

A kvantumfolyadékok csodái – a szuperfolyékony hélium

**Sasvári László
ELTE Fizikai Intézet
Komplex Rendszerek Fizikája Tanszék**

He helye a periódusos rendszerben

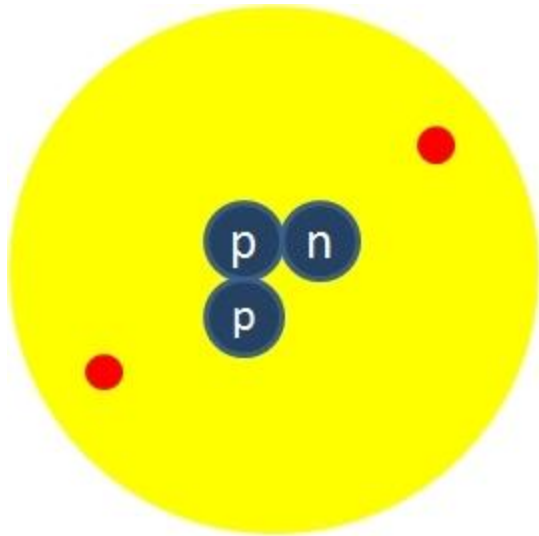
nemes
gázok



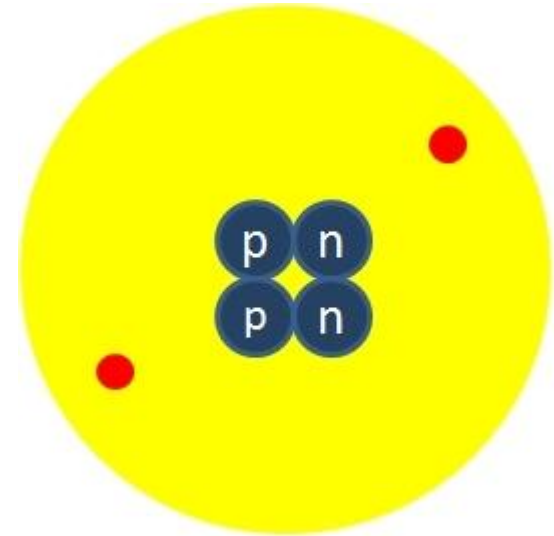
															1 H	2 He	
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 J	54 Xe
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
87 Fr	88 Ra	89** Ac	(Th)	(Pa)	(U)												

A hélium stabil izotópjai és elektron szerkezete

^3He



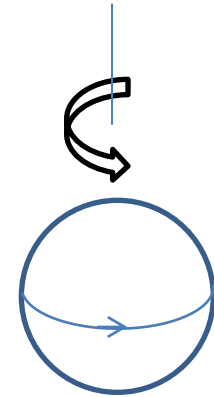
^4He



Különbségek:

- tömeg
- impulzusnyomaték (spin)

Spin és statisztika



Spin = saját impulzusnyomaték: $j = \hbar S$

Fermionok: pl. proton, neutron, elektron, ${}^3\text{He}(2p1n2e)$

$S = \text{félegész}$

$$S = \frac{1}{2} \quad S_z = \frac{1}{2}, -\frac{1}{2}$$

Érvényes a Pauli-féle kizárási elv.

Bozonok:

$S = \text{egész}$

pl. ${}^4\text{He} (2p2n2e)$

Nincs kizárási elv.

Alapállapotban:

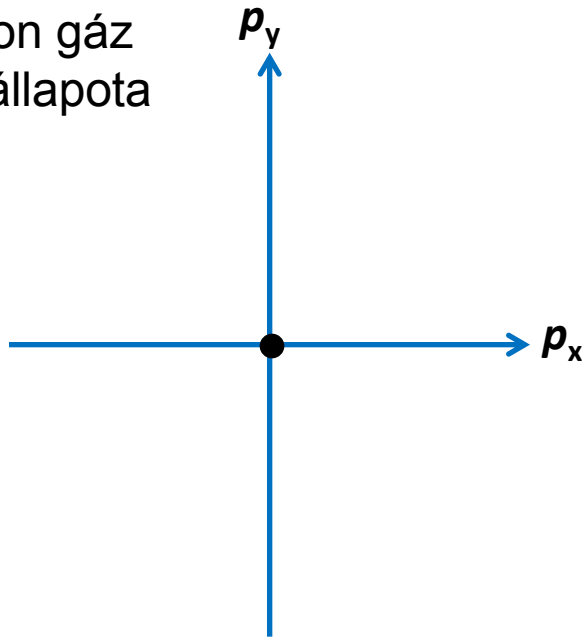
${}^3\text{He}: S = 1/2$

${}^4\text{He}: S = 0$

Spin és statisztika

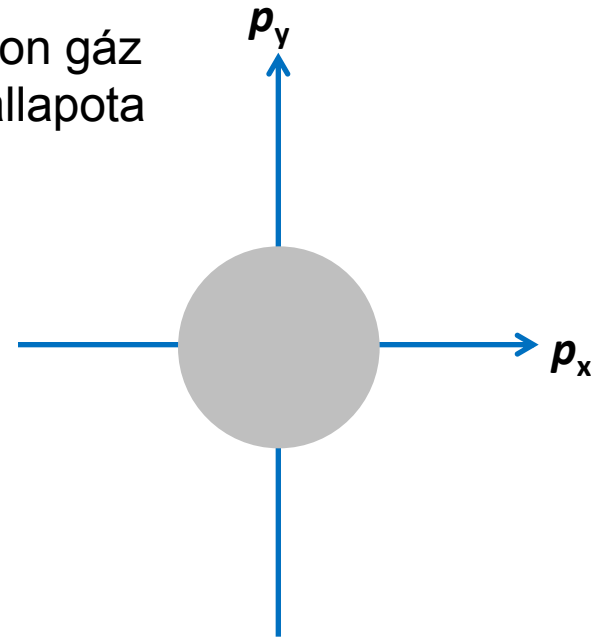
kölcsönhatás mentes gázban

bozon gáz
alapállapota



Minden atom a $p = 0$ állapotban

fermion gáz
alapállapota



Az atomok egyenletesen elosznak
a Fermi-gömbben

Hélium felfedezése: a Nap színeképében (1869)
(neve a görög Heliosz „Nap” szóból)

Első földi felismerése: urán ásványokban (1895)

^3He felfedezése (1933)

Előfordulása az Univerzumban:

H után a második leggyakoribb elem (pl. a Nap 15-20%-a)

Előfordulása a Földön:

- a légkörben: $5 \cdot 10^{-4}$ % He (ebből 10^{-6} rész ^3He)
- egyes földgáz forrásokban 1–2 % He (ebből 10^{-7} rész ^3He)
 - U és Th ásványok zárvényaiban (nincs ^3He)

Földi keletkezése:

- ^4He radioaktív bomlásból (α -bomlás)
- ^3He egyéb ritka magreakciókból

^3He előállítása:

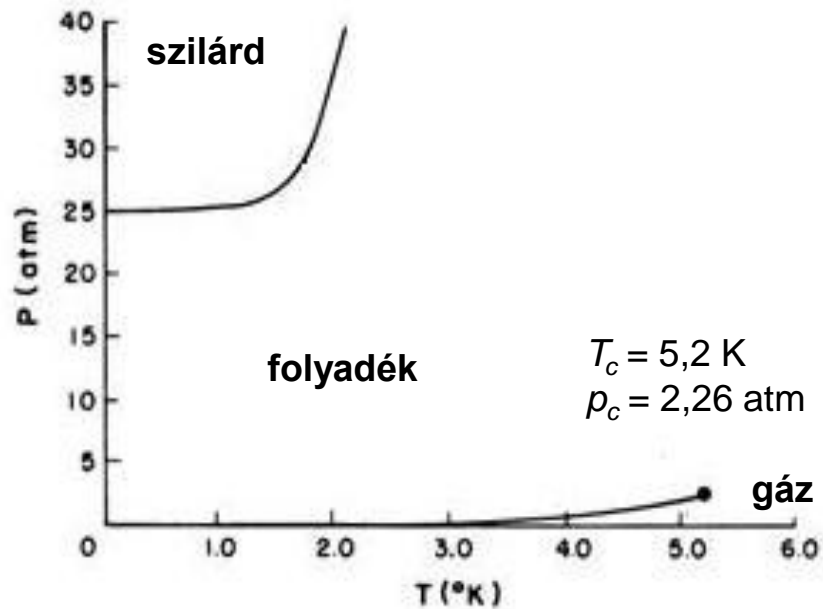
- ^6Li besugárzása lassú neutronokkal: $^6\text{Li} + n \rightarrow ^3\text{H}$ (trícium) + α
- trícium β -bomlása (felezési idő 12,5 év): $^3\text{H} \rightarrow ^3\text{He} + e^- + \nu$

A nukleáris fegyverkezés mellékterméke

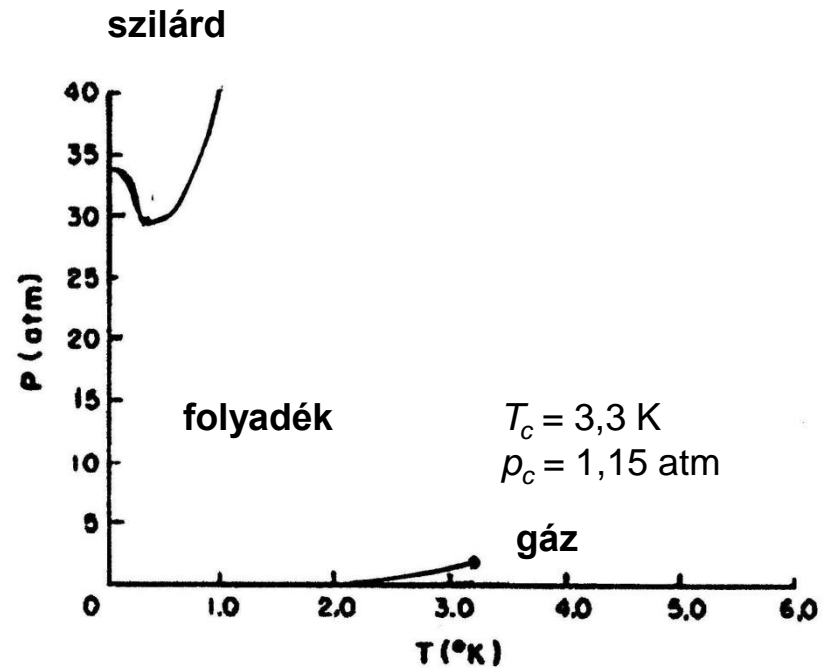
He cseppfolyósítása: légköri nyomáson 4,2 K hőmérsékleten (^4He)
(H. Kammerlingh Onnes, 1908)

^4He és ^3He fázisdiagramja

^4He

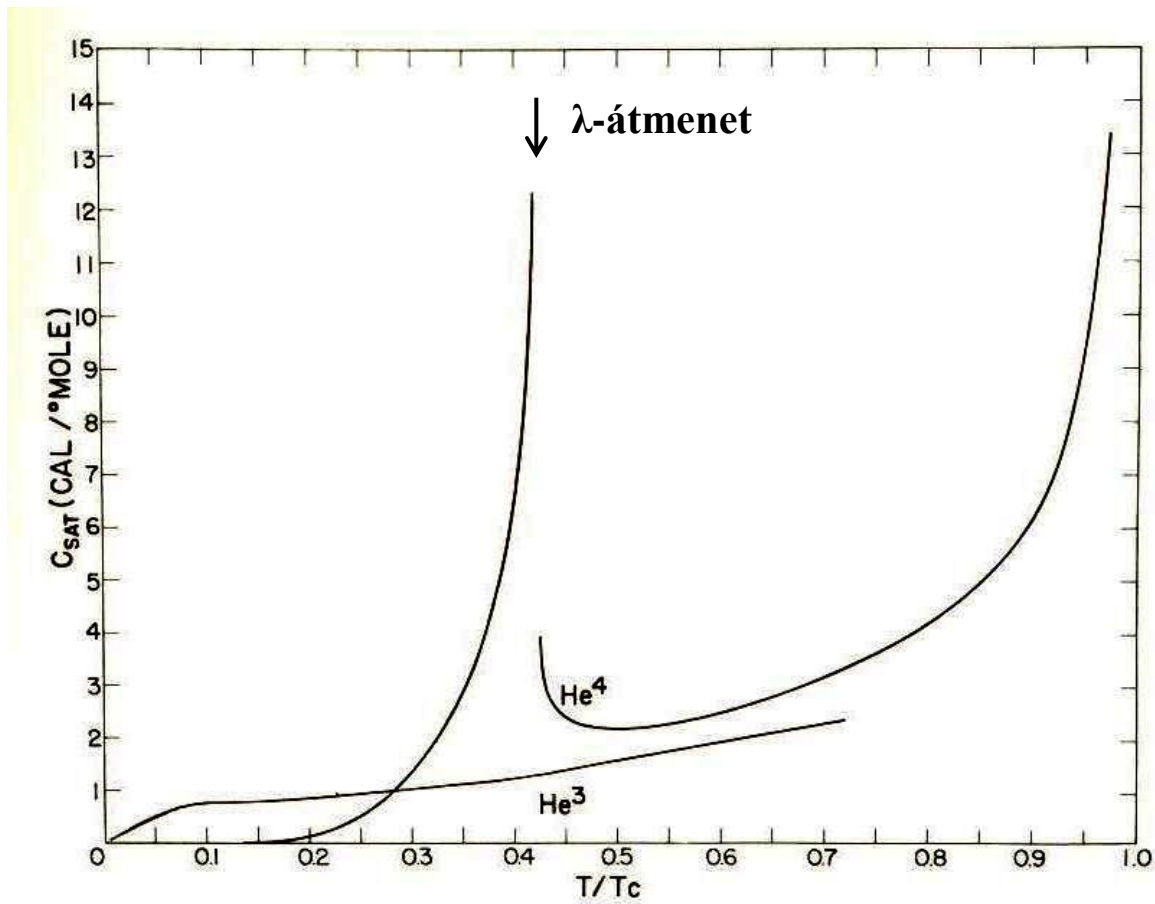


^3He



^4He és ^3He fajhője

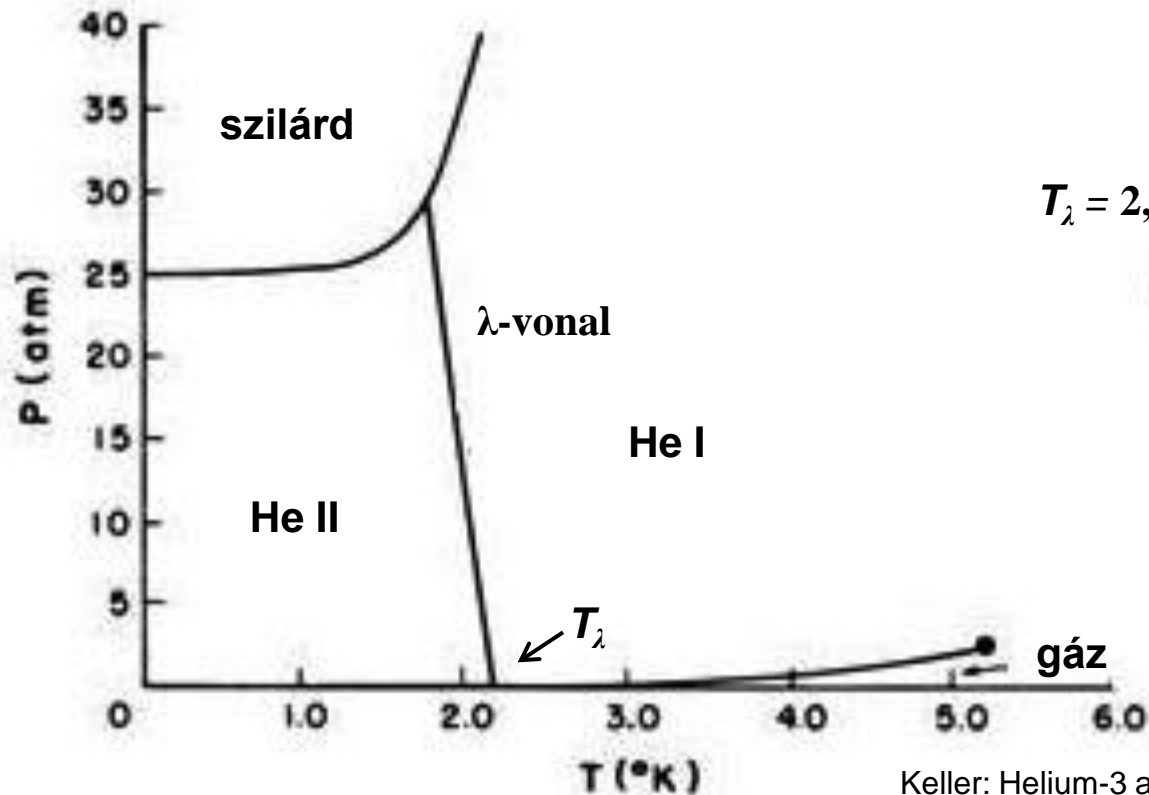
$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta T}$$



Keller: Helium-3 and Helium-4

⁴He fázisdiagramja

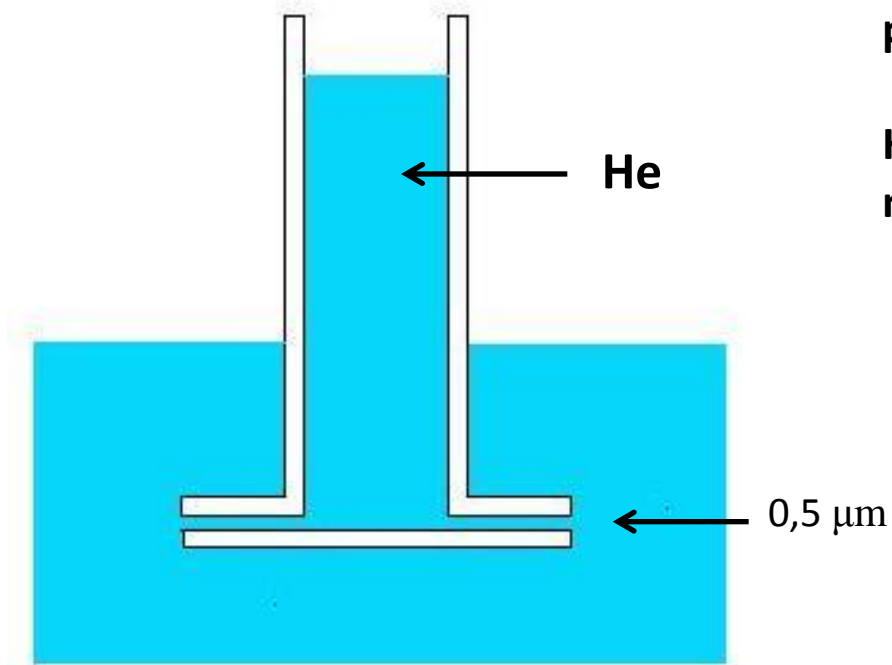
He I : normál folyadék
He II: szuperfolyadék



Keller: Helium-3 and Helium-4

Kapitza kísérlete

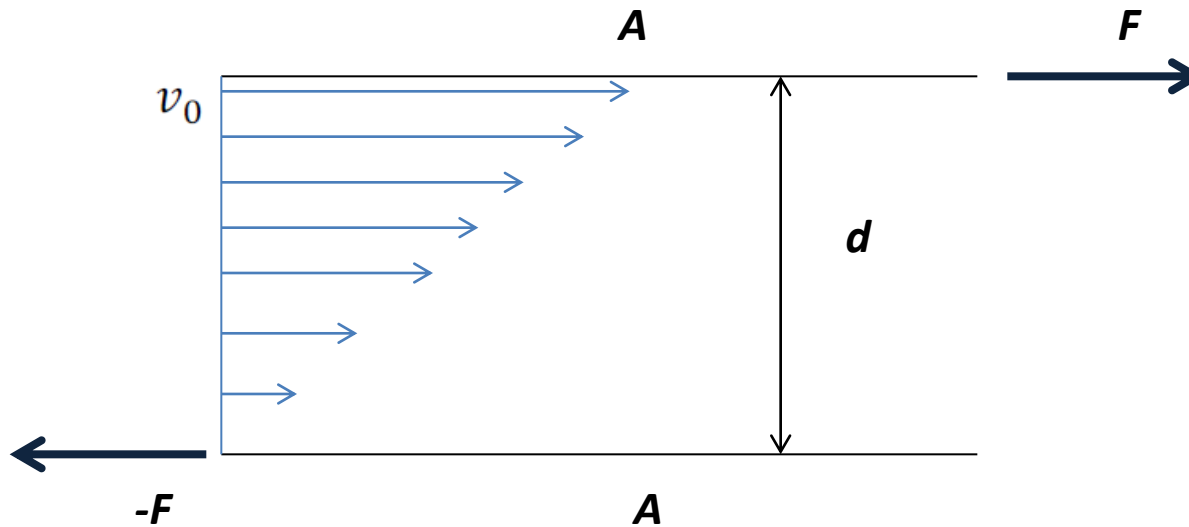
(P. Kapitza, 1938)



He I : a szint süllyedése csak néhány perc után észlelhető

He II : a külső és belső szintek néhány másodpercen belül kiegyenlítődnek

Belső súrlódás, viszkozitás



$$F = \eta A \frac{v_0}{d} = \eta A \frac{\partial v}{\partial z}$$

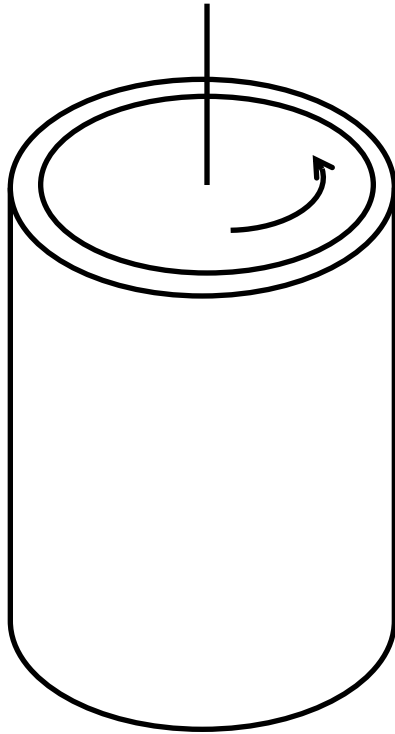
Newton-féle súrlódási törvény

F : az A nagyságú felületre ható nyíróerő

η : belső súrlódási (viszkozitási) együttható

(az anyagra jellemző mennyiség)

rotációs viszkozitás mérő



$$M \sim \eta \omega$$

M a forgás fenntartásához szükséges forgatónyomaték

kapilláris viszkozitás mérő



$$\frac{\Delta p}{l} = \frac{8\eta}{\pi a^4} I$$

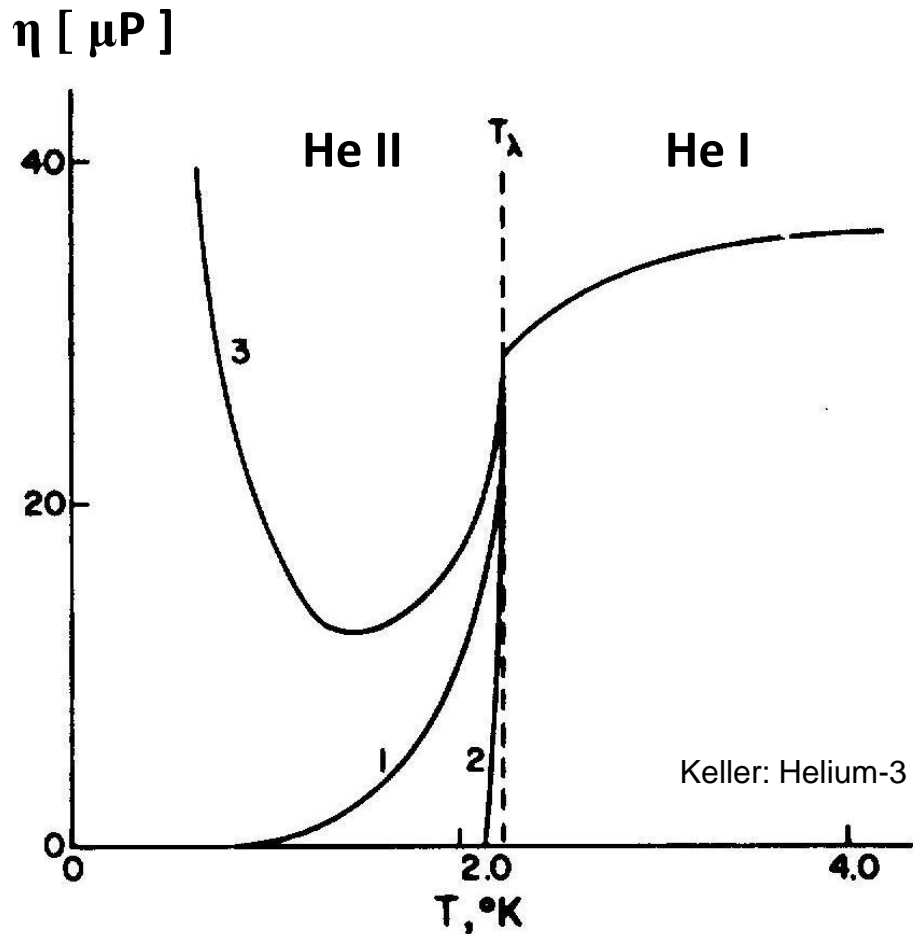
Δp : nyomáskülönbség

l : a cső hossza

a : a cső sugara

I : 1 sec alatt átfolyt
térfogat

Viszkozitás mérések eredményei



- 1: rezgő lemez
- 2: kapilláris viszkozitásmérő
- 3: rotációs viszkozitás mérő

A szuperfolyékony He két-folyadék modellje

Munkahipotézis

(L.D. Landau, 1941)

(Tisza László, 1940)

A He II folyadék két komponensből áll:

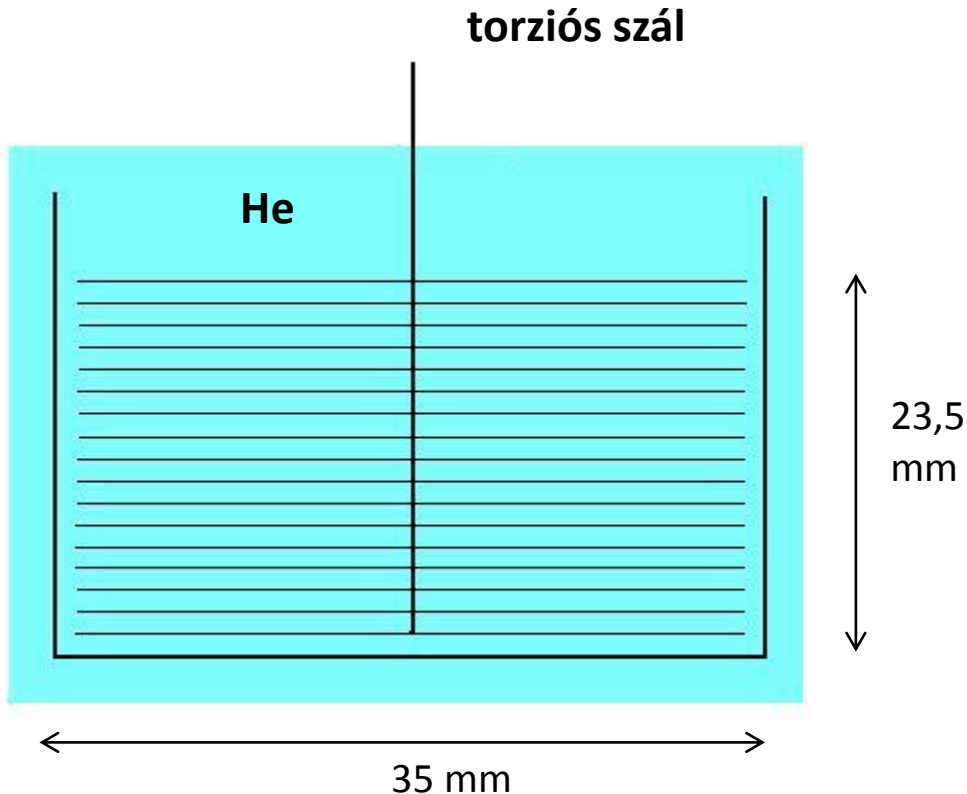
- ρ_n sűrűségű normál folyadék-komponens (véges viszkozitás)
- ρ_s sűrűségű szuperfolyadék-komponens (zérus viszkozitás)

Nem jelenti az atomok szétválogatását. A kísérleti megfigyelések kvantitatív rendszerezésére alkalmas effektív elmélet.

A szuperfolyadék áramlása a kondenzátum mozgásával hozható kapcsolatba.

Andronikasvili kísérlete

(E.L. Andronikasvili, 1946)



100 db 13 μm vastag Al lemez

A ρ_n normál sűrűség mérése

A rezgésbe hozott lemezek magukkal viszik a normál komponenst.

A torziós rezgések körfrekvenciája:

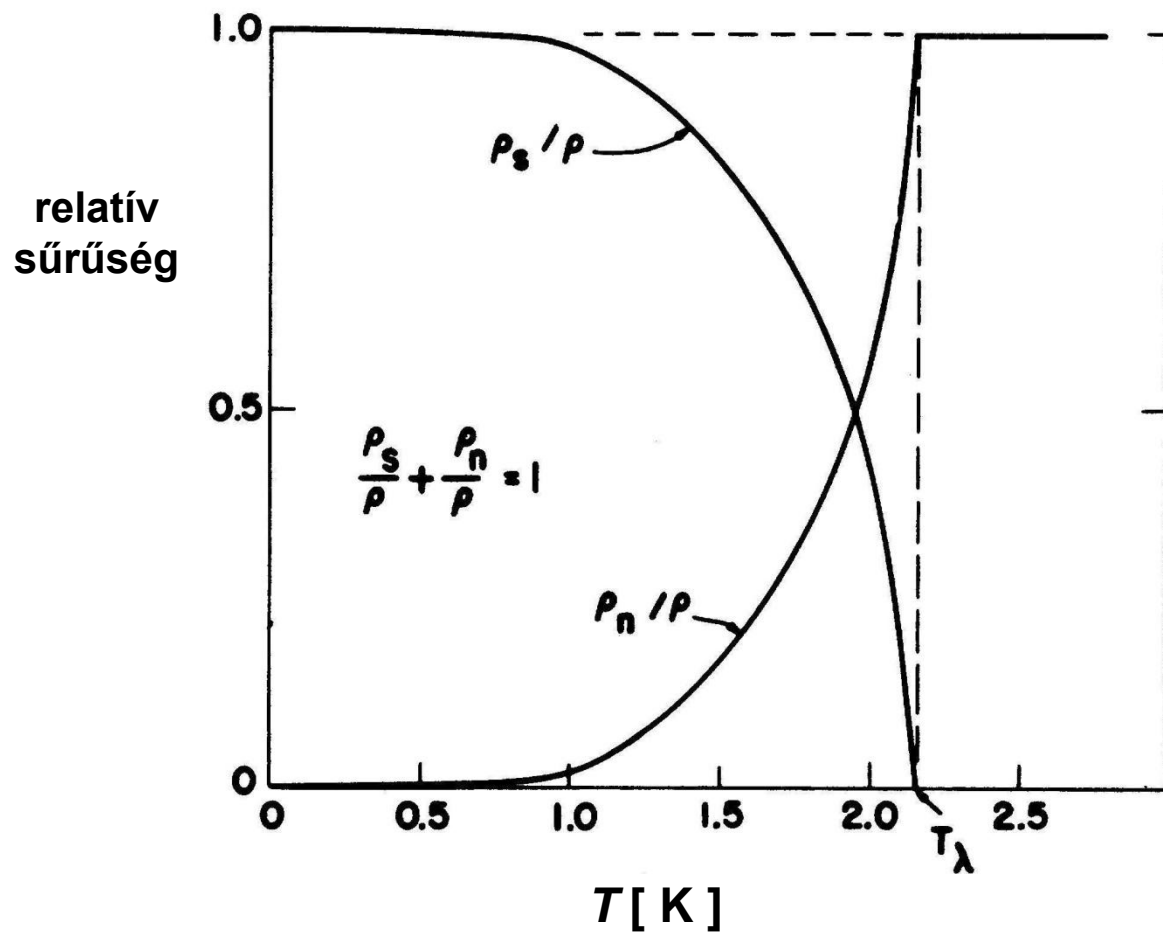
$$\omega^2 = \frac{\tilde{D}}{\Theta}$$

\tilde{D} : direkciós nyomaték

Θ : tehetetlenségi nyomaték

$$\Theta = \frac{1}{2} m a^2$$

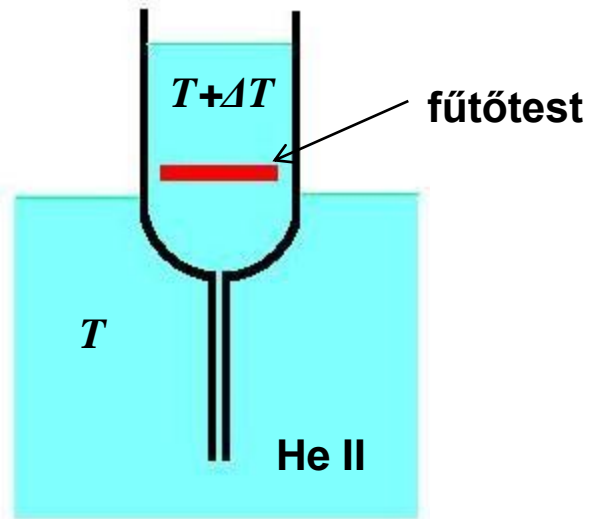
A normál és a szuperfolyékony komponens sűrűsége



Keller: Helium-3 and Helium-4

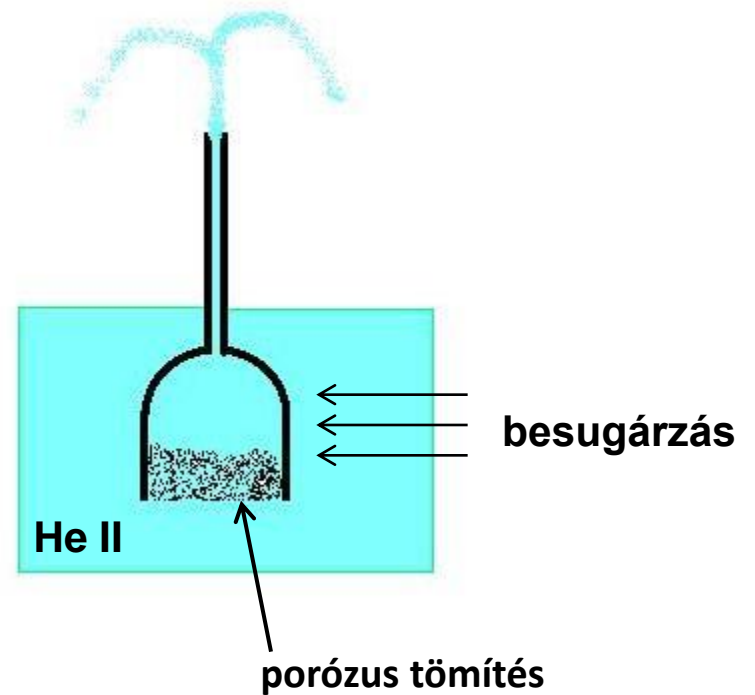
Termomechanikai jelenség

(J.F. Allen, H. Jones, 1938)



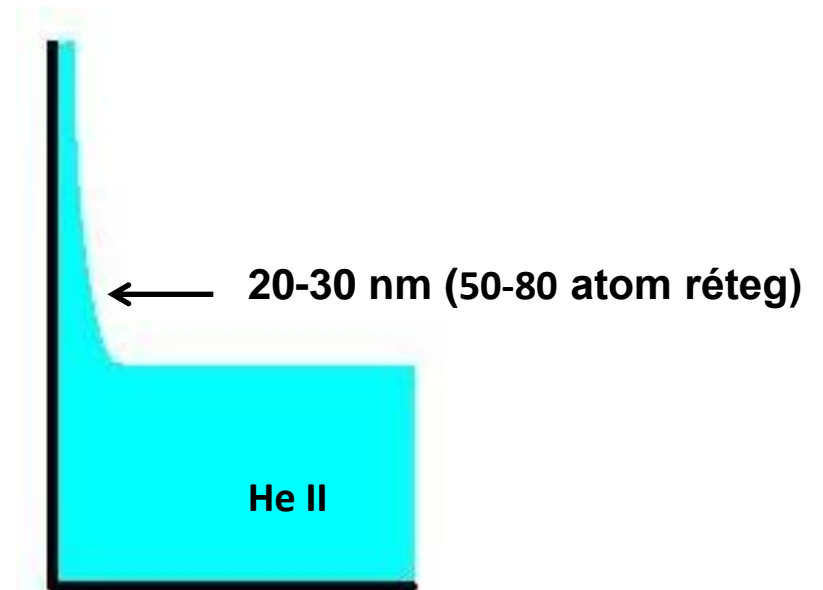
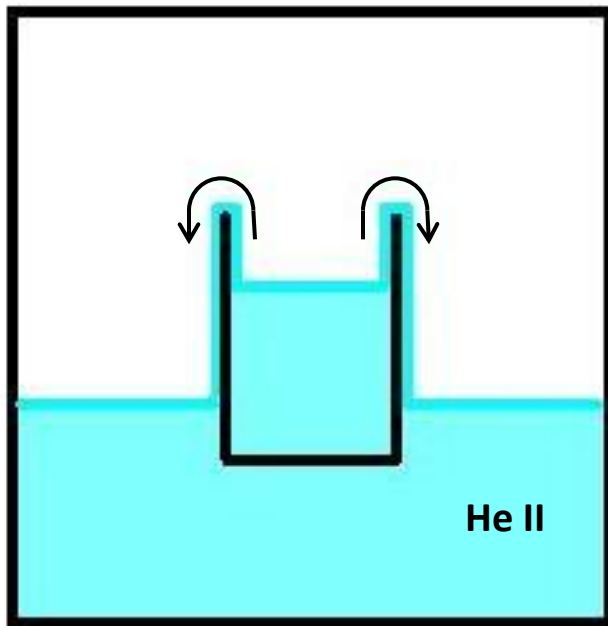
$$\frac{\Delta p}{\Delta T} = 10 \frac{\text{Hecm}}{\text{mK}} \quad (T = 1\text{K})$$

szökőkút jelenség



Rollin-film

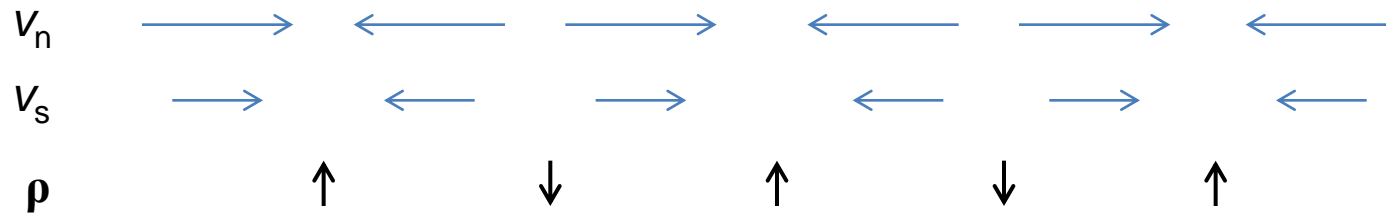
(B.V. Rollin, F.E. Simon, 1937)



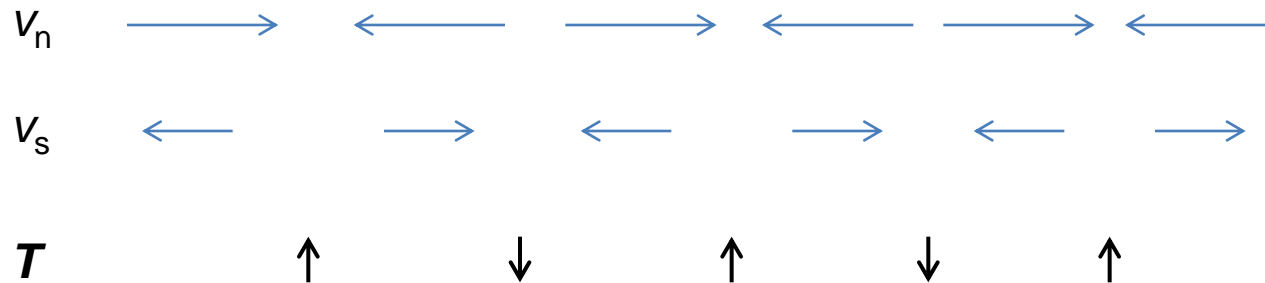
Hullámok He II folyadékban

Első hang: kompressziós (akusztikus) hullámok

$$\lambda v = u_1$$



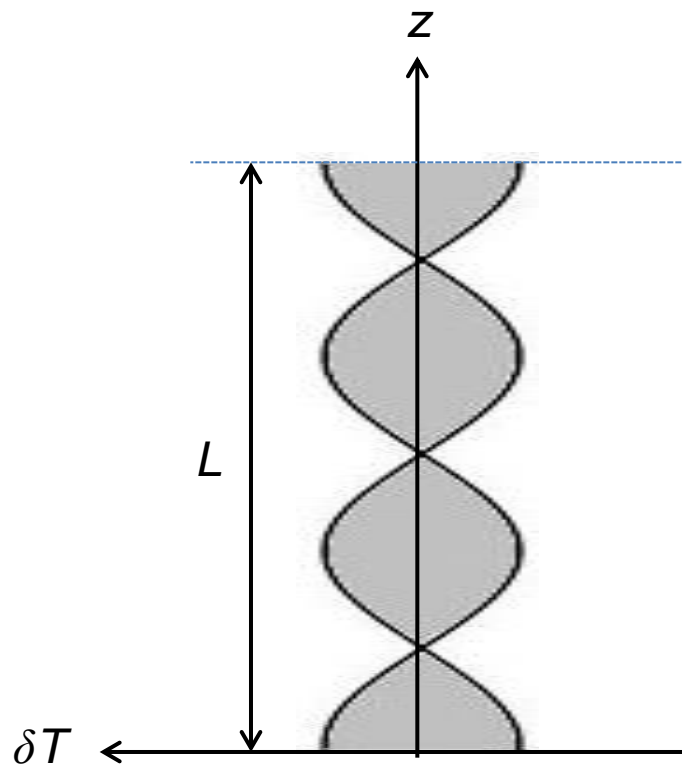
Második hang: hőmérséklet hullámok (eredő tömegáramlás nélkül)



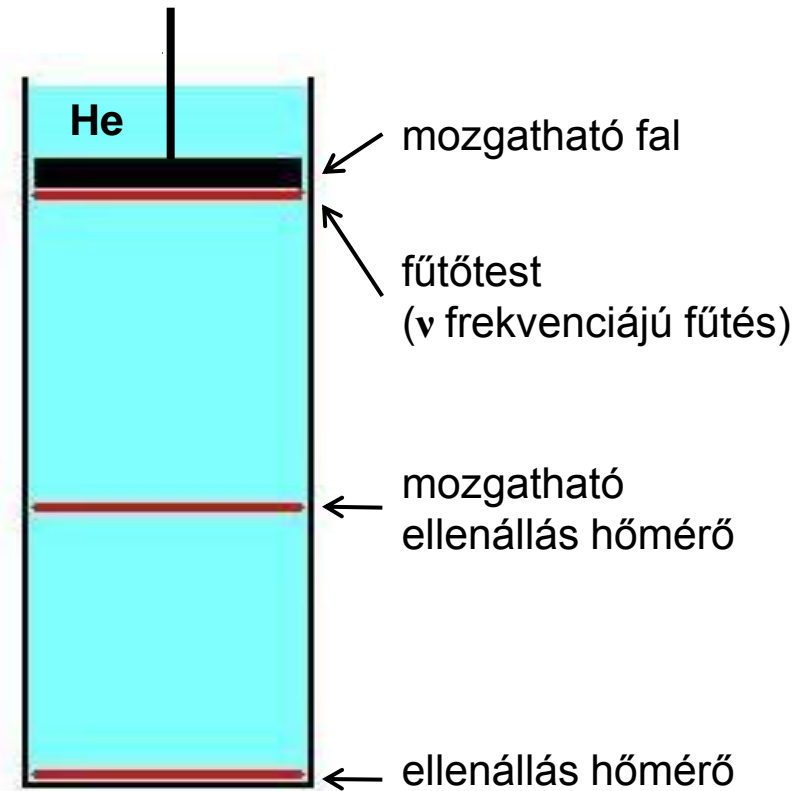
$$\lambda v = u_2$$

Peskov kísérlete

(V.P. Peskov, 1944)



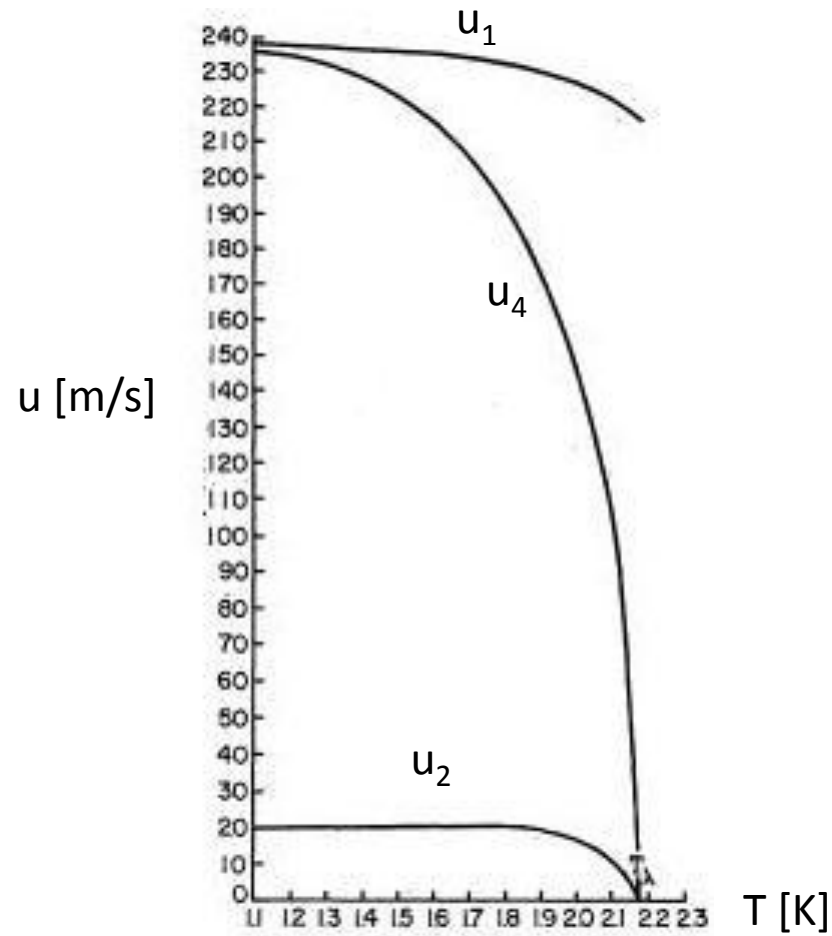
álló hőmérséklet hullámok



$$L = \frac{\lambda}{2} l \quad (l = 1, 2, \dots)$$

$$\lambda \nu = u_2$$

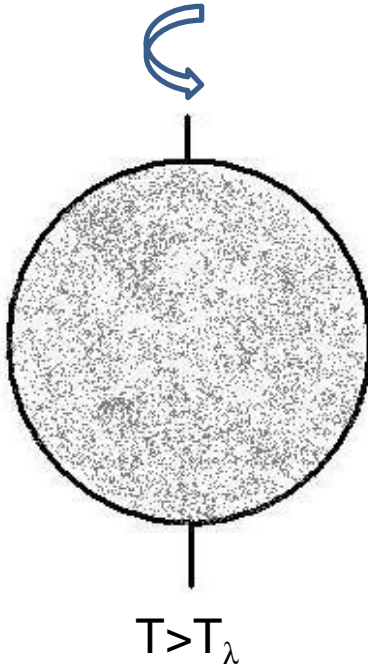
Hangsebességek He II folyadékban



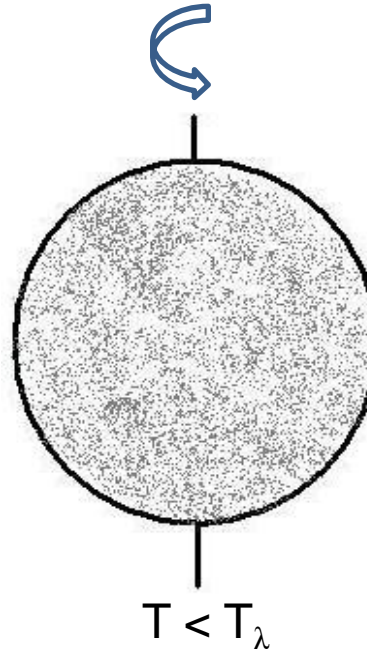
Keller: Helium-3 and Helium-4

Fennmaradó (perzisztens) áramlás

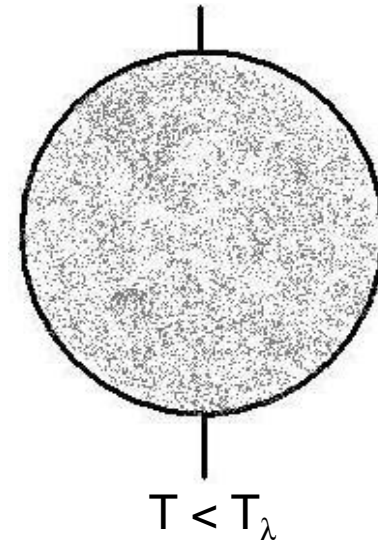
porózus anyaggal töltött edényben



Forgó edényben
együttforgó
He I folyadék



Forgó edényben
együttforgó
He II folyadék



Álló edényben
álló normál komponens,
perzisztens szuperáramlás

Video

<http://www.youtube.com/watch?v=2Z6UJbwxBZI>

Bemutatott kísérletek:

- He folyadék forrása
- szuperfolyadék kiszökése porózus kerámia aljú pohárból
- Rollin-film
- szökőkút effektus

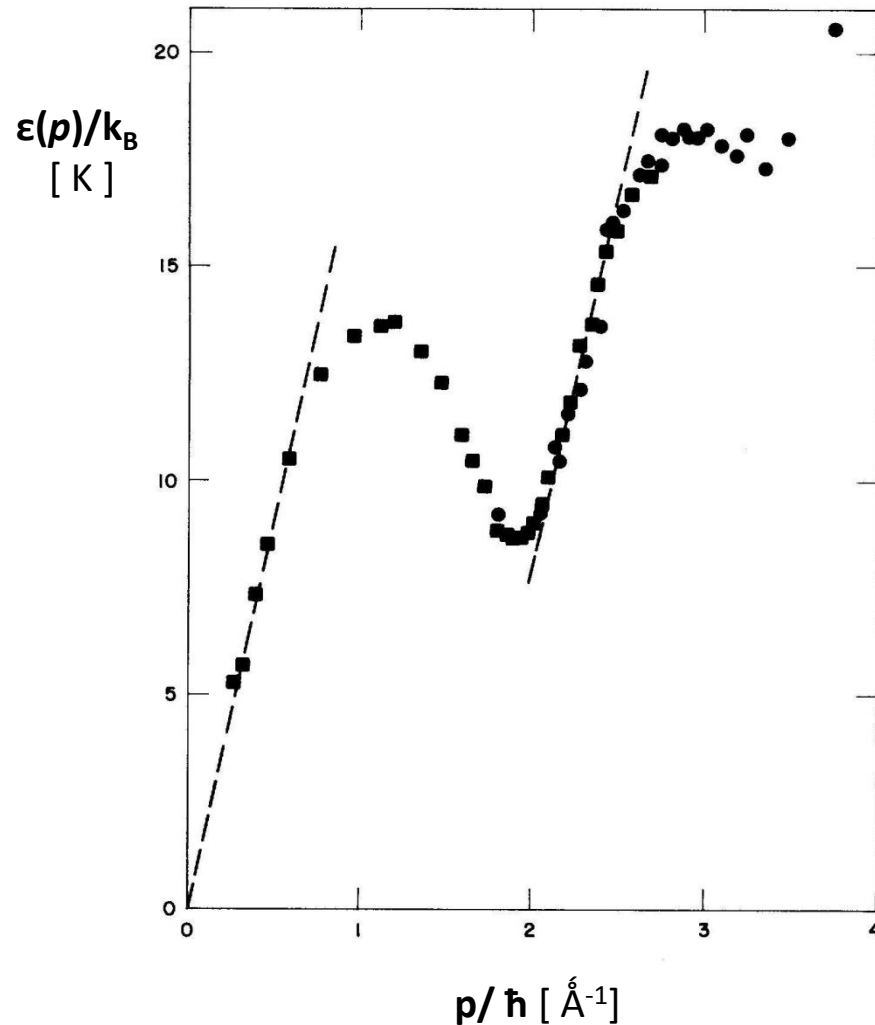
Kvázirészecskék ^4He folyadékban

L.D. Landau

$\varepsilon(p)$ a He folyadék által
 p impulzusváltozással
felvehető energia adag

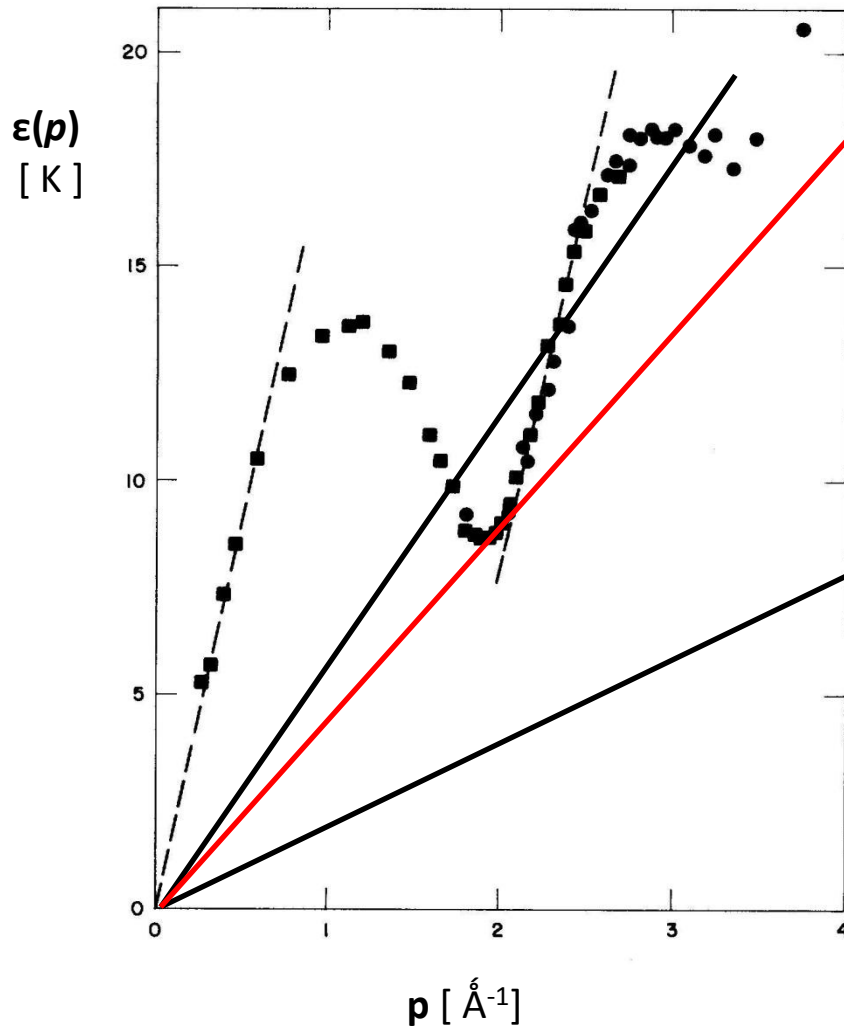
$\varepsilon(p)$ a p impulzusú
kvázirészecske energiája

normál komponens =
a kvázirészecskék gáza



Keller: Helium-3 and Helium-4

A szuperfolyékonyág Landau-féle feltétele



ρv_{sc}

v sebességű áramlásban
fékező kvázirészecskék
jelenhetnek meg, ha a
 ρv egyenes metszi $\varepsilon(p)$ -t.

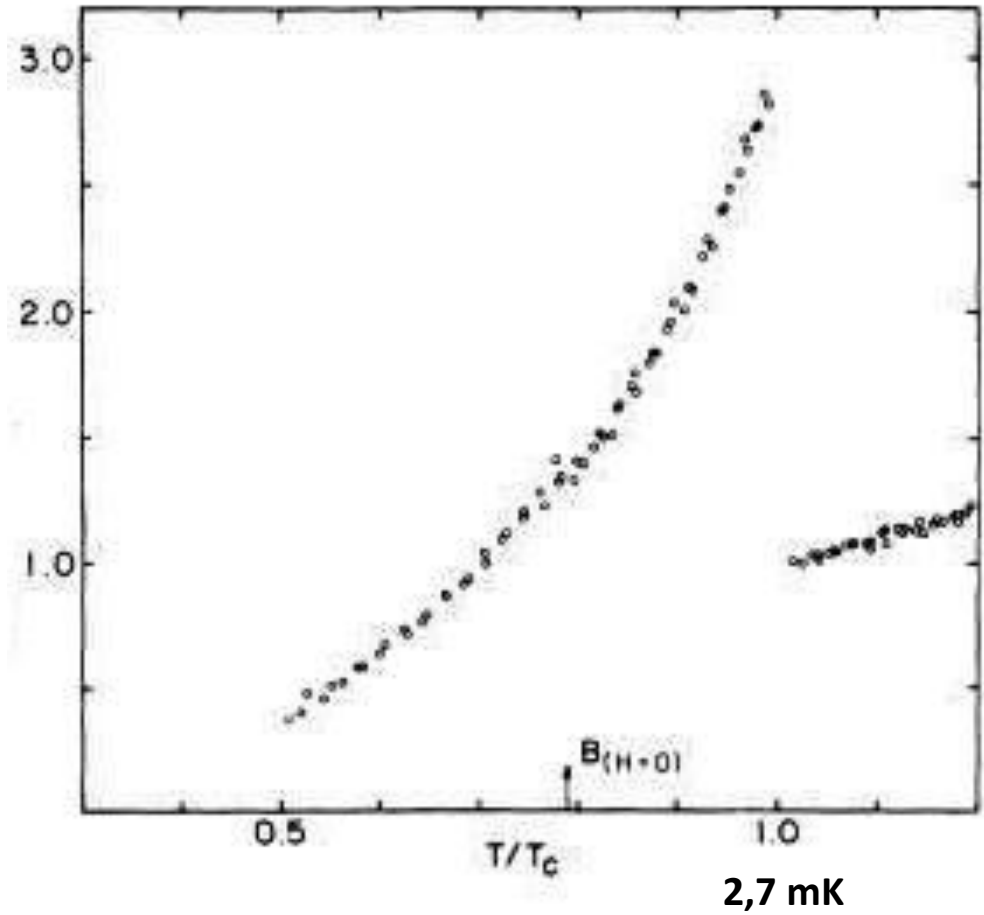
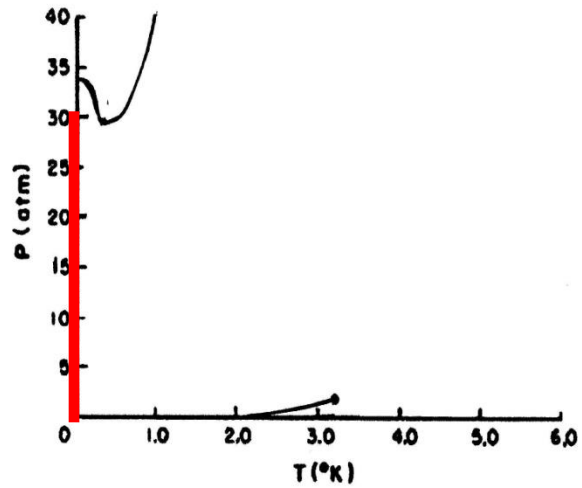
ρv_s

szuperfolyékony áramlás:

$$V_s < V_{sc}$$

3He fajhője az olvadási vonalon

C_f
[J/K mol]

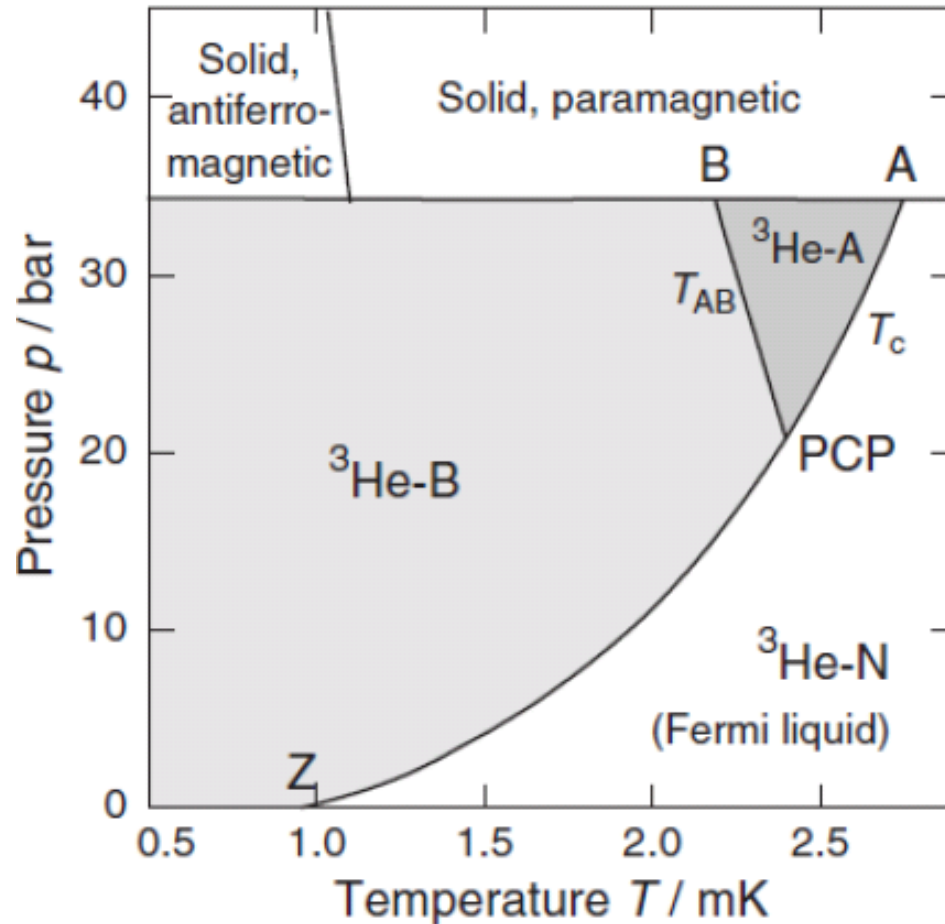


Halperin et al., Phys. Rev. B 13, 2124 (1976)

3He fázisdiagramja ($T < 3$ mK, $H = 0$)

szuperfolyékony fázisok:

$^3\text{He-A}$ és $^3\text{He-B}$



C. Tiuramanis, Phys 393 Low Temperature Physics

A szuperfolyékonyság kialakulásának háttere

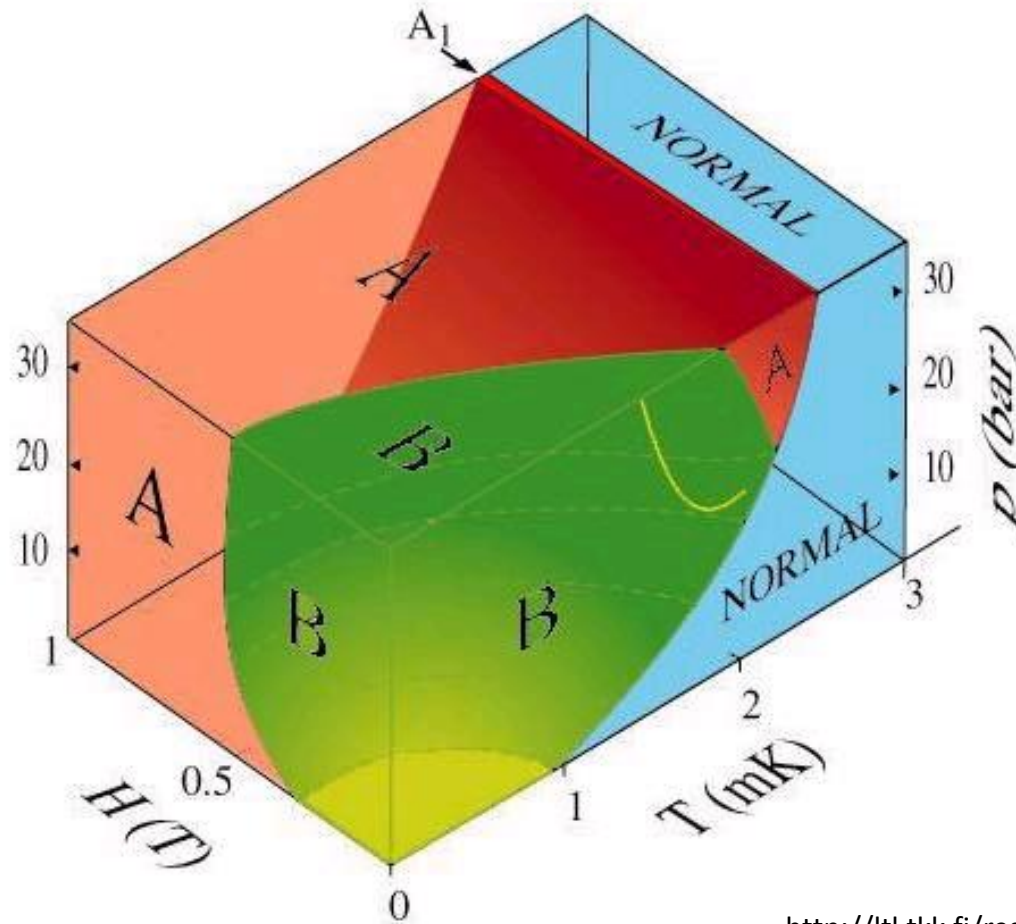
^3He :

kötött ^3He párok ($S = 1$) kondenzációja

szupravezető fémek:

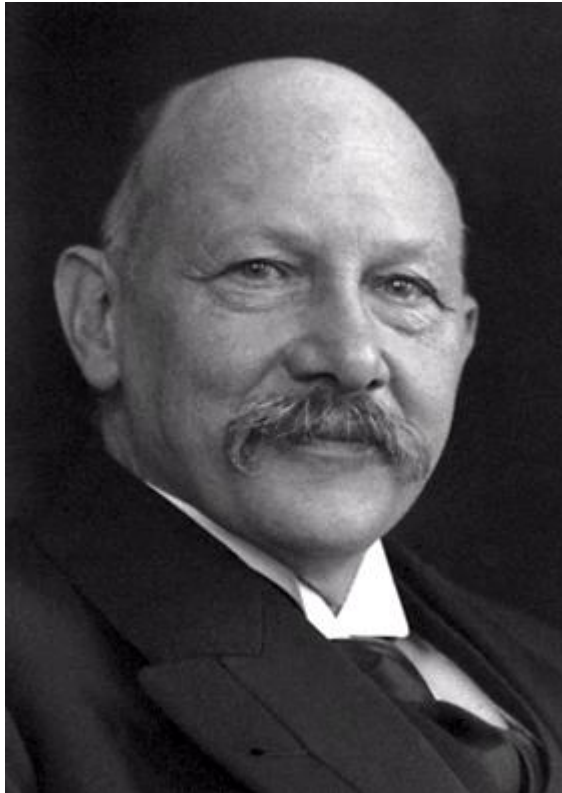
kötött elektron párok (Cooper-párok, $S = 0$) kondenzációja

3He fázisdiagramja mágneses térben



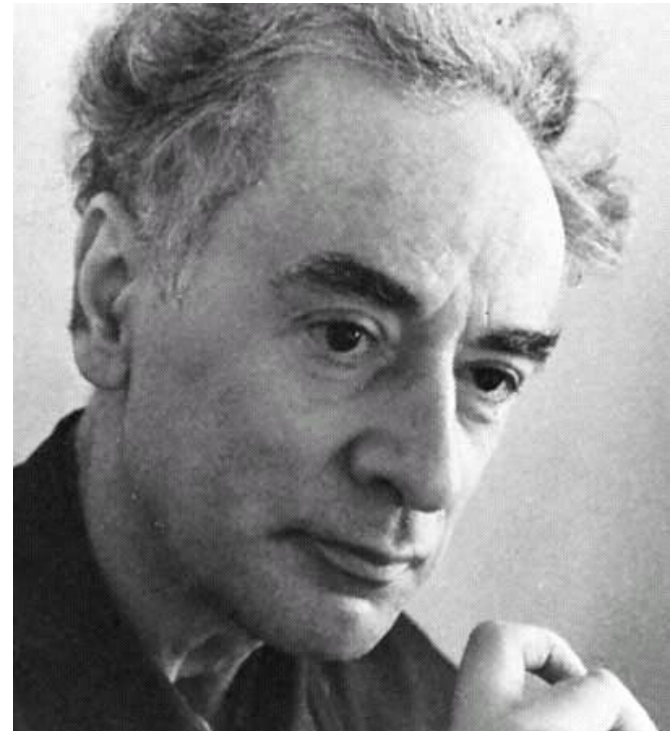
<http://l.tl.tkk.fi/research/theory/he3.html>

A kvantumfolyadékok Nobel-díjasai



H. Kammerlingh Onnes

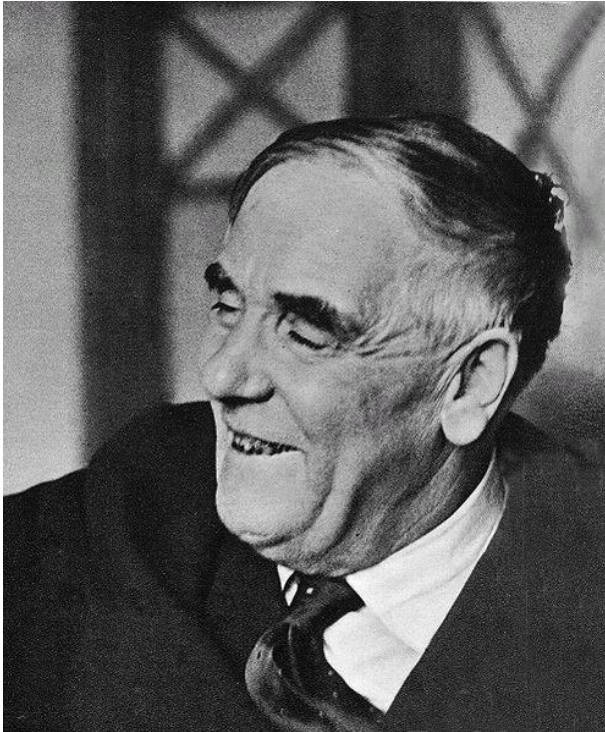
Nobel-díj (1913)
alacsony hőmérsékleti kutatásokért,
ezen belül He cseppfolyósításáért



L.D. Landau

Nobel-díj (1962)
a kondenzált anyag, különösen a
He folyadék elméletében elért
úttörő eredményeiért

A kvantumfolyadékok Nobel-díjasai



P. Kapitza

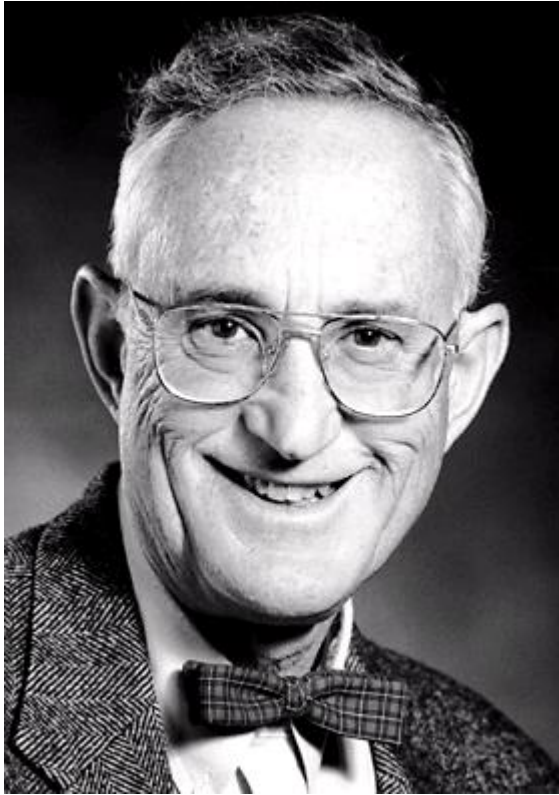
Nobel-díj (1978, megosztva)
alapvető felfedezésekért és újításokért
az alacsony hőmérsékletek fizikája
területén



A.J. Leggett

Nobel-díj (2003, megosztva)
a szuperfolyadékok területén elért
úttörő eredményeiért

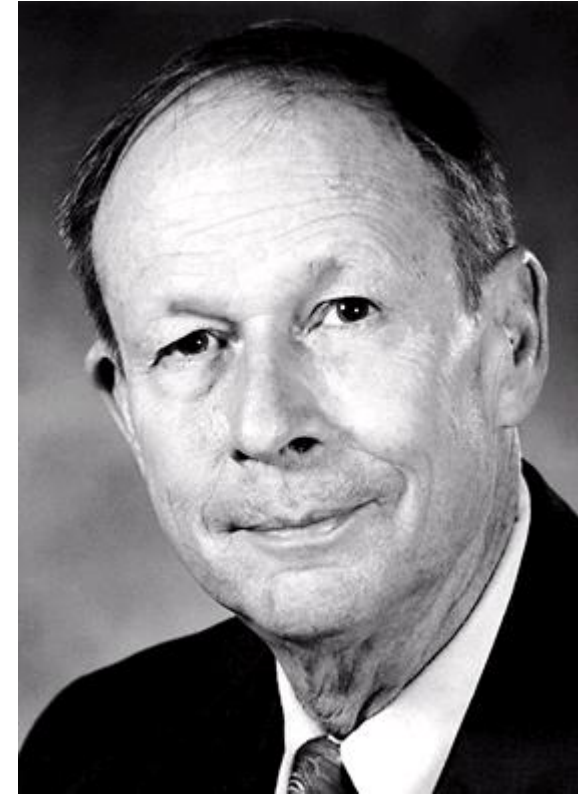
A kvantumfolyadékok Nobel-díjasai



D.M. Lee



D.D. Osheroff



R.C. Richardson

Nobel-díj (1996)
a ^3He szuperfolyékonyságának
felfedezéséért