

szen közel (FK környékére) hűtenének, majd – az egyik pozitront eltávolítva – mérnék a gravitációs süllyedését. A GBAR együttműködés hasonló az AEGIS-hez, és a kísérlet eredménye jól kiegészítené az AEGIS eredményeit.

AMS-02

Az AMS (Alpha Magnetic Spectrometer, alfa mágneses spektrométer) kísérlet a Nemzetközi Űrállomás egyik berendezése (23. ábra). Részecske-detektor a világűrben, amely antianyagra és sötét anyagra vadászik. A CERN-ben készítették *Samuel Ting* (Nobel-díj, 1976) amerikai fizikus vezetésével és az egyik utolsó űrsiklóval sikerült feljuttatni és üzembe helyezni. A kísérlet megerősítette az antianyag hiányát a Világ-egyetemen: nem lát antihélium-atomokat. A vártnál sokkal több pozitront észlel ugyan, de azok jöhetnek közösleges csillagászati folyamatokból is.

Végszó

Nem várhatunk különbséget anyag és antianyag között, az eddigi adatok szerint semmilyen tulajdonságuk sem különbözik, gravitációjuk sem. Az antianyag nem esik felfelé és a repülő csészéaljakat is inkább a gazdag emberi képzelet tartja a levegőben, mint az antigravitáció.

Irodalom

1. M. Charlton, J. Eades, D. Horváth, R. J. Hughes, C. Zimmermann: Antihydrogen physics. *Physics Reports* 241 (1994) 65–117.
2. M. Hori, A. Sótér, D. Barna, A. Dax, R. S. Hayano, S. Friedreich, B. Juhász, T. Pask, E. Widmann, D. Horváth, L. Venturelli, N. Zurlo: Two-photon laser spectroscopy of pbar-He and the antiproton-to-electron mass ratio. *Nature* 475 (2011) 484–488.
3. M. Hori, H. Aghai-Khozani, A. Sótér, D. Barna, A. Dax, R. Hayano, T. Kobayashi, Y. Murakami, K. Todoroki, H. Yamada, D. Horváth, L. Venturelli: Buffer-gas cooling of antiprotonic helium to 1.5 to 1.7 K, and antiproton-to-electron mass ratio. *Science* 354 (2016) No. 6312, 610.

SZAPPANHÁRTYÁK ÉS -BUBORÉKOK TUDOMÁNYTÖRTÉNETE

Rajkovits Zsuzsanna
ELTE, Anyagfizikai Tanszék

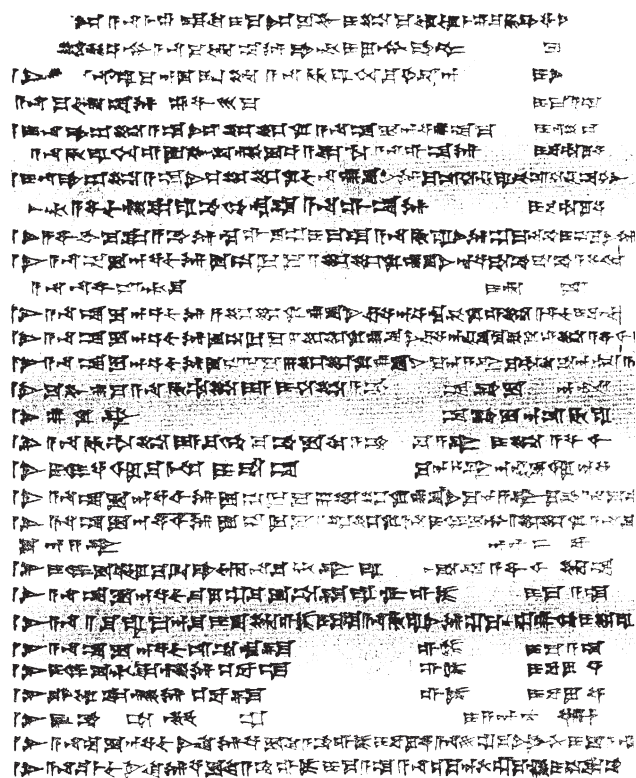
Egyes rovarok úgy sétálnak a tavak felszínén, mint az emberek az utcán. A kicsi gyerekek szappanos vizet kérnek, ha buborékot akarnak fújni. Ha egy füstös helyiségben tartózkodunk, ruhánk, hajunk onnan kijöve is tanúskodik ottlétünkéről. Gyomorrontás esetén az orvos széntablettát ír fel, amely segít a bajunkon. Mi a közös ezen jelenségekben?

A folyadékok, a szilárd anyagok felülete a belsejükhöz viszonyítva másképpen viselkedik. A felület eltérő tulajdonsága főleg abban az esetben válik szembe-tűnővé, ha nagy fajlagos felületű anyagokat, azaz kevés anyagból nagy felületet tudunk előállítani. A szappanhárták és -buborékok is nagy fajlagos felületű képződmények.

Tudománytörténetük ezért összefonódik a felületi feszültségről alkotott képünk változásának, fejlődésének történetével. A felületi jelenségekért az anyag molekulái közötti kölcsönhatások felelősek, így e témakör a kölcsönhatások jellegének, eredetének felderítésével is kiegészül.

Érdekes végigkövetni, hogy a történelem folyamán miként figyeltek fel ezekre a jelenségekre, és milyen magyarázatokat találtak rájuk.

1. ábra. A szappanhárták legrégebbi írásos emléke.



Rajkovits Zsuzsanna PhD, ny. egyetemi docens. Az ELTE kémia-fizika szakán végzett, ahol az Anyagfizikai Tanszék *fémfizikai kutatásaiban* vett részt. Az *oktatáskutatásba* a tehetség gondozás új módszereinek bevezetésével, új típusú tanulmányi versenyekkel kapcsolódott be. 1994-ben *nemzetközi versenyt alapított* (ICYS), amelynek azóta is elnöke. Általános és középiskolásoknak írt újszerű fizika tankönyvek társszerzője, interdiszciplináris szemléletű internetes gyűjtemény összeállítója.



2. ábra. Leonardo da Vinci (1452–1519)

A jelenségeket kutató tudósok *fizikusok, kémikusok, biológusok és matematikusok* mindegyike megtalálta e jelenségkörben a számára érdekeset. Volt olyan tudós, aki csak a jelenségeket figyelte meg, és lejegyezte a tapasztaltakat, de volt, aki kísérleteket végzett. Volt olyan tudós, aki azon gondolkodott, mi lehet a társai által megfigyelt sajátságok oka, és magyarázatot is talált rájuk. A teljesség igénye nélkül álljon itt néhány tudós neve, akik az e témakörbe tartozó problémák megoldásához időszámítás előtt 3000-tól kezdődően napjainkig hozzájárultak.

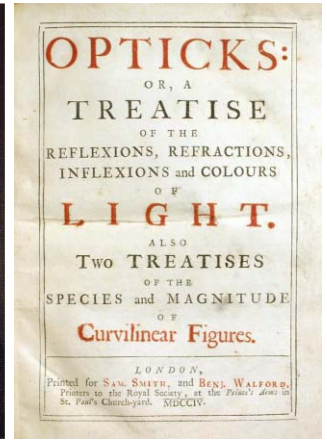
Az első írásos emlék a szappanhártyákról i.e. 3000-ból, Babilonból való, amelyet ékírással rögzítettek. A másolatot a British Museumban őrzik (1. ábra).

Leonardo da Vinci (2. ábra), a reneszánsz nagy egyéniségeinek „legnagyobbika” valószínűleg a közlekededények működésének tanulmányozása közben vette észre, és le is jegyezte, hogy a nagyon vékony belső átmérőjű csövekben a folyadékszint a csövet körülvevő vízszintnél magasabban áll.

Isaac Newton (3. ábra) említést tett kohéziós és adhéziós erőkről, és kapcsolatba hozta azokat a kapilláris hatással. A fény „sűrűbb” közegben megtett útját elemelve becslést adott a folyadék részecskéi között működő vonzóerőkre, és azok kölcsönös vonzásával magyarázta a folyadék belsejében uralkodó nagyobb nyomást.

Megfigyelte a vékony szappanhártyákon megjelenő *színeket és fekete foltokat* (4. ábra) sőt a nagyobb

5. ábra. Robert Hooke (1635–1703)



3. ábra. Sir Isaac Newton (1642–1727)



4. ábra. A Newton által is megfigyelt, vékony szappanhártyán megjelenő színek és fekete foltok.

kiterjedésű fekete tartományokat, a *Newton-féle fekete hárttyákat*.

A színek kialakulására azonban nem adott magyarázatot. A vékonyréteg-interferencia korrekt matematikai leírását, az optikailag sűrűbb közegről történő fényvisszaverődéskor fellépő π fázisugrás felismerésével *Thomas Young* végezte el.

Robert Hooke (5. ábra) a szappanhártyákon kialakuló színeket és fekete foltokat fényinterferencia eredményeként magyarázta.

Francis Hauksbee (Hawksbee-ként is ismert) (6. ábra), aki Newton mechanikusa és munkatársa volt, a

6. ábra. Francis Hauksbee (1666–1713)





7. ábra. Segner János András (1704–1777)

légszivattyúk és barométerek nagy szakértője, a kapilláris emelkedés okainak vizsgálatára szisztematikus kísérletet végzett (1709). Eltérő falvastagságú, de különböző belső átmérőjű üvegsövekben tanulmányozta a folyadék magasságát, és megállapította, hogy a jelenség oka a folyadék és az üveg egymásra hatása.

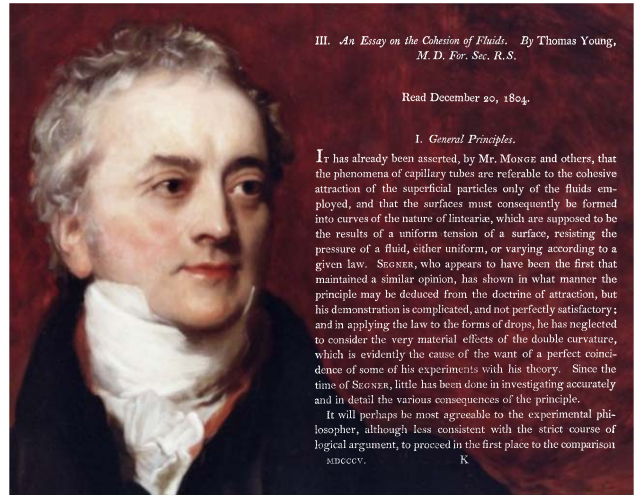
Segner János András (7. ábra) a Hauksbee által említett folyadék-üveg kölcsönhatást összekapcsolta a kohéziós, adhéziós erőkkel (1751). Azt gondolta, hogy a folyadék belsejében a kohéziós erők miatt fellépő nagyobb nyomással a megfeszített héjhoz hasonló felületben ébredő feszültség tart egyensúlyt. Tőle származik a *felületi feszültség* elnevezés.

Thomas Young (8. ábra) a *Cohesion of Fluids* című munkájában (1805) elemezte az anyag részecskéi között működő hatást, és megállapította, hogy amíg a vonzás a részecskék távolságát „kicsit” változtatva nem változik számottevően, addig a taszítás, csökkentve a részecskék között lévő távolságot, rohamosan nő. Segner elméletét továbbfejlesztve megmutatta, hogy a görbült felületeknél fellépő görbületi nyomás a főgörbületi sugarakkal a

$$\Delta p \approx \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

módon arányos. Kiemelte, hogy az arányossági tényező

9. ábra. Carl Friedrich Gauss (1777–1855) balra és Pierre Simon Laplace (1749–1827) jobbra.



8. ábra. Thomas Young (1773–1829)

zö éppen a Segner-féle σ felületi feszültség. Bevezette az illeszkedési szög (vagy peremszög) fogalmát, a

$$\sigma_{sg} - \sigma_{sf} = \sigma_{gs} \cos \Theta$$

erőegyensúly alapján, mert szerinte a levegővel érintkező folyadék és a szilárd anyagok bármely kombinációjához létezik egy alkalmas Θ érintkezési szög, amelyet

$$\cos \Theta = \frac{\sigma_{sg} - \sigma_{sf}}{\sigma_{gf}}$$

módon definiált. Megemlítette, hogy e szög nagysága a víz és az üveg érintkezésekor elenyészően kicsi. Egyebek között megbecsülte egy molekula nagyságát is.

Pierre Simon Laplace (9. ábra, jobbra) és Young egymástól függetlenül állapították meg, hogy a görbült folyadékfelszínben a feszítőerők eredője nyomóerőt eredményez, a görbületi nyomásra vonatkozó

$$\Delta p = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

Laplace–Young-egyenletnek megfelelően (1806). Laplace azonban sohasem tett említést Young eredményéről, amiért Young élete végéig neheztelt rá.

10. ábra. Siméon Denis Poisson (1781–1840)





11. ábra. Joseph Antoine Ferdinand Plateau (1801–1883), dagerotípiá

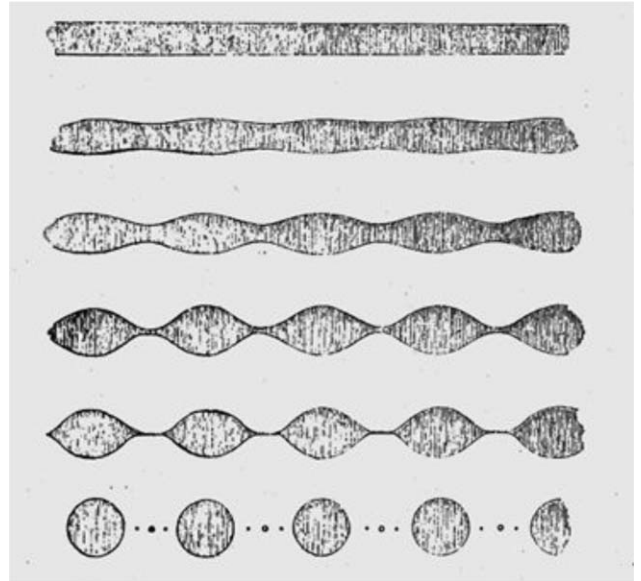
Carl Friedrich Gauss (9. ábra, balra) energetikai megfontolásokkal jutott el a Laplace–Young-egyenlethez. Bevezette a fajlagos felületi energia fogalmát, mint a felületi feszültség egy másik értelmezését.

Siméon Denis Poisson (10. ábra) bírálta Laplace-t, mert számításaiban figyelmen kívül hagyta a folyadék levegővel érintkező felszínéhez közeli vékony rétegében jelenlévő sűrűségváltozást. Számításaiban – figyelembe véve a folyadék belseje felől a felszínre átlépve a sűrűség csökkenését is – a görbületi nyomásra a korábbi egyenletekhez hasonló egyenletek adódtak.

Joseph Antoine Ferdinand Plateau (11. ábra) tanulmányozta a szappanhártyák és buborékok geometriáját (12. ábra). Elsőként mutatta meg a háromdimenziós drótkeretekre (13. ábra) feszített szappanhártyák által kirajzolt minimálfelületeket. Több folyadékhártya találkozását vizsgálva, megállapította az egyensúlyi szappanhártyák geometriáját szabályozó elveket. Észrevette, hogy egyensúlyban lévő három hártya 120 fokos szögben, négy hártya pedig 109 fok 28 perces szögben találkozik (Plateau-szabályok). A hártyákban lévő folyadék nagy része ilyen határtalálkozásoknál az úgynevezett Plateau-határban található. A Plateau-határ alakja a folyadék felől nézve domború felszín. A görbült határszakaszon a nyomás kisebb annál, amely a síkfelület mentén a hártyában uralkodik. Az így előálló nyomáskülönbség a vizet a



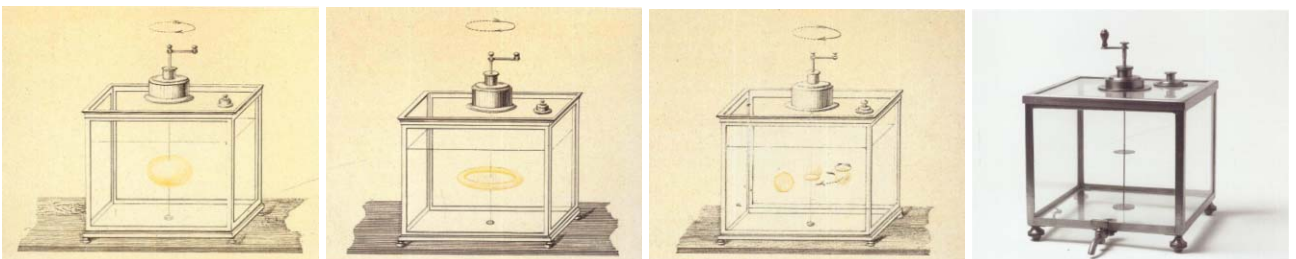
13. ábra. Plateau keretei

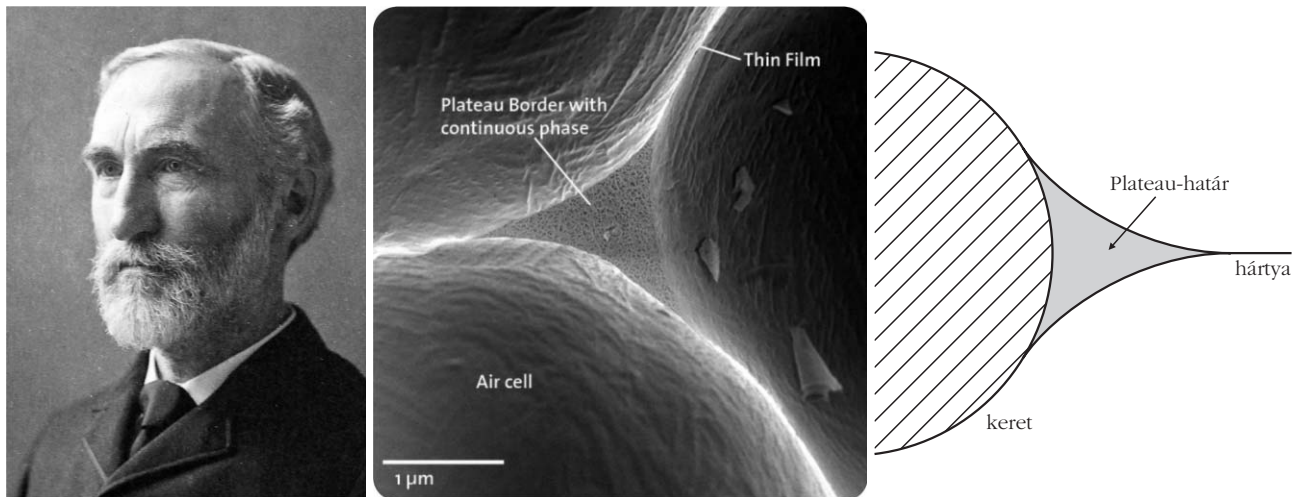


14. ábra. Folyadékszálak alakja, „gyöngyösödés”. (<http://www.mhsgent.ugent.be/eng-plat1.html>)

sík hártyából a határtalálkozásokba „szívja”. A frissen készített vizes hab geometriája a fent említett szabályozóelveknek megfelelően az idő múlásával, a hártyák öregedése során változik. A folyadékszálakon terjedő zavarok hatásával is foglalkozott. A zavar hatására a folyadékszál alakja a zavar mértékétől, hul-

12. ábra. Plateau-kísérlet





15. ábra. Balra Josiah Willard Gibbs (1839–1903), míg jobbra a Gibbs-gyűrű és a Plateau-határ.

lámhosszától függően minimálfelületté formálódik, emiatt a szál vagy megtartja hengeres alakját, vagy cseppek képződnek rajta (14. ábra). Megállapította, hogy a felületek megfigyelt tulajdonságait a molekuláris erőknek a folyadékok felületén és belsejében észlelt különbözősége eredményezi. Erre vonatkozó kísérleti és elméleti megfontolásait az *Experimental and Theoretical Investigation of the Equilibrium Properties of Liquids Resulting from Their Molecular Forces* című könyvében foglalja össze, amely azóta is az e témakörrel foglalkozók alapvető irodalma. Plateau egy optikai kísérlet kapcsán a Napba nézett, és negyven éves korára megvakult. Csak ezután kezdett el a szappanhártyák geometriájával foglalkozni. A minimálfelületekkel kapcsolatos kísérleteket – irányításával – helyette családtagjai és munkatársai végezték el.

Josiah Willard Gibbs (15. ábra, balra) szerint: „A szappanhártyák a metastabil egyensúlyi állapot legszébb példái.” Elméleti fizikus lévén – a szappanhártyákkal kapcsolatos vizsgálódásait kivéve – soha nem kísérletezett. Foglalkozott a felületkialakulás energiájának a folyadék intenzív paramétereivel való kapcsolatával. Megtalálta egyebek között a kapcsolatot a felületaktív anyagok híg oldatának felületi feszültsége és a határfelületben felhalmozódott anyag felületi koncentrációja között, a

$$\Gamma_B = - \frac{c_B}{RT} \frac{d\sigma}{dc_B}$$

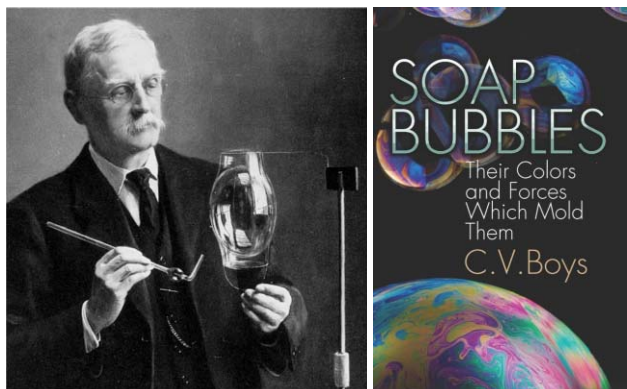
a Gibbs-féle abszorpciós egyenletet. Ő is észrevette a szappanhártyák kerettel történő illeszkedésénél kialakult, a hártya belsejéből nézve konvex tartományt, a Gibbs-gyűrűt, amely a hártyák találkozásakor képződő Plateau-határral azonos (15. ábra, mikroszkópos kép és rajz).

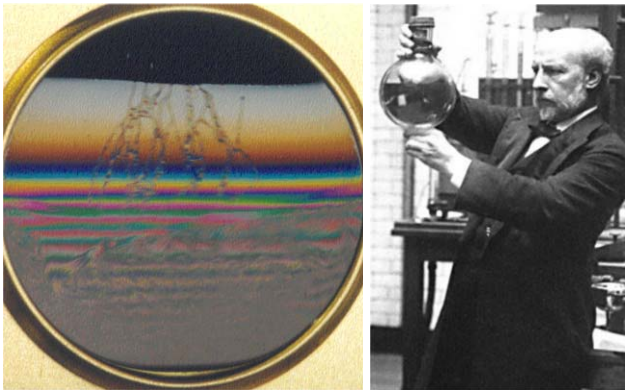
Az itt uralkodó kisebb nyomás miatt az érintkező tartomány közvetlen környezete vékonyabbá válik. Ez az eredete a függőleges síkú hártyában, a keret szomszédságában megfigyelhető intenzív konvekciónak. A vékonyabb hártyadarabok ugyanis a felső tartományokba, a nekik megfelelő felületi sűrűségű régiókba törekedve okoznak intenzív kavargást, amelyet *gravitációs konvekciónak* nevezett. E változások részei a szappanhártyák vékonyodását okozó mechanizmusoknak. Megállapította, hogy a folyadékhártyák stabilizálását a hártyában rendezetten elhelyezkedő felületaktív anyag biztosítja. A hártyában fellépő, minden olyan lokális zavar, amely a felületegységre eső oldott anyag mennyiségét csökkenti – a hártyát a vízhez hasonlóbbá téve –, ott a felületi feszültséget megnöveli. A hártya e kényszernek ellenszegülve, mint egy rugalmas membrán (Gibbs-féle rugalmasság), összehúzódik.

Charles Vernon Boys (16. ábra) a tizenéveseknek írt *Soap Bubbles, Their Colours and the Forces which Mould Them* című könyvével a témakör egyik legnagyobb népszerűsítője volt a századfordulón.

James Dewar (17. ábra, jobbra) a szappanhártyák vékonyodásának vizsgálatakor felfedezte a „kritikus süllyedés” néven ismert jelenséget (17. ábra, balra), amely a sok felületaktív anyagot tartalmazó oldatokból kialakított függőleges síkú hártyák rohamos vékonyodásánál figyelhető meg. Ekkor igen látványosan, feketekör-alakú foltokban végződő, a pávatollhoz hasonló formák sokaságának képződésével kerül a hártya a nagy területen Newton-féle fekete hártyát tartalmazó, alacsonyabb energiájú állapotba.

16. ábra. Sir Charles Vernon Boys (1855–1944)





17. ábra. A „kritikus süllyedés” balra és James Dewar (1842–1923) jobbra.

Arthur Stuart Clark Lawrence (1902–1971), Dewar munkatársa, interferencián alapuló optikai módszert dolgozott ki a hártavastagság mérésére [1].

Eötvös Loránd (18. ábra) – a híres gravitációval kapcsolatos vizsgálataival mellett – módszert dolgozott ki a folyadékok felületi feszültségének mérésére is, és elemezte a folyadék anyagi minőségének hatását a felületi feszültségre. Megállapította, hogy különböző folyadékok felületi feszültségét megfelelő állapotban kell összehasonlítani, amelyhez a molekula által folyadék- és gőzállapotban elfoglalt térfogat nagyságának aránya, v/u a jellemző paraméter. Úgy vélte, hogy a megfelelő állapotban lévő „testekben” a részek között ható erők hasonlóak.

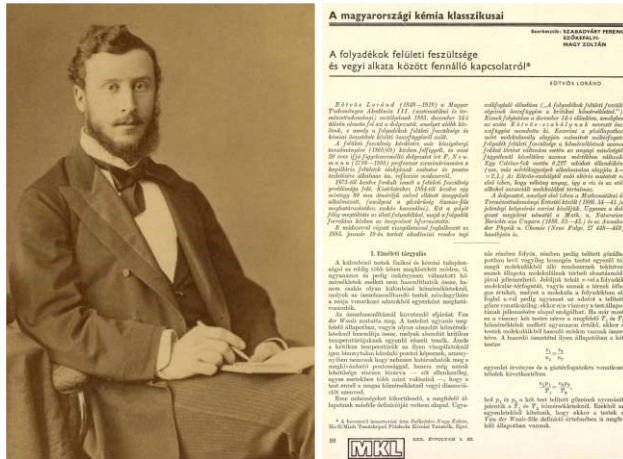
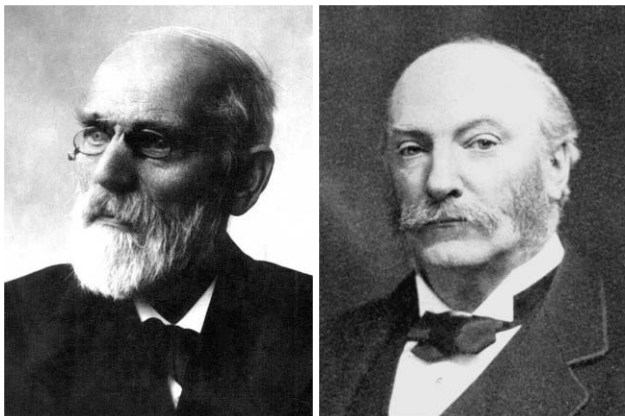
A felületi feszültség hőmérséklettel való változására mérései alapján a

$$\sigma v^{2/3} = k(T_0 - T)$$

összefüggést, az Eötvös-törvényt állapította meg, amelyben a k tényező értékéből lehet következtetni a folyadékot alkotó molekulák asszociáltságára (T_0 a kritikus hőmérséklet, vagy a körüli érték). Akadémiai székfoglaló előadását *A folyadékok felületi feszültsége és vegyi alkata között fennálló kapcsolatról* címmel tartotta 1885-ben [2].

Johannes Diderik Van der Waals (19. ábra, balra) szerint – ahogyan azt Poisson is észrevette – a folya-

19. ábra. Johannes Diderik Van der Waals (1837–1923), Nobel-díj 1910 (balra) és Lord Rayleigh (1842–1919), Nobel-díj 1904 (jobbra).



18. ábra. Eötvös Loránd (1848–1919)

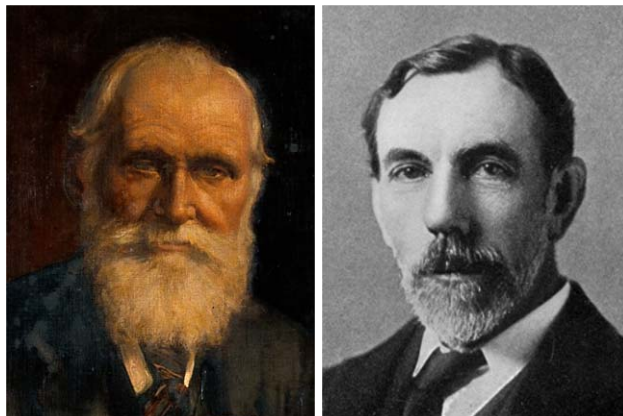
dékból gőzbe való átmenetnél a sűrűségváltozás nem lehet ugrásszerű. A kapilláris jelenségek tárgyalásánál a folyadékfelszínhez közeli, véges vastagságú tartományon belül, a folyadékból gőzbe való átmenetnél a sűrűségváltozást folytonosnak tekintette. Megmutatta, hogy a reális gázok

$$\left(p + \frac{a}{V^2}\right)(V - b) = RT$$

állapotegyenletében az a és b paraméterek a molekulák közötti vonzással és taszítással kapcsolatosak. Mért értékükből a molekulák átmérője becsülhető. Meghatározta a folyadékok állapotegyenletét, és foglalkozott az Eötvös-törvény elméleti megokolásával is.

Lord Rayleigh (eredetileg John William Strutt, 19. ábra, jobbra) folyadékszálak, hengeres folyadékhártyák alakjának vizsgálatával meghatározta az a sugarú szálon terjedő zavar azon λ_{kr} hullámhosszát, amelynél a szál alakja instabillá válik, ez a Rayleigh-instabilitás, $\lambda_{kr} = 9,02a$. Ennél nagyobb hullámhosszak esetén a folyadékszál befűződéssel, végül cseppek kialakulásával veszi fel a minimális energiájú, minimális felületű állapotot. Rayleigh Van der Waals molekuláris erőkre vonatkozó elméletét alkalmazta a felületi feszültség értelmezésére, kiemelve a moleku-

20. ábra. Lord Kelvin (1824–1907) balra és Sir William Ramsay (1852–1916), Nobel-díj 1904 (jobbra).





21. ábra. Carlo Giuseppe Matteo Marangoni (1840–1925) [3]

lák közötti taszítás fontosságát. Munkássága nagyban hozzájárult azokhoz a modern elképzelésekhez, amelyek a kondenzált rendszerekben működő erőhatásokra születtek.

Lord Kelvin (eredetileg William Thomson, 20. ábra, balra) meghatározta a görbült folyadékfelületek párolgására vonatkozó törvényt, az

$$RT \ln \left(\frac{p_r}{p_\infty} \right) = \frac{2 \sigma M}{r \rho}$$

összefüggést, amelyben p_r és p_∞ az M molekulatömegű, ρ sűrűségű folyadék gőznyomása az r görbületi sugarú felület, illetve a síkfelület felett.

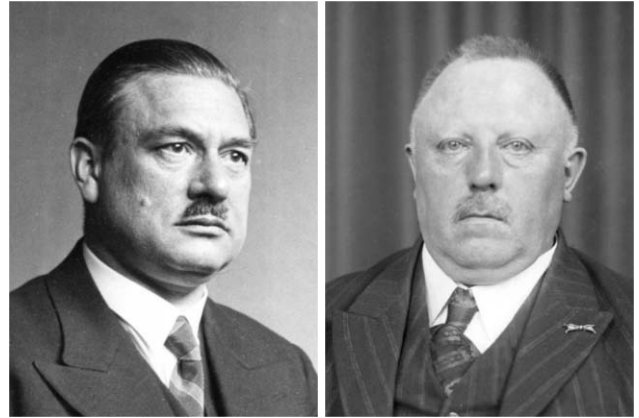
William Ramsay (20. ábra, jobbra) és John Shields a felületi feszültség hőmérsékletfüggésére az Eötvös-egyenlethez hasonló

$$\sigma (Mv)^{2/3} = k(T_0 - T - 6)$$

empirikus egyenletet javasoltak.

Carlo Giuseppe Matteo Marangoni (21. ábra) a szappanhártyák lokális zavarokkal szembeni ellenálló képességével kapcsolatban megállapította, hogy a hártya lokális vékonyodása során megnövekedett felületi feszültség (Gibbs-rugalmasság) a felületaktív anyagok diffúziója miatt viszonylag hosszabb ideig

23. ábra. Fritz Wolfgang London (1900–1954) Erwin Schrödingerrel (balra) Berlinben, 1928-ban.



22. ábra. Balra Peter Joseph William Debye (1884–1966), kémiai Nobel-díj 1936, jobbra Willem Hendrik Keesom (1876–1956).

megmarad (Marangoni-hatás). E két hatás igen jelentős a folyadékhabok stabilitása szempontjából [1].

A határfelületek érdekes viselkedésének oka már a kezdetektől izgatta a tudósokat, és történtek kísérletek az egyes jelenségek anyagszerkezeti magyarázatára is. A kondenzált rendszerekben jelenlévő intermolekuláris kölcsönhatások okára azonban csak a 20. század elején derült fény.

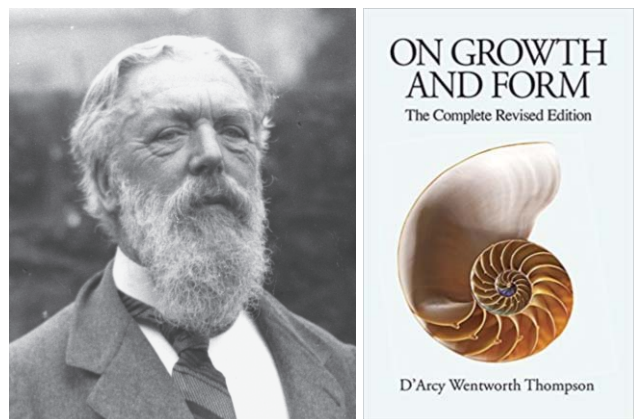
A folyadékokban a molekulák között, azok szerkezetéből adódó dipólus tulajdonságuk miatt (permanens dipól),

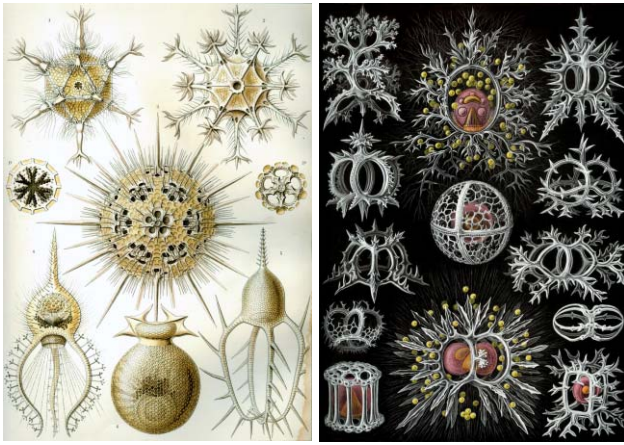
$$U = - \frac{n}{r^6}$$

potenciállal jellemezhető vonzó kölcsönhatás van jelen.

A dipólok további eredetére vonatkozóan Peter Joseph William Debye (22. ábra, indukciós hatás), Willem Hendrik Keesom (22. ábra, orientációs effektus), és Fritz Wolfgang London (23. ábra, diszperziós effektus) tettek javaslatot. Az intermolekuláris kölcsönhatások kvantitatív leírásához a vonzó hatások mellé a molekulák közötti, kvantummechanikai természetű taszító erőket is figyelembe vevő empirikus potenciálokat javasoltak, egyik gyakran alkalmazott egyenlet közülük az

24. ábra. D'Arcy Wentworth Thompson (1860–1948)





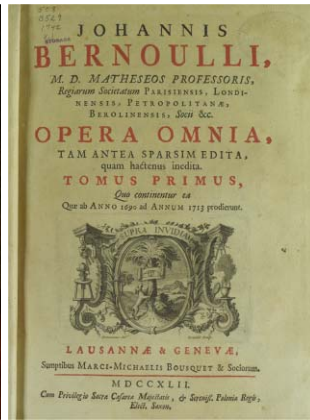
25. ábra. Radioláriák

$$U = -\frac{n}{r^6} + \frac{m}{r^{12}}.$$

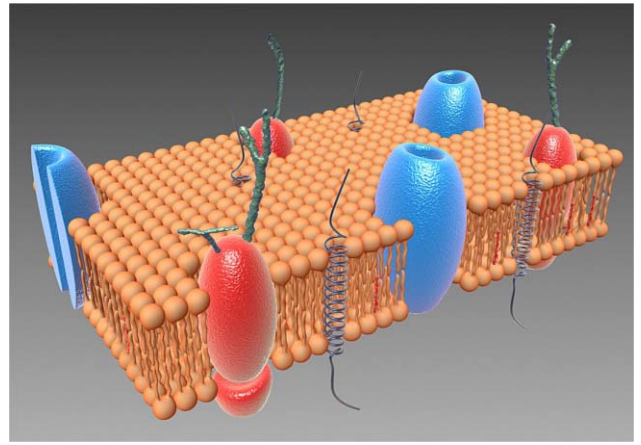
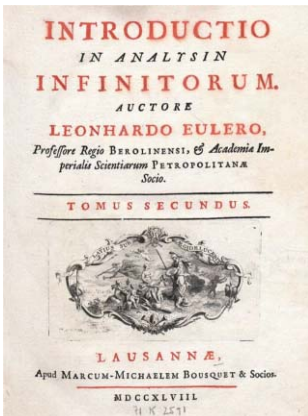
A továbbiakban azokról a kutatókról teszünk említést, akik a *biológia* és *matematika* területén kerültek valamilyen kapcsolatba a szappanhártyákkal, -buborékokkal.

D'Arcy Wentworth Thompson (24. ábra) a 20. század elején hívta fel a figyelmet a szappanbuborékok és az élő szervezetek hasonlóságára. Híres munkájában, az *On Growth and Form*-ban elemezte a radiolá-

27. ábra. Johann Bernoulli (1710–1790)



28. ábra. Leonhard Euler (1707–1783)



26. ábra. A sejtmembrán felépítése

riák szappanhabszerű felépítését. Egy mélytengeri expedíció kapcsán a felszínre került vázaikon jól látható a hasonlatosság (25. ábra). D. W. Thompson az első biomatematikusnak tartják [1].

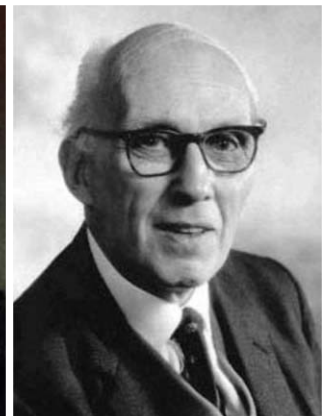
A sejtmembránokban lévő lipidmolekulák szerkezete (26. ábra) hasonló a szappan molekuláihoz, a belőlük felépülő membránoké pedig a szappanhártyákhoz. A szappanhártyákra vonatkozó minden ismeret így segít a membránok viselkedésének jobb megismerésében.

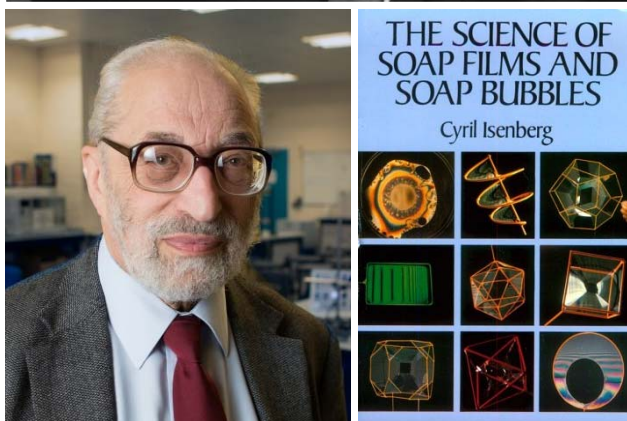
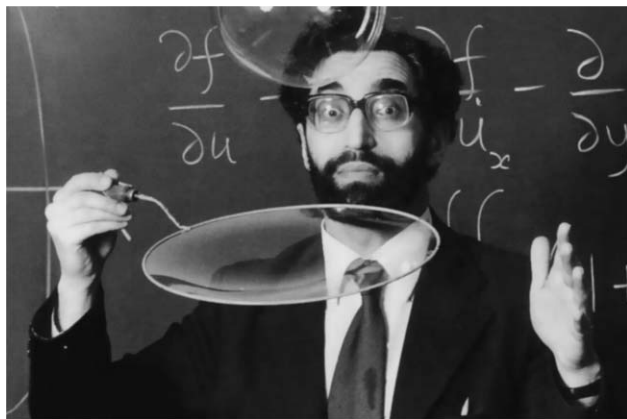
Johann Bernoulli (27. ábra) és tanítványa, Leonhard Euler (28. ábra) a variációszámítás kidolgozásával megteremtette a matematikai módszert az úgynevezett minimálfelület-probléma megoldásához, amelyhez tevékenységével Joseph-Louis Lagrange (29. ábra, balra) is hozzájárult. Meghatározta két koaxiális gyűrűre feszíthető minimálfelület alakját, a katenoid formát. Bonyolultabb felületek elméleti számítása azonban igen sok nehézséggel jár.

Szappanhártyák és habok kialakítása segítségével azonban e problémák egyszerűen megoldhatók. Plateau úttörő munkájából tudjuk, hogy a legkisebb területű felületek rajzolódnak ki szappanoldatba mártott drótkeretekben.

Ha több várost érintő utazást tervezünk, és a lehető legrövidebb utat szeretnénk megtenni (motorway probléma) energiatakarékosság okán, megfelelő kí-

29. ábra. Balra Joseph-Louis Lagrange (1736–1813), míg jobbra Radó Tibor (1895–1965).





30. ábra. Cyril Isenberg, University of Kent at Canterbury

sérleti eszközt használva, a szappanhártyák könnyen megmutatják a legjobb úthálózatot, a legrövidebb utat.

A matematikusok azóta is érdeklődéssel fordulnak e terület felé, a huszadik század elején a magyar származású *Radó Tibor* (29. ábra, jobbra) fejtett ki jelentős tevékenységet a minimálfelületek analitikus meghatározása terén [1].

Manapság egész kémiai iparág alapul a szappanhabok, illetve az azokat felépítő szappanhártyák tudományán. A nagyon eltérő, és rendkívül sokféle feladatot ellátó haboknak sok elvárásnak kell megfelelniük. Így még mindig van mit vizsgálni, hogy jobban megismerjük, és még szélesebb körben használhassuk ezeket a bonyolult fizikai-kémiai rendszereket. E munkához szinte alapmű *Karol Joseph Mysels* (1914–1998) szappanhártyák vékonyodási mechanizmusait ismertető könyve, a *Soap films: Studies of their thinning and bibliography*. *Cyril Isenberg* (30. ábra) a *The Science of Soap Films and Soap Bubbles* című, komoly szakmai igényekkel megírt könyvében, a fizikus és a kémikus is megtalálja a számára érdekes fejezeteket. A könyv nagy segítséget nyújt a szappanhártyák és szappanbuborékok népszerűsítéséhez, sokoldalú felhasználásuk hátterének megértéséhez.

Irodalom

1. Cyril Isenberg: *The Science of Soap Films and Soap Bubbles*. Dover Publication, Inc., New York, 1992.
2. *Báró Eötvös Loránd Emlékkönyv* (szerk.: Fröhlich Izidor) Magyar Tudományos Akadémia, Budapest, 1930, 97–111.
3. Plate from Ernst Haeckel's 1904 *Kunstformen der Natur* (Art-forms of Nature), showing radiolarians belonging to the superfamily Stephoidea.
4. <http://www.aif.it/FISICI\7/F19\1b.jpg>
A külön nem hivatkozott képek többnyire a Wikipedia internetes forrásból származnak.

A FIZIKA TANÍTÁSA

LEWIS A. RYGG (1893) KLASSZIKUS MECHANIKUS LOVA – a ló megépítése, és mozgásának elemzése: eszköz a négylábú állatok lábmozgásának szemléltetésére és elemzésére

Bogár Attila, Bedőcs Imre, Horváth Gábor
ELTE Biológiai Fizika Tanszék

Írásunk célja a *Lewis A. Rygg* 1893. évi amerikai szabadalmában leírt mechanikus ló megépített modellje lábmozgásainak elemzése. A szerkezet lábmozgásainak megfelelő beállításával a négylábúak lépéssorrendjét szemléltető modellt kapunk, ami oktatási célra is alkalmas. A szabadalomban nem szerepeltek az alkotóelemek pontos méretei, de azt tudjuk, hogy e mechanikus lovat Rygg arra tervezte, hogy egy ember meg tudja lovagolni. Megépítettük e valós nagyságú mechanikus ló kicsinyített változatát. A lómodell meg-

tervezése először számítógépen, 3 dimenzióban történt, majd e terv alapján elkészítettük a 15%-os kicsinyített modellt. A számítógépes és a valódi modell elkészülte után mindkettőn beállítottuk a hatféle lehetséges lépéssorrendet a fogaskerekek egymáshoz viszonyított szögeinek módosításával, és az egyes lépésmódokról filmet is készítettünk. Már a számítógépes lómodell lábmozgásán is látható volt, hogy a szerkezet valószínűleg alkalmatlan lenne járásra. A számítógépes szimuláció még nem tartalmazta a sza-