

исходных ядер (в случае неравновесно протекавшего нуклеосинтеза). Для получения наблюдаемого изотопного состава элементов с  $6 \leq Z \leq 28$  необходимо, чтобы  $\eta \approx 0,002$ . Образование хим. элементов с  $Z \leq 28$  при взрывах сверхновых подтверждается прямыми наблюдениями оптич. спектров сверхновых и рентг. спектров их остатков, свидетельствующих о присутствии элементов группы железа и более лёгких элементов в выбрасываемом при взрыве веществе.

Для нуклидов с  $Z > 28$  реакции с  $\alpha$ -частицами и протонами из-за высокого кулоновского барьера оказываются неэффективными. Образование столь тяжёлых элементов возможно в реакциях захвата нейтронов. Анализ изотопного состава элементов тяжелее железа определённо показывает, что часть изотопов была синтезирована в условиях, когда реакции захвата нейтронов протекали значительно быстрее, чем  $\beta^-$ -распады образующихся нестабильных нуклидов, т. е. за времена, сравнимые с характерным временем взрыва звезды (т. н.  $r$ -процесс; см. *Ядерная астрофизика*). Для протекания  $r$ -процесса требуется высокая концентрация в веществе свободных нейтронов. При взрывах звёзд причиной этому может быть, напр., диссоциация тяжёлых ядер на свободные нейтроны и протоны при *гравитационном коллапсе* или сильная *нейтронизация вещества* благодаря захватам электронов ядрами в условиях электроного вырождения.

Образование обойдённых ядер (не способных образоваться при захватах нейтронов) теория объясняет существованием  $p$ -процесса, т. е. захвата ядрами протонов в реакциях  $(p, \gamma)$ ,  $(p, n)$ ,  $(p, 2n)$ , а также процесса образования этих ядер в реакциях с участием нейтрино [напр.,  $\nu + (A, Z) \rightarrow (A, Z+1) + e^-$ ], излучаемых коллапсирующими ядрами звёзд. В реакциях с нейтрино возможно также образование ряда лёгких элементов.

Лит.: Фаулер У. А., Экспериментальная и теоретическая ядерная астрофизика, поиски происхождения элементов, «УФН», 1985, т. 145, с. 441; Burbidge E. M. et al., Synthesis of the elements in stars, «Rev. Mod. Phys.», 1957, v. 29, p. 547; Trimble V., The origin and abundances of the chemical elements, там же, 1975, v. 47, p. 877. А. М. Хохлов.

**ВИБРОННОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ** (от лат. *vibro* — колеблеться) (электронно-колебательное взаимодействие) — взаимодействие электронов и колебаний ядер в молекуле или в твёрдом теле. В широком смысле к В. в. относятся все явления, учитывающие движение ядер: колебат. структура электронных спектров, разрешённые запрещённых переходов за счёт участия неополносимметричных колебаний и т. п. Такие явления обусловлены смешиванием электронных состояний ядерными смещениями (см. *Молекулярные спектры*). В узком смысле к В. в. относят т. н. эффекты Яна — Теллера: собственно Яна — Теллера эффект, псевдоэффект Яна — Теллера и эффект Реннера.

В 1937 Г. А. Ян (H. A. Jahn) и Э. Теллер (E. Teller) установили, что любая конфигурация  $Q_0$  атомов или ионов (за исключением линейной) с вырожденным по орбитальному моменту основным электронным состоянием неустойчива относительно смещений, понижающих симметрию конфигурации  $Q_0$ . Строго говоря, эта теорема Яна — Теллера означает, что минимум адиабатич. потенциальной энергии на *потенциальной поверхности* не может находиться в точке  $Q_0$  орбитального вырождения данной системы, а располагается в точках  $Q \neq Q_0$ , соответствующих состояниям с нарушенной симметрией расположения ядер. Если потенциальные барьеры между минимумами адиабатич. потенциальной энергии достаточно высоки, то система может «заморозиться» в одном из минимумов — статич. эффект Яна — Теллера; в противном случае наблюдается динамич. эффект Яна — Теллера, к-рый характерен для изолир. молекул и мол. комплексов. Статич. эффект Яна — Теллера в кристаллах реализуется благодаря кооперативному (за счёт взаимодействия частей) увеличению высоты барьеров на потенциальной поверхности. Минимумам адиабатич. потенциальной энергии в этом

случае соответствуют искажённые конфигурации всей кристаллич. структуры, при к-рых электронное вырождение для каждого т. н. ян-теллеровского иона снимается. Такое энергетически выгодное упорядочение локальных искажений с ростом темп-ры может разрушаться тепловыми флуктуациями, поэтому с изменением темп-ры за счёт кооперативного эффекта Яна — Теллера может происходить структурный фазовый переход.

Исчезновение минимума адиабатич. потенциальной энергии для высокосимметричной конфигурации  $Q_0$  молекул и кристаллов может наблюдаться также в случае невырожденного основного электронного состояния вследствие его смешивания с близко расположенным возбуждённым состоянием. Такой эффект наз. псевдоэффектом Яна — Теллера (его наз. также эффектом Яна — Теллера второго порядка, т. к. в этом случае разложение адиабатич. потенциала по нормальным координатам начинается с членов второй степени по  $Q - Q_0$ ). Псевдоэффект Яна — Теллера может быть сильным и слабым. При слабом псевдоэффекте положение минимума потенциальной поверхности (в точке  $Q_0$ ) сохраняется, но уменьшается кривизна потенциальной поверхности вдоль координаты  $Q$  в точке  $Q_0$ , т. е. результирующая, перенормированная В. в. силовая константа уменьшается по сравнению с исходной. При сильном псевдоэффекте перенормированная силовая константа изменяет знак на противоположный знаку исходной константы — возникает структурная неустойчивость, минимум потенциальной энергии перемещается из точки  $Q_0$  в точки  $Q \neq Q_0$ .

Эффект Реннера [Р. Реннер (R. Renner), 1934], к-рый наз. также эффектом Реннера — Теллера, возникает в линейных молекулах при наличии орбитального вырождения электронных состояний, что может привести к отклонению конфигурации атомов от линейной. При определ. параметрах системы соответствующая силовая константа для изгиба линейной конфигурации может уменьшаться или даже менять знак. Тогда линейная конфигурация превращается в угловую.

Экспериментально структурные и спектральные проявления эффектов Яна — Теллера наблюдаются для нек-рых молекул и кристаллов, содержащих ионы переходных металлов. Псевдоэффектом Яна — Теллера объясняют отклонения формы молекул от наиб. симметричных. Возникновение спонтанной поляризации в сегнетоэлектриках также трактуют как проявление кооперативного псевдоэффекта Яна — Теллера (вибрональная теория сегнетоэлектричества). Приложения теории В. в. охватывают стереохимию, теорию хим. реакций, кристаллофизику и кристаллохимию, спектроскопию, сегнетоэлектрич. и магн. фазовые переходы, *вибронные возбуждения* в молекулярных кристаллах, а также проблемы, связанные со стрессом атомных ядер и спонтанным нарушением симметрии в теории элементарных частиц.

Лит.: Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М., Квантовая механика, 3 изд., М., 1974; Ельишев И. М. А., Атомная и молекулярная спектроскопия, М., 1962; Ян Г. А., Теллер Э., Устойчивость многоатомных молекул с вырожденными электронными состояниями, в сб.: Нокс Р., Голд А., Симметрия в твёрдом теле, пер. с англ., М., 1970; Кугель К. И., Хомский Д. И., Эффект Яна — Теллера и магнетизм: соединения переходных металлов, «УФН», 1982, т. 136, с. 621; Берсукер И. Б., Полингер В. З., Вибронные взаимодействия в молекулах и кристаллах, М., 1983; Эллиот Дж., Добер П., Симметрия в физике, пер. с англ., т. 2, М., 1983; Englman R., The Jahn-Teller effect in molecules and crystals, L. — [a.o.], 1972. В. А. Иванов, А. А. Левин.

**ВИБРОННЫЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ** в молекулярных кристаллах — возбуждения, состоящие из электронного *молекулярного экситона* и одного или нескольких *внутренних фононов*. Внутренние фононы соответствуют колебат. ветвям кристалла, возникающим из внутримолекулярных колебаний при объединении молекул в кристалл (см. *Динамика кристаллической решётки*). В. в. в кристаллах являются анало-