



Století kapalného helia, supratekutost a supravodivost

NFPL 095
NFPL 168
NFUF 807
U3V

Miloš Rotter
Univerzita Karlova v Praze

Prehistorie zkapalnění helia

chladicí směs: led + 23% NaCl
-21 °C

předchůdci:

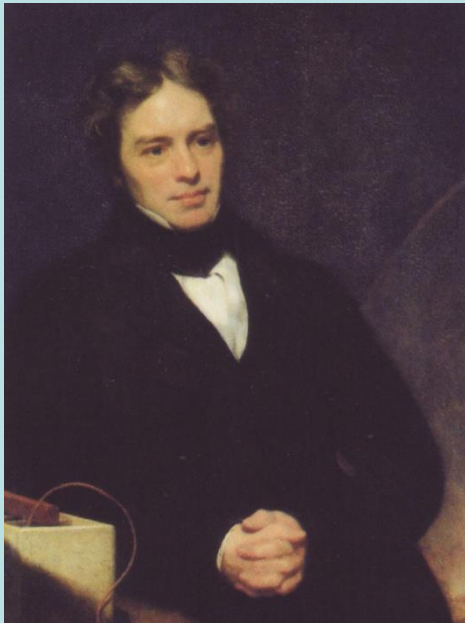
Martinus van Marum (1750 – 1837)

Charles Cagniard de la Tour (1777 – 1859)

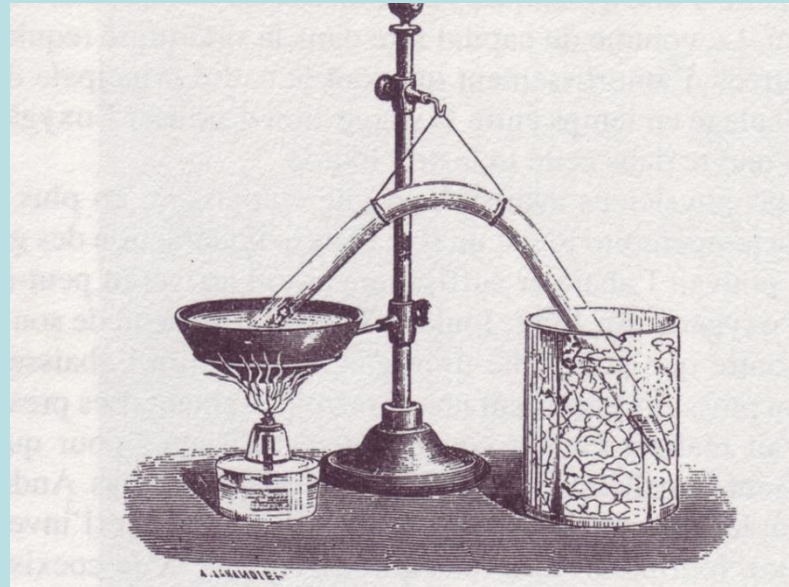
Thomas Andrews (1813 – 1885)

Michael Faraday (1791 – 1867)

geniální anglický fyzik a chemik - samouk, vyučený knihvazač, navštívil přednášky Humphry Davyho, asistent → profesor na Royal Institution
zkapalnil většinu plynů: Cl, NH₃, CO₂,...kromě O₂, N₂ a H₂



prostá destilace

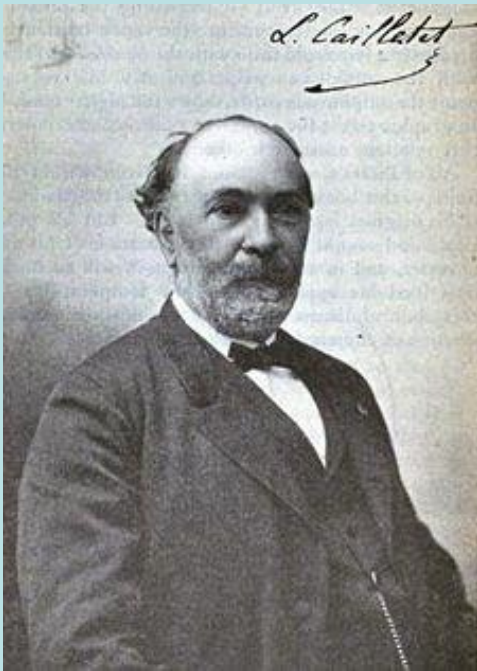


1877 – zkapalnění kyslíku (90 K)

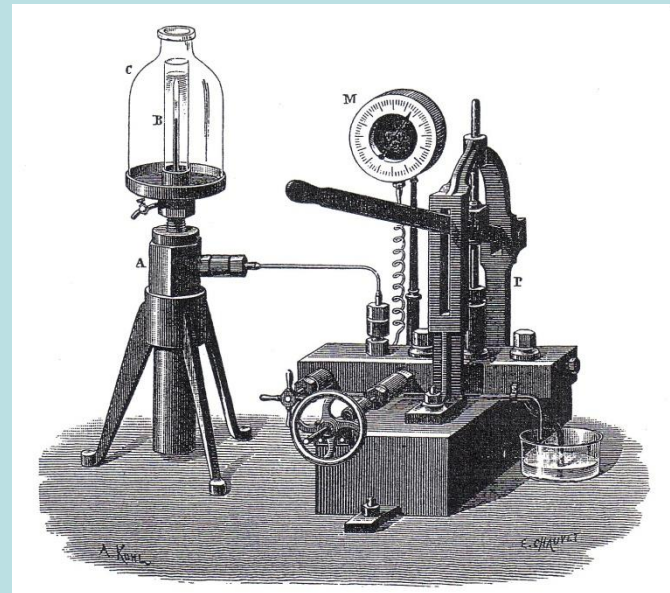
vánoční zasedání Académie des Sciences v Paříži 24. 12. 1877

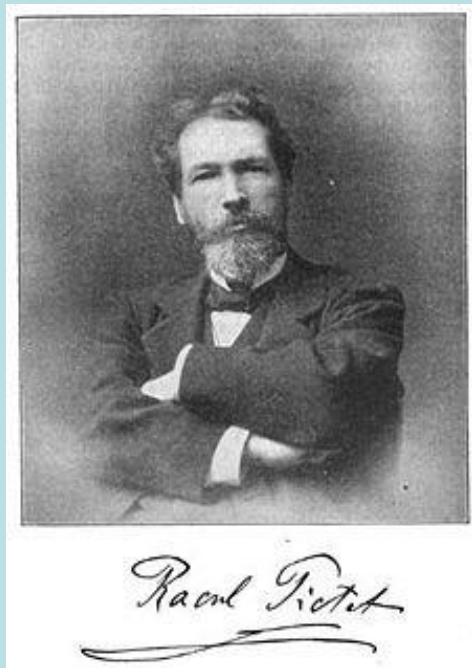
zapečetěný dopis stálému tajemníku prof. Jeanu Baptistovi Dumasovi

Louis – Paul Cailletet (1832 – 1913) soukromý výzkumník z Châtillon-sur-Seine veřejně předváděl své pokusy v Ecole Normale Supérieure



směs kyslíku a CO_2 stlačená na 30 MPa ochlazená na $-29\text{ }^\circ\text{C}$ zkapalněným SO_2 po expanzi dávala kapky zkapalněného kyslíku (využití Jouleova – Thomsonova jevu)



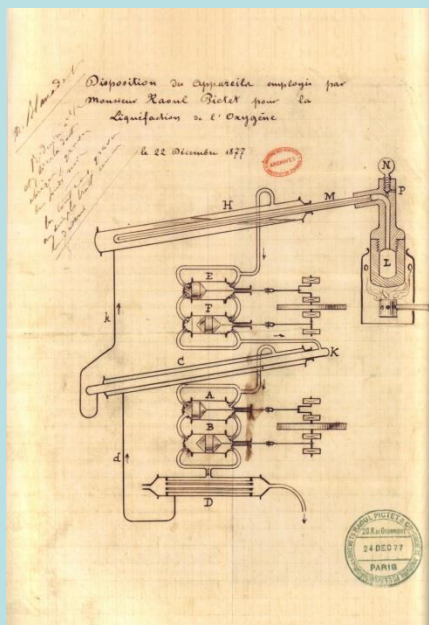


Raoul – Pierre Pictet (1846 – 1929)

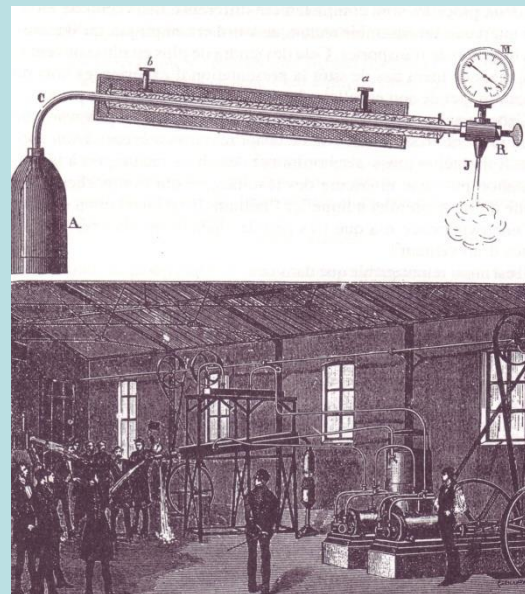
průmyslník, absolvent Ecole Polytechnique
na tomtéž zasedání byl přečten
telegram od firmy Raoul Pictet et C^{ie} z Ženevy

kaskádní princip:

- chlazení kapalným SO₂ čerpaným na -65 °C
- uvnitř pevný CO₂ čerpaný na -140 °C
- kyslík stlačený na 32 MPa, při otevření ventilu byla pozorována krátká sprška kapalného kyslíku



výkres k patentové
příhlášce



1883 zkapalnění dusíku (77 K)

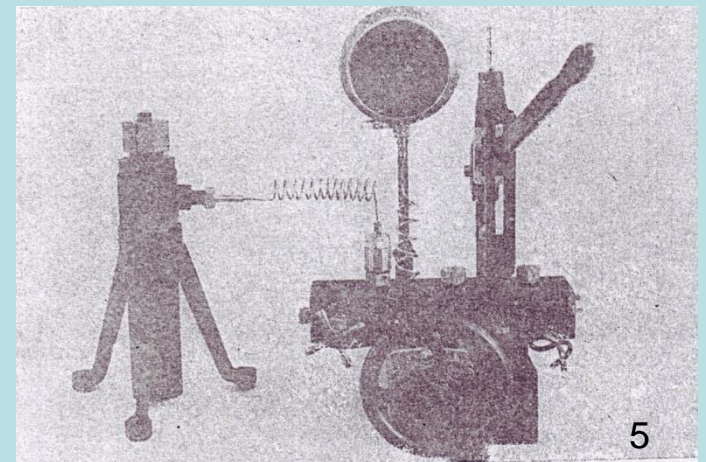
Jagellonská univerzita v Krakově

Zygmund Wróblewski (1845 – 1888) Karol Olszewski (1846 – 1915)



Z. Wróblewski

Z. Wróblewski – za účast na studentské vzpouře v Kyjevě poslán na nucené práce na Sibiř, po amnestii - oční operace v Berlíně, studoval v Heidelbergu u Helmholtze, z Krakova vyslán na stáž ve Francii a Anglii zakoupil Cailletetovu aparaturu, v několika měsících ve spolupráci s K. Olszewskim ji zdokonalil, zlepšil tepelnou izolaci, používal kapalný etylén





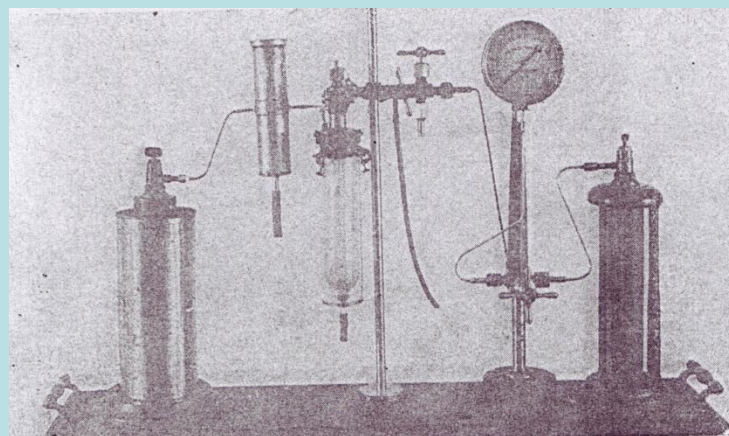
K. Olszewski

společně zkapalnili kyslík a posléze dusík
- spolupráce měla krátké trvání,
pokračovali v práci samostatně
r. 1888 Z. Wróblewski zemřel na těžké popáleniny
způsobené rozlitym hořícím petrolejem

K. Olszewski – zkapalnil argon
vyvolával spory o prvenství
s francouzskými vědci a s J. Dewarem



návštěva R. Picteta v Krakově



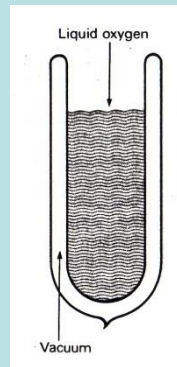
Olszewského aparatura

1898 zkapalnění vodíku (20 K)

James Dewar (1842 – 1923)



v 33 letech jmenován profesorem experimentální filozofie v Cambridge, po 2 letech získal místo profesora chemie na Royal Institution v Londýně (přednášel až do své smrti ve věku 81let)



1892 – vynalezl vakuovou tepelnou izolaci sklář Reinhold Burger – Thermos Flasche



1895 – Carl Linde and William Hampson
- vynalezli tepelné výměníky – pro zařízení na chlazení piva, transport masa

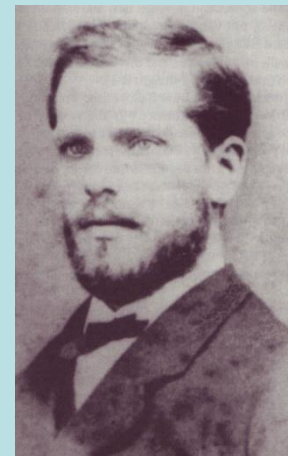


Páteční večerní přednášky prof. J. Dewara v Royal Institution v Londýně

veřejná demonstrace fyzikálních experimentů včetně zkapalnění plynů

v publiku: Alexander Siemens s chotí, Lady Dewar, Sir Williams Crookes, Lord Rayleigh,
Ludwig Mond, Sir Oliver Lodge, Sir Francis Galton, Robert Mond, Commendatore Marconi
asistenti: J. W. Heath, R. N. Lennox (autor: Henry Jamyn Brooks)

Johannes Diderick van der Waals (1837 – 1923)



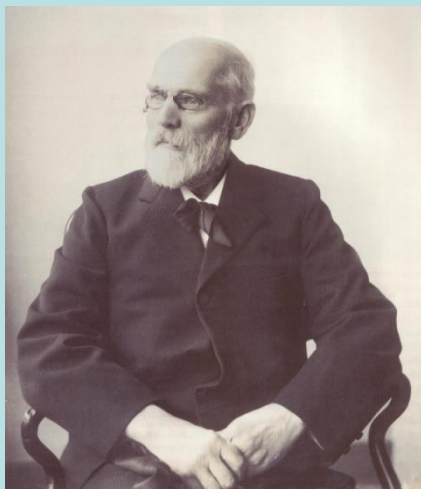
1873 – stavová rovnice reálného plynu

$$(V - b)(p + a/V^2) = nRT$$

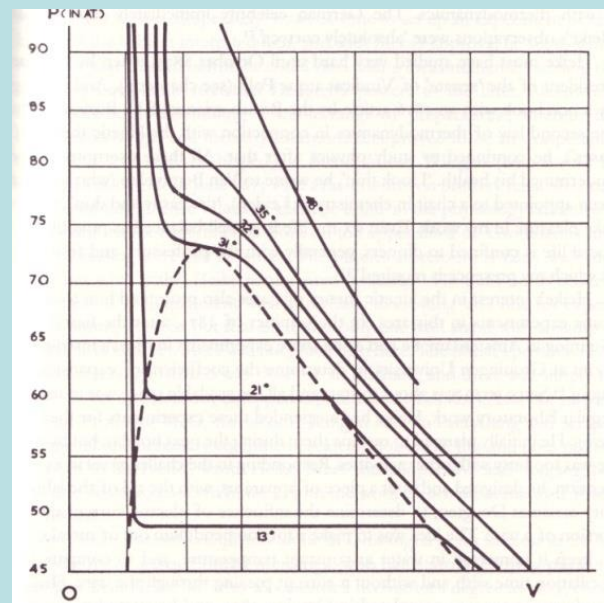
1879 – zákon o korespondenčních stavech

$$(\pi + 3/v^2)(v - 1/3) = 8/3 \tau$$

$$\pi = p/p_c \cdot v = V/V_c \cdot \tau = T/T_c$$



inspiroval Dewara a H.K.O.
ke studiu fázových přechodů plynů a kapalin



1910 Nobelova cena za fyziku

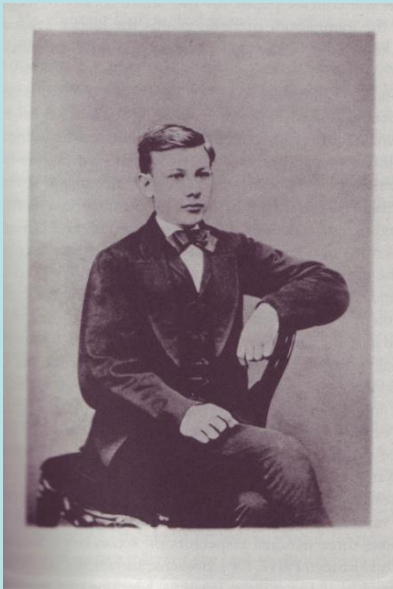
**za formulování fázových rovnic
plynů a kapalin**

1908 zakapalnění helia – 4,2 K

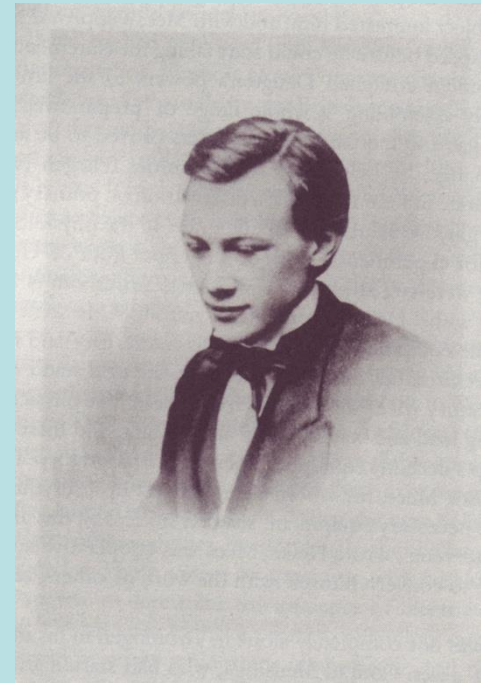
Heike Kamerlingh Onnes

se narodil 21. září 1853 v Groningen

v rodině majitele cihelny, v kultivovaném prostředí literatury, hudby a malířství

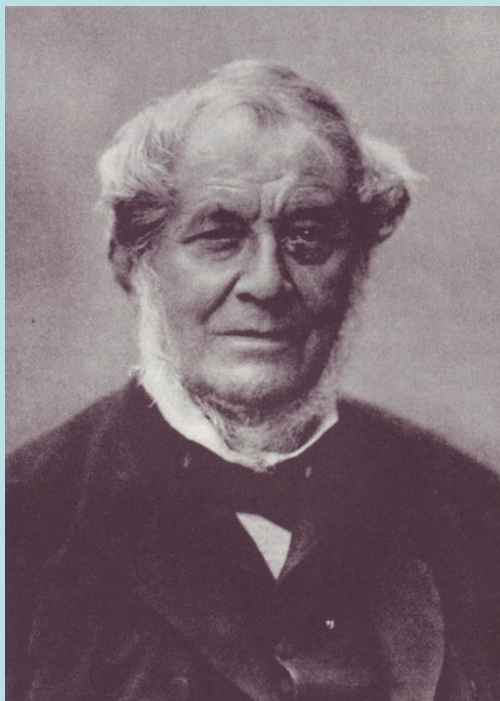


Heike ve věku 17 let,
studoval na univerzitě v Groningen (1870 – 1876)
aktivní účast ve studentských spolcích

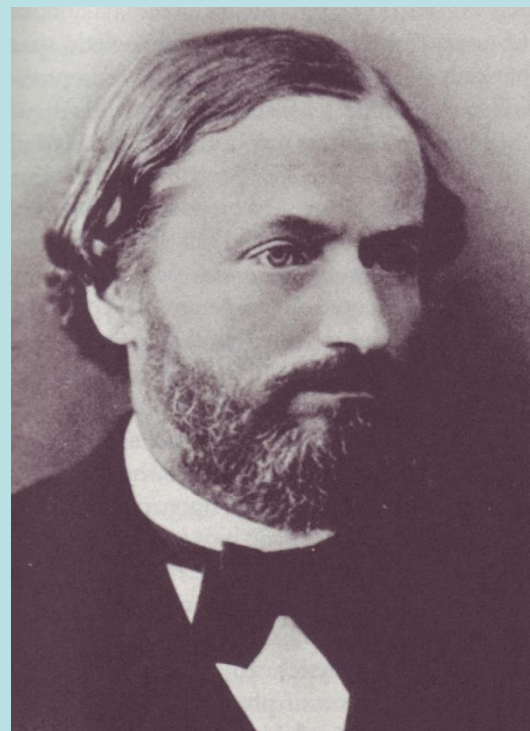


Heike v 22 letech

od listopadu 1871 do dubna 1873
studoval na univerzitě v Heidelbergu



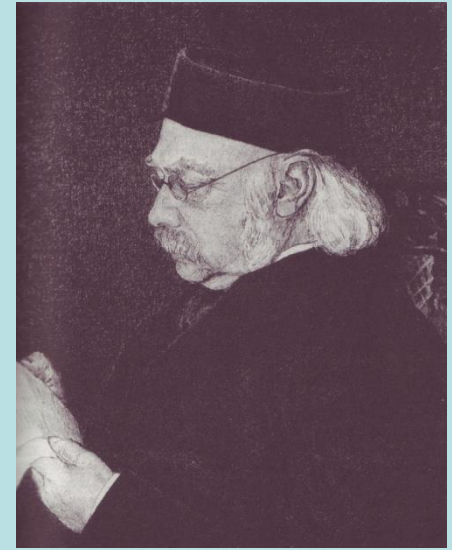
Robert Bunsen (1811 – 1899)
profesor chemie



Gustav Kirchhoff (1824 – 1887)
profesor fyziky

- důraz na přesnost měření

v roce 1876 získal H. K. O. vědecký stupeň Master ve fyzice
a aprobaci Higher Educational Act
v letech 1878 – 1882 asistentem na univerzitě v Delftu



Johannes Bosscha
profesor univerzity v Delftu

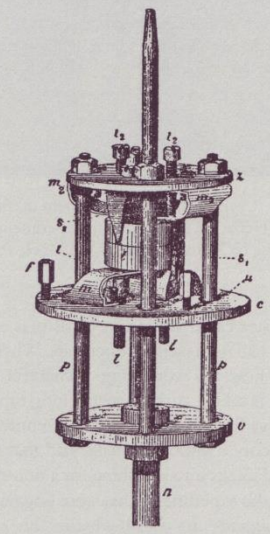
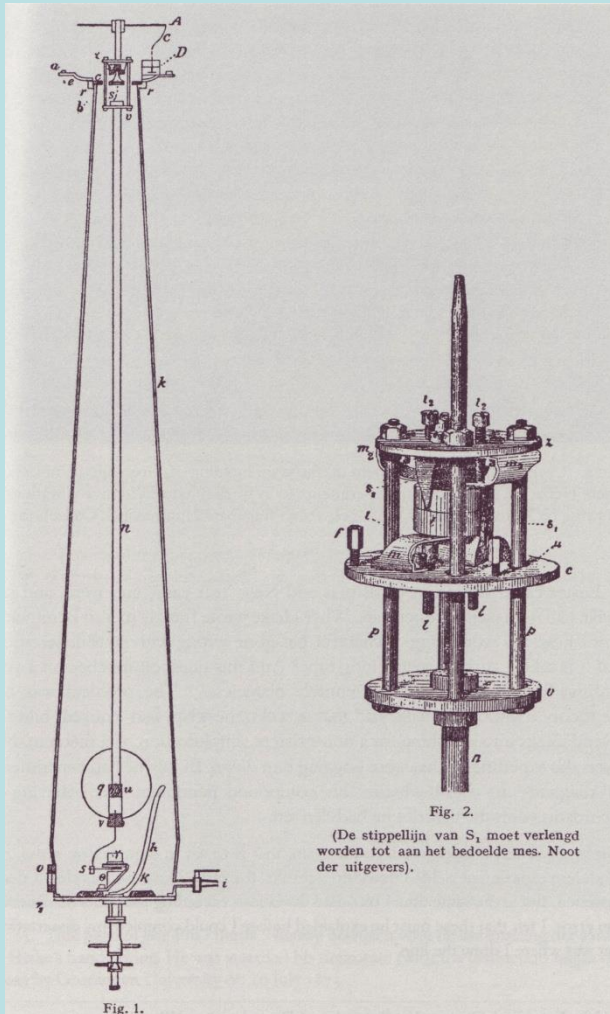


Fig. 2.
(De stippelij van S₁ moet verlengd worden tot aan het bedoelde mes. Noot der uitgevers).

v roce 1879 obhájil disertaci o vlastnostech
Foucaultova kyvadla:
New proof of the Earth's rotation on its axis

v září 1882 byl Heike Kamerlingh Onnes jmenován profesorem fyziky na univerzitě v Leidenu

V inauguračním projevu 11. listopadu 1882
O významu kvantitativního výzkumu ve fyzice
zdůraznil nutnost přesného měření pro formulování
teoretických závěrů

nade dveře laboratoří umístil nápis

Door meten tot weten

(od měření k poznání)

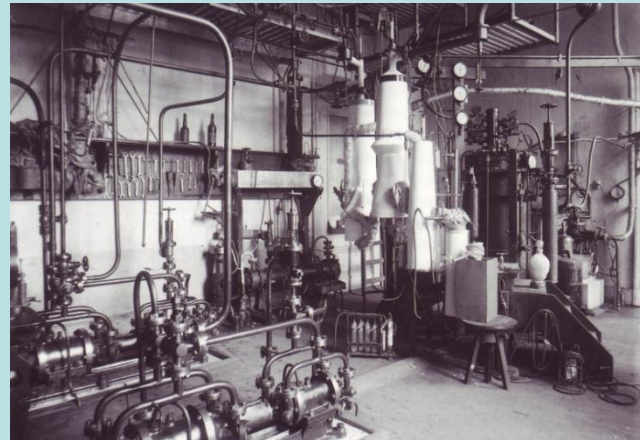


Scanned at the American
Institute of Physics

sál zkapalňovače helia



budova fyzikálního ústavu na Steenschuur
postavená v roce 1859



kaskáda refrigerátorů

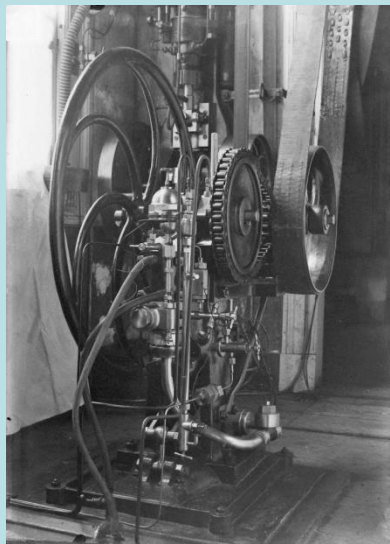
založil odborný časopis *Communications from the Physical Laboratory at the University of Leiden* pro okamžitou publikaci výsledků výzkumu
- otevřel laboratoř všem zájemcům o spolupráci – předchůdce současných „large facilities“



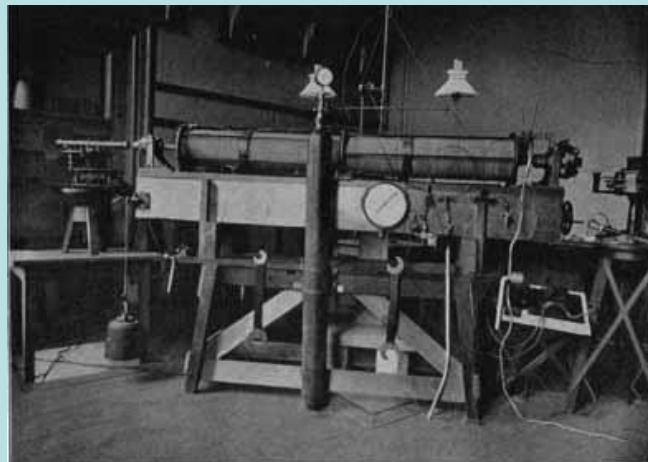
zřídil sklářskou školu a dílnu vedenou Oskarem Kesselringem



v roce 1900 založil v budově fyzikálního ústavu školu jemných mechaniků



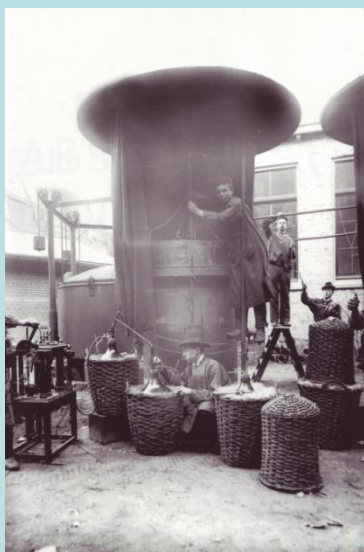
Cailletetův kompresor se rtuťovým pístem



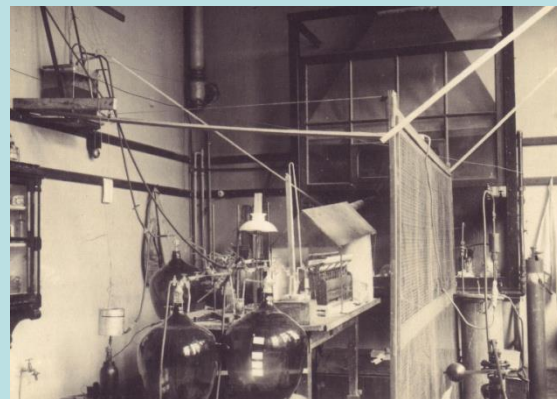
WERKKAMER C.

Scanned at the American
Institute of Physics

sál kompresorů



plnění plynojemu etylénem



čištění plynného helia



H. K. O. se svými asistenty

1868 – Pierre Janssen objevil čáry He ve spektru sluneční korony
1895 – William Ramsay objevil He v plynech uvolňovaných ze smolince
1905 – H.K.O. získal monazitový písek ze Severní Karolíny

v únoru 1895 byly zastaveny práce na zkapalňování plynů
- po 2 roky vládní komise vyšetřovala bezpečnostní opatření při zacházení se stlačenými plyny
- dobrozdání zahraničních fyziků (Dewar, Olszewski)
- konečný výrok: „energie stlačeného plynu v tlakové lahvi nepřesahuje energii exploze bedničky dělostřeleckých granátů, jejíž přeprava po železnici nepodléhá zvláštním předpisům“

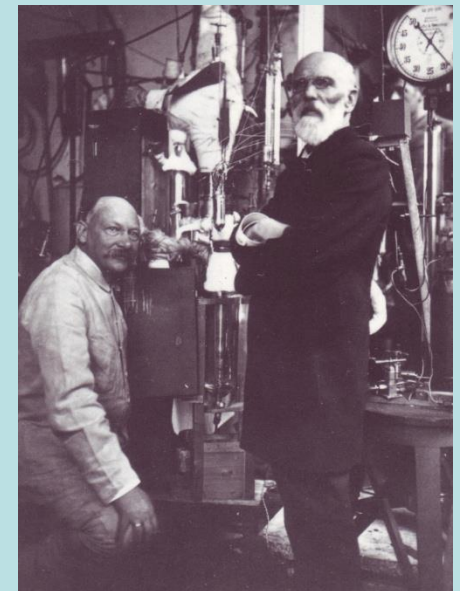
vzpomínka na výbuch lodi
naložené střelným prachem v roce 1807



Průběh památného dne 10. července 1908

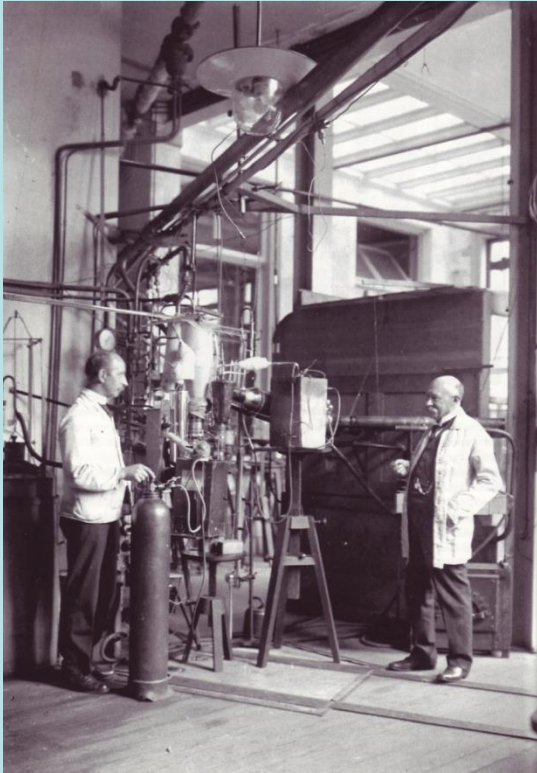
- den předem bylo připraveno 75 litrů kapalného vzduchu
- zařízení bylo testováno na těsnost, vyčerpáno a napuštěno čistým plynem
- do 11.30 hod. bylo připraveno 20 litrů kapalného vodíku
- 200 litrů plynného helia bylo po několik měsíců získáváno žháním monazitového písku a opakovaně zbavováno zbytků nečistot
- do aparatury byl nalit kapalný vzduch, kapalný vodík byl použit k prochlazení vnitřních prostor
- ve 14.30 hod. bylo zahájeno prochlazování helia, po 30 minutách klesla teplota na $-180\text{ }^{\circ}\text{C}$
- v 16.20 hod. byl spuštěn kompresor oběhu helia, hodinu poté byl plyn stlačen na 10 MPa, byl ochlazován čerpaným vodíkem teplota klesala, v 18.30 hod. byla teplota nižší než teplota kapalného vodíku a klesala nepravidelně až na $-267\text{ }^{\circ}\text{C}$
- do aparatury byla nalita poslední zásoba kapalného vodíku
- teploměr začal ukazovat stálou teplotu $-269\text{ }^{\circ}\text{C}$, nebylo vidět žádnou kapalinu
- profesor chemie Schreinemaker doporučil osvětit nádobu zespodu a tak poprvé spatřili hladinu kapalného helia (bez menisku)
- bylo připraveno **60 ml kapalného helia**.
- ihned bylo zahájeno čerpání par až na tlak 23 torr (1,5 K) ve 20.30 hod.
 - bez přeměny v led
- ve 21.30 hod. zbývalo jen několik mililitrů kapalného helia a experiment byl ukončen

(Communication No. 108)

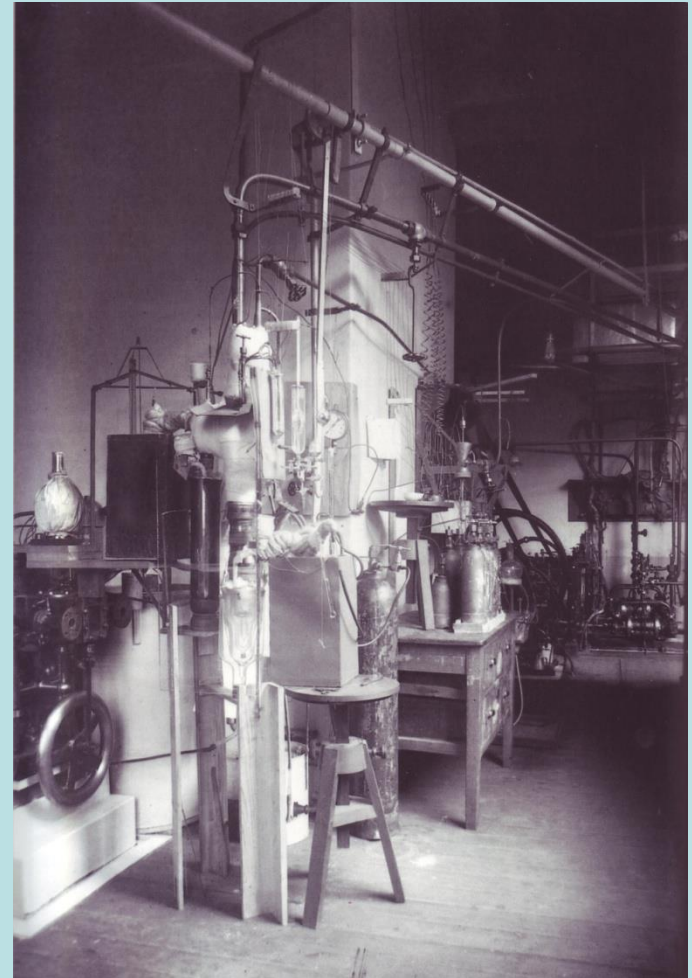


H. K. O. a Van der Waals

1908

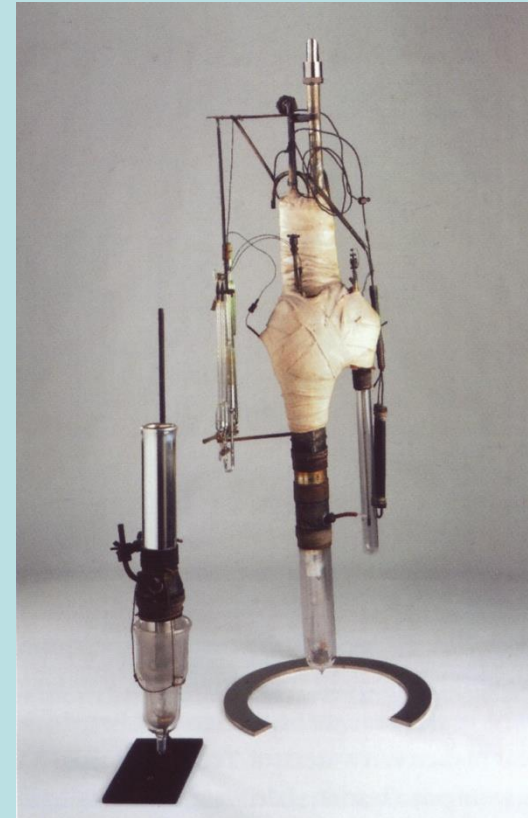
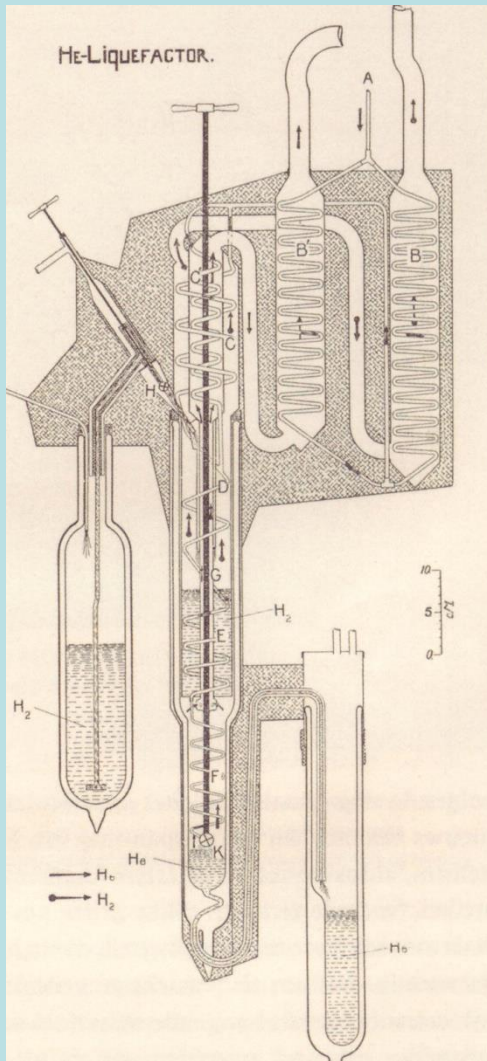


Chtěl bych zvláště vyjádřit svou vděčnost panu Gerritu J. Flimovi, který mi nejen asistoval jako vedoucí technické skupiny kryogenní laboratoře při řízení všech operací, ale dohlížel i na konstrukci všech zařízení pod mým vedením. Poskytl mi tak velmi účinnou a inteligentní pomoc v obou směrech.
(*Communication No. 108*)



první zkapalňovač helia

10. červenec 1908 zkapalnění helia - 4,2 K



Communication No. 108

Nejen zařízení pracovalo na mezi svých možností během experimentu a při jeho přípravě, ale i moji spolupracovníci byli nuceni pracovat na mezi svých sil.



Menso K. O. 1904
(bratr H.K.O.)



Harm K. O. 1920 (synovec H.K.O.)



Harm K. O. 1920



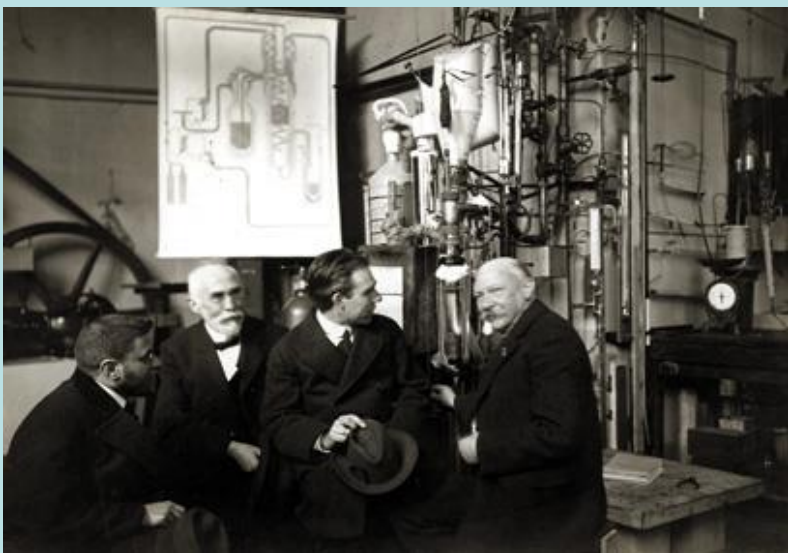
Harm K. O. 1921

1911 objev supravodivosti

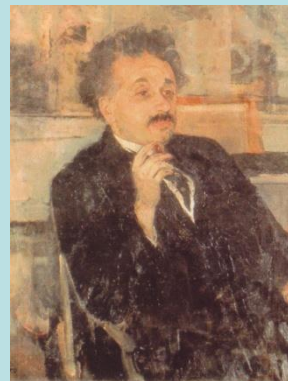
1913 Nobelova cena za fyziku

„za výzkum vlastností hmoty při nízkých teplotách, který vedl, kromě jiného, ke zkapalnění helia“

slavní návštěvníci



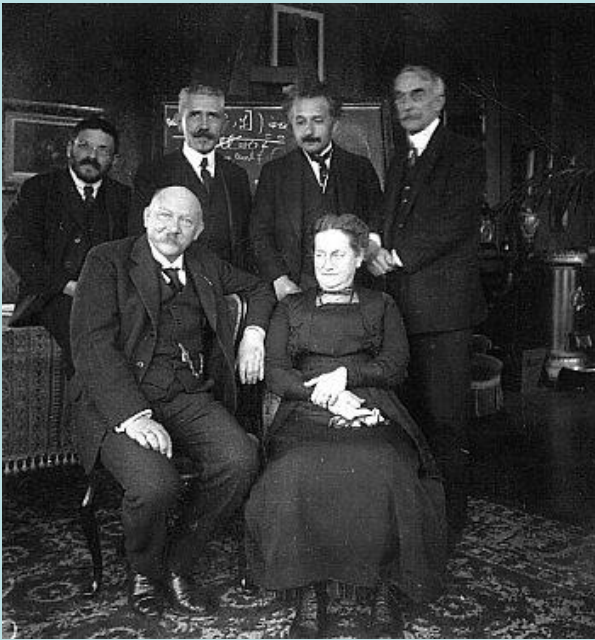
P. Ehrenfest, H. A. Lorentz, Niels Bohr a H. K. O.
v roce 1921



Albert Einstein byl v roce 1920
hostujícím profesorem v Leidenu



Harm K. O. 1921

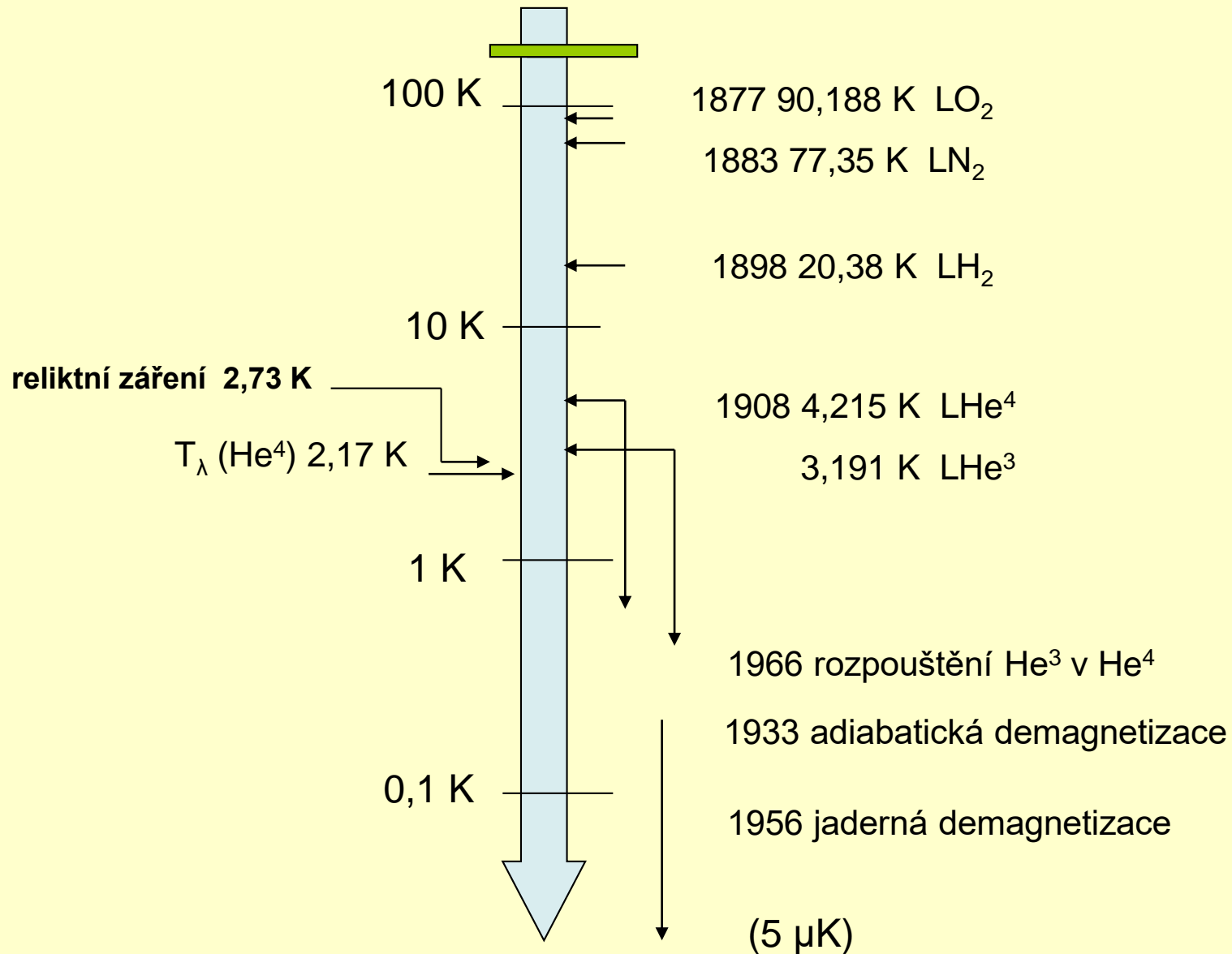


H.K.O. s chotí, A. Einstein, P. Ehrenfest,...



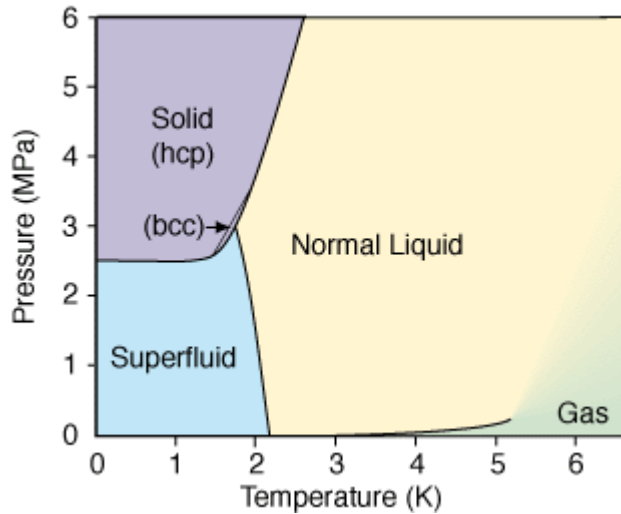
Marijke K.O. (neteř H. K. O.) 1920 (Muzeum De Lakenhal)

Historický teploměr

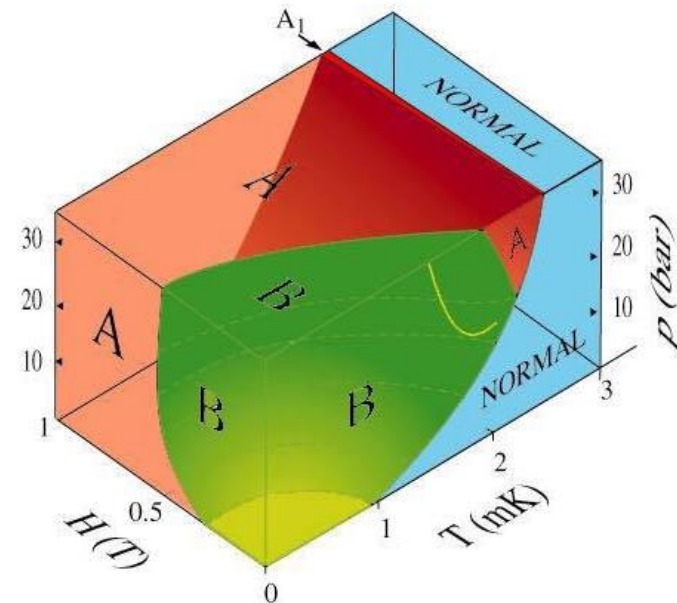


Supratekutost

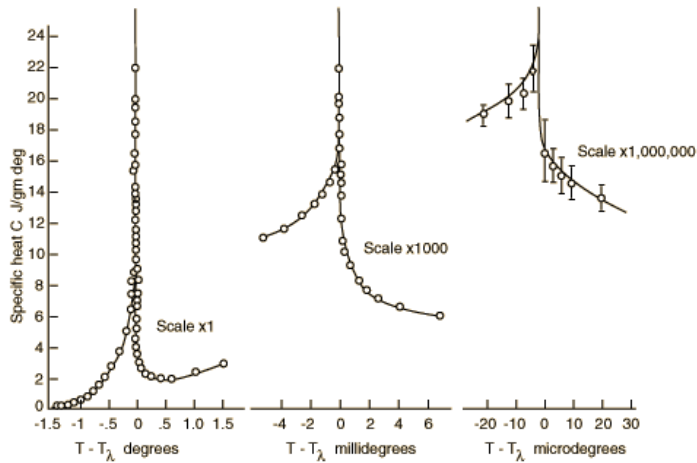
He⁴ – kondenzát bozonů



supratekuté fáze He³
- párování fermionů

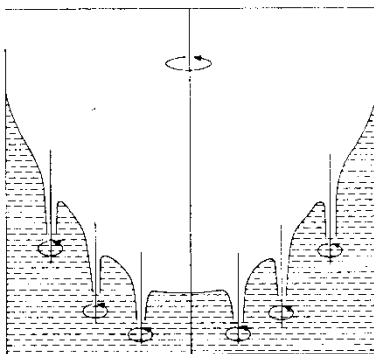


Projevy supratekutosti

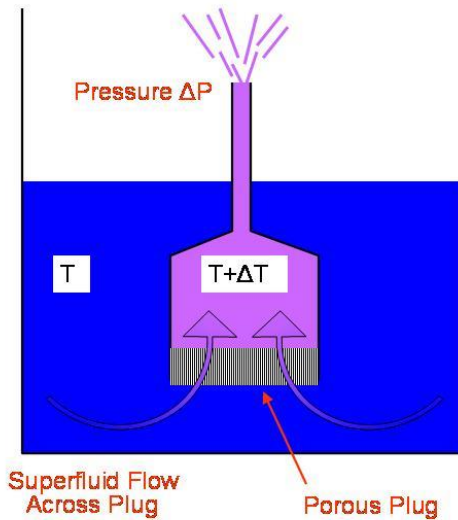


supratekutý film

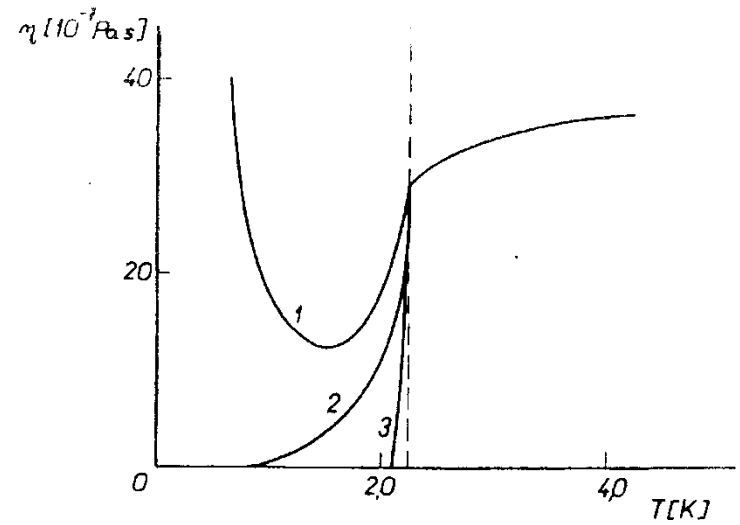
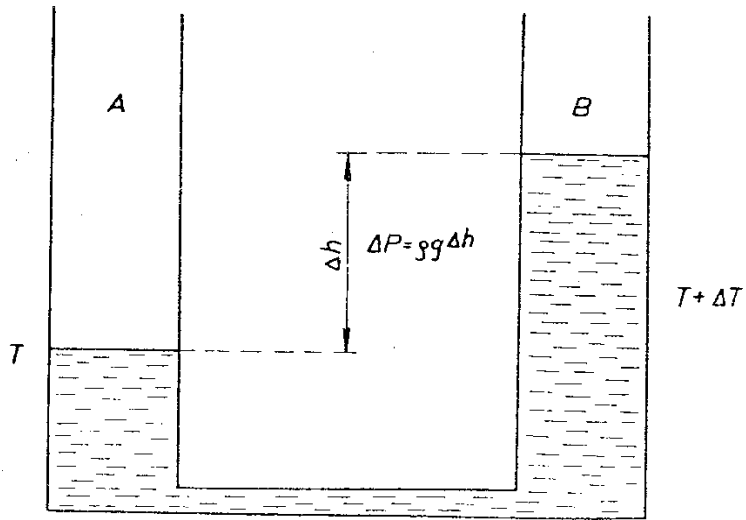
přechod λ mezi supratekutou a normální kapalinou



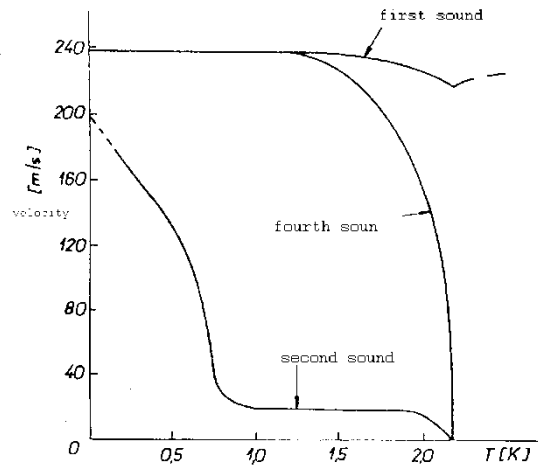
rotace supratekuté kapaliny



fontánový jev



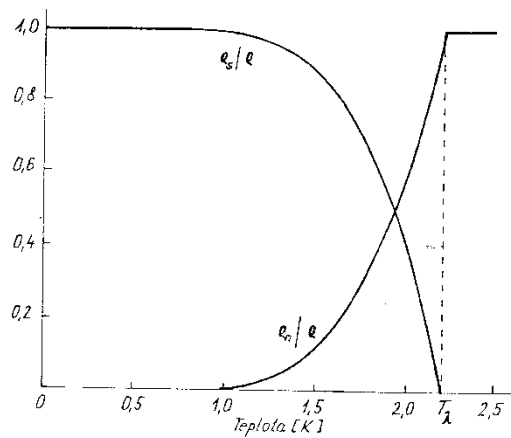
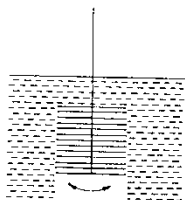
termomechanický jev



viskozita měřená různými metodami

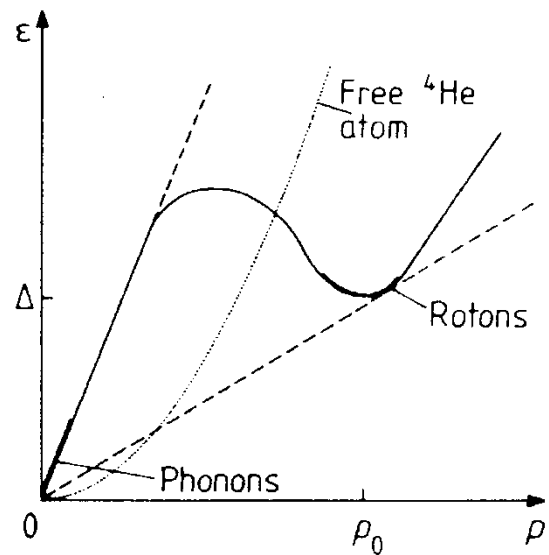
zvuky v supratekutém heliu

1. zvuk – klasické vlny hustoty
2. zvuk – vlny teploty

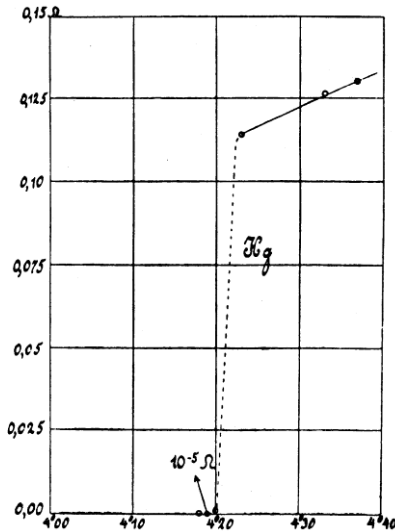


dvoukapalinový model

model excitací L. D. Landaua

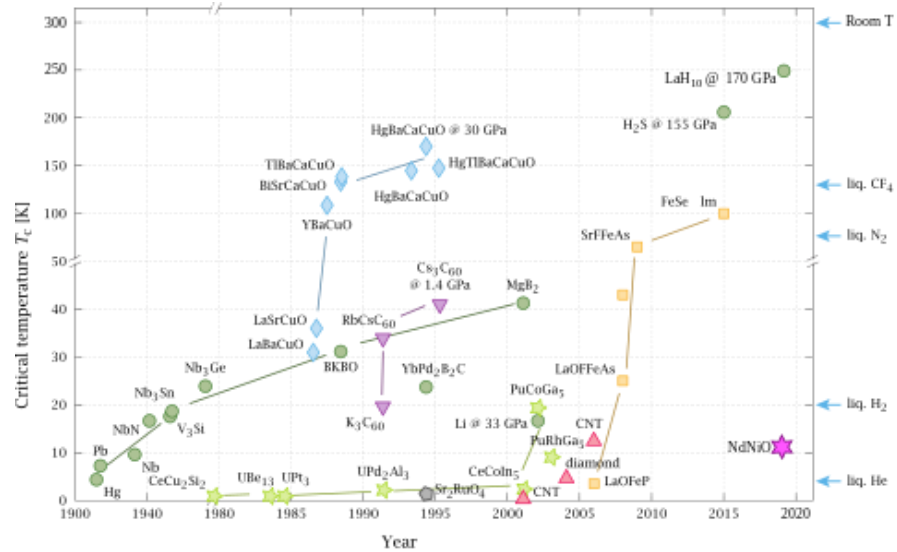


Supravodivost

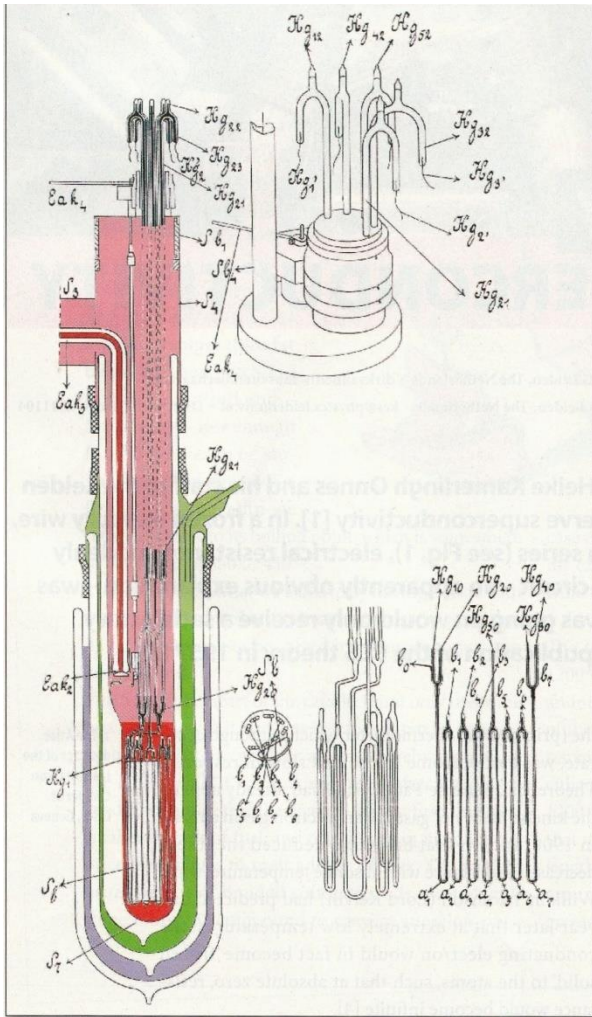


měření z 26. 10. 1911

1911 – Heike Kamerlingh Onnes
8. 4. 1911 poprvé pozoroval
supravodivost rtuti $T_c = 4,22$ K

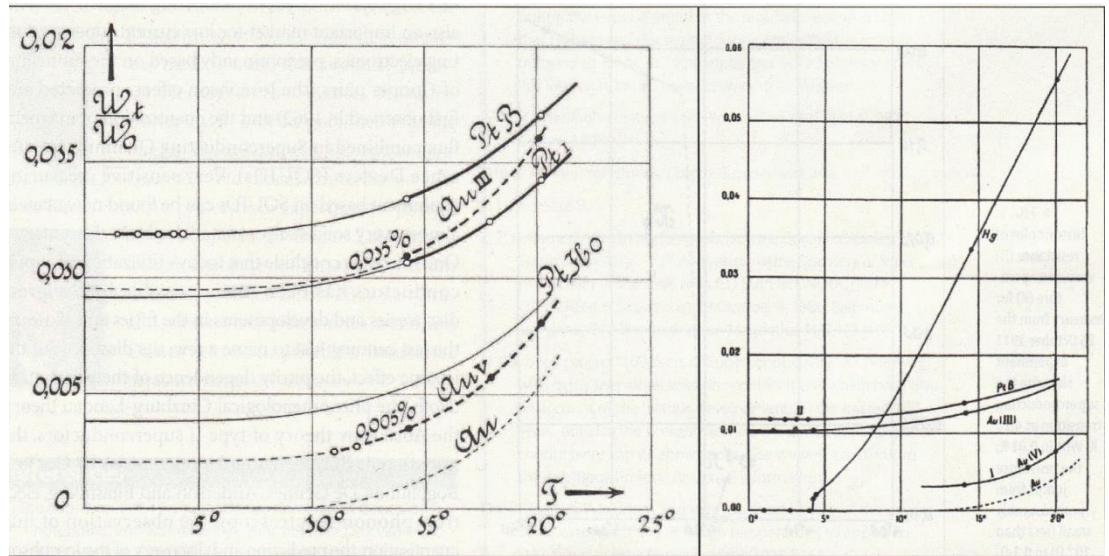


vývoj supravodičů a jejich kritických teplot

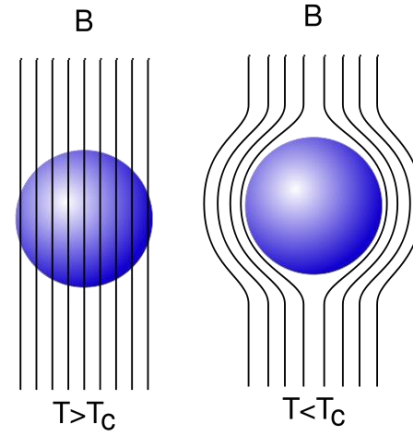


skleněná kapilára o $\varnothing 0,7$ mm
naplněná velmi čistou rtuť

od roku 1906 byla systematicky proměřována závislost odporu čistých kovů (zlato, platina) na teplotě, nejprve v čerpané lázni kapalného vodíku a později helia



1933 Meissnerův – Ochsenfeldův jev



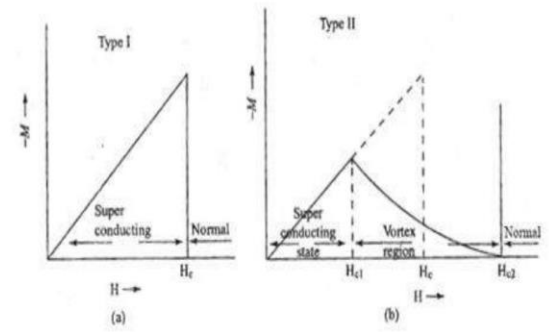
Periodic table of superconductivity

H																	He
Li 0.0004	Be 0.026											B 11	C	N	O 0.6	F	Ne
Na	Mg											Al 1.18	Si 8.2	P 13	S 17.3	Cl	Ar
K	Ca 19.6	Sc	Ti 0.5	V 5.4	Cr	Mn	Fe 2.1	Co	Ni	Cu	Zn 0.87	Ga 1.1	Ge 5.35	As 2.4	Se 8	Br 1.4	Kr
Rb	Sr	Y 19.5	Zr 0.85	Nb 9.25	Mo 0.92	Tc 8.2	Ru 0.5	Rh 0.0003	Pd	Ag	Cd 0.5	In 3.4	Sn 3.7	Sb 3.9	Te 7.5	I 1.2	Xe
Cs	Ba 5		Hf 0.38	Ta 4.5	W 0.01	Re 1.7	Os 0.7	Ir 0.1	Pt	Au	Hg 4.15	Tl 2.4	Pb 7.2	Bi 8.5	Po	At	Rn
Fr	Ra		Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Nh	Fl	Mc	Lv	Ts	Og
Lanthanides		La 6	Ce 1.7	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu 2.7	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu 0.1	
Actinides		Ac	Th 1.4	Pa 1.4	U 1.3	Np	Pu	Am 1.0	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr	

Periodic table of binary hydride superconductors

H																	He
LiH ₈ 82	BeH ₂ 44											BH 21	C	N	O	F	Ne
Na	MgH ₄ 30											AlH ₃ 140	SiH ₄ ~20	PH ₃ 90	SH ₄ 200	Cl	Ar
KH ₁₀ 140	CaH ₆ 235	ScH ₃ 233	TiH ₁₄ 54	VH ₈ 72	CrH ₃ 81	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	GaH ₃ 123	GeH ₄ 220	AsH ₃ 90	SeH ₃ 120	BrH ₂ 12	Kr
Rb	SrH ₁₀ 259	YH ₈ 240	ZrH ₁₄ 88	NbH ₄ 47	Mo	TcH ₂ 11	RuH ₃ 1.3	RhH 2.5	PdH 5	Ag	Cd	InH ₃ 41	SnH ₄ 90	SbH ₃ 95	TeH ₄ 100	IH ₂ 30	XeH 29
Cs	BaH ₄ 38		HfH ₂ 76	TaH ₄ 136	WH ₃ 60	Re	OsH 2	IrH 7	PtH 25	AuH 21	Hg	Tl	PbH ₃ 107	BiH ₃ 110	PoH ₄ 50	At	Rn
FrH ₇ 63	RaH ₁₂ 116		Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Nh	Fl	Mc	Lv	Ts	Og
Lanthanides		LaH ₁₀ 250	CeH ₈ 117	PrH ₃ 31	NdH ₃ 6	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	HoH ₃ 37	ErH ₁₅ 30	TmH ₄ 21	Yb	LuH ₁₂ 7	
Actinides		AcH ₁₀ 250	ThH ₁₀ 170	PaH ₃ 62	UH ₃ 35	NpH ₇ 10	Pu	AmH ₄ 0.3	CmH ₃ 0.9	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr	

Type 1 & Type 2 Superconductors

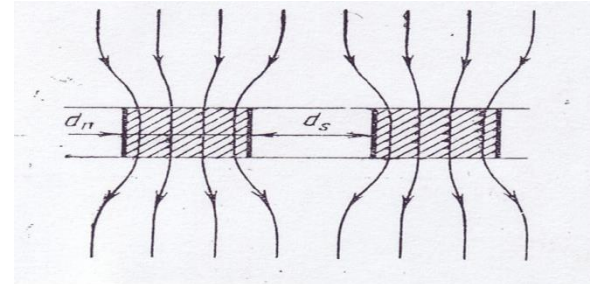


14

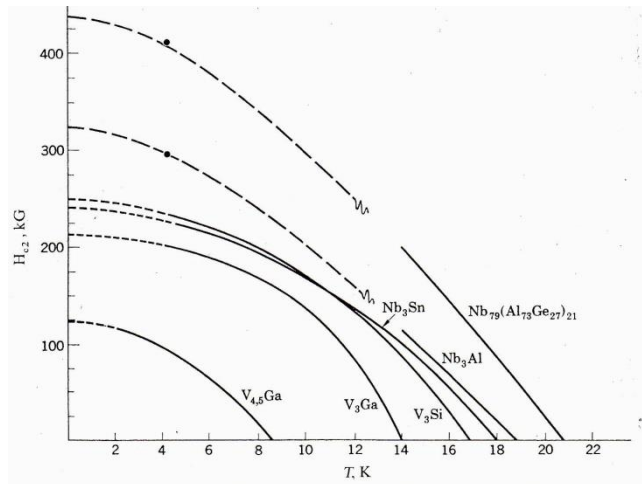
Supravodiče 2. druhu

- praktické využití pro solenoidy silných magnetických polí (do 16 T)

materiál	T_c (K)	materiál	T_c (K)
Nb_3Sn	18,05	V_3Ga	16,5
Nb_3Ge	23,2	V_3Si	17,1
Nb_3Al	17,5	Nb-Ti	9
NbN	16,0	Ti_2Co	3,44
$(SN)_x$	0,26	La_3In	10,4



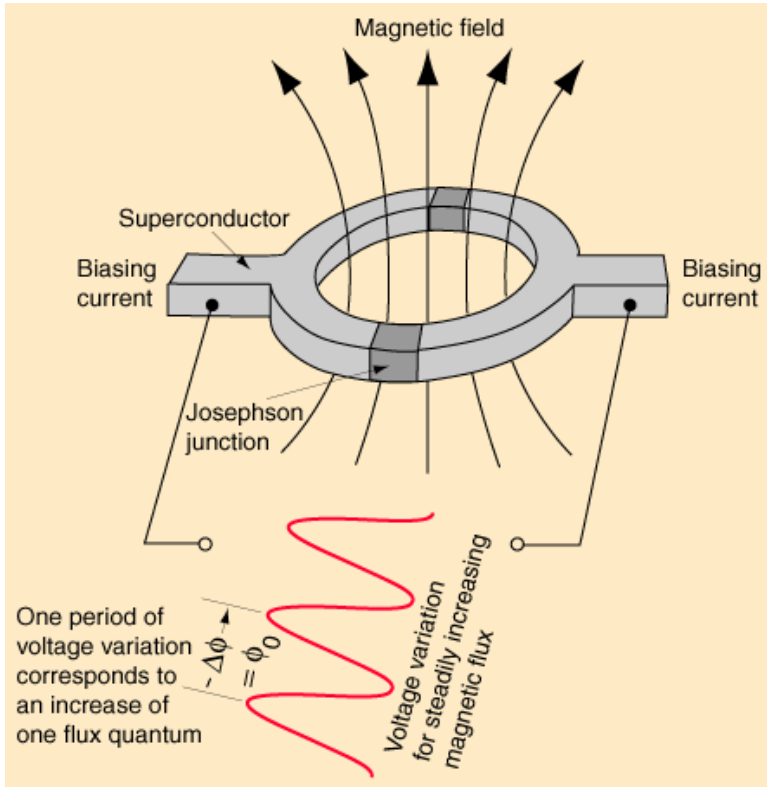
supravodiče 2. druhu
– smíšený stav
magnetické pole proniká
do supravodiče podél vřív



supravodiče 2. druhu v magnetickém poli

Slabá supravodivost

Josephsonovy jevy



$$\Phi_0 = h/2.e = 2,07.10^{-15} \text{ Wb (T.m}^2\text{)}$$

$$f = 2.e.V/h$$

citlivost skvidu $\delta V/V \sim 10^{-10}$

$B \sim 10^{-14} \text{ T}$

(srdce $B \sim 10^{-10} \text{ T}$

mozek $B \sim 10^{-13} \text{ T}$)

SQUID

(Superconducting quantum interference device)



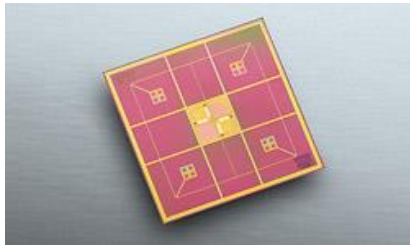
model hrotového skvidu

MCG - Magnetokardiografie

99 kanálů

– 33 jednotek skvidů (tenkovrstvých)
(2 ortogonální gradiometry + 1
magnetometr)

6 litrů LHe/den



Elekta Neuromag

MEG - Magnetoencefalografie

306 kanálů – 102 jednotky (2 ortogonální gradiometry + 1 magnetometr)

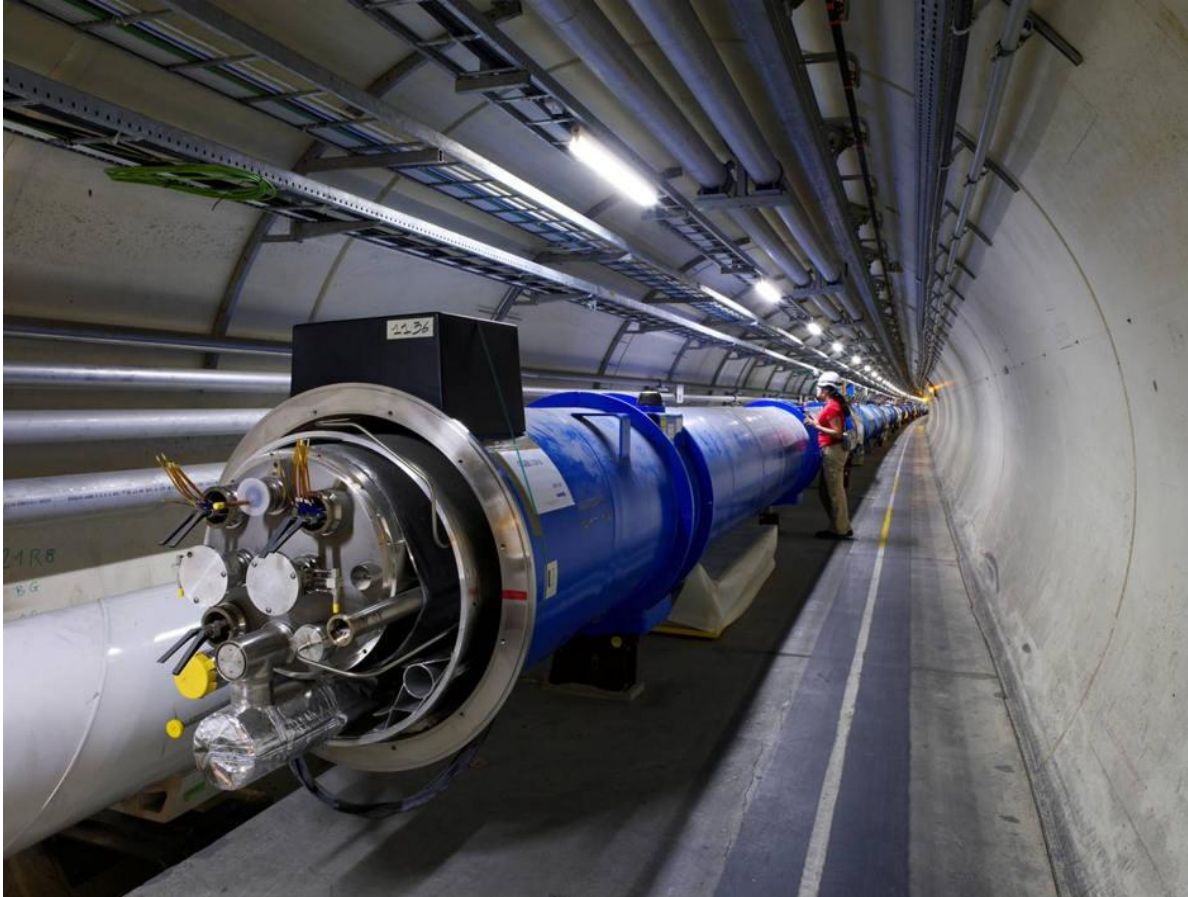
64 kanálů EEG



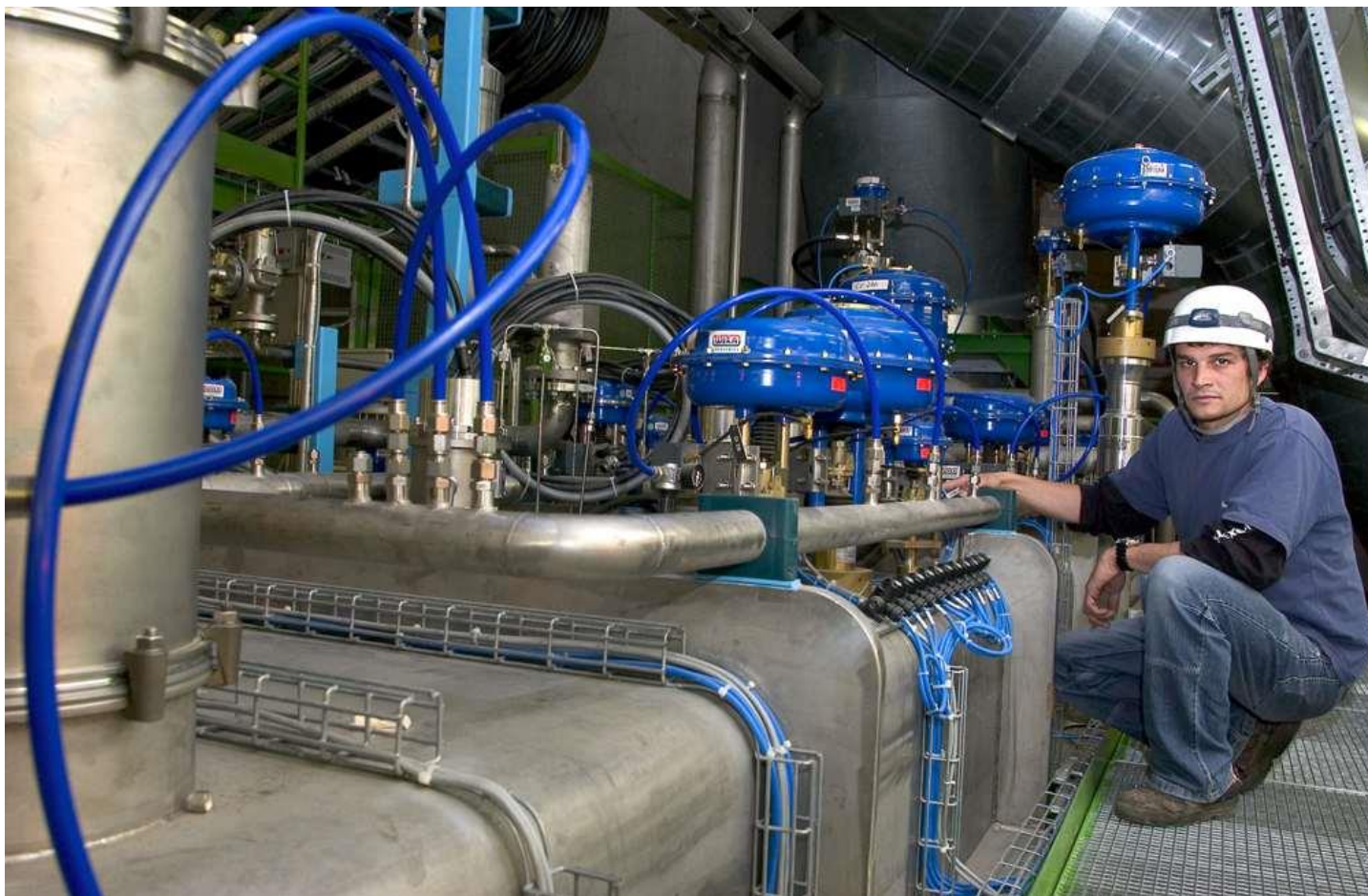
Elekta Neuromag



Supravodivodivé magnety



CERN LHC: 1296 dipólů (Nb-Ti) $B = 8,36$ T; $T = 1,9$ K

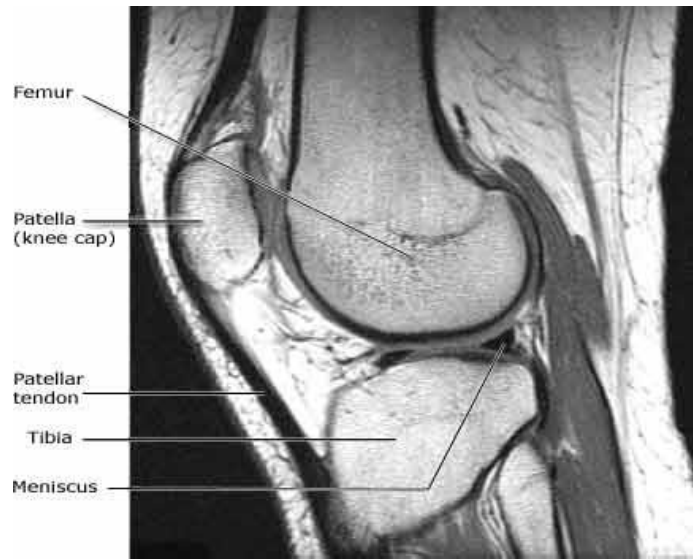


**LHC: supratekuté LHe, chladičící výkon 140 kW / 4,5 K
zásoba 700 m³ LHe, 12 000 m³ LN₂ k prochlazení 31 000 t materiálu**

Supravodivé magnety pro MRI

$B = 0,5 - 1,5 \text{ T}$, perzistentní mód
uzavřený chladicí okruh helia,
vysoká autonomie ~ 3 měsíce

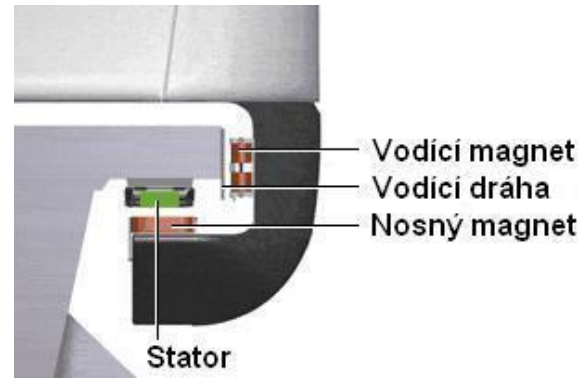




Magnetické levitační vlaky

Transrapid – zkušební trať u
Lathem (BRD)

2002 Šanghaj - komerční trať z
letišť (450 km/h)

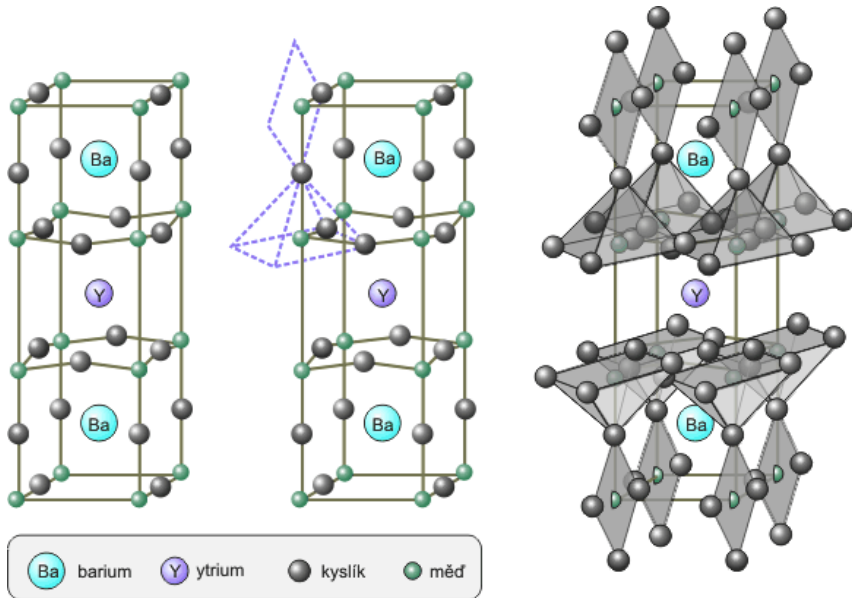


JR Maglev Japonsko
1996 zkušební provoz v Mayazaki
trať 7 km v Yamanashi u Tokya rekord 581 km/h (2005)



Vysokoteplotní supravodiče

1986 Muller, Bednorz, Chu
 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ $T_c = 90 \text{ K}$

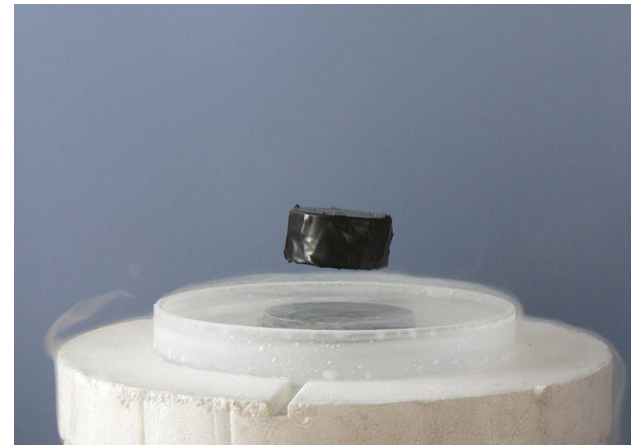


$\text{HgBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_8$ $T_c = 134 \text{ K}$

$\text{SmO}_{1-x}\text{F}_x\text{FeAs}$ $T_c = 55 \text{ K}$

$\text{PrO}_{1-x}\text{F}_x\text{FeAs}$ $T_c = 52 \text{ K}$

MgB_2 $T_c = 39 \text{ K}$



levitace magnetu nad supravodičem

Děkuji vám za pozornost,

