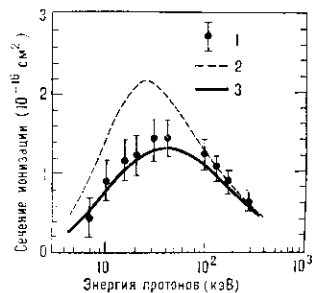


Указанная выше скорость И. (1) в предположении максвелловского распределения электронов по скоростям может быть представлена в виде

$$\langle v\sigma_i \rangle = 10^{-8} \left(\frac{R}{\mathcal{E}_i} \right)^{3/2} \frac{n_i}{2l+1} e^{-\beta G(\beta)}, \text{ [см}^3/\text{с]} \quad (4)$$

где $\beta = \mathcal{E}_i/kT$, T — темп-ра ионизирующих электронов. Ф-ции $G(\beta)$ вычислены и табулированы в [3] для большого числа атомов и ионов. Как видно из формул (2) и (4), с повышением заряда иона Z ($\mathcal{E}_i \propto Z^2$) сечение И. убывает пропорц. Z^{-4} , а скорость И. $\propto Z^{-3}$.



С повышением энергии налетающего электрона энергетически возможно выбивание одного из электронов

Рис. 3. Ионизация атома водорода протонами: 1 — экспериментальные данные; 2 — расчёт в приближении Борна; 3 — расчёт [7].

внутр. оболочек (K, L, \dots) многоэлектронных атомов (или ионов). Соответствующие сечения и скорости И. описываются также ф-лами (2) и (4). Однако создание вакансий во внутр. оболочке приводит к образованию автоионизац. состояния атома, к-рое неустойчиво и распадается с удалением из атома одного или неск. электронов и излучением фотонов (*оже-эффект*). Но сечения этого процесса много меньше сечения И. внеш. оболочки, поэтому в плазме доминирующим механизмом образования

многозарядных ионов является последовательная И. внеш. оболочек.

В плотных газах и при высокоинтенсивных потоках бомбардирующих частиц, обладающих энергией $\langle \mathcal{E}_i \rangle$, возможна т. н. ступенчатая И. В первом соударении атомы переводятся в возбуждённое состояние, а во втором соударении ионизуются (двухступенчатая И.). Ступенчатая И. возможна только в случаях столь частых соударений, что частица в промежутке между

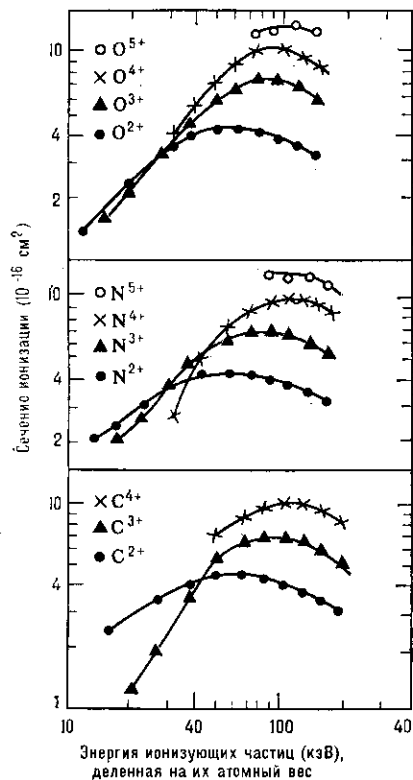


Рис. 4. Экспериментальные данные по ионизации атомов водорода многозарядными ионами углерода, азота и кислорода [9].

двумя соударениями не успевает потерять (излучить) энергию, напр. если атомы ионизируемого вещества обладают метастабильными состояниями.

Ионизация молекул электронным ударом отличается от И. атомов большим числом разл. процессов. Если молекулярная система, остающаяся после удаления электрона, оказывается устой-

чивой, образуется молекулярный ион; в противном случае система диссоциирует с образованием атомных ионов. Число возможных процессов И. с диссоциацией молекул возрастает с увеличением числа атомов в молекуле и в случае многоатомных молекул приводит к образованию большого числа осколочных ионов. Наиб. детально экспериментально и теоретически изучена И. двухатомных молекул. Из рис. 1 видно, что при больших энергиях электрона (в области борновского приближения) ионизац. кривые для молекулы H_2 (2) и для атома H (1) отличаются примерно в два раза, что соответствует различию в числе электронов.

Ионизация атомов в столкновениях с ионами и др. атомами эффективна при кинетич. энергии сталкивающихся частиц ~ 100 эВ и выше. При меньших энергиях сечения крайне малы и в области порога И. ($\mathcal{E} = \mathcal{E}_i$) экспериментально не наблюдались. Сечения И. атомов протонами (рис. 3) и др. ионами (рис. 4) качественно подобны сечениям И. электронным ударом в масштабе скоростей относит. движения сталкивающихся частиц. И. максимально эффективна, когда скорость относит. движения порядка скорости орбитальных электронов, т. е. при энергиях ионизирующих ионов в десятки кэВ (для И. из осн. состояния атомов). Эксперимент и расчёт показывают, что макс. значение сечения И. атома ионами растёт с ростом заряда иона пропорц. величине заряда. При меньших скоростях механизм И. усложнён образованием квазимолекулы в процессе столкновения, т. е. перераспределением электронов между ядрами сталкивающихся атомных частиц. Это может приводить к появлению дополнительных максимумов в области малых скоростей.

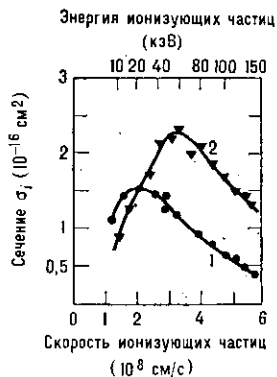


Рис. 5. Ионизация молекулярного водорода атомами водорода (Кривая 1) и протонами (Кривая 2).

И. атомов и молекул в столкновениях с нейтральными атомами объясняется теми же механизмами, что и в столкновениях с ионами, однако, как правило, количественно менее эффективна. На рис. 5 приведены для сравнения ионизац. кривые для ионизации молекулярного водорода атомами водорода и протонами.

При взаимодействии атомных частиц электроны могут удаляться не только из частиц-мишеней, но и из бомбардирующих частиц (явление «обдирки» быстрых ионов или атомов при прохождении через газ или плазму). Налетающие положит. ионы могут также захватывать электроны от ионизируемых частиц — т. н. *перезарядка ионов*.

«Квазимолекулярный» характер процессов столкновения атомных частиц при малых скоростях может приводить к более эффективному, чем в электронных столкновениях (при тех же скоростях), образованию ионов с зарядом больше единицы.

Сечения ионизац. столкновит. процессов экспериментально исследуются в скрещенных пучках с использованием техники совпадений. Такой метод является наиб. точным и даёт детальную картину величин дифференц. и полных сечений и их зависимостей от физ. параметров. Скорости И. могут быть с хорошей точностью получены спектроскопич. методом при исследовании излучения хорошо диагностированной плазмы (см. *Диагностика плазмы*). При этом необходимо иметь надёжные данные о темп-ре (ф-ции распределения) частиц и их плотности. Этот метод успешно применяется для исследования И. многозарядных ($Z \geq 10$) ионов электронным ударом.