



11. ábra. A PET-CT Kft. (a MEDISO cégcsoport tagja) Philips TOF PET-CT berendezése betegvizsgálat közben, Tornay Istvánné aszisztenssel 2007-ben.

Időközben beszerezte a cég azt a Time-of-flight (TOF – repülési idő) PET-CT-t is, amely világszínvonalon teszi lehetővé most már az egészségtest onkológiai és agyi vizsgálatokat (11. ábra).



Összegzésként elmondható, hogy Debrecenben a Szalay Sándor professzor úr által elindított és segített izotópos technikák nemcsak jó gondolatnak bizonyultak, de a nukleáris medicina szakma kialakulásához vezettek. Ma a Debreceni Egyetemen mintegy 4000 m²-en működik a nukleáris medicina, világszínvonalú műszerparkkal és igen jól képzett szakembergárdával. Ha élne, Szalay professzor urat minden bizonnyal nagy örömmel töltené el ez a sikeres út, amelyen az ő munkásságával és közreműködésével indulhattunk el.

SZALAY SÁNDOR, A SZONOKÉMIA ÚTTÖRŐJE

Molnár Árpád

Szegedi Tudományegyetem, Szerves Kémiai Tanszék

A szonokémia olyan módszer, amelynek során kémiai átalakulásokat nagyfrekvenciás ultrahang (20 kHz – 1 MHz) jelenlétében hajtunk végre (az 1 MHz feletti tartományt orvosi és diagnosztikai célra használják). Az eljárás, az elmúlt mintegy három évtized viharos fejlődésének köszönhetően, napjaink egyik elfogadott és széleskörűen alkalmazott kísérleti technikájává vált. Figyelembe véve, hogy a kémiai reakciók energiaigényének kielégítésére viszonylag szűk lehetőségeink vannak – ilyen célra elsősorban és széleskörűen csak a hőenergia és az ultrabolya fény alkalmazása jön szóba – az ultrahang (és mellette a mikrohullám) kémiai alkalmazása új, hasznos nem hagyományos aktiválási eljárásnak tekinthető [1].

Habár az ultrahang kémiai célú felhasználása sokkal régebbi időkre nyúlik vissza – és jelen ismertető hangúlyozottan éppen az előzményekről és Szalay Sándornak ebben játszott úttörő szerepéről szól –, a tényleges fejlődés az 1980-as évek kezdetére tehető. Ez elsősorban az abban az időben kereskedelmi forgalomba került olcsó, egyszerű, megbízható készülékeknek köszönhető [1]. A gyors fejlődést jól illusztrálja, hogy az *Európai Szonokémia Társaság* 1986-ban rendezte első nemzetközi szonokémiai konferenciáját, 1990-ben indult az *Advances in Sonochemistry* című monográfiásorozat, amelynek azóta 6 kötete jelent meg, illetve 1994-ben az általános jellegű *Ultrasonics* folyóiratból kivált az *Ultrasonic Sonochemistry*, kizárólag kémiai alkalmazásra vonatkozó eredményeket közlő folyóirat. Ugyanakkor az is látható, hogy a fejlődés eredményeként a szonokémia ma már „mindössze” egyike a bevált, általánosan alkalmazható aktiválási módszereknek. Így talán az újdonság varázsának elvesztéseként tekinthetjük azt is, hogy miközben az említett monográfiásorozat kötetei 1990-től kezdő-

dően általában két évente jelentek meg, a legutóbbi, 6. kötet viszonylag régen, 2001-ben került kiadásra.

Az ultrahang gyakorlati célú felhasználásának vizsgálata az 1910-es években kezdődött. Egyrészt a Titanic 1912-es katasztrófája kapcsán, a hajózás biztonságosabbá tétele miatt felmerült az igény a jéghegyek tényleges méretének meghatározására, másrészt az I. világháborúban a tengeralattjárók felderítése vált fontossá. Ilyen gyakorlati igények eredményeként kezdte vizsgálni *Paul Langevin* az ultrahang tengervízben történő terjedését [2]. Ezek a kezdeti vizsgálatok vezettek a II. világháborúban a visszhangtechnikán alapuló, a tengeralattjárók felderítésére használt ASDIC rendszer kidolgozásához (Allied Submarine Detection Investigation Committee vagy Anti-Submarine Depth Indicating Control), illetve az ultrahang egy másik, napjainkban fontos gyakorlati, a tengeri mélységmérésben történő alkalmazásához (SONAR technika – Sound Navigation and Ranging).

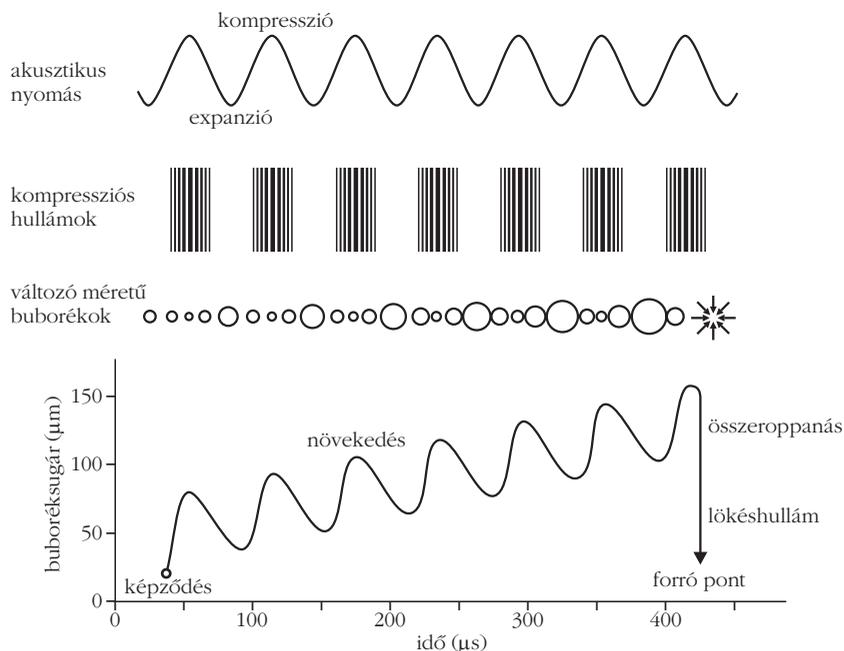
Érdemes megemlíteni továbbá azt is, hogy az alábbiakban tárgyalandó, az ultrahang kémiai alkalmazása szempontjából fontos kavitációs jelenség felismerésének is haditechnikai vonatkozásai vannak. Az 1893-ban épült *HMS Daring* angol torpedórombolónál (csúcssebessége 27 tengeri csomó/óra, azaz mintegy 50 km/h) nagy sebességnél vibrációt és a motor teljesítményének jelentős csökkenését figyelték meg, illetve itt tapasztaltak először a propelleren erózióhoz hasonló jelenségeket [3]. Ezeket a fémfelületen kialakuló buborékok összeroppanása okozza. Napjainkban a fentiekben túlmenően az ultrahangot legelterjedtebben az orvosi diagnosztikában alkalmazzák.

Az ultrahang első kémiai felhasználása *Loomis* és *Richards* nevéhez fűződik [4]. Munkájuk során – egybekellett – megfigyelték, hogy a besugárzott folyadékok felmelegednek, forráspontjuk néhány fokkal csök-

ken, továbbá azt, hogy gázzal telített folyadékokból ultrahang hatására felszabadulnak a gázok. Legfontosabb megállapításuk azonban az volt, hogy az ultrahang felgyorsítja a reakciókat. Dimetil-szulfát hidrolízise, illetve a KIO_3 redukciója során végeztek körültekintő vizsgálatokat. Utóbbi esetben a reakcióelegy keményítőt tartalmazott, amely a KIO_3 redukójakor képződő jóddal kék színreakciót adva jelezte a reakció megindulását (jód „órareakció”). Azt tapasztalták, hogy az ultrahanggal történt besugárzásnál – a hagyományos melegítéssel összehasonlítva – alacsonyabb hőmérsékleten kezdődött a jód „órareakció”. Nem meglepő módon a jóddazid (N_3I), ami mechanikai hatásokra nagyon érzékeny vegyület, ultrahang hatására felrobbant, viszont a kevésbé érzékeny ammónium-nitráttal semmi nem történt.

Néhány évvel később, 1933-ban jelent meg Szalay Sándor történeti távlatokban úttörő jelentőségűnek tekinthető munkája [5], amelyben elsőként tanulmányozta az ultrahang hatását polimer molekulákon. A méréseket a maga építette ultrahang-generátorral keltett 722 kHz-es ultrahanggal végezte. Vizsgálataihoz két fehérjemolekulát (keményítő, zselatin), illetve a gumiarábikumot (poliszacharidok és glikoproteinek keveréke) használta. A keményítő vizsgálatánál a fent már említett kék színreakciót használta indikátorként, míg a zselatin és a gumiarábikum esetén vizes oldatuk viszkozitásának változását mérte. Az eredmények – vagyis a viszkozitás csökkenése – alapján megállapította, hogy az ultrahang kisebb részekre darabolja a polimermolekulákat (azaz depolimerizációt idéz elő). Hasonló jelenséget egyszerű, kis molekuláknál nem tapasztalt. A Szalay által közölt felismerések alapján hamarosan további vizsgálatokat végeztek más természetes óriásmolekulákkal (pl. a hemocinain nevű fehérjével) [6], illetve mesterséges polimerekkel is [7].

Szalay Sándor abban az időben *Szent-Györgyi Albert* mellett, a Szegedi Tudományegyetem Orvosi Kémiai Intézetében dolgozott. *Ralph W. Moss* amerikai újságíró Szent-Györgyiről szóló, magyar fordításban is megjelent életrajzi könyvéből [8] tudjuk, hogy Szent-Györgyi azzal a kifejezett céllal alkalmazta az akkor 22 éves fiatal fizikus Szalay Sándort,¹ hogy egy megfelelő teljesítményű ultrahang-generátort építsen. Szent-Györgyi Albert igazi célja patkányok daganatos (rákos) sejtjeinek nagy energiájú ultrahangos besugár-



1. ábra. Az átmeneti kavitáció jelensége.

zással történő elpusztítása volt. Talán ezzel is magyarázható, hogy Szalay Sándor egyedüli szerzőként jegyzi kémiai vonatkozású eredményeit. Ugyanakkor Szent-Györgyi Albert még abban az évben a *Nature* című nagy tekintélyű folyóiratban egy rövid közleményben foglalta össze az ultrahanggal kapcsolatos tapasztalataikat megállapítva, hogy a rákos sejtek elpusztítása nem járt sikerrel [9].

Az eredmények jelentőségét mi sem mutatja jobban, mint hogy röviddel e cikk megjelenése után a *The New York Times* heti *The week in science* rovatában beszámol a korai, ultrahanggal nyert eredményekről, utalva Loomis vizsgálataira és idézve Szent-Györgyi megállapításait [10].

Szent-Györgyi Albert fent említett cikkében lehetőségként megjegyzi [9], hogy nagyobb energiájú sugárzással esetleg lehetővé válhat kis molekulák átalakítása is, illetve lehetőség nyílhat arra, hogy az ultrahang segítségével kémiai kötések erősségét is megmérjük. Látni kell azonban azt, hogy az ultrahang energiája nem alkalmas arra, hogy vele kémiai kötések közvetlenül hasítsunk. Az ultrahang hatására a kémiai reakciók hatékonyabban, gyorsabban, enyhébb reakciókörülmények között, nagyobb hozamot adva mennek végbe, esetleg a reakcióút is megváltozhat, vagyis az ultrahang lényegében újfajta, különleges, hatékony energiaközlést jelent.

Az ultrahang kémiai átalakulásokban történő felhasználási lehetősége az akusztikus kavitáció jelenségén alapul. Az ultrahanghullámok (mint bármely hanghullám) összenyomódási (kompressziós) és tágulási (expanzíós) ciklusokból állnak. Folyadékokban a tágulás során fellépő negatív nyomás eredményeként a molekulák eltávolodnak egymástól. Ha a hanghullám elegendő nagy energiájú, akkor a molekulákat összetartó kötőerők megszűnnek és buborékok képződnek. Nagyon tiszta folyadékok esetén a buborék-

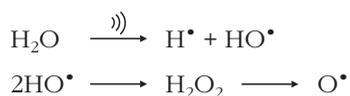
¹ Az angol eredetiben Szalay Sándor neve A. Szalayként jelent meg (ismert, hogy tudományos munkáit Alexander Szalayként jegyezte). Sajnálatos módon a fordító, illetve a lektor figyelmen kívül hagyta a magyar fordításban Szalay Andrásné szerepét.

képződéshez szükséges negatív nyomás nagyon nagy (tisztá víznél pl. ~1000 atm). Amennyiben azonban a folyadékban oldott gázok vannak (és a gyakorlatban ez mindig fennáll), ezek buborék formájában könnyen megjelennek. A buborékképződést szennyezések is elősegítik. A buborékok belsejében a nyomást az adott folyadék adott körülmények közötti gőznyomása határozza meg, amihez hozzáadódik az oldott gáz felszabadulásából eredő nyomás is (vagyis a buborékban nem vákuum van) [1].

A kavitációnak két formája ismert. A stabil – az akusztikus hatás szempontjából elhanyagolható – kavitáció azt jelenti, hogy a képződő buborékok stabilak több kompressziós-expanziós cikluson keresztül. Ezzel szemben az átmeneti vagy tehetetlenségi (tranzien) kavitáció során a buborékok a ciklusok során növekednek, majd egy bizonyos méret elérése után – a buborékban uralkodó nyomás jelentős csökkenése miatt – hevesen összeroppannak (*1. ábra*). Utóbbi eredményeként a folyadékokban lokálisan extrém nagy hőmérsékletek és nyomások alakulnak ki. Konkrét mérések szerint ezek elérhetik az 5500 K (ez a Nap felszíni hőmérséklete) és az 1000 atm értékeket is, ugyanakkor ezek a hatások gyorsan elenyésznek (a hűlési sebesség 10^{10} K/s). Az ultrahang kémiai reakciókra gyakorolt hatásának ilyen értelmezését forró pont (hot spot) modellnek nevezzük. Amennyiben a buborék szilárd felület mentén omlik össze, akkor a buborék ellentétes oldaláról nagy sebességű, túszerű kilövellés indul meg a felület felé (microjet). Ez okozza a kavitáció mechanikai hatását, vagyis szilárd felületek (pl. hajócsavar és szivattyúk, illetve az ultrahangkészülék) erózióját.

A szonokémiának sokféle kémiai alkalmazási lehetősége közül – érdekességük és jelentőségük alapján – két fontos területet emelünk ki, megemlítve azt, hogy legszélesebb körben elsősorban a szerves kémiában használják.

Az ultrahang vízre gyakorolt hatását már 1929-ben vizsgálták és megfigyelték, hogy ilyenkor hidrogénperoxid képződik. Mivel a víz, mint oldószer fontos szerepet tölt be a kémiában, érthető, hogy ezt a területet behatóan tanulmányozták. Ma már ismert, hogy ultrahang hatására vízben – az alábbi, a részletezés és teljesség igénye nélkül bemutatott reakcióban feltüntetett – reaktív részecskék képződnek, amelyek másodlagos, oxidációs folyamatokat indítanak el (a nyíl fölött látható jelet használják kémiai reakciók esetén az ultrahang szimbólumaként). Ez a terület a *vizes szonokémia*.



A másik fontos alkalmazás a *heterogén szonokémia*, amikor két, nem elegyedő fázis között megy végbe kémiai átalakulás. Ezen belül – különösen a szerves kémiában – nagyon gyakori egy folyadékfázisban oldott reagens és szilárd anyag – igen gyakran fém – közötti reakció. A fémek többségének felülete

oxidréteggel borított, ezért a reagens csak e felületi oxidrétegen keresztüli diffúzió révén tud eljutni a fémhez, ami lassú folyamat. Az oxidréteg alatt folyó reakció eredményeként azonban a felületi oxidréteg egy idő után leválik és a szabad fémmel így a továbbiakban már gyors reakció mehet végbe. A reakció lassú kezdeti időszakát indukciós periódusnak nevezzük. Ha ilyen esetekben ultrahangot alkalmazunk, az indukciós periódus jelentősen lerövidül és a reakció sokkal rövidebb idő alatt megy végbe. Az ultrahang ugyanis lényegében gyorsan „megtisztítja” a felületet, vagyis nagyon reaktív, tiszta fémfelületet hoz létre és ez eredményezi a reakciósebesség növekedését. A legfontosabb ilyen alkalmazási lehetőségek a fémorganikus kémia területére esnek, amikor is szerves vegyületek és fémek közötti reakcióval fém-szén kötést tartalmazó vegyületeket szintetizálunk. Ezek többsége igen nagy reaktivitású és ennek eredményeként nagyon széles körben használhatók a szintetikus szerves kémiában. Végezetül érdemes utalni arra is, hogy az ultrahang előidézheti szilárd anyagok (pl. fémek) apródozását (diszpergálódását) is (ez az alkalmazott körülmények és az anyagok tulajdonságai, pl. olvadáspont, függvényében eltérő mértékű lehet). Ennek a heterogén katalízisben lehet nagy jelentősége, ugyanis itt a reakció sebességét befolyásoló egyik legfontosabb tényező a reagensek számára hozzáférhető felület.

Befejezésül érdemes utalni Szalay Sándor munkájának utóéletére is. Ahogy azt *Török István* körültekintő elemzése kimutatta [11], az 1933-ban megjelent publikációra még az utóbbi években is hivatkoznak és nem csak összefoglaló közleményekben. Ez is világosan utal arra, hogy a tudományos közvélemény Szalay Sándor eredményeit tényleg úttörő jelentőségűnek tartja, és valóban úgy tekinthetünk rá, mint az ultrahang kémiai alkalmazásának egyik legelső művelőjére, vagyis a szonokémia egyik úttörőjére.

Köszönetnyilvánítás

A szerző köszönetet mond *Hannus István* egyetemi tanárnak a Szent-Györgyi Albertre vonatkozó dokumentumok rendelkezésre bocsátásáért.

Irodalom

1. Török B., Molnár Á.: Kémiai átalakulások mikrohullámú és szonokémiai aktiválással. *A kémia újabb eredményei*. 82. kötet (szerk. Csákvári Béla). Akadémiai Kiadó, Budapest, 1997, 99–301.
2. Tarnóczy T., *Fizikai Szemle* 22 (1972) 321.
3. J. Thornycroft, S. Barnaby, *Minutes of Proceedings of the Institution of Civil Engineers* 122 (1895) 51.
4. W. T. Richards, A. L. Loomis, *J. Am. Chem. Soc.* 49 (1927) 3086.
5. A. Szalay, *Z. Phys. Chem. A* 164 (1933) 234.
6. S. Brohult, *Nature* 140 (1937) 805.
7. G. Schmid, A. Rommel, *Z. Phys. Chem. A* 185 (1939) 97.
8. R. W. Moss: *Szent-Györgyi Albert*. Typotex, Budapest, 2003.
9. A. Szent-Györgyi, *Nature* 131 (1933) 278.
10. *The New York Times*, Sunday, March 26, 1933.
11. I. Török, *ATOMKI Annual Report* 2006, x–xi; *Természet Világa* (2007. április) 172–174.

A témakörhöz kapcsolódó honlap: <http://www.freeweb.hu/lorincza/labinfo/dokument/7szlabresz.pdf>