Mozgó testek hőmérséklete relativisztikus sebességek esetén

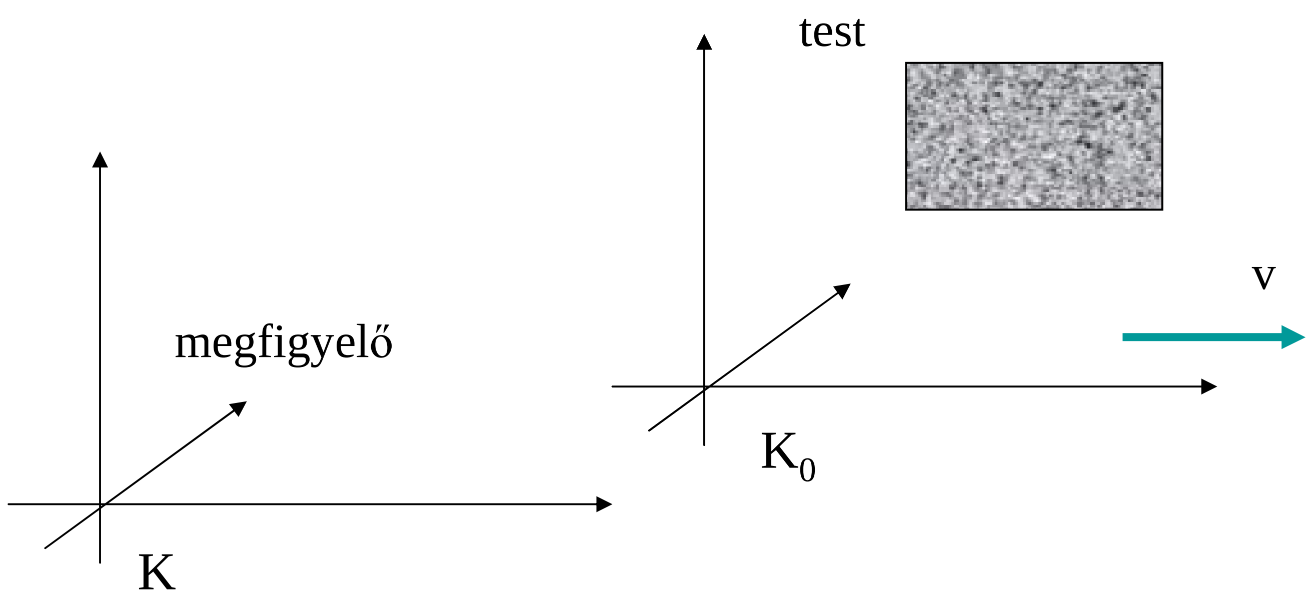
Ván Péter, Bíró Tamás

KFKI, RMKI, Elméleti Fizika Főosztály

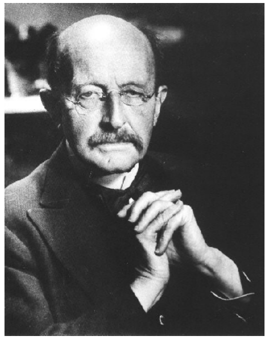
– Planck-Einstein és Ott
  (relativisztikus termodinamika)

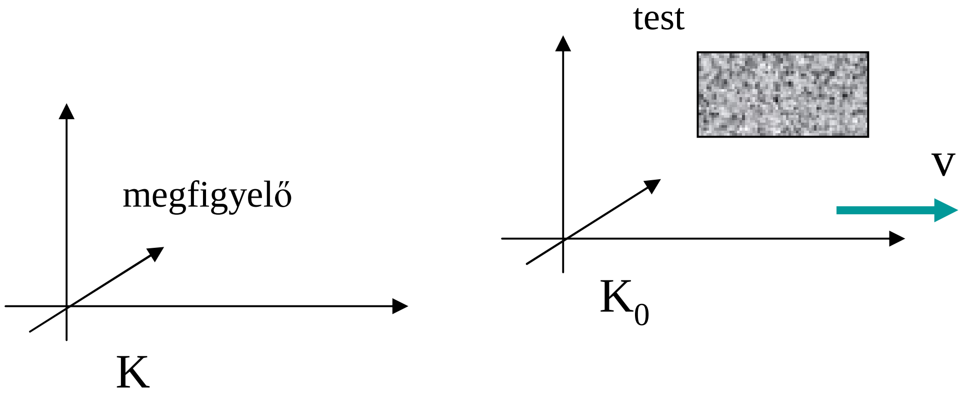
– Hidrodinamikai keretek és általánosítás

A mozgó testek hőmérsékletéről…



- Planck-Einstein (1907): hidegebb
- Ott (1963) [Blanusa (1947)] : melegebb
- Landsberg (1966-67): egyenlő
- Costa-Matsas-Landsberg (1995): irányfüggő (Doppler)

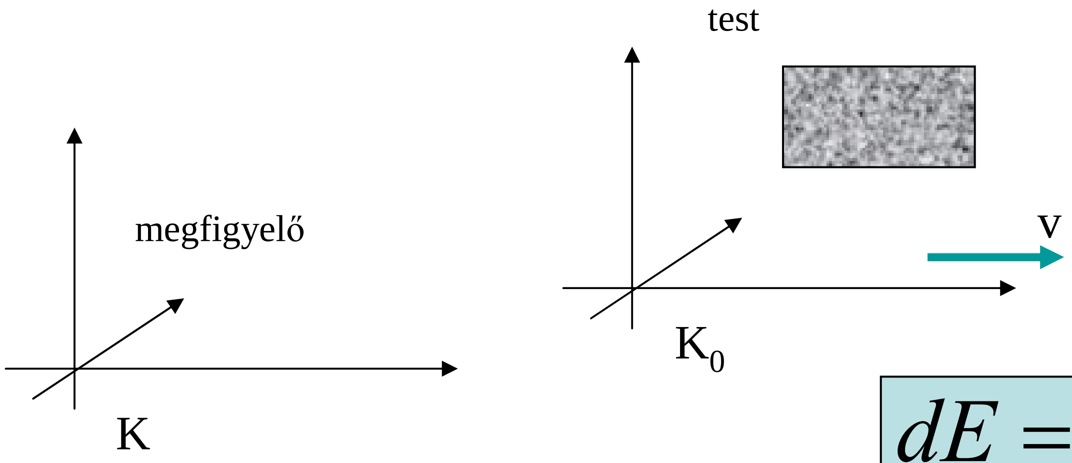
Planck  és Einstein 



$$dE = TdS - pdV$$

Relativisztikus termodinamika?

Hogyan transzformálódik – rejtett kovariancia



$$c = 1, \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1-v^2}}$$

$$\boxed{dE = TdS - pdV \quad ?}$$

$p = p_0$

$V = V_0 / \gamma$ – Lorentz kontrakció

$S = S_0$ – Planck: adiabatikus átvitel
ekvivalens megfigyelők

$$S_0^1 = S_0^2$$
$$\vee \qquad \wedge$$
$$S^1 = S^2$$

Energia-impulzus vektor:

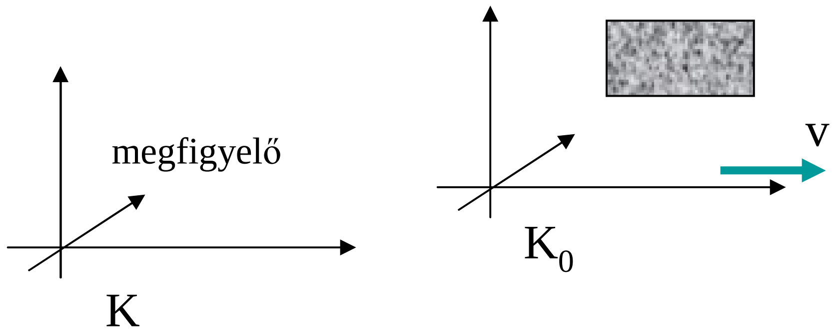
$$\begin{pmatrix} E \\ G \end{pmatrix} = \gamma \begin{pmatrix} 1 & v \\ v & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma E_0 \\ \gamma v E_0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} t' \\ x' \end{pmatrix} = \gamma \begin{pmatrix} 1 & v \\ v & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t \\ x \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma(t+vx) \\ \gamma(x+vt) \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{1-(v/c)^2}} \begin{pmatrix} t + vx/c^2 \\ x + vt \end{pmatrix}$$

$$dE = TdS - pdV + vdG$$

transzlációs munka –

hő = impulzus



$$\left\{\begin{aligned} p &= p_0 \\ dV &= dV_0/\gamma \\ dS &= dS_0 \\ dE &= \gamma dE_0 \\ dG &= \gamma v dE_0 \end{aligned}\right.$$

$$dE = TdS - pdV + vdG$$

$$\gamma dE_0 = TdS_0 - p_0 \frac{dV_0}{\gamma} + \gamma v^2 dE_0$$

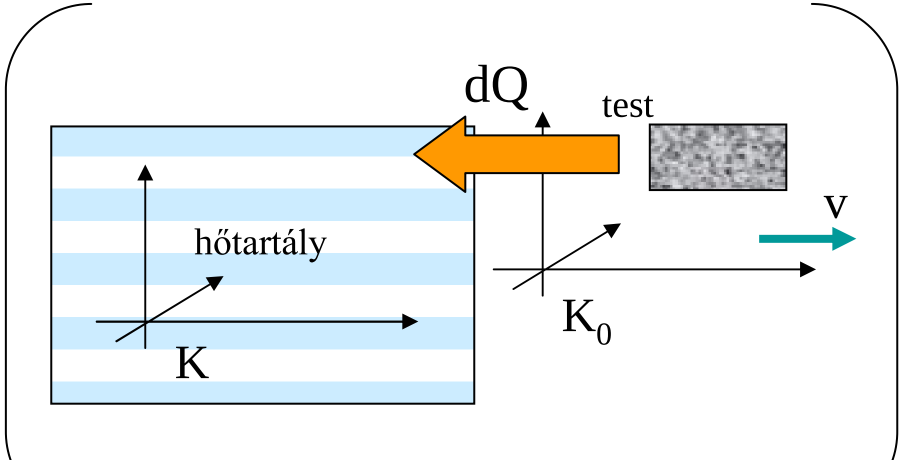
$$\frac{dE_0}{\gamma} = TdS_0 - p_0 \frac{dV_0}{\gamma}$$

$$dE_0 = T_0 dS_0 - p_0 dV_0$$

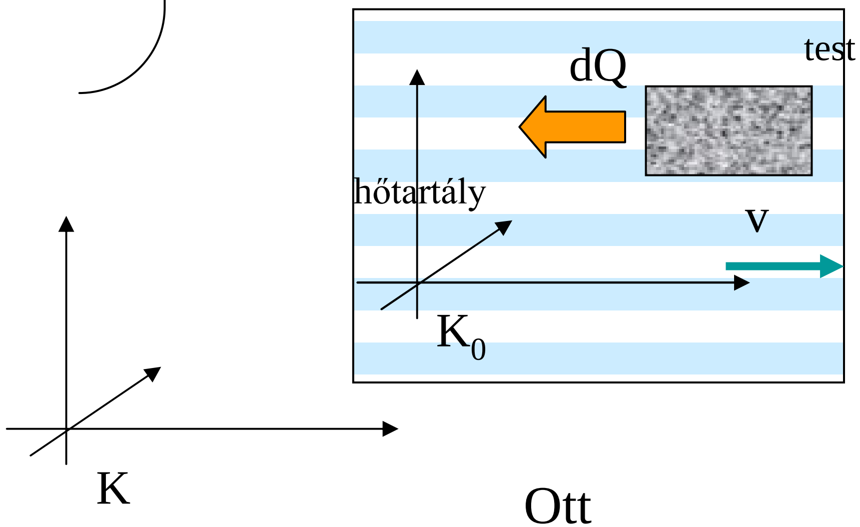
$$\boxed{T = \frac{T_0}{\gamma} = T_0\sqrt{1-v^2} < T_0}$$

Mi ez?

Ott (1963)



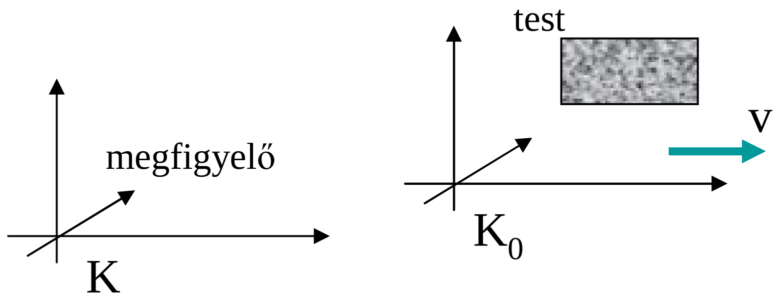
Planck-Einstein



Ott

$$dE = TdS - pdV + \cancel{vdG}$$

nincs transzlációs munka



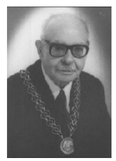
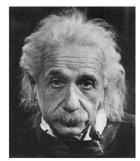
$$\left\{\begin{aligned} p &= \gamma^2 p_0 \\ dV &= dV_0/\gamma \\ dS &= dS_0 \\ dE &= \gamma dE_0 \end{aligned}\right.$$

$$dE = TdS - pdV$$

$$\gamma dE_0 = TdS_0 - \gamma^2 p_0 dV_0/\gamma$$

$$\updownarrow$$

$$dE_0 = T_0 dS_0 - p_0 dV_0 \longrightarrow \boxed{T = \gamma T_0}$$

Blanusa (1947)
Einstein (1952) (levelezése Laue-val)

De: hőmérséklet vektor? tenzorkomponensek?

sebesség a termodinamikában:

Vita (~1963-70): új szempontokkal, megoldás nélkül.

Landsberg

van Kampen

Kérdések

- Mi az ami mozog (áramlik)?
  - barion, elektromos, stb. töltés (Eckart)
  - energia (Landau-Lifshitz)
- Mi a termodinamikai test?
  - térfogat
  - tágulás (Hubble)
- Mi az állapotegyenlet kovariáns formája?
  - $S(E,V,N,\ldots)$
- Kölcsönhatás: hogyan transzformálódik a hőmérséklet?

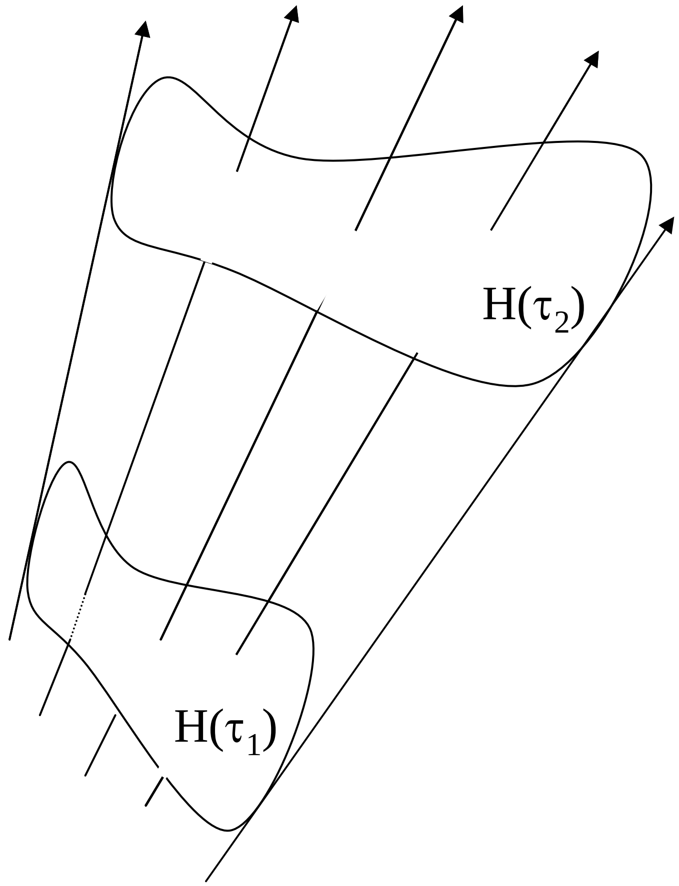
A termodinamikai rendszer speciális kontinuum

Térfogati integrálok: munka, hő, belső energia

$$\boxed{\dot{E}\overline{u}^a + \dot{G}^a + p\overline{u}^a\dot{V} = -\oint_{\partial H}\left(u^a q^b + \Pi^{ab}\right)dA_b = \delta Q^a}$$

$$\overline{u}^a = \frac{1}{V}\int_H u^a dV, \quad E = \int_H e dV = eV, \quad G^a = \int_H q^a dV,$$

$$E^a = E\overline{u}^a + G^a, \quad a \in \{0,1,2,3\}$$



Hőáram és entrópiaváltozás:

integráló szorzó

$$\delta Q^a = \dot{E}^a + p\overline{u}^a\dot{V} = \dot{S}A^a$$

$$E^a = E\overline{u}^a + G^a, \quad S = S(E^a, V)$$

$$dS = \frac{A_a\overline{u}^a}{A_b A^b}dE + \frac{A_a}{A_b A^b}dG^a + \frac{A_a\overline{u}^a}{A_b A^b}pdV$$

hőmérséklet

$$\boxed{TdS = g_a dE^a + pdV}$$

$$g_a u^a = 1$$

$$\boxed{TdS = g_a dE^a + pdV}$$

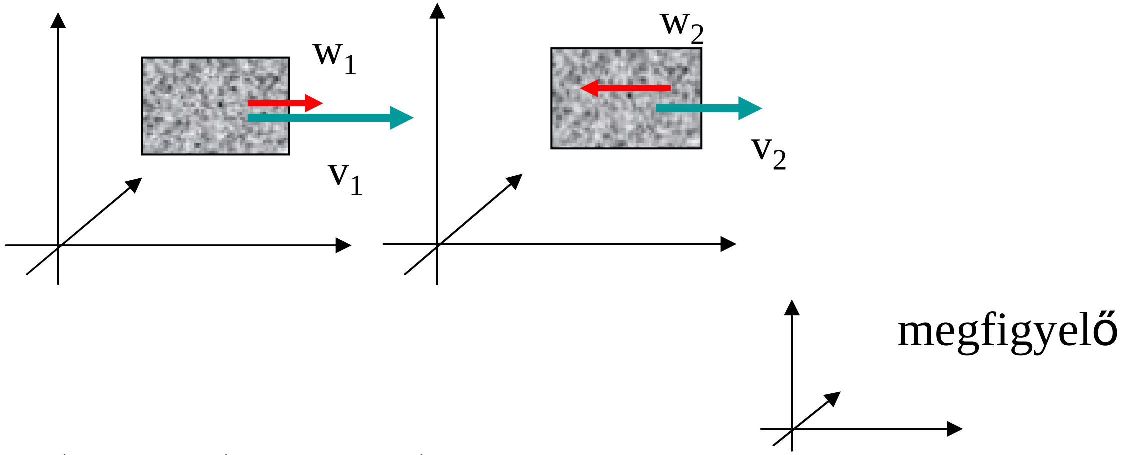
sebesség a termodinamikában

van Kampen

$$g_a u^a = 1 \quad \Rightarrow \quad \boxed{w^a = g_a - u^a}$$

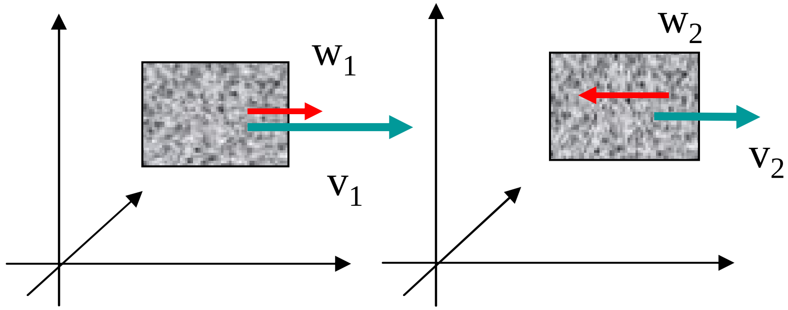
w térszerű, de $|w|<1$ -- a hőáram sebessége

Kölcsönhatás



- általában négy különböző sebességünk van
- csak egyik sebesség transzformálható ki.
- a test mozgása és az energia-impulzus áramok fénysebesség alattiak

$$\boxed{TdS = g_a dE^a \quad \Rightarrow \quad \frac{g_1^a}{T_1} = \frac{g_2^a}{T_2}}$$



1+1 dimenzió:

$$u^a = (\gamma, \gamma v), \quad w^a = (\gamma w, \gamma w)$$

$$\frac{\gamma_1 (1 + v_1 w_1)}{T_1} = \frac{\gamma_2 (1 + v_2 w_2)}{T_2}$$

$$\frac{\gamma_1 (v_1 + w_1)}{T_1} = \frac{\gamma_2 (v_2 + w_2)}{T_2}$$

$$\frac{v_1 + w_1}{1 + v_1 w_1} = \frac{v_2 + w_2}{1 + v_2 w_2}$$

$$\frac{\sqrt{1 - w_1^2}}{T_1} = \frac{\sqrt{1 - w_2^2}}{T_2}$$

Hőmérsékletek transzformációja

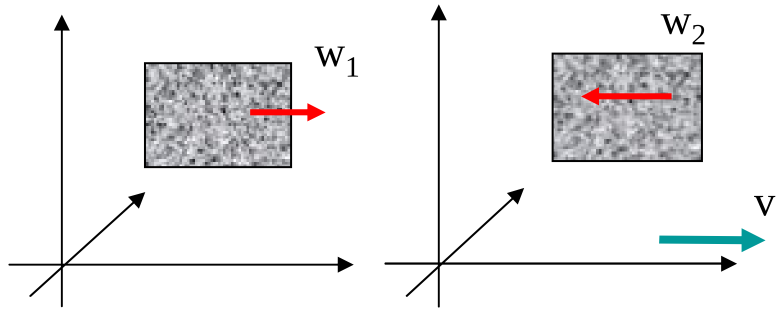
$$\boxed{\frac{v_1 + w_1}{1 + v_1 w_1} = \frac{v_2 + w_2}{1 + v_2 w_2}, \quad \frac{\sqrt{1 - w_1^2}}{T_1} = \frac{\sqrt{1 - w_2^2}}{T_2}}$$

Négy sebesség: v_1, v_2, w_1, w_2

Relatív sebesség

(Lorentz trafó)

$$v = \frac{v_2 - v_1}{1 - v_1 v_2}$$

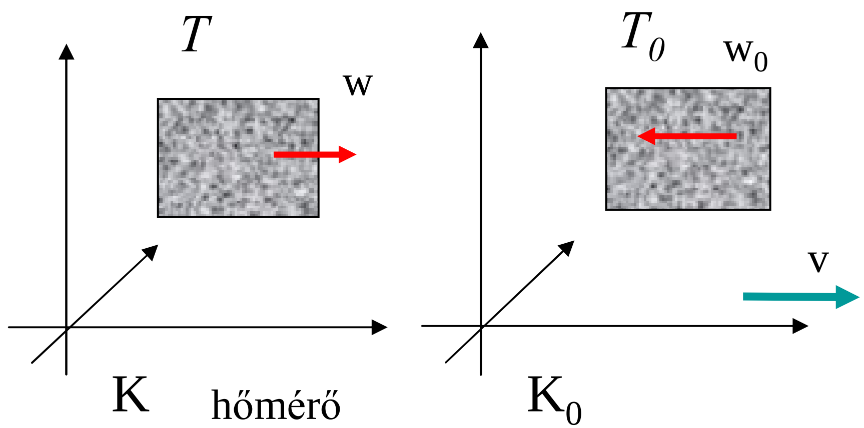


$$w_1 = \frac{v + w_2}{1 + v w_2}$$

$$\boxed{\frac{T_1}{T_2} = \frac{\sqrt{1 - v^2}}{1 + v w_2}}$$

általános Doppler-szerű formula!

$$\boxed{\frac{T}{T_0} = \frac{\sqrt{1-v^2}}{1+vw_0}}$$



Esetek:

$w_0 = 0$	$T = T_0/\gamma$	*Planck-Einstein*
$w = 0$	$T = \gamma\, T_0$	*Ott*
$w_0 = 1,\ v > 0$	$T = T_0 \bullet$ *vörös*	*Doppler*
$w_0 = 1,\ v < 0$	$T = T_0 \bullet$ *kék*	*Doppler*
$w_0 + w = 0$	$T = T_0$	*Landsberg*

Öszefoglalás

Belső energia:

E	E^a
– $S = S(E,V,N)$	– $S = S(E^a, V, N)$
– munka impulzus cserével	– energia-impulzus csere
– a relatív sebesség v nulla	– T és v nem egyenlítődik ki
– Hidegebb, melegebb, egyenlő, Doppler?	– $\gamma_w T$ és $w \oplus v$ egyenlítődik
	– T: trafó dopplerezi w-t v-vel

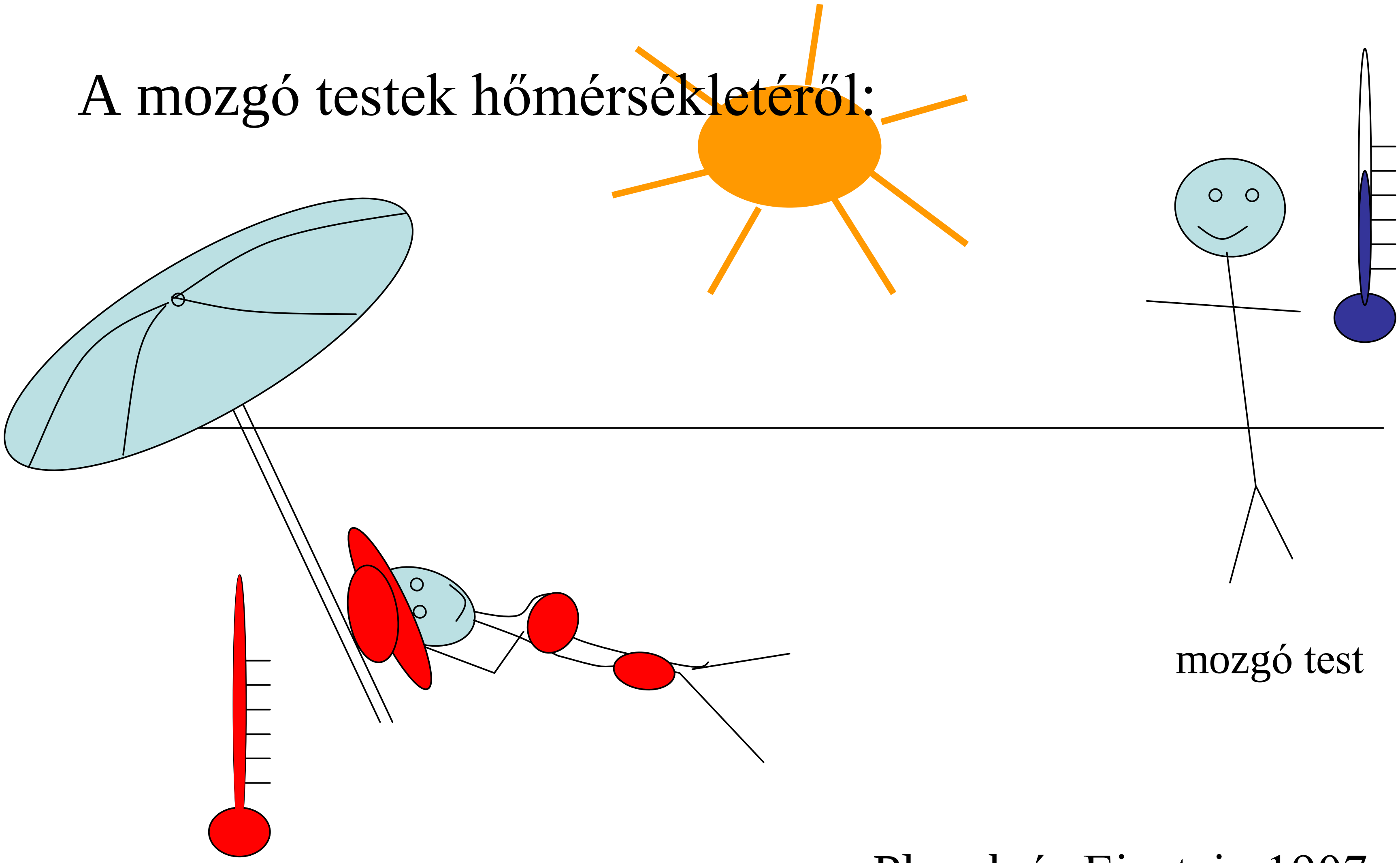
Bíró-Ván: arXiv:0905.1650
Wolfram Demonstration Project, Transformation of …

Nehézion fizika:

disszipatív relativisztikus folyadékok

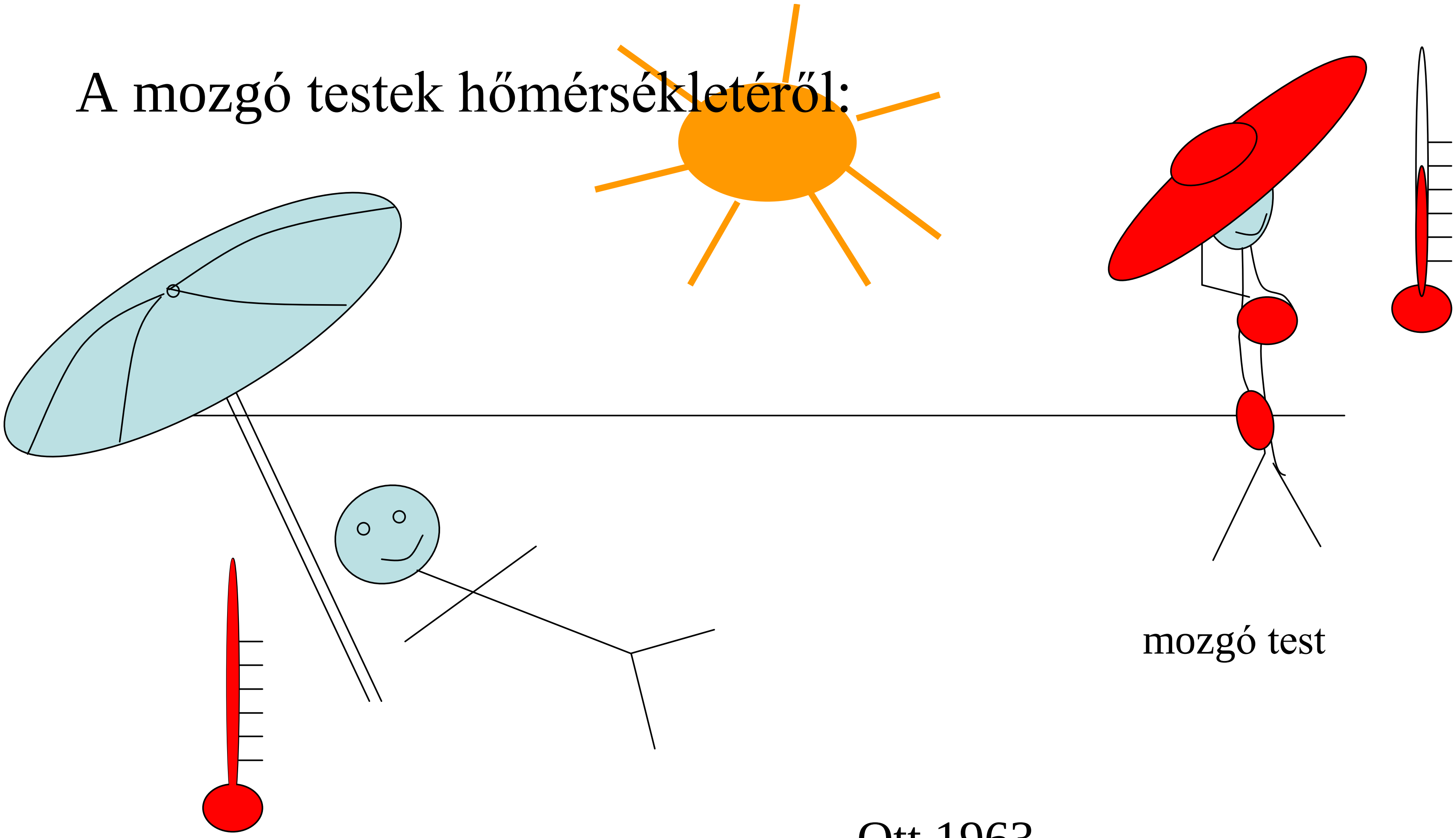
Ván: J. Stat. Mech. P02054, 2009.
Bíró-Molnár-Ván: PRC 78, 014909, 2008.

A mozgó testek hőmérsékletéről:



Planck és Einstein 1907

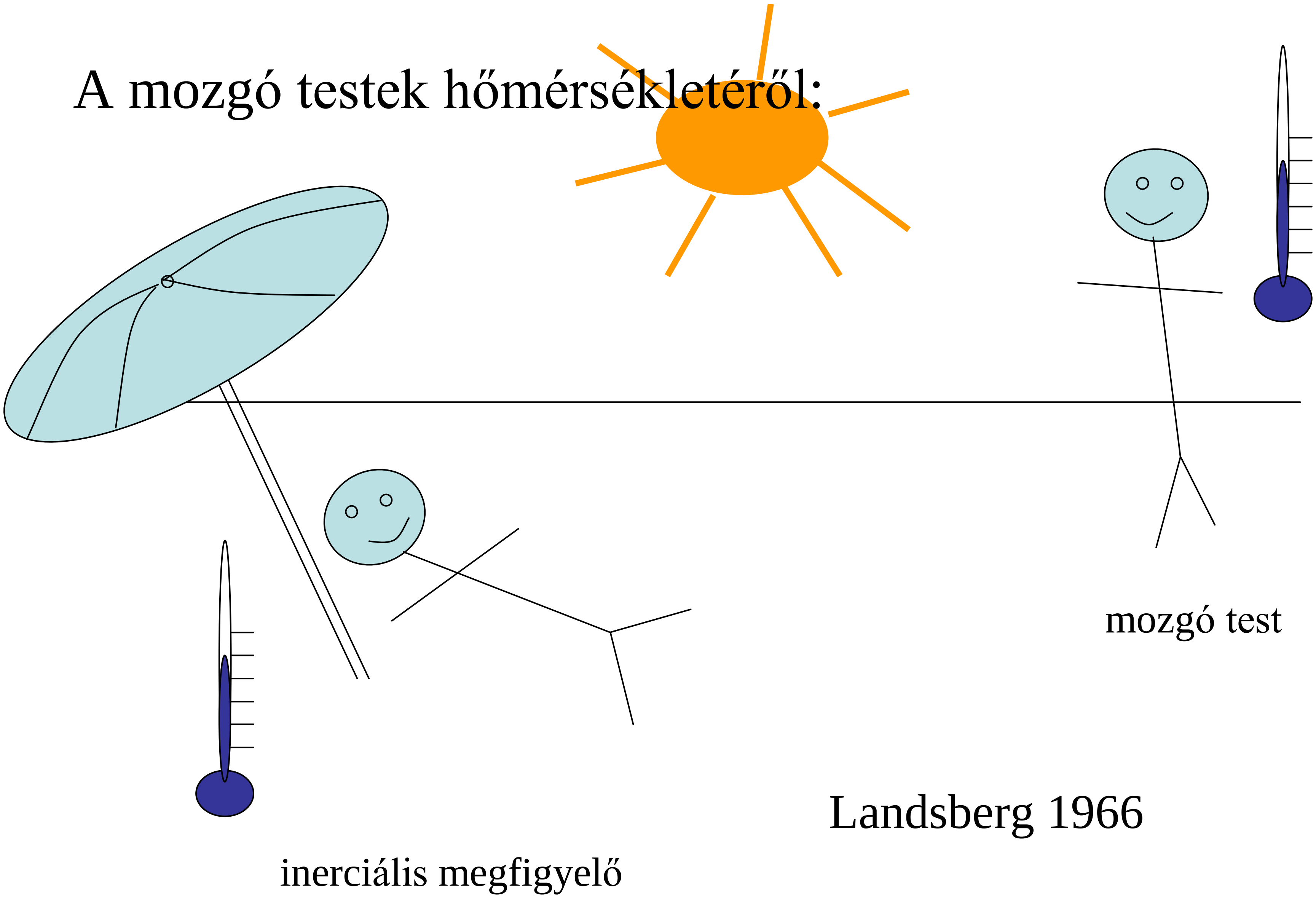
A mozgó testek hőmérsékletéről:



Ott 1963

inerciális megfigyelő

A mozgó testek hőmérsékletéről:



Landsberg 1966

Köszönöm a figyelmet!