KAPILLARITÁS-KUTATÁSOK

– Diákok az Akadémián: Eötvös 100 –

2019. november 28.

Szijártó Márk

PhD hallgató (mark.szijarto@ttk.elte.hu)

Geofizikai és Űrtudományi Tanszék

Tóth József és Erzsébet Hidrogeológia Professzúra

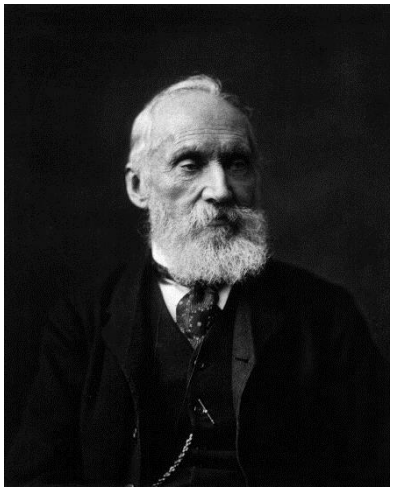
Eötvös Loránd Tudományegyetem

Mi a közös bennük?

Leonardo da Vinci
(1452-1519)

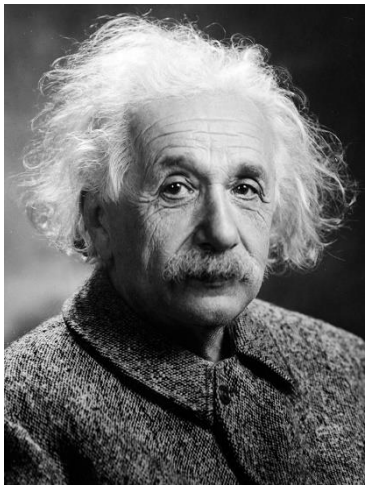
Robert Boyle
(1627-1691)

Pierre-Simon de Laplace
(1749-1827)



William Thomson
(1824-1907)

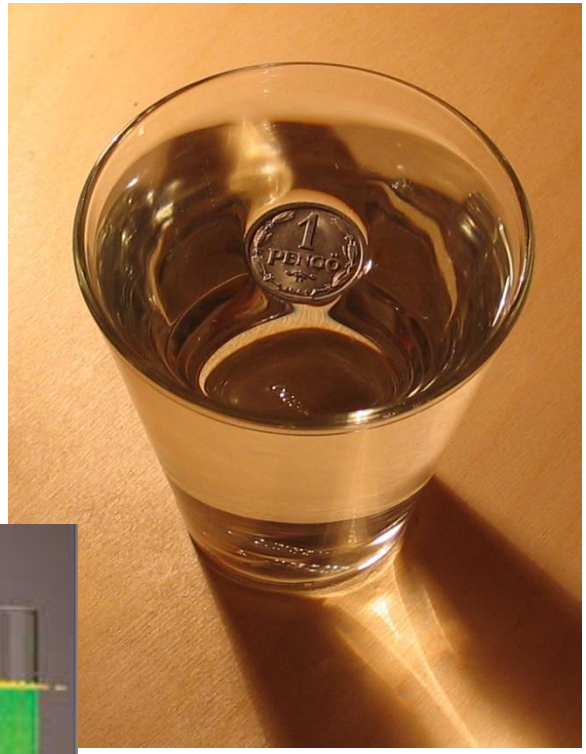
Eötvös Loránd
(1848-1919)



Albert Einstein
(1879-1955)

Néha a természet látszólag „furcsán” viselkedik

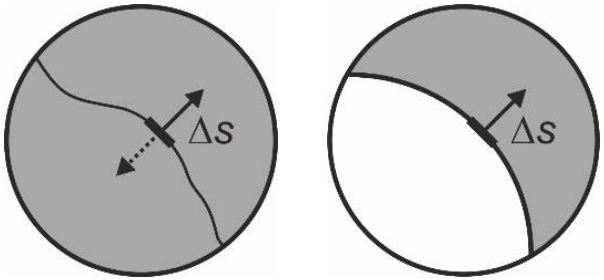
Molnárpoloska a víz felszínén
(wikipedia.org)



A víz felszínén „úszó” pengő
(wikipedia.org)

Hajszálcsövesség
(takacslajos.uw.hu)

Felületi feszültség

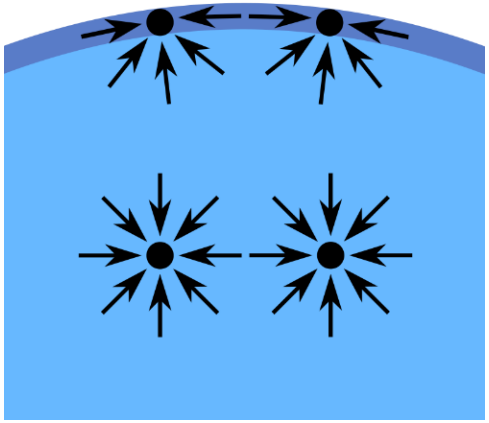


A folyadékfelszín viselkedése hártyáknál
(Budó, 1992 nyomán)

- Mechanikai rendszerek stabil egyensúlyi állapotban = **helyzeti energiájuk minimum**.
- Ha molekuláris erők mellett más erők elhanyagolhatók, a folyadék felszíne az **adott feltételek mellett lehetséges legkisebb potenciálfelületet próbálja elérni.**

Felületi feszültség

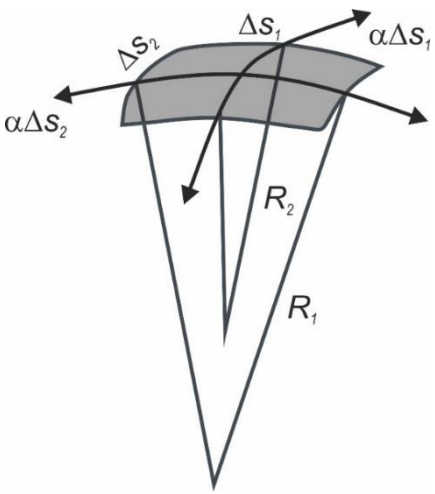
$$\alpha = \frac{\Delta F}{\Delta s}$$



A folyadékmolekulákra ható erők
(wikipedia.org)

- A folyadék felszínére nyomóerő hat (kohéziós nyomás), így az ott lévő molekuláknak **nagyobb a potenciális energiájuk!**

Felületi feszültség

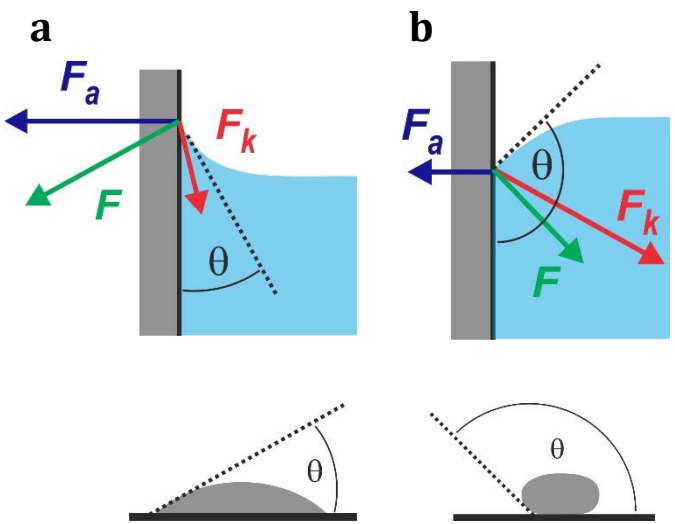


Laplace első tétele, 1806.
(Budó, 1992 nyomán)

- Általános esetben, a folyadékfelület tetszőleges pontjában a kapilláris nyomás meghatározható (**Laplace első tétele**, 1806)!

Kapilláris nyomás

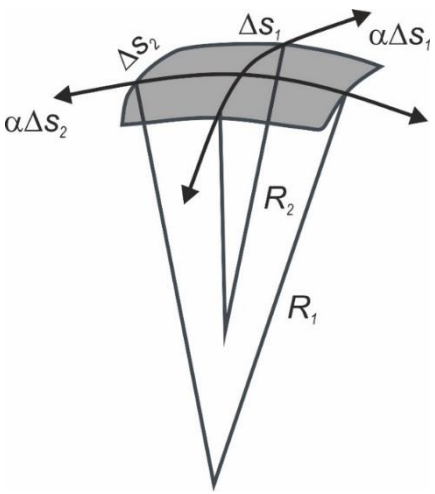
$$p_{\text{kap}} = \alpha \left[\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right]$$



(a) „Nedvesítő" és (b) „nem nedvesítő" folyadék
(Budó, 1992 nyomán)

- A felszín és a fal határánál levő molekulákra a kohéziós ($\mathbf{F_k}$) és az adhéziós ($\mathbf{F_a}$) erő hat; az eredő erő ($\mathbf{F=F_k+F_a}$) merőleges a folyadék felszínére.
- Az illeszkedési szöget (θ) ez a két erő határozza meg.

Felületi feszültség

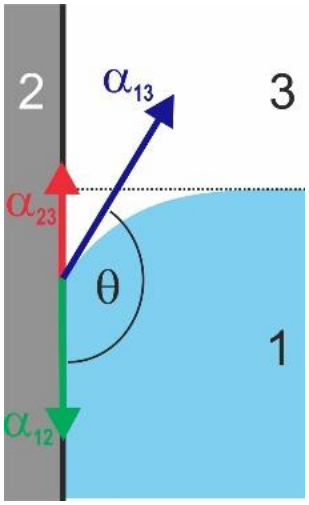


Laplace első tétele, 1806.
(Budó, 1992 nyomán)

- Általános esetben, a folyadékfelület tetszőleges pontjában a kapilláris nyomás meghatározható (**Laplace első tétele**, 1806)!

Kapilláris nyomás

$$p_{\text{kap}} = \alpha\left[\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right]$$



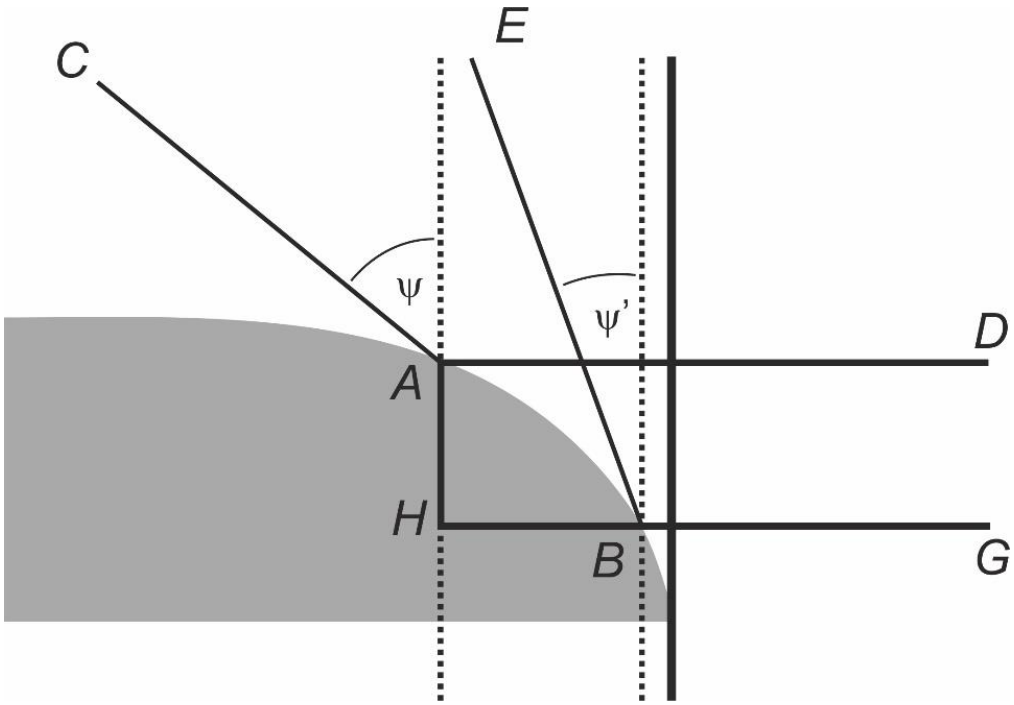
Három erő eredője (1) folyadék, (2) szilárd fal, (3) levegő határán (Budó, 1992 nyomán)

- Folyadék + szilárd fal + levegő
- **Az illeszkedési szöget (θ) kizárólag a három érintkező anyag természete (α_{12}, α_{23}, α_{14}) határozza meg (határfelületi feszültség)!**

Young–Laplace egyenlet

$$\cos\theta = \frac{\alpha_{23} - \alpha_{12}}{\alpha_{14}}$$

Eötvös eredményei I. – Új mérési módszer



Az Eötvös-féle rexflexiós mérési eljárás vázlatrajza
(Eötvös, 1876; 1886 nyomán)

- A felületi feszültséget (α) sikerült tetszőleges időtartamon keresztül változatlanul tartania!
- A mértani reflexiós törvény segítségével két pontban meghatározta a folyadék szabad felszínének alakját; majd kiszámított a vizsgált folyadékra jellemző α értékét.

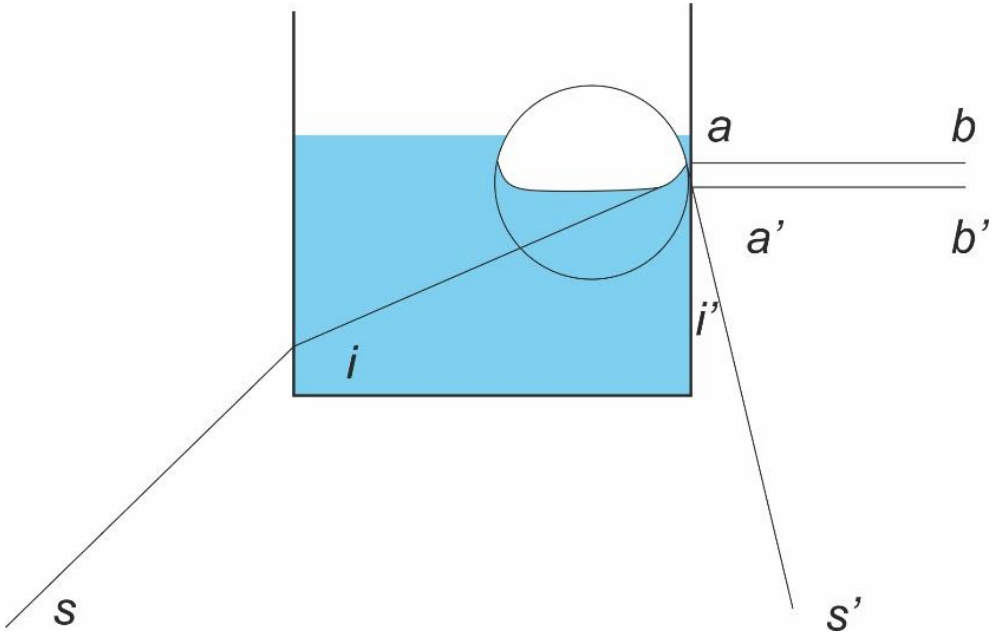
Laplace	2,55	Poisson	2,55
Hagen	2,62—2,68	Béde	2,66
Danger	2,59	Desains	2,62—2,65
	Quincke	2,861—2,941.	

Laplace, Hagen, stb. eredményi, más módszerekkel (Eötvös, 1876)

2,415	2,411	2,468
2,407	2,468	2,476
2,498	2,420	2,420
Középérték a = 2,442		

Eötvös eredményei az új mérési eljárással
(Eötvös, 1876)

Eötvös eredményei II. – α(T) hőmérsékletfüggése



A felületi feszültség hőmérsékletfüggésének vizsgálata

(Eötvös, 1884 nyomán)

- Eötvös egy 80 mm átmérőjű vékony csővel ellátott üveggolyót félig megtöltött desztillált vízzel, majd lezárt.
- Egy év leforgása alatt hat különböző időszakban, eltérő szögekkel végzett referencia-méréseket desztillált vízzel.

Hőmérsékletfüggő felületi feszültség

$$\alpha(T) = 7{,}617 - 0{,}0146 \cdot T - 0{,}000035 \cdot T^2$$

Brunner szerint:

$$a^2 = 15{,}3321 - 0{,}02864\, t$$

Frankenheim szerint:

$$a^2 = 15{,}336 - 0{,}02751\, t - 0{,}000035\, t^2$$

Wolff szerint:

$$f = 7{,}633 - 0{,}0136\, t - 0{,}000035\, t^2$$

„Más észlelők eredményei”

(Eötvös, 1884)

Eötvös eredményei III. – Eötvös-szabály

- Különböző anyagok felületi feszültségének összehasonlításánál figyelembe kell venni azok kritikus hőmérsékletét (T_{krit}), hogy törvényszerű összefüggést lehessen definiálni!

Egyesített gáztörvény

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} \quad \Rightarrow \quad \frac{\alpha_1 v_1^{2/3}}{T_1} = \frac{\alpha_2 v_2^{2/3}}{T_2}$$

Eötvös-szabály

$$\alpha \cdot v_m^{\frac{2}{3}} = E[T_{\text{krit}} - T]$$

(Eötvös, 1886a; 1886b)

Eötvös eredményei IV. – Eötvös-féle állandó

Egyetemes gáztörvény

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

Eötvös-szabály

$$\alpha \cdot v_m^{\frac{2}{3}} = E[T_{\text{krit}} - T]$$

Egyetemes gázállandó

$$R = \frac{p \cdot V}{n \cdot T} = 8{,}314 \ \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$$

?

Eötvös-féle állandó

$$E = \frac{d}{dT}\left(\alpha \cdot v_m^{\frac{2}{3}}\right)$$

Eötvös eredményei IV. – Eötvös-féle állandó

- Az Eötvös-féle állandó ($E \sim \alpha v_m^{2/3}$) **valamennyi egyszerűen összetett folyadékra valóban állandó** (pl. nitrogénre $2 \cdot 10^{-7}$ J/(mol$^{2/3}$·K))!

A vizsgált folyadékmolekula felületi energiaváltozása 1 K hőmérsékletkülönbség hatására!

Aethylaethan	6° C.-tól	62° C.-ig	$\frac{d}{dt}(\alpha v^{\frac{2}{3}})$	= 0,228
«	62° C. «	120° C. «	«	= 0,226
«	120° C. «	190° C. «	«	= 0,221
Aethylenbromid	20° C. «	99° C. «	«	= 0,227
«	99° C. «	213° C. «	«	= 0,232
Chloroform	20° C. «	60° C. «	«	= 0,230
Higanymethyl	20° C. «	99° C. «	«	= 0,228
Szénoxychlorid	3° C. «	63° C. «	«	= 0,231
Széndioxyd	3° C. «	31° C. «	«	= 0,228
Szénkéneg	22° C. «	78° C. «	«	= 0,237
Kénecssav	2° C. «	60° C. «	«	= 0,230

Különböző folyadékok felületi Eötvös-állandója (Eötvös, 1886b)

- **Azonban a víz, az alkoholok és a folyékony szénsavak esetén az Eötvös-féle állandó értéke változik a hőmérsékelt függvényében!**

„Ezeket tüzetesebb vizsgálatnak vetettem alá, viselkedésök elméleti okoskodás útján azon feltevés segélyével fejthető meg, hogy az illető testek a vizsgálat alá eső hőmérsékleti térben ***nem egyszerűen összetettek, azaz, hogy molekuláik folyós állapotban nem ugyanazon tömeggel bírnak, mint gőzállapotban****.” (Eötvös, 1886b)*

3° C.-tól	40° C.-ig	$\frac{d}{dt}(\alpha v^{\frac{2}{3}})$	= 0,159
40° C. «	100° C. «	«	= 0,180
100° C. «	150° C. «	«	= 0,228
150° C. «	210° C. «	«	= 0,227.

A vízre számított Eötvös-állandó értékei a hőmérséklet függvényében (Eötvös, 1886b)

Eredményei V. – Eötvös-szám

- A dimenziótlan **Eötvös-szám (*Eö*) a gravitációs erő és a felületi feszültség arányát** fejezi ki, ahol $\Delta\rho$ a két fázis közötti sűrűségkülönbség (a vizsgált csepp és a körülötte lévő folyadék sűrűségkülönbsége), g a gravitációs gyorsulás, L a csepp egy karakterisztikus mérete (pl.: görbületi sugara), α a felületi feszültség.
- Az Eötvös-szám (*Eö*) egyenértékű az ún. dimenziótlan Bond-számmal (*Bo*).

Eötvös-szám

$$E\ddot{o} = \frac{\Delta\rho \cdot g \cdot L^2}{\alpha} = \frac{\text{"gravitációs erő"}}{\text{"felületi feszültség"}}$$

Eötvös Loránd eredményei a kapillaritás-kutatásokban

- A **felületi feszültség állandó értéken tartása** tetszőleges *t* időtartamon keresztül
- A **reflexiós mérési módszer** kidolgozása
- A felületi feszültség **hőmérsékletfüggésének** vizsgálata
- Egy összefüggés levezetése folyadékokra az „egyesített gáztörvény” analógiája alapján (**Eötvös-szabály**)
- Az **Eötvös-féle hőmérsékletfüggetlen állandó** (E) bevezetése egyszerűen összetett folyadékok esetén
- Az Eötvös-féle állandó **hőmérsékletfüggésének vizsgálata** ($E(T)$) **víz**, **alkohol** és **folyékony** szénsavak esetén
- A dimenziótlan **Eötvös-szám** ($Eö$) bevezetése a **gravitációs erő** és a **felületi feszültség** összehasonlítására

Referenciák

- Budó, Á. (1992) Kísérleti fizika I. (Mechanika, Hangtan, Hőtan), *Tankönyvkiadó,* Budapest, p. 517
- **Eötvös, L. (1876) Új módszer a capillaritási tünemények tanulmányozására. *Műegyetemi Lapok*, 1(1), 2-10.**
- **Eötvös, L. (1884) A folyadékok felületi feszültségeinek összefüggése a kritikai hőmérséklettel. *Mathematikai és Természettudományi Értesítő*, 3(2-3), 54-73.**
- **Eötvös, L. (1886a) Über den Zusammenhang der Oberflachenspannung der Flüssigkeiten mit ihrem Molecularvolumen. *Annalen der Physik*, 263(3), 448-459.**
- **Eötvös, L. (1886b) A folyadékok feszültsége és vegyi alkata között fennálló kapcsolatról. *Mathematikai és Természettudományi Értesítő*, 4, 35-41.**

Eötvös Loránd eredményei a kapillaritás-kutatásokban

- A **felületi feszültség állandó értéken tartása** tetszőleges *t* időtartamon keresztül
- A **reflexiós mérési módszer** kidolgozása
- A felületi feszültség **hőmérsékletfüggésének** vizsgálata
- Egy összefüggés levezetése folyadékokra az „egyesített gáztörvény” analógiája alapján (**Eötvös-szabály**)
- Az **Eötvös-féle hőmérsékletfüggetlen állandó** (E) bevezetése egyszerűen összetett folyadékok esetén
- Az Eötvös-féle állandó **hőmérsékletfüggésének vizsgálata** ($E(T)$) **víz**, **alkohol** és **folyékony** szénsavak esetén
- A dimenziótlan **Eötvös-szám** ($Eö$) bevezetése a **gravitációs erő** és a **felületi feszültség** összehasonlítására

Köszönöm a megtisztelő figyelmet!