

Рефрижератор растворения $^3\text{He}/^4\text{He}$ - устройство для получения сверхнизких температур ($T < 0.3\text{K}$)

Температура

Температурная шкала

Цельсий Кельвин

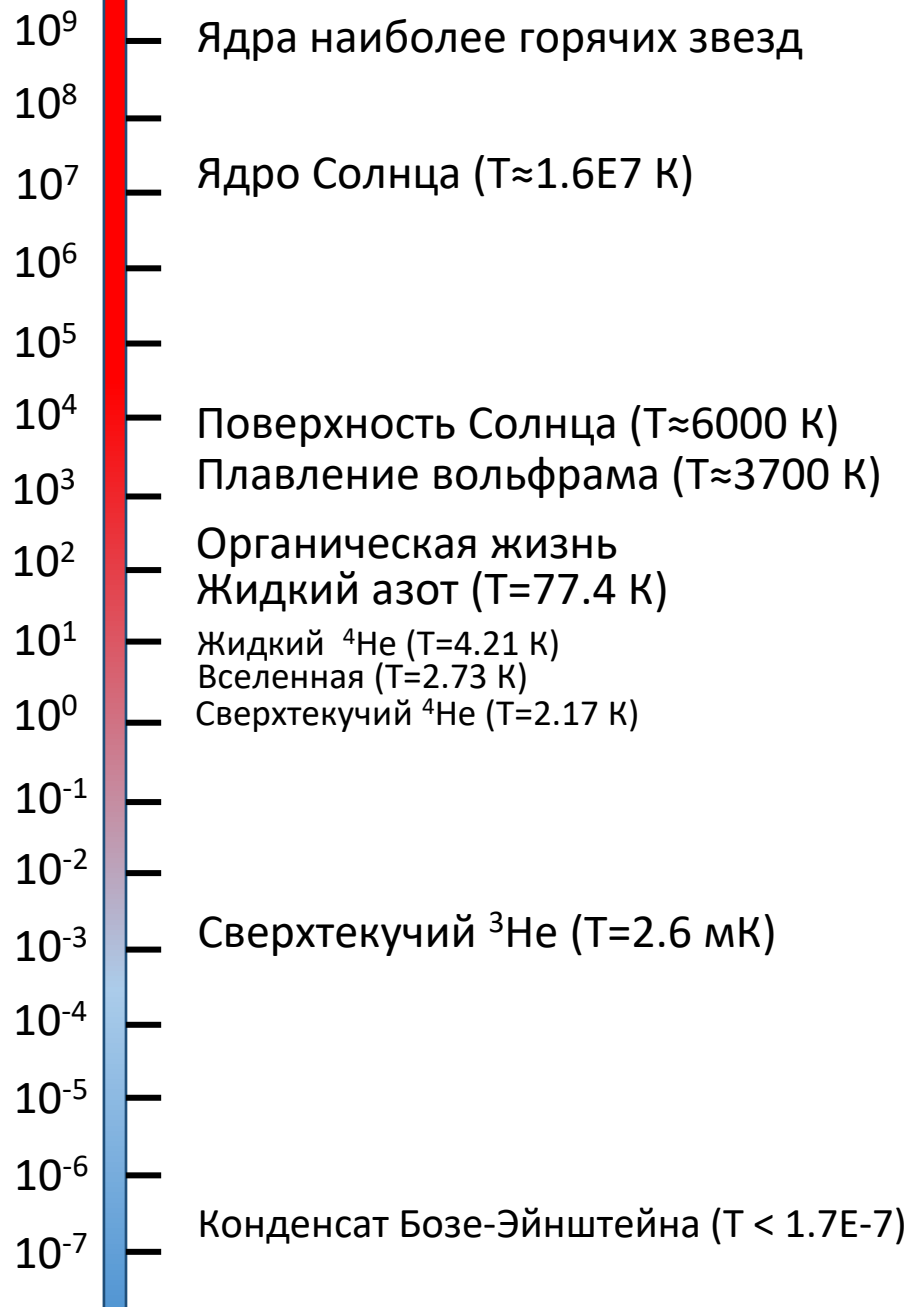
100 °C 373.15 K

0 °C 273.15 K

- 273.15 °C 0 K

$$T[K] = T[°C] + 273.15$$

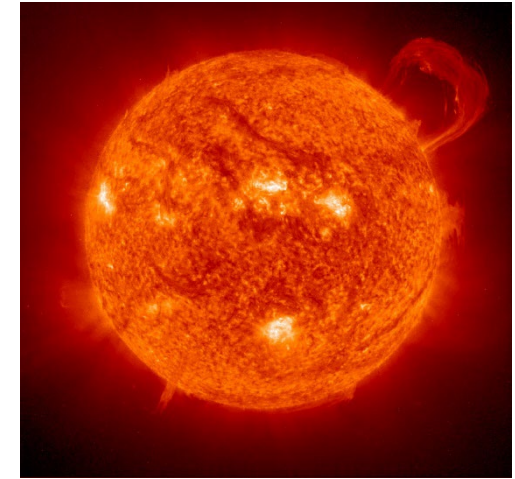
Температура, K



Поверхность солнца ≈ 6000 K



X 20



Комнатная температура ≈ 300 K



X 30000



Криостат растворения ≈ 10 мК

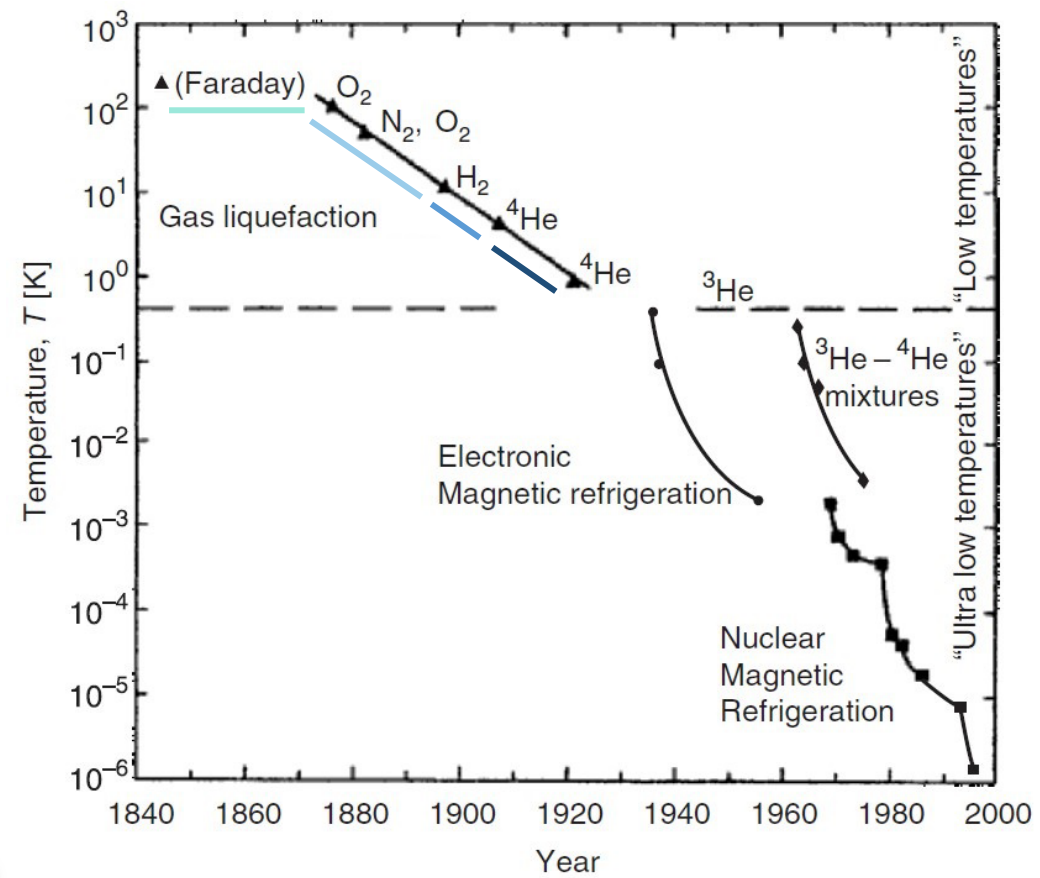
История

1845: Фарадей успешно ожижил большинство известных газов, за исключением шести, которые стали известны как постоянные газы: кислород, водород, азот, монооксид углерода, метан и монооксид азота (гелий еще не был открыт на тот момент)

1877: Кароль Ольшевский (Польша) и Сигизмунд Врублевский (Польша) получили жидкий кислород и азот (достигли 80 K)

1898: Джеймс Дьюар (Кембридж) получил жидкий и твердый водород (достиг температуры 13 K)

1908: Последний постоянный газ, гелий, был сжижен Камерлинг-Оннесом в Лейдене. Он достиг 0.83 K в 1922 году



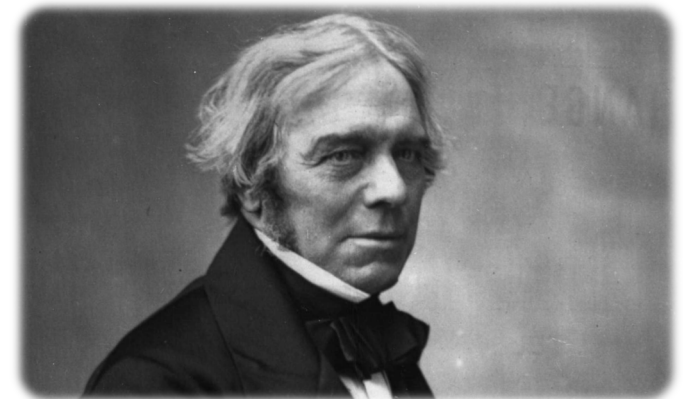
Хейке Камерлинг-Оннес
(1853 - 1926)



Джеймс Дьюар
(1842 - 1923)



Кароль Ольшевский
(1846 - 1915)



Майкл Фарадей (1791 - 1867)

История

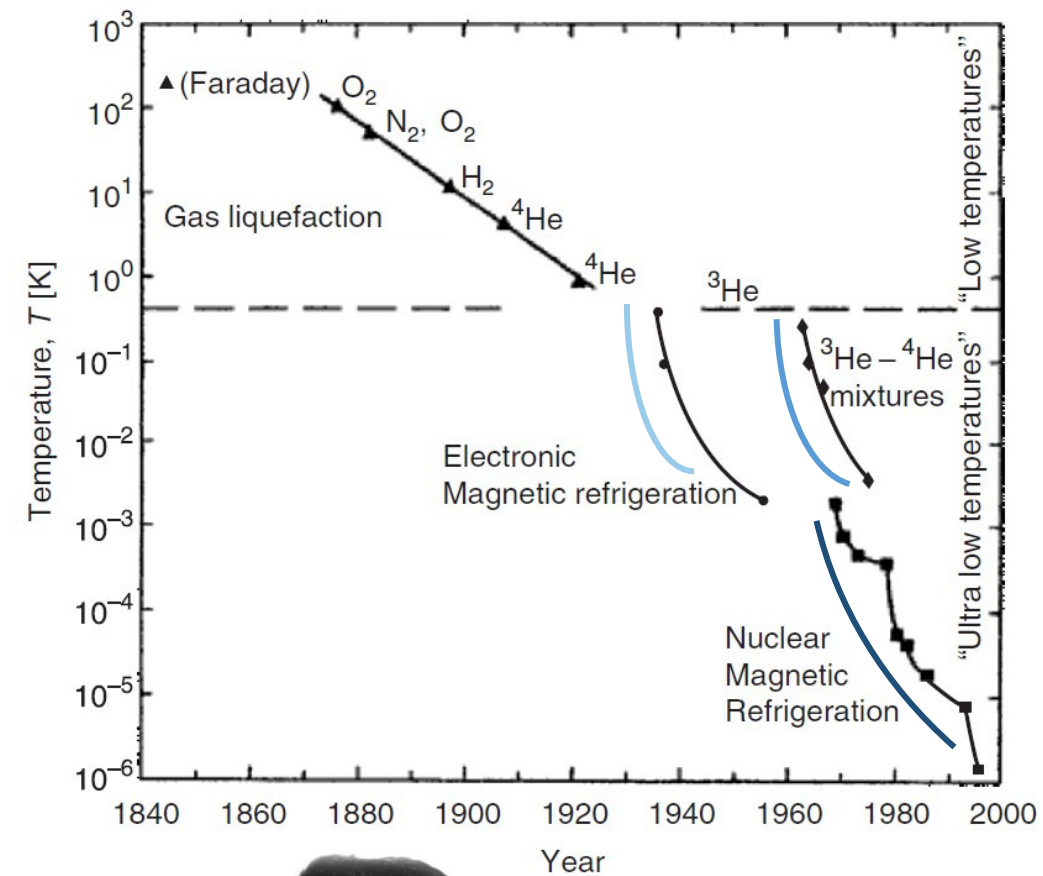
1930-е: Адиабатическое размагничивание позволяет получать температуры в несколько милликельвин (однократное охлаждение). Сейчас: $T = 5 - 30$ мК (рекорд: 1 мК)

1960-е: Создание криостатов растворения $^3\text{He}/^4\text{He}$, которые позволяют в непрерывном режиме получать температуру нескольких милликельвин.

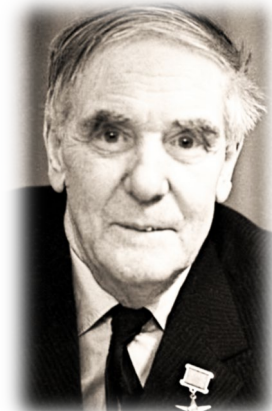
Сейчас: $T = 5 - 20$ мК (рекорд: 2 мК)

1970-е: Ядерное размагничивание позволяет получать температуры порядка микрокельвин (однократное охлаждение).

Сейчас: $T < 100$ мкК (рекорд: 1.5 мкК)



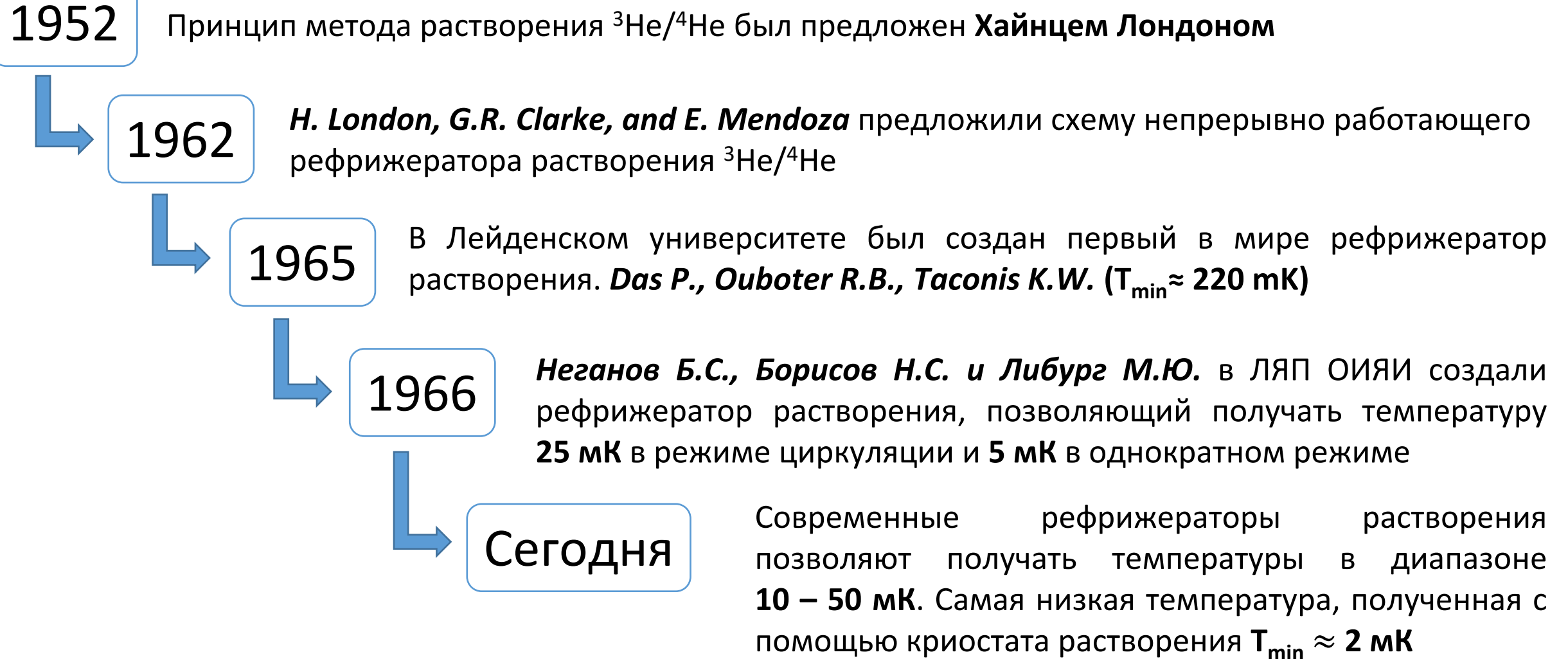
Пётр Дебай
(1884 - 1966)

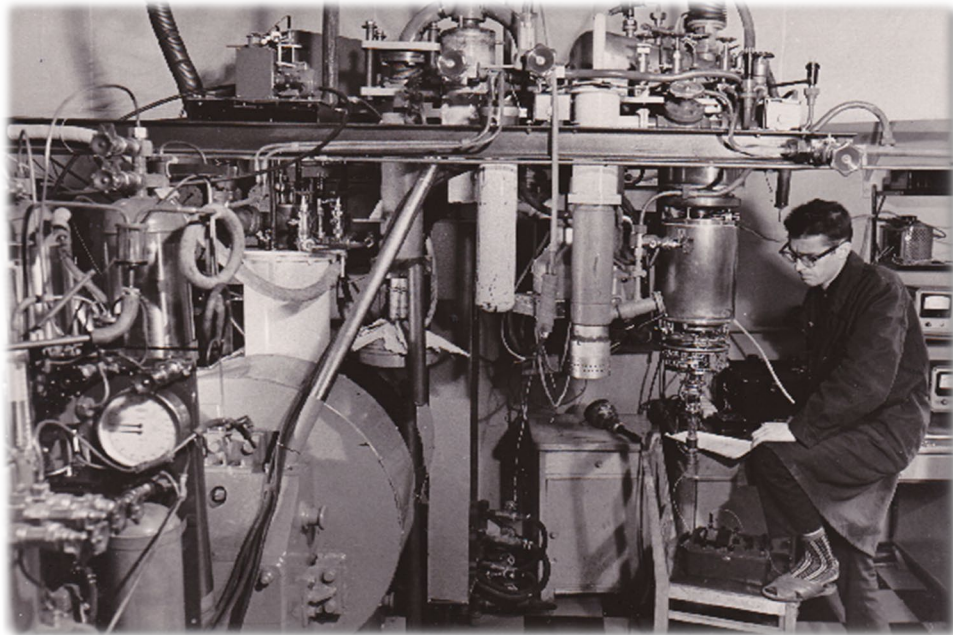
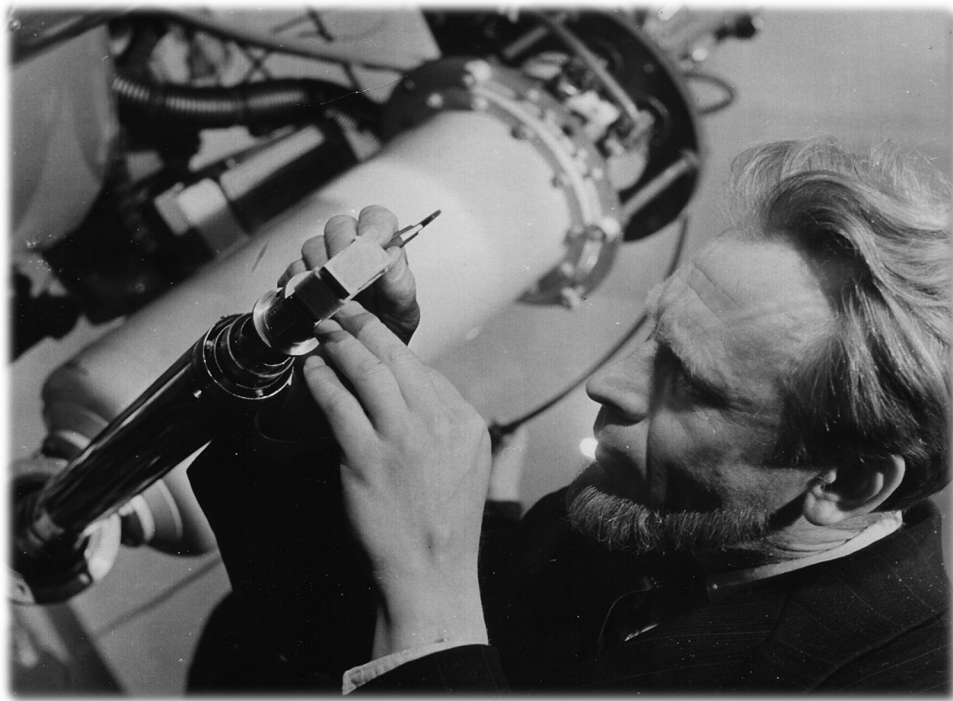


Пётр Капица
(1894 - 1984)

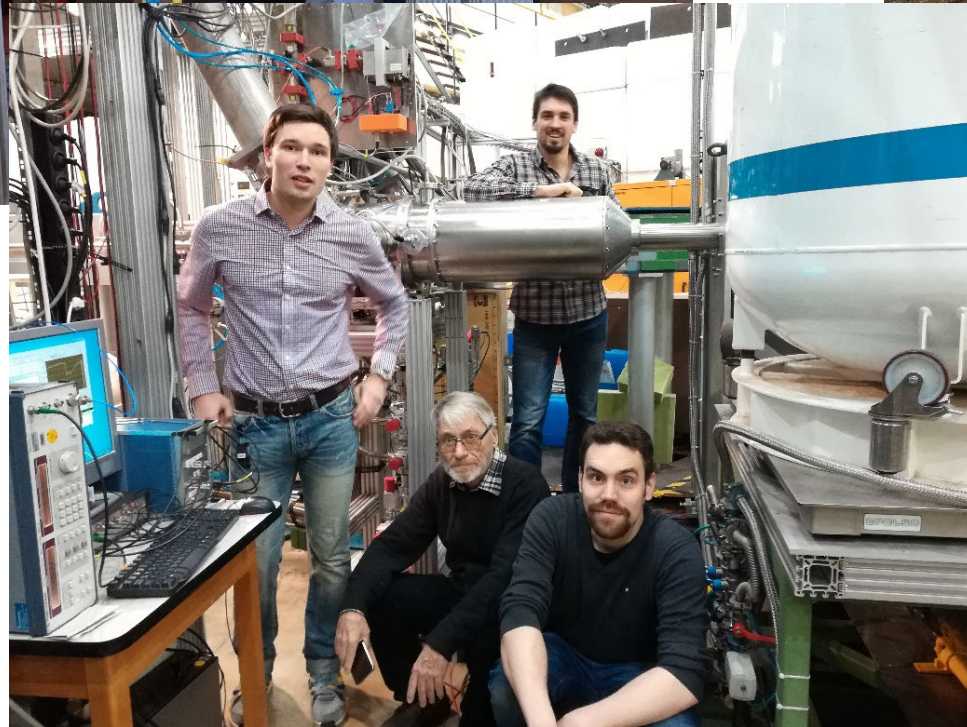
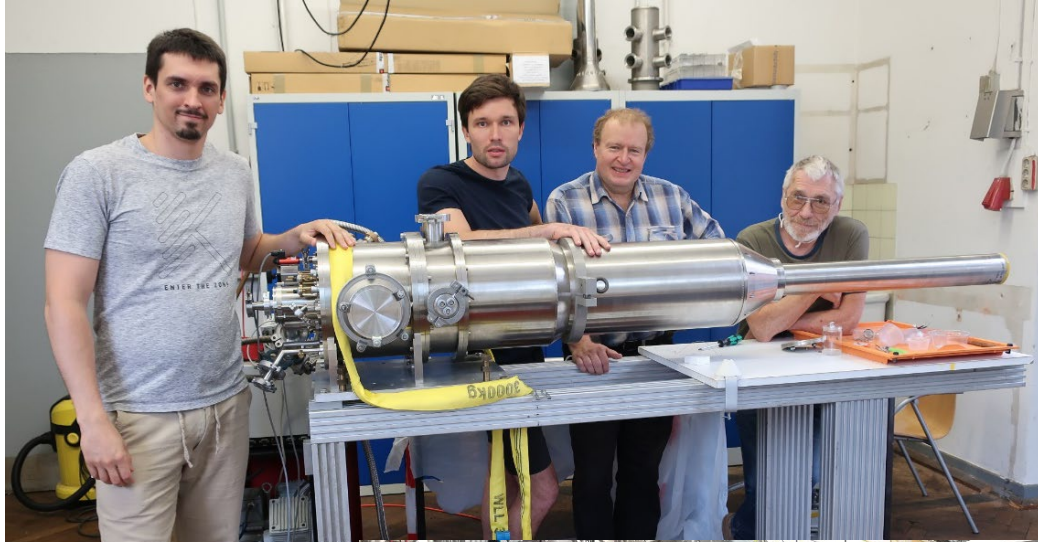


Хайнц Лондон
(1907 - 1970)

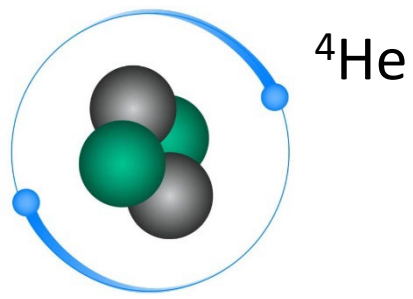




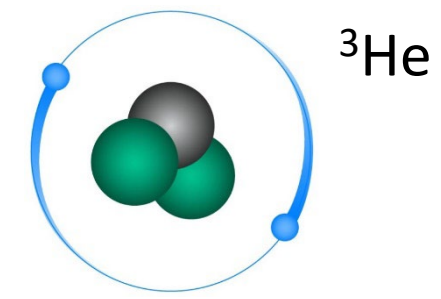
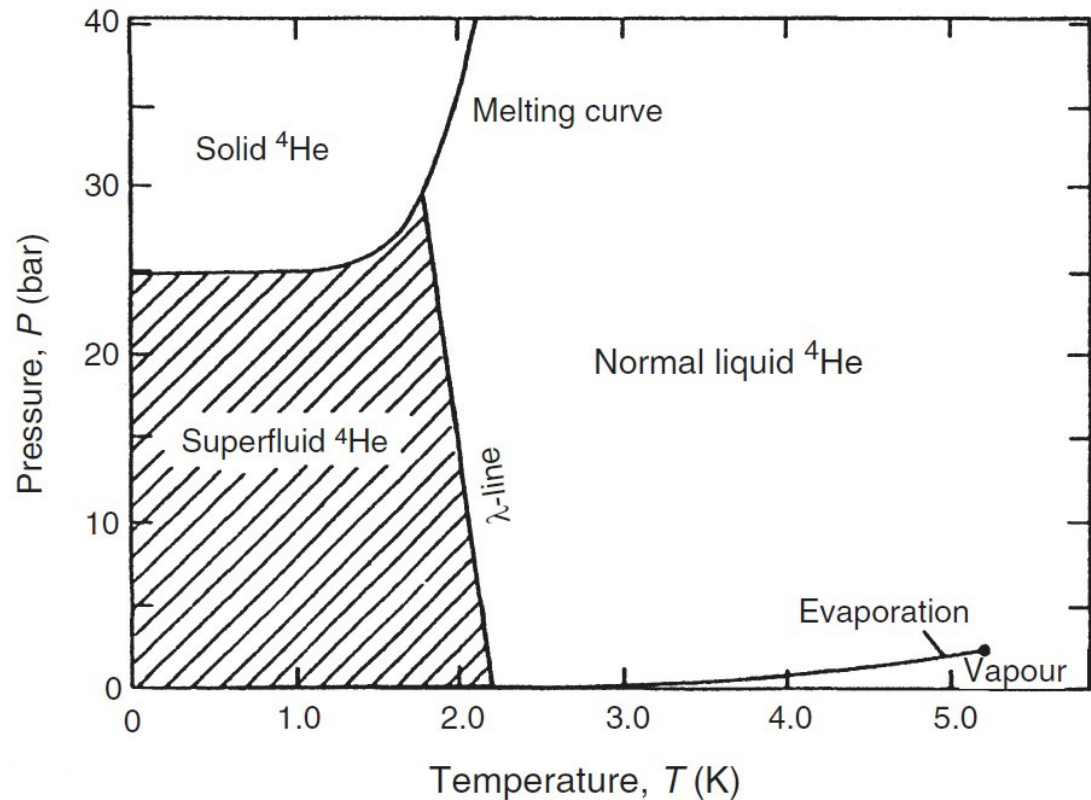
Сектор №3 низких температур ОНИРИ ЛЯП



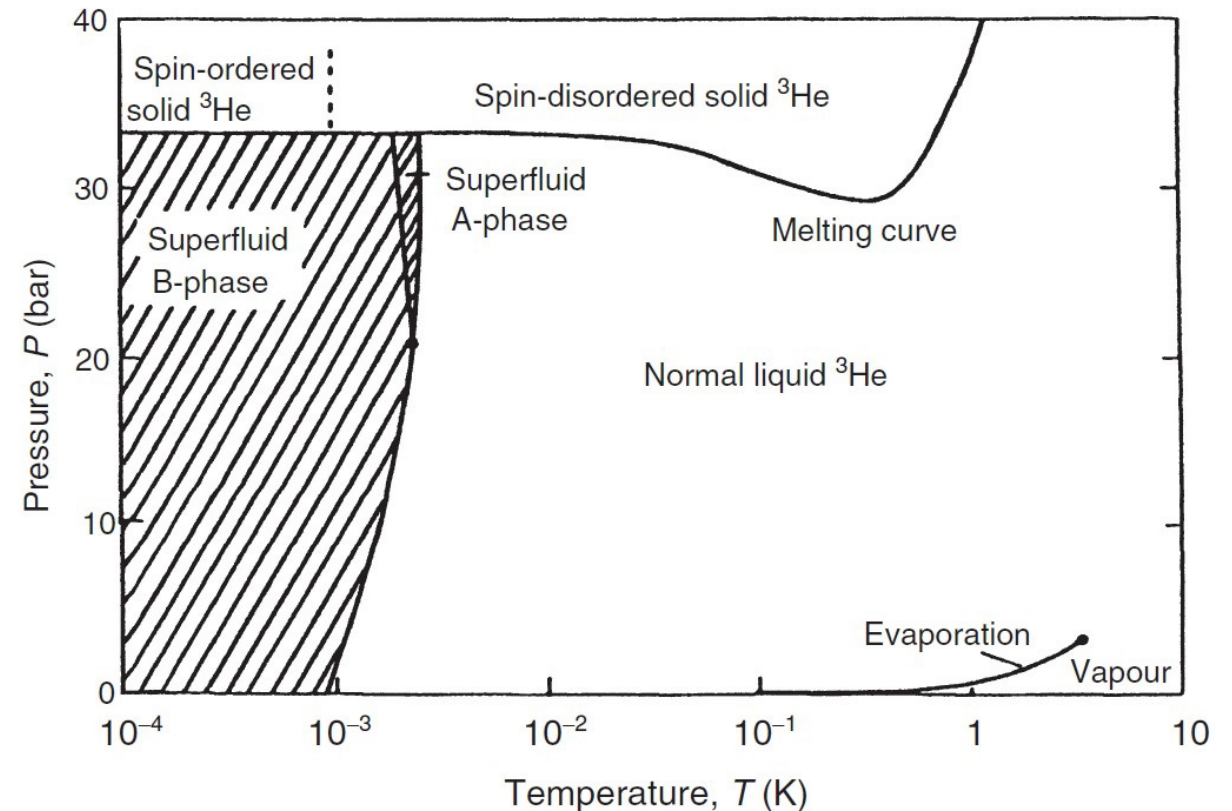
Гелий



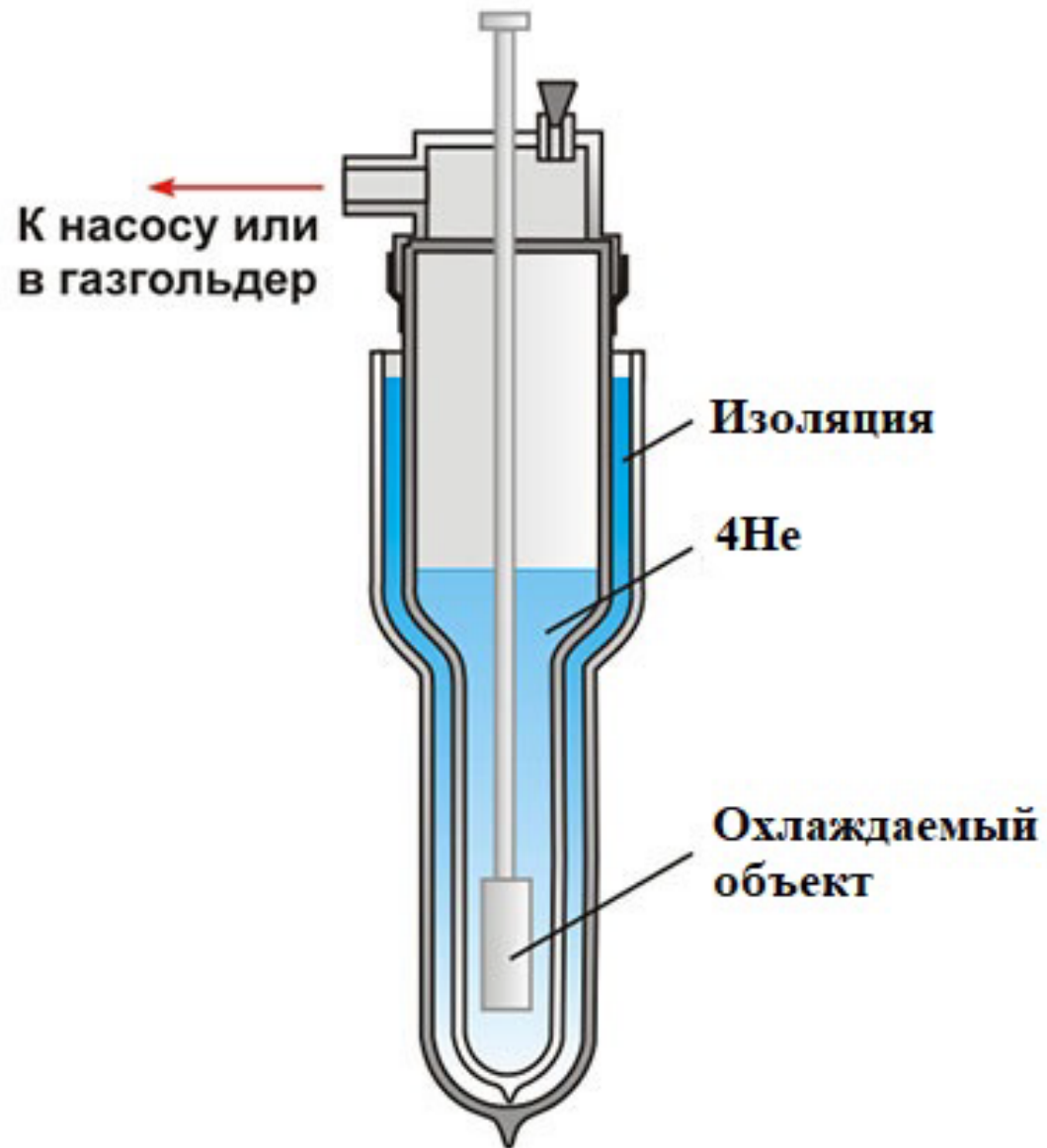
- Добывается из природного газа
- $T_{\text{н.к.}} = 4.21 \text{ K}$
- Цена: $\approx 0.3 \text{ \$ /н.л.}$



- Продукт реакции полураспада трития
- $${}^3_1\text{T} \xrightarrow{12.3\text{y}} {}^3_2\text{He} + {}^0_{-1}\text{e} + \bar{\nu}$$
- $T_{\text{н.к.}} = 3.19 \text{ K}$
 - Цена: $\approx 3000 \text{ \$ /н.л.}$



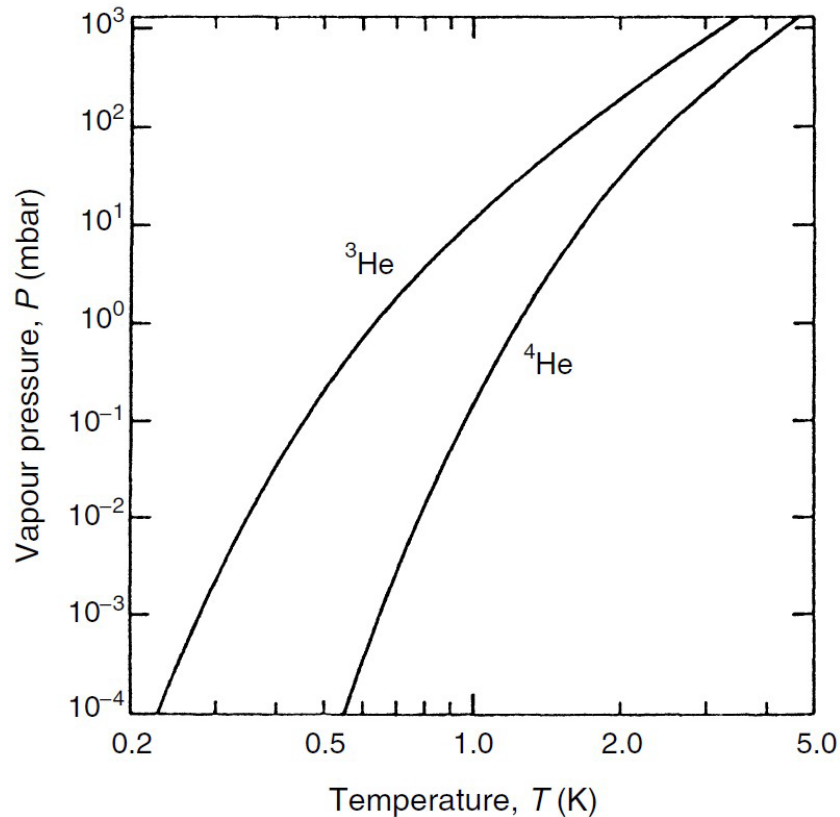
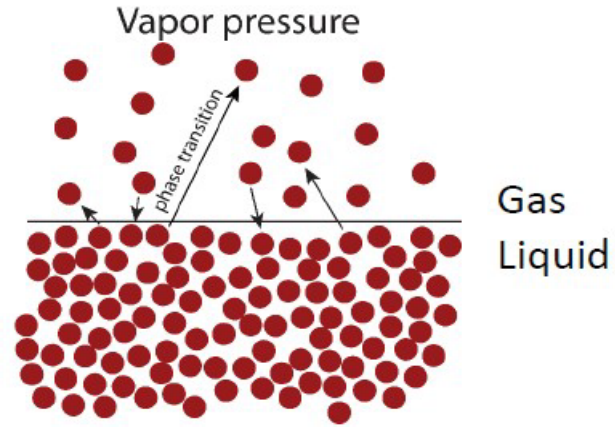
Откачной криостат ^4He



Откачка паров He

Давление пара:

$$P \propto e^{-\frac{L}{RT}}$$



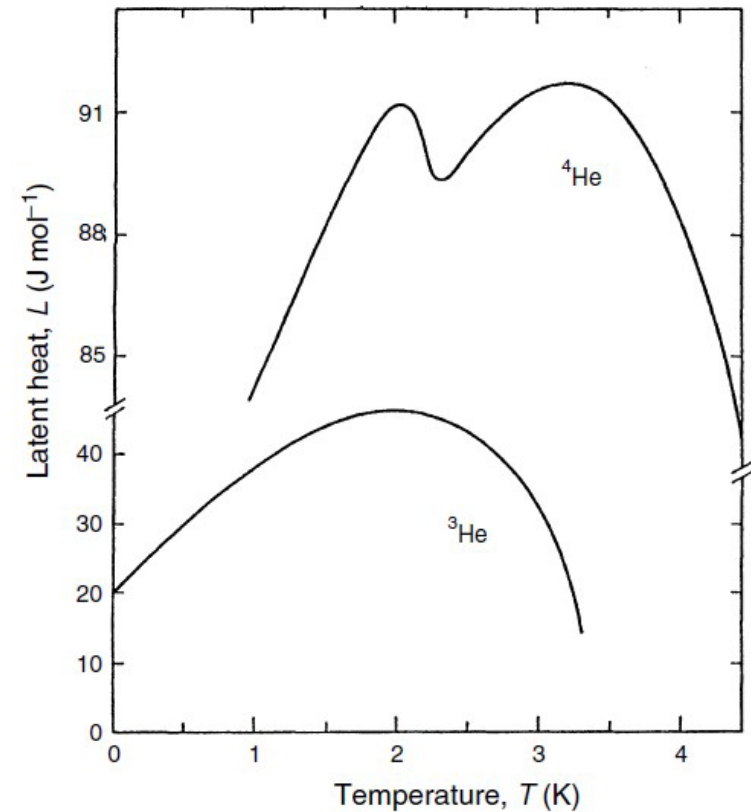
Холодопроизводительность: $\dot{Q} = \dot{n}L$

$$\dot{n} \propto P(T) \quad \dot{Q} \propto LP(T) \propto e^{-\frac{1}{T}}$$

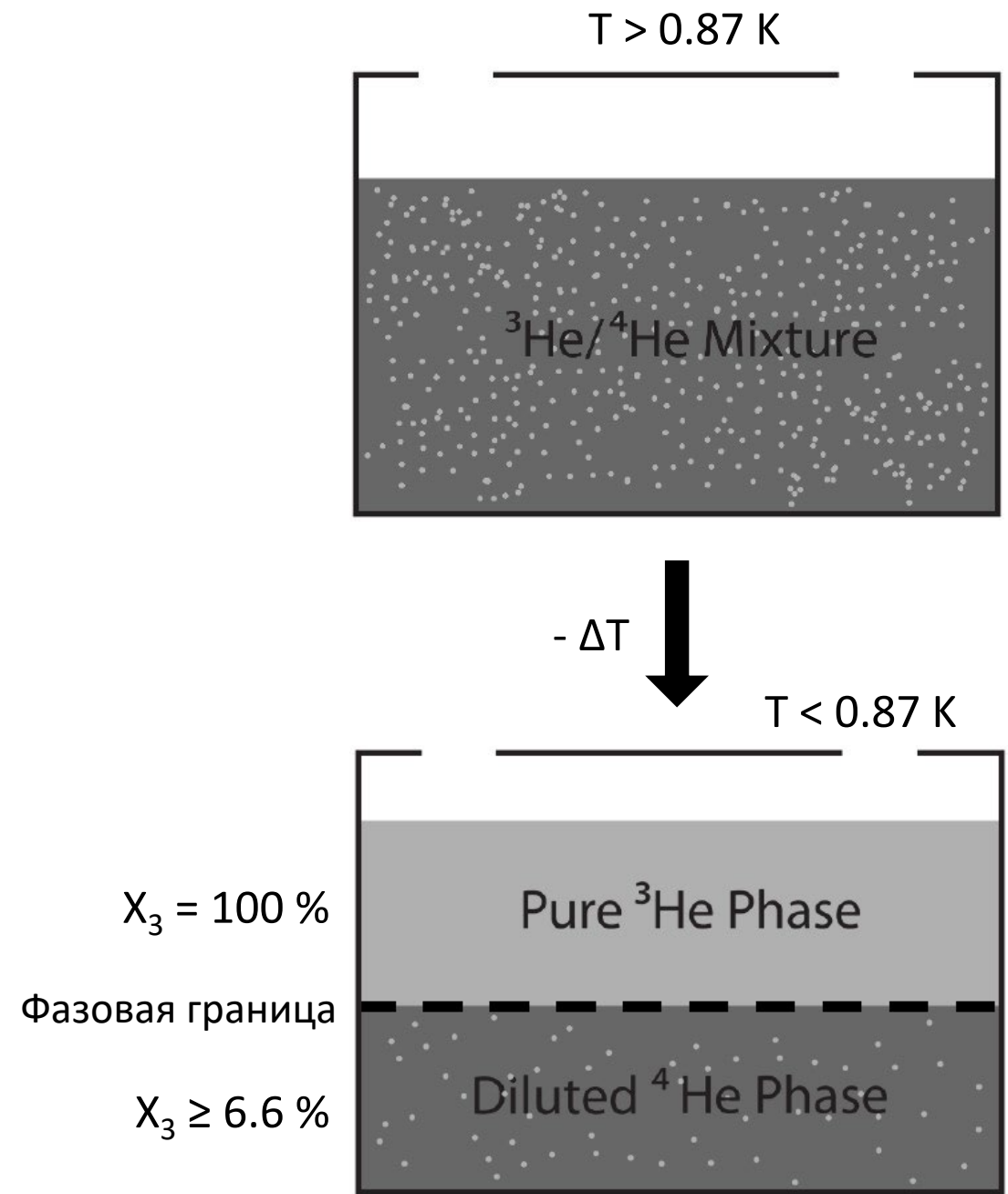
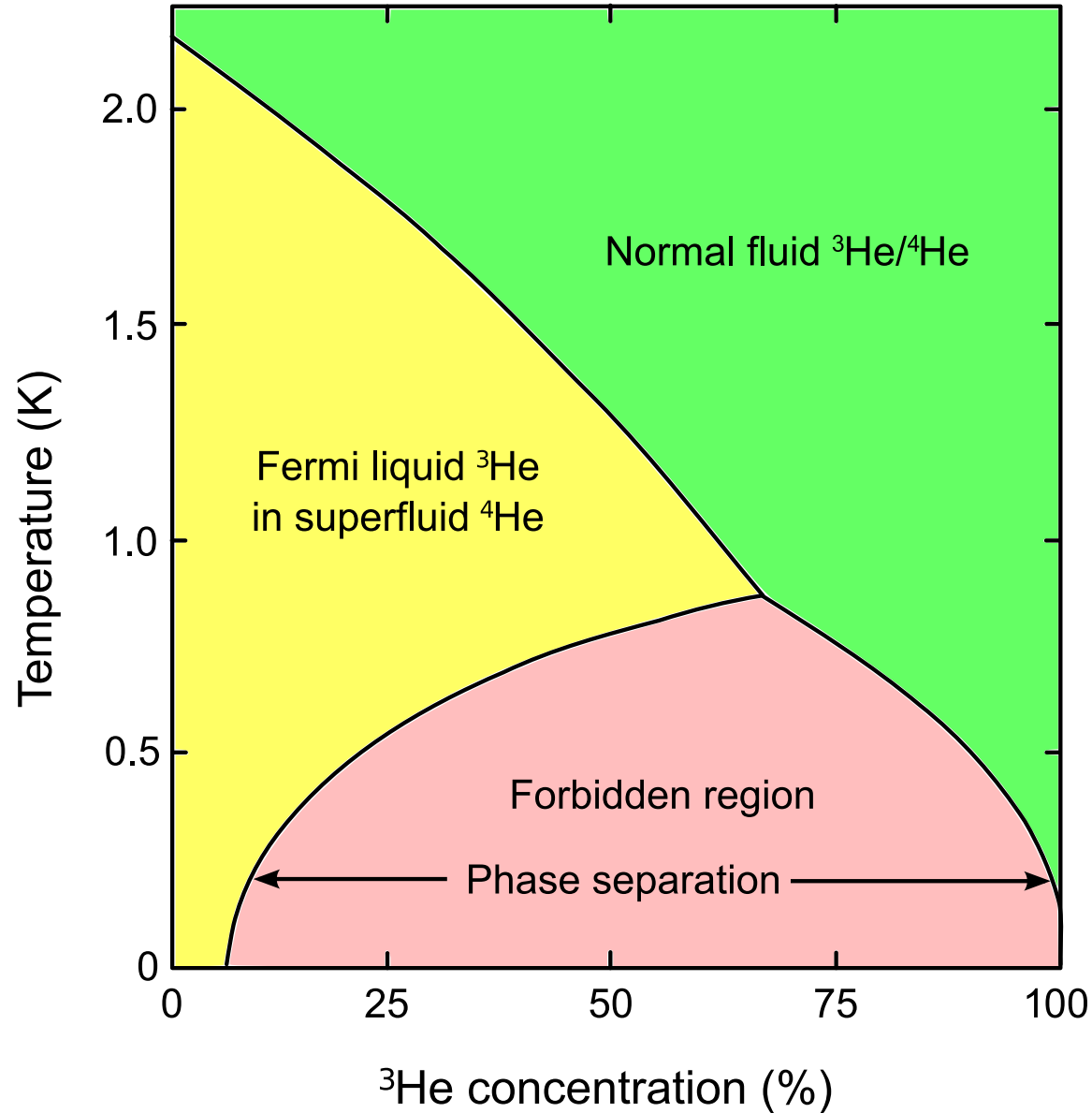
Характерные достигаемые температуры:

^4He : 1.3 K [$T_{\min} \approx 0.7$ K]

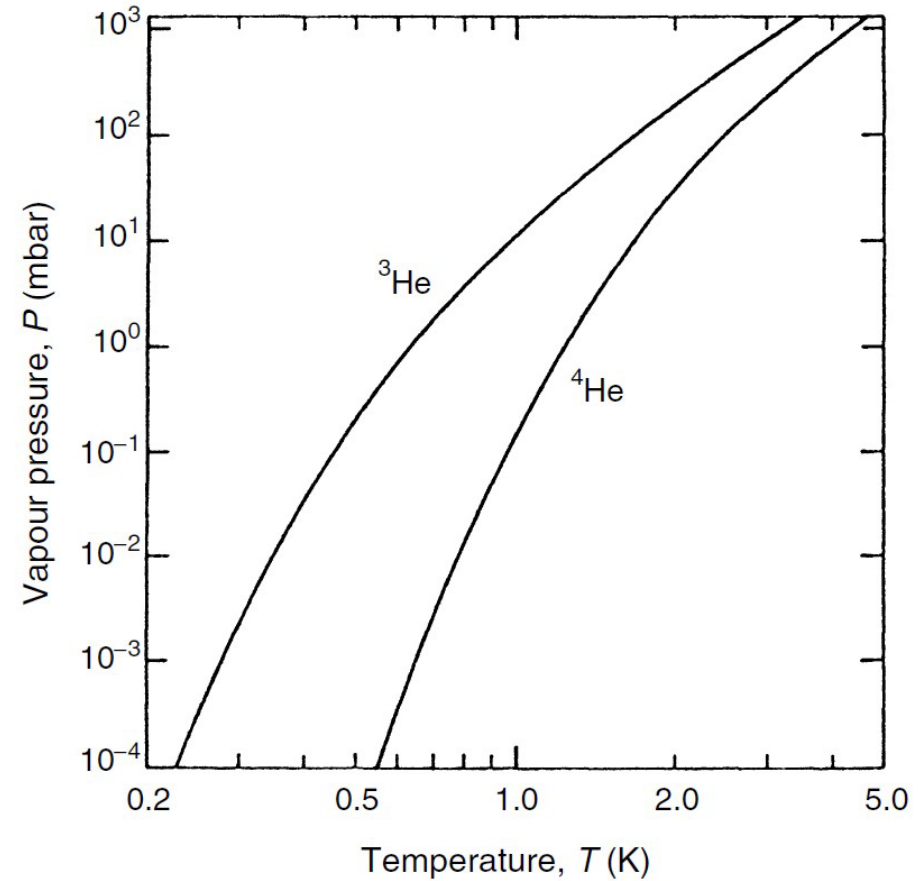
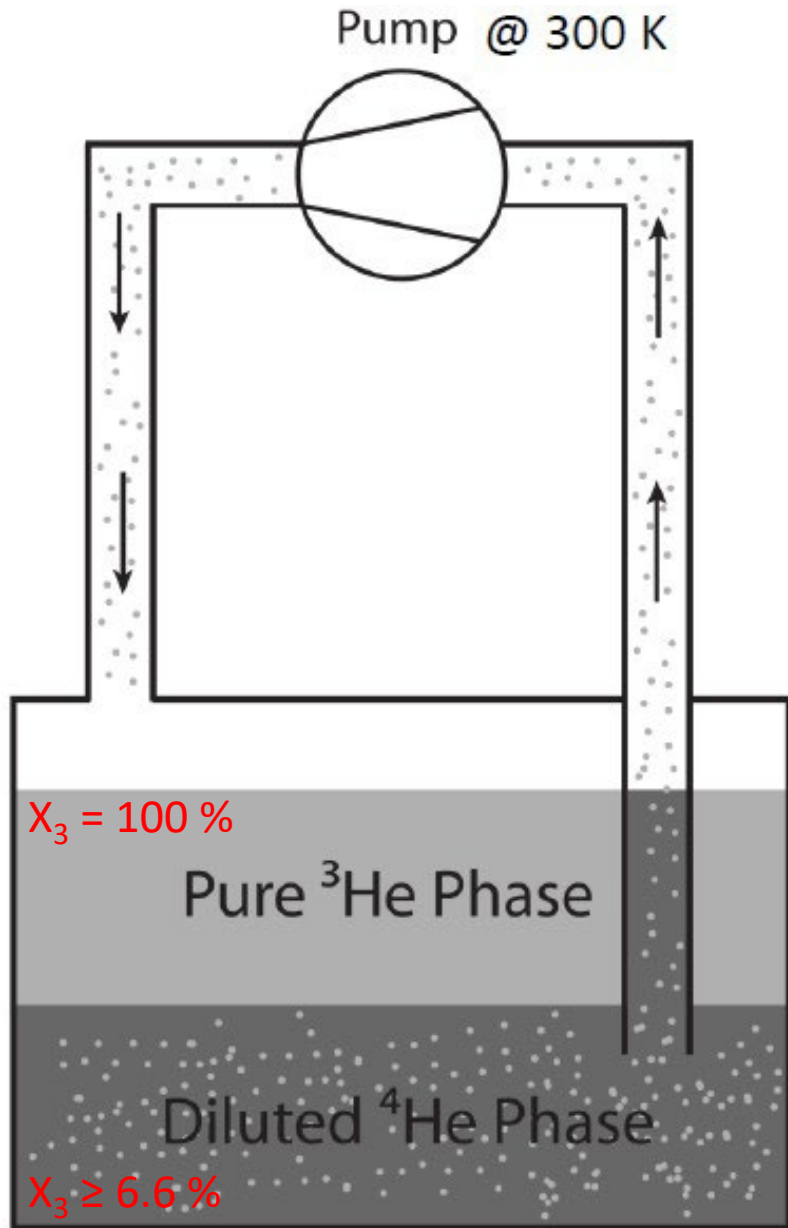
^3He : 0.3 K [$T_{\min} \approx 0.23$ K]



Смесь ^3He и ^4He



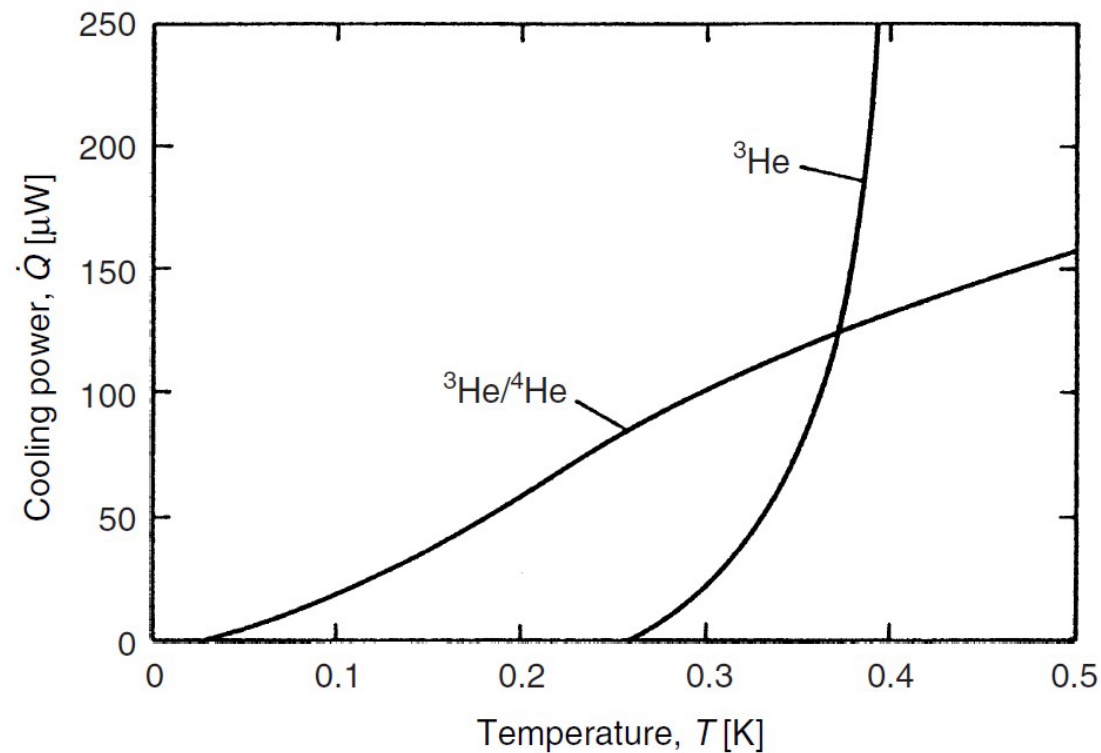
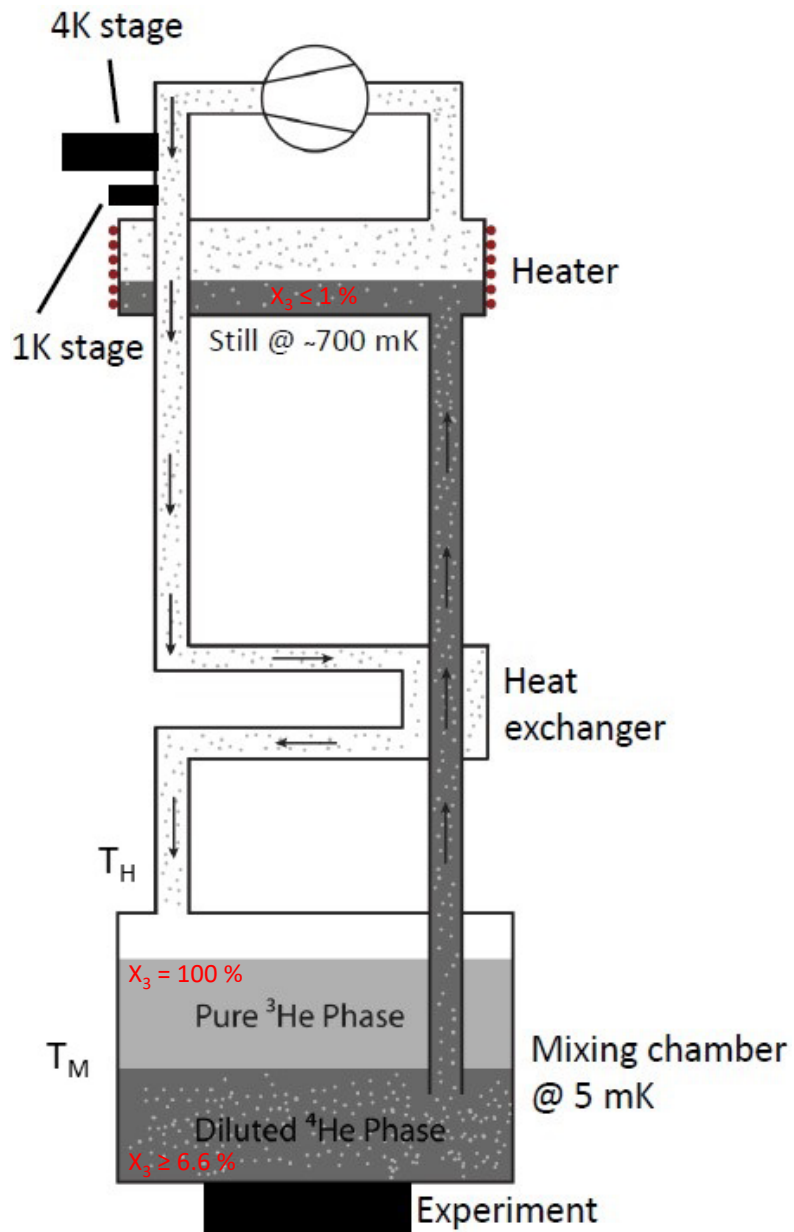
Принцип действия



- Откачка разбавленной фазы приводит к тому, что удаляется в основном ^3He , так как давление его паров больше чем у ^4He

$$p_{^3\text{He}} > p_{^4\text{He}}$$

Принцип действия



- Предварительное охлаждение циркулирующего ^3He осуществляется в узлах, охлаждаемых ^4He
- **Still:** имеет температуру ≈ 700 мК, чтобы поддерживать более высокое давление паров ^3He

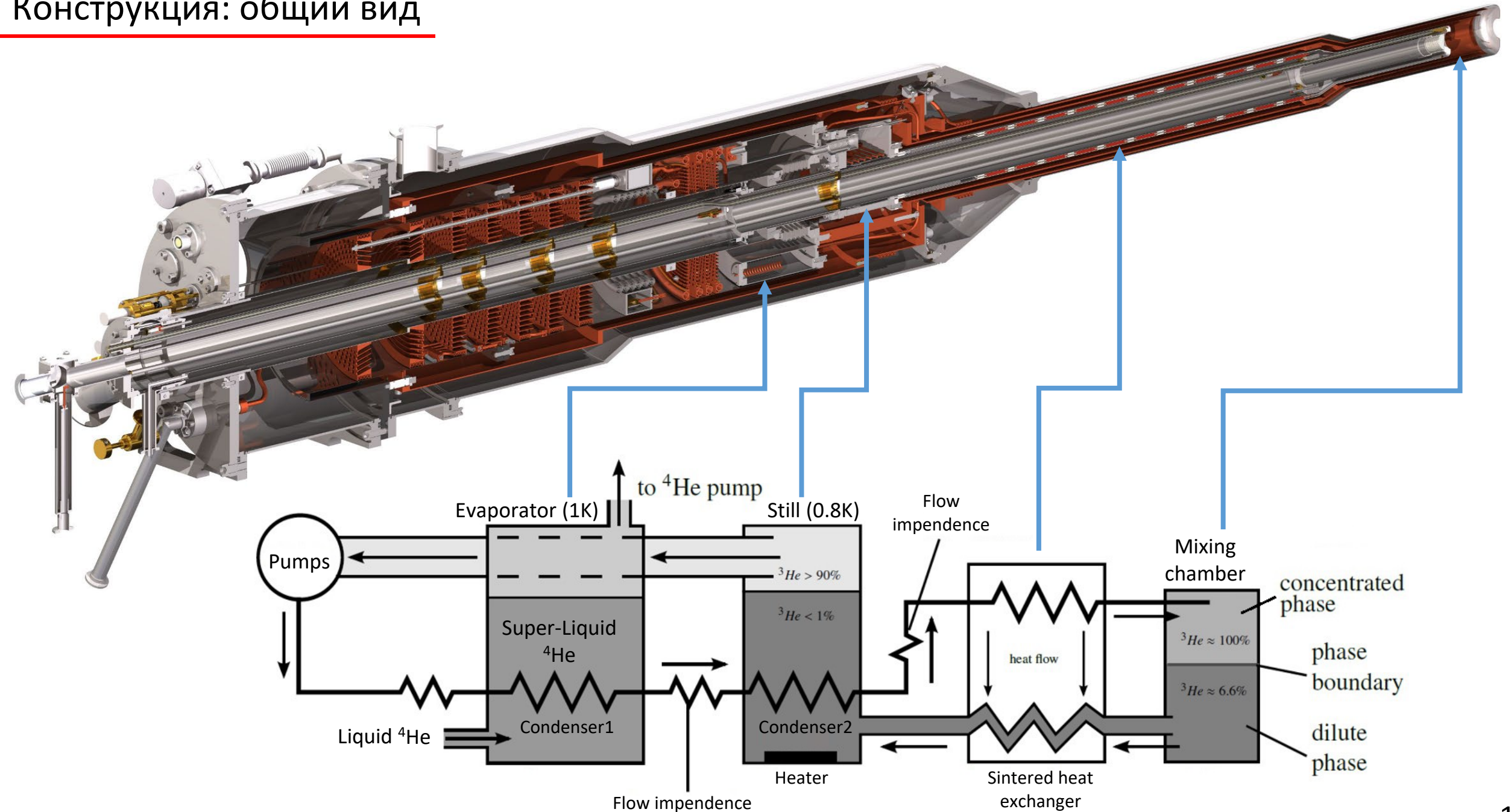
$$\rho_{^3\text{He}} \gg \rho_{^4\text{He}}$$

- **Теплообменник:** имеет решающее значение для конечной температуры криостата (T_M)

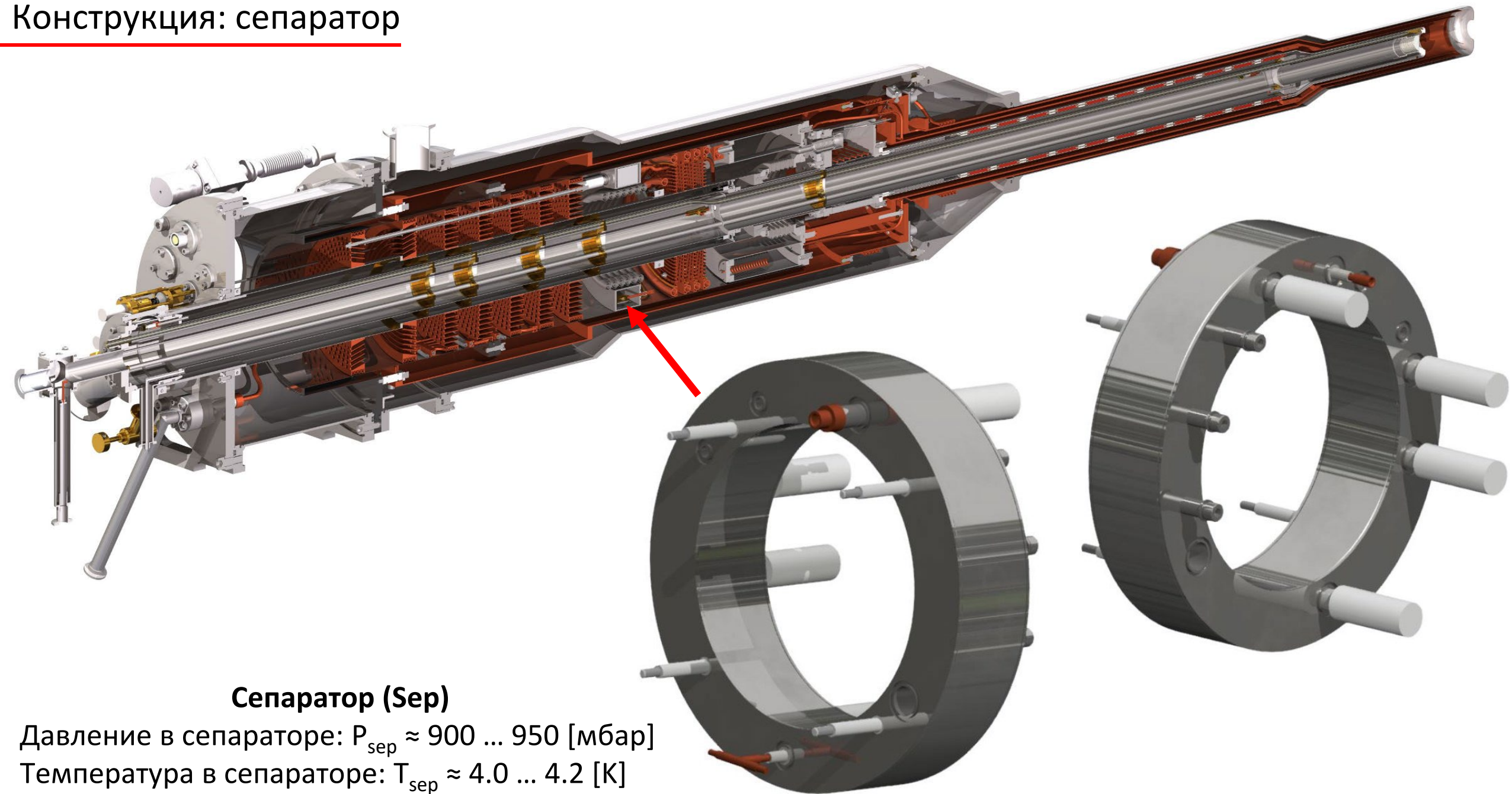
$$\frac{T_H}{T_M} = 2.8 \text{ при } \dot{Q} = 0$$

- **Холодопроизводительность:** $\dot{Q} = \dot{n}(95T_M^2 - 11T_H^2)$

Конструкция: общий вид



Конструкция: сепаратор

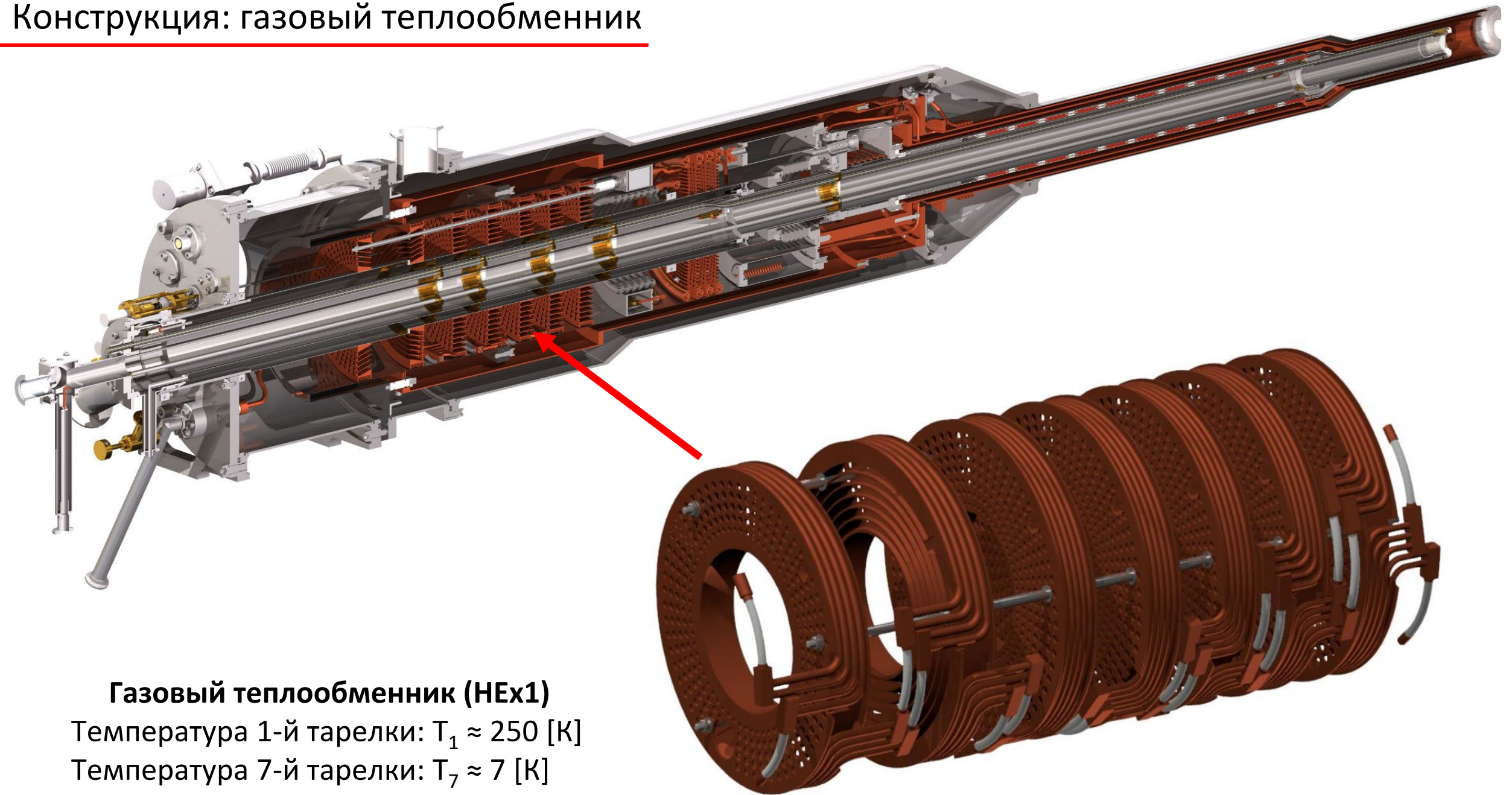


Сепаратор (Sep)

Давление в сепараторе: $P_{\text{sep}} \approx 900 \dots 950$ [мбар]

Температура в сепараторе: $T_{\text{sep}} \approx 4.0 \dots 4.2$ [K]

Конструкция: газовый теплообменник

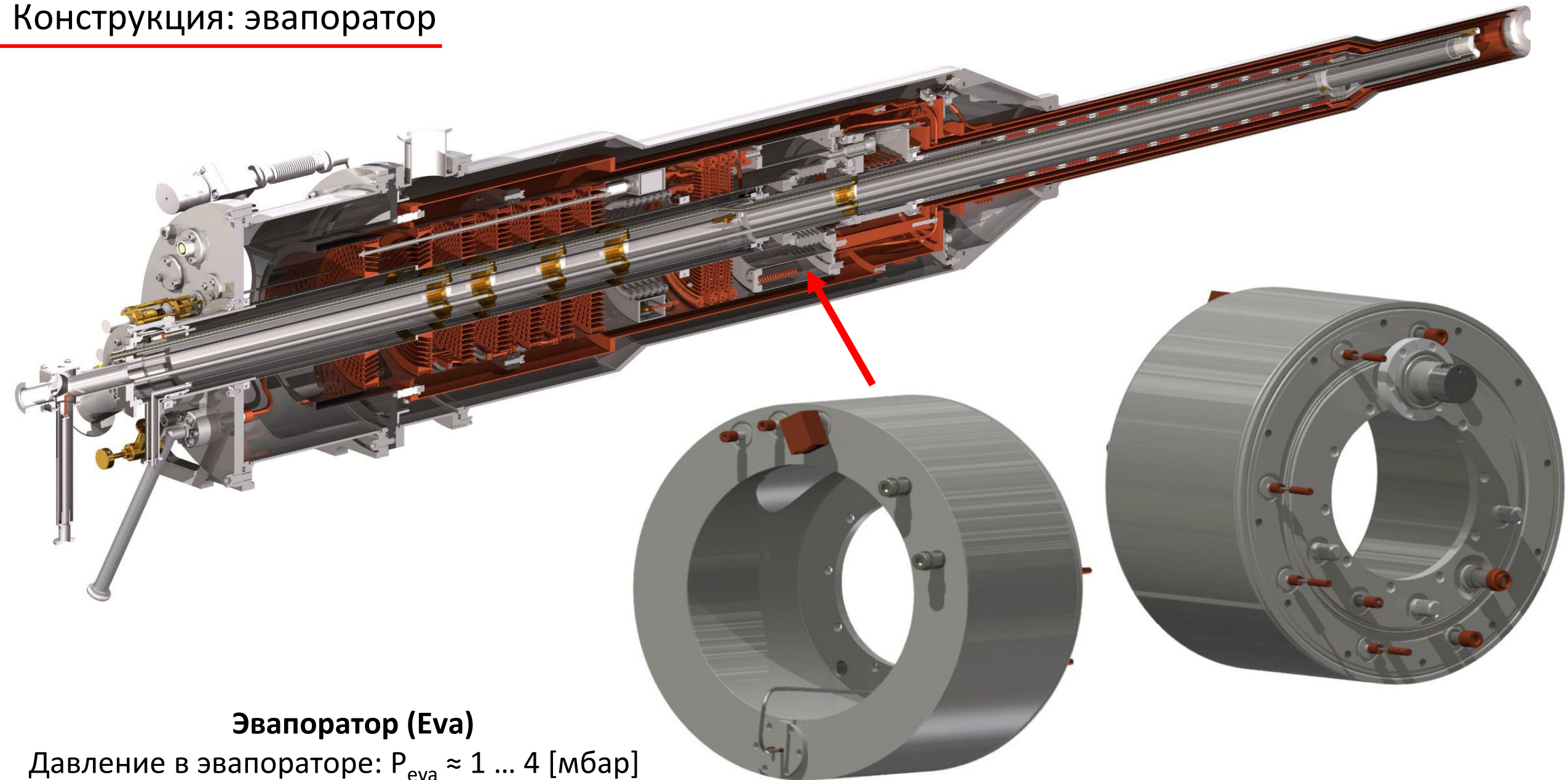


Газовый теплообменник (HEX1)

Температура 1-й тарелки: $T_1 \approx 250$ [K]

Температура 7-й тарелки: $T_7 \approx 7$ [K]

Конструкция: эвапоратор

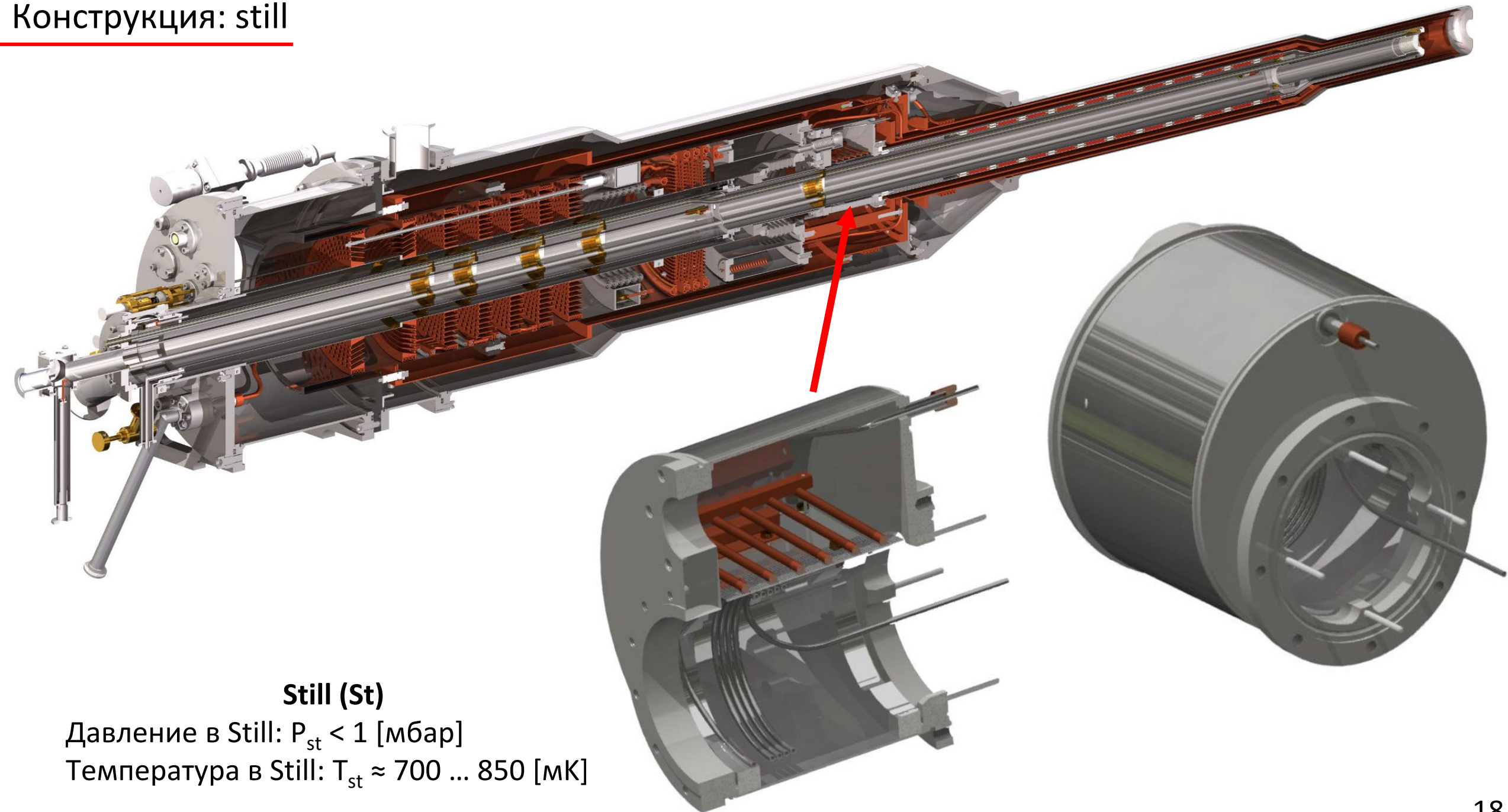


Эвапоратор (Eva)

Давление в эвапораторе: $P_{\text{eva}} \approx 1 \dots 4$ [мбар]

Температура в эвапораторе: $T_{\text{eva}} \approx 1.2 \dots 1.5$ [K]

Конструкция: still

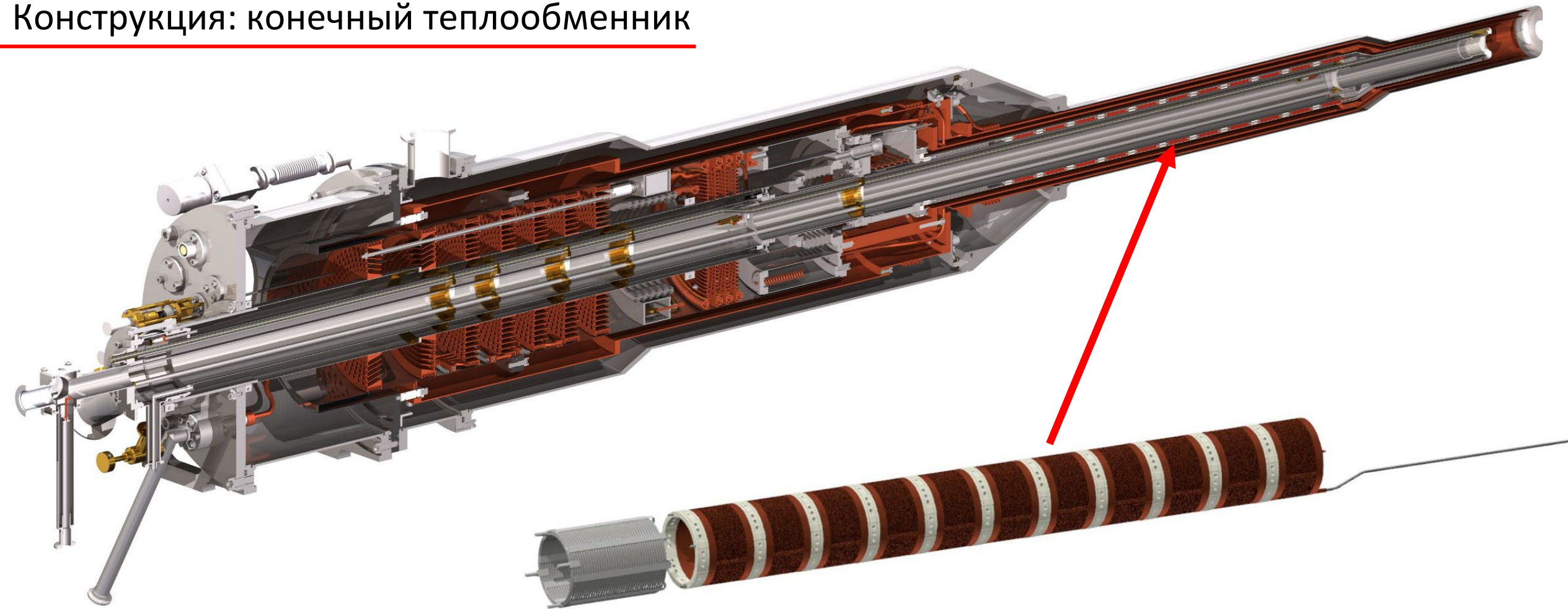


Still (St)

Давление в Still: $P_{st} < 1$ [мбар]

Температура в Still: $T_{st} \approx 700 \dots 850$ [мК]

Конструкция: конечный теплообменник



Теплообменник предохлаждения конечного (Pre-FHE)

Температура на входе ТО: $T_{\text{Pre-FHEen}} \approx 850$ [мК]

Температура на выходе ТО : $T_{\text{Pre-FHEex}} \approx 500$ [мК]

Конечный теплообменник (FHE)

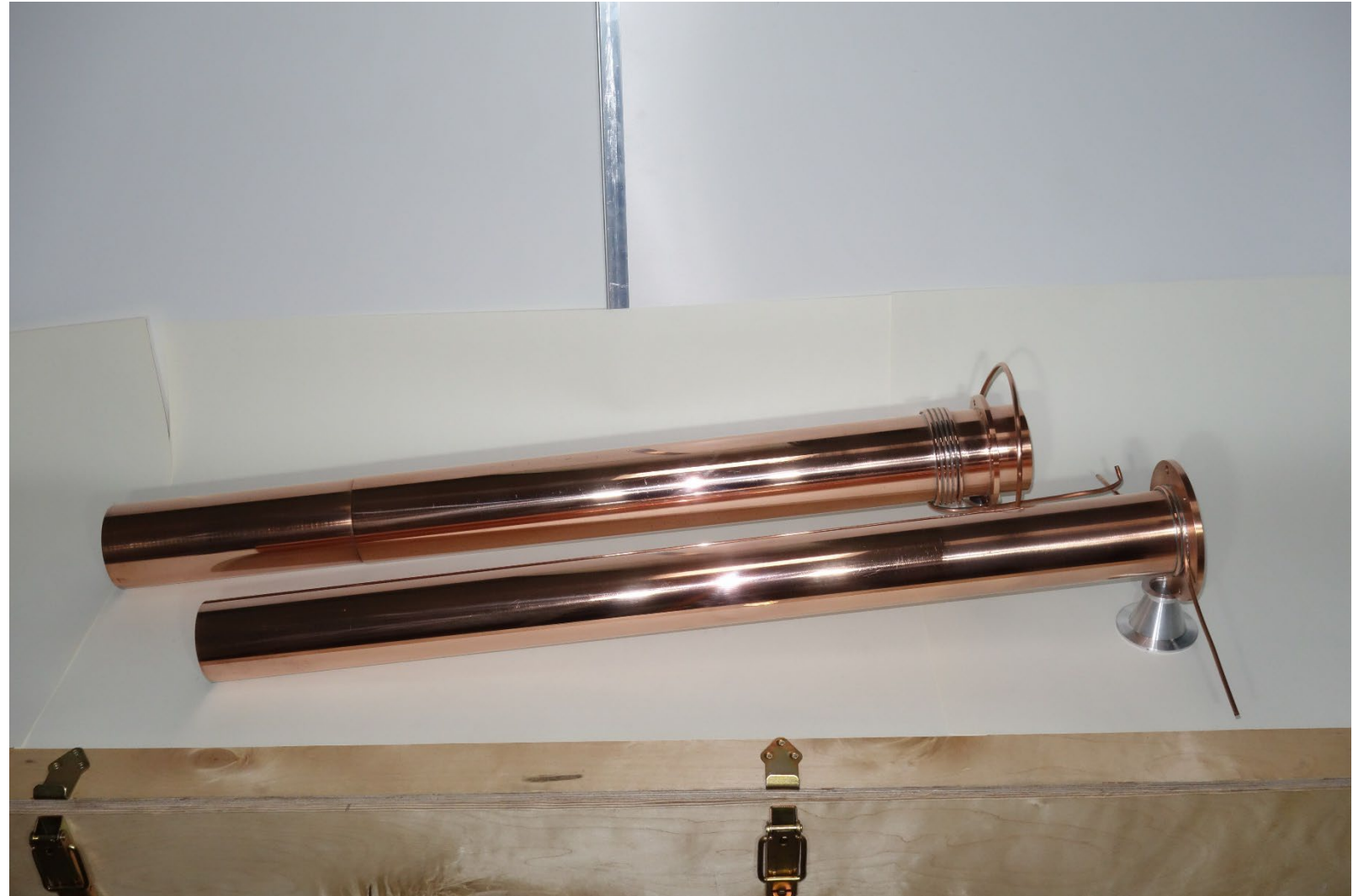
Температура на входе ТО: $T_{\text{FHEen}} \approx 500$ [мК]

Температура на выходе ТО : $T_{\text{FHEex}} \approx 35...50$ [мК]

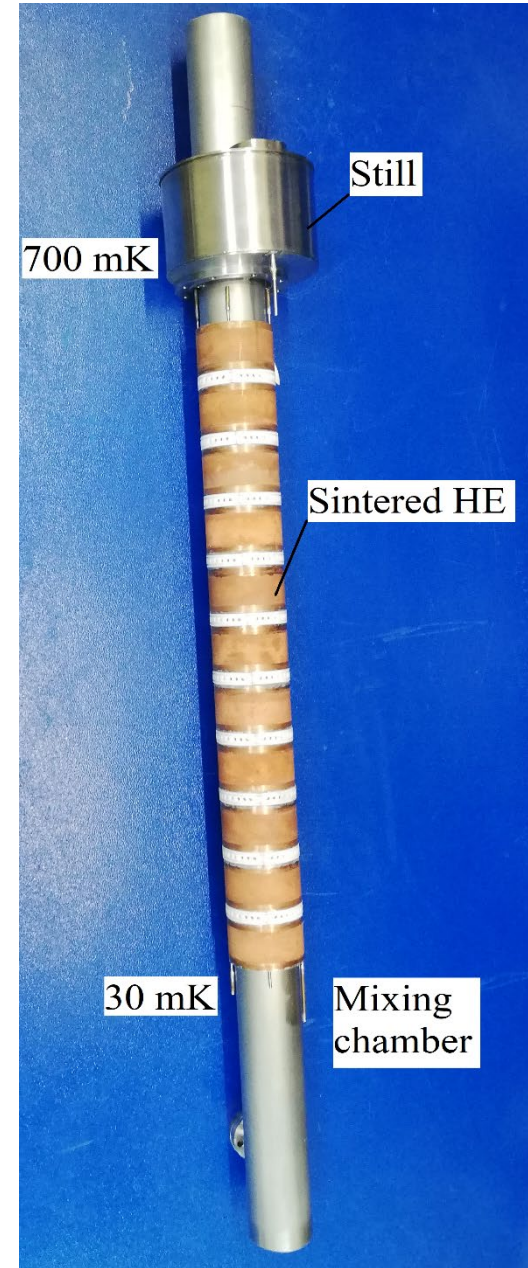
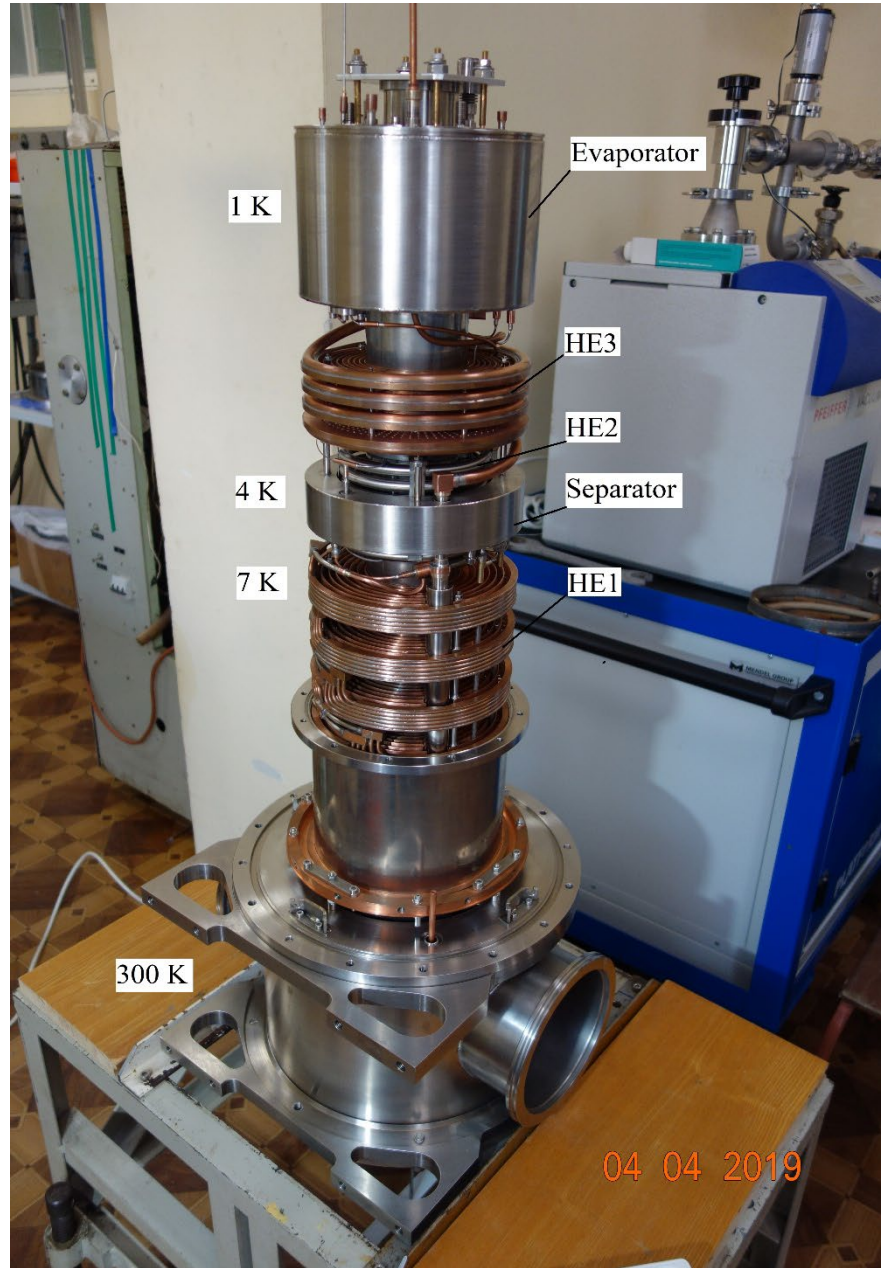
Конструкция: фото



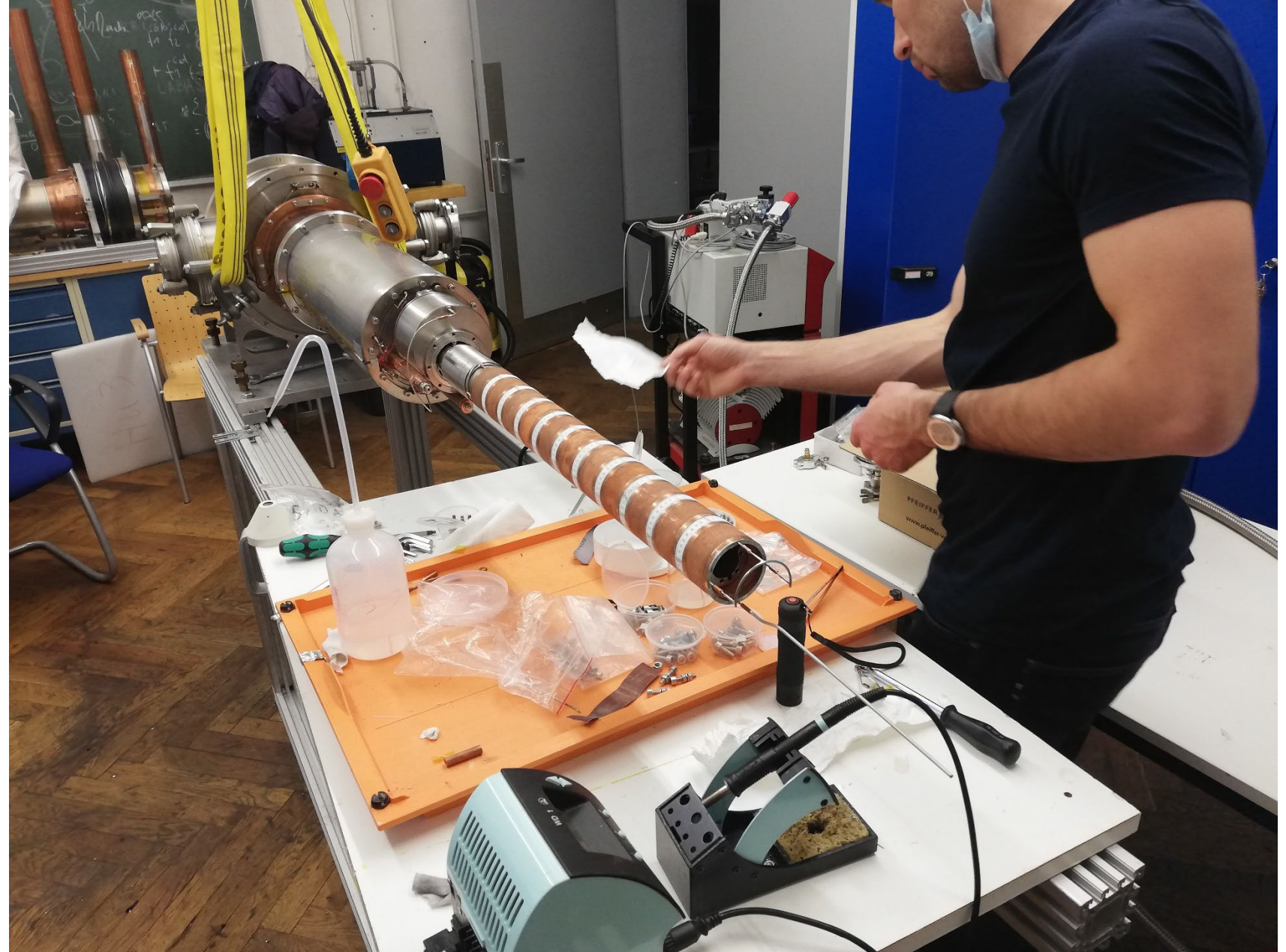
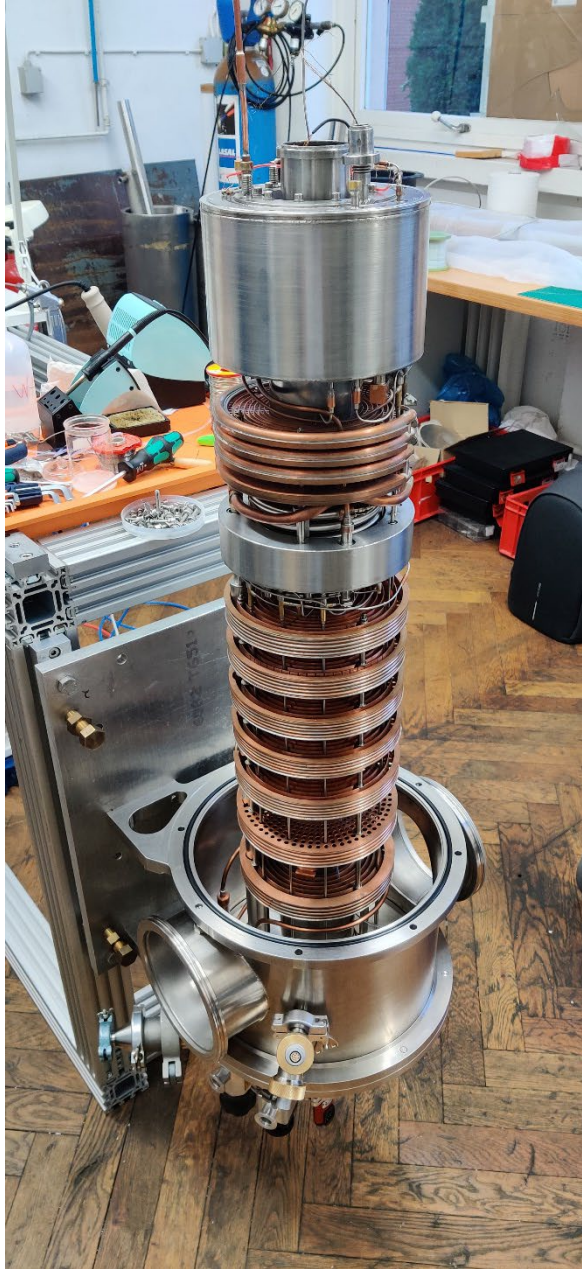
Конструкция: фото



Конструкция: фото



Конструкция: фото

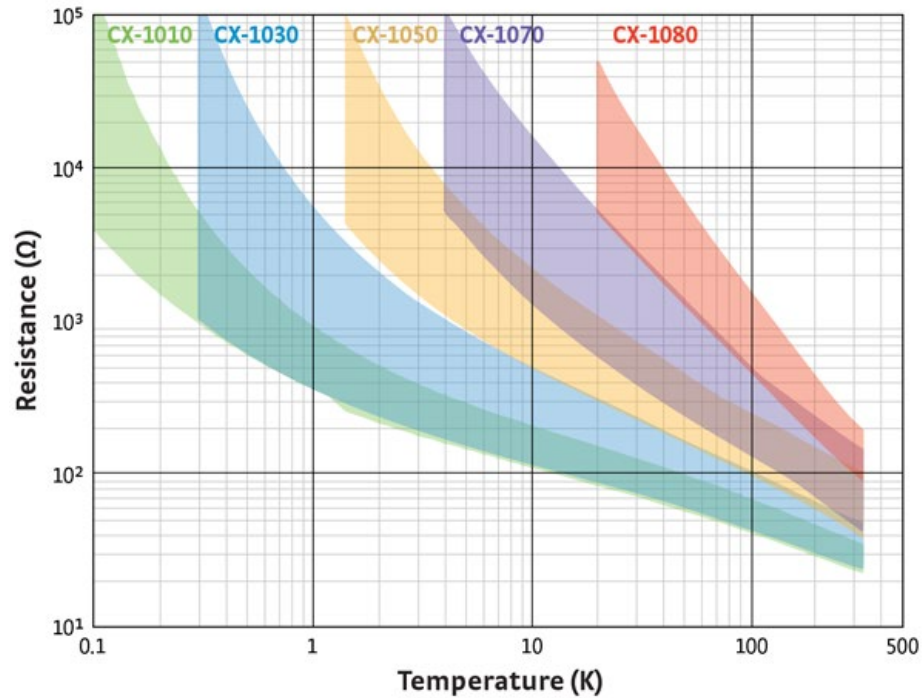
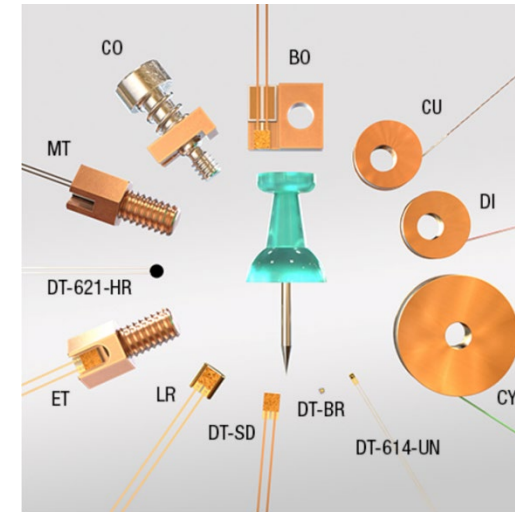


Измерение сверхнизких температур

Контроллер температуры LakeShore 372 AC

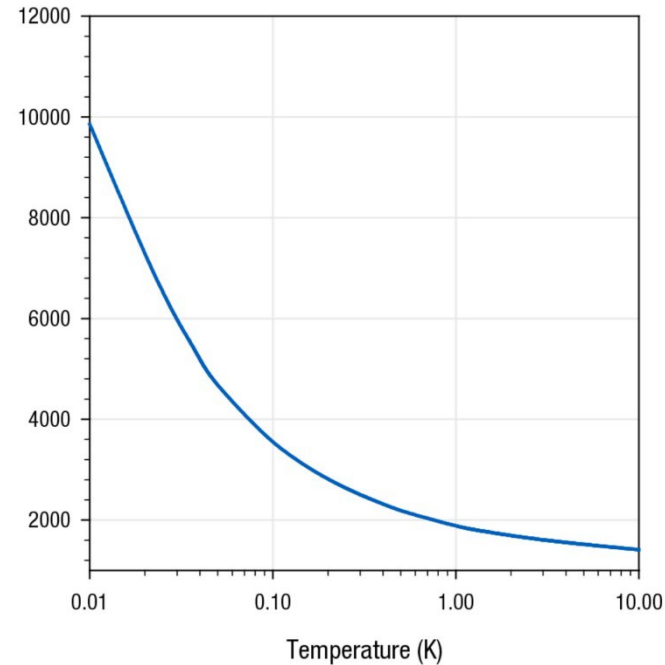


Линейка криогенных датчиков температуры LakeShore

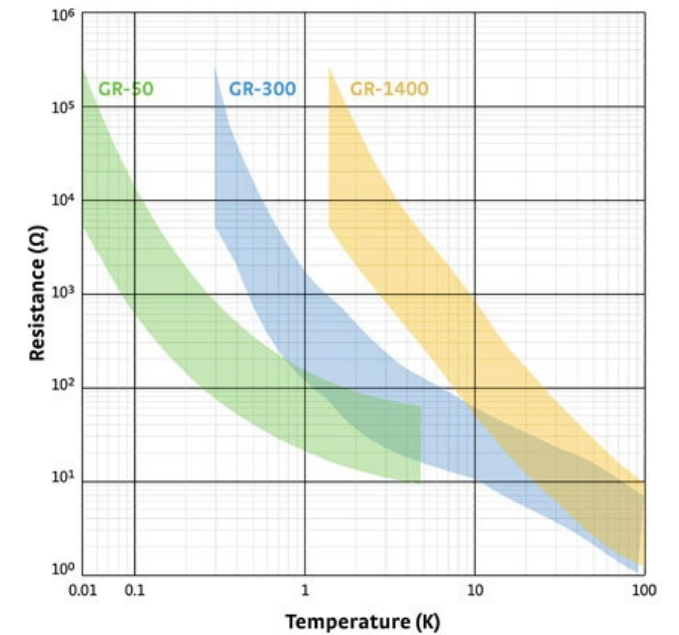


Характерное сопротивление датчиков Cernox®

Typical resistance Ω



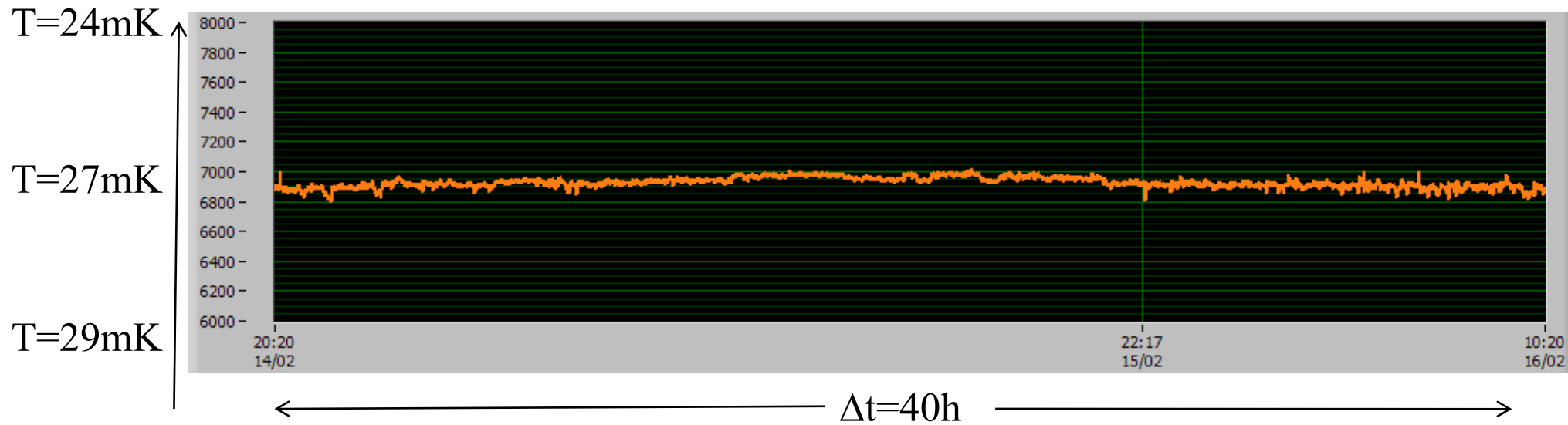
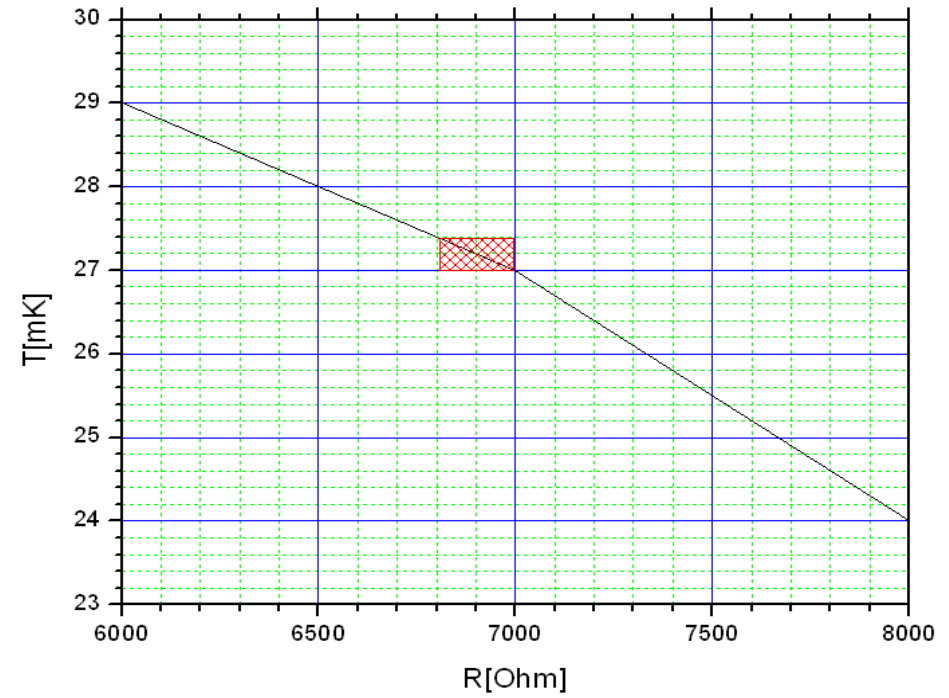
Характерное сопротивление датчиков Rox™



Характерное сопротивление Ge датчиков

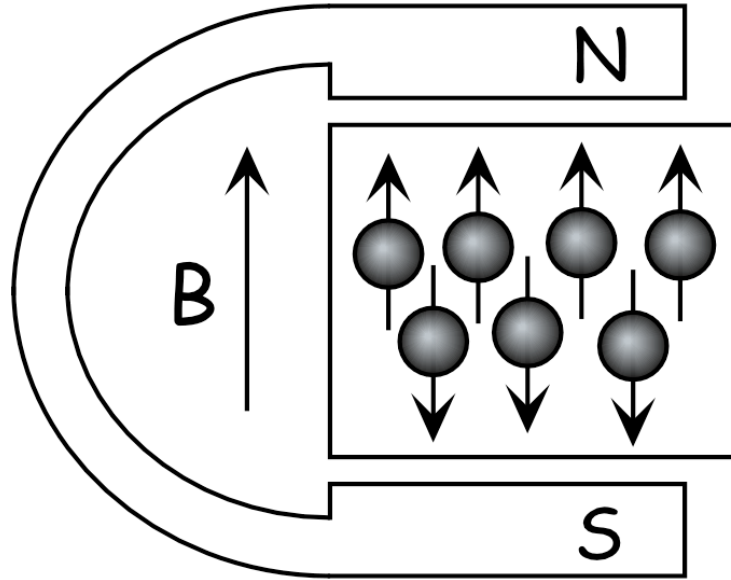
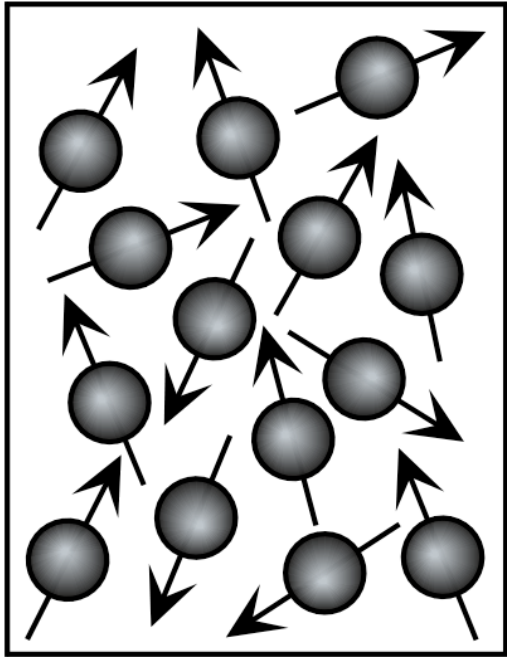
Достигаемая температура

Стабильность температуры:
 $\Delta T \sim \pm 0.25\text{mK}$ (весь день)



Поляризованная мишень

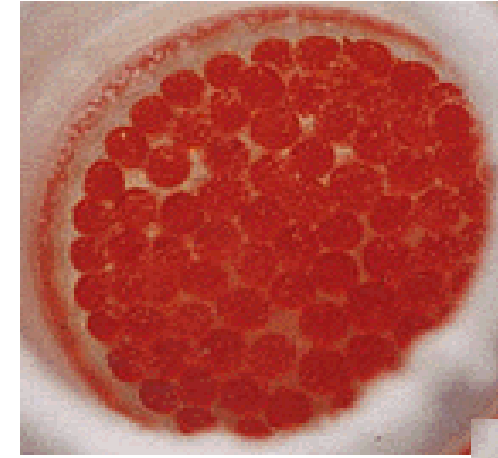
Поляризация = Ориентация спинов в магнитном поле



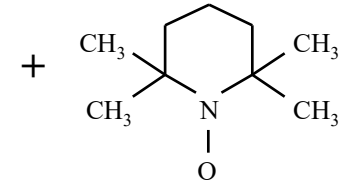
$$P = \frac{N\uparrow - N\downarrow}{N\uparrow + N\downarrow}$$

В идеале: Все спины в направлении поля
P=100%

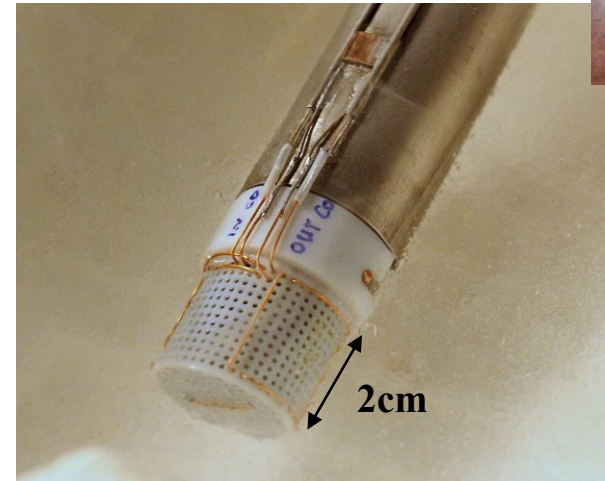
Бутанол



ТЕМПО

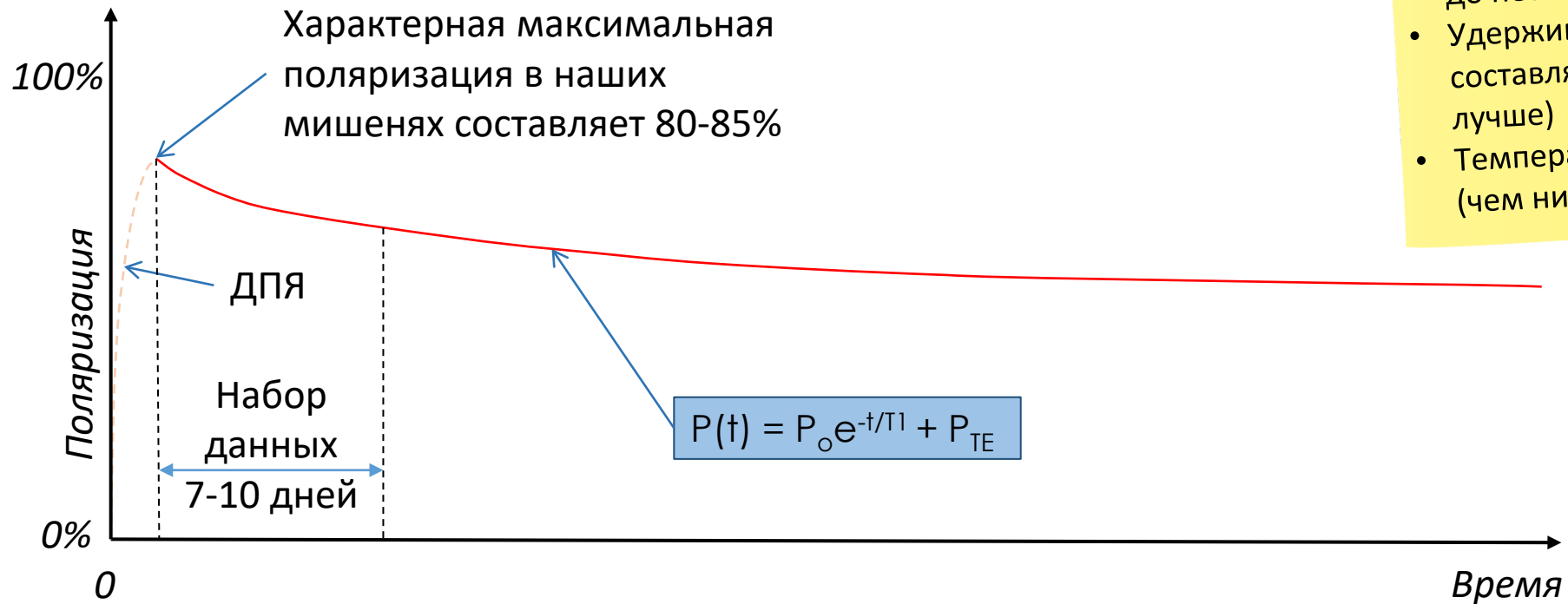


Нашатырный спирт



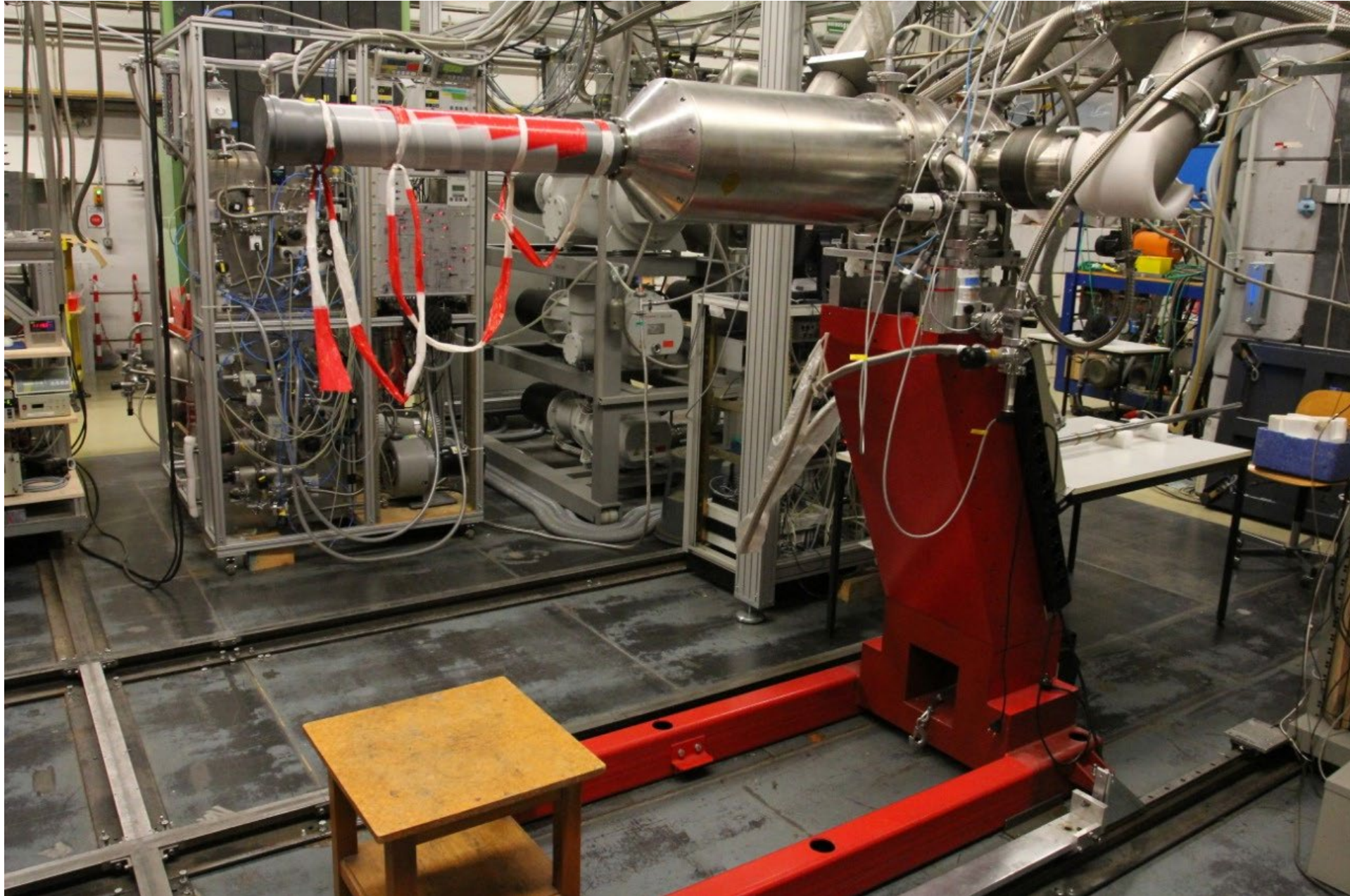
Контейнер с материалом мишени и 2 катушками ЯМР в жидком азоте

Поляризация

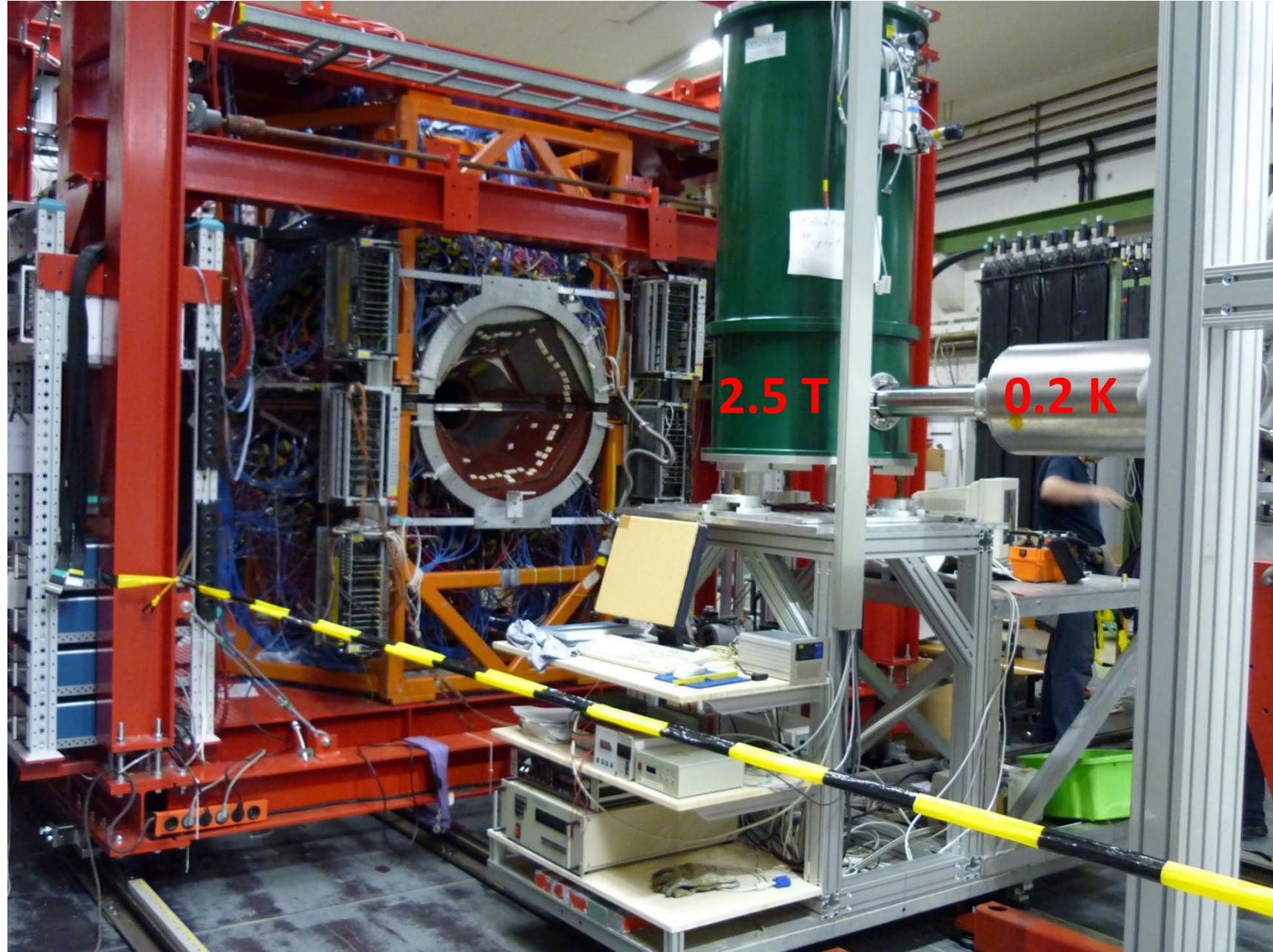


- Как только ДПЯ прекращается, поляризация начинает уменьшаться до своего естественного значения, соответствующего тепловому равновесию
- Снижение поляризации происходит экспоненциально, с T_1 (постоянной времени релаксации) от нескольких дней до нескольких месяцев
- Удерживающее магнитное поле обычно составляет $\sim 0.2 - 0.5$ Тл (чем выше, тем лучше)
- Температура обычно составляет < 50 мК (чем ниже, тем лучше)

Применение рефрижератора растворения

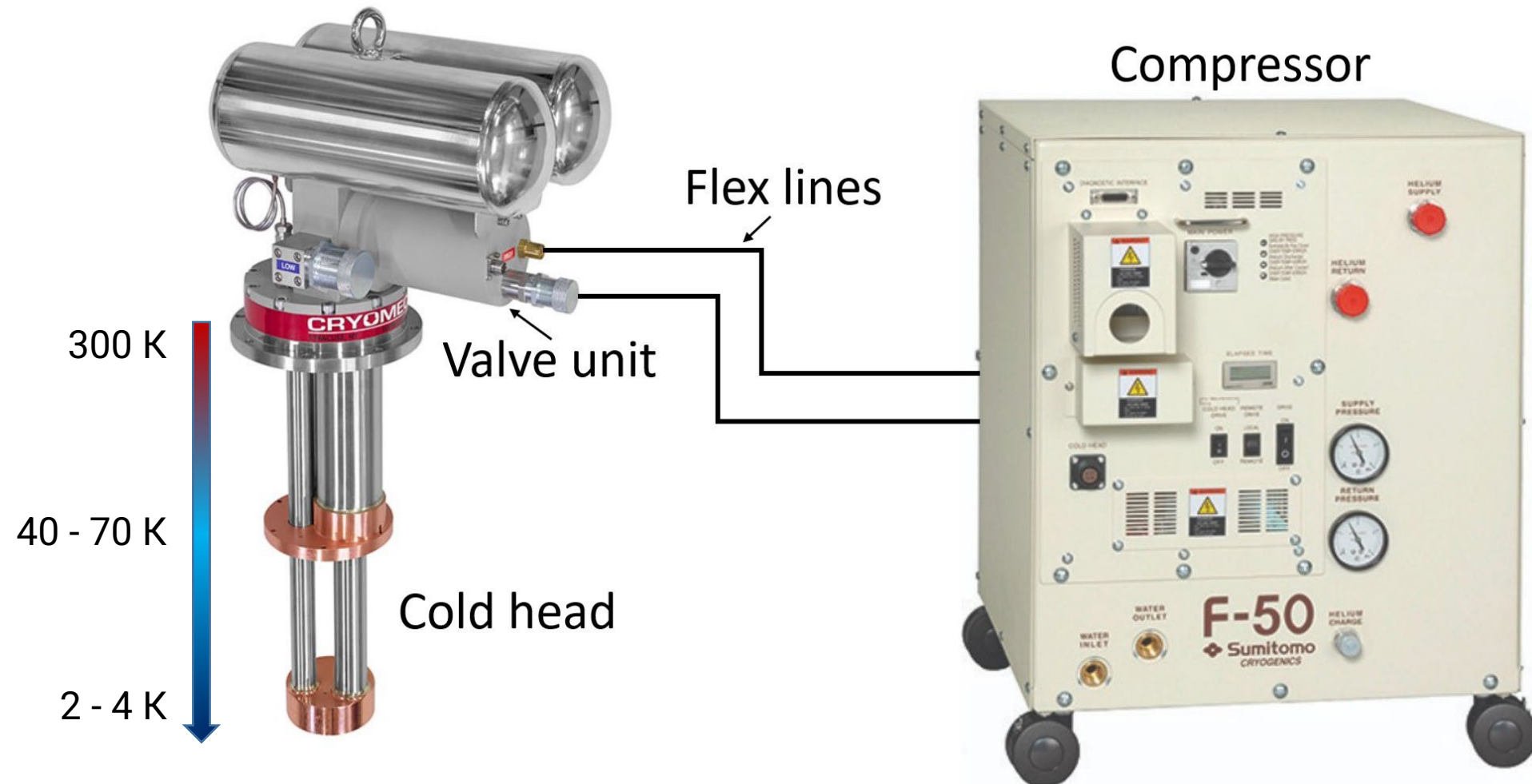


Применение рефрижератора растворения

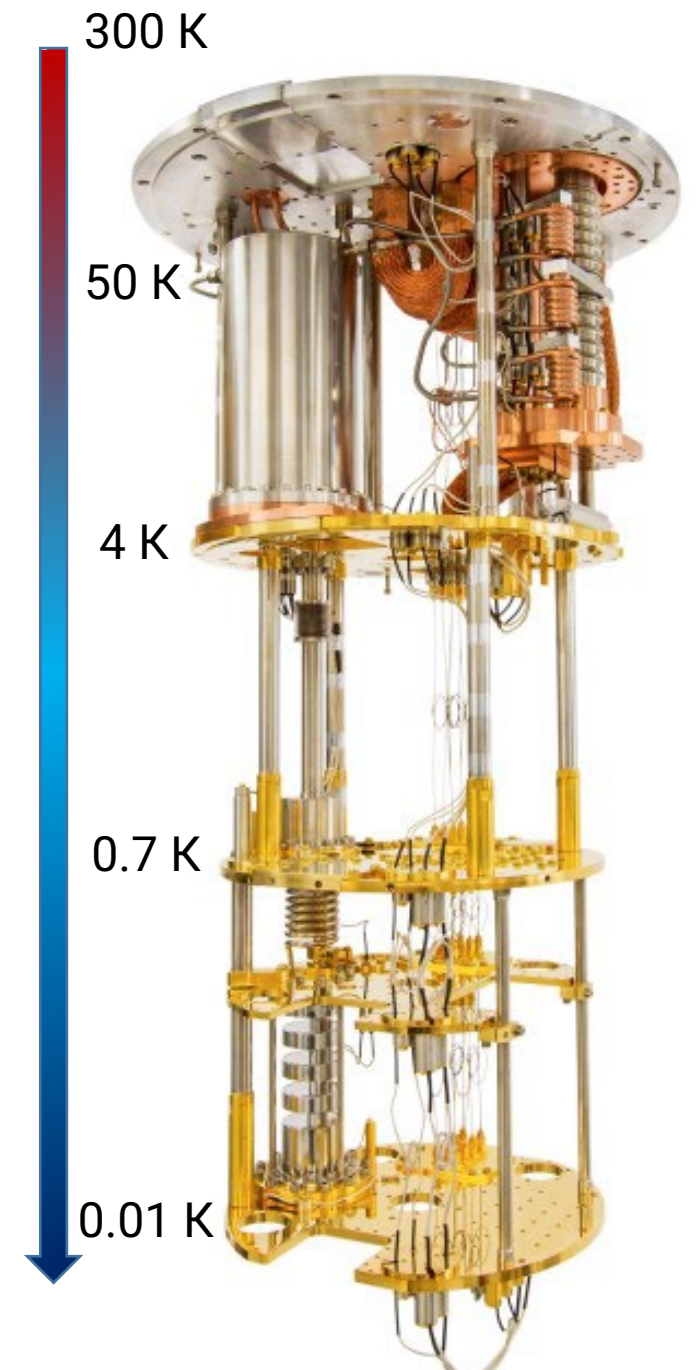


Криокулер

- Автономная газовая криогенная машина
- Минимальное общее техническое обслуживание, длительное среднее время между техническими обслуживаниями
- Идеально подходит для применений, чувствительных к вибрации
- Способен обеспечивать температуры в диапазоне 300 К – 2 К без использования криожидкостей
- Энергопотребление в диапазоне 3 – 15 кВт
- Полезная холодопроизводительность @77К: 10 - 150 Вт, @4К: 0.25 - 5 Вт

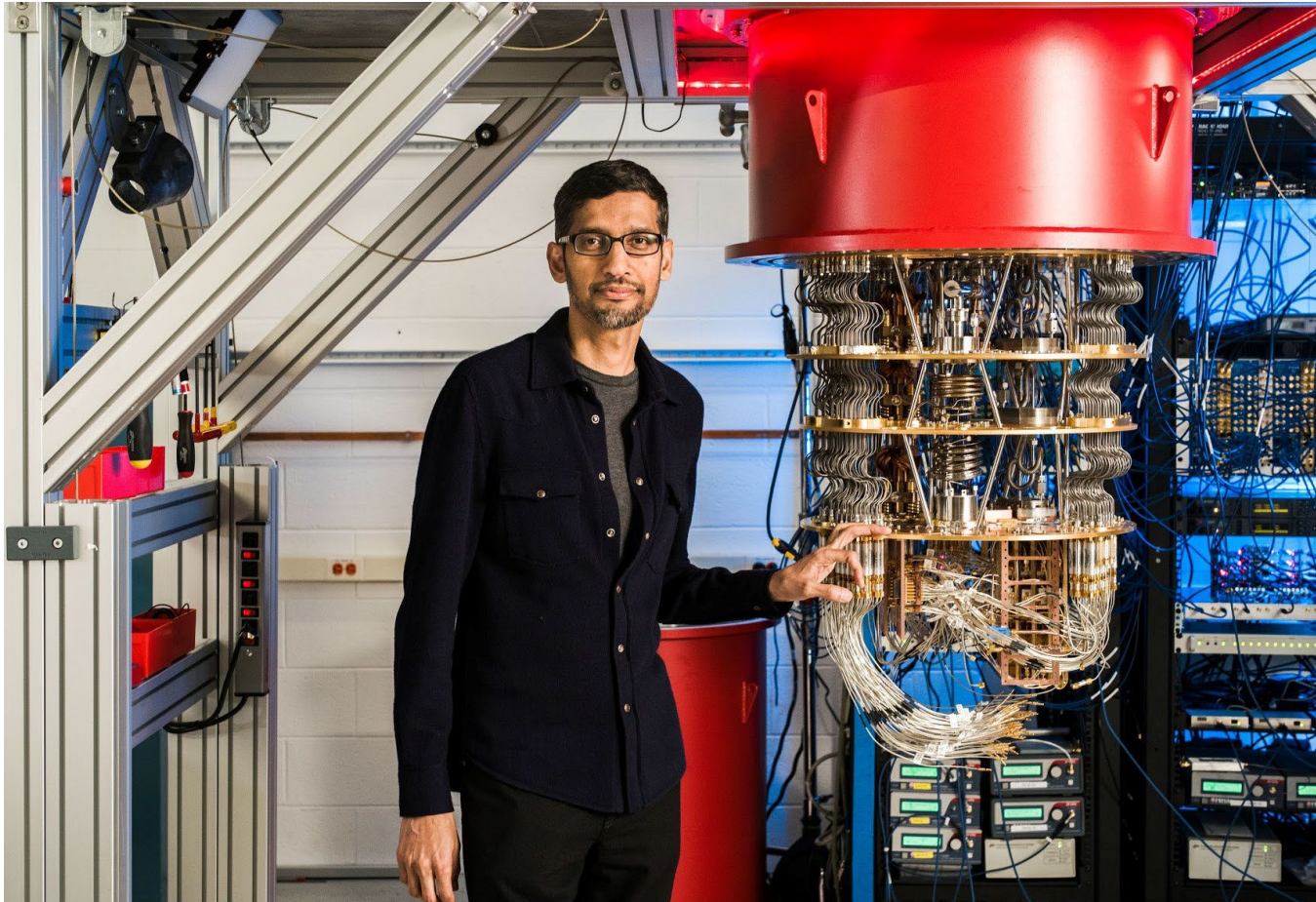


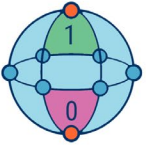
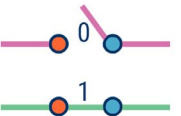
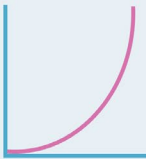
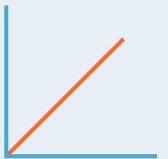
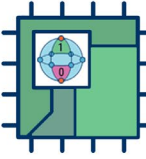
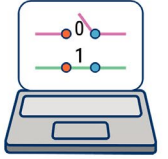
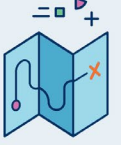

«Сухой» рефрижератор растворения



Квантовый компьютер

Квантовый компьютер оперирует с кубитами, имеющими значения одновременно и 0, и 1, что позволяет обрабатывать все возможные состояния одновременно, достигая существенного преимущества над обычными компьютерами в ряде алгоритмов.



Quantum Computing	Vs.	Classical Computing
 <p>Calculates with qubits, which can represent 0 and 1 at the same time</p>		 <p>Calculates with transistors, which can represent either 0 or 1</p>
 <p>Power increases exponentially in proportion to the number of qubits</p>		 <p>Power increases in a 1:1 relationship with the number of transistors</p>
 <p>Quantum computers have high error rates and need to be kept ultracold</p>		 <p>Classical computers have low error rates and can operate at room temp</p>
 <p>Well suited for tasks like optimization problems, data analysis, and simulations</p>		 <p>Most everyday processing is best handled by classical computers</p>

Платформа KIDE от компании BlueFors



https://www.youtube.com/watch?v=AZIjXuGUN4U&ab_channel=Bluefors

Литература:

1. Frank Pobell *“Matter and Methods at Low Temperatures”*;
2. Лоунасмаа О.В. *“Принципы и методы получения температур ниже 1К”*;
3. Nellis G.F. *“Cryogenic heat transfer”*.

Интернет ресурсы:

1. Сайт Википедии: <https://ru.m.wikipedia.org/wiki> ;
2. Сайт компании BlueFors: <https://bluefors.com/> ;
3. Сайт компании Oxford Instruments: <https://www.oxinst.com/> ;
4. Сайт компании Cryomech: <https://www.cryomech.com/> .

Большинство изображений, используемых в презентации, позаимствовано из книги Frank Pobell *“Matter and Methods at Low Temperatures”*, сайта «Википедия» или открытых источников сети интернет, а также из личных архивов Сектора №3 Низких Температур ОНИРИ ЛЯП ОИЯИ.

Спасибо за внимание!