



Joint Institute for Nuclear  
Research

SCIENCE BRINGING NATIONS TOGETHER

# Замороженные спиновые мишени Сектора Низких Температур Лаборатории Ядерных Проблем ОИЯИ

---

Ivan Gorodnov - JINR DLNP SLT  
«Вопросы поляризационной физики легких ядер»  
Гатчина, Российская Федерация  
27-30 Июня 2022 г.



## Dilution refrigerator history

1952

**Heinz London** были предложены теоретические основы работы криостата растворения.

1962

*H. London, G. R. Clarke, u Eric Mendoza* (<https://doi.org/10.1103/PhysRev.128.1992>) предложили прототип криостата растворения, работающего в непрерывном режиме.

1964

Идея была реализована **P. Das, R. Bruyn de Ouboter & K. W. Taconis** в Kamerlingh Onnes Laboratorium, Leiden, The Netherlands ( $T_{\min} \sim 220\text{мК}$ ).

1966

**Неганов Б.С., Борисов Н.С. и Либурз М.Ю.** в ЛЯП ОИЯИ создали криостат растворения на котором впервые были получены температуры **50мК** в непрерывном режиме работы и **25мК** в однократном режиме работы.

Наши дни

Современные «жидкостные» криостаты растворения основаны на т.н. «Гренобльском дизайне» разработанным **Дж. Фроссати** и его коллегами. Такие криостаты достигают стабильной температуры в диапазоне **10 – 50 мК**.

### Ссылки на публикации:

**1960** R. Bruyn Ouboter, K.W. Taconis, C.Le Pair, J.J.M. Beenakker. Thermodynamic properties of liquid  $^3\text{He}$ - $^4\text{He}$  mixtures derived from specific heat measurements between 0.4°K and 2°K over the complete concentration range. [https://doi.org/10.1016/0031-8914\(60\)90037-9](https://doi.org/10.1016/0031-8914(60)90037-9)

**1965** Das, P., de Ouboter, R.B., Taconis, K.W. A Realization of a London-Clarke-Mendoza Type Refrigerator. Low Temperature Physics LT9. [https://doi.org/10.1007/978-1-4899-6443-4\\_133](https://doi.org/10.1007/978-1-4899-6443-4_133)

**Обзор по криостатам растворения 2022** - <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2021.103390>

# JIRN DLNP SNT Polarized target history

1962

Создание французскими специалистами во главе с А. Абрагамом первой поляризованной мишени динамического типа.

1965

Создана 1К поляризованная мишень динамического типа в ОИЯИ группой под руководством Неганова Б.С.

1975

В СНТ ЛЯП ОИЯИ создана **первая в мире** поляризованная замороженная мишень.

1978

В СНТ ЛЯП ОИЯИ создана вторая поляризованная замороженная мишень для ИФВЭ, У-70, Протвино. Эксплуатируется по н.в.

1978

Усовым Ю.А. осуществлена сложнейшая перевозка первой поляризованной замороженной мишени в ЛЯИФ, Гатчина. Где впоследствии сформировалась собственная группа поляризованных мишеней.

1994

Началось международное сотрудничество между чехословацкими физиками и физиками сектора Ю.М. Казаринова. В 1994 г. Запущена поляризованная замороженная мишень для экспериментов при низких энергиях (15 МэВ) на ускорителе (Van de Graaff) Карлова Университета, Прага.

1994-1996

Проводились работы по реконструкция передвижной поляризованной мишени. При лидирующей роли сотрудников СНТ, в этой работе участвовали также специалисты из Франции, Украины, ИЯИ – Москва, ПИЯФ – Гатчина, ЛВЭ – ОИЯИ. Работы проводились по двум грантам INTAS.

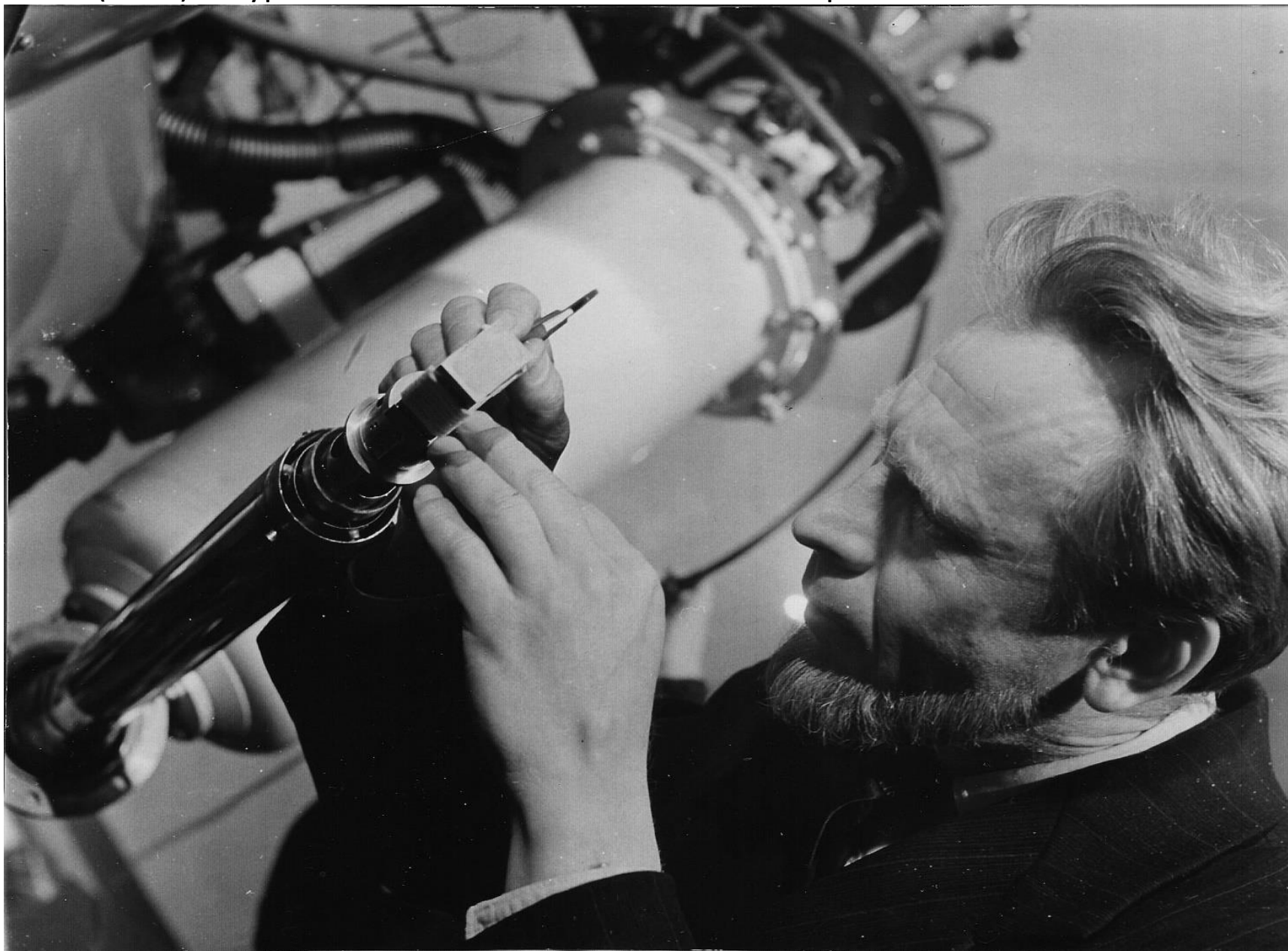
с 2003

С 2003 по 2007 создавалась поляризованная замороженная мишень для университета Майнца. С 2007 по н.в. – проводятся эксперименты с использованием данной мишени в Университетах Майнца и Бонна, Германия.

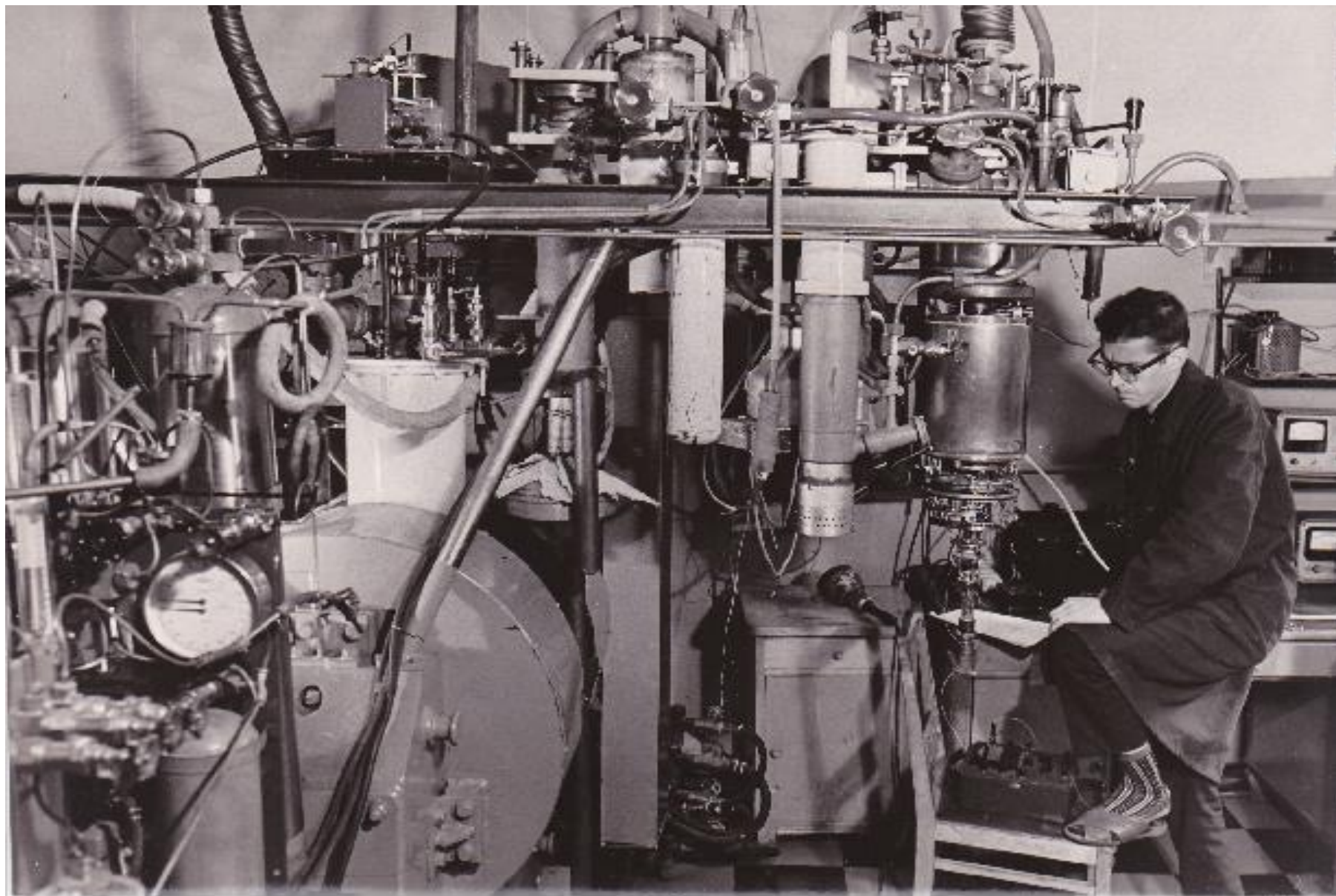
с 2015

С 2015 по 2022 создаётся поляризованная замороженная мишень для университета Бонна.

Борис Степанович Неганов в процессе работы с 1К динамической поляризованной мишенью (1965). Лауреат Сталинской и Ломоносовской премий.



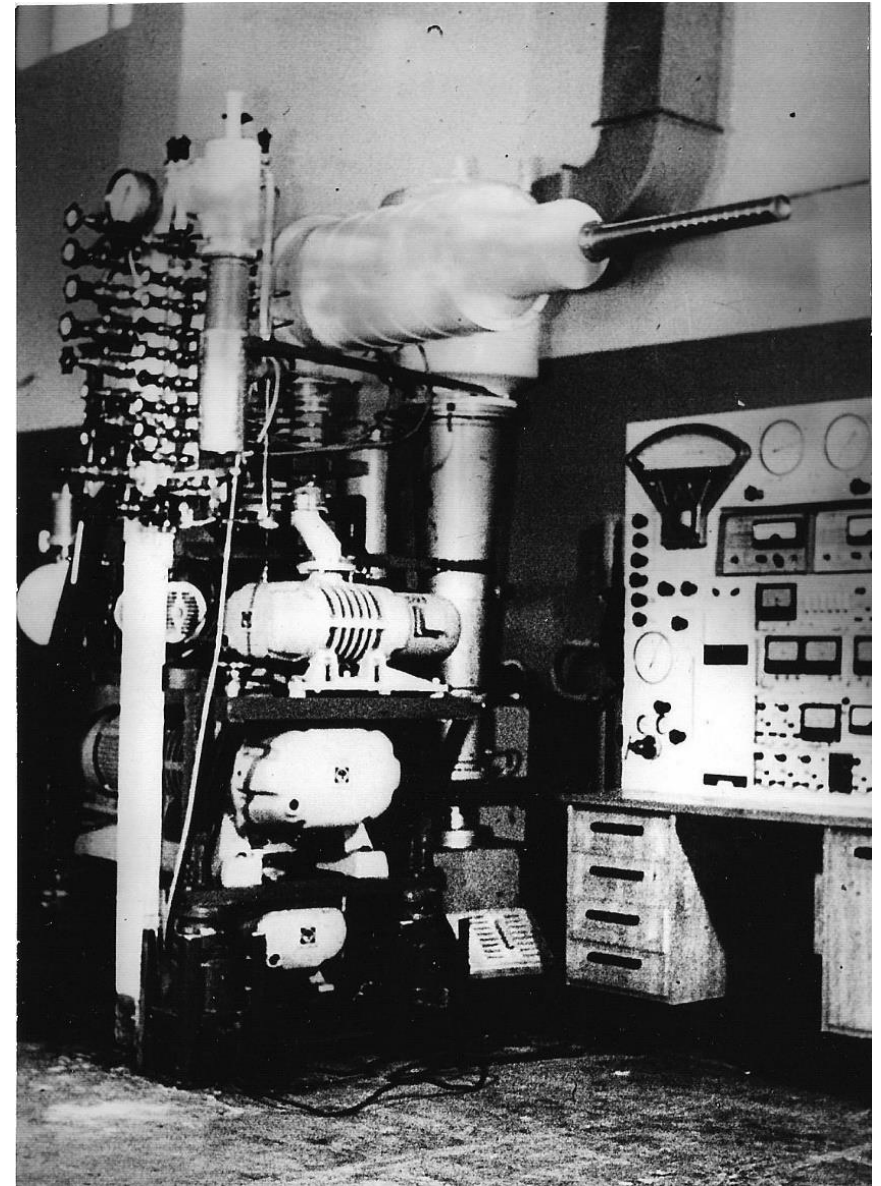
Комбинированная установка, включающая в себя 1К динамическую поляризованную мишень и рефрижератор растворения на котором были достигнуты рекордные температуры в 5мК (1966). На фото Н.С. Борисов.



# Первые замороженные поляризованные мишени (Frozen Spin Target, FST)

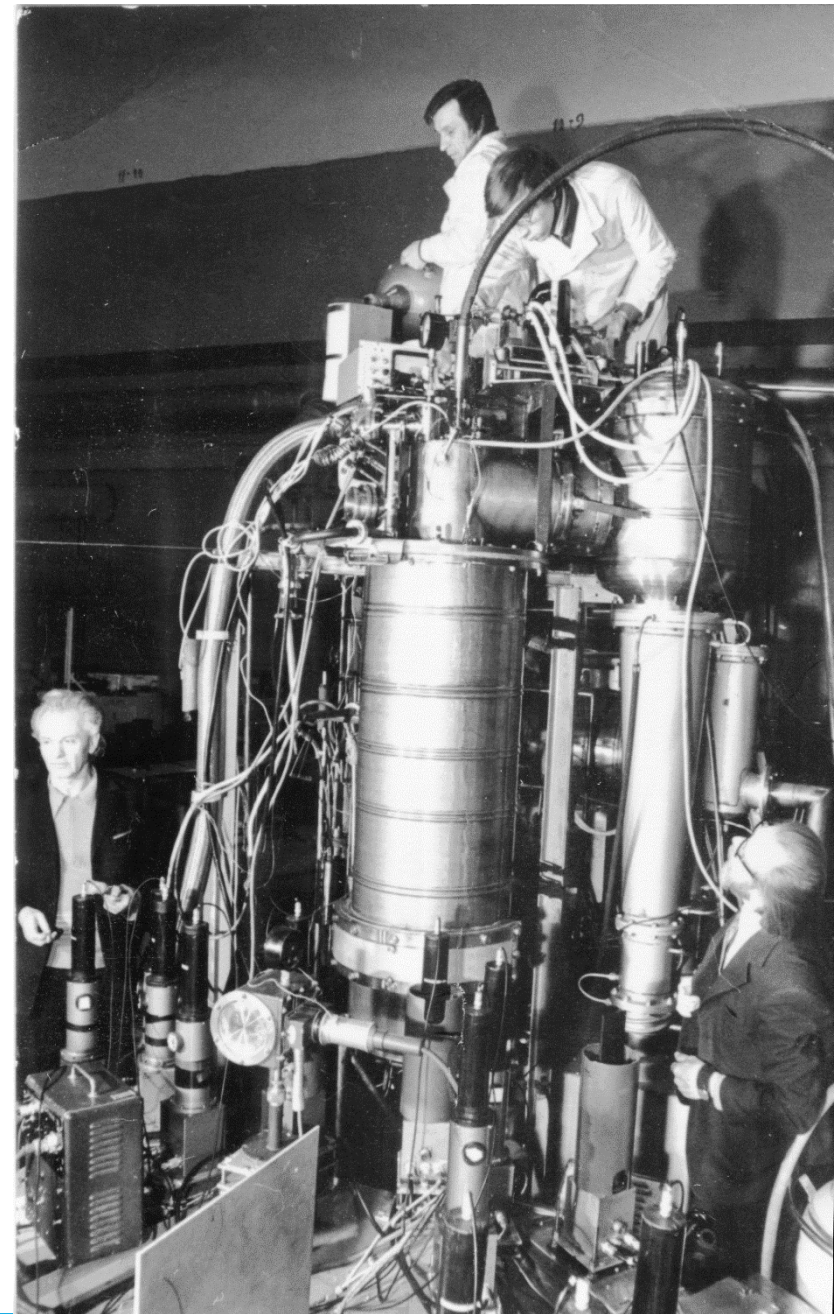


Первая в мире FST (1975) в процессе подготовки к тесту (Б.С. Неганов и Н.С. Борисов)



Вторая FST до перевозки в ИФВЭ (Протвино, У-70) – 1978

Первая FST, перевезённая из Дубны в Гатчину (ЛИЯФ) в процессе подготовки к тесту в Гатчине (1977)



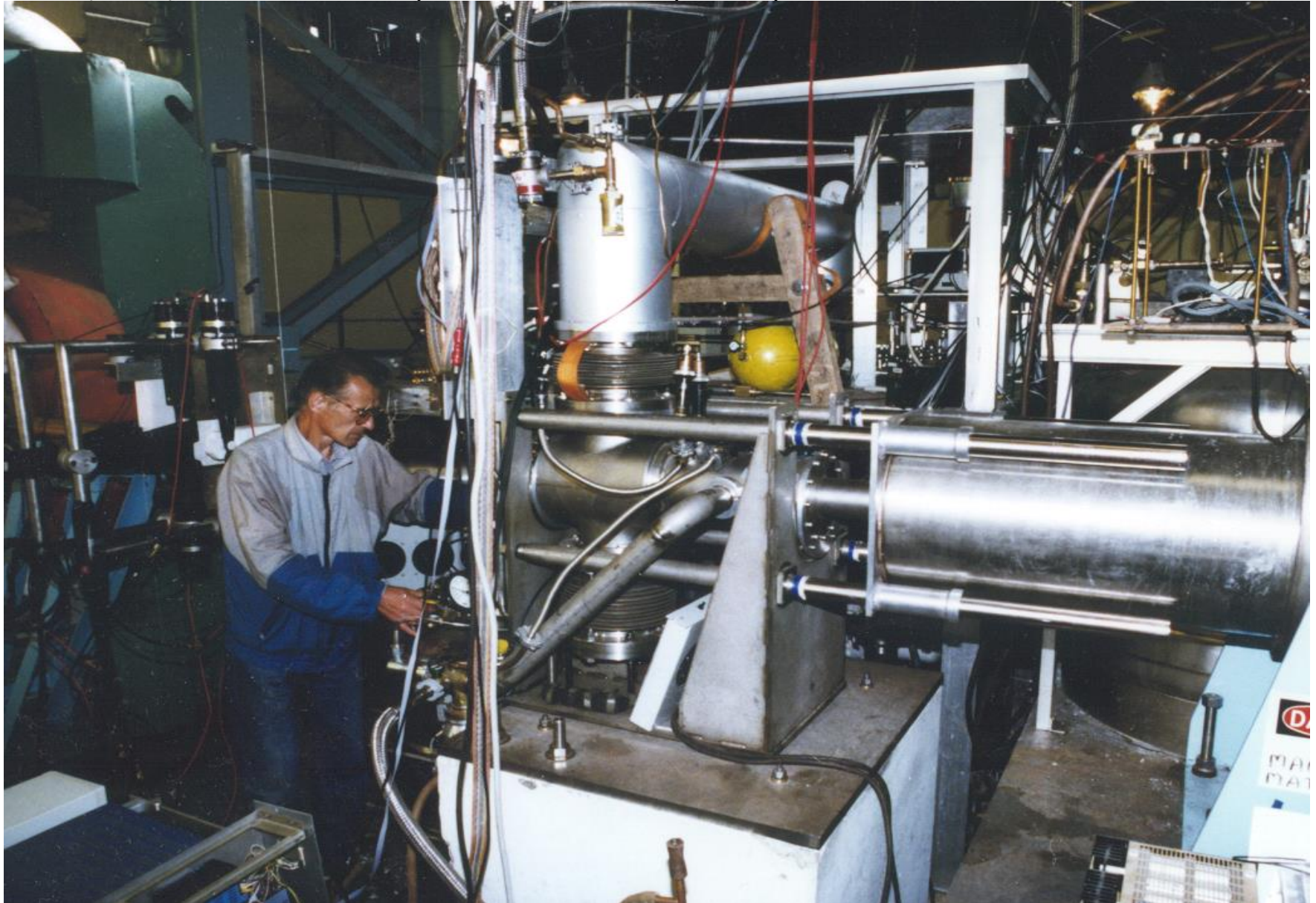
История СНТ ЛЯП ОИЯИ

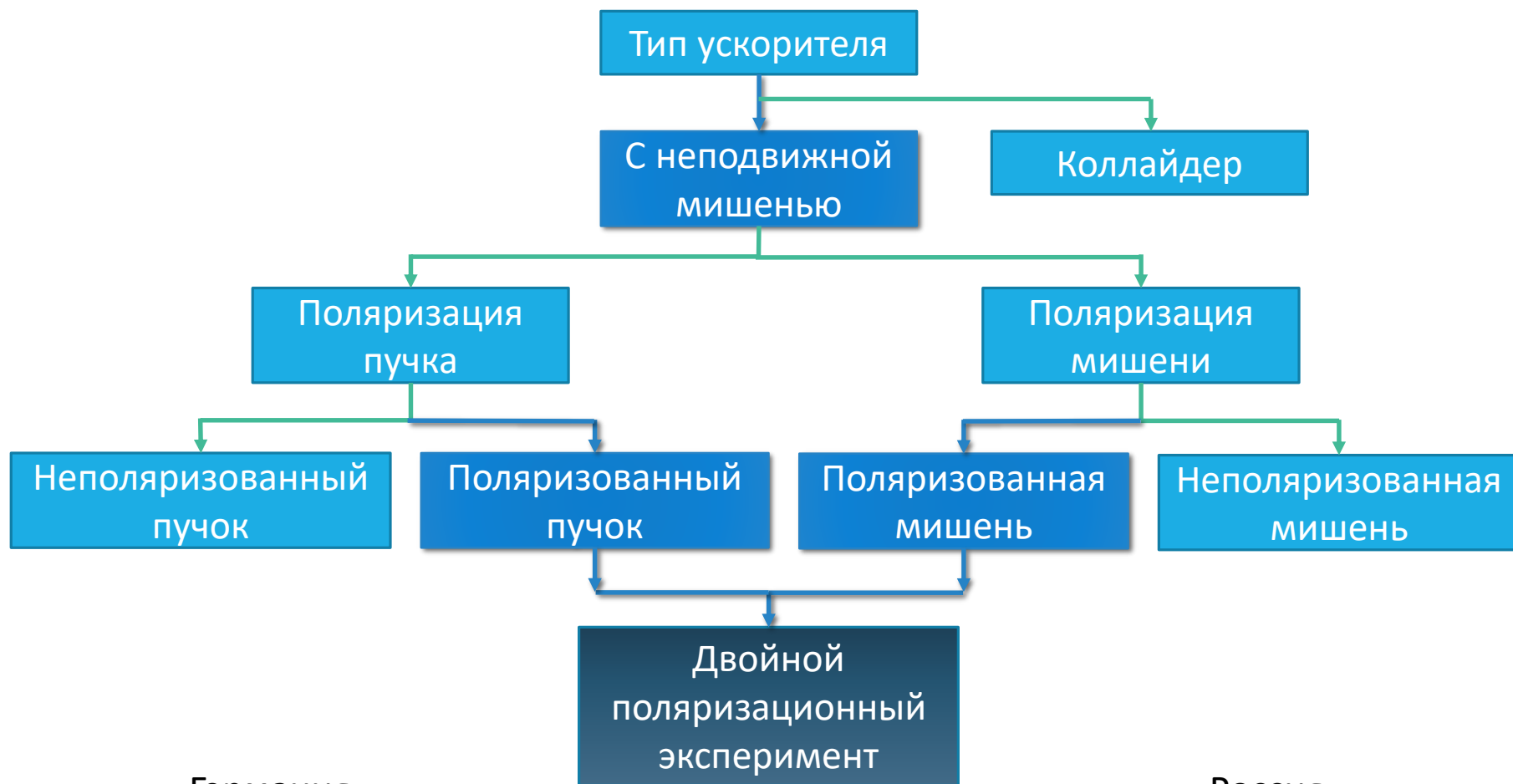
<https://dlnp.jinr.ru/snt/>





Реконструкция замороженной спиновой протонно-поляризованной мишени Saclay-Argonne  
в подвижную поляризованную мишень для спиновых экспериментов высоких энергий, NIM  
A 372, (1996) 349-351. Этот проект был поддержан грантами INTAS в 1993 и 1995 годах.





Германия



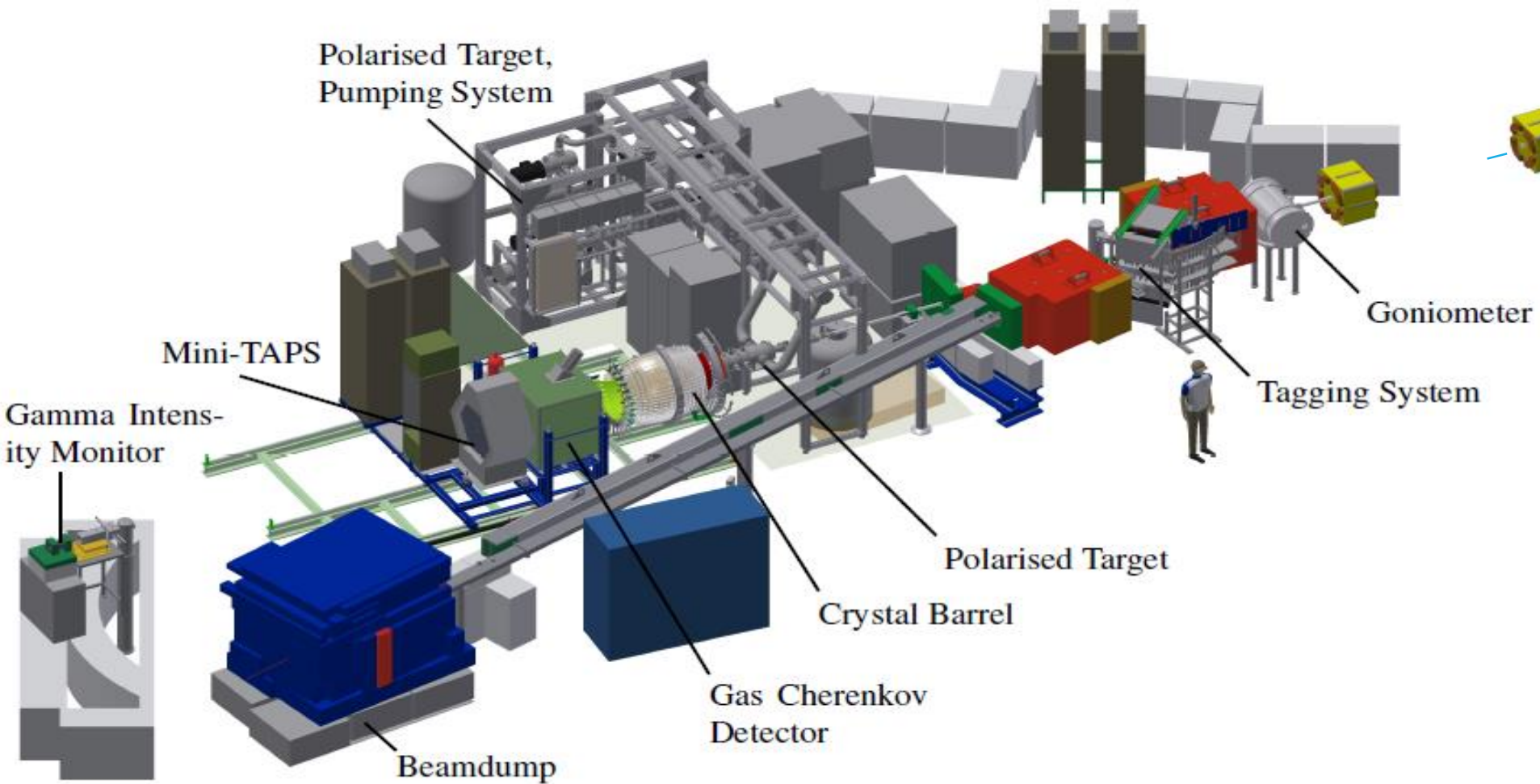
Прага



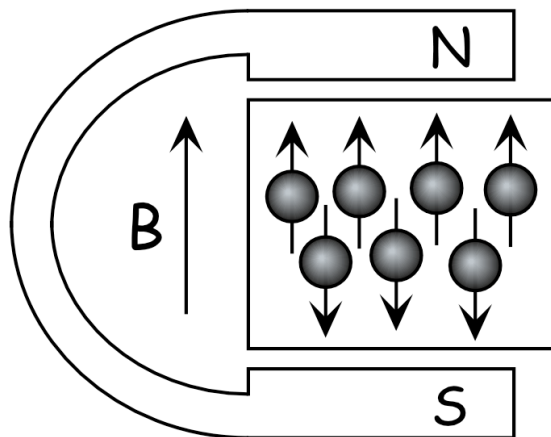
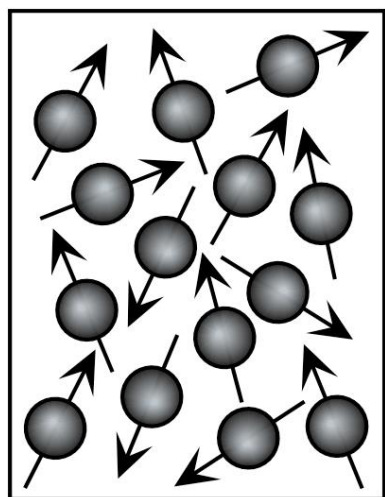
Россия



# Experimental setup of the CBELSA/TAPS experiment



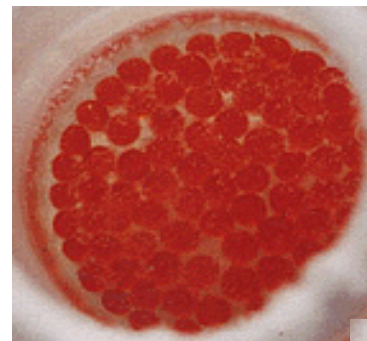
Polarisation = Orientation of Spins in a magnetic field



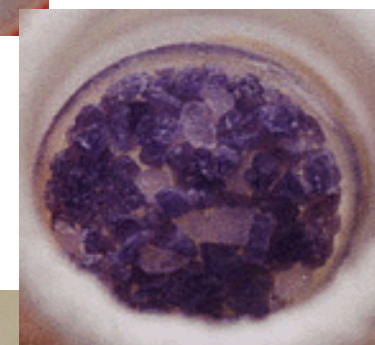
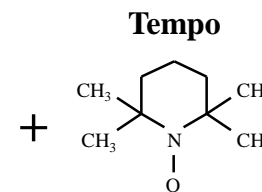
$$P = \frac{N\uparrow - N\downarrow}{N\uparrow + N\downarrow}$$

Ideally: All spins in field direction

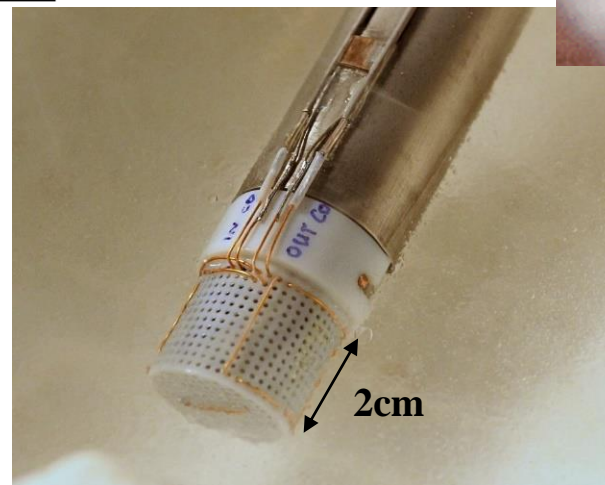
$$P = \pm 100\%$$



Butanol

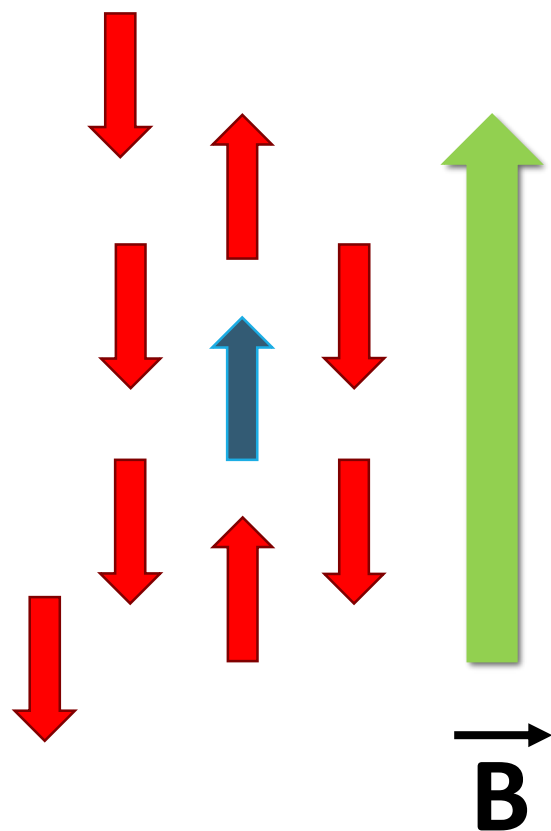


Ammonia



Container with target material and 2 NMR coils on Inner Insert in liquid nitrogen

# Polarizing the spins: Dynamic Nuclear Polarization



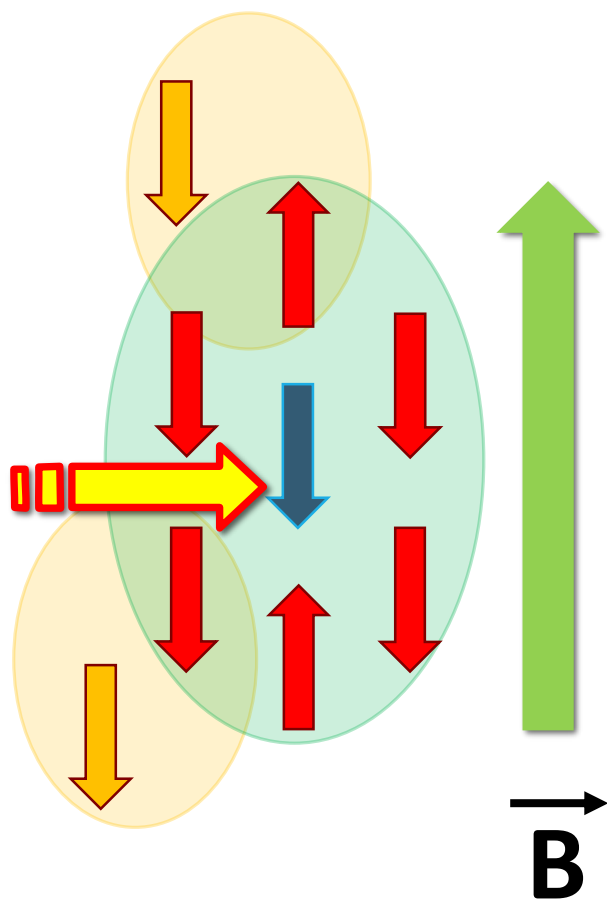
Sample is prepared with  
**paramagnetic radicals** ( $\sim 10^{19}/\text{cm}^3$ )

Radicals are polarized at **low temperature and high field**,  
 $\tanh(m_e B/kT) > 99\%$

Nuclei remain **unpolarized**,  $< 1\%$

The goal of DNP is to **transfer** the  
**radicals'** polarization to the **nuclei**

# Polarizing the spins: Dynamic Nuclear Polarization



Microwaves near the radicals resonance frequency induce mutual electron/nuclear spin flips.  
Freq. matching:  $\nu = \nu_e \pm \nu_N$

The electron flips back quickly to its equilibrium orientation.  
The nucleus does not.

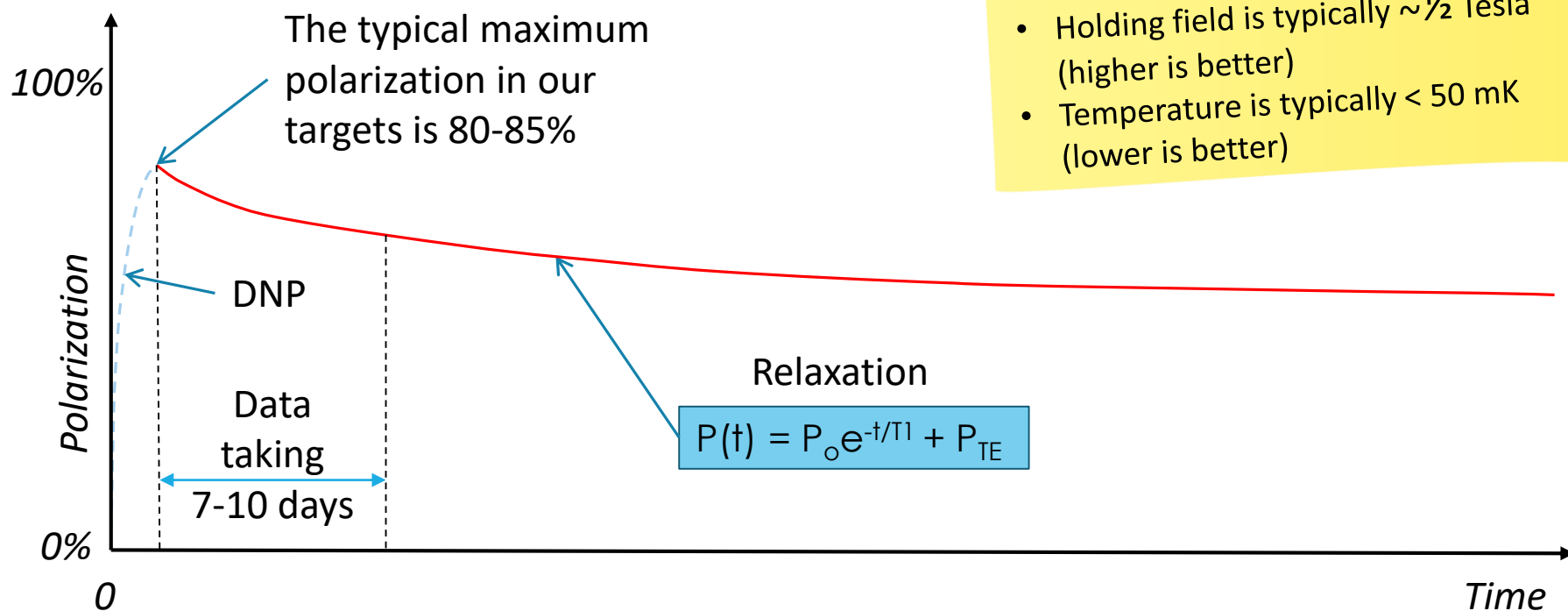
Eventually, the nuclei in the area of the radical become polarized.

Nuclear polarization spreads quickly throughout sample via *spin diffusion*

# Freezing the spins

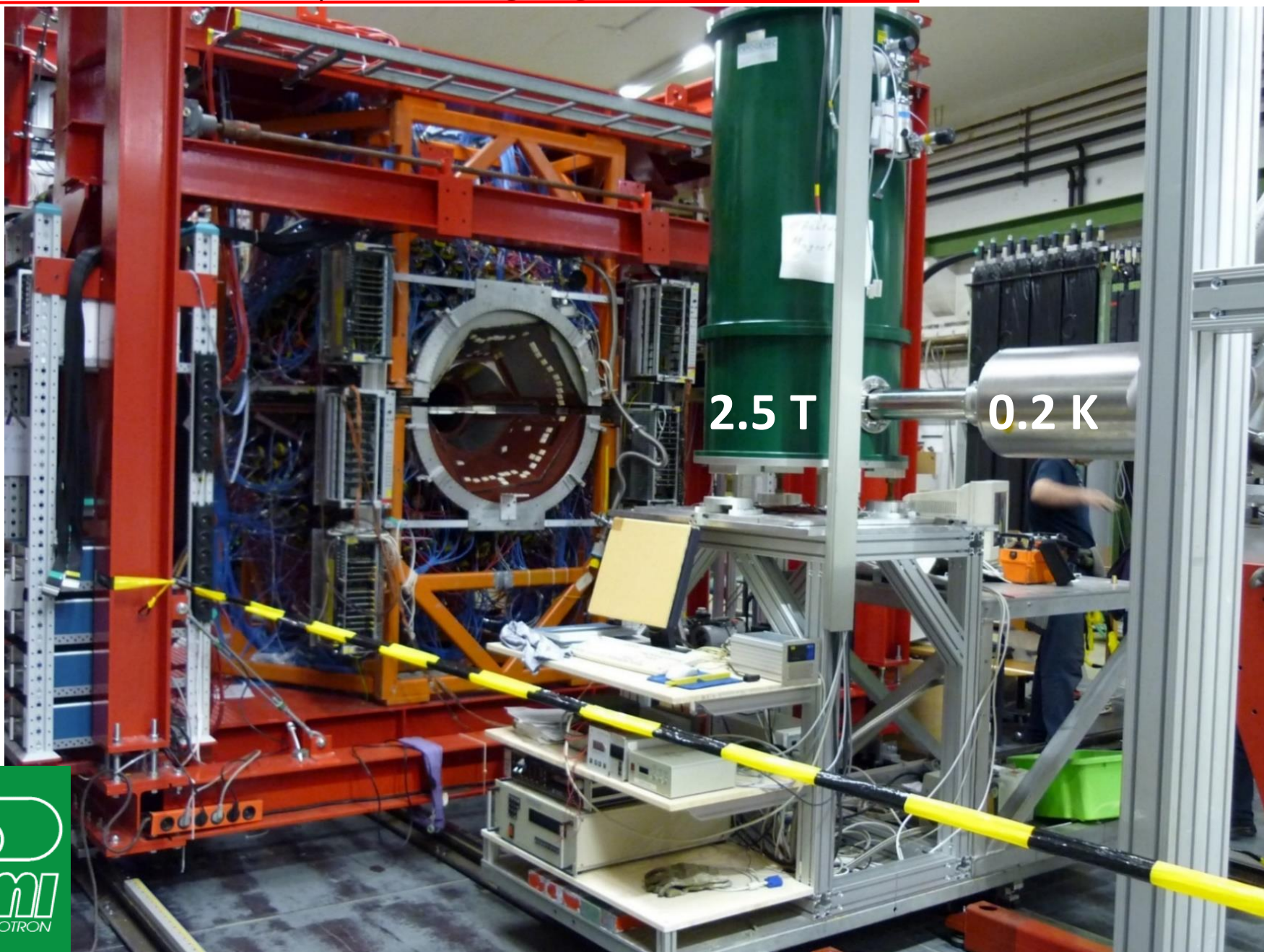
Dynamic Nuclear Polarization was first suggested by A.W. Overhauser in 1953

The typical time for data taking is 7-10 days, then re-DNP.



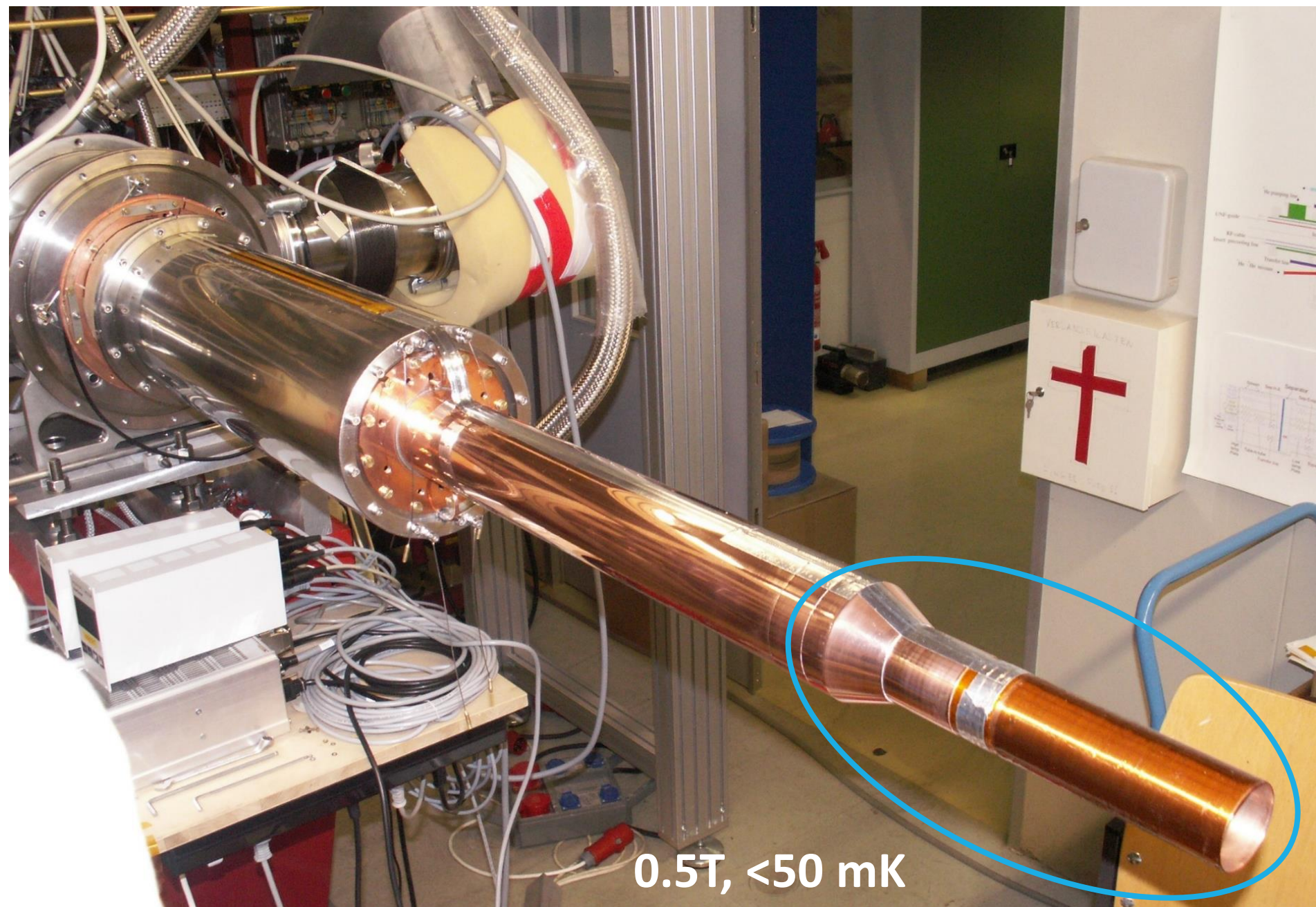
- Once DNP is stopped, the polarization begins to decay towards its natural, thermal-equilibrium value
- Decay is exponential, with  $T_1$  (spin-lattice time constant or relaxation time) of a few days to a few months
- Holding field is typically  $\sim 1/2$  Tesla (higher is better)
- Temperature is typically  $< 50$  mK (lower is better)

# «Crystal Ball» detector and superconducting magnet on MAMI C (Mainz)



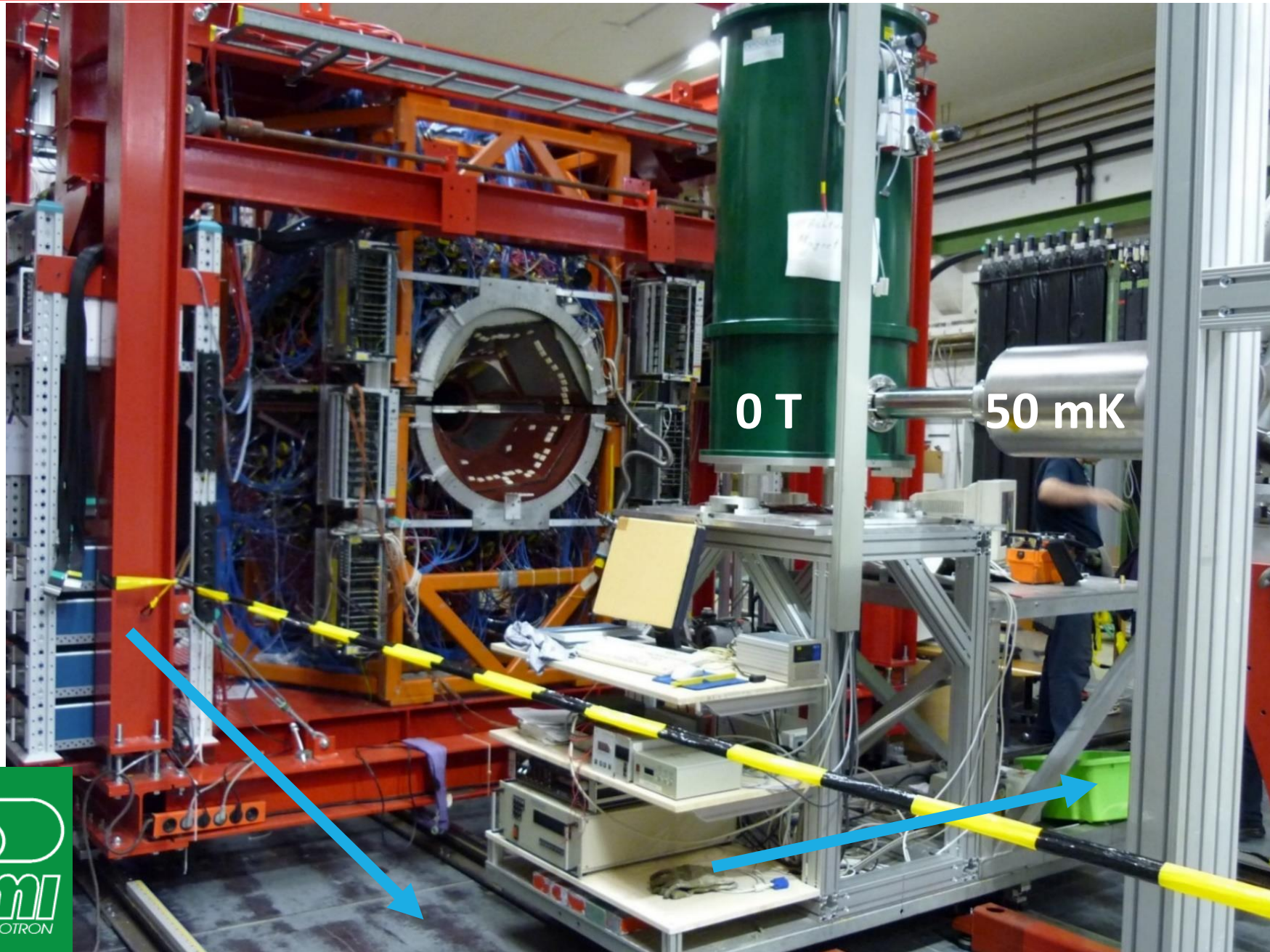


# Holding coil on open Mainz dilution cryostat

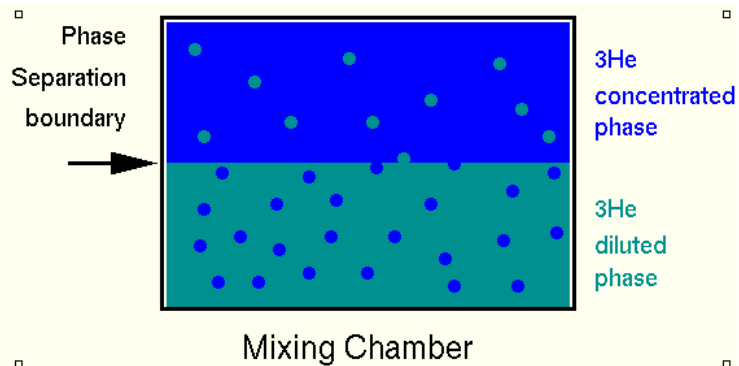
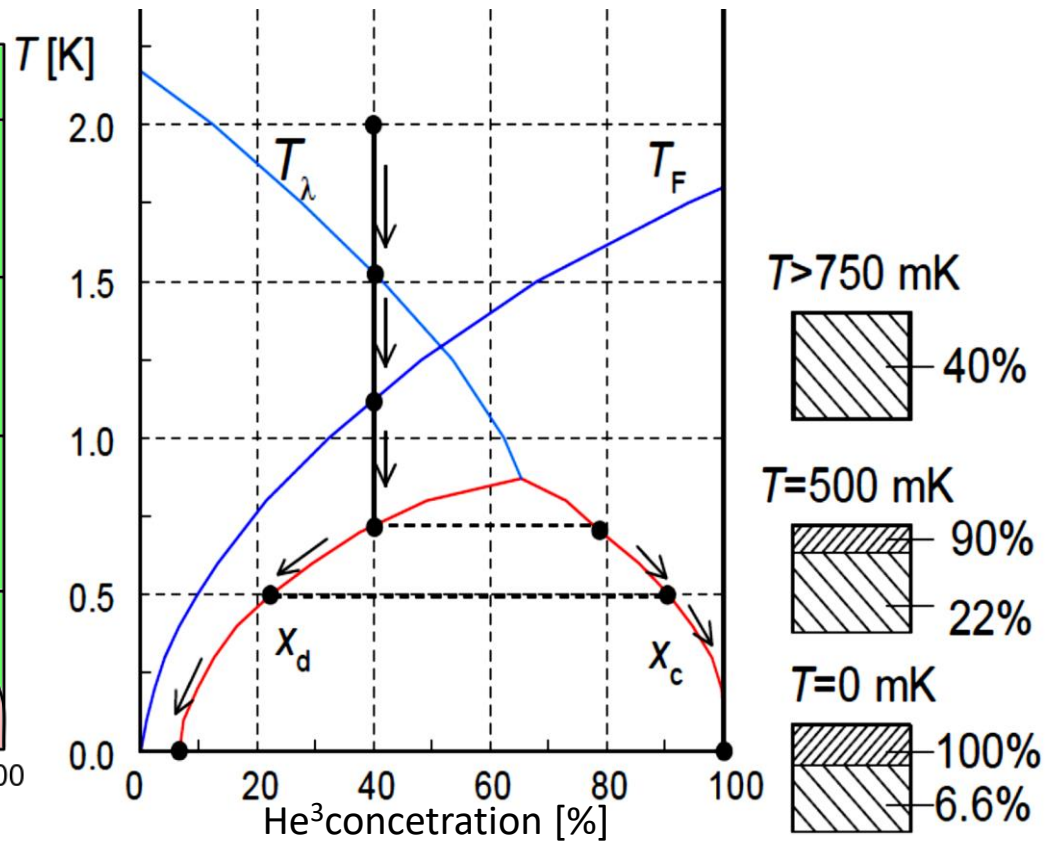
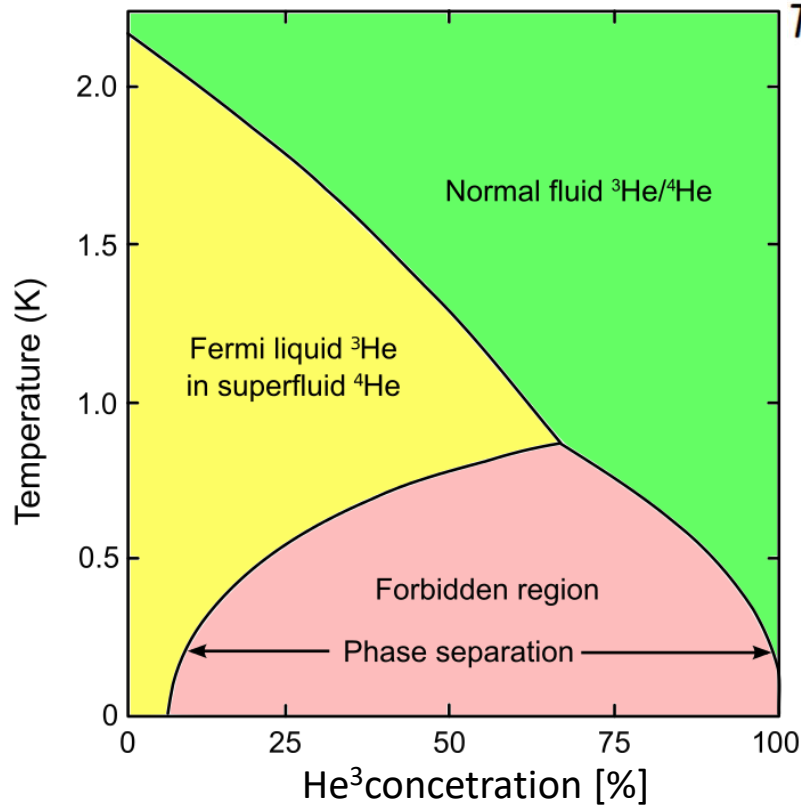


**0.5T, <50 mK**

«Crystal Ball» detector and superconducting magnet on MAMI C (Mainz)



# The dilution effect, He<sup>3</sup>/He<sup>4</sup> phase diagram, phase separation

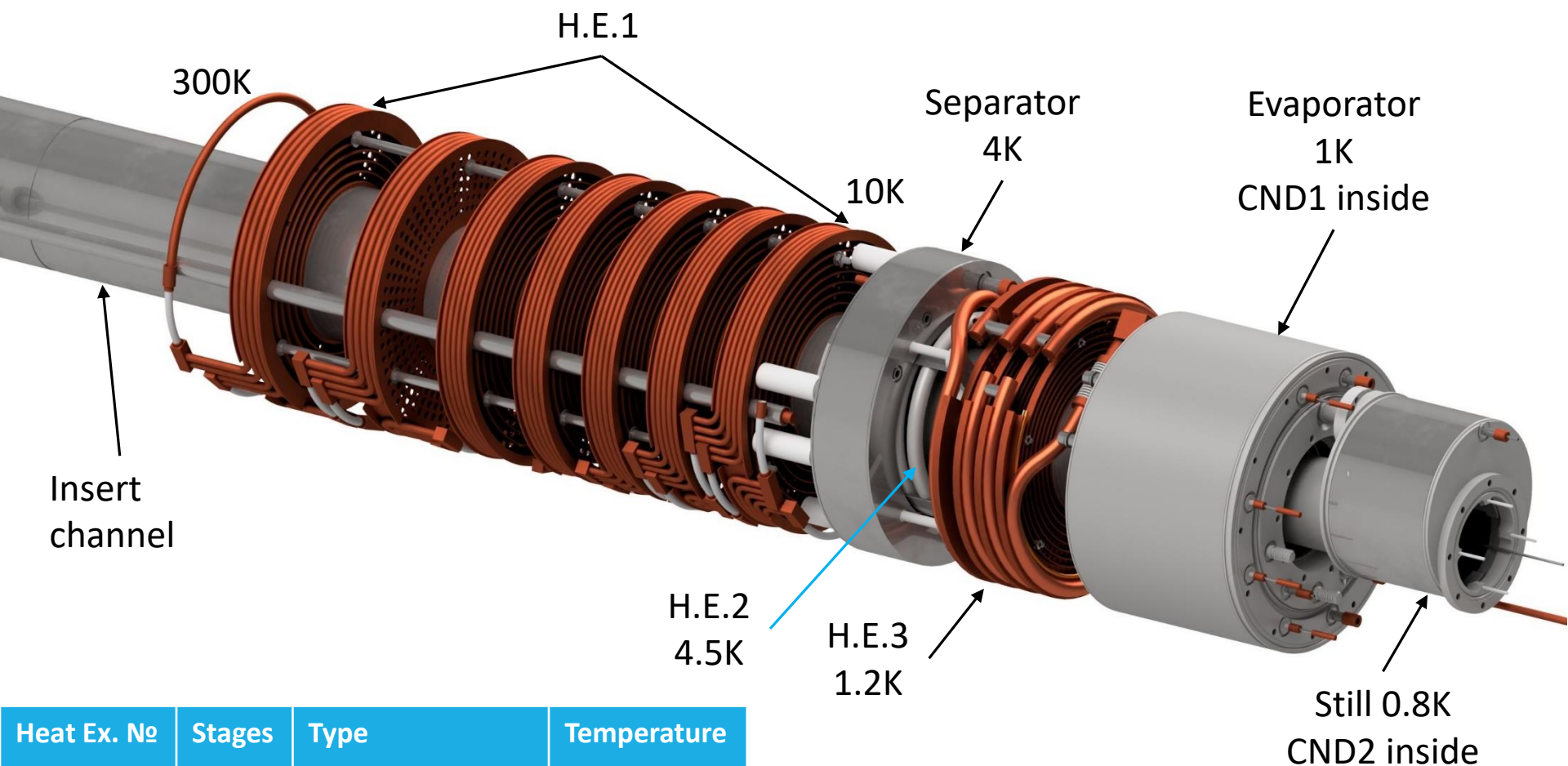


Maximum cooling power:

$$Q = 84n_3T_{mc}^2$$

# Principle of a dilution refrigerator

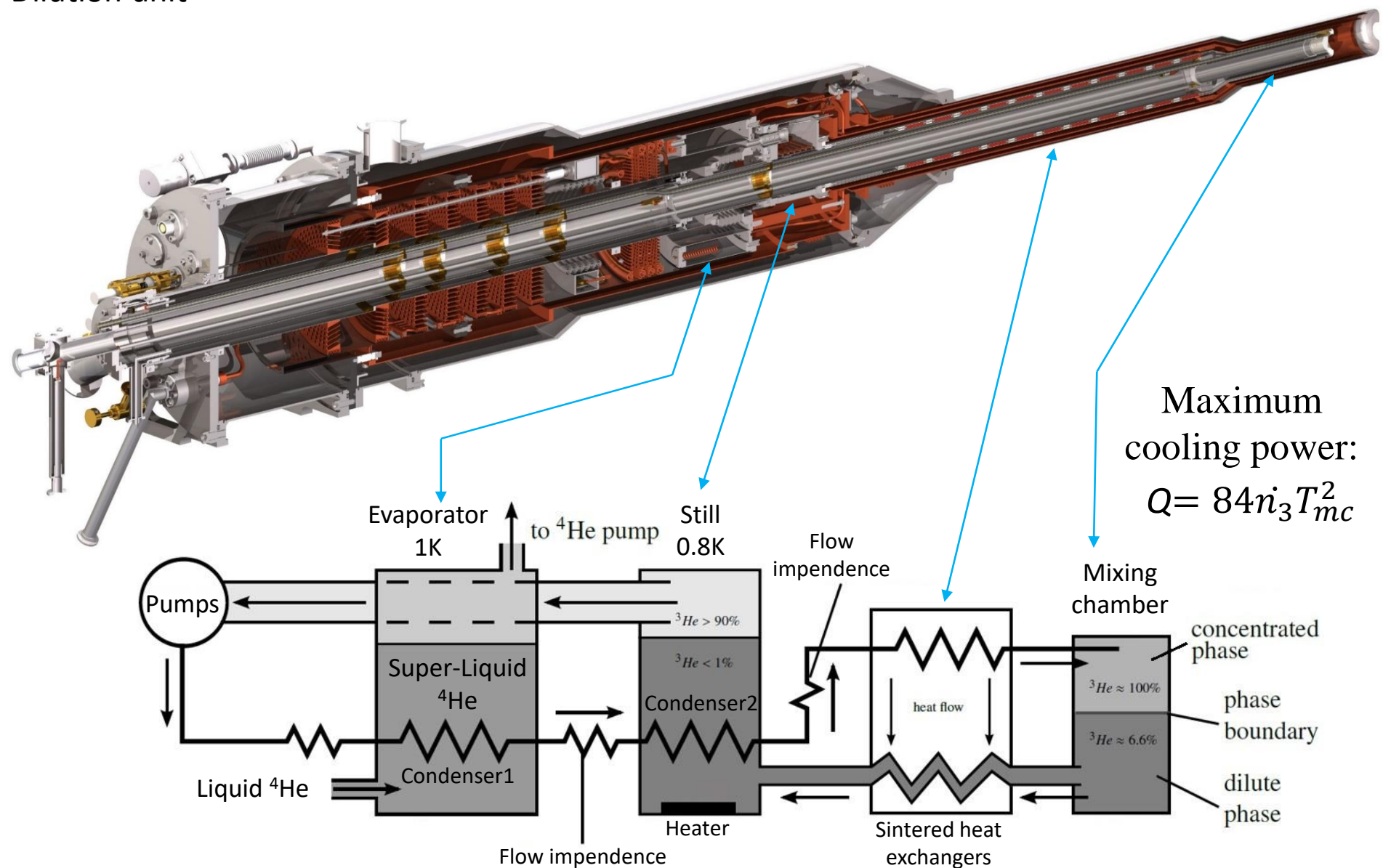
## Precooling Stages



Heat Ex. №	Stages	Type	Temperature
H.E. 1	7	Radial	300K - 10K
H.E. 2	1	Tube(1-7) in Tube	10K – 4.5K
H.E. 3	4	Radial	4.5K – 1.2 K

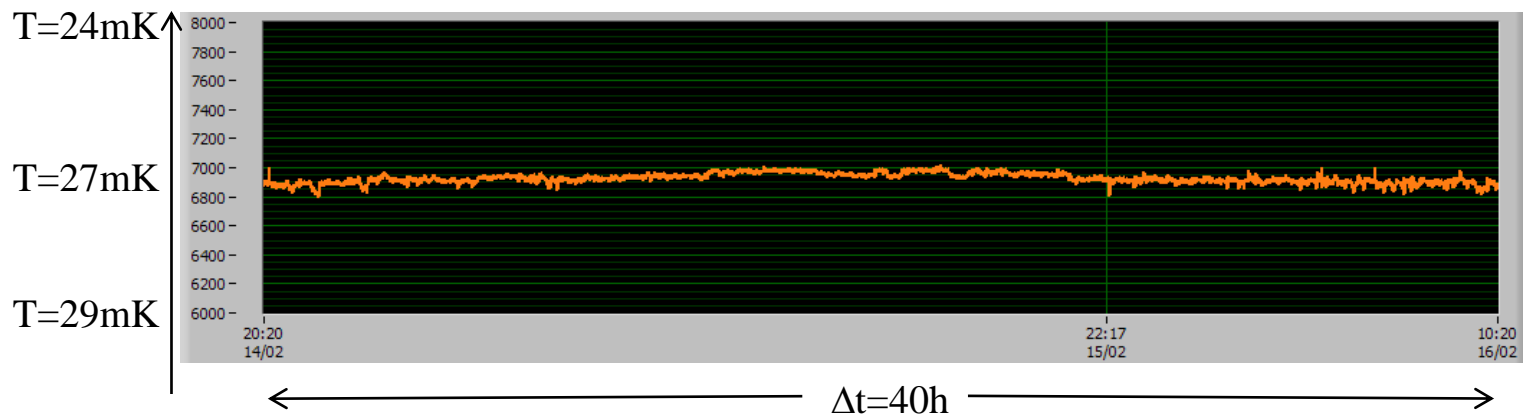
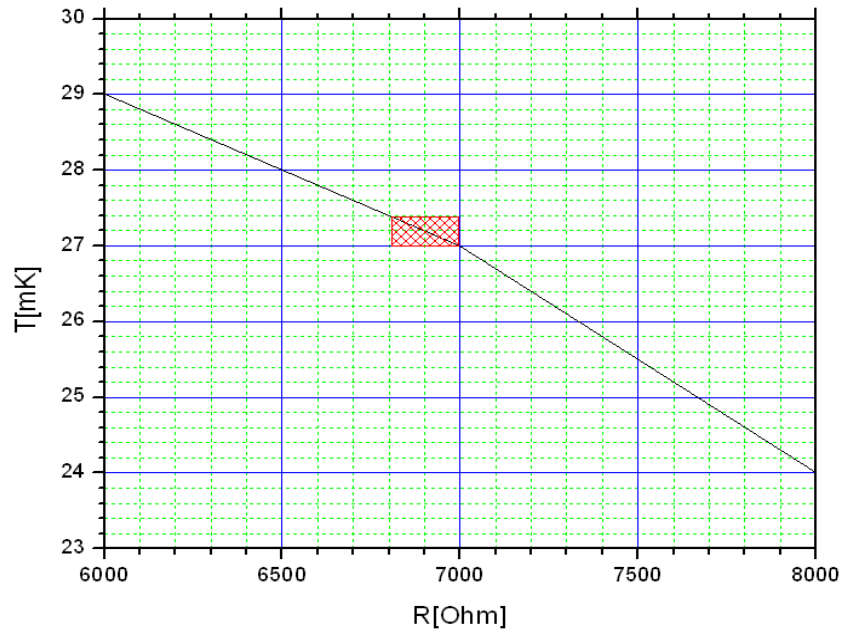
# Principle of a dilution refrigerator

## Dilution unit



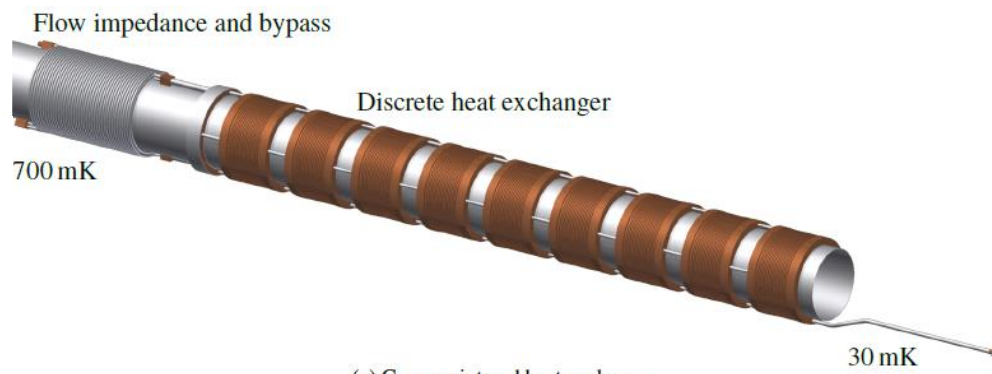
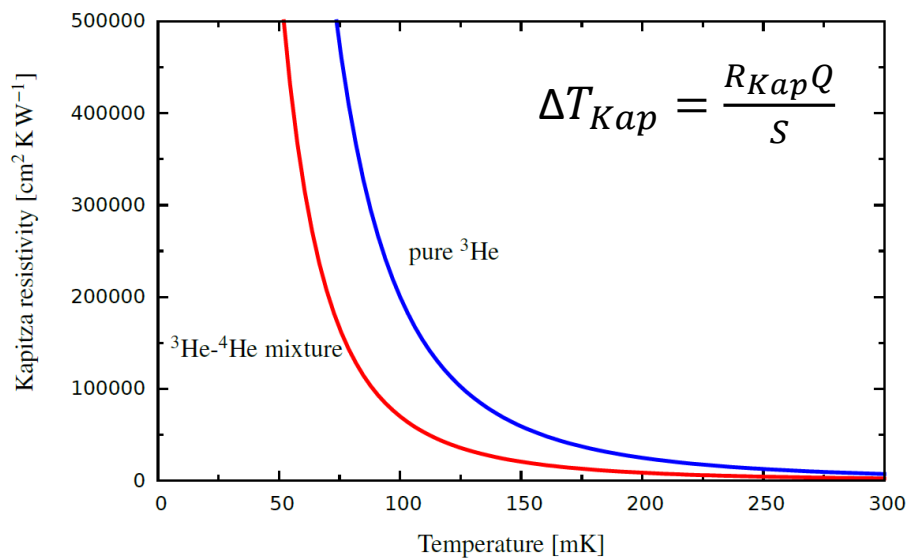
# Temperature stability

Temperature stability:  
 $\Delta T \sim \pm 0.2 \text{mK}$  (one day)  
(typical one week measurement period).

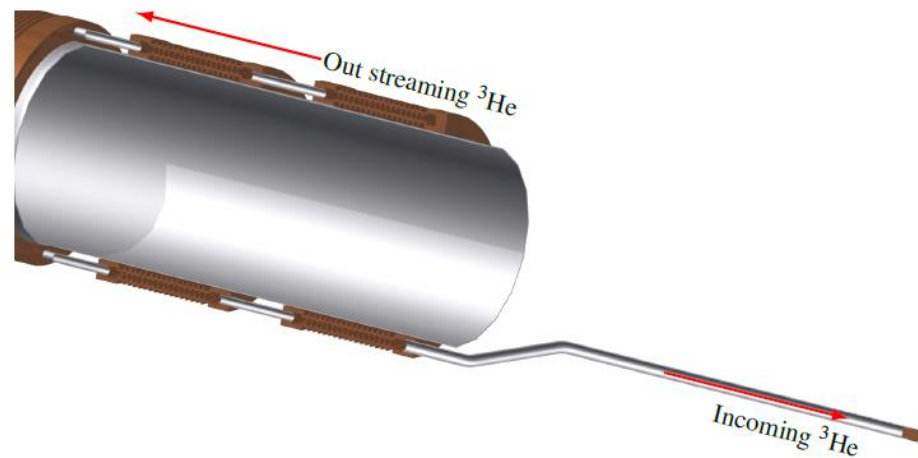


# Dilution Unit

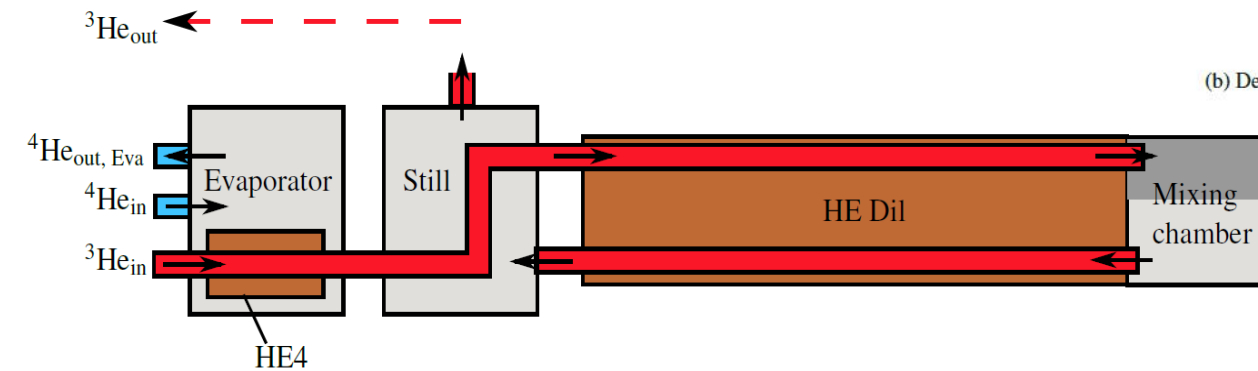
## Kapitza resistance (Interfacial thermal resistance)



(a) Copper sintered heat exchanger



(b) Detailed view of the dilution heat exchanger

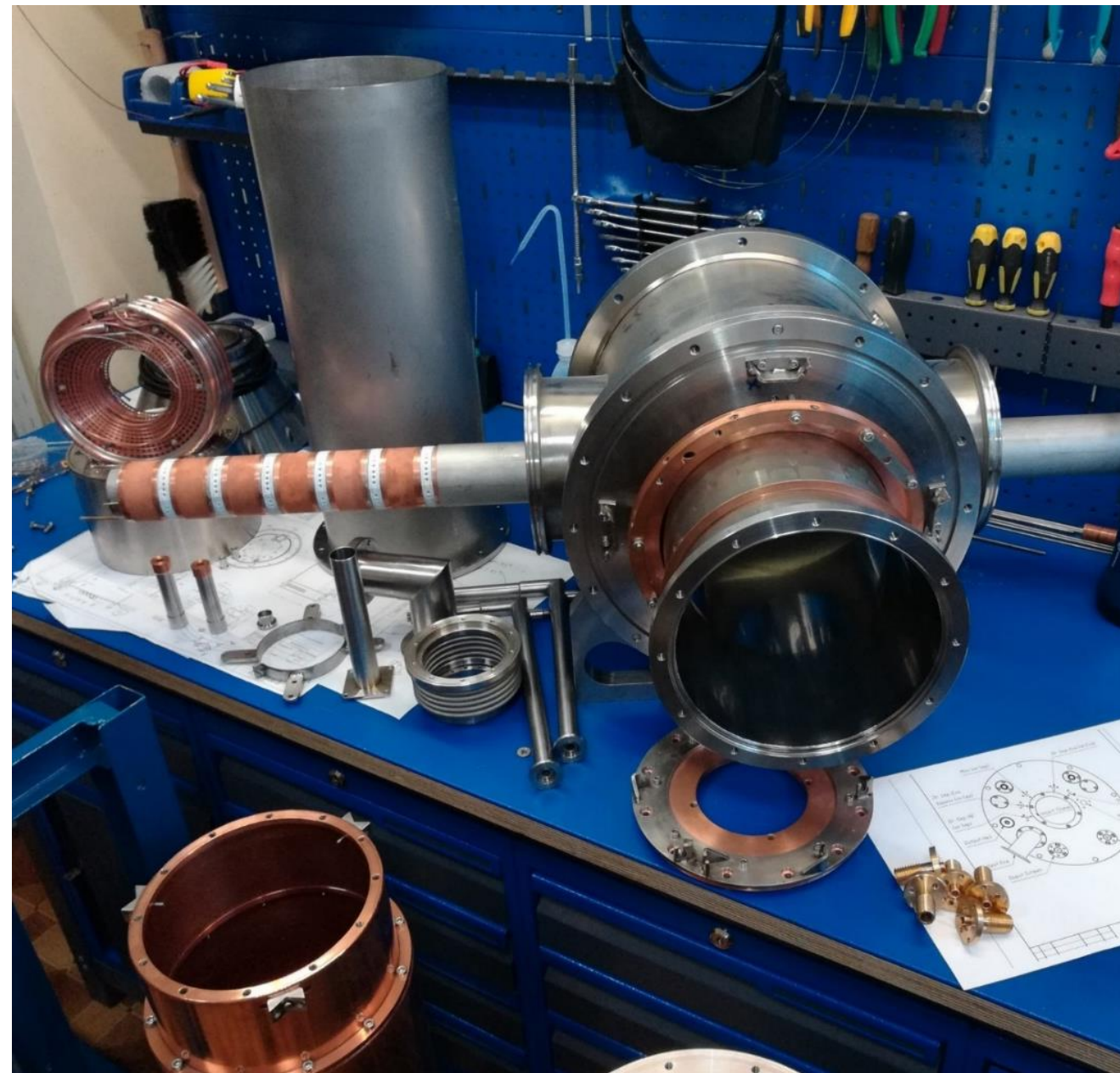


# Technical realisation of Bonn dilution cryostat





# Technical realisation of Bonn dilution cryostat

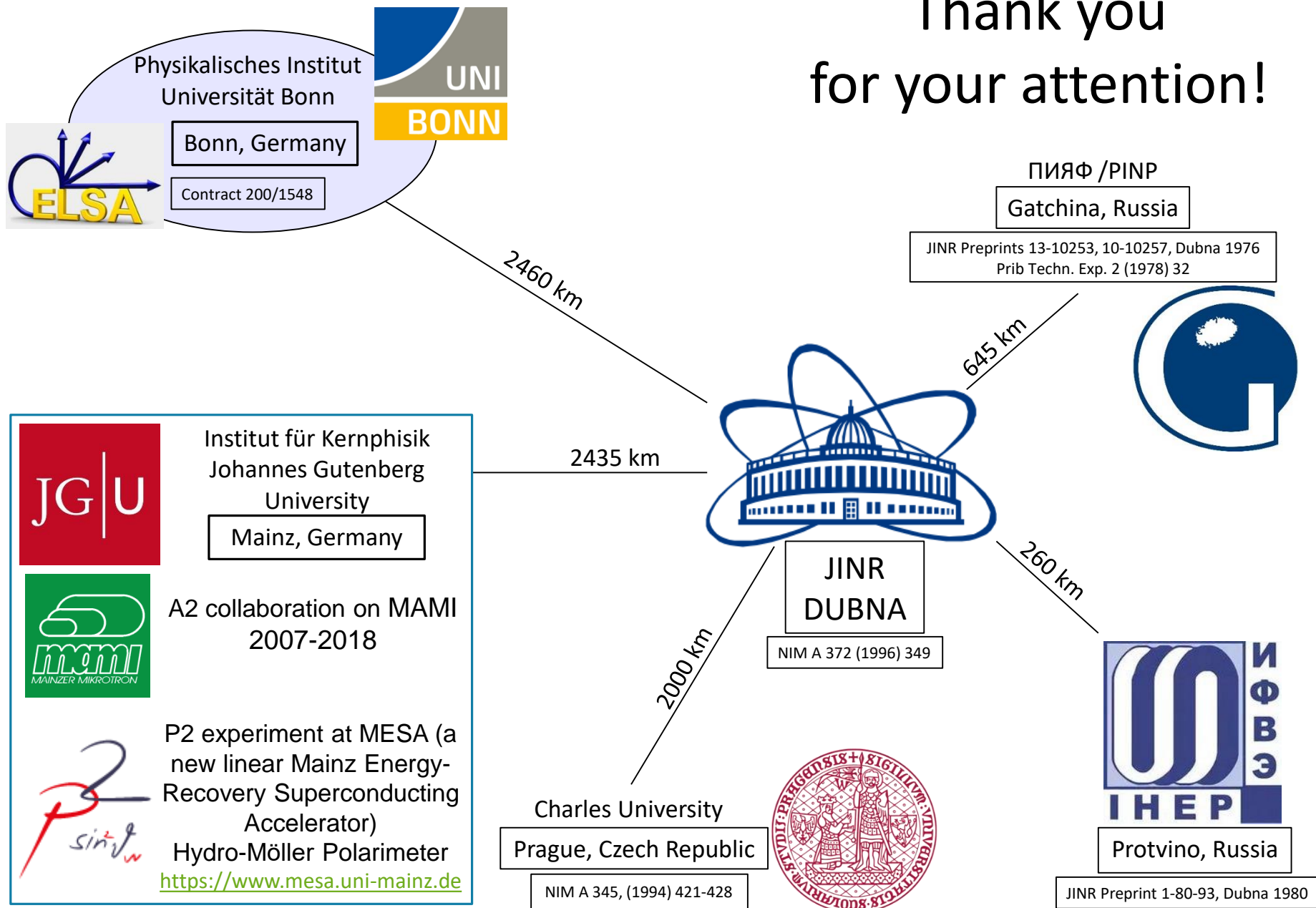


## Технических характеристики нового криостата

для поляризационной программы Боннского университета:

- Температура образца  $< 30$  мК, в длительном режиме.
- Холодопроизводительность на температурном уровне  $300$  мК  $> 30$  мВт при циркуляции  $^3\text{He}$   $\sim 10$  ммоль/с.
- Температура удерживающей катушки  $\sim 1.3$  К, при токе  $50-100$  А.
- Потребление жидкого  $^4\text{He}$   $< 4$  л/ч.
- Размеры образца:  $L=20$  мм,  $\varnothing=20$  мм
- Температура 1К ванны  $\sim 1.2$  К, Температура сепаратора  $\sim 4$  К.
- Углы разлёта вторичных частиц:  $0^\circ \gg \theta > 160^\circ$ .

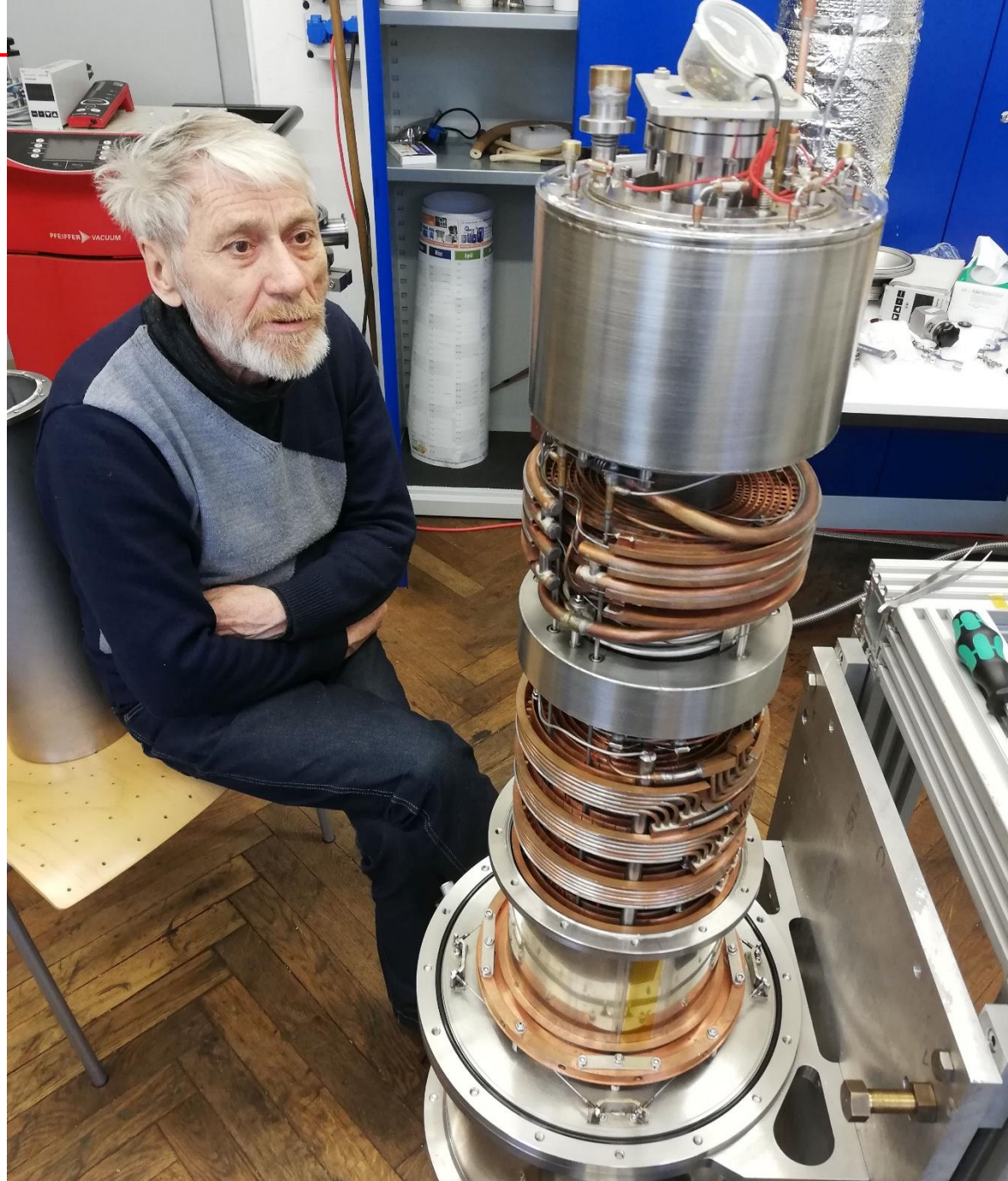
# Thank you for your attention!

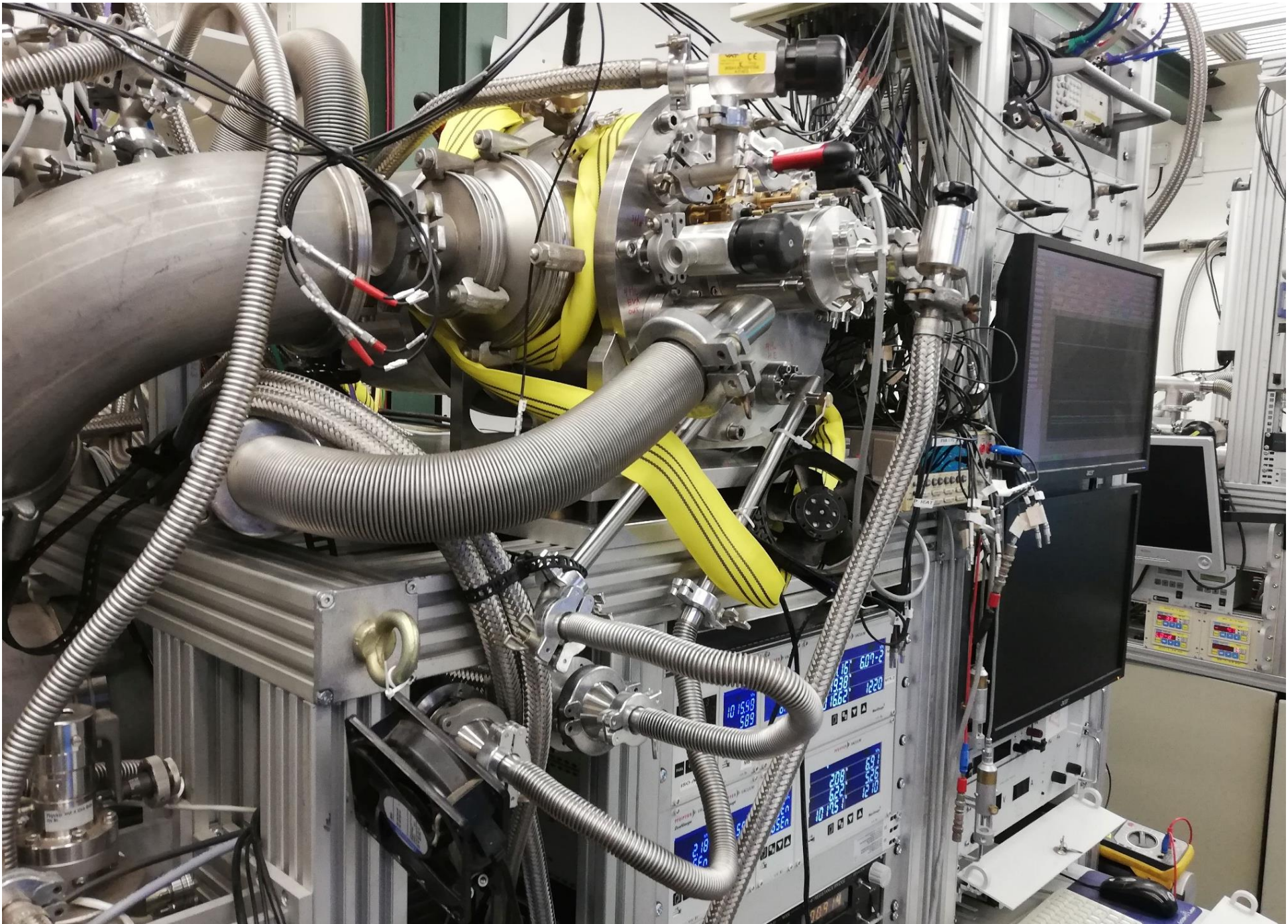


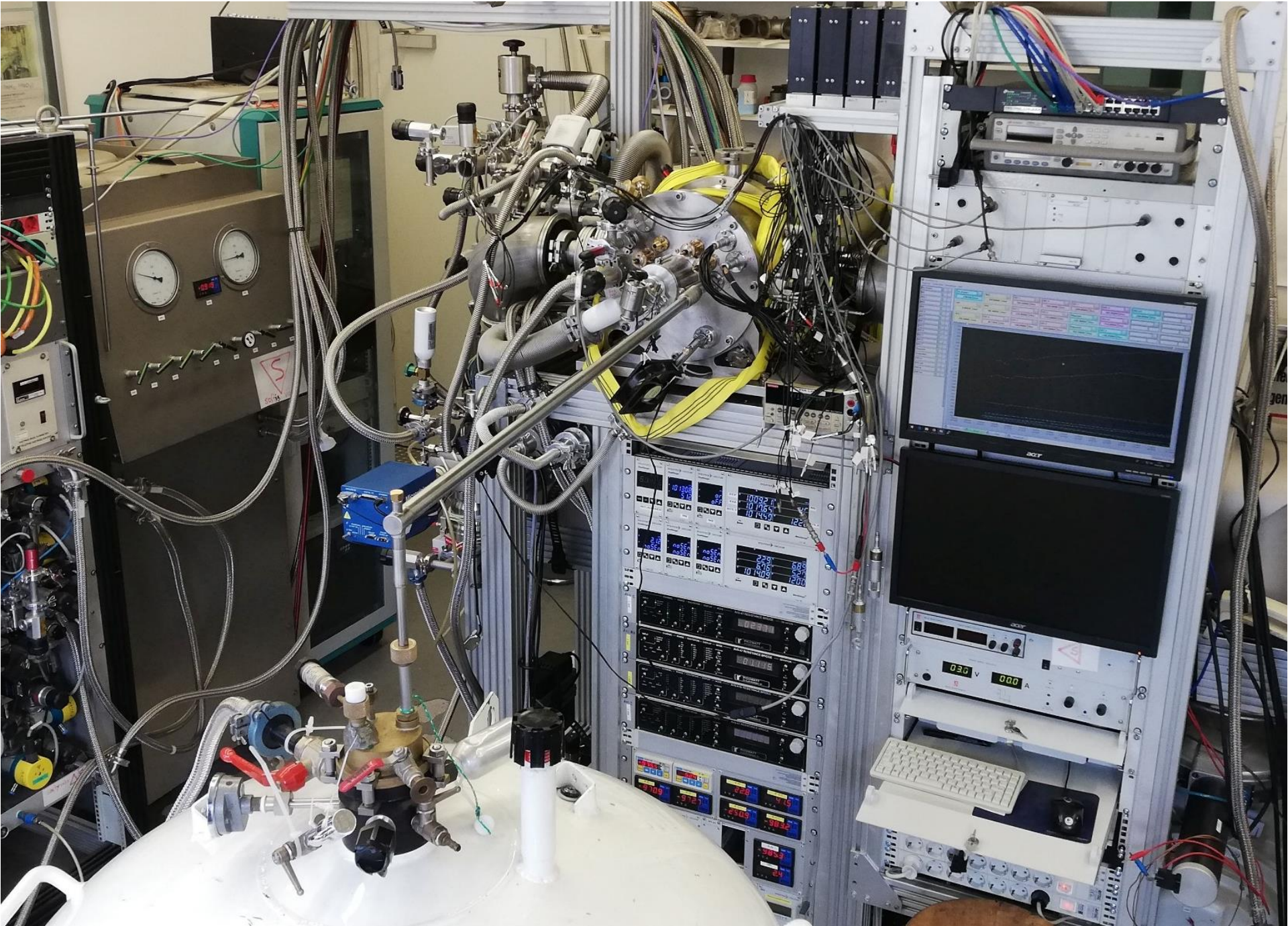
# Frozen Spin polarized Target on MAMI C ( Mainz) - 2010

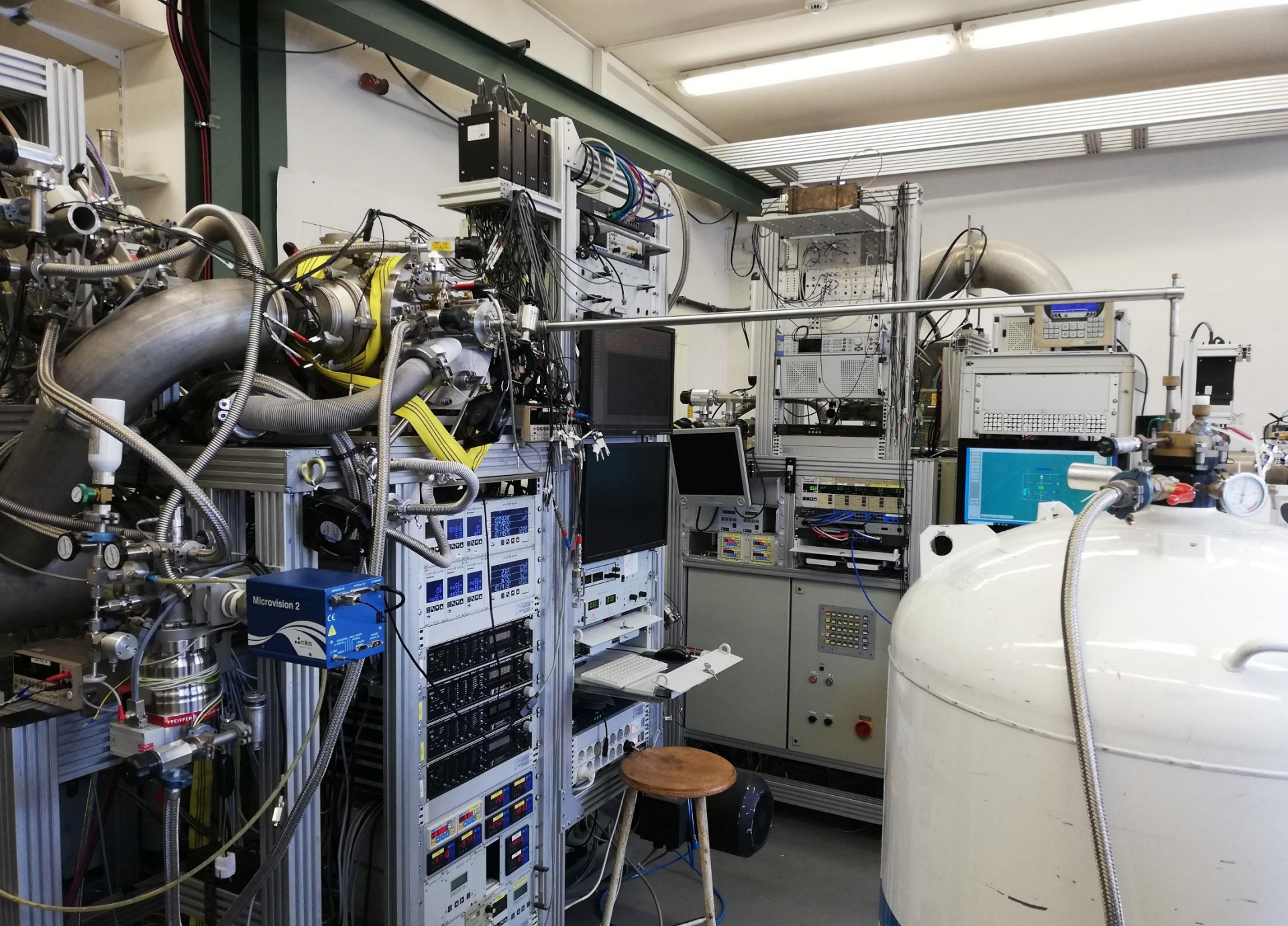


А.Б. Неганов  
на сборке  
нового  
криостата в  
г.Бонн (2020).

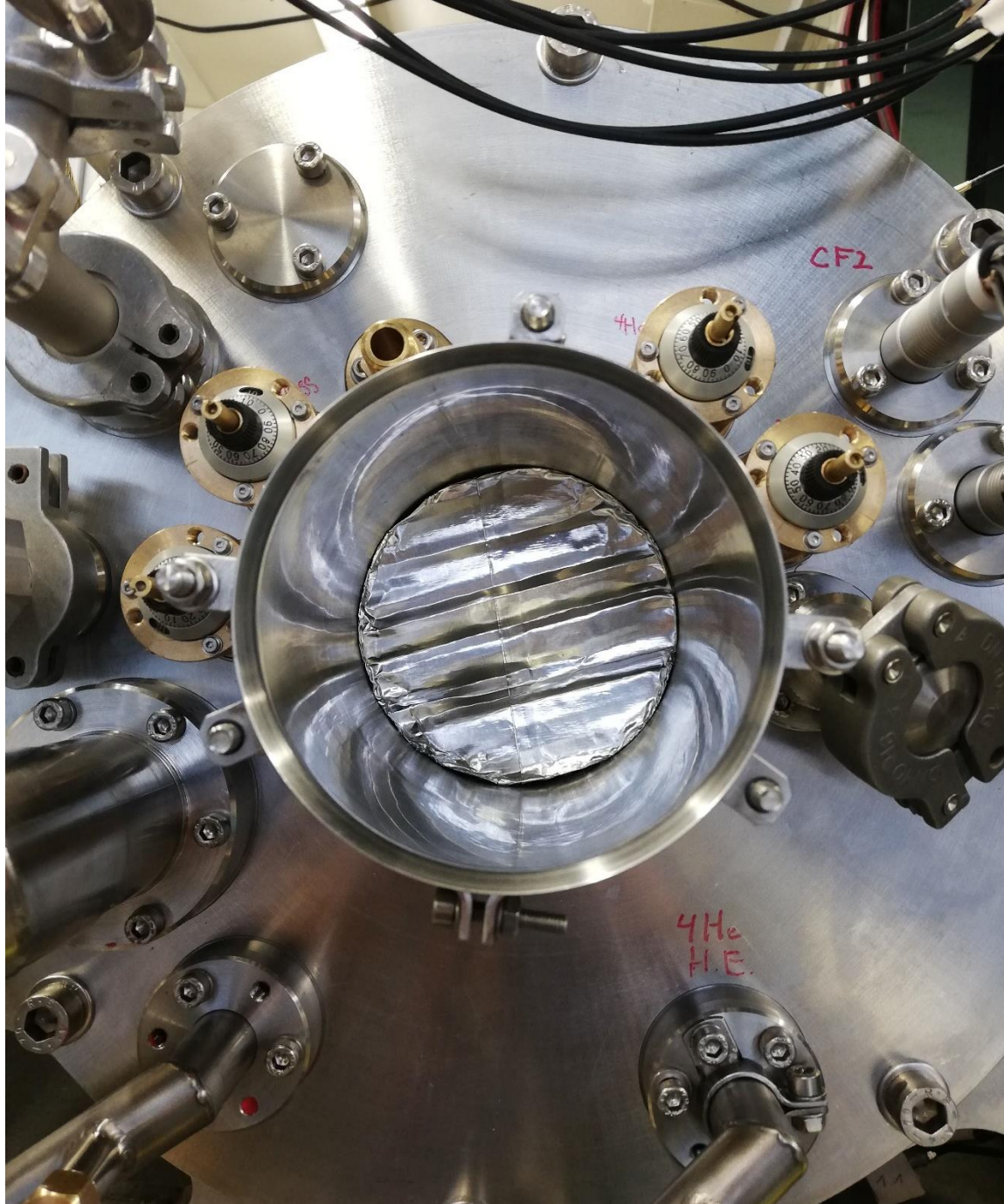




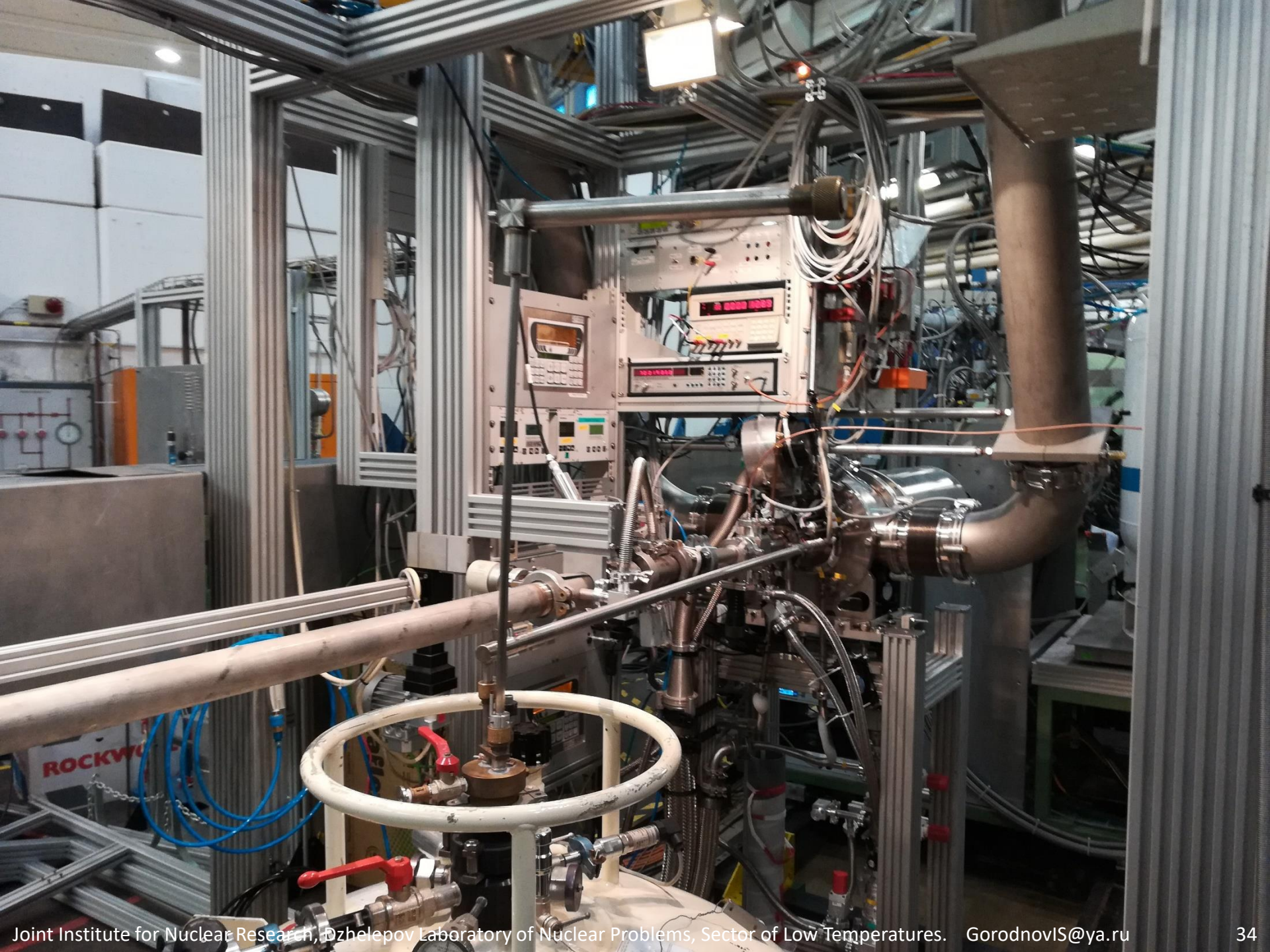


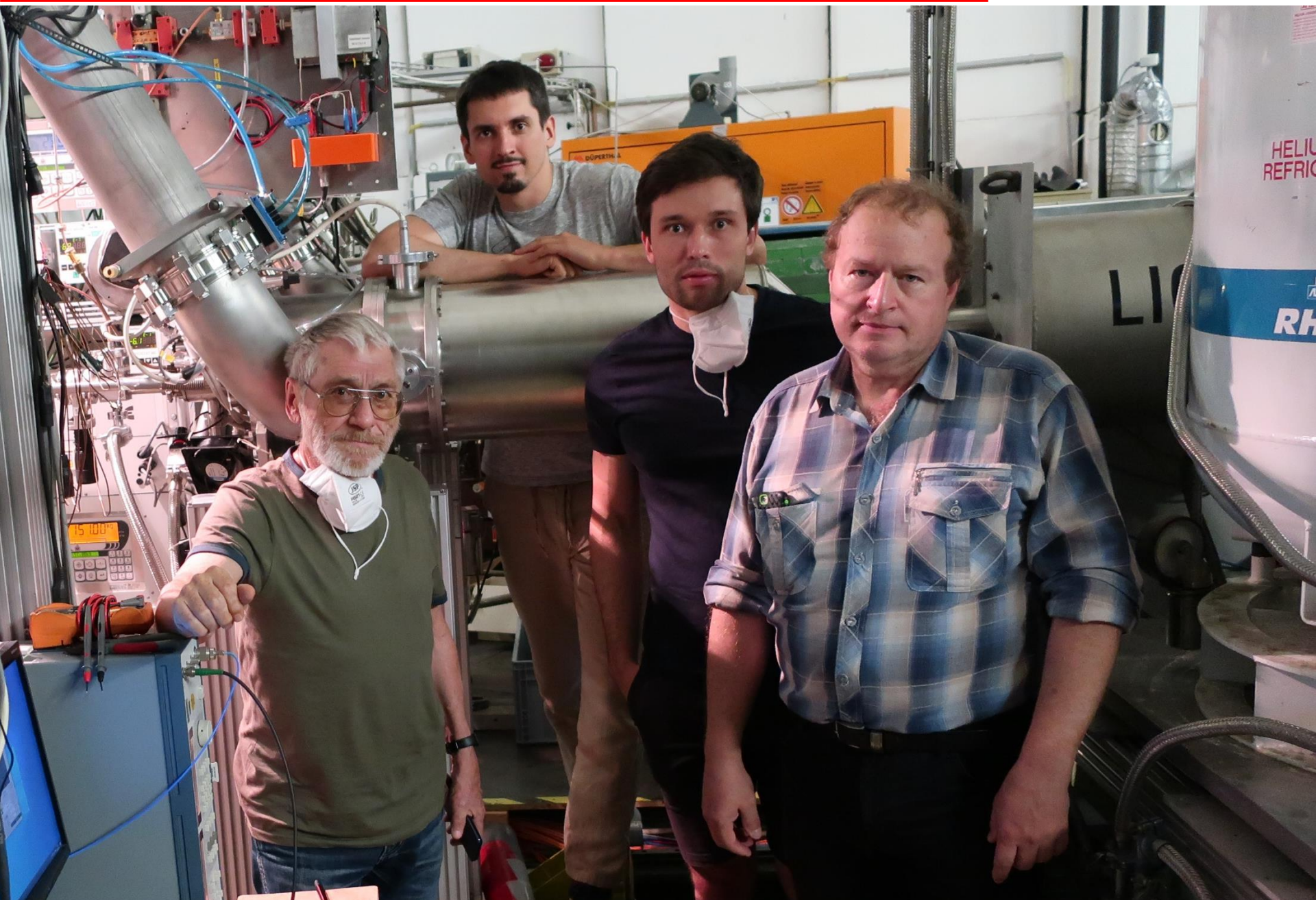




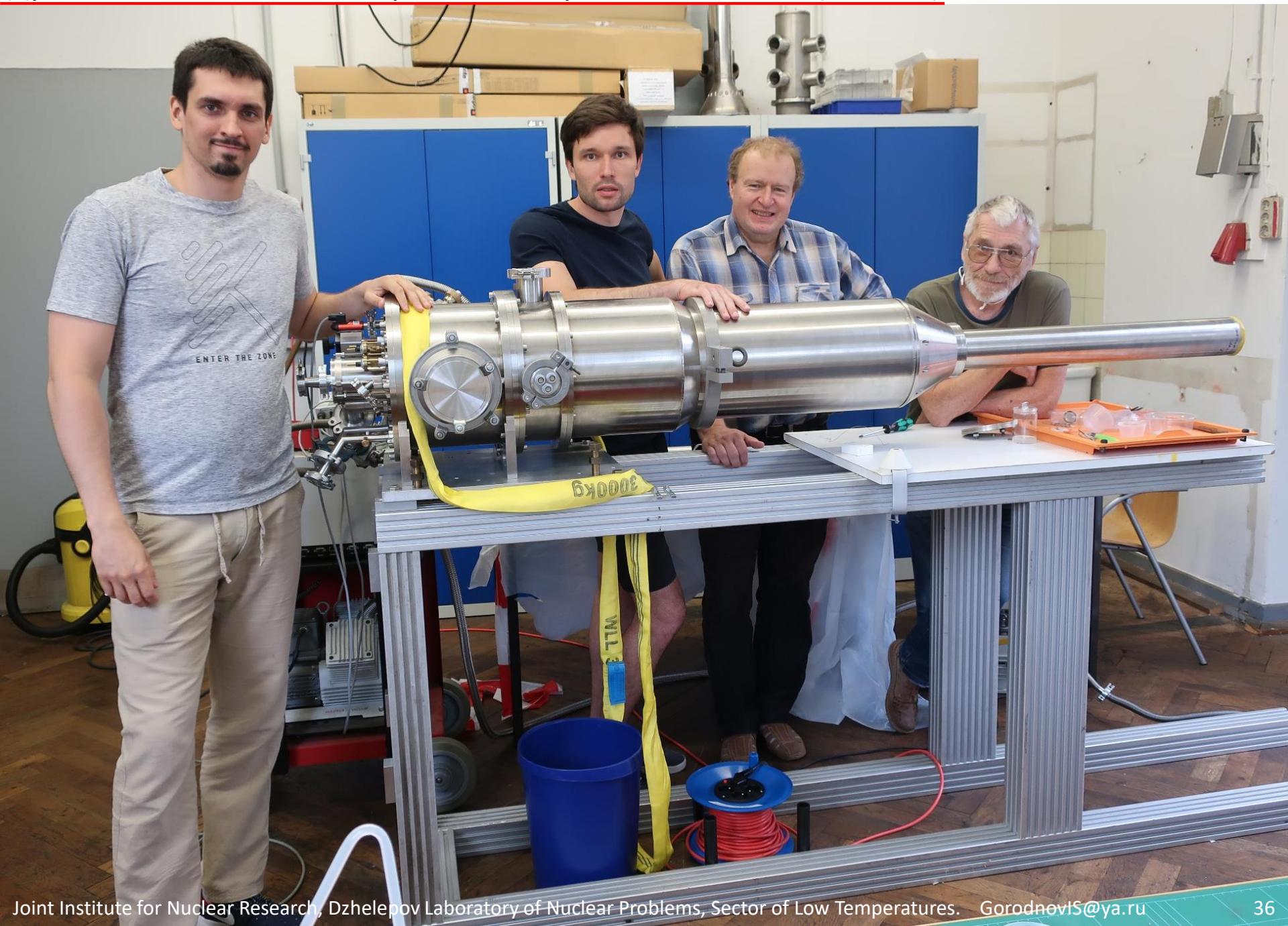








# Дубненская команда на сборке нового криостата в г. Бонн (05.2021)





Elektronen-Stretcher-Anlage (ELSA)

Hadronenphysik Experiment

Stretchen 8.9-12.0

Схематичное расположение элементов экспериментальных установок на новом ускорителе MESA в г. Майнц (Германия).

Double Mott Polarimeter at 0.100 MeV

Mott Polarimeter at 5.0 MeV

**Hydro-Möller  
Polarimeter  
at 155.0 MeV  
accuracy < 0.14%**

P2 detector  
( $10^{11}$  1/s)

**150  $\mu$ A eBeam,  
polarization  $\sim$ 85 %**

Используется недавно созданная технология ускорителя Energy-Recovery-Linac (ERL), которая обеспечивает очень высокую светимость электронного пучка на внутренних мишенях при низких энергиях.

Коллаборация P2 нацелена на высокоточное измерение асимметрии с нарушением четности, в упругом рассеянии поляризованных электронов на неполяризованных ядрах. Ожидаемые данные будут интерпретированы как определение угла смешивания слабого взаимодействия, одного из фундаментальных параметров Стандартной модели, с точностью, сравнимой с измерениями на LEP (Большой электрон-позитронный коллайдер) или LHC (Большой адронный коллайдер).

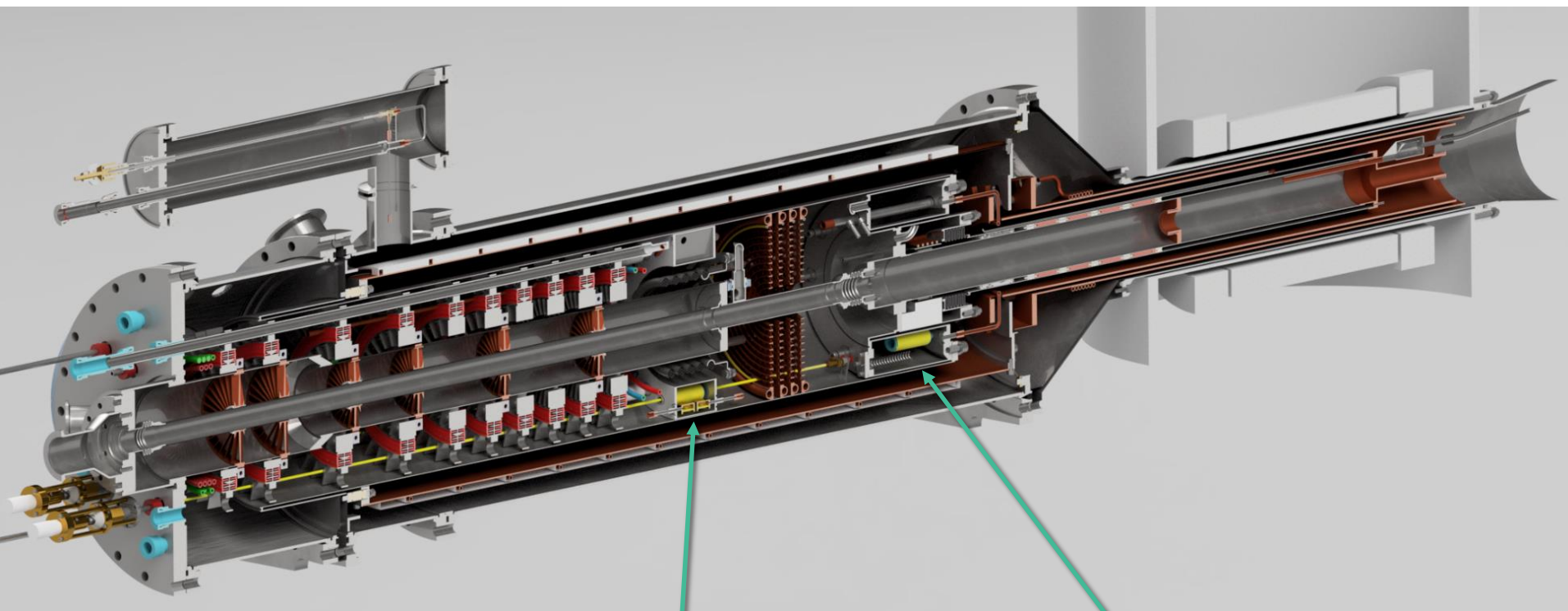
Криостат растворения создаётся как часть высокоточного Online-поляриметра мощного (155.0 MeV, 150  $\mu$ A) поляризованного электронного пучка.

Камера смещения окружает ячейку с диссоциированным водородом. Для удержания водорода в ячейке (по оси пучка) используется мощное магнитное поле 8 Тл.

Стенки ячейки покрыты тонким слоем сверхтекучего  $^4\text{He}$ , не позволявшего водороду сконденсироваться или десублимироваться на поверхности ячейки.



Поперечное сечение модели нового поляриметра Hydro Moeller на основе рефрижератора растворения для эксперимента P2 на новом ускорителе MESA в г. Майнц (Германия).



**LHe сепаратор  
(3.8-4.2 K).**

**LHe испаритель  
(~1 K).**

## Технических характеристики нового криостата

Для прецизионного поляриметра Hydro Möller (строящийся ускоритель MESA):

- Температура миксера 250-300 мК, в длительном режиме.
- Холодопроизводительность на температурном уровне 300 мК 45-60 мВт при циркуляции  $^3\text{He} \sim 60$  ммоль/с.
- Удерживающее поле 8 Тл, однородность поля  $\Delta B/B < 10^{-4}$
- Потребление жидкого  $^4\text{He} < 8$  л/ч.
- Размеры водородной ячейки:  $L=400$  мм,  $\varnothing=49$  мм. На стенках ячейки плёнка сверхтекучего  $^4\text{He} \sim 50$  нм.
- Температура испарителя  $\sim 1.2$  К, Температура сепаратора  $\sim 4$  К.
- Углы разлёта вторичных частиц:  $0^\circ \gg \theta > 30^\circ$ .

В общем случае явление рассеяния энергии на границе раздела материалов, из-за различий электронных и колебательных свойств, принято называть **Межфазное тепловое сопротивление** или **сопротивление Капицы** (впервые измерено П. Капицей в 1941г. в жидком  $^4\text{He}$ ).

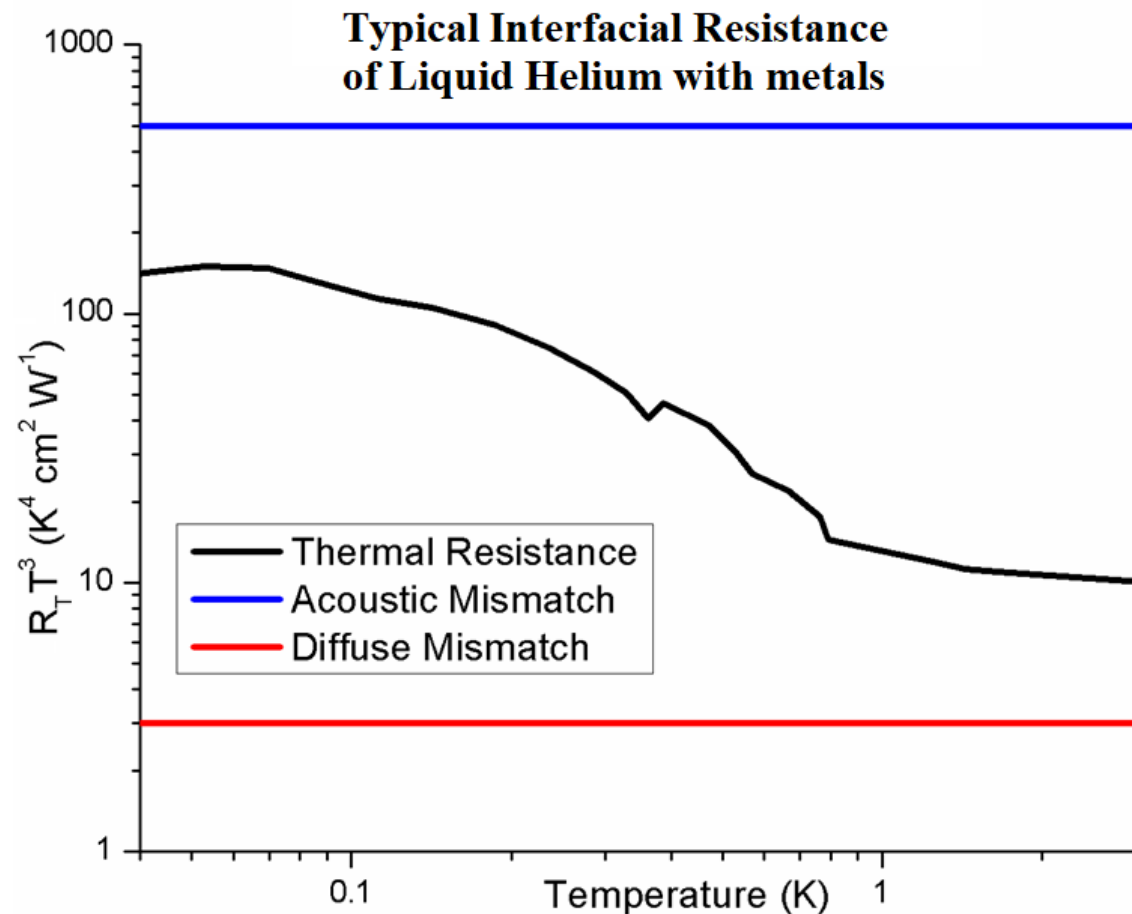
Стоит отметить, что межфазное тепловое сопротивление существует не только при низких температурах. Например явление учитывается при разработке микроэлектронных полупроводниковых устройств, и реактивных турбин. Существуют две основные модели, которые используются для понимания теплового сопротивления границ раздела:

модель акустического несоответствия (АММ) и модели диффузного несоответствия (DMM).

Обе модели основаны только на фононном переносе без учета вклада переноса энергии электронами.

Фонон – квазичастица, квант колебательного движения атомов кристалла.

Ни одна из моделей не является универсально эффективной для прогнозирования сопротивления теплового интерфейса, но для большинства материалов они действуют как верхний и нижний пределы реального поведения.



Обе модели сильно различаются по трактовке рассеяния на границе раздела.

В АММ граница считается идеальной, что приводит к отсутствию рассеяния, поэтому фононы упруго распространяются через границу.

В DMM предполагается противоположная крайность, идеально рассеивающая граница раздела. В этом случае волновые векторы, распространяющиеся через интерфейс, случайны и не зависят от падающих на интерфейс фононов. В результате АММ обычно представляет собой верхний предел сопротивления, а DMM представляет собой нижний предел. Шероховатость поверхности, вносящая большой вклад в сопротивление, учитывается только в DMM.

В контексте криогеники скачок Капицы – физическое явление, состоящее в том, что на границе раздела любых разнородных сред (из которых, по крайней мере, одна - диэлектрик) при наличии теплового потока  $Q$  через границу сред возникает разность температур выражаемая как:

$$\Delta T = \frac{A}{T^3} Q = R(T)Q,$$

где коэффициент  $A$  зависит от упругости, находящихся в контакте веществ и от характера обработки поверхности твёрдого тела,  $R(T)$  – сопротивление Капицы.

Данное явление сильно ограничивает эффективность теплообменников при сверхнизких температурах.

# Контракт между ОИЯИ и HSKP (Боннский университет) на разработку и производство криостата раствора $^3\text{He}$ - $^4\text{He}$ (заключён в 2015г.)

## Agreement / Contract N<sub>0</sub> 40960106

between

**Joint Institute for Nuclear Research (JINR)  
Dubna, Russia**

and

**Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität (RFWU),  
Helmholtz-Institut für Strahlen- und Kernphysik (HSKP)  
Bonn, Germany**

concerning

design, production and test of an  $^3\text{He}$ - $^4\text{He}$  Dilution cryostat  
for the CBELSA/TAPS- experiment in the SFB/TR-16

### 10. Legal Addresses and Bank Requisites


Helmholtz-Institut für Strahlen- und Kernphysik (HSKP),  
Nussallee 14-16, Bonn, 53115, GERMANY.  
Tel.: 0049-228-732201, Fax: 0049-228-732205

Joint Institute for Nuclear Research (JINR),  
Joliot-Curie, 6 Dubna, Moscow Region, 141980, RUSSIA.  
Tel.: 007-09621-62287/ 63404/ 65576 Fax: 007-09621-65004


#### Bank Requisites:

**Beneficiary:** Joint Institute for nuclear Research;  
**Beneficiary's bank:** MDM Bank (OJSC), Russia, Moscow;  
**Beneficiary's account:** 40807978900140027653;  
**SWIFT:** MOBWRUMM  
**Corr. bank:** Deutsche Bank AG 12, Taunusanlage, 60262, Frankfurt/Main,  
Germany, account: 1009474149.  
**SWIFT:** DEUTDEFF


**for Rheinische Friedrich-Wilhelms Universität Bonn:** Chancellor Dr. R. Lutz

Date: 20.07.2015 Signature:   
Rheinische  
Friedrich-Wilhelms-Universität  
Dr. Ranzler  
Im Auftrag  
(Dr. Impekoven)

**for Helmholtz-Institut für Strahlen- und Kernphysik:** Prof. Dr. R. Beck,

Date: 14.7.2015 Signature:   
Prof. Dr. R. Beck  
Helmholtz-Institut für Strahlen- und  
Kernphysik der Universität Bonn  
Nussallee 14-16  
D-53115 Bonn

**for Joint Institute of Nuclear Research(JINR):** Prof. Dr. V. A. Matveev

Date: Signature: 



## История открытий жидкого гелия

1823-1845

**М. Фарадей** осуществлял ожижение  $\text{H}_2\text{SO}_3$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{C}_2\text{N}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{PH}_3$  и других в трубке при охлаждении газов под давлением в охлаждающей смеси.

1877

**Л. Кайете и Р. Пикте** независимо друг от друга разными способами впервые получили жидкий кислород.

1898

**Дж. Дьюар** впервые получил жидкий водород в цикле с эффектом Джоуля-Томпсона и регенеративным охлаждением.

1908

**Heike Kamerlingh Onnes** впервые получил жидкий  $^4\text{He}$  в цикле с эффектом Джоуля-Томпсона и регенеративным охлаждением в 6-ти ступенчатой каскадной установке. Достигнута температура 1К откачкой жидкого  $^4\text{He}$ . Впервые откачка не позволила получить твёрдую фазу вещества. Нобелевская премия по физике за 1913г.

1926

**Heike Kamerlingh Onnes** достиг температуры  $\sim 0,7\text{K}$  откачкой жидкого  $^4\text{He}$ .

1948

Получен жидкий  $^3\text{He}$ .

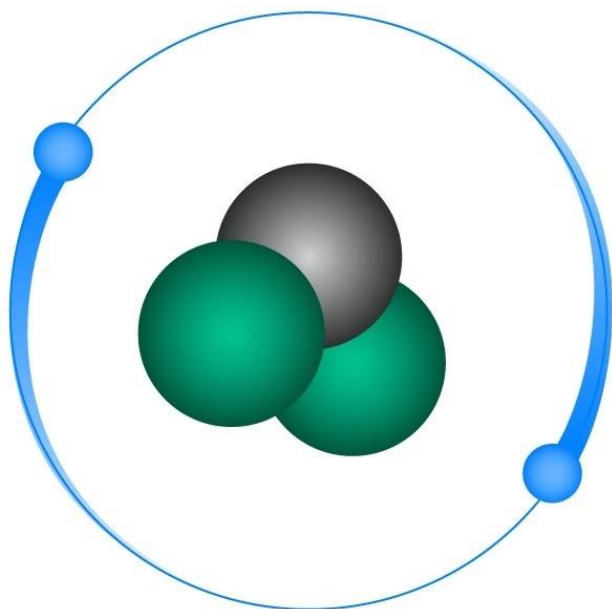
Температуры достижимые методом откачки паров жидкого  $^3\text{He}$  ограничены  $\sim 235\text{ мК}$ . Это минимальная температура, которую возможно достичь используя газовые циклы на чистых веществах.

1930 – **В. Хендрик Кеез** обнаружил фазовый переход гелий-I - гелий-II.

1938 - **П. Л. Капица** открыл сверхтекучесть гелия-II. Нобелевская премия по физике за 1978г.

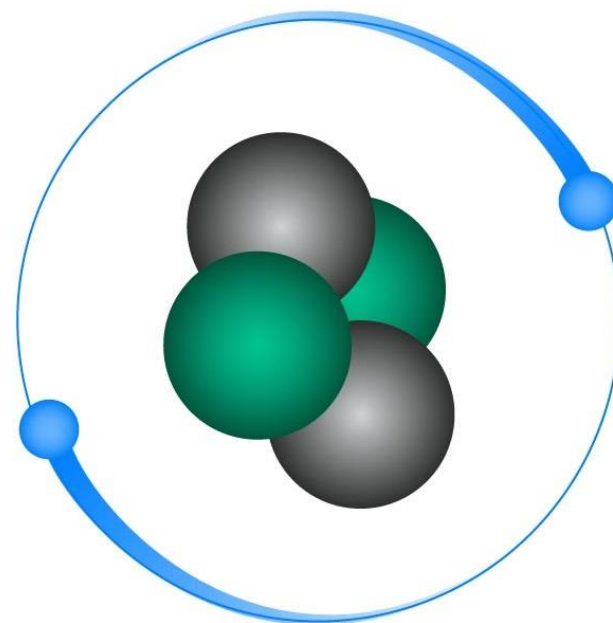
1972 – Обнаружен фазовый переход и сверхтекучесть в жидком  $^3\text{He}$ .

Более подробные технические и исторические данные по методам охлаждения Вы можете найти в книге:  
Бродянский В.М.: От твердой воды до жидкого гелия (история холода).



## Helium-3

2 protons, 1 neutron



## Helium-4

2 protons, 2 neutrons

Изотоп	N(n)	а.е.м.	Спин и чётность	Тип частицы	Изотопная распространённость в атмосфере Земли
$^3\text{He}$	1	3,0160	$\frac{1}{2}^+$	Фермион	0.000137
$^4\text{He}$	2	4,0026	$0^+$	Бозон	99.999863

# Таблица нуклидов (карта изотопов)

$p \rightarrow$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
$n \downarrow$	<u>H</u> ↓	<u>He</u> ↓	<u>Li</u> ↓											
0	<sup>1</sup> H	<sup>2</sup> He	<sup>3</sup> Li	<u>Be</u> ↓	<u>B</u> ↓									
1	<sup>2</sup> D	<sup>3</sup> He	<sup>4</sup> Li	<sup>5</sup> Be	<sup>6</sup> B	<u>C</u> ↓								
2	<sup>3</sup> T	<sup>4</sup> He	<sup>5</sup> Li	<sup>6</sup> Be	<sup>7</sup> B	<sup>8</sup> C	<u>N</u> ↓							
3	<sup>4</sup> H	<sup>5</sup> He	<sup>6</sup> Li	<sup>7</sup> Be	<sup>8</sup> B	<sup>9</sup> C	<sup>10</sup> N	<u>O</u> ↓						
4	<sup>5</sup> H	<sup>6</sup> He	<sup>7</sup> Li	<sup>8</sup> Be	<sup>9</sup> B	<sup>10</sup> C	<sup>11</sup> N	<sup>12</sup> O	<u>F</u> ↓					
5	<sup>6</sup> H	<sup>7</sup> He	<sup>8</sup> Li	<sup>9</sup> Be	<sup>10</sup> B	<sup>11</sup> C	<sup>12</sup> N	<sup>13</sup> O	<sup>14</sup> F	<u>Ne</u> ↓				
6	<sup>7</sup> H	<sup>8</sup> He	<sup>9</sup> Li	<sup>10</sup> Be	<sup>11</sup> B	<sup>12</sup> C	<sup>13</sup> N	<sup>14</sup> O	<sup>15</sup> F	<sup>16</sup> Ne	<u>Na</u> ↓	<u>Mg</u> ↓		
7		<sup>9</sup> He	<sup>10</sup> Li	<sup>11</sup> Be	<sup>12</sup> B	<sup>13</sup> C	<sup>14</sup> N	<sup>15</sup> O	<sup>16</sup> F	<sup>17</sup> Ne	<sup>18</sup> Na	<sup>19</sup> Mg	<u>Al</u> ↓	<u>Si</u> ↓
8		<sup>10</sup> He	<sup>11</sup> Li	<sup>12</sup> Be	<sup>13</sup> B	<sup>14</sup> C	<sup>15</sup> N	<sup>16</sup> O	<sup>17</sup> F	<sup>18</sup> Ne	<sup>19</sup> Na	<sup>20</sup> Mg	<sup>21</sup> Al	<sup>22</sup> Si

Стабильный изотоп  
 10—10 000 лет  
 10—100 дней  
 Нестабильный изотоп (<1сут.)



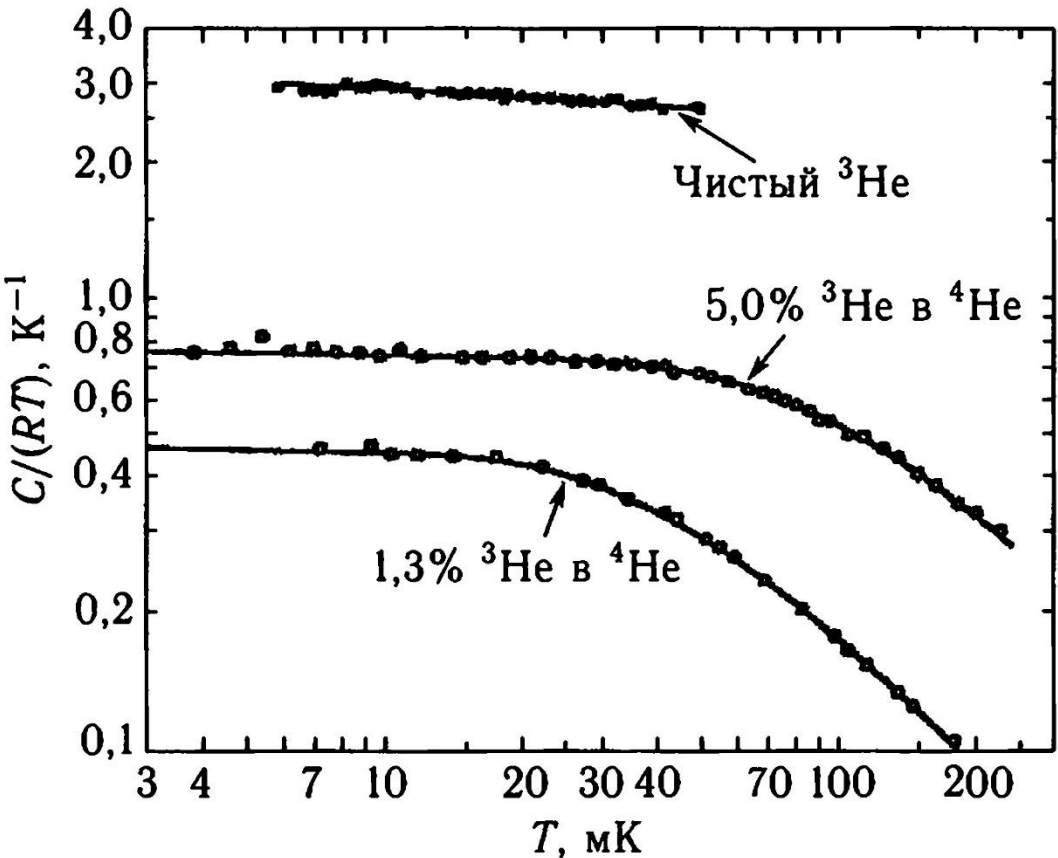
Преимущество процесса растворения  $^3\text{He}$  в  $^4\text{He}$  над испарением из чистого  $^3\text{He}$  очевидно: например, при  $T = 0,28 \text{ K}$  давление паров  $^3\text{He}$  около  $10^{-5} \text{ Па}$ , в то время как осмотическое давление между концентрированной и обедненной фазами составляет порядка  $1 \text{ кПа}$  при  $T \rightarrow 0$ . Таким образом, всегда можно создать поток атомов  $^3\text{He}$  из концентрированной (верхней) фазы к обедненной.

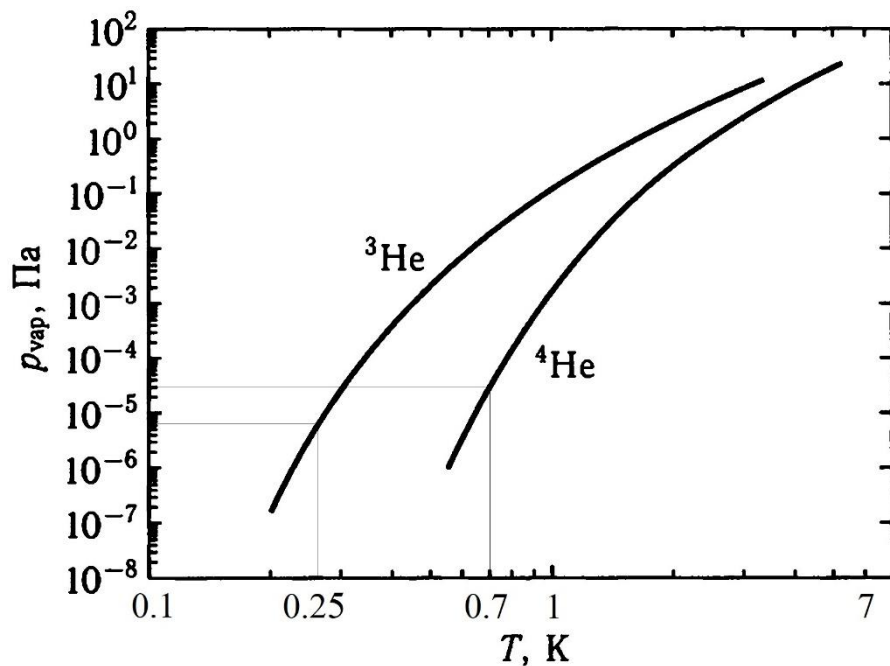
$$H_{(mix)} = \Delta H_{mix} + \sum x_i H_i$$

$$C_p \equiv \left( \frac{\partial H}{\partial T} \right)_P,$$

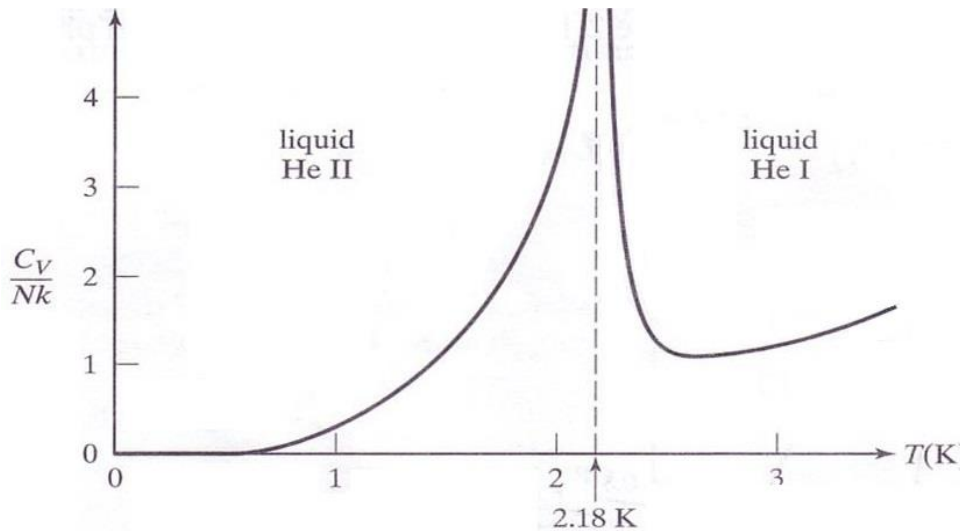
или при локально неизменной  $C_p$

$$\Delta H = C_p \times \Delta T$$





Давление паров жидких  $^3\text{He}$  и  $^4\text{He}$ . Линии на графиках соответствует наименьшей достигнутой  $T$ .

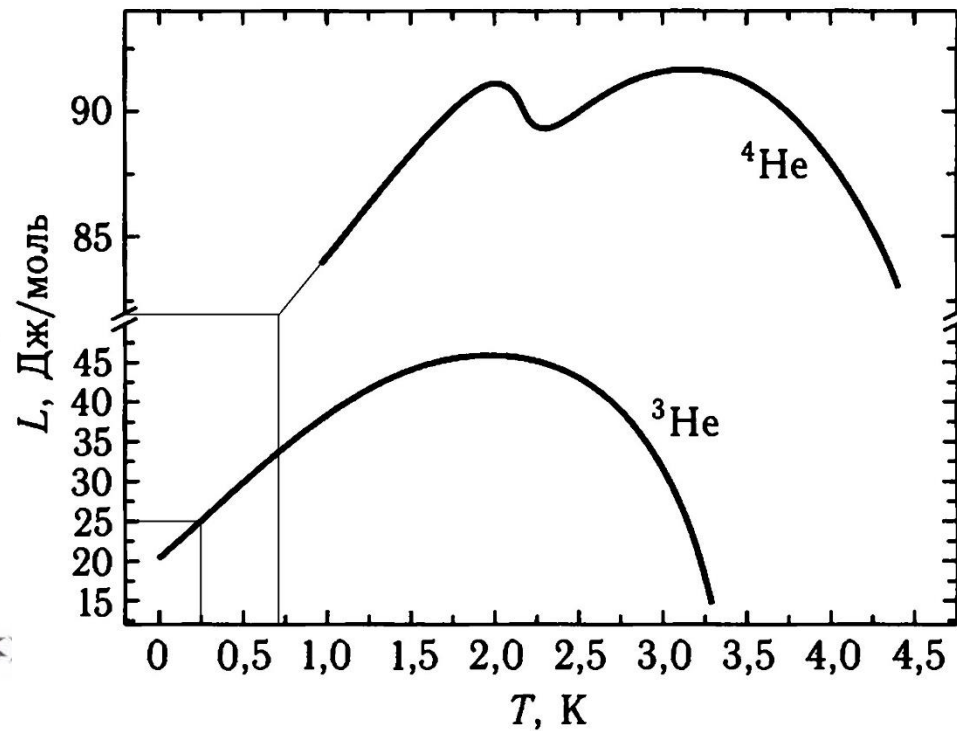


При низких температурах молярные объёмы  $^3\text{He}$  и  $^4\text{He}$  пренебрежимо малы по сравнению с молярными объёмами паров, которые приблизительно подчиняются законам, справедливым для идеального газа. Уравнение Клайперона-Клаузиуса для паров гелия можно записать в виде: где  $R$  – газовая постоянная.

$$\frac{dP_v}{dT} = \frac{L(T)P_v}{RT^2}$$

Упрощённо полагая  $L(T) \approx L(0) = \text{const}$ , тогда интегрируя уравнение, получаем

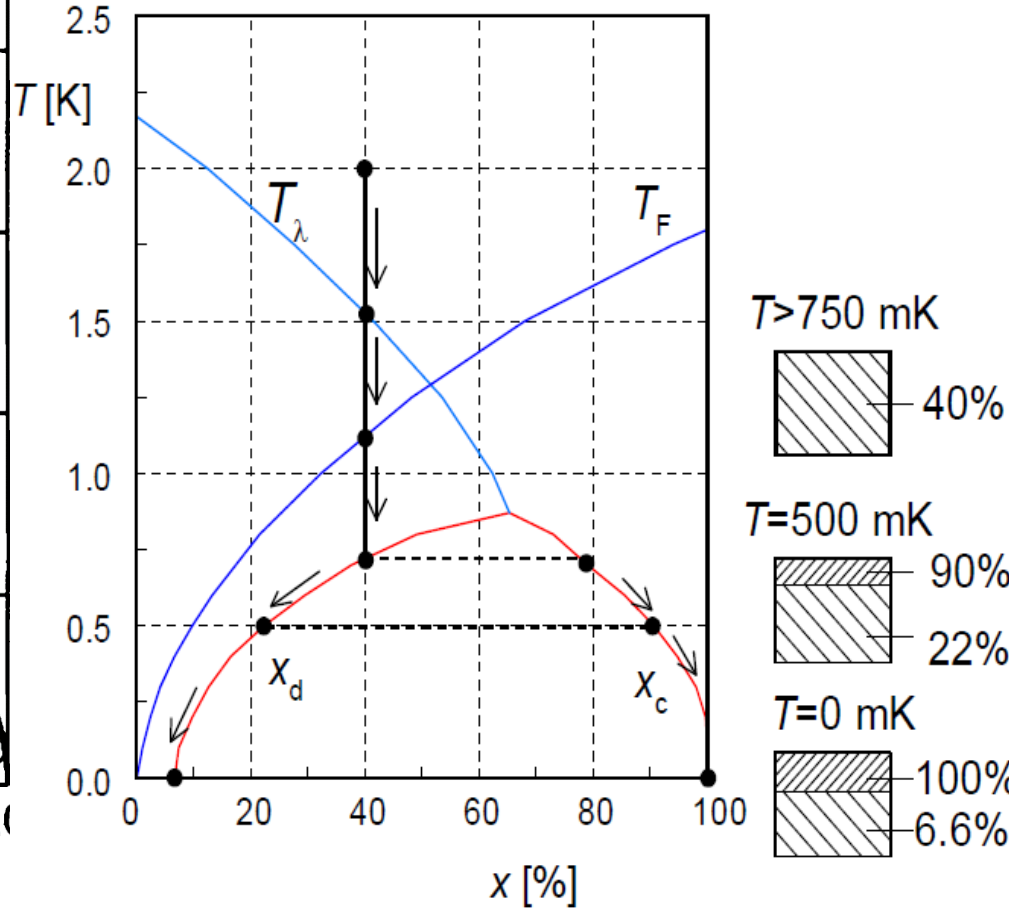
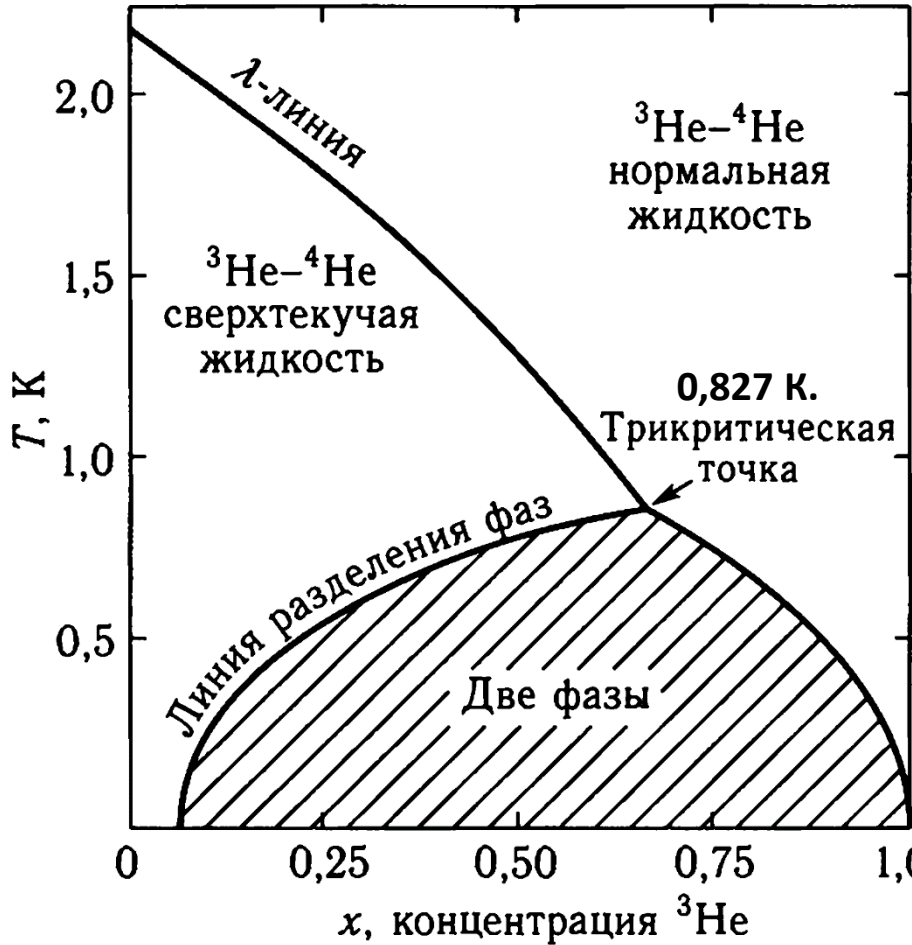
$$P_v \propto \exp(-L(0)/RT)$$



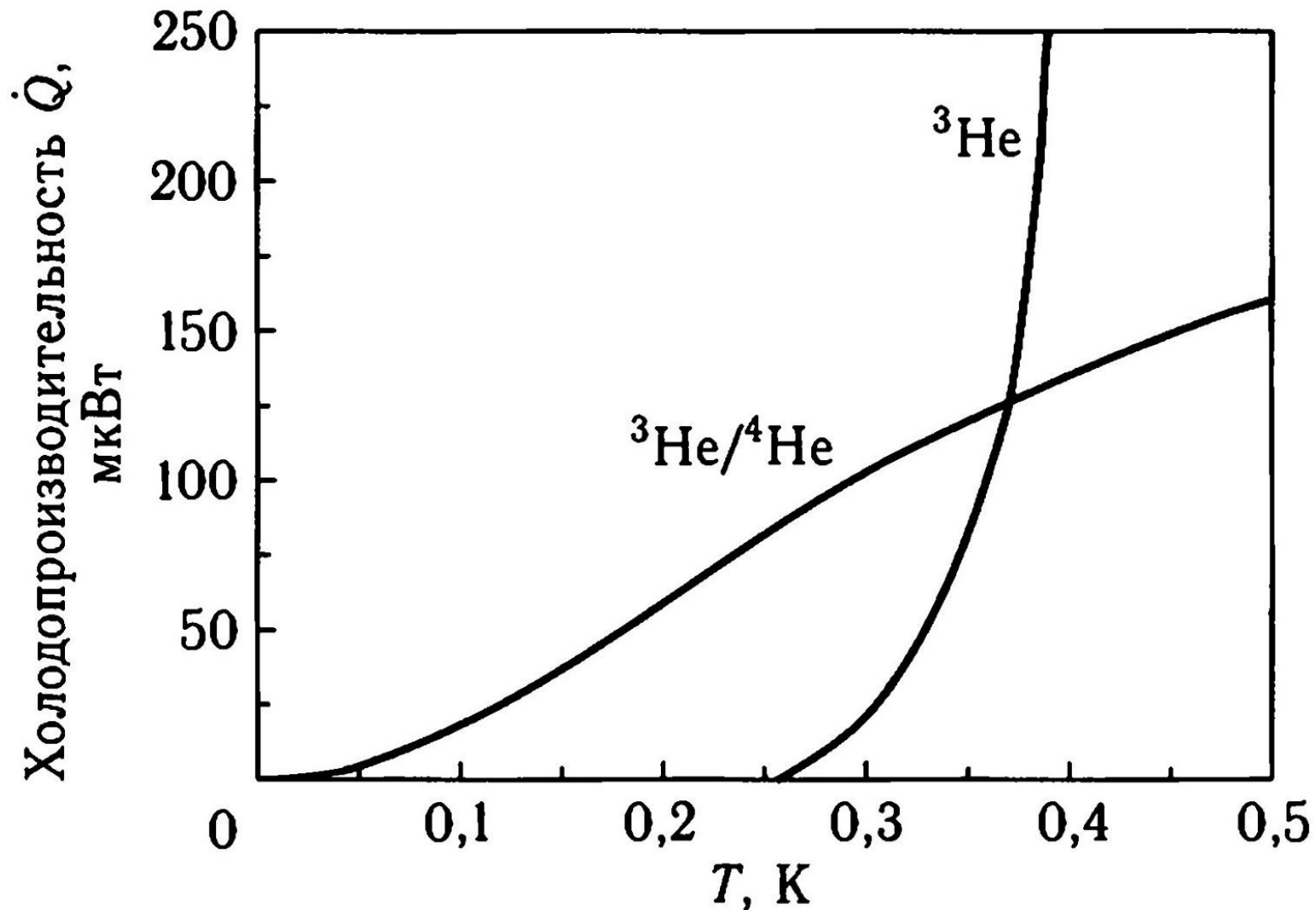
# Правило фаз Гиббса

$$\Psi = n - r + 2$$

Число компонентов  $n=2$  ( $^3\text{He}$  и  $^4\text{He}$ ),  
 Число фаз  $r=3$  (2 жидких фазы и пар)  
 Число степеней свободы  $\Psi=1$



Относительная концентрация  $^3\text{He}$  в смеси  $^3\text{He} - ^4\text{He}$ :  $x_3 = n_3 / (n_3 + n_4)$ .



Холодопроизводительность рефрижераторов, основанных на испарении и растворении  ${}^3\text{He}$  при одинаковой скорости циркуляции  ${}^3\text{He}$  (5 л/с  $\approx$  0,223 моль/с)

На рисунке сравнивается холодопроизводительность рефрижераторов, работающих на испарении или растворении  $^3\text{He}$ . При «испарении»  $^3\text{He}$  из концентрированной фазы в растворенную холодопроизводительность системы равна:

$$Q = \dot{n}_3 [H_d(T) - H_c(T)] \sim x \int \Delta C(T) dT$$

где  $n_3$  — количество молей  $^3\text{He}$ , переходящих в единицу времени из концентрированной фазы (concentrated) в растворенную (diluted),  $H$  — молярная энтальпия и  $\Delta C$  — разность молярных теплоемкостей двух фаз.

Концентрация  $x$  атомов  $^3\text{He}$  в растворенной фазе практически постоянна для  $T < 0,1$  К (около 6,6%). Поскольку теплоемкость  $^3\text{He}$  пропорциональна температуре, холодопроизводительность процесса растворения:  $Q \approx 84\dot{n}_3 T^2$

Это следует из приближения для энтальпий (по данным Graywall D.S.):

$$H_{3,c}(T) = H_3(0) + 11T^2 \text{ [Дж/(моль} \cdot \text{K}^2)]$$

$$H_{3,d}(T) = H_3(0) + 95T^2 \text{ [Дж/(моль} (^3\text{He}) \cdot \text{K}^2)]$$

В то же время для процесса испарения  $Q \sim e^{-1/T}$