

проявляться сколько-нибудь заметно. Поэтому фактически в прямом лаб. эксперименте приходится иметь дело с двумя К. ж. — изотопами гелия: жидким ${}^4\text{He}$ и жидким ${}^3\text{He}$ (а также с их смесями) при темп-рах $\sim 1-2$ К. К. ж., по-видимому, образуют нейтроны в нейтронных звёздах. В определ. смысле К. ж. составляют электроны в металлах и полупроводниках и экситоны в экситонных каплях в диэлектриках, а также протоны и нейтроны в атомных ядрах.

К. ж. классифицируют по статистике составляющих их частиц. Жидкость, состоящая из частиц с целым спином, бозонов (жидкий ${}^4\text{He}$), наз. бозе-жидкостью, а из частиц с полуцелым спином, фермионов (жидкий ${}^3\text{He}$), — ферми-жидкостью.

Элементарные возбуждения. Квантовые эффекты особенно ярко проявляются при низких темп-рах, когда жидкость находится в слабовозбуждённых состояниях, близких к основному квантовому состоянию. Выявление свойств таких состояний — осн. задача теории К. ж. Важнейшее положение этой теории состоит в том, что переход пространственно-однородной К. ж. из осн. состояния в слабовозбуждённое можно описать как появление в ней газа *квазичастиц*, или элементарных возбуждений, каждое из к-рых обладает определёнными импульсом и энергией. Энергия квазичастицы ϵ определяется её импульсом p . Зависимость $\epsilon(p)$ — закон дисперсии квазичастиц — является важнейшей характеристикой К. ж. Всякое слабовозбуждённое состояние жидкости характеризуется распределением квазичастиц по импульсам.

Кроме импульса состояние квазичастицы в изотропной К. ж. характеризуется *спиральностью* — проекцией угл. момента на направление импульса. Квазичастицы, отличающиеся знаком спиральности, в жидкости, инвариантной относительно *пространственной инверсии*, имеют одну и ту же энергию, т. е. состояния квазичастиц с отличной от нуля спиральностью двукратно вырождены.

Как и обычные частицы, квазичастицы подчиняются определ. статистике — *Бозе — Эйнштейна статистике* или *Ферми — Дирака статистике*. Квазичастицы с целой (включая нуль) спиральностью являются бозонами, с полуцелой — фермионами. При этом поскольку проекция угл. момента жидкости может меняться лишь на целое число (в единицах \hbar), фермиевские квазичастицы могут появляться и исчезать лишь парами квазичастица-дырка (аналогичными в известном смысле электрон-позитронным парам), а бозевские — поодиночке. В бозе-жидкости все квазичастицы являются бозонами, тогда как среди частиц ферми-жидкости могут быть как фермиевские, так и бозевские ветви.

В состоянии термодинамич. равновесия квазичастицы фермиевского и бозевского типов распределены по импульсам согласно ϕ -циям распределения идеальных (соответственно) ферми- и бозе-газов.

Описание возбуждённых состояний жидкости на языке квазичастиц является приближённым. Это проявляется в конечности времени жизни квазичастиц, обусловленной их взаимодействием. При отличии от абс. нуля темп-рах затухание квазичастиц связано с процессами их взаимного рассеяния и распада. При темп-ре абс. нуля рассеяние отсутствует и затухание квазичастицы связано только с процессами распада; если в том или ином интервале импульсов они запрещены законами сохранения, квазичастица является строго незатухающей.

Ферми-жидкость. Нормальная (несверхтекучая) фермиевская жидкость имеет спектр квазичастиц, аналогичный спектру идеального ферми-газа. Его естественно описывать, считая, что при темп-ре абс. нуля квазичастицы заполняют в импульсном пространстве все квантовые состояния вплоть до нек-рого фермиевского импульса p_F . Рождение пары квазичастица (с импульсом p) — дырка (с импульсом p') описывается в этой картине как переход квазичастицы с импульсом

— p' , первоначально находившейся внутри фермиевской сферы, в состояние с импульсом p вне этой сферы. Т. о., квазичастицы могут иметь импульсы $p > p_F$, а дырки $p < p_F$.

Важнейшее положение теории ферми-жидкости, созданной Л. Д. Ландау в 1956, состоит в том, что определяющий распределение квазичастиц фермиевский импульс p_F связан с плотностью числа реальных частиц (атомов жидкости) N/V тем же соотношением, что и в идеальном ферми-газе:

$$p_F = \hbar (3\pi^2)^{1/3} (N/V)^{1/3} \quad (1)$$

(N — число частиц, V — объём системы). В этом смысле число квазичастиц в ферми-жидкости равно числу реальных частиц жидкости.

Энергия ϵ ферми-жидкости является функционалом от *функции распределения* квазичастиц $n(p)$; её изменение при изменении $n(p)$ определяет энергию квазичастицы $\epsilon(p)$:

$$\delta\epsilon = 2 \int \epsilon(p) \delta n(p) \frac{d^3p}{(2\pi\hbar)^3} \quad (2)$$

(здесь и далее предполагается, что распределение квазичастиц не зависит от их спиновых состояний, и опускаются спиновые индексы у всех величин).

Важное отличие ферми-жидкости от идеального ферми-газа состоит в том, что энергия квазичастицы $\epsilon(p)$ зависит от распределения всех остальных квазичастиц. Изменение $\epsilon(p)$ при малом изменении $n(p)$ имеет вид

$$\delta\epsilon(p) = 2 \int f(p, p') \delta n(p') \frac{d^3p'}{(2\pi\hbar)^3} \quad (3)$$

Φ -ция $f(p, p')$ описывает взаимодействие между квазичастицами.

Фермиевский импульс p_F связан с *химическим потенциалом* μ жидкости равенством:

$$\epsilon(p_F) = \epsilon_F = \mu \quad (4)$$

(ϵ_F — ферми-энергия). В окрестности фермиевского импульса

$$\epsilon(p) \approx \mu + v_F (p - p_F), \quad (5)$$

где v_F — скорость квазичастиц на фермиевской сфере. Отношение $m^* = \hbar p_F / v_F$ наз. *эффективной массой* квазичастицы.

Ввиду равенства числа частиц числу квазичастиц плотность импульса последних, делённая на массу частицы m , должна быть равна потоку их числа, что приводит к соотношению

$$\int p n \frac{d^3p}{(2\pi\hbar)^3} = m \int \frac{\partial \epsilon}{\partial p} n \frac{d^3p}{(2\pi\hbar)^3}, \quad (6)$$

варьирование к-рого по n даёт связь эфф. массы с ϕ -цией взаимодействия f :

$$(m^*)^{-1} = m^{-1} - \frac{p_F}{(2\pi\hbar)^3} \int f(\vartheta) \cos \vartheta d\vartheta. \quad (7)$$

Здесь ϕ -ция $f(p, p')$ берётся при $|p| = |p'| = p_F$, и поэтому она зависит лишь от угла ϑ между p и p' , $d\vartheta = 2\pi \sin \vartheta d\vartheta$ — элемент телесного угла в направлении p' . Аналогично можно получить связь ϕ -ции f с сжимаемостью жидкости:

$$\frac{\partial P}{\partial \rho} = \frac{p_F^2}{3m^2} + \frac{1}{3m} \left(\frac{p_F}{2\pi\hbar} \right)^3 \int f(\vartheta) (1 - \cos \vartheta) d\vartheta \quad (8)$$

($\rho = mN/V$ — плотность жидкости, P — давление).

Энтропия жидкости выражается через ϕ -цию распределения квазичастиц той же ϕ -лой, что и для идеального ферми-газа:

$$S = -V \cdot 2 \int [n \ln n + (1-n) \ln (1-n)] \frac{d^3p}{(2\pi\hbar)^3}.$$

Распределение же квазичастиц по импульсам в состоянии термодинамич. равновесия даётся обычной ϕ -лой