

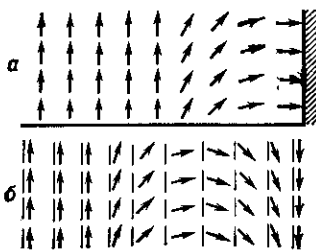
обладают пространственной (т. н. орбитальной) и магнитной анизотропией, т. е. являются одновременно жидкими кристаллами и упорядоченными магнетиками. Последнее позволяет применять для исследования сверхтекучих фаз методы ЯМР (магн. момент атомов ^3He сосредоточен в ядрах). Динамика ядерных магн. моментов сверхтекучих фаз и частоты продольного и поперечного ЯМР определяются ур-ниями Лэггетта (А. Leggett, 1974).

Структура куперовских пар в фазах А, В и А₁ разная, поэтому сверхтекучие, магн. и жидкокристаллич. свойства этих фаз различны.

А-фаза ^3He обладает осью магн. анизотропии и осью орбитальной жидкокристаллич. анизотропии, характеризуемыми единичными векторами d и l . Векторы d и l являются осями квантования соответственно спинового и орбитального моментов импульса куперовских пар. Проекция спина пары S на ось d равна нулю, т. е. спины пар равновероятно ориентированы в плоскости, перпендикулярной к d , так что ср. ядерный магн. момент у пары отсутствует и А-фаза является жидким одноосным антиферромагнетиком. Магн. восприимчивость А-фазы совпадает с магн. восприимчивостью нормального ^3He . Проекция орбитального момента пары L на ось l равна 1, т. е. орбитальные моменты всех пар направлены по l . Куперовские пары частично вовлекают во вращат. движение электроны атомов, в результате А-фаза обладает небольшим электронным ферромагн. моментом ($\sim 10^{-11}$ магнетонов Бора на атом), направленным вдоль l , и является жидким ферромагнетиком.

Направления осей d и l произвольны, т. е. состояния А-фазы вырождены по энергии относительно поворотов этих осей. Вырождение снимается внеш. магн. полем, ориентирующим d перпендикулярно полю; граничными условиями, ориентирующими l по нормали к границе; сверхтекучим потоком, ориентирующим l вдоль потока; слабым спин-орбитальным взаимодействием, ориентирующим l и d параллельно друг другу. Если ориентирующие взаимодействия конкурируют

Рис. 5. Текстуры в А-фазе ^3He : а — текстура вблизи границы сосуда (магнитное поле перпендикулярно границе), б — топологически устойчивая текстура — солитон; линии со стрелками — l -вектор, линии без стрелок — d -вектор.



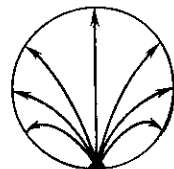
между собой, возникают текстуры: неоднородные в пространстве распределения полей $l(r)$ и $d(r)$ [на рис. 5, а изображена текстура $l(r)$, возникающая в магн. поле, перпендикулярном границе; поле l изображено стрелками]. Плавное изменение поля l в текстуре обесценивается макроскопич. когерентностью, стремящейся сделать распределение однородным и приводящей к росту энергии при деформации поля. Текстуры могут существовать и в том случае, если они энергетически невыгодны, но не могут непрерывно исчезать в силу топологич. причин. На рис. 5, б изображена одна из таких текстур — топологический солитон, обнаруженный в А-фазе в экспериментах с ЯМР. В этой текстуре области параллельной и антипараллельной ориентаций векторов l и d , соответствующих минимуму энергии спин-орбитального взаимодействия, разделены областью неоднородного распределения l и d (областью солитона), где ориентация l относительно d меняется на противоположную. Солитон приводит к дополнит. резонансному пику поглощения в ЯМР, возникающему из-за возбуждения локализованных на солитоне спиновых волн. Классификация всех возможных топологически устойчивых

структур в сверхтекучих фазах А, В и А₁ и др. упорядоченных средах осуществляется методами гомотопич. топологии.

Текстуры вектора l существенно влияют на сверхтекучие свойства А-фазы. Если поле l однородно, сверхтекучесть А-фазы описывается обобщенной двухжидкостной моделью Ландау, учитывающей орбитальную анизотропию. Сверхтекучие свойства оказываются анизотропными: плотность сверхтекучего компонента является одноосным тензором $\rho_s^{ik} = \rho_s \delta^{ik} - \rho_0 l^i l^k$ ($\rho_0 = \rho_s/2$ при $T \rightarrow T_c$ и $\rho_0 \rightarrow 0$ при $T \rightarrow 0$); скорость четвертого звука и затухание первого звука зависят от направления их распространения. Последнее позволяет исследовать текстуры вектора l по данным о затухании ультразвука в А-фаза в зависимости от направления его распространения.

В присутствии текстур сверхтекучие свойства А-фазы резко меняются: сверхтекучее течение перестаёт быть потенциальным, циркуляция сверхтекучей скорости по замкнутому контуру ($\oint v_s dr$) в текстуре не квантуется и зависит от выбора контура интегрирования [Н. Д. Мермин (N. D. Mermin), Т. Л. Хо (T. L. Ho), 1977]. Это приводит, во-первых, к существованию вихрей с непрерывно распределённой завихрённостью ($\text{rot } v_s$), к-рые тем не менее отличаются от вихрей в нормальной жидкости своей топологич. устойчивостью. Эти вихри были обнаружены методом ЯМР во вращающемся сосуде до дополнит. пика поглощения. Во-вторых, в отличие от He II, макроскопич. поток сверхтекучего компонента при течении по каналу (трубке) может непрерывно изменяться (диссипировать за счёт трения и перехода кинетич. энергии в теплоту), вызывая пространственно-временные осцилляции поля l (их наблюдали в экспериментах с распространением ультразвука). Этот периодич. процесс является аналогом нестационарного Джозефсона эффекта в сверхпроводниках. На поверхности канала, где вектор l фиксирован, пристеночный слой сверхтекучего компонента может испытывать торможение за счёт рождения поверхностных квантованных вихрей — буджумов (стянутых в точку вихрей), обладающих

Рис. 6. Текстура вектора l в сферическом сосуде с гелием (случай незатухающего сверхтекучего движения). Точечная особенность в векторном поле l на поверхности сосуда — буджум с $N=2$.



чётным числом N квантов $K = h/m$ циркуляции сверхтекучей скорости по контуру, лежащему в плоскости стенки, где $m = 2m_3$ — масса бозона (двух атомов ^3He). В-третьих, в сосудах определ. формы, напр. в сферических, всегда, даже в осн. состоянии, имеется циркуляционное сверхтекучее движение, вызываемое образующейся в этом сосуде текстурой (рис. 6). Это движение обладает моментом импульса и может быть обнаружено по гироскопич. эффекту.

Уникальность сверхтекучих свойств А-фазы — следствие специфики спонтанного нарушения симметрии. Состояния А-фазы не инвариантны относительно калибровочного преобразования, а также относительно пространственных и спиновых вращений, однако инвариантны относительно определ. комбинации этих преобразований: калибровочное преобразование + поворот вокруг оси l . В результате сверхтекучие свойства, являющиеся следствием нарушения калибровочной симметрии, оказываются связанными с жидкокристаллич. свойствами, возникающими из-за нарушения симметрии относительно пространственных поворотов. Комбинированная инвариантность приводит также к возможности существования в А-фаза вихрей с полуцелым числом квантов циркуляции. В В-фаза