

# **Fázisátalakulások,**

avagy

az anyag ezer arca

**Sasvári László**

**ELTE Fizikai Intézet**

**ELTE Bolyai Kollégium**

Atomoktól a csillagokig, Budapest, 2016. december 8.

# Fázisátalakulások

## A kondenzált anyag

- több módosulatban létezhet,
- ezek egymásba átalakulhatnak,
- egymással egyensúlyban lehetnek.

## Energiaskálák

$$E = k_B T$$

$$E = mc^2$$

<sup>3</sup> He szuperfolyékonysága (3 mK)	$2,6 \cdot 10^{-7}$ eV
<sup>4</sup> He forráspontja (1 atm, 4,2 K)	$3,6 \cdot 10^{-4}$ eV
Szobahőmérséklet (293 K)	0,025 eV
H atom ionizációs energiája	13,6 eV
Elektron tömege	510 MeV
Higgs-bozon tömege	126 GeV

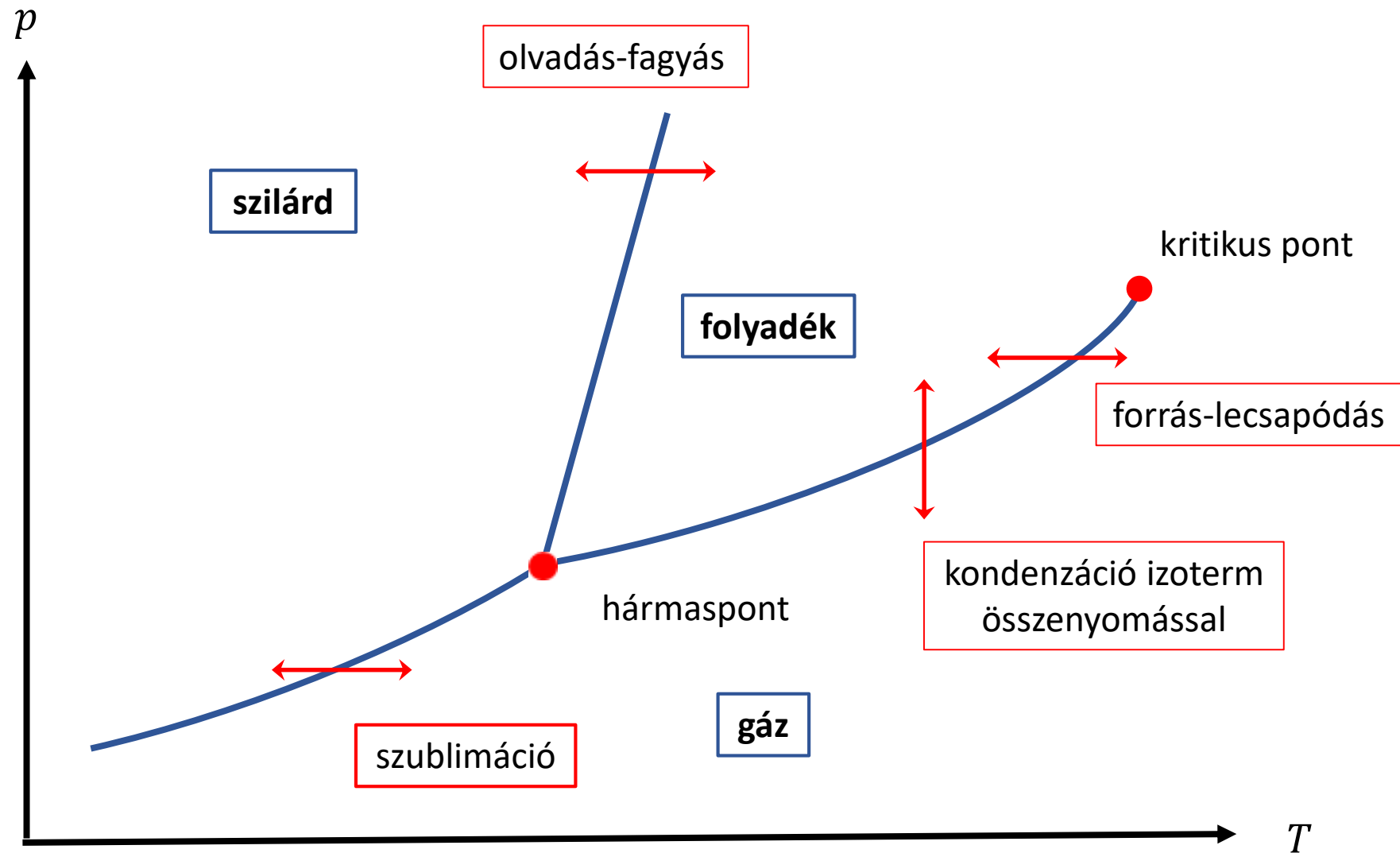
Csak kondenzált anyag?  
Hadron-anyag – kvark-gluon plazma

## Kondenzált anyag:

atommagok,  
elektronok,  
Coulomb-  
köölcsönhatás,  
kvantummechanika

Kis energiájú  
folyamatok

# Egykomponensű anyag tipikus fázisdiagramja



## CO<sub>2</sub> fázisdiagramja

Kritikus pont (K):

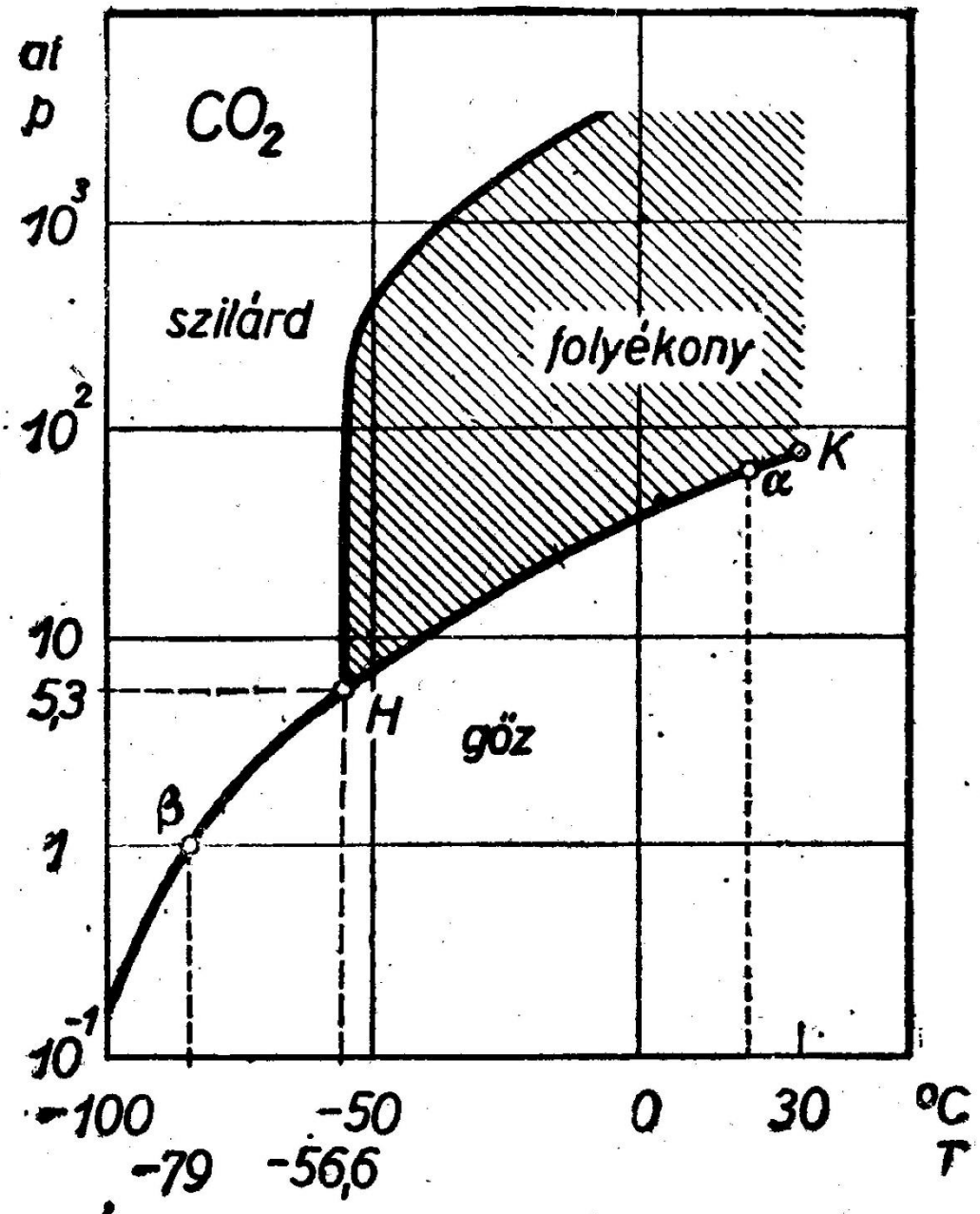
$$T_c = 31,1 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$p_c = 73 \text{ atm}$$

Hármaspont (H):

$$T_H = -56,6 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$p_H = 5,3 \text{ bar}$$



## A hélium ( $^4\text{He}$ ) fázisdiagramja

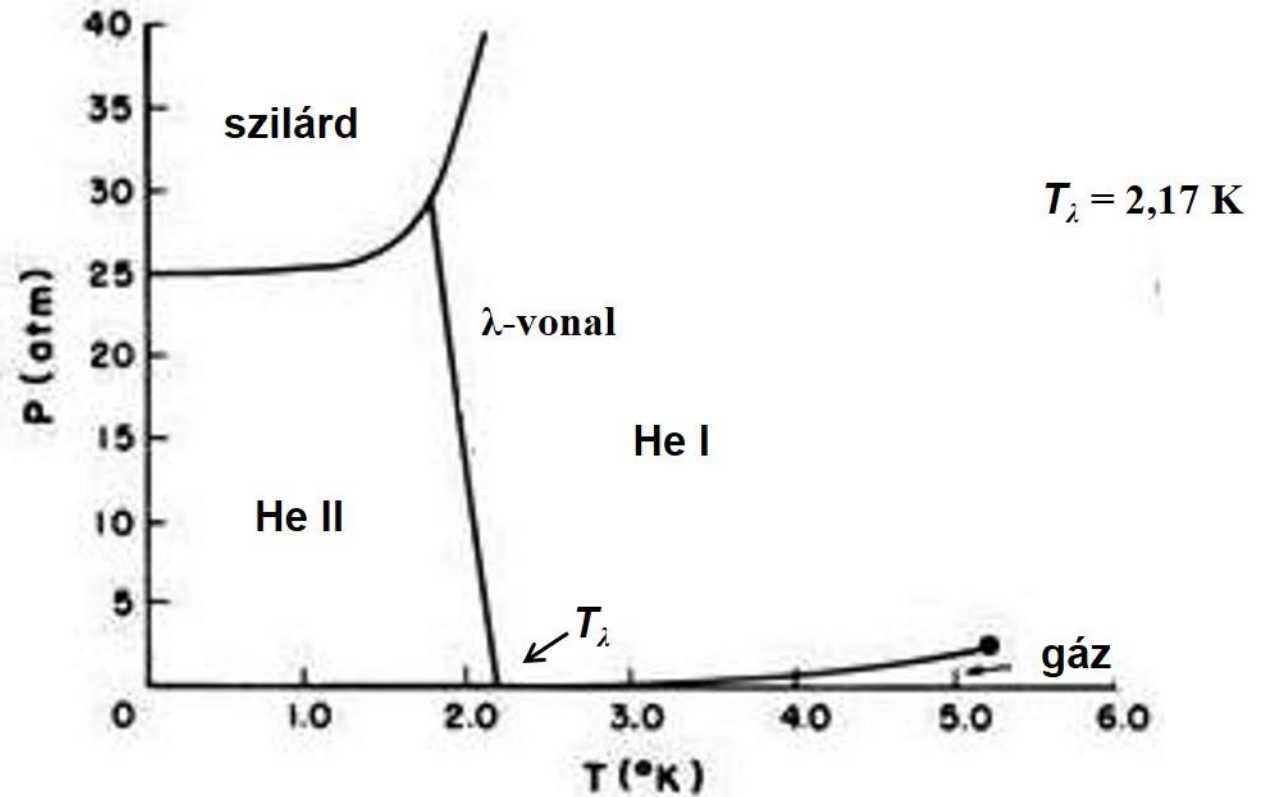
Kritikus pont:

$$T_c = 5,2 \text{ K}$$

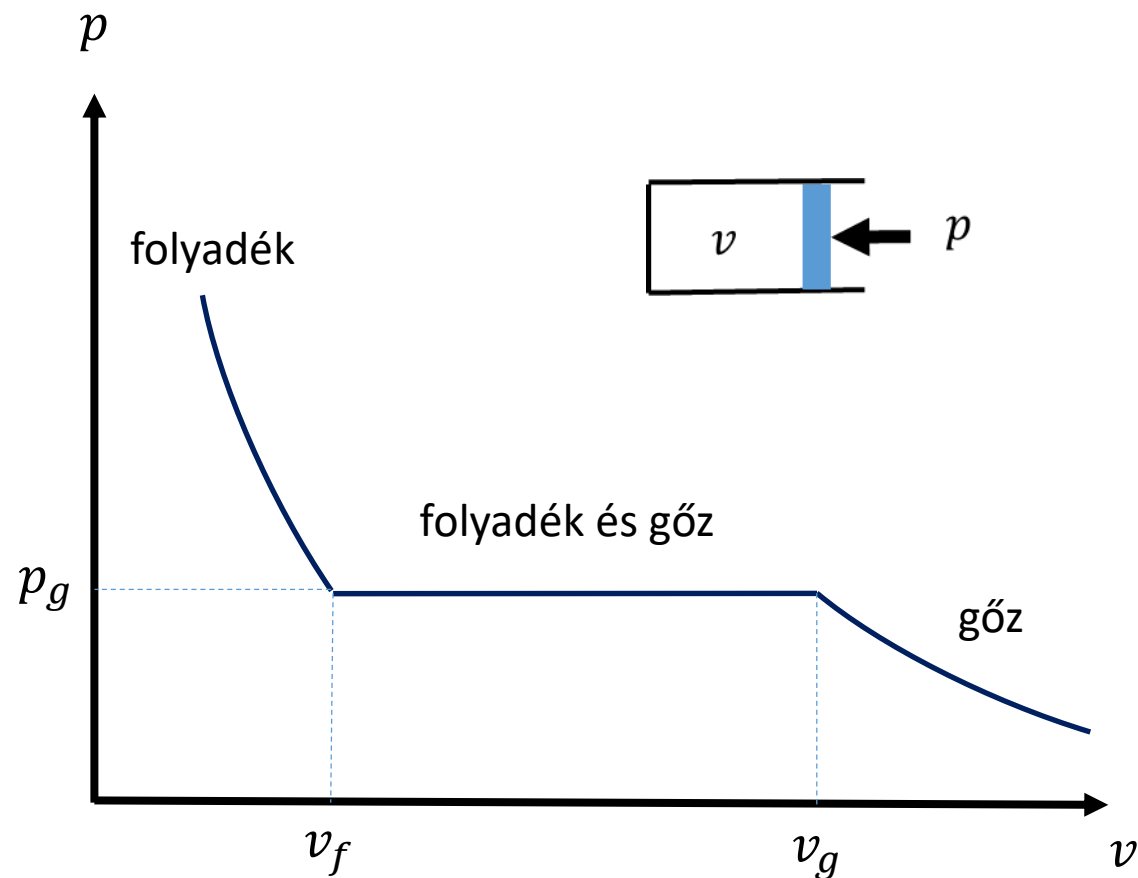
$$p_c = 2,26 \text{ atm}$$

He I : normál folyadék

He II : szuperfolyékony folyadék

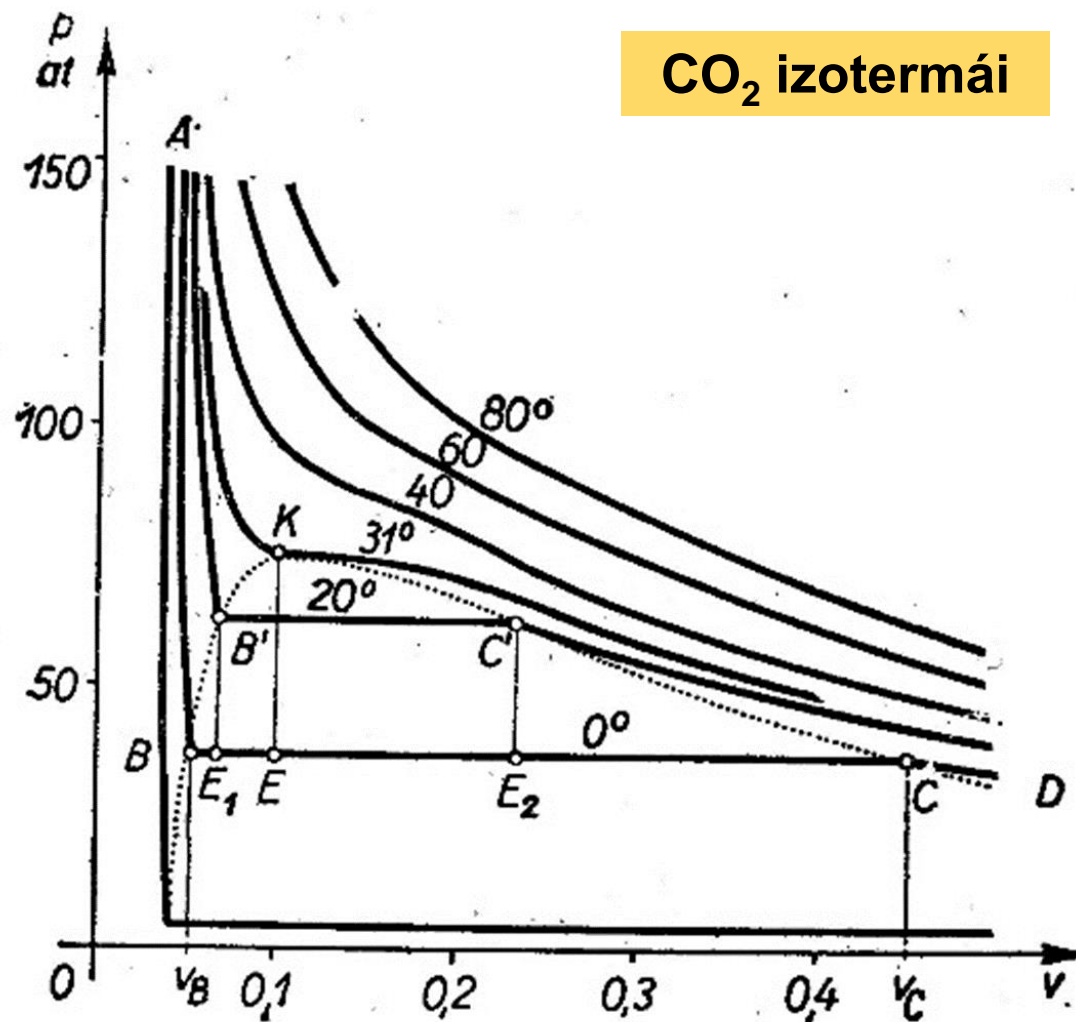


## Tipikus izoterma ( $T < T_c$ )



A kritikus ponthoz közeledve eltűnik a folyadék és gőze közötti különbség

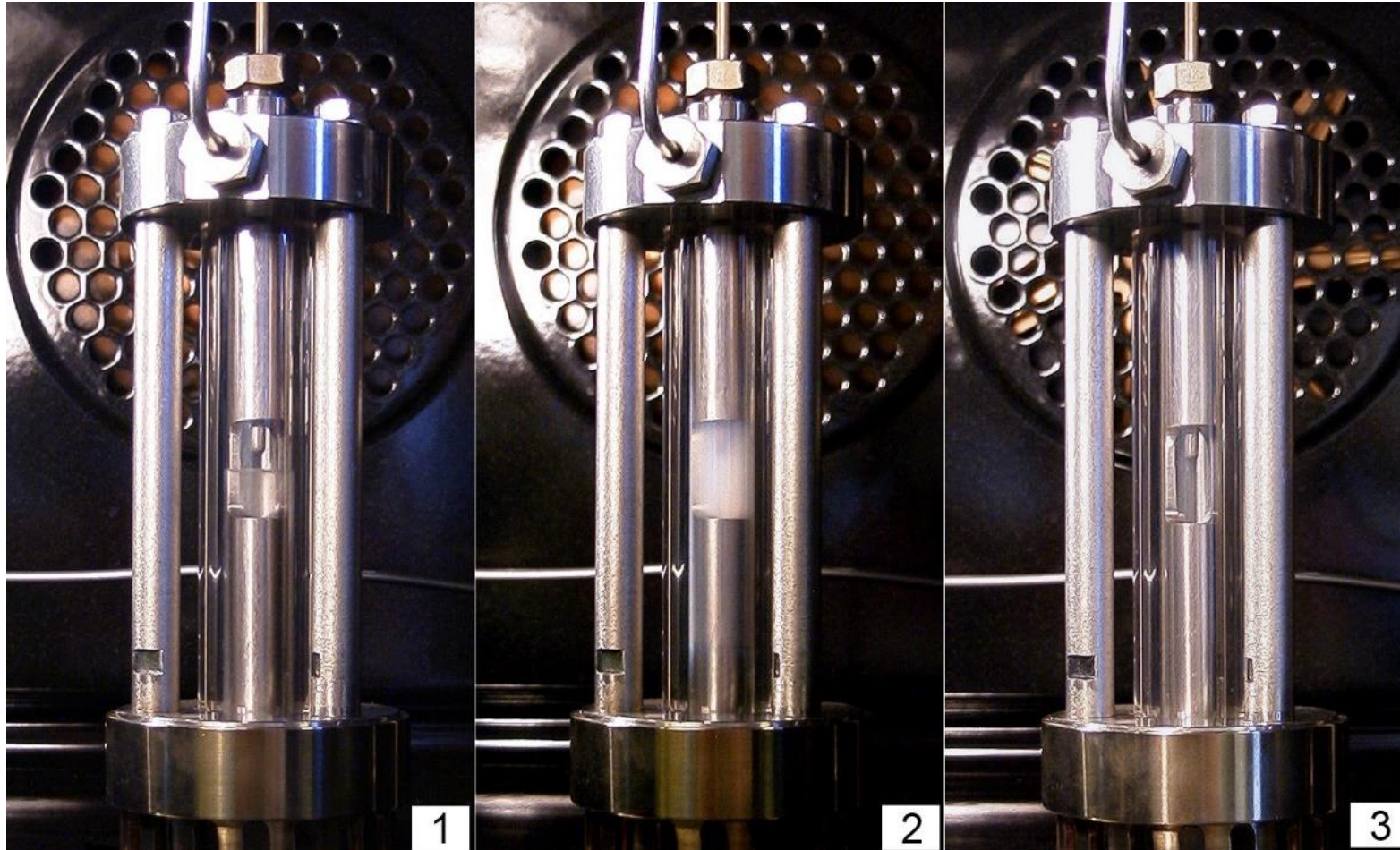
## CO<sub>2</sub> izotermái



A kritikus pontban  $\frac{\Delta p}{\Delta v} = 0$



# Anomális fényszórás (kritikus opaleszcencia)



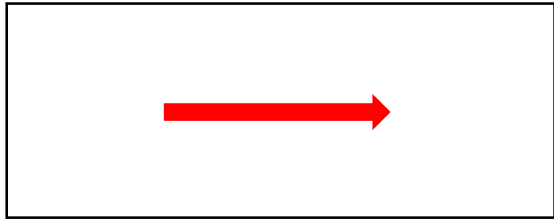
$$T < T_c$$

$$T = T_c$$

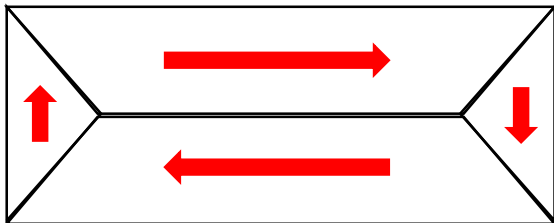
$$T > T_c$$

# Ferromágnesség

Spontán mágnesezettség

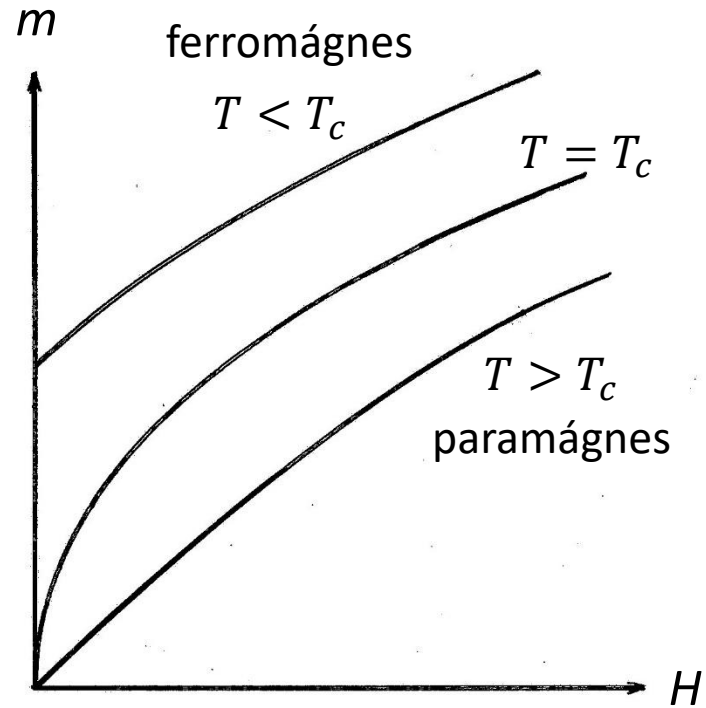


homogén minta



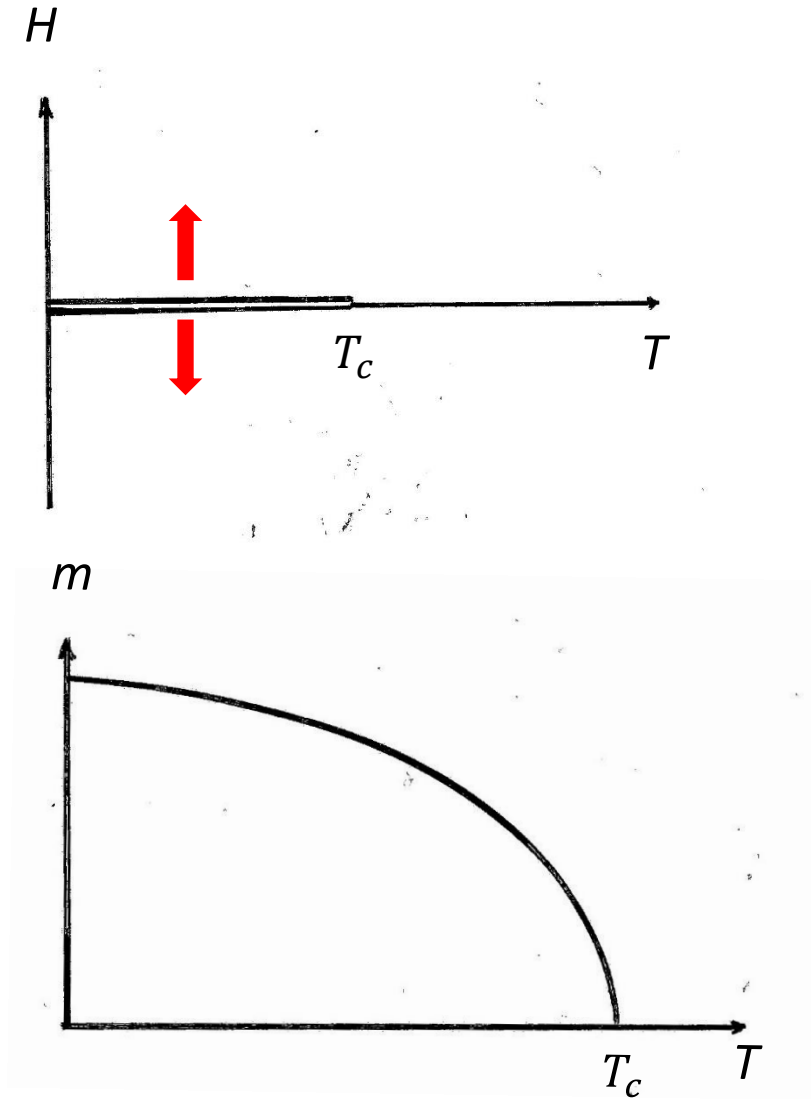
domén szerkezet

## Fázisdiagramok



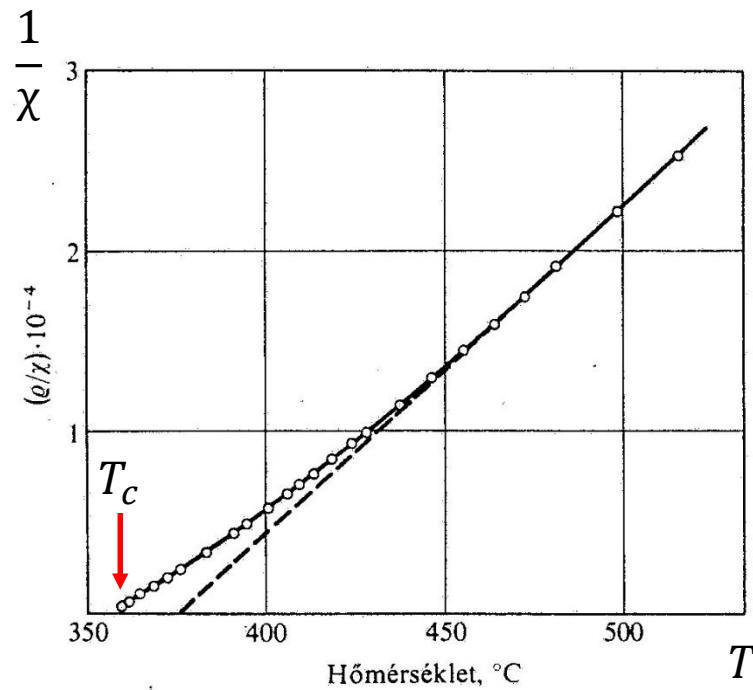
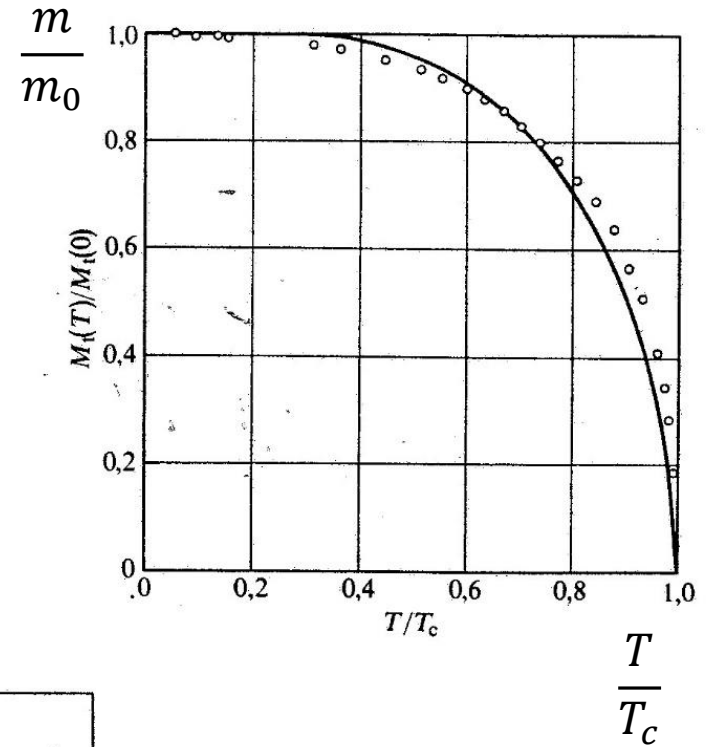
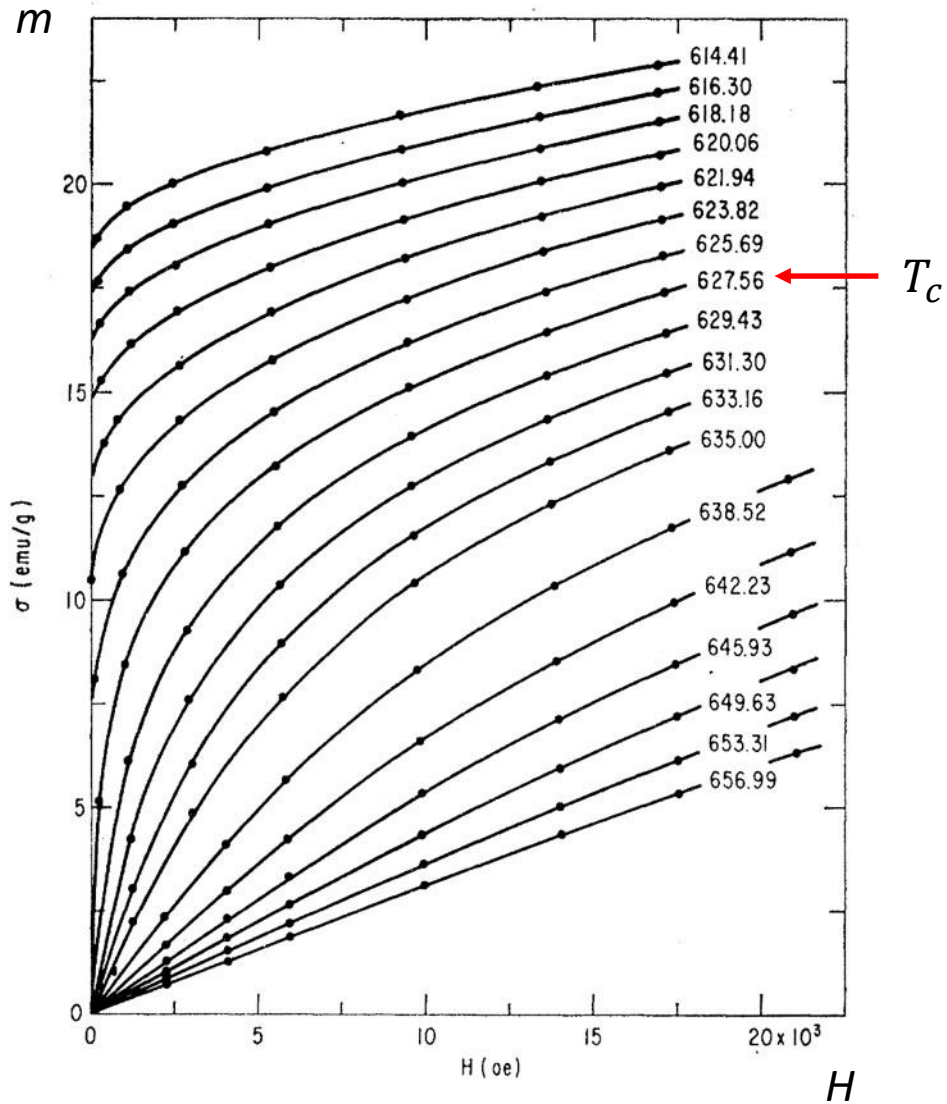
$$\begin{matrix} T = T_c \\ H \rightarrow 0 \end{matrix} \quad \frac{\Delta H}{\Delta m} = 0$$

Anomális mágnesezettség fluktuációk,  
anomális neutronszórás





# Ni fázisdiagramja



$$\chi = \frac{m}{H}, \quad (H \rightarrow 0)$$

# Rendezettség, rendezetlenség, szimmetria

A stabil egyensúlyi állapot kiválasztása:  
a szabadenergia minimuma

$$F = E - TS$$

Energia ( $E$ ) és entrópia ( $S$ ) versenye

Belső energia:

- alacsony hőmérsékleten döntő
- a rendezett állapotot teszi kedvezővé

Entrópia:

- magas hőmérsékleten döntő
- a rendezetlen állapotot teszi kedvezővé

A fázisátalakulás többnyire szimmetriasértéssel jár:

A rendezetlen fázis valamely szimmetriája nem szimmetriája a rendezett fázisnak.

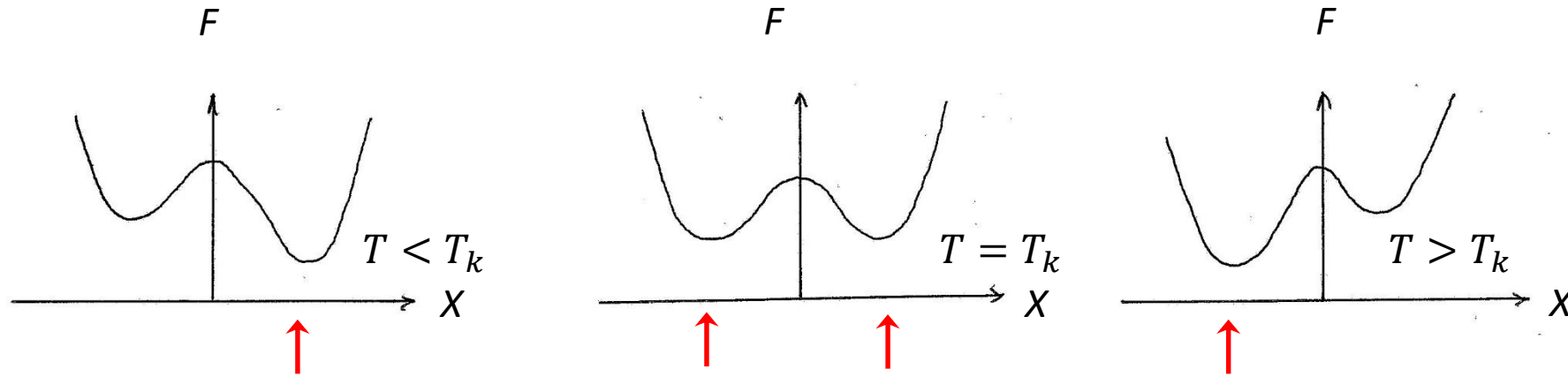
A sérült szimmetria művelet a lehetséges fázisokat kapcsolja össze.

Példa: az egytengelyű vagy az izotróp ferromágnes

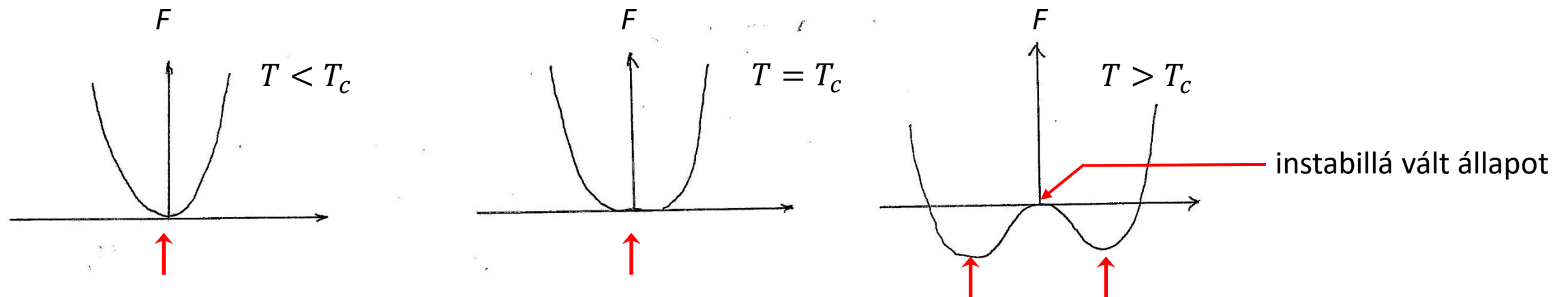
Ellenpélda: folyadék-gáz átalakulás

# A fázisátalakulások két forgatókönyve

I. Stabil és metastabil állapotok szerepcseréje (ún. elsőrendű átalakulás)

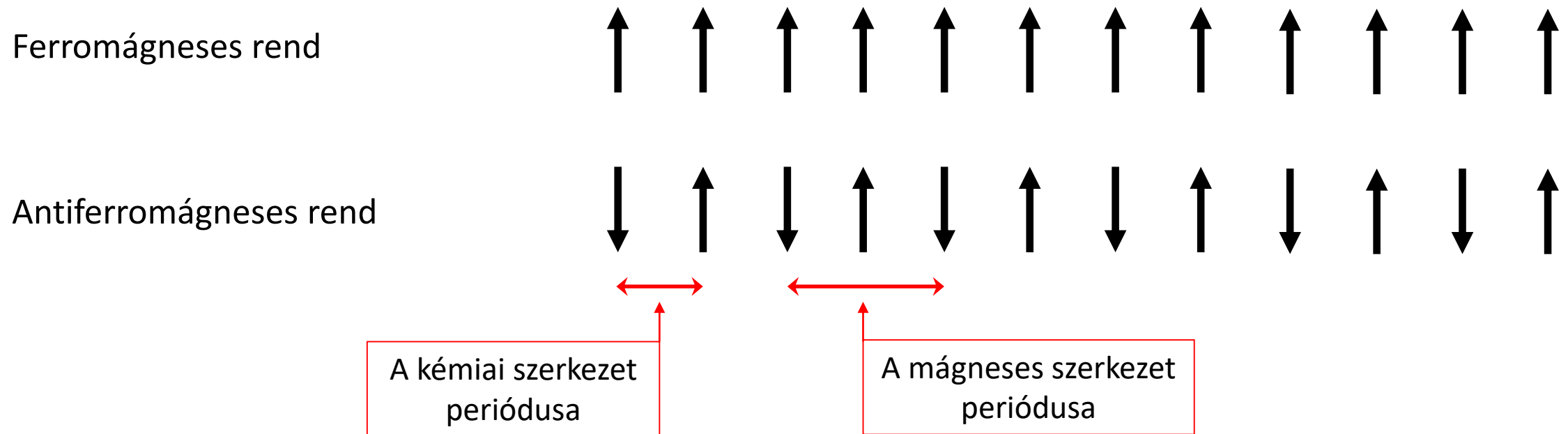


II. Az egyensúlyi állapot instabilitása (ún. folytonos átalakulás)



# Antiferromágnesség

Nincs spontán mágnesezettség, de van mágneses rendeződés.

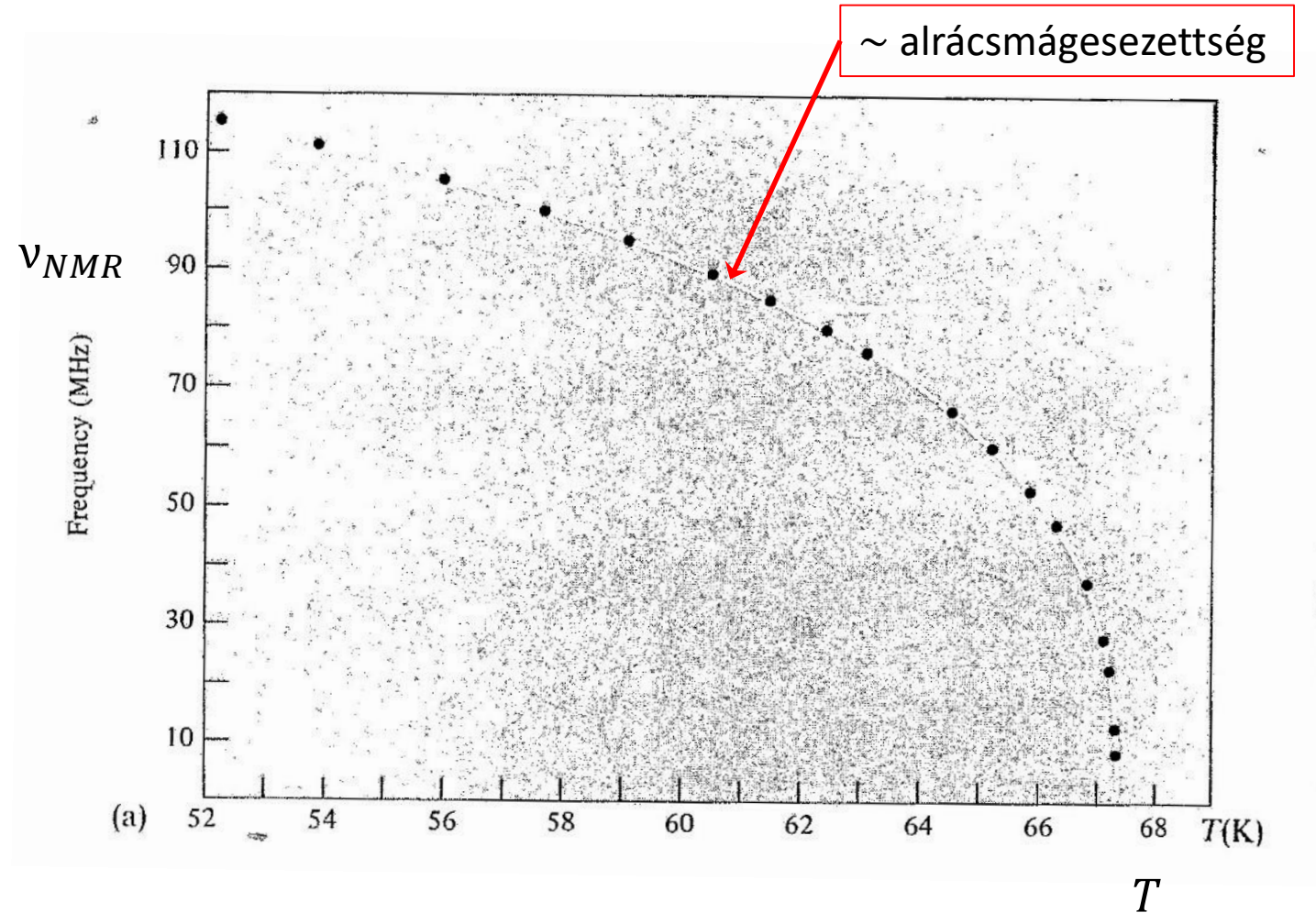
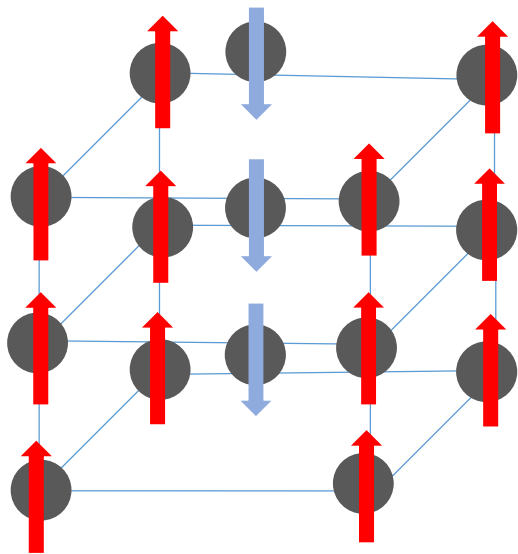
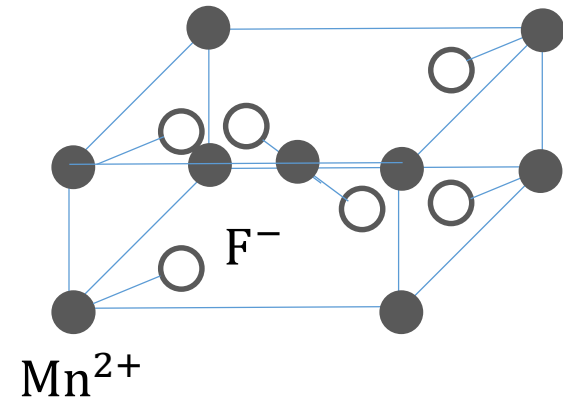


A mágneses szerkezet meghatározása: neutron-diffrakcióval

$\lambda = h/p$  hullámhosszú hullámok

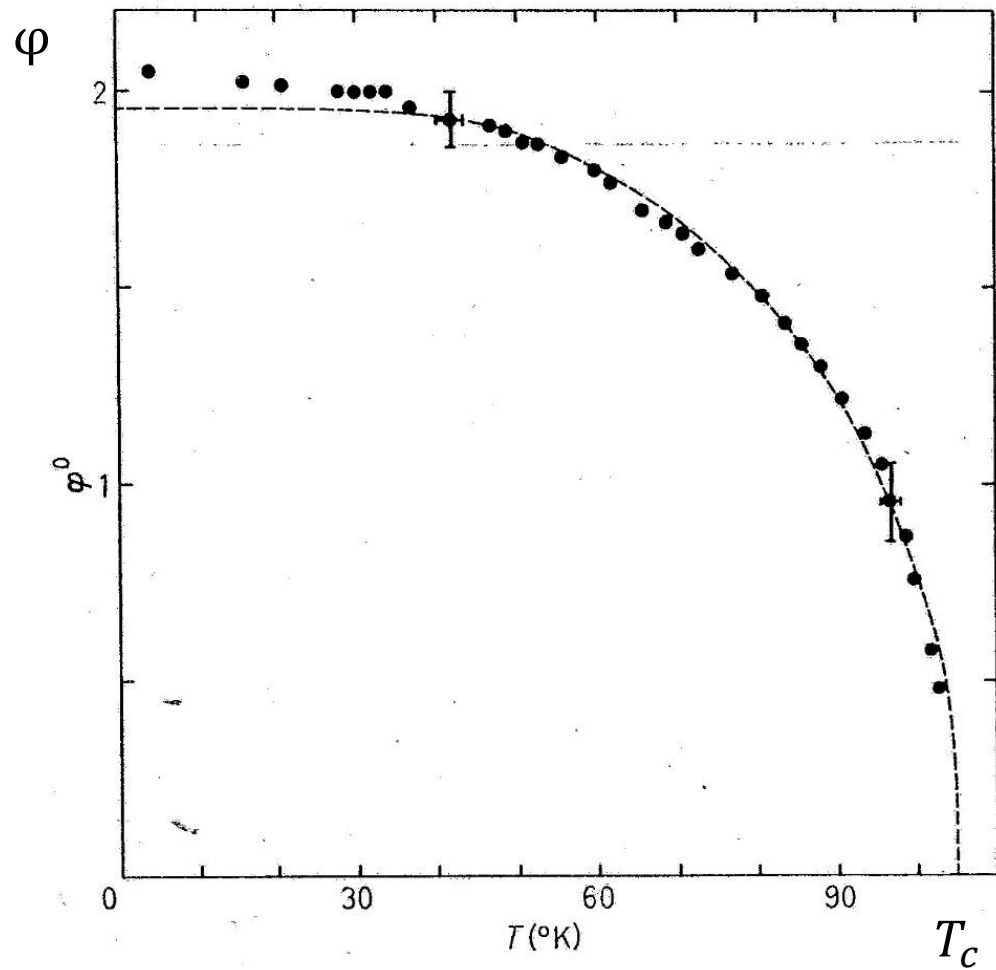
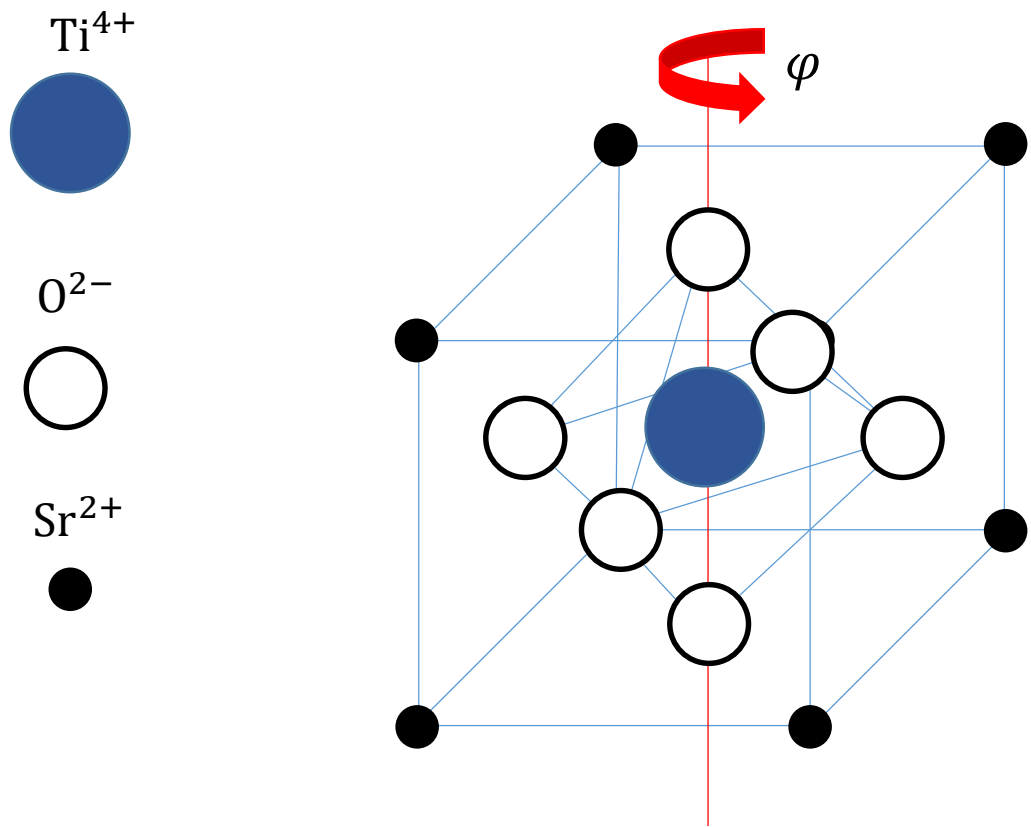
Kémeink jelentik ...

# Antiferromágneses rend $\text{MnF}_2$ kristályban

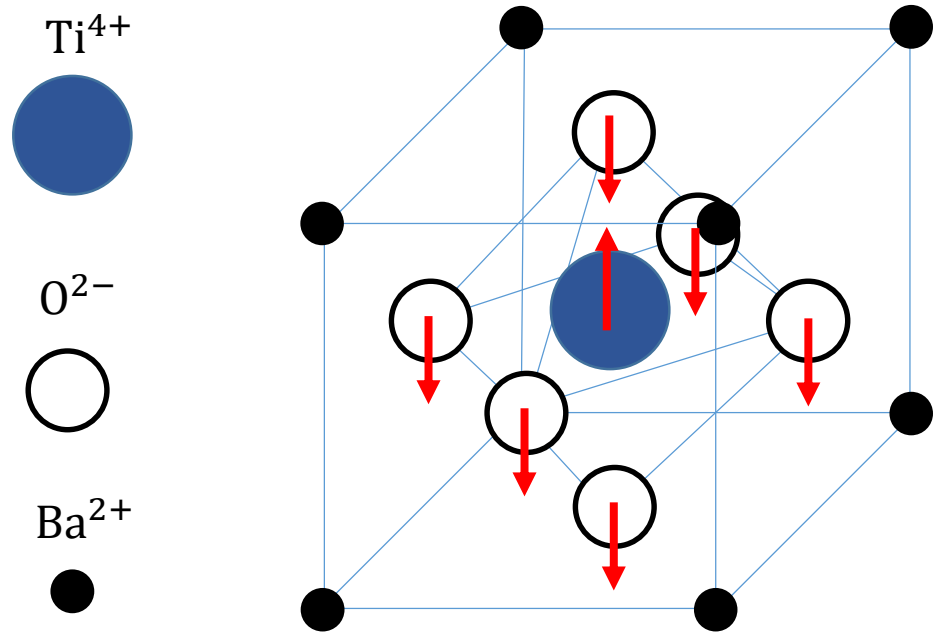


Az alrácsmágesezettség mérése nukleáris mágneses rezonanciával (NMR)

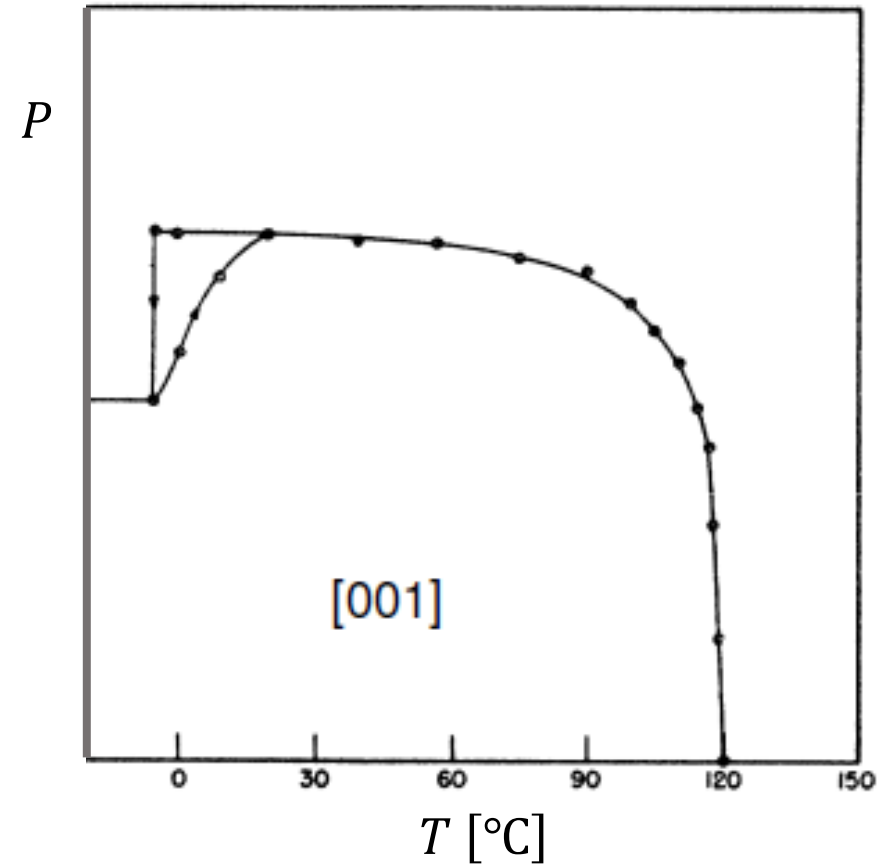
# Szerkezeti átalakulás SrTiO<sub>3</sub> kristályban



# Ferroelektromosság BaTiO<sub>3</sub> kristályban



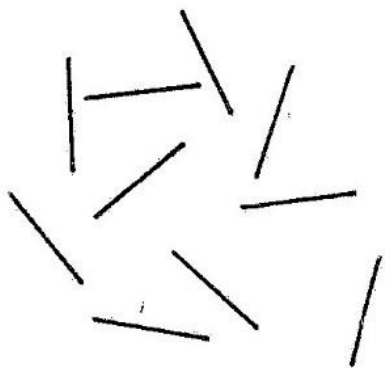
elektromos polarizáció



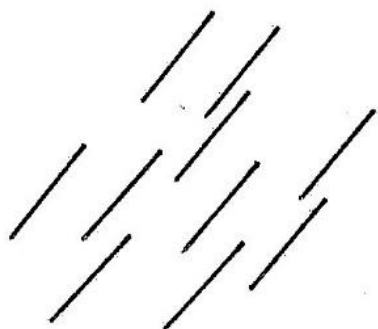


# Folyadék-kristályok

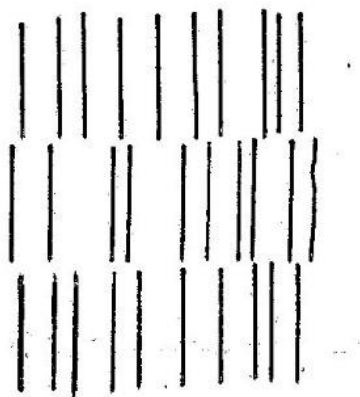
Anizotróp folyadékok



izotrop

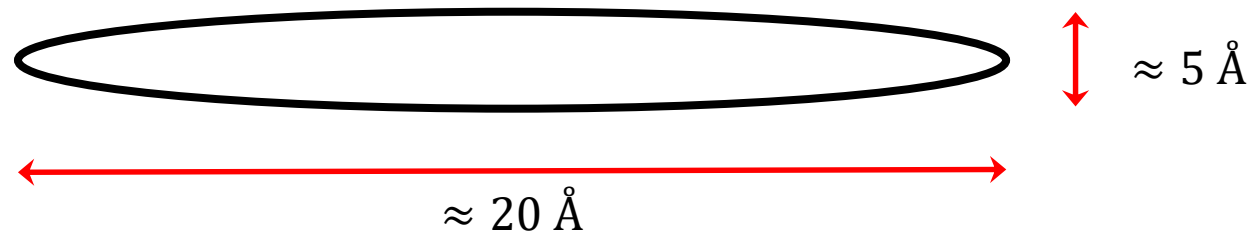


nematikus



szmektikus

Rúd alakú molekulák



Orientációs rendeződés  
megszilárdulás előtt

# Egy kis elmélet: paramágnes-ferromágnes átalakulás

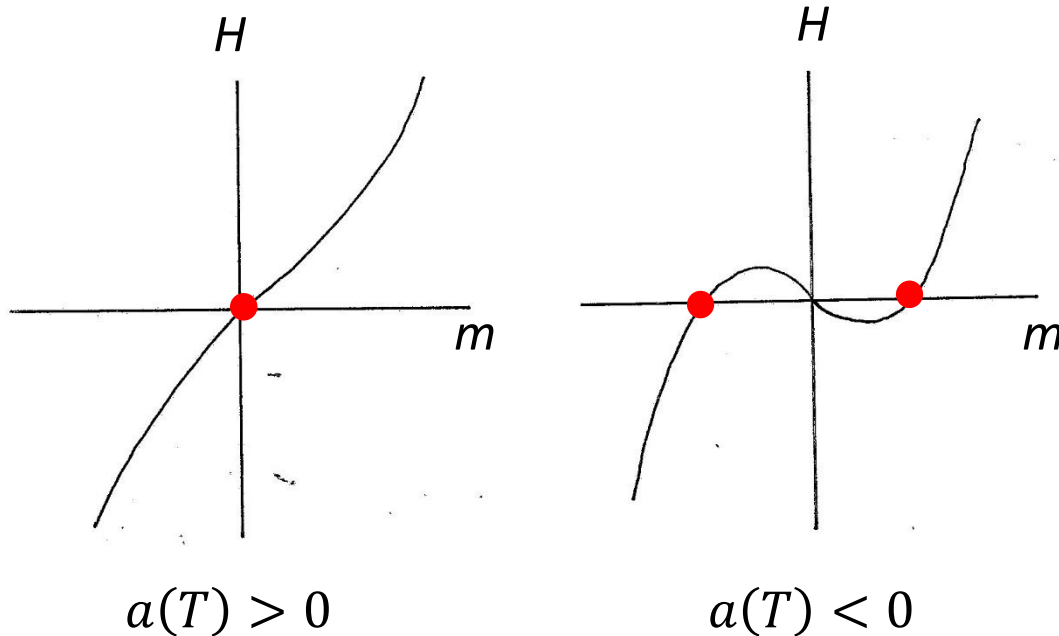
Állapotegyenlet:

$$H(T, m) = a(T)m + u(T)m^3$$

Csak páratlan hatványok:

$H, m \leftrightarrow -H, -m$  szimmetria

A mágnesezettség telítődik:  $u(T) > 0$



A kritikus pont közelében:

$$a(T) = \bar{a} \cdot (T - T_c)$$

$$u(T) \approx u(T_c)$$

$$m^2 = 0, \quad (T > T_c)$$
$$m^2 = \frac{\bar{a} \cdot (T_c - T)}{u(T_c)}, \quad (T < T_c)$$

Kis elméletünk szerint:  $m \sim \sqrt{T_c - T}$ ,  $(T \rightarrow T_c^-)$

Mérések illesztése  $m \sim (T_c - T)^\beta$  függvénnyel:

$\beta$  értékei (hibahatárok nélkül):

Fe	Ni	CrBr <sub>3</sub>	EuO	CO <sub>2</sub>	Xe	<sup>4</sup> He	MnF <sub>2</sub>	SrTiO <sub>3</sub>	univerzalitás
0,34	0,37	0,36	0,37	0,35	0,35	0,35	0,33	0,33	$\beta \approx 1/3$



ferromágnes



folyadék-gáz  
( $v_g - v_f$ )



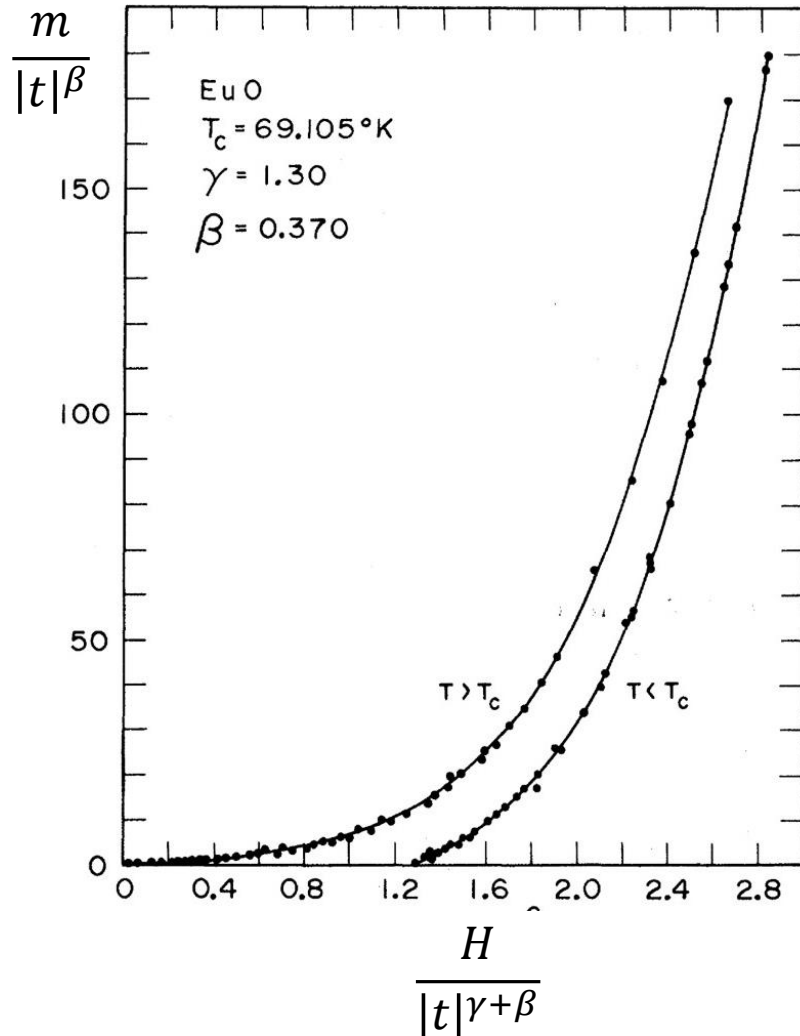
antiferromágnes  
(alrácsmágneszettség)



szerkezeti átalakulás  
(oktaéder elfordulásának  
szöge)

## Skálázás

Megfelelő átskálázással az izotermák egymásra esnek.



## Modern elmélet: renormálási csoport elmélet

Hogyan kezeljük nagyszámú,  
erősen korrelált szabadsági fokot?

$$t = \frac{T - T_c}{T_c}$$

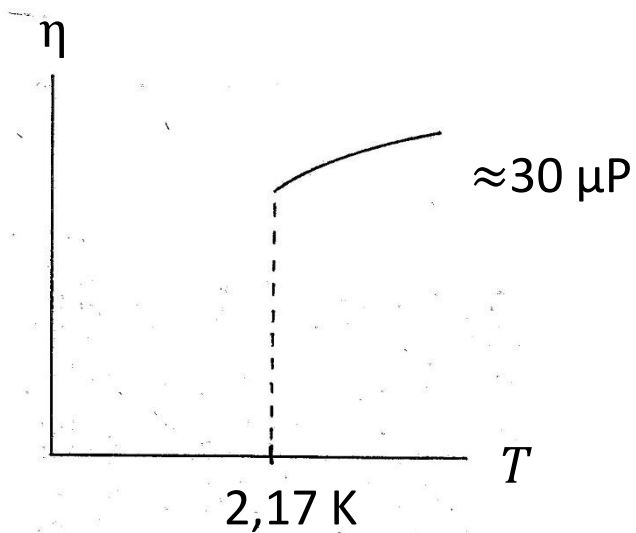
$$m(H = 0) \sim |t|^\beta$$

$$\chi \sim |t|^{-\gamma}$$

# Disszipáció nélküli áramlások

## $^4\text{He}$ szuperfolyékonysága

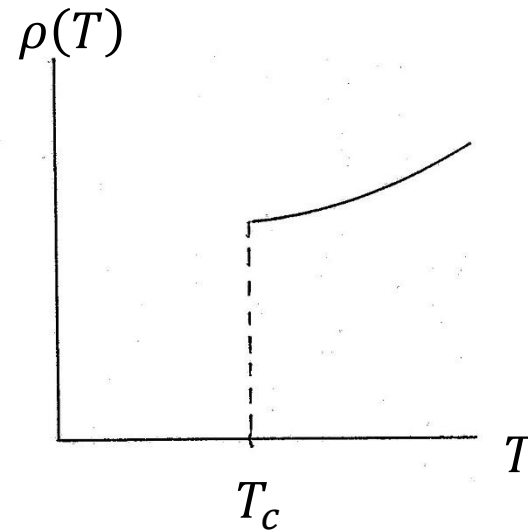
Dinamikai viszkozitás  
(áramlás kapillárison keresztül)



Bose-kondenzáció

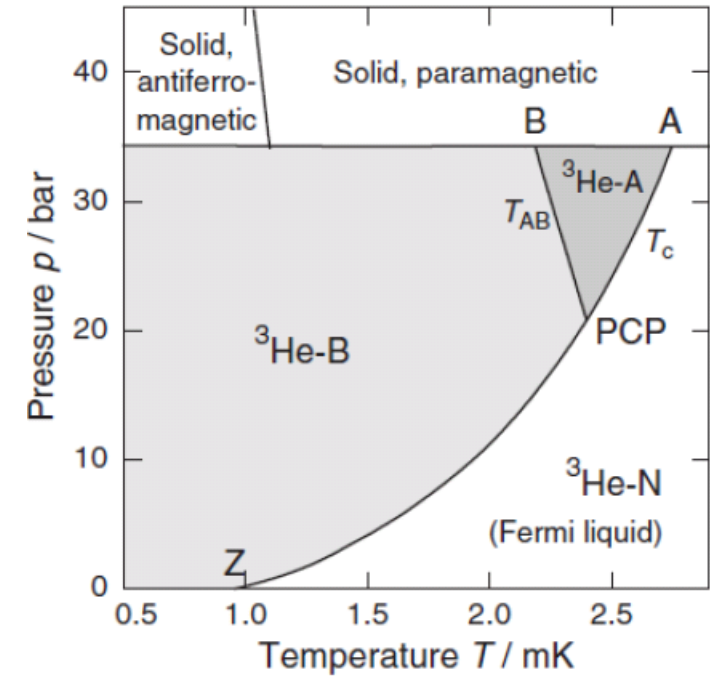
## Fémek szupravezetése

Fajlagos ellenállás



szinglett e-e párok

## $^3\text{He}$ szuperfolyékonysága



triplett He-He párok

**Itt a vége, tedd a jégre!**  
**Majd elcsúszik valamerre!**