

PERIODICITÁS A TERMÉSZETTUDOMÁNYOKBAN – MENGYELEJEV ÖRÖKSÉGE

PERIODICITY IN NATURAL SCIENCES – MENDELEEV'S LEGACY

Maksay Gábor

a biológiai tudomány doktora, Természettudományi Kutatóközpont
maksay.gabor@ttk.hu

ÖSSZEFOGLALÁS

Dmitrij Mengyelejev 150 éve fedezte fel a kémiai elemek periodicitását. A jubileum kereteit kiterjesztve, áttekintjük a természettudományokban felfedezett periodicitásokat, elsősorban a fizikai kémiában, biokémiában és biológiában. Az élettanilag fontos elemek elkülönülő csoportokban helyezkednek el a periódusos rendszerben, mely rendszer a kémia oktatásának mindmáig alapja. A természet biopolimerei, a fehérjék és nukleinsavak gazdaságosan épülnek fel; homológ építőkövekből, periodikus láncokon át; növekvő stabilitással, szimmetriával és hierarchiával. A fehérjék negyedleges komplexei az alegységek száma és szimmetriájuk szerint periódusos rendszerbe illeszthetők. Az időbeli periodicitás *chemoton* modellje kapcsolatot teremt a kémiai és biológiai evolúció között. A biofázis ciklikus folyamatai a geofázis periódusaihoz illeszkednek. Bizonyos szervek (például: szárny, szem) rekurrens módon, periodikusan és hasonló formában újra megjelennek a törzsfejlődés különböző szintjein. A fizikai anyagforma belső kölcsönhatásainak periódusait és frekvenciáit a biológiai anyagforma felé haladva egyre inkább elfedik a környezeti kölcsönhatások.

ABSTRACT

Dmitri Mendeleev discovered the periodicity of chemical elements 150 years ago. Beyond the scope of the jubilee we have overviewed periodicities discovered in natural sciences, particularly in physical chemistry, biochemistry and biology. The physiologically important elements are situated in separate groups in the periodic table which has since been the basis of teaching chemistry. Nature builds up its biopolymers, proteins and nucleic acids economically; through periodic chains; with increasing stability, symmetry and hierarchy. The quaternary protein complexes can be put in a periodic table according to the number of their subunits and symmetry. The *chemoton* model of temporal periodicity is a link between chemical and biological evolutions. Cyclic processes in the biophase fit in the periods of the geophase. Certain organs (e.g. wing and eye) show up in recurrent manner, periodically and in similar forms at different levels of evolution. The periods and frequencies of the physical type of matter are disguised by environmental interactions more and more towards the biological type of matter.

Kulcsszavak: elemek periódusos rendszere, Mengyelejev, fehérjék, DNS, szimmetria

Keywords: periodic table of chemical elements, Mendeleev, proteins, DNA, symmetry

FIZIKAI KÉMIAI PERIODICITÁS

A kémiai elemek periódusos rendszere, melyet Dmitrij Ivanovics Mengyelejev orosz kémikus ismert fel 1869-ben, mindmáig a kémia oktatásának alapvető eszköze. De vajon átlátjuk-e egészen tudományos és kulturális jelentőségét? Az UNESCO az idei évet a kémiai elemek periódusos rendszerének szentelte a másfél évszázados jubileum tiszteletére (1. ábra). A *Nature* és *Science* 2019. januári számaiban több cikk is foglalkozik a jubileummal. Az Általános és Alkalmazott Kémia XXI. Jubileumi Mengyelejev Kongresszusát Szentpéterváron tartották 2019 szeptemberében. A Nemzetközi Csillagászati Unió pedig *The Periodic Table through Space and Time* címmel tartott kapcsolódó szimpóziumot.



1. ábra. Az UNESCO emblémája a kémiai elemek periodikus rendszere éve és Mengyelejev tiszteletére (URL1)

A tudományos kutatás igyekszik a felismeréseket és összefüggéseket rendszerbe illeszteni. Carl von Linné a 18. században rendszerbe foglalta a növényeket és állatokat. Miután pedig a 19. században sikerült világosan megkülönböztetni a kémiai elemeket és vegyületeket, Mengyelejev felismerte, hogy az elemek tulajdonságai periodikusan ismétlődnek az atomtömeg függvényében. Ennek alapján sorokba és oszlopokba rendezte az akkor ismert hatvanhárom elemet. Mások hasonló rendszereit meghaladóan Mengyelejev a periódusos rendszere alapján megjósolta új elemek létezését és tulajdonságait is. Ezeknek az elemeknek a felfedezése hamarosan igazolta rendszere érvényességét. Voltak persze ellentmon-

dónak látszó felfedezések is: például a nemesgázok számára új oszlopot kellett a rendszerbe illeszteni.

Mengyelejev valóban a kémia alapvető rendszerét ismerte fel. A rendszer alapvető jellegzetessége a periodicitás, periodikusan változó paraméterek (atomsugár, ionizációs energia, elektronegativitás, elektronaffinitás, fémes jelleg) határozzák meg az elemek tulajdonságait és kémiai reaktivitását.

Sok természeti jelenség, folyamat ciklikus, meghatározott sorrendben és időben ismétlődik. Mengyelejev periódusos rendszere volt az első, amelyik az anyag szerkezetében és minőségében mutatott ki periodicitást. Az aktinoidák bővülésével ma már 118 elemet tartalmaz a periódusos rendszer. De ezeknek a magfúzióval előállított szupernehéz elemeknek az élettartama rendkívül rövid, és tulajdonságaik periodicitása gyengül (Scerri, 1998). A periódusos rendszernek számos változata van. Kisebb-nagyobb anomáliáinak értelmezése apróbb módosulásokat eredményezhet még, de gyakorlatilag véglegesnek tűnik.

hidrogén 1 H 1.0079																hélium 2 He 4.0026																			
lítium 3 Li 6.941				berillium 4 Be 9.0122								boron 5 B 10.811		szén 6 C 12.011		nitrogén 7 N 14.007		oxigén 8 O 15.999		fluorin 9 F 18.998		neon 10 Ne 20.180													
jódium 11 Na 22.990				magnézium 12 Mg 24.305								alumínium 13 Al 26.982		silícium 14 Si 28.086		foszfor 15 P 30.974		szulfur 16 S 32.065		klorin 17 Cl 35.453		argon 18 Ar 39.948													
potassium 19 K 39.098		calcium 20 Ca 40.078		scandium 21 Sc 44.956		titanium 22 Ti 47.867		vanádium 23 V 50.942		chromium 24 Cr 51.996		mangán 25 Mn 54.938		vas 26 Fe 55.845		kobalt 27 Co 58.933		nikkel 28 Ni 58.693		réz 29 Cu 63.546		cink 30 Zn 65.38		galium 31 Ga 69.723		germánium 32 Ge 72.64		arsén 33 As 74.922		szelén 34 Se 78.96		bromin 35 Br 79.904		krypton 36 Kr 83.798	
rubídium 37 Rb 85.468		strontium 38 Sr 87.62		yttrium 39 Y 88.906		zincium 40 Zr 91.224		nióbium 41 Nb 92.906		molibdénium 42 Mo 95.94		technécium 43 Tc 98		rúthénium 44 Ru 101.07		rhódium 45 Rh 102.91		palládium 46 Pd 106.42		ezüst 47 Ag 107.87		cadmium 48 Cd 112.41		indium 49 In 114.82		antimon 50 Sb 118.71		tellúr 51 Te 127.60		jódiin 52 I 126.90		xenon 53 Xe 131.29			
caesium 55 Cs 132.91		barium 56 Ba 137.33		hélium 72 He 4.0026		litium 73 Li 6.941		berillium 74 Be 9.0122		boron 75 B 10.811		szén 76 C 12.011		nitrogén 77 N 14.007		oxigén 78 O 15.999		fluorin 79 F 18.998		neon 80 Ne 20.180		szilícium 81 Si 28.086		foszfor 82 P 30.974		szulfur 83 S 32.065		klorin 84 Cl 35.453		argon 85 Ar 39.948		krypton 86 Kr 83.798			
francium 87 Fr		radium 88 Ra		rutherfordium 104 Rf		dubnium 105 Db		seaborgium 106 Sg		bohrium 107 Bh		hasznium 108 Hs		meitnerium 109 Mt		darmstadtium 110 Ds		roentgenium 111 Rg		copernicium 112 Cn		nihonium 113 Nh		flerovium 114 Fl		moscovium 115 Mc		livermorium 116 Lv		tennessin 117 Ts		oganeszon 118 Og			
lanthanum 57 La 138.91		cerium 58 Ce 140.12		praseodymium 59 Pr 140.91		neodymium 60 Nd 144.24		promethium 61 Pm		samarium 62 Sm 151.96		europium 63 Eu 151.96		gadolinium 64 Gd 157.25		terbium 65 Tb 158.93		dysprosium 66 Dy 162.50		holmium 67 Ho 164.93		erbium 68 Er 167.26		tulium 69 Tm 168.93		ytterbium 70 Yb 173.05		lutetium 71 Lu 174.97							
actinium 89 Ac		thorium 90 Th 232.04		protactinium 91 Pa 231.04		uránium 92 U 238.03		neptunium 93 Np		plutonium 94 Pu		americium 95 Am		curium 96 Cm		berkelium 97 Bk		californium 98 Cf		einsteinium 99 Es		fermium 100 Fm		mendelevium 101 Md		nobelium 102 No		lawrencium 103 Lr							

2. ábra. A kémiai elemek periódusos rendszere és biokémiai relevanciája (Az esszenciálisan szükséges 28 elem szürke árnyalata mennyiségi viszonyait tükrözi az élő szervezetekben. A nyomelemek halványoszürkék.)

(saját szerkesztés Jonsson et al., 2017 alapján)

Mengyelejev periódusos rendszere inspirálta Joseph John Thompson, Wolfgang Pauli és Niels Bohr atommodelljét fél évszázaddal később. Mai szemmel az atomszerkezet és elektronhéjainak ismeretében az atomok protonjaik száma, azaz

rendszámuk alapján rendezhetők sorba, és az egyes elektronhéjak telítődése után kerülnek a következő sorba. A periódusos rendszer független változója mennyiségi jellegű lépcsőzetes függvény, a függő változó pedig a minőség változása periodikusan; úgy, hogy a hasonló tulajdonságúak azonos oszlopba kerülnek. A rendszer komplexitásában a hierarchia szintjeit az elektronhéjak (*s*, *d*, *f*, *g*, *h*, *i*) jelentik, mégpedig hagyományosan elrendezésben: az első periódus az *s* héj, a második a *d* stb. Az elemek periódusos rendszere az atomok elektronkonfigurációjának periodicitását tükrözi. Az atom reaktivitását főképpen a külső héj vegyértékelektronjai, ezek a szimmetrikus vegyértékorbitálok határozzák meg.

Vegyületek (két- és háromatomos molekulák, aromás szénhidrogének) rendszerezését is megpróbálták. Kevés eredménnyel, mert itt a független változó nem lineárisan változik.

Figyelemre méltó, hogy az élővilág esszenciális alkotóelemei: szén, nitrogén, oxigén, foszfor és kén (C, N, O, P és S), a hidrogén kivételével, azonos csoportban található a periódusos rendszer jobb felső sarkában (2. ábra). Ugyanitt található a klór (Cl), amely anionként esszenciális. Másrészt az esszenciális kationok elemei (Na, K, Mg és Ca) a rendszer bal oldalán tömörülnek, a hidrogén alatt, amelynek kationja hasonló tulajdonságú. A többi, különböző funkciójú elem is különálló csoportokat alkot a rendszerben. Ez a hasonló kémiai tulajdonságok megnyilvánulása hasonló funkciókban.

A periodicitás és gyakoriság kiegészítő fogalmak. Időben, a fizikában ezáltal, a reciprok periódus a frekvencia, az egységnyi időre jutó periódusok mennyisége. A szerkezeti és időbeli periodicitás összefüggése feltehetőleg az anyag kettős (korpuszkuláris és hullám-) természetéből ered. Például az elektron szimmetrikus pályákat tölt be, mindazonáltal perdülete van. Terveztek már alacsony hőmérsékleten csapdázott ionokkal tér-idő kristályokat is, amelyeknek szerkezete térben és időben periodikus (Liu–Dwi–Nugroho, 2012).

A fizikai folyamatok minden szintjén megfigyelhető a pontos frekvencia; az elemi részecskéktől a Naprendszerig.

BIOKÉMIAI PERIODICITÁS

A biológiai szervezetekben a fehérjék meghatározó helyzetben vannak. A szerkezeti proteinekben (kollagén, keratin, selyem) sok periodikusan ismétlődő aminosav-szekvencia található. A peptidlánc ismétlődő savamid kötéseiben a C- és N-atomok vegyértékeinek szögparái periodikusan ismétlődő másodlagos szerkezeteket (hélix, β -redő) határoznak meg, amelyek – például hidrogénhidakkal – harmadlagos szerkezetté feltekeredve rögzülnek. A funkcionális fehérjékben (transzkripciós faktorok, receptorok, ioncsatornák, hisztonok) szerkezeti domének ismétlődnek. A domén a fehérje harmadlagos szerkezetének funkcionális egysége;

van például tetratrikopeptid, ankyrin és β -propeller. Megpróbálták formalizálni a fehérjék másodlagos és harmadlagos kölcsönhatásait, hogy topológiájukat automatikusan lehessen definiálni és periódusos rendszerbe foglalni (Taylor, 2002).

A fehérjék szerkezeti hierarchiája sokrétű. Az alegységek (harmadlagos szerkezetű peptidláncok) egymással szimmetrikus kvaterner komplexeket hoznak létre (például: szuperhélix, csavart csavar). A szignáloszómáknak nevezett kvaterner komplexek nagy méretük miatt jelátviteli sejttestescskéknek tekinthetők (Maksay–Marsh, 2017). Sebastian E. Ahnert és munkatársai (2015) periódusos rendszerbe foglalták a kvaterner proteineket több száz szerkezet topográfiája és alegységeik kontaktfelületének elemzése alapján. Az egyik tengelyen különböző alegységek száma szerepel, a másikon pedig szimmetrikus ismétlődéseik száma. Az egyes cellákban pedig sémás szerkezetük van. Azonos alegységek fej-láb kapcsolódással forgási szimmetriájú komplexeket képeznek, a fej-fej és láb-láb kapcsolódások pedig diéderes szimmetriát eredményeznek. Ez a szerkezeti periódusos rendszer már új szerkezetek predikciójára és az ismertek besorolásának korrekciójára is alkalmas (Ahnert et al., 2015).

A sejtmembránba ágyazott ioncsatornák és transzporterek felelősek a sejt ionháztartása, ingerelhetősége és anyagcseréje folyamataiért. Ezek a henger- és tükörszimmetrikus fehérjék periodikusan és ciklikusan váltakoznak nyitott és zárt állapotú szerkezetek között. Fizikai (elektromos) és kémiai inger (ligandumok kötődése) szimmetriasértő szerkezetváltoztatással hoz létre nyitott állapotot (Maksay–Tőke, 2014).

Általánosan megfogalmazható, hogy a hierarchia alacsonyabb szintjének szerkezeti tulajdonságai határozzák meg a hierarchia magasabb szintjének szerkezetét. Következésképp az új fehérjelánc feltekeredése (folding) meghatározott útvonalon közelít stabil natív szerkezetéhez. Ez aztán periodikusan oszcillál a funkcionális (például az előbbi nyitott és zárt) állapotok között.

A fehérjelánc periodikus β -redői oda-vissza, párhuzamosan β -lemezbe rendeződhetnek, majd növekvő hierarchiával és szimmetriával stabilizálódnak. Alzheimer-kórban és hasonló neurodegeneratív betegségekben ilyen szerkezetű β -amiloid rostok keletkeznek az agyban. Ezek a fehérjék legstabilabb szerkezetei, amelyekből nincs visszaút...

A nukleinsavak szerkezete a fehérjékhez hasonlóan periodikus és hierarchikus. Az elsődleges szerkezet a váltakozó dezoxiribóz (cukor) és foszfodiészter egységek láncolata. A cukorhoz négyféle nukleobázis (adenin, citozin, guanin és timin) kapcsolódik. A négyféle cukor-foszfát-bázis egység közös neve nukleotid. A másodlagos szerkezetben két lánc között a bázisok hidrogénhidakkal kapcsolódnak. A bázisok szerkezete csak timin-adenin és citozin-guanin párkapcsolatot tesz lehetővé. A harmadlagos szerkezet a dupla hélix, amelyben a bázispárok csigalépcsőként helyezkednek el. A negyedleges szerkezetben a dupla hélixek tovább tekeredhetnek egymással (például szuperhélix).

A transzpozon olyan DNS-szakasz, amelyik önmaga lemásolásával a DNS több helyén is beilleszkedve fokozza a periodicitást. A palindrom pedig olyan DNS-szakasz, amelyik visszafelé azonos sorrendű, tehát szimmetrikus. A DNS halmozottan előforduló, szabályos közökkel elválasztott rövid palindromikus ismétlődései (Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats, CRISPR) a génszerkesztés beláthatatlan perspektíváit nyitották meg.

Összefoglalva, a természet legfontosabb biopolimerei (fehérjék, nukleinsavak, szénhidrátok) hasonló elvek szerint épülnek fel. Gazdaságosan, homológ építőkövekből, periodikus láncokon át; növekvő stabilitással, szimmetriával és hierarchiával jutnak el szinte végtelen szerkezeti változatosságig.

BIOLÓGIAI PERIODICITÁS

Gánti Tibor *chemoton* elmélete hidat képez a kémiai és biológiai periodicitás között (Gánti, 2002). A *chemoton* az élet minimálrendszere. Három autokatalitikus alrendszert tartalmaz sztöchiometrikusan, megszabott arányban csatolva. A *chemoton* önszerveződő fluid automata, amely stabil, szaporodik és evolúcióképes. Következésképpen az időbeli biológiai periodicitás a prebiotikus evolúcióból ered.

Az élő szervezetekben hasonlóan, periodikus és összehangolt körfolyamatokba rendeződik az önfenntartás, reprodukció, a szükséges vegyületek előállítása és lebontása. Az energiatermelés biológiai oxidációval történik, amely egymáshoz kapcsolódó periodikus folyamatokra épül. Például a gerincesek tüdeje periodikusan veszi fel az oxigént; a szív ciklikusan adja tovább a vér hemoglobinjához kötött oxigént a szerveknek, amelyekben a citrátciklus és a kapcsolódó oxidatív foszforiláció energiatároló vegyületek (ATP) szintéziséhez vezet.

A biológiai rendszereket és evolúciójukat befolyásolják a geoszféra és bioszféra ciklikus folyamatai: a cirkadián ciklus, az évszakok stb. Az élő szervezetek epigenetikus és periodikus hormonális szabályozással alkalmazkodnak a ciklikusan változó fény- és hőmérsékleti viszonyokhoz.

Kérdéses, hogy a biológiai periodicitás vizsgálatában mi tekinthető független változónak. Antonio Lima-de-Faria az evolúció és rendszertan alapján vizsgálta az egyes rendszertani csoportok funkcióit, tehát a minőségi változások periodicitását (1997, 2018). A független változóban tehát megjelenik az idő is. A biológiai evolúció rekurrens jellegét számos ismételtelen megjelenő szerv és funkció igazolja, például a lumineszcencia, látás, regeneráció, placenta, pénisz és a mentális képességek ismételtelen felbukkannak a törzsféjlődés különböző szintjein (Lima-de-Faria, 2018). A placenta eltérő komplexitású rendszertani szinteken jelenik meg: növényekben(!), gerinctelenekben és emlősökben, számos faj hasonló szárnyakkal repül, pedig a szervezettségük különféle. Lima-de-Faria (1997, 2018) a rekurrens evolúcióban laza periodicitást vél felfedezni.

Nemkódoló RNS-ek szabályozzák a DNS-ek aktivitását, a fehérjékre átírást. A genomban kódolt bizonyos funkciók az életkörülmények változása következtében egyes fajoknál szükségtelenné válnak, és gátlódnak, másoknál újra előnyössé válhatnak, és expresszálnak, kifejezésre jutnak. Így az evolúciónak nem kell újra és újra felfedezni, és működésképtelen átmeneti formákon át stabilizálni egy-egy funkciót. Úgy tűnik, hogy az evolúció szükség esetén (időközönként) a faj fenntartásához előnyös funkciókat expresszál (Lima-de-Faria, 2018).

Lima-de-Faria (1997, 2018) még tovább megy, és a periodikus rekurenciát az elemek periódusos rendszerére és a fejlebb említett elemcsoportosulásokra vezeti vissza. Okozati összefüggést lát az ásványok kristályszerkezeti és az élővilág morfológiai szimmetriái között is (Lima-de-Faria, 1997). Bilaterális tükrös szimmetria jellemzi a kontakt ikerkristályokat és minden gerinces fajt. A természetben mindenhol megtalálható szimmetria az anyagszerkezet szimmetriájának megnyilvánulása. A jégkristályok hatfogású forgási szimmetriája például a H₂O-molekula térszerkezetéből következik. A molekuláris mimikri alapján különböző kémiai összetételű ásványok és makromolekulák vehetnek fel hasonló szerkezetet, és tölthetnek be hasonló funkciót. Bizonyos fajok szemlencséje nem fehérjéket (krisztallinokat), hanem ásványokat tartalmaz. Lima-de-Faria biológiai periódusos rendszere azonban predikciókra nem képes, és számos adattal kell még alátámasztani a létjogosultságát.

Bizonyos növény- és állatfajok tömegének ciklikus váltakozása is periodikus jelenség. Az észak-amerikai kabócák (*Magicalada*) tömeges felszaporodásának 13 és 17 éves periódusokba rendeződése hőmérsékleti változásoknak tulajdonítható (Ito et al., 2015). Már ökológiai periódusos táblázatokkal is próbálkoztak (Ferraro, 2013).

De mi is a gond a biológiai szerkezeti periodicitások kimutatása körül? Az anyagszerkezet mélyén ugyan bizonyosan ott lapul a periodicitás, de a szupernehéz kémiai elemek tulajdonságaiban már gyengül, mert a tulajdonságaikat meghatározó külső elektronok egyre jobban kikerülnek az atommag vonzó hatása alól. Az atommag belső, erős kölcsönhatásai determinisztikus törvényszerűségekben nyilvánulnak meg. Egy komplex biológiai rendszer tulajdonságait azonban nemcsak belső, hanem külső hatások (bioszféra, geoszféra és légkör) is befolyásolják. Minél jobban alárendelődnek a belső kölcsönhatások a környezeti hatásoknak, annál inkább elfedik valószínűségi törvényszerűségek a determinisztikusakat (Maksay, 2015).

Láthatunk, hogy a periodicitás kapcsolatban áll a szimmetria fogalmával. Geometriai megfogalmazással, a szimmetrikus szerkezetek szimmetriaműveletekre (például tükrözés) invariánsak. Az evolúció periodikus ismétlődésekkel fokozza a szerkezetek szimmetriáját és stabilitását. Modern biofizikai szerkezetvizsgálatok feltárták, hogy a biomakromolekulák működését szimmetriasértő szerkezetváltozások váltják ki (Maksay–Tőke, 2014).

A biológiai ismeretek rendszerezése *Linné* óta folyamatosan bővül. Mengyelejev óta pedig a rendszerezésben a periodicitást is figyelembe veszik (Liu–Dwi-Nugroho, 2012). A fizikai, kémiai, biokémiai és szerkezeti biológiai anyagformákban a tudomány sorra tárja fel a periodicitást. Amennyiben a szimmetria általános rendszerező elvnek is tekinthető, a biológiai periódusos rendszerekben – ha lesz valaha ilyen – a szimmetriára fontos szerep vár.

IRODALOM

- Ahnert, S. E. – Marsh, J. A. – Hernández, A. et al. (2015): Principles of Assembly Reveal a Periodic Table of Protein Complexes. *Science*, 350, aaa2245. DOI: 10.1126/science.aaa2245
- Ferraro, S. P. (2013): Ecological Periodic Tables: in Principle and Practice. *Oikos*, 122, 1541–1553. DOI: 10.1111/j.1600-0706.2013.00717.x
- Gánti T. (2002): On the Early Evolutionary Origin of Biological Periodicity. *Cell Biology International*, 26, 729–735. DOI: 10.1006/cbir.2000.0668, https://www.researchgate.net/publication/11210935_On_the_early_evolutionary_origin_of_biological_periodicity
- Ito, H. – Kakishima, S. – Uehara, T. et al. (2015): Evolution of Periodicity in Periodic Cicadas. *Scientific Reports*, 5, 14094. DOI: 10.1038/srep14094, <https://www.nature.com/articles/srep14094>
- Jonsson, A. L. – Roberts, M. A. J. – Kiappes, J. L. et al. (2017): Essential Chemistry for Biochemists. *Essays in Biochemistry*, 61, 401–427. DOI: 10.1042/EBC20160094, <http://essays.biochemistry.org/content/61/4/401>
- Lima-de-Faria, A. (1997): The Atomic Basis of Biological Symmetry and Periodicity. *BioSystems*, 43, 115–135. DOI: 10.1016/S0303-2647(97)01694-8
- Lima-De-Faria, A. (2018): Periodic Tables Unifying Living Organisms at the Molecular Level: The Predictive Power of the Law Of Periodicity. World Scientific Press preview, <https://books.google.hu>
- Liu, Y. – Dwi-Nugroho, A. (2012): The Social Semiotic Construction of Chemical Periodicity: A Multimodal View. *Semiotica*, 190, 133–151.
- Maksay G. (2015): *Quo vadis*, tudományos megismerés? *Magyar Tudomány*, 176, 9, 1139–1145. <http://www.matud.iif.hu/2015/09/16.htm>
- Maksay G. (2019): Kémiai és biológiai periodicitás; Mengyelejev öröksége. *Biokémia*, XLIII, 1, 42–49. http://www.mbkegy.hu/apps/mbkegy/resources/biokem/2019/2019_03.pdf
- Maksay G. – Marsh, J. (2017): Signalling Assemblies: The Odds of Symmetry. *Biochemical Society Transactions*, 45, 599–611. DOI: 10.1042/BST20170009
- Maksay G. – Töke O. (2014): Asymmetric Perturbations of Signalling Oligomers. *Progr. Biophys. & Mol. Biol.*, 114, 153–169. DOI: 10.1016/j.pbiomolbio.2014.03.001, http://real.mtak.hu/21828/7/Asymmetric_Signalling_MG_TO_2014.pdf
- Scerri, E. R. (1998): The Evolution of the Periodic System. *Scientific American*, 78–83. <https://www.scientificamerican.com/article/the-evolution-of-the-periodic-system/>
- Taylor, R. W. (2002): A ‘Periodic Table’ for Protein Structures. *Nature*, 416, 657–660. DOI: 10.1038/416657a

URL: <https://www.iypt2019.org>