

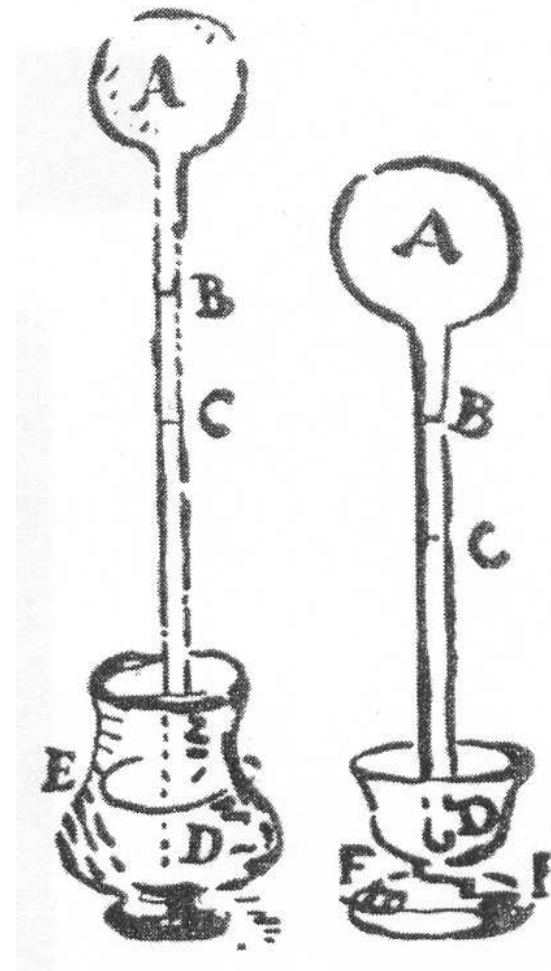
# A fizika története

A hőtan fejlődése



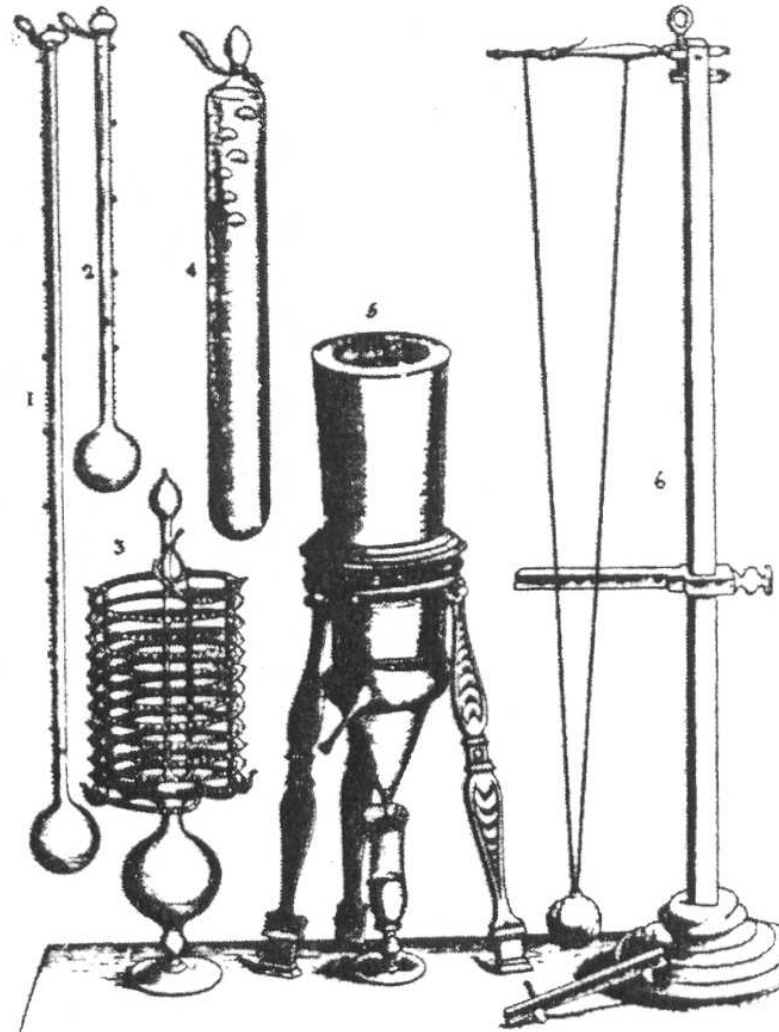
# Az első hőmérők

- LEONARDO DA VINCI már fölvetette a gondolatot
- GALILEI léghőmérője (1597): üveggömbhöz csatlakozó cső, a csőbeli vízcsepp elmozdulásából
- GUERICKE is készített léghőmérőt
- hátrányuk: légnyomásfüggők



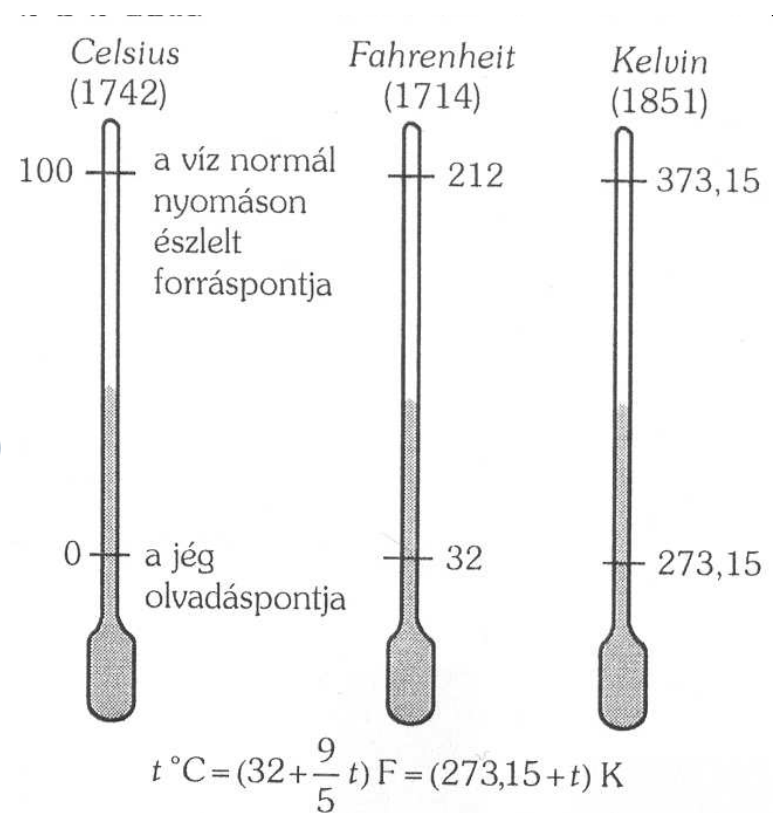
# Az első hőmérők

- első leforrasztott alkoholos hőmérő: II. FERDINÁND toszkán herceg
- sűrűségeen alapuló hőmérők: alkoholban úszó különböző sűrűségű üreges üveggömbök az alkohol sűrűségének változásával különböző hőmérsékleten süllyednek le



# Hőmérsékleti skálák

- FABRI: alappontok szükségessége
- RENALDINI: a víz olvadás- és forráspontját ajánlta (1694)
- FAHRENHEIT: az egyik alappont víz, jég és szalmiáksó keveréke, a másik alappont először az emberi test hőmérséklete, később a víz forráspontja (1714), köztük 212 osztás (1724)
- RÉAUMUR: a víz olvadás- és forráspontja között 80 osztás (1730)
- ANDERS CELSIUS (1701–1744): a víz olvadáspontja  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , forráspontja  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  (1742), később STROMER cserélte meg a két alappontot



# JOSEPH BLACK (1728–1799)

- korábban azt gondolták, hogy a hő a térben egyenletesen oszlik el (hőmérőt érintve egy légtérben levő testekhez azonos hőmérsékletet kaptak)
- BLACK: el kell különíteni a hő intenzitásának (*hőmérséklet*) és mennyiségének (*hőmennyiség*) fogalmát
- a hőt szubsztanciának gondolta
- bevezette a *fajhő* fogalmát (egységnyi tömegű anyag egységnyi hőmérséklet-változásához szükséges hőmennyiség)
- cáfolta azt a nézetet, hogy a fajhő a sűrűséggel arányos
- ezt érvként használta a kinetikus hőelmélettel szemben
- WILCKE-vel és DELUC-kel egyetemben fölfedezte a *látens hő* fogalmát: olvadáskor és forráskor a hőmennyiség elnyelése nem jár együtt hőmérséklet-változással
- ő maga nem adott ki könyvet, tanítványa, ROBISON jelentette meg BLACK előadásait 1803-ban

# A hőanyagelmélet

- a hő szubsztancia, egyfajta fluidum: *caloricum*
- a *caloricum* rugalmas folyadék
- a *caloricum* egyes részei egymást taszítják, ugyanakkor a közönséges (*ponderabilis*) anyag részeit vonzzák (cf FRANKLIN egyfolyadékos elektromosságelmélete)
- a *caloricum* nem semmisíthető meg és nem is teremthető (a hőanyag megmaradása)
- a „látens hő” magyarázata: a *caloricum* mintegy vegyületet képez a ponderabilis anyaggal
- megoszlottak a vélemények, hogy a *caloricum* súlytalan-e

# A hőanyagelmélet anomáliái: RUMFORD

BENJAMIN THOMPSON, azaz RUMFORD gróf (1753–1814)

---

- a hőszubsztancia súlyát akarta mérni a „látens hő” segítségével (ekkor nagy hőmennyiség nyelődik el vagy szabadul föl hőmérséklet-változás nélkül): nem tapasztalt súlyváltozást
- ügyelt a mérleg karjainak relatív hosszváltozására is
- megadta a mérési pontosságot is: a vizsgált test súlyának egymilliomod része
- a hőszubsztancia-elmélet magyarázata a súrlódással keletkező hőre: a súrlódástól az anyag hőkapacitása lecsökken, így a benne változatlanul megmaradó hőmennyiség magasabb hőmérsékletre emeli
- vizsgálta az ágyúcsövek kifűrésének hőviszonyait: a fűrészkor keletkező forgács fajhője nem változott; másrészt folyamatos dörzsöléssel *folyamatos* hőtermelést lehet fönntartani
- következtetés: a hő kapcsolatban van a mozgással



# Hőszubsztancia vs kinetikus hőelmélet

	hőáramlás	hőszugárzás	rejtett hő	súrlódási hő	kvantitatív tárgyalás
hőszubsztancia	✓	✓	✓	✗	✓
kinetikus elv	✓	✗	✗	✓	✗

- a kinetikus elmélet időrendben megelőzi a hőszubsztancia-elméletet
- a hőszubsztancia-elmélet magyarázata a súrlódáskori folyamatos hőfejlődésre: a környezet hőszubsztanciája áramlik a súrlódással gerjesztett testbe
- a hőszubsztancia-elmélet, bár mai szemmel zsákutca, lehetővé tette a kvantitatív tárgyalást, és olyan ma is használt fogalmak bevezetését, mint a *hőmennyiség* és a *fajhő*
- a kinetikus elmélet fejlődésének fő akadályja: a *statisztikus kezelés hiánya*
- a XIX. század elején a hőszubsztancia-elmélet uralkodott mint munkahipotézis

# Gáztörvények

- ROBERT BOYLE (1627–1691): kísérletek egyik végén zárt, U alakú csővel; tanítványa, TOWNLEY mondta ki, hogy a nyomás és a térfogat fordítottan arányosak
- BOYLE 1669-ben közölte; tőle függetlenül EDME MARIOTTE (1620?–1684) is fölfedezte 1679-ben
- GUILLAUME AMONTONS (1663–1705): a Boyle–Mariotte-törvény érvényességének föltétele az állandó hőmérséklet (1702)
- JOSEPH LOUIS GAY-LUSSAC (1778–1850): adott mennyiségű, állandó nyomású gáz térfogatának (I. törvény, 1802) és adott mennyiségű, állandó térfogatú gáz nyomásának hőmérsékletfüggése (II. törvény)
- BENOIT CLAPEYRON (1799–1864) egyesített gáztörvény
- JAN DIDERIK VAN DER WAALS (1837–1923): valódi gázok állapotegyenlete (1881)

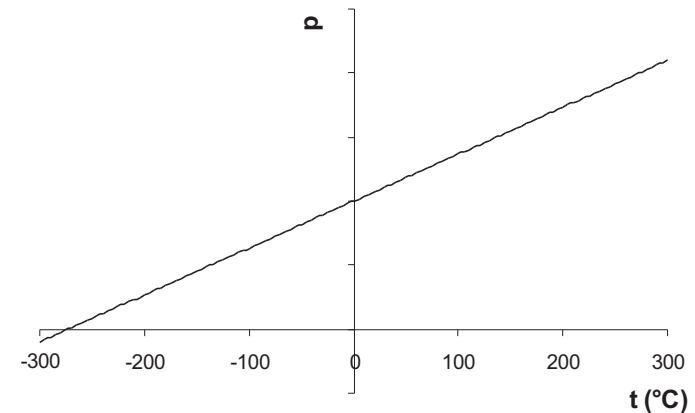
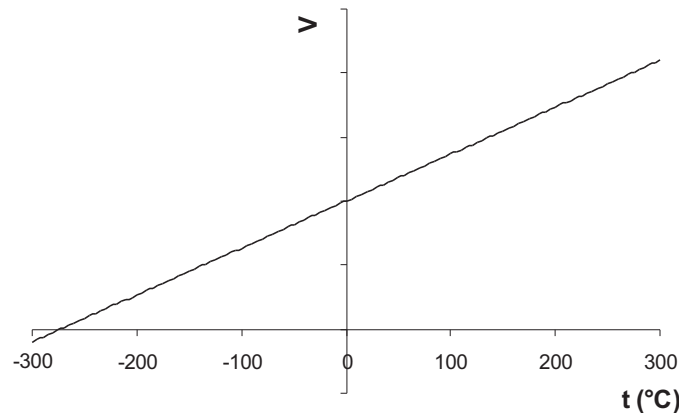
# Abszolút hőmérséklet (1848)

Gay-Lussac I. törvénye:  
állandó nyomáson

$$V = V_0(1 + \beta t) = V_0 + V_0\beta t$$

Gay-Lussac II. törvénye:  
állandó térfogaton

$$p = p_0(1 + \beta' t) = p_0 + p_0\beta' t$$



---

WILLIAM THOMSON (LORD KELVIN, 1824–1907)

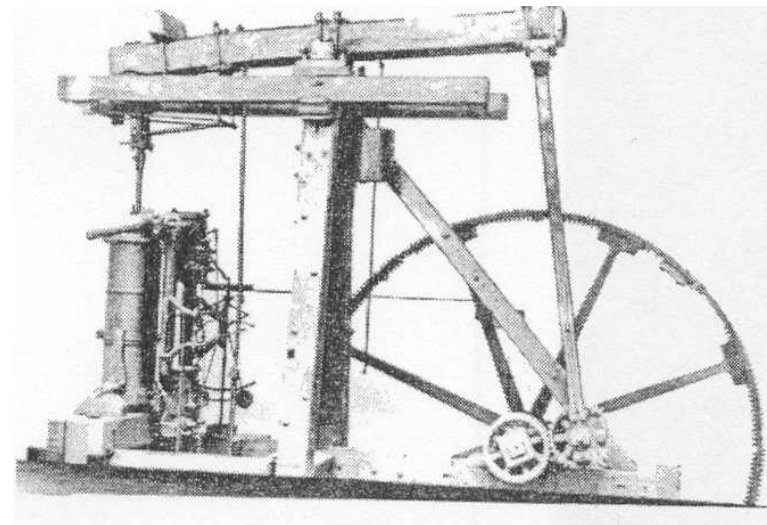
# A *caloricum* és az állapotegyenlet

PIERRE SIMON LAPLACE (1749–1827)

- alapfeltevés: az anyagrészeket körülvevő hőszubsztancia miatt az anyagrészek közötti taszítóerő lép föl
- $F = Hc^2\phi(r)$ , ahol  $H$  állandó,  $c$  a *caloricum* sűrűsége,  $\phi(r)$  pedig a távolsággal gyorsan csökkenő függvény
- ennek segítségével a nyomás:  $p = 2\pi HK\rho^2c^2$ , ahol  $K$  az egy anyagrészre ható erők eredője
- az anyagsűrűség és a *caloricum* sűrűsége egymástól nem független:  $\rho c^2 = \Pi(t)$ , ahol  $\Pi(t)$  csak a hőmérséklettől függ
- így  $p \propto \rho\Pi(t)$ , ami a Gay-Lussac törvénnyel azonos alakú, ha  $\Pi(t)$  maga a hőmérséklet
- LAPLACE ilyen elven vezette le az adiabatikus állapotváltozás  $pV^\kappa = \text{állandó}$  állapotegyenletét is

# Gőzgépek

- HÉRON gőzgépe
- HUYGENS ötlete alapján PAPIN készített XIV. Lajos szökőkútjához gőzgépet (1690, 1707)
- SAVERY: HÉRON gőzgépéhez hasonló szerkezet (1696)
- NEWCOMEN: a Huygens–Papin-féle gőzgépet fejlesztette tovább (1705-1706)
- POLZUNOV: kéthengeres, munkagépek hajtására is alkalmas gőzgép terve 1763-ban
- JAMES WATT (1736–1819): NEWCOMEN gépének tökéletesítője (1763-tól); az addig szakaszosan működő gépet folyamatos működésűvé tette (1782)
- FREVITHICK (1804) és STEPHENSON (1814): a gőzmozdony föltalálása



# Carnot-ciklus

SADI NICOLAS LEONARD CARNOT (1796–1832)

---

- a hőerőgépek működését, hatásfokát vizsgálta
- elképzelése: a vízerőgépek működésének analógiájára – a *hőszubsztancia* a magasabb hőmérsékletű helyről az alacsonyabb hőmérsékletűre jut, a lezúduló vízhez hasonlóan nem szenved átalakulást
- a gőzgép hatásfoka:

$$\eta = \frac{Q(T_1 - T_2)}{QT_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

- téves elképzelés: valójában a kilépő hőmennyiség a hőerőgépeknél kisebb a betáplált hőmennyiségnél  $\Rightarrow$  munkává alakul
- CARNOT már fölvetette a kinetikus hőelmélet lehetőségét és fölfedezhetők nála az energiamegmaradás csírái, de eredményeit a hőszubsztancia-elmélet alapján érte el

# A Fourier-sorfejtés

- Ha  $f(t)$  periodikus  $T$  periódusidővel, akkor  $f(t)$  fölírható az alábbi alakban:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} \left[ a_k \cos \left( k \frac{2\pi}{T} t \right) + b_k \sin \left( k \frac{2\pi}{T} t \right) \right],$$

ahol

$$a_k := \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos \left( k \frac{2\pi}{T} t \right) dt,$$

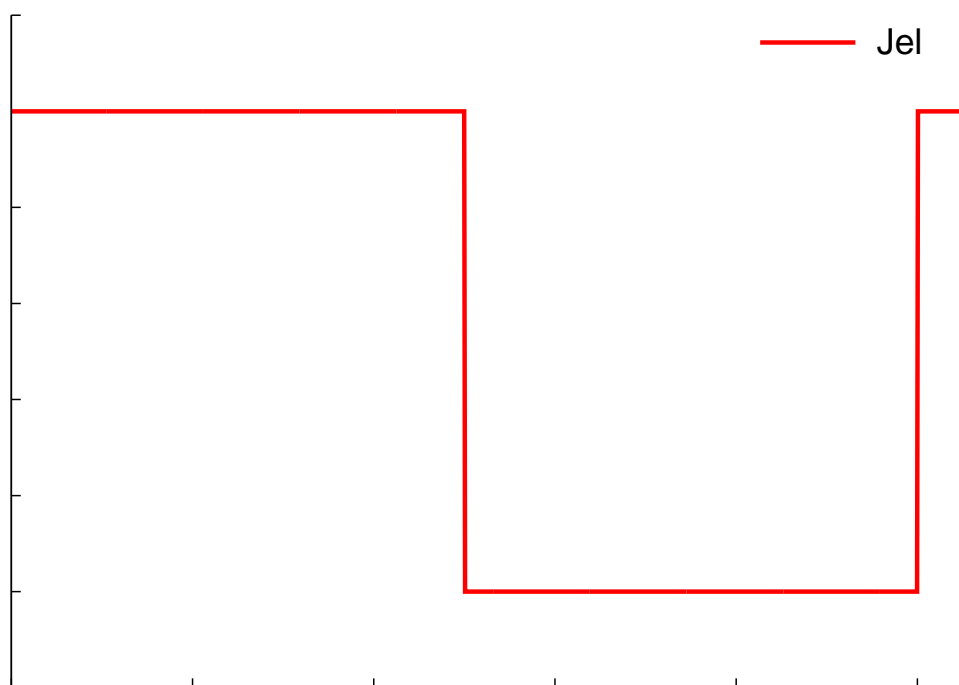
és

$$b_k := \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin \left( k \frac{2\pi}{T} t \right) dt.$$

# A Fourier-sorfejtés

- Az  $A$  amplitúdójú,  $A/2$  átlagértékű és  $T$  periódusidejű négyzögjel Fourier-sora

$$f(t) = \frac{A}{2} + \frac{2A}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{2n+1} \sin \left( [2n+1] \frac{2\pi}{T} t \right)$$

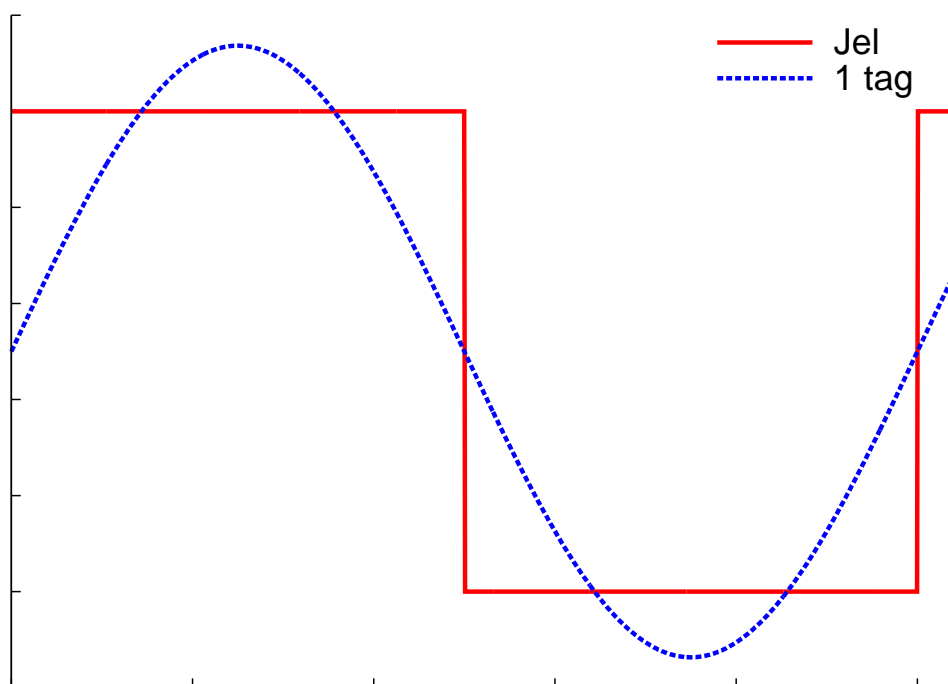




# A Fourier-sorfejtés

- Az  $A$  amplitúdójú,  $A/2$  átlagértékű és  $T$  periódusidejű négyzögjel Fourier-sora

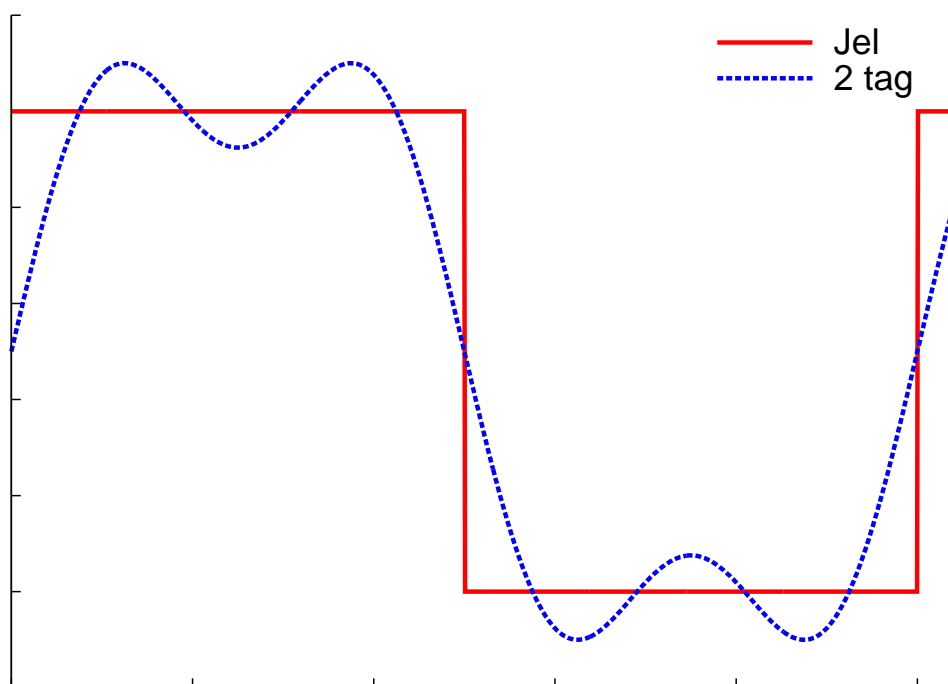
$$f(t) = \frac{A}{2} + \frac{2A}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{2n+1} \sin \left( [2n+1] \frac{2\pi}{T} t \right)$$



# A Fourier-sorfejtés

- Az  $A$  amplitúdójú,  $A/2$  átlagértékű és  $T$  periódusidejű négyzögjel Fourier-sora

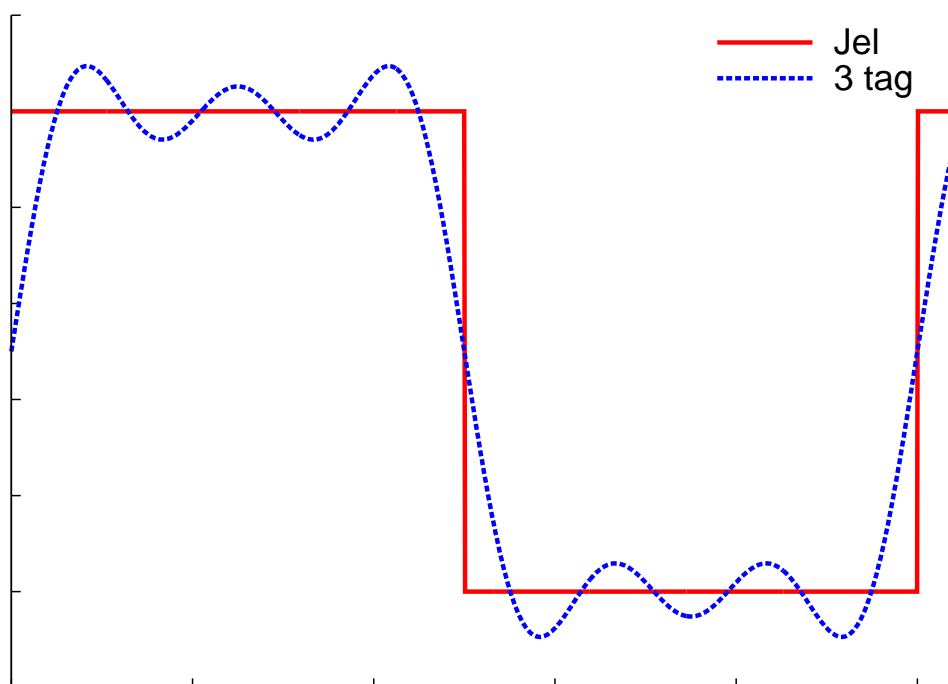
$$f(t) = \frac{A}{2} + \frac{2A}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{2n+1} \sin\left([2n+1] \frac{2\pi}{T} t\right)$$



# A Fourier-sorfejtés

- Az  $A$  amplitúdójú,  $A/2$  átlagértékű és  $T$  periódusidejű négyzögjel Fourier-sora

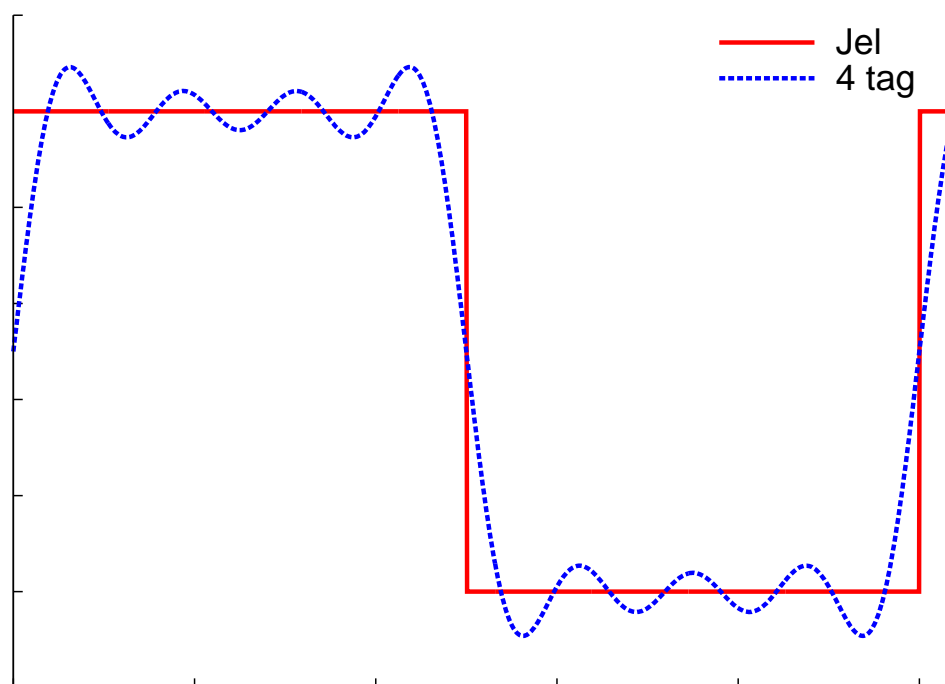
$$f(t) = \frac{A}{2} + \frac{2A}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{2n+1} \sin \left( [2n+1] \frac{2\pi}{T} t \right)$$



# A Fourier-sorfejtés

- Az  $A$  amplitúdójú,  $A/2$  átlagértékű és  $T$  periódusidejű négyszögjel Fourier-sora

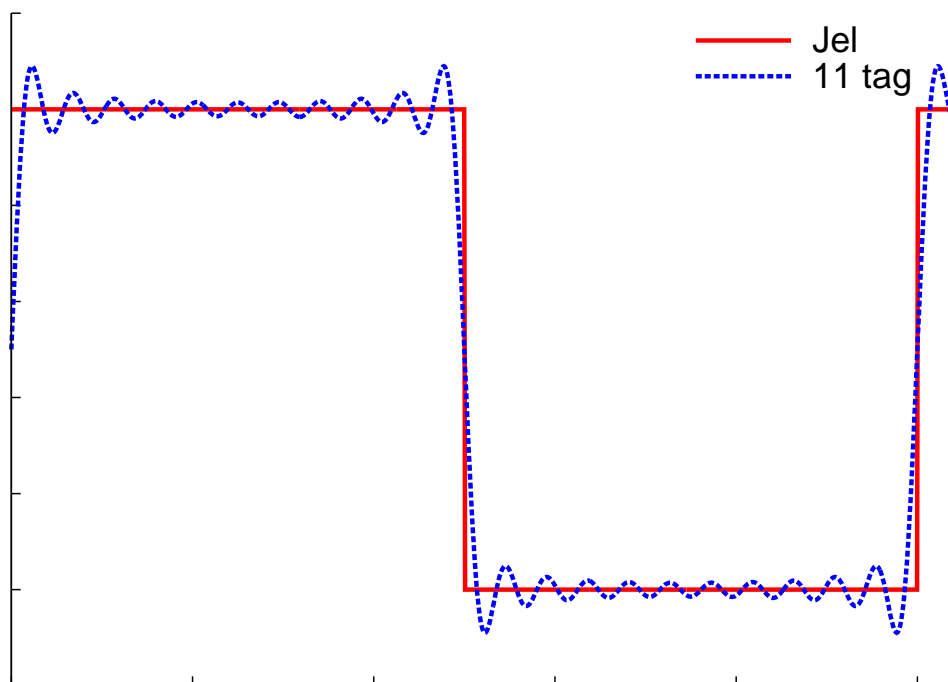
$$f(t) = \frac{A}{2} + \frac{2A}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{2n+1} \sin \left( [2n+1] \frac{2\pi}{T} t \right)$$



# A Fourier-sorfejtés

- Az  $A$  amplitúdójú,  $A/2$  átlagértékű és  $T$  periódusidejű négyzögjel Fourier-sora

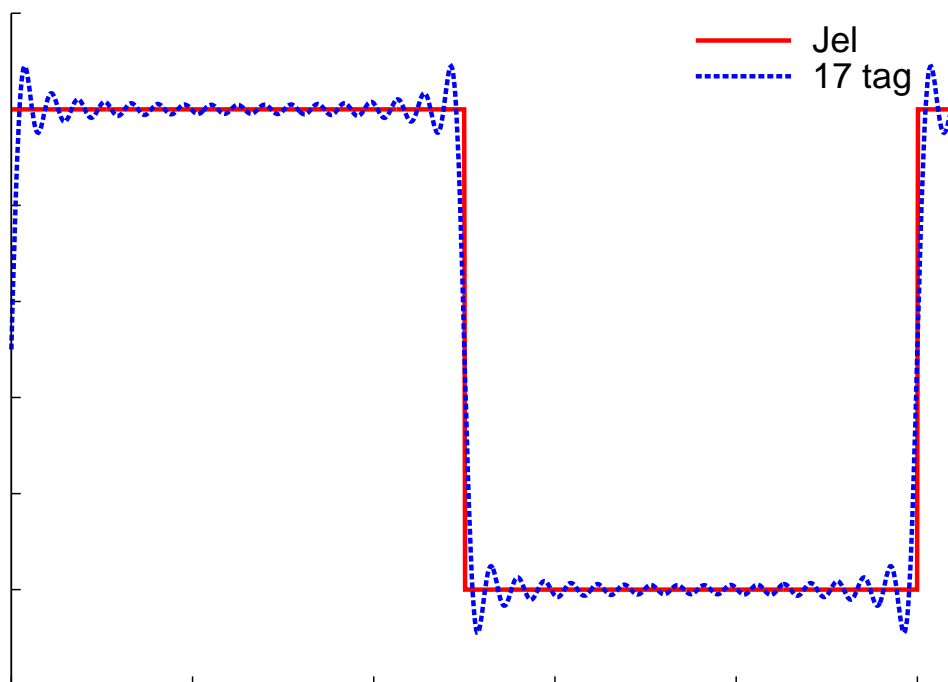
$$f(t) = \frac{A}{2} + \frac{2A}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{2n+1} \sin \left( [2n+1] \frac{2\pi}{T} t \right)$$



# A Fourier-sorfejtés

- Az  $A$  amplitúdójú,  $A/2$  átlagértékű és  $T$  periódusidejű négyzögjel Fourier-sora

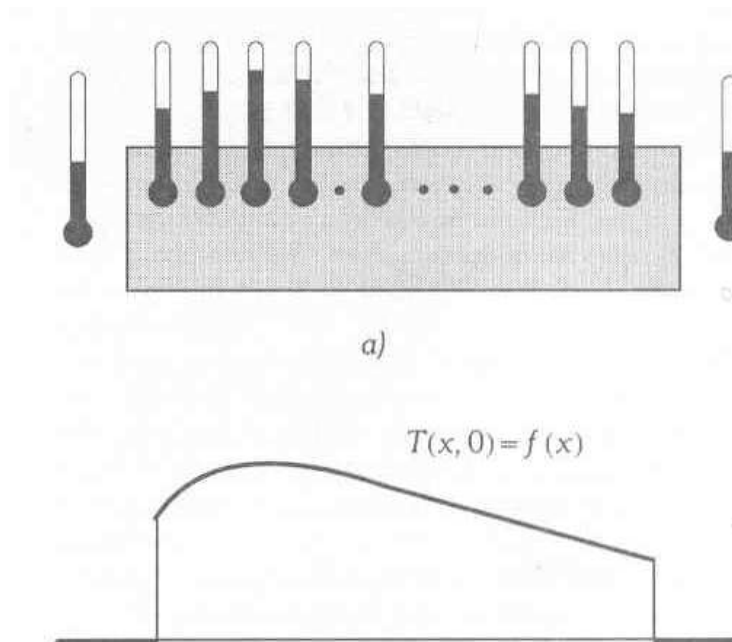
$$f(t) = \frac{A}{2} + \frac{2A}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{2n+1} \sin\left([2n+1] \frac{2\pi}{T} t\right)$$



# A Fourier-sorok eredete: a hővezetés

JOSEPH FOURIER (1768–1830)

- feladat: egy  $l$  hosszúságú rúdon adott egy kezdeti hőmérséklet-eloszlás ( $T(x, 0) = f(x)$ ), meg kell adni a hőmérséklet-eloszlás  $T(x, t)$  időfejlődését
- a rúd két vége hőtartályhoz van kötve, így hőmérsékletük rögzített, pl  $0^\circ\text{C}$



# A Fourier-sorok eredete: a hővezetés

- hőáramsűrűség: egységnyi felületen egységnyi idő alatt átáramló hő

$$J = \frac{d^2Q}{dqdt}$$

- a hőáramsűrűség a hőmérséklet-gradienssel arányos ( $\kappa$  a hővezetési állandó):

$$J = -\kappa \frac{\partial T}{\partial x}$$

- a rúd egy kis darabjának hőtartalma annyival változik, amennyi a két határoló lapon átáramló hő különbsége, ebből

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{\rho c}{\kappa} \frac{\partial T}{\partial t} = k^2 \frac{\partial T}{\partial t}$$



# A Fourier-sorok eredete: a hővezetés

- a megoldás keresése szeparációs módszerrel:

$$T(x, t) = \Phi(x)\Psi(t)$$

- a megoldás

$$T(x, t) = \sum_{\nu} c_{\nu} e^{-\left(\frac{\pi\nu}{kl}\right)^2 t} \sin \frac{\nu\pi x}{l}$$

- ebből a kezdeti föltétel

$$T(x, 0) = f(x) = \sum_{\nu=1}^{\infty} c_{\nu} \sin \frac{\nu\pi x}{l}$$

- azaz akkor van megoldás, ha  $f(x)$  szinuszok összegére bontható

# A kinetikus hőelmélet előképei

- FRANCIS BACON (1561–1626) az angol empirista filozófia atyja; „plusz-mínusz táblázatának” a hőre való alkalmazásával arra jutott, hogy a hő szoros kapcsolatban van a mozgással

+	köztes	-
napsugár	<i>az állati hő nő</i>	holdfény
tűz	-erőlködés	víz
hőforrás	-láz	hideg szél
dörzsölés	-alkoholfogyasztás	pince nyáron
mészoltás	<i>által</i>	

- a kinetikus elmélet az uralkodó fölfogás a XVII. században
- JACOB HERMANN (1678–1733): különösebb indoklás nélkül megállapítja, hogy a hő a test sűrűségével és a mozgás négyzetével arányos (1716)

# A kinetikus hőelmélet kezdetei

- LEONHARD EULER (1707–1783): az átlagos részecskesebesség számszerű értéke
- DANIEL BERNOULLI (1700–1782)
  - ◆ egyenes vonalban ide-oda száguldó részecskék ütközésével magyarázza a nyomást
  - ◆ a maihoz nagyon hasonló gondolatmenettel jut el a  $p \propto mv^2$  összefüggéshez 1738-ban
  - ◆ szabálytalan, különböző alakú részecskék
- JOHN HERAPATH (1790–1868): föleleveníti BERNOULLI elméletét, de hibásan – nála a hőmérséklet a részecskék *impulzusával* van kapcsolatban
- JOHN JAMES WATERSTON (1811–1883): a mai elképzelésekhez igen közel álló elmélet
  - ◆ az ekvipartíció speciális esete: hőmérsékleti egyensúlyban lévő két gáz minden atomjának közepes mozgási energiája azonos ( $\Rightarrow$  válasz BLACK-nek, miért nem arányos a fajhő a sűrűséggel)
  - ◆ dolgozatát visszadobták, ostobaságnak minősítették; csak LORD RAYLEIGH fedezi föl a Royal Society irattárában és közli 1891-ben

# Az energiamegmaradás törvénye

JULIUS ROBERT MAYER (1814–1878)

---

- hajóorvos; a vér színének megfigyelése: a trópusokon vörösebb, mint északabbra  $\Rightarrow$  alacsonyabb szintű oxidációs folyamatok zajlanak le, mert az életműködésekhez szükséges hő egy részét a környezetből veszik föl
- eredményeit 1842-ben közli
- a romantikus természetfilozófia hatása: fő elve a „*causa equat effectum*” (az ok egyenlő az okozattal)
- fölvetés: milyen magasról kell ejteni egy testet, hogy „esési ereje” egyenlő legyen az azonos súlyú víz 1 °C-os hőmérséklet-növeléséhez szükséges hővel
- megfontolások: a leeső test „a Föld ösztérfogatót csökkenti”, és ez a gázok összenyomásával analóg módon hőfejlődéssel jár

# Az energiamegmaradás törvénye

- JAMES PRESCOTT JOULE (1818–1889)
  - ◆ 1841: az áram hőhatására vonatkozó törvény ( $Q \propto I^2 R t$ )
  - ◆ 1845: az energiamegmaradás tételével kapcsolatos munkája – „a hő mechanikai egyenértéke”
  - ◆ a mérés elve: egy meghatározott súlyú test potenciális energiáját lapátos folyadékkeverőben alakítja hővé
  - ◆ a mérés először nem vezetett a ma elfogadott eredményekre, de módszerét egyre finomította
  
- HERMANN VON HELMHOLTZ (1821–1894)
  - ◆ ő is a romantikus természetfilozófia hatása alatt állt
  - ◆ ő fogalmazta meg az energiamegmaradás elvét a mai fölfogáshoz legközelebb álló formában 1847-ben

# A kinetikus hőelmélet újrakezdése

- JOULE: 1851-ben, HERAPATH-ra hivatkozva megkísérli kiszámítani a hidrogénmolekula sebességét és az állandó térfogaton mért fajhőt
- AUGUST KARL KÖNIG (1822–1879): 1856-ban megjelent cikke nem tartalmaz újat, de tekintélye hozzájárul a kinetikus gázelmélet elfogadtatásához
- RUDOLF CLAUSIUS (1822–1888)
  - ◆ kinetikus elméletből vezeti le az ideális gázok állapotegyenletét
  - ◆ a nyomás a molekulák transzlációs mozgásával van kapcsolatban, a belső energiába azonban más mozgásformák (pl rezgés, forgás) is beleszámítanak
- JAMES CLERK MAXWELL (1831–1879)
  - ◆ sebességeloszlási formula olyan rugalmas részecskékre, amelyek csak ütközésen keresztül hatnak egymásra (1860)
  - ◆ az ekvipartíció elve: a gázrészecskének minden szabadsági fokára azonos energia jut
  - ◆ az állandó nyomáson és térfogaton vett fajhő hányadosa

# A termodinamika II. főtétele

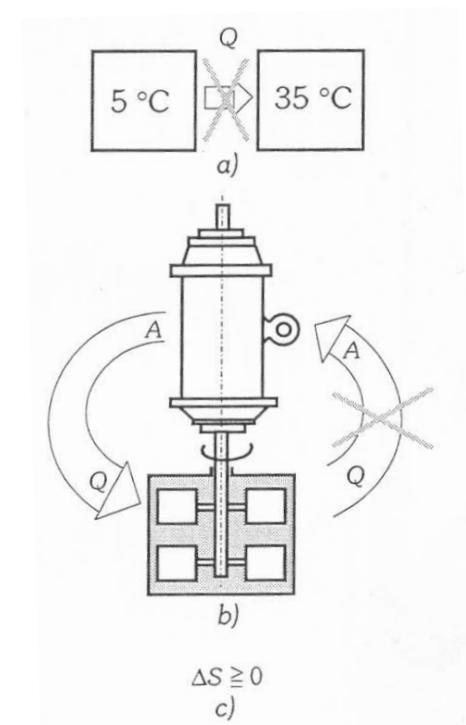
- Az I. főtétele: az energiamegmaradás tétele ( $\Delta U = Q + W$ )
- CLAUSIUS: hidegebb testről nem áramolhat hő egy melegebb testre; az *entrópia* bevezetése

$$S_B - S_A := \int_A^B \frac{1}{T} dQ$$

- a II. főtétele: zárt rendszer entrópiája csak növekedhet
- III. főtétele, WALTHER NERNST (1864–1941) és MAX PLANCK (1858–1947): zárt rendszerre

$$\lim_{T \rightarrow 0} S = 0$$

- „a világegyetem hőhalála”: a maximális entrópiájú állapot, megszűnik minden élet lehetősége (hibás gondolat: a II. főtétele véges zárt rendszerre vonatkozik)



# A Maxwell-démon

- MAXWELL gondolkísérlete: a démon szelektál a részecskék között – a kisebb sebességűeket csak az egyik térrészbe, a nagyobb sebességűeket csak a másik térrészbe engedi át  $\Rightarrow$  entrópiacsökkenés



- SZILÁRD LEÓ: a Maxwell-démonnak az információfeldolgozáshoz, az ablaknyitogatáshoz, &c energiát kell fölhasználnia  $\Rightarrow$  nem zárt rendszer



# Entrópia és valószínűség

- megoldatlan feladat: a II. főtétele magyarázata gázkinetikai elvekkel
- megoldási kísérletek: igen erőltetett föltevésekkel, pl mindegyik atom zárt pályán mozog azonos periódusidővel  $\Rightarrow$  a második főtétele értelmezése tisztán mechanikai elvek alapján nem lehetséges
- LUDWIG EDUARD BOLTZMANN (1844–1906): a részecskék eloszlása a  $(q_1, q_2, \dots, q_f; p_1, p_2, \dots, p_f)$  koordinátákkal jellemzett fázistérben ( $f$ : szabadsági fokok száma,  $q$  helyzetet jellemző koordináta,  $p$  impulzus)
  - ◆ *Mikroállapot*: megadjuk minden részecskéhez azt a cellát, amelyet a fázistérben elfoglal
  - ◆ *Makroállapot*: a makroszkopikus mérésekkel detektálható állapot; a részecskék fázistérbeli eloszlása határozza meg
  - ◆ *Termodinamikai valószínűség*: az adott makroállapotot megvalósító mikroállapotok száma:  $W = \frac{N!}{N_1!N_2!\dots N_n!}$  ( $N$ : összrészecskeszám;  $N_i$ : a fázistér  $i$ -edik cellájában lévő részecskék száma)

# Entrópia és valószínűség

- ha a fázistér minden cellájához ugyanaz az energiaérték tartozik,  $W$  az  $N_1 = N_2 = \dots = N_n$  esetben veszi föl
- ha a fázistér  $i$ -edik cellájához  $E_i$  energia tartozik, az összenergia pedig  $E_0$ , a termodinamikai valószínűség maximumát az  $E_0 = \sum_i N_i E_i$  föltétel mellett kell keresni (kötött szélsőérték)
- a legnagyobb valószínűséghez tartozó eloszlás (Boltzmann-eloszlás):

$$N_i = A e^{-\frac{E_i}{kT}}$$

- termodinamikai valószínűség  $\Rightarrow$  entrópia: a jelenségek lefolyásának irányt szabó mennyiség
- független gázok: az entrópia additív ( $S = S_1 + S_2$ ), az együttes termodinamikai valószínűség az egyedi valószínűségek szorzata  $\Rightarrow S = k \ln W$

# A hőszugárzás

- ARKHIMÉDÉSZ homorú tükrei
- MARIOTTE homorú gömbtükrével lőport gyújtott meg
- MALUS (1775–1812): a hő a fény egyik összetevője
- SCHEELE: a hőszugarak a fényel megegyező visszaverődési törvényt követnek (1782)
- LAMBERT: világító és sötét hőszugarak megkülönböztetése
- PICTET: közös optikai tengelyű homorú tükröt állított szembe egymással, az egyik fókuszpontjába helyezett parázs a másik tükör fókuszpontjába helyezett papírt meggyújtotta
- HERSCHEL: a hőszugarak törési törvénye azonos a fényszugarakéval; az infravörös szugarak fölfedezése (1800)
- KIRCHHOFF: feketetest-sugárzás; Stefan–Boltzmann-törvény, Wien-féle eltolódási törvény ⇒  
KVANTUMMECHANIKA

# Fölhasznált irodalom

- SIMONYI KÁROLY: *A fizika kultúrtörténete*. Budapest, 1998, Akadémiai Kiadó
- GAZDA ISTVÁN – SAIN MÁRTON: *Fizikatörténeti ABC*. Budapest, 1989, Tankönyvkiadó
- BUDÓ ÁGOSTON: *Kísérleti fizika 1*. Budapest, 1994, Tankönyvkiadó