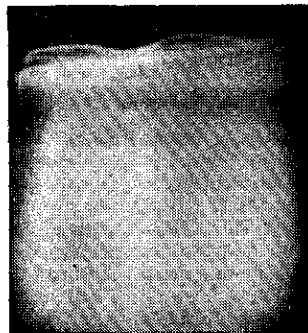


при работе ядерных реакторов; для очистки газообразных отходов ядерной энергии от  $^{85}\text{Kr}$  и т. п. примесей используют сорбцию на активиров. угле и др. методы.

С. С. Бердоносов.

**КРИСТАЛЛИЗАЦИОННЫЕ ВОЛНЫ** — слабо затухающие колебания границы раздела квантовый кристалл — сверхтекучая квантовая жидкость, обусловленные периодич. плавлением и кристаллизацией. К. в., распространяющиеся вдоль границы раздела, экспериментально наблюдались в  $^4\text{He}$ . Механизм возникновения К. в. состоит в следующем: в равновесии квантовый кристалл имеет определ. форму, обеспечивающую минимум свободной энергии его поверхности; любое отклонение формы кристалла от равновесной приводит к увеличению поверхностной энергии. Поэтому любая неравновесная форма кристалла будет изменяться за счёт кристаллизации или плавления так, чтобы поверхностная энергия уменьшалась. С др. стороны, вследствие разности плотностей двух фаз рост и плавление кристалла вызывают движение жидкости, т. е. увеличение кинетич. энергии системы. В результате поверхность будет испытывать слабо затухающие колебания, во многом сходные с обычными капиллярными волнами на границе раздела жидкости и газа (см. *Капиллярные явления*). В частности, К. в. характеризуются таким же, как и капиллярные волны, законом дисперсии:  $\omega \sim k^{3/2}$  ( $\omega$  — частота колебаний,  $k$  — волновой вектор). Отличие состоит в том, что в случае К. в. движению границы целиком обусловлено периодич. плавлением и кристаллизацией, а в объёме кристалл остаётся неподвижным и недеформированным. Это свойство позволяет также отличить К. в. от упругих поверхностных волн.

Для существования К. в. необходимо, чтобы полная диссипация энергии, сопровождающая кристаллизацию и плавление, была достаточно мала. В обычных классич. кристаллах это условие не выполняется, и процесс установления равновесной формы носит аperiodич. характер. В случае границы сверхтекучая квантовая жидкость — квантовый кристалл (поверхность кристалла  $^4\text{He}$ ) возникновение К. в. оказывается возможным, если темп-ра  $T$  достаточно низка (гораздо ниже  $\lambda$ -точки) и если поверхность кристалла находится в особом квантово-шероховатом состоянии, являющемся квантовым аналогом классич. атомно-шероховатого состояния (см. *Кристаллизация*).



Квантово-шероховатое состояние (как и классическое) характеризуется большим кол-вом термодинамически равновесных дефектов поверхности (ступеней и изломов на ступенях). Основное отличие состоит в том, что в квантовом случае изломы на ступенях ведут себя

Кристаллизационная волна на поверхности кристалла  $^4\text{He}$  при  $T=0,5\text{K}$ , возникшая в результате удара по наружной стенке кристалла.

как квазичастицы (см. *Дефектон*), т. е. их движение, а следовательно и движение самих ступеней, практически не сопровождается диссипацией энергии. Поэтому рост и плавление кристалла с квантово-шероховатой поверхностью, обусловленные, как и в классическом случае, именно движением изломов и ступеней, могут происходить практически бездиссипативно.

Бездиссипативность означает, что кристалл может расти и плавиться с весьма большими скоростями уже при ничтожных внеш. воздействиях. Так, кристаллы  $^4\text{He}$  размером  $\sim 1$  см с квантово-шероховатой поверхностью при  $T < 1$  К принимают равновесную форму в поле тяжести за времена  $\ll 1$  с. При этом поверхность

кристалла имеет вид выпуклого мениска, сходного с мениском, к-рый образует поверхность жидкости, плохо смачивающей стенки сосуда. К. в. на такой поверхности (как и обычные капиллярные волны) могут быть возбуждены либо с помощью переменного электрического поля, либо при механич. вибрациях прибора (рис.).

Поверхность кристалла  $^4\text{He}$  при низких темп-рах в зависимости от её ориентации относительно осей кристалла может находиться либо в квантово-шероховатом, либо в классич. атомно-гладком состоянии. Атомно-гладкая поверхность не обладает свойством бездиссипативной кристаллизации; соответственно К. в. на таких поверхностях не могут существовать. Согласно теории, К. в. могут существовать, кроме  $^4\text{He}$ , также и в  $^3\text{He}$ , однако лишь при  $T \ll 1$  мК, при к-рых жидкий  $^3\text{He}$  становится сверхтекучим, а твёрдый  $^3\text{He}$  — антиферромагнитным.

К. в. — одно из проявлений квантовых законов на макроскопич. уровне — для конденсиров. тела как целого.

Лит.: Андреев А. Ф., Паршин А. Я., О равновесной форме и колебаниях поверхности квантовых кристаллов, «ЖЭТФ», 1978, т. 75, с. 1511; Кешисhev К. О., Паршин А. Я., Бабкин А. В., Кристаллизационные волны в  $\text{He}^4$ , «ЖЭТФ», 1981, т. 80, с. 716; Паршин А. Я., Кристаллизационные волны в  $\text{He}^4$ , «УФН», 1981, т. 135, с. 175; его же, Когерентная кристаллизация и кристаллизационные волны, «Природа», 1982, № 5, с. 28; Keshishev K. O., Parshin A. Ya., Shal'nikov A. I., Surface phenomena in quantum crystals, Soviet Scientific Reviews. Section A: Physics Reviews, v. 4, ed. by I. M. Khalatnikov, Amst., 1982; Андреев А. Ф., Квантовые кристаллы — новое состояние вещества, в сб.: Академик И. М. Лифшиц, М., 1987.

А. Я. Паршин.

**КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ** — образование кристаллов из газа, раствора, расплава, стекла или кристалла др. структуры (полиморфные превращения). К. состоит в укладке атомов, молекул или ионов в кристаллическую решётку. К. определяет образование минералов, льда, играет важную роль в атм. явлениях, в живых организмах (образование зубной эмали, костей, почечных камней). Путём К. получают и массивные монокристаллы, и тонкие кристаллич. плёнки полупроводников, диэлектриков и металлов. Массовая К. — одноврем. рост множества мелких кристаллов — лежит в основе металлургии и широко используется в хим., пищевой и медицинской промышленности.

**Термодинамика кристаллизации.** Расположение частиц в кристалле упорядочено (см. *Дальний и ближний порядок*), и их энтропия  $S_K$  меньше энтропии  $S_C$  в неупорядоченной среде (паре, растворе, расплаве). Поэтому снижение темп-ры  $T$  при пост. давлении  $p$  ведёт к тому, что химический потенциал вещества в кристалле

$$\mu_K = \epsilon_K - TS_K + p\omega_K \quad (1)$$

становится меньше его потенциала в исходной среде:

$$\mu_C = \epsilon_C - TS_C + p\omega_C.$$

Здесь  $\epsilon_K$ ,  $\epsilon_C$ ,  $\omega_K$ ,  $\omega_C$  — энергии взаимодействия частиц и уд. объём вещества в кристаллич. и неупорядоченном состояниях (фазах),  $S_K$  и  $S_C$  — энтропии. Т. о., кристаллич. фаза оказывается «выгоднее», происходит К., сопровождаемая выделением т. н. скрытой теплоты К.:  $\Delta H = T(S_C - S_K) \approx 0,5 - 5$  эВ, а также скачком уд. объёма  $\Delta\omega = \omega_C - \omega_K$  (фазовый переход первого рода). Если  $p \ll 10^4$  атм, то член  $p\Delta\omega$  в соотношении (1) мал, и при  $\mu_K = \mu_C$  теплота К. равна  $\Delta H = \epsilon_C - \epsilon_K$ , т. е. является мерой изменения энергии связи между частицами при К. [при К. из расплава  $\Delta\omega \approx (0,05 - 0,15)\omega_C$  и может иметь разл. знаки].

К. при полиморфных превращениях (см. *Полиморфизм*) может быть фазовым переходом второго рода. В случае переходов первого рода граница раздела кристалл — среда локализована в пределах неск. межатомных расстояний, и её уд. свободная энергия  $\alpha > 0$ .