

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

ИЗ ТЕКУЩЕЙ ЛИТЕРАТУРЫ

ПРЯМОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СПЕКТРА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ВОЗБУЖДЕНИЙ В ЖИДКОМ ГЕЛИИ II

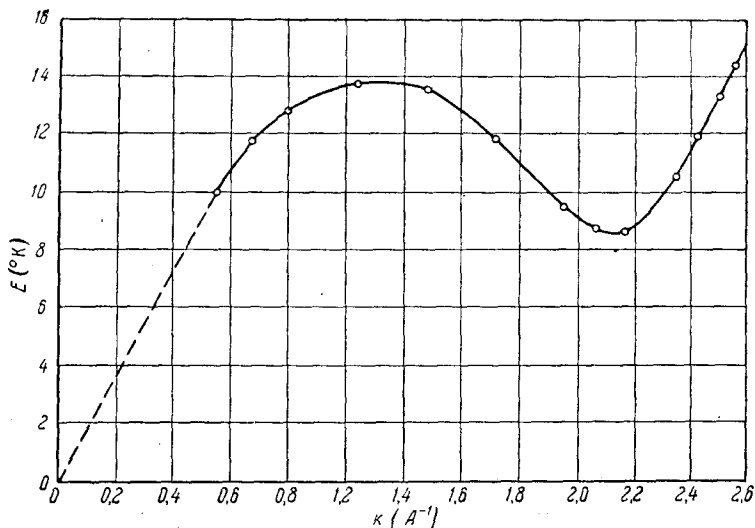
Основываясь на фундаментальном экспериментальном исследовании свойств жидкого гелия II П. Л. Капицы¹, Л. Д. Ландау создал теорию сверхтекучести². Согласно этой теории гелий II представляет собой квантовую жидкость, в которой все атомы образуют единую связанную систему. Возбужденные состояния такой системы представляются в виде совокупности «элементарных возбуждений» (ЭВ) — квазичастиц, обладающих энергией ε и импульсом p . Исследования скорости второго звука В. П. Пешкова³ привели Ландау⁴ к установлению общепринятого в настоящее время энергетического спектра ЭВ, т. е. зависимости $\varepsilon(p)$. А именно: при малых энергиях $\varepsilon = cp$, где c — скорость звука (фононная область спектра), затем ε проходит через максимум, далее через минимум и затем вновь возрастает. Для ЭВ вблизи минимума («ротонны») приближенно $\varepsilon = \Delta + (p - p_0)^2/2\mu$. Значения параметров, определенные из данных по теплоемкости гелия II и скорости второго звука, составляют: $\Delta = 8,9^\circ \text{ K}$, $p_0 = 2,1 \cdot 10^{-19} \text{ г} \cdot \text{см/сек}$, $\mu = 1,72 \cdot 10^{-24} \text{ г}$ ($\approx 1/4$ массы атома гелия). Спектр гелия II типа, предложенного Ландау, был получен также Н. Н. Боголюбовым⁶, Фейнманом⁷ и др. Однако прямой проверки правильности этого спектра до последнего времени не было.

Козин и Фейнман⁸ указали на возможность непосредственного экспериментального определения вида спектра ЭВ в жидком гелии из опытов по рассеянию медленных моноэнергетических нейтронов. Они показали, что основным процессом, обуславливающим рассеяние таких нейтронов при температурах, близких к абсолютному нулю, является рождение единичного ЭВ в гелии II. Зная длину волны де-Бройля (а следовательно, также энергию и импульс) падающего нейтрона и нейтрона, рассеянного на некоторый угол ϑ , можно по законам сохранения энергии и импульса определить энергию и импульс, приобретенные возникшим ЭВ. Варьируя длину волны падающих нейтронов λ_i при постоянном ϑ или варьируя ϑ при постоянном λ_i , можно определить целый участок спектра ЭВ гелия II. Козин и Фейнманом было также найдено, что при $T=0$ для нейтронов с $\lambda_i \geq 16,5 \text{ \AA}$ жидкий гелий оказывается прозрачным. Последний результат находился в согласии с данными Соммерса, Даша и Голдштейна⁹, однако для проведения измерений по определению спектра ЭВ необходимо было иметь пучок монохроматических нейтронов значительной интенсивности.

В последнее время такого рода эксперименты были выполнены почти одновременно в Швеции¹⁰ и в США¹¹, причем трудность с необходимостью получения мощного пучка медленных моноэнергетических нейтронов была остроумно обойдена. Работа¹⁰ была выполнена на Стокгольмском реакторе¹², другая работа выполнена в Лос-Аламосской научной лаборатории на реакторе «Омега-Вест». Методика, принятая в обеих работах, в основных чертах совпадает. В этих экспериментах вместо монохроматических нейтронов использовались нейтроны со сплошным распределением по энергиям, однако с резким обрывом спектра со стороны больших энергий. Последнее достигалось тем, что поток тепловых нейтронов, выходящий из реактора, пропусклся через фильтр из поликристаллического бериллия толщиной 10—40 см. При этом нейтроны с $\lambda_i \geq 3,96 \text{ \AA}$ претерпевали в фильтре интенсивное «брегговское» рассеяние, и в прошедшем через фильтр пучке оставалась четкая «метка» энергии в виде резкого обрыва в энергетическом распределении нейтронов. Далее пучок проходил через коллиматор и рассеивался на 10 или 25 см жидкого гелия, поддерживавшегося при температурах 1,1—1,4° K, т. е. значительно ниже температуры λ -перехода. Нейтроны, рассеянные под заданным углом ϑ , коллимировались, и их распределение по энергиям анализировалось по времени пролета¹¹, либо при помощи кристаллического спектрометра с кристаллом NaCl и B^{10}F_3 -счетчиками¹². Было найдено¹¹, что в энергетическом распределении рассеянных на гелии II нейтронов сохраняется резкий обрыв со стороны высоких энергий, однако положение его оказывается смещенным в сторону меньших энергий. В то же время при рассеянии на жидком гелии выше

λ -точки (при $4,2^\circ \text{ K}$) резкий обрыв не сохраняется и спектр оказывается размазанным. Это показывает, что основным процессом, обуславливающим рассеяние медленных нейтронов в He II, является процесс рождения единичных ЭВ, рассмотренный Козном и Фейнманом⁸.

По полученным данным были определены энергии и соответствующие им импульсы ЭВ в довольно широкой области спектра гелия II. Например, в работе¹¹ был охвачен интервал импульсов от $0,6 \cdot 10^{-19}$ до $2,5 \cdot 10^{-19} \text{ г.см/сек.}$ Результаты измерений¹¹ приведены на рисунке (здесь по оси абсцисс отложены величины волнового вектора ЭВ k ,



связанные со значениями импульса p соотношением $p = \hbar k$). Полученные данные находятся в поразительно хорошем количественном согласии со спектром ЭВ Ландау, рассчитанным косвенным путем из термодинамических данных⁵. Экспериментально определенная энергетическая щель между основным состоянием гелия II и низшими ротонными состояниями составляет $\Delta = 8,6 \pm 0,2^\circ \text{ K}$, минимум ϵ лежит при $p_0 = (2,02 \pm 0,04) \cdot 10^{-19} \text{ г.см/сек.}$ Эффективная масса ротона также оказывается очень близкой к рассчитанной косвенными методами. Результаты работы¹⁰ близки к этим результатам. Таким образом, в результате прямого экспериментального определения полностью подтверждена правильность энергетического спектра гелия II, впервые предложенного Л. Д. Ландау.

Р. Ченцов

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. П. Л. Капица, ЖЭТФ 11, 1 (1941).
2. Л. Д. Ландау, ЖЭТФ 11, 592 (1941), 14, 112 (1944).
3. В. П. Пешков, ЖЭТФ 16, 1000 (1946), 18, 867 (1948).
4. Л. Д. Ландау, Z. Physics 11, 91 (1947).
5. И. М. Халатников, УФН 59, 673 (1956).
6. Н. Н. Боголюбов, Известия АН СССР, сер. физ. 11, 77 (1947).
7. R. Feynman, Phys. Rev. 94, 262 (1954).
8. M. Cohen, R. P. Feynman, Phys. Rev. 107, 13 (1957).
9. Sommers, Dash, Goldstein, Phys. Rev. 97, 855 (1955).
10. H. Palevsky, K. Otnes, K. E. Larsson, R. Pauli, R. Stedman, Phys. Rev. 108, 1346 (1957) (в печати).
11. J. L. Yarnell, G. P. Arnold, P. J. Bendt, E. C. Kerr, Phys. Rev. (в печати).
12. S. Eklund, J. Nuclear Energy 1, 93 (1954).