

У. с. л., вызываемое взаимодействием частиц, и доплеровское У. с. л. не являются статистически независимыми. В обычных спектрах поглощения и испускания их статистич. зависимость существенно проявляется только в эффекте сужения Дике, однако в нелинейной спектроскопии статистич. зависимость ударного и доплеровского уширения часто весьма существенна. Для её описания используются квантовое кинетич. ур-ние.

Различают однородное и неоднородное У. с. л. Если вероятность $P_{ab}(\omega)$ поглощения или испускания на частоте ω , приводящего к квантовому переходу $a \rightarrow b$, одинакова для всех атомов, находящихся на уровне a , то линию наз. однородно уширенной. В противоположном случае имеет место неоднородное уширение. Однородным являются ударное и естественное У. с. л.; доплеровское и квазистатистическое — примеры неоднородного уширения. При доплеровском уширении в резонанс с эл.-магн. волной вступают лишь атомы, для к-рых с точностью до естественной или ударной ширины $\delta\omega$ выполняется условие $kv = \omega - \omega_{ab}$ (здесь k — волновой вектор эл.-магн. волны, v — скорость атома). При квазистатич. уширении резонансно взаимодействуют с полем волны те атомы, у к-рых сдвиг частоты в локальном микрополе равен отстройке $\omega - \omega_{ab}$.

Неоднородно уширены линии примесных ионов в неоднородных кристаллах и аморфных твёрдых телах. Значительное однородное уширение ($\delta\omega \sim 10^{11} - 10^{13} \text{ с}^{-1}$) испытывают молекулярные линии в жидкостях и растворах. Вследствие перекрытия колебательно-вращат. полос в большинстве случаев вместо отд. спектральных линий в спектрах поглощения и люминесценции наблюдаются широкие полосы. Во мн. экспериментах лазерной спектроскопии и радиоспектроскопии (особенно в пучковых) время взаимодействия атомов или молекул с полем излучения мало по сравнению с временем жизни возбуждённого уровня. В результате наблюдаемый контур линии поглощения (или вынужденного испускания) испытывает т. н. время-пролётное (или просто пролётное) уширение. При этом ширина контура $\delta\omega \approx 5v/d$ (d — размер области взаимодействия). Форма контура зависит от распределения поля в области взаимодействия.

Резонансное взаимодействие атомов с полем интенсивной эл.-магн. волны приводит к полевому У. с. л. вследствие нелинейных эффектов, напр. вследствие насыщения поглощения.

Структура электронных спектров кристаллов при обычных условиях сильно размыта под действием тепловых колебаний атомов кристаллич. структуры, и в большинстве случаев наблюдаются широкие размытые спектральные полосы. При гелиевой темп-ре можно наблюдать дискретные спектральные линии, к-рые возникают при прямых переходах между экситонными зонами, при переходах между дискретными уровнями электронов и дырок, локализованных на дефектах решётки, либо на акцепторных или донорных примесях в гомеополярных полупроводниках (см. *Спектроскопия кристаллов*). Помимо колебаний атомов на форму и ширину экситонных линий влияют тип связи в кристалле, его зонная структура и микроструктура экситонного возбуждения. В сильнолегир. полупроводниках ширина линии может зависеть от степени легирования. Дискретные линии наблюдаются и при комнатной темп-ре в поглощении и люминесценции кристаллов, содержащих ионы переходных металлов (хром, железо, палладий, платина и др.), лантанидов и трансурановых элементов, имеющих незаполненные d - и f -оболочки. В кристаллах высокого качества линии таких примесных ионов, напр. линия иона Cr^{3+} в рубине и линия Nd^{3+} в иттрий-алюминиевом гранате, испытывают однородное уширение, обусловленное гл. обр. колебаниями атомов кристаллич. структуры.

Весьма многообразны причины уширения радиочастотных линий *электронного парамагнитного резонанса* (ЭПР), *ядерного магнитного резонанса* (ЯМР) и *ядерного квадратного резонанса* (ЯКР). Наиб. значит. влияние на их форму и ширину оказывают спин-решёточное взаимодействие, спин-спиновое взаимодействие, неоднородность магн. поля и исследуемого объекта. К уширению наблюда-

емых линий ЭПР часто приводит неразрешённая сверхтонкая структура. Ширина линий циклотронного (диамагнитного) резонанса, соответствующая переходам между уровнями Ландау, определяется частотой электрон-электронных соударений.

Лит.: Tsao C. J., Curnutte B., Line-widths of pressure-broadened spectral lines, «J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.», 1962, v. 2, p. 41; Bibliography on atomic line shapes and shifts, Wash., 1972; Supplement 1—4, Wash., 1974—92; Carrington C. G., Stacey D. N., Cooper J., Multipole relaxation and transfer rates in the impact approximation: application to the resonance interaction, «J. Phys.», 1973, v. 6B, p. 417; Rabitz H., Rotation and rotation-vibration pressure-broadened spectral lineshapes, «Ann. Rev. Phys. Chem.», 1974, v. 25, p. 155; Грим Г., Уширение спектральных линий в плазме, пер. с англ., М., 1978; Вайнштейн Л. А., Собельман И. И., Юков Е. А., Возбуждение атомов и уширение спектральных линий, М., 1979; Allard N., Kielkopf J., The effect of neutral nonresonant collisions on atomic spectral lines, «Rev. Mod. Phys.», 1982, v. 54, p. 1103. Е. А. Юков.



ФАДДЕЕВА — ПОПОВА ДУХИ — вспомогательные поля, к-рые вводятся в теорию Янга — Миллса полей для того, чтобы записать матрицу рассеяния в виде хронологически упорядоченной экспоненты от локального действия или в виде функционального интеграла от $\exp\{iS\}$, где S — локальное эфф. действие, включающее помимо классич. действия Янга — Миллса фиксирующий калибровку член и действие Φ . — П. д. (см. также *Калибровочные поля*). Действие Φ . — П. д.

$$S_c = \int \text{tr} \left[\frac{1}{2} \bar{c} (\square c - g \bar{c}_\mu [A_\mu, c]) \right],$$

где A_μ — компоненты поля Янга — Миллса, g — константа взаимодействия, черта означает дираковское сопряжение. Скалярные поля $\bar{c}(x)$, $c(x)$, принимающие значения в алгебре Ли калибровочной группы, наз. Φ . — П. д. (Л. Д. Фаддеев, В. Н. Попов, 1967). По отношению к базису *генераторов группы* t^a , \bar{c} , c определяются своими коэф. \bar{c}^a , c^a :

$$\bar{c}(x) = \bar{c}^a(x) t^a, \quad c(x) = c^a(x) t^a.$$

Поля \bar{c}^a , c^a являются антикоммутирующими переменными.

Φ . — П. д. отсутствуют в асимптотич. состояниях. Их роль состоит в том, чтобы компенсировать вклад нефиз. продольных и временных квантов поля Янга — Миллса, присутствующих в теории при квантовании в ковариантных калибровках, и тем самым обеспечить унитарность матрицы рассеяния. Суммарная вероятность перехода из любого физ. состояния (т. е. состояния, включающего только поперечно поляризованные кванты поля Янга — Миллса) в состояния, включающие Φ . — П. д. и нефиз. поляризации поля Янга — Миллса, равна нулю. Это свойство может быть положено в основу ковариантной процедуры квантования теории Янга — Миллса, в к-рой исходным объектом является эфф. действие.

Лит. см. при ст. *Калибровочные поля*.

А. А. Славнов.

ФАЗ ПРАВИЛО — см. *Гиббса правило фаз*.

ФАЗА в термодинамике — термодинамический равновесное состояние вещества, отличающееся по физ. свойствам от др. возможных равновесных состояний (др. фаз) того же вещества (см. *Равновесие термодинамическое*). Иногда неравновесное *метастабильное состояние* вещества также наз. Φ . (метастабильная Φ). Переход вещества из одной Φ . в другую — *фазовый переход* — связан с качеств. изменениями свойств вещества. Напр., газовое, жидкое и кристаллич. состояния (Φ .) вещества различаются харак-