

цией. Иногда под К. л. подразумевают только люминесценцию, идущую по третьему механизму.

Слой из поликристаллич. кооперативных люминофоров используют для изготовления светодиодов с видимым свечением на основе GaAs:Si диодов с высокой эффективностью ИК-излучения (в области 0,9–1,0 мкм), а также для приготовления экранов, визуализирующих поля излучения нек-рых ИК-лазеров (в т. ч. ИАГ: Nd<sup>3+</sup>).

Лит.: Чукова Ю. П., Антистокова люминесценция и новые возможности ее применения, М., 1980.

Ю. П. Тимофеев.

**КООПЕРАТИВНЫЕ ЯВЛЕНИЯ** — явления в многочастичной системе, связанные с когерентным (согласованным) взаимодействием большого числа частиц (иначе говоря, с развитыми многочастичными корреляциями). Простейший пример К. я. — гидродинамич. движения (звук, теплопроводность и т. п.). Такие движения связаны с локальными изменениями термодинамич. характеристик (плотности, давления и т. д.), а также скорости и имеют достаточно большие пространств. и временные масштабы (необходимые для установления локального равновесия). К. я. происходят как в равновесных физ. системах, так и в системах разл. природы (физ., хим., биол. и т. п.), находящихся вдали от термодинамич. равновесия.

Равновесные кооперативные явления можно разделить на две группы: *критические явления*, связанные с разл. фазовыми переходами, и когерентные явления, связанные с установившейся макроскопич. упорядоченностью. Примером первого типа К. я. служит аномалия теплоёмкости вблизи  $\lambda$ -точки <sup>4</sup>He, примером второго типа — отсутствие вязкости (*сверхтекучесть*) <sup>4</sup>He при темп-рах ниже  $\lambda$ -точки. Сверхтекучесть, как и сверхпроводимость, представляет собой пример квантовых К. я., при к-рых квантовая когерентность проявляется в макроскопич. масштабах. К такого же рода явлениям относится и неустойчивость Пайерлса — Фрелиха, наблюдаемая в ряде квазиодномерных металлич. и органич. соединений и приводящая к появлению пространств. модуляции электронной плотности (т. н. *волны зарядовой плотности*). Причиной неустойчивости Пайерлса — Фрелиха является, как и в случае сверхпроводимости, электрон-фононное взаимодействие. Хорошо известные примеры К. я. — ферромагнетизм и антиферромагнетизм — явления, связанные с установлением дальнего магн. порядка того или иного типа. Когерентные явления в упорядоч. фазах вещества, как правило, можно описать в терминах слабо взаимодействующих квазичастиц (фононов и ротонов в сверхтекучем <sup>4</sup>He, спиновых волн в магнетиках и т. п.). Критич. явления при фазовых переходах 2-го рода не допускают такого описания, они связаны с интенсивным взаимодействием большого кол-ва флуктуирующих степеней свободы.

Неравновесные кооперативные явления имеют место в открытых системах, далёких от термодинамич. равновесия, их существование связано с диссипацией энергии. Нек-рые из них обусловлены возникновением в неравновесной системе макроскопич. пространств. когерентности (*диссипативной структуры*); они в значит. степени аналогичны равновесным К. я. при термодинамич. фазовых переходах. К ним относятся: когерентное излучение лазера (пример квантового неравновесного К. я.), неустойчивость Рэлея — Бенара, возникающая в нагреваемом снизу слое жидкости, образование пространственно неоднородных структур при нек-рых хим. реакциях, а также в процессе морфогенеза (см. также *Неравновесные фазовые переходы*). Успешное описание процессов в лазере вблизи порога генерации в терминах *Ландау теории* фазовых переходов 2-го рода положило начало построению единого подхода к неравновесным К. я., составляющего предмет нового научного направления — *синергетики*. Общая идея такого подхода состоит в следую-

щем: при достаточно высокой степени неравновесности (мощности накачки в лазере, температурном градиенте в неустойчивости Рэлея — Бенара) тривиальное (бесструктурное) состояние системы становится неустойчивым по отношению к малым флуктуациям; анализ динамич. ур-ний в линейном приближении позволяет определить те моды (степени свободы), к-рые первыми теряют устойчивость; вблизи порога неустойчивости эти (критич.) моды релаксируют наиб. медленно, что даёт возможность исключить из динамич. ур-ний остальные (некритич.) моды и получить эфф. нелинейные ур-ния для амплитуд критич. мод (*параметров порядка*). В тех случаях, когда критич. моды обладают лишь пространственной (но не временной) структурой (как во всех приведённых примерах), ур-ния для параметров порядка аналогичны ур-ниям теории Ландау. Это позволяет определить функционалы распределения вероятностей разл. состояний системы, формально сходные с распределением Гиббса.

Ряд важных неравновесных К. я. связан с появлением временных (или пространственно-временных) структур, напр.: осцилляции тока в диоде Ганна, осцилляции плотностей хим. компонентов в реакции Белоусова — Жаботинского и численностей разл. видов животных в экологич. системах, распространение электрич. волн в нервных клетках и т. п. Динамич. ур-ния для параметров порядка таких систем (активных сред) не допускают построения распределений вероятности, сходных с распределением Гиббса. Общего статистич. подхода к описанию активных сред в настоящее время не существует. Один из наиболее интересных типов волновых К. я. в активных средах — *автоволны*.

Особый тип К. я., к-рые нельзя отнести ни к критическим (в обычном смысле), ни к когерентным, представляют явления, связанные с процессами замерзания в стёклах (структурных, спиновых, электрич. и т. п.). Замерзание стёкол, в отличие от обычных фазовых переходов, не приводит к изменению симметрии системы, однако качественно изменяет макроскопич. свойства системы (в частности, структурные стёкла, как и кристаллы, обладают конечным модулем сдвига, что отличает их от жидкостей). Структурные стёкла образуются при быстром охлаждении чистых веществ (напр., SiO<sub>2</sub>) или сплавов. Состояние стекла является метастабильным, за очень большое время (порядка сотен лет для SiO<sub>2</sub>) стекло кристаллизуется. В этом смысле структурные стёкла не являются равновесными системами, однако они также принципиально отличаются от неравновесных диссипативных структур, существующих за счёт притока энергии извне. Естественно называть происходящие в них процессы *квазиравновесными кооперативными явлениями*. Кооперативный характер процесса замерзания структурных стёкол проявляется, в частности, в температурной зависимости вязкости  $\eta$  охлаждаемой жидкости при темп-рах  $T$  выше точки замерзания  $T_0$ , к-рая описывается эмпирич. законом Вугеля — Фулчера:  $\eta \sim \exp[\epsilon_0/k(T - T_0)]$ . Существование конечной темп-ры замерзания  $T_0$  указывает на кооперативный характер релаксации в стёклах, в отличие от обычных актив. процессов, подчиняющихся закону Аррениуса:  $\eta \sim \exp(\epsilon/kT)$ .

*Спиновые стёкла* представляют собой неупорядоч. твёрдые растворы магн. атомов в немагнитных со случайным (зависящим от конкретной реализации раствора) знаком перем. взаимодействием между магн. моментами. Образование к.-л. регулярной структуры в такой системе невозможно. Тем не менее при понижении темп-ры  $T$  из-за взаимодействия между спинами процессы спиновой релаксации замедляются, причём для макс. времени релаксации хорошо выполняется закон Вугеля — Фулчера, и при  $T < T_0$  возникают ненулевые ср. магн. моменты на отд. атомах (средний по системе момент при этом отсутствует). Наиб. характерной чер-