

# ЧАСТЬ II

## ФИЗИКА АТОМОВ И МОЛЕКУЛ

---

### ГЛАВА XII

#### МОДЕЛИ СТРОЕНИЯ АТОМА

##### § 42. Атомные единицы энергии и массы

Прежде чем переходить к строению атома, остановимся на применяемых в атомной и ядерной физике единицах.

Ничтожно малые размеры и массы атомных систем делают целесообразным применение в атомной и ядерной физике, наряду с системой СИ, специальных, «практических» для данной области единиц измерения различных встречающихся величин.

В технике единицей измерения малых длин служит *м и к р о н* (*мк*):

$$1 \text{ мк} = 10^{-3} \text{ мм} = 10^{-4} \text{ см} = 10^{-6} \text{ м.}$$

Длины волн видимого света меньше микрона и для их измерения в оптике применялась единица в тысячу раз меньшая, называвшаяся миллимикрон или, по современной номенклатуре, *н а н о м е т р* (*нм*):

$$1 \text{ нм} = 10^{-3} \text{ мк} = 10^{-9} \text{ м.}$$

Радиусы атомов и длины волн рентгеновских лучей еще меньше и для их измерения применяется в десять раз меньшая единица — *а н г с т р е м* ( $\text{\AA}$ ), которой пользуются и в оптике:

$$1 \text{\AA} = 10^{-8} \text{ см} = 10^{-10} \text{ м.}$$

Для измерения еще более коротких длин волн  $\gamma$ -лучей используется *Х* (*икс*)-единица

$$1 \text{ X} = 10^{-3} \text{\AA} = 10^{-13} \text{ м.}$$

Наконец, для измерения размеров атомных ядер предложена еще меньшая единица

$$1 \text{ ферми} = 10^{-5} \text{\AA} = 10^{-13} \text{ см} = 10^{-15} \text{ м,}$$

а в качестве единицы поперечного сечения

$$1 \text{ барн} = 10^{-24} \text{ см}^2 = 10^{-28} \text{ м}^2.$$

Электрически заряженные частицы, элементарные или сложные, имеют заряд, по величине равный или кратный заряду электрона. Им сообщается энергия путем ускорения в электрическом поле. Поэтому для измерения энергий заряженных (и незаряженных) частиц в атомной и ядерной физике применяется единица, носящая название электронвольт. 1 электронвольт (эв) есть энергия, которую приобретает частица с зарядом, равным заряду электрона ( $e = 1,601 \cdot 10^{-19}$  кул), при прохождении разности потенциалов в 1 в:

$$1 \text{ эв} = 1,601 \cdot 10^{-19} \text{ к} \cdot 1 \text{ в} = 1,601 \cdot 10^{-19} \text{ дж} = 1,601 \cdot 10^{-12} \text{ эрг.}$$

С помощью соответствующих приставок можно ввести производные от этой единицы:

$$\begin{aligned} 1 \text{ кэв} &= 10^3 \text{ эв} = 1,6 \cdot 10^{-16} \text{ дж}, \\ 1 \text{ Мэв} &= 10^6 \text{ эв} = 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ дж}, \\ 1 \text{ Гэв} (1 \text{ Бэв}) &= 10^9 \text{ эв} = 1,6 \cdot 10^{-10} \text{ дж}. \end{aligned}$$

Посмотрим, числами какого порядка выражаются в этих единицах энергии различных микроопических частиц.

Средняя энергия теплового движения атомов при  $T = 300^\circ \text{ К}$  составляет

$$e_T = \frac{3}{2} kT = \frac{3 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} \left[ \frac{(\text{дж/град}) \cdot \text{град}}{\text{дж/эв}} \right] = 0,0388 \text{ эв} \approx 0,04 \text{ эв.}$$

Энергия фотона видимых лучей, например для длины волны  $\lambda = 500 \text{ нм} = 5 \cdot 10^{-7} \text{ м}$ , соответствующей зеленой области спектра, составляет

$$e_{\text{фл}} = h\nu = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{5 \cdot 10^{-7} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} \left[ \frac{\text{дж} \cdot \text{сек} \cdot \text{м/сек}}{\text{м} \cdot \text{дж/эв}} \right] = 2,48 \text{ эв}$$

Тепловые эффекты химических реакций составляют обычно 200 000—400 000 кдж/кмоль. При среднем значении  $3 \cdot 10^8$  дж/кмоль энергия, выделяемая на одну реагирующую частицу, равна

$$e_{\text{хим}} = \frac{3 \cdot 10^8}{6 \cdot 10^{26} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} \left[ \frac{\text{дж}}{\text{дж/эв}} \right] \approx 3,5 \text{ эв.}$$

Фотон рентгеновских лучей с длиной волны  $\lambda = 1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ м}$  обладает энергией

$$e_{\text{ф}} = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6 \cdot 62 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{10^{-10} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} \left[ \frac{\text{дж} \cdot \text{сек} \cdot \text{м/сек}}{\text{м} \cdot \text{дж/эв}} \right] = 12 \cdot 400 \text{ эв} = 12,4 \text{ кэв}$$

Еще большей энергией порядка мегаэлектронвольт обладают фотоны  $\gamma$ -лучей, излучаемых радиоактивными веществами. На синхрофазотроне Объединенного института ядерных исследований в Дубне ядра водорода (протоны) ускоряются до энергий в 10 миллиардов электронвольт (10 Гэв). Наконец, входящие на Землю частицы космических лучей имеют энергии, достигающие до  $10^{18}$  эв.

В качестве атомной единицы массы (1 аем) естественно было бы выбрать массу самого легкого атома — водорода (H). Фактически удобнее оказалось в качестве эталона сравнения

выбрать атом кислорода и приписать ему массу, равную ровно 16,000... аем. Впоследствии выяснилось, что естественный кислород содержит небольшое количество тяжелых изотопов  $O^{17}$  и  $O^{18}$ . В химических расчетах оказалось тогда удобнее приписывать ровный атомный вес 16,000... естественной смеси изотопов и вводить

$$1 \text{ хим. аем} = \frac{1}{16} m_O.$$

В физических измерениях и расчетах более целесообразно приписать ровный атомный вес 16,000... лишь одному — более легкому изотопу  $O^{16}$ . Тогда

$$1 \text{ физ. аем} = 1 \text{ аем} = \frac{1}{16} m_{O^{16}} = \frac{1}{16} \frac{16}{6,025 \cdot 10^{23}} g = 1,660 \cdot 10^{-24} g$$

и

$$1 \text{ хим. аем} = 1,00027 \text{ физ. аем.}$$

В физических единицах масса атома водорода составляет:

$$m_H = 1,00814 \text{ фаем.}$$

Масса электрона равна:

$$m_{0e} = 5,488 \cdot 10^{-4} \text{ фаем.}$$

При изучении новых микрочастиц — мезонов и гиперонов (см. ниже § 73) —  $m_{0e}$  используется в качестве удобной единицы измерения масс.

Для точного сопоставления и измерений масс спектроскопическими методами более удобной, чем кислородная, оказалась углеродная единица массы, узаконенная в настоящее время. В качестве основной унифицированной атомной единицы массы ( $уаem$ ) выбрана одна двенадцатая массы изотопа углерода  $C^{12}$ :

$$1 \text{ уаем} = \frac{1}{12} m_{C^{12}}.$$

Эта единица ближе к химической и ее введение практически не требует какого-либо пересчета табличных атомных весов элементов:

$$1 \text{ уаем} = 1,000318 \text{ фаем} = 1,000043 \text{ хаем.}$$

Все эти единицы отличаются друг от друга в четвертом — пятом знаке после запятой. В нашем курсе такая точность излишняя и мы в дальнейшем всюду будем писать просто аем.

Соотношение Эйнштейна

$$e = mc^2 \quad (42.1)$$

позволяет по известной энергии частицы  $\epsilon$  рассчитать ее массу  $m$  и обратно. «Переводным множителем» при этом является квадрат скорости света:

$$c^2 = 9 \cdot 10^{16} \text{ (м/сек)}^2 \text{ или (дж/кг)}.$$

Рассчитаем с помощью (42.1) величину «переводного множителя» от массы данной частицы к ее энергии в атомных единицах. Энергия частицы с массой в 1 аем будет равна:

$$\epsilon_{аем} = \frac{1,660 \cdot 10^{-27} \cdot 9 \cdot 10^{16}}{1,601 \cdot 10^{-19}} \text{ эв} = 9,315 \cdot 10^8 \text{ эв} = 931,5 \text{ Мэв}.$$

Пользуясь этим переводным множителем, рассчитаем массу кванта рентгеновского излучения, энергия которого составляет, например, 30 000 эв = 30 кэв = 0,03 Мэв:

$$m_{\text{рентг}} = \frac{0,03}{931} \left[ \frac{\text{Мэв}}{\text{Мэв/аем}} \right] = 3,22 \cdot 10^{-5} \text{ аем}.$$

Зная массу покоящегося электрона, можно определить его энергию покоя:

$$\epsilon_{0e} = 5,488 \cdot 10^{-4} \cdot 931 \left[ \frac{\text{аем}}{\text{Мэв/аем}} \right] = 0,511 \text{ Мэв}.$$

Импульс (количество движения) летящей частицы равен произведению ее массы  $m$  (с учетом зависимости последней от скорости) на скорость  $v$ . Запишем его в виде

$$p = mv = \frac{mc^2 \frac{v}{c}}{c}. \quad (42.2)$$

Числитель этого выражения представляет собой полную энергию частицы  $mc^2$ , умноженную на «безразмерную скорость»  $\frac{v}{c}$ , и имеет, следовательно, размерность энергии. Для сильно релятивистских частиц  $\frac{v}{c} \rightarrow 1$  и этот числитель практически равен энергии. В качестве единицы скорости в атомных и ядерных процессах естественно выбрать скорость света  $c$ . Тогда единица измерения импульса будет

$$1 \frac{\text{эв}}{c} = \frac{1,60 \cdot 10^{-19}}{3 \cdot 10^8} \left[ \frac{\text{дж}}{\text{м/сек}} \right] = 5,33 \cdot 10^{-28} \text{ кг} \cdot \text{м/сек}.$$

Фотон с энергией 30 кэв движется со скоростью  $c$  и обладает импульсом  $p = 30 \text{ кэв}/c$ .

Частица с полной энергией 20 Мэв, движущаяся с относительной скоростью  $\beta = \frac{v}{c} = 0,9$ , обладает импульсом

$$p = \frac{\epsilon \beta}{c} = \frac{20 \cdot 0,9}{c} \left[ \frac{\text{Мэв}}{c} \right] = 18 \text{ Мэв}/c.$$