

Поляризационный механизм сверхтекучести в гелие-2.

В.В. Чернуха

УДК: 538.941; 538.945

Аннотация.

Для объяснения феномена сверхтекучести в гелие-2 используется подход, основывающийся на поляризационном рождении и куперовском спаривании фермионов физического вакуума, коррелированных с ядрами ${}^4\text{He}$. Этими фермионами являются связанные состояния бесцветных трикварков (кварконов), между которыми преобладают приводящие к спариванию силы притяжения. Исходными данными поляризационной модели сверхтекучести являются плотность, масса и нуклонная структура ядер ${}^4\text{He}$, в которой нуклоны содержат 12-кварковое ядро и трехкварковую оболочку. Найдены удовлетворительно согласующиеся с опытными данными спектр ротонных возбуждений в гелии-2, критическая температура сверхкритического перехода, скорость звука.

Сверхтекучее состояние ${}^4\text{He}$ (гелия-2) было открыто П.Л. Капицей в 1938г. Л.Д. Ландау показал [1], что сверхтекучесть связана с видом экспериментально найденного спектра возбуждений гелия-2, имеющего фононный и ротонный участки, причём у ротонных возбуждений имеется энергетическая щель (рис.1). В дальнейшем В.Л. Гинзбургом и Л.Д. Ландау [2] была разработана макроскопическая теория сверхтекучести с волновой функцией в качестве параметра порядка. Однако на микроуровне количественной теории этой квантовой бозе-жидкости, которая бы через параметры последней (плотность, структуру и массу атомов гелия) описывала спектр возбуждений, температуру λ -точки, до сих пор не существует. Поэтому природу сверхтекучести гелия-2 нельзя считать до конца выясненной.

В поляризационной теории, развитой в [3], исходные представления о мироустройстве являются более общими, чем принятые в существующей физической парадигме. Поэтому поляризационный подход расширяет область применения фундаментальной физики, позволяя исследовать не находящие объяснений природные явления. Одним из них является сверхтекучесть в гелии-2, возникновение которой в данной работе получает объяснение не на атомном, а на фундаментальном – кварковом – уровне. Этот подход, предложенный в [3], дается в новой редакции.

В поляризационной теории основным законом Мироздания является такое изменение физических величин, при котором сохраняется сумма их значений, т.е. реализуются законы их сохранения для действительных и комплексных физических величин [3, 4]. В частности, таким поляризационным процессом является рождение фундаментальных частиц – лептонов, кварков, нуклонов, промежуточных векторных бозонов, а также α – частиц и некоторых ядер с особым нуклонным составом. Феномен сверхтекучести в гелии-2 обусловлен поляризационным рождением α – частиц и спектра его возбуждений. Куперовское спаривание фермионов также является поляризационным процессом, в котором сохраняется нулевой импульс.

Как показано в [3, 4], центрально-симметричное пространство физического вакуума Вселенной определяет свойства рождающихся фундаментальных частиц (лептонов, кварков, нуклонов и некоторых бозонов). Центральная симметрия пространства проявляются в симметриях фигур Платона: тетраэдра, куба, додекаэдра (Д) и икосаэдра (И). Особо важную роль играют две последние фигуры [4].

Образование физических систем происходит мультиплетами, размерность которых соответствует мультиплетам элементов этих центрально-симметричных фигур – граней, вершин, рёбер, углов граней. Додекаэдр и икосаэдр образуют систему с общим центром (синглетным состоянием), характеризуемую мультиплетами геометрических элементов: 12-плетами граней (Д) и вершин (И), 20-плетами вершин (Д) и граней (И), 30-плетами рёбер (Д и И) и 60-плетами углов (Д и И). Мультиплеты элементов фигур отражают симметрии группы $SU(N)$, где N – размерность пространства зарядов. Первые ее три неприводимых представления 1 , N и $N^2 - 1$ в сумме дают $N(N + 1)$ состояний. Например, три цветовых заряда порождают 12 глюонных полей. $N = 5$ соответствует пяти новым зарядам (названных в [3] *вкусами*), которые получают частицы при орбитальном вращении, и порождают 30 новых (*гравитонных*) полей [3-5].

Важную роль для понимания природы сверхтекучести играет кварковая структура нуклонов. Она также соответствует симметрии додекаэдра и икосаэдра. Как показано в [3], нуклоны, будучи поляризационно образующимися фермионами, являются двухструктурными частицами, имеющими нейтральное скалярное ядро и оболочку из цветонейтрального трикварка – *uud* (у протона) и *udd* (у нейтрона). Сегодня под нуклоном понимают лишь оболочечный трикварк. В пользу существования ядра указывают эксперименты по столкновению нуклонов, которые способны сближаться только до 0,4 Фм. Этот масштаб характеризует размер нуклонного ядра [3]. Нейтральное ядро нуклонов содержит 12-плет кварков. Оболочки нуклонов ${}^4\text{He}$ образуют кварковый 12-плет. Это позволяет рассматривать ядро ${}^4\text{He}$ как поляризационно образующуюся кварковую структуру, состоящую из 60 кварков: четырех кварковых 12-плетов, образующих нуклонные ядра, и 12-плета их оболочечных кварков. Связанные цветонейтральные трёхкварковые структуры будем называть *кварконами* [3]. В нуклонах кваркон связан с ядром, но в физическом вакууме он может существовать и в свободном состоянии.

В [3, 4] показано, что, помимо заряженных глюонных полей, существуют незаряженные глюонные поля, сохраняющие при взаимодействии с кварками их цветовой заряд подобно тому, как электромагнитное поле сохраняет их электрический заряд. Незаряженные глюонные поля реализуют кулоновский тип взаимодействия и определяют формирование стационарных систем, в которых образующие их частицы сохраняют свой цветовой заряд и, следовательно, заряд всей системы. Октет заряженных глюонных полей КХД осуществляет процессы изменения кварковых структур. Вместе с незаряженным триплетом и синглетом глюонных полей октет образует 12-плет глюонных полей.

Приведённые здесь сведения из [3-5] нужны для рассмотрения поляризационного механизма сверхтекучести, основанного на куперовском спаривании кварконов.

Кварконный механизм сверхтекучести в гелие-2. ${}^4\text{He}$ является скалярным бозоном. Считается, что с микроскопической точки зрения сверхтекучесть в нём связана с явлением бозе-конденсации его атомов, изученным на примере слабонеидеального бозе-газа, а когерентное сверхтекучее состояние возникает в результате перехода макроскопической части атомов в состояние бозе-конденсата. В реальном сверхтекучем гелие-2 взаимодействия атомов являются сильными. При $T = 0$ весь ${}^4\text{He}$ находится в состоянии конденсата: состояния с нулевыми и ненулевыми импульсами образуют единый когерентный конденсат [6]. Другим известным механизмом образования сверхтекучего состояния является куперовское спаривание электронов, приводящее к появлению сверхпроводимости. Можно предположить, что на фундаментальном уровне механизм возникновения сверхтекучести в гелии-2 должен определяться спариванием кварконов.

Поэтому мы рассмотрим этот механизм образования гелиевого конденсата, рассматривающий ядро ${}^4\text{He}$ как частицу, порождаемую кварконной компонентой физического вакуума.

Сверхтекучесть возникает в результате перехода из некогерентного состояния частиц вещества в фазово-когерентное состояние. В поляризационной теории фазовую

корреляцию частицы получают при рождении в составе мультиплетов, состояния которых определяются числом возможных различных подпространств (пространственных состояний) физического вакуума. В трехмерном пространстве их число $\sim 10^5$ [4]. Нормальная фаза состоит из таких некоррелированных между собой мультиплетов. Для того чтобы произошел переход в фазово-коррелированное состояние некоррелированные мультиплеты частиц должны исчезнуть (деполяризоваться) и вместо них родиться фазово-когерентные мультиплеты, но с существенно большим числом пространственных состояний. Это происходит при спаривании фермионов: число пространственных состояний увеличивается до $\sim 10^{10}$. Если спаривающиеся фермионы, подобно кварконам, состоят из трех однотипных фермионов, то число пространственных состояний возрастает до $\sim 10^{30}$. Это уже макроскопический масштаб. При увеличении числа связанных фермионов этот механизм способен переводить в сверхтекучее состояние огромные массы вещества.

Так как в образовании ядра ${}^4\text{He}$ участвуют 60 кварков, то возможно проявление всех трех групповых симметрий $SU(N)$ с $N = 3, 4$ и 5 . Во внешнем пространстве скалярное ядро ${}^4\text{He}$ образует синглетное $U(1)$ -состояние. Во внутреннем пространстве ядра кварки, имеющие четыре заряда (электрический и три цветовых), обладают симметрией группы $SU(4)$. Размерность трех ее неприводимых представлений равна 20, т.е. в ядре гелия кварки структурируются в кварконы, которые будучи бесцветными, локализуются (в составе ядра) в пространстве Вселенной. Там их зарядовое пространство распадается на два подпространства: трехмерное цветное и одномерное электрическое. Поэтому в пространстве Вселенной нарушается симметрия группы $SU(4)$:

$$SU(4) \rightarrow SU(3) \times U(1),$$

и возможна структура из 12 кварконов и электрически заряженного синглета, которым является не имеющее цветового заряда ядро гелия. В кварконном конденсате плотность частиц будет в 12 раз больше, чем плотность ядер гелия.

При $T = 0$ плотность гелия-2 $\rho_{\text{He}} = 0,145 \text{ г см}^{-3}$. С учётом массы ${}^4\text{He}$, равной $m_{\text{He}} = 6,642 \cdot 10^{-24} \text{ г}$, для плотности кварконов будем иметь

$$n_R = 12 \frac{\rho_{\text{He}}}{m_{\text{He}}} = 2,62 \cdot 10^{23} \text{ см}^{-3}. \quad (1)$$

Как показано ниже, в кварконном конденсате между кварконами действует сила притяжения, приводящая к спариванию фермионов и возникновению сверхтекучести. Рассмотрим поляризационный механизм образования сверхтекучей фазы. Совместное поляризационное рождение ядер гелия и кварконов (их массу обозначим m_R) приводит к общему спектру возбуждений их конденсатов. Их квазичастицы на поверхности Ферми получают суммарные нулевые значения скоростей и импульсов. Нулевой является и сумма энергий ядра гелия и кваркона.

Отсюда следует, что скорость кваркона равна по модулю скорости ядра гелия $w_R = w_{\text{He}}$, а масса квазичастицы гелия – массе кваркона: $m^* = m_R$. На ферми-поверхности кинетическая энергия частицы определяется из уравнения $\frac{\partial \varepsilon}{\partial p} = w = \text{const}$. На ней энергии

квазичастиц гелия ε_{FHe} и кваркона ε_{FR} равны и определяют величину щели Δ :

$$\varepsilon_{\text{FHe}} = m_R w_{\text{He}}^2 = \varepsilon_{\text{FR}} \equiv \Delta. \quad (2)$$

Так как на поверхности Ферми значения импульса кваркона P_{FR} и квазичастиц гелия P_{FHe} одинаковы и равны

$$P_{\text{FR}} = m_R w_{\text{He}} = P_{\text{FHe}} \equiv P_F,$$

то для щели гелия-2 получаем значение

$$\Delta = m_R \left(\frac{P_F}{m_{He}} \right)^2. \quad (3)$$

В сверхтекучем состоянии возбуждения конденсата не должны влиять на импульс частиц гелия P_F , т.е. импульс квазичастиц гелия $\delta p = p - P_F$ ортогонален импульсу P_F . Этому условию удовлетворяют вращательные (ротонные) возбуждения, ось вращения которых совпадает с направлением импульса P_F . Импульс возбуждений и их энергия $\varepsilon(p)$ образуют 4-вектор импульса $P_4 = \delta p \pm i\varepsilon(p) / w_{He}$. Его векторная сумма с импульсом квазичастицы гелия P_F в силу их поляризационного рождения равна нулю. Отсюда получаем спектр ротонных возбуждений

$$\varepsilon(p) = w_{FHe} \left[P_F^2 + (p - P_F)^2 \right]^{1/2} = \left[\Delta^2 + w_{FHe}^2 (p - P_F)^2 \right]^{1/2}. \quad (4)$$

Аналогичный (4) вид спектра возбуждений имеет место и у сверхпроводящих электронов в теории БКШ [7], что указывает на поляризационную природу спаривания электронов.

Спектр (4) надо сравнить с экспериментально найденным спектром при температуре $T = 0$ (рис. 1), который в [7] аппроксимирован в виде

$$\varepsilon(p) \approx \bar{\Delta} + \frac{(p - p_0)^2}{2m^*},$$

где $\bar{\Delta} = 8,5K$, $m^* = 0,16m_{He}$, $\frac{p_0}{\hbar} = 1,9 \cdot 10^8 \text{ см}^{-1}$. Разлагая (4) в ряд вблизи $p = P_F$ и ограничиваясь двумя членами, найдём

$$\varepsilon(p) \approx \Delta + \frac{(p - P_F)^2}{2m_R},$$

т.е. при $T = 0$ должно быть

$$\bar{\Delta} = \Delta, \quad P_F = p_0, \quad m_R = m^*.$$

Кинетическая энергия, приходящаяся на одну частицу предполагаемого идеальным ферми-газа кварковых возбуждений, для плотности кварконов (1) равна

$$K_R = 0,3 \frac{P_F^2}{m_R}; \quad \frac{P_F}{\hbar} = (3\pi^2 n_R)^{1/3} = 1,98 \cdot 10^8 \text{ см}^{-1}, \quad (5)$$

где m_R – пока неизвестная масса кваркона. Здесь учтено, что спин кваркона имеет два спиновых состояния. Полученное значение P_F близко к значению p_0 .

Для образования трехчастичного кваркона требуется три кванта действия. Радиус свободного кваркона равен $3\hbar / P_F \approx 1,5 \cdot 10^{-8} \text{ см}$. Как следует из (1), среднее расстояние между кварконами составляет примерно ту же величину, т.е. кварконный конденсат плотно упакован, образуя жидкую фазу.

Энергия кварконов. Глюонные и электрические взаимодействия кварков делают возможным существование кварконов четырех видов. Возможны четыре комбинации u и d кварков с электрическим зарядом, указанным в скобках: uuu ($z = 2$), ddd ($z = -1$), uud ($z = 1$) и udd ($z = 0$). Таким образом, нейтральный кварконный конденсат содержит разнозаряженные и нейтральные частицы. С учетом спина кварконов плотность его фермионов равна

$$n_Q = 2n_R. \quad (6)$$

Его заряженные кварконы взаимодействуют между собой по закону Кулона, а с нейтральными кварконами, являющимися электрическими диполями, посредством пропорционального r^{-2} (r – расстояние между частицами) дипольного взаимодействия, которое, в зависимости ориентации диполя, может быть как притяжением, так и

отталкиванием. Вклад диполь-дипольного взаимодействия нейтральных кварконов будем полагать малым и не учитывать.

В нейтральной кварконной жидкости среднее расстояние между притягивающимися электрическими зарядами разных знаков меньше, чем между отталкивающимися одинаковыми зарядами. Поэтому кулоновская энергия взаимодействия будет отрицательной. В равновесной системе энергия должна быть минимальной, что возможно, если энергия взаимодействия зарядов с диполями будет положительной. Вблизи равновесия эти энергии меняются в разных направлениях. Кулоновское взаимодействие, экранируемое диполями, будет снижаться, что будем учитывать посредством введения диэлектрической постоянной ε . Поэтому потенциал кулоновского взаимодействия заряженных кварконов имеет вид

$$U_{qq} = -\frac{A}{\varepsilon r}, \quad (7)$$

а возрастающий потенциал их дипольного взаимодействия с нейтральными кварконами может быть записан в виде

$$U_{qn} = \frac{\varepsilon B}{r^2}. \quad (8)$$

В (7) и (8) r – расстояние между кварконами, заметно превышающее их размер, а A и B – положительные величины. Потенциальная энергия заряженных кварконов равна

$$U = U_{qq} + U_{qn}.$$

Диэлектрическая постоянная определяется из условия механического равновесия рассматриваемой кварконной системы $\frac{\partial U}{\partial r} = 0$ и равна $\varepsilon = \left(\frac{A}{2B} r\right)^{1/2}$. Получаем следующее равновесное значение потенциальной энергии:

$$U(\varepsilon) = -\left(\frac{AB}{2}\right)^{1/2} r^{-3/2} < 0. \quad (9)$$

Таким образом, между заряженными кварконами имеет место притяжение, приводящее к их спариванию.

Можно считать, что энергия равновесного состояния (11) представляет собой сумму пропорциональных $r^{-3/2}$ потенциальных энергий кварконов, т. е. является однородной функцией координат. В силу ограниченности объёма, занимаемого ферми-жидкостью, возможно применение теоремы вириала, дающей соотношение между средними по времени значениями кинетической энергии $\langle K \rangle$ и потенциальной энергии частиц кварконного ферми-газа $\langle E \rangle = \langle K + U \rangle$. С учётом (5), (6) и (9) получаем

$$\langle E \rangle = -\frac{1}{3} \langle K \rangle = -0,1 \cdot 2^{2/3} \frac{P_F^2}{m_R}. \quad (10)$$

Условие слабой неидеальности газа кварконных квазичастиц заключается в требовании малости средней энергии взаимодействия $\langle E \rangle$, приходящейся на одну частицу, по сравнению с ее средней кинетической энергией $\langle K \rangle$. Для газа квазичастиц обе эти энергии сравнимы, и использованное здесь приближение слабо неидеального газа должно давать погрешность в определении энергетических параметров сверхтекучей фазы, но, как следует из табл. 1, она невелика.

Масса кварконов и ширина ротонной щели. Как сказано выше, при поляризационном механизме рождения кварконов и ядер гелия, отрицательная энергия кваркона (9) компенсируется энергией ядра ${}^4\text{He}$, равной на поверхности Ферми величине

$$\varepsilon_{F_{He}} = \frac{P_F^2}{m_{He}} = -\langle E \rangle \quad (11)$$

Отсюда получаем массу кваркона, равную массе квазичастицы гелия:

$$m_R = 0,1 \cdot 2^{2/3} m_{He} = 0,159 m_{He}.$$

Из (3) находим значение ширины щели

$$\Delta = m_R \left(\frac{P_F}{m_{He}} \right)^2 = 7,5 \text{ K}.$$

Табл. 1. Сравнение расчётных и экспериментальных параметров гелия-2.

параметр	$\frac{m_R}{m_{He}}$	$\frac{P_F}{\hbar} \text{ (сМ}^{-1}\text{)}$	$\Delta \text{ (K)}$	$u \text{ (м/с)}$	$\frac{2\Delta}{T_\lambda}$	$T_\lambda \text{ (K)}$
теория	0,159	$1,98 \cdot 10^8$	7,5	228	6,76	2,22
эксперимент [9]	0,16	$1,9 \cdot 10^8$	8,6	235	7,9	2,17
погрешность модели	<0,1%	4%	-13%	-3%	-13%	2,3%

Вычисление температуры сверхтекучего перехода в гелие-2. Для определения температуры этого перехода T_λ используем условие исчезновения сверхтекучей компоненты [7]:

$$\rho_f + \rho_r = \rho_{He} \quad (12)$$

где плотности «фонной» (ρ_f) и «ротонной» (ρ_r) компонент жидкости имеют вид

$$\rho_f = \frac{2\pi^2 T_\lambda^4}{45\hbar^3 u^5}; \quad \rho_r = \frac{2m_R^{1/2} P_F^4}{3(2\pi)^{3/2} \hbar^3 T_\lambda} e^{-\frac{\Delta}{T_\lambda}}.$$

Здесь u – скорость звука в жидкости. Уравнение (12) представим в виде

$$Fx^{1/2} e^{-x} + Gx^{-4} = 1,$$

$$\text{где } x = \frac{\Delta}{T_\lambda}; \quad F = (2\pi)^{1/2} \frac{m_{He}}{m_R} = 15,76; \quad G = \frac{2^{1/3} \cdot 3^{3/2} \pi^2}{5} \left(\frac{m_R}{m_{He}} \right)^3 = 0,513.$$

Его решение $x = 3,37$ и $T_\lambda = 2,22 \text{ K}$ (фонная компонента на него практически не влияет).

Скорость первого звука. С учетом (6) давление вырожденного идеального газа квазичастиц гелия равно

$$P_{He} = \frac{2^{2/3} P_F^2}{5m_{He}} n_{He} \propto \frac{n_{He}^{5/3}}{m_{He}}.$$

Отсюда находим скорость звука на поверхности Ферми:

$$u_{He} = \left[\frac{\partial P_{He}}{\partial (m_{He} n_{He})} \right]^{1/2} = \frac{2^{1/3}}{3^{1/2}} \left(\frac{P_F}{m_{He}} \right) = \frac{2^{1/3}}{3^{1/2}} w_{He} = 228 \text{ м/с}.$$

что всего на 3% меньше экспериментального значения (табл. 1).

Сделанное предположение о вырожденности ферми-газа гелиевых квазичастиц выполняется, поскольку температура вырождения

$$T_g = 0,3 \frac{P_F^2}{m_R} \approx 85 \text{ K},$$

что существенно больше температуры конденсации (4K).

Как видно из табл. 1, поляризационная модель образования сверхтекучести гелия-2, которую следует отнести к моделям с сильной связью, удовлетворительно согласуется с опытными данными. Таким образом, в поляризационной теории спаривание фермионов является общим механизмом возникновения сверхтекучести и электронов, и атомов гелия-2.

Заключение.

Показано, что поляризационное рождение кваркона (связанного бесцветного триплета кварков) в физическом вакууме и альфа-частицы в действительном подпространстве Вселенной является коррелированным нелокальным процессом, приводящим к их одновременному переходу в сверхтекучее состояние. При этом спектр возбуждений кварконной жидкости таков же, как и спектр возбуждения гелия-2. Кварконный механизм основан на представлении поляризационной теории о нуклоне как частице, содержащей скалярное нейтральное ядро и кварконную оболочку [3, 4].

В поляризационной модели сверхтекучести исходными опытными данными для получения ротонного спектра возбуждения в гелии-2 является плотность и масса ядер гелия и их нуклонный состав. Рассчитаны при $T = 0$ величины щели, импульса на ферми-поверхности, температуры сверхтекучего перехода, массы кваркона, определяющей массу квазичастиц гелия-2, и скорости звука. Из табл. 1 видно, что для рассмотренной кварконной модели образования сверхтекучей фазы согласие расчетных и экспериментальных значений указанных характеристик гелия-2 можно считать удовлетворительным, что является аргументом в пользу кварконного механизма образования сверхтекучести гелия-2. Отношение ширины его щели к критической температуре соответствует значениям, присущим высокотемпературным сверхпроводникам, и их существование может быть результатом поляризационных механизмов спаривания фермионов.

Основной вывод: В поляризационной теории куперовское спаривание фермионов является поляризационным механизмом возникновения не только сверхпроводимости, но и сверхтекучести гелия-2.

Список литературы.

1. Ландау Л.Д., ЖЭТФ **11** 592 (1941); J.Phys USSR **5** 71 (1941).
2. Гинзбург В.Л., Ландау Л.Д. ЖЭТФ **20** 1064 (1950).
3. Чернуха В.В., Поляризационная теория Мироздания. – М.: Атомэнергоиздат, 2008, 657с.
4. Чернуха В.В., О природе массы и зарядов фундаментальных частиц. www.ptm2008.ru
5. Чернуха В.В., О природе безмассовых бозонов и нейтрино. www.ptm2008.ru
6. Физическая энциклопедия, т. 4, 454. М.: Большая Российская энциклопедия, 1994.
7. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Статистическая физика. М.: Наука, 1964, 567 с.
8. Henshaw D., Woods A., Phys. Rev., **121**, 1266 (1961).

04.02.2014. Изменения внесены 29.03.16.

