

Г. Е. Воловик. Структура вихрей во вращающемся сверхтекучем ^3He . Сверхтекучие фазы ^3He — это жидкости, в которых нарушены все известные в физике конденсированных сред симметрии. В дополнение к нарушенной калибровочной инвариантности, ответственной за явление сверхтекучести, нарушена инвариантность относительно пространственных вращений и вращений спиновой подсистемы, в результате чего сверхтекучие фазы ^3He являются одновременно жидкими кристаллами и жидкими упорядоченными магнетиками. Причем сверхтекучие, жидкокристаллические и магнитные свойства этих жидкостей тесно переплетаются между собой из-за наличия в сверхтекучих фазах комбинированных симметрий, что приводит к весьма экзотическим свойствам квантованных вихрей, возникающих при вращении сосуда.

A-фаза ^3He обладает двумя комбинированными симметриями: непрерывной и дискретной. Непрерывная симметрия (калибровочное преобразование, скомбинированное с пространственным вращением вокруг жидкокристаллической оси анизотропии \mathbf{l} , не меняет состояние A-фазы) связывает жидкокристаллические и сверхтекучие свойства A-фазы таким образом, что текстура вектора \mathbf{l} является источником непрерывного вихревого движения сверхтекучей компоненты. Иначе говоря, сверхтекучее течение A-фазы в жидкокристаллической текстуре не является потенциальным. В результате в A-фазе возможны квантованные вихри, у которых сверхтекучее состояние A-фазы нигде не нарушено, в отличие от квантованных вихрей в сверхтекучем ^4He и в сверхпроводниках, где сверхтекучесть (сверхпроводимость) нарушена на оси вихрей. Эти объекты, представляющие собой гибрид жидкокристаллической текстуры и квантованного вихря с двумя квантами циркуляции, наблюдаются в ЯМР экспериментах.

Еще один экзотический тип вихрей возможен в A-фазе как следствие дискретной комбинированной инвариантности (калибровочное преобразование + вращение спиновой подсистемы). Это гибрид дисклинации в поле вектора магнитной анизотропии \mathbf{d} с полупелым индексом Франка и вихря, который обладает полупелым числом квантов циркуляции. Отдельно каждый из объектов, составляющих гибрид, существовать не может: конфаинмент обеспечивается топологическими ограничениями. Дисклинация в поле \mathbf{d} представляет собой довольно нетривиальный неоднородный вакуум для элементарных возбудений в A-фазе (фермионные квазичастицы и бозонные коллективные моды), напоминающий линейные топологические объекты в теории великого объединения, при обходе вокруг которых элементарные частицы меняют свой заряд или четность. Такие вихри можно будет наблюдать при вращении A-фазы, заключенной между параллельными пластинами.

Свойства вихрей в B-фазе определяются непрерывной комбинированной симметрией, которая следующим образом связывает жидкокристаллические и магнитные свойства. В невозмущенном состоянии B-фаза изотропна, однако под действием любого внешнего возмущения, нарушающего изотропность, появляются сразу две разных оси анизотропии — жидкокристаллическая и магнитная, — взаимная ориентация которых задается параметром порядка — ортогональной матрицей R_{ik} . Так в результате образования системы квантованных вихрей во вращающемся сосуде, которые создают пространственную одноосную анизотропию вдоль оси вращения Ω , у жидкости одновременно возникает и ось магнитной анизотропии, направленная по вектору $R_{ik}\Omega_k$. Именно это сделало возможным обнаружение вихрей

в В-фазе с помощью ЯМР спектроскопии. Аналогичным образом матрица R_{ik} зацепляет в возмущенной В-фазе орбитальный и спиновый моменты импульса. В результате вихрь, обладающий моментом количества движения сверхтекучей компоненты вокруг оси вихря, обладает также и магнитным моментом, направленным по вектору $R_{ik}\Omega_k$. Несмотря на чрезвычайную малость этого момента (порядка 10^{-11} ядерных магнетонов на один атом жидкости, содержащей равновесное число вихрей при вращении со скоростью 1 рад/с) он обнаружен в ЯМР экспериментах благодаря гиромагнитному эффекту.

Понятие комбинированной симметрии существенно и при описании структуры кора вихрей. Так у непрерывного вихря в А-фазе в области так называемого мягкого кора, в котором сосредоточена жидкокристаллическая текстура, нарушена пространственная четность P . Однако определенная комбинированная четность может сохраняться: это либо PTU_2 , либо TU_2 , где T — временная четность, а U_2 — операция переворота вихревой линии. Вихрь, у которого сохраняется комбинированная четность PTU_2 (так называемый v -вихрь), обладает спонтанным электрическим дипольным моментом, направленным вдоль оси вихря. У w -вихря с комбинированной симметрией TU_2 имеется спонтанный сверхтекучий ток, текущий вдоль оси.

В В-фазе вычисления показывают, что вихрь при низких давлениях находится в v -состоянии. Экспериментально при повышении давления во вращающейся В-фазе наблюдается фазовый переход I рода, связанный с перестройкой кора вихрей. В какое состояние при этом переходит вихрь, пока не ясно. В коре v -вихря в В-фазе сверхтекучесть не нарушается: кор состоит из А-фазы и еще одной сверхтекучей фазы с ферромагнитно упорядоченными спинами куперовских пар. Это так называемая β -фаза в свободной геометрии является неустойчивой. Именно она ответственна за наблюдаемый магнитный момент вихрей.

Подробнее о вихрях в А- и В-фазе ^3He см. в обзорных статьях, указанных в списке литературы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Krusius M., Hakonen P. J., Simola J. T.— In: Proc. of the 17th Intern. Conference on Low Temperature Physics.— Physica. Ser. B+C, 1984, v. 126, p. 22.
 Volovik G. E.— Ibidem, p. 34.