

Microwold 4. Superfluidity of Helium

N.N. Leonov

At extremely low temperatures liquid helium contains atoms in which electron and nucleus are arranged on the same straight line and both electrons are from the same side of the nucleus. The existence of such atoms allows for gaining a simple, eye-minded understanding of all amazing properties of superfluid helium.

*

Liquid helium has very strange and amazing properties. These properties of liquid helium were discovered following extraordinary ingenious and high-skilled experiments.

At extremely low temperatures liquid helium exhibits a superfluid component featuring ultra-high thermal conductivity, ultra-low viscosity and capability of getting on vertical walls of vessels that it is contained by and flowing over the same.

Helium has two stable isotopes, ${}^4\text{He}$ and ${}^3\text{He}$, and is the only element featuring a unique superfluidity feature in liquid state. ${}^4\text{He}$ becomes liquid at $T < 4.21$ K while ${}^3\text{He}$ becomes liquid at $T < 3.91$ K. A superfluid component occurs in ${}^4\text{He}$ at $T < 2.17$ K and in ${}^3\text{He}$ at $T < 2.6 \cdot 10^{-3}$ K.

An eye-minded comprehension of the phenomenon of liquid helium superfluidity has been gained in the result of building structural models of helium atoms.

*

${}^4\text{He}$ nucleus consists of two protons, two neutrons and has two nucleonic magnetic clusters (Fig. 1).

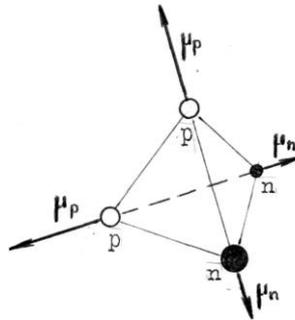


Fig. 1. ${}^4\text{He}$ nucleus diagram

The “electron shell” of neutral ${}^4\text{He}$ contains two electrons and may be of three different shapes. There is one electron per nucleonic magnetic cluster in A-shaped shell. Both of B shape electrons are arranged on one of the clusters at different sides of the nucleus while C shape electrons are on the same cluster from the same side of the nucleus.

A-shape is the most stable. The first ionization potential for (${}^4\text{He}$, A) is equal to 24.586 eV, for B shape it is equal to 2.788 eV. The less stable is C-shape as its outer electron is at a far distance from the nucleus. The sufficient energy to knock it out from the atom is 1.449 eV.

*

The C-shaped electron shell of helium atoms allows gaining an eye-minded understanding of all amazing properties of superfluid helium.

The outer C-shell electron is 20 times farther from the nucleus than the inner one which is located at the closest distance to the nucleus. Therefore, (${}^4\text{He}$, C) atom has pronounced electrical dipole properties. Due to electrical attraction (${}^4\text{He}$, C) atoms can unite into long, thread-like polyatomic molecules. Magnetic interactions keep atoms of these molecules from approaching each other too much.

These molecules can consist of two atoms if the exposure level does not exceed 0.862 eV. The less the exposure energy is the more atoms unit in a long molecule.

If we abstract from sizes of electrons and atomic nucleus the shape of (${}^4\text{He}$, C) atom is one-dimensional. Therefore, long polyatomic molecules consisting of (${}^4\text{He}$, C) atoms have a thread-like structure.

The most fascinating fact is the magnetic orientation effect makes these long polyatomic molecules tend to take a straight shape, a shape of a long thin needle.

*

Exceptional properties of superfluid helium include, first of all, the fact that it features ultra-high (as compared to other liquids) thermal conductivity and ultra-high viscosity. However, the most amazing, almost fantastic thing is its capability of rising up along vertical walls of vessels containing it and flowing over the same. Thermal conductivity and viscosity of various degrees is a common feature of any and all liquids. However, the capability of flowing over elevated walls is the unique feature of liquid helium superfluid component.

It has been experimentally found that superfluid helium covers vertical walls with quite a thick (about hundred of atomic sizes) film. Because of such a film physicists thought that liquid helium flowing over the vessel walls can be explained by a siphon effect. That explanation would be reliable if they could explain who the film is formed.

The fact that superfluid helium consists of ultra-long thread-like polyatomic molecules tending to become straightened under the impact of magnetic interactions among elements of these molecules allows obtaining an extremely simple, eye-minded explanation for such film formation process.

At extremely low temperatures one-dimensional polyatomic helium molecules may reach macroscopic lengths. That why they are multi-folded in liquid helium vessels.

Because of the magnetic orientation effect folded thread-like helium molecules tend to unfold and reside in internally stressed state like contracted springs. Due to internal tension end and intermediate fragments of thread-like molecules are pushed out from liquid at the interface between solid surfaces and liquid helium. Pressurized by internal tension fragments of thread-like molecules are creeping over solid surfaces, particularly over vertical walls, enveloping them with helium film.

If vertical walls are not too high the molecules may be pushed beyond the vertical wall edges of vessels and flow over the same.

If the edges of these walls are made necked inwards the vessel liquid helium will flow down in the same vessel as long as the required temperature of liquid helium is maintained.

*

Experiments with liquid helium showed an ultra-high thermal conductivity of superfluid helium: thermal agitation of any small portion of liquid helium is accompanied with almost instant dispersion and uniform distribution of this thermal agitation throughout the volume of liquid helium.

Thermal conductivity is a concept related with heat transfer from one layer of a medium to another describing velocity of heat propagation in the medium.

Normal liquids consist of numerous finest molecular particles. Heat transfer in such liquids is provided by means of relative movement of particulates and their intercollision at limited velocities.

Thread-like polyatomic molecules of superfluid helium are so long that each of them fills the volume of liquid helium quite densely. And since thermal agitations are propagated in such molecules at the rate of electromagnetic interactions any thermal agitation of even a considerably small portion of liquid helium will very quickly (almost instantly) spread uniformly throughout the volume.

*

Experiments showed that, when moving in capillaries, superfluid helium features extremely low viscosity.

Viscosity is understood as friction between the adjacent layers of liquid in motion. The distinctive feature of normal liquid is the presence of molecular assemblies with a “flickering”

periphery. This “flickering” manifests itself in outer atoms of molecular assemblies repeatedly joining the assembly and leaving it because of temperature fluctuations.

Friction is caused in normal liquids primarily by a partial contact of molecular assemblies with each other. The more intense is the power interchange accompanying such a contact, the higher is friction and thus the viscosity.

Normal liquids feature noticeable friction between the adjacent layers. Such friction significantly limits liquid flow velocity.

Experiments showed that liquid helium capillary movement velocity is incredibly high against flow velocity of other liquids and that helium superfluid component viscosity is negligibly small. The reason is that superfluid helium consists of long and very thin molecules which tend to get straightened due to magnetic interactions. There are no obstacles for that in capillaries. Therefore, superfluid helium in capillaries is a multitude of long and very thin needle-like molecules parallel to each other and to the capillary itself.

The presence of such molecules in liquid helium ensures the existence of real layers in liquids rather than of conventional. These layers are multidimensional. There is neither atomic exchange nor contact of molecular assemblies between these layers as well as between the layers and normal liquid helium layers. This is the explanation for low viscosity of superfluid helium in normal vessels and ultra-low viscosity in capillaries.

Sizes of (${}^4\text{He}, A$) atoms in part of liquid helium component that lacks superconducting properties are measured by Bohr radius equal to $5.3 \cdot 10^{-11}$ m. Lateral dimensions of a superfluid molecule are defined by the diameter of helium atom nucleus which is $4 \cdot 10^{-15}$ m according to E. Rutherford. These values differ by four orders.

Numerous thin, straight superfluid molecules parallel to each other are moving in a capillary with virtually no friction and no resistance from other molecules like a bundle of parallel, thin and long needles is moving in a vertical cylindrical tube.

* *

There are number of experiments with superfluid helium detailed understanding of which results in the quantum theory has not been gained still. These are, particularly, experiments using thermal agitations and experiments using extremely fine-grained filters, so-called “super-slots”. Knowing the structure of superfluid helium component it is easy to gain an eye-minded understanding of observable phenomena in this case as well.

These experiments were conducted using two vessels containing liquid helium with superfluid component and interconnected with a tube. There was the proper temperature maintained as required for existence of super fluid helium component.

*

As soon as a small heater was placed in a vessel and put into operation the counter flow of normal and superfluid helium components was induced in the connecting tube. The normal component was flowing out of the vessel with the heater that subsequently was receiving superfluid component flowing into it from another vessel.

The eye-minded explanation to this phenomenon is trivial. The temperature exposure induced the local, near-heater disintegration of superfluid molecules into separate (${}^4\text{He}, C$) atoms which then became (${}^4\text{He}, A$) atoms. Therefore, ρ_n/ρ relation increased in that vessel. And since there was a constant temperature maintained in the vessel without a heater ρ_n/ρ relation remained there the same. Due to such difference (${}^4\text{He}, A$) atoms were flowing from the vessel with the heater via the tube to the vessel without a heater partially turning into (${}^4\text{He}, C$) atoms to ensure that ρ_n/ρ relation remains the same in the vessel.

Since long superfluid helium molecules are multi-folded and reside in internally stressed state due to magnetic interactions they tend to fill the whole volume of helium quite densely. Consequently, the place of disintegrated fragments of superfluid molecules in a vessel with a heater is refilled with superfluid molecules due to their movement from a vessel without a heater.

All of these processes took place as long as the heater was in operation.

*

When the tube interconnecting the vessels with superfluid helium was filled with extremely fine powder the counter flow through the tube stopped. The powder filter did not pass the normal component of liquid helium letting through superfluid molecules only. This made the pressure of liquid helium contained in the vessel with the heater on rise.

These findings provide the direct experimental evidence of the fact that lateral dimensions of superfluid helium component are much lesser than Bohr radius.

* *

^3He atom nucleus consists of two protons and one neutron. The nucleus has two nucleonic magnetic clusters which axial lines are parallel (Fig. 2).

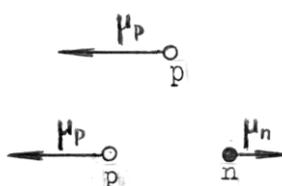


Fig. 2. ^3He nucleus diagram

The distance from the nucleus to the nearest electron is by four orders longer than the one between the nucleus magnetic clusters. That is why magnetic fields of both the magnetic clusters are indistinguishable in terms of atomic electrons which perceive them as a single magnetic field with a doubled magnetic moment. Therefore, neutral ^3He may only exist in an “electron shell” of C shape. And since the first ionization potential for ($^3\text{He}, C$) is 1.313 eV such ^3He shape can only exist at extremely low temperatures; ^3He atoms exist in the natural environment in ionized form only.

Due to the nucleus magnetic field specificity neutral ^3He has weaker electric dipole properties than ^4He . That is why ^3He becomes liquid at lower temperatures than ^4He while its superfluid component is also formed at lower temperatures than in case with ^4He .

Superfluid component of ^3He has the same properties as the one of ^4He .

Nikolay Nikolaevich Leonov

Cand. Sc. (Physics and Mathematics), Senior Research Associate, 73 publications.

Apartment 22, Raduzhnaya Street 1, Nizhny Novgorod, 603093, Russian Federation

Tel: 831-4361015

E-mail: NNLeonov@inbox.ru

Микромир 4.
Сверхтекучесть гелия

Леонов Н.Н.

При чрезвычайно низких температурах в жидком гелии существуют атомы, в которых электроны и ядро расположены на одной и той же прямой, и оба электрона находятся с одной и той же стороны от ядра. Существование таких атомов позволяет достичь простого, наглядно-образного понимания всех удивительных свойств сверхтекучего гелия.

*

Гелий в жидком состоянии обладает очень странными и удивительными свойствами. Эти свойства жидкого гелия были обнаружены в результате необычайно остроумных и весьма искусных экспериментов

При очень низких температурах в жидком гелии появляется сверхтекучая компонента со сверхвысокой теплопроводностью, сверхнизкой вязкостью и со способностью забираться на вертикальные стенки содержащих её сосудов и перетекать через них.

Гелий обладает двумя стабильными изотопами – ${}^4\text{He}$ и ${}^3\text{He}$ и является единственным элементом, обладающим уникальным свойством сверхтекучести в жидком состоянии. В жидком состоянии ${}^4\text{He}$ находится при температуре $T < 4,21\text{K}$, а ${}^3\text{He}$ – при $T < 3,91\text{K}$. Сверхтекучая компонента возникает в ${}^4\text{He}$ при $T < 2,17\text{K}$, а в ${}^3\text{He}$ – при $T < 2,6 \cdot 10^{-3}\text{K}$.

Наглядно-образное понимание явления сверхтекучести жидкого гелия достигнуто в результате построения структурных моделей атомов гелия.

*

Ядро ${}^4\text{He}$ состоит из двух протонов и двух нейтронов, и обладает двумя нуклонными

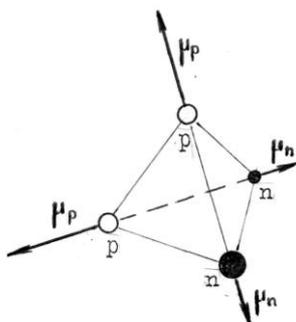


Рис.1. Схема ядра ${}^4\text{He}$

магнитными кластерами (рис.1). Нейтральный атом ${}^4\text{He}$ имеет в своей «электронной оболочке» два электрона и может обладать тремя разными формами «электронной оболочки». В форме *A* на каждом нуклонном магнитном кластере находится по одному электрону. В форме *B* оба электрона находятся только на одном из кластеров, по разные стороны от ядра. В форме *C* оба электрона находятся на одном и том же кластере, с одной и той же стороны от ядра.

Форма *A* наиболее устойчива. Потенциал первой ионизации атома (${}^4\text{He}, A$) равен 24,586эВ. Потенциал первой ионизации формы *B* равен 2,788эВ. Самой слабой устойчивостью обладает форма *C*. Ее внешний электрон далеко отстоит от ядра. Чтобы его выбить из атома, достаточно энергии в 1,449эВ.

*

Наличие у атомов гелия «электронной оболочки» формы *C* позволяет получить наглядно-образное объяснение всех необычных свойств сверхтекучего жидкого гелия.

В форме *C* внешний электрон отстоит от ядра в 20 раз дальше, чем внутренний – наиболее близкий к ядру. Поэтому атом (${}^4\text{He}, C$) обладает ярко выраженными электрическими дипольными свойствами. Благодаря электрическому притяжению, атомы (${}^4\text{He}, C$) могут объединяться в длинные, нитеподобные многоатомные молекулы. Магнитные взаимодействия не позволяют атомам в этих молекулах слишком сильно сближаться.

Эти молекулы могут состоять из двух атомов, если уровень внешнего воздействия не превышает 0,862эВ. Чем меньше энергия внешних воздействий, тем большее количество атомов объединяется в длинную молекулу.

Атом (${}^4\text{He}, C$), если отвлечься от размеров электронов и атомного ядра, имеет одномерную форму. Следовательно, длинные, многоатомные молекулы, состоящие из атомов (${}^4\text{He}, C$), имеют нитевидную форму.

Самое интересное заключается в том, что, благодаря магнитному ориентационному эффекту, эти длинные многоатомные молекулы стремятся принять прямолинейную форму, форму длинной тонкой спицы.

*

Среди необычных свойств сверхтекучего гелия, прежде всего, обращают внимание на то, что он обладает сверхвысокой (по сравнению с другими жидкостями) теплопроводностью и сверхнизкой вязкостью. Однако, самым удивительным, почти

фантастическим выглядит его способность подниматься вверх вдоль вертикальных стенок содержащих его сосудов и перетекать через эти стенки. Теплопроводностью и вязкостью разной величины обладают все жидкости без исключения. Способностью же перетекания через возвышенные стенки обладает только сверхтекучая компонента жидкого гелия.

В экспериментах установлено, что сверхтекучий гелий покрывает вертикальные стенки довольно толстой (порядка сотни атомных размеров) пленкой. Из-за наличия такой пленки физики решили, что перетекание жидкого гелия через стенки сосудов можно объяснить «сифонным» эффектом. Это объяснение было бы правдоподобным, если бы им удалось объяснить, как эта пленка образуется.

То, что сверхтекучий гелий состоит из сверхдлинных нитевидных многоатомных молекул, стремящихся распрямиться, под влиянием магнитных взаимодействий между элементами этих молекул, позволяет получить чрезвычайно простое, наглядно-образное объяснение процесса образования такой пленки.

При чрезвычайно низких температурах, одномерные многоатомные молекулы гелия могут достигать макроскопической длины. Поэтому, в ограниченных сосудах с жидким гелием они оказываются многократно свернутыми.

Свернутые нитевидные гелиевые молекулы, из-за магнитного ориентационного эффекта, стремятся распрямиться и находятся во внутренне напряженном состоянии, как свернутые пружинки. Благодаря внутренней напряженности, концевые и промежуточные фрагменты нитевидных молекул выдавливаются из жидкости вблизи поверхностей твердых тел, контактирующих с жидким гелием. Под давлением, создаваемым внутренним напряжением, фрагменты нитевидных молекул заползают на поверхности этих тел, в том числе и на вертикальные стенки, и обволакивают их гелиевой пленкой.

Если вертикальные стенки не слишком высоки, то эти молекулы могут выдавливаться за края вертикальных стенок содержащих их сосудов и перетекать через эти края.

Если края этих стенок выполнить в виде горлышка, направленного внутрь этого же сосуда, то жидкий гелий будет стекать опять в тот же сосуд, и это будет продолжаться до тех пор, пока поддерживается необходимая температура в жидком гелии.

*

Эксперименты с жидким гелием обнаружили наличие сверхвысокой теплопроводности у сверхтекучего гелия: внесение теплового возмущения в любую весьма малую часть жидкого гелия сопровождается практически мгновенным рассеиванием и выравниванием этого теплового возмущения по всему объему жидкого гелия.

Теплопроводность – понятие, связанное с передачей тепла от одного слоя какой-либо среды к другому, характеризующее скорость распространения тепла в среде.

Обычные жидкости состоят из множества мельчайших молекулярных частиц. Тепло в этих жидкостях распространяется за счет относительных перемещений частиц жидкости и их соударений. Происходит это с ограниченными скоростями.

Нитевидные многоатомные молекулы сверхтекучего гелия настолько длинны, что каждая из них достаточно плотно заполняет весь объем жидкого гелия. А так как тепловые возмущения в таких молекулах распространяются со скоростью электромагнитных взаимодействий, то любое тепловое возмущение, приложенное даже к достаточно малому фрагменту жидкого гелия, очень быстро (практически мгновенно) растекается и выравнивается по всему этому объему.

*

Эксперименты показали, что сверхтекучий гелий, при движении в капиллярах, обладает чрезвычайно низкой вязкостью.

Под вязкостью понимается трение между соседними слоями движущейся жидкости. Характерной особенностью обычной жидкости является наличие в ней молекулярных агрегатов с упорядоченной структурой и с «мерцающей» периферией. Это «мерцание» выражается в том, что внешние атомы в молекулярных агрегатах то присоединяются к агрегату, то уходят из него из-за температурных флуктуаций.

Трение в обычной жидкости образуется, в основном, за счет частичного зацепления друг за друга молекулярных агрегатов. Чем больше энергообмен при таких зацеплениях, тем больше трение, тем больше вязкость.

Обычные жидкости обладают заметным трением между соседними слоями. Это трение существенно ограничивает скорость течения жидкости.

Эксперименты показали, что скорость течения жидкого гелия в капиллярных каналах необычайно высока по сравнению со скоростью течения других жидкостей и что вязкость сверхтекучей компоненты гелия ничтожно мала. Причина этого заключается в том, что сверхтекучий гелий состоит из длинных, очень тонких молекул. Эти молекулы, благодаря магнитным взаимодействиям, стремятся распрямиться. В капиллярах ничто не мешает им это сделать. Поэтому в капиллярах сверхтекучий гелий представляет собой множество параллельных друг другу и самому капилляру длинных, тонких, спицеподобных молекул.

Наличие таких молекул в жидком гелии вызывает существование реальных, а не условных слоев в жидкости. Эти слои одномерны. Между этими слоями, а также между этими слоями и слоями нормального жидкого гелия нет ни атомного обмена, ни зацепления молекулярных агрегатов. Этим и объясняется низкая вязкость сверхтекучего гелия в обычных сосудах и сверхнизкая вязкость в условиях капиллярности.

Размеры атомов (${}^4\text{He}, A$), из которых состоит компонента жидкого гелия, не обладающая свойством сверхпроводимости, оцениваются величиной «Боровского радиуса», равного $5,3 \cdot 10^{-11}$ м. Поперечные размеры сверхтекучей молекулы, определяются величиной диаметра ядра атома гелия, оценка которого, по Э. Резерфорду, равна $4 \cdot 10^{-15}$ м. Эти величины расходятся на четыре порядка.

Множество тонких, длинных, прямолинейных и параллельных друг другу сверхтекучих молекул движется по капилляру практически без трения, не испытывая сопротивления своему движению со стороны других молекул, так же, как пучок параллельных, тонких и длинных спиц движется в вертикальной цилиндрической трубке.

* *

Существует ещё ряд экспериментов со сверхтекучим гелием, детальное понимание результатов которых в квантовой теории до сих пор не достигнуто. Это эксперименты с использованием тепловых возмущений и эксперименты с использованием чрезвычайно мелкозернистых фильтров – «сверхщелей». Зная структуру сверхтекучей компоненты гелия, нетрудно достичь и здесь наглядно-образного понимания наблюдаемых явлений.

Эти эксперименты проводились на двух сосудах, содержащих жидкий гелий со сверхтекучей компонентой, соединенных между собой трубкой. В обоих сосудах поддерживалась температура существования сверхтекучей компоненты гелия.

*

Когда в один из сосудов помещался небольшой нагреватель и по нему подводилось тепло, в соединительной трубке начиналось встречное течение обычной и сверхтекучей компонент гелия. Из сосуда с нагревателем вытекала обычная компонента, а в него, из другого сосуда, втекала сверхтекучая компонента.

Наглядно-образное объяснение этого явления тривиально. В окрестности нагревателя, под влиянием температурных воздействий, происходил локальный распад сверхтекучих молекул на отдельные атомы (${}^4\text{He}, C$), которые превращались в атомы (${}^4\text{He}, A$). Поэтому в этом сосуде происходило увеличение отношения ρ_n/ρ . А так как в сосуде без нагревателя поддерживалась постоянная температура, то отношение ρ_n/ρ оставалось в нем постоянным. Из-за этой разности из сосуда с нагревателем в сосуд без нагревателя, через соединительную трубку, перетекали атомы (${}^4\text{He}, A$), часть которых превращалась в атомы (${}^4\text{He}, C$), чтобы отношение ρ_n/ρ в сосуде без нагревателя оставалось неизменным.

Так как длинные сверхтекучие молекулы гелия многократно свернуты и находятся, благодаря магнитным взаимодействиям, во внутренне напряженном состоянии, то они стремятся достаточно плотно заполнить весь объем жидкого гелия. Вследствие этого, место распавшихся фрагментов сверхтекучих молекул, в сосуде с нагревателем, вновь

заполнялось сверхтекучими молекулами, за счет их перемещения из сосуда без нагревателя.

Все эти процессы протекали, пока в нагреватель подавалось тепло.

*

Когда соединительная трубка между сосудами со сверхтекучим гелием была заполнена чрезвычайно мелким порошком, встречное течение через эту трубку прекратилось. Порошковый фильтр не пропускал нормальную компоненту жидкого гелия, пропуская только сверхтекучие молекулы. Из-за этого давление жидкого гелия в сосуде с включенным нагревателем повышалось.

Эти результаты дают прямое экспериментальное доказательство того, что поперечные размеры сверхтекучей молекулы гелия намного меньше величины «Боровского радиуса».

* *

Ядро атома ${}^3\text{He}$ состоит из двух протонов и одного нейтрона. Оно обладает двумя нуклонными магнитными кластерами, осевые линии которых параллельны (рис.2).

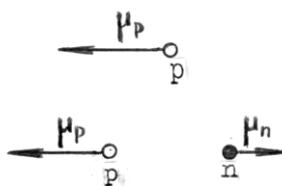


Рис.2. Схема ядра ${}^3\text{He}$

Расстояние от ядра до ближайшего электрона на четыре порядка больше, чем расстояние между магнитными кластерами ядра. Из-за этого, магнитные поля обоих магнитных кластеров, с точки зрения атомных электронов, неразличимы и воспринимаются атомными электронами как одно единое магнитное поле с удвоенной величиной магнитного момента. Поэтому в нейтральном атоме ${}^3\text{He}$ «электронная оболочка» может существовать только в форме C . А так как потенциал первой ионизации атома (${}^3\text{He}, C$) равен 1,313эВ, то эта форма атома ${}^3\text{He}$ может существовать только при очень низких температурах; в естественных условиях ${}^3\text{He}$ существует только в ионизированном виде.

Из-за специфики магнитного поля ядра, нейтральный атом ${}^3\text{He}$ обладает более слабыми электрическими дипольными свойствами, чем ${}^4\text{He}$. Поэтому ${}^3\text{He}$ переходит в жидкое состояние при более низких температурах, чем ${}^4\text{He}$, а его сверхтекучая компонента образуется также при более низких температурах, чем в ${}^4\text{He}$.

Сверхтекучая компонента в ${}^3\text{He}$ имеет те же свойства, что и сверхтекучая компонента в ${}^4\text{He}$.

Леонов Николай Николаевич

Кандидат физико-математических наук, старший научных сотрудник, 73 публикации.

РФ, 603093, Нижний Новгород, ул. Радужная, д.1, кв.22.

Тел.: 831-4361015,

E-mail: NNLeonov@inbox.ru