

Non-isothermal Physico-Chemical Processes in Superfluid Helium



ЧЕРНОГОЛОВКА

**НАУЧНЫЙ
ЦЕНТР**

E. B. Gordon

*Institute of Problems of Chemical Physics
RAS, Chernogolovka 142432 Russia
gordon.eb@gmail.com*

Туапсе, 17 сентября 2016

Логика исследований

Обычная система → экзотические условия → экзотические результаты
→ ничего интересного
→ **только хуже**
→ ??????

Наука и вера

Наука движется доказательствами.

Но они, как правило, не 100%-ные.

Если перестают верить, то не слушают доказательств.

(Пример – лженауки).

Что делать?

Мы изначально хотели получить HEDM в сверхтекучем гелии,
но затем возникло подозрение, что жидкий гелий хуже, чем твердая матрица, а сверхтекучий гелий - еще хуже, чем нормальный.

Экзотические условия - посторонние частицы в He II

1. Liquid helium being a quantum fluid is homogeneous structureless substance.
2. In its superfluid state helium possesses a record high thermal conductivity, that eliminating any local overheating.

It seems obvious that it is the reason for any physical and chemical process of guest particles embedded into He II to be:

- 1) the diffusion-controlled one in a homogeneous space, and**
- 2) strictly isothermal one**

These “obvious” statements

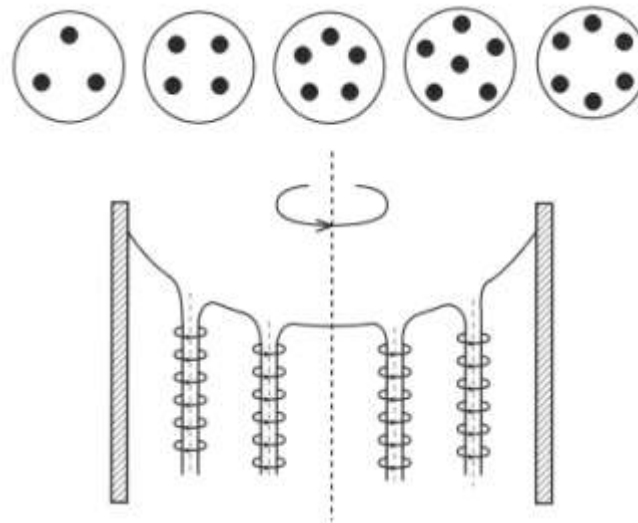
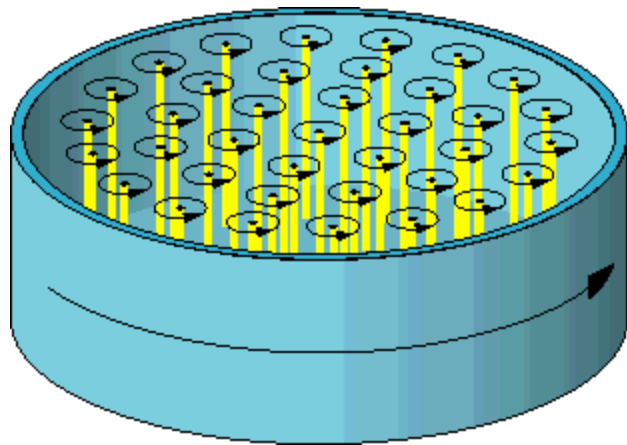
- (1) diffusion-controlled process in a homogeneous space
- (2) strictly isothermal process

Both statements are completely **wrong**
(not due to low accuracy,
but **principally wrong!!!!**)

I. Сверхтекучий гелий неоднороден – в нем имеются квантованные вихри

Квантованные вихри не играют заметной роли в явлении сверхтекучести и Л.Д.Ландау для его объяснения сверхтекучести наличием двух невзаимодействующих компонент они не потребовались.

Они стали нужны, когда Ларс Онзагер (кстати, физхимик и Нобелевский лауреат по химии) задал «наивный» вопрос, а что произойдет, если начать вращать сосуд со сверхтекучим гелием.... Он же предложил выход из этого парадокса...



Внутри вихрей – нормальная компонента, и они берут на себя весь момент вращения

Когда Р. Фейнман решил проквантовать эти вихри, чтобы заодно ввести постоянную Планка в теорию Ландау,

$$\oint \vec{v}_s \cdot d\vec{s} = \frac{h}{m_4} n.$$

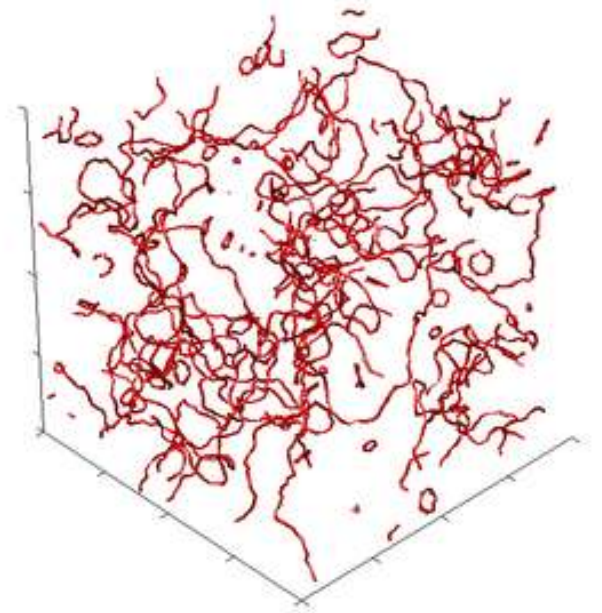
при $n=1$ квант k равен

$$\kappa = \frac{h}{m_4} = 1.0 \times 10^{-7} m^2/s$$

то получил обескураживающий результат – вихри как бы реально не существуют: их диаметр оказался около 1\AA , что заметно меньше предела справедливости самого понятия жидкости в механике сплошных сред.

Поэтому их стали достаточно пренебрежительно называть «топологическими дефектами».

В действительности для возникновения вихрей не обязательно вращать криостат - от них, наоборот, трудно избавиться и в количестве 10^5 на см^2 они существуют всегда, образуясь практически при любом возмущении. В.Я. Покровский (лауреат премии Онзагера) посоветовал мне «обходиться» с квантованными вихрями как с классическим водоворотами, только очень тонкими.



Но если есть вращательное движение, то должна быть и сила Бернулли, направленная к оси вращения, – это следствие закона сохранения энергии. В квантовой теории сверхтекучести давно обнаружили сродство вихря к любым посторонним частицам, затем к нему стали добавлять член Бернулли. И только совсем недавно в своей, инспирированной нашими работами статье, Юсси Элоранта показал, что –или-или. Суммировать нельзя – члены квантовой теории просто тождественны члену Бернулли в теории Ландау.

Impurity	R (Å)	a_F (Å)	OT-DFT $V_{IM-Vortex}(0)$ (K)	Exp. $V_{IM-Vortex}$ (K)
H ₂ ($X^1\Sigma_g$)	3.1	0.38	-9.4	...
Ag ₂ ($X^1\Sigma_g$)	3.9	0.51	-10.9	...
Cu ₂ ($X^1\Sigma_g$)	4.0	0.52	-11.4	...
Ag (2S)	4.4	0.63	-12.0	...
Cu (2S)	4.5	0.65	-12.5	...
He ₃ ⁺ ($X^2\Sigma_g$)	≈5.7	≈0.75	-16.0	-17.5 at 0.28-0.6 K ^{7,13,17}
Li (2S)	6.8	0.75	-21.5	...
He* ($2s^3S$)	7.1	0.77	-22.6	...
He ₂ * ($a^3\Sigma_u$)	8.6	0.80	-29.8	...
e^- ($1s$)	22.2	0.76	-109	-55 to -59 at 1.6 K ^{59,60}

Энергия этого взаимодействия невелика – для атомов и малых молекул она составляет **10 – 20 К** и не может вызвать заметного концентрирования примеси из объема жидкости в вихри при типичных температурах эксперимента **1.5 – 2 К**.

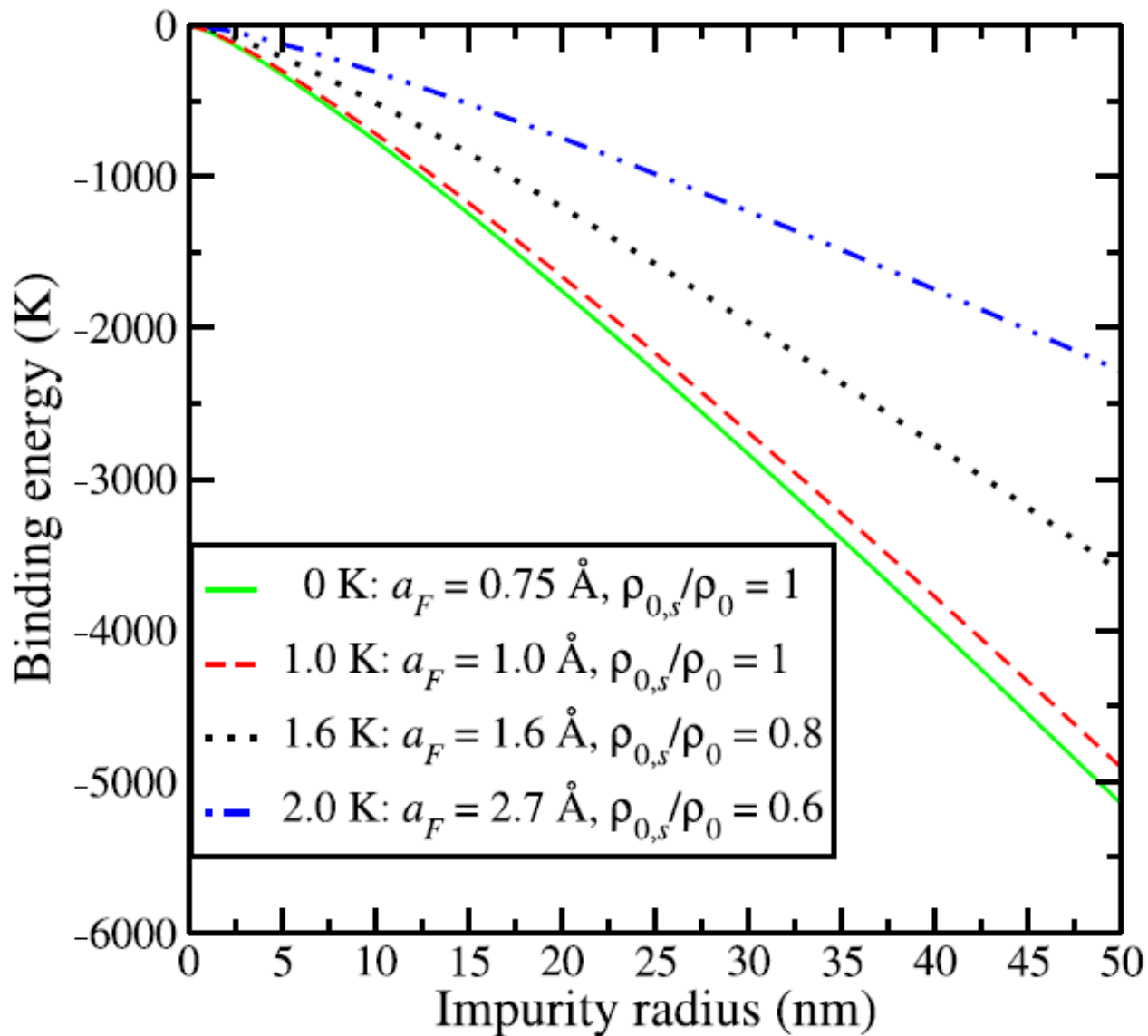
Рассуждаем так, как принято в химической физике

Наша пока недоказанная теоретически спекуляция

Будучи захваченными в вихрь частицы движутся исключительно навстречу друг другу (а не стохастически как в объеме). Как следует из геометрических соображений, это сильно повышает вероятность их встречи и последующего образования растущего «червячка».

Наша уже доказанная теоретически спекуляция

Как известно, силы Бернулли носят характер давления – чем длиннее тело, тем больше сила и тем пропорционально сильнее связан с вихрем продукт конденсации
(*см. подтверждающий расчет того же Элоранты*).



Мы поняли, что в результате должен возникнуть самоускоряющийся, каталитического типа процесс, в котором **роль катализатора играют квантованные вихри**. Несмотря на его кажущуюся очевидность, существования такого быстрого процесса в сверхтекучем гелии никто не предполагал. И самое главное - его продуктами должны были быть длинные тонкие нити, и он может быть использован для bottom-up синтеза нанопроволок.

Gordon E.B., Okuda Y., Low Temp. Phys. 35(3) P: 209-213 (2009).

Но «мусор из сверхтекучего гелия таким процессом действительно можно убрать быстро, но проволоочки будут либо практически одноатомными нестабильными нитями, либо рыхлыми фрактальными образованиями» - *Бертан Гальперин, Гарвард, 2010.*

Дело в том, что сверхтекучий гелий является абсолютным чемпионом мира по теплопроводности – «**она в 200 раз больше чем у чистой меди**» - *П.Л. Капица*. Поэтому все локальные перегревы в жидкости должны оперативно устраняться и любые процессы в сверхтекучем гелии должны были быть **строго изотермическими**. В частности, куда атом пришел, в том месте конденсата он и должен остаться.

Тем не менее, используя сравнительно простую технику и маломощный, но короткоимпульсный (400 пс) лазер мы получили высококачественные нанопроволоки из более чем тридцати металлов и сплавов. Мы можем выращивать нанопроволоки из всего – даже из ртути, кремния, углерода.

(Естественно, что электронные микроскопы, литографические установки и устройства манипулирования нанопроволоками и измерения их характеристик занимают гораздо бо'льшие площади)

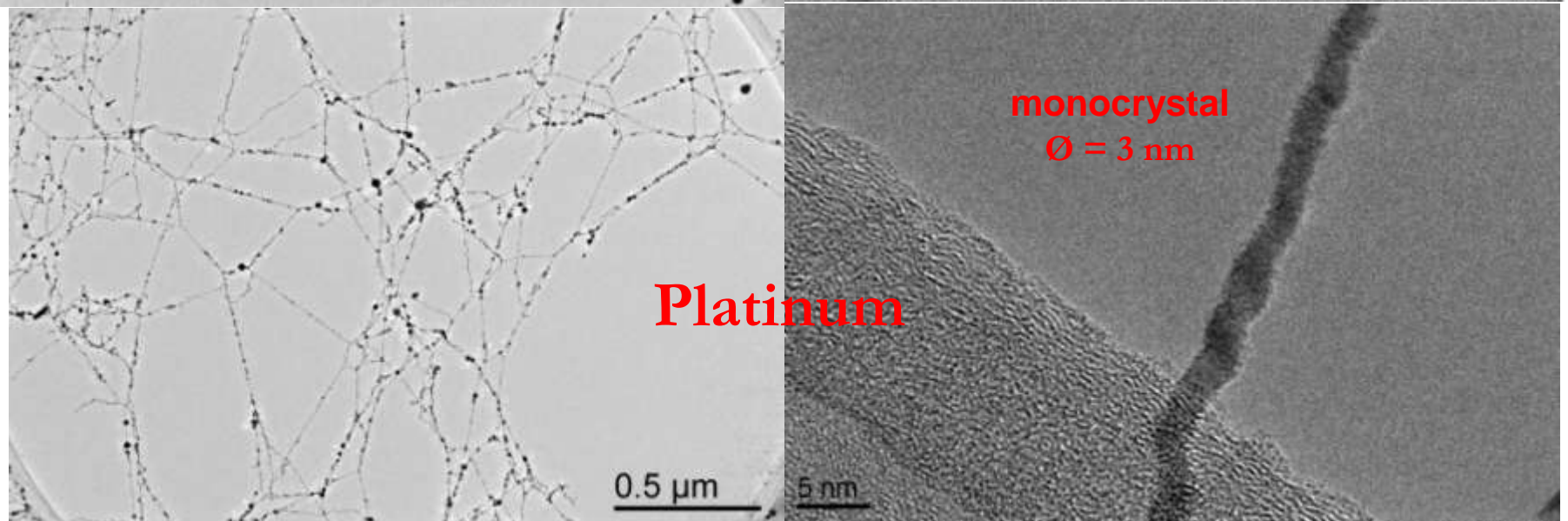
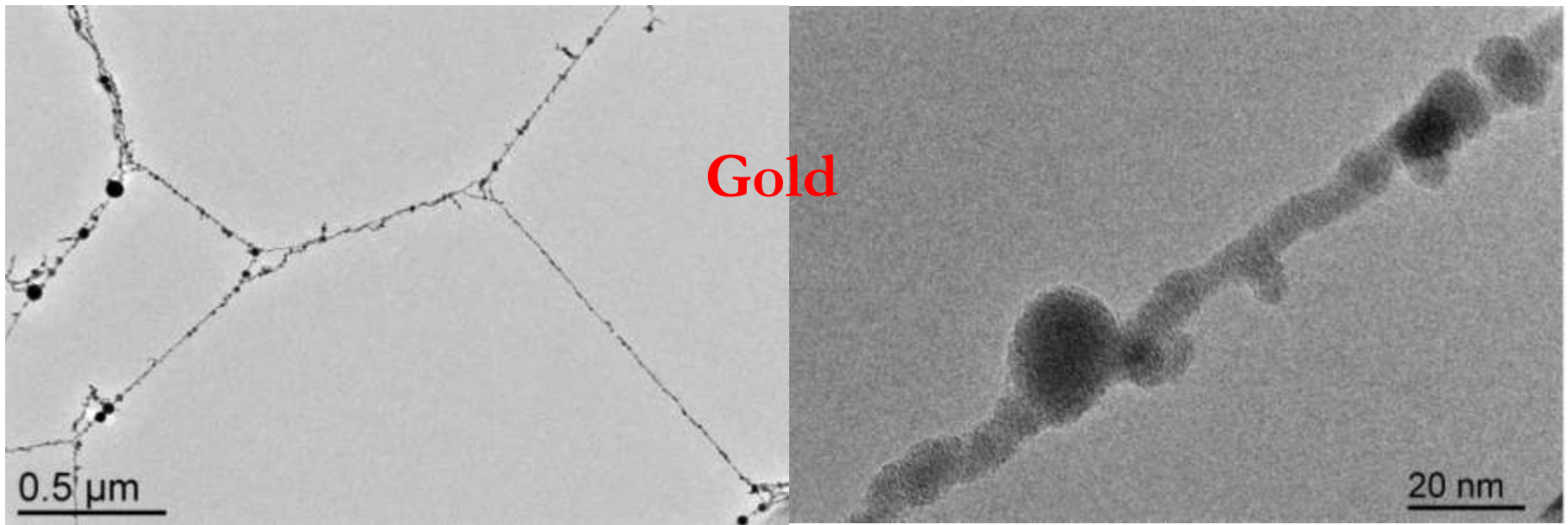


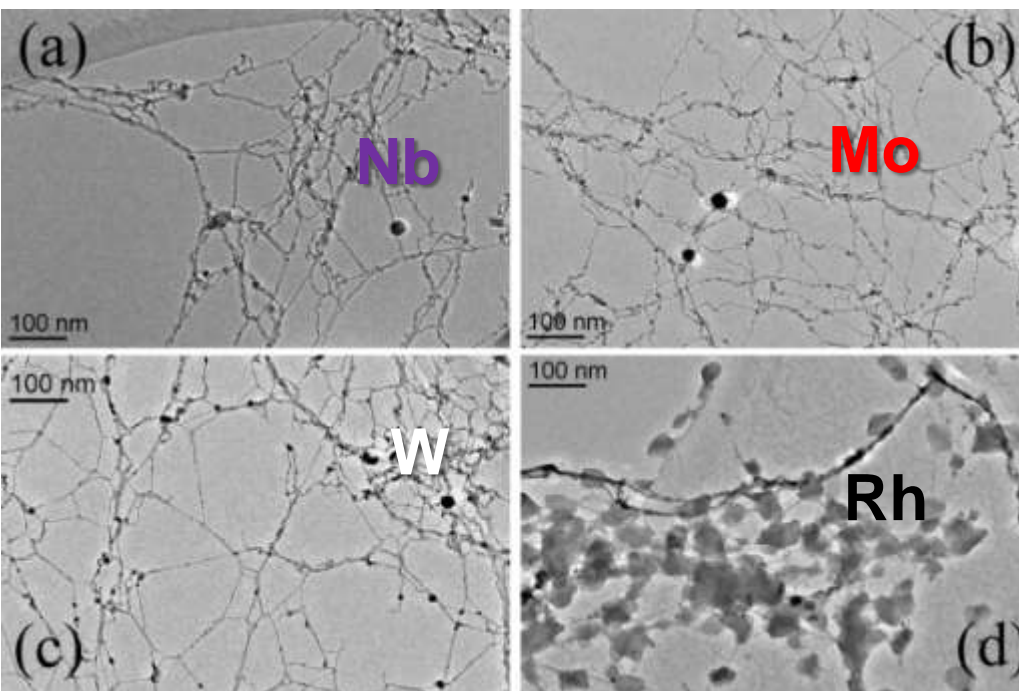
А.В. Карабулин

В.И. Матюшенко

В.Д. Сизов

Морфология и структура нанопроволок (примеры)



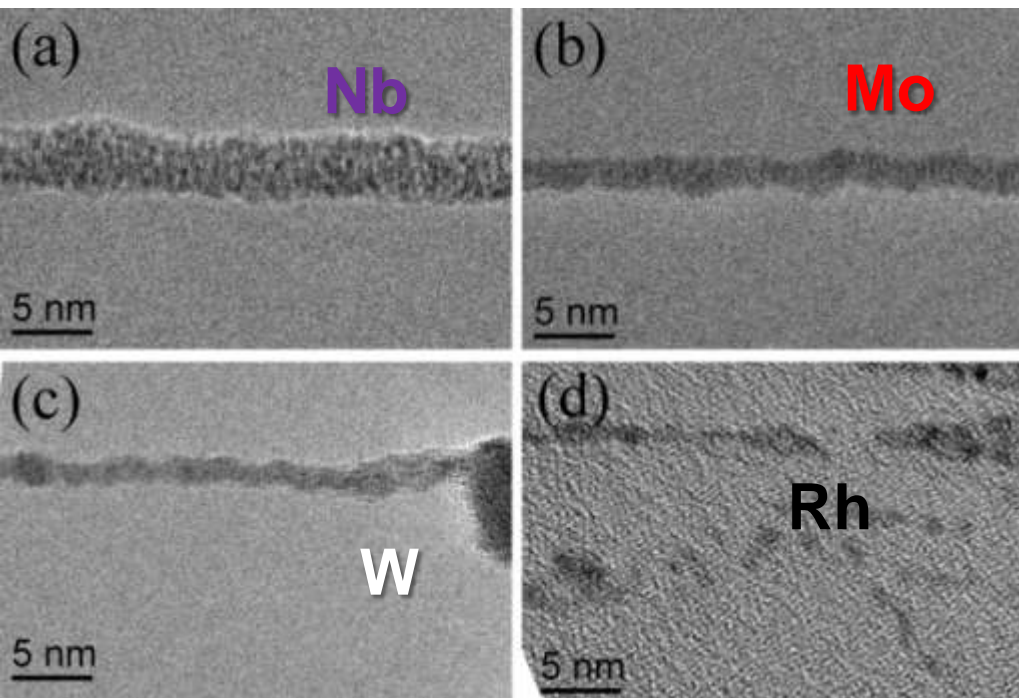


Нанопроволоки из тугоплавких металлов – трудно получить другими методами

Gordon, E. B.; Karabulin, A. V.; Matyushenko, V. I.; и др.

Laser Phys. Letters 12, 096002 (2015)

Перспективны как катализаторы (Nb), холодные катоды (W, Pt), сверхпроводники с квантовым сдвигом фазы (Nb), итд.



В одном эксперименте получаем нанопутину в количествах, достаточных для ее использования в качестве нанокатализатора в стандартном потоковом химическом реакторе.

II. Теплопроводность He II

Наше основное **везение** состояло в обнаружении того, что Гальперин был неправ, но наша основная **заслуга была** в том, что мы поняли причину этого и ею воспользовались

Простые соображения

Высокая теплопроводность сверхтекучего гелия обеспечивается ламинарным потоком нормальной компоненты. При слишком высоких потоках из-за интенсивного рождения вихрей развивается мощная турбулентность и тепло начинает распространяться обычным; диффузионно-подобным способом. Для объектов размером **более 10 микрон** этот пороговый поток, как известно, составляет около **3 Вт/см²**. **Для физических экспериментов это действительно большой поток тепла, но вот для химии...** Чтобы предотвратить плавление продукта слияния двух холодных металлических шариков размером в 1 нм, вызванное просто нагревом из-за уменьшения полной поверхности, требуется гигантская скорость отвода тепла, превышающая **10⁵ Вт/см²**.

Наша пока недоказанная теоретически спекуляция

Пороговый тепловой поток существует и для наноразмерных кластеров.

Тогда вот, что происходит при превышении порогового значения теплового потока:

- гелий испаряется, образуя вокруг горячего кластера хорошо изолирующую тепло «рубашку» газа низкого давления;
- и процесс конденсации происходит практически **адиабатически**.

Простая модель роста нанопроволоки :

*E. B. Gordon, A. V. Karabulin, V. I. Matyushenko, V. D. Sizov, and I. I. Khodos, **J. Exp. Theor. Phys.** 112, 1061 (2011).*

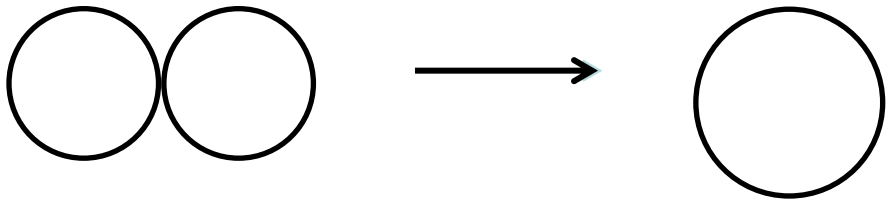
*E. B. Gordon, A. V. Karabulin, A. A. Morozov, V. I. Matyushenko, V. D. Sizov, and I. I. Khodos, **J. Phys. Chem. Lett.** 5, 1072 (2014).*

- на первом этапе конденсации маленькие «червяки» плавятся, образуя за счет поверхностного натяжения шарики ;
- после достижения шариками критического размера они уже не плавятся, а слипаются;
- этот критический размер и определяет диаметр проволоки.

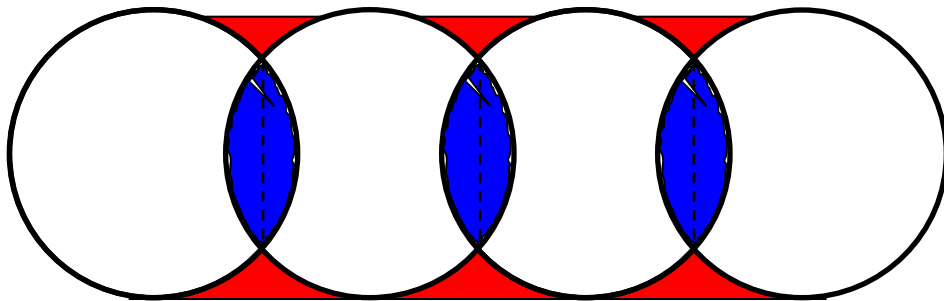
Несмотря на использование простых геометрических соображений и табличных термодинамических характеристик металла мы достигли количественного совпадения предсказанных диаметров нанопроволок с экспериментально измеренными. Плотность структуры при этом также находила объяснение.

Простая адиабатическая модель для объяснения существования критических размеров сферических прото-кластеров и радиусов нанопроволок

сферы



a – толщина атомного слоя

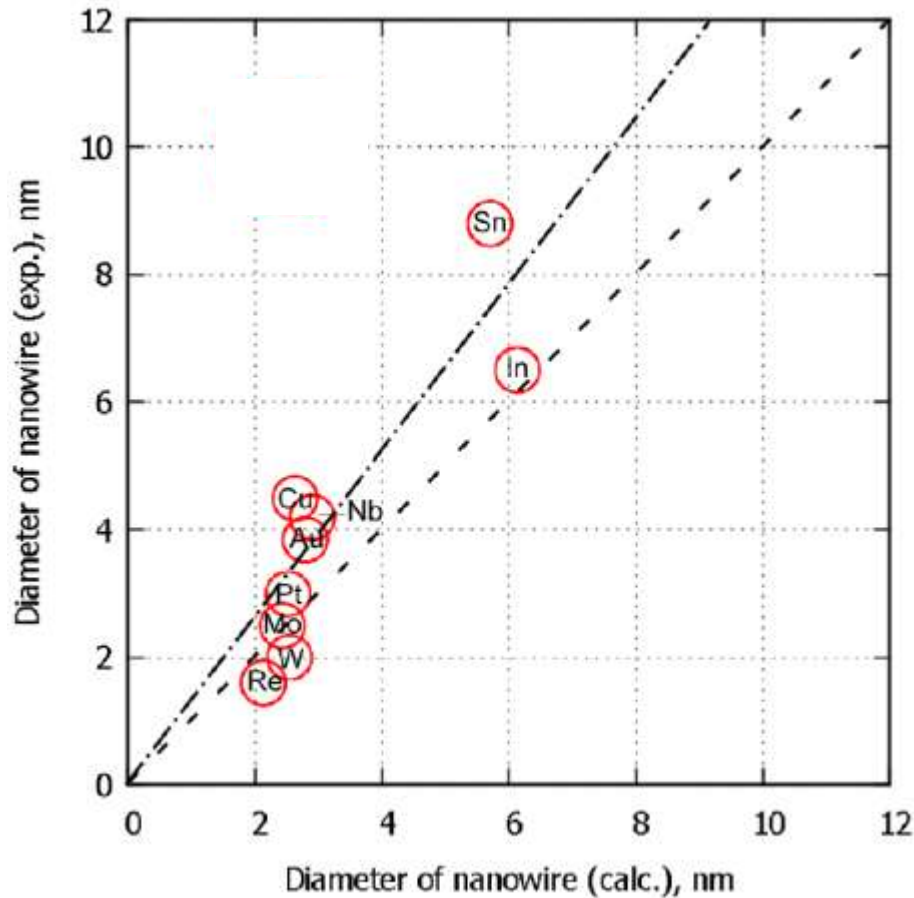
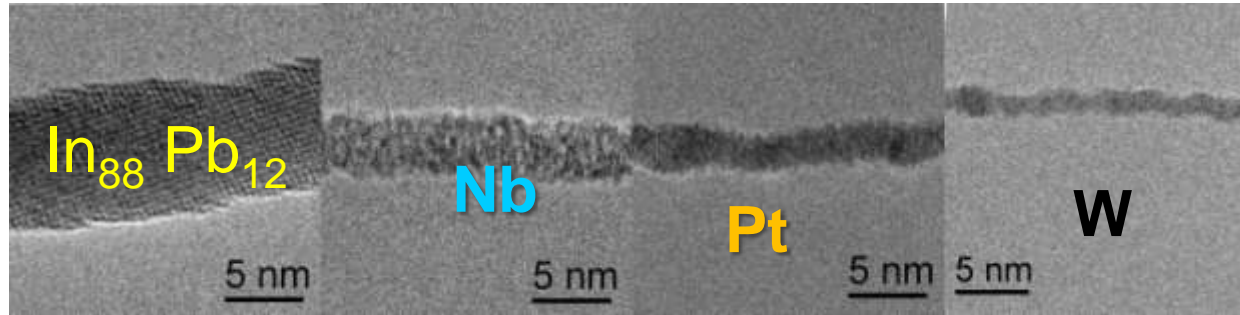


$$R \leq R_s^{\max} \equiv 0.78\alpha a$$

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

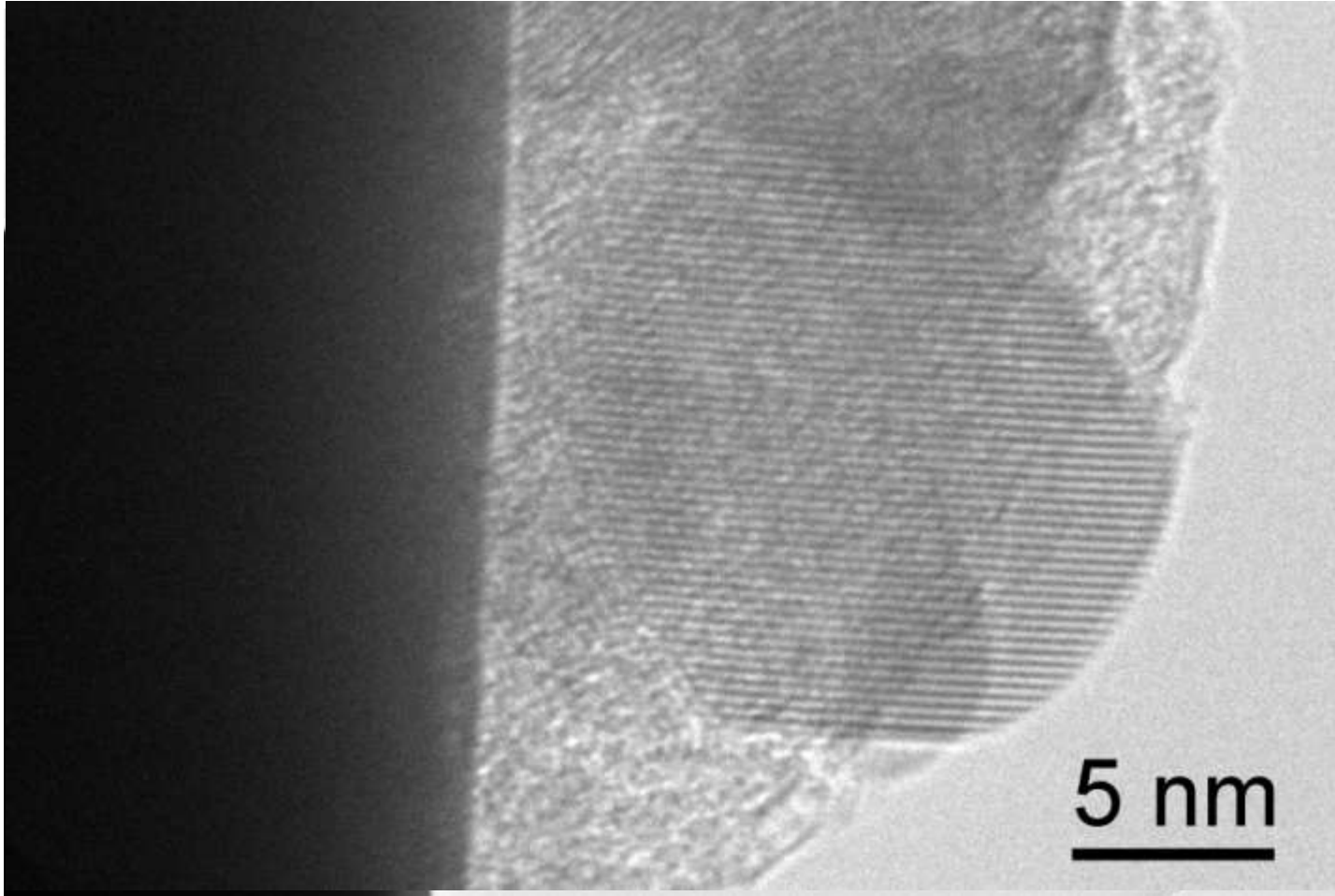
$$R \leq R_w^{\max} \equiv \alpha a$$

Сравнение экспериментальных диаметров нанопроволок с предсказанными моделью



Даже абсолютные значения диаметров нанопроволок (биссектрисса) предсказываются с неплохой точностью.

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



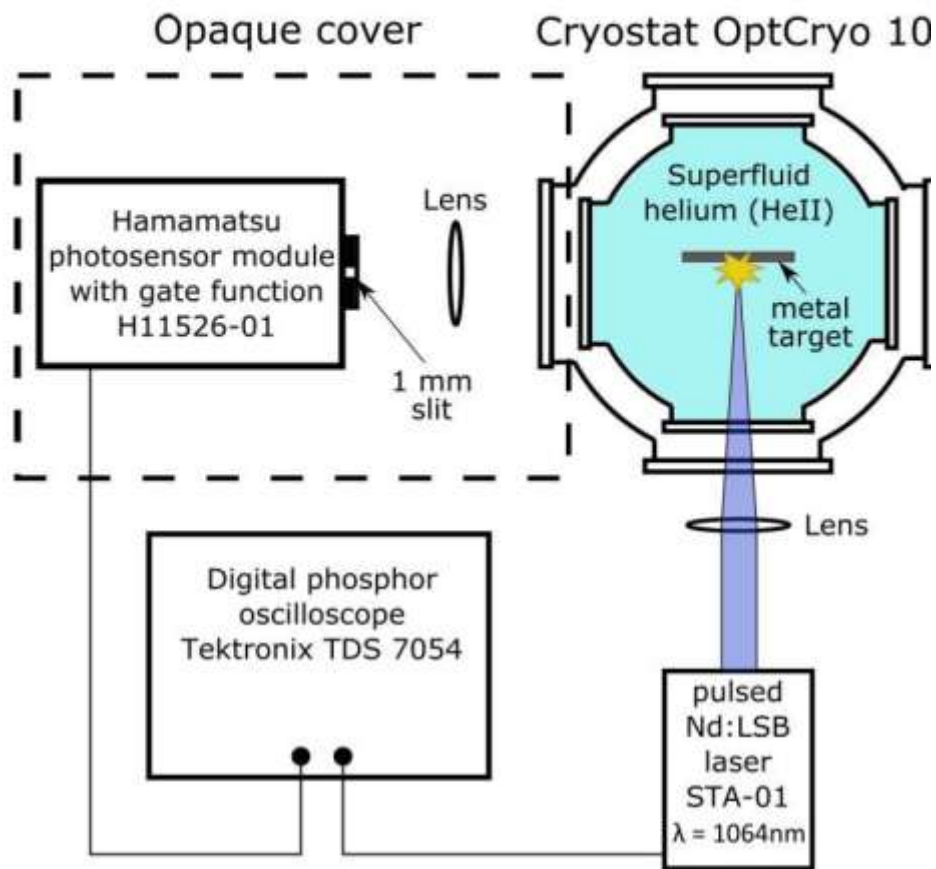
Atomically smooth surface may appear only as a result of cluster melting.

Итак, чтобы объяснить структуру нанопроволок мы вынуждены были допустить плавление металлов в сверхтекучем гелии.

Некоторые нам поверили, но для большинства то, что **Вольфрам (!) плавится в сверхтекучем гелии**, где перегревы в доли кельвина считались мощными проявлениями необычных физических процессов (сопротивление Капицы)!?!

Я их понимаю и, возможно, тоже бы не поверил и не стал вникать ...

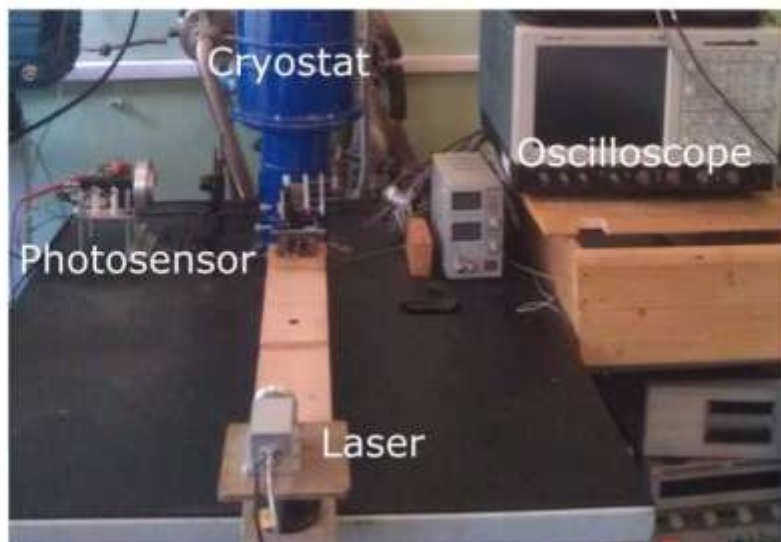
Пришлось ставить прямые эксперименты - изучать тепловое излучение, сопровождающее рост проволок внутри сверхтекучего гелия. К счастью, в горячих металлических кластерах диаметром больше 1 нм уже много свободных электронов и прото-кластеры уже можно считать АЧТ.



Экспериментальная установка

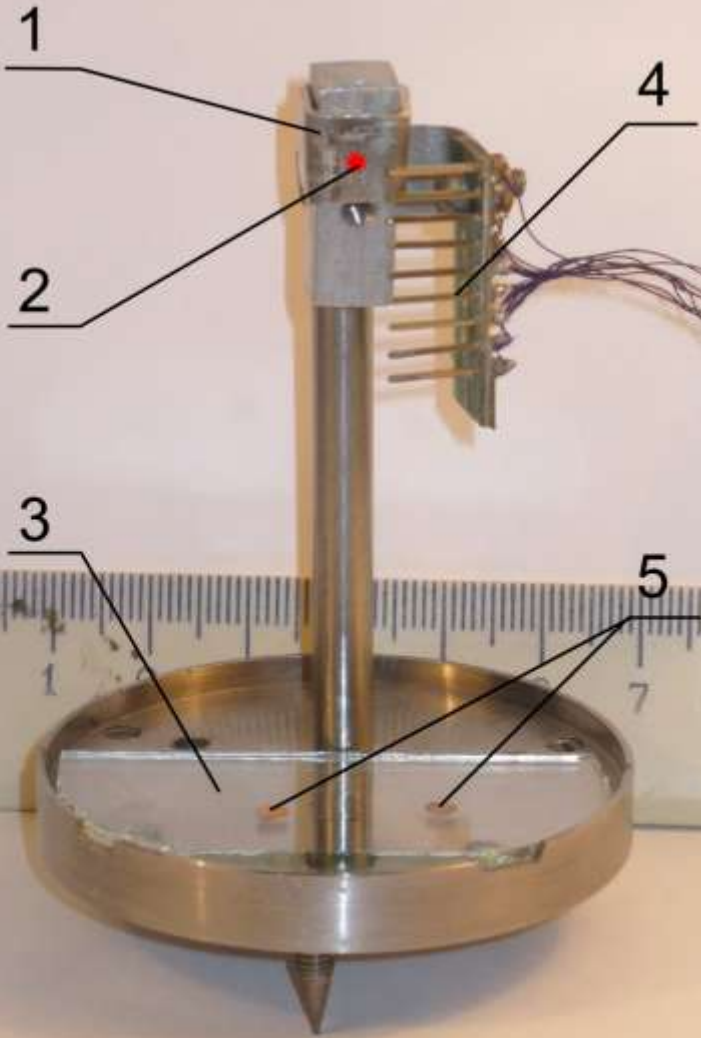
Квантованные вихри рождаются в фокусе лазера, т.е. в нужный момент в нужном месте

Иттриевый лазер, частота импульсов до 4 kHz, $E_{\text{pulse}} = 10^{-4}$ Дж
 $\tau_{\text{pulse}} = 400$ ps.



Фотообъектив создает дважды увеличенное изображение рабочей зоны реактора. В экспериментах с пространственным разрешением фотоумножитель с 1 мм-щелью двигался в плоскости изображения.

Experimental cell



1 – metallic target

2 – focus of low-power pulse-repetition laser with 500 ps pulse duration

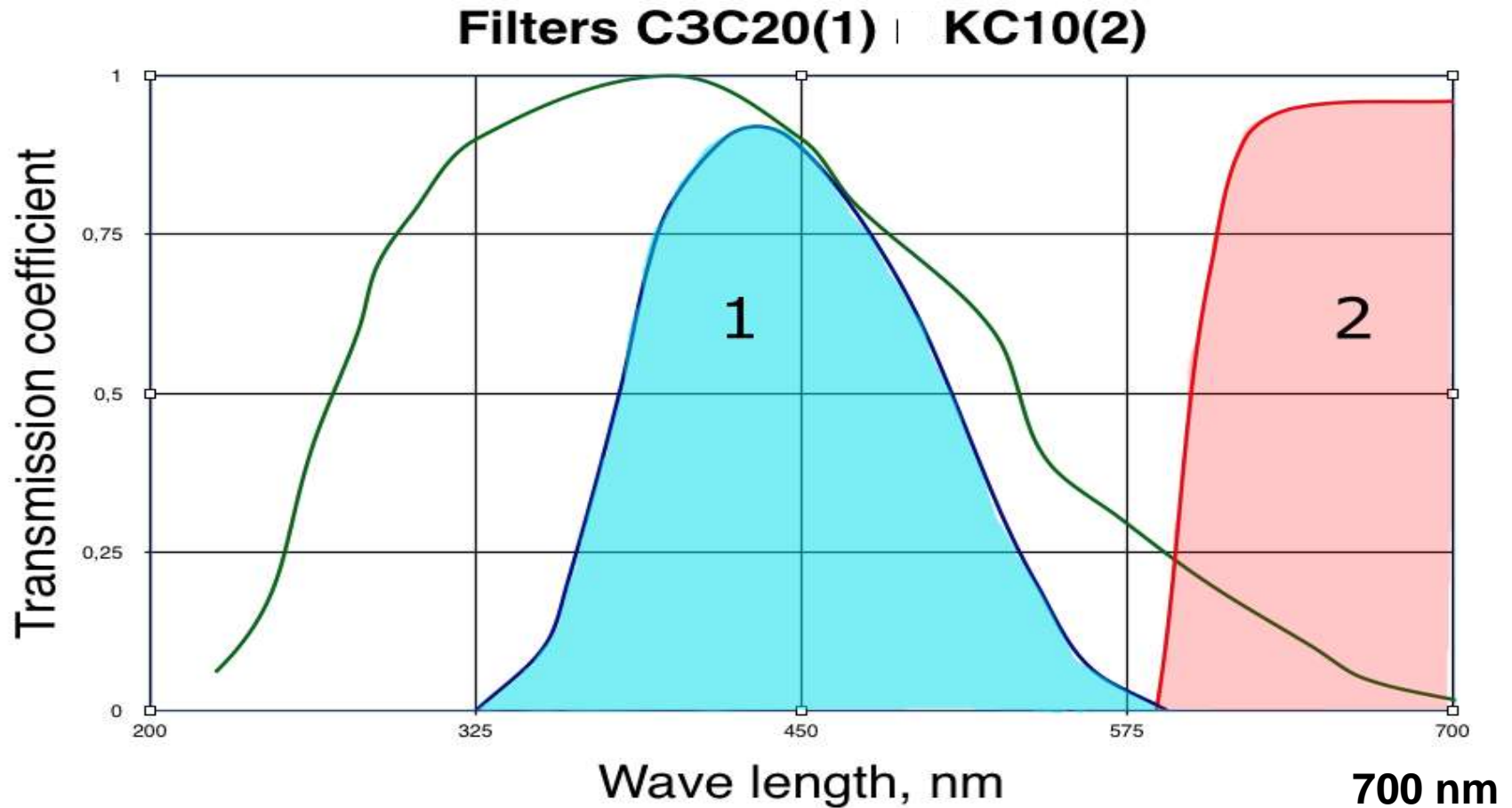
3 – glass slide

4 – the electrode array

5 – TEM grids

1. The nanowires grown between electrodes were subjected to electrical measurements in 1.6 – 300K temperature range.
2. The nanowires deposited on TEM grids were investigated by electron microscopy at 300K

PMT spectral sensitivity



We specially chosen PMT sensible only to visible radiation

The choice of metals under study- W, Mo, Pt and Indium

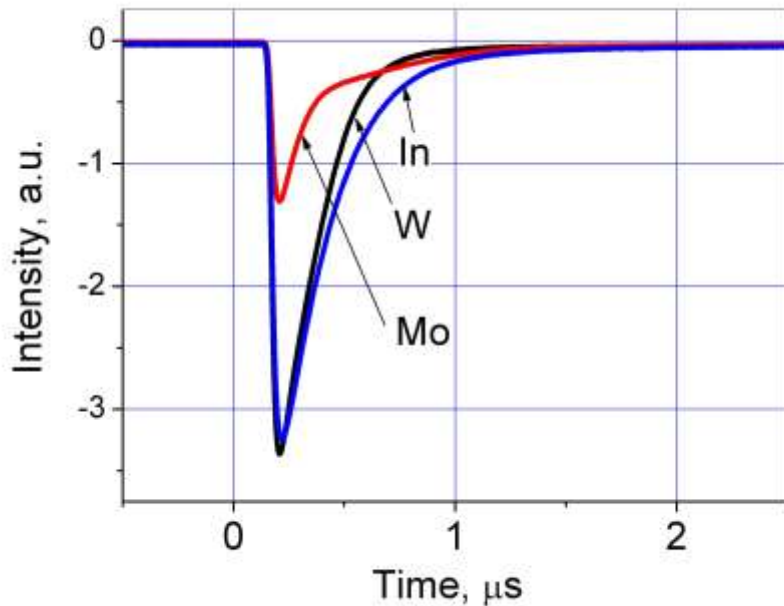
Fusible **Indium** should never be seen, refractory **Tungsten** should always be seen, whereas **Platinum and Molybdenum** should be seen only provided $T = T_{\text{adiabatical}}$

Metal (# in PT)	T_{melt} K	Heat to T_{melt} kJ/mole	λ_{melt} at T_{melt} μ	Hidden heat of melting, kJ/mole	$T_{\text{adiabatical}}$ (for 1 nm clusters) K	λ_{melt} at $T_{\text{adiabatical}}$ μ	Heat capacity, C # J/mole K	R, nm
In (49)	430	11.5	6.44	3.24	1900	1.53	26.7	4.78
Pt (78)	2041	52.8	1.42	27.8	3280	0.88	25.9	1.97
Mo (42)	2890	80.9	1.0	23.93	4200	0.69	28	1.89
W (74)	3695	89.8	0.78	35.2	6690	0.43	24.3	1.98

Laser ablation

- As usual the gas bubble filled by plasma was formed in the laser spot at the target surface. $D_b \sim 0.2$ mm.
- Metallic atoms and small clusters from this plasma embedded into liquid helium through the bubble surface.

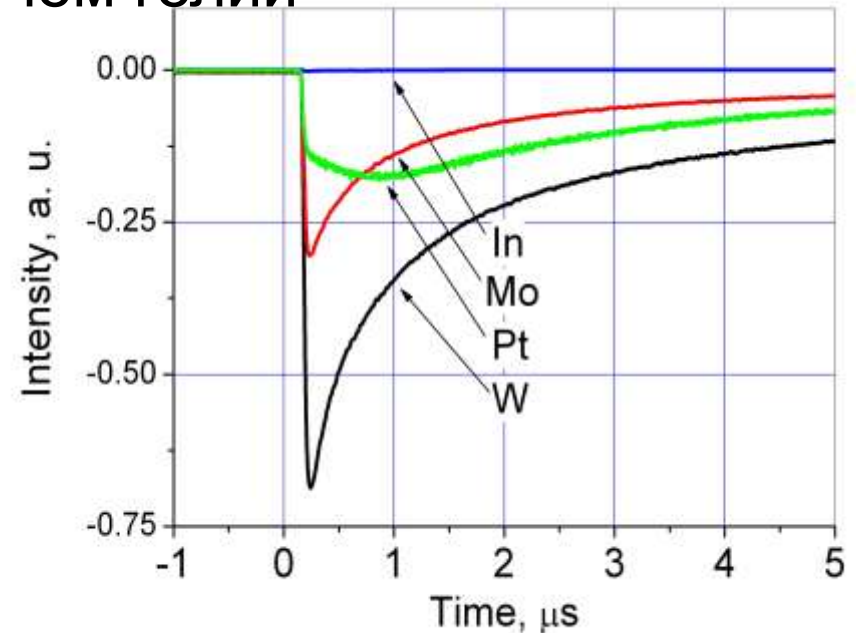
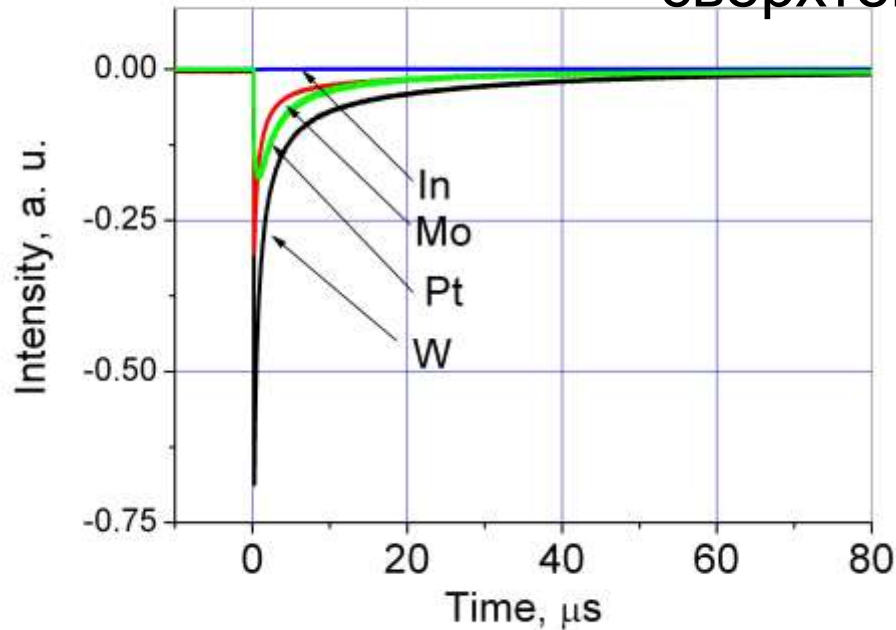
Gas plasma bubble glowing



The intensity of illumination in the focal spot on the targets of indium, tungsten and molybdenum, respectively. The measurements were made at 45° angle to the plane of the target in a helium gas at room temperature and atmospheric pressure.

**Indium plasma is rather bright.
All signals are short (less than 1 μs duration).**

Относительные интенсивности видимого (400 – 700 нм) свечения при конденсации вольфрама, молибдена, платины и индия в сверхтекучем гелии



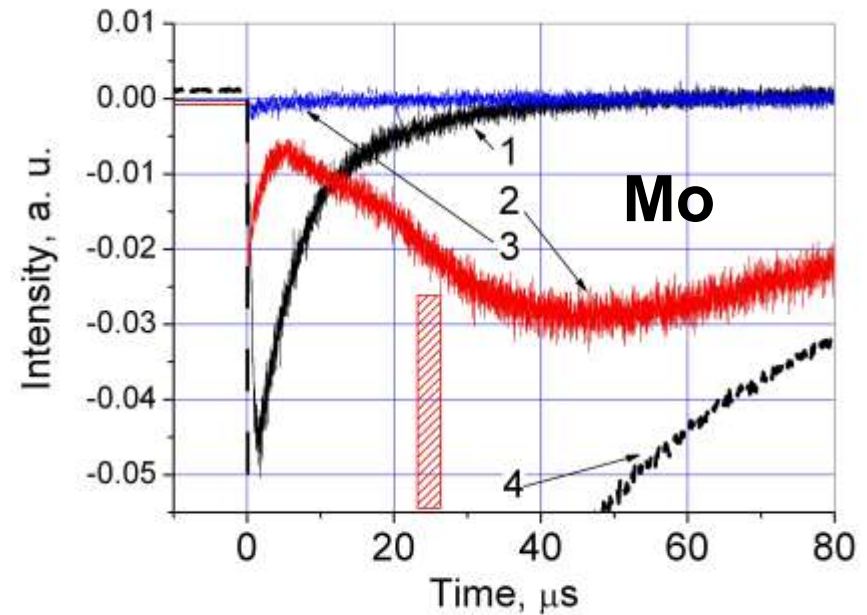
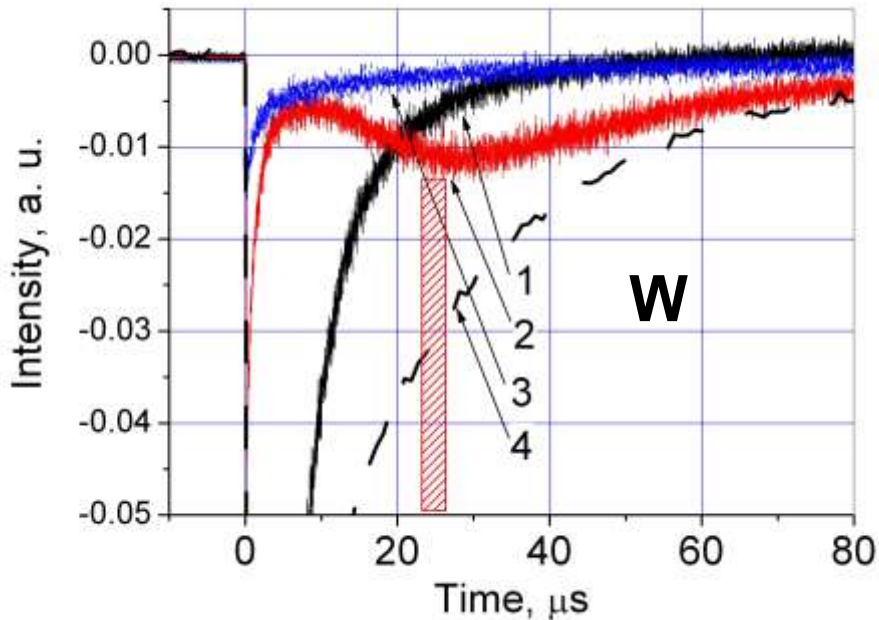
Весь сигнал

Начальный участок

Все металлы, кроме легкоплавкого индия, «сияют» в видимом диапазоне. Их яркостная температура даже превышает температуры плавления металла

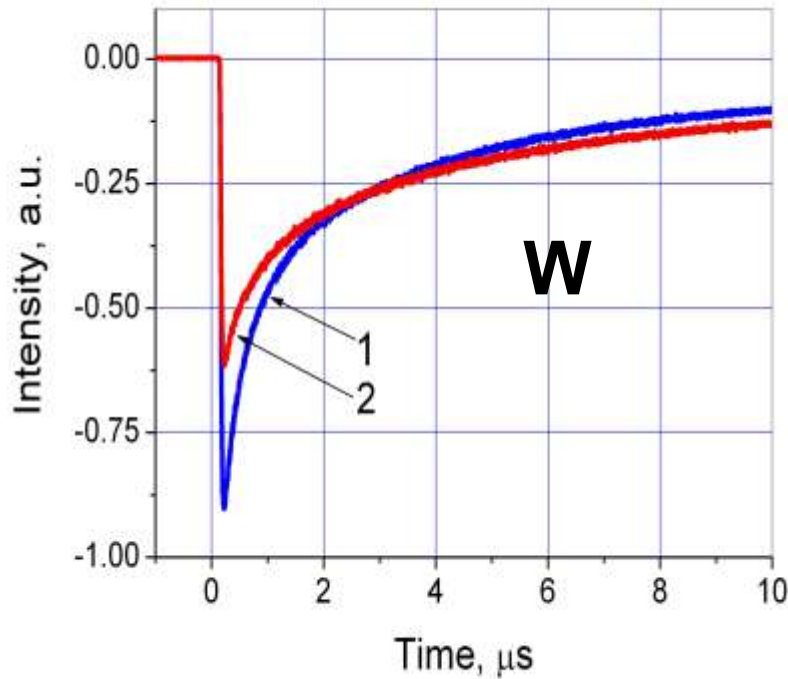
W - > 4000 K, Mo - > 3500 K, Pt - > 3000 K !!!

«Облако» металла, взвешенного в сверхтекучем гелии, расползается максимально быстро, со скоростью Ландау, но конденсация в вихрях идет еще быстрее

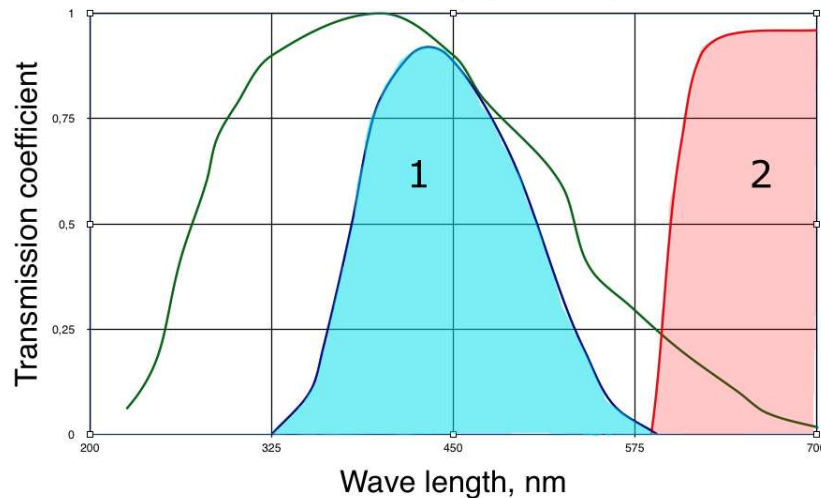


Кривые отвечают следующим расстояниям от фокуса лазера: 1 – 0; 2 – 1.25 and 3 - . 2.5 mm; 4 – полный сигнал из реактора. Красный прямоугольник – момент прихода плоского фронта, движущегося со скоростью Ландау (50 м/с) в точку, отстоящую на 1.25 мм.

The cooling (temporal changes in emission spectra)

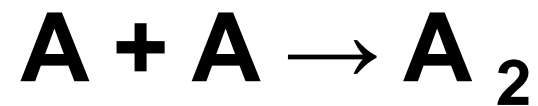


- Blue (1) and red (2) filters
- Blue corresponds to higher temperature
- PMT sensitivity in red is 20 times less than in blue.
- The cooling exists (blue signal at the beginning is higher than red one) but really it is rather small effect.



Но если расползанием металла по объему He II и изменением спектра во времени можно пренебречь, то зависимость свечения от времени отражает скорость реакции конденсации металлических кластеров

To characterize its rate one should use the simplest approximation describing the coagulation as a bimolecular process of two identical clusters coalescence,



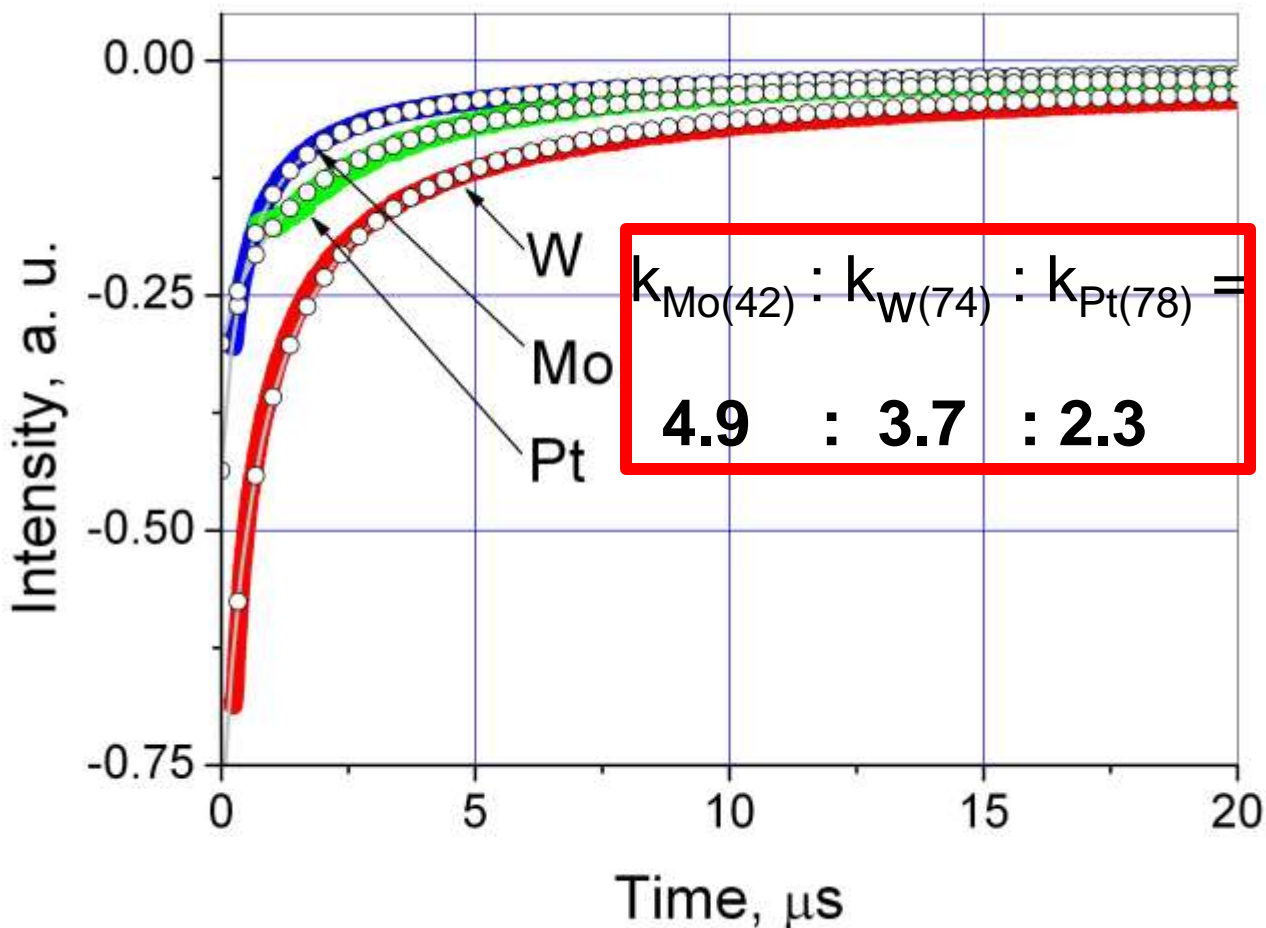
the kinetic equation:

$$\frac{dn}{dt} = -kn^2$$

and hyperbolic
solution

$$n = \frac{n_0}{1 + kn_0 t}$$

Доказательство происхождения свечения: гиперболический закон затухания, справедливый для коагуляции



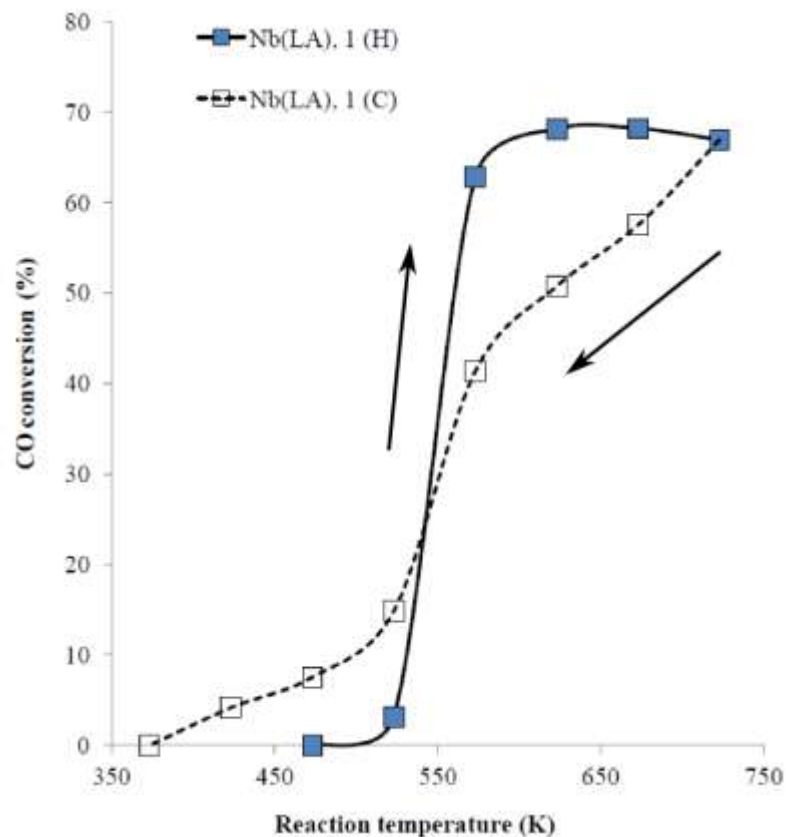
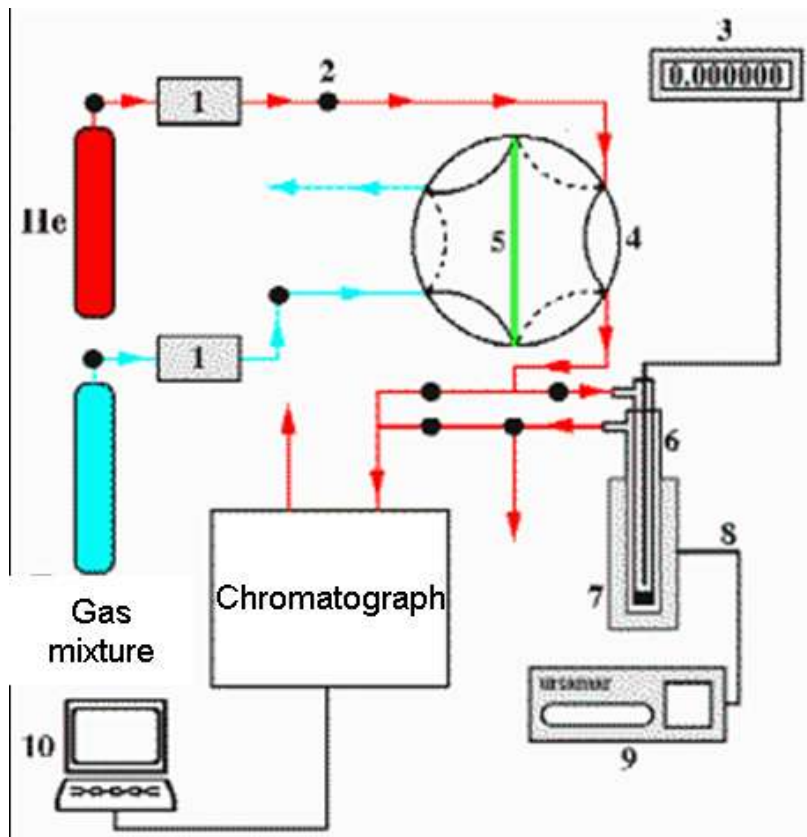
$$k_{\text{Mo}(42)} : k_{\text{W}(74)} : k_{\text{Pt}(78)} = 4.9 : 3.7 : 2.3$$

Сплошные кривые - эксперимент
Кружки – гиперболическая зависимость

«Константы скорости» для одномерных вихрей должны относиться как скорости движения кластеров вдоль вихря.

Другие результаты

Нанокатализ: Au, Pd, Pt и Nb нанопластины как катализаторы в модельной реакции окисления CO : $2\text{CO} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{CO}_2$



Gordon, E. B.; Karabulin, A. V.; Matyushenko, V. I.; и др., *Gold Bull*, 48, 119 (2015)

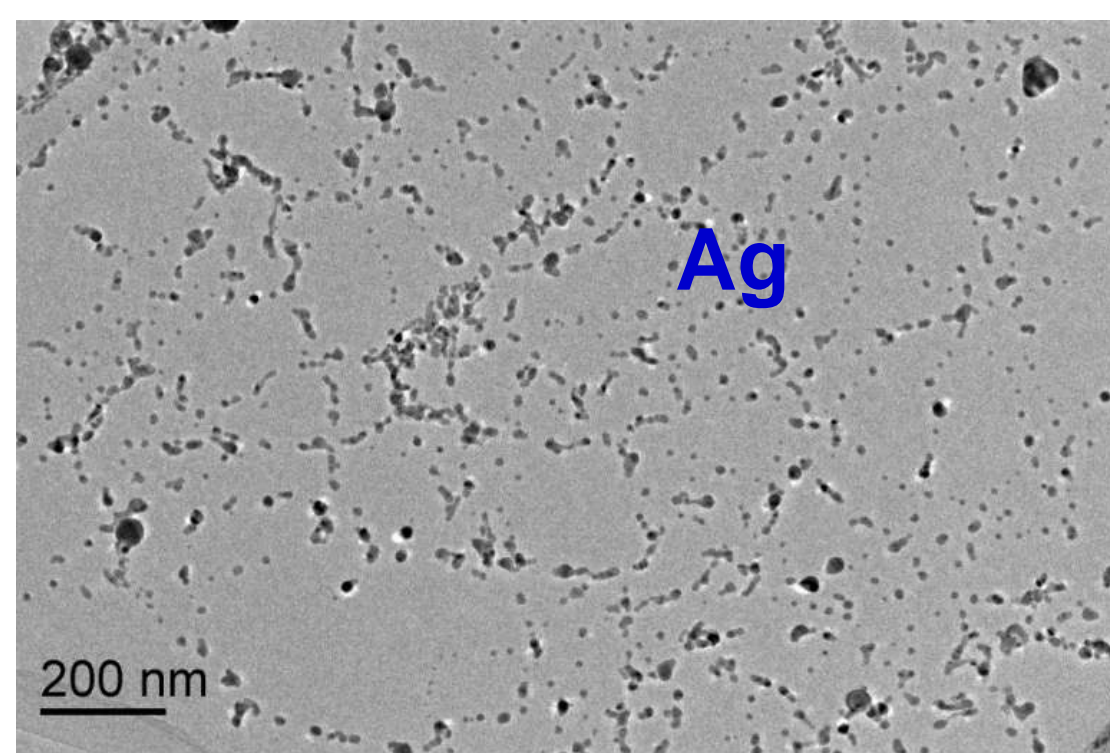
Гордон Е.Б., Карабулин А.В., Матюшенко В.И. и др., *ТЭХ*, 52, 75 (2016)

ХВЭ, 50, 305 (2016)

Аномально низкая термическая стабильность тонких нанопроволок (безотносительно того, каким образом они получены)

Нанопроволоки диаметром, меньшим 4 нм, имеют низкую температурную стабильность и благодаря Рэлеевской неустойчивости распадаются на цепочки нанокластеров при T в 3 раза меньших температуры $T_{пл}$.

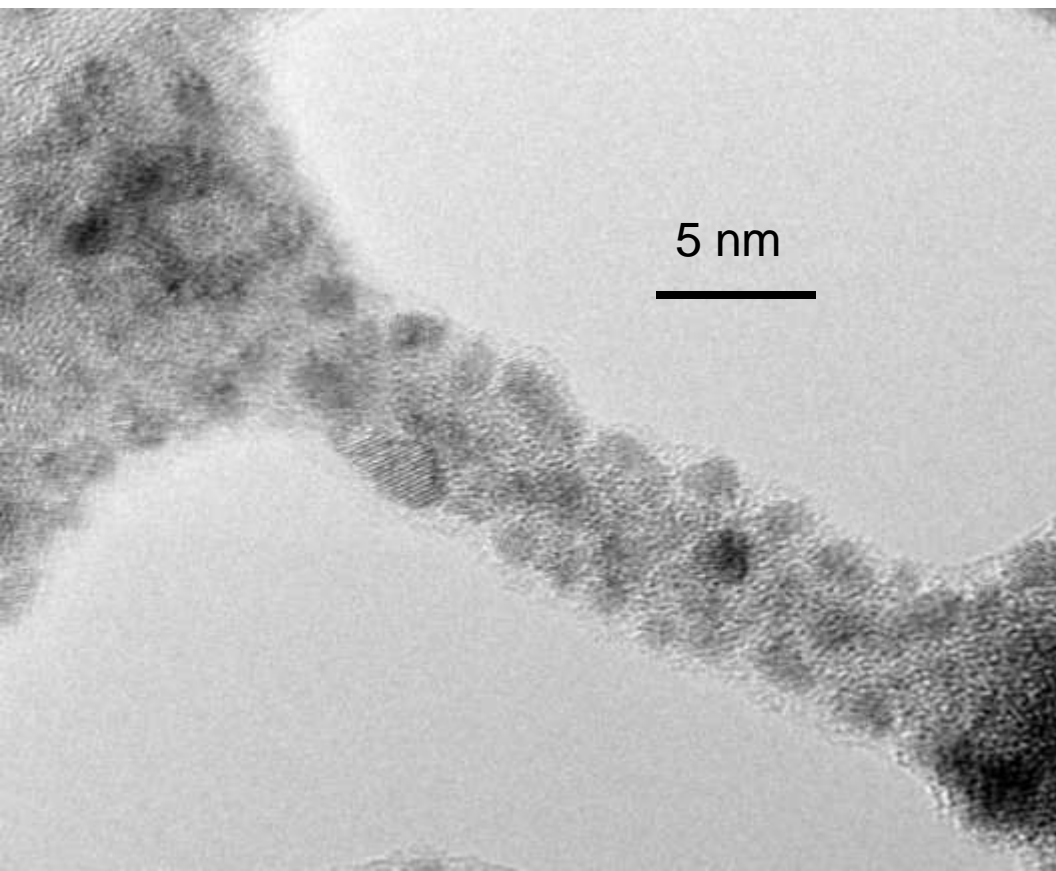
E. B. Gordon, A. V. Karabulin, V. I. Matyushenko, and I. I. Khodos, Phys. Chem. Chem. Phys. 16, 25229 (2014) and J. Phys. Chem. A 119, 2490 (2015).



Парадокс: нанопроволока из легкоплавкого индия, имеющая диаметр 8 нм, стабильна по крайней мере в течение года, а нанопроволока из серебра диаметром 4 нм не выдерживает нагрев до комнатной температуры

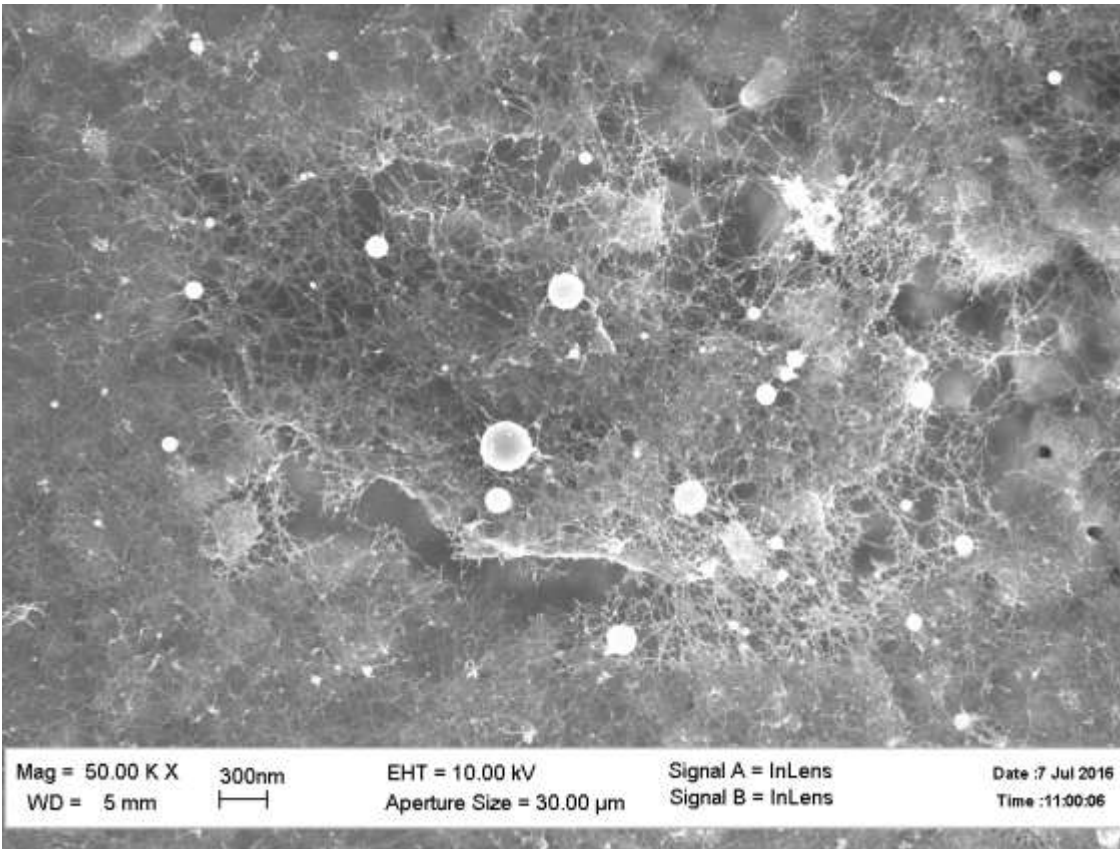
Образование гетероструктур при конденсации сплавов в сверхтекучем гелии

Ограничения, которые это накладывает на их применения в качестве катализатора при повышенных температурах, могут быть сняты при выращивании нанопроволок из сплавов.



Структура проволоки, полученной из сплава $W:Pt = 1:1$ и прогретой до $350^{\circ}C$ на воздухе. Зерна – нанокристаллы - Pt, тело – WO_3 . Температурная стабильность обеспечивается окисью вольфрама, а каталитическая активность - регулярно расположенными на поверхности нанокластерами платины.

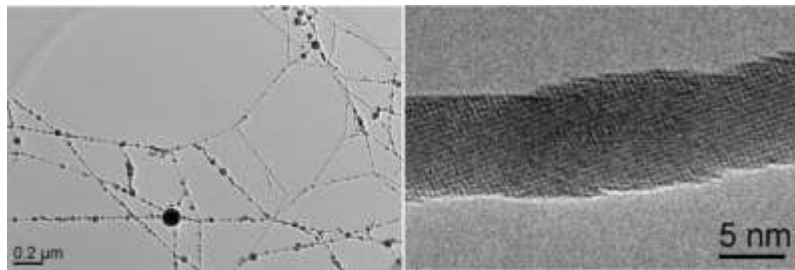
Холодные катоды



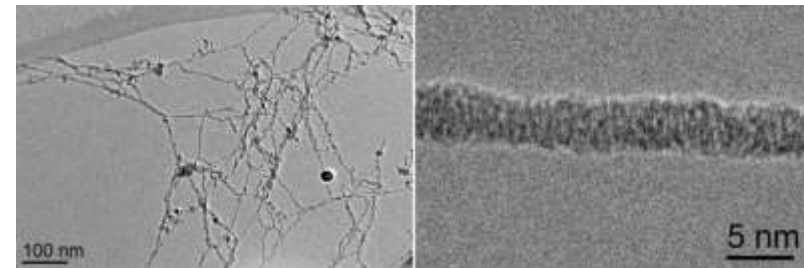
Наноплатина из платины, является превосходным холодным катодом, в котором активными местами являются не острия, а вся боковая поверхность.

Для нанокатализа появляется уникальная возможность управления работой выхода электронов из металлической наноплатины - катализатора с помощью умеренного напряжения 10 – 100 вольт обоих знаков. Мы надеемся оптимизировать таким физическим способом активность катализаторов

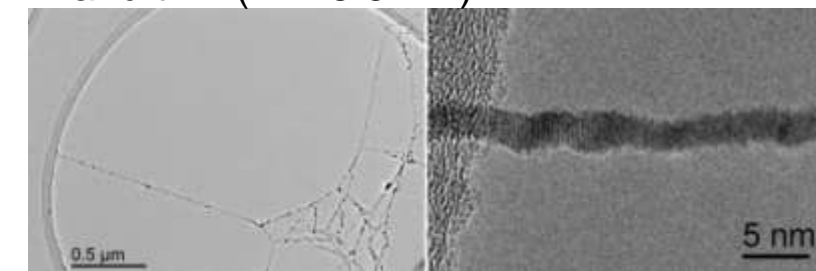
Доказательство проявления квантового сдвига фаз в тонких Nb нанопроволоках: переход «сверхпроводник – изолятор» при $T \rightarrow 0$



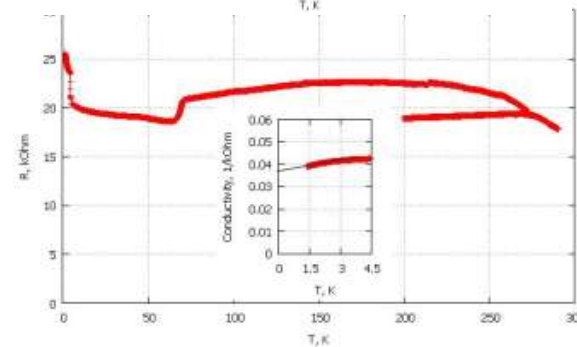
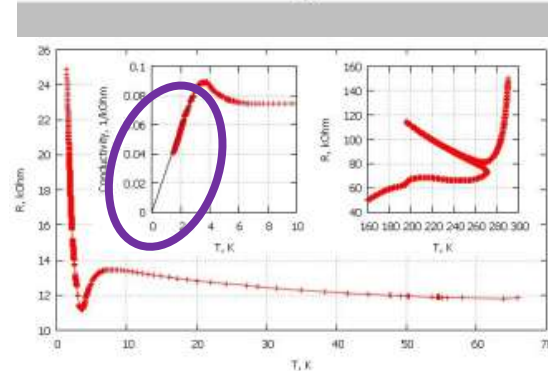
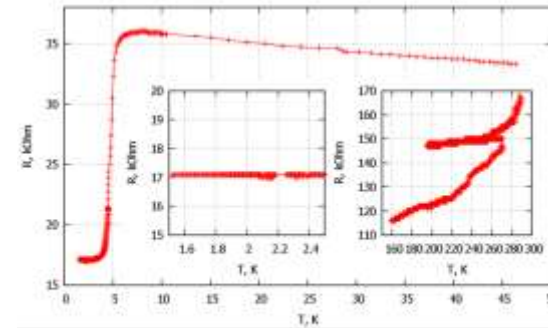
$\text{In}_{88}\text{Pb}_{12}$ - superconductor ($T_c = 5\text{K}$)
but thick ($D = 7\text{ nm}$)



Niobium - superconductor ($T_c = 9\text{K}$)
and thin ($D = 3.5\text{ nm}$)



Platinum – not superconductor, and
more thin ($D = 3\text{ nm}$)



Gordon, E. B.; Bezryadin, A. V.; Karabulin, A. V., et al., Physica C, 516, 44 (2015)

Выводы:

1. Считалось, что продуктами конденсации металлических наночастиц, введенных в сверхтекучий гелий, являются рыхлые сферические кластеры. Оказалось, что ими являются длинные тонкие нанопроволоки с плотной решеткой.
2. Считалось, что все физико-химические процессы в сверхтекучем гелии идут строго изотермически. Оказалось, что при конденсации металлов продукты нагреты до нескольких тысяч К и находятся в расплавленном состоянии.
3. Все это справедливо не только для металлов и не только для химических процессов.
4. Универсальный метод выращивания нанопроволок – первое практическое применение сверхтекучести гелия.
5. Существование громадных локальных перегревов не позволяет получать в сверхтекучем гелии каких-либо экзотических химических соединений, зато в нем можно получать **уникальные нано-материалы**, экзотические свойства и высокая стоимость которых оправдывает дорогостоящий и маломасштабный метод их получения.

Thanks for
attention



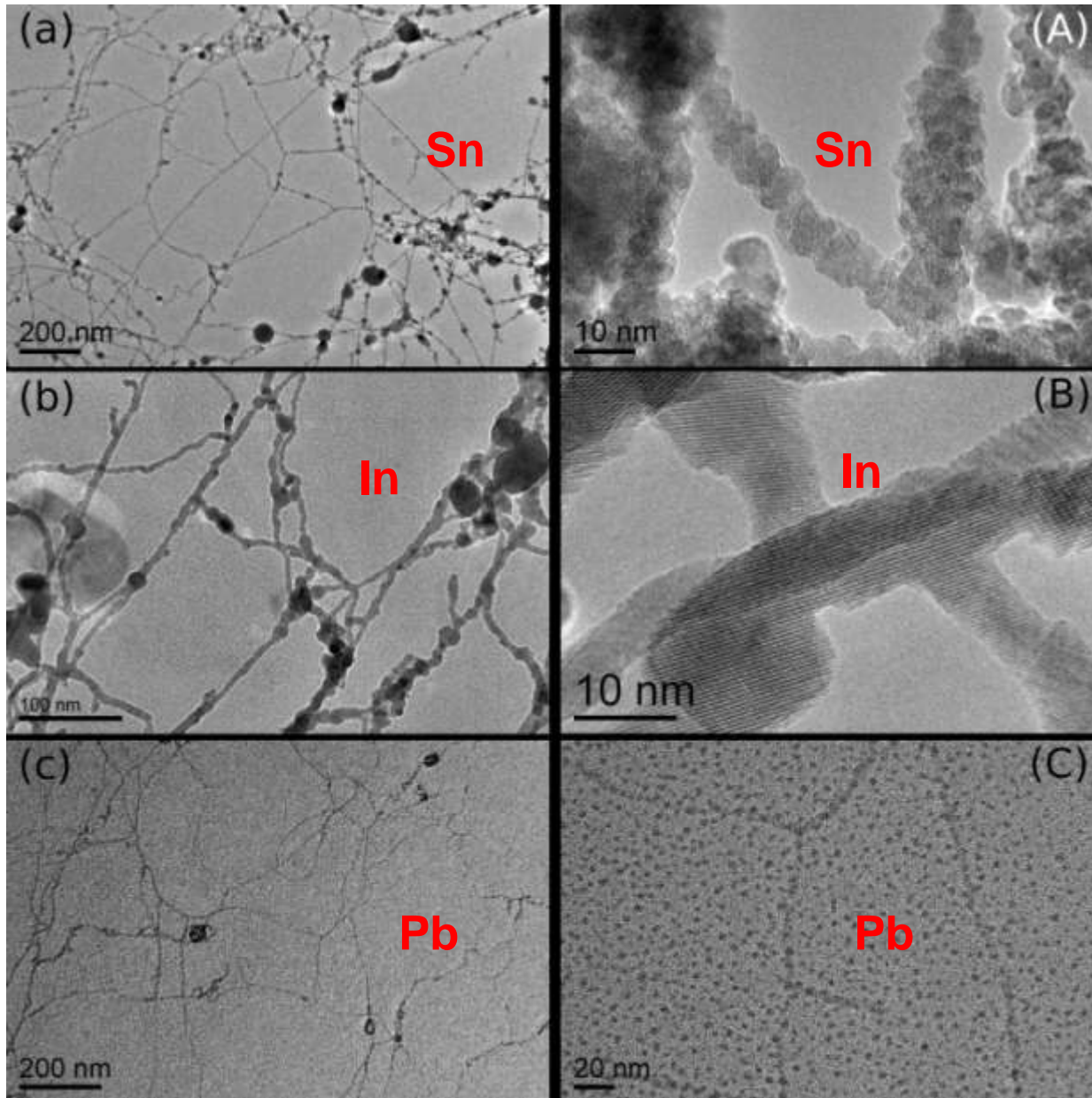
Thanks for
attention





Under long laser
ablation of metal the
bundles of nanowires
are enough large to
be seen by eye

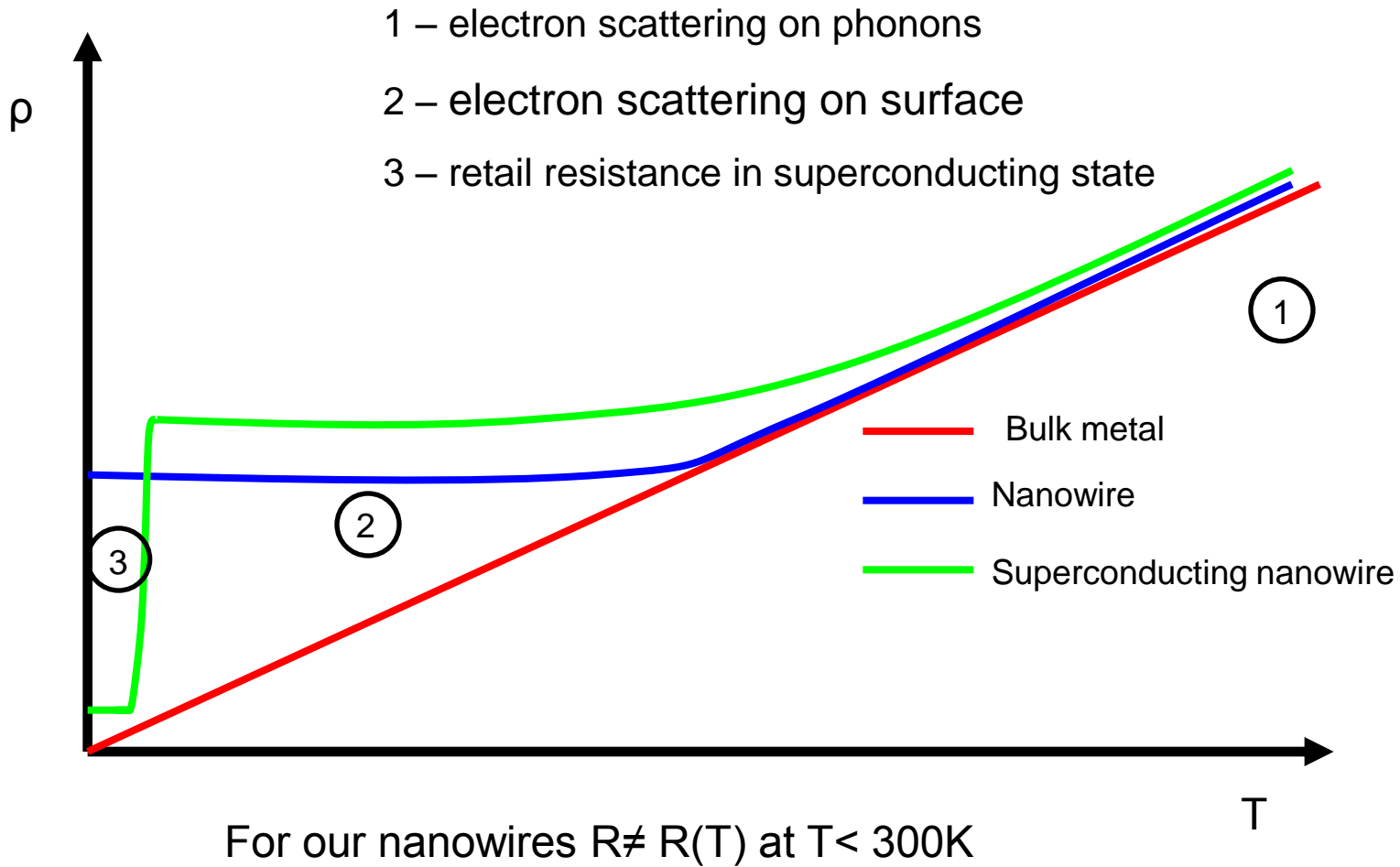
Nanowire bundles morphology and structure



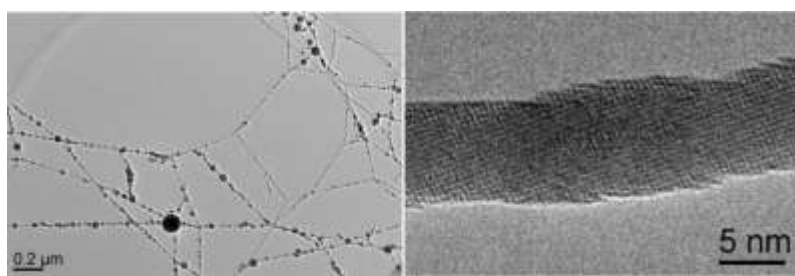
TEM images of fragments of nanowire bundles.

Nanowires of different metals display different structures: tin nanowires composed of stuck together polycrystals with crystallite sizes of 2 nm (A), indium wire are fused to each other monocrystals (B), lead nanowires unfortunately rapidly oxidized on air and only traces of consisting of oxide nanowires seen in the electron microscope (C).

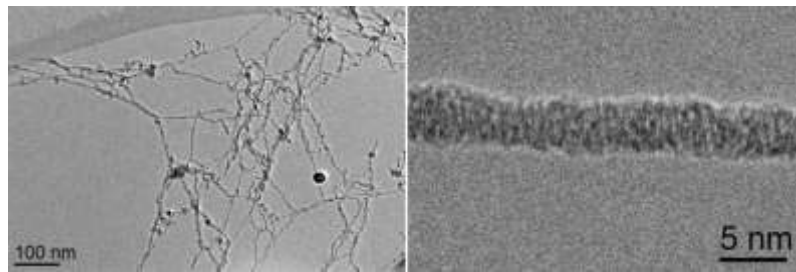
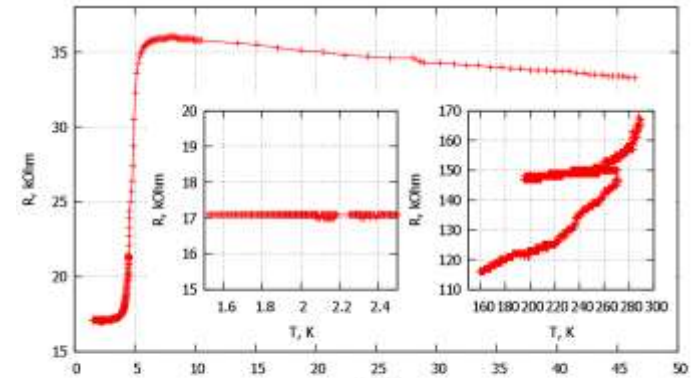
Metal resistance vs *temperature*



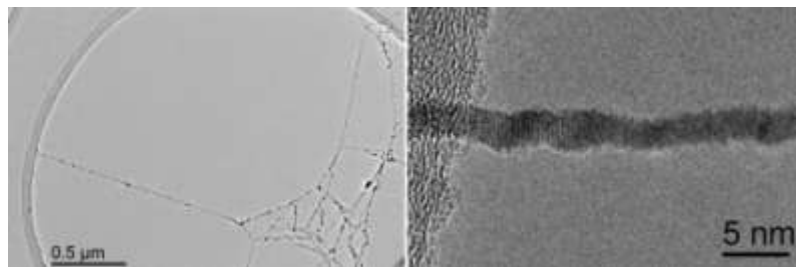
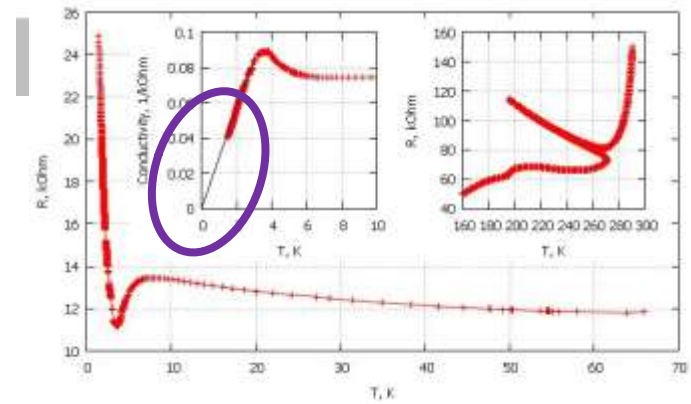
The evidence of Quantum Phase Slip occurrence in thin Nb nanowires - superconductor \rightarrow insulator transition at $T \rightarrow 0$



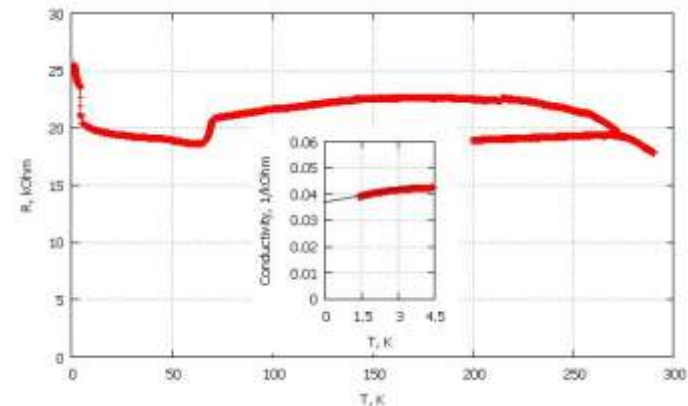
$\text{In}_{88}\text{Pb}_{12}$ - superconductor ($T_c = 5\text{K}$)
but thick ($D = 7\text{ nm}$)



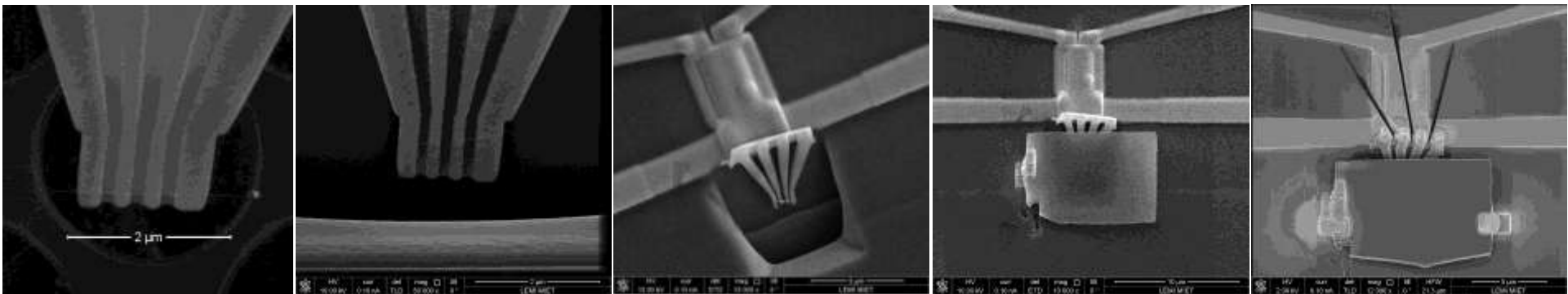
Niobium - superconductor ($T_c = 9\text{K}$)
and thin ($D = 3.5\text{ nm}$)



Platinum – not superconductor, and more
thin ($D = 3\text{ nm}$)



Manipulation by Separate Nanowire and its inclusion to 4-wire scheme of measurement



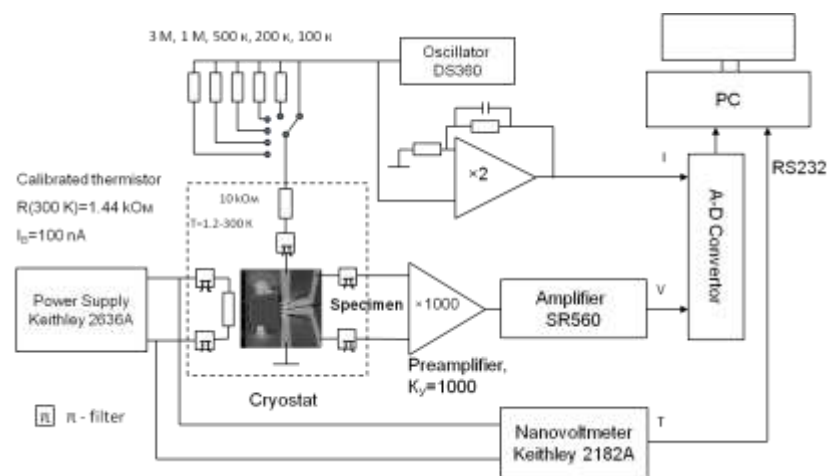
Step
1

Step
2

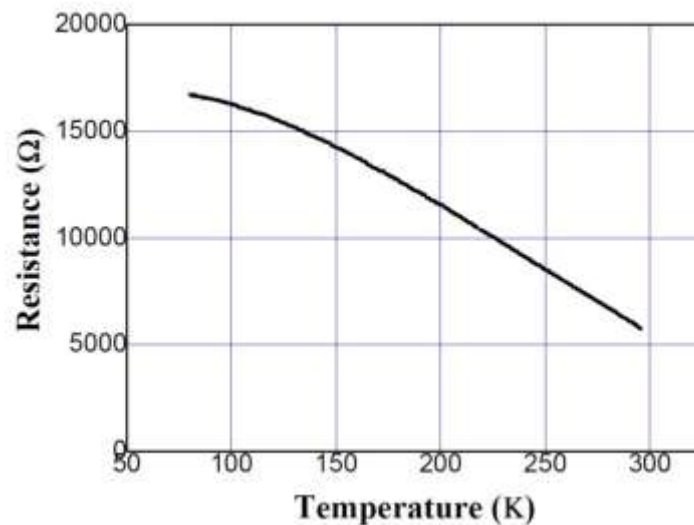
Step
3

Step
4

Step
5

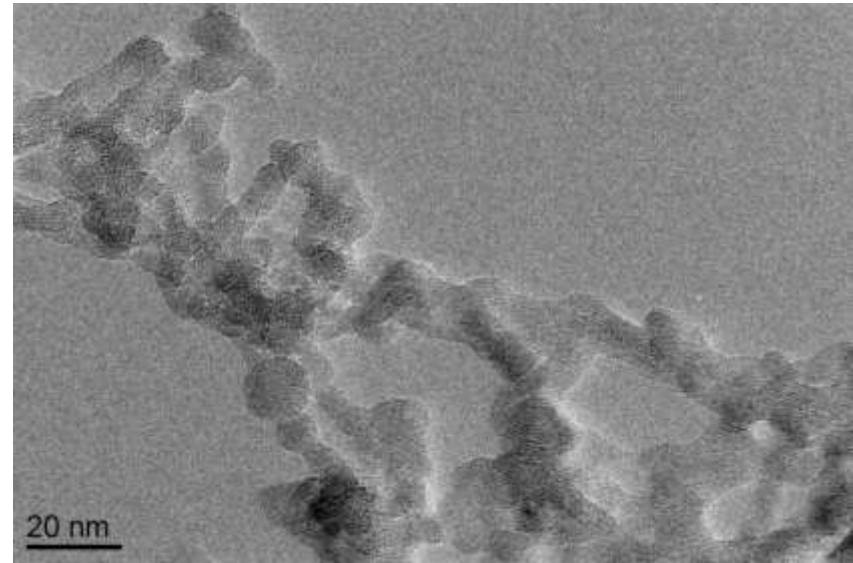
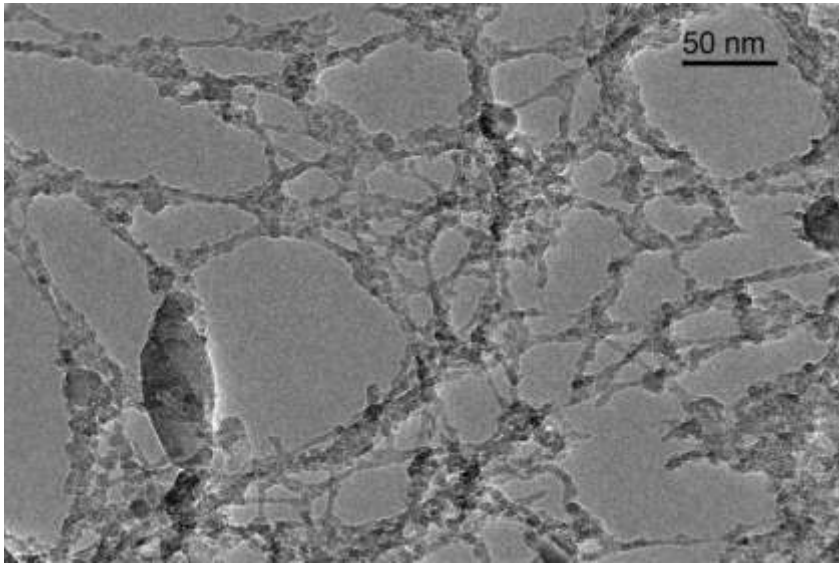


Scheme of measurement

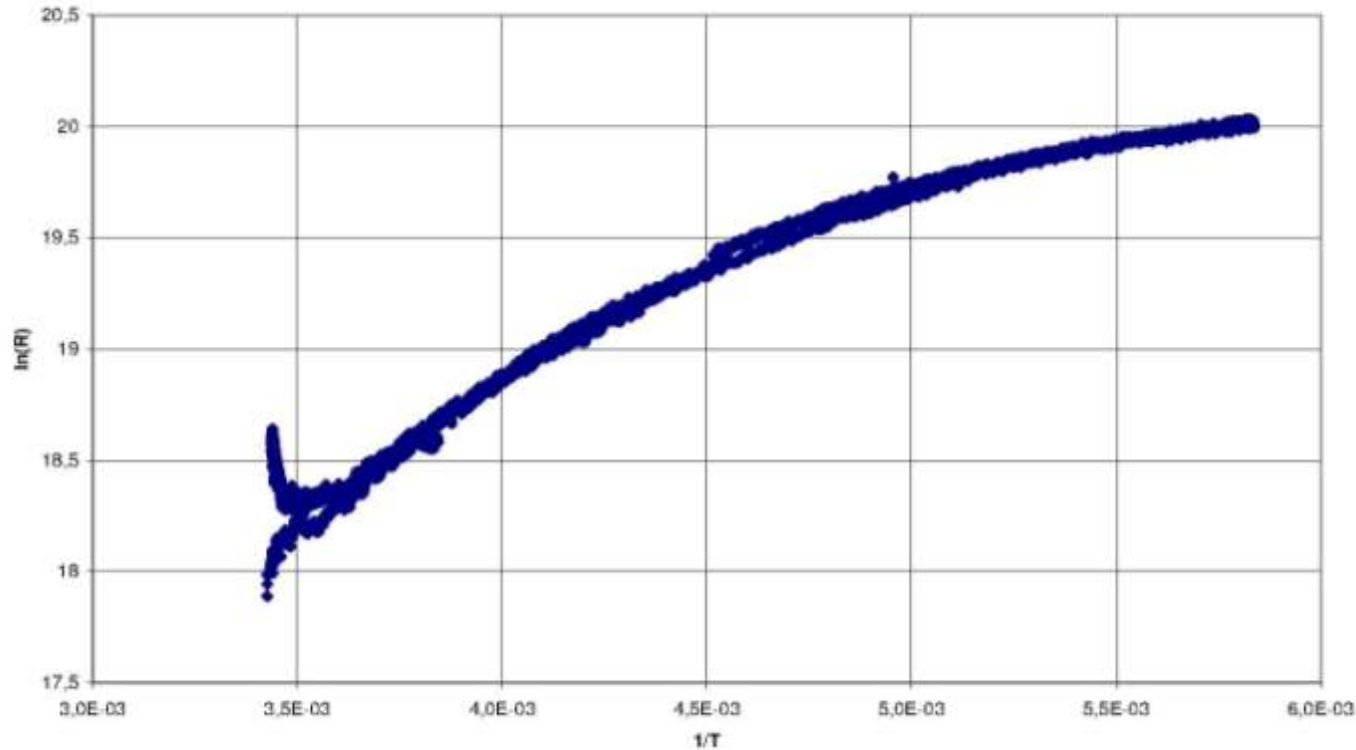


$R(T)$ for Pt nanowire ($D=3$ nm, $L=280$ nm)

Pure silicon



Dependence $\ln R$ on $1/T$ for bundle of nanowires is typical for the semiconductor, but is too weak for Si



Thermal instability of thin nanowires

	Indium	Silver	Gold	Platinum
Diameter, nm	8	5	4	3
T_{melting} , K	430	1235	1337	2041
$T_{\text{mw}}/T_{\text{m}}$, equation (1)	0.95	0.92	0.92	0.87
$T_{\text{d}}/T_{\text{m}}$, experiment	0.9	0.24	<0.5	0.4

For nanowires with diameter **less than 5 nm**, there is a specific channel of decay realized at temperatures **2 - 3 times lower their melting**. According to our experiments, this channel is implemented by **unfreezing the atom surface mobility** with the proviso that **peapod shape is energetically favorable structure**

A lot of possible applications

Nanocatalysis - **Gold**, Silver, **Platinum** ... nanoclusters displayed unusual and strong catalytic activity (one of the largest achievements in modern chemistry) but only being of 2 – 5 nm in size!!!

Nanoweb instead of clusters →

- Any support for immobilization
- Convenient topology
- Electrocatalysis – applying electrical voltage of 10 -100 V is sufficient even for electron field emission from the nanowire's side surface

A lot of possible applications

Quantum devices - “For a superconductor, charge and phase are dual quantum variables. A phase-slip event in a nanowire changes the phase difference over the wire by 2π ; it is the dual process to Cooper-pair tunnelling in a Josephson junction.” J.E. Mooij* and Yu.V. Nazarov, Superconducting nanowires as quantum phase-slip junctions, *Nature physics* v 2, p. 169 (2006)

Promises: →

- nanocomputer qubit (Shapiro steps),
- point SQUID, etc
- superconductivity suppression and Coulomb blockade has already observed in Niobium 3 nm – nanowire

The nanowires made of alloys - promises

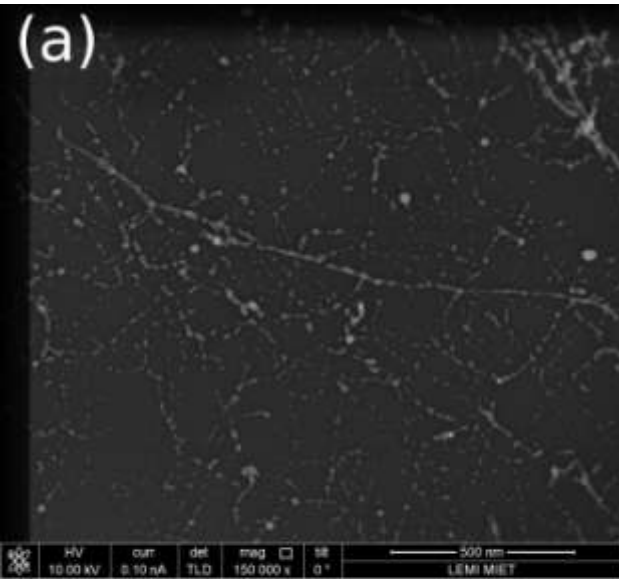
Phase diagram for the surface layers, the energy of which is determined mainly by the surface tension is different from that for the bulk. As a result, the surface of the nanowire is enriched by one of the components atoms compared with the bulk. → **The surface covering by motionless or oxidized atoms**

For alloys with compositions close to the eutectic, the separation of α and β phases nanocrystals in the axial direction. The specific length of different composition alternation should be close to the caliber, i.e. wire diameter. → **The nanowire heterostructures for various purposes could be created in this way.**

Report is based on papers:

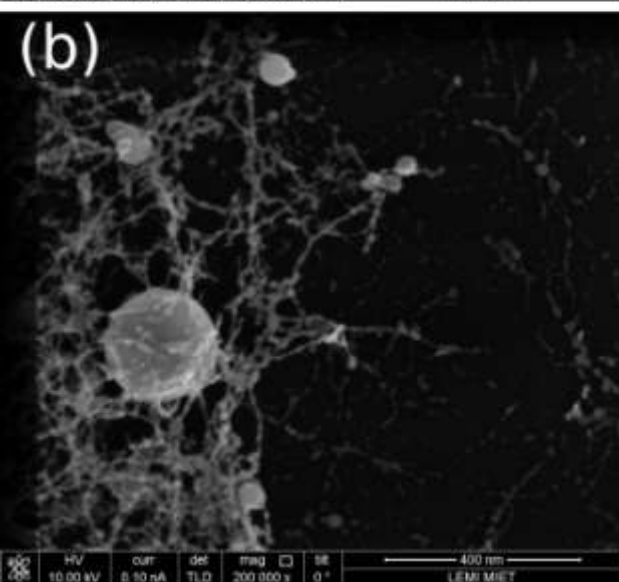
1. Gordon E.B., Okuda Y., [Catalysis of impurities coalescence by quantized vortices in superfluid helium with nanofilament formation](#). **LOW TEMP. PHYS.** 35(3) P: 209-213 (2009).
2. Gordon E.B., Karabulin A.V., Matyushenko V.I., et al., [Electric properties of metallic nanowires obtained in quantum vortices of superfluid helium](#): **LOW TEMP. PHYS.** 36 (7) P: 590-595 (2010).
3. P. Moroshkin, V. Lebedev, B. Grobety, C. Neururer, E.B. Gordon and A. Weis. Nanowire formation by gold nano-fragment coalescence on quantized vortices in He II: **EPL**, 90(3), AN 34002, (2010).
4. Gordon E.B., Karabulin A.V., Matyushenko V.I., et al., Structure of metallic nanowires and nanoclusters formed in superfluid helium **JETP** 112(6) p: 1061-1070 (2011).
5. V. Lebedev, P. Moroshkin, B. Groberty, E. Gordon, A. Weis. Formation of Metallic Nanowires by Laser Ablation in Liquid Helium. **J.Low Temp.Phys.** 165(3-4), 166-176, (2011).
6. E. B. Gordon, A.V. Karabulin, V.I. Matyushenko, V.D. Sizov, I.I. Khodos. The role of vortices in the process of impurity nanoparticles coalescence in liquid helium. **Chem. Phys. Lett.**, 519-520, 64-68, (2012).
7. E. B. Gordon, A. V. Karabulin, V. I. Matyushenko, V. D. Sizov, I. I. Khodos. The electrical conductivity of bundles of superconducting nanowires produced by laser ablation of metals in superfluid helium. **Appl. Phys. Lett.** 101(5) , 052605 (2012).
8. E. B. Gordon, Superfluidity Influence on Impurities Condensation in Liquid Helium, **Low Temp. Phys.** 38, 1043-1055 (2012).
9. E. B. Gordon, A.V. Karabulin, V.I. Matyushenko, V.D. Sizov, I.I. Khodos. The Nanostructures Produced by Laser Ablation of Metals in Superfluid Helium, **J. Low Temp. Phys.** 172, 94-112 (2013)

Decay of golden nanowires deposited on the glass



Au melting point $T_M = 1064 \text{ }^\circ\text{C}$

Nanowires disintegrate into separate clusters, such as clusters of silver, in few days keeping at standard conditions

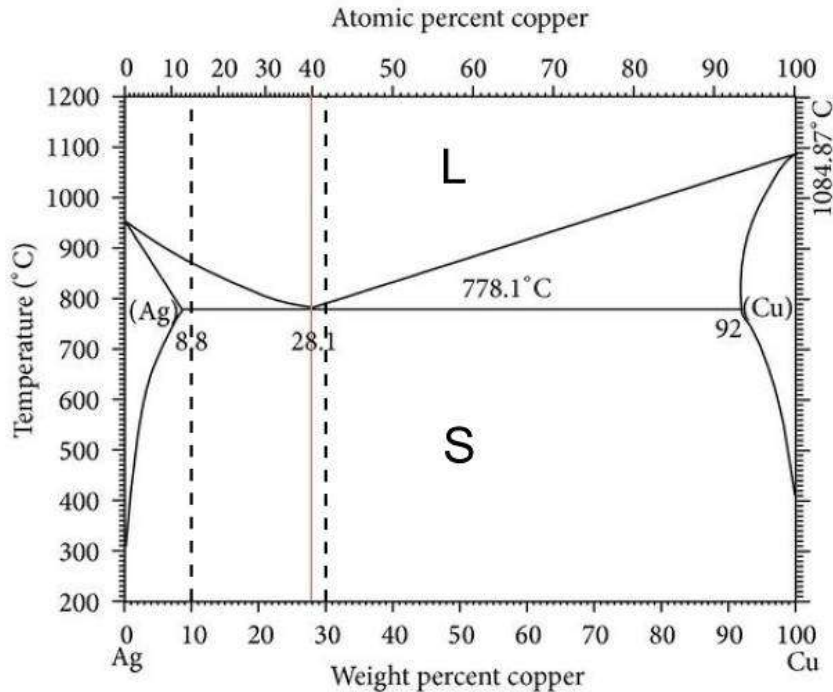


In the left side of (b) the number of deposited nanowires is so large, that they do not adhere tightly to the glass surface, and these nanowires **remain intact** (the same was observed for the fresh silver nanoweb).

The metal wetting of surface stimulates the nanowire decay.

Could we suppress the surface mobility by its covering with less movable atoms ???

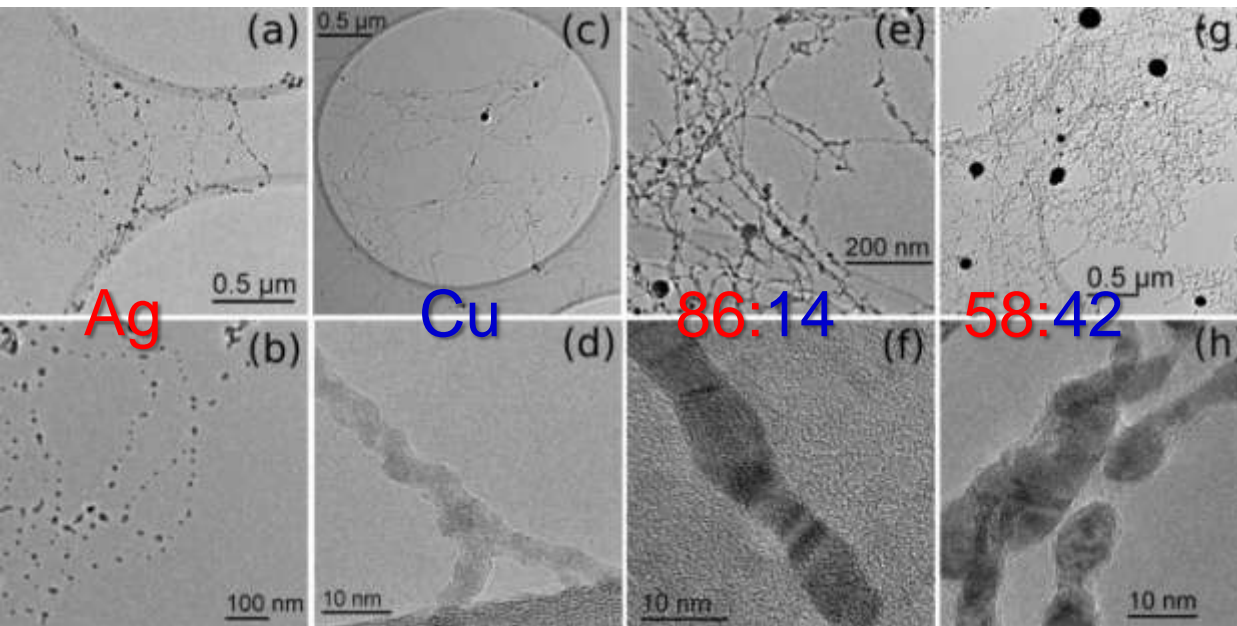
Nanowires from the silver-copper alloys



For α (Ag:Cu \geq 88:12) or β silver (Ag: Cu \leq 8:92) phases a solid solution is formed after cooling. Outside these regions precursor must disintegrate upon solidification to crystallites rich by silver (α phase) or copper (β phase).

Ag - Cu phase diagram, solid vertical line marks the eutectics, the dashed lines correspond to the alloys

Nanowires from the silver, copper and their alloys



Addition copper to silver improves the thermal stability of the nanowires made of alloy

Morphology and structure of sediments on the grid under laser ablation in superfluid helium of various targets:

Light halo around the nanowires corresponds to copper oxide formed during the contact with air. The diameter of holes are 2 μm.

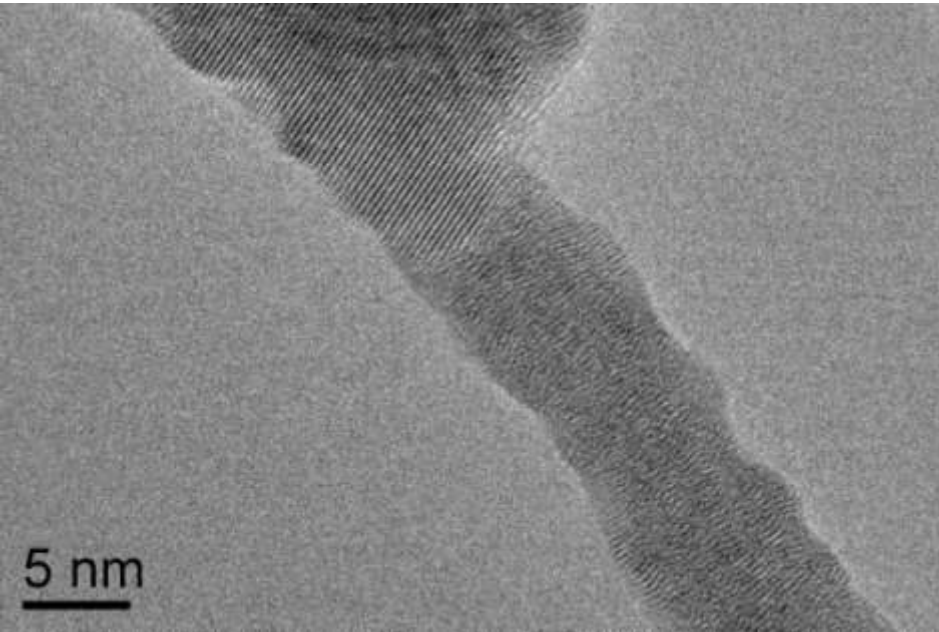
Limiting sizes for premelting spheres, R_s , and wires, R_w

	α	R_s^{\max} , nm	R_w^{\max} , nm
In	7.66	1.8	2.3
Ni	3.05	0.7	0.9
Sn	7.12	1.6	2.1
Pb	4.34	1.0	1.3
Cu	3.28	0.78	1.0
Au	3.49	0.78	1.0
W	3.18	0.74	0.95
H₂	0.87	-	-
H₂O	0.77	-	-

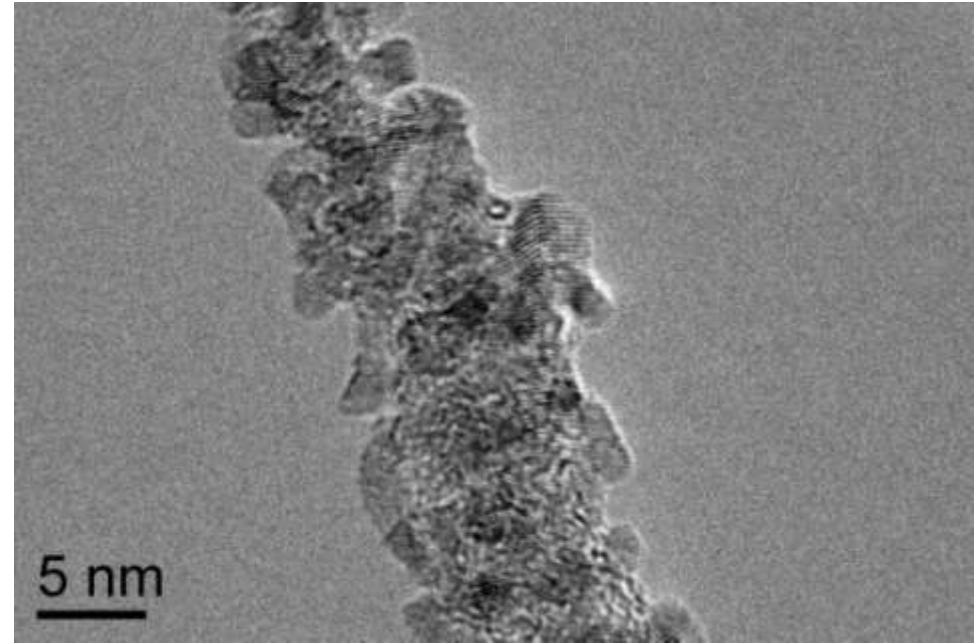
In accordance with experimental results the radius of nanowire for **casting metals** is more than for **refractory metals**.

In hydrogen and water $\alpha < 1$ and melting is impossible.

Nanowire structure



Indium



Permalloy