

с. 506; 4) Мурзин В. С., Сарычева Л. И., Космические лучи и их взаимодействие, М., 1968; 5) Веер А. и др., The central calorimeter of the UA 2 experiment at the CERN pp collider, «Nucl. Instr. and Meth. in Physics Research», 1984, v. A224, p. 360; 6) Fabjan C. W., Lundlam T., Calorimetry in high-energy physics, «Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.», 1982, v. 32, p. 335; 7) Alford M. G., Issues of calorimetry, «Nucl. Phys.», 1987, v. A 461, p. 417.

ИОНИЗАЦИОННЫЙ ПОТЕНЦИАЛ — энергия ионизации, делённая на величину заряда электрона e . И. п. равен ускоряющей разности потенциалов V , к-рую нужно приложить, чтобы сообщить электрону энергию eV , достаточную для ионизации атома (или молекулы) при их соударении. Значения И. п. для нейтрального атома и его ионов различны. Чаще всего под значением И. п. понимают И. п. нейтрального атома из осн. состояния. См. *Энергия ионизации*.

ИОНИЗАЦИЯ — превращение электрически нейтральных атомных частиц (атомов, молекул) в результате удаления из них одного или неск. электронов в положит. ионы и свободные электроны. Ионизовываться могут также и ионы, что приводит к повышению кратности их заряда. (Нейтральные атомы и молекулы могут в особых случаях и присоединять электроны, образуя отрицательные ионы.) Термином «И.» обозначают как элементарный акт (И. атома, молекулы), так и совокупность множества таких актов (И. газа, жидкости). Осн. механизмами И. являются следующие: столкновительная И. (соударения с электронами, ионами, атомами); И. светом (фотоионизация); ионизация полем; И. при взаимодействии с поверхностью твёрдого тела (поверхностная ионизация); ниже рассматриваются первые два типа И.

Столкновительная ионизация является важнейшим механизмом И. в газах и плазме. Элементарный акт И. характеризуется эфф. сечением ионизации σ_i [см²], зависящим от сорта сталкивающихся частиц, их квантовых состояний и скорости относительного движения. При анализе кинетики И. используются понятия скорости И. $\langle v\sigma_i(v) \rangle$, характеризующей число ионизаций, к-рое может произвести одна ионизирующая частица в 1 с:

$$\langle v\sigma_i(v) \rangle = \int vF(v)\sigma_i(v)dv \quad [\text{см}^3/\text{с}]. \quad (1)$$

Здесь v — скорость относит. движения и $F(v)$ — ф-ция распределения по скоростям ионизирующих частиц. Вероятность ионизации w_i данного атома (молекулы) в единицу времени при плотности N числа ионизирующих частиц связана со скоростью И. соотношением

$$w_i = N \langle v\sigma_i(v) \rangle \quad [1/\text{с}].$$

Определяющую роль в газах и плазме играет И. электронным ударом (столкновения со сво-

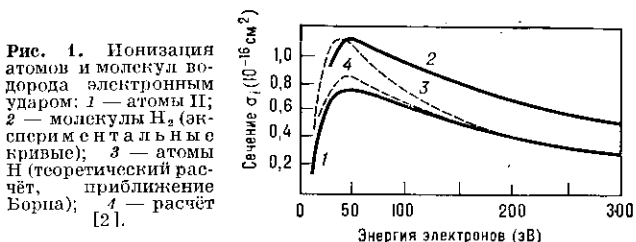


Рис. 1. Ионизация атомов и молекул водорода электронным ударом: 1 — атомы H; 2 — молекулы H₂ (экспериментальные кривые); 3 — атомы H (теоретический расчёт, приближение Борна); 4 — расчёт [2].

бодными электронами). Доминирующим процессом является одноэлектронная И. — удаление из атома одного (обычно внеш.) электрона. Кинетич. энергия ионизирующего электрона при этом должна быть больше или равна энергии связи электрона в атоме. Мин. значение кинетич. энергии ионизирующего электрона наз. порогом (границей) ионизации. Сечение И. атомов, молекул и ионов электронным ударом равно нулю в пороге, возрастает (приблизительно по линейному закону) с ростом кинетич. энергии, достигает макс. значения при энергиях, равных нескольким (2—5) пороговым значе-

ниям, а затем убывает с дальнейшим ростом кинетич. энергии. Положение и величина макс. сечения зависят от рода атома. На рис. 1 приведены ионизац. кривые (зависимости сечения И. от энергии) для атома и молекулы водорода. В случае сложных (многоэлектронных) атомов и молекул возможно наличие неск. максимумов в зависимости сечения от энергии. Появление дополнит. максимумов сечения в области энергий столкновения между порогом ионизации и энергией, соответствующей осн. максимуму, связано обычно с интерференцией прямой И. с возбуждением одного из дискретных состояний (и последующей И. последнего) в одном и том же акте столкновения. На рис. 2 виден такой дополнит. максимум на нач. части ионизац. кривой для Zn. Дополнит. максимумы в области энергий, превышающих значение, соответствующее осн. максимуму сечения, объясняются возбуждением автоионизационных состояний либо И. внутр. оболочек атома. Последние процессы можно рассматривать независимо, поскольку их вклад в И. связан с др. электронными оболочками атома.

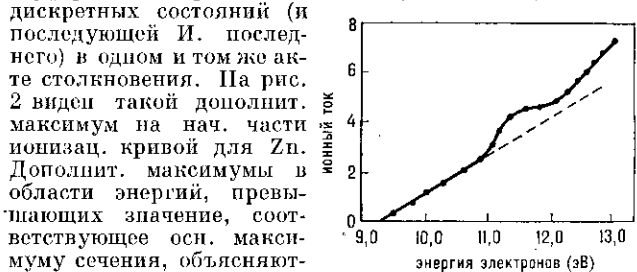


Рис. 2. Ионизация атомов Zn электронным ударом вблизи порога.

независимо, поскольку их вклад в И. связан с др. электронными оболочками атома.

Паряду с одноэлектронной И. возможно удаление двух и более электронов в одном акте столкновения при условии, что кинетич. энергия больше или равна соответствующей энергии И. Сечение этих процессов в неск. раз (для двух- и трёхэлектронных) или на неск. порядков величины (для многоэлектронных процессов) меньше сечений одноэлектронной И. Поэтому в кинетике И. газов и плазмы осн. роль играют процессы одноэлектронной И. и одноэлектронного возбуждения автоионизац. состояний.

Сечение И. атома или иона электронным ударом может быть представлено в виде:

$$\sigma_i = \pi a_0^2 \left(\frac{R}{\mathcal{E}_i} \right)^2 \frac{n_l}{2l+1} \Phi(u), \quad (2)$$

где $a_0 = 0,529 \cdot 10^{-8}$ см — *Бора радиус*; $R = 13,6$ эВ — т. п. *ридбергова единица энергии*, равная энергии И. атома водорода из осн. состояния (см. *Ридберга постоянная*); \mathcal{E}_i — энергия И. рассматриваемого состояния атома или иона; n_l — число эквивалентных электронов в оболочке атома; l — значение орбитального момента нач. состояния электрона; величина $u = (\mathcal{E} - \mathcal{E}_i)/\mathcal{E}_i$ есть разность кинетич. энергии налетающего электрона \mathcal{E} и порога ионизации \mathcal{E}_i , выраженная в единицах \mathcal{E}_i . Ф-ции $\Phi(u)$ вычислены и табулированы для большого количества атомов и ионов в [3]. При больших энергиях налетающего электрона $\mathcal{E} \gg \mathcal{E}_i$ применяется *возмущенной теории* первого порядка (т. н. *борновское приближение*). В этом случае для И. атома водорода из осн. состояния ф-ция

$$\Phi(u) = \frac{0,570}{u+1} \ln \frac{u+1}{0,012}, \quad u > 1. \quad (3)$$

В областях малых и средних энергий налетающего электрона ($u \ll 1$) важнейшим эффектом, влияющим на величину σ_i , является эффект обмена, связанный с тождественностью налетающего и выбитого из атома электронов [2]. Расчёт σ_i одноэлектронной И. в рамках теории возмущений с учётом эффекта обмена приводит к удовлетворит. согласию с экспериментом для большинства атомов и ионов [2÷4].

Усовершенствование (и усложнение) методов расчёта позволяет описать детальную структуру ионизац. кривых, а также распределение освобожденных электронов по энергии и углу рассеяния (т. е. дифференц. сечения).