

MENDĚLEJEV, PERIODICKÝ ZÁKON A PERIODICKÁ TABULKA

MIROSLAV NOVÁK

*Ústav učitelství a humanitních věd, Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Technická 5, 166 28 Praha 6
Miroslav.Novak@vscht.cz*

Došlo 2.12.18, přijato 14.12.18.

Klíčová slova: periodický zákon, periodická tabulka prvků, D. I. Mendělejev, předpověď neobjevených prvků

V tomto roce uplyne 150 let od uveřejnění Mendělejevova článku „*Vztah vlastností a atomové váhy prvků*“ v Časopise ruské chemické společnosti¹ (současně byl publikován stručný výtah v němčině²). Tato práce byla vyvrcholením tehdejších snah vytvořit ucelený a logický systém prvků, založený na periodicitě jejich chemických vlastností.

Abychom pochopili význam Mendělejevova přínosu, je třeba se podívat trochu do historie. Než Mendělejev dospěl ke svým závěrům o periodicitě, zabývala se uspořádáním prvků celá řada chemiků. O něco podobného se pokoušeli vlastně již alchymisté, kteří se snažili seřadit tehdy známé látky, ovšem nejenom prvky – tento pojem v dnešním smyslu neznali – do určitých skupin na základě podobných vlastností. V novověku se pokoušeli o systém tehdy známých látek, opět nejenom prvků, např. Lavoisier a spolupracovníci³ a podobných pokusů je známa celá řada. Tyto pokusy byly poplatné stavu znalostí a rozsahu souboru zpracovávaných informací v dané době a nepřinášely nic zásadně nového. Teprve když Dalton zveřejnil svoji atomovou teorii⁴, dodal těmto pokusům nový impuls – možnost použít k systemizaci hodnoty relativních atomových hmotností (tehdy označovaných jako *atomové váhy*; v dalším textu je používán zkrácený výraz *atomová hmotnost*).

V první polovině 19. století ovšem sestavení funkčního systému prvků na základě atomových hmotností komplikovala celá řada problémů, daná úrovní znalostí, k jejichž řešení chemici dospívali postupně. Původní Daltonovy atomové hmotnosti byly pro tento účel zcela nevhodné a musely být postupně zpřesňovány, ale i tak v důsledku nedokonalých analytických metod nebyly hodnoty atomových hmotností obvykle příliš přesné, nadto řada chemiků byla přesvědčena – byl to důsledek neznalosti izotopové skladby prvků –, že atomové hmotnosti jsou celá čísla. Dalším problémem bylo, že chemici používali různě a nesystematicky dvojí atomové hmotnosti: poloviční ekvivalentové (byly odvozeny jako váhové ekvi-

valenty atomové hmotnosti vodíku $A_H=1$, např. $A_O=8$, $A_N=7$, $A_C=6$ atd.) a dvojnásobné, přibližně shodné s dnešními, a vedli vzájemné půtky o tom, které z nich jsou správné. Teprve když Stanislao Cannizzaro objasnil způsob zjišťování korektních atomových hmotností⁵ – stalo se tak na samý závěr prvního chemického kongresu v Karlsruhe v roce 1860 (cit.⁶) – začali je chemici postupně všeobecně používat. Mendělejev, který se kongresu zúčastnil, ve svých periodických tabulkách používal tyto korigované, dvojnásobné a tedy správné, hodnoty.

V dotčené době řada prvků nebyla známa a vytvářené posloupnosti prvků obsahovaly nevyplněné mezery, nebo – v horším případě – byly prvky v důsledku toho posunuty na nesprávné místo. Podobnost chemických vlastností prvků není vždy jednoznačná, což vedlo k nejisté nebo nesprávné poloze některých prvků v systému. A konečně, průběžné řazení lanthanoidů mezi ostatní prvky působilo značné potíže. V polovině 19. století jich nebylo známo mnoho, pouze cer, erbium a směs praseodymu a neodymu, tehdy považovaná za prvek didym (Di), ale i tak jejich zařazování vedlo k omylům (správným způsobem lanthanoidy do tabulky zařadil až Bohuslav Brauner⁷, Mendělejevův přítel a zanícený propagátor jeho periodické soustavy).

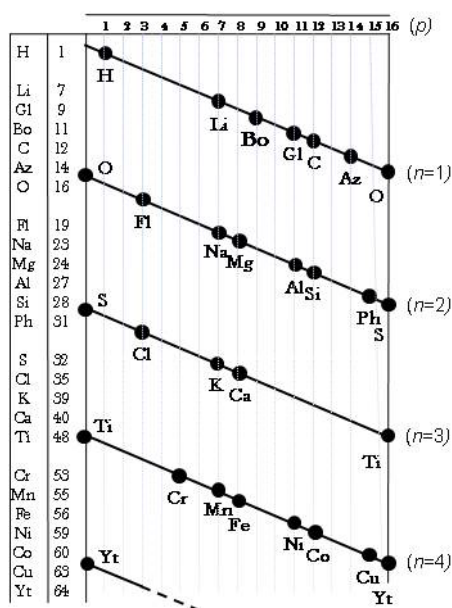
Chemici v 19. století netušili, že prvky v periodickém systému mají být řazeny podle stoupajících protonových (atomových) čísel⁸; naštěstí i posloupnost stoupajících atomových hmotností je s výjimkou několika anomálií monotónní. S nejvýznamnější anomálií tellur – jod si většinou tehdy poradili správně, další anomálie v polovině 19. století neměly význam: buď se nalézaly v rozmezí chyb tehdejších hodnot atomových hmotností (Co–Ni) nebo některý z prvků nebyl tehdy známý (Ar–K, Th–Pa).

Z pohledu do historie je víceméně zřejmé, že jednotliví badatelé v oboru periodizace neznali některé práce svých předchůdců, ať již proto, že byly otištěny v nevýznamných časopisech nebo z důvodů jazykových bariér, a často dospěli k podobným výsledkům nezávisle, což se týká i Mendělejeva.

Z řady chemiků, kteří se pokoušeli na základě atomových hmotností vybudovat systém momentálně známých prvků, byl zřejmě prvním Johan Döbereiner⁹. Ten formuloval tzv. zákon triád: ve trojici prvků podobných chemických vlastností – triádě – se atomová hmotnost středního prvku přibližně rovná aritmetickému průměru atomových hmotností prvního a třetího prvku. Takové triády tvoří třeba prvky Li–Na–K, Ca–Sr–Ba, S–Se–Te, Cl–Br–I a další. Döbereiner používal ekvivalentové hmotnosti (někdy dokonce vztažené na atomovou hmotnost kyslíku $A_O = 100$) a občas dosti nepřesné, někdy ale kupodivu relativně přesné, např. pro triádu Cl–Br–I: $(35,470+126,470)/2 = 80,470$ (dnešní atomové hmotnosti prvků Cl, Br, I jsou 35,453, 79,904 a 126,904). V řadě dalších možných triád nejsou

chemické vlastnosti příliš podobné (např. Fe–Mn–Cr nebo dokonce C–N–O), ze všech tehdy známých prvků nebylo možné platné triády utvořit, a naopak nově objevované prvky, např. Rb, umožnily vytvářet triády chemicky podobných prvků (Na–K–Rb), kde již pravidlo o střední hodnotě neplatilo. To vše triády diskvalifikovalo, i když z nich někteří badatelé včetně Mendělejeva vycházeli.

První systém, který lze označit za periodický, pocházel od francouzského geologa Beguiera de Chancourtois¹⁰. Ten umístil tehdy známé prvky podle stoupajících atomových hmotností na šroubovice navinuté na válci; toto uspo-



Obr. 1. Výřez plošného zobrazení Chancourtoisova telurického šroubu s „charakteristickými body“; ve druhém sloupci zleva jsou uvedeny jím používané atomové hmotnosti. (Gl, glucinium = Be, Bo = B, Fl = F, Ph = P, Yt=Y)

řádání nazval telurický šroub (*vis tellurique*; z latinského *tellus* = země). Délku jednoho závitu položil rovnou šestnácti zvoleným délkovým jednotkám, což odpovídalo atomové hmotnosti kyslíku, a na závity postupně od počátků vynášel jednotlivé prvky ve vzdálenostech, odpovídajících jejich atomovým hmotnostem; k pozitivům patří používání dvojnásobných atomových hmotností, byť pouze celočíselných a ne vždy zcela správných. Prvky podobných vlastností byly umístěny v jednotlivých šroubovicích nad sebou (viz obr. 1). Polohu prvku bychom mohli popsat vztahem $A = p + 16(n-1)$, kde A je jeho atomová hmotnost, p číslo sloupce a n pořadové číslo závitu. Body na šroubovicích Chancourtois označil jako *charakteristické body* (*points caractéristiques*), vzdálenosti od počátku *geometrické znaky* (*caractères géométriques*) a systém charakterizoval slovy: *Příbuznosti těl* (= prvků) *jsou vyjádřeny jednoduchými vztahy poloh jejich charakteristických bodů*. Jeho systém byl skutečným – a prvním – periodickým systémem, byť podobnost prvků z něj v řadě případů nevyplývá. Bohužel zcela zapadl; jistě k tomu přispělo zcela nepraktické provedení a snad i to, že Chancourtois nebyl chemik, ale geolog.

Dva roky po Chancourtoisovi se touto problematikou zabýval anglický hudbymilovný chemik John Newlands (cit.^{11,12}). Seřadil tehdy známé prvky od vodíku po thorium podle stoupajících hodnot atomových hmotností a současně jim přiřadil pořadová čísla. Při tom dospěl k závěru, že „*osmý prvek, počítáno od některého zvoleného prvku, je svým způsobem opakováním onoho prvního prvku, podobně jako v hudbě osmá nota v oktávě*“, a nazval tuto závislost zákonem oktáv (*Law of Octaves*; obr. 2). V jeho tabulce je příliš mnoho chyb, mimo jiné proto, že používal ekvivalentové atomové hmotnosti a neměl vždy k dispozici jejich správné hodnoty. Bylo by v ní třeba přehodit pořadí některých prvků (Cr–Ti, Zn–Y, Ce&La–Zr, U–Sn a většiny v posledním sloupci) – některé změny provedl posléze sám Newlands – což ovšem porušuje jak číselné pořadí prvků, tak jejich správné umístění. Newlands také neuvažoval možnost objevu dalších, dosud neznámých prvků: jejich zařazením by se celý systém v podstatě rozpadl. Při vy-

	No.	No.	No.	No.	No.	No.	No.	No.	No.						
H	1	F	8	Cl	15	Co&Ni	22	Br	29	Pd	36	I	43	Pt&Ir	50
Li	2	Na	9	K	16	Cu	23	Rb	30	Ag	37	Cs	44	Os	51
G	3	Mg	10	Ca	17	Zn	24	Sr	31	Cd	38	Ba&V	45	Hg	52
Bo	4	Al	11	Cr	18	Y	25	Ce&La	32	U	39	Ta	46	Tl	53
C	5	Si	12	Ti	19	In	26	Zr	33	Sn	40	W	47	Pb	54
N	6	P	13	Mn	20	As	27	Di&Mo	34	Sb	41	Nb	48	Bi	55
O	7	S	14	Fe	21	Se	28	Ro&Ru	35	Te	42	Au	49	Th	56

Obr. 2. Tabulka Johna Newlandse; (G = Be, Bo = B, Di = Pr a Nd, Ro = Rh)

					Ro	104	Pt	197
					Ru	104	Ir	197
					Pd	106,5	Os	199
					Ag	108	Au	196,5
			Zn	65	Cd	112	Hg	200
							Tl	203
							Pb	207
H	1	"			U	120	"	
L	7	"			Sn	118	"	
G	9	"			Sb	122	Bi	210
B	11	Al	27,5		Te	129	"	
C	12	Si	28		I	127	"	
N	14	P	31	As	75	Cs	133	"
O	16	S	32	Se	79,5	Ba	137	"
F	19	Cl	35,5	Br	80	Ta	138	Th
Na	23	K	39	Rb	85	"		231,5
Mg	24	Ca	40	Sr	87,5	V	137	
		Ti	50	Zr	89,5	W	184	
				Ce	92			
		Cr	52,5	Mo	96			
		Mn	55					
		Fe	56					
		Co	59					
		Ni	59					
		Cu	53,5					

Obr. 3. Tabulka Williama Odlinga; (L = Li, G = Be, Ro = Rh)

stoupení na zasedání Londýnské chemické společnosti (*London Chemical Society*) byl kritizován, jeho práce nedošla uznání a společnost ji neakceptovala k publikování, přestože Newlands, zřejmě nezávisle na Chancourtoisovi, formuloval princip periodicity vlastností prvků.

Dalším chemikem, který se pokusil vybudovat systém prvků, byl William Odling¹³. Na rozdíl od málo známého Chancourtoise nebo Newlandse byl naopak významnou

osobností, totiž ředitelem londýnského *Royal Institution*; tuto pozici zaujal po Michaelu Faradayovi. Byl rozhodným zastáncem Canizzarovy reformy atomových hmotností a používal jím korigované hodnoty. V jeho tabulce (obr. 3) je zařazeno 57 prvků seřazených podle stoupajících atomových hmotností v pěti sloupcích, přičemž podobné prvky leží ve vodorovných řadách. Seřazení prvků podle jejich periodické příbuznosti v některých případech není správné

I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	VII.	VIII.	IX.
	B = 11,0	Al = 27,3		—		? In = 113,4		Tl = 202,7
	C = 11,97	Si = 28		—		Sn = 117,8		Pb = 206,4
			Ti = 48		Zr = 89,7			
	N = 14,01	P = 30,9		As = 74,9		Sb = 122,1		Bi = 207,5
			V = 51,2		Nb = 93,7		Ta = 182,2	
	O = 15,96	S = 31,98		Se = 78		Te = 128?		—
			Cr = 52,4		Mo = 95,6		W = 183,5	
	F = 19,1	Cl = 35,38		Br = 79,75		J = 126,5		—
			Mn = 54,8		Ru = 103,5		Os = 198,6?	
			Fe = 55,9		Rh = 104,1		Ir = 196,7	
			Co = Ni = 58,6		Pd = 106,2		Pt = 196,7	
Li = 7,01	Na = 22,99	K = 39,04		Rb = 85,2		Cs = 132,7		—
				Cu = 63,3		Ag = 107,66		Au = 196,2
?Be = 9,3	Mg = 23,9	Ca = 39,9		Sr = 87,0		Ba = 136,8		—
				Zn = 64,9		Cd = 111,6		Hg = 199,8

Obr. 4. Tabulka Lothara Meyera

(např. Ti, Zr, Ta, Th) a právě tak tečkovanými čarami naznačené určité podobné vlastnosti některých prvků, v zásadě ale tabulka představuje jistý pokrok oproti dřívějším pokusům, především tím, že jsou explicitně vynechána místa pro dosud neznámé prvky.

Přibližně ve stejné době jako Mendělejev vypracoval periodickou tabulku Lothar Meyer¹⁴ (obr. 4). Vzal v úvahu valenci prvků, ale nezařadil všechny prvky (jen 55 z 62 tehdy známých): jednoduše vynechal prvky, které mu do systému nezapadaly (H, Y, La, Ce, Er, Di, U). Podobné prvky jsou řazeny v řádcích a v tabulce jsou vynechána místa pro dosud neobjevené prvky; na rozdíl od Mendělejeva se Meyer ale nepokusil o jejich předpověď. Tabulky Meyera a Mendělejeva jsou si dosti podobné, včetně rozdělení na hlavní a vedlejší podskupiny (v řádcích u Meyera a ve sloupcích u Mendělejeva), což vedlo mezi nimi k dlouholetým sporům. Priorita nakonec byla přičtena Mendělejevovi, na základě různých indicií se nicméně ukázalo, že oba pracovali nezávisle. Meyer kromě toho zjistil, že periodickou funkcí atomové hmotnosti je rovněž atomový objem (podíl atomové hmotnosti a hustoty prvku).

Při porovnání různých pokusů o periodizaci prvků – bylo jich více, než je zde uvedeno – vyvstává otázka, v čem byl Mendělejev vlastně první a původní. Mendělejev především založil svůj systém na daleko rozsáhlejší a pečlivější recepci tehdejších znalostí o jednotlivých prvcích a jejich sloučeninách než jeho předchůdci či současníci. Kromě atomové hmotnosti – tu samozřejmě považoval za nejdůležitější klasifikační vlastnost – sledoval i řadu dalších vlastností prvků: valenci v oxidech a hydridech a vlastnosti celé řady dalších chemických sloučenin, elektrochemické vlastnosti, atomový objem, termochemické chování a např. i krystalickou formu nebo izomorfii.

Ovšem jeho první tabulka (obr. 5)¹, představující seřazení prvků do šesti sloupců podle stoupající atomové hmotnosti, i když obsahovala mezery pro neznámé prvky, nebyla dokonalá a nadto se velmi podobala tabulce Williama Odlinga (srov. s obr. 3). Mendělejev sám ji ovšem nepovažoval za ukončenou a rovněž nepovažoval za konečné ani uspořádání v šesti sloupcích. Z dnešního pohledu je zřejmé, že v této jeho první práci nebyla nejdůležitější *tabulka*, ale jasná formulace periodického zákona a s ním souvisejících okolností, byť v lecčems poplatná stavu znalostí v dané době. Mendělejev v této práci shrnul své závěry do osmi bodů:

1. Prvky sestavené podle velikosti atomových hmotností vykazují zřetelnou periodicitu vlastností.

2. Prvky s podobnými chemickými vlastnostmi mají buď atomové hmotnosti podobné (např. Pt, Ir, Os) nebo postupně a monotónně se zvětšující (např. K, Rb, Cs).

3. Seřazení prvků nebo jejich skupin podle velikosti atomové hmotnosti odpovídá jejich valenci, a do jistého stupně i rozdílnosti chemického charakteru, což je jasně patrné v řadě Li, Be, B, C, N, O, F a opakuje se i v dalších řadách.

4. V přírodě nejrozšířenější prvky mají malou atomovou hmotnost a výrazné chemické vlastnosti. Proto se označují jako typické; vodík, nejlehčí prvek, je prvkem nejtypičtějším.

5. Hodnota atomové hmotnosti určuje charakter prvku, tak jako hodnota hmotnosti částice (= molekuly) určuje charakter sloučeniny; proto je třeba při posuzování sloučenin věnovat pozornost nejenom vlastnostem a počtu prvků, nejenom jejich vzájemnému působení, ale i hmotnosti jejich atomů. Díky tomu například sloučeniny S a Te, Cl

			Ti = 50	Zr = 90	? = 180
			V = 51	Nb = 94	Ta = 182
			Cr = 52	Mo = 96	W = 186
			Mn = 55	Rh = 104,4	Pt = 197,4
			Fe = 56	Ru = 104,4	Ir = 198
			Ni = Co = 59	Pt = 106,6	Os = 199
			Cu = 63,4	Ag = 108	Hg = 200
			Zn = 65,2	Cd = 112	
			? = 68	Ur = 116	Au = 197?
			? = 70	Sn = 118	
			As = 75	Sb = 122	Bi = 210
			Se = 79,4	Te = 128?	
			Br = 80	J = 127	
			Rb = 85,4	Cs = 133	Tl = 204
			Sr = 87,6	Ba = 137	Pb = 207.
			Ce = 92		
			La = 94		
			Di = 95		
			Th = 118?		
H = 1					
	Be = 9,4	Mg = 24			
	B = 11	Al = 27,4			
	C = 12	Si = 28			
	N = 14	P = 31			
	O = 16	S = 32			
	F = 19	Cl = 35,5			
Li = 7	Na = 23	K = 39			
		Ca = 40			
		? = 45			
		? Er = 56			
		? Yt = 60			
		? In = 75,6			

Obr. 5. Mendělejevova první periodická tabulka z práce¹; (Yt = Y, Di = Pr + Nd, Pt = Pd, Ur = U)

a J apod. při vzájemné podobnosti vykazují i jasné odlišnosti.

6. Je třeba očekávat objevení mnoha dosud neznámých prvků, např. podobných Al a Si, s atomovou hmotností 65–75.

7. Hodnota atomové hmotnosti může být někdy nepravdivá. Pokud známe vzájemné analogie, Te může být nikoliv 128, ale 123–126.

8. Některé analogie prvků se objevují podle hmotností jejich atomů, např. uran se ukazuje jako analog boru

a hliníku, což lze potvrdit porovnáním jejich sloučenin.

Teprve o rok později v rozsáhlé, téměř stostránkové práci¹⁵, kde byly velmi podrobně probrány důkazy platnosti periodického zákona, se objevila tabulka v podobě, z níž je periodický charakter prvků jasně patrný (obr. 6). V práci jsou rovněž sumarizovány přednosti periodického systému, který může sloužit kromě systemizace prvků (a) ke stanovení atomových hmotností nedostatečně prozkoumaných prvků, (b) k předpovědi vlastností dosud neznámých prvků, (c) ke korekci atomových hmotností (např. Berze-

Reihen	Gruppe I. — R ² O	Gruppe II. — RO	Gruppe III. — R ² O ³	Gruppe IV. RH ⁴ RO ²	Gruppe V. RH ⁵ R ² O ⁵	Gruppe VI. RH ⁶ RO ³	Gruppe VII. RH R ² O ⁷	Gruppe VIII. — RO ⁴
1	H=1							
2	Li=7	Be=9,4	B=11	C=12	N=14	O=16	F=19	
3	Na=23	Mg=24	Al=27,3	Si=28	P=31	S=32	Cl=35,5	
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	Nb=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	?Di=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	—	—

Obr. 6. Mendělejevova tabulka z práce v *Annalen* (cit.¹⁵)

Tabulka I

Předpověděné a nalezené prvky

Mendělejevův název	Předpověděná atomová hmotnost	Nalezený prvek	Nalezená atomová hmotnost	Objevitel
<i>eka</i> -bor	44	skandium	44,96	Lars Fredrik Nilson, 1879
<i>eka</i> -aluminium	68	galium	69,72	Lecoq de Boisbaudran, 1875
<i>eka</i> -silicium	72	germanium	72,63	Clemens Winkler, 1886
<i>eka</i> -mangan	100	technecium	97 ^a	Carlo Perrier, Emilio Segrè, 1939
<i>eka</i> -jod	170	astat	210 ^a	Dale Corson, Kenneth MacKenzie, Emilio Segrè, 1940
<i>tri</i> -mangan	190	rhenium	186,21	Ida a Walther Nodack, Otto Berg, 1927
<i>dvi</i> -tellur	212	polonium	209 ^a	Marie Curie, 1898
<i>dvi</i> -cesium	220	francium	223 ^a	Marguerite Perey, 1939
<i>eka</i> -tantal	235	protaktinium	231 ^a	Kazimierz Fajans, Oswald (Otto) Göhring, 1913

^a nejstabilnější izotop

lius uváděl vzorec oxidu berylia Be^2O^3 , pozdější badatelé BeO ; Mendělejev na základě periodických vlastností umístil Be do II. skupiny a tím i vyřešil diskuse o jeho valenci a složení oxidu), a (d) k doplnění znalostí o vlastnostech chemických sloučenin. Svoji tabulku Mendělejev několikrát upravoval, další chemici opravovali a zpřesňovali hodnoty atomových hmotností, doplňovali objevené prvky (lanthanoidy, vzácné plyny, aktinoidy ad.), přesto – přibližně v podobě uvedené na obr. 6 – přečkala celá desetiletí, dokud ji nenahradila dnes preferovaná tabulka IUPAC.

Přestože dnes považujeme periodický zákon za základ teoretické i praktické chemie, byly Mendělejevovy výsledky přijaty se značným skepticismem a jeho zásadní práci (cit.¹⁵) dokonce Bunsen a Kopp, tehdejší redaktori *Annalen*, nechtěli uveřejnit a teprve na Volhardtovu přímluvu změnili názor¹⁶. Satisfakce se dočkala periodická tabulka a periodický zákon teprve předpovědi vlastností dosud neznámých prvků, pro které zůstala v tabulce vynechána prázdná místa. Mendělejev, na rozdíl od všech ostatních chemiků, kteří se zabývali periodizací prvků, dokázal na základě porovnání vlastností prvků a jejich sloučenin v dané skupině předpovědět nejenom atomovou hmotnost, ale i řadu chemických a fyzikálních vlastností oněch dosud neznámých prvků a mezery v tabulce tak zaplnit. Předpovězené prvky byly posléze postupně objeveny a jejich reálné vlastnosti velmi dobře souhlasily s předpovědí. Šlo o geniální nápad, geniálně aplikovaný, a současně – a to především – o neoddiskutovatelný důkaz platnosti periodického zákona.

Již ve své první práci Mendělejev předpokládal, že v řádcích vedle hliníku a křemíku (viz obr. 5) se mohou vyskytovat dosud neznámé prvky s podobnými vlastnostmi a postupně takovéto předpoklady učinil i o dalších vynechaných místech tabulky. Dosud neznámý prvek vždy nazval jménem prvku, pod nímž se měl v příslušném

sloupci tabulky (viz obr. 6) nalézat, s předponou *eka*, *dvi*, *tri* (v sanskrtu jeden, dva, tři) podle počtu řádků od výchozího prvku – z pohledu na tabulku je patrné, že toto číslování je poněkud relativní. Tyto prvky jsou uvedeny v tab. I, spolu s předpokládanými atomovými hmotnostmi a s údaji o jejich objevu. Samotná předpověď atomové hmotnosti nepředstavovala nic zásadního: šlo vesměs o aritmetický průměr atomové hmotnosti předcházejícího a následujícího prvku, tedy o jakousi analogii triád. Co bylo zásadním milníkem v periodické systemizaci prvků, byla předpověď chemických vlastností těchto neznámých prvků, provedená právě na základě jejich polohy v periodickém systému, v periodické tabulce. Jak je patrné na příkladu galia a germania (tab. II), byly předpovědi překvapivě přesné, dokonce tak, že na základě předpovězených vlastností bylo možné korigovat experimentální data: když v roce 1875 Lecoq de Boisbaudran předpovězené galium objevil¹⁷, stanovil jeho hustotu $4,7 \text{ g cm}^{-3}$, odlišně od Mendělejevovy predikce 6 g cm^{-3} . Mendělejev jej na to upozornil, Boisbaudran provedl nová přesnější měření a našel hodnotu $5,96 \text{ g cm}^{-3}$ (cit.¹⁸). Právě přesnost Mendělejevových předpovědí byla jasným důkazem platnosti periodického zákona a přinesla Mendělejevovi zasloužené uznání.

Stojí za zmínku, že Mendělejev se pokusil předpovědět i prvky, které nebyly nalezeny, dokonce předpokládal existenci dvou prvků lehčích než vodík; tyto neúspěšné předpovědi, které nikterak nesnižují zásadní Mendělejevův přínos, jsou uvedeny v tab. III.

Přestože se Mendělejev zabýval celou řadou dalších problémů, mj. chemií silikátů, zkoumáním vlastností plynů a roztoků, elektrolytickou disociací, metrologií (byl ředitelem Úřadu pro míry a váhy v Petrohradě), studoval původ a složení ropy a zabýval se také vzduchoplavectvím a stavbou lodí (*sic!*), největší slávu a ocenění mu přinesly jeho

Tabulka II

Srovnání vlastností *eka*-aluminia a *eka*-silicia s vlastnostmi galia a germania

Vlastnost	<i>Eka</i> -aluminium (<i>Ea</i>)	Galium	<i>Eka</i> -silicium (<i>Es</i>)	Germanium
Atomová hmotnost	68	69,72	72	72,60
Hustota [g cm^{-3}]	6,0	5,96	5,5	5,35
Atomový objem	11,5	11,8	13	13,57
Teplota tání [$^{\circ}\text{C}$]	nízká	29,78		
Tvorba kamenců	ano	ano		
Složení oxidu	Ea_2O_3	Ga_2O_3	EsO_2	GeO_2
Hustota oxidu [g cm^{-3}]	5,5	3,90	4,7	4,23 ^a
Složení chloridu	EaCl_3	GaCl_3	EsCl_4	GeCl_4
Teplota varu chloridu [$^{\circ}\text{C}$]	nižší než u ZnCl_2 (230 $^{\circ}\text{C}$)	201	~ 100	83
Hustota chloridu [g cm^{-3}]			1,9 (0 $^{\circ}\text{C}$)	1,88 (20 $^{\circ}\text{C}$)

^a β -modifikace

Tabulka III
Nenalezené předpověděné prvky

Mendělejevův název	Předpověděná atomová hmotnost
ether	0,17
newtonium (coronium)	0,4
eka-cer	54
eka-molybden	140
eka-niob	146
eka-kadmium	155
eka-caesium	175

práce o periodické soustavě prvků. Jeho spory s Meyerem utichly, když oba získali v roce 1882 Davyho medaili (*Davy Medal*), nejvyšší britské vědecké ocenění udělované na poli chemie, „za objev periodických vztahů atomových hmotností“; tato medaile, kterou udělovala (a dodnes uděluje) Královská společnost v Londýně (*Royal Society of London*) představovala v 19. století jakousi předchůdkyni Nobelových cen. Stejnou medaili „za objev periodického zákona chemických prvků“ kupodivu obdržel v roce 1887 i Newlands, i když by si ji spíše zasloužil Chancourtois; tuto cenu nezískal ani Odling. Mendělejev se dočkal i dalších ocenění: v roce 1883 se stal čestným členem londýnské Chemické společnosti (*Chemical Society of London*), v roce 1889 mu Královská společnost v Londýně udělila Faradayovu přednáškovou cenu (*Faraday Lectureship Prize*), nejvyšší ocenění, které tato společnost uděluje za mimořádné přínosy k fyzikální nebo teoretické chemii, a v roce 1890 byl zvolen zahraničním členem této společnosti. V Británii se mu tedy dostalo těch nejvyšších poct, ale nikdy, a to je pozoruhodné, se nestal členem Carské akademie věd v Petrohradě (*Императорская Санкт-Петербургская академия наук*). Nobelovy ceny se Mendělejev za svého života (1834–1907) nedočkal, údajně díky nepřátelství Svante Arrhenia, ale dostalo se mu posmrtně pocty přinejmenším srovnatelné s Nobelovou cenou: aktinoid unnilunium s protonovým číslem 101, objevený v roce 1955 v *Lawrence Berkeley National Laboratory*¹⁹, byl na návrh tohoto pracoviště na jeho počest pojmenován mendělejevium (mendelejevium, Md).

LITERATURA

- Mendělejev D. I.: *Žurnal ruského chemického občestva* 1, 60 (1869).
- Mendelejeff D.: *Z. Chem.* 15, 405 (1869).
- Morveau G. L. B., Lavoisier A. L., Berthollet C. L., Fourcroy A. F.: *Méthode de Nomenclature Chimique*. Paris, Cuchet 1787.
- Dalton J.: *A New System of Chemical Philosophy*. London, Bickerstaff; Part I. 1808; Part II. 1810.
- Canizzaro S.: *Il Nuovo Cimento* 7, 321 (1858).
- Ihde A. J.: *J. Chem. Educ.* 38, 83 (1961).
- Brauner B.: *Ber. Dtsch. Chem. Ges.* 15, 109 (1882).
- Moseley H. G. J.: *Nature* 92, 554 (1913).
- Döbereiner J. W.: *Ann. Phys. Chem.* 15, 301 (1829).
- de Chancourtois B. A. E.: *Comptes Rendus Acad. Sci.* 54, 757, 840, 967 (1862).
- Newlands J. A. R.: *Chem. News* 10, 94 (1864).
- Newlands J. A. R.: *Chem. News* 12, 83 (1865).
- Odling W.: *Quart. J. Sci.* 1, 642 (1864).
- Meyer L.: *Ann. Chem. Pharm., Suppl.* 7, 354 (1870)
- Mendelejeff D.: *Ann. Chem. Pharm., Suppl.* 8, 133 (1871).
- Kypr P.: *Dopisy Dimitrije I. Mendělejeva českému chemiku Bohuslavu Braunerovi*. Technicko-vědecké vydavatelství, Praha 1952.
- de Boisbaudran L.: *Comptes Rendus Acad. Sci.* 81, 493 (1875).
- Scerri E. R.: *The Periodic Table*. Oxford University Press, New York 2007.
- Ghiorso A., Harvey B., Choppin G., Thompson S., Seaborg G.: *Phys. Rev.* 98, 1518 (1955).

M. Novák (*Department of Education and Human Sciences, University of Chemistry and Technology, Prague*): **Mendeleev, the Periodic Law and Periodic Table**

In 1869, 150 years ago, D. I. Mendeleev published a fundamental paper on the periodic behavior of chemical elements. This paper crowned a half-century of attempts to create a logical arrangement of the elements according to their atomic weights. The paths which gradually led to completion of these attempts, attitude of contemporary chemists towards Mendeleev's system, as well as reasons for its general acceptance are briefly described.

Keywords: the periodic law, periodic table of the elements, D. I. Mendeleev, prediction of unknown elements