



Je li periodni sustav elemenata doista periodičan?

DOI: 10.15255/KUI.2015.029

KUI-44/2016

Stručni rad

Prispjelo 29. svibnja 2015.

Prihvaćeno 5. srpnja 2015.

N. Raos*

Institut za medicinska istraživanja i medicinu rada
Ksaverska c. 2, p.p. 291
10 001 Zagreb

Sažetak

Periodni sustav elemenata je po imenu i naravi periodičan, no njegova se periodičnost ne može jednostavno, matematički definirati. Uz osnovnu periodičnost po skupinama uočavaju se i druge vrste pravilnosti, poput diagonalne sličnosti, sličnosti među skupinama (n) i ($n + 10$) te povezanosti elemenata "konjičevim skokom". Složenost PSE-a odražava se i u njegovim mnogobrojnim i raznovrsnim grafičkim prikazima ("tablicama") koji naglašavaju specifične odnose među elementima.

Ključne riječi

Nastava kemije, PSE, periodni sustav elemenata, elektronska konfiguracija

Uvod

Periodičnost periodnog sustava elemenata (PSE)^{1,2} njegovo je bitno obilježje. On nije tek jedna od mnogih mogućnosti logične i sustavne klasifikacije kemijskih elemenata, nego je izraz temeljnog prirodnog zakona, zakona periodičnosti, kojeg Mendeljejev u drugom dijelu *Osnova kemije* (1870.) definira ovako: "Svojstvo jednostavnih tvari, a također i svojstva njihovih spojeva, nalaze se u periodičkoj ovisnosti (ili, izrazivši se algebarski, čine periodičku funkciju) o veličini atomskih težina elemenata."³

Stoga je periodni sustav ujedno i prirodni sustav elemenata, termin kojim se Mendeljejev rado koristio. Taj se zakon očituje, kako ruski kemičar ukazuje u svom prvom radu⁴ (ovdje je preneseno u nešto skraćenom obliku), u sljedećem:³

1. Niz elemenata po rastućoj atomskoj težini pokazuje izrazitu periodičnost svojstava.
2. Slični elementi, ili su bliski po atomskoj težini (platina, iridij, osmij), ili im ona ravnomjerno raste (kalij, rubidij, cezij).
3. Redoslijed elemenata ili njihovih grupa odgovara takozvanoj atomičnosti [valenciji] što se vidi primjerice u nizu Li, Be, B, C, N, O, F.

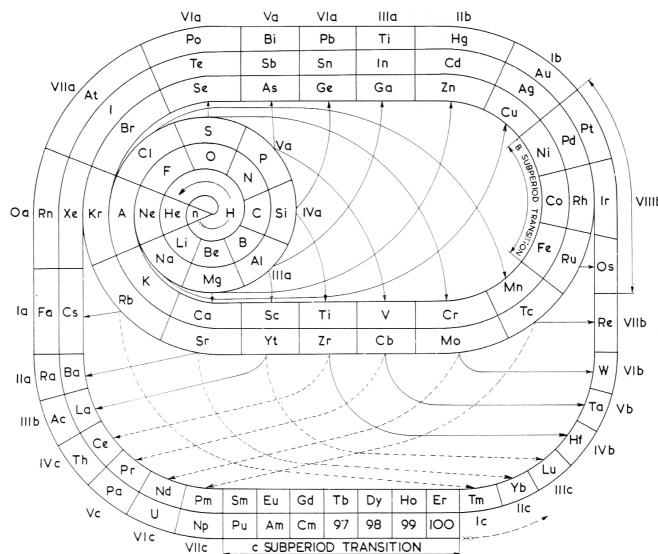
4. Elementi najrašireniji u prirodi imaju malu atomsku težinu, ali oštro izražena svojstva. Vodik, najlakši element, slučaj je za sebe.
5. Atomska težina veličinom određuje svojstva elemenata: spojevi srodnih elemenata, na primjer sumpora i telura, razlikuju se zbog razlike u atomskoj težini. Isto tako spojevi klora i joda.
6. Treba očekivati otkrića dosad nepoznatih elemenata, na primjer onih sličnih aluminiju i siliciju.
7. Neke sličnosti elemenata otkrivaju se usporedbom njihovih atomskih težina.

Upravo je otkriće triju novih elemenata koje "treba očekivati" (predzadnja točka), galija (Mendeljejevljeva ekaaluminijska), germanija (ekasilicija) i skandija (ekabora) u godinama nakon objavljivanja prvih tablica, doveo do općeg prihvatanja zakona periodičnosti i periodnog sustava.^{5,6} To je i bio osnovni razlog da se otkriće periodnog sustava pripše Mendeljejevu, premda je bila riječ – kako pokazuju novija istraživanja – upravo o školskom primjeru kolektivnog otkrića.⁷

No nije sve išlo glatko. Bilo je elemenata čije je postojanje bilo predviđeno, no nikada nisu otkriveni. To je bila posljedica prije svega toga što se periodičnost povezivala s relativnom atomskom masom, a ne s protonskim brojem, fizičkom veličinom koja još nije bila poznata.⁸ Potom su se počeli redati najrazličitiji prikazi periodnog sustava, a s njima i pokušaji da se skupine i periode drugačije urede. Uz tablice s dugim, kratkim i dvostrukim periodama, pojavili

* Dr. sc. Nenad Raos
e-pošta: raos@imi.hr

su se kružni, spiralni, valjkasti, stožasti, kuglasti i kockasti prikazi,¹ pa i prikaz u obliku "arene"⁹ (slika 1). Procjenjuje se da ih ima više od tisuću! Iz toga proizlazi jednostavno pitanje: ukazuju li ti prikazi na neki dublji zakon koji leži iza "zakona periodičnosti"? Ili: zakon periodičnosti možda uopće nije prirodnji zakon, jer mu nedostaje obilježe općenitosti.



Slika 1 – Jedan od mnogih osebujnih prikaza periodnog sustava, Clarkova “arena” (ref. 9 i 1, str. 181)

Fig. 1 – One of the many PSE models: “arena” system of Clark (Ref. 9 and 1, p. 181)

Periodičnost mimo grupa

Periodičnost je riječ širokog značenja, no u onom smislu u kojem Mendeljejev definira zakon periodičnosti ona se odnosi na algebarsku funkciju, pa bismo iz toga mogli pretpostaviti kako je moguće periodni sustav elemenata izraziti matematički. To bi vjerojatno bilo moguće kada bismo mogli točno definirati varijable, no samo je nezavisna varijabla, redni (protonski) broj elementa, jasna i nesporna, dok je broj zavisnih varijabli (ionizacijski potencijal, elektronegativnost, talište, vrelište, topljivost itd.) praktički beskonacan. Drugim riječima periodičnost PSE-a treba shvatiti više kvalitativno nego kvantitativno. Najučljuvija je periodičnost vezana uz skupine, ali nije jedina.²

Dijagonalna sličnost

Prva od "dodatnih" sličnosti je sličnost elemenata koji pripadaju susjednim skupinama (stupcima) i periodama (redcima). Primjera takve, dijagonalne ili "kose" sličnosti ima mnogo. Prvi je primjer litij, koji po mnogo čemu nalikuje zemnoalkalijskim metalima, posebice magneziju, iz susjedne skupine. Tako litij gradi samo normalni oksid, Li_2O , ali ne i peroksid, spaja se s dušikom u nitrid, Li_3N , a njegove se soli s ugljičnom, sumpornom i fluorovodičnom kiselinom

teško otapaju u vodi, baš poput analognih soli zemnoalkalijskih, no ne i soli alkalijskih metala. Litijev karbonat raspada se grijanjem na oksid i ugljikov dioksid, što je također svojstveno metalima druge, no ne i prve skupine kamo litij formalno pripada.

Berilij je pak sličan aluminiju. Ne reagira s vodom, kao drugi zemnoalkalijski metali, nego se poput aluminija presvlači tankom oksidnom kožicom te se poput njega otapa u ljužinama. Oba su oksida, i berilijski i aluminijev, amfoterni, što nije slučaj s oksidima elemenata druge skupine. Bor pak ima mnogo sličnosti sa silicijem, pa i s ugljikom. Tako primjerice s dušikom gradi nitrid, $(\text{BN})_n$, polimer strukture analogue strukturi grafita ("anorganski grafit"), a s ugljikom karbid, $(\text{B}_4\text{C})_n$, dijamantne strukture. Borazol, $\text{B}_3\text{N}_3\text{H}_6$, ima pak strukturu benzena.

Sekundarna periodičnost

Sekundarna periodičnost je pojava kada elementi pokazuju sličnost koja nije povezana s ravnomjernim porastom "atomske težine" (drugo pravilo periodičnosti), već element više sliči svom drugom negoli prvom susjedu u stupcu. Tako je ruski kemičar Evgenij Biron pronašao 1915. godine izmjenjivanje osnovnog oksidacijskog stanja, +III ili +V, unutar 15. skupine: N(+III), P(+V), As(+III), Sb(+V), Bi(+III). Ralph Sanderson pronašao je sličan uzorak za svojstva spojeva elemenata 13., 14. i 15. skupine,¹⁰ a Chistyakov za atomske radijuse prijelaznih metala (npr. Cu (119,1 pm), Ag (128,6 pm), Au (118,7 pm)).¹¹

Sličnost između skupina (n) i ($n + 10$)

O sličnosti elemenata koji su udaljeni za deset mjesta u istoj periodi ne treba upoznavati starije kolege, tj. one koji su još učili da postoje A i B skupine periodnog sustava: elementi prve (I. A) i 11. (II. B) skupine su jednovalentni, druge (II. A) i 12. (II. B) dvovalentni itd. Ta je sličnost očita. Manje je međutim uočljiva sličnost između titanija (4. skupina) i kositra (14. skupina), posebice sličnosti njihovih oksida i klorida. Zanimljiva je pak analogija osmija (8. skupina) i ksenona (18. skupina), premda ne pripadaju istoj periodi. OsO_4 i XeO_4 žute su boje, a osmij i ksenon tvore i druge slične spojeve s kisikom i fluorom ($[\text{OsO}_2]\text{O}_4$ i $[\text{XeO}_2]\text{O}_4$, OsO_3F_2 i XeO_3F_2).

Sličnost "konjićeva skoka"

Da se elementi mogu povezati i u šahovskoj formi konjićeva skoka (jedno mjesto nadolje pa dva mesta nadesno) neobično je otkriće južnoafričkog kemičara Michaela Lainga.¹² On je uočio slična tališta i vrelišta halogenida srebra i talija, kadmija i olova, cinka i kositra te galija i antimona. Ima i drugih sličnosti. Kadmij i olovo su otrovni, dok cink i kositar nisu, dapače riječ je o esencijalnim elementima (kositar je esencijalan samo za biljke). Sličnost pak cinka i kositra poznata je od davnina: s bakrom prvi metal gradi mjeđ (mesing), a drugi broncu. Kromati olova (PbCrO_4) i kadmija (CdCrO_4) žute su tvari netopljive u vodi.

Najprirodniji oblik prirodnog sustava kemijskih elemenata

Periodna tablica samo je, kako sam već rekao, odraz zakona periodičnosti, drugim riječima njegov grafički prikaz. No, kako bi zakon periodičnosti trebao, idealno, odražavati ne samo primarnu periodičnost (po stupcima) nego i sve druge oblike periodičnosti, očito je da se to mora odraziti i na oblik tablice. Periodičnost tipa $(n)/(n+10)$ vidimo već u Mendeljejevljevoj tablici iz 1871. godine¹³ (slika 2), standarnom obliku tablice koji se održao više od stotinu godina. To opet ne znači da je suvremena IUPAC-ova tablica s 18 stupaca jedina ispravna, pa ni najbolja verzija periodnog sustava.

REIHEN	Gruppe I - R ² O	Gruppe II - RO	Gruppe III - R ² O ³	Gruppe IV RH ⁴ RO ²	Gruppe V RH ³ R ² O ⁵	Gruppe VI RH ² RO ³	Gruppe VII RH ¹ R ² O ⁷	Gruppe VIII - RO ⁴
I	H = 1							
2	Li = 7 Be = 94	B = 11	C = 12	N = 14	O = 16	F = 19		
3	Na = 23	Mg = 24	Al = 273	Si = 28	P = 31	S = 32	Cl = 355	
4	K = 39	Ca = 40	- = 44	Ti = 48	V = 51	Cr = 52	Mn = 55	Fe = 56, Co = 59, Ni = 59, Cu = 63
5	(Cu = 63)	Zn = 65	- = 68	- = 72	As = 75	Se = 78	Br = 80	
6	Rb = 85	Sr = 87	?Yt = 88	Zr = 90	No = 94	Mo = 96	- = 100	Ru = 104, Rh = 104, Pd = 106, Ag = 108
7	(Ag = 108)	Cd = 112	In = 113	Sn = 118	Sb = 122	Te = 125	J = 127	
8	Cs = 133	Ba = 137	?Dl = 138	?Ce = 140	-	-	-	-
9	(-)	-	-	-	-	-	-	-
10	-	-	?Er = 178	?La = 180	Ta = 182	W = 184	-	Os = 195, Ir = 197, Pt = 198, Au = 199
11	(Au = 199)	Hg = 200	Tl = 204	Pb = 207	Bi = 208	-	-	
12	-	-	Th = 231	-	U = 240	-	-	-

Slika 2 – Mendeljejevljeva tablica iz 1871. preteča je kasnijeg svrstavanja elemenata na skupine A i B (ref. 1, str. 137)

Fig. 2 – Mendeleev's table from 1871 was the model for later tables with A and B groups (Ref. 1, p. 137).

Nakon otkrića elektronske konfiguracije atoma zaredali su se pokušaji da se tablica elemenata zasnuje na zbroju kvantnih brojeva $n + l$, umjesto samo na osnovnom kvantnom broju n ("broju elektronskih ljudskih"), koji empirijski odgovara broju periode.^{14–16} U tom je pogledu zanimljiva verzija tablice s lijevim stepenicama (*left-step table*) (slika 3). Riječ je zapravo o grafu $n + l$ (redci) nasuprot energiji valentnih orbitala određenih kvantnim brojevima l, m_l i s (stupci).¹⁶ Zanimljivost je ove tablice u tome što se alkalijski metali nalaze uz plemenite plinove, dok bi helij (zbog

konfiguracije s^2) pripadao skupini zemnoalkalijskih metala. U ovoj je tablici očito zanemarena valentnost, koja čini temelj izvornoga Mendeljejevljeva sustava (slika 3).

Zaključak

Periodni sustav elemenata nesumnjivo je periodičan, no njegova periodičnost nije takve naravi da bi se mogla jednostavno definirati. Riječ je očito o kompleksnoj i višestrukoj periodičnosti, koja je vrlo daleko od naivnog Mendeljejevljeva uvjerenja da bi se zakon periodičnosti mogao izraziti matematičkom formulom, poput zakona mehanike. Kompleksnost se PSE očituje ne samo u odstupanjima od očekivanih sličnosti nego i u pronalaženju neočekivanih pravilnosti. Unatoč stotinama verzija još nema tablice koja bi bila prihvaćena kao konačna, jednostavno zato što nijedan grafički prikaz ne može obuhvatiti sve vidove periodičnosti. Tako tablice s dvostrukim grupama (slika 2) naglašavaju valentnost, dok novije tablice stavljaju težište na elektronsku konfiguraciju. To se može i očekivati, jer je izvorna periodna tablica empirijska klasifikacija svojstava elemenata, dok za suvremenu tablicu možemo reći da proizlazi iz "načela izgradnje".⁸ To opet ne znači da je PSE čisto teoretski konstrukt budući da "periodni sustav stoji kao glavni izazov shvaćanju da se kemija može svesti na kvantnu mehaniku",¹⁷ a "teorijski proračuni ne mogu uistinu predvidjeti elektronsku konfiguraciju nijednog elemenata" (ref. 2, str. 242), kako kaže Eric R. Scerri, vodeći svjetski stručnjak za PSE.

Ulaženje u probleme periodičnosti može dakako poslužiti u nastavi, prije svega radi boljeg i lakšeg upoznavanja svojstava elemenata. Primjeri neobičnih tablica mogu učenicima biti zanimljivi i na svoj način zabavni. Usto ih mogu potaknuti da pronalaze svojstva periodičnosti na kojima se te tablice temelje. Može ih se navesti da uspoređuju svojstva elemenata kako bi sami pronašli neočekivane sličnosti. Dva najlakša elemenata pružaju pak mogućnost najširih usporedbi. Je li vodiku primjereno mjesto među alkalijskim metalima (metalni vodik) ili halogenim elementima (natrijev hidrid)? Odgovara li elektronska konfiguracija vodika više konfiguraciji alkalijskih metala ili halogenih elemenata? Svrstava li elektronska konfiguracija helij među

H	He	1
Li	Be	2
B	C	3
Al	Si	4
Sc	Ti	5
Y	Zr	6
La	Ce	7
Ac	Th	8
Pm	Pa	
Sm	U	
Eu	Np	
Gd	Pu	
Tb	Am	
Dy	Cm	
Ho	Bk	
Er	Cf	
Tm	Es	
Yb	Fm	
Lu	Md	
Hf	No	
Ta	Lr	
W	Rf	
Re	Db	
Os	Sg	
Ir	Bh	
Pt	Hs	
Au	Mt	
Hg	Ds	
Tl	Rg	
Ge		
As		
Se		
Br		
Kr		
Rb		
Sr		
In		
Sn		
Sb		
Te		
I		
Xe		
Cs		
Ba		

Slika 3 – Tablica elemenata s lijevim stepenicama. Brojevi s desne strane jednaki su vrijednosti $n + l$ (ref. 15 i 2, str. 283).

Fig. 3 – The left-step table. Numbers on the right represent values of $n + l$ (Ref. 15 and 2, p. 283).

plemenite plinove ili zemnoalkalijske metale? Koliko ovise svojstva elemenata o njihovoј elektronskoј konfiguraciji? Može se organizirati i radionica (istraživački miniprojekt) radi izvođenja periodnog sustava iz energije ionizacije elemenata.¹⁸

Sve to na kraju vodi do temeljne spoznaje o naravi prirodnih zakona. Oni se ne izvode iz osnovnih postavki (deduktivno), kao što se u matematici teoremi izvode iz aksioma, nego proizlaze iz svijeta iskustva, koje se onda koliko je to moguće opisuje matematičkim jezikom. Periodičnost periodnog sustava elemenata stoga nije posljedica "zakona periodičnosti", onako kako ga je shvaćao Mendeljejev, nego je uzgredna posljedica elektronske konfiguracije atoma, točnije načela popunjavanja atomskih orbitala.

Popis kratica i simbola List of abbreviations and symbols

PSE – periodni sustav elemenata	– periodic system of elements
<i>l</i> – azimutni kvantni broj	– azimuthal quantum number
<i>n</i> – redni broj skupine / glavni kvantni broj	– group number / principal quantum number

Literatura References

1. J. W. van Spronken, *The Periodic System of Chemical Elements. A History of the First Hundred Years*, Elsevier, Amsterdam, 1969.
2. E. R. Scerry, *The Periodic Table. Its Story and Its Significance*, Oxford University Press, Oxford, 2007.
3. D. Grdenić, *Povijest kemije*, Novi Liber i Školska knjiga, Zagreb, 2001., str. 746.

4. D. Mendelejeff, Über die Beziehung der Eigenschaften zu den Atomgewichten der Elemente, *Z. Chem.* **12** (1869) 405–406.
5. N. Raos, Periodni sustav u Hrvata, *Kem. Ind.* **60** (12) (2011) 633–638.
6. N. Raos, Pan-Slavism and the periodic system of the elements, *Bull. Hist. Chem.* **37** (1) (2012) 24–28.
7. E. Scerry, The discovery of the periodic table as a case of simultaneous discovery, *Phil. Trans. Roy. Soc. A* **373** (2015), doi: <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2014.0172>.
8. N. Raos, Povijesni pristup u nastavi kemije: periodni sustav elemenata, *Kem. Ind.* **64** (3-4) (2015) 169–172, doi: <http://dx.doi.org/10.15255/KUI.2015.001>.
9. J. D. Clark, A new periodic chart, *J. Chem. Educ.* **10** (1933) 675–676, doi: <http://dx.doi.org/10.1021/ed010p675>.
10. R. T. Sanderson, *Chemical Periodicity*, Reinhold, New York, 1960.
11. E. V. Chistyakov, Biron's secondary periodicity of the side d-subgroups of Mendeleev's short table, *Zh. Obsch. Khim. (Engl. Ed.)* **38** (1968) 213–214.
12. M. Laing, The knight move in the periodic table, *Educ. Chem.* **36** (1999) 160–161.
13. D. I. Mendelejeff, Die periodische Gesetzmässigkeit der chemischen Elemente, *Ann. Chem. Pharm.* **8** (1871) 133–229.
14. R. T. Sanderson, A rational periodic table, *J. Chem. Educ.* **41** (1964) 187–189, doi: <http://dx.doi.org/10.1021/ed041p187>.
15. E. R. Scerry, Presenting the left-step periodic table, *Educ. Chem.* **42** (2005) 135–136.
16. D. Neubert, Double shell structure of the periodic system of the elements, *Z. Naturforsch.* **25A** (1970) 210–217, doi: <http://dx.doi.org/10.1515/zna-1970-0211>.
17. E. R. Scerry, Editorial 8. Special issue on the periodic system of the elements, *Found. Chem.* **3** (2001) 97–104, doi: <http://dx.doi.org/10.1023/A:1011443411806>.
18. P. Vrklijan, Građa atoma i periodni sustav elemenata, u N. Raos (ur.), *Nove slike iz kemije, priručnik kemije u nastavi, Školska knjiga i Hrvatsko kemijsko društvo*, Zagreb, 2004., str. 253–280.

SUMMARY

Is the Periodic System of the Elements Really Periodic?

Nenad Raos

The periodic system of the elements is periodic, but its periodicity is far from simplicity, *i.e.* the properties of the elements and their compounds cannot be reduced to the "algebraic, periodic function of the values of atomic weights of the elements", as Mendeleev thought. Besides the well-known trends along the columns (groups) of periodic system, there are also secondary trends such as diagonal behaviour (*e.g.* similarity of Li to Mg, of Be to Al, and of B to Si), similarities between groups (*n*) and (*n* + 10), secondary periodicity inside the group, and knight's move relationship. These complex relationships are reflected in many attempts at an "ideal" periodic table.

Keywords

Chemistry education, PSE, periodic system of the elements, electronic configuration

Institute for Medical Research and
Occupational Health
Ksaverska c. 2, P.O.B. 291 Zagreb
Croatia

Professional paper
Received May 29, 2015
Accepted July 5, 2015