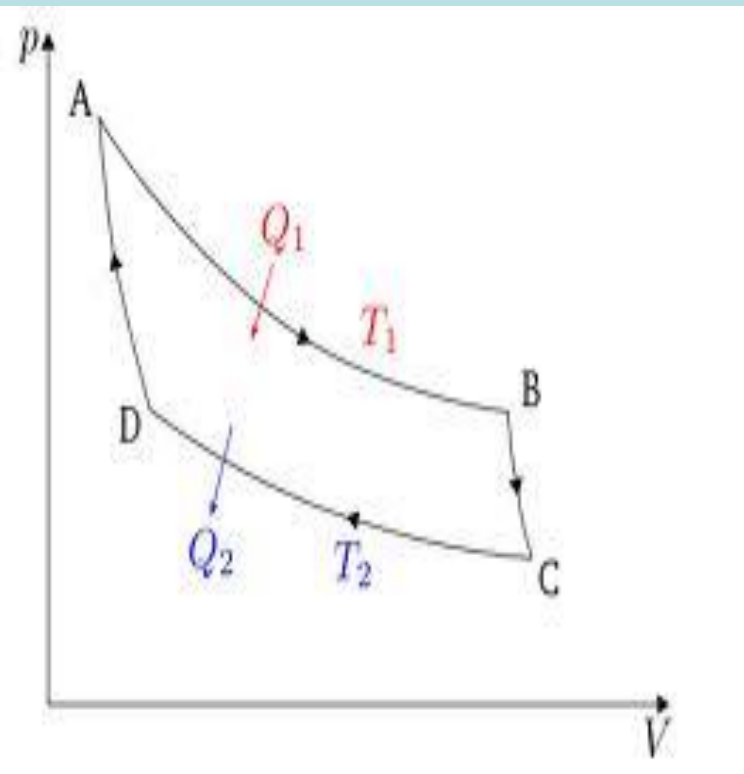




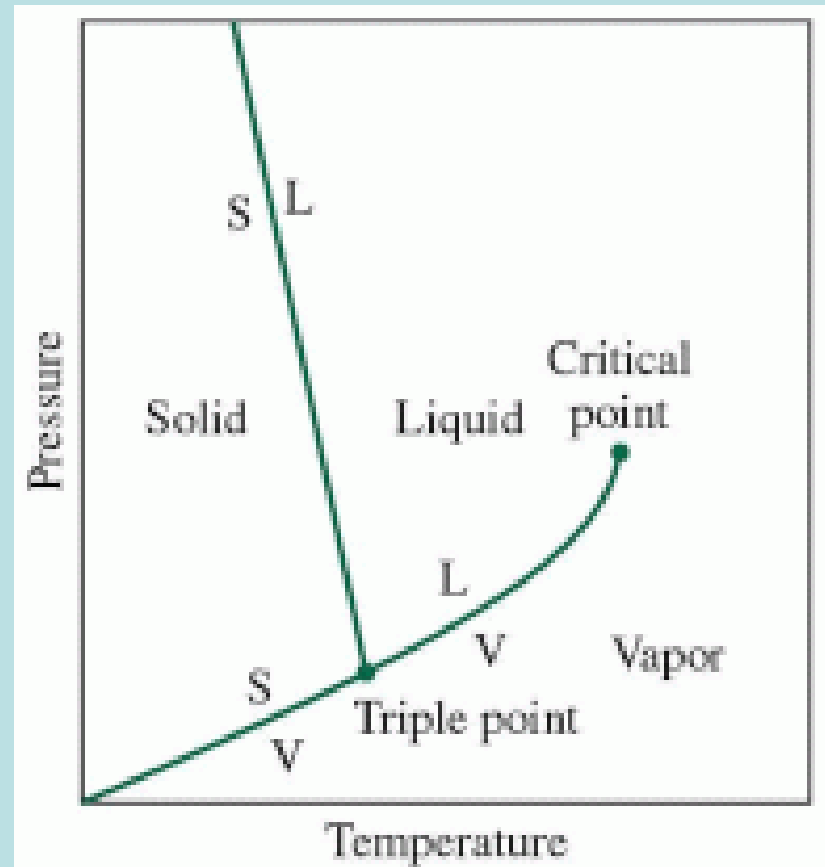
# Století kapalného helia

Univerzita 3. věku  
25.10.2021

Miloš Rotter  
Univerzita Karlova v Praze



fázový diagram  
klasických plynů



Carnotův cyklus  
- klasická definice absolutní teploty

# Prehistorie zkapalnění helia

předchůdci:

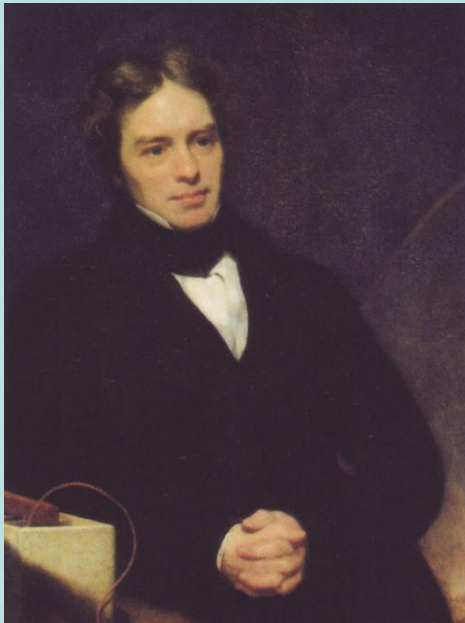
Martinus van Marum (1750 – 1837)

Charles Cagniard de la Tour (1777 – 1859)

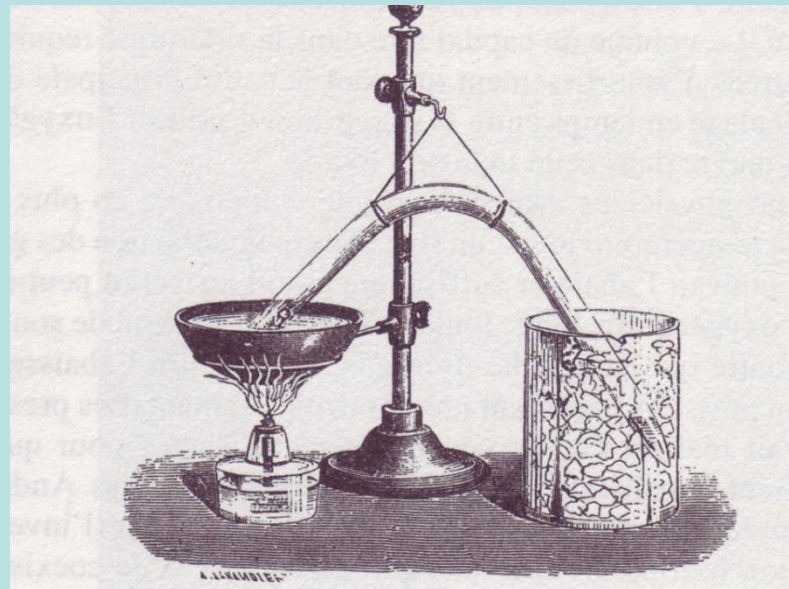
Thomas Andrews (1813 – 1885)

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, NH<sub>3</sub>, CO<sub>2</sub>,...kromě O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> a H<sub>2</sub>



prostá destilace

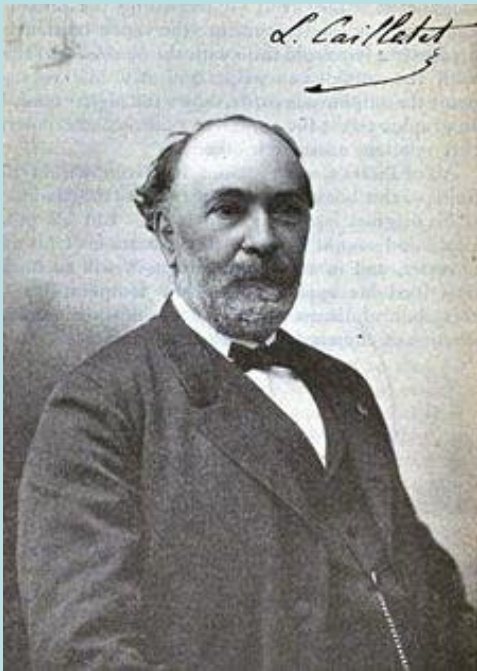


# 1877 – zkapalnění kyslíku (90 K)

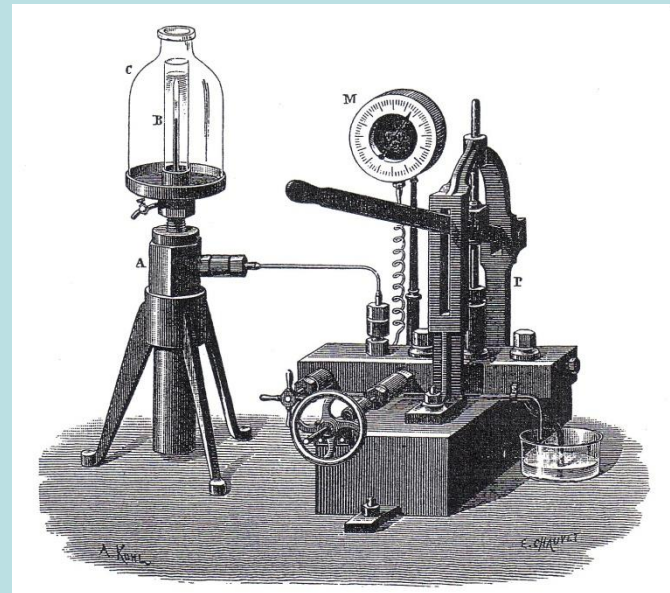
vánoční zasedání Académie des Sciences v Paříži 24. 12. 1877

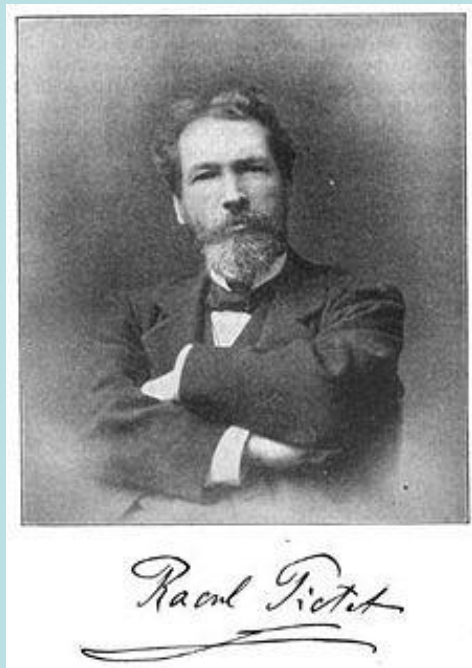
zapečetěný dopis stálému tajemníku prof. Jeanu Baptistovi Dumasovi

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



směs kyslíku a  $\text{CO}_2$  stlačená na 30 MPa ochlazená na  $-29\text{ }^\circ\text{C}$  zkapalněným  $\text{SO}_2$  po expanzi dávala kapky zkapalněného kyslíku (využití Jouleova – Thomsonova jevu)



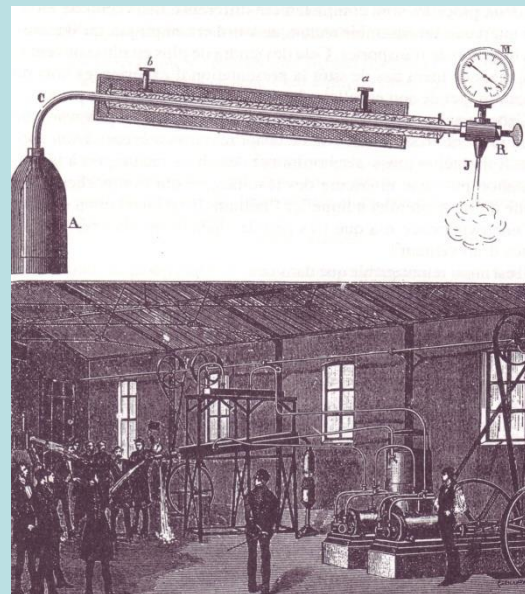
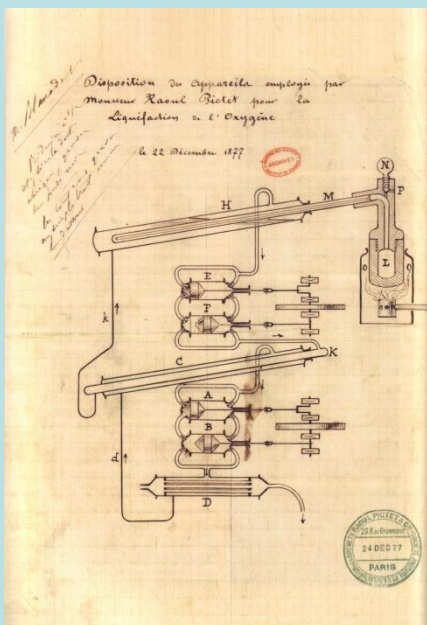


## Raoul – Pierre Pictet (1846 – 1929)

průmyslník, absolvent École Polytechnique,  
na tomtéž zasedání byl přečten  
telegram od firmy Raoul Pictet et C<sup>ie</sup> z Ženevy

### kaskádní princip:

– chlazení kapalným SO<sub>2</sub> čerpaným na -65 °C  
uvnitř pevný CO<sub>2</sub> čerpaný na -140 °C  
kyslík stlačený na 32 MPa, při otevření ventilu byla  
pozorována krátká sprška kapalného kyslíku  
(reálně s pomocí Jouleova - Thomsonova jevu)



# 1883 zkapalnění dusíku (77 K)

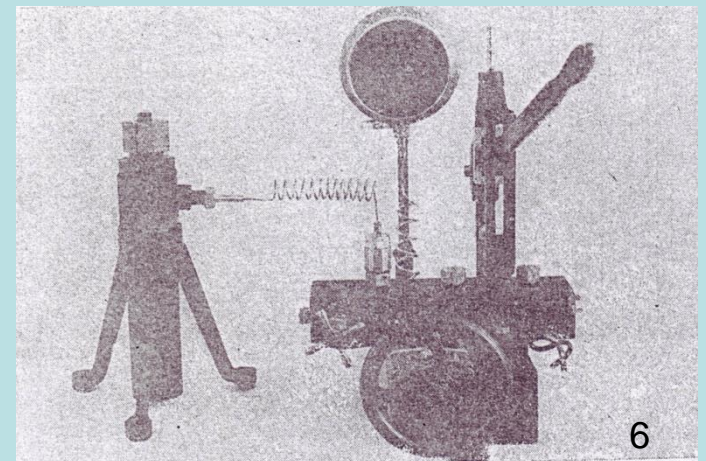
Jagellonská univerzita v Krakově

**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





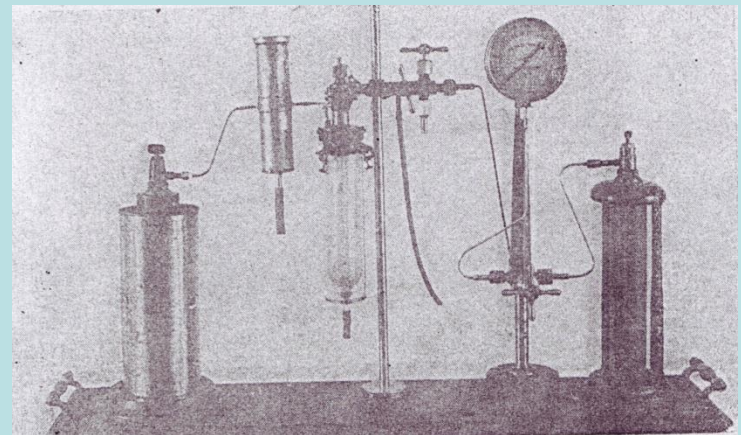
K. Olszewski

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



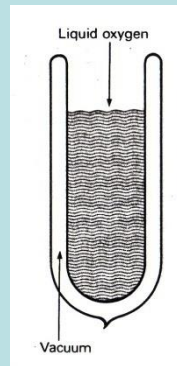
Olszewského aparatura

## 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

1895 – Carl Linde and William Hampson  
- vynalezli tepelné výměníky







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

veřejná demonstrace fyzikálních experimentů včetně zkapalnění plynů

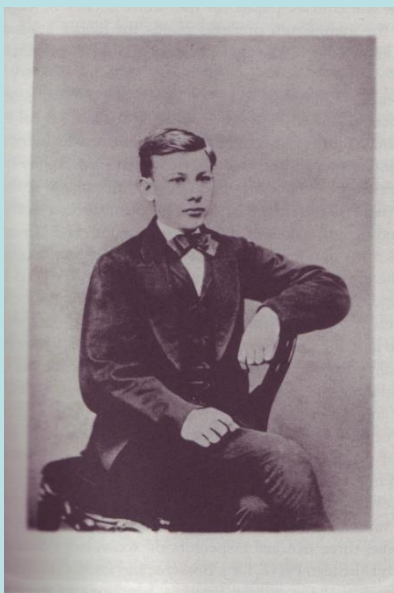
v publiku: Alexander Siemens s chotí, Lady Dewar, Sir Williams Crookes, Lord Rayleigh, Ludwig Mond, Sir Oliver Lodge, Sir Francis Galton, Robert Mond, Commendatore Marconi  
asistenti: J. W. Heath, R. N. Lennox

# 1908 zakapalnění helia – 4,2 K

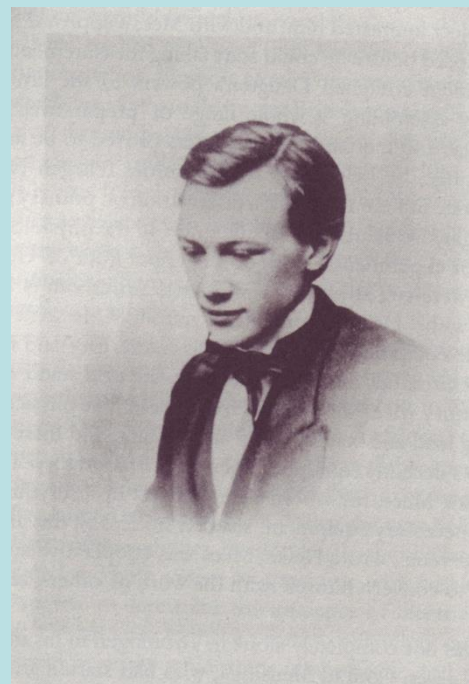
## Heike Kamerlingh Onnes

se narodil 21. září 1853 v Groningen

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

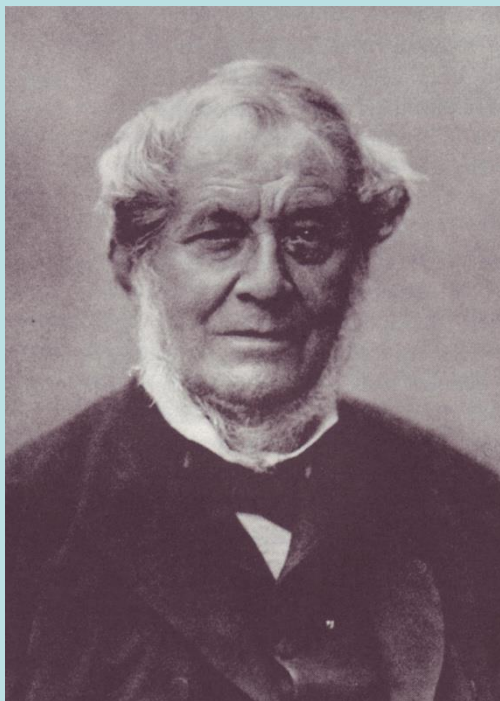


Heike ve věku 17 let,  
studoval na univerzitě v Groningen (1870 – 1876)  
aktivní účast ve studentských spolcích

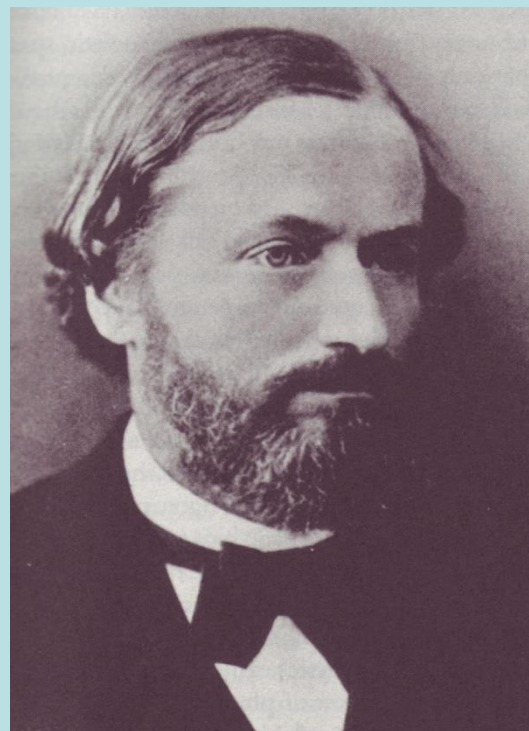


Heike v 22 letech

od listopadu 1871 do dubna 1873  
studoval na univerzitě v Heidelbergu



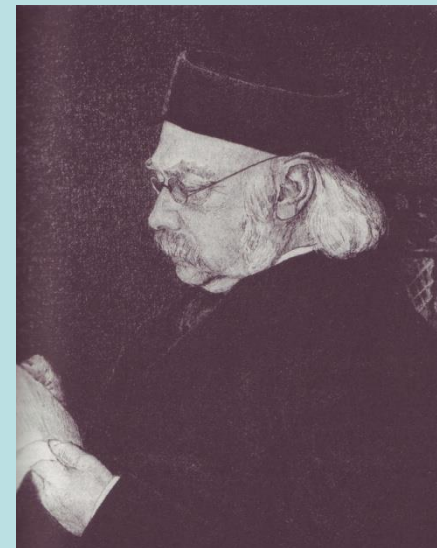
Robert Bunsen (1811 – 1899)  
profesor chemie



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

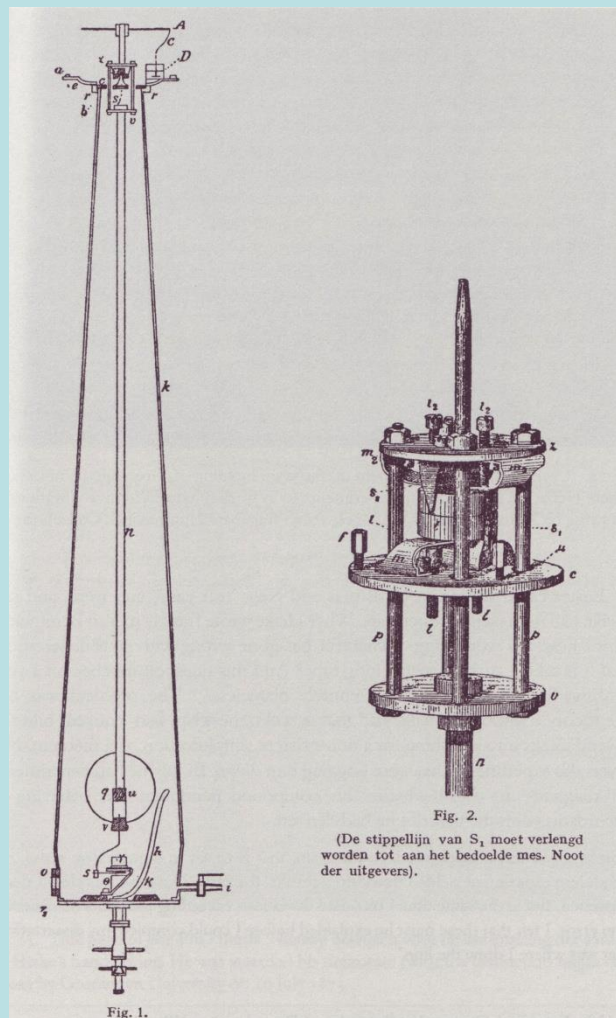


Fig. 1.

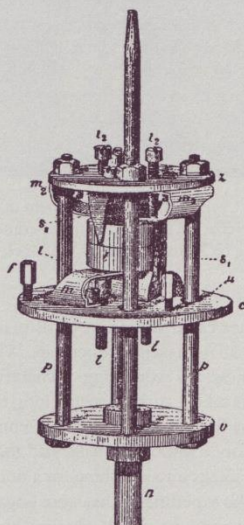
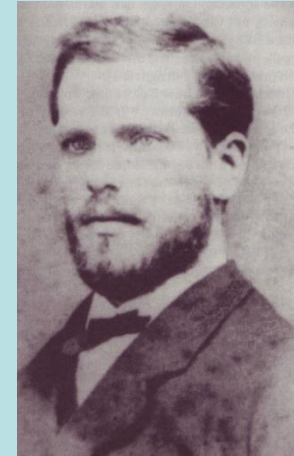


Fig. 2.

(De stippelij van S<sub>1</sub> 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*

# Johannes Diderick van der Waals (1837 – 1923)



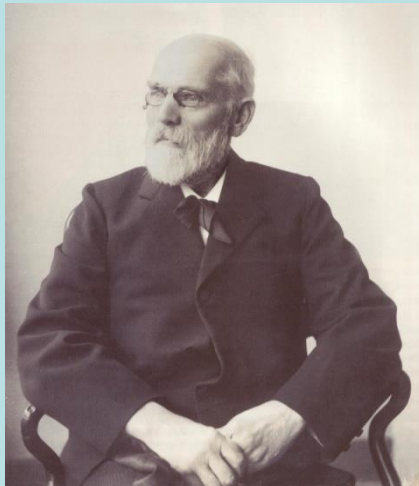
1873 – stavová rovnice reálného plynu

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

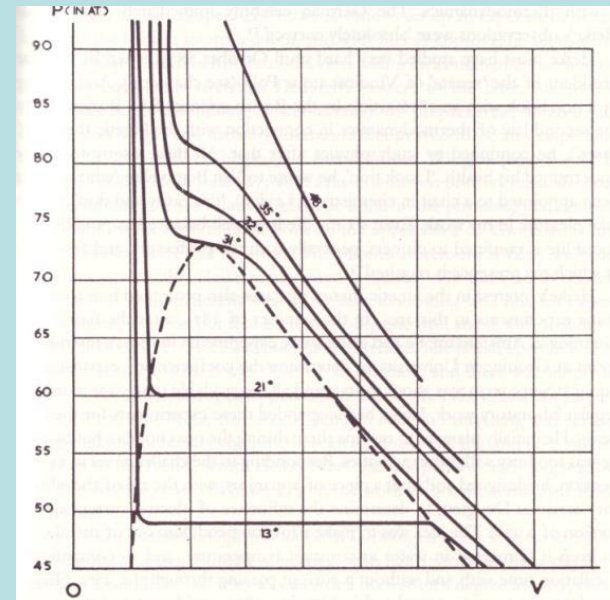
1879 – zákon o korespondenčních stavech

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

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



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**

# 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 umístit nápis

**Door meten tot weten**

(od měření k poznání)

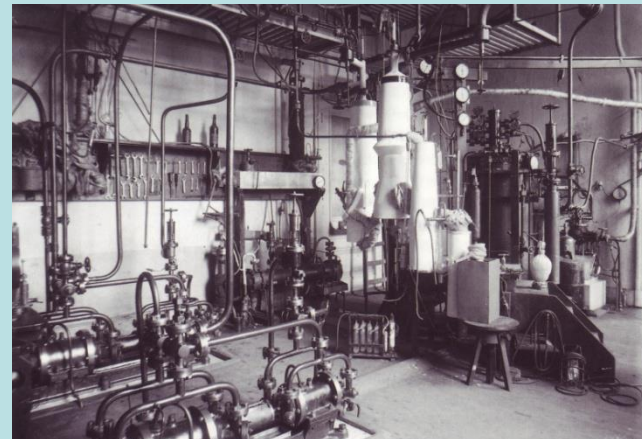


Scanned at the American  
Institute of Physics

sál zkapalňovače helia



budova fyzikálního ústavu na Steenschuur  
postavená v roce 1859



kaskáda refrigerátorů

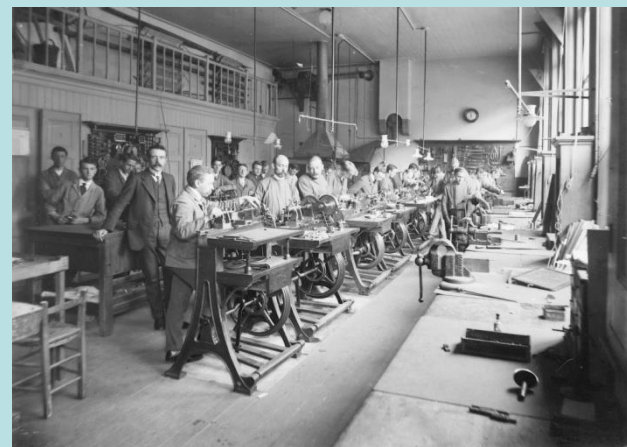


založil odborný časopis *Communications from the Physical Laboratory at the University of Leiden* pro bezprostřední publikaci výsledků výzkumu

v září 1887 se H. K. O.  
oženil s Betsy Bijleveldovou

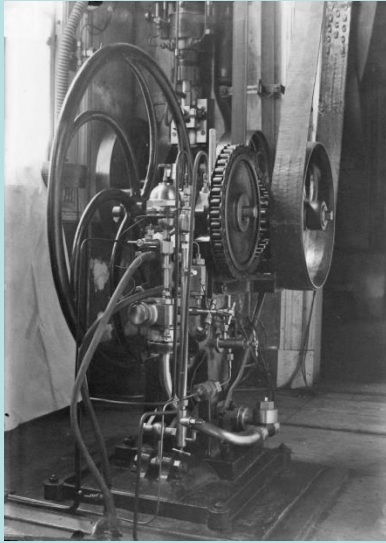


zřídil sklářskou školu a dílnu vedenou Oskarem Kesselringem

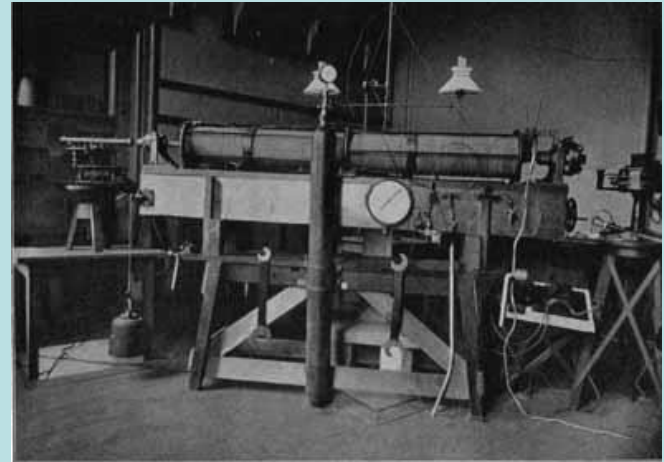


v roce 1900 založil v budově fyzikálního ústavu školu jemných mechaniků 15

## technické zázemí



Cailletetův kompresor se rtuťovým pístem



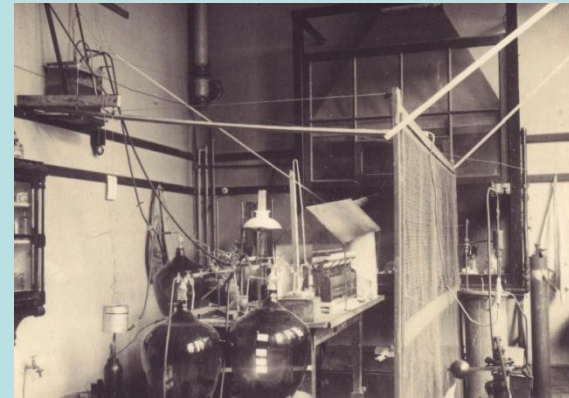
WERKKAMER C.

Scanned at the American  
Institute of Physics

sál kompresorů



plnění plynojemu etylénem



čištění plynného helia





H. K. O. se svými asistenty

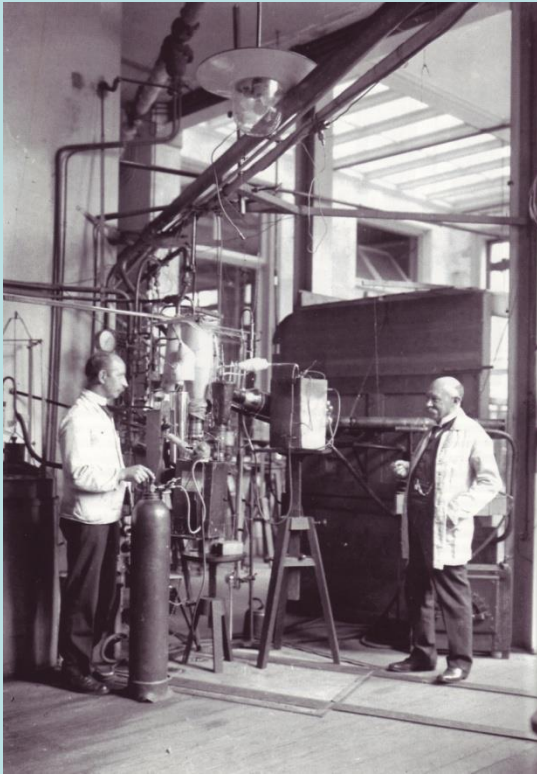
**1868** – Pierre Janssen objevil čáry He ve spektru sluneční korony  
**1895** – William Ramsay objevil He v plynech uvolňovaných ze smolince  
**1905** – H.K.O. získal monazitový písek ze Severní Karoliny

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“

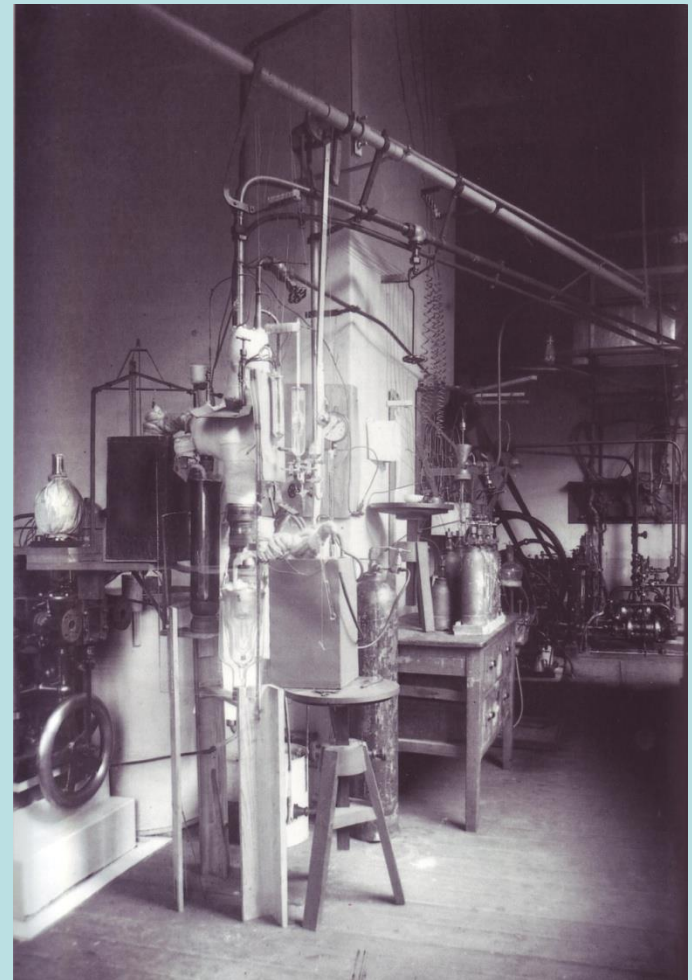
připomínka výbuchu lodi na stejném místě  
naložené střelným prachem v roce 1807



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*)

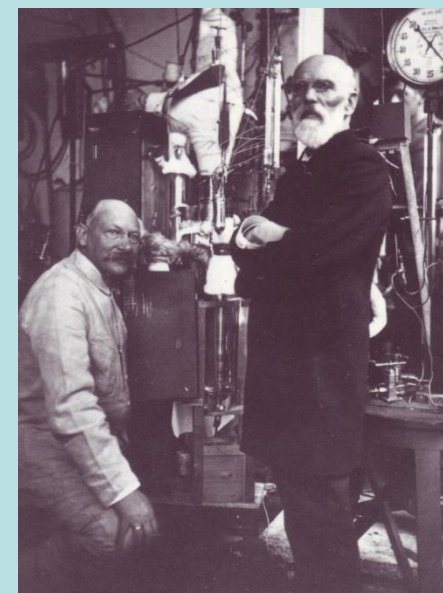


první zkapalňovač helia

## Průběh památného dne 10. července 1908

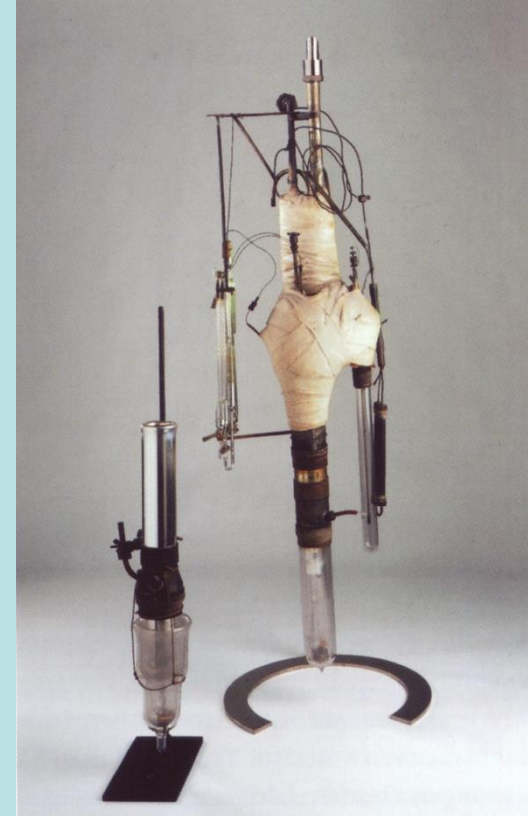
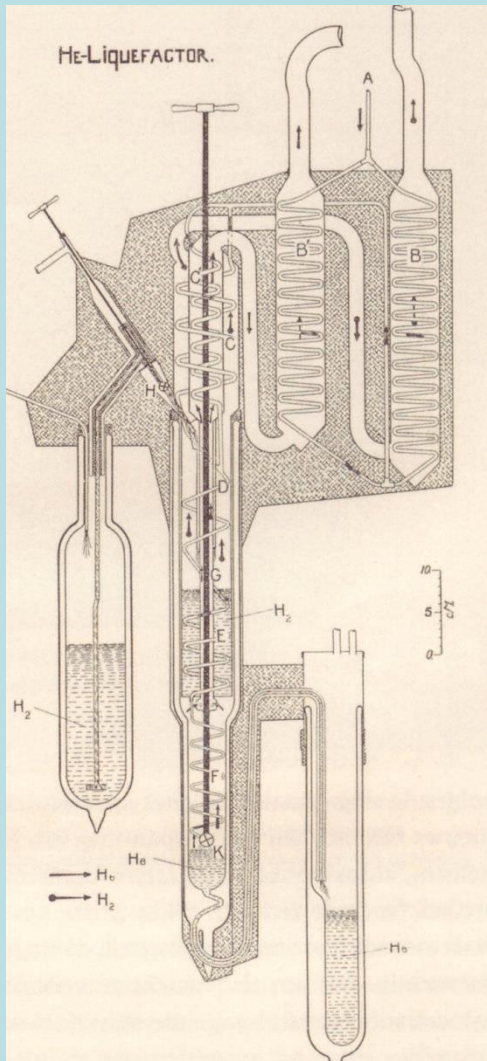
- den předem bylo připraveno 75 litrů kapalného vzduchu
- zařízení bylo testováno na těsnost, vyčerpáno a napuštěno čistým plynem
- do 11.30 hod. bylo připraveno 20 litrů kapalného vodíku
- 200 litrů plynného helia bylo po několik měsíců získáváno žháním monazitového písku a opakovaně zbavováno zbytků 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 pozorované přeměny v led
- ve 21.30 hod. zbývalo jen několik mililitrů kapalného helia, experiment byl ukončen

(Communication No. 108)



H. K. O. a Van der Waals

## 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.

# Heike Kamerlingh Onnes



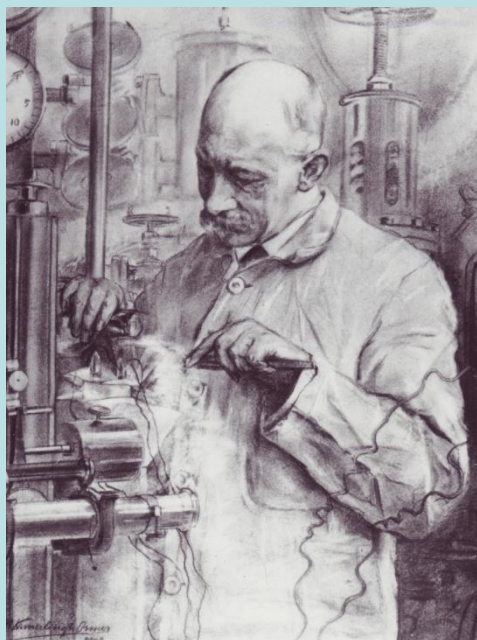
21/09/1853 Groningen – 21/02/1926 Leiden

## **Zkapalnění helia v roce 1908**

**se stalo významným milníkem ve vývoji fyziky dvacátého století. Byla tehdy nejenom získána kapalná fáze posledního „permanentního“ plynu a započat rozvoj fyziky nízkých teplot, ale byl tak dán i impuls k rozvoji dalších oblastí fyziky.**

**Systematické úsilí Heike Kamerlingha Onnese v budování laboratoře schopné zkapalnit helium se stalo předobrazem moderní fyzikální laboratoře vystavěné na průmyslovém základě se systematicky připravovaným kádrem technických spolupracovníků. Laboratoř byla otevřena všem, kdo se chtěli podílet na společném výzkumu, jehož výsledky byly neprodleně publikovány ve vlastním časopise.**

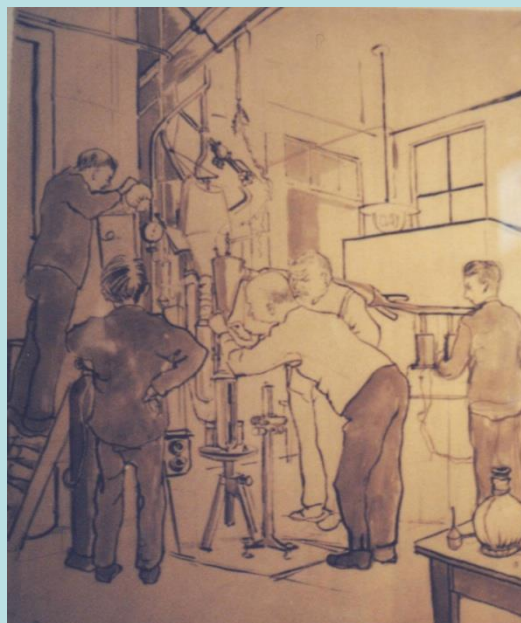
**Laboratoř se stala základem pokroku ve fyzice nízkých teplot a ve fyzice kondenzovaného stavu.**



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

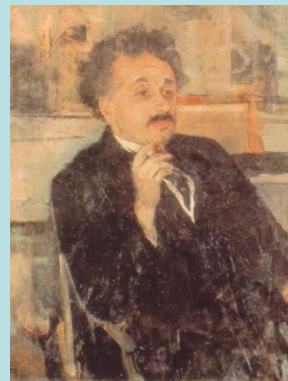
### 1913 Nobelova cena za fyziku

„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

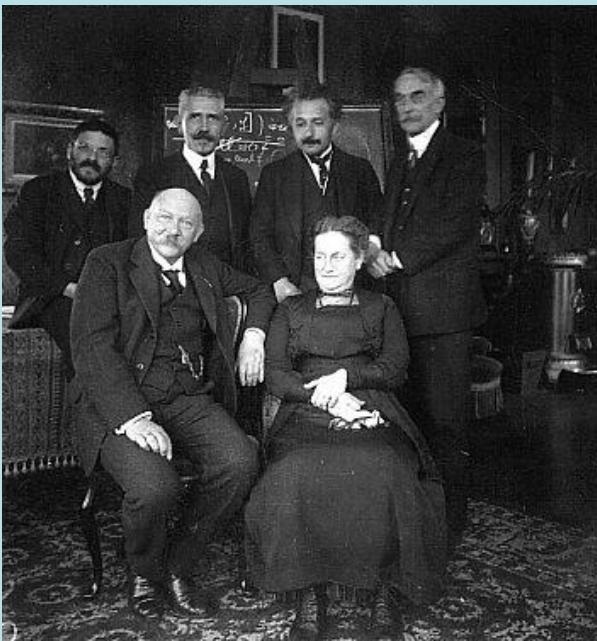


Albert Einstein byl v roce 1920  
hostujícím profesorem v Leidenu



Harm K. O. 1921

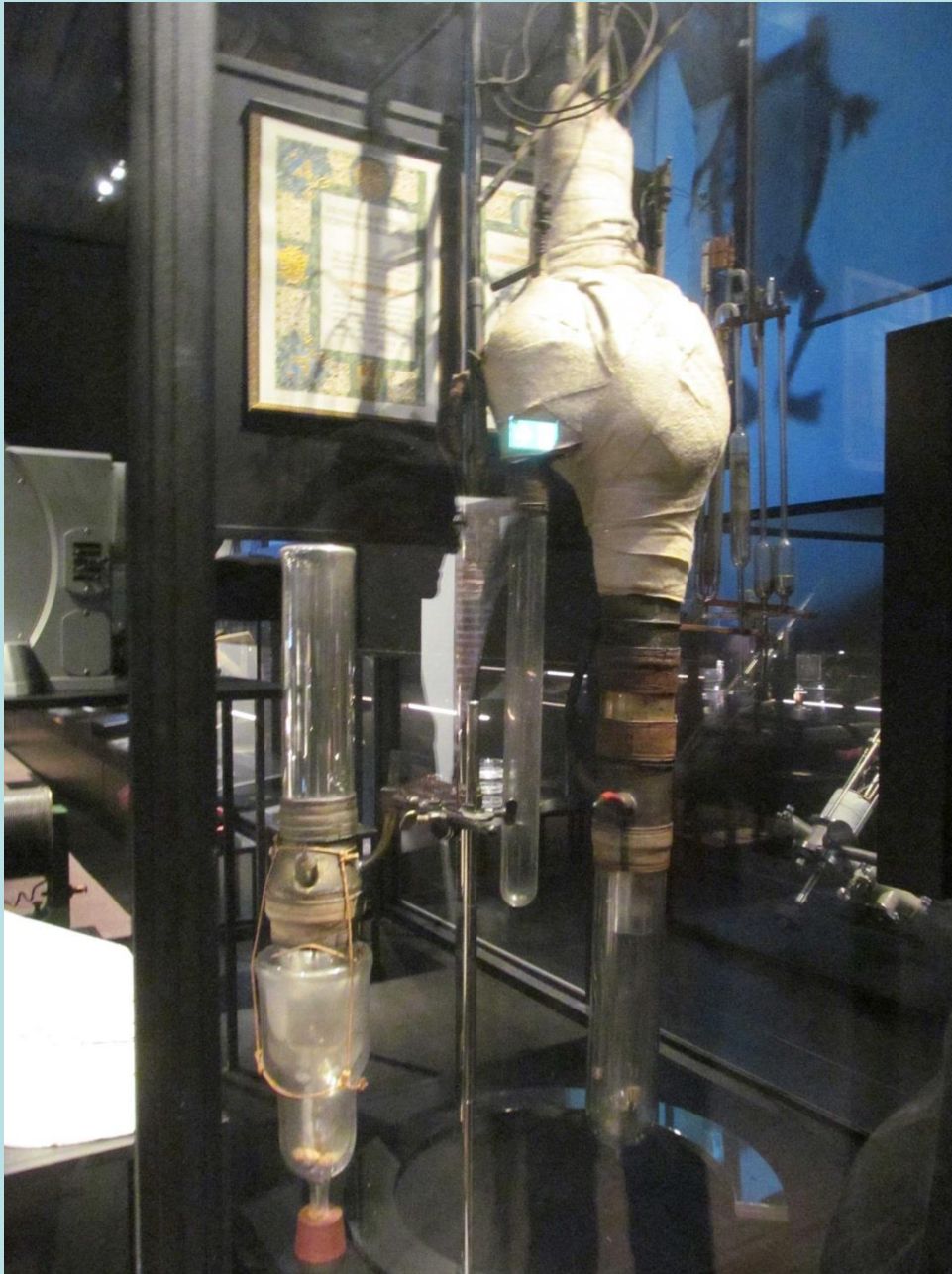




**H.K.O. s chotí, A. Einstein, P. Ehrenfest,...**



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



**druhý zkapalňovač  
helium v muzeu  
Boerhave v Leidenu**

# Kryogenerátory

## – perspektivní způsob získávání nízkých teplot

### Giffordův – McMahonův kryogenerátor

celkové zásoby He na Zemi

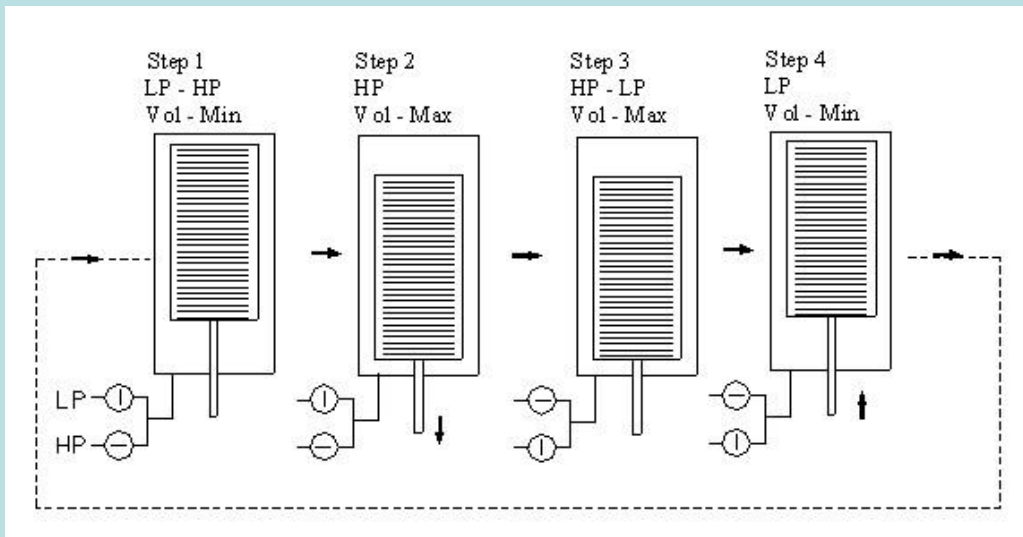
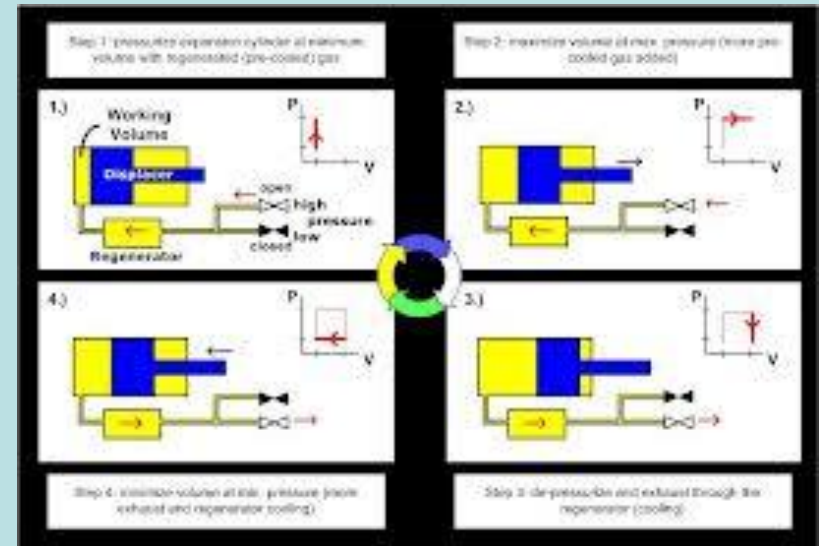
~  $6,5 \cdot 10^9 \text{ m}^3$  těžba ~  $110 \cdot 10^6 \text{ m}^3 / \text{rok}$

He z rozpadu U a Th

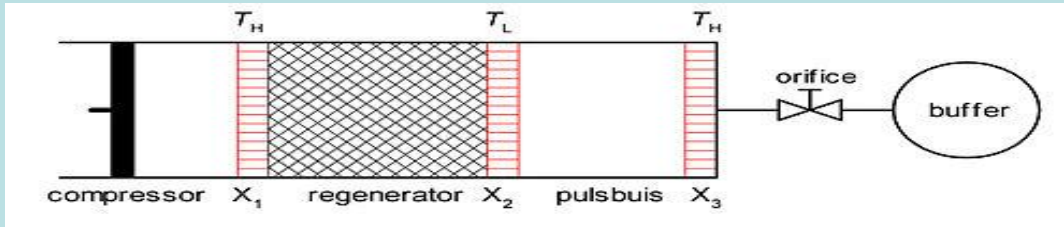
~  $17 \cdot 10^6 \text{ m}^3 / \text{rok}$

nebezpečí vyčerpání zásob He do r. 2040

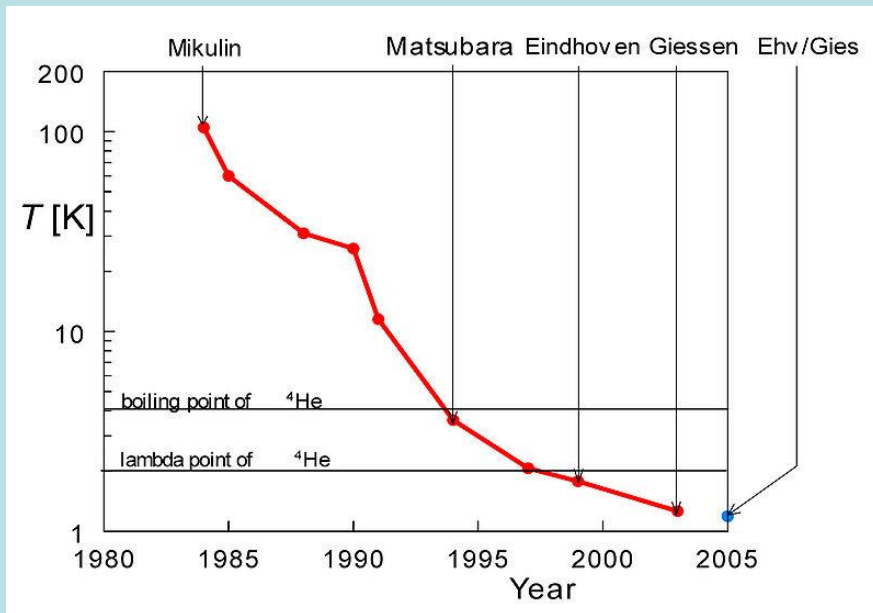
(Robert Richardson)



## Pulzní trubice

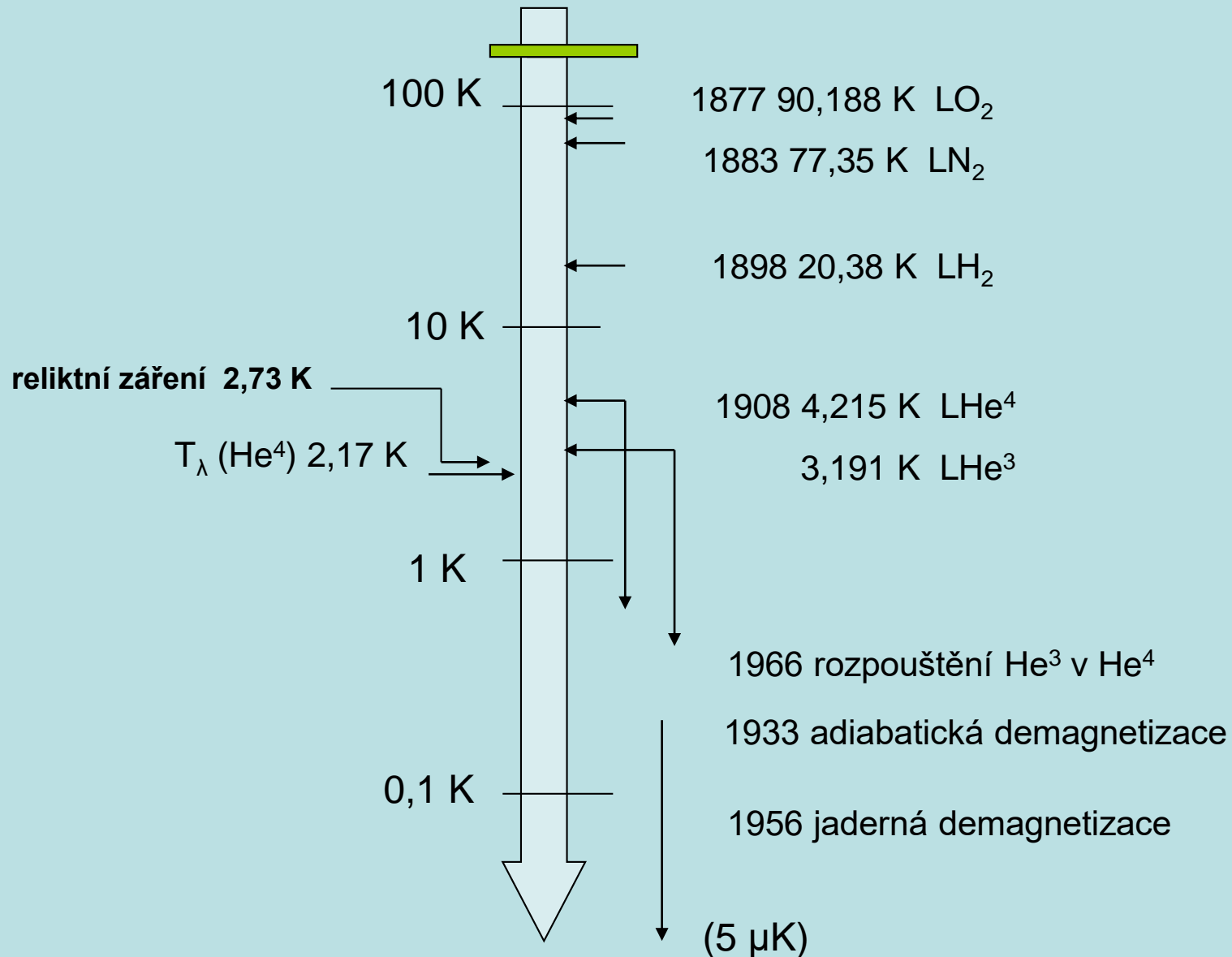


dvoustupňová až do teploty 3,2 K



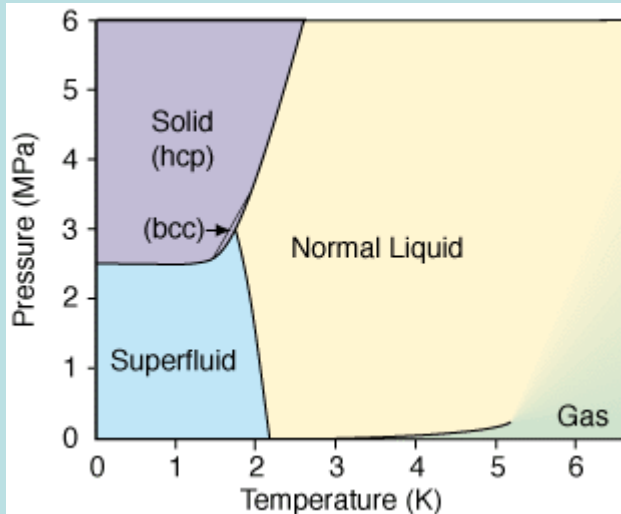


# Historický teploměr



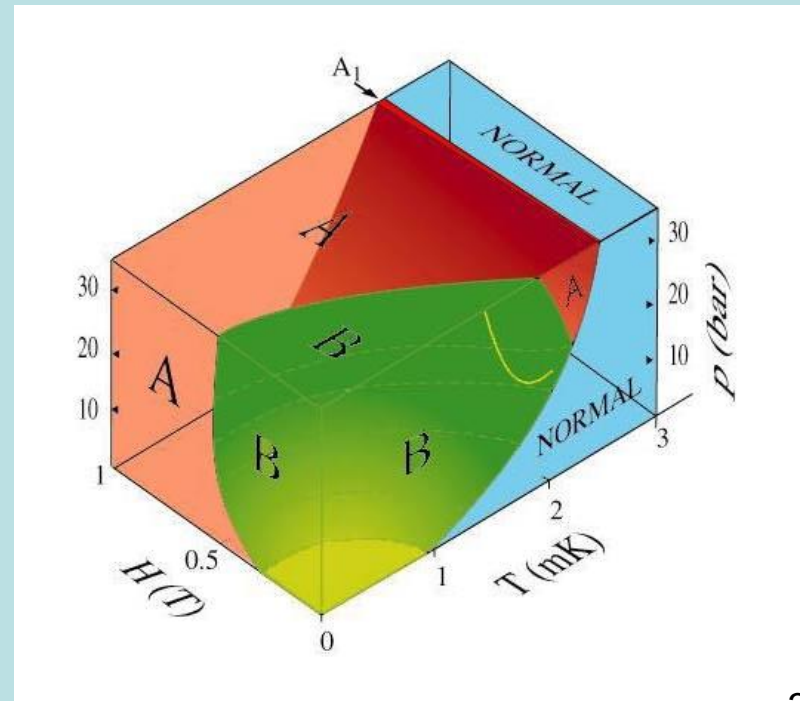
# Supratekutost

$^4\text{He}$  – kondenzát bozonů

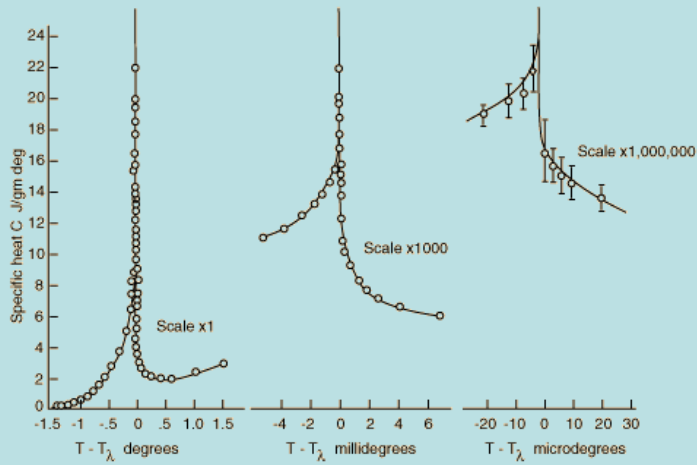


ozařováním  $^6\text{Li}$  neutrony v reaktoru vzniká tritium, rozpadá se na  $^3\text{He}$   
 $^3\text{H} \rightarrow ^3\text{He} + e + \bar{\nu}_e$   $\tau = 12,32$  yr

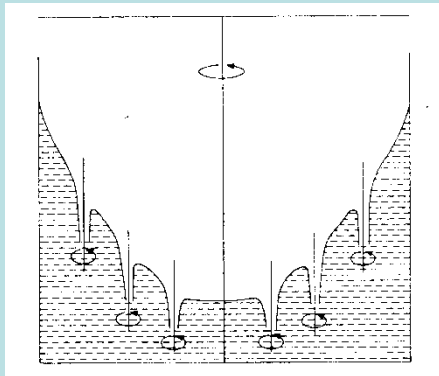
supratekuté fáze  $^3\text{He}$   
- párování fermionů



# Projevy supratekutosti



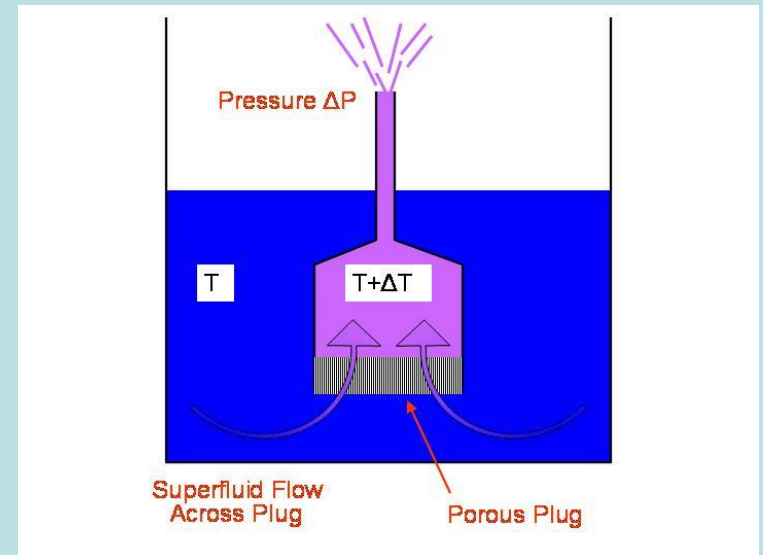
přechod  $\lambda$  mezi supratekutou a normální kapalinou



rotace supratekuté kapaliny

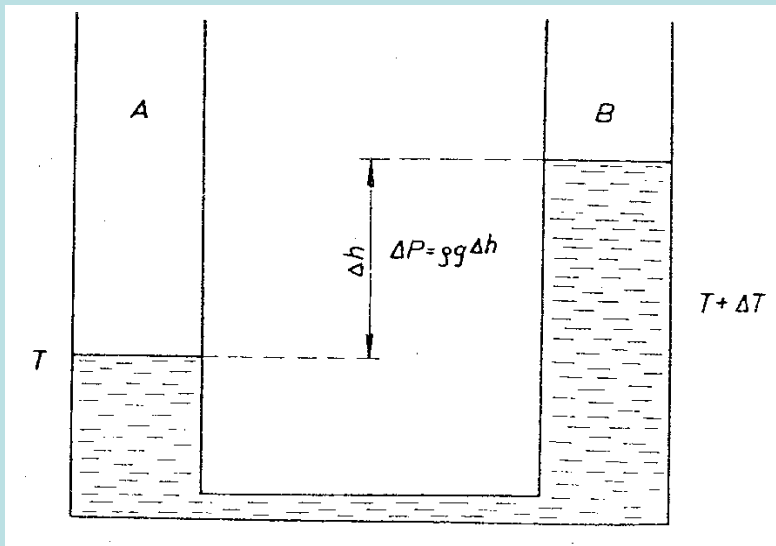


supratekutý film

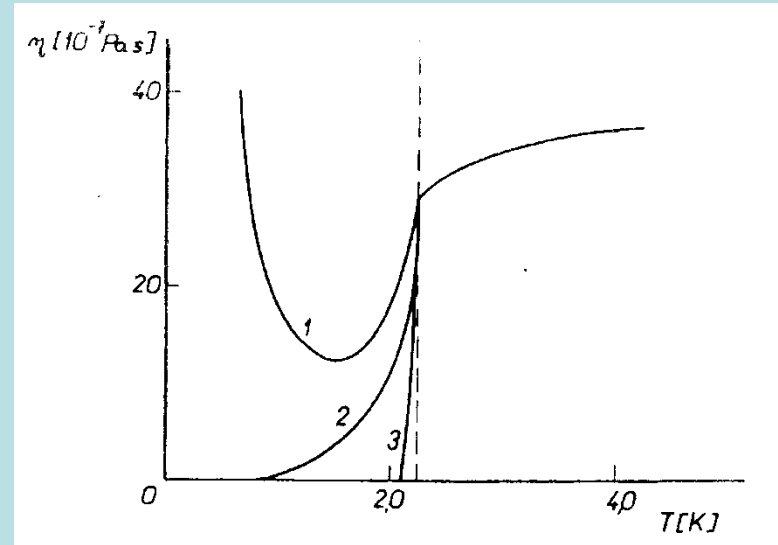


fontánový jev

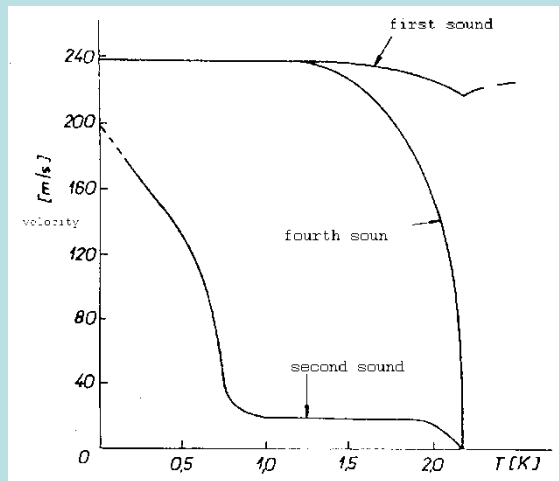




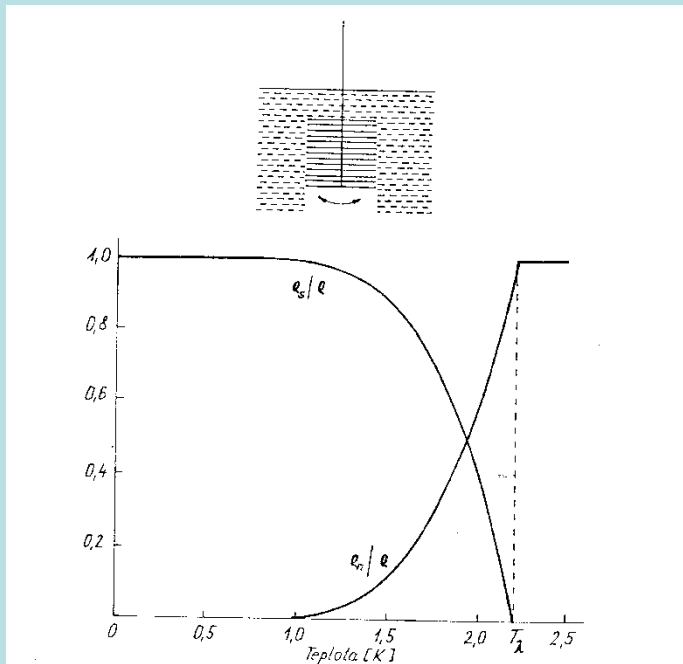
**termomechanický jev**



**viskozita měřená různými metodami**



**zvuky v supratekutém heliu**



**dvoukapalinový model**

**model excitací L. D. Landaua**

