

О МЕТАСТАБИЛЬНОМ ВИХРЕ В СВЕРХТЕКУЧЕМ $^3\text{He-B}$

Г.Е.Воловик, М.М.Саломаа

Получено новое вихревое решение уравнений Гинзбурга – Ландау, описывающее одно-квантовый вихрь с осью симметрии четвертого порядка. Этот вихрь может объяснить наблюдаемое в гистерезисных процессах необычное метастабильное состояние. Обсуждаются физические свойства вихря.

ЯМР эксперименты на вращающемся $^3\text{He-B}$ выявили существование по крайней мере двух стабильных вихрей с одним квантом циркуляции сверхтекучей скорости, различающихся структурой вихря $^1, 2$. Численный анализ функционала Гинзбурга – Ландау вблизи T_c также показал существование двух стабильных вихрей: аксиально симметричный $^3, 4$ (магнитный класс $C_{\infty v}(C_{\infty})$) и аксиально несимметричный $^5, 4, 6$ (магнитный класс $C_{2v}(C_2)$).
 v – вихри, оба с нарушенной четностью в вихре.

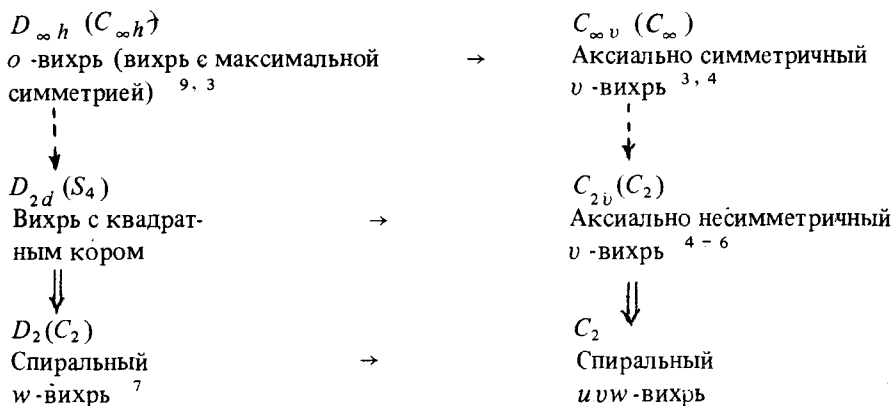
Эти два вихря могут соответствовать экспериментально наблюдаемым: аксиально несимметричный v - вихрь – вихрю при низких давлениях, аксиально симметричный – при высоких. Однако для подобного отождествления еще нужно, во-первых, экспериментально дока-

зять, что линия наблюдаемого фазового перехода первого рода между вихрями выходит на линию T_c . Во-вторых, может оказаться, что вдали от T_c есть фазовые переходы второго рода, пока не наблюдаемые из-за непрерывности измеряемых физических величин, при которых симметрия теоретически найденных вблизи T_c вихрей изменяется. Поэтому прямым доказательством явилось бы наблюдение физических следствий нарушения различных симметрий в коре (см. подробнее в ⁷).

Более того необычное поведение гистерезисной петли (см. рис. 5 в ⁸) указывает на возможность существования еще одного вихря — метастабильного. Чтобы выяснить, какому симметричному классу мог бы соответствовать этот гипотетический 3-ий вихрь, мы искали возможные метастабильные состояния вблизи T_c . Для этого мы проводили минимизацию функционала Гинзбурга — Ландау в классах функций различной симметрии, используя то обстоятельство, что в силу симметрии полученный минимум всегда будет являться решением уравнений как Гинзбурга — Ландау, так и уравнений Горькова, хотя и не обязательно будет соответствовать абсолютному или даже локальному минимуму на множестве всех функций.

Мы нашли, что наряду с максимально симметричным o -вихрем ^{9, 3} (магнитный класс $D_{\infty h}(C_{\infty h})$), который по-видимому всегда неустойчив, имеется по крайней мере еще одно, четвертое, решение, принадлежащее классу $D_{2d}(S_4)$. Новый вихрь энергетически выгоднее, чем o -вихрь, устойчив по отношению к переходу в аксиально симметричный v -вихрь и неустойчив по отношению к переходу в аксиально несимметричный v -вихрь. Субординационная схема подчинения различных симметричных классов вихрей указана в таблице. Разными стрелками отмечены разные типы нарушения симметрии при переходе от одной структуры кора к другой.

Схема нарушения симметрии в квантованных вихрях в ³He-B



Различными стрелками показаны типы нарушения симметрии:

→ Нарушение дискретной симметрии, при котором в коре вихря появляется спонтанная электрическая поляризация вдоль оси вихря и спонтанный поток спина.

-- → Нарушение аксиальной симметрии.

⇒ Полное нарушение пространственной четности, приводящее к появлению холестерической спирали в коре вихря и спонтанного потока массы вдоль оси.

Верхние 4 вихря получены как решения уравнений Гинзбурга — Ландау вблизи T_c , существование двух последних в области Гинзбурга — Ландау еще не проверено.

Новый вихрь имеет следующую структуру параметра порядка, соответствующую классу $D_{2d}(S_4)$. Из параметров $C_{\mu\nu}(r)$ в разложении амплитуд $a_{\mu\nu}$ куперовского спаривания с проекцией спина $\mu = 0, +1, -1$ и проекцией орбитального момента $\nu = 0, +1, -1$ по гармонии-

$$a_{\mu\nu}(r, \varphi) = \exp [i(1 - \mu - \nu)\varphi] \sum_Q C_{\mu\nu}(r, Q) e^{iQ\varphi}$$

(r – расстояние до оси вихря, φ – азимутальный угол) отличны от нуля и действительны следующие: $C_{\mu\nu}(Q = 4k)$ с $\mu + \nu$ четным и $C_{\mu\nu}(Q = 4k + 2)$ с $\mu + \nu$ нечетным (k – целое). При вычислении мы оставляли только три гармоники, $Q = 0, +2, -2$ (см. рис. 1), что не меняет симметрии, топологии, а следовательно и выводов.

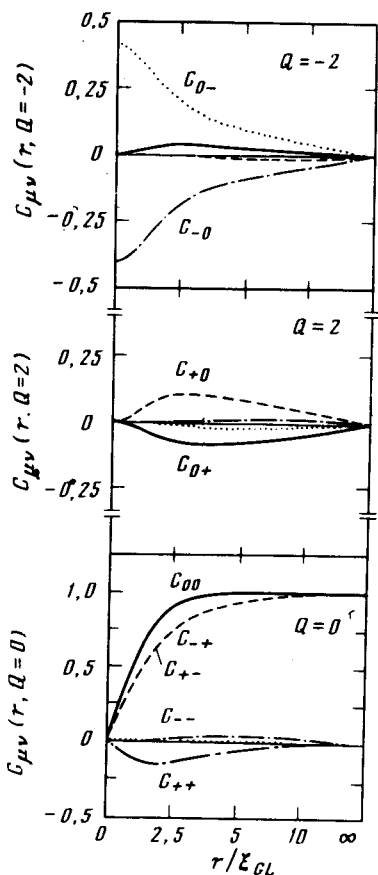


Рис. 1. Зависимость от расстояния r до оси вихря амплитуд $C_{\mu\nu}$ куперовского спаривания в новом (метастабильном) вихре с симметрией $D_{2d}(S_4)$. Отличны от нуля амплитуды с четным $\mu + \nu$ для нулевой гармоники ($Q = 0$) и с нечетным $\mu + \nu$ для вторых гармоник ($Q = +2, -2$). Вихрь может соответствовать как седловой точке функционала энергии, так и локальному минимуму

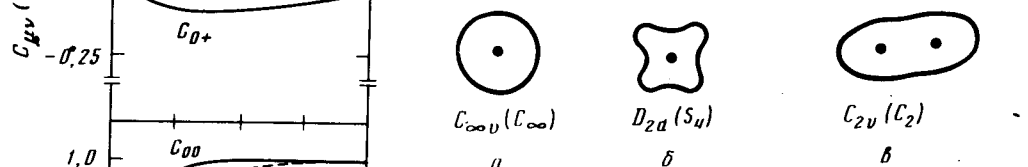


Рис. 2. Форма поперечного сечения ядра различных вихрей. Внутри ядра появляются буджумы "а ферми-поверхности (нули щели в спектре возбуждений, см. ⁶), в точках 1-векторы буджумов параллельны оси вихря. а – v -вихрь с "круглым" ядром; б – новый вихрь с "квадратным" ядром; в – v -вихрь с "двойным" ядром (пара полуквантовых вихрей)

Элементы симметрии этого вихря образуются из комбинированных симметрий PC_4 и TU_2 . Величина $\sum_{\mu\nu} a_{\mu\nu} a_{\mu\nu}^*$ имеет ось симметрии четвертого порядка, т. е. сечение вихря имеет симметрию квадрата (см. рис. 2). Следующие из симметрии свойства вихря, которые можно использовать для отличия его экспериментально от других (стабильных) вихрей: как у o -вихря, отсутствуют спонтанные потоки спина и массы и спонтанная электрическая поляризация, из тензора вихревой магнитной анизотропии ⁵ отлична от нуля только компонента λ_{11} , поскольку вектор анизотропии в плоскости сечения вихря отсутствует. Однако в отличие от o -вихря сверхтекучесть в ядре не нарушается за счет образования буджумов на ферми-поверхности. Топология буджумов на ферми-поверхности такая же, как у аксиально симметричного v -вихря, и тем самым отлична от топологии аксиально несимметричного v -вихря, который представляет собой связанную пару вихрей с полуцелой циркуляцией ⁶. Поэтому вдали от T_c возможно появление топологического барьера, отделяющего вихрь $D_{2d}(S_4)$ от вихря $C_{2\nu}(C_2)$, и тем самым локальной или даже абсолютной устойчивости нового вихря.

В заключение отметим, что еще не исследована устойчивость решений для v -вихрей по отношению к образованию спиральной холестерической текстуры в коре вихря, которая должна возникать у аксиально несимметричных вихрей при полном нарушении четности (см. таблицу). Это требует минимизации функционала Гинзбурга – Ландау во всех трех пространственных измерениях, поскольку линия вихря сама становится спиралью.

Работа выполнена в рамках Советско-Финского проекта РОТА.

Литература

1. Иккала О.Т., Воловик Г.Е., Хаконен П.Ю., Буньков Ю.М., Исландер С.Т., Харадзе Г.А. Письма в ЖЭТФ, 1982, **35**, 338.
2. Hakonen P.J., Krusius M., Salomaa M.M., Simola J.T., Bun'kov Yu. M., Mineev V.P., Volovik G.E. Phys. Rev. Lett., 1983, **51**, 1362.
3. Salomaa M.M., Volovik G.E. Phys. Rev. Lett., 1983, **51**, 2040; Phys. Rev., 1985, **B31**, 203.
4. Thuneberg E.V. Phys. Rev. Lett., 1986, **56**, 359.
5. Воловик Г.Е., Саломая М.М. Письма в ЖЭТФ, 1985, **42**, 421.
6. Salomaa M.M., Volovik G.E. Phys. Rev. Lett., 1986, **56**, 363; Europhys. Lett., 1986, **2**, 781.
7. Salomaa M.M., Volovik G.E. Rev. Mod. Phys., (в печати).
8. Krusius M., Hakonen P.J., Simola J.T. Physica, 1984, **126B**, 22.
9. Ohmi T., Tsuneto T., Fujita T. Progr. Theor. Phys., 1983, **70**, 647.

Институт теоретической физики им. Л.Д.Ландау
Академии наук СССР

Низкотемпературная Лаборатория
Технического Университета
г. Хельсинки

Поступила в редакцию
13 ноября 1986 г.