

## ГЛАВА XI

### ЗАКОН ПРОПОРЦИОНАЛЬНОСТИ МАССЫ И ЭНЕРГИИ И РЕЛЯТИВИСТСКИЕ СООТНОШЕНИЯ

#### § 78. Закон пропорциональности массы и энергии

Для понимания атомноядерных процессов особенно важным оказался один из наиболее общих законов физики — закон пропорциональности массы и энергии. Согласно этому закону *всякое тело, всякая частица или область поля, имеющие энергию  $E$ , обладают массой  $m$ , определяемой равенством*

$$m = \frac{E}{c^2}, \quad (1)$$

где  $c$  — скорость света; и, наоборот, *всякой массе  $m$  присуща энергия  $E$ , определяемая тем же равенством:*

$$E = mc^2. \quad (1')$$

Здесь  $m$  выражена в граммах,  $E$  — в эргах и  $c = 2,99793 \cdot 10^{10}$  см/сек.

Указанный закон был открыт на рубеже XX в. в итоге обобщений, которые были сделаны при анализе вопроса об инерции электронов и при исследовании давления света. Утверждение, что масса электромагнитного происхождения пропорциональна электромагнитной энергии, было высказано впервые в 1881 г. Дж. Дж. Томсоном и развито им же в 1895 и 1899 гг.

Для ускорения движения электрона необходима затрата работы, которая преобразуется в энергию магнитного поля. При торможении электрона его магнитное поле, исчезая, порождает развиваемую электроном силу инерции, направленную против силы торможения. В связи с этим кинетическую энергию электрона можно рассматривать как проявление некоторой части энергии его магнитного поля. Как уже было указано в § 77 второго тома, энергия магнитного поля электрона  $W_m$  пропорциональна произведению энергии электрического поля электрона  $W_e$  на отношение квадрата скорости движения электрона  $v$  к квадрату скорости света в вакууме  $c$ .

Из соотношения, что кинетическая энергия электрона (при  $v \ll c$ )  $\frac{mv^2}{2}$

пропорциональна величине  $W_e \frac{v^2}{c^2}$ , следует, что масса медленно движущегося или *покоящегося* электрона пропорциональна энергии его электрического поля, разделенной на квадрат скорости света. Необходимо отметить, однако, что при таком подходе к выявлению связи между массой покоящегося электрона  $m_0$  и энергией его электрического поля коэффициент пропорциональности  $k$  в соотношении  $m_0 = k \frac{W_e}{c^2}$ , хотя по порядку величины и получается близким к единице, но точно равным единице он оказывается только при некоторых предположениях, дополняющих уравнения Максвелла.

Если бы электроны и протоны представляли собой шарики с зарядом, равномерно распределенным по их поверхности, то энергия их электрического поля была бы равна  $W_e = \frac{e^2}{2a}$ , где  $e$  — элементарный электрический заряд ( $e = 4,803 \cdot 10^{-10}$  CGSE) и  $a$  — радиус электрона или протона, а так как  $W_e = m_0 c^2$ , то радиусы электрона и протона должны быть *обратно пропорциональны массам* этих частиц:

$$m_0 = \frac{W_e}{c^2}, \quad \text{откуда} \quad a = \frac{e^2}{2m_0 c^2}. \quad (2)$$

По этой формуле радиус электрона (для которого  $m_0 = 9,1 \cdot 10^{-28} \text{ г}$ ) получается равным  $1,41 \cdot 10^{-13} \text{ см}$ , а радиус протона (масса которого в 1836,5 раза больше массы электрона) равным  $7,7 \cdot 10^{-17} \text{ см}$ .

Поскольку, следуя представлениям Фарадея — Максвелла, электрическую энергию  $W_e$  мы должны представлять себе распределенной во всем объеме электрического поля (так же как и магнитную энергию), то очевидно, что массу электромагнитного происхождения, т. е. количество материи, связанное с зарядом  $e$ , нужно считать равной суммарному количеству той не локализованной в заряде, а распределенной в пространстве материи, скрытые движения которой проявляются в наличии поля, вызванного зарядом  $e$ . Иначе говоря, масса электромагнитного происхождения, связанная с зарядом  $e$ , должна считаться как бы «размазанной» по всему объему поля с плотностью, пропорциональной квадрату напряженности поля, т. е. с плотностью, убывающей обратно пропорционально четвертой степени расстояния от центра заряженной частицы. Это означает, что  $\frac{1}{2}$  массы, связанной с зарядом  $e$ , распределена в шаровом слое между сферами с радиусом  $a$  и  $2a$ ;  $\frac{2}{3}$  массы находятся в слое между сферами  $a$  и  $3a$ ;  $\frac{3}{4}$  — в слое между сферами  $a$  и  $4a$  и т. д.

Электромагнитное поле является, таким образом, носителем массы, связанной с зарядами. Электромагнитное поле, распространяющееся в пространстве (в частности, и поле, которое мы рассматриваем как отделившееся, «отшнуровавшееся» от зарядов и обусловленное токами смещения), имеет в каждом кубическом сантиметре массу  $\rho = \frac{u}{c^2}$ , где  $u$  — плотность энергии поля. Поэтому *распространяю-*

щегося электромагнитное поле обладает количеством движения, которое для каждого кубического сантиметра поля определяется произведением массы  $\rho$  на скорость перемещения поля. При распространении поля в вакууме со скоростью  $c$  количество движения для каждого кубического сантиметра поля равно  $\rho c$ , т. е.  $\frac{u}{c}$ . Обладая отличным от нуля количеством движения, распространяющееся электромагнитное поле, в частности свет, оказывает на препятствия давление, пропорциональное плотности энергии поля.

Фотон, имеющий энергию  $h\nu$ , обладает массой

$$m = \frac{h\nu}{c^2}, \quad (3)$$

т. е. массой, пропорциональной частоте. Так как фотон движется в вакууме со скоростью  $c$ , то количество движения фотона  $mc$  равно  $\frac{h\nu}{c}$ , т. е. оно, так же как энергия и масса, пропорционально частоте. Отметим, что по приведенной выше формуле при частоте  $\nu = 1,24 \cdot 10^{20}$  гц (что соответствует длине волны  $\lambda = 0,0242 \text{ \AA}$ ) масса фотона равна  $9,1 \cdot 10^{-28}$  г, т. е. равна массе покоящегося электрона. Масса фотона наиболее жестких характеристических рентгеновых лучей по порядку величины раз в десять меньше массы покоящегося электрона, а масса фотона наиболее жестких  $\gamma$ -лучей радия приблизительно в 10 раз превышает массу электрона. В космических лучах наблюдаются фотоны с массой, превышающей массу протона; такие же фотоны получают и в лабораториях при торможении электронов, которые предварительно ускоряются в синхротроне до энергий порядка более миллиарда электроновольт.

В начале XX в. экспериментальной основой для обобщений, приведших к закону пропорциональности массы и энергии, служили главным образом два факта: изменение массы электрона при изменении его скорости, доказанное опытами Кауфмана, Бухерера и др. в 1901—1909 гг., и давление света, обнаруженное опытами П. Н. Лебедева в 1901 г.

В 1905—1907 гг. А. Эйнштейн в работах, посвященных обоснованию теории относительности, показал: 1) что закон пропорциональности массы и энергии получается как следствие принципа относительности и утверждения, что скорость света одинакова во всех системах отсчета, и 2) что этот закон, как и формула, определяющая изменение массы при изменении скорости, должны считаться справедливыми вне зависимости от того, имеет ли масса электромагнитное происхождение или же масса частиц тела имеет какое-то иное, неполевое происхождение. В 1907—1910 гг. М. Планк развил соображения Эйнштейна об универсальном характере закона пропорциональности массы и энергии, применил этот закон, наряду с принципами термодинамики, для исследования разнообразных

процессов и указал на особое значение этого закона для явлений радиоактивности.

В 20-х годах нашего века существовало убеждение, что атомы и атомные ядра, а стало быть, и все тела построены из протонов и электронов. Поэтому казалось, что изменение массы при изменении скорости движения и закон пропорциональности массы и энергии имеют всеобщую применимость вследствие того, что масса всех тел имеет электромагнитное происхождение. Но в 30-х годах были открыты *нейтроны* — частицы, сходные по массе с протонами, однако лишенные заряда. До настоящего времени остается неустановленным, какое происхождение имеет масса нейтронов. В 30-х годах выяснилось также, что нейтроны составляют значительную долю (около половины) любого атомного ядра. Вместе с тем подтвердилось, что закон пропорциональности массы и энергии с совершенной точностью оправдывается во всех ядерных процессах. Все это привело к господствующему сейчас мнению, что всеобщая применимость закона пропорциональности массы и энергии не является следствием полевого происхождения массы. Более того, даже в отношении заряженных элементарных частиц, таких, как электроны и протоны, теперь предполагают, что значительная часть массы этих частиц имеет *неполевое* происхождение, т. е. непосредственно не связана с их электромагнитным полем.

*Закон пропорциональности массы и энергии является всеобщим, т. е. справедливым для всех видов массы и энергии.* Как будет пояснено ниже, это приводит ко многим важным следствиям.

Кинетическая энергия частицы может возрасти вследствие соударения частицы с другой частицей; в этом случае к частице вместе с энергией переходит и пропорциональная ей масса. Кинетическая энергия частицы может возрасти также вследствие поглощения частицей части энергии фотона (эффект Комптона, § 80); в этом случае энергия и масса частицы возрастают за счет равного уменьшения энергии и массы фотона. Наконец, кинетическая энергия частицы может возрасти вследствие ускорения частицы силами поля; тогда энергия и масса частицы возрастают за счет соответствующего уменьшения энергии и массы поля. Когда частица движется в поле ускоренно или замедленно, но без изменения ее суммарной кинетической и потенциальной энергий, то неизменяющейся величине полной энергии соответствует и неизменяющаяся величина массы частицы; если при этом движении частицы является ускоренным, то приток массы частицы, связанный с увеличением ее кинетической энергии, в точности компенсируется убылью массы, происходящей в связи с уменьшением потенциальной энергии.

Из закона пропорциональности массы и энергии следует, что взаимное притяжение частиц приводит по мере сближения частиц к некоторому уменьшению их суммарной массы в сравнении с суммой масс тех же частиц, удаленных на большое расстояние одна от дру-

гой; численно это уменьшение массы —  $\Delta m$  (*дефект массы*) выражается формулой

$$-\Delta m = \frac{-\Delta E}{c^2}. \quad (4)$$

Здесь  $-\Delta E$  есть убыль энергии, вызванная сближением частиц, или, что то же, энергия, необходимая для полного разобщения частиц; эту энергию называют *энергией связи*.

Нередко высказывается ошибочный взгляд, что соотношение (4) будто бы указывает на возможность превращения материи в энергию. Такое заключение является не только совершенно произвольным, необоснованным, но оно прямо опровергается всеми исследованными случаями, когда наблюдается дефект массы и когда одновременно излучается энергия. Ложная идея о превращении материи (или массы) в энергию в философском отношении глубоко порочна и ведет к идеалистическим извращениям физики. *Масса в действительности никогда не превращается в энергию*, но изменения массы *сопутствуют* изменениям энергии. Когда при ядерных процессах происходит заметная убыль массы без выброса из ядра элементарных частиц, то одновременно ядро излучает фотон; никакого преобразования массы в энергию здесь не происходит: изменение массы ядра в точности равно массе  $\frac{h\nu}{c^2}$ , уносимой фотоном, а убыль энергии ядра равна энергии излучаемого фотона.

Следует отметить, что закон  $mc^2 = E$  нередко называют «законом эквивалентности массы и энергии». Такое название неудачно, так как об эквивалентности величин принято говорить в тех случаях, когда может происходить переход одной величины в другую (например, работы в теплоту). Превращения же массы в энергию или энергии в массу никогда не происходит. Закон  $mc^2 = E$  иногда называют также «законом связи энергии и массы». Такое название было бы уместно, если бы связь энергии и массы в разных случаях имела бы различный характер и являлась бы математически сложной. В действительности же изменения энергии и массы и их абсолютные величины всегда просто пропорциональны друг другу.

Так как при всех превращениях, происходящих в природе, общее количество энергии не изменяется (закон сохранения энергии), то соотношение  $E = mc^2$  утверждает, что и общее количество материи (масса) остается постоянным (закон сохранения массы). Обратное: из сохранения массы вытекает необходимость сохранения энергии.

Любое химическое уравнение, выражающее закон сохранения массы для какой-либо реакции (при учете массы выделяемой энергии), переходит, если все члены умножить на  $c^2$ , в уравнение термодинамики, представляющее применение к той же реакции закона сохранения энергии.

Масса определяет количество материи, энергия есть мера движения материи. Соотношение  $E = mc^2$  является фундаментальным подтверждением положения: нет материи без движения и нет движения без материи.