

реакций очень велики по сравнению со скоростью первой реакции В. ц. Поэтому  $^2\text{D}$ ,  $^3\text{He}$ ,  $^7\text{Be}$ ,  $^7\text{Li}$  и  $^8\text{B}$  не накапливаются в сколько-нибудь заметных количествах. Примерно в 70% всех случаев В. ц. заканчивается ветвью I, в 30% — ветвью II, а на долю ветви III приходится менее 0,1% случаев. В последней строке табл. приведен итог В. ц.: каждая ветвь заканчивается образованием ядра  $^4\text{He}$  из четырех протонов с испусканием двух нейтрино. При этом выделяется энергия 26,73 МэВ, из которой в ср. ок. 0,6 МэВ уносит нейтрино. В недрах звезд при  $T \geq 18 \cdot 10^8 \text{ K}$  с В. ц. конкурирует *углеродно-азотный цикл*.

Лит.: Ядерная астрофизика, пер. с англ., М., 1986.

Д. К. Набёжин.

**ВОДОРОДОПОДОБНЫЕ АТОМЫ** — атомы (ионы), состоящие, подобно атому водорода, из ядра и одного электрона. К ним относятся ионы элементов с ат. номером  $Z \geq 2$ , потерявшие все электроны, кроме одного:  $\text{He}^+$ ,  $\text{Li}^{+2}$ ,  $\text{B}^{+3}$ , ... Вместе с водородом они образуют простейший *изоэлектронный ряд*. Уровни энергии (и спектры) В. а. подобны водородным, отличаясь от них масштабом энергий (и частот) переходов в  $Z^2$  раз (см. *Атом*).

Системы, подобные В. а., образуют атомное ядро и мезон (*мезоатом*), а также электрон и позитрон (*позитроний*); для этих систем также получаются аналогичные водородным уровни энергии и спектры.

**ВОЗБУЖДЕНИЕ АТОМА И МОЛЕКУЛЫ** — квантовый переход атома или молекулы с более низкого (напр., основного) уровня энергии на более высокий при поглощении ими фотонов (фотовозбуждение) или при столкновениях с электронами и др. частицами (возбуждение ударом).

Под действием света относительно слабой интенсивности В. а. и м. происходит в результате поглощения одного фотона частоты  $\nu$  и энергии  $h\nu = \mathcal{E}_i - \mathcal{E}_k$ , где  $\mathcal{E}_i$  и  $\mathcal{E}_k$  — энергии нач. и конечных уровней энергии атомной системы (с учётом ширины уровней). Сечение фотопоглощения равно:

$$\sigma_{\nu} = \frac{1}{4} \frac{g}{g'} a_{\nu} \lambda^2,$$

где  $\lambda$  — длина волны света,  $g$  и  $g'$  — статистич. веса начальных и конечных уровней энергии; безразмерная величина  $a_{\nu}$  — вероятность спонтанного испускания, приходящаяся на единичный интервал частот, зависящая от сорта атомов и характеристик уровней энергии  $\mathcal{E}_i$  и  $\mathcal{E}_k$ .

В поле лазерного излучения возможно возбуждение с одноврем. поглощением неск. фотонов, суммарная энергия  $k$ -рых равна энергии перехода в атоме или молекуле  $\mathcal{E}_i - \mathcal{E}_k$  (см. *Многофотонные процессы*).

При столкновениях с электронами и др. атомными частицами элементарный акт В. а. и м. характеризуется сечением возбуждения  $\sigma$ , зависящим от строения сталкивающихся частиц и скорости их относит. движения  $v$  (см. *Столкновения атомные*). Для анализа кинетики возбуждения используется величина, наз. скоростью возбуждения:

$$\langle v\sigma(v) \rangle = \int vF(v)\sigma(v)dv,$$

где  $F(v)$  — ф-ция распределения по скоростям возбуждающих частиц. Кинетич. энергия частиц, равная энергии перехода в атоме (молекуле), наз. *пороговой*. При возбуждении нейтральных атомов (кроме водорода) электронами пороговой энергии  $\sigma$  равно нулю. С ростом энергии электронов вплоть до значений порядка 2—5 пороговых (в зависимости от строения электронных оболочек)  $\sigma$  возрастает, а при больших энергиях начинает убывать. На возрастающей части кривой зависимости  $\sigma$  от энергии электронов возможно наличие неск. максимумов, связанных с интерференцией разл. квантовых состояний атома (см. *Интерференция состояний*).

Для атома водорода сечения возбуждения конечны и при пороговых значениях энергии электронов, что свя-

зано с наличием *вырождения* уровней с разл. значениями орбитального квантового числа (рис. 1). Для всех положит. ионов сечения  $\sigma$  возбуждения также конечны при пороговых значениях энергии электронов вследствие дальнедействующего взаимодействия между ионом и внеш. электроном.

Возбуждение атомов в столкновениях с ионами и др. атомами эффективно при кинетич. энергии сталкивающихся частиц  $\sim 100$  эВ и выше. При меньших энергиях они крайне малы и в области пороговых энергий

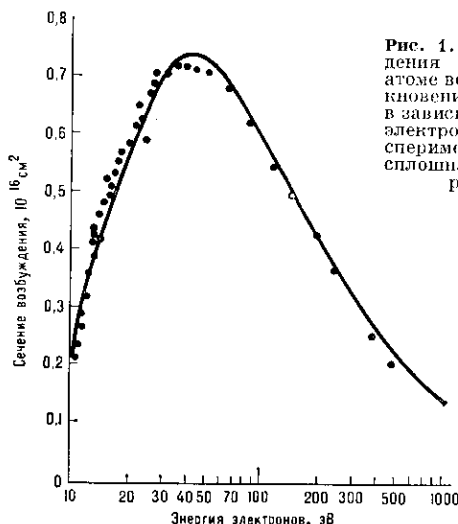


Рис. 1. Сечение возбуждения перехода 1—2 в атоме водорода при столкновении с электронами в зависимости от энергии электронов; точки — экспериментальные данные, сплошная кривая — теоретическая.

экспериментально не наблюдались. Качество, подобие сечений межатомных столкновений сечениям электронно-атомных столкновений реализуется в масштабе скоростей относит. движения — при скоростях порядка и больше скоростей орбитальных электронов. При меньших скоростях (т. е. медленных столкновениях) механизм возбуждения объясняется образованием квазимолекулы в процессе столкновения и переходом электрона между молекулярными уровнями энергии. На рис. 2 показано сечение возбуждения перехода 1—2 в атоме водорода протонным ударом.

Возбуждение молекул при атомных столкновениях характеризуется большим многообразием процессов в связи с наличием колебат. и вращат. структуры их уровней энергии. Возбуждение электронных переходов (при усреднении по колебательно-вращат. состояниям) в целом описывается теми же закономерностями, что и возбуждение атомов. Колебат. и электронно-колебат. переходы исследованы полнее, чем вращательные.

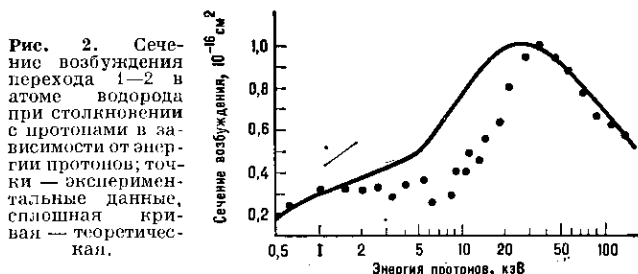


Рис. 2. Сечение возбуждения перехода 1—2 в атоме водорода при столкновении с протонами в зависимости от энергии протонов; точки — экспериментальные данные, сплошная кривая — теоретическая.

В атомно-молекулярных столкновениях могут возбуждаться обе сталкивающиеся частицы. К образованию атомов (и молекул) в возбужденном состоянии может приводить также фотодиссоциация молекул (см. *Диссоциация молекулы*), перезарядка ионов при столкновении с атомами [3] и молекулами.

Лит.: Соболевман И. И., Введение в теорию атомных спектров, М., 1977; Делоне Н. Б., Крайнов В. П., Атом в сильном световом поле, М., 1978; Друкарева Г. Ф.,