

порядка $\psi(r) = |\psi|e^{i\phi}$, по фазе ϕ . Здесь $|\psi|^2 = \rho_s$ — плотность сверхтекучего компонента. Скорость сверхтекучего движения $v_s = (\hbar/2\pi m_4)\nabla\phi$, и циркуляция v_s по замкнутому контуру пропорц. изменению фазы, равному $2\pi n$. В случае прямолинейного вихря $v_s = \kappa/2\pi r$, где r — расстояние от оси вихря. При $r \rightarrow 0$ плотность кинетич. энергии сверхтекучего движения $\rho_s v_s^2/2$ остаётся конечной благодаря разрушению сверхтекучего состояния на оси вихря (где $\rho_s = 0$).

Квантование циркуляции — фундам. свойство He—II. Оно запрещает как непрерывное уменьшение интенсивности вихрей под действием вязкости, так и рождение вихрей с произвольной величиной циркуляции, что обесценивает незатушающий характер сверхтекучего движения. Существование конечной критич. скорости v_c течения сверхтекучего He—II по тонким трубкам обусловлено рождением К. в. при достижении потоком скорости $v_c = (\kappa/2\pi R) \ln(R/a)$ (a — толщина ядра вихря, R — радиус капилляра). Движением К. в. обусловлено также трение между сверхтекучим и нормальным компонентами и квантование разности давлений в сосудах, сообщающихся через достаточно узкое отверстие (механ. аналог Джозефсона эффекта).

Из квантования циркуляции скорости при обходе оси вихря следует, что К. в. не могут оканчиваться внутри жидкости, они либо пронизывают весь сосуд, либо образуют замкнутые вихревые кольца. Динамика вихревых колец изучалась в экспериментах с ионами, инжектируемыми в He—II. Прямолинейные вихри наблюдаются в экспериментах с He—II во вращающихся сосудах.

Условие потенциальности сверхтекучего течения ($\text{rot } v_s = 0$) запрещает твердотельное вращение сверхтекучего компонента в сосуде, вращающемся с угл. скоростью Ω , поскольку в этом случае $v_s = [\Omega r]$ и $\text{rot } v_s = 2\Omega$ (не равен нулю). Вращат. движение передаётся сверхтекучему компоненту посредством вращающейся вместе с сосудом двумерной периодич. решётки вихревых нитей, оси к-рых параллельны вектору угл. скорости вращения сосуда. Такая вихревая решётка подобна решётке квантованных вихрей в сверхпроводниках 2-го рода в магн. поле (А. А. Абрикосов, 1957). Распределение скорости в решётке вихрей в среднем имитирует твердотельное вращение сверхтекучего компонента так, что число вихрей N , пронизывающих площадь поперечного сечения сосуда S , каждый из к-рых несёт один квант циркуляции, находится из условия $\kappa N = 2\Omega S$, что даёт $N/S = 2000$ вихрей/см² при $\Omega = 1$ рад/с. Вихревые решётки — общее явление для всех вращающихся сверхтекучих жидкостей: He—II, сверхтекучих А- и В-фаз ³He, вращающихся нейтронных звёзд-пульсаров.

К. в. в сверхтекучей А-фазе ³He — частный вид линейных особенностей поля параметра порядка этой фазы. Существование линейных особенностей — следствие вырождения состояний А-фазы, характеризуемых параметром порядка $A_{\alpha i}(r) = \Delta(T)d_{\alpha}(r)\Delta_i(r)$ по ориентации векторов d и Δ . Единичный спиновый вектор d определяет направление оси квантования спинов куперовских пар (спин пары $S=1$), равновероятно распределённых в плоскости, перпендикулярной d . $\Delta = \Delta' + i\Delta''$ — комплексный вектор, Δ' и Δ'' — единичные ортогональные векторы, определяющие направление $l = [\Delta' \Delta'']$ — орбитального момента куперовских пар (момент пары $L=1$), $\Delta(T)$ — множитель, зависящий от темп-ры.

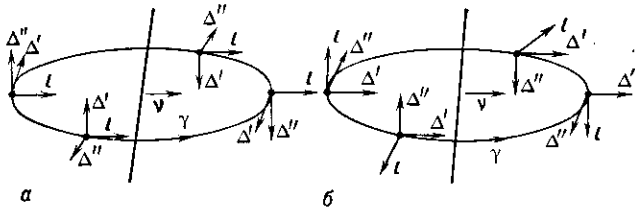
Движение центров масс куперовских пар в А-фазе ³He неотделимо от внутр. вращат. движения атомов в куперовских парах. Поэтому сверхтекучее движение в А-фазе непотенциально:

$$v_s = (\hbar/2m_3) \Delta'_i \nabla \Delta'_i,$$

$$(\text{rot } v_s)_i = \frac{\hbar}{4m_3} \epsilon_{ijk} l \frac{\partial l}{\partial x_j} \mathbf{X} \frac{\partial l}{\partial x_k}.$$

[Н. Д. Мермин, Т.-Л. Хо (N. D. Mermin, T.-L. Ho), 1976.] Циркуляция сверхтекучей скорости v_s в А-фазе ³He не квантуется. Тем не менее в А-фазе существуют устойчивые особые линии, на к-рых разрушена сверхтекучесть.

Топологич. анализ особых линий (Г. Е. Воловик, В. П. Минеев, 1976) позволил разбить их на классы, включающие линии, преобразующиеся (в каждом классе) друг в друга непрерывным преобразованием поля параметра порядка. Линии, принадлежащие разл. классам, нельзя перевести друг в друга (или в линии без особенности на оси) непрерывной деформацией поля параметра порядка. Типичны три класса устойчивых особых линий в А-фазе ³He. 1-й класс — линии, при обходе к-рых по замкнутому контуру γ тройка векторов Δ' , Δ'' , l совершает поворот на угол 2π вокруг фиксированного направления, произвольно ориентированного в пространстве. Все особые линии L из этого класса эквивалентны, т. е. преобразуются друг в друга непрерывной деформацией векторного поля (Δ' , Δ'' , l). В част-



ности, если ось поворота v совпадает с l (рис. а), то особая линия представляет собой вихрь с одним квантом циркуляции $\oint v_s dr = \hbar/2m_3 = 0,662 \cdot 10^{-3}$ см²/с. Если v совпадает с Δ' (рис. б), то особая линия представляет дисклинацию целой силы в поле векторов Δ'' и l . Циркуляция v_s вокруг такой особой линии равна нулю. Слияние двух особых линий из этого класса приводит к неособой конфигурации поля параметра порядка, т. е. к восстановлению сверхтекучести на линии особенности. В частности, слияние двух особых вихрей с одним квантом циркуляции приводит к образованию вихревого течения с непрерывным распределением завихренности. Во вращающейся А-фазе ³He методами ЯМР обнаружены непрерывные вихри с двумя квантами циркуляции по границе элементарной ячейки вихревой решётки. 2-й и 3-й классы — всевозможные особые линии L , при обходе к-рых по замкнутому контуру вектор d меняется на $-d$, а Δ на $\Delta e^{\pm i\pi} = -\Delta$. Особые линии этих классов представляют сочетания вихрей с $\pm 1/2$ (половиной) кванта циркуляции сверхтекучей скорости и дисклинации полужелой силы в поле вектора d . Отдельное существование такого рода особенностей в полях d и Δ невозможно. Слияние двух особых линий из класса 2-го (или из класса 3-го) приводит к особым линиям из класса 1-го. Слияние особых линий из класса 2-го и из класса 3-го приводит к неособой конфигурации поля параметра порядка.

В А-фазе ³He возможно также существование объектов, подобных монополям, — вихрей с двумя квантами циркуляции, оканчивающихся в объёме с жидкостью в точке с точечной топологич. особенностью — «ежом» в поле вектора l . Когда такой вихрь стягивается в точку на поверхности сосуда, он образует точечную поверхностную особенность в поле параметра порядка — буждун (см. Гелий жидкий). Всякие дополнит. взаимодействия — спин-орбитальное, магн. поле и т. д. — изменяют структуру параметра порядка сверхтекучей А-фазы ³He и приводят к др. классификации особых линий и точек, а также к существованию топологически устойчивых неоднородных конфигураций параметра порядка — доменных стенок, солитонов и пр.

К. в. в В-фазе ³He подобны К. в. в He—II.