



Braun Tibor

■ ELTE Kémiai Intézet, MTA Könyvtár és Információs Központ | dr.braun.tibor@gmail.com

Akusztikusan levitált folyadékcseppek

Edénymentes és érintésmentes kémia

Előszó

A levitáció, némi egyszerűsítéssel, a gravitáció ellenében, energiabefektetéssel, kisméretű szilárd tárgyakat vagy folyadékcseppeket tart fenn, illetve lebegtet. A fogalom a latin *levitas* szóra vezethető vissza, amely könnyedségnek, könnyűségnek vagy mozgékonyágnak fordítható.

A levitáció aerodinamikai, elektrosztatikai, diamágneses, optikus és akusztikus energiával hozható létre. Az aerodinamikai levitációnál a felfelé áramló levegő ellensúlyozza a kisméretű tárgyra ható gravitációs vonzást. Az elektrosztatikus módszer esetében elektromosan töltött kisméretű vagy súlyú szilárd anyagot levitálnak elektromos térben. A levitáció erős mágnessel is előidézhető. Az optikai levitáció lézerefénnyel lebegtet, végül az 1937-ben felfedezett akusztikus levitáció ultrahangot használ. Az akusztikus levitáció egyik nagy előnye a széles körű alkalmazási lehetőség, ugyanis bármilyen kisméretű szilárd anyag vagy folyadék (általában kis csepp) akusztikusan levitálható. Más levitálási eljárások, például a mágneses vagy elektromágneses levitálás kizárólag csak mágneses, illetve vezető anyagokkal alkalmazható.

Ezúttal csak az akusztikus levitációval foglalkozunk, röviden körbejárva annak alapjait, példaként említve alkalmazását gyógyszerhatóanyagok amorfizálására. Röviden foglalkozunk egy új oldatkémiai szakterület kialakulásával is.

Történelmi előzmények

Újszerűnek és korszerűnek tűnő jellege ellenére az akusztikus energia (hanghullámok) hatását szilárd tárgyra, illetve azok mozgatására számos emlék őrzi, főleg legendákként a történelemben. Annak ellenére, hogy ezek mögött ritkán van szigo-

rián tudományos háttér, történelmi alapot szolgáltatnak az akusztikus jelenségekre, igazolva, hogy a tárgyak mozgása hangok hatására nem korunk jelensége.

Írott emlékként eszünkbe juthatnak majja, egyiptomi, sőt tibeti eredetű legendák. De megemlíthető például a bibliai Ótestamentum, és abban Jerikó város falainak leomlása a Kr. e. 13. évszázadban. Eszerint a Jeruzsálemtől 28 km-re fekvő Jerikóban, mint Józsué (Mózes utódja) könyve leírja, az Úr szólt Józsuéhez, megparancsolva neki, hogy seregével kosszarvból készült kürtökkel felszerelt hét pap kíséretében hat napig ostromolja a várost. Amikor a kürtök erős hangja a hetedik napon is felhangzott, és elérte Jerikó falait, azok a hangok hatására leomlottak, a várost pedig elfoglalták és kifosztották.

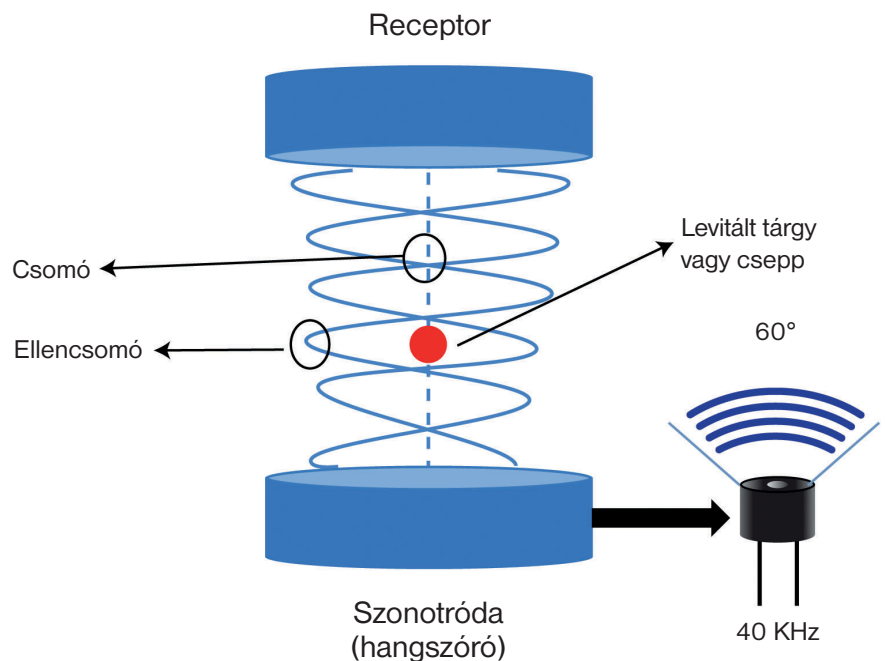
A másik példa a görög mitológiából ered.

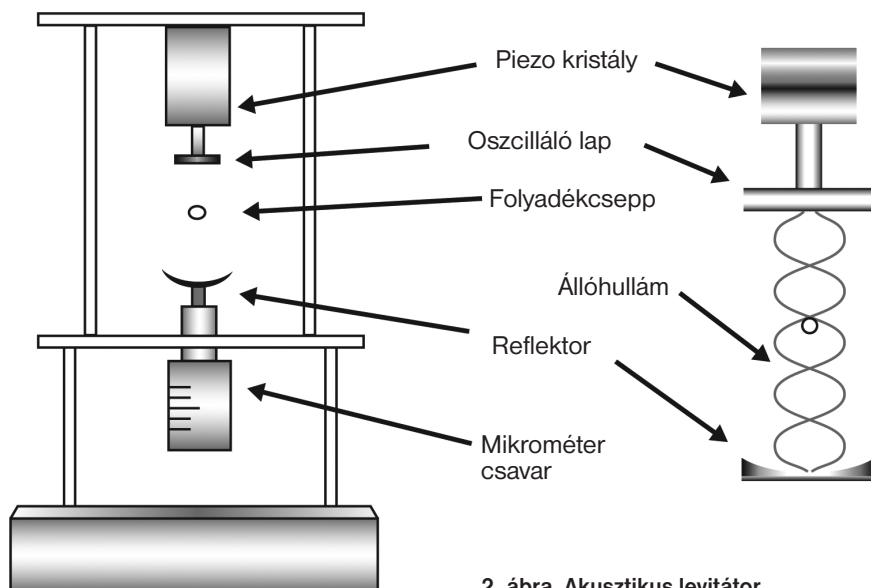
Pauszaniász görög geográfus IX. könyve szerint Zeus és Antiopé fia, Amphión, iker-testvéreivel, Zéthossal elfoglalta Thébat, majd 7 kapun átjárható fal építésével kezdték megerősíteni a várost. Miközben Zéthosz minden erejét megfeszítve küzdött a kőtömbök elhelyezésével, Amphión egyszerűen megszólaltatta lantját, és annak hangjára a kövek, követve a zenét, önmaguktól elrendeződtek a falban.

Bevezetés

Az akusztikus levitáció tehát akusztikus nyomáshullámokat alkalmaz kisméretű szilárd tárgyak vagy folyadékcseppek emelésére, illetve lebegtetésére. E jelenség meghatározott frekvenciájú és amplitúdójú ultrahanghullámok eredménye (**1. ábra**), amelyekben nagy nyomású és alacsony nyomá-

1. ábra. Az akusztikus levitáció elve





2. ábra. Akusztikus levitátor

sú csomók jönnek létre. Mint az ábrán látható, a csomók és ellencsomók lehetővé teszik szilárd részecskék vagy folyadékcseppek emelését, függesztését és lebegtetését valamilyen fluidumban (általában, de nem mindig levegőben). A levitátorban az akusztikus hullámot piezoelektromos kibocsátó

(emitter, transzduktor, szonotród) hozza létre.

Az akusztikus levitációt 1933-ban fedezték fel, [1] első elmélete 1934-ből származik. [2] Xie és munkatársai a levitált részecskék geometriáját, hőmérsékletét, méretét és hátterét vizsgálták. [3–6] Ők dolgozták

ki a manapság leggyakrabban használt akusztikus levitátort is.

2010-ig akusztikus levitációs berendezések főleg statikus mérésekre adtak lehetőséget, amiben a levitált tárgyak vagy folyadékcseppek mozgatása meglehetősen korlátozott volt.

Akusztikus levitátor

Az akusztikus levitátor, mint említettük, szonotródból és reflektorból áll (2. ábra). Előbbi piezoelektromos kristályhoz csatlakozik, ami beállított frekvencián folyamatosan ultrahanghullámot hoz létre. A reflektor és a szonotród közötti távolság mikrométercsavarral állítható. Az ultrahanghullám intenzitása külső energiaforrással állítható be, és értéke lényegesen nagyobb kell legyen, mint a normális hanghullámoké. A tárgyakat és a folyadékcseppeket mozgató ultrahanghullámok 160 dB erősségűek és a 24 kHz-es tartományban terjednek, vagyis az emberi fül számára nem hallhatóak. A levitátorban lebegtetett folyadékcseppek mérete széles skálán változtatható, de általában 1,1–5 nm-től körülbelül 2,5

1. táblázat. Példák angol nyelvű cikkekben a „containerless” és a „contactless” kifejezés használatára

Szerző(k)	Cím	Folyóirat	Kifejezés
J. K. R. Weber, D. S. Hampton, D. R. Mertley, Ch. A. Rey, M. M. Zatarski, P. C. Nordine	Aero-acoustic Levitation: A Method for Containerless Liquid-Phase Processing at High Temperatures	Rev.Sci.Instrum., 1994, 65, 10	Containerless
E. A. Crawford, C. Esen, D. A. Volmer	Real Time Monitoring of Containerless Microreactions in Acoustically Levitated Droplets via Ambient Ionization Mass Spectrometry	Analytical Chemistry, 2016, 88, 8396	Containerless
M.Lopez-Pastor, A. Dominguez-Vital, M. J. Ayora-Canada, T. Laurel, M. Varcacel, B. Lendl	Containerless Reaction Monitoring in Ionic Liquids by Means of Raman Microspectroscopy	Lab-on-a-Chip, 2007, 7, 126	Containerless
A.Watanabe, K. Hasegawa, Y. Abe	Contactless Fluid Manipulation in Air: Droplets Coalescence and Active Mixing by Acoustic Levitation	Scientific Reports 2018, 8, 10221	Contactless
S. J. Brotton, R. I. Kaiser	Controlled Chemistry via Contactless Manipulation and Merging of Droplets in an Acoustic Levitator	Analytical Chemistry 2020, 92, 8371	Contactless
R. Malinowski, I. P. Parkin, G. Volpe	Nonmonotonic Contactless Manipulation of Binary Droplets via Sensing of Localised Vapor Sources on Pristine Substrates	Science Advances 2020, 6, 3636	Contactless
S. Mohanty, I. S. M. Khalil, S. Mihra	Contactless Acoustic Micro/Nano Manipulation: Paradigm for Next Generation Application in Live Sciences	https://doi.org/10.1098/lspa2020.0621	Contactless



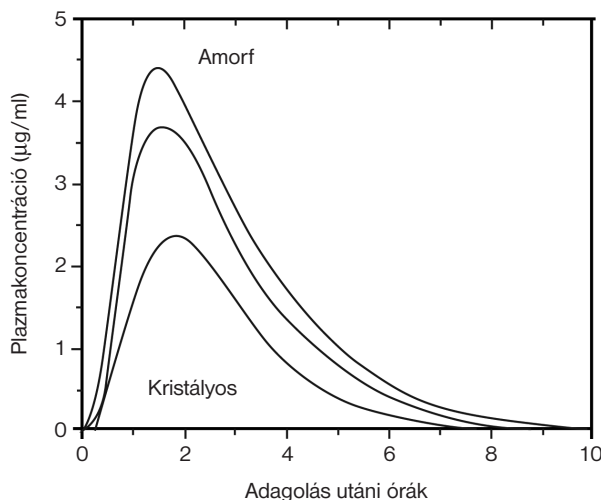
mm-ig terjed. A folyadékcspepek bevezetése és eltávolítása a levitátorba, illetve levitátorból kapillárisal vagy pipettával egyszerűen elvégezhető. A folyadékbevezetés során képződött cseppek a folyadékfajta-tól függően különböző formájúra torzulhatnak. A levitátorban két (vagy több) egymás feletti csepp is lebegtethető. Ilyenkor a felső csepp oszcillálható (mozgatható) az ultrahang amplitúdójának változtatásával. A cseppek egyesítésével folyadékok lúgosítása, dúsítása, illetve kémiai reakciók is megvalósíthatóvá válnak. Az **1. táblázatban** említett *Bretton-Kaiser*-dolgozatban vízcseppeket és etil-alkoholt, illetve vizes nátrium-hidrokarbonátot és ecetsavas cseppeket keverték levitálás közben, valamint szilárd kis kristályt, $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ -t oldottak vízcseppben UV-spektroszkópiás átvilágítással követve az oldódást.

Alkalmazási példa: gyógyszerhatóanyagok amorfizálása

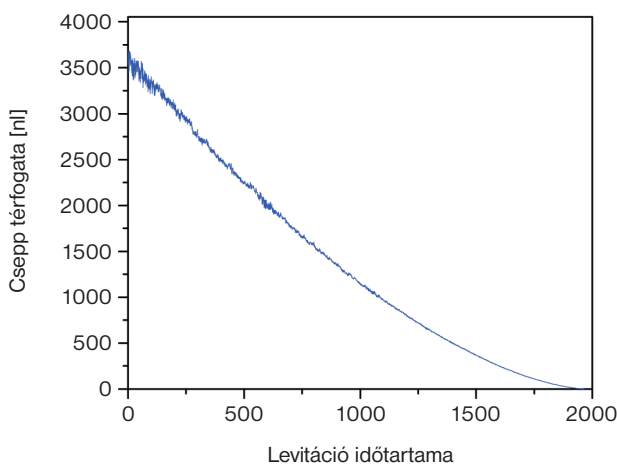
A gyógyszerhatóanyagok amorf vagy kristályos szerkezetűek. Az amorf gyógyszerhatóanyagoknak általában jobb a felszívódása az emberi szervezetben (**3. ábra**), mint a kristályosoknak, ami annak tulajdonítható, hogy gyenge intermolekuláris kötéseik révén jobban oldhatók, és így jobban asszimilálódnak az emberi testben. Ezért kisebb amorf gyógyszerdózis alkalmazható a kívánt hatás elérésére. Általában a forgalmazott gyógyszerhatóanyagok nagy része sajnos kristályos. Az amorf gyógyszerhatóanyagok készítése oldatból meglehetősen összetett feladat. Ha egy gyógyszerhatóanyagot oldatból való párologtatással készítene, a heterogén nukleáció és az edény falának kölcsönhatása révén a hatóanyag, jó eséllyel, kristályos formában szilárdul meg. Ezzel szemben akusztikus levitációt alkalmazva különböző gyógyszerhatóanyagok szupratelített folyadékcspepekből gyorsan és könnyen párologtathatók (**4. ábra**), és szilárd amorf gyógyszerhatóanyagokhoz vezetnek. [7,8]

Folyadékok és oldatok tárolása

A folyadékok, oldatok tárolását, reagáltatását már az alkímia is valamilyen edényben, tartályban valósította meg. Az edények falai és az edényekben tárolt folyadékok, oldatok között jelentős kölcsönhatások jöhetnek létre, és ezek a folyadékok, oldatok viselkedését komolyan befolyásolhatják. Mindez azért válik ma különösen



3. ábra. Amorf, illetve kristályos gyógyszerhatóanyag felszívódása vérben



4. ábra. Levitált folyadék-csepp térfogatának változása az idő függvényében

fontossá, mert a korszerű kémia a miniatürizálás irányában halad, azaz gazdasági, valamint környezet- és egészségvédelmi szempontok alapján a folyadékok és oldatok egyre kisebb térfogatával igyekezik dolgozni. Problémát okozhat azonban a folyadékok és oldatok felülete és térfogata közötti arány. Minél kisebb a folyadékminta térfogata, annál nagyobbak a minták összetételében jelentkező változások, hiszen nő a felület/térfogat arány.

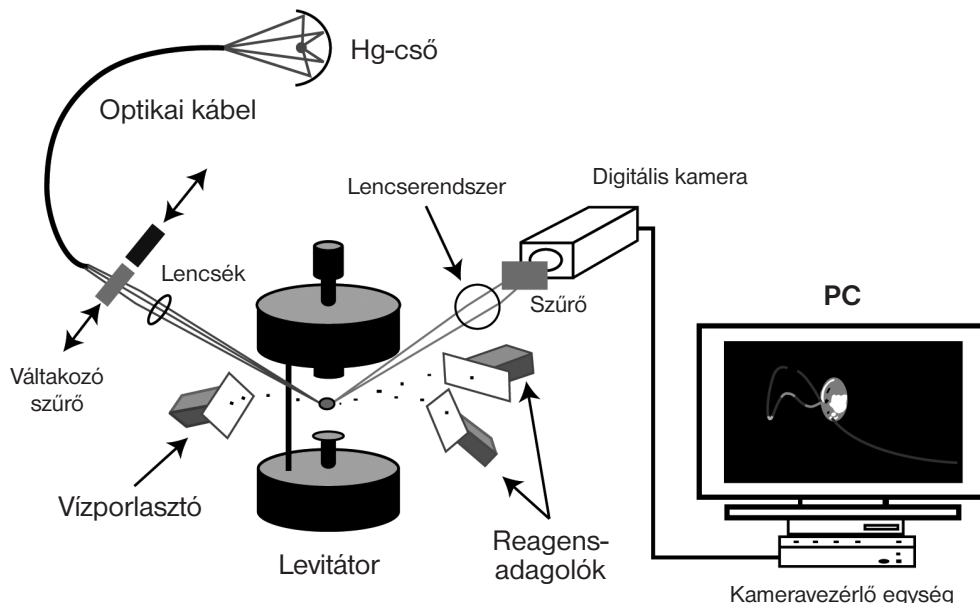
A folyadékkémiai reakciók során a rendkívül kis (mikroliter, pikoliter) térfogatú folyadékok és az edények között lényegében két jelenség jöhet létre. Egyrészt a folyadék szennyeződhet olyan anyagokkal, amelyek az edények falából oldódnak ki vagy válnak le, másrészt megnő annak a valószínűsége, hogy a folyadékokban tartalmazott komponensek rátapadhatnak az edények falaira.

Itt térnénk vissza az akusztikus levitáció folyadékcspepek előállítására való alkalmasságára, aminek során a cseppméretű folyadékok valamilyen fluidumban lebegnek, és például a levegőben levitált folyadékcspeppben bármilyen kémiai művelet, például párologtatás, oldódás, reagálás anélkül játszódhat le, hogy az oldat és az

edény között valamilyen kölcsönhatás létrejön. A világ angol nyelvű szakirodalmában jelenleg gyakran találkozhatunk a *containerless manipulation*, *containerless processing*, *contactless manipulation*, *contactless processing* kifejezéseket tartalmazó cikkekkel.

Az **1. táblázatban**¹ néhány példát sorolunk fel említett cikkekből, amelyek az akusztikus levitációval létrehozott cseppek edénymentességének (*containerless*) és érintésmentességének (*contactless*) kérdésével foglalkoznak. Mint ezek a dolgozatok is jelzik, az ultrahangos levitáció alkalmazásával a csepptérfogatú folyadékminták képzésével és lebegtetésével a kémiában elkerülhető a folyadékok és az edényfalak közötti problémás kölcsönhatás, illetve káros érintkezés. Ez új kémiai szakterület kialakulását jelezheti. Profán módon erre az új területre az *edénymentes kémia*, illetve *érintésmentes kémia* elnevezés helyett a

¹ A kifejezések magyar fordítására még nem alakult ki a megfelelő szakszavak, ezért az angol container szó-tári megfelelőjeként a tartály lenne ajánlatos, de a térfogata és mérete miatt félreérthető lenne. Ezért az edénymentes szót találtuk megfelelőnek. Hasoló módon a contactless fordítására az érintésmentes kifejezés mellett döntöttünk.



5. ábra. Levitált folyadékcsepp fluorimetriás átvilágítását lehetővé tevő berendezés

meztelen folyadék cseppkémia elnevezést javasoljuk, értve ez alatt olyan folyadékokkal, oldatokkal végzett kémiai műveleteket, folyamatokat, amelyekben a levitálás folytán a folyadékcseppek „ruhátlanok”, azaz öltözet-, illetve edénymentesen elérhető, illetve reagáltathatók.

Végül a teljesség igénye nélkül felsorolunk néhány más alkalmazást is, amelyek a folyadékcseppek akusztikus levitálása lehetővé tesz. Ilyenek például: folyadékok koncentrációja, [9] folyadék-folyadék extrakció [10] és gáz-folyadék extrakció [11]. Ugyancsak nagy előnye az akusztikusan levitált folyadékcseppeknek, hogy bennük lebegtetés közben különböző műszeres analitikai detektálási méréseket is el lehet végezni. Ilyenek például: a fotometria, [12] fluorimetria (5. ábra), [13] foszforimetria, [14] Raman-spektroszkópia [15] és röntgendiffrakció [16].

Utószó

Az akusztikus levitációs szakirodalom jelentős méretűre nőtt az utóbbi években, ezért a témának csak a bemutatására vállalkozhattunk. A fentiekből az is kiderült, hogy új kémiai szakterület van kialakulóban, ami elsősorban a folyadékkémia fejlődését, működési mechanizmusának jobb megismerését szolgálja. Ennek alátámasztására idézünk a *Reactions without walls* című hivatkozásból: „Az ionos folyadékok cseppjeinek levitálása talán varázslatos illúzió hangzik, de a kutatók valós előnyöket találtak ezeknek az oldószereknek az edénymentes kémiai felhasználásában.” [17]

IRODALOM

- [1] K. Bücks, H. Müller, Z. Phys. (1933) 84, 75.
 [2] L. V. King, Proc. Roy. Soc. A: Math. Phys. Eng. Sci. (1934) 147, 212.

- [3] W. Xie, C. Cao, Y. Lu, W. Wei, Phys.Rev.Lett. (2002) 89, 1043.
 [4] W. Xie, W. Wei, Appl. Phys. Lett. (2001) 79, 881.
 [5] W. Xie, W. Wei, J. Appl. Phys. (2003) 93, 3016.
 [6] W. Xie, W. Wei, Appl. Phys. Lett. (2007) 90, 2041.
 [7] C. J. Benmore, J. K. R. Weber, Phys. Rev. X (2011) 1.011004.
 [8] J. K. R. Weber, C. J. Benmore et al., Biochem. Biophys. Acta (2007) 3686.
 [9] N. Nilsson, S. E. Johansson, et al., 36th Annual Eastern Analytical Symposium & Exposition, Somerset N.Y., USA, 1997.
 [10] B. Neuhart, E. Welter, Fresenius J. Anal. Chem. (1997) 357, 345.
 [11] P. Jacob, A. Stockhaus et al., Fresenius J. Anal. Chem. (2001) 371, 726.
 [12] S. Santesson, E. S. Cedergren-Zeppeauer et al., Anal.Chem. (2003) 75, 1733.
 [13] S. Santesson, E. S. Cedergren-Zeppeauer et al., Anal.Chem. (2000) 72, 3412.
 [14] A. Omrane, S. Santesson et al., Lab. Chip. (2004) 4, 287.
 [15] C. Esen, D.Weigel et al., Spectrosc. Radiat. Transfer (2004) 89, 79.
 [16] Y. Cerenius, A. Oskarsson, J. Appl. Crystallogr. (2003) 36, 163.
 [17] Austrian Academy of Sciences. Reactions without walls, 2006. november 16.

Robert W. Gore és a Gore-Tex®

Robert W. Gore amerikai mérnök és tudós, feltaláló és üzletember 2020-ban hunyt el. Többek között a poli(tetrafluoretilén) gyantákat tanulmányozta, alkalmazásukat kutatta. Ennek során feltalálta az általa és részben róla elnevezett lélegző membránt, a Gore-Tex®-et. Külön érdekesség, hogy a lélegző membránnak és anyagának felfedezése is külön-külön – más célú kísérletek során – a véletlennek köszönhető.

Robert W. Gore édesapja a delaware-i Wilmingtonban, a DuPont K+F létesítményében dolgozott. Gore a Delaware-i Egyetemen vegyészmérnöki diplomát szerzett 1959-ben, 1963-ban pedig PhD-fokozatot ért el. Kutatóként csatlakozott a család új, W. L. Gore & Associates cégéhez, amelynek 1967-ben műszaki és kutatási vezetője lett.

A W. L. Gore & Associates a poli(tetrafluoretilén) (PTFE) alkalmazásait fejlesztette. Széles körű tevékenységüket jelzi, hogy számítástechnikai kábelekkel, orvosi berendezésekkel, az űrhajók külső rétegeinek kialakításával egyaránt foglalkoztak. Gore 1969-ben az extrudált PTFE csőmenetes szalaggá való nyújtását kutatta, eközben felfedezte a polimer porózus, nagy szilárdságú