 и \mathbf{v}' в системе S' связаны с соответствующими скоростями в системе S соотношениями

$$\mathbf{v}'_1 = \mathbf{v}_1 - \mathbf{V}, \quad \mathbf{v}'_2 = \mathbf{v}_2 - \mathbf{V}, \quad \mathbf{v}' = \mathbf{v} - \mathbf{V}.$$

Поэтому (16.2) преобразуется в

$$m_1(\mathbf{v}_1 - \mathbf{V}) + m_2(\mathbf{v}_2 - \mathbf{V}) = m(\mathbf{v} - \mathbf{V}),$$

или на основании соотношения (16.1)

$$(m_1 + m_2) \mathbf{V} = m \mathbf{V}.$$

Отсюда

$$m = m_1 + m_2. \quad (16.3)$$

Масса составного тела, как мы и ожидали, равна сумме масс составляющих тел. Это свойство называется аддитивностью массы.

Доказательство может быть обобщено. Нет необходимости предполагать, что сталкиваются только два тела и что после столкновения они соединяются в одно тело. Можно взять, например, произвольную химическую реакцию, в которой реагирует несколько молекул или атомов, а в результате реакции получается несколько других молекул или атомов. Тогда, повторяя рассуждения, приведшие нас к соотношению (16.3), мы придем к более общему заключению, что *сумма масс веществ до реакции равна сумме масс веществ после реакции. Это — закон сохранения вещества или, точнее, закон сохранения массы.* Масса пропорциональна весу. Поэтому этот закон называли также *законом сохранения веса*. Такое название применялось в старой литературе, но оно неудачно и теперь почти вышло из употребления. Однако Ломоносов (1711—1765) и Лавуазье (1743—1794), с именами которых обычно связывают утверждение в науке *закона сохранения вещества*, пришли к своему открытию на основании опытов по взвешиванию продуктов химических реакций. Поэтому то, что непосредственно доказали эти ученые, есть именно «закон сохранения веса».

2. Ньютон определил массу тела как *количество вещества*, содержащегося в нем. Такое определение бессодержательно, пока не указано, что следует понимать под «количеством вещества». Ньютон просто заменил термин «количество вещества» новым термином «масса», не дав ни одному из них точного определения. Однако с ньютоновым определением массы интуитивно связано представление об ее аддитивности. Если, например, две одинаковые гири с массами 1 кг каждая соединить в одну, то «интуитивно ясно», что получится гиря с массой 2 кг, ибо «количество вещества» в двух гирях вдвое больше, чем в одной из них. Интуиция является мощным источником научного творчества. Но в науке она не может

служить доказательством. Доказательство должно основываться на точных определениях и законах природы. Точное определение понятия массы было дано в § 10. Если пользоваться только этим определением, то совсем не очевидно, что масса является величиной аддитивной. Необходимость доказательства этого свойства следует уже из того, что *аддитивность и закон сохранения массы вещества верны лишь приближенно*. В самом деле, этот закон мы получили как следствие галилеева принципа относительности. Но *галилеев принцип относительности не есть вполне точный закон природы — он является приближенным предельным случаем эйнштейновского принципа относительности*. Поэтому приведенное выше рассуждение должно быть пересмотрено — в основу его надо положить не галилеев, а эйнштейновский принцип относительности. Это будет сделано при изложении теории относительности. Сейчас же мы ограничимся сообщением основного результата ввиду его фундаментального значения. *Закон сохранения массы в старом его понимании — сумма масс тел до реакции равна сумме масс тел после реакции — оказывается неверным. Законы сохранения массы и энергии, которые в дорелятивистской физике считались двумя независимыми точными законами природы, в релятивистской физике утратили свою независимость и были объединены в единый закон сохранения массы — энергии. Всякая энергия обладает массой, равной количеству энергии, деленному на квадрат скорости света в вакууме*. К такому заключению мы уже пришли в частном случае лучистой энергии (см. конец § 13). В балансе массы должна учитываться не только масса вещества, но и масса выделяющейся или поглощающейся энергии. Во всех процессах природы сумма массы вещества и энергии остается постоянной.

То обстоятельство, что в химических реакциях не было обнаружено изменение массы вещества, связано с их относительно очень малым энергетическим выходом. Изменение массы за счет выделения или поглощения энергии столь мало, что его обнаружение находится за пределами точности измерений. Так, при сгорании 12 г углерода с образованием углекислого газа CO_2 выделяется около 99 ккал тепла. В эргах эта величина равна $\epsilon = 99 \cdot 4,19 \cdot 10^{10} \approx \approx 4 \cdot 10^{12}$ эрг. По формуле (13.2) ей соответствует масса

$$\Delta m \approx \frac{4 \cdot 10^{12}}{9 \cdot 10^{20}} \approx 0,5 \cdot 10^{-8} \text{ г.}$$

Полная масса веществ, участвующих в реакции, равна $m = = 12 + 32 = 44$ г. Поэтому

$$\frac{\Delta m}{m} = \frac{0,5 \cdot 10^{-8}}{44} \approx 10^{-10}.$$

Чтобы обнаружить взвешиванием изменение массы вещества при химических реакциях, необходима относительная точность измерений не менее 10^{-10} .

Энергетический выход ядерных реакций в миллионы раз больше, чем химических реакций. На ядерных реакциях соотношение между массой и энергией (13.2) подтверждено экспериментально. В ядерной физике и физике элементарных частиц это соотношение играет исключительную роль.

§ 17. О законах трения

1. В механике обычно имеют дело с силами всемирного тяготения, упругими силами и силами трения. Иногда в механику включаются также задачи на движение электрически заряженных частиц в электрических и магнитных полях. Тогда к указанным силам добавляются еще электромагнитные силы, т. е. силы, которым подвержены заряженные частицы со стороны таких полей. Силы всемирного тяготения и упругие силы будут подробно рассмотрены в дальнейшем. Сейчас же мы кратко рассмотрим *силы трения*. Заметим при этом, что механика не занимается изучением физической природы действующих сил — эти вопросы рассматриваются в других разделах физики. Поэтому мы здесь совсем не будем затрагивать вопрос о происхождении сил трения, а ограничимся описанием эмпирически найденных *законов трения*. Понятно, что эти вопросы при всей их важности не имеют все же того фундаментального значения, каким характеризуются, например, законы Ньютона, а сами законы трения являются приближениями, часто довольно грубыми.

Упругие силы, силы всемирного тяготения, а также силы притяжения и отталкивания электрически заряженных тел зависят только *от конфигурации тел*, т. е. от их взаимного расположения, но не от их скоростей. Силы трения, помимо конфигурации, зависят еще *от относительных скоростей тел*, между которыми они действуют.

Силы трения могут действовать между соприкасающимися телами или их частями как при их относительном движении, так и при их относительном покое. Трение называется *внешним*, если оно действует между различными соприкасающимися телами, не образующими единого тела (например, трение между бруском и наклонной плоскостью, на которой он лежит или с которой он соскальзывает). Если же трение проявляется между различными частями одного и того же тела, например между различными слоями жидкости или газа, скорости которых непрерывно меняются от слоя к слою, то трение называется *внутренним*. Впрочем, разделение трения на внутреннее и внешнее носит условный характер. Если соприкасающиеся тела объединить в одну механическую систему, то трение, которое ранее рассматривалось как внешнее, становится внутренним. Сила трения, испытываемая твердым телом при движении в жидкости (или газе), есть сила внутреннего трения в жидкости,