

PACS: 67.40.Bz, 67.40.Pm

A CONVECTIVE MODEL OF A ROTON

V.I. Tkachenko^{1,2}¹⁾National Science Center "Kharkov Institute of Physics and Technology"
The National Academy of Sciences of Ukraine

61108, Kharkov 1, Akademicheskaya str., tel./fax 8-057-349-10-78

²⁾V.N. Karazin Kharkiv National University,
61022, Kharkov, 4, Svobody sq., tel./fax 8-057-705-14-05E-mail: tkachenko@kipt.kharkov.ua

Received February 17, 2017

A convective model describing the nature and structure of the roton is proposed. According to the model, the roton is a cylindrical convective cell with free horizontal boundaries. On the basis of the model, the characteristic geometric dimensions of the roton are estimated, and the spatial distribution of the velocity of the helium atoms and the perturbed temperature inside are described. It is assumed that the spatial distribution of rotors has a horizontally multilayer periodic structure, from which follows the quantization of the energy spectrum of rotors. The noted quantization allows us to adequately describe the energy spectrum of rotors. The convective model is quantitatively confirmed by experimental data on the measurement of the density of the normal component of helium II, the scattering of neutrons and light by helium II. The use of a convective model for describing the scattering of light by helium II made it possible to estimate the dipole moment of the roton, as well as the number of helium atoms participating in the formation of the roton.

KEY WORDS: superfluid helium, convection, elementary convective cell, roton, energy spectrum of helium II, density of the normal component of helium II, neutron scattering, light scattering, dipole momentum

КОНВЕКТИВНА МОДЕЛЬ РОТОНА

В.І. Ткаченко^{1,2}¹⁾ Національний науковий центр "Харківський фізико-технічний інститут"
Національної академії наук України

61108, м. Харків, вул. Академічна 1, tel./fax 8-057-349-10-78

²⁾ Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна
61022, м. Харків, пл. Свободи, 4, tel./fax 8-057-705-14-05

Запропоновано конвективну модель, що описує природу і структуру ротона. Згідно моделі ротон є циліндрична конвективна комірка з вільними горизонтальними межами. На підставі моделі оцінені характерні геометричні розміри ротона та описано просторовий розподіл швидкості атомів гелію та збуреної температури всередині нього. Передбачається, що просторовий розподіл роторів має горизонтально-багатошарову періодичну структуру, з якої випливає квантування енергетичного спектру роторів. Це квантування дозволяє адекватно описати енергетичний спектр роторів. Конвективна модель кількісно підтверджується експериментальними даними для вимірювання щільності нормальної компоненти гелію II, розсіюванню нейтронів і світла на гелії II. Використання конвективної моделі для опису розсіювання світла на гелії II дозволило оцінити дипольний момент ротона, а також кількість атомів гелію, що беруть участь у формуванні ротона.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: надплинний гелій, конвекція, елементарний конвективний осередок, ротон, енергетичний спектр гелію II, щільність нормальної компоненти гелію II, розсіювання нейтронів, розсіювання світла, дипольний момент

КОНВЕКТИВНАЯ МОДЕЛЬ РОТОНА

В.И. Ткаченко^{1,2}¹⁾ Национальный научный центр "Харьковский физико-технический институт"
Национальной академии наук Украины

61108, г. Харьков, ул. Академическая 1, tel./fax 8-057-349-10-78

²⁾ Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина
61022, г. Харьков, пл. Свободы 4, tel./fax 8-057-705-14-05

Предложена конвективная модель, описывающая природу и структуру ротона. Согласно модели ротон является цилиндрической конвективной ячейкой со свободными горизонтальными границами. На основании модели оценены характерные геометрические размеры ротона, и описано пространственное распределение скорости атомов гелия и возмущенной температуры внутри него. Предполагается, что пространственное распределение роторов имеет горизонтально-многослойную периодическую структуру, из которой следует квантование энергетического спектра роторов. Отмеченное квантование позволяет адекватно описать энергетический спектр роторов. Конвективная модель количественно подтверждается экспериментальными данными по измерению плотности нормальной компоненты гелия II, рассеянию нейтронов и света на гелии II. Использование конвективной модели для описания рассеяния света на гелии II позволило оценить дипольный момент ротона, а также количество участвующих в формировании ротона атомов гелия.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: сверхтекучий гелий, конвекция, элементарная конвективная ячейка, ротон, энергетический спектр гелия II, плотность нормальной компоненты гелия II, рассеяние нейтронов, рассеяние света, дипольный момент

ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СПЕКТРА РОТОНОВ

В работе [1] Ландау представил количественную теорию сверхтекучего гелия, которая описала практически все известные к моменту ее появления экспериментальные результаты, и предсказала ряд новых явлений.

Согласно этой теории, при температуре ниже λ - точки ($T_\lambda = 2,17$ K), гелий, который принято называть гелий II, одновременно содержит в себе два вида тепловых возбуждений: фононы и ротоны.

Первый вид тепловых возбуждений (фононы) существует в длинноволновой части спектра и характеризуется линейным законом зависимости энергии такой квазичастицы от ее импульса: $\varepsilon(p) = cp$, где c - скорость обычного звука в гелии II, равная приблизительно 240 м/сек, $\varepsilon(p)$ и p - энергия и импульс квазичастицы соответственно.

Второй вид тепловых возбуждений (ротоны) существует в более коротковолновой относительно фононов части спектра. При этом постулируется, что связь между энергией $\varepsilon(p)$ и импульсом p в этой части энергетического спектра характеризуется параболической зависимостью: $\varepsilon(p) = \Delta + (p - p_0)^2 / 2\mu$, где постоянные определяются следующим образом: Δ - ширина энергетической щели между невозбужденным и возбужденным уровнями, p_0 - импульс ротона, μ - эффективная масса ротона (в единицах массы атома ${}^4\text{He}$: $m_{\text{He}} = 6.646 \cdot 10^{-24}$ г), на котором рассеиваются нейтроны.

Постулируемая зависимость энергии от импульса в коротковолновой части спектра была подтверждена, по мнению авторов ряда публикаций (см., например, [2-4]), в экспериментах с помощью нейтронографического анализа, когда зондирующий пучок монохроматических нейтронов с определенной длиной волны рассеивался на гелии II. В этих экспериментах были определены значения постоянных энергетического спектра Ландау, которые сведены в таблицу 1:

Таблица 1.

Значения постоянных энергетического спектра ротон

$\Delta/k = 9,6, K$	$p_0/\hbar = 1,95, \text{ \AA}^{-1}$	$\mu = 1,06 m_{\text{He}}$	[2]
$\Delta/k = 8,1 \pm 0,4, K$	$p_0/\hbar = 1,9 \pm 0,03, \text{ \AA}^{-1}$	$\mu = 0,16 \pm 0,02 m_{\text{He}}$	[3]
$\Delta/k = 8,65 \pm 0,04, K$	$p_0/\hbar = 1,92 \pm 0,01, \text{ \AA}^{-1}$	$\mu = 0,16 \pm 0,01 m_{\text{He}}$	[4]

где $m_{\text{He}} = 6.6464836122 \cdot 10^{-24}$ г - масса атома гелия [5], k - постоянная Больцмана.

Согласно [4] ширина энергетической щели Δ/k не является постоянной величиной, а уменьшается с ростом температуры по закону $\Delta/k = 8,68 - 0,0084 \cdot T^7$ K.

Как следует из таблицы 1, значения констант энергетического спектра имеют разные значения.

Это несоответствие указывает на необходимость придания физического смысла постулируемой коротковолновой части энергетического спектра.

МОДЕЛИ СТРОЕНИЯ РОТОНА

Набор большой экспериментальной базы данных по теплофизическим параметрам ротон до настоящего времени не завершился созданием его физической модели.

На протяжении всего периода исследования гелия II различными методами не прекращаются попытки описать структуру и свойства ротона.

Так, например, Р. Фейнман предложил модель ротона в виде вихревого кольца, состоящего из шести атомов ${}^4\text{He}$, и расположенных так вдоль линии кольца, что промежутки между ними порядка диаметра атома гелия. Каждый находящийся в кольце атом синхронно вращается, располагаясь то в первоначальном положении, то занимая соседний, например, левый промежуток. Характерный размер вихревого кольца порядка среднего атомного расстояния в жидком гелии II [6].

Другая модель ротонной структуры [7] основана на предположении о том, что в гелии II при температуре $0,6 \leq T(K) \leq 1,2$ существуют стабильные кластеры, которые являются связанными состояниями некоторого числа N_c атомов ${}^4\text{He}$ ($N_c \gg 1$). Число N_c атомов в таком ротонном кластере может быть определено по минимуму свободной энергии, которая представляет собой условие устойчивости ротона. По данным [7] стабильный кластер должен иметь близкую к сферической форму, и число атомов гелия - $N_c = 13$. Средний радиус такого сферического кластера оценивается величиной 5,22 Å.

Однако, в описанных моделях ротона (вихревая и сферическая) отсутствует какое-либо описание физической природы сил, удерживающих атомы гелия в кольце или в сфере.

