

Примесные частицы в He II. Нано- и мезоскопические проявления сверхтекучести

Eugene B. Gordon
Institute of Problems of Chemical Physics,
142432, Chernogolovka, Russia
e-mail: *Gordon.eb@gmail.com*

Школа-конференция «Идеи и методы физики
конденсированного состояния»
Сочи, пансионат «Буревестник»,
17 сентября 2015 г.

Явление **сверхтекучести** жидкого гелия, будучи по своей природе чисто **квантовым явлением**, в основном проявляется в макроскопических эффектах —

1. отсутствие трения при движении тел в жидкости
2. фонтанный эффект
3. аномально высокая скорость отвода тепла

Однако, поскольку само явление сверхтекучести является следствием определенной симметрии волновых функций гелия, можно ожидать его проявлений и для меньших масштабов.

- ▣ «**Физики** — концентрируют свое внимание на атомах и молекулах, и согласны платить по доллару за каждый атом созданного ими уникального вещества».
- ▣ «**Химики** — мыслят молями вещества и вынуждены стремиться к цене произведенного продукта в один доллар за моль»
 - ▣ щель в $6 \cdot 10^{23}$
- ▣ **Если платить по доллару за миллион атомов, то всех имеющихся на Земле долларов не хватит, чтобы приобрести один **миллиоль** этого вещества**

Любимые игры человечества

- ▣ **А. Вещества:** взрывчатка и горючее
- ▣ **Б. Энергия:** свет

- ▣ Химики были вне конкуренции (А – порох, гексоген и бензин; Б – от лучины до люминесцентной лампы).

- ▣ В 20-м веке физики вырвались вперед (ядерная энергия и лазеры). Таунс.
- ▣ Воодушевленные этим они решили создать
- ▣ **HEDM (High energy dense material)**

Backbone N_xH compounds at high pressures

Alexander F. Goncharov,^{1,2,3} Nicholas Holtgrewe,^{2,4} Guangrui Qian,^{6,7,8} Chaohao Hu,⁸ Artem R. Oganov,^{5,6,7,8,9} Maddury Somayazulu,² Elissaios Stavrou,² Chris J. Pickard,¹⁰ Adam Berlie,¹ Fei Yen,¹ Mahmood Mahmood,⁴ Sergey S. Lobanov,^{2,11} Zuzana Konôpková,¹² and Vitali B. Prakapenka¹³

¹Key Laboratory of Materials Physics, Institute of Solid State Physics, Chinese Academy of Sciences, 350 Shushanghu Road, Hefei, Anhui 230031, China

²Geophysical Laboratory, Carnegie Institution of Washington, 5251 Broad Branch Road, Washington, D.C. 20015, USA

³University of Science and Technology of China, Hefei, 230026, China

⁴Howard University, Washington, D.C. 20059, USA

⁵Skolkovo Institute of Science and Technology, Skolkovo Innovation Center, Moscow 143026, Russia

⁶Department of Geosciences, State University of New York, Stony Brook, New York 11794-2100, USA

⁷Center for Materials by Design, Institute for Advanced Computational Science, State University of New York, Stony Brook, New York 11794-2100, USA

⁸Guangxi Key Laboratory of Information Materials, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China

⁹Moscow Institute of Physics and Technology, 9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, Moscow Region 141700, Russian Federation

¹⁰University College London, Gower St., London WC1E 6BT, United Kingdom

¹¹V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, SB RAS, 3 Pr. Ac. Koptya, Novosibirsk 630090, Russia

¹²DESY Photon Science, Notkestrasse 85, D-22607 Hamburg, Germany

¹³Center for Advanced Radiation Sources, University of Chicago, Chicago, Illinois 60637, USA

(Received 12 March 2015; accepted 22 May 2015; published online 5 June 2015)

I. INTRODUCTION

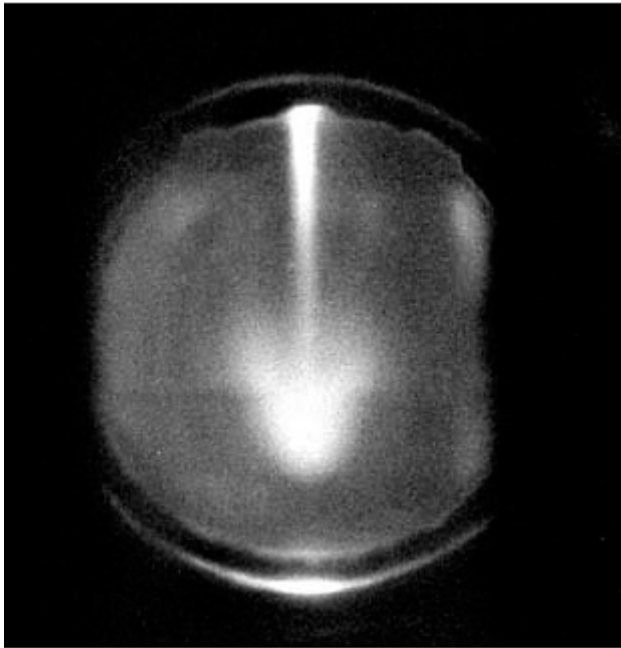
“... On the other hand, metastable N–H compounds (as well as other nitrogen-rich systems) at ambient pressure would be superior high energy-density materials (HEDM) due to the substantial energy difference between single and triple nitrogen-nitrogen bonds”

Естественно, физики начали с использования ядерной радиации - радиационно-химическое накопление атомов и свободных радикалов при низких температурах.

- ▣ Использование осаждения на холодной подложке продуктов электрических разрядов и применение мощного сжатия с произведенной работой в доли ЭВ/молекулу началось позже.
- ▣ Я был взят на работу....

Введение атомного пучка в сверхтекучий гелий через его поверхность

*Е.Б.Гордон, Л.П.Межов-Деглин, О.Ф.Пугачёв.
Письма в ЖЭТФ, т.19 вып.2 с.103 (1974)*



Никакой особой роли сверхтекучести не предполагалось, привлекали только

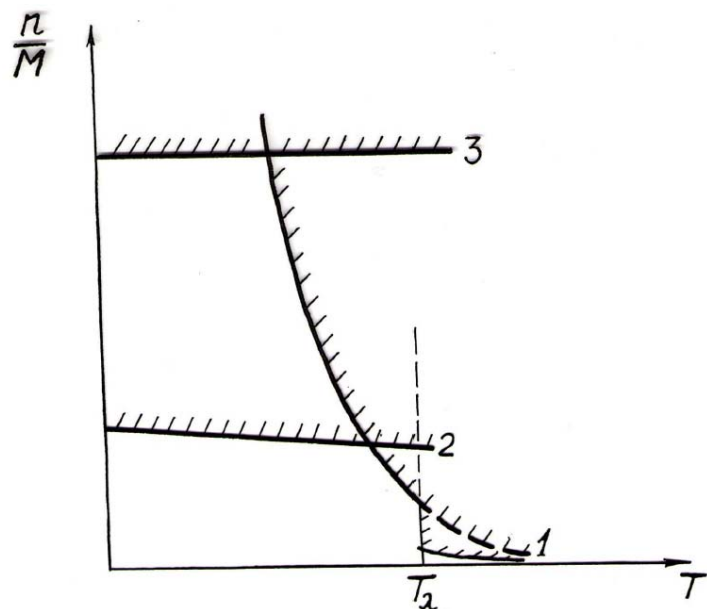
- более низкие температуры
- низкое давление паров для введения примесей из газа
- высокая теплопроводность HeII, обещавшая интенсивный отвод тепла из зоны конденсации.

Большие, но скромные для взрывчатки концентрации.

Взрыв при переходе λ -точки.

Тепловая устойчивость конденсированных систем, содержащих стабилизированные атомы

*Е.Б. Гордон, Л.П.Межов-Деглин, О.Ф.Пугачёв, В.В.Хмеленко, ЖЭТФ
т. 73 (2), с. 952 (1977)*



Одного условия изотермической стабильности, когда время жизни атома относительно его рекомбинации при заданной T больше, чем время хранения при этой температуре, **недостаточно**

Два типа неизотермической неустойчивости
1 – **Тепловой взрыв**, когда отвод тепла через границу гранулы не справляется с тепловыделением внутри ее при спонтанной рекомбинации атомов.

2 – **Тепло-волновой взрыв**, когда тепловая волна, распространяющаяся от места спонтанной рекомбинации, инициирует последующую рекомбинацию.

3. Условие **отсутствия прямого контакта** между атомами

Примесь-гелиевая твердая фаза

Анализируя экспериментальные данные мы /*Е.Б. Гордон, А.Пельменёв, Е.А.Попов, О.Ф.Пугачёв, В.В.Хмеленко* , *Chem. Phys. Lett.* 155 (3), p. 301 (1989)/ предположили, что за счет вандерваальсового взаимодействия с примесью происходит локализация ближайших атомов гелия. Такие «тяжелые» гелиевые кластеры должны вести себя как классические частицы, и поэтому при температурах 2 – 4 К смерзаться в субстанцию, названную авторами ПГТФ. Несмотря на многочисленные попытки не удалось получить серьезных доказательств существования такого объекта. Те группы, которые продолжают использовать струевую методику введения примесей в сверхтекучий гелий , называя продукт примесь-гелиевой фазой, характеризуют скорее способ получения образца, чем его структуру. Исключение составляет работа /*P. Moroshkin, A. Hofer, S. Ulzega, and A. Weis, Nature Phys.* 3, 786 (2007)./, в которой в жидком гелии наблюдалось образование твердого тела, состоящего из гелия, «скрепленного» небольшим количеством атомов щелочного металла.

В процессе многочисленных и разнообразных попыток стабилизировать примеси в жидком и твердом гелии создавалось впечатление, что в сверхтекучем гелии дело обстоит даже хуже, чем в нормальном.

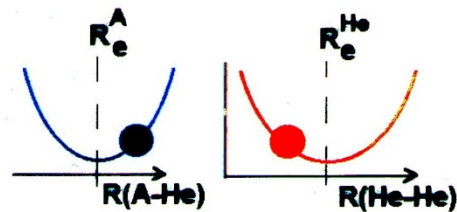
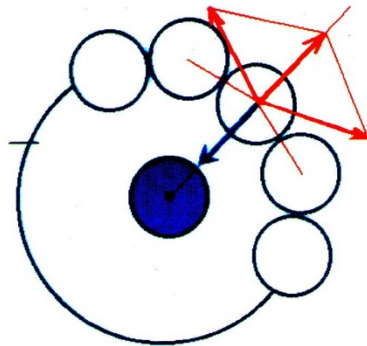
Так потом и оказалось

Фундаментальные аспекты матричной изоляции атомов, молекул и малых кластеров в жидком и твердом гелии

- При исследовании структуры ближайшего гелиевого окружения взвешенных частиц и его возмущающего действия на их спектры приходилось учитывать, что жидкий гелий даже в нормальном состоянии является квантовой жидкостью.
- В большинстве случаев по аналогии с поведением в жидком гелии избыточного электрона и атомных и молекулярных ионов использовалась модель квантовых пузырьков – bubbles и «снежков» - snowballs, соответственно.
- Считалось, что атомы с наружным s – электроном и ридберговские состояния образуют bubbles, а атомы и молекулы с замкнутой внешней оболочкой - snowballs.
- Но, как было отмечено в /*Е.Б. Гордон, А.Ф. Шестаков, ФНТ т. 26(1) с.5 (2000)* /, такая классификация может ввести в заблуждение.

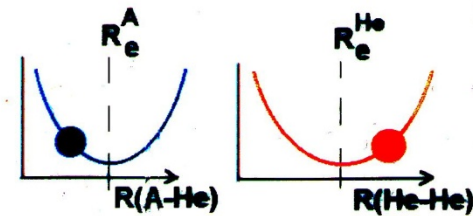
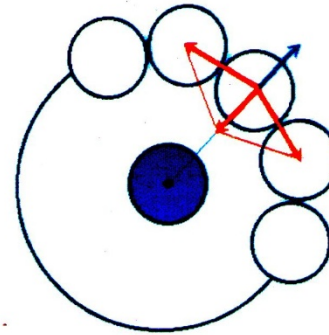
Attraction to

a core is compensated by **He-He repulsion**



Repulsion from

a core is compensated by **He-He attraction**



- Сила направлена к минимуму потенциала взаимодействия, поэтому в **snowball** сжатая оболочка находится на расстоянии, **большем чем равновесное**, а в **bubble** растянутая оболочка находится на расстоянии, **меньшем чем равновесное**.

- В любом случае, в жидком гелии квантовые эффекты для тяжелых частиц (атомов и молекул) с наружными s-электронами гораздо менее выражены, чем для свободного электрона. Конечно гелий, окружающий оптически активные примесные частицы, влиял на вид их оптических спектров, но никакого последствия перехода жидкого гелия в сверхтекучее состояние замечено не было.

Гелиевый «пульверизатор»

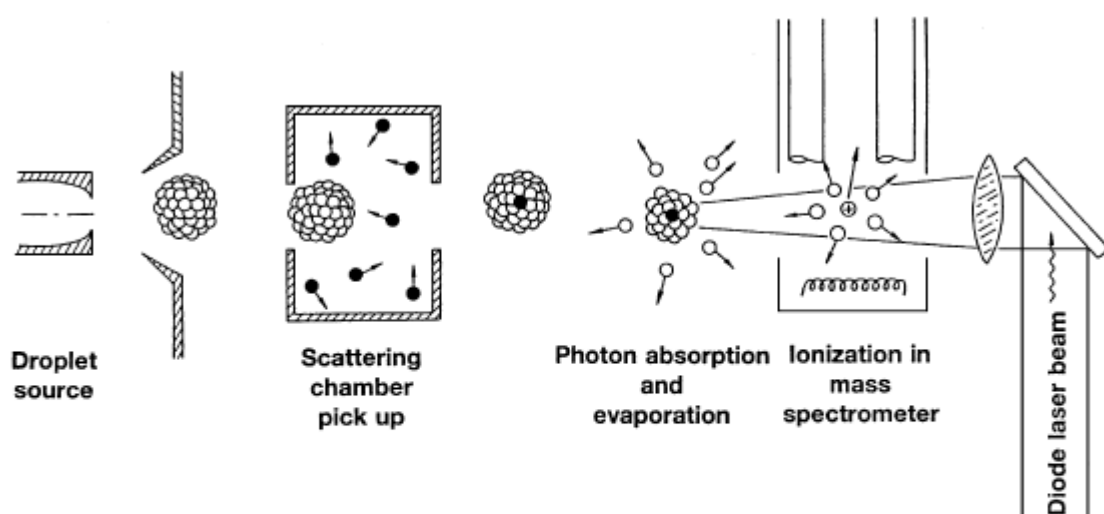


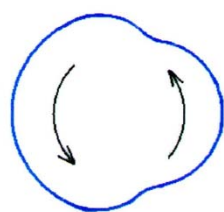
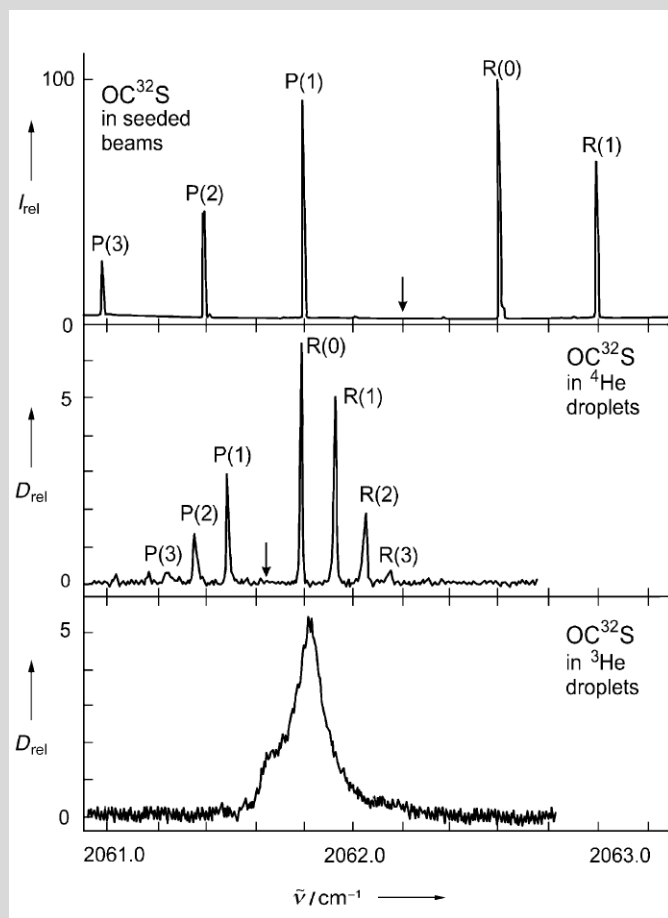
Figure 1 Schematic diagram of the molecular beam apparatus for the depletion spectroscopy of molecules embedded in liquid helium droplets (DHe). Droplets are produced via the nozzle beam expansion of He gas from the droplet source. They pick up foreign molecules in the scattering chamber and are detected via quadrupole mass spectrometer with electron-impact ionizer. The output of a continuous tunable diode laser is directed antiparallel to the droplet beam. Reprinted from Reference 120.

Преимущества

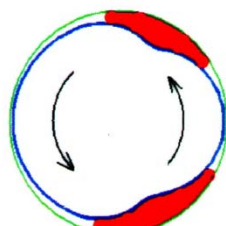
1. Нет слипания частиц, изолированных по одиночке в капле.
2. Поглощение кванта света в приводило к сильному уменьшению числа атомов гелия в нанокapле – сверхчувствительная depletion spectroscopy.
3. Низкие температуры (0.38 К для ^4He и 0.15 К для ^3He) способствовали упрощению спектров и сужению спектральных линий.

Изменяя температуру сопла и давление газа на его входе можно было в широких пределах – от 10 до 1000 нм - менять размер капель, при этом распределение по размерам в ансамбле было достаточно узким. Методика была тем более удобна, что не требовала, в принципе, использования жидкого гелия как такового. В мире работает более 50 таких установок.

Колебательно-вращательный спектр молекулы OCS



B_0, E_{barrier}



$B' < B_0$
 $E'_{\text{barrier}} \ll E_{\text{barrier}}$

1. В жидком He постоянная B в 3 раза меньше чем в вакууме и матрицах тяжелых инертных газов. Объяснение - и в ^4He , и в ^3He молекуле более выгодно захватить во вращение несколько атомов He и принять форму фигуры вращения, чем вращаться туннельным образом сквозь «неудобные» области. Это – **не сверхтекучесть**.
2. Но сами вращательные линии в сверхтекучем ^4He были в 5 раз уже чем в нормальном ^3He . Этот эффект был тщательно изучен и отнесен к **проявлению сверхтекучести на наномасштабе**. Причина - в сверхтекучем гелии имеет место когерентное вращение молекулы, в то время как в нормальной вязкой жидкости происходит вращательная диффузия.

Grebenyev, S., Toennies, J.P., and Vilesov, A.F.
(1998) *Science*, 279(5359), 2083.

Этому эффекту было уделено большое внимание (десятки статей в самых престижных журналах)

Оказалось, однако, что существуют другие, гораздо более **сильные и практически важные проявления сверхтекучести**, определяющие свойства частиц , взвешенных в **холодном жидком гелии**.

- ▣ Я рассказывал о них в прошлые годы.
- ▣ Благодаря эксплуатации этих эффектов мы стали монополистами в получении ультратонких нанопроволок практически из любого металла и сплава

Нанопроволоки



Квантовые
приборы

Катализаторы
химических
реакций

Нанокатализ

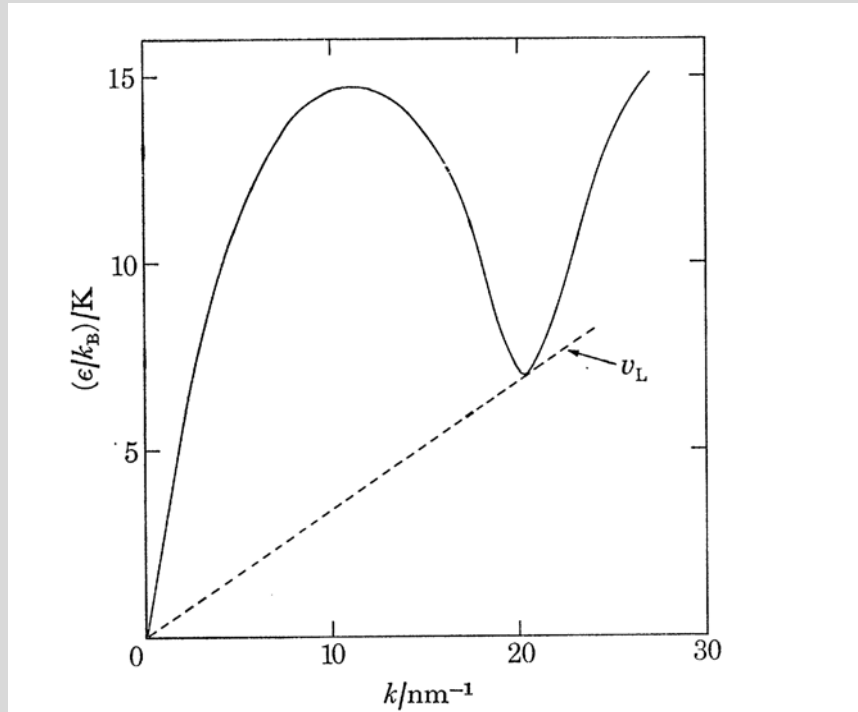
1. 90% химической промышленности основан на каталитических реакциях.
2. Что такое нанокатализ.
3. Модельная реакция окисления СО.
4. Возможность управления катализом электрическим полем.
5. Нестабильность тонких нанопроволок.

Но сегодня я хотел бы остановиться на «Идеях физики конденсированного состояния», которые ответственны за эти эффекты

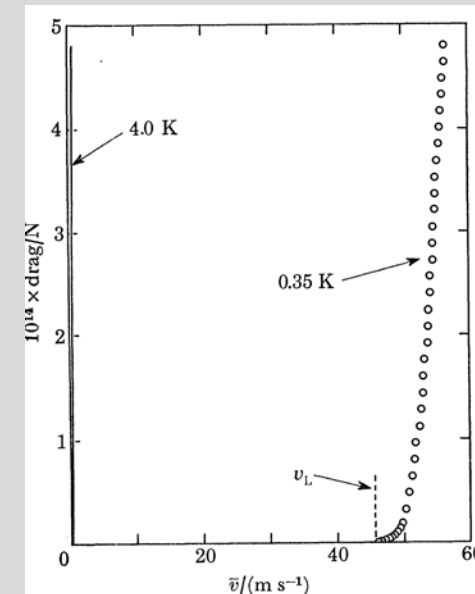
- 1. Существование квантованных вихрей в сверхтекучем гелии было предсказано Онзагером для устранения парадокса, связанного с невозможностью, при описании He II как двухкомпонентной жидкости, участия сверхтекучей компоненты во вращении жидкого He как целого. Для его устранения предлагалось допустить возникновение в жидкости практически одномерных ($\approx 1 \text{ \AA}$) длинных, вращающихся с квантованной скоростью трубок, внутри которых нет сверхтекучести.
- 2. Оказалось, что эти топологические дефекты реально существуют, образуются практически при любом возбуждении He II, и, более того, стремятся захватить в себя любую (легкую и тяжелую) примесь, попавшую в гелий.

**«Сверхтекучие» эффекты в сверхтекучем гелии
существуют только при достаточно слабых его
возмущениях**

Вязкость He II: Трение отсутствует до скоростей движения, меньших скорости Ландау



После достижения скорости Ландау (при которой возможно образование ротонов) энергия движения тратится на образование вихревых колец; при турбулентном движении образование квантованных вихрей ограничивает скорость гораздо раньше



Сила сопротивления движению отрицательного иона в нормальном (4.0 K) и в сверхтекучем (0.35 K) гелии, как функция скорости иона, v_L — скорость Ландау

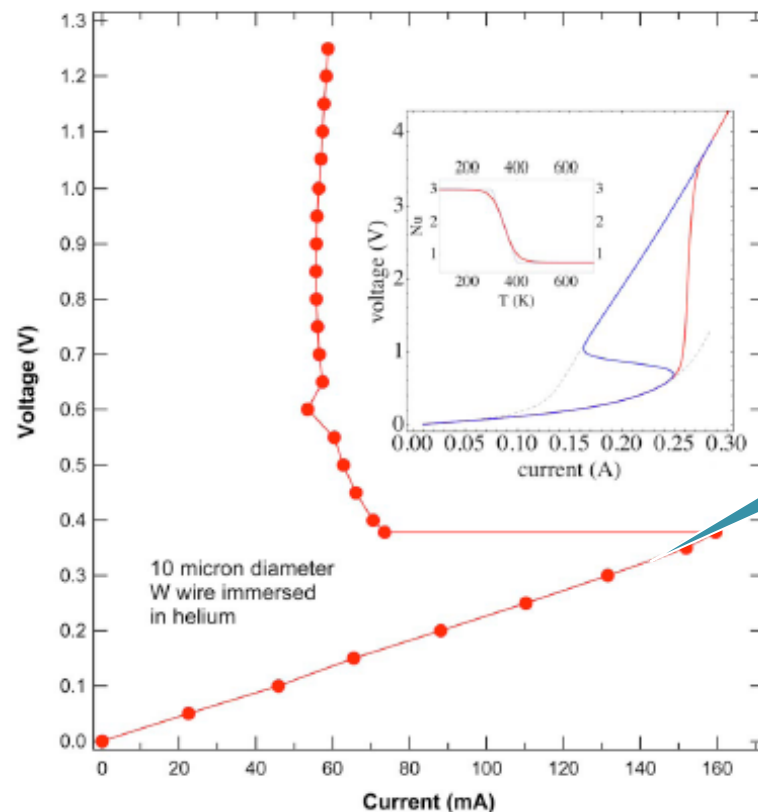
Allum, et al, Philosophical Transactions of the Royal Society A, vol. 284 (1977), p. 179

Предельный поток тепла в Helium

не может превышать 3 Вт/см^2

Heating 10 μ tungsten wire in Helium

I.F. Silvera et al Rev. Sci. Instrum. 80, 043901 (2009)



The wire temperature jump from 1.5 K to 1200 K took place at electrical power equivalent to 3 W/cm^2

“above a certain current a vapor sheath formed around the filament, insulating it from the liquid and it would glow at temperatures up to a few thousand kelvin”

- ▣ Величина предельного потока тепла и сценарий дальнейшего поведения системы ($\text{He II} \rightarrow \text{He I} \rightarrow \text{газовая рубашка}$) доказаны лишь для достаточно больших объектов.
- ▣ Предельная скорость безвязкостного движения для больших частиц существенно ниже скорости Ландау.

Я столкнулся с этой проблемой довольно случайно

■ Мы с Ючи Окудой решили в 2006 г. развить появившуюся недавно в работу [G. P. Bewley, D. P. Lathrop and K. R. Sreenivasan, *Nature*, 2006, 441, 588](#), согласно которой крупинки водорода впрыскиваемые в He II выстраивались вдоль некоторых линий, предположительно – вихрей (выстраивались вдоль оси вращения). Мы стартовали с молекул и получили прочные нити. Я выстроил простую, но наивную логическую цепочку – захват в вихри, высокая вероятность столкновений, удлинение кластеров –продуктов и увеличение их жизни в вихре и т.д. И написал сообщение с предложением производить нанопроволоки.

■ Окуда прислал мне возмущенное письмо, но от соавторства не отказался – отказался только посылать в японский журнал – и мы опубликовали в русском.

Вернувшись в Россию я стал строить установку с лазерной абляцией. У Антуана Вайса (Швейцария) было нечто пригодное . Стали делать одновременно в ЧГ и в Фрибурге - и там, и там сразу получилось. Только задумавшись о процессах более глубоко, я понял, что Окуда был прав: вероятность успеха была столь мала, что начинать и не стоило. Но было уже поздно.

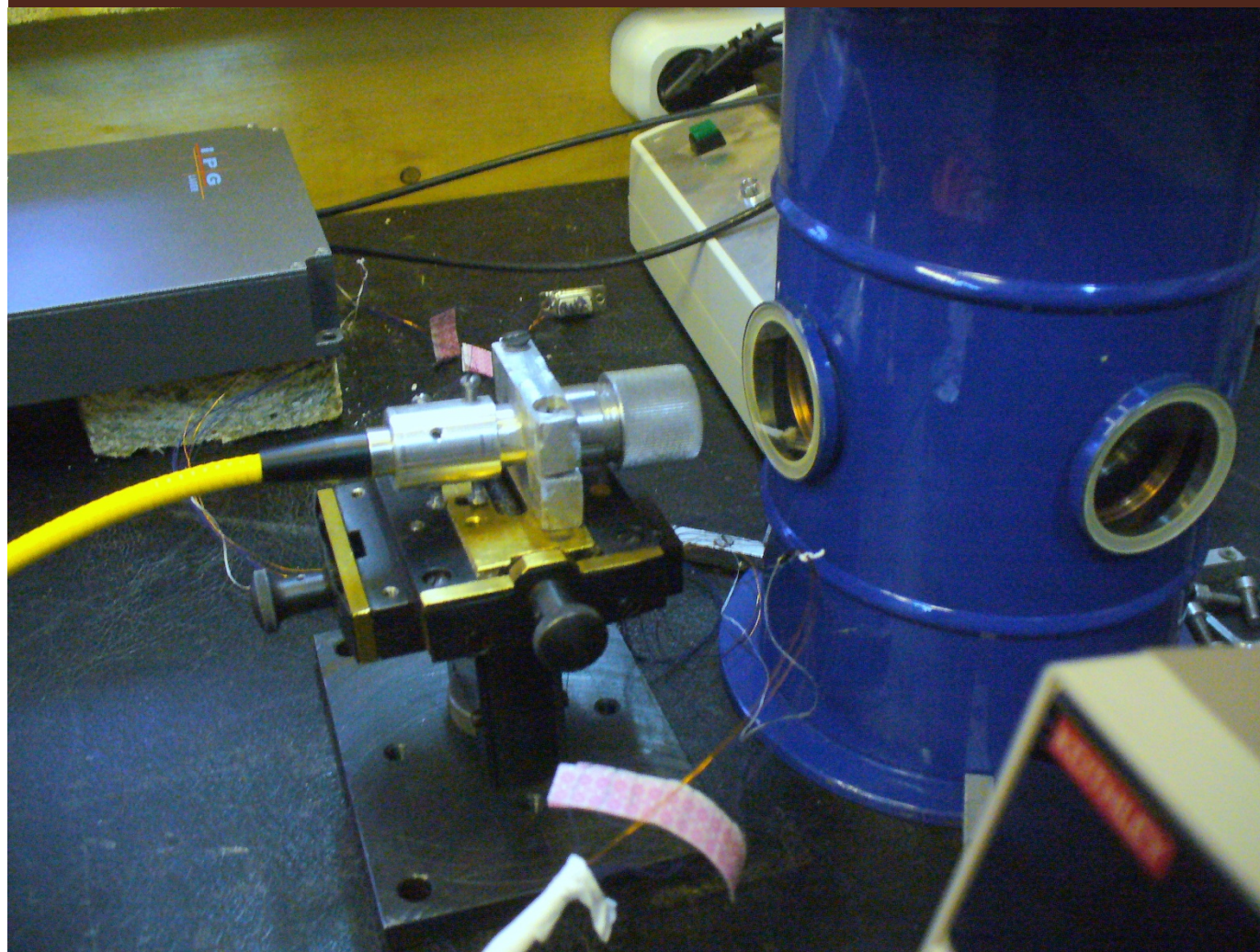
Экспериментальная реализация

Использовалась абляция с погруженных в гелий металлических мишеней. Вихри образовывались от лазерного «звука» в фокусе, т.е. появлялись в том же месте и в то же время, что и рабочий материал.

Догадались поместить иглы - электроды вблизи реакционной зоны ожидая при этом, что вместе с вихрями на острия сядут выросшие внутри их нанопроволоки и замкнут цепь.

Измеряли сопротивление прямо внутри криостата, а структуру смотрели на ТЕМ электронном микроскопе.

**Количество материала для изготовления
нанопроволок столь мало, что можно использовать
маломощный волноводный лазер**



**Иттербиевый
лазер**

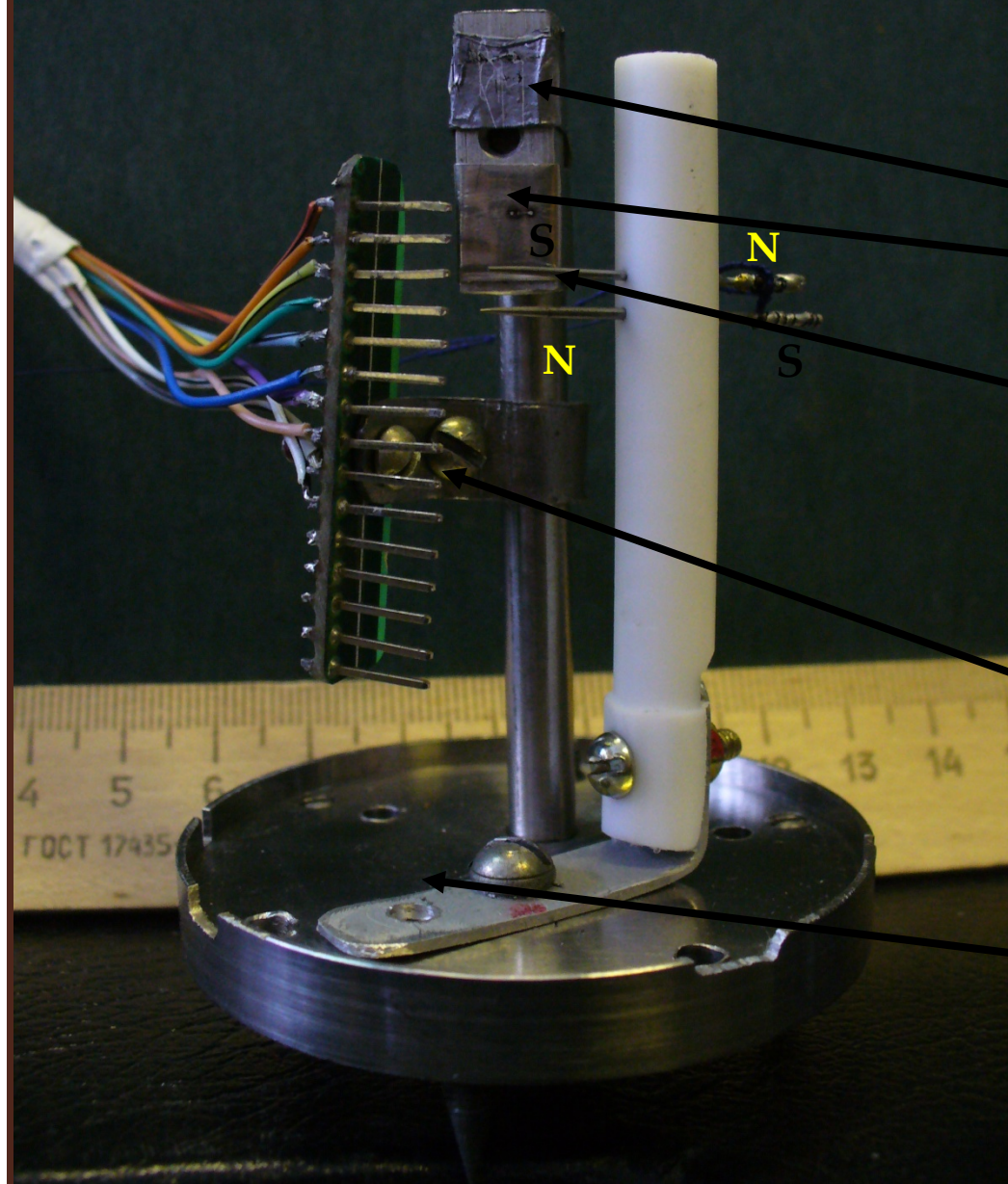
$$\lambda = 1.06 \mu$$

$$E = 10^{-4} \text{ J}$$

$$\tau = 0.4 \text{ ns}$$

$$f = 0.5 - 4 \text{ kHz}$$

Experimental cell



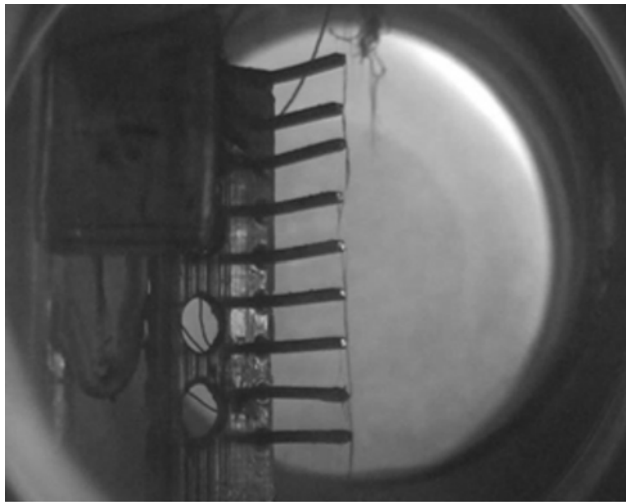
Metallic targets, the craters in laser focuses are seen

The pair of oppositely magnetized sewing needles are seen

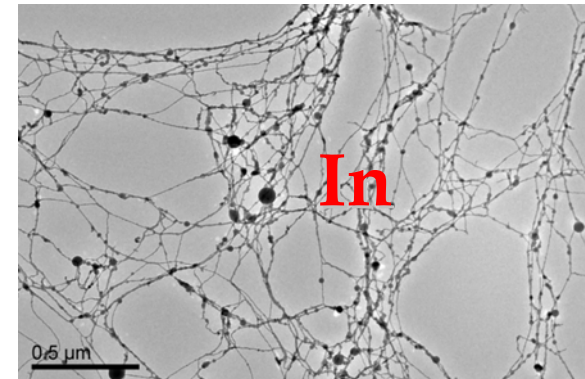
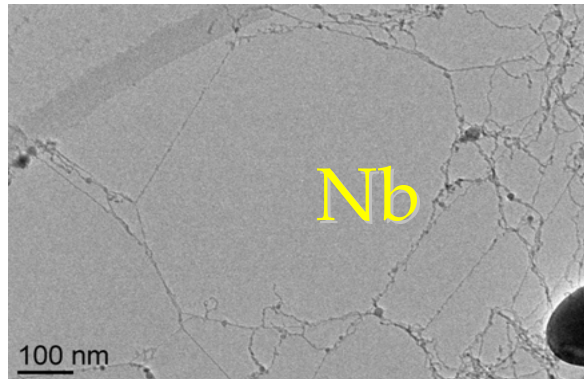
Vertical row of gilded contacts, interelectrode distances are 3 mm each

Bottom, where fragments of filaments were collected

Our objects



The photo of the bundles of silver nanowires grown in the cryostat after 5 min-long laser ablation, the distances between electrodes are 1.4 mm

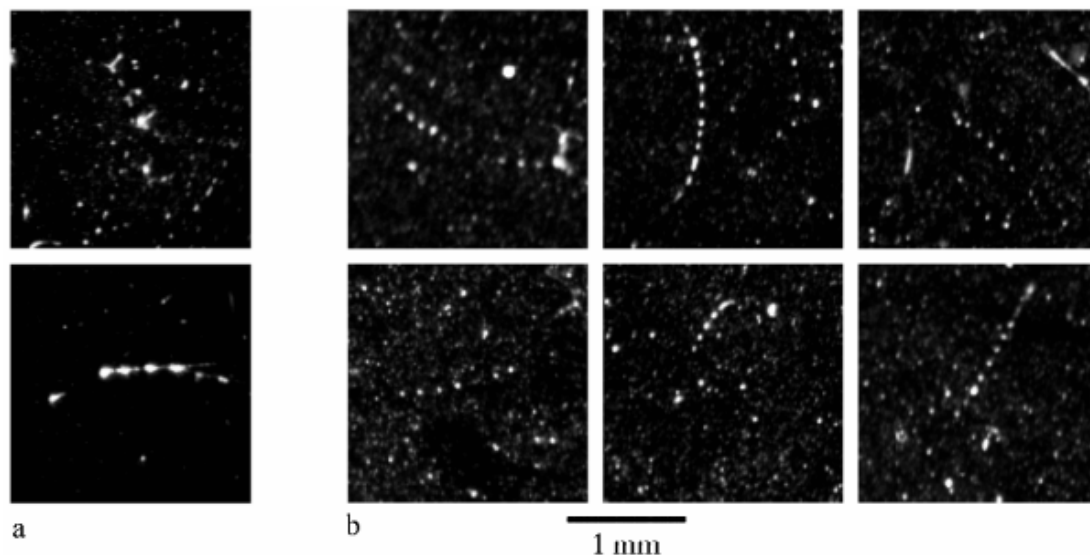


The sediments on the cell bottom with the network of nanowires. All nanowires in the web were interconnected by metallic way and the net was rigid.

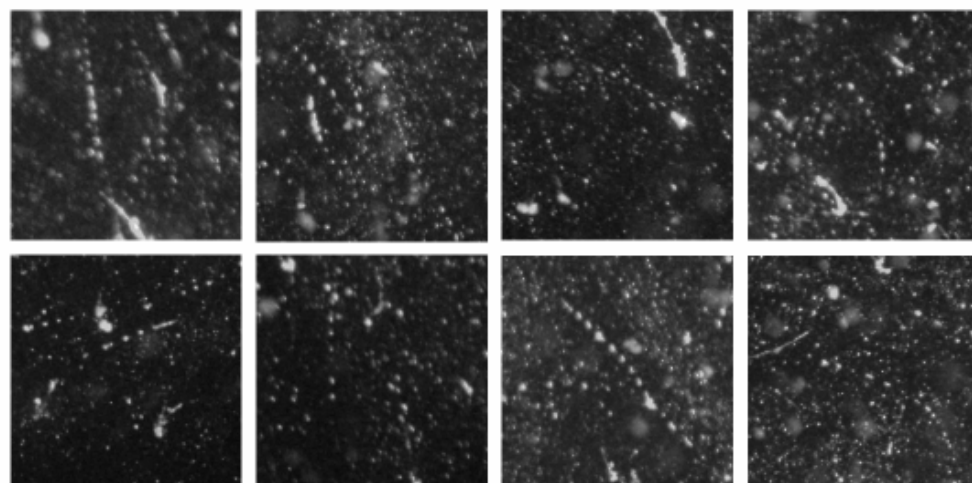
All nanowires in the web are of the same size being specific for given metal.

После того, как стало некуда деваться от растущих нанопроволок, настало время проанализировать, почему и как все получилось и в чем состоит обнаруженный нами сильный эффект влияния сверхтекучести He II на физико-химические процессы с участием взвешенных в нем нано- и мезо- частиц.

Микронные крупинки водорода, захваченные в вихрь



Выстраиваются внутри
вихря на расстоянии
100 мкм друг от друга и,
по-видимому, взаимно
отталкиваются.

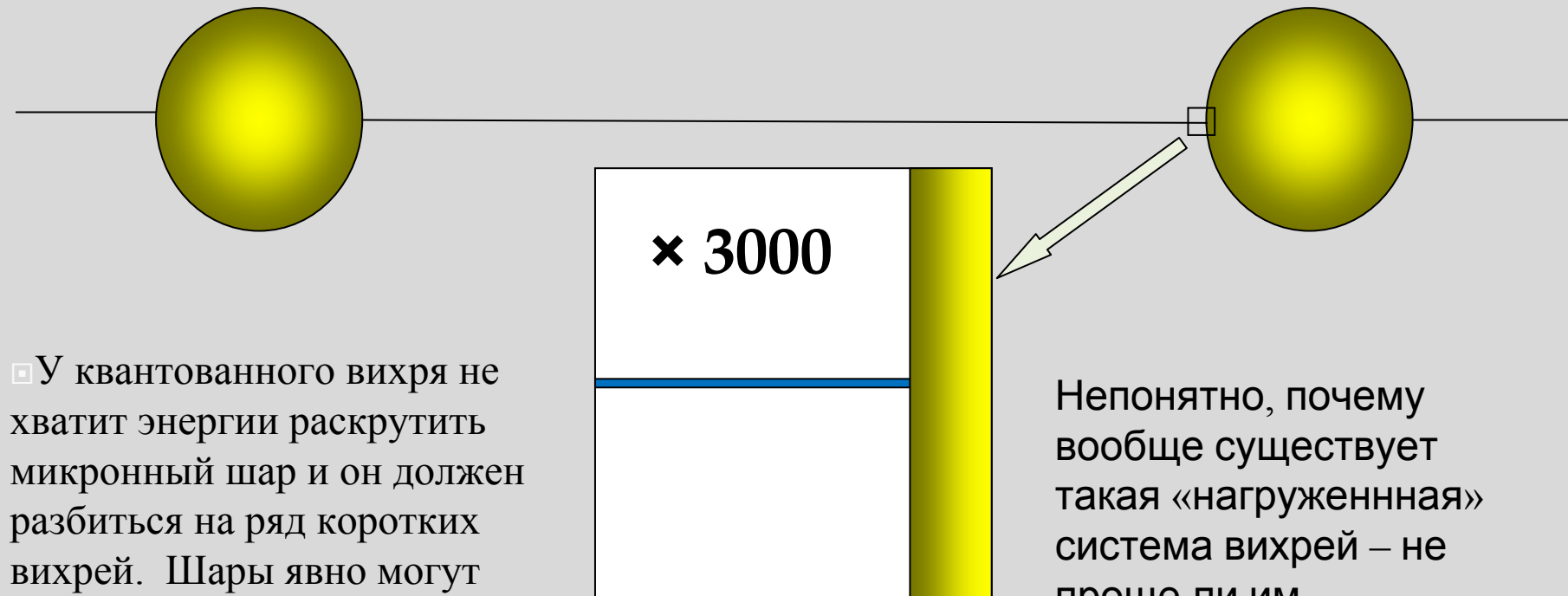


G. P. Bewley, Ph.D. dissertation, Yale University, New Haven, CT, 2006.

× 3000

Верблюд и игольное ушко

Анализ предыдущих фотографий в масштабе



□ У квантованного вихря не хватит энергии раскрутить микронный шар и он должен разбиться на ряд коротких вихрей. Шары явно могут двигаться вдоль вихря, но что-то останавливает их на сравнительно большом расстоянии друг от друга — они отталкиваются (природа этого явления не анализировалась и непонятна)

Непонятно, почему вообще существует такая «нагруженная» система вихрей — не проще ли им сдвинуться и выкинуть шары из своего нутра, как получается в расчетах (см. следующий слайд)

Interactions between particles and quantized vortices in superfluid helium

Demosthenes Kivotides, Carlo F. Barenghi, and Yuri A. Sergeev

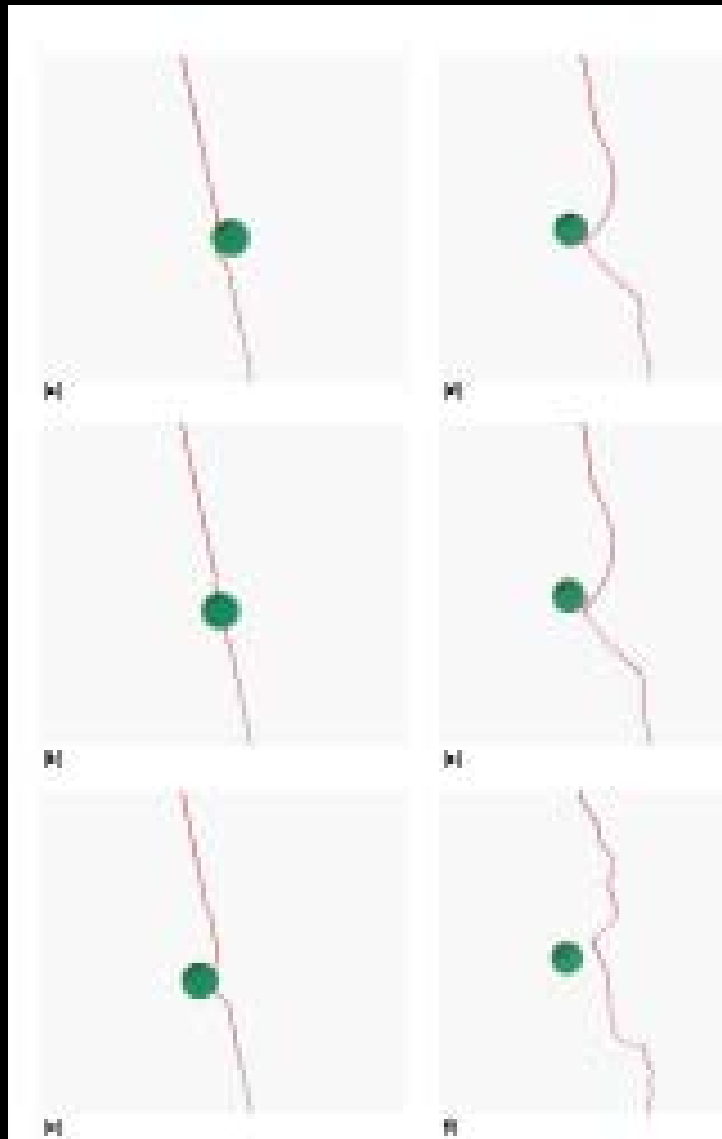
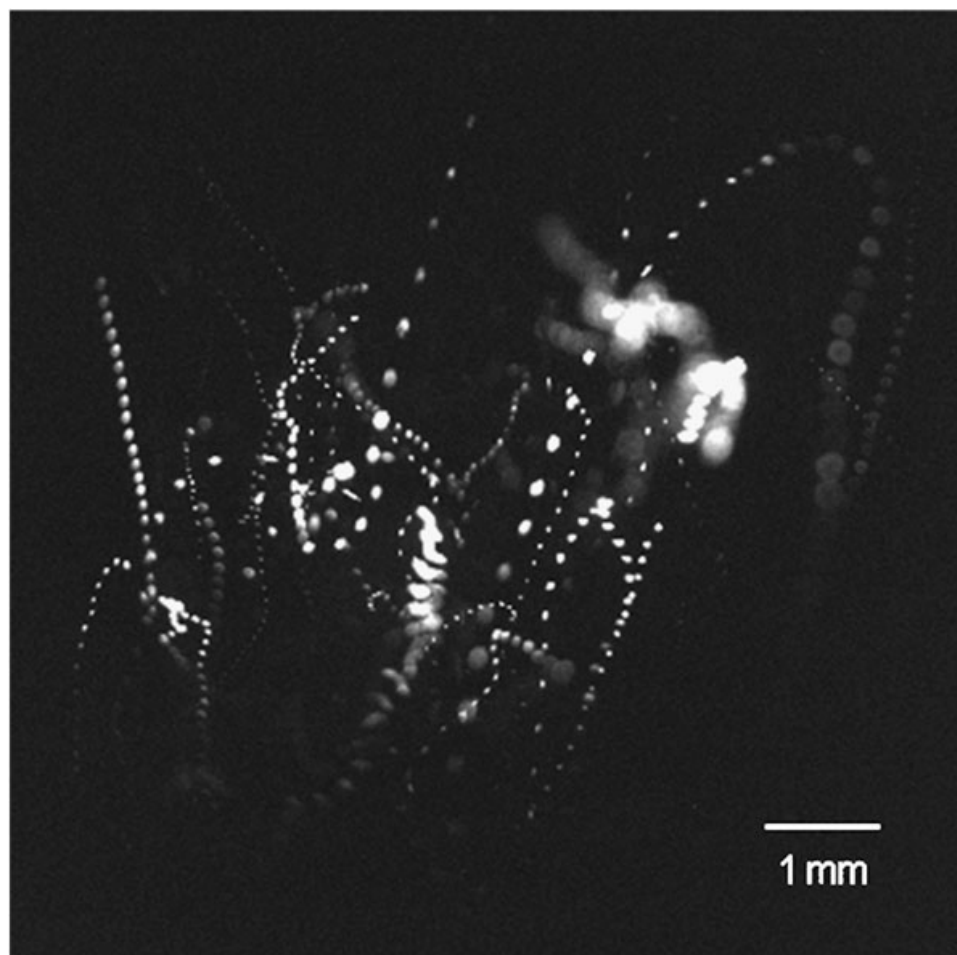


FIG. 4. Particle-vortex collision for initial particle speed $V=25$ cm/s, at $T=1.3$ K. Time increases as follows: $t_a=0.63 \cdot 10^{-5}$ s a, $t_b=0.95 \cdot 10^{-5}$ s b, $t_c=0.16 \cdot 10^{-4}$ s c, $t_d=0.44 \cdot 10^{-4}$ s d, $t_e=0.50 \cdot 10^{-4}$ s e, and $t_f=0.79 \cdot 10^{-4}$ s f. The particle arrives from the right. The particle diameter is $2a=2 \cdot 10^{-4}$ cm, and the initial particle-vortex distance is $2a$. The particle attaches to the vortex, and, after stretching it, breaks free.

Полное время процесса ≤ 100 мкс,
в то время как экспозиция
предыдущих фотографий в 1000
раз больше!

Экспериментальное наблюдение движения пылинок в сверхтекучем гелии

*D. Jin, H.J. Maris, J. Low. Temp. Phys. **162**, 329–339 (2011)*



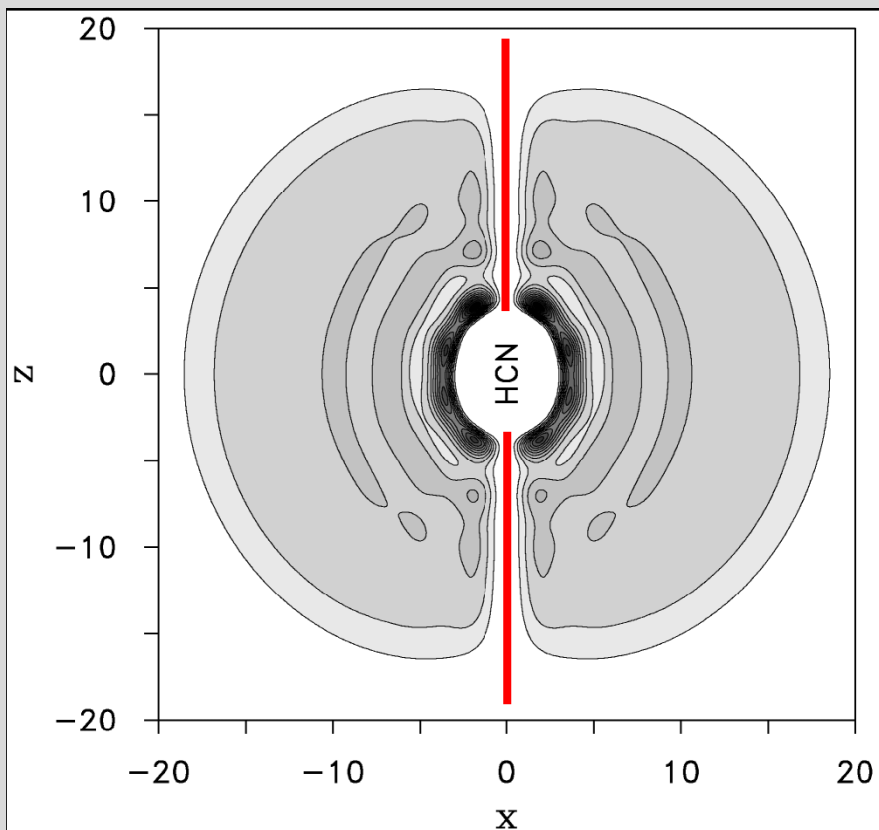
Каждая кривая - это одна случайная пылинка микронного размера, периодически, с частотой 160 Гц, подсвечиваемая импульсами лазера .
Полная экспозиция 0.5 сек.

Скорость всех пылинок – около 5 см/сек , в то время как скорость Ландау 50 м/сек.

- Теперь перейдем к рассмотрению поведения атомов, молекул и малых кластеров, введенных в сверхтекучий гелий.

Pinning of Quantized Vortices in Helium Drops by Dopant Atoms and Molecules

Franco Dalfovo, Ricardo Mayol, Martí Pi, and Manuel Barranco



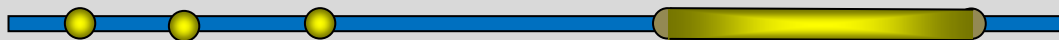
Density distribution in the xz plane for a HCN-He₅₀₀ droplet hosting a vortex along the z axis. Lengths are in Å.

Contour lines are drawn between 12 equally spaced intervals of density, where white is for density less than $7.5 \times 10^{-3} \text{ Å}^{-3}$,

and the darkest level corresponds to density higher than $9 \times 10^{-2} \text{ Å}^{-3}$.

Коагуляция атомов

- Атомы имеют размер, соизмеримый с поперечным размером вихря; вполне возможно, что вихрь «обволакивает» их, и они могут двигаться по нему свободно, образуя при коагуляции нити атомной толщины.

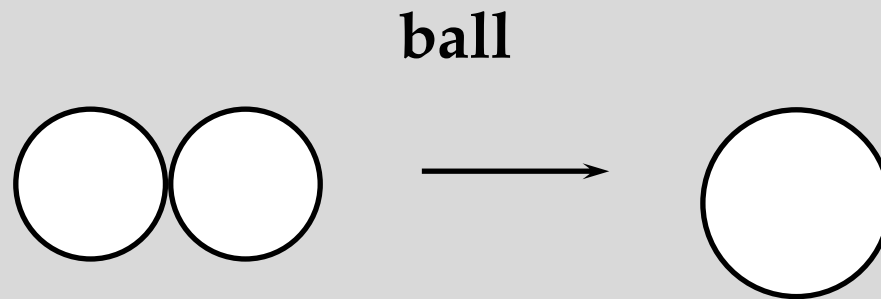


- Сродство частиц к вихрю носит характер сил Бернулли, поэтому оно **должно быть пропорционально длине ниточки (не доказано!)**.
- Если это так, то процесс коагуляции самоускоряется. Вся примесь сосредотачивается в вихрях и должна в результате образовывать ультратонкую ниточку.

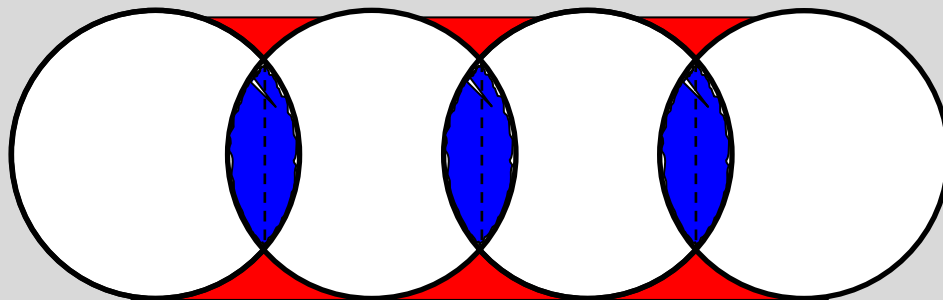
**Но, по крайней мере, для металлов все происходит
иначе
(правдоподобные рассуждения) .**

- При слиянии двух малых металлических кластеров за счет уменьшения суммарной поверхности выделяется большая энергия, достаточная, как известно, для плавления продукта.
- Как показывают оценки, для того чтобы предотвратить плавление продукта слияния двух кластеров диаметром 1 нм необходимо отводить тепло со скоростью 10^4 Вт/см².
-
- Сверхтекучий гелий, конечно, не может справиться с таким потоком. В результате продукт коагуляции плавится, приобретая за счет поверхностного натяжения плотную структуру и сферическую форму.
- И только начиная с достаточно больших размеров кластеры металлов просто приплавляются друг к другу.

Simple model for estimating the limiting radius of liquid sphere and wire



a - one-layer thickness

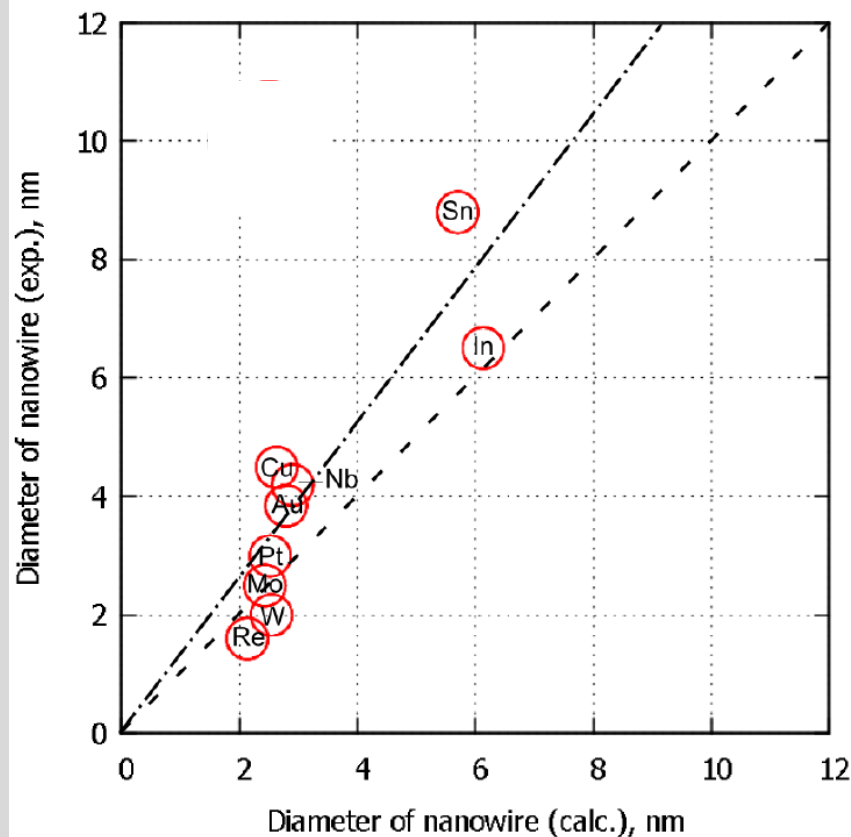
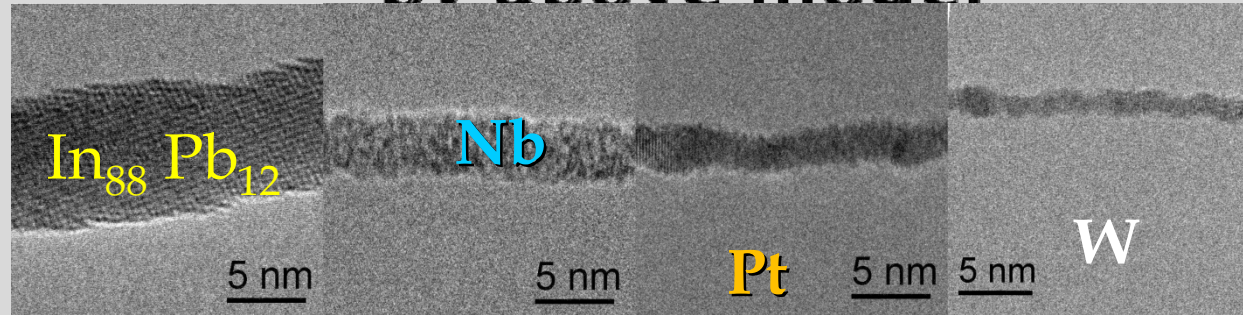


$$R \leq R_s^{\max} \equiv 0.78\alpha a$$

$$\alpha \equiv Q_b / (CT_m + Q_m)$$

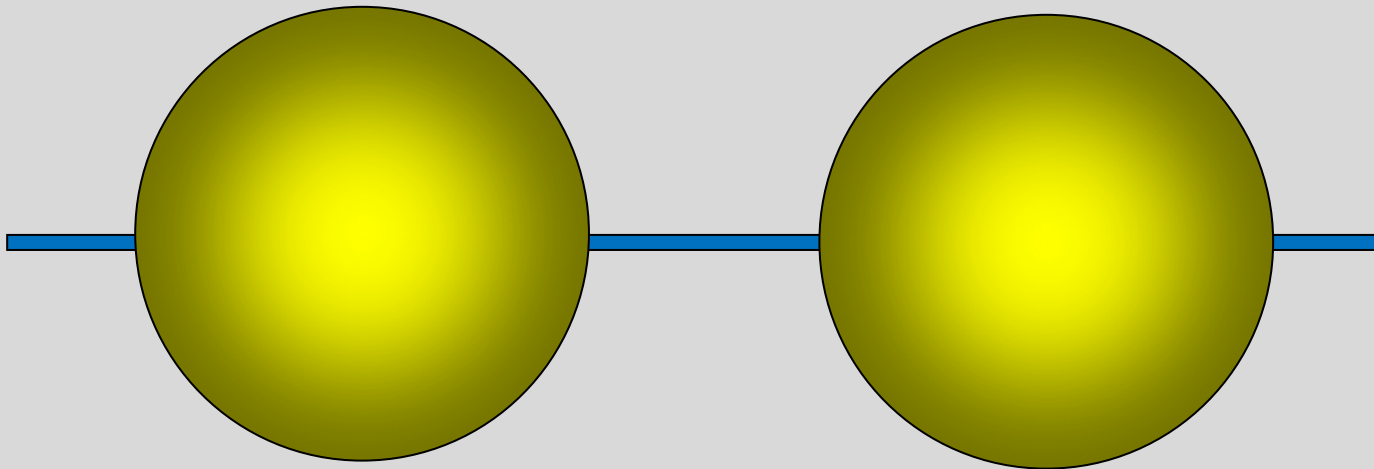
$$R \leq R_w^{\max} \equiv \alpha a$$

The comparison of the experimental nanowires diameters with those predicted by above model

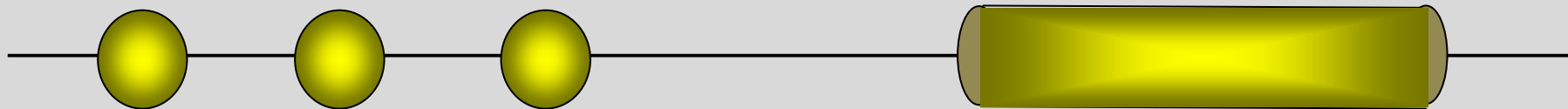


Even the absolute values of nanowires thickness were predicted reasonably close (dashed line)

Но образующаяся нанопроволока уже не такая тонкая по сравнению с квантованным вихрем

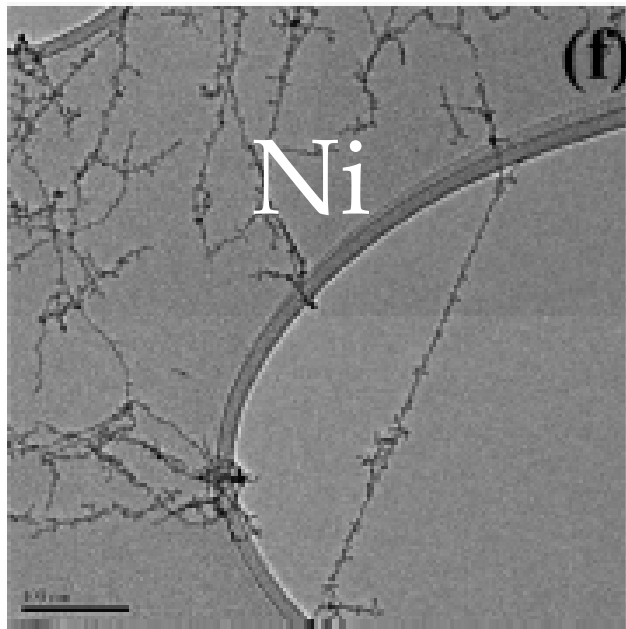


Опять проблемы с движением вдоль вихря, но на этом размере кластеры, похоже, притягиваются

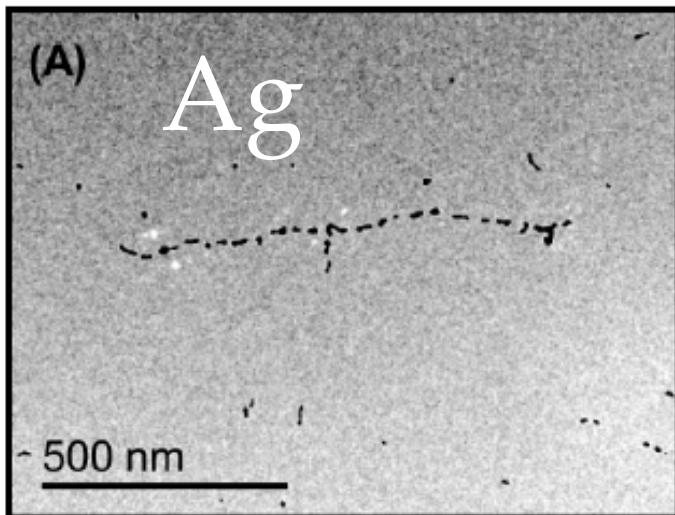


Гипотеза: нанизываются как бусы на нитку и конец проволоки – представляет собой protuberance для следующего вихря (игра в серсо)

Коагуляция металла в микронных холодных гелиевых каплях



D. Spence, E. Latimer, C. Feng,
A. Boatwright, A. M. Ellis and
S. Yang, *Phys. Chem. Chem. Phys.*,
2014, **16**, 6903–6906.

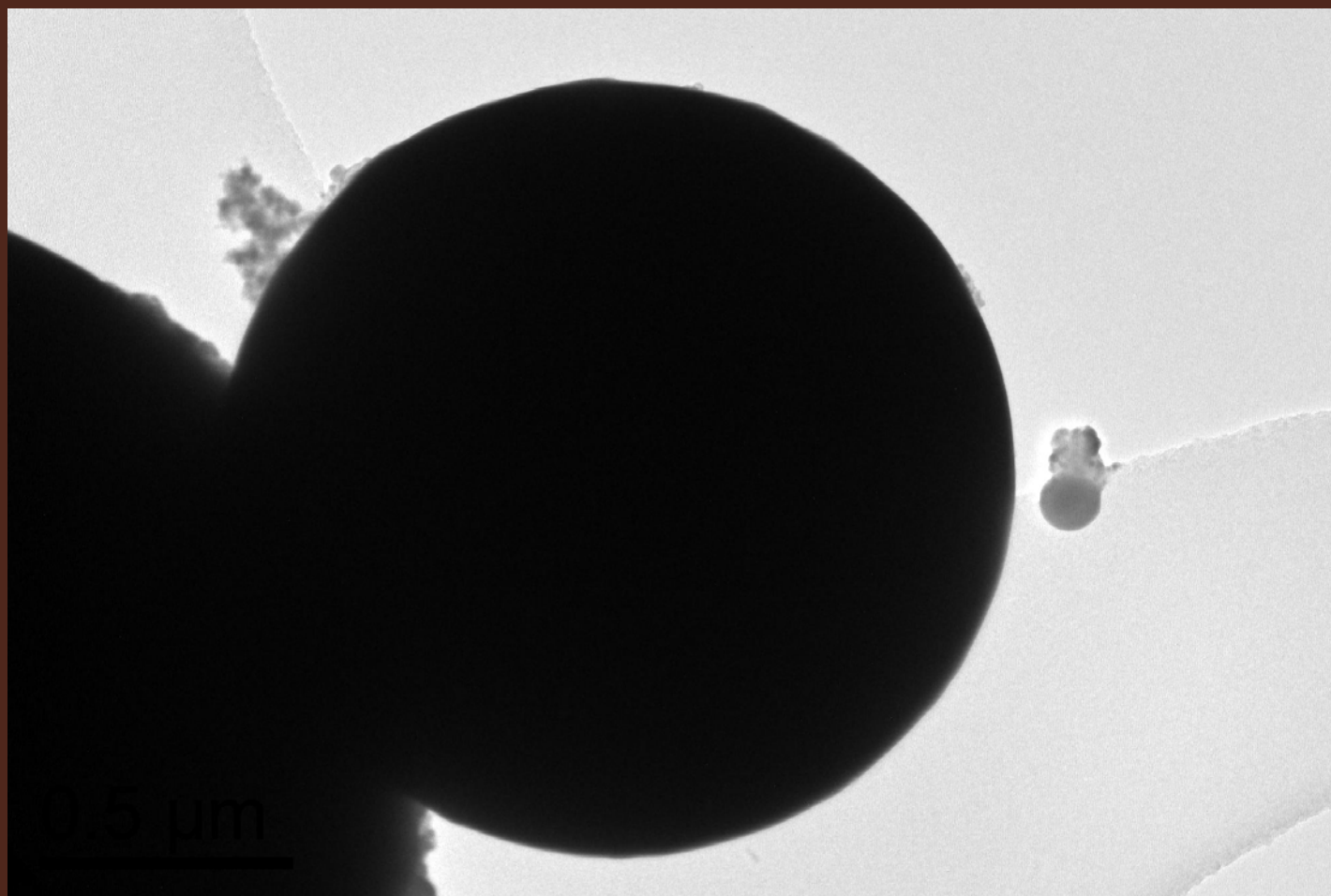


L. F. Gomez, E. Loginov, and A. F.
Vilesov, *Phys. Rev. Lett.*
108, 155302 (2012).

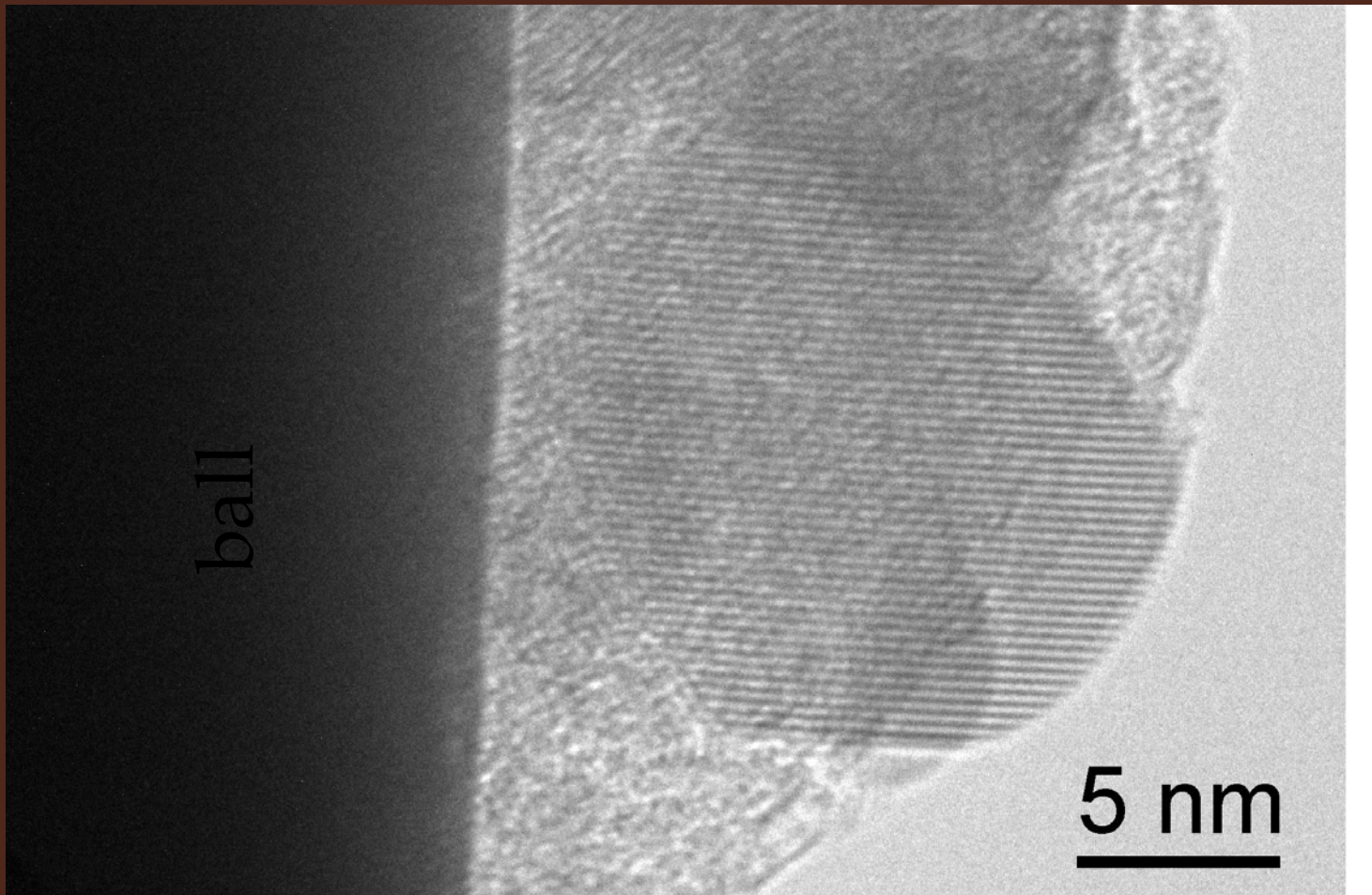
**Параллельно с проволоками образуются
шары идеальной формы с атомно гладкой
поверхностью диаметром до микрона**

Мы предположили – неостывшие шары.
Взрываются
Как остывают ???

The metallic balls are ideal spheres, their radius was grown with increasing laser repetition rate



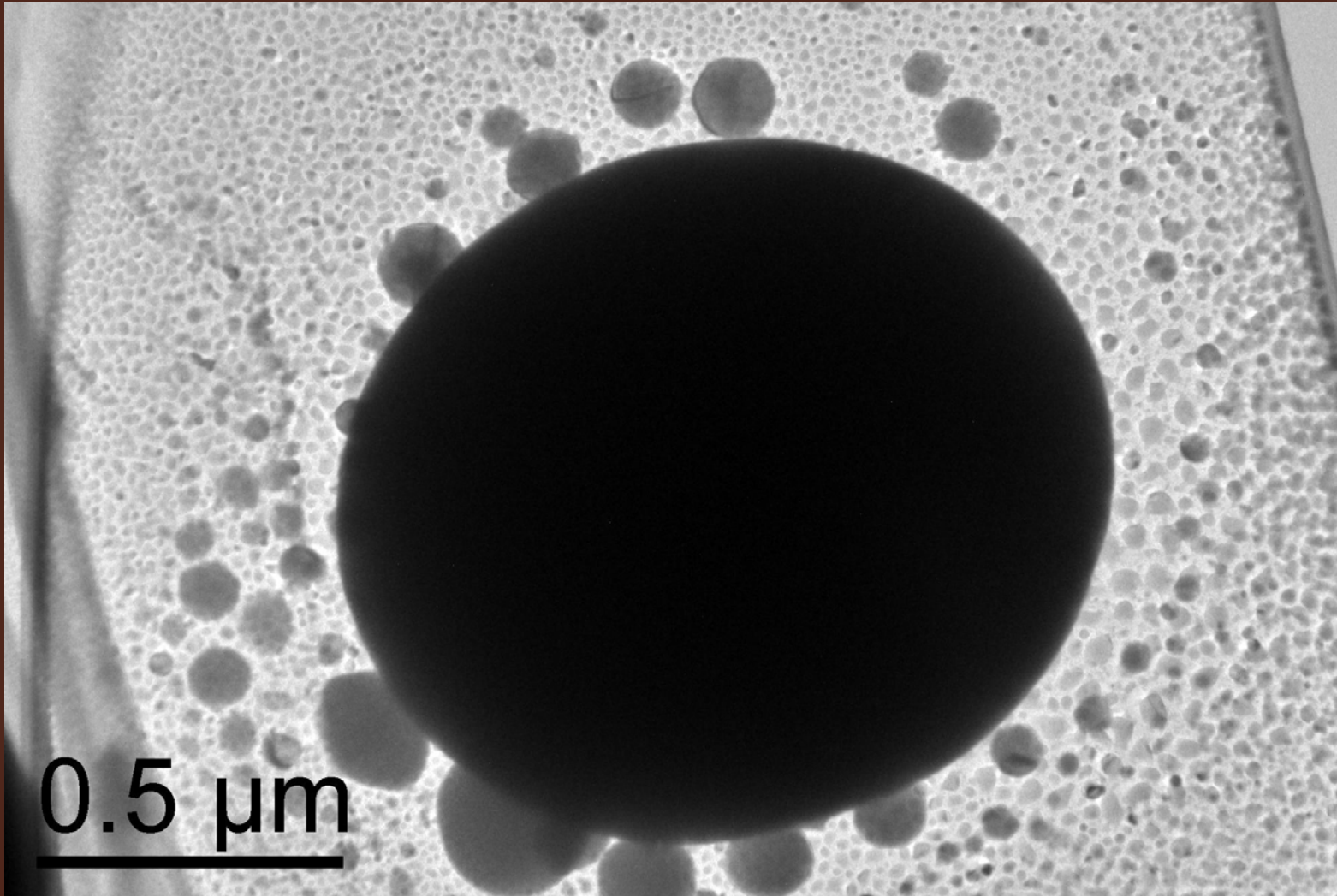
The edge of this sphere at high resolution



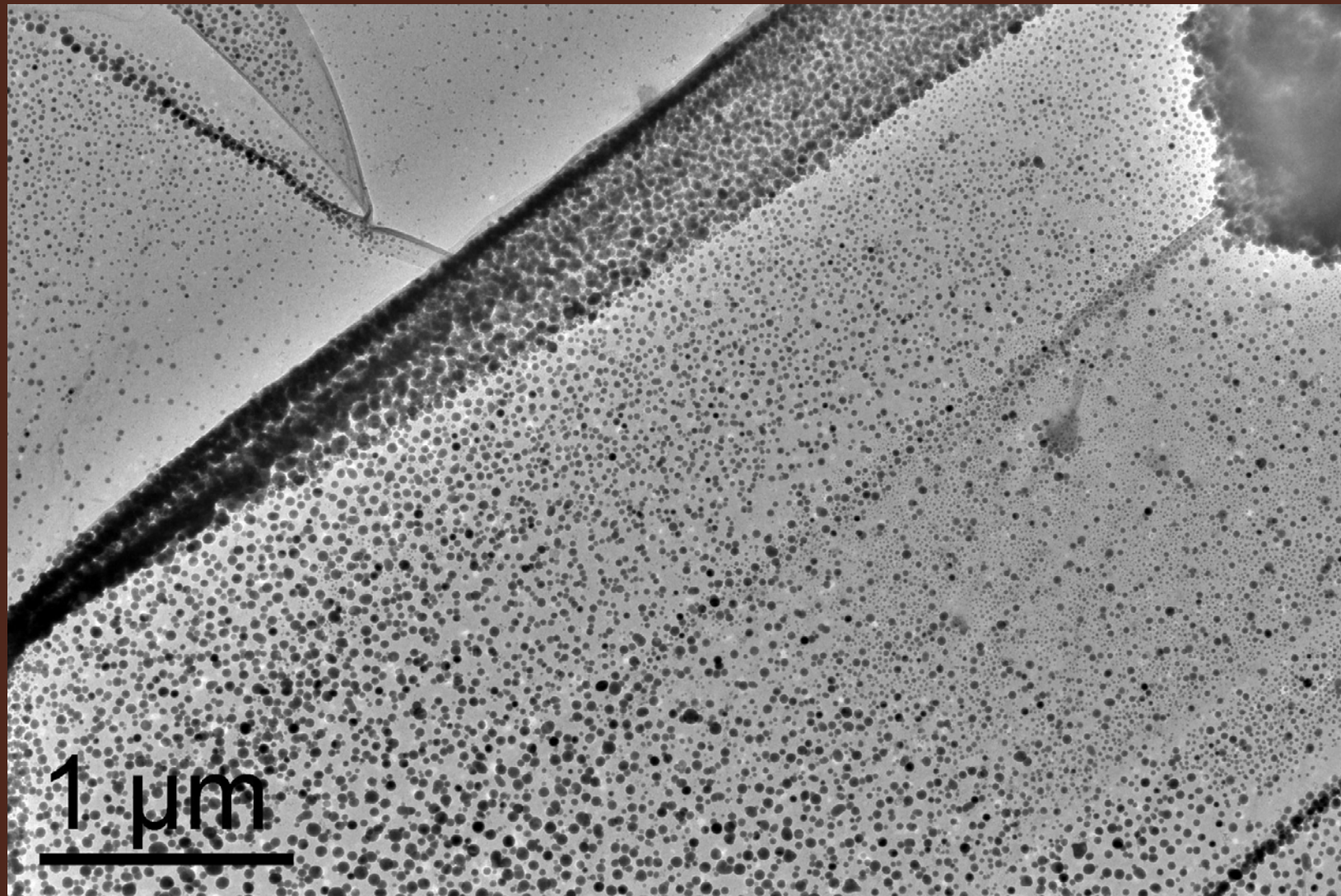
Accidentally sticking to the ball microcrystal demonstrates the scaling, interference fringes have 3Å spacing

- the ball surfaces are atomically smooth

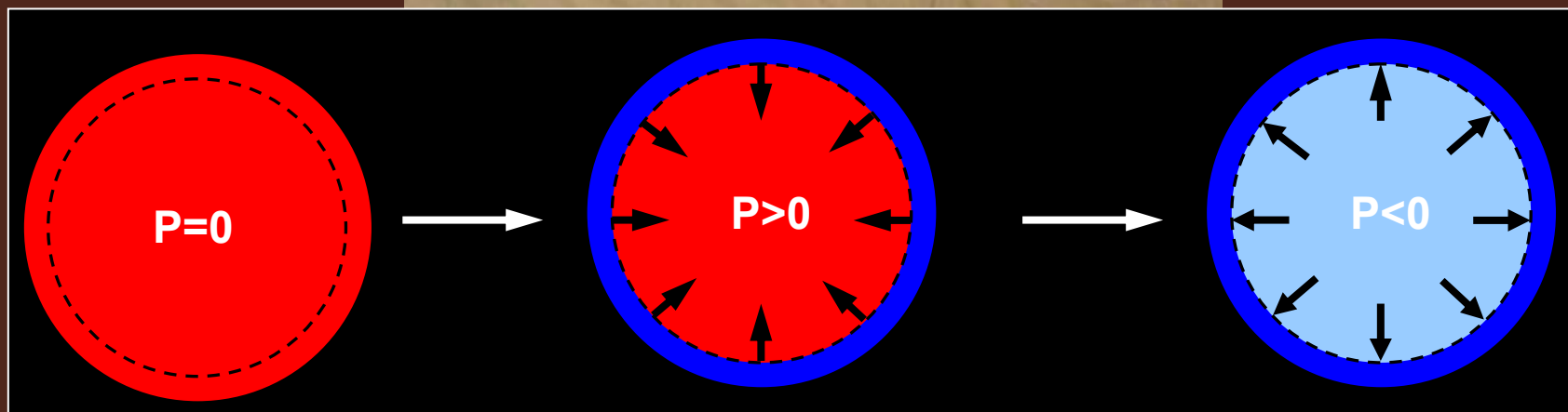
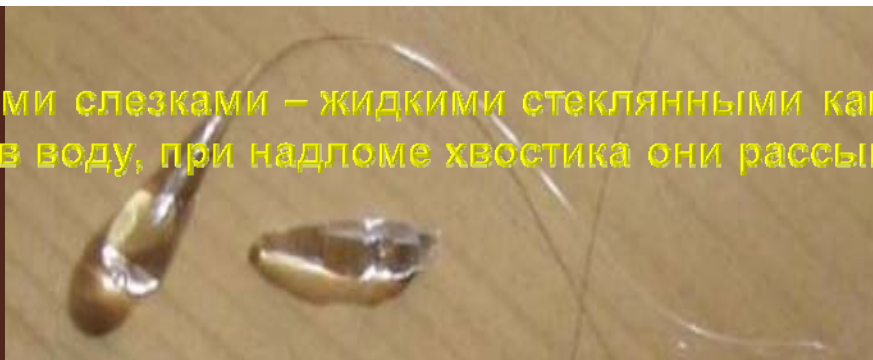
**Indium ball in three months after
producing
(distortion after dispersing)**



**Indium ball in three months after
producing
(sedimentation near ridge, low trajectories)**



Аналогия с Батавскими слезками – жидкими стеклянными каплями, застывающими при их падении в воду, при надломе хвостика они рассыпаются в порошок



Жидкая горячая капля имеет объем больше чем холодная и твердая

Быстрое охлаждение вызывает образование твердой корки, сжимающей жидкое ядро

При дальнейшем охлаждении образуется твердое ядро, занимающее объем больше равновесного

Отсутствие дислокаций и полостей в микронных шариках делает пластичные металлы – индий, свинец – твердыми как стекло

Остывание металлических частиц в сверхтекучем гелии

- Для АЧТ пороговый для квантовой теплопередачи поток тепла в вакууме имеет место при $T \approx 1000$ К. При более высоких адиабатических T вокруг нагретой частицы образуется газовый пузырь, и температура поверхности частицы скачком возрастает от $T \approx 2$ К до очень больших значений. После этого остывание может происходить двумя путями – теплопередачей через гелиевый газ и излучением с поверхности частицы. Для жидкого вольфрама максимальная (реализующаяся для АЧТ) скорость радиационного отвода тепла составляет 10^3 W/cm².



- ▣ Ввиду малости размера кластеров по сравнению с длиной волны света радиационно они могут остывать только за счет свободных электронов.
- ▣ Пока кластер не металл (~ 100 атомов) он остывает медленно.
- ▣ Планируется изучать тепловое излучение при коагуляции различных металлов в He II

Вывод

- Катализируемая квантованными вихрями коагуляция нано- и мезочастиц в He II является чрезвычайно сильно выраженным проявлением сверхтекучести гелии.
- Красота эффекта состоит в том, что он пороговым образом возникает в λ -точке.
- Полезность эффекта состоит в его возможном использовании для создания уникальных наноструктур.

Вопросы

1. В какой мере может быть справедливой следующая модель квантового вихря с захваченными внутри него кластером или проволокой:
 - А) для тонких или малых (предельный размер?) кластеров - с образованием структуры типа core-shell = примесь-гелий,
 - Б) для толстых кластеров – с реализацией периодической цепочки из неподвижных (не вращающихся) кластеров, соединенных между собой короткими вихрями.
3. Можно ли, базируясь на такой структуре, объяснить наблюдающиеся экспериментально два режима поведения примесей, захваченных в квантованный вихрь: отталкивание для микронных кластеров и слияние их в проволоку для нанокластеров.
4. Какова скорость движения nano и мезочастиц вдоль вихря и зависит ли она от температуры жидкого гелия? Известно, что для атомных ионов и электронов вплоть до скорости Ландау (около 50 м/сек) нет вязких потерь, в то время как для микронных частиц экспериментальная скорость равна при $T \approx 2\text{K}$ нескольким см/сек.
5. Может ли образовываться изолирующая газовая прослойка вокруг реагирующих в He II атомов и молекул, и каково время ее существования?
6. Может ли гелиевая нанокляпля разрушиться за счет газового пузыря, образующегося в ней при слиянии захваченных в нее кластеров металла.