

Pontosabban csak részben igaz. Újabban tudományosan is alátámasztott régi tapasztalat, hogy a tudás alkalmazásában nem csak az új ismeretek rögzítésének (ismétlés, gyakorlás) van fontos szerepe, hanem a már rögzült ismeretek előhívásának, mozgósításának (emlékezeti előhívás) is. Az emlékezeti előhívást erősítő tanuláshoz (más szóhasználat: tesztalapú tanuláshoz) az ismeretek hosszú távú rögzítésére és mozgósítására kifejtett pozitív hatását elsősorban a nyelvtanulás és a matematikatanulás esetében vizsgálták [14]. Azok a hallgatói csoportok, akik a matematika-szemináriumokon rögtön az óra végén írták az aznap tanult anyagból a zárthelyi dolgozatokat, sokkal eredményesebbek voltak a félévi megmérettetésen, mint azok, akik mindig a következő óra elején írtak dolgozatot. Úgy tűnik tehát, hogy az óra végi összefoglalás helyett eredményesebb az óra végi „számmonkérés”, akár a Mazur-féle technikával [15] kombinálva. Sajnos, az emlékezeti előhívás módszerének a kémia oktatásában való kipróbálásával kapcsolatban még nagyon szegényes a szakirodalom.

Összegzés

Tisztában vagyok vele, hogy ezeknek a tévhiteknek a felszámolása, korrekciója legalább olyan nehéz, mint a tanulók kémiai tudásában fellelhető tévképzeteké. Talán az egyre több pozitív példa, az ilyen szempontból is „jó gyakorlat” bemutatása, elterjesztése lehet a megoldás. Ehhez viszont ki kell dolgozni az ún. alkalmazásközpontú (kontextusalapú) kémiatanítás gyakorlatát. Ez viszont csak kellően átgondolt, bizonyítékokon alapuló eljárással lehetséges. Ehhez nyújthat segítséget – reményeim szerint – a közelmúltban megjelent két szakmodszertani könyv is [1, 16]. A fejlesztést minél hamarabb el kellene kezdeni, mert a NAT legújabb tervezetében is hangsúlyozottan szerepel a kontextusalapú tananyagfeldolgozás [17].

IRODALOM

- [1] Tóth Z.: Korszerű kémia tantárgy-pedagógia. (Híd a pedagógiai kutatás és a kémiaközpont között) SZAKTÁRNET-könyvek 5. Debreceni Egyetemi Kiadó, Debrecen,



Bár a kémia lényege nem a képlet és a reakcióegyenlet, azért olykor életmentő lehet az alapvető vegyületek képletének ismerete

2015. http://tanarkepzes.unideb.hu/szaktarnet/kiadvanyok/korszeru_kemia_tantargy-pedagogia.pdf (utolsó megtekintés: 2018. 12. 03.)
- [2] Reid, N.: Chemistry Education: Research and Practice in Europe (2000) 1 (3), 381.
- [3] Tóth Z. és Bodnár M.: Iskolakultúra (2004) 14 (1), 106.
- [4] Nakhleh, M. B.: Journal of Chemical Education (1993) 70 (1), 52.
- [5] Nahalka I. és Poór I.: Problémák és feladatok megoldása a fizika tanulása során. In: Radnóti K. és Nahalka I. (szerk.): A fizikatanítás pedagógiája. Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 2002.
- [6] Csapó B. és Szabó G. (szerk.): Tartalmi keretek a természettudományok diagnosztikus értékeléséhez. Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 2012.
- [7] Radnóti K.: Iskolakultúra (2000) 10 (10), 34.
- [8] Tóth Z.: Természet Világa (2009) 140 (19), 25.
- [9] Tóth Z.: Iskolakultúra (2000) 10 (10), 71.
- [10] Tóth Z.: Iskolakultúra (2000) 9 (10), 103.
- [11] Tóth Z.: Magyar Kémikusok Lapja (2016) 71 (11), 334.
- [12] Turányi T. és Tóth Z.: Magyar Kémikusok Lapja (2011) 66 (4), 122.
- [13] Barke, H-D, Hazari, A. és Yitbarek, S.: Misconceptions in Chemistry. Springer, Berlin-Heidelberg, 2009.
- [14] Dobóné Tara É., Sarka L. és Tóth Z.: Magyar Kémikusok Lapja (2016) 71 (11), 353.
- [15] Racsmán M. (2014): Mindennapi Pszichológia (2014) 6(3), 52.
- [16] Tóth Z.: Magyar Kémikusok Lapja (2017) 72 (4), 116.
- [17] Szalay L. (szerk.): A kémiatanítás módszertana. ELTE TTK, Budapest, 2015. <http://ttomc.elte.hu/szervezeti/kemia-szakmodszertani-csoport> (utolsó megtekintés: 2018. 12. 20.)
- [18] A Nemzeti alaptanterv tervezete (2018. 08. 31.) <https://www.oktatasi2030.hu> (utolsó megtekintés: 2019. 01. 09.)

Braun Tibor

■ ELTE Kémiai Intézet

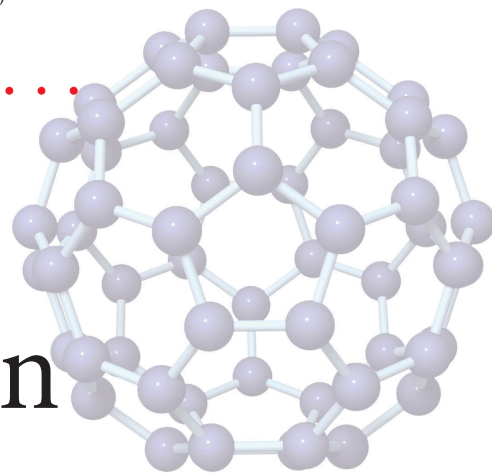
■ MTA Könyvtár és Informatikai Központ | braun@mail.iif.hu

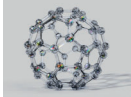
A fullerén-paradoxon

Általában azzal szoktunk kezdeni, hogy vázoljuk, tanulmányunk miről szól, mivel foglalkozik. Ezúttal annyiban térünk el a szokásostól, hogy említést teszünk arról, amivel nem fogunk foglalkozni. Ugyanis véleményünk szerint a fullerének szakirodalma tengernyi, és nem látjuk értelmét, hogy még csak kivonatossan is ismertessük. Nem tudjuk azonban elkerülni, hogy egy nagyon rövid áttekintéssel azért ne foglalkozzunk, és ne említsünk a fullerénekről publikált néhány alpművet. [1–9]

1985 őszen angol és egyesült államokbeli kutatók elindultak

egy úton, amelyről remélték, hogy elvezeti őket a csillagközi teretek kémiai összetételének jobb megismeréséhez. Mint kiderült, az út nem oda, hanem a C₆₀-molekula és társai, illetve a fullerének felfedezéséhez vezetett. Ez a felfedezés, persze, pozitív értelemben megrengette a kémia világát, és talán nem túlzás, a természettudományok egészének világát is. A kutatási úti célok, illetve az érkezők helyének út közbeni változása nem ritka jelenség a tudományban. Az angol nyelv e jelenség elemzésére egy szakszót alkotott, a lefordíthatatlan *serendipityt*. E szó képessé-





get jelent értékes dolgok megtalálására ott, ahol kevésbé valószínű. És ha már szavak értelmezésénél tartunk, említsük meg a *paradoxon* fogalmát is. Paradoxon alatt állítások olyan halmazát értjük, amelyek ellentmondásra vezetnek, vagy a józan észnek ellentmondó következtetés vonható le belőlük. Görög szó, amiben a *para* görögül az ellentétet, a *doxa* a véleményt jelenti.

Végleg elkerülhetetlen, hogy ne emeljük ki azt a tanulmányt, amely 1985-ben forradalmi útjára indította a kémia tudományát. [10] Lehetetlen elmenni amellett, hogy ez utóbbi cikknél rövidebbet és tömörebbet keveset ismer a tudományos kutatás szakirodalmába.

Az előbbieken a forradalomról tettünk említést a kémiában. Kuhn nagy jelentőségű műve [11] óta a tudományos kutatásnak két típusát szokás megkülönböztetni, egyrészt a feladatmegoldó, egy paradigmarendszer keretén belül folytatott vizsgálatokra, másrészt a paradigmarendszert kisebb, vagy nagyobb mértékben megváltoztatni kényszerítő eredményekre, azaz tudományos forradalmakhoz vezető kutatásokra. A paradigma fogalma Kuhnál sem teljesen egyértelmű, egyik kritikusa kimutatta, hogy több mint húszféle jelentésben használta. Talán a legkifejezőbb, ha azt mondjuk, hogy az a forradalmi jelentőségű felfedezés, amelynek nyomán át kell írni a tankönyveket. A legnagyobb jelentőségű felfedezések esetén nem csupán az egyetemi, hanem a középiskolai tankönyvek is átírára szorulnak. A kizárólag szénatomokból álló kalitkamolekulák, a fullerének és származékaik felfedezése nyilván ilyen jellegű felfedezés. 1985 óta nem szabad azt tanítani, hogy a kristályos szénnek csak két allotróp módosulata, a grafitot és a gyémántot ismerjük. Ennek a felfedezésnek a jelentősége azonban messze túlnő azon, hogy egy sereg új szénmódosulatot ismertünk meg. Ismételjük, hogy itt egyáltalán nem foglalkozunk a szén nanocsövekkel és a grafénnal. Az egyesült államokbeli *Science Watch* című folyóirat szerint a fullerénkutatás az 1990-es években a kémiai kutatás egyik legintenzívebben művelt területe volt, eredményei jelentősen gyarapították természettudományi tudásunkat és sok alkalmazását javasolták (1. ábra).

A fentiekkel szemben azonban felvetődött az a kérdés, hogy jelentős tudás- és ismeretgyarapító jellege mellett származott-e a C_{60} -ból olyan iparilag olcsón előállított termék, ami használható a mindennapi gyakorlati életben? Az e cikkben felsorolt hivatkozásokban [1–9] rendkívül sok példát találunk a C_{60} és társaival kapcsolatos alapkutatásokról és felfedezésekről. De ezekben sajnos a már említett gyakorlati felhasználás kérdéseire nem volt válasz.

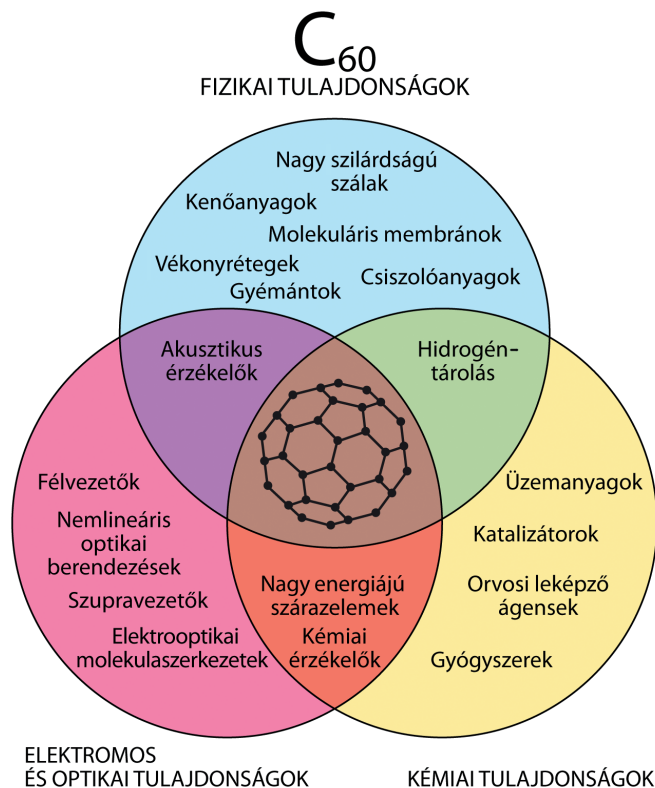
Sőt, a továbbiakban szó szerint kell idéznünk néhány negatív felvetést:

„A fullerénkutatásnak eddig nem sikerült elérnie a remélt kereskedelmi potenciálját.” (Fullerene research has so far failed to develop the commercial potential hoped for. [12])

„A C_{60} és rokonainak egyedülálló fizikai és kémiai tulajdonságai feltevéseket tápláltak számos lehetséges felhasználásról, de termékek eddig nem valósultak meg.” (Unique physical and chemical properties of C_{60} and its cousins have fuelled speculations on many possible uses, but products haven't yet materialized. [13])

„Az 1985-ben felfedezett futball-labda alakú fulleréneknek eddig korlátozott hatása volt az iparra.” (The in 1985 discovered football-shaped fullerenes have so far had a limited impact on industry. [14])

A fentiek kiegészítésére a következőkben szó szerint idézzük egy meglepő helyen, éspedig a brit felsőházban, más néven a



1. ábra. A C_{60} fizikai, kémiai tulajdonságai és javasolt alkalmazásai [7]

Lordok Házában 1991. december 10-én „Buckminster Fullerenek: kutatási támogatás” címmel jegyzőkönyvileg nyilvántartott 4 perces vita szövegét: [15]

„Lord Errol of Hale megkérdezi őfelsége kormányát: Milyen lépéseket terveznek a buckminsterfullerén alkalmazásának elősegítésére a kutatásban és az iparban?

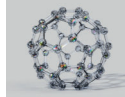
Lord Reay (a Kereskedelmi és Ipari Minisztérium államtitkár-helyettese): Nemes uraim, a kormány érdeklődéssel követte a buckminsterfullerén felfedezését és a Tudományos és Technológiai Kutatási Tanács (Science and Engineering Research Council, SERC) keresztül támogatja a Sussexi Egyetemen jelenleg ilyen irányban folyó kutatásokat. Azonban az ipari vállalatok döntésére bízom, hogy kívánnak-e kutatást folytatni a buckminsterfullerén és más fullerének kereskedelmi alkalmazásáról.

Lord Errol of Hale: Nemes uraim, köszönöm nemes barátom választát, amely csak részben kielégítő. Nem lenne-e országunkban lehetőség e nagyon sokat ígérő új szénváltozat továbbfejlesztésének még hathatósabb támogatására? Ugyanis azt már gyártják nem kevesebb, mint három egyesült államokbeli üzemben.

Lord Reay: Nemes uraim, mint említettem, a kormányzat folytatja a buckminsterfullerénnel kapcsolatos alapkutatás támogatását a Sussexi Egyetemen. 1986 óta több más pályázati támogatást is jóváhagyott e témában való kutatásra. A SERC támogat több olyan kutatót is, akik a fullerénekkel kapcsolatos kémiai kötések elméleti kérdéseivel foglalkoznak. Továbbá kormányzati támogatás várható a fullerénekkel kapcsolatos alapkutatások és az ipari kutatások közötti együttműködésre, kereskedelmi alkalmazások kifejlesztésére.

Sear bárónő: Nemes uraim, nézzék el tudatlanságomat, de megmondhatná a nemes Lord, hogy ez a valami állati, növényi vagy ásványi anyag-e?

Lord Reay: Nemes uraim, örülök, hogy a nemes bárónő feltette ezt a kérdést. Így elmondhatom, hogy a buckminsterfullerén



rén egy 60 szénatomból álló molekula, amit a vegyészek C_{60} -ként ismernek. Ezek az atomok 12 ötszögből és 20 hatszögből álló zárt kalitkát képeznek, vagyis futball-labdaszerű idomná állnak össze.

Lord Williams of Elvel: Nemes uraim, e válasz kiegészítése-ként kérdelem, hogy tudatában van-e a nemes Lord annak, hogy valamilyen különleges oknál fogva ez a futball-labda formájú molekula „buckyball” néven is ismeretes és, hogy felfedezése jelentős felbuzdulást okozott a tudományos közösségben. Mivel a „Brit Technológiai Csoport”-ot (British Technologic Group, BTG) a közelmúltban privatizálták, vagy rövidesen privatizálni fogják, nem lenne-e időszerű a privatizált BTG részéről, hogy a C_{60} -at átvegye és brit találmányként terjessze?

Lord Reay: Nemes uraim, a privatizált BTG meghozhatja ezt a döntést. Úgy véljük azonban, hogy nem a kormányzat dolga, hogy eldöntse, vannak-e a buckminsterfullerénnek kereskedelmi alkalmazásai, illetve, hogy a vállalatoknak foglalkozniuk kell-e ezzel a kérdéssel. Ezt rájuk kell bízni.

Lord Renton: Nemes uraim, a molekula rögbilabda vagy futball-labda formájú?

Lord Reay: Úgy vélem, hogy futball-labda formájú. Kroto professzor, akinek kutatócsoportja jelentős szerepet játszott a buckminsterfullerén felfedezésében, úgy jellemezte, hogy mérete úgy viszonyul egy futball-labdához, mint ahogyan ez utóbbi mérete viszonyul a földgolyó méretéhez. Más szavakkal, ez egy rendkívül kis molekula.

Lord Campbell of Alloway: Nemes uraim, és mire alkalmazható?

Lord Reay: Nemes uraim, feltételezik, hogy többféle alkalmazása lehetséges, például akkumulátorokban, kenőanyagként vagy félvezetőként. De mindez spekuláció. Kiderülhet, hogy semmire sem alkalmazható.

Lord Russell: Nemes uraim, mondhatjuk akkor azt, hogy semmi különösre nem alkalmazható, de arra nagyon?

Lord Reay: Nemes uraim, ez nagyon lehetséges.”

A Lordok Házában folytatott vita rendkívül előrelátónak bizonyult a fulleréntudomány szempontjából, de külön hangsúlyozhatjuk, hogy az ott elhangzott Lord Russel-féle válasz nem oldja fel a fullerén-paradoxont. Azzal kell befejeznünk, hogy a múlt alapján mindmáig érvényes a fullerén-paradoxon. A jövő halvány, ködös körvonalazása érdekében talán hivatkozhatunk egy nemrég megjelent dolgozatra, amiben elhangzott a fullerének gyakorlati, ipari alkalmazásával kapcsolatban a „reneszánsz” (új-jászületés) szó [16] kiegészítve azzal, hogy az ott leírt terméknek nagy üzleti jövőt remélnek 2023-ig. [17] Arra is hivatkozhatunk, hogy az alapismeretek és a tudásgyarpodás terén 2017-ben 2534 fullerénkutatással foglalkozó cikket publikáltak a világ tudományos folyóirataiban. [18]

Végül meg kell említsük, hogy a fentiekkel kapcsolatos fullerén-paradoxonról e-mailben megkérdeztük Eiji Osawa japán kutató véleményét. Eiji Osawa [19] az a világhírű kutató, aki 1970-ben, tehát Kroto és társai [10] előtt, elméleti szerves kémiai számítások alapján felfedezte és leírta a C_{60} molekulát. [20] Felfedezését egy japán nyelvű folyóiratban publikálta is. A japán cikke a nyelv miatt a világon senki sem figyelt fel, így rögtön feledésbe is merült, és csak Krotóék cikkének megjelenése után vettek róla tudomást, de akkor már késő volt: Osawa kimaradt az 1996. évi kémiai Nobel-díjból, amit a fullerének felfedezéséért az angol Krotónak, az észak-amerikai Smalley-nek és Curl-nek ítéltek.

Kérdésekre Eiji Osawa még aznap e-mailben válaszolt. A hi-telesség kedvéért angol nyelvű válaszát itt ismertetjük. „As to

your interesting question, I have also devoted considerable time and thoughts to it. I have also published a few related papers, but my actual answer is more direct and simple. Fullerene C_{60} stopped to attract interests of scientists simply because its formation mechanism still remains unknown. Without the atomistic mechanism cleared, we cannot increase the yields (now very poor, less than 1%) and the costs remain high making fullerenes and carbon nanotubes forbiddingly high. Harry Kroto left C_{60} one year after me and passed away without knowing the mysterious mechanism. We still have a chance to see someone else solving the problem. Why does the formation mechanism of C_{60} take so long time to solve? I think we are still not good enough to solve all of the existing problems. However, time will come when we will be able to solve it.

I like Lord Russel's answer. He is not answering the question but amuses us well. Anything on earth could be better.”

(Ami érdekes kérdésedet illeti, jómagam is jelentős időt és gondolkodást szenteltem neki. Néhány cikket is publikáltam róla, de jelen válaszom egyszerűbb, közvetlenebb. A kutatók érdeklődését a C_{60} iránt az állította le, hogy képződésének mechanizmusa még mindig ismeretlen. Az atomi mechanizmus felderítése nélkül nem tudjuk növelni a kitermelést, ami jelenleg nagyon alacsony, 1%-nál kevesebb. Így a fullerének és szén nanocsövek előállításai költségei megengedhetetlenül magasak maradnak. Harry Kroto egy évvel utánam hagyta abba a C_{60} -kutatást. Majd elhunyt anélkül, hogy megismerte volna rejtélyes képződési mechanizmusát. Nekünk még mindig megvan a reményünk arra, hogy megérjük, valaki megoldja a kérdést. Miért tart ennyi ideig a C_{60} -képződés mechanizmusának megoldása? Úgy vélem, hogy még mindig nem vagyunk elég jók az összes kérdés megoldásához. De eljön az idő, amikor megoldjuk.

Tetszik Lord Russel válasza. Ugyan nem oldotta meg a kérdést, de szórakoztatott. Minden a Földön csak ennél jobb lehet.”)

Plautusra hivatkozva: *sapienti sat.*



IRODALOM

- [1] F. Langa, J. F. Nierengarten, Fullerenes, Principles and Applications, RSC Publishing, London, 2007.
- [2] M. S. Dresselhaus, G. Dresselhaus, P. T. Eklund, Science of Fullerenes and Carbon Nanotubes, Elsevier Inc., Amsterdam, 1996.
- [3] P. W. Fowler, D. E. Manopoulos, An Atlas of Fullerenes, Dover Publ., 2007.
- [4] K. M. Kadish, R. S. Gruoff, Fullerenes, Chemistry, Physics and Technology, J. Wiley & Sons, 2000.
- [5] A. Hirsch, The Chemistry of the Fullerenes, Wiley CH Verlag GmbH, 2002.
- [6] R. Taylor, Lecture Notes of Fullerene Chemistry, University of Sussex Press, Sussex, 1999.
- [7] Braun Tibor, A káprázatos C_{60} molekula, Akadémiai Kiadó, Budapest, 1996.
- [8] Braun Tibor, Szénszférák zenéje. Fullerénkémiai kalandozások, Akadémiai Kiadó, Budapest, 2000.
- [9] T. Braun, A. P. Schubert, R. N. Kostoff, Chem.Rev. (2000) 100, 23.
- [10] M. H. Kroto, J. R. Heath, S. C. O'Brian, R. F. Curl, L. E. Smalley, Nature (1985) 318, 162.
- [11] T. S. Kuhn, The Structure of Scientific Revolutions, University of Chicago Press, Chicago, 1961.
- [12] R. Michalitsch, Chr. Kallinger, Y. Voorhandt, V. Veefreind, S. R. Moethner, Nanotechnol., Law Business (2008) 5, 85.
- [13] R. M. Baekke, Chem.Eng.News (1993) 74, 8.
- [14] R. Van Noorden, Nature (2011) 419, 14.
- [15] H. Aldersey-Williams, The Most Beautiful Molecule. An Advance in Chemistry, Aurum Press, London, 1995.
- [16] T. Gatti, E. Menna, M. Meneghetti, M. Maggini, Nanoenergy (2017) 41, 84.
- [17] Perovskite solar cells market 2018–2023: Key vendors landscape, opportunities, challenges, and drivers, analysis, type, application. The West Bulletin, 2018, Friday, November 9.
- [18] L. Leydersdorff, Amsterdam, magánközlés e-mailben.
- [19] https://en.wikipedia.org/wiki/Eiji_Osawa
- [20] E. Osawa, Kagaku (1970) 25, 854.
- [21] E. Osawa, magánközlés e-mailben.