



Курс:

Фізичні методи дослідження матеріалів

<https://eduportal.kau.org.ua/course/view.php?id=11>

Тема: Вступна лекція:

Матеріали під впливом зовнішніх чинників

1. <https://youtu.be/A7VEa6qLI44> (2021)
2. <https://youtu.be/xGJTZ55qWnU> (2021)

Лектор: Олександр Кордюк

kordyuk@kau.edu.ua 095 0104594

Експериментальні методи

- Спектроскопічні методи
 - Field-emission microscopy (**FEM**) and Field ion microscope (**FIM**)
 - Scanning electron microscope (**SEM**)
 - Thermal desorption spectroscopy (**TDS**)
 - Mass spectrometry. Quadrupole mass spectrometer (**QMS**)
Rutherford backscattering spectrometry (**RBS**) and Secondary-ion mass spectrometry (**SIMS**)
Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf: Ion Beam Center, Electron Linac for beams with high Brilliance and low Emittance (**ELBE**), Dresden High Magnetic Field Laboratory
 - Low Energy Electron Diffraction (**LEED**). Reflection High Energy Electron Diffraction (**RHEED**)
- Фотоемісійна спектроскопія з кутовим розділенням (**ARPES**)
- Синхротрон та синхротронні експерименти
- Сканувальна тунельна мікроскопія (**STM**) та спектроскопія (**STS**)
- Непружне нейтронне розсіювання (**INS**)
- Мюонна спінова спектроскопія (**μ SR**)
- Транспортні методики
- Методи засновані на квантових осциляціях (**QO**)
- Рентгенівський дихроїзм та інфрачервона спектроскопія (**IR**)
- ...

- Фізичні методи
 - Загальне
 - 1. Матеріали під впливом зовнішніх чинників
 - 2. Матеріали в магнітних та електричних полях
 - 3. Спектроскопічні методи
 - 4. Фотоемісійна спектроскопія з кутовим розділенням (ARPES)
 - 5. Синхротронні експерименти
 - 6. Квантове тунелювання та тунельна спектроскопія: FT-STs
 - 7. Спектральні функції та перетворення Фур'є
 - 8. Непружне нейтронне розсіювання (INS)
 - 9. Мюонна спінова спектроскопія (μ SR)
 - 10. Транспортні методи
 - 11. Методи засновані на квантових осциляціях
 - 12. Рентгенівський дихроїзм та інфрачервона спектроскопія
 - 13. Масивні дані
 - X. Скануюча тунельна мікроскопія та спектроскопія
 - X. Фізичні явища у високих магнітних полях
 - X. Метод кінетичного ідентування

Фізичні методи дослідження матеріалів

На головну / Курси / КАУ / Кафедра прикладної фізики та наноматеріалів / Базові курси / Фізичні методи

Загальне

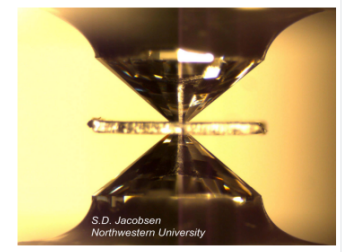
Курс складається із стислого огляду-класифікації сучасних методів дослідження матеріалів під впливом зовнішніх чинників: температури, тиску, механічного навантаження, магнітних та електричних полів та різних видів опромінення – різноманітні спектроскопічні методи. Більш детально, на прикладах європейських експериментальних інфраструктур, розглянуто способи реалізації високих магнітних полів та їх застосування, синхротронні експерименти та метод фотоелектронної спектроскопії, дифракційні методи та методи тунельної електронної спектроскопії.

- Новини
- Література з фізичних методів
- Форум курсу "Фізичні методи дослідження матеріалів"
- Білету на іспит (2018)

1. Матеріали під впливом зовнішніх чинників

Вступна лекція. Лектор: Олександр Кордюк

- Температура:** шкали, рекорди, нормальні та екстремальні температури Всесвіту, печі та кріостати. Діапазон температур у фізиці конденсованої речовини. Великий адронний колайдер та ІТЕР. Методи вимірювання температури.
- Тиск:** від ультра високого вакууму до металічного водню, вакуумні насоси та преси.
- Фазові діаграми:** P-T, V-T, T-x



Контрольні питання

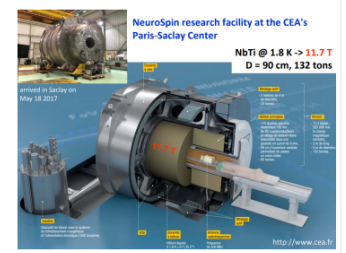
- Мінімальні і максимальні температури: кубіт, рідкий гелій, оптична піч, поверхня Сонця...
- Чим визначаються максимальні температури індукційної та оптичної печей?
- Чому першим металом в якому відкрили надпровідність стала ртуть?
- Принцип дії кріостату розчинення?
- Чи завжди ми вимірюємо температуру термометру?
- Чим цікавий металічний водень?
- Якими бувають фазові діаграми?

URL (веб-посилання): 1 Файл: 1 Тека: 1

2. Матеріали в магнітних та електричних полях

Вступна лекція 2. Лектор: Олександр Кордюк

- Стале магнітне поле.** В-поле та H-поле. Системи одиниць. Магнітні поля в природі. Екранування поля. Нормальні та надпровідні електромагніти. Міжнародні лабораторії високих магнітних полів та світові рекорди. Короткий огляд магнітних експериментів. Магнетометри.
- Електричне поле.** Тунельна спектроскопія. Польовий транзистор...



Контрольні питання

- Чим відрізняється H-поле та B-поле?
- Принцип роботи ЯМР та МРТ? Чому роздільна здатність залежить від поля?
- Чим обмежені максимальні поля резистивних, надпровідних та імпульсних магнітів?
- Принцип роботи потокового (fluxgate) магнетометра?
- Принцип роботи VSM?
- Принцип роботи SQUID?

URL (веб-посилання): 1 Файл: 1 Тека: 1

1. Температура

2. Тиск

3. Поле

dc

Магнітне

Електричне

ac

Спектроскопії

1. Температура

2. Тиск

3. Поле

dc

Магнітне

Електричне

ac

Спектроскопії

Температура

- **1848 - Вільям Томсон (лорд Кельвін)**, британський фізик і інженер:

$$\Delta T: 1\text{K} = 1^\circ\text{C}$$

$$T: 0\text{K} = -273.15^\circ\text{C}$$

$$T \rightarrow 0: \quad Q, S, C, \alpha \rightarrow 0$$

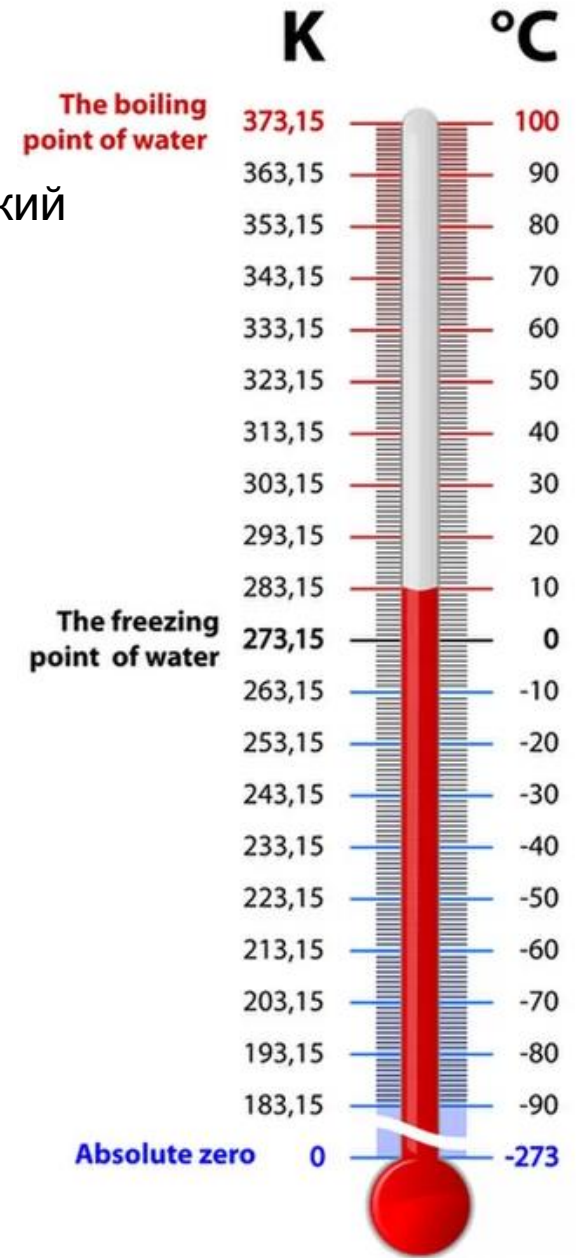
Рекорди:

100 pK = 10^{-10} K - ядерні спіни
шматочку родію (1999)

[http://lfi.tkk.fi/wiki/LTL/World_record_in_low_temperatures]

6 mK = $6 \cdot 10^{-3}$ K - мідна камера
~ 400 кг (2014)

[<http://www.interactions.org/node/12905>]



Температура

[wiki]

	K	Peak emittance wavelength of black-body photons
Coldest measured temperature	450 pK	6,400 kilometers
One millikelvin	0.001 K	2.897 77 meters (Radio, FM band)
Cosmic Microwave Background Radiation	2.7 K	1.063 mm (peak wavelength)
Incandescent lamp	2500 K	1160 nm (Near infrared)
Sun's visible surface	5778 K	501.5 nm (Green light)
Lightning bolt's channel	28,000 K	100 nm (Far Ultraviolet light)
Sun's core	16 MK	0.18 nm (X-rays)
Thermonuclear explosion (peak temperature)	350 MK	8.3×10^{-3} nm (Gamma rays)
Merging binary neutron star system	350 GK	8×10^{-6} nm (Gamma rays)
Relativistic Heavy Ion Collider	1 TK	3×10^{-6} nm (Gamma rays)
CERN's proton vs. nucleus collisions	10 TK	3×10^{-7} nm (Gamma rays)
Universe 5.391×10^{-44} s after the Big Bang	1.4×10^{32} K	1.616×10^{-26} nm (Planck frequency)

Температура



Planck temperature = 1.42×10^{32} K

Strong gravitational forces -> quantum theory of gravity

Hagedorn temperature = 2×10^{12} K - quark matter (CERN)

in string theory $\sim 10^{30}$ K



6 mK < 6 orders > 3000 K



Condensed matter experiment



Laboratory Furnaces



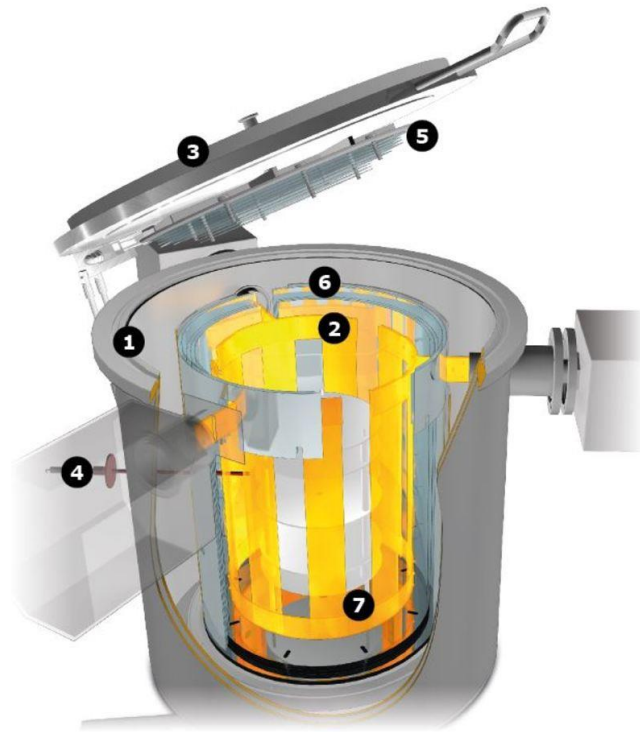
Chamber Furnaces

up to 1600°C



Tube Furnaces

Laboratory Furnaces

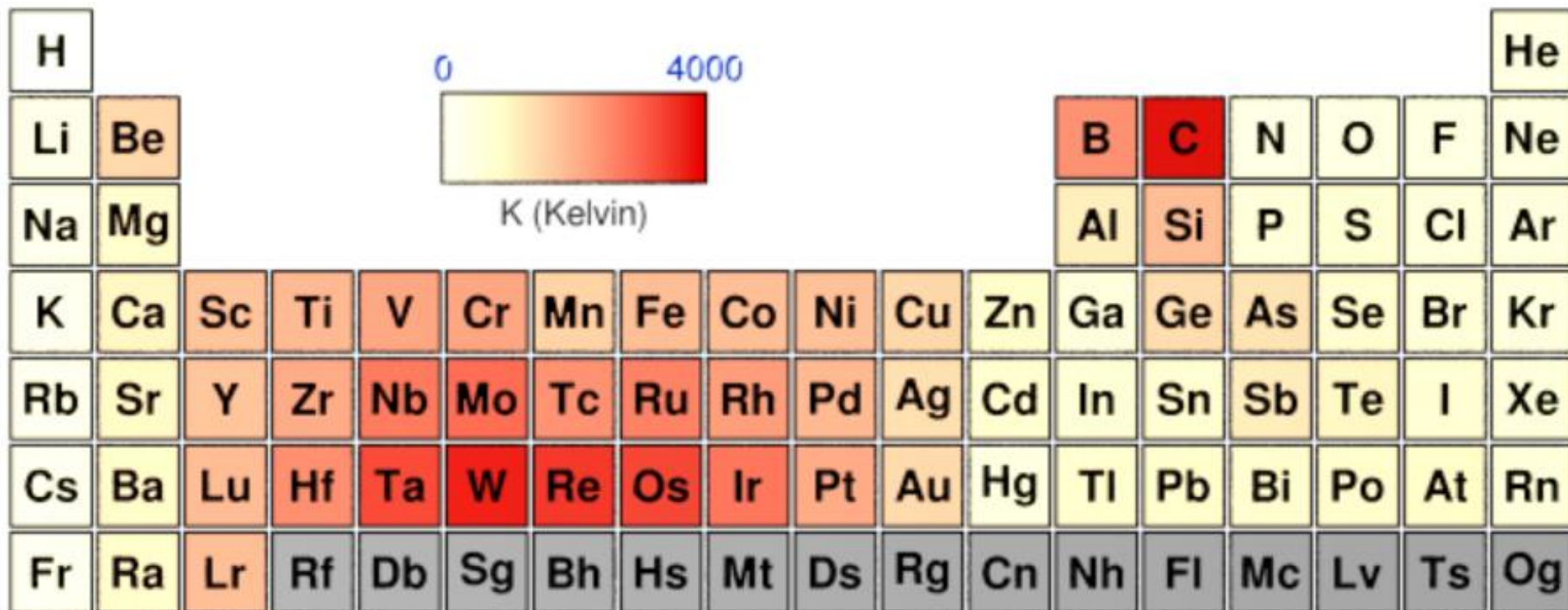


Vacuum Furnaces



Vacuum level $< 5 \times 10^{-6}$ mbar

High temperature top loader up to 3000 °C with Graphite



La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb
Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No



Melting point
www.webelements.com

Тиглі - Crucibles

Оксидні вогнетривкі матеріали:
карборунд, корунд, оксид цирконію,
оксид хрому, оксид церію,
оксид ітрію та ін.



Графіт: кольорові метали

Платина: точні хімічні роботи, операції з плавиковою кислотою, інш.

Нікель: робота з розплавами лугів.

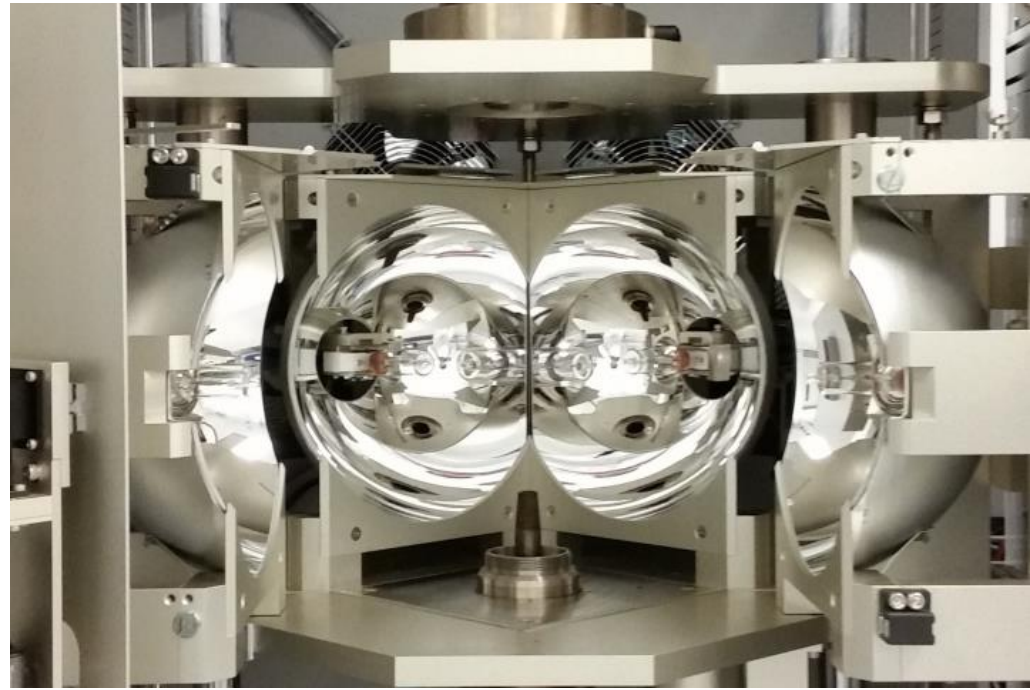
Іридій, Родій, Молібден: особливо точні лабораторні роботи, вирощування дорогоцінних каменів.

Тантал, Ніобій: робота з агресивними кислотами і расплавами лантаноїдів.

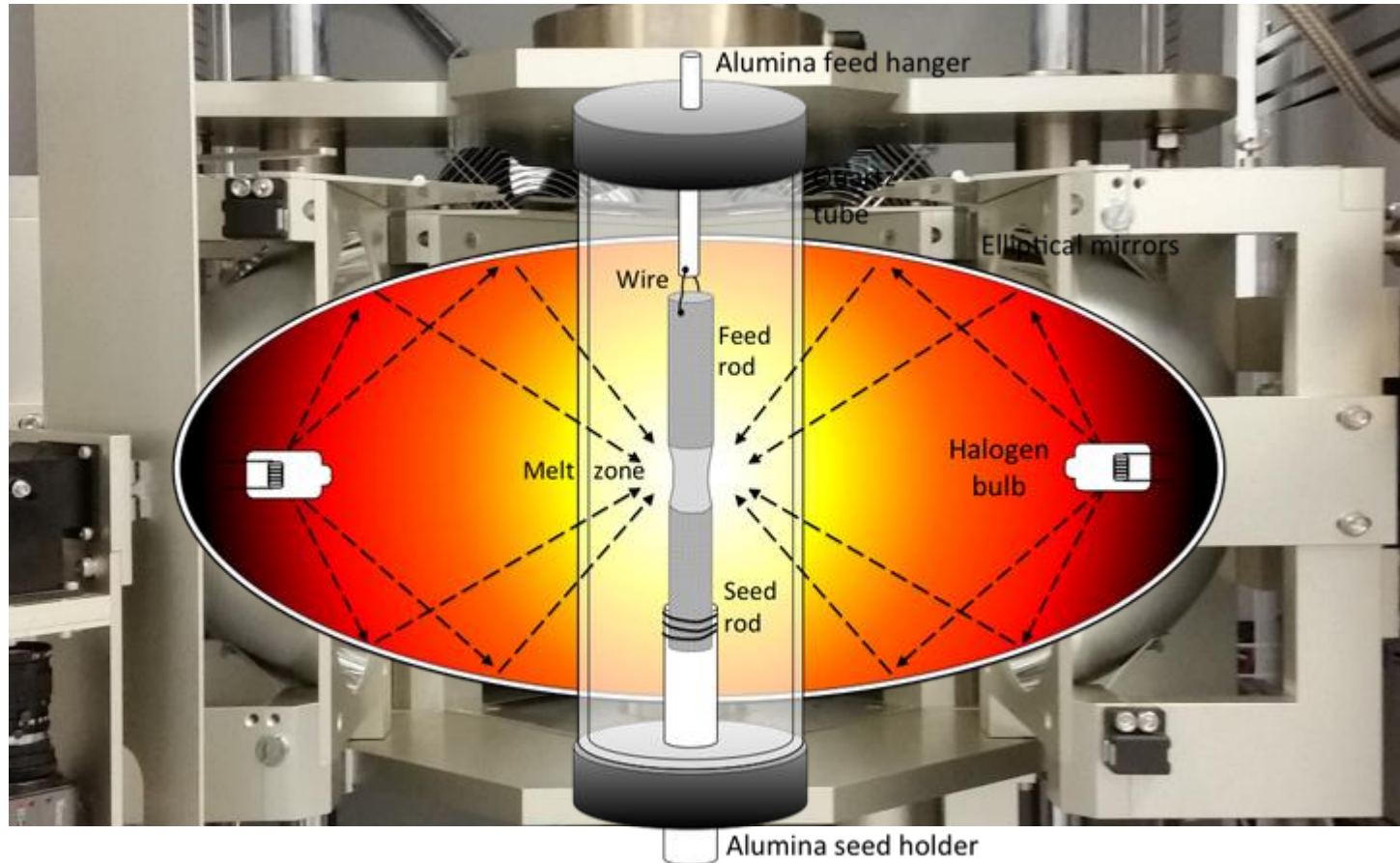
Вольфрам: робота в області надвисоких температур в вакуумі або захисній атмосфері.

Optical Furnaces

Four Mirror Optical Floating
Zone Furnace
up to 2200°C



Optical Furnaces



Four Mirror Optical Floating Zone Furnace

up to 2200°C

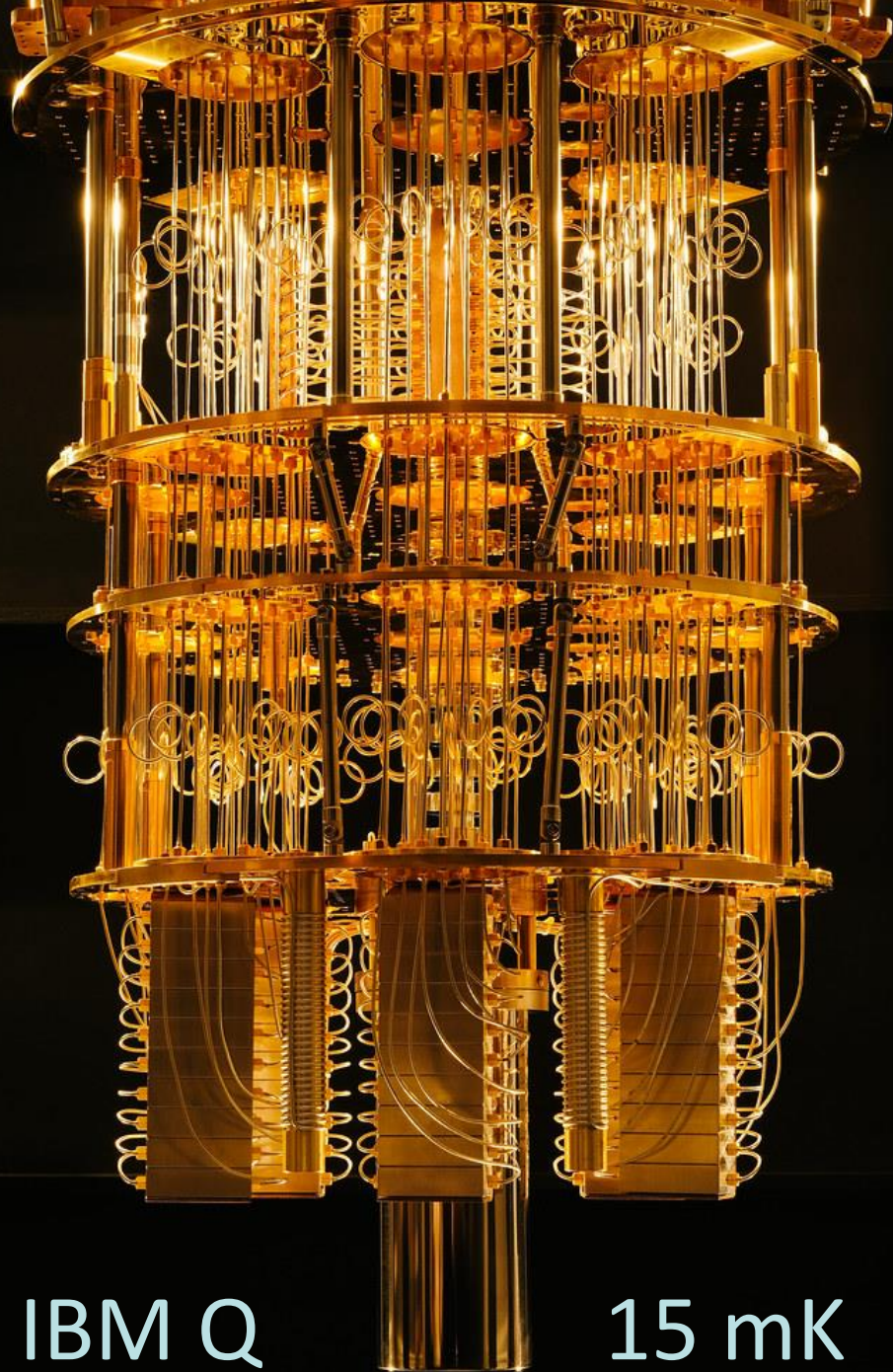
Odeillo solar furnace

became operational in 1970

more than **3,000°C**

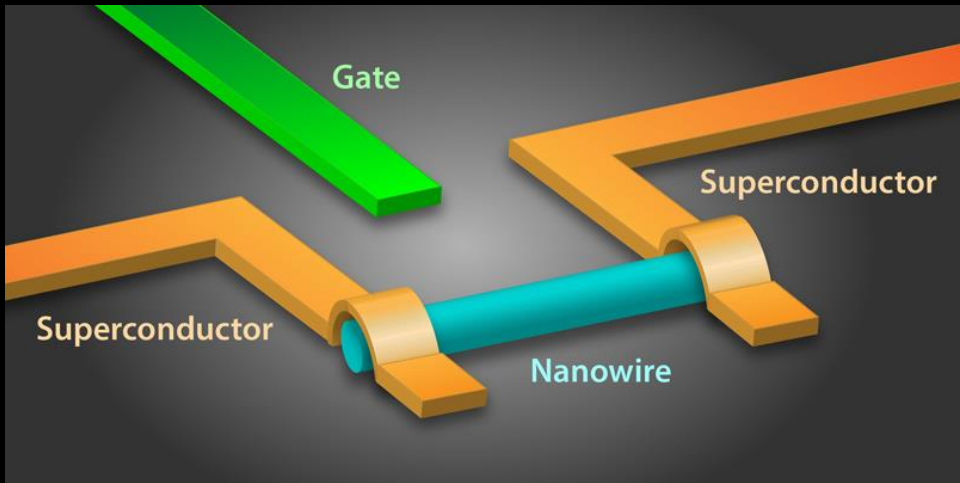


Superconducting qubits



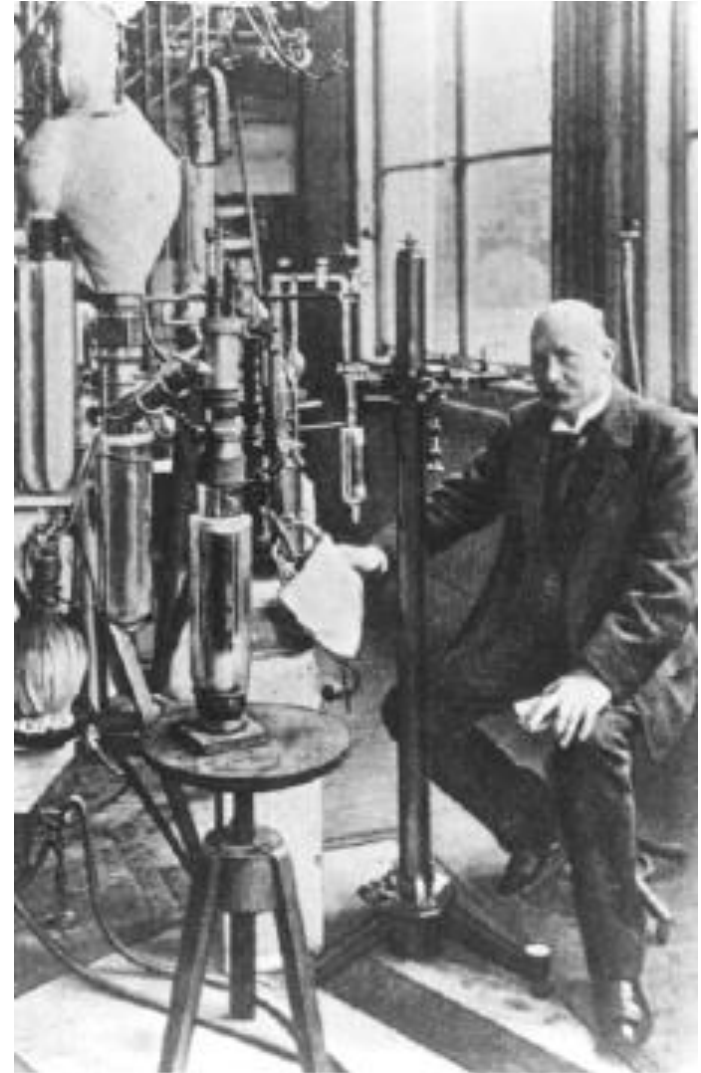
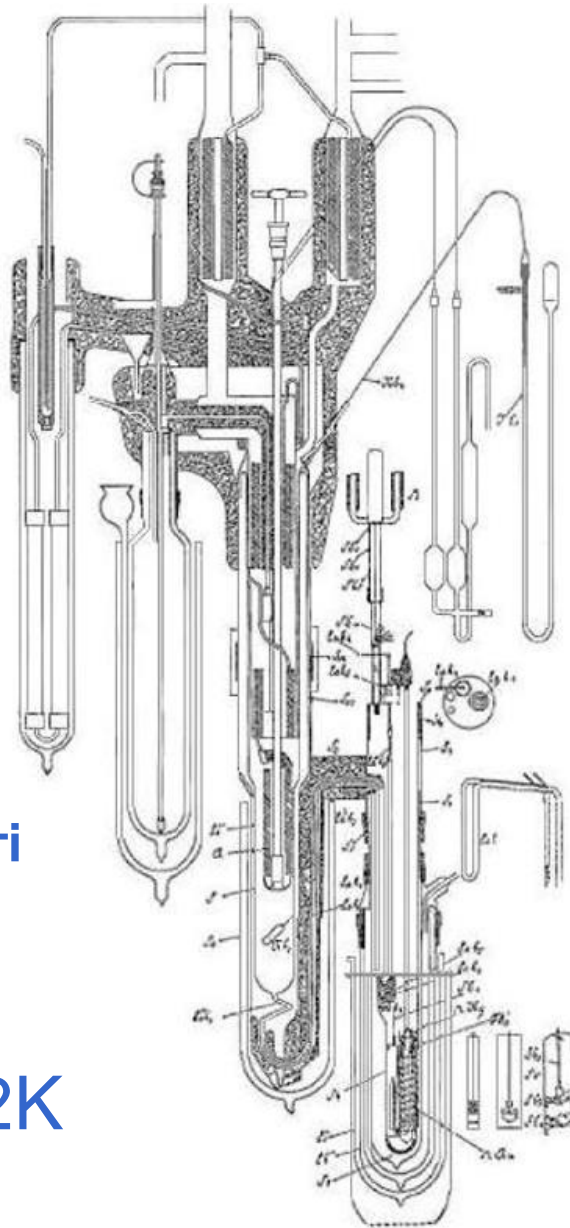
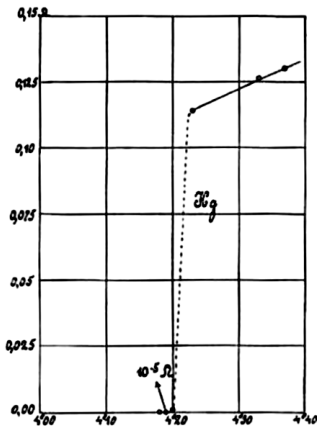
IBM Q

15 mK



Laboratory Cryostats

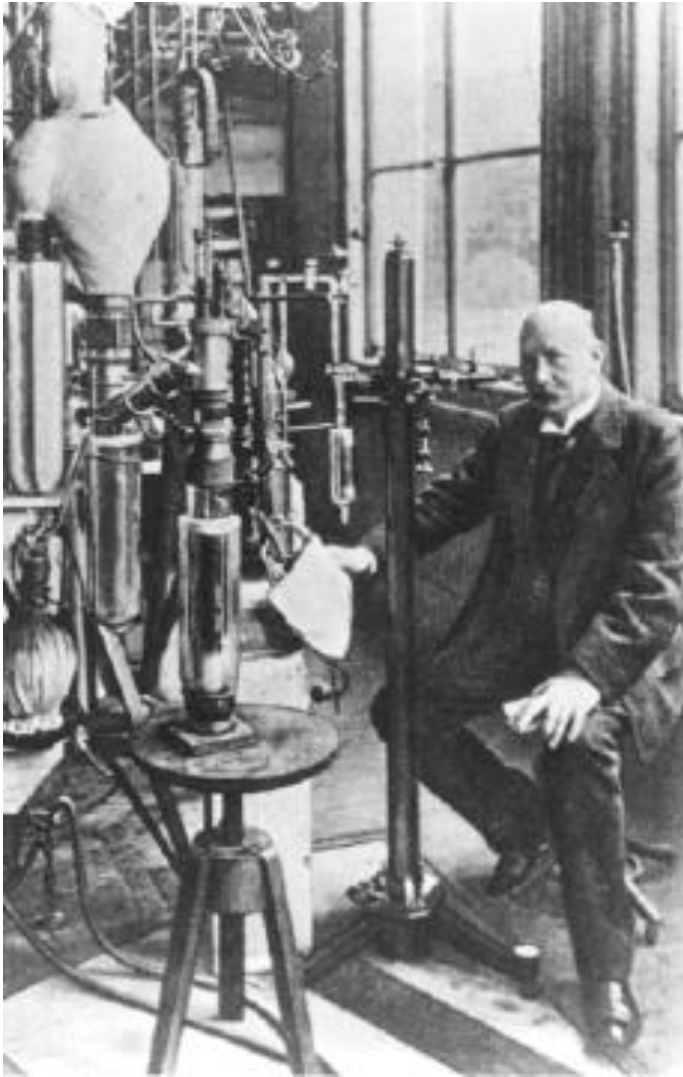
1911



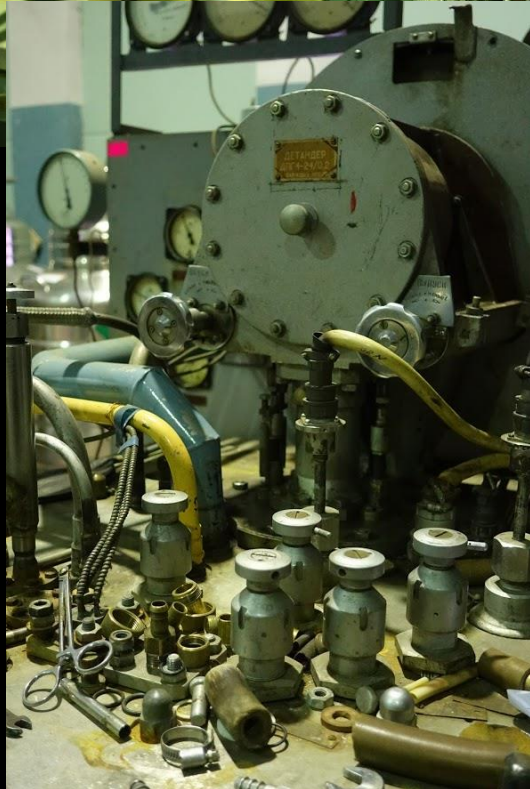
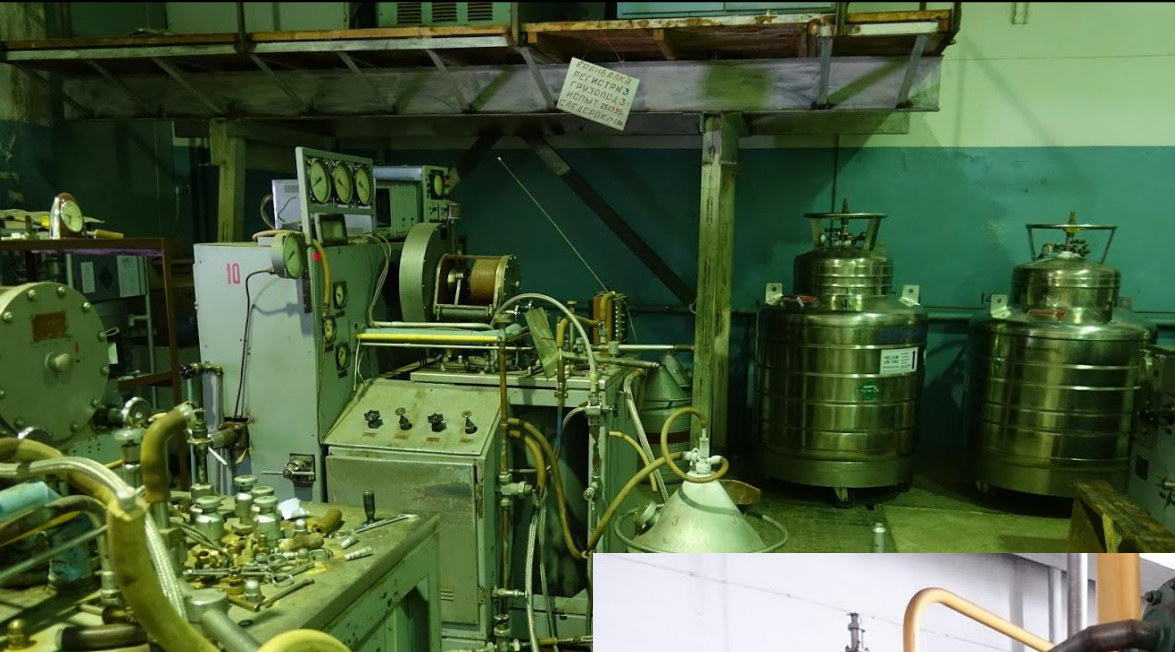
Історія
надпровідності
почалася з
гелію

Hg, $T_c = 4.2\text{K}$

Laboratory Cryostats



Станція скраплення гелію в Інституті металофізики НАН України



Випаровування рідин

LN 77 K, LHe 4.2 K

відкачуванням пари азоту до температури потрійної точки 63 K

відкачуванням пари гелію - до 0,7 K

Дроселювання

ефект Джоуля-Томсона

Розширення з виконанням зовнішньої роботи

детандер (турбодетандер)

Адіабатне розмагнічування

на ефекті поглинання теплоти під час розмагнічування парамагнітних солей
- до 0,001 K

Ефект Пельтьє

на зниженні температури спаїв напівпровідників під час проходження через них постійного електричного струму.

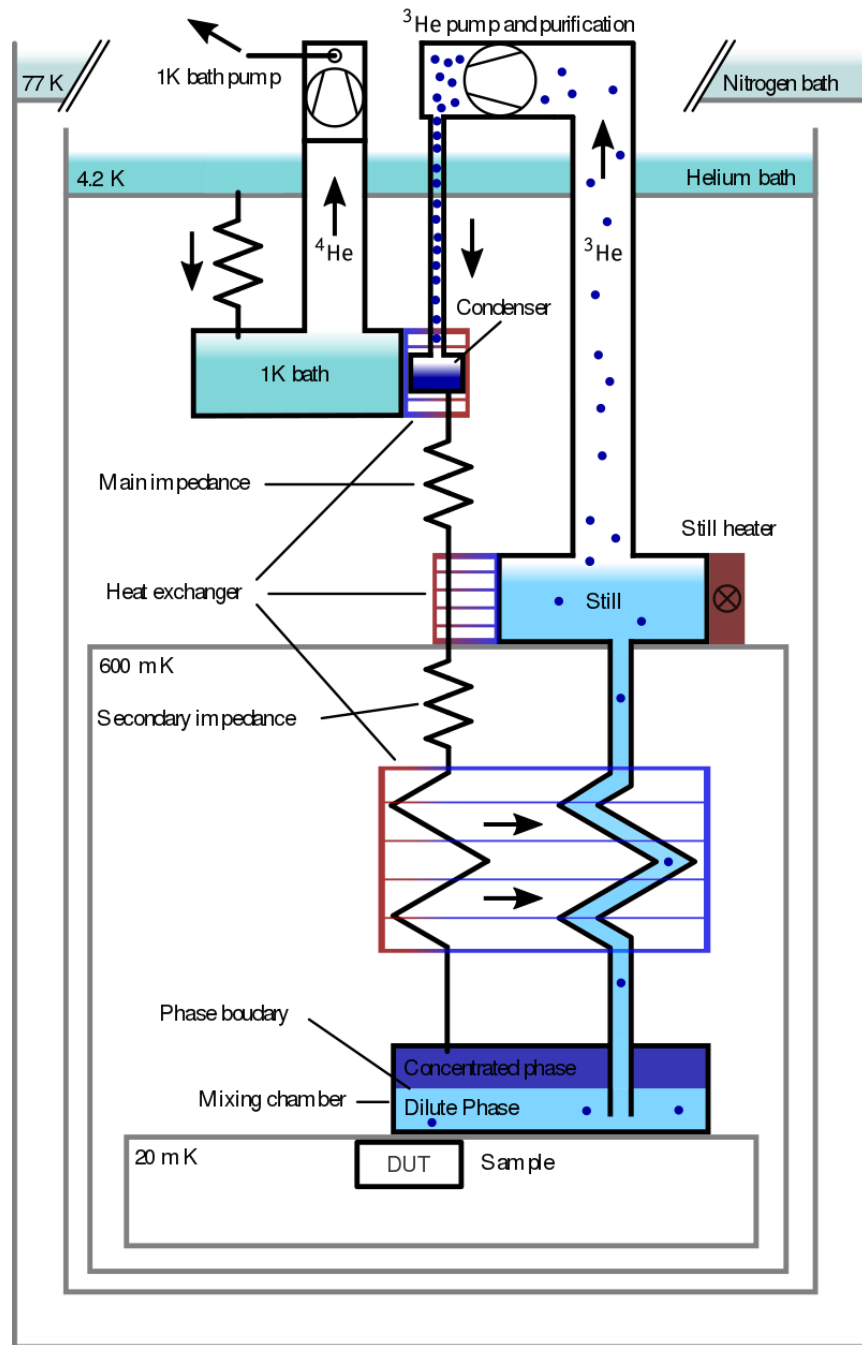
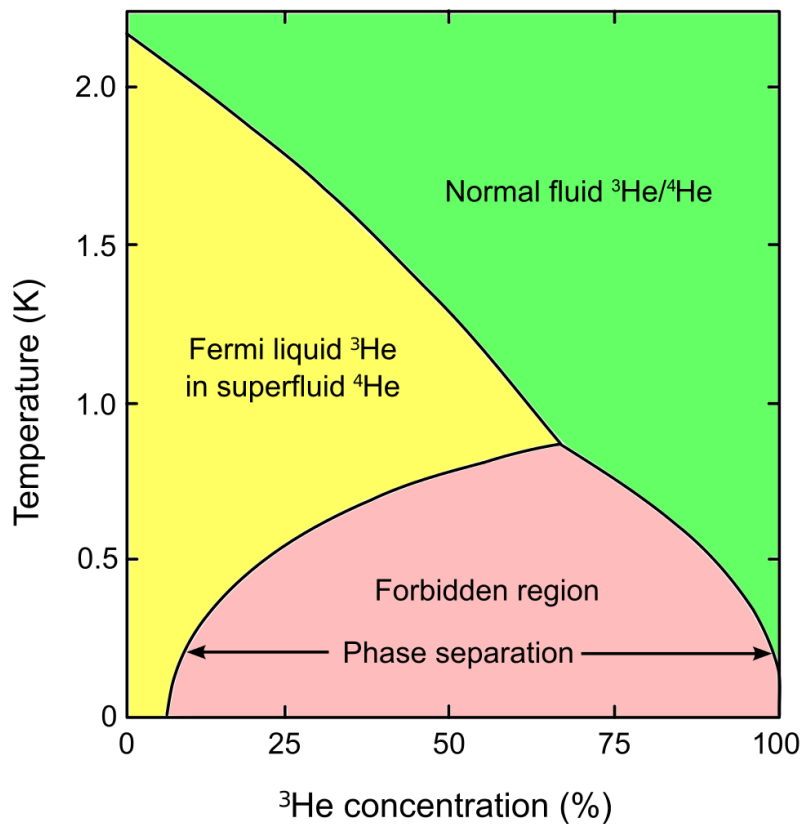
Кріостат розчинення

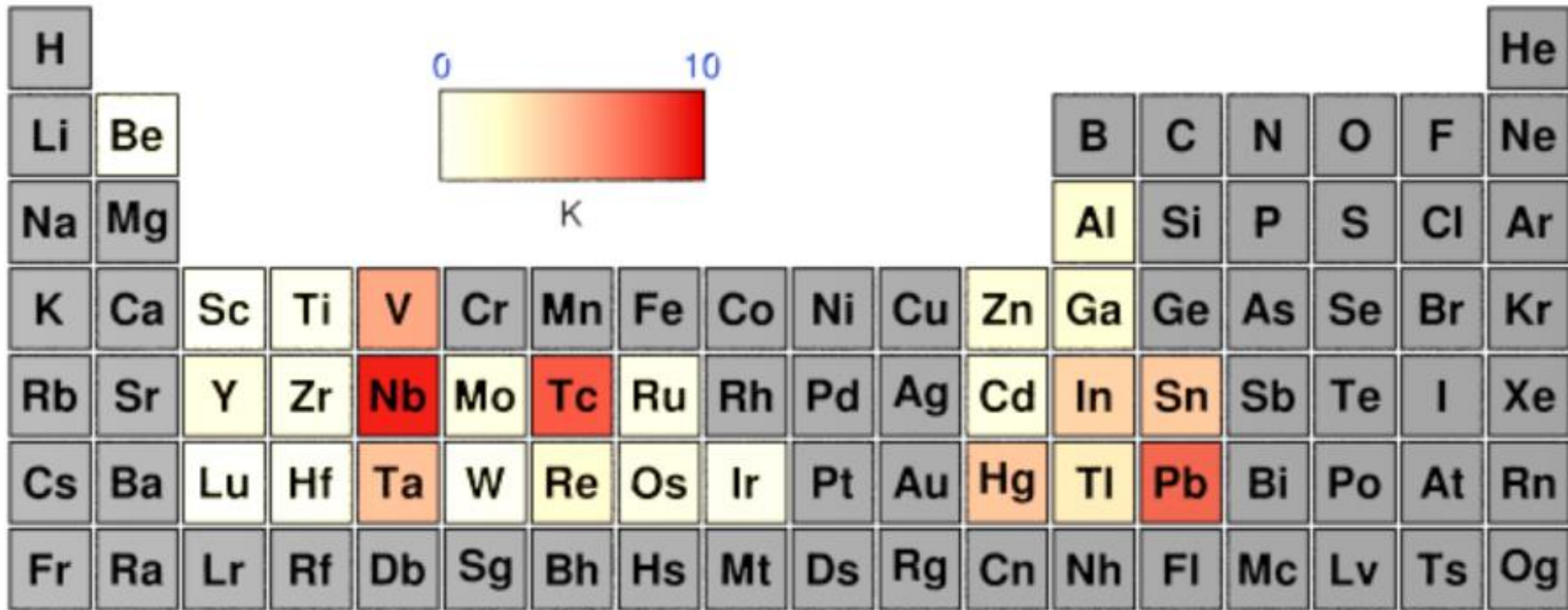
суміш двох ізотопів гелію: ^3He і ^4He

Кріостат розчинення

суміш двох ізотопів гелію: ^3He і ^4He

до 2 мК





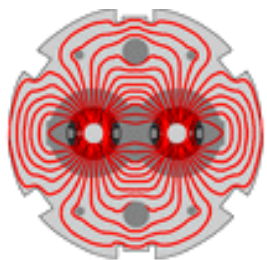
La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb
Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No

Superconductivity temperature

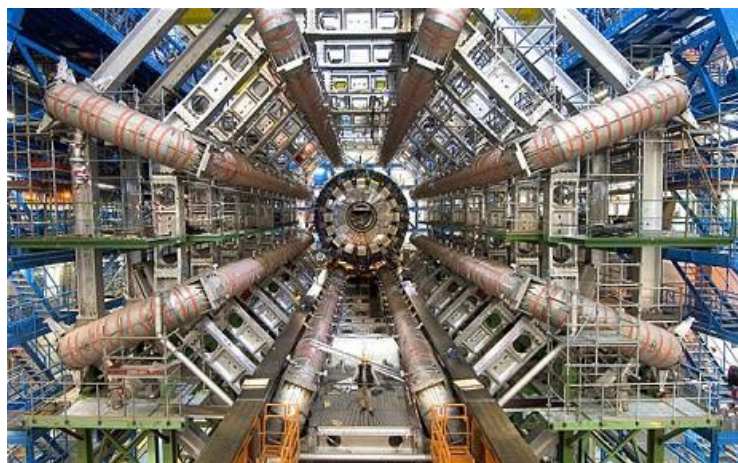
www.webelements.com



T_c : **Nb** (9.3K), **NbTi** (~10K), **Nb₃Sn** (18K), **Nb₃Ge** (23K)



Великий адронний колайдер



10 000 надпровідних магнітів
1200 тон кабелю з NbTi при 1.9 K
> 130 тон LHe

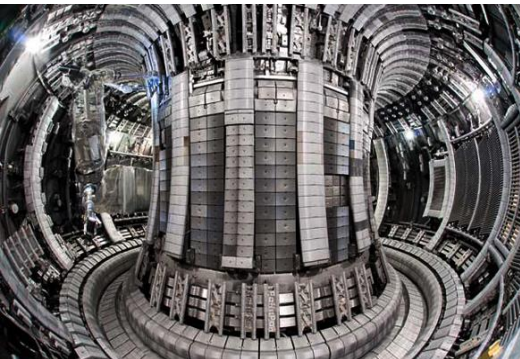
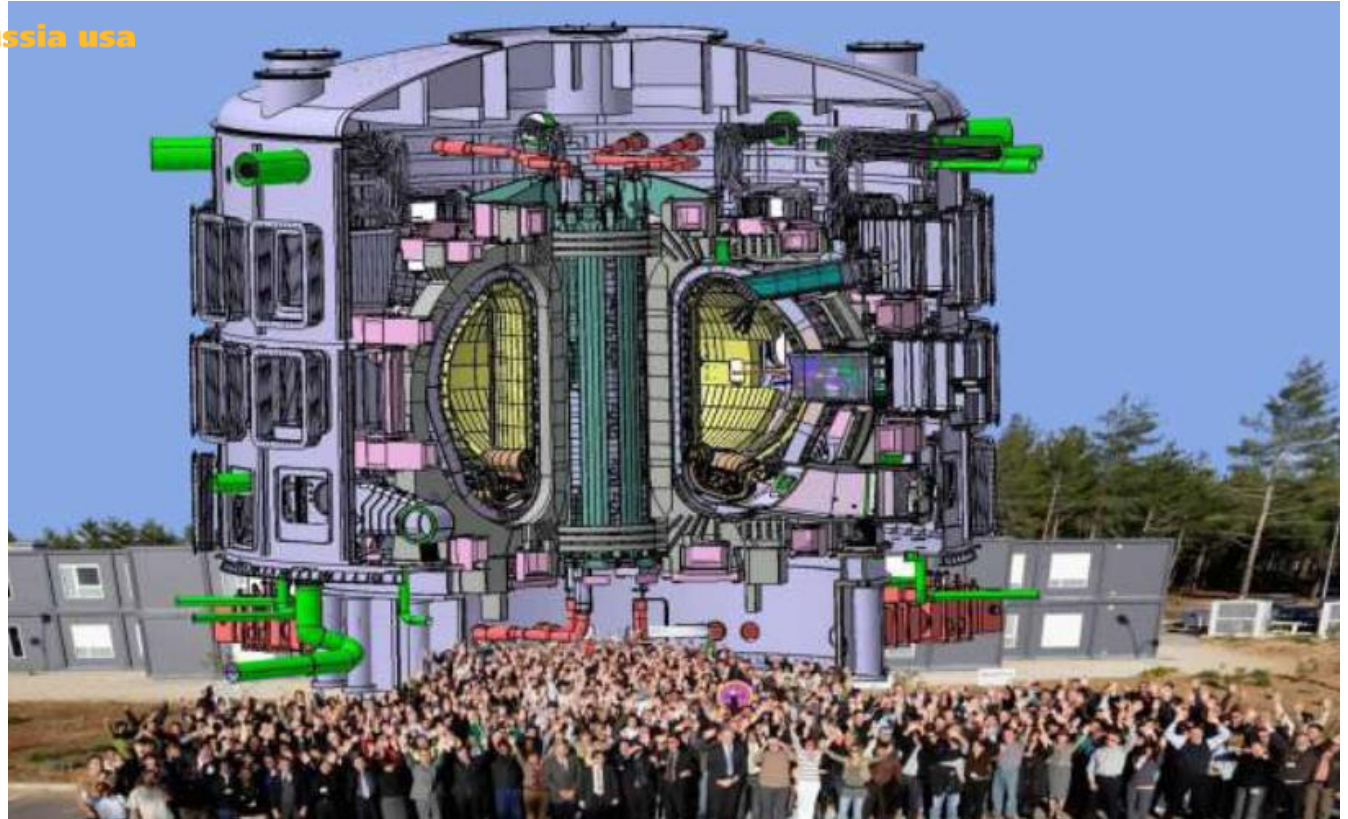




iter

Міжнародний експериментальний термоядерний реактор ІТЕР

china eu india japan korea russia usa



T_c
 H_c
 J_c

У магнітній системі ІТЕР-а використовується близько 600 тон Nb_3Sn .

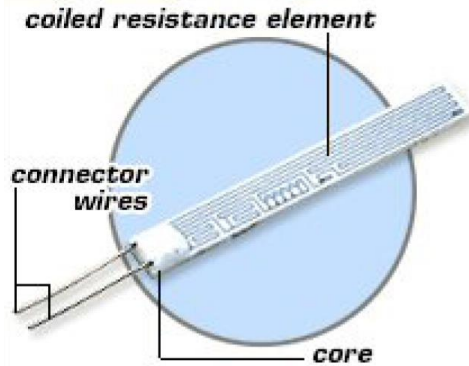
І стільки ж $NbTi$

Contact temperature measurements



1. Thermistors, RTD $0.004 \Omega/^{\circ}\text{C}$
2. Thermocouples $10 \text{ K} - 2500 \text{ K}$
3. Semiconductor Probes $1 \mu\text{A}/^{\circ}\text{C}$

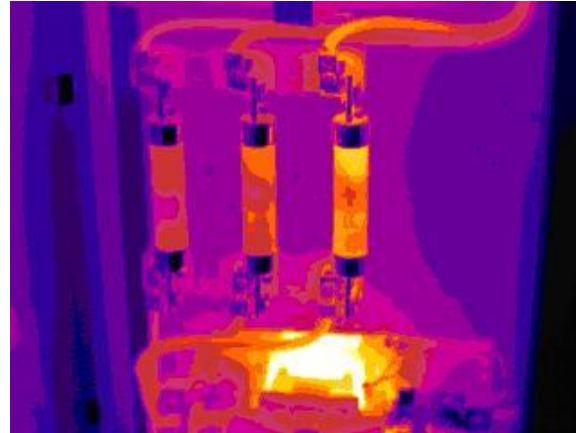
Typical RTD Design



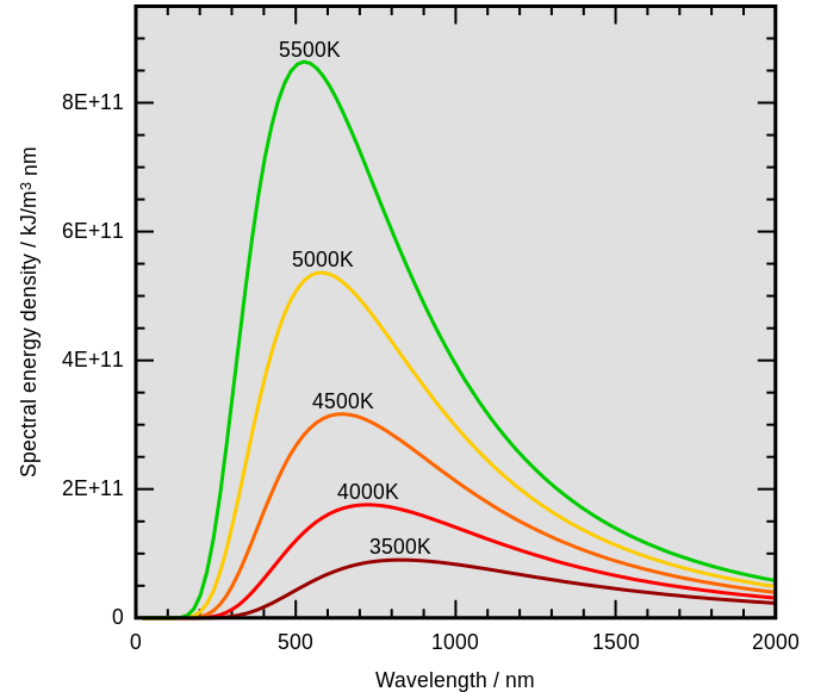
Type	Materials	Min temp	Max temp	Min $^{\circ}\text{C}$	Max $^{\circ}\text{C}$
J	Iron Constantan(Cu-Ni)	0°C	750°C	0 mV	42.281 mV
T	Copper Constantan(Cu-Ni)	-250°C	350°C	-6.18 mV	17.819 mV
K	Cromel (Ni-Cr) Alumel (Ni- Al)	-200°C	1250°C	-5.891 mV	50.644 mV
E	Cromel (Ni-Cr) Constantan(Cu-Ni)	-200°C	900°C	-8.825 mV	68.787 mV
N	Nicrosil (Ni-Cr-Si) NiSil (Ni-Si-Mg)	-260°C	1300°C	-4.336 mV	47.513 mV
S	Platinum-13% Rhodium Platinum	-50°C	1768°C	-0.236 mV	18.693 mV
B	Platinum-30% Rhodium Platinum-6% Rhodium	0°C	1820°C	0 mV	13.82 mV
C	Tungsten-5% Rhenium Tungsten-26% Rhenium	0°C	2320°C	0 mV	37.107 mV

The first three are the most common of the thermocouples in use throughout industry.

Non-contact temperature measurements



1. Single reading devices
2. Camera Field Devices



Контрольні питання

1. Мінімальні і максимальні температури: кубіт, рідкий гелій, оптична піч, поверхня Сонця...
2. Чим визначаються максимальні температури індукційної та оптичної печей?
3. Чому першим металом в якому відкрили надпровідність стала ртуть?
4. Принцип дії кріостату розчинення?
5. Чи завжди ми вимірюємо температуру термометру?

TICK

	Pressure (Pa or kPa)	Pressure (Torr)	Mean Free Path	Molecules per cm ³
Standard atmosphere, for comparison	101.325 kPa	760	66 nm	2.5×10^{19}
Intense hurricane	approx. 87 to 95 kPa	650 to 710		
Vacuum cleaner	approximately 80 kPa	600	70 nm	10^{19}
Mars atmosphere	1.155 kPa to 0.03 kPa (mean 0.6 kPa)	8.66 to 0.23		
freeze drying	100 to 10	1 to 0.1	100 μ m to 1 mm	10^{16} to 10^{15}
Incandescent light bulb	10 to 1	0.1 to 0.01	1 mm to 1 cm	10^{15} to 10^{14}
Thermos bottle	1 to 0.01	10^{-2} to 10^{-4}	1 cm to 1 m	10^{14} to 10^{12}
Earth thermosphere	1 Pa to 1×10^{-7}	10^{-2} to 10^{-9}	1 cm to 100 km	10^{14} to 10^7
Vacuum tube	1×10^{-5} to 1×10^{-8}	10^{-7} to 10^{-10}	1 to 1,000 km	10^9 to 10^6
Cryopumped MBE chamber	1×10^{-7} to 1×10^{-9}	10^{-9} to 10^{-11}	100 to 10,000 km	10^7 to 10^5
Pressure on the Moon	approximately 1×10^{-9}	10^{-11}	10,000 km	4×10^5
Interplanetary space				11
Interstellar space				1
Intergalactic space				10^{-6}

Тиск

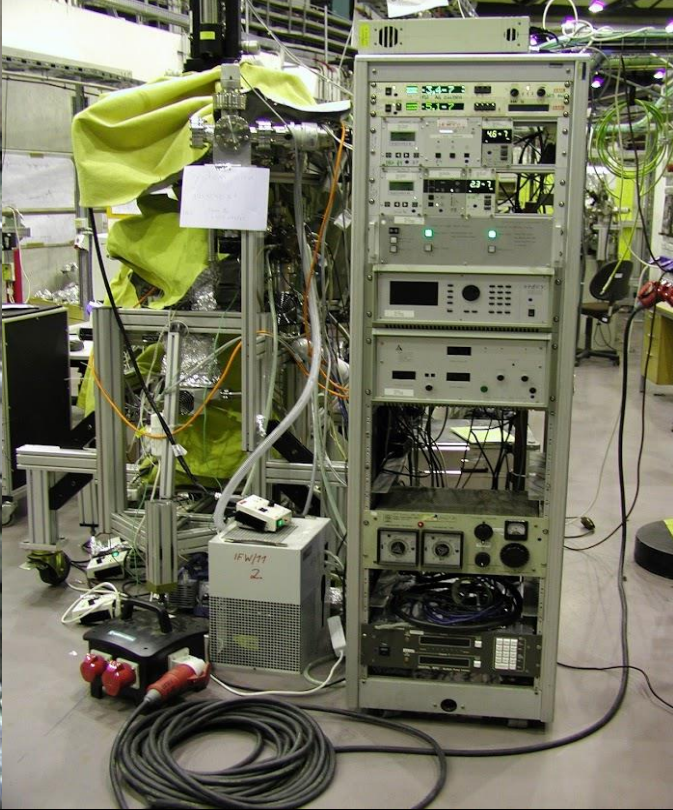
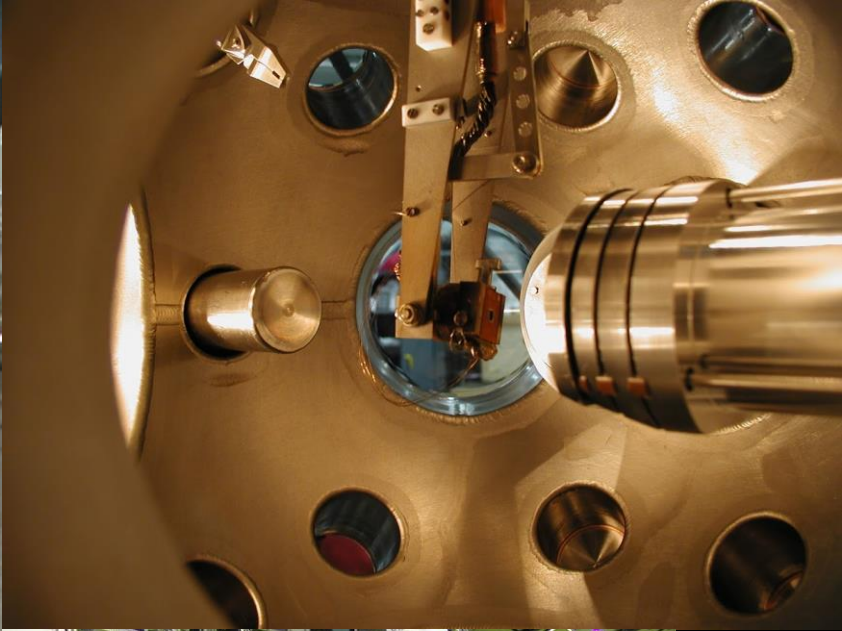
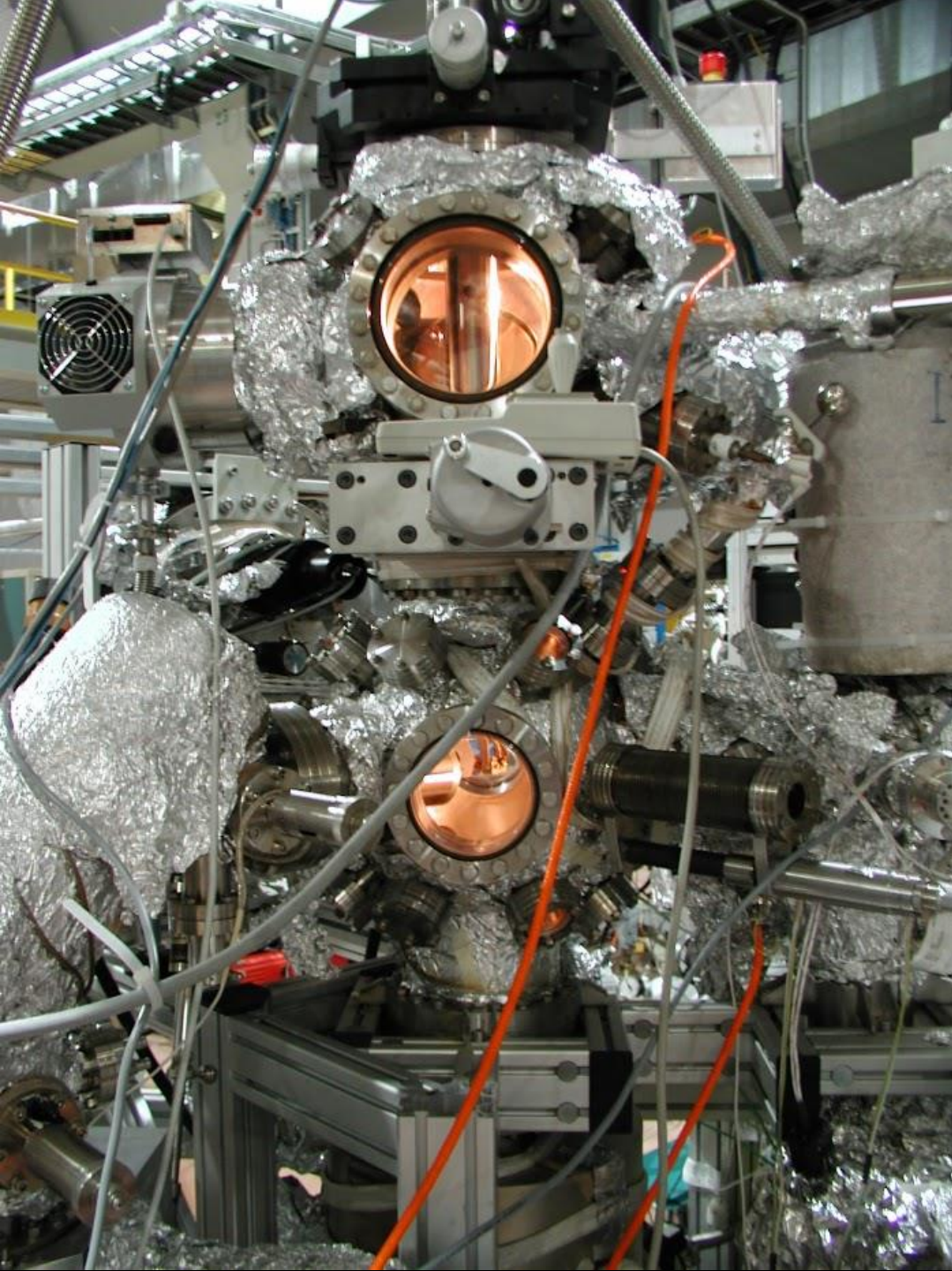
$$1 \text{ psi} = 1 \text{ lbf/in}^2 = 68,046 \cdot 10^{-3} \text{ атм} = 69 \text{ мБар} = 51,7 \text{ Торр}$$

	Бар	кПа	Атм.	кг/см ²	Торр (мм рт.ст.)
Бар	1	100	0,9869	1,0197	750
кПа	0,01	1	0,009869	0,00102	7,5
Атм.	1,013	101,3	1	1,033	760
кг/см ²	0,9807	98,067	0,9678	1	735,528
Торр (мм рт.ст.)	0,00133	0,1333	0,001316	0,00136	1

$$1 \text{ мБар} = 1 \text{ гПа} = 100 \text{ Па} = 0.75 \text{ Торр}$$

Perfect Vacuum	0 Torr (theoretically impossible)
Outer Space	about 10^{-9} to 10^{-17} Torr
Extreme High Vacuum	about 10^{-13} Torr
Ultra High Vacuum (UHV)	about 10^{-10} to 10^{-11} Torr
High or Hard Vacuum (HV)	about 10^{-5} to 10^{-8} Torr
Medium or Intermediate Vacuum	about 10^{-3} to 10^{-5} Torr
Low, Soft or Rough Vacuum	about 10^{-3} Torr
Atmospheric Pressure	760 Torr

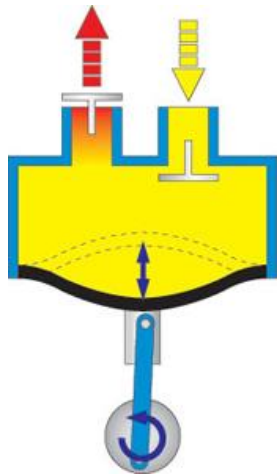




ARPES Vacuum Chamber
at BESSY 2002

Ступені вакууму

Ступінь вакууму	Тиск, P (Торр)	Густина газу, n (м^{-3})	Середня довжина пробігу, l (м)	Час утворення моношару, t (с)
Атмосфера	760	2×10^{25}	7×10^{-8}	10^{-9}
Низький	1	3×10^{22}	5×10^{-5}	10^{-6}
Середній	10^{-3}	3×10^{19}	5×10^{-2}	10^{-3}
Високий	10^{-6}	3×10^{16}	50	1
Ультра-високий	10^{-10}	3×10^{12}	5×10^5	10^4



Diaphragm pumps /
Мембранні насоси



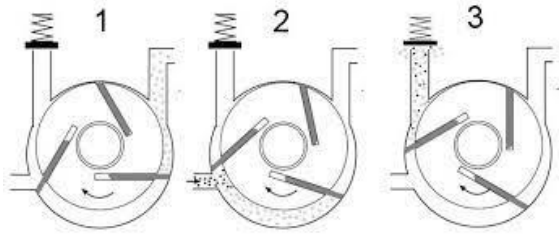
Turbomolecular pump /
Турбомолекулярний насос

invented in 1958 by
W.Becker, based on the
older molecular drag
pumps



Working principle of the turbomolecular pump (Leybold)
<https://youtu.be/V2fbXdNgDJM?si=ClwUbaAj-I452zW5t>

Вакуумні насоси / Vacuum pumps



Rotary vane pumps / роторно-лопаткові насоси

Diaphragm pumps / Мембранні насоси



Turbomolecular pump / Турбомолекулярний насос
invented in 1958 by W. Becker, based on the older
molecular drag pumps

Working principle of the turbomolecular pump (Pfeiffer) <https://youtu.be/f1SErZyhMe4?si=8ZqFDnICQbgsip6a>

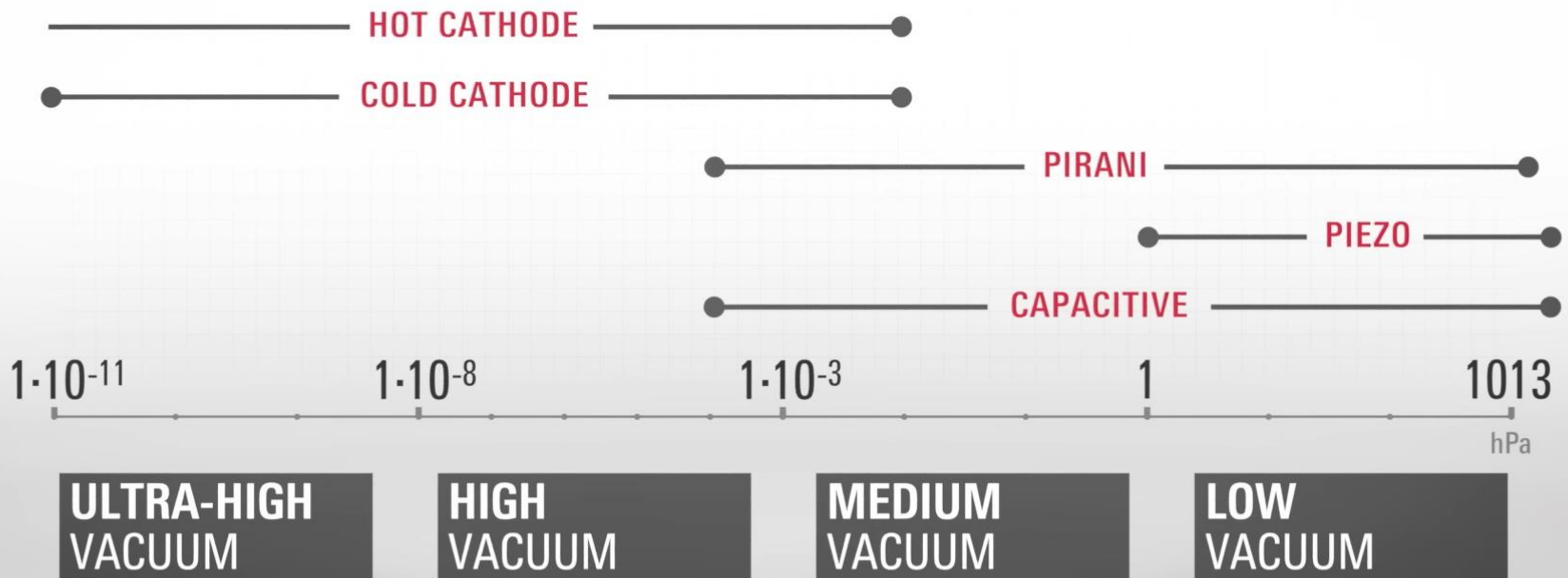
Vacuum pumps

- **Positive displacement pumps**
 - Rotary vane pump, the most common
 - **Diaphragm pump**, zero oil contamination
 - Piston pump, fluctuating vacuum
 - Scroll pump, highest speed dry pump
- **Momentum transfer pumps**
 - Diffusion pumps
 - **Turbomolecular pumps**
- **Entrapment pumps**
 - Cryopump
 - Non-evaporative getter pump
 - **Titanium sublimation pump (TSP)**

Вимірювання вакууму

Measuring Vacuum

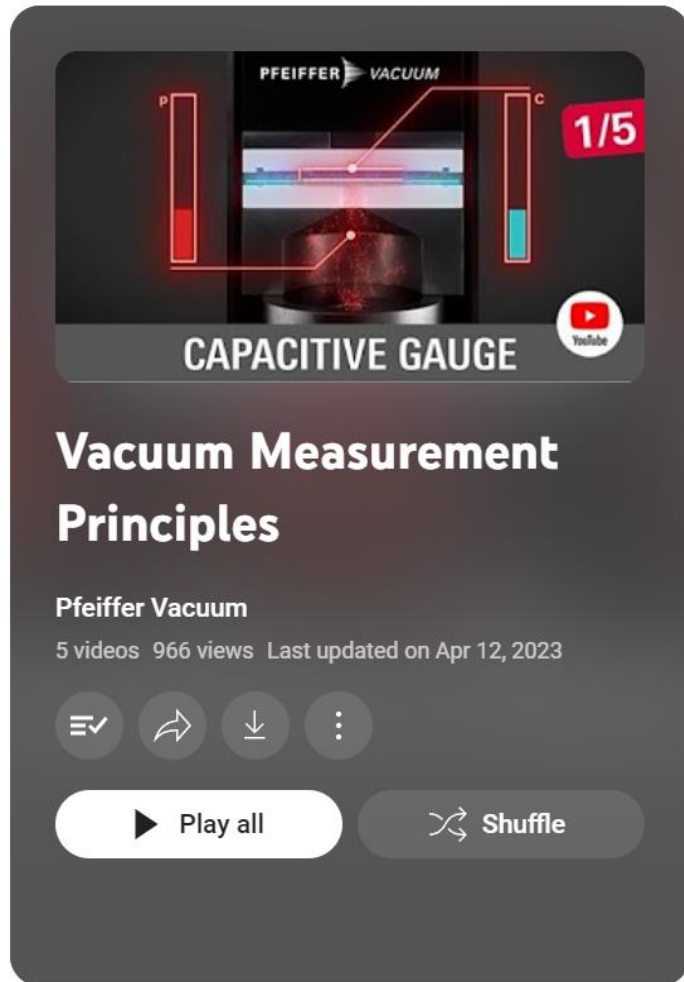
PFEIFFER VACUUM



Vacuum Measurement Principles by Pfeiffer Vacuum

https://youtube.com/playlist?list=PLBUqdQZpQHAO_jpFTAnKP5srlxmD3Uw19&si=A5q8VFW3xILoFB0S

Вимірювання вакууму



Vacuum Measurement Principles

Pfeiffer Vacuum

5 videos 966 views Last updated on Apr 12, 2023

Play all Shuffle



[Capacitive Gauge](#)



[Piezo-resistive Gauge](#)



[Pirani Gauge](#)



[Cold Cathode](#)



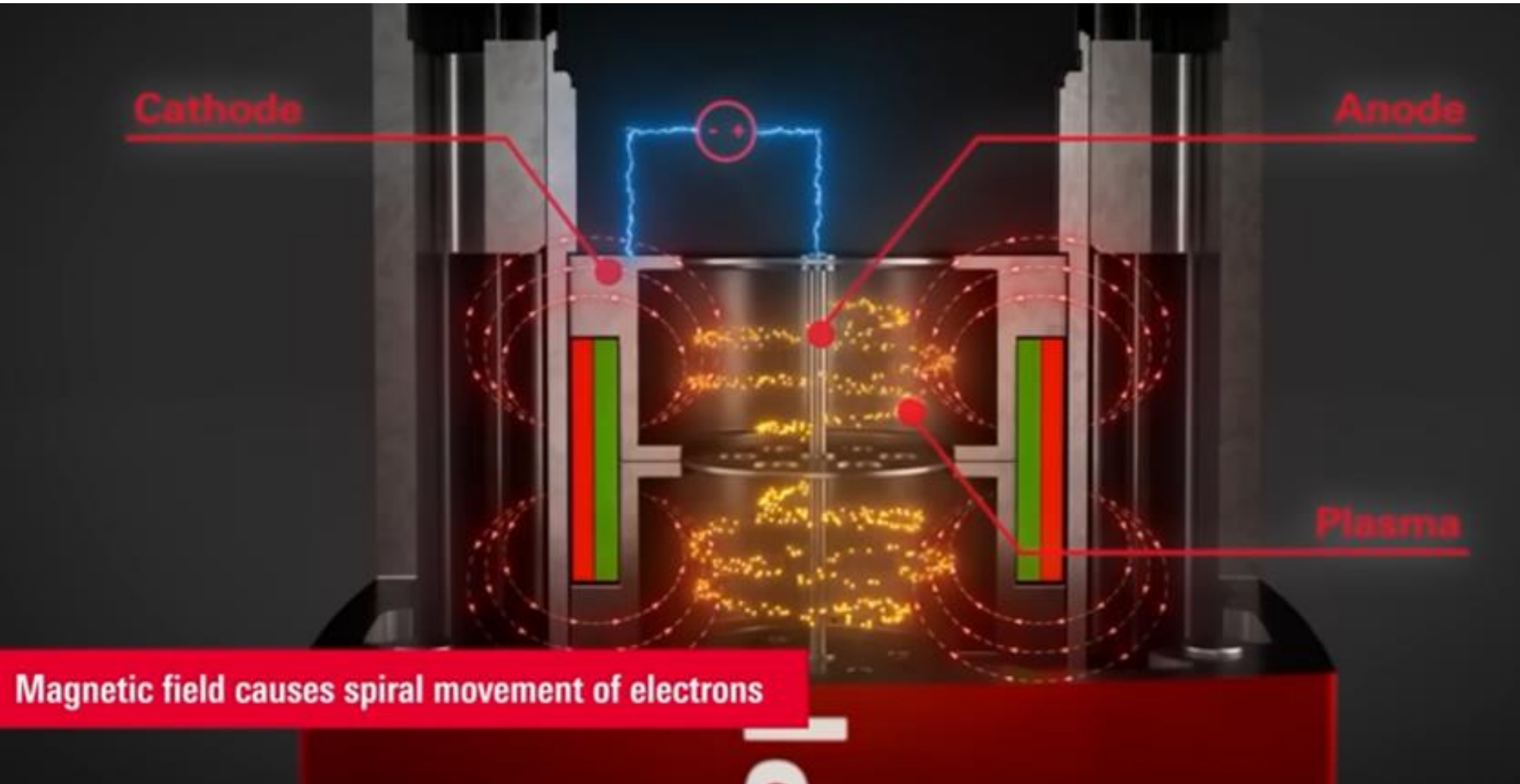
[Hot Cathode](#)

Vacuum Measurement Principles by Pfeiffer Vacuum

https://youtube.com/playlist?list=PLBUqdQZpQHAO_jpFTAnKP5srlxmD3Uw19&si=A5q8VFW3xILoFB0S

Cold Cathode

https://youtu.be/PiJku9rUdGE?si=o24R_N0NwvQ_93EK&t=29



Vacuum Measurement Principles. Playlist by Pfeiffer Vacuum

https://youtube.com/playlist?list=PLBUqdQZpQHAO_jpFTAnKP5srlxmD3Uw19&si=A5q8VFW3xLoFB0S

1. Температура

2. Тиск

3. Поле

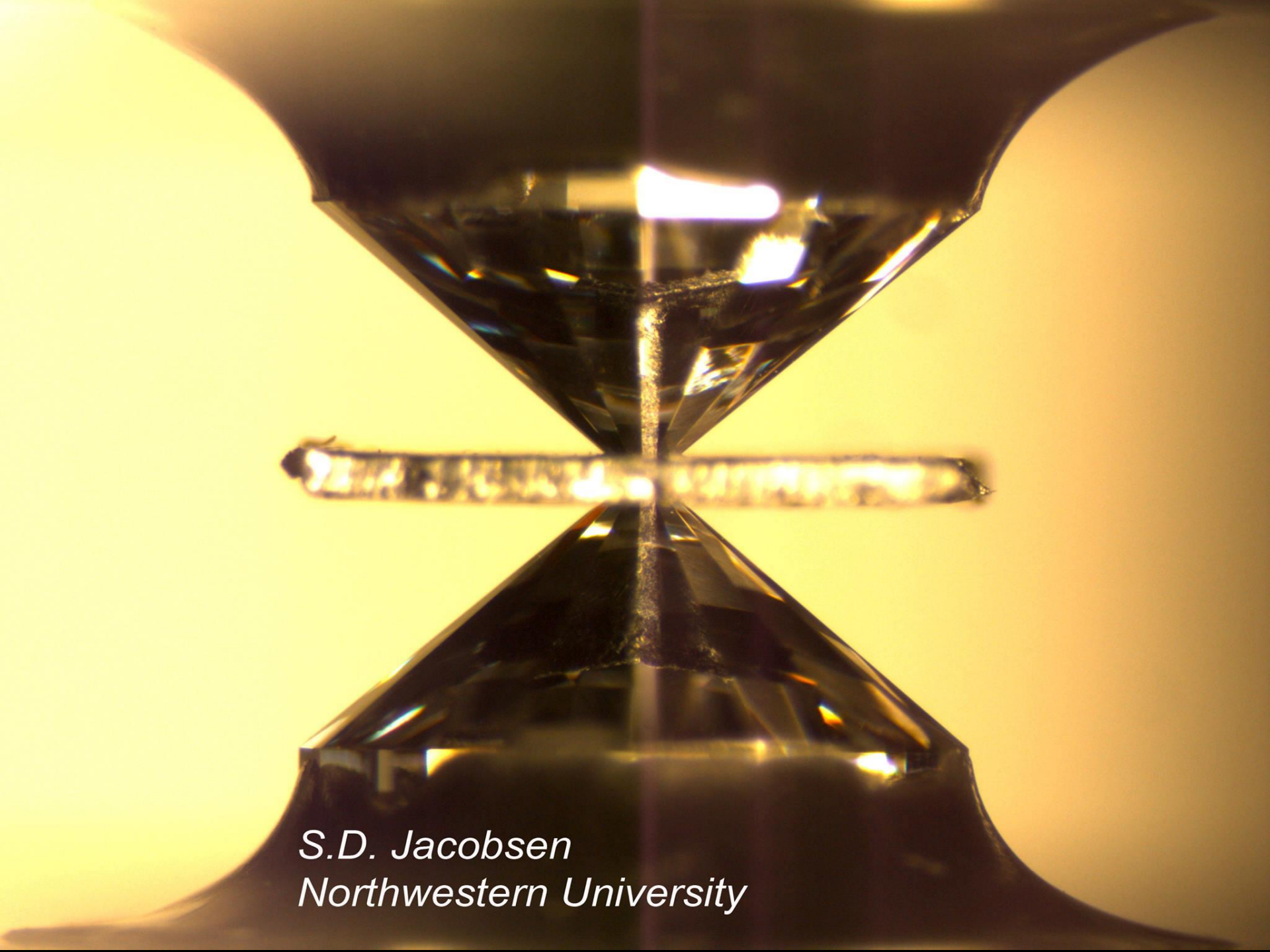
dc

Магнітне

Електричне

ac

Спектроскопії



*S.D. Jacobsen
Northwestern University*

Superconducting Elements

- In Bulk at Ambient Pressure
- At High Pressure
- In Modified Form

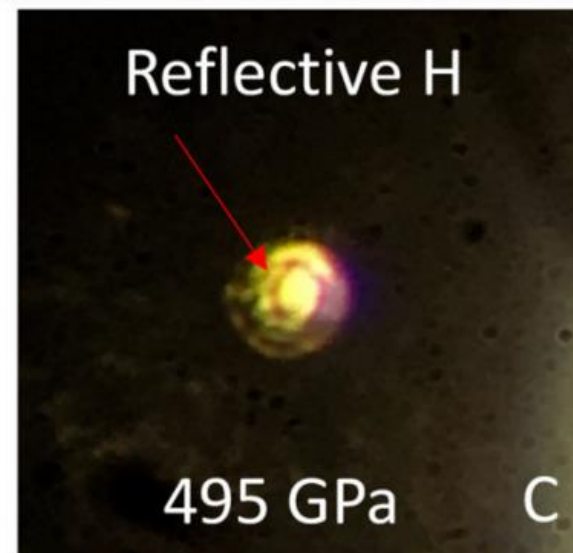
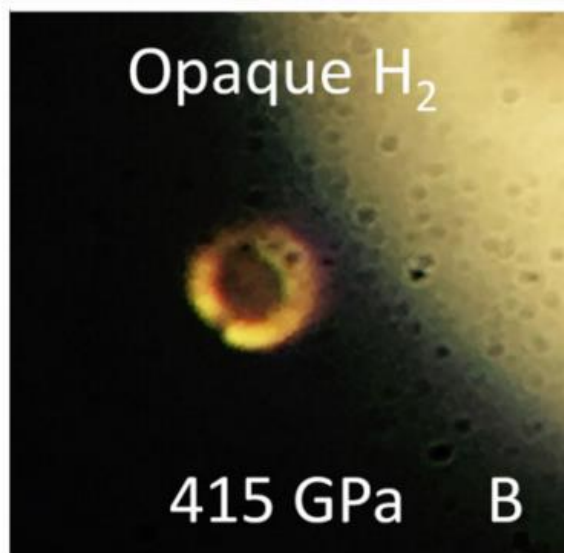
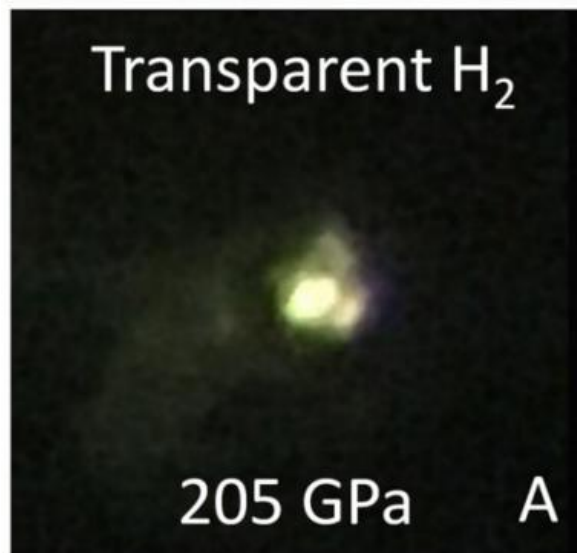
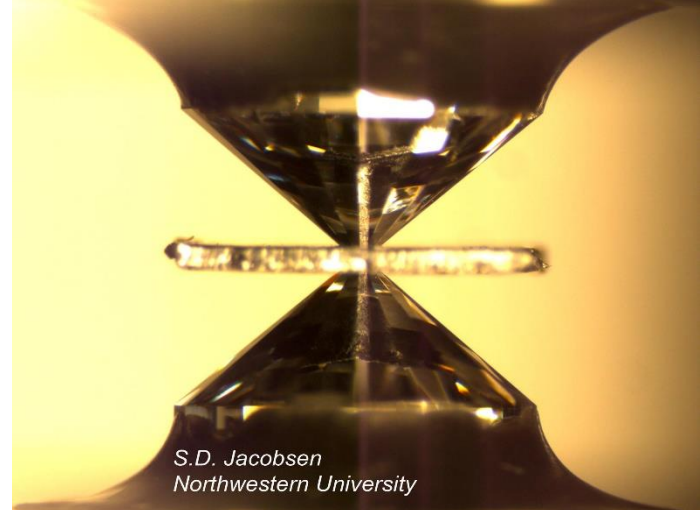
1	1	H																	2	2	He															
2	3	Li	4	Be																	5	6	7	8	9	10	Ne									
3	11	Na	12	Mg																	13	14	15	16	17	18	Ar									
4	19	K	20	Ca	21	Sc	22	Ti	23	V	24	Cr	25	Mn	26	Fe	27	Co	28	Ni	29	Cu	30	Zn	31	Ga	32	Ge	33	As	34	Se	35	Br	36	Kr
5	37	Rb	38	Sr	39	Y	40	Zr	41	Nb	42	Mo	43	Tc	44	Ru	45	Rh	46	Pd	47	Ag	48	Cd	49	In	50	Sn	51	Sb	52	Te	53	I	54	Xe
6	55	Cs	56	Ba	57	La	72	Hf	73	Ta	74	W	75	Re	76	Os	77	Ir	78	Pt	79	Au	80	Hg	81	Tl	82	Pb	83	Bi	84	Po	85	At	86	Rn
7	87	Fr	88	Ra	89	Ac	104	Rf	105	Ha	106	Sg	107	Bh	108	Hs	109	Mt	110	Ds	111	Rg	112	Uub												

58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103
Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

MH

10.2016: в комірці з діамантовими
ковадлами при тиску близько
495 ГПа ~ 5 млн атмосфер

$500 \text{ ГПа} / (30 \text{ мкм})^2 \sim 36 \text{ кг}$



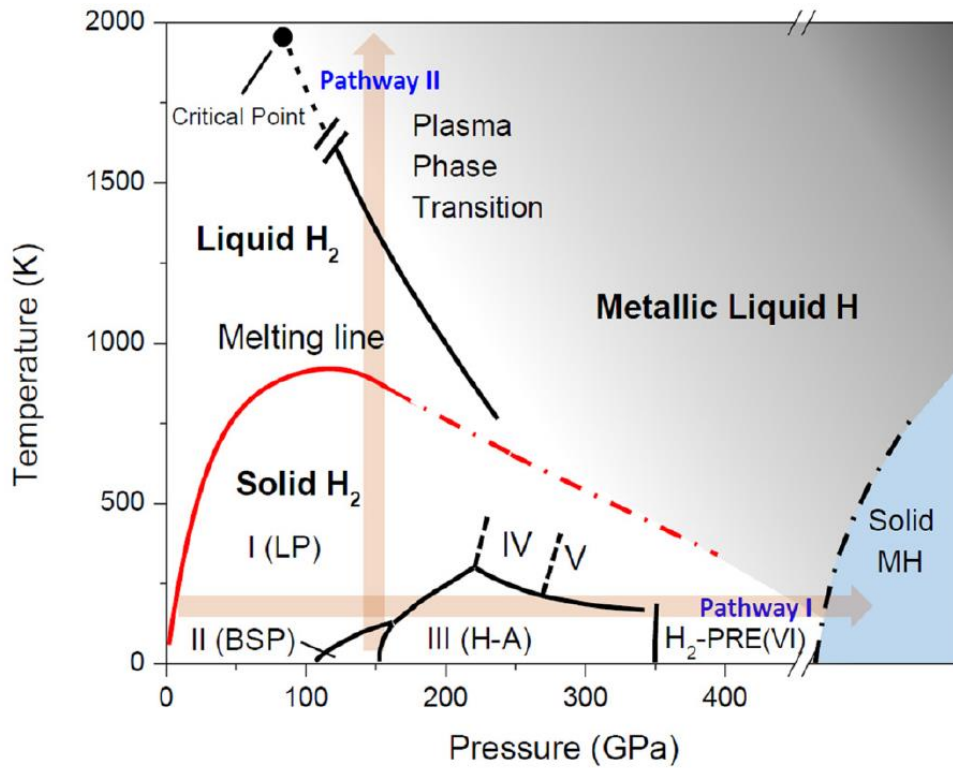
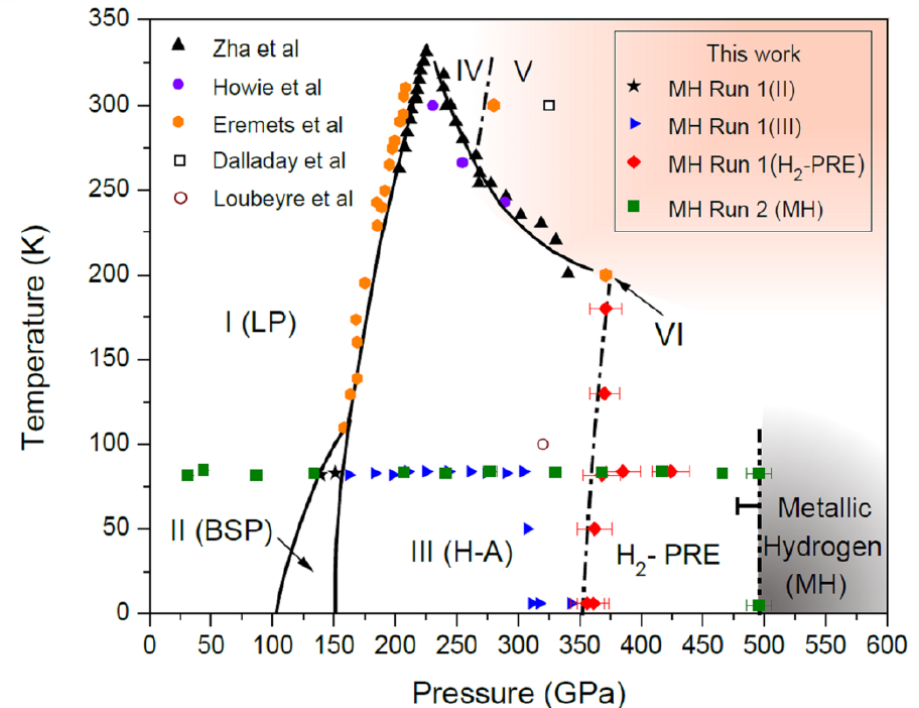


Fig. 1. Experimental/theoretical P-T phase diagram of hydrogen. Shown are two pathways to metallic hydrogen, I the low temperature pathway and II the high temperature pathway. In pathway I phases for pure para hydrogen have lettered names: LP (low pressure), BSP (broken symmetry phase) and H-A (hydrogen-A). The plasma phase transition (PPT) is the transition to liquid metallic atomic hydrogen.

Dias & Silvera, *Science* (2017)

Fig. 4. The T-P phase diagram of hydrogen along Pathway I of Fig. 1. The data shows the thermodynamic pathway followed for our measurements. We also show other recent data for the phases at lower pressures from Zha *et al.* (40), Howie *et al.*, Eremets *et al.* (25), and Dias *et al.* (24). A transition claimed by Dalladay-Simpson *et al.* (41) at 325 GPa is plotted as a point, as is the earlier observation of black hydrogen by Loubeyre *et al.* (28).



Тиск

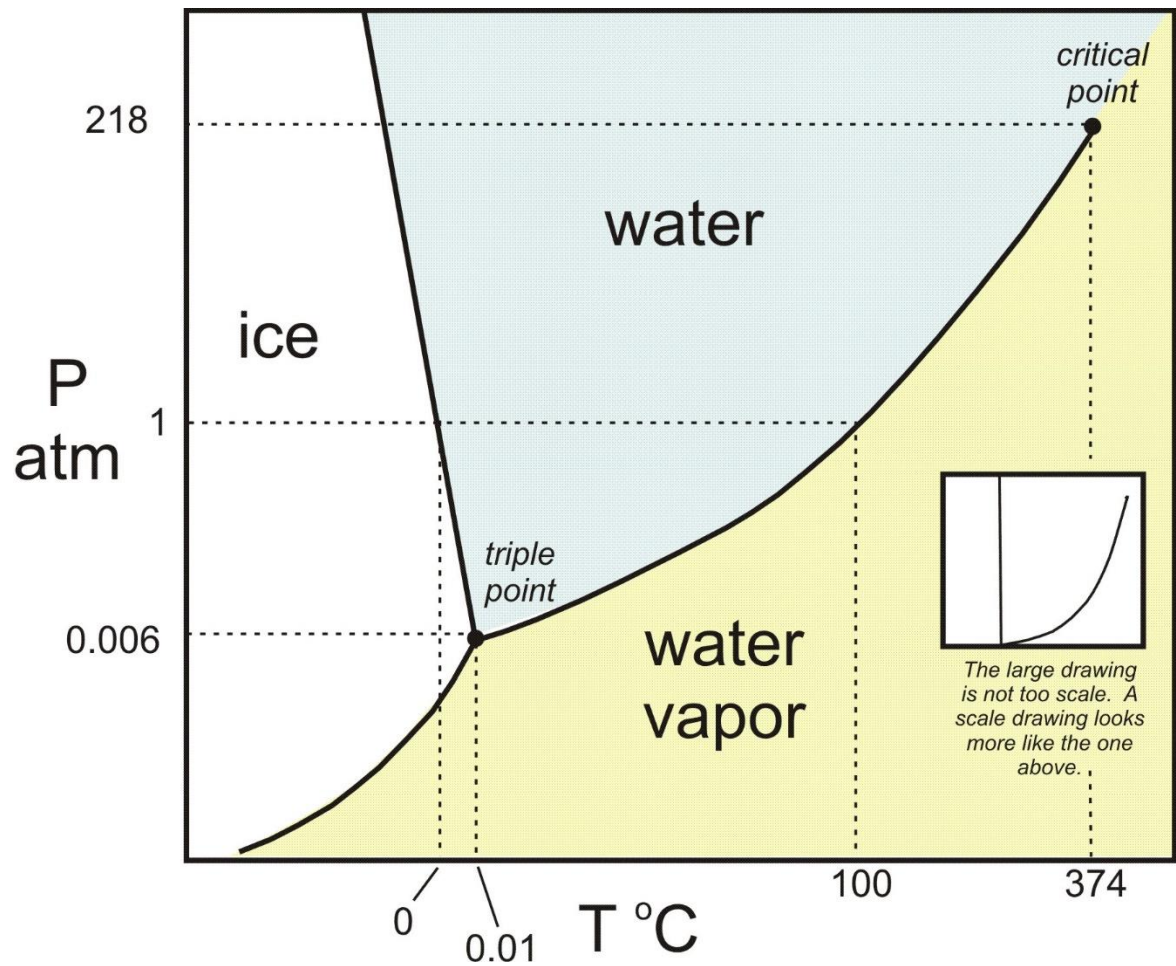


$5 \cdot 10^{-11}$ mbar < 20 orders > 500 GPa = $5 \cdot 10^9$ mbar

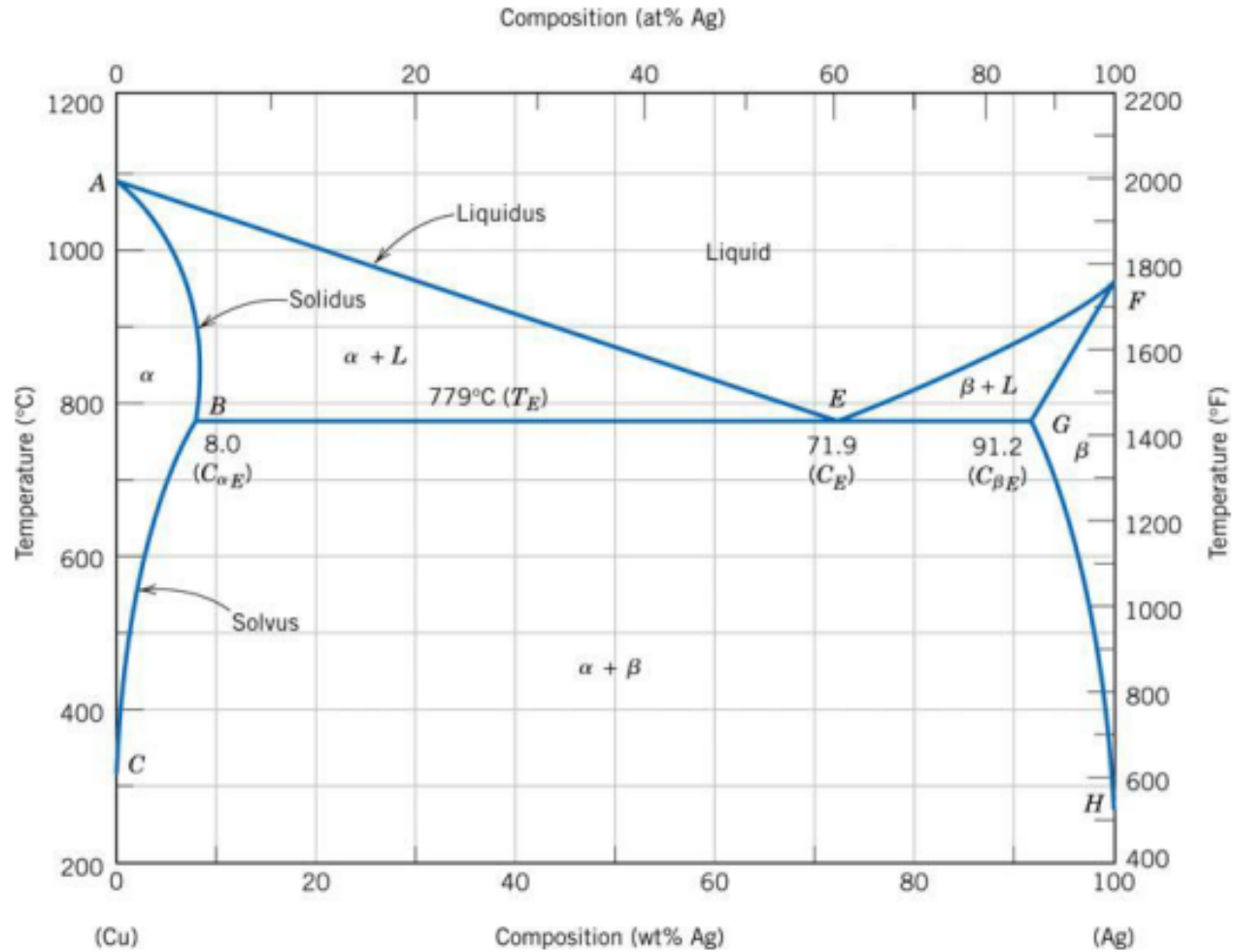


Condensed matter experiment

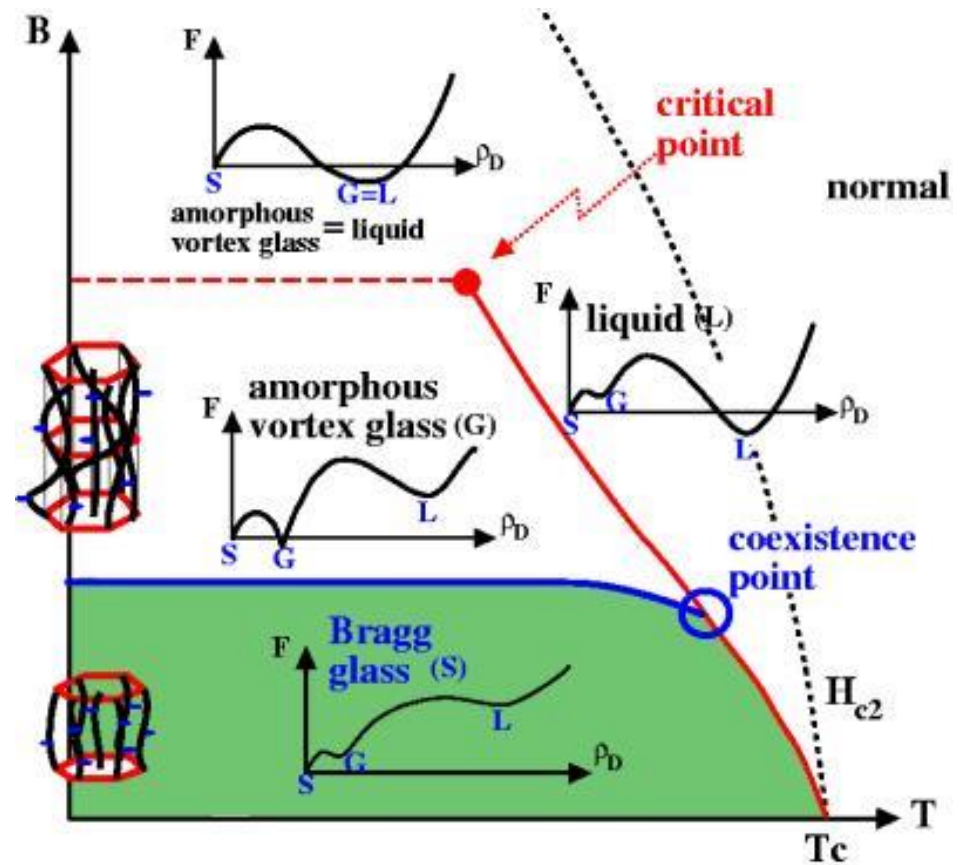
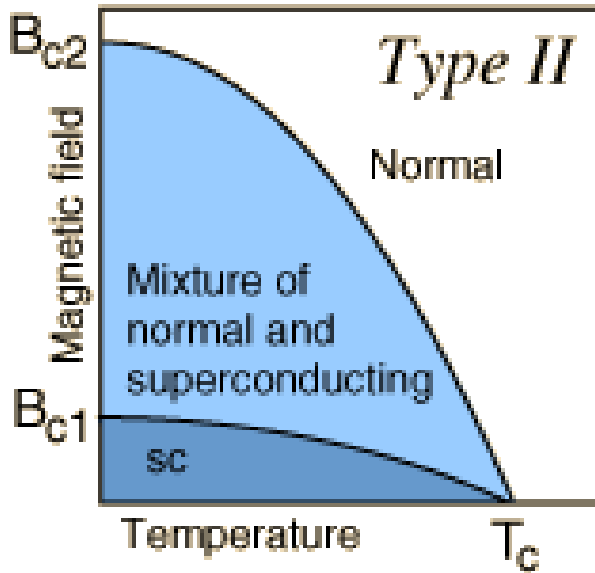
Фазові діаграми: вода (P - T діаграма)



Фазові діаграми: Cu-Ag сплав



B - T фазові діаграми: вихорова матерія



Контрольні питання

1. Для чого потрібен UHV?
2. Принцип дії турбомолекулярного насосу? Чим відрізняється від форвакуумного?
3. Чим цікавий металічний водень?
4. Якими бувають фазові діаграми?

1. Температура

2. Тиск + вимірювання
+ навантаження

3. Поле

dc

Магнітне

Електричне

ac

Збуджений стан: інверсна заселеність

Спектроскопії з імпульсною накачкою

Magnetic field

B-field

- Magnetic induction
- Magnetic flux density
- Magnetic field

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \frac{1}{c} \left(4\pi \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \right)$$

$$(\mathbf{J}_f + \mathbf{J}_b)$$

H-field

- Magnetic field intensity
- Magnetic field strength
- Magnetic field
- Magnetizing field

$$\nabla \times \mathbf{H} = \frac{1}{c} \left(4\pi \mathbf{J}_f + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \right)$$

Magnetic field

B-field

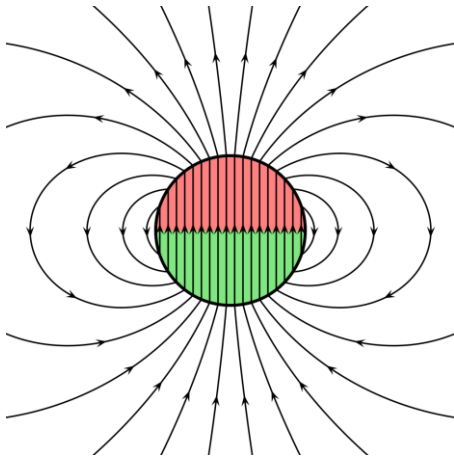
$$1 \text{ T} = 10^4 \text{ G}$$

$$1 \text{ mT} = 10 \text{ G}$$

H-field

$$1 \text{ kA/m} = 4\pi \text{ Oe}$$

$$1 \text{ kA/m} \approx 12 \text{ Oe}$$



+ формули, розмагнічувальний фактор,
масштаб усереднення

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ [N/A}^2 \text{ or H/m]}$$

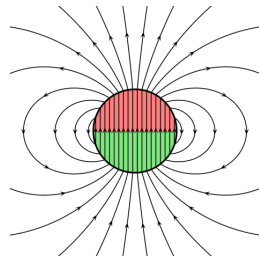
Розмагнічувальний фактор / Demagnetizing factor

$$B = \mu H = \mu_0 (M + H)$$

$$M = \frac{B}{\mu_0} - H = \chi H$$

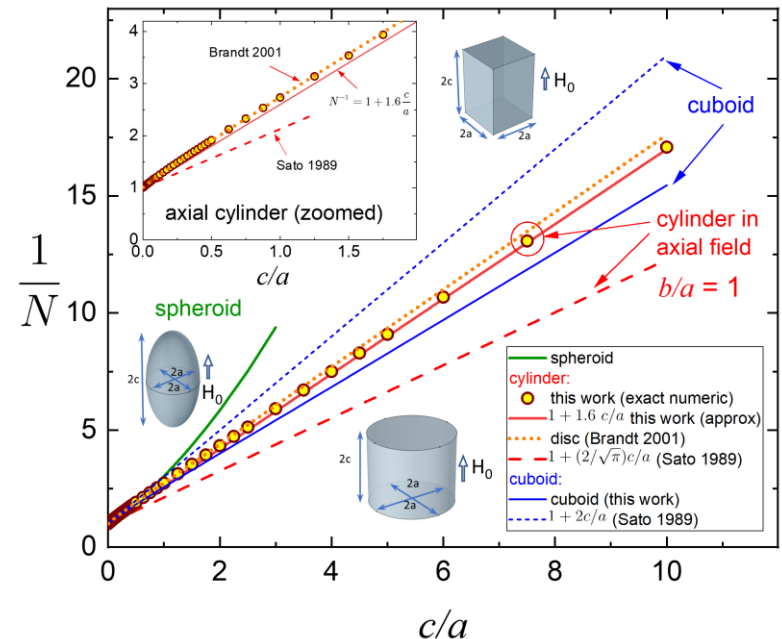
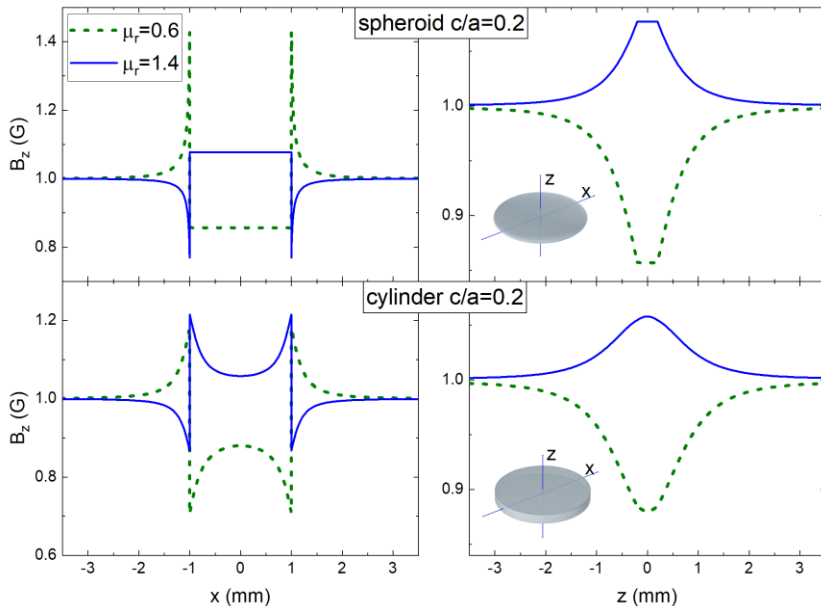
$$H = H_0 - \underline{N} M$$

$$M = \frac{\chi}{1 + \chi N} H_0$$

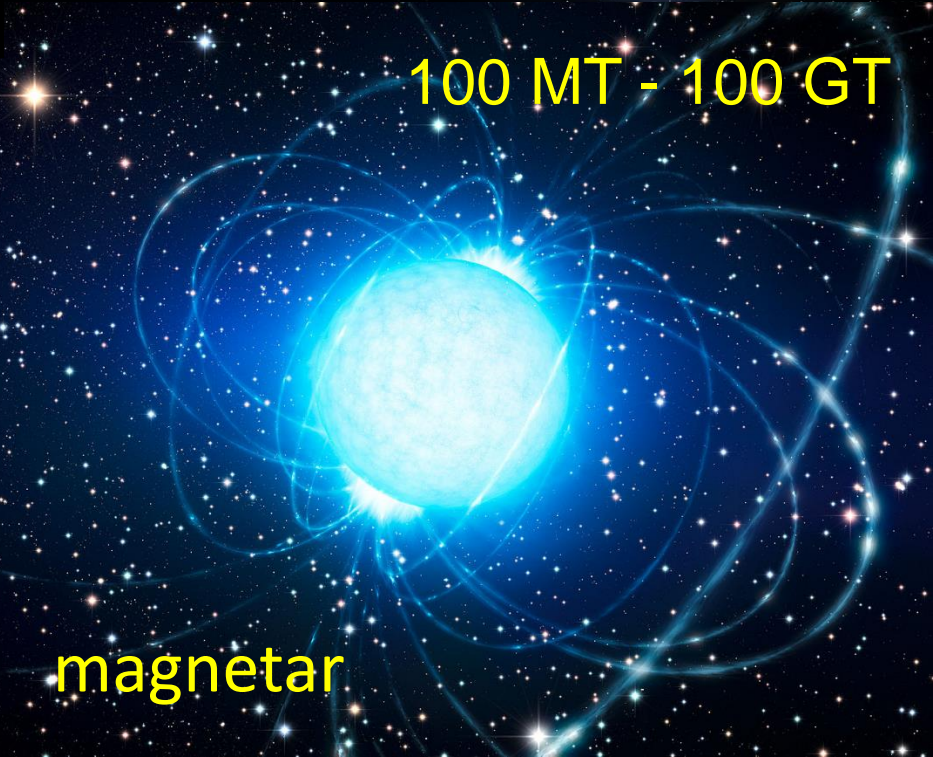
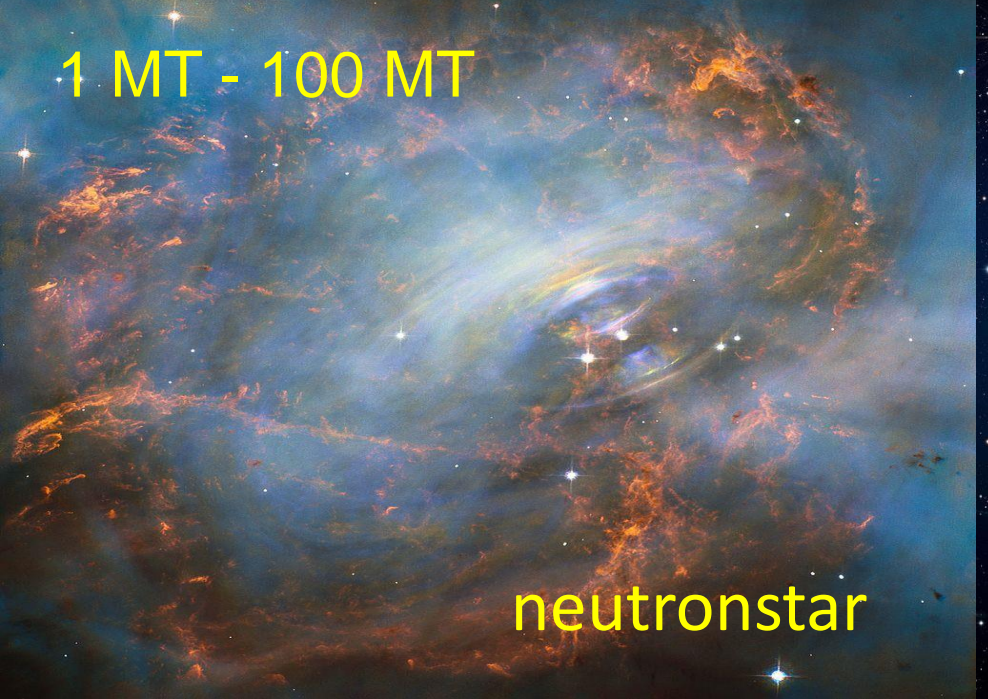
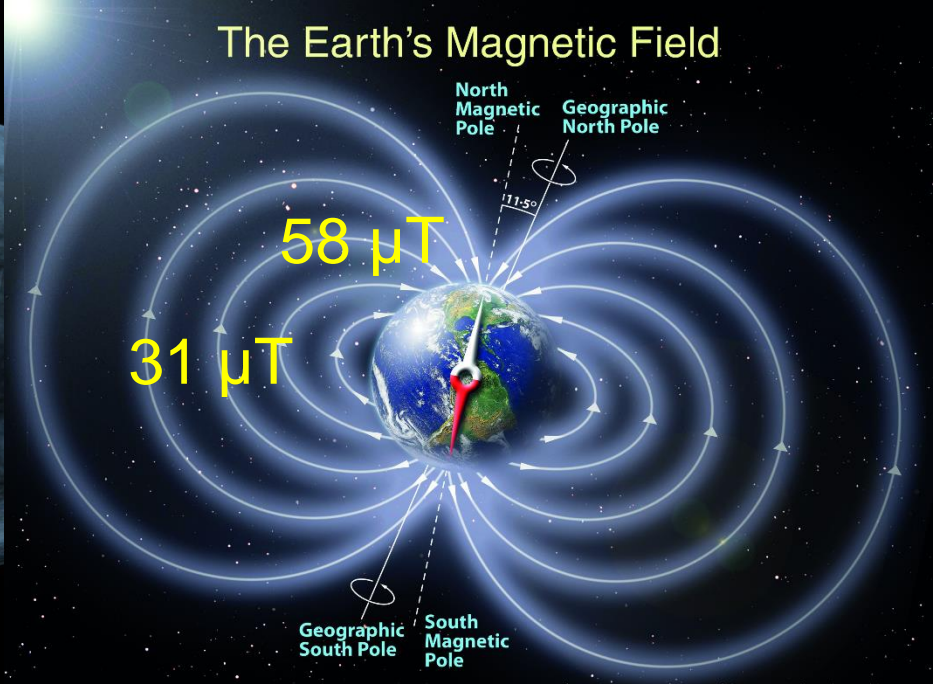
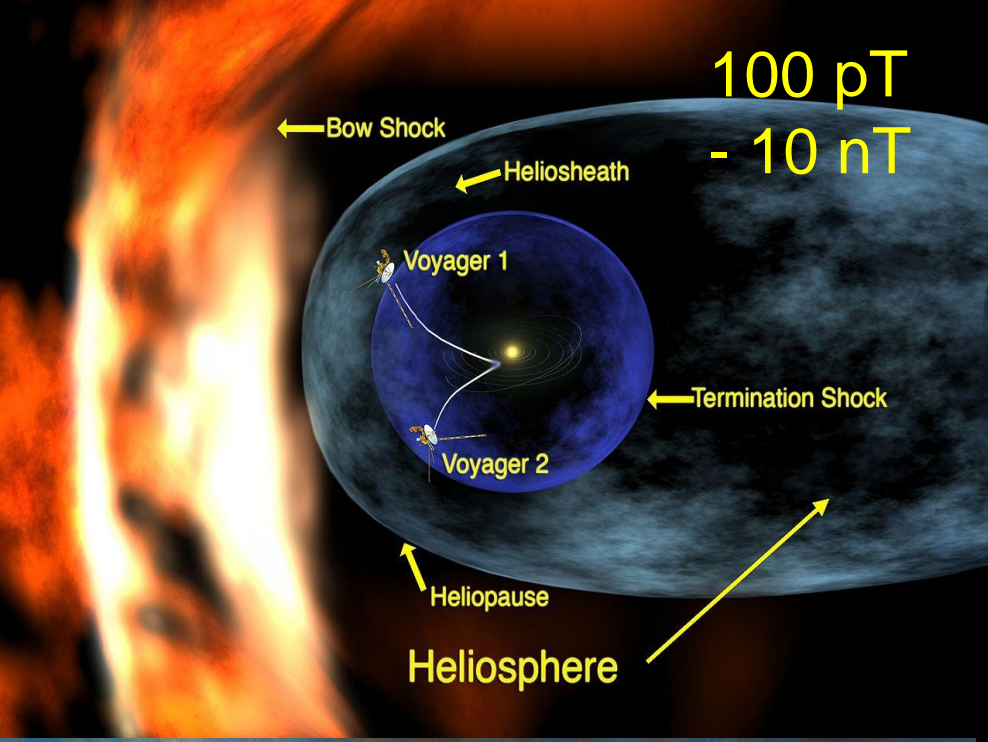


Demagnetizing Factors

<p>① Toroid</p> <p>No free poles $\Rightarrow N_d = 0$ so Rowland ring was a great idea!</p>	<p>② Cylinder (∞)</p> <p>$N_{d_z} = 0$ since pole separation $\Rightarrow \infty$ $H_d = \frac{P}{r} = 0$ $\Rightarrow N_{d_x} = N_{d_y} = \frac{1}{2}$</p>
<p>③ Sphere</p> <p>From symmetry $N_{d_x} = N_{d_y} = N_{d_z} = \frac{1}{3}$ $N_{d_x} + N_{d_y} + N_{d_z} = 1$</p>	<p>④ Infinite sheet (\sim thin film)</p> <p>∞ distance between the poles on x and y axes. $\Rightarrow N_{d_x} = N_{d_y} = 0$ $N_{d_z} = 1$</p>



Factor (T)	SI prefix	Value (SI units)	Value (CGS units)	Item
10^{-18}	attotesla	5 aT	50 fG	SQUID magnetometers on Gravity Probe B gyroscopes measure fields at this level over several days of averaged measurements
10^{-15}	femtotesla	2 fT	20 pG	SQUID magnetometers on Gravity Probe B gyros measure fields at this level in about one second
10^{-12}	picotesla	100 fT to1 pT	1 nG to 10 nG	Human brain magnetic field
10^{-9}	nanotesla	100 pT to10 nT	1 μG to100 μG	Magnetic field strength in the heliosphere
10^{-6}	microtesla	4 μT to 8 μT	40 mG to80 mG	Magnetic field produced by a microwave oven , in use, at a distance of 30 cm
10^{-5}		31 μT	310 mG	Strength of Earth's magnetic field at 0° latitude (on the equator)
		58 μT	580 mG	Strength of Earth's magnetic field at 50° latitude
10^{-3}	millitesla	5 mT	50 G	The strength of a typical refrigerator magnet
10^0	tesla	1.25 T	12.5 kG	Strength of a modern neodymium–iron–boron (Nd₂Fe₁₄B) rare earth magnet.
10^1	decatesla	16 T	160 kG	Strength used to levitate a frog
		45 T	450 kG	Strongest continuous magnetic field yet produced in a laboratory (National High Magnetic Field Laboratory , USA)
10^2	hectotesla	100 T	1 MG	Strongest pulsed non-destructive magnetic field produced in a laboratory, Pulsed Field Facility at National High Magnetic Field Laboratory's, Los Alamos National Laboratory , Los Alamos, NM, USA)
10^3	kilotesla	1 kT	100 MG	Strongest (pulsed) magnetic field ever obtained in a laboratory (Z machine , Sandia National Laboratories in Albuquerque, New Mexico)
10^6	megatesla	1 MT to100 MT	10 GG to1 TG	Strength of a neutron star
10^6	megatesla	2.2 MT	22 GG	Strongest pulsed magnetic field created by destructive measurements in Jablikia , Russia).
$10^8 - 10^{11}$	gigatesla	100 MT to100 GT	1 TG to 1 PG	Strength of a magnetar
10^{53}	N/A	2×10 ²⁹ YT	2×10 ³³ YG	Planck magnetic field strength



A Room with the Lowest Magnetic Field in the Solar System

TU Munich

H / 7 000 000



- to measure the electric dipole moment of the neutron
- to explain physics beyond our Standard Model
- measuring magnetic signals from the brain with SQUIDs
- the design and testing of SQUIDs, superconducting detectors, and low-noise electronics

A large-scale magnetic shield with 10^6 damping at mHz frequencies
J. Appl. Phys. **117**, 183903 (2015)

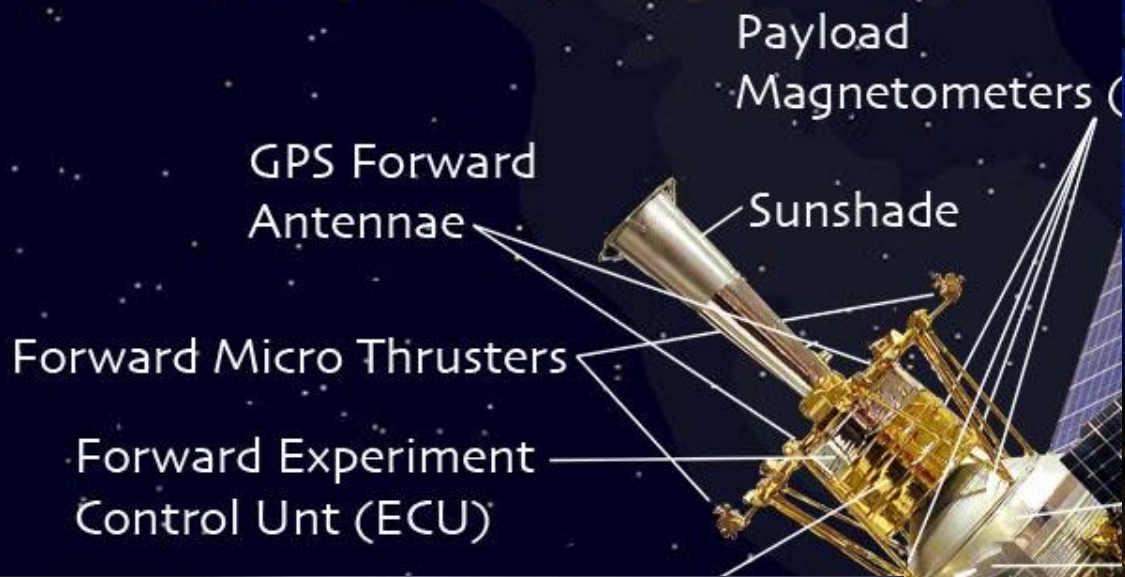
The Gravity Probe B Spacecraft

$$5 \text{ aT} = 5 \times 10^{-18} \text{ T}$$

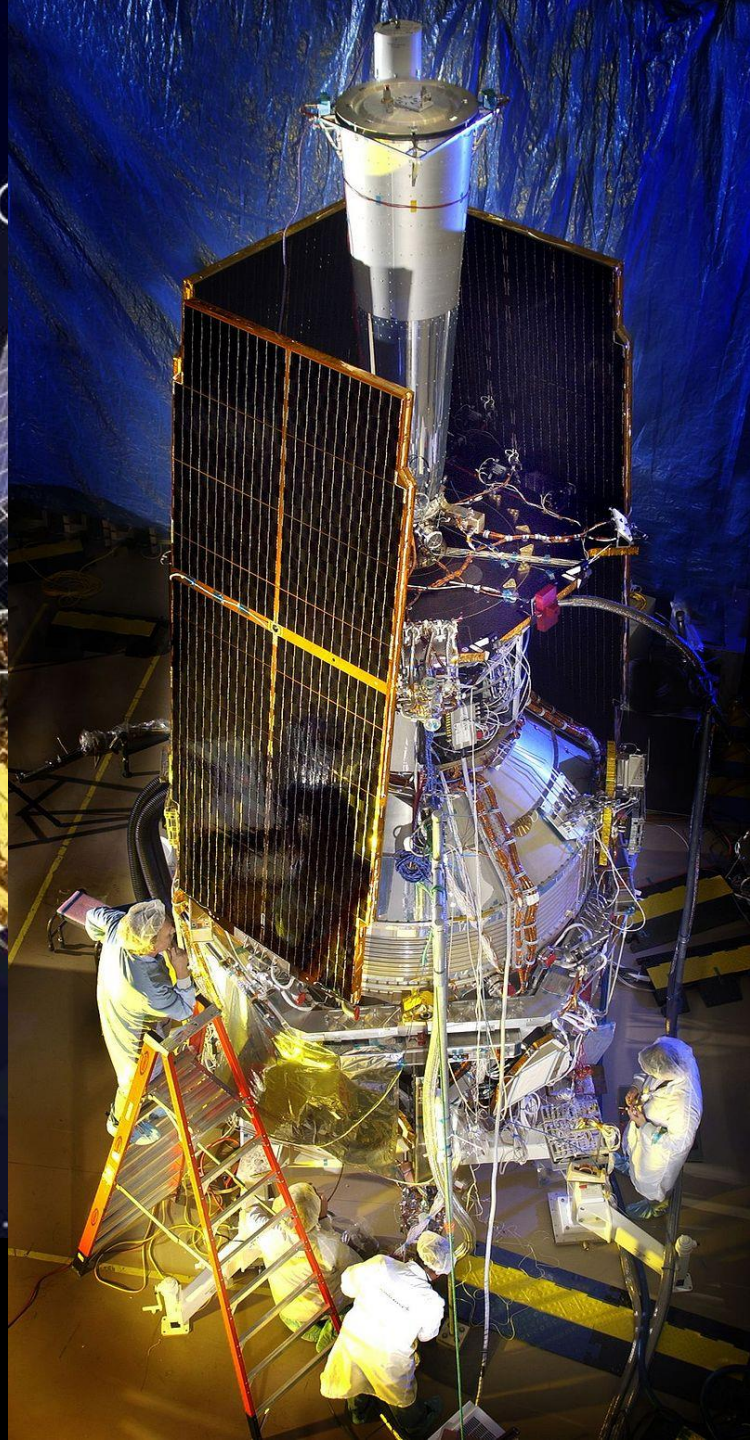


- https://en.wikipedia.org/wiki/Gravity_Probe_B
- Everitt; et al. (2011). Gravity Probe B: Final Results of a Space Experiment to Test General Relativity. *Physical Review Letters*. **106** (22): 221101. [arXiv:1105.3456](https://arxiv.org/abs/1105.3456)

The Gravity Probe B Spacecraft



gement (GMA)

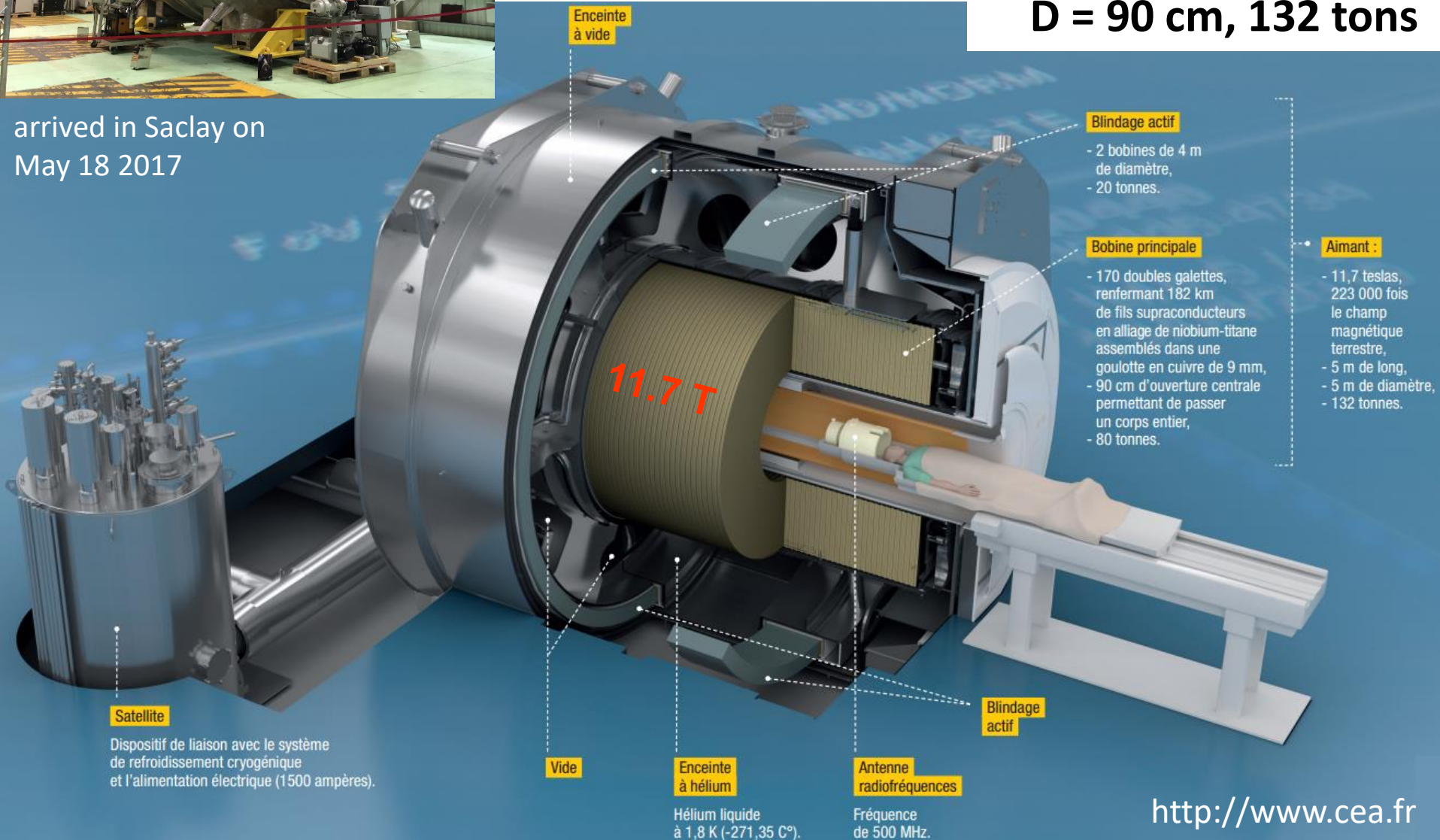


NeuroSpin research facility at the CEA's Paris-Saclay Center

NbTi @ 1.8 K -> 11.7 T
D = 90 cm, 132 tons

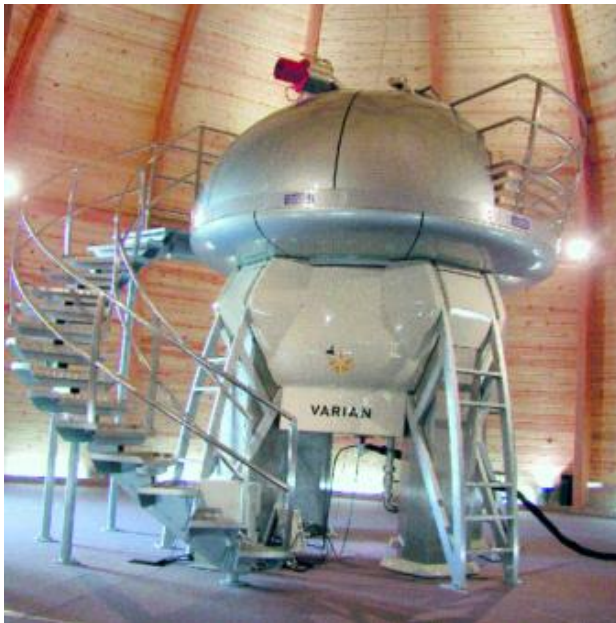


arrived in Saclay on
May 18 2017

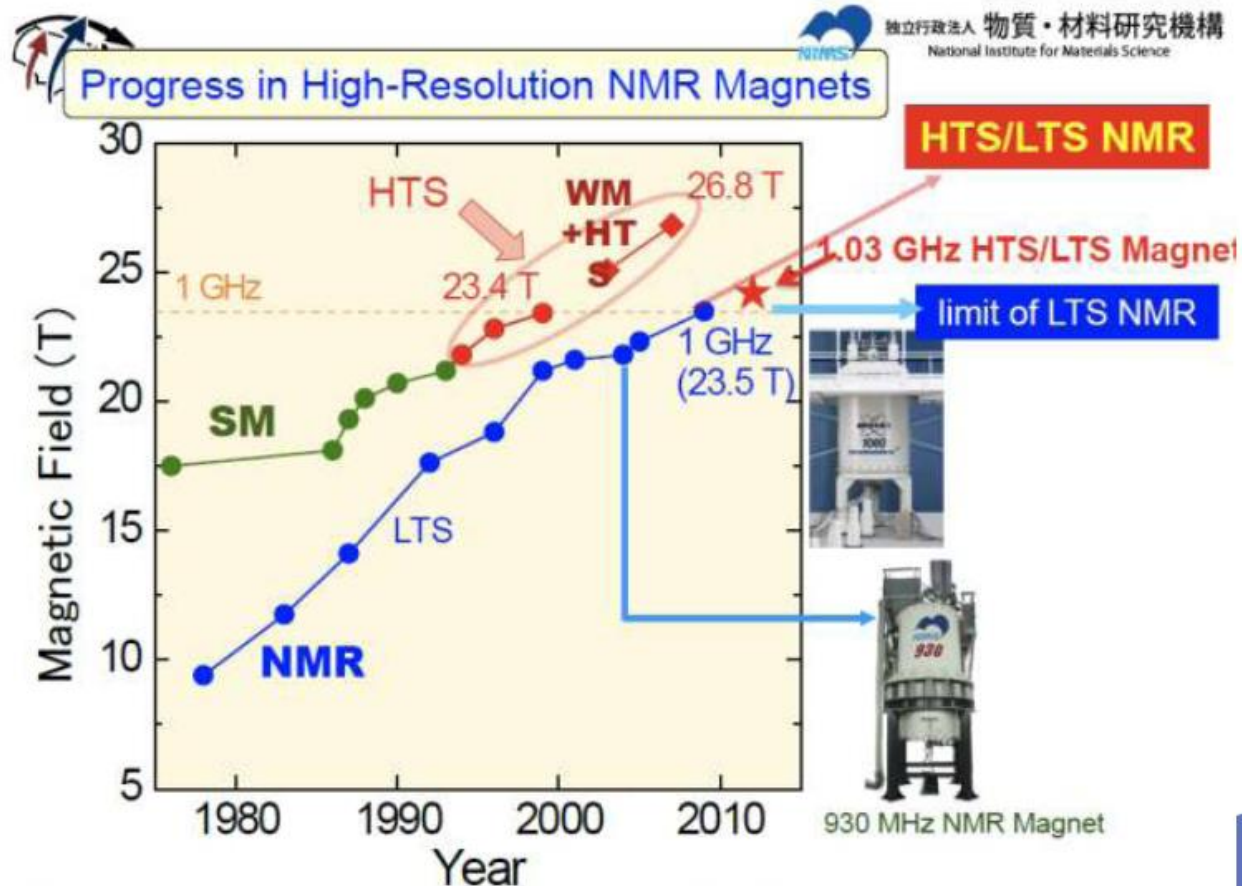


ЯМР-спектрометри

біологи готові на все щоб отримати високі поля
але потенціал НТНП - вже вичерпано



900 МГц надпровідний ЯМР
для вивчення біологічних
макромолекул в
Yokohama City University



dc magnetic field

16 T

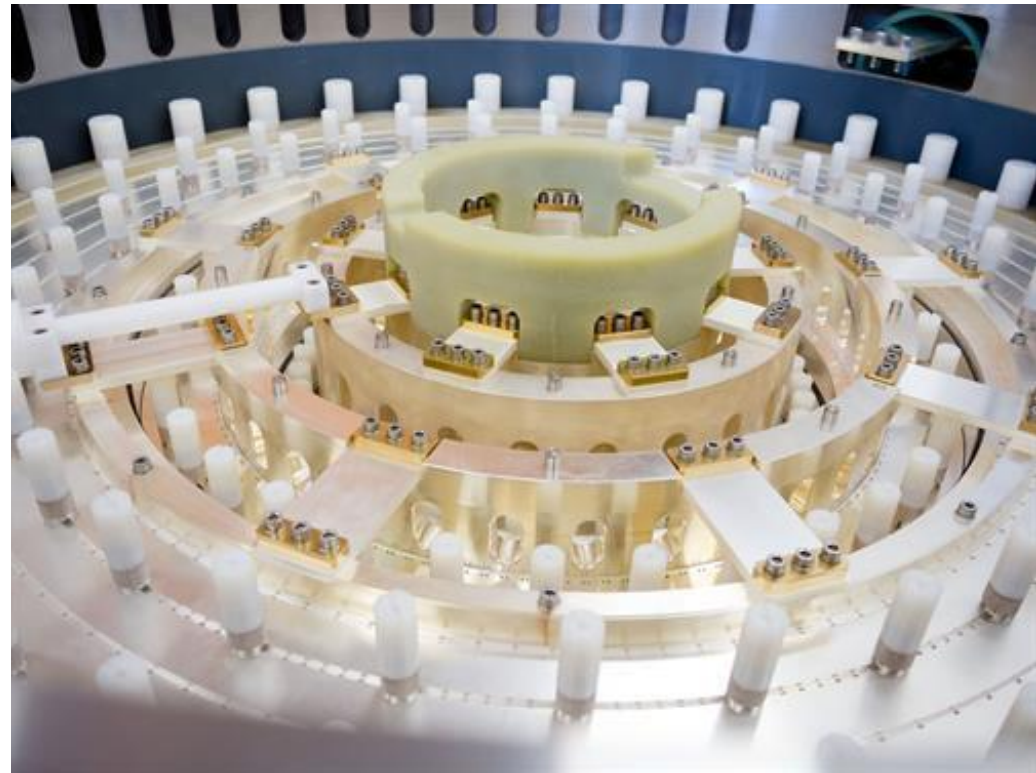


High Field Magnet Laboratory

@ University of Nijmegen



2014
HFML sets world record
with a new **37.5 tesla**
magnet



National High Magnetic Field Lab, Los Alamos National Laboratory

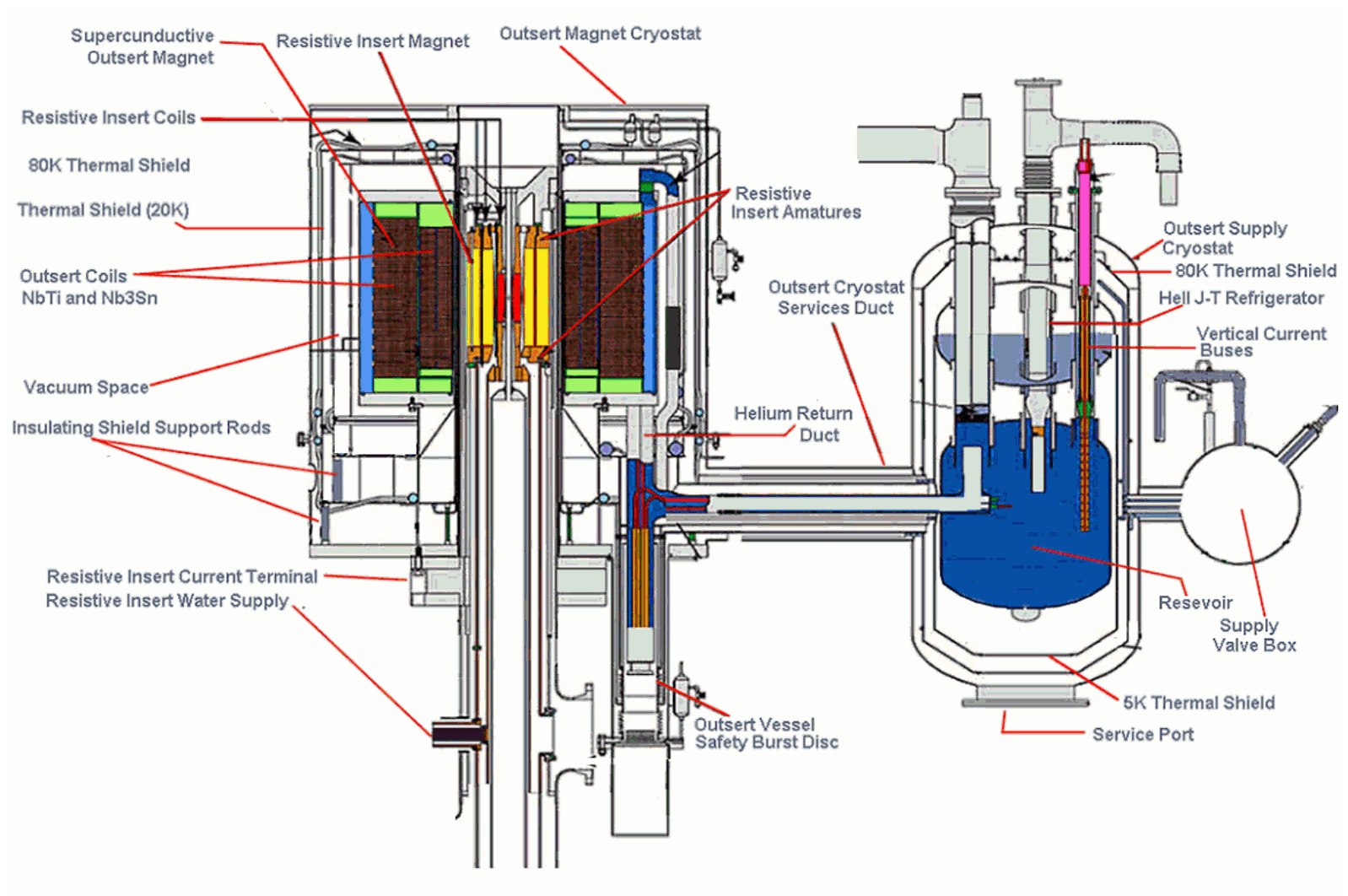


Diagram of the **45 tesla** hybrid magnet

Chinese Academy of Sciences' Steady High Magnetic Field Facility (SHMFF)



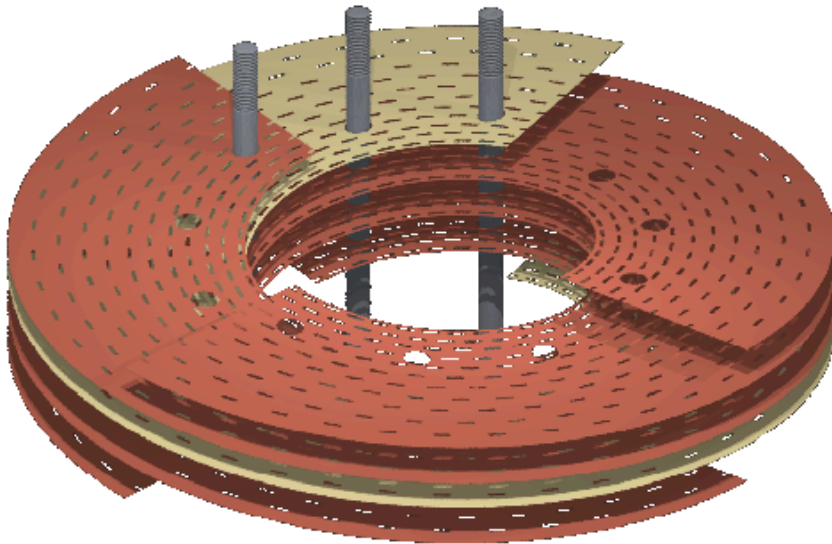
The hybrid magnet that achieved a record 45.22 tesla

<https://www.sciencealert.com/scientists-just-broke-the-world-record-for-the-most-powerful-stable-magnetic-field>

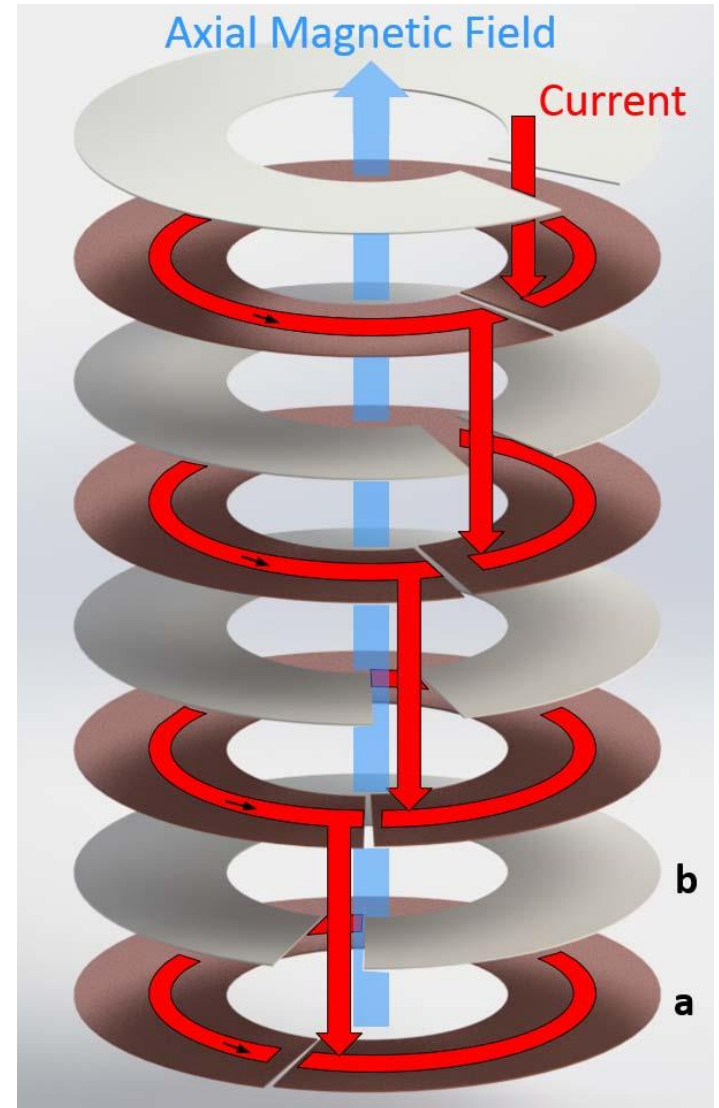
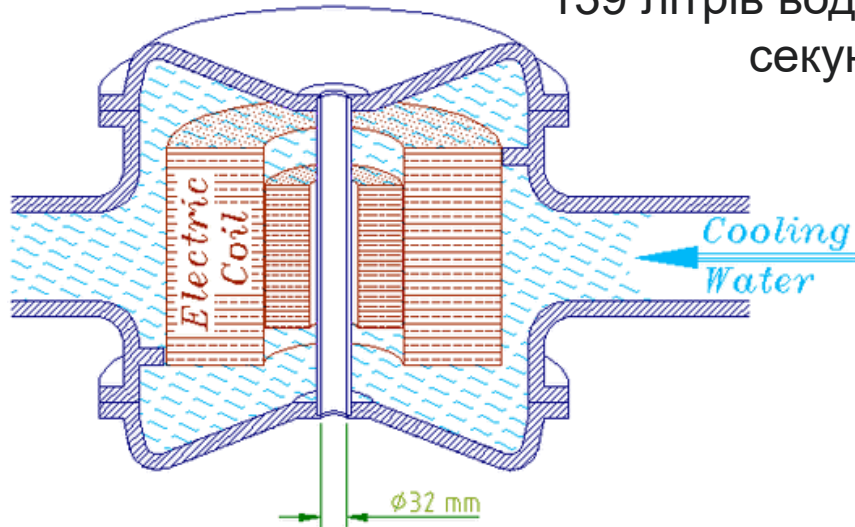
15 August 2022

Bitter electromagnets

36.2 Тл (2011) - National High Magnetic Field Laboratory (Tallahassee)

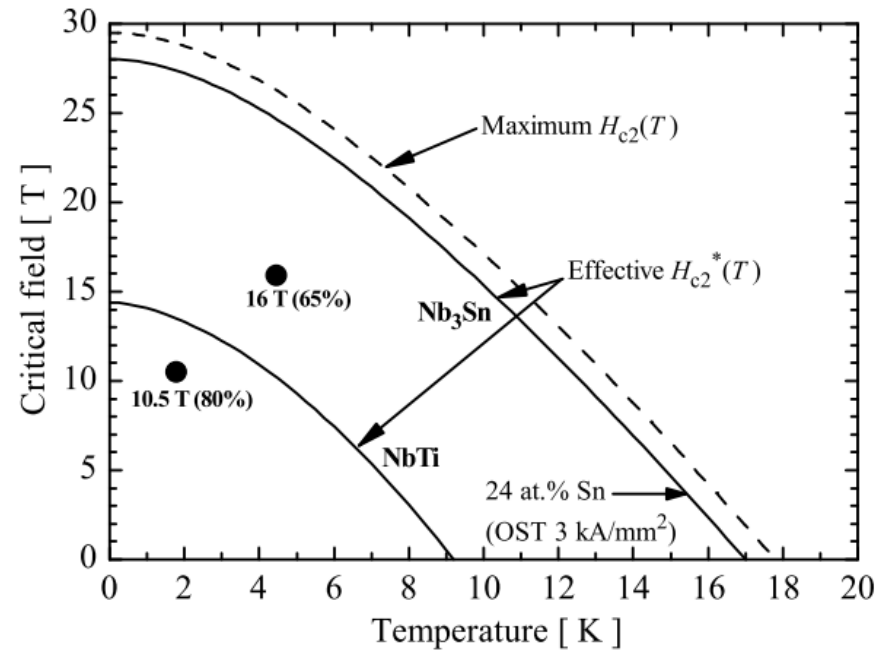
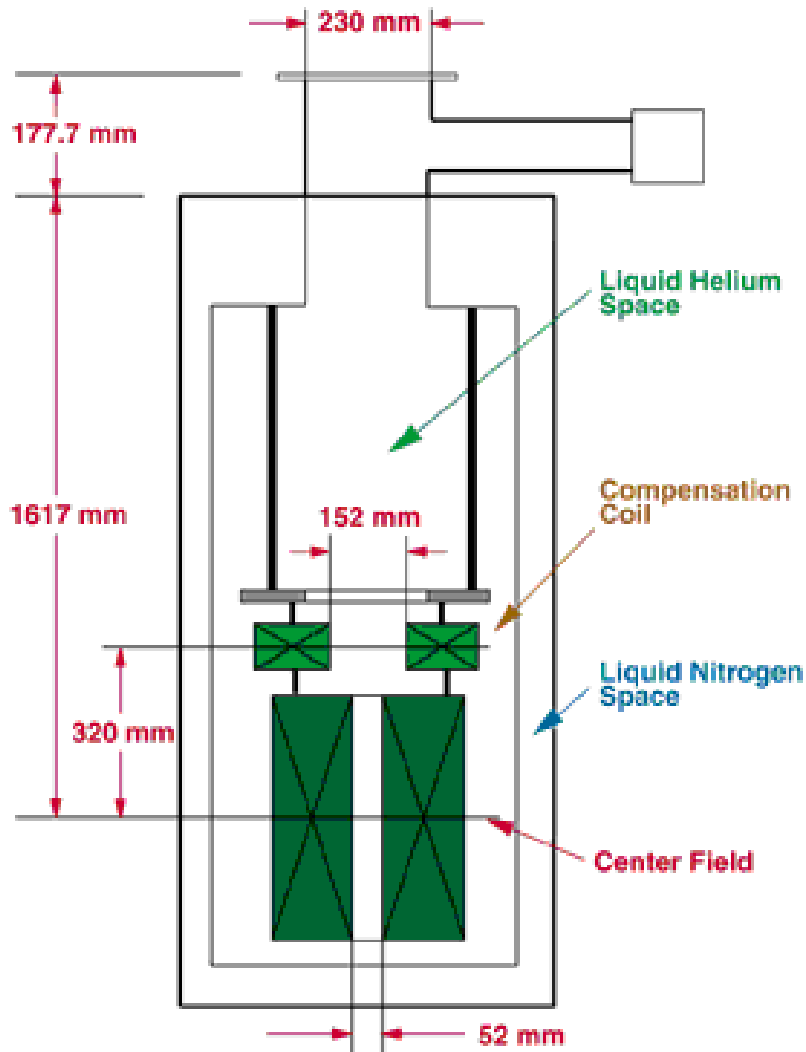


19,6 МВТ,
139 літрів води в
секунду



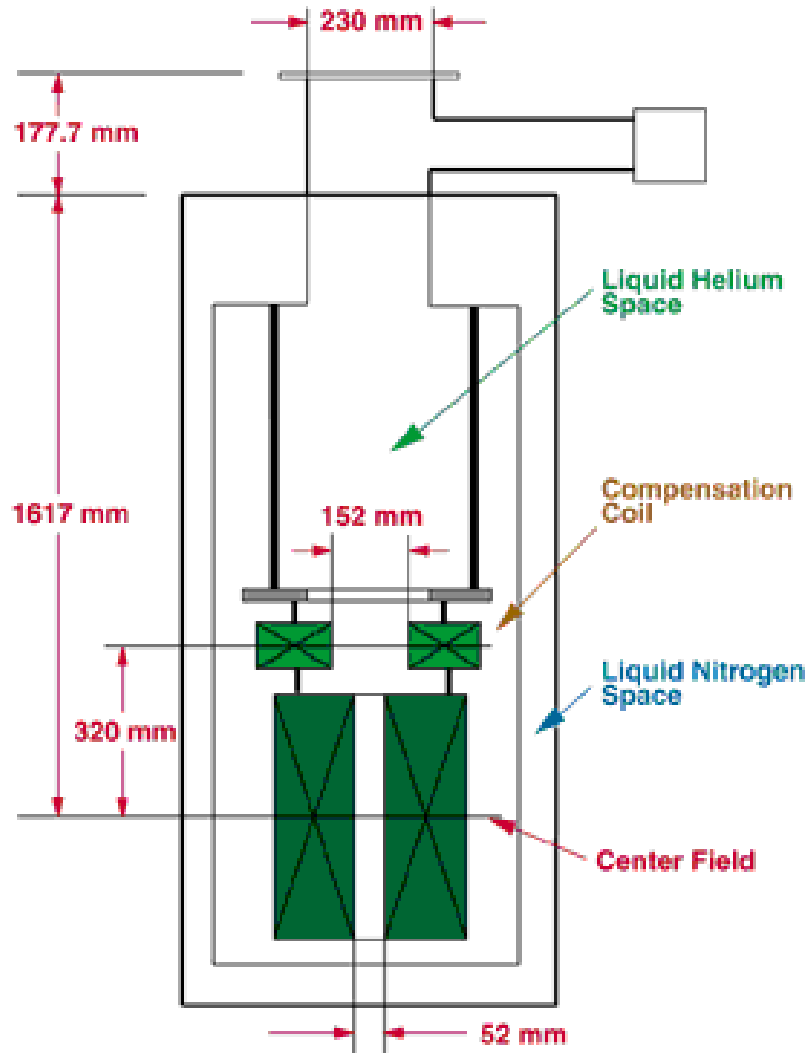
Superconducting magnets

20T Superconducting Magnet



Superconducting magnets

20T Superconducting Magnet



16T Magnet at KAU/IMP

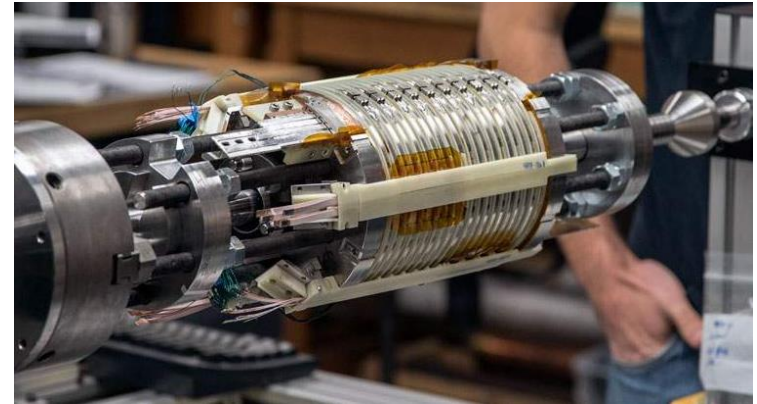


Superconducting magnets

32 Tesla

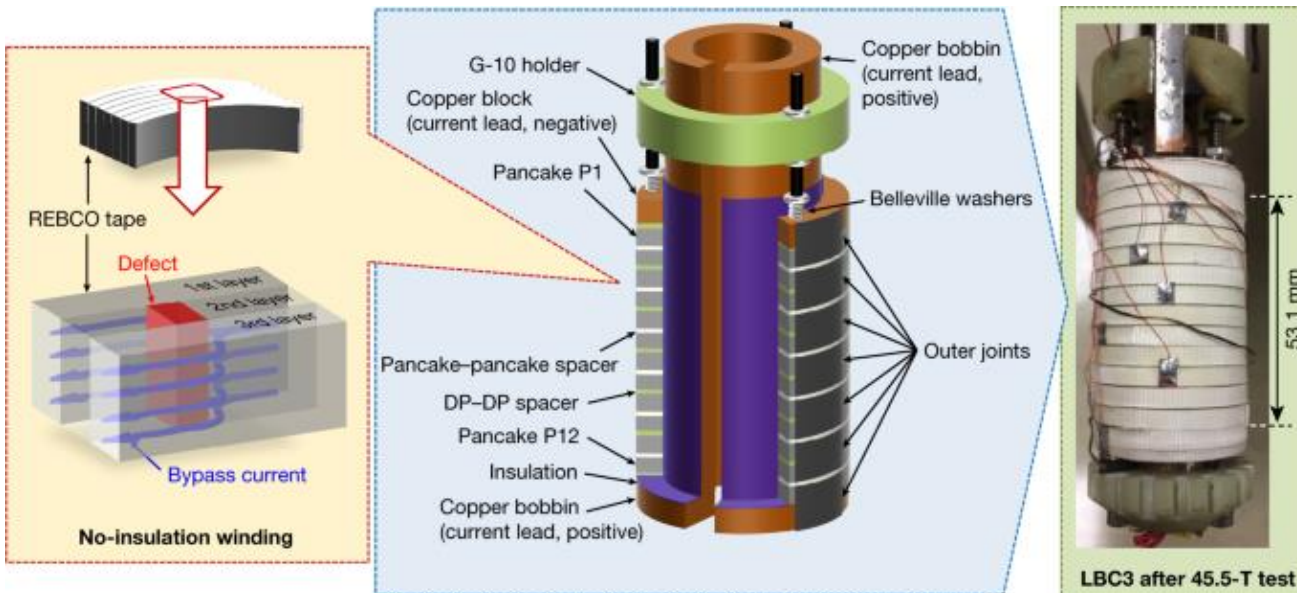
All-Superconducting
Magnet:

YBCO (2 coils),
NbTi (3 coils)



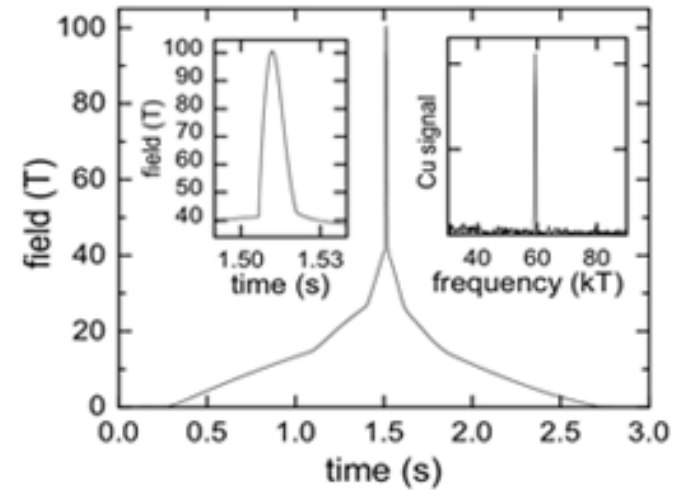
<https://nationalmaglab.org/education-magnet-academy/teachers/32-tesla-scm>

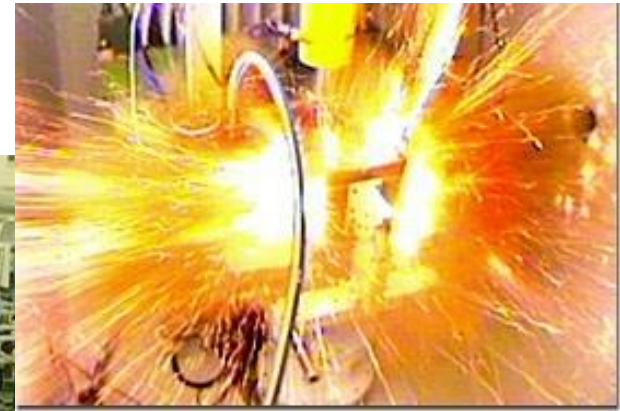
45.5-tesla direct-current magnetic field generated with a high-temperature superconducting magnet. *Nature* **570**, 496 (2019)

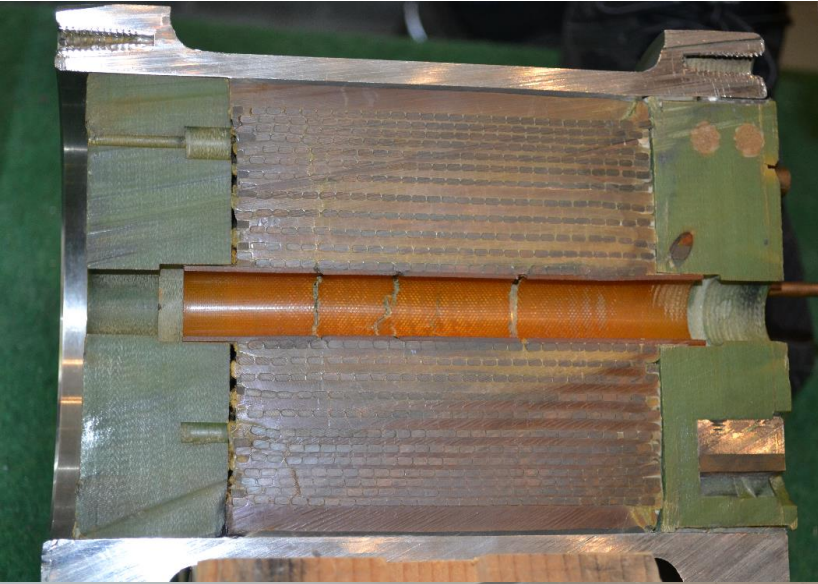


Pulsed Field Facility @ National High Magnetic Field Lab, Los Alamos National Laboratory

RECORD: 100 T







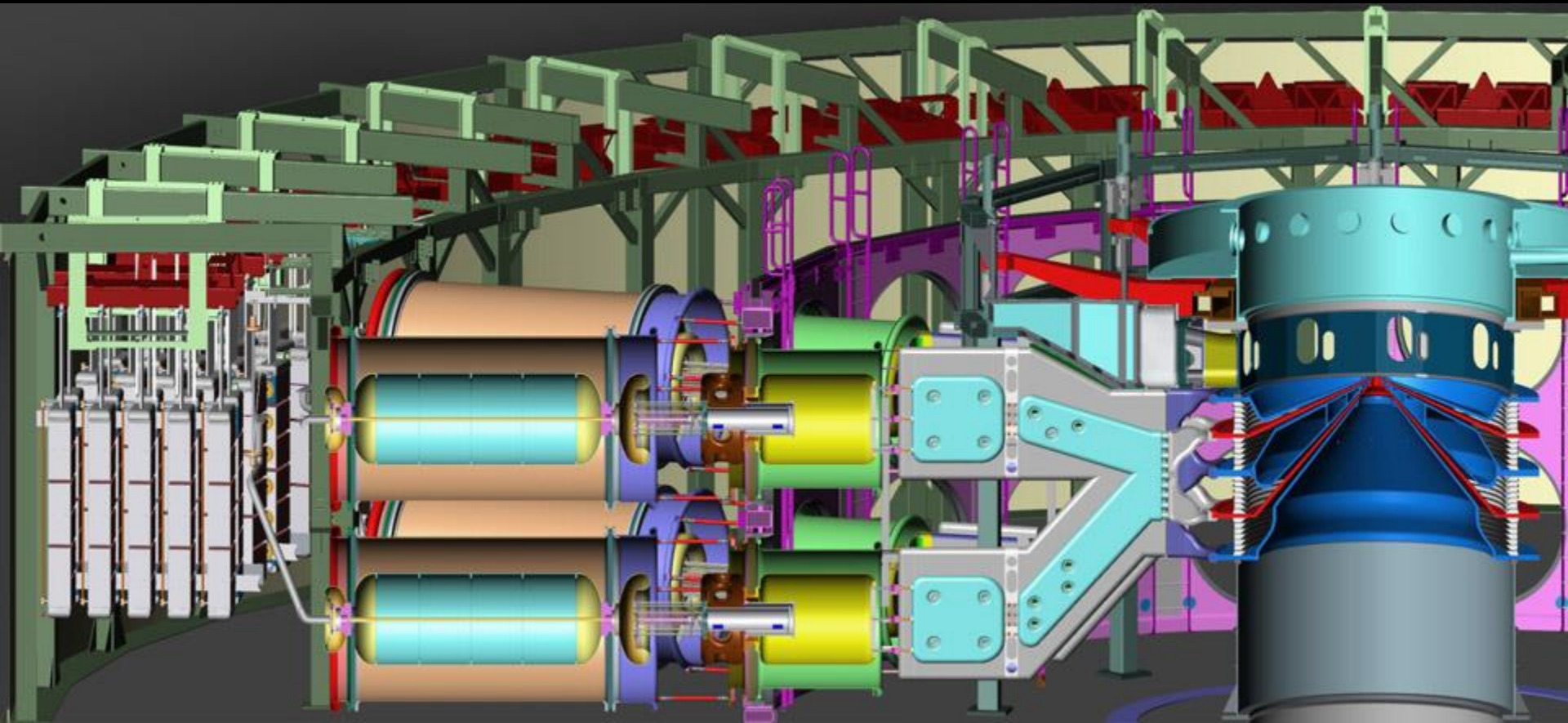
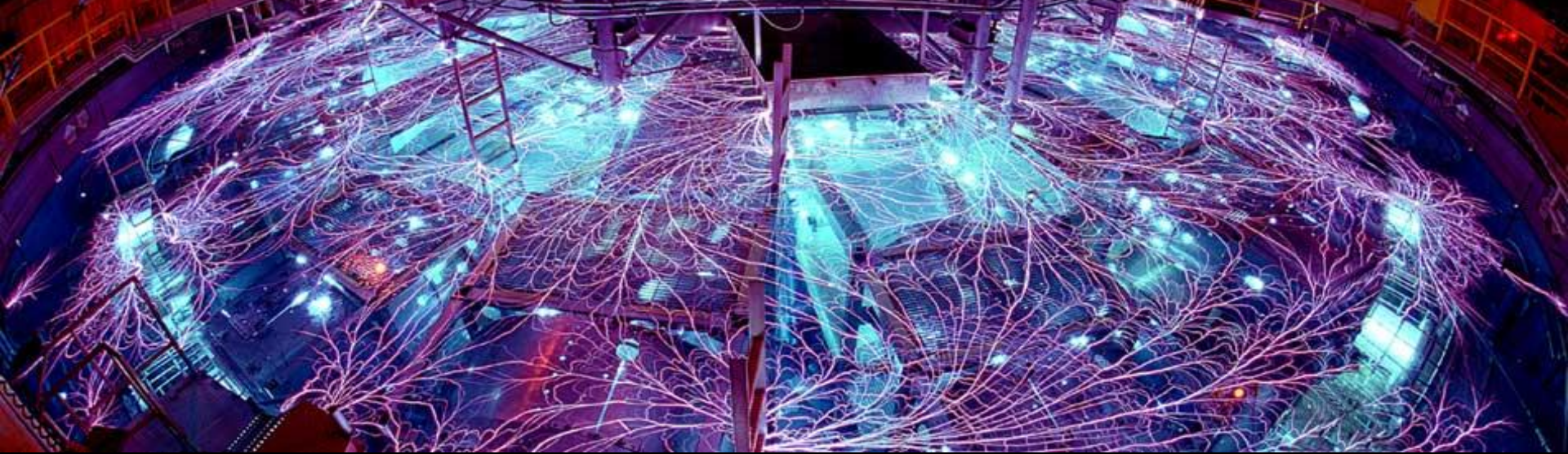


“Z machine” (Z Pulsed Power Facility) 2 GK, 1 kT

<https://youtu.be/eaopaLJk3-Y> | https://youtu.be/TValvAPMd_g

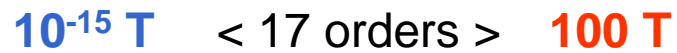


18 million amperes in less than 100 nanoseconds



Factor (T)	SI prefix	Value (SI units)	Value (CGS units)	Item
10^{-18}	attotesla	5 aT	50 fG	SQUID magnetometers on Gravity Probe B gyroscopes measure fields at this level over several days of averaged measurements
10^{-15}	femtotesla	2 fT	20 pG	SQUID magnetometers on Gravity Probe B gyros measure fields at this level in about one second
10^{-12}	picotesla	100 fT to1 pT	1 nG to 10 nG	Human brain magnetic field
10^{-9}	nanotesla	100 pT to10 nT	1 μG to100 μG	Magnetic field strength in the heliosphere
10^{-6}	microtesla	4 μT to 8 μT	40 mG to80 mG	Magnetic field produced by a microwave oven , in use, at a distance of 30 cm
10^{-5}		31 μT	310 mG	Strength of Earth's magnetic field at 0° latitude (on the equator)
		58 μT	580 mG	Strength of Earth's magnetic field at 50° latitude
10^{-3}	millitesla	5 mT	50 G	The strength of a typical refrigerator magnet
10^0	tesla	1.25 T	12.5 kG	Strength of a modern neodymium–iron–boron (Nd₂Fe₁₄B) rare earth magnet.
10^1	decatesla	16 T	160 kG	Strength used to levitate a frog
		45 T	450 kG	Strongest continuous magnetic field yet produced in a laboratory (National High Magnetic Field Laboratory , USA)
10^2	hectotesla	100 T	1 MG	Strongest pulsed non-destructive magnetic field produced in a laboratory, Pulsed Field Facility at National High Magnetic Field Laboratory's, Los Alamos National Laboratory , Los Alamos, NM, USA)
10^3	kilotesla	1 kT	100 MG	Strongest (pulsed) magnetic field ever obtained in a laboratory (Z machine , Sandia National Laboratories in Albuquerque, New Mexico)
10^6	megatesla	1 MT to100 MT	10 GG to1 TG	Strength of a neutron star
10^6	megatesla	2.2 MT	22 GG	Strongest pulsed magnetic field created by destructive measurements in Jablikiya , Russia).
$10^8 - 10^{11}$	gigatesla	100 MT to100 GT	1 TG to 1 PG	Strength of a magnetar
10^{53}	N/A	2×10^{29} YT	2×10^{33} YG	Planck magnetic field strength

Magnetic field



Condensed matter experiment

Методи

Дмитро Каменський

Radboud University, Nijmegen

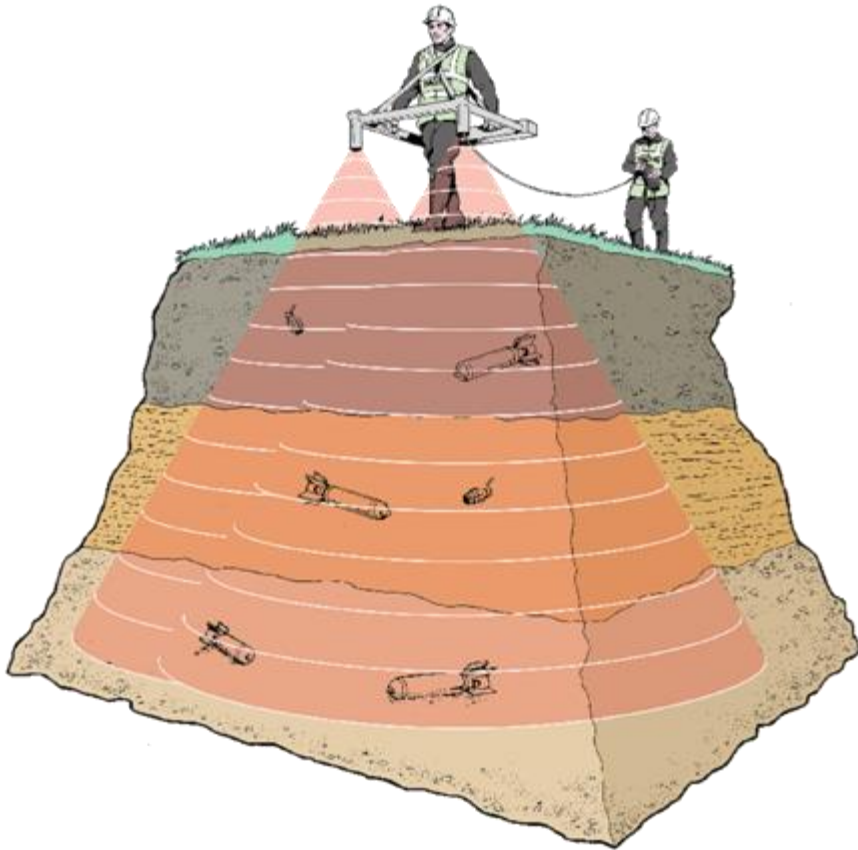
23-24 листопада

- магнітні резонанси
 - квантові осциляції
 - класичний та квантовий ефекти Холла
 - фазові перетворення
-
- магнітометрія
 - магнетооптика

Magnetometers / Магнітометри

Survey magnetometers

Польові магнетометри



Laboratory magnetometers

Лабораторні магнетометри



Magnetometers / Магнітометри

Survey magnetometers

Полюві магнетометри

- Proton precession magnetometer
- Caesium vapour magnetometers
- Rotating coil magnetometer
- Fluxgate magnetometer
- Hall sensor
- Magnetoresistive devices
- SQUID magnetometer
- Spin-exchange relaxation-free (SERF) atomic magnetometers

Laboratory magnetometers

Лабораторні магнетометри

- Faraday Force Magnetometry
- VSM (Vibrating Sample Magnetometer)
- Inductive Pickup Coils
- Pulsed Field Magnetometry
- SQUID Magnetometer
- Torque Magnetometry
- Optical Magnetometry

Magnetometers / Магнітометри

Survey magnetometers

Полюві магнетометри

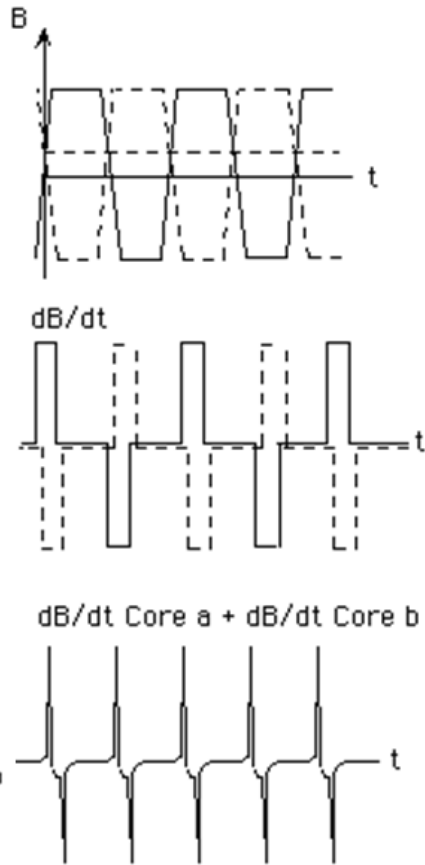
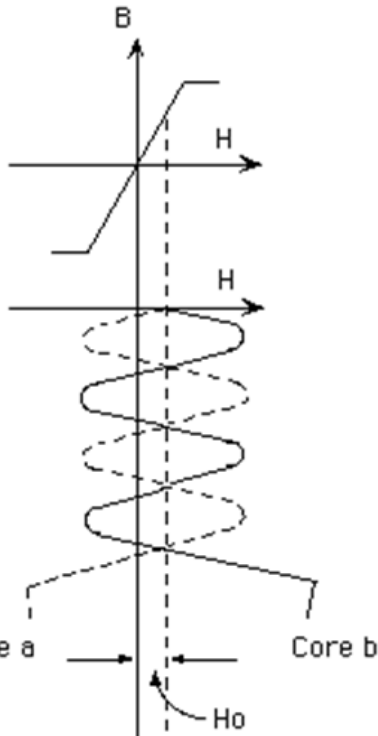
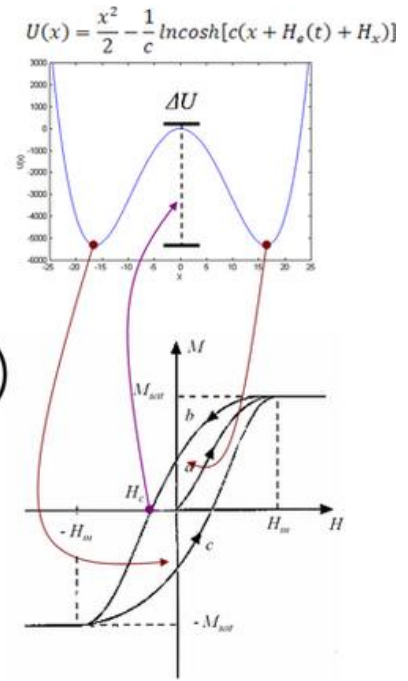
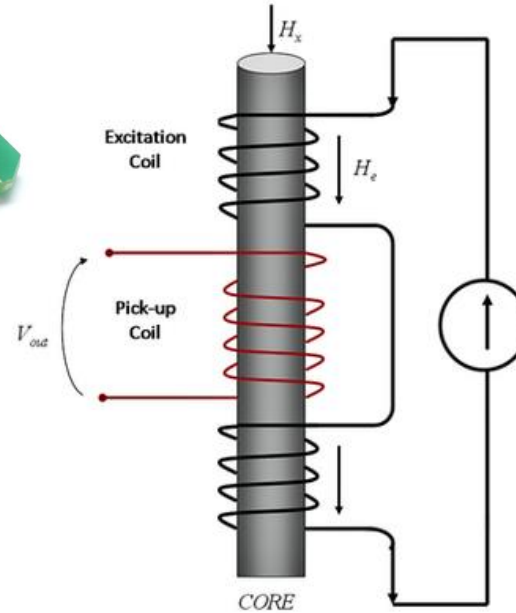
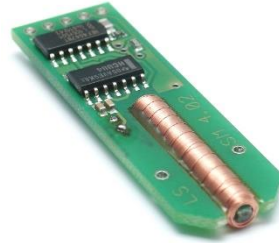
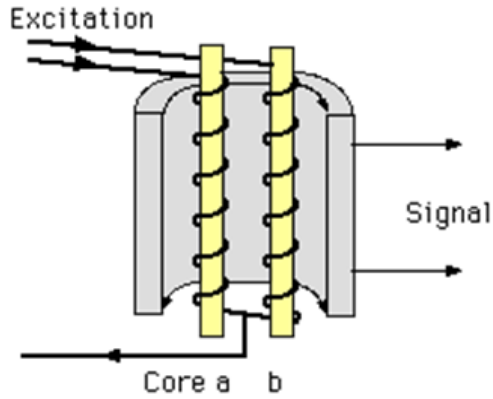
- Proton precession magnetometer
- Caesium vapour magnetometers
- Rotating coil magnetometer
- **Fluxgate magnetometer**
- Hall sensor
- Magnetoresistive devices
- SQUID magnetometer
- Spin-exchange relaxation-free (SERF) atomic magnetometers

Laboratory magnetometers

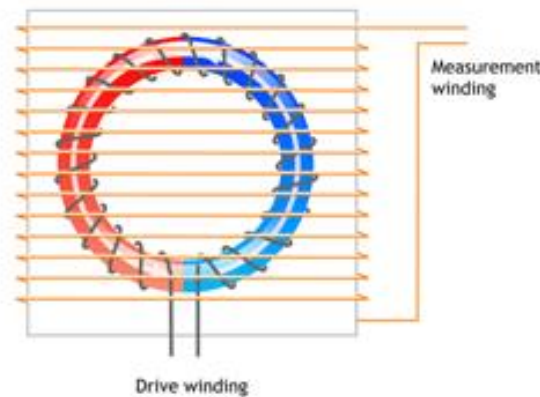
Лабораторні магнетометри

- Faraday Force Magnetometry
- VSM (Vibrating Sample Magnetometer)
- Inductive Pickup Coils
- Pulsed Field Magnetometry
- SQUID Magnetometer
- Torque Magnetometry
- Optical Magnetometry

Fluxgate magnetometers



External magnetic field direction





Rediscovering the Lost Art of Fluxgate Magnetometer Cores

Published: Jul 6, 2021

PROJECT: MAGnetometers for Innovation and Capability (MAGIC)

SNAPSHOT

A NASA-sponsored team at the University of Iowa is rediscovering and improving **lost techniques** to develop high-fidelity instruments needed to make the magnetic field measurements that enable many of the nation's space science and space weather missions.

Fluxgate magnetometers are essential and widely-used space science and space weather instruments, but they depend on a legacy component—a **ferromagnetic core**—that was developed and manufactured for the U.S. Navy using **technology that has been subsequently lost to the civilian community**. The stockpiles of these legacy cores are so depleted that some providers are now exploring destroying old flight-spare hardware to recover and refurbish the cores for use in new missions.

The instrument's **performance is limited by the magnetic noise** of a specialized ferromagnetic core.



New 'Tesseract' high stability sensor prototype enabled by new styles of fluxgate cores.

Magnetometers / Магнітометри

Survey magnetometers

Полюві магнетометри

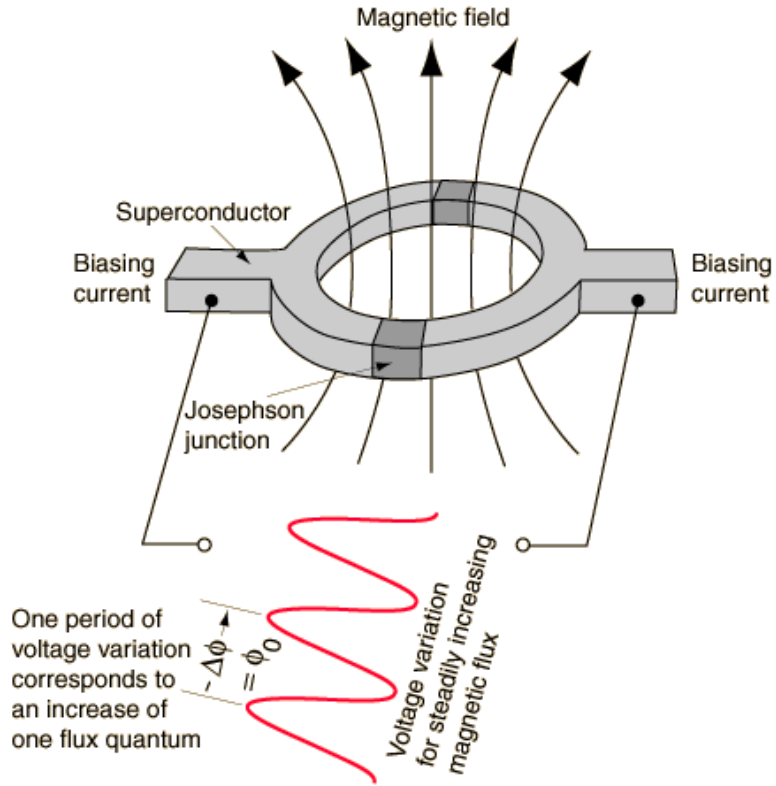
- Proton precession magnetometer
- Caesium vapour magnetometers
- Rotating coil magnetometer
- Fluxgate magnetometer
- Hall sensor
- Magnetoresistive devices
- **SQUID magnetometer**
- Spin-exchange relaxation-free (SERF) atomic magnetometers

Laboratory magnetometers

Лабораторні магнетометри

- Faraday Force Magnetometry
- VSM (Vibrating Sample Magnetometer)
- Inductive Pickup Coils
- Pulsed Field Magnetometry
- SQUID Magnetometer
- Torque Magnetometry
- Optical Magnetometry

SQUID Magnetometer



$$\Phi_0 = \frac{2\pi\hbar}{2e} \cong 2.0678 \times 10^{-15} \text{ tesla} \cdot \text{m}^2$$

Threshold for SQUID:	10^{-14} T
Magnetic field of heart:	10^{-10} T
Magnetic field of brain:	10^{-13} T

Magnetometers / Магнітометри

Survey magnetometers

Полюві магнетометри

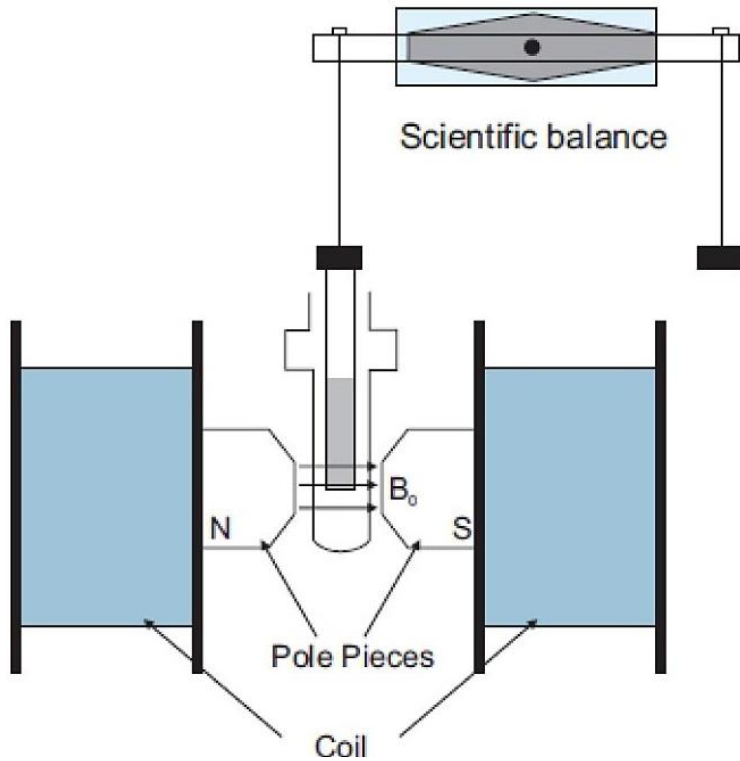
- Proton precession magnetometer
- Caesium vapour magnetometers
- Rotating coil magnetometer
- Fluxgate magnetometer
- Hall sensor
- Magnetoresistive devices
- SQUID magnetometer
- Spin-exchange relaxation-free (SERF) atomic magnetometers

Laboratory magnetometers

Лабораторні магнетометри

- **Faraday Force Magnetometry**
- VSM (Vibrating Sample Magnetometer)
- Inductive Pickup Coils
- Pulsed Field Magnetometry
- SQUID Magnetometer
- Torque Magnetometry
- Optical Magnetometry

Ваги Фарадея / Gouy balance Magnetic Susceptibility Balance



Analytical balance-based Faraday magnetometer

Alberto Riminucci,^{1,a)} Marc Uhlarz,² Roberto De Santis,³ and Thomas Herrmannsdörfer²

¹*Institute for the Study of Nanostructured Materials, CNR, Via Gobetti 101, 40129 Bologna, Italy*

²*Dresden High Magnetic Field Laboratory (HLD-EMFL), Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e.V., Bautzner Landstraße 400, D-01328 Dresden, Germany*

³*IPCB-CNR Institute for Polymers, Composites and Biomaterials, V.le J.F. Kennedy 54, 80125 Naples, Italy*

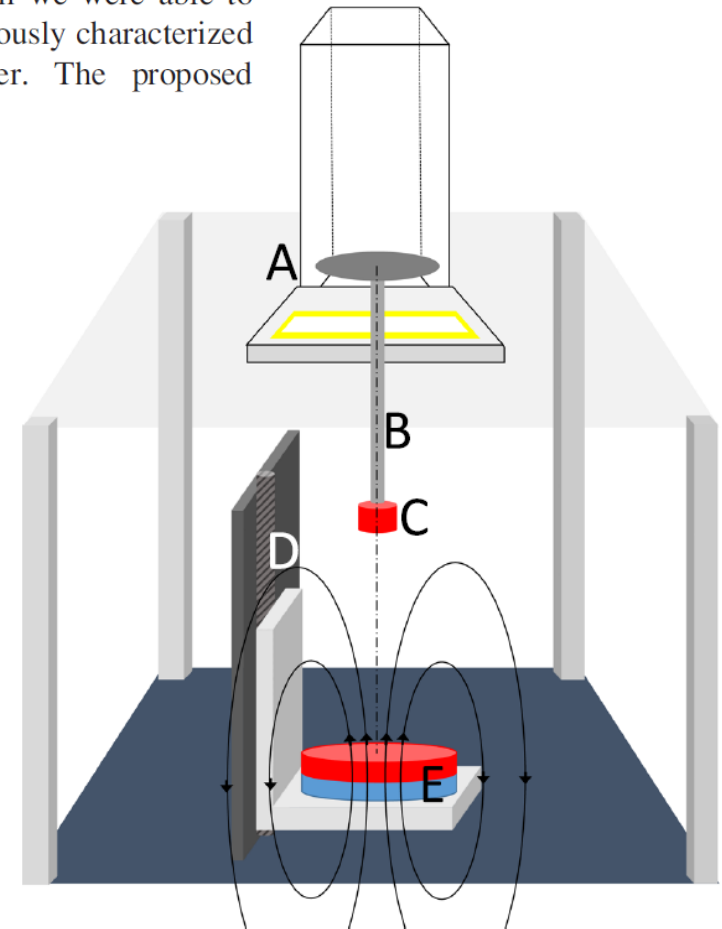
(Received 23 November 2016; accepted 16 February 2017; published online 3 March 2017)

We introduce a Faraday magnetometer based on an analytical balance in which we were able to apply magnetic fields up to 0.14 T. We calibrated it with a 1 mm Ni sphere previously characterized in a superconducting quantum interference device (SQUID) magnetometer. The proposed magnetometer reached a theoretical sensitivity of $3 \times 10^{-8} \text{ A m}^2$.

$$\vec{F} = (\vec{\mu} \nabla) \vec{B}$$

$$\mu = \chi \mu_0 H$$

$$F = \mu(B) \times \nabla B \sim H^2$$



Magnetometers / Магнітометри

Survey magnetometers

Полюві магнетометри

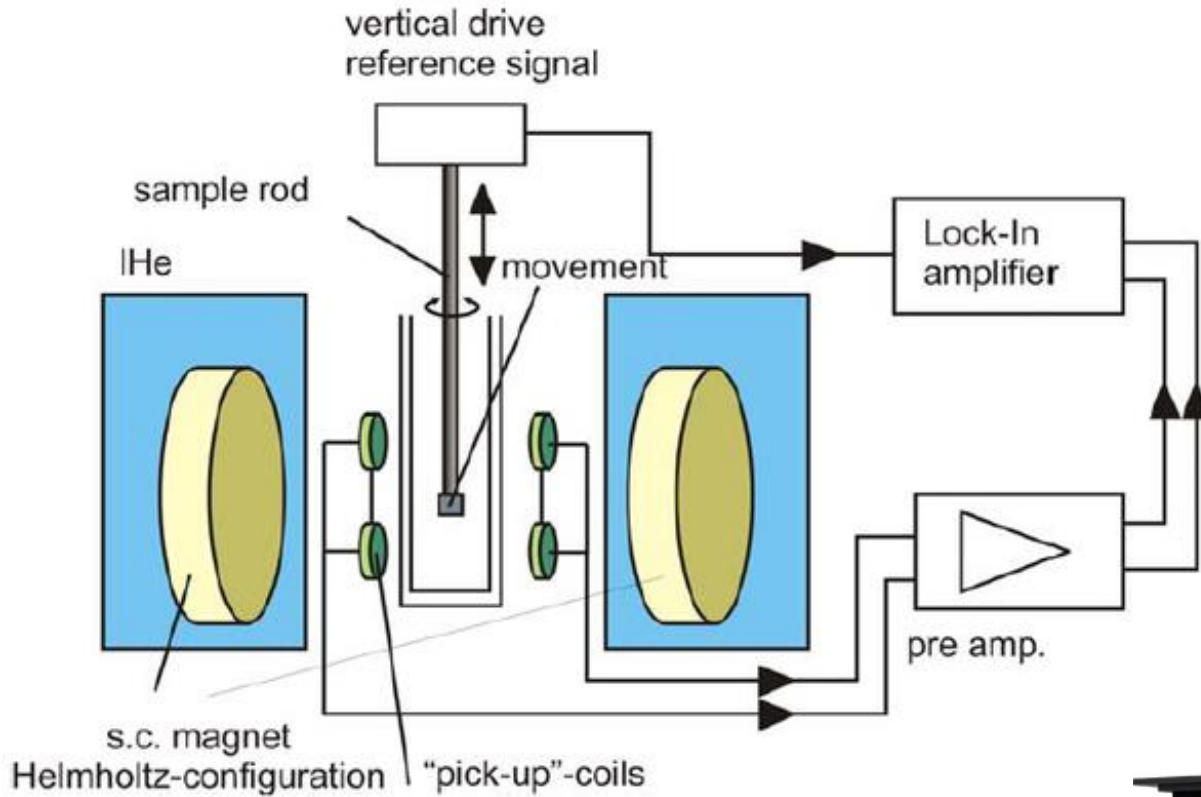
- Proton precession magnetometer
- Caesium vapour magnetometers
- Rotating coil magnetometer
- Fluxgate magnetometer
- Hall sensor
- Magnetoresistive devices
- SQUID magnetometer
- Spin-exchange relaxation-free (SERF) atomic magnetometers

Laboratory magnetometers

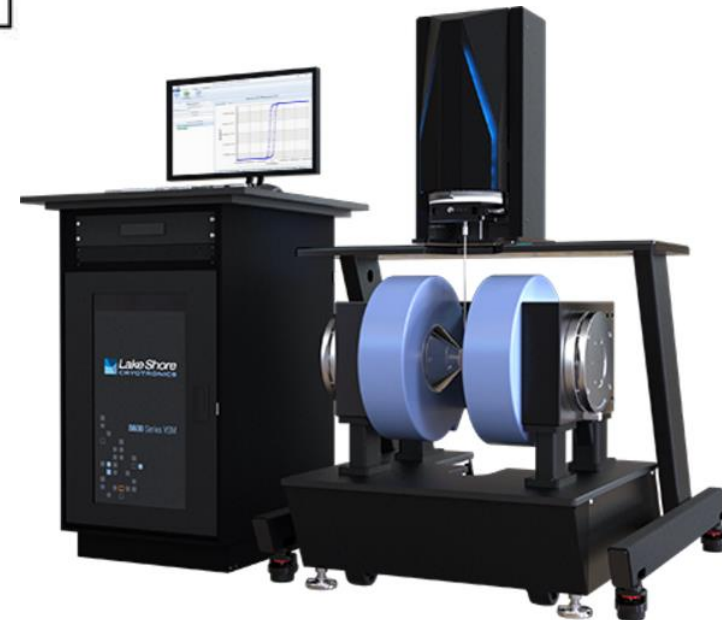
Лабораторні магнетометри

- Faraday Force Magnetometry
- **VSM (Vibrating Sample Magnetometer)**
- Inductive Pickup Coils
- Pulsed Field Magnetometry
- SQUID Magnetometer
- Torque Magnetometry
- Optical Magnetometry

Vibrating Sample Magnetometer (VSM)



$$\mu = \chi \mu_0 H$$



Magnetometers / Магнітометри

Survey magnetometers

Полюві магнетометри

- Proton precession magnetometer
- Caesium vapour magnetometers
- Rotating coil magnetometer
- Fluxgate magnetometer
- Hall sensor
- Magnetoresistive devices
- SQUID magnetometer
- Spin-exchange relaxation-free (SERF) atomic magnetometers

Laboratory magnetometers

Лабораторні магнетометри

- Faraday Force Magnetometry
- **VSM (Vibrating Sample Magnetometer)**
- **Inductive Pickup Coils**
- Pulsed Field Magnetometry
- **SQUID Magnetometer**
- Torque Magnetometry
- **Optical Magnetometry**



Physical Property Measurement System (PPMS®) Magnetic Property Measurement System (MPMS®3)



PPMS:

T = 1.9 - 400K, 7, 9, 14 and 16 tesla magnets

- **Heat Capacity, Electrical Transport and DC Resistivity** measurements
- Helium-3 Refrigerator Option (down to 0.5 K)
- Dilution Refrigerator Option (from 4 K down to 50 mK)
- Adiabatic Demagnetization Refrigerator (ADR) (from 300 K to ~100 mK in <3 hours)



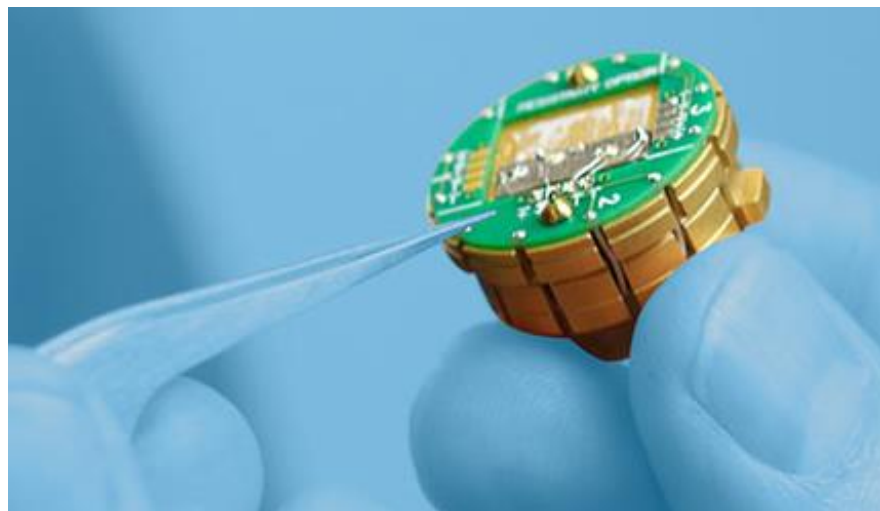
MPMS: SQUID Magnetometry

T = 1.8 - 400K, B ≤ 7 T ± 0.05 G

- **Vibrating Sample Magnetometer (VSM) Oven** (up to 1000K)
- **AC Susceptibility** Option (0.005–15 Oe, 0.1 Hz – 1 kHz)
- **Magneto-Optic** Option (UV or IR Rod)
- Horizontal Sample Rotator

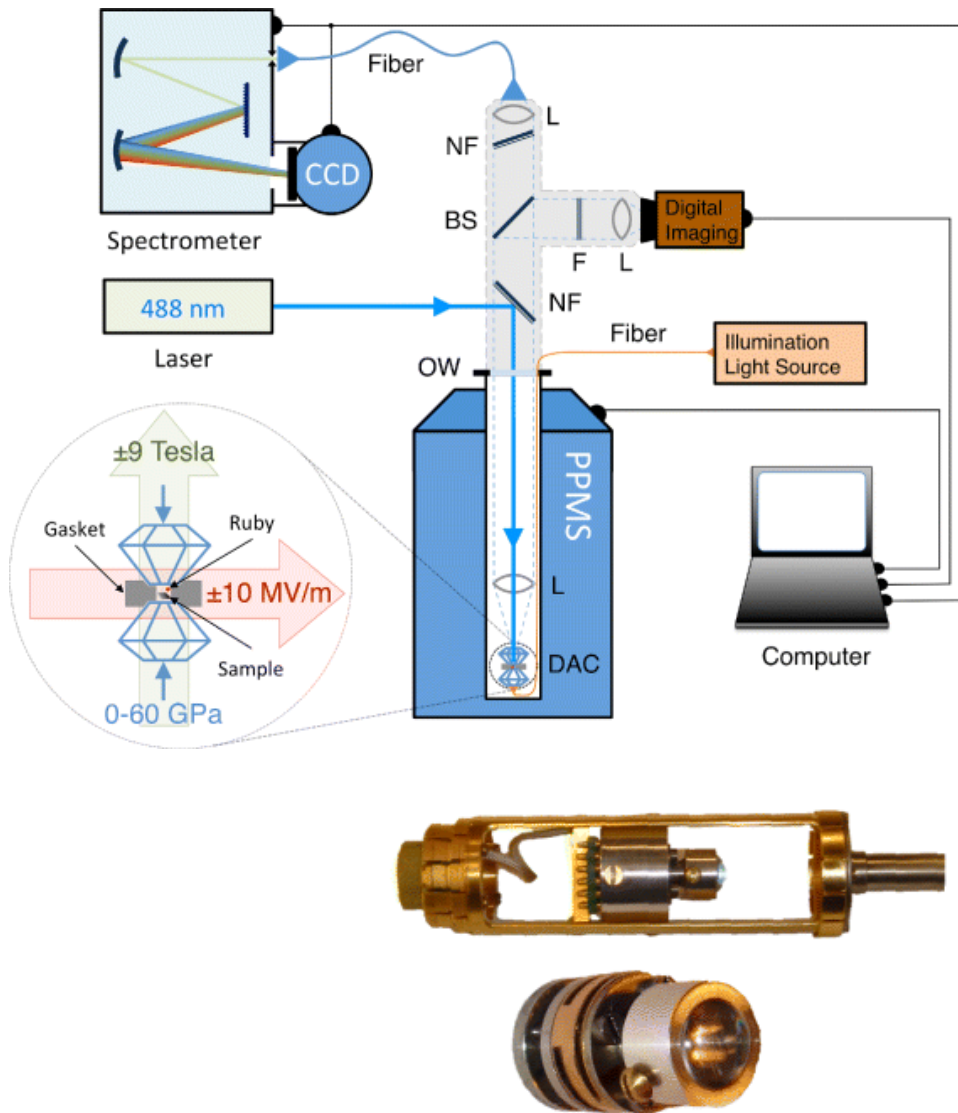


Physical Property Measurement System (PPMS[®]) Magnetic Property Measurement System (MPMS[®]3)

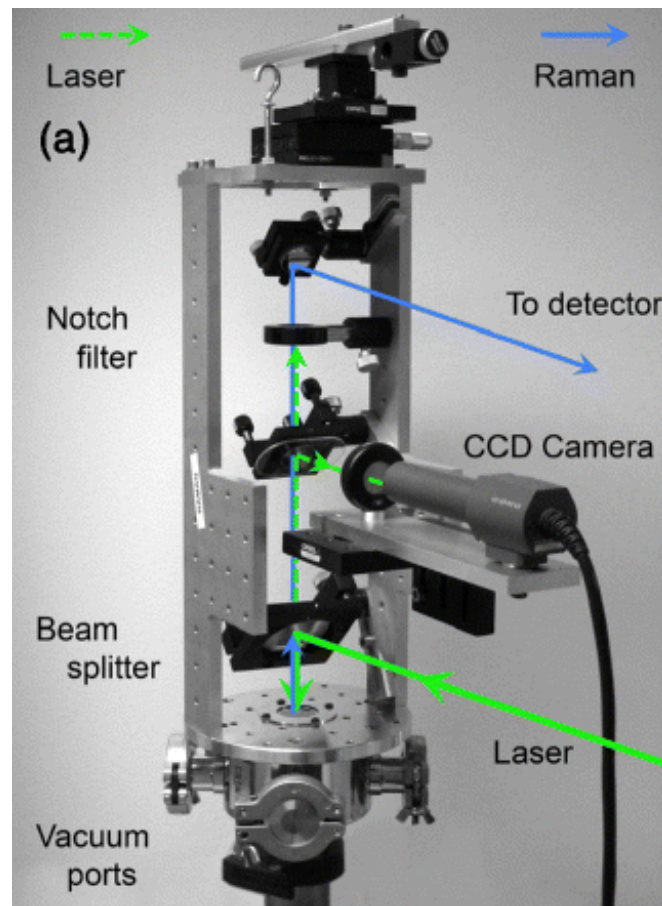




Physical Property Measurement System (PPMS[®]) Magnetic Property Measurement System (MPMS^{®3})



PPMS-based set-up for Raman and luminescence spectroscopy at high magnetic field, high pressure and low temperature



Magnetometers / Магнітометри

Survey magnetometers

Польові магнетометри

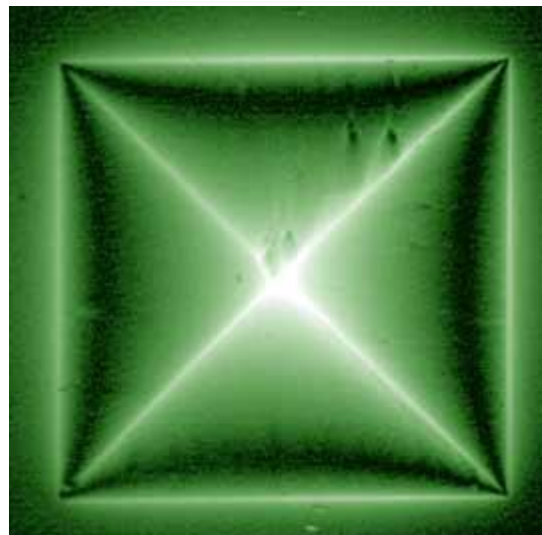
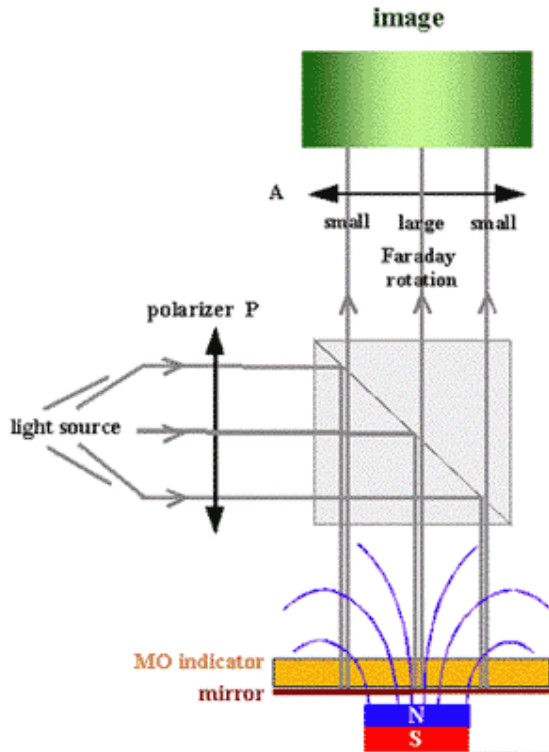
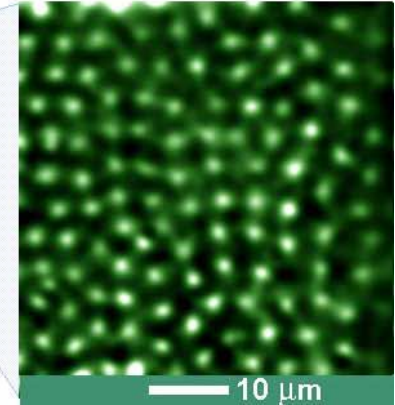
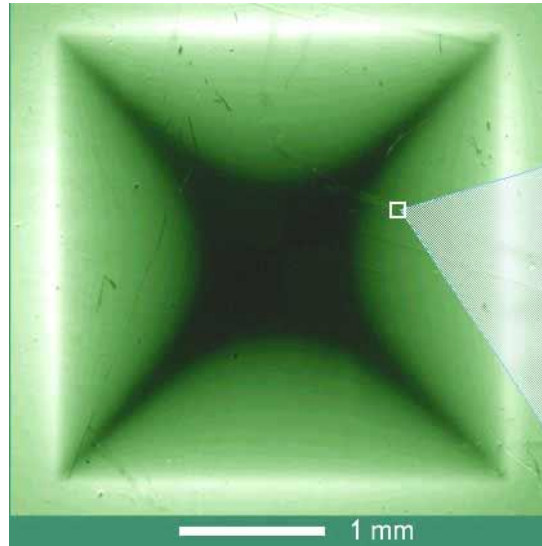
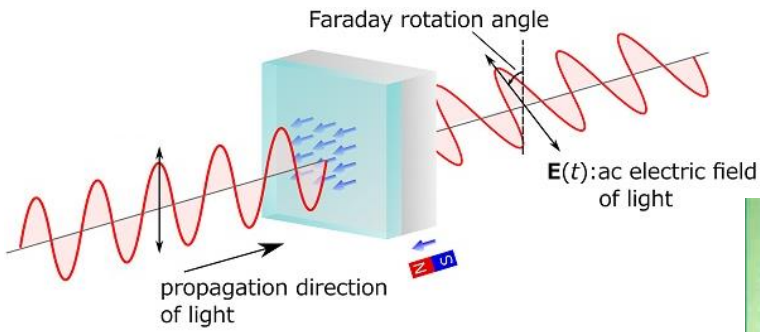
- Proton precession magnetometer
- Caesium vapour magnetometers
- Rotating coil magnetometer
- Fluxgate magnetometer
- Hall sensor
- Magnetoresistive devices
- SQUID magnetometer
- Spin-exchange relaxation-free (SERF) atomic magnetometers

Laboratory magnetometers

Лабораторні магнетометри

- Faraday Force Magnetometry
- VSM (Vibrating Sample Magnetometer)
- Inductive Pickup Coils
- Pulsed Field Magnetometry
- SQUID Magnetometer
- Torque Magnetometry
- **Optical Magnetometry**

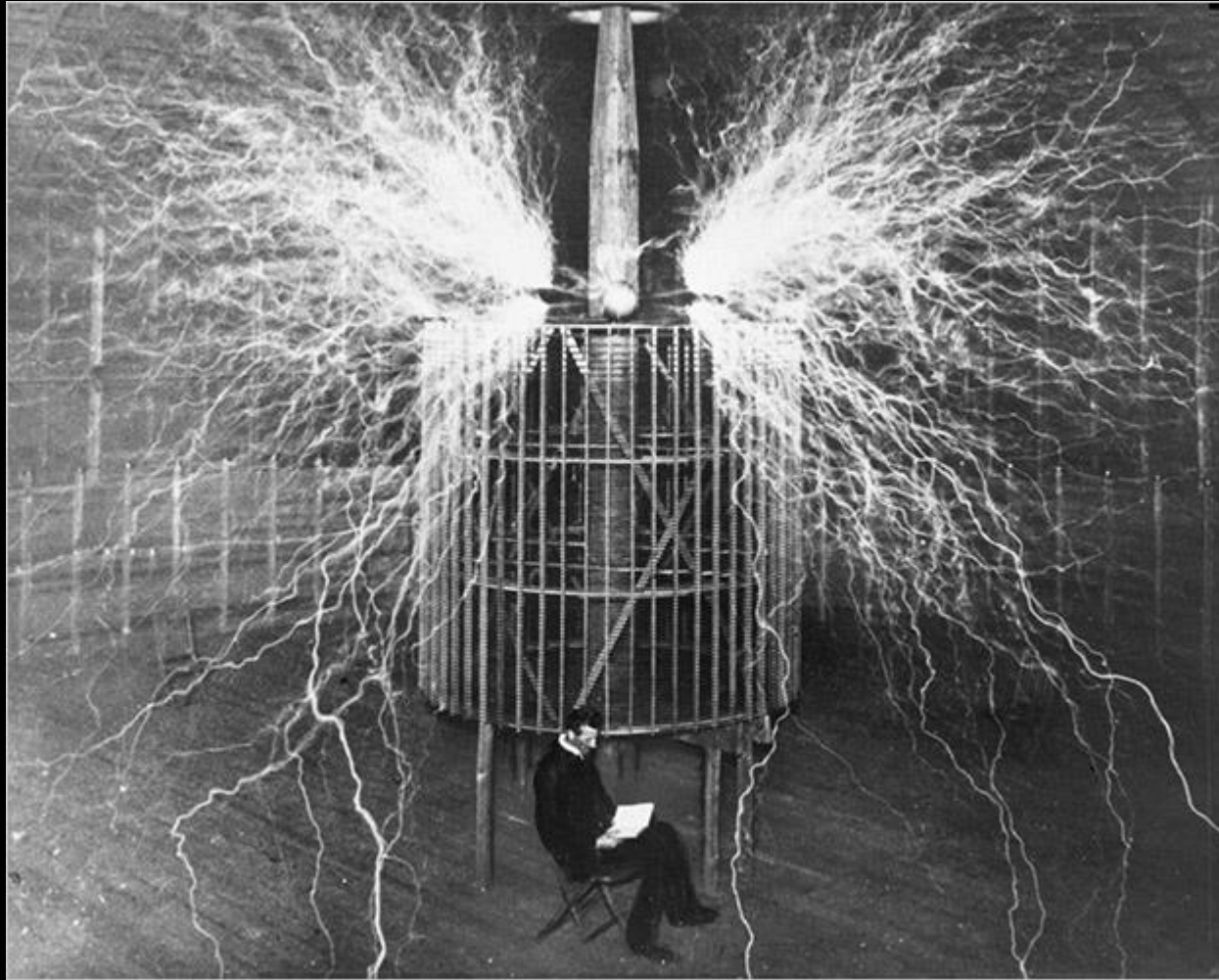
Magneto optics



Materials in Magnetic Field

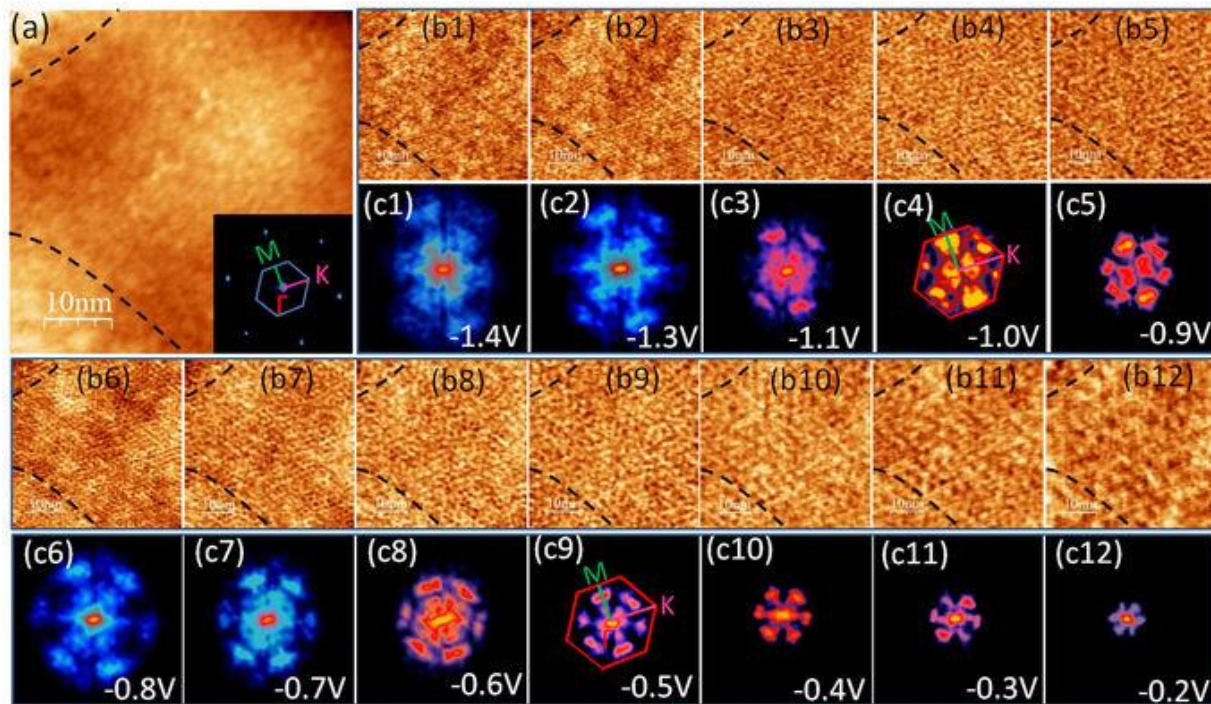
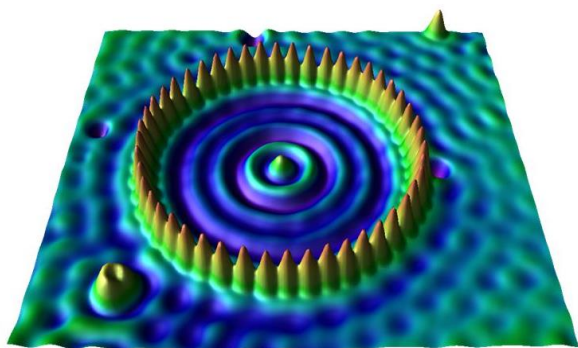
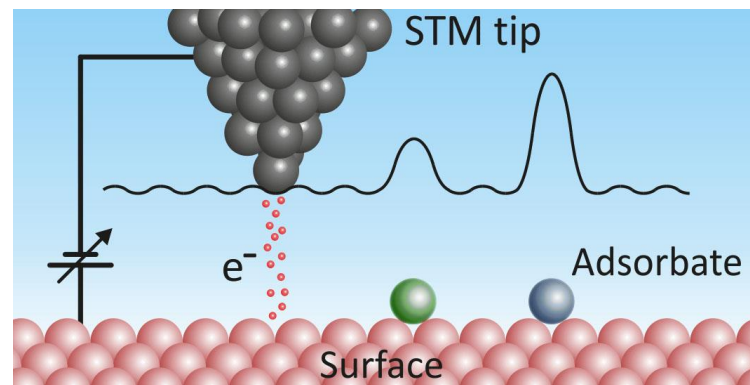
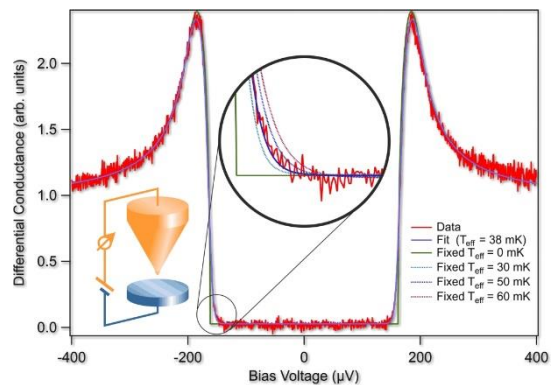
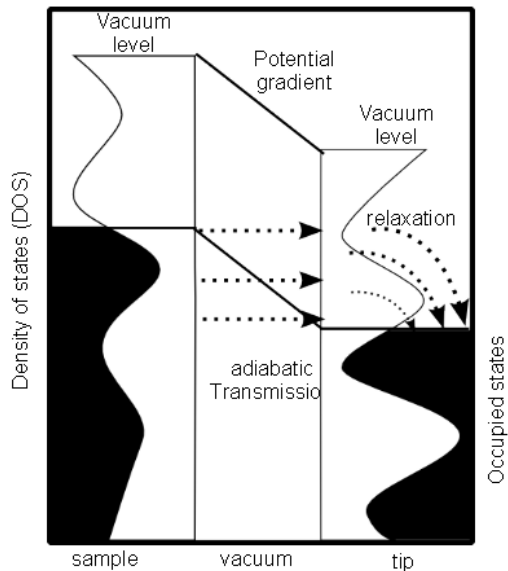
- Resonance spectroscopies:
 - NMR
 - EPR
- Quantum oscillations:
 - resistance (the Shubnikov-de Haas effect)
 - Hall resistance
 - magnetic susceptibility (the de Haas-van Alphen effect)
- Muon spin spectroscopy (μ SR)
- Neutron scattering

Electric Field



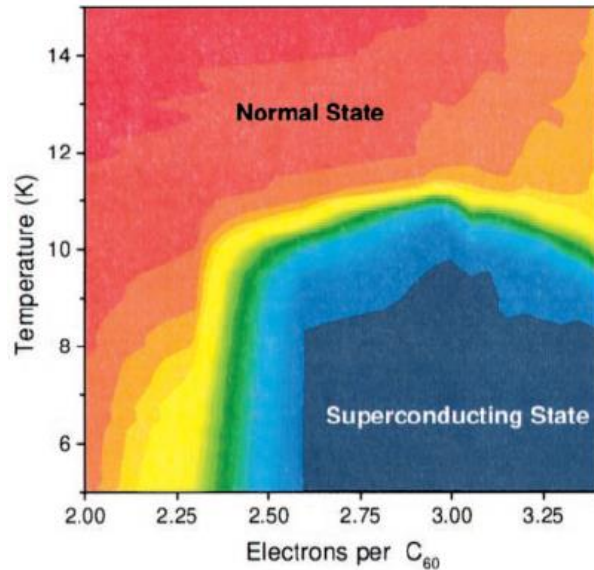
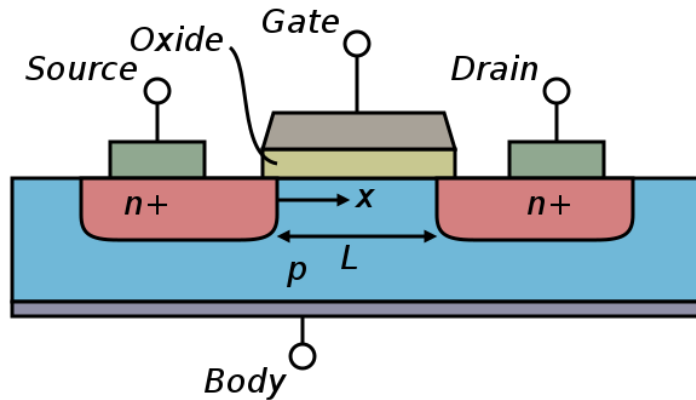
I prefix	Factor (volt)	Value	Item
Micro-	10^{-7}	0.5 μ V	Change in nerve cell potential caused by opening a single acetylcholine receptor channel
Milli-	10^{-4}	0.5–1 mV	Miniature endplate potentials , spontaneous fluctuations in neuron potentials
Centi-	10^{-2}	~10–50 mV	Ripple voltage in the output of a good DC power supply
		75 mV	Nerve cell resting potential
N/A	10^0	1.5 V	Alkaline battery AA , AAA , C or D battery
Deca-	10^1	12 V	Typical car battery
Hecto-	10^2	100–240 V	Domestic wall socket voltage
Kilo-	10^3	2450 V	Electric chair execution in Nebraska
		3–35 kV	Accelerating voltage for a typical television cathode ray tube
		4160-34,500 V	Typical voltages in North America for distribution of power from distribution substations to end users
	10^4	25 kV	European high-speed train overhead power lines
	10^5	800 kV	Lowest voltage used by ultra- high voltage (UHV) power transmission systems
Mega-	10^6	3 MV	Used by the ultra-high voltage electron microscope at Osaka University
	10^7	25.5 MV	The largest man-made voltage – produced in a Van de Graaff generator at Oak Ridge National Laboratory
	10^8	100 MV	The potential difference between the ends of a typical lightning bolt
Peta-	10^{15}	7 PV	Voltage around a particular energetic highly magnetized rotating neutron star
N/A	10^{27}	1.04×10^{27} V	Planck voltage

Scanning tunneling spectroscopy (STS)



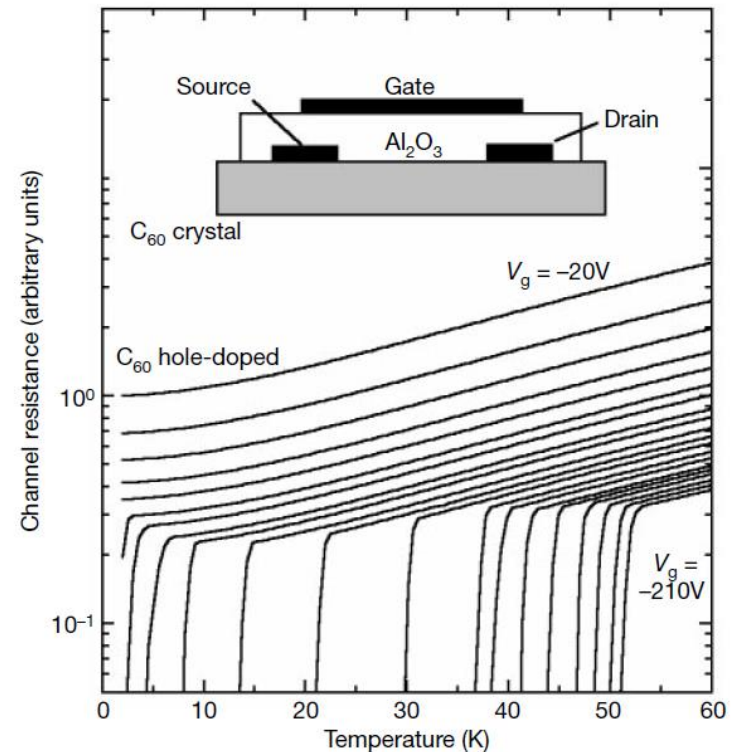
Польовий транзистор / field-effect transistor (FET)

Metal-oxide-semiconductor field-effect transistor (MOSFET)



A Superconducting Field-Effect Switch

J. H. Schön,¹ Ch. Kloc,¹ R. C. Haddon,² B. Batlogg¹



Retraction

... AND J. HENDRIK SCHÖN *SCIENCE* • 1 Nov 2002 • Vol 298, Issue 5595 • p. 961 • DOI: [10.1126/science.298.5595.961b](https://doi.org/10.1126/science.298.5595.961b)

We are writing as coauthors on the following manuscripts published in *Science*, which were, in part, the subject of an independent investigation conducted at the behest of Bell Laboratories, Lucent Technologies. The independent committee reviewed concerns related to the validity of data associated with the device measurements described in the papers.

1. J. H. Schön, S. Berg, Ch. Kloc, B. Batlogg, Ambipolar pentacene field-effect transistors and inverters, *Science* 287, [1022](#) (2000).
2. J. H. Schön, Ch. Kloc, R. C. Haddon, B. Batlogg, A superconducting field-effect switch, *Science* 288, [656](#) (2000).
3. J. H. Schön, Ch. Kloc, B. Batlogg, Fractional quantum Hall effect in organic molecular semiconductors, *Science* 288, [2338](#) (2000).
4. J. H. Schön, Ch. Kloc, A. Dodabalapur, B. Batlogg, An organic solid state injection laser, *Science* 289, [599](#) (2000).
5. J. H. Schön, A. Dodabalapur, Ch. Kloc, B. Batlogg, A light-emitting field-effect transistor, *Science* 290, [963](#) (2000).
6. J. H. Schön, Ch. Kloc, H. Y. Hwang, B. Batlogg, Josephson junctions with tunable weak links, *Science* 292, [252](#) (2001).
7. J. H. Schön, Ch. Kloc, B. Batlogg, High-temperature superconductivity in lattice-expanded C_{60} , *Science* 293, [2432](#) (2001).
8. J. H. Schön, H. Meng, Z. Bao, Field-effect modulation of the conductance of single molecules, *Science* 294, [2138](#) (2001).

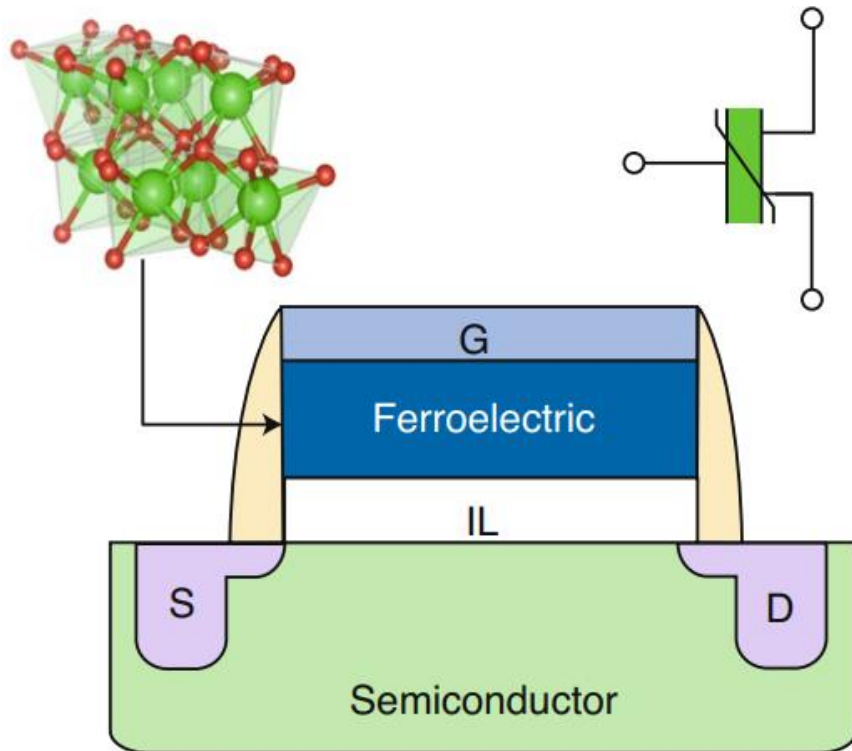
As a result of the committee's findings, we feel obligated to the scientific community to issue a retraction of the above articles. We note that although these papers may contain some legitimate ideas and contributions, we think it best to make a complete retraction.

Note

Editor's Note: For more information on the investigation, please see the summary and full report of the committee, which are available at www.lucnet.com/news_events/researchreview.html.

Ferroelectric field-effect transistor

Сегнетоелектрики або фероелектрики — речовини, які мають спонтанний дипольний електричний момент в одній із кристалічних фаз, що існує в певному діапазоні температур.



A ferroelectric field-effect transistor (FEFET) combines a ferroelectric material with a semiconductor in a transistor structure.

FEFET can be a key hardware component in the future of computing, providing a new approach to electronics that we term ferroelectronics

Контрольні питання

1. Чим відрізняється Н-поле та В-поле?
2. Принцип роботи ЯМР та МРТ? Чому роздільна здатність залежить від поля?
3. Чим обмежені максимальні поля резистивних, надпровідних та імпульсних магнітів?
4. Принцип роботи потокового (fluxgate) магнетометра?
5. Принцип роботи VSM?
6. Принцип роботи SQUID?