

ДЕФЕКТЫ НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА А- И В-ФАЗ СВЕРХТЕКУЧЕГО ^3He .

Г.Е.Воловик

Дается классификация топологически устойчивых дефектов структуры на границе раздела А- и В-фаз сверхтекучего ^3He , среди которых вихри с концами и буджумы.

Граница между сверхтекучими фазами А и В жидкого ^3He — двумерный объект, который в настоящий момент экспериментально исследуется. Топологические дефекты, которые могут существовать на поверхности раздела фаз, рассматривались в работе ¹, наиболее интересные из них монополюподобные дефекты, представляющие собой вихревые линии имеющие точку окончания на АВ-границе. Здесь мы дадим классификацию дефектов исходя из конкретной структуры АВ-границы.

Параметр порядка в сверхтекучем ^3He это 3×3 матрица $A_{\alpha i}$. В равновесном состоянии А-фазы $A_{\alpha i}$ выражается через единичные вектора \mathbf{d} , \mathbf{e}_1 и \mathbf{e}_2 : $A_{\alpha i}^A = \Delta_A d_\alpha (e_{1i} + i e_{2i})$, где $\mathbf{e}_1 \cdot \mathbf{e}_2 = 0$, а вектор $\mathbf{l} = [\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2]$ указывает направление орбитального момента куперовских пар. В равновесном состоянии В-фазы $A_{\alpha i}$ выражается через матрицу R трехмерных вращений $A_{\alpha i}^B = \Delta_B e^{i\Phi} R_{\alpha i}$, где Δ_B и Φ амплитуда и фаза параметра порядка В-фазы. Граница раздела, которая связывает эти две фазы, создает взаимные граничные условия, связывающие параметры вырождения А-фазы (\mathbf{d} , \mathbf{e}_1 , \mathbf{e}_2 и \mathbf{l}) с параметрами вырождения В фазы (Φ и R). Эти граничные условия зависят от структуры границы. Различные АВ-границы с различной симметрией рассматривались в ². Вблизи T_c наиболее устойчивая АВ-граница имеет следующие асимптотики параметра порядка по обе стороны границы ^{2, 3}

$$A_{\alpha i}^0(x = -\infty) = \Delta_A \hat{x}_\alpha (\hat{x}_i - i \hat{z}_i), \quad A_{\alpha i}^0(x = +\infty) = \Delta_B \delta_{\alpha i}, \quad (1)$$

где x направлено по нормали к границе. Это только одно из вырожденных состояний границы, остальные получаются операциями симметрии, которые образуют группу

$$G = U(1) \times SO(2)^L \times SO(3)^S, \quad (2)$$

Здесь $SO(3)^S$ группа спиновых вращений, действующая на греческий индекс параметра порядка; $SO(2)^L$ — группа орбитальных вращений вокруг нормали \hat{x} , эти вращения действуют на латинский индекс параметра порядка; $U(1)$ — группа калибровочных преобразований, меняющих фазу параметра порядка. В результате общий вид параметра порядка вдали от АВ-границы имеет вид

$$A_{\alpha i} = e^{i\Phi} R_{\alpha\beta}^S R_{ik}^L A_{\beta k}^0, \quad (3)$$

где R^S матрица трехмерных спиновых вращений, а R^L матрица орбитальных вращений вокруг x . Как видно из (1) и (3), асимптотики фаз не произвольны. Ориентация спинового вектора \mathbf{d} А-фазы связана с ориентацией матрицы R В-фазы, поскольку $\mathbf{d} = R^S \hat{x}$, а $R = R^S (R^L)^{-1}$. Орбитальный вектор \mathbf{l} А-фазы параллелен плоскости границы, поскольку $\mathbf{l} = R^L \hat{y}$, однако направление \mathbf{l} в плоскости границы не фиксируется ориентацией матрицы R в В-фазе, поскольку орбитальное вращение параметра порядка В-фазы может быть скомпенсировано противоположным вращением спинового пространства.

Уравнение (3) не содержит эквивалентных состояний, поскольку каждый элемент из группы G меняет либо состояние А-фазы, либо В-фазы, либо обеих фаз. Это означает, что пространство вырожденных состояний АВ-границы совпадает с пятимерным пространством

группы G , т.е. $R_{AB} = G$. Фундаментальная гомотопическая группа

$$\pi_1(R_{AB}) = Z \times Z \times Z_2, \quad (4)$$

следовательно точечные дефекты AB -границы описываются тремя целыми числами $\mathbf{N} = (N_1, N_2, N_3)$, где N_1 число квантов циркуляции сверхтекучей скорости вдоль контура на AB -границе, охватывающего дефект; N_2 число оборотов вектора \mathbf{l} при обходе вокруг дефекта по AB -границе; N_3 из группы Z_2 , состоящей из двух элементов 0 и 1, описывает сингулярности в поле матрицы R . Теперь нужно выяснить, как дефекты на границе раздела связаны с дефектами в объеме, являются ли они точками окончания сингулярных линий, приходящих из объема или являются изолированными точечными дефектами на AB -границе. Для этого можно воспользоваться методом относительных гомотопических групп, которые применялись для классификации дефектов на поверхности упорядоченной среды⁴. Из этого анализа следует, что дефект с нечетным $N_1 + N_2$ обязательно распространяется вглубь A -фазы, в то время как дефект с четным $N_1 + N_2$ не имеет особенности внутри A -фазы. Дефект с ненулевым N_1 является точкой окончания вихря B -фазы с N_1 квантами циркуляции, а дефект с $N_3 = 1$ — точка окончания дисклинации в B -фазе, в то время как величина N_2 вообще не влияет на поведение параметра порядка в B -фазе. В результате дефекты можно разделить на пять типов.

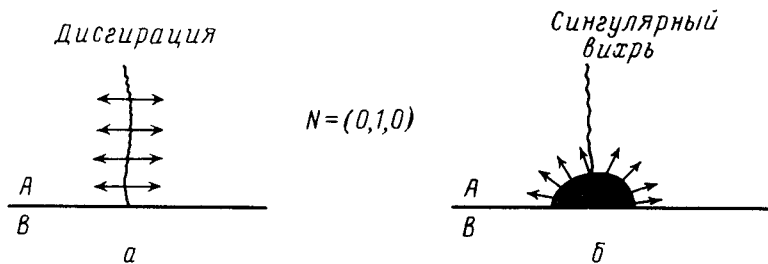


Рис. 1. Дисгирация *а*) в поле вектора \mathbf{l} (указано стрелками) и сингулярный вихрь *б*) в A -фазе, которые оканчиваются на границе раздела A - и B -фаз в точке, где обход вектора \mathbf{l} : $N_2 = 1$. Оба дефекта принадлежат одному и тому же топологическому классу

I. Точки окончания линейных сингулярностей A -фазы без сингулярности в B -фазе. Это дефекты с топологическими зарядами $\mathbf{N} = (0, 2k + 1, 0)$. Элементарный дефект $\mathbf{N} = (0, 1, 0)$ представляет собой дисгирацию в поле вектора \mathbf{l} , оканчивающуюся на AB -границе (рис. 1*а*), либо точку окончания сингулярного вихря (рис. 1*б*) в зависимости от того, какой из линейных дефектов A -фазы имеет меньшую энергию.

II. Точки окончания линейных сингулярностей B -фазы без сингулярности в A -фазе. Здесь существует два подтипа. II*а*. Элементарными представителями этого подтипа являются дефекты с $\mathbf{N} = (\pm 1, \pm 1, 0)$, это точки окончания вихрей B -фазы с $N_1 = \pm 1$ квантами циркуляции. Причем точки окончания являются точечными дефектами в поле вектора \mathbf{l} A -фазы, т.е. буджумами (рис. 2*а*). Буджум характеризуется двумя квантовыми числами. Одно из них число обходов вектора \mathbf{l} по границе, N_2 . Второе это степень отображения полусферы, охватывающей буджум со стороны A -фазы, на сферу вектора \mathbf{l} . Его можно выразить через интеграл по плоскости yz , проходящей в A -фазе параллельно AB -границе: $N = \frac{1}{4\pi} \int dydz \mathbf{l} [\partial_y \mathbf{l}, \partial_z \mathbf{l}]$. Согласно соотношению Мермина—Хо, оно связано с числом квантов циркуляции в вихре, приходящем в эту точку со стороны B -фазы: $N = \frac{1}{2} N_1$. II*б*. Дефекты с $\mathbf{N} = (0, 0, 1)$, это точки окончания дисклинации B -фазы. В отличие от вихрей исчез-

новение дисклинации на границе не требует существования буджумов в A -фазе (рис. 2б). Остальные дефекты типа II являются комбинациями элементарных дефектов (см., например, рис. 2в).

III. Точки пересечения линейных дефектов с AB -границей. Элементарный дефект этого типа это одноквантовый вихрь, пересекающий AB -границу, $N = (1, 0, 0)$ (рис. 3а). Его можно представить в виде комбинации дефектов на рис. 1б и на рис. 2а: $(1, 0, 0) = (0, 1, 0) + (1, -1, 0)$ (дефект на рис. 2а нужно взять с противоположным $N_2 = -1$).

IV. Изолированные точечные дефекты на AB -границе, AB -буджумы. Элементарный дефект этого типа $N = (0, 2, 0)$ (рис. 3б) можно получить, соединя два дефекта на рис. 1б: $(0, 2, 0) = (0, 1, 0) + (0, 1, 0)$. Здесь используется известный факт, что соединение двух сингулярных линий в A -фазе приводит к несингулярному состоянию. Согласно теореме Пуанкаре об индексе касательного к замкнутой поверхности векторного поля (вектор l) такой буджум должен существовать на поверхности капли A -фазы в B -фазе или B -фазы в A -фазе.

Отметим, что данная классификация дефектов определяется конкретной структурой параметра порядка в AB -границе, которая диктует взаимные граничные условия для параметров вырождения A - и B -фаз. Для границ другого вида (см. ^{2, 5}) классификация будет другой.

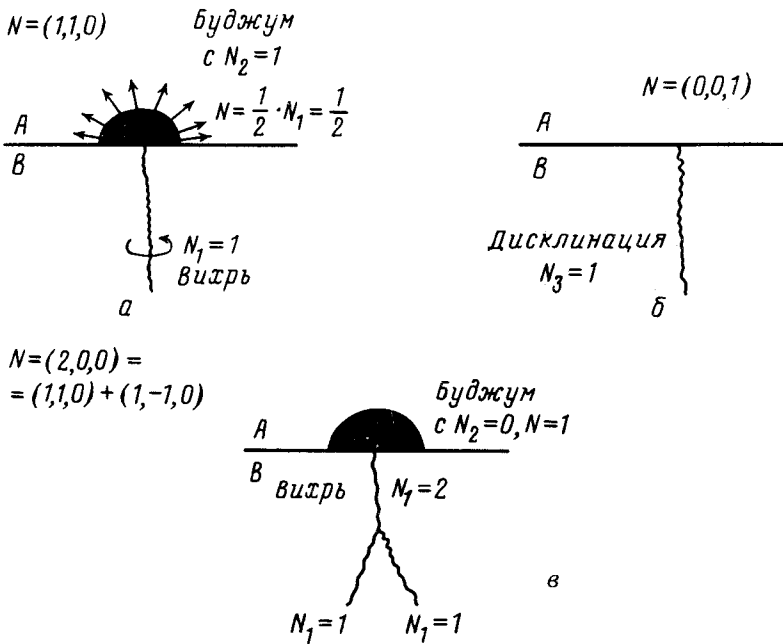


Рис. 2. Квантованные вихри с одним а) и двумя в) квантами циркуляции в B -фазе оканчиваются на буджумах A -фазы. Дисклинация B -фазы оканчивается на AB -границе без образования буджума в A -фазе б)

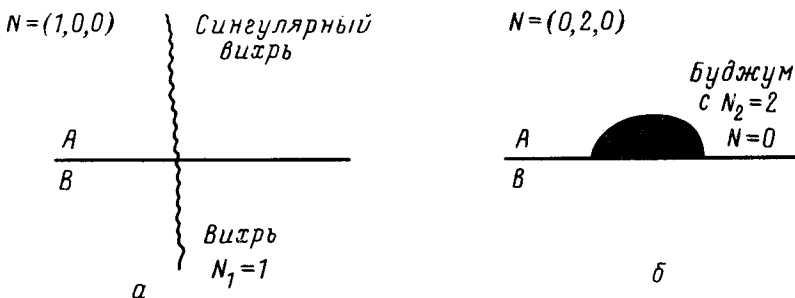


Рис. 3. Квантованный вихрь, пересекающий AB -границу без образования буджумов, а), и изолированный буджум без сингулярностей в объеме б)

Я благодарен М.Крусиусу и В.В. Дмитриеву за многочисленные обсуждения, а также сотрудникам Лаборатории низких температур Технологического университета г. Хельсинки, где эта работа была выполнена.

Литература

1. *Salomaa M.M.* Nature, 1987, **326**, 367.
2. *Salomaa M.M.* J. Phys. C, 1988, **21**, 4425.
3. *Schopohl N.* Phys. Rev. Lett., 1987, **58**, 1664.
4. *Воловик Г.Е.* Письма в ЖЭТФ, 1978, **28**, 65.
5. *Воловик Г.Е.* ЖЭТФ, 1990, **97**, 1198.

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

Поступила в редакцию
12 марта 1990 г.
