

MEZE PERIODICKÉ TABULKY

PETR SLAVÍČEK a EVA MUCHOVÁ

Ústav fyzikální chemie, Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Technická 6, 166 28 Praha 6
petr.slavicek@vscht.cz

Došlo 25.2.19, přijato 11.3.19.

Klíčová slova: periodická tabulka prvků, relativistické efekty, historie chemie, vyšší oxidační stavy, exotické atomy

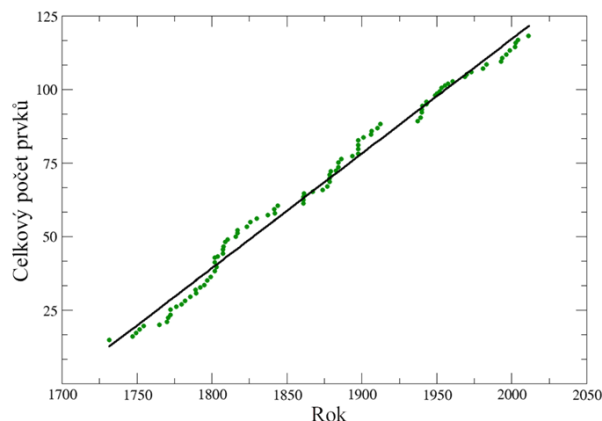
Obsah

1. Úvod
2. Končí periodická tabulka uranem?
3. Meze periodické tabulky směrem shora
4. Je periodická tabulka omezena zdola?
5. Exotické atomy
6. Pár slov na závěr

1. Úvod

Mendělejev na svůj návrh periodické tabulky údajně přišel 17. 2. 1869, byť časové umístění objevu do jediného dne je dnes zpochybnováno¹. Tabulka to byla v mnoha směrech jiná než dnes – měla prohozené sloupce a řádky, graficky byla omezená typografickými možnostmi své doby, ale především byla z dnešního pohledu strašně děravá^{2,3}. Mendělejev svůj periodický systém vyspekuloval na základě pouze 63 známých prvků, oproti 118 prvkům, které známe dnes. V navrženém systému viděl několik mezer, které odvážně interpretoval jako nové, doposud neobjevené prvky. Skandium, galium a germanium byly krátce poté skutečně objeveny, což mimořádně zvýšilo kredit periodického zákona i Mendělejeva jako jejího nepochybnitelného autora.

Periodická tabulka se od té doby rychle doplňovala i rozšiřovala. Je pak přirozené se ptát, zda má nějaké limity a pokud ano, tak jaké ony limity jsou. Tato otázka je hlavním tématem této krátké práce. Není jen otázkou času a vylepšujících se technologií, kdy budou objeveny další a další prvky? Pohled na křivku kumulativního součtu známých prvků v čase (obr. 1) by mohl vést k optimis-



Obr. 1. Vývoj počtu známých prvků v kulturních dějinách. Upraveno podle cit.⁴ a doplněno o nejnověji uznané prvky

tickým očekáváním. Na druhou stranu předchozí úspěchy nejsou obecně zárukou jejich opakování.

2. Končí periodická tabulka uranem?

V období následujícím po Mendělejevově publikaci se pohled na limity periodické tabulky velmi různil. Anglický analytický chemik John Newlands, známý svým zákonem oktáv předcházejícím periodický zákon, se domníval, že žádné principiální omezení na počet prvků není⁵. Na druhou stranu ještě ve dvacátých letech byla ale řada badatelů přesvědčena, že periodická tabulka končí uranem⁶. K tomuto postoji byl dosti dobrý důvod – uran byl Martinem Klaprothem objeven v roce 1789, přičemž následující prvek periodické soustavy, neptunium, byl objeven až v roce 1940. V mezích se objevilo 64 nových prvků, žádný z nich ale nebyl těžší než uran.

Ne že by se nikdo o izolaci těžších prvků nepokoušel. Známý je případ Enrica Fermiho, který si nárokoval objev prvku č. 93 (a také prvku 94 (cit.⁷)). Ačkoliv se Fermi mýlil, šlo přesto o průlom. Prvek totiž nehledal v některém z přírodních materiálů, ale pokusil se jej připravit ozařováním uranu tehdejší horkou novinkou, neutrony. Prvek nazval ausoniem (prvek č. 94 pak hesperiem, oba dle starých řeckých názvů pro Itálii*). Tyto prvky neměly dlouhého trvání, konec jim učinila Ida Noddacková, spoluobjevitel-

* Objevuje se občas tvrzení, že tento prvek chtěl Fermi dokonce označit jako mussolinium, což se ale s největší pravděpodobností nezakládá na pravdě⁸.

ka rhenia, která ve své práci kritizující Fermiho objev dokonce poprvé (správně) postulovala jaderné štěpení⁹. Další, téměř současný pokus je spojen s naším územím. Ředitel jáchymovské továrny a laboratoře na výrobu uranových barev a radiových preparátů Odolen Koblíček uvažoval, že izotop ²²⁵Ac nemůže pocházet z žádné známé rozpadové řady – a musí existovat těžší prvek, ze kterého vzniká¹⁰. V roce 1934 publikoval údajný objev tohoto prvku v časopise *Chemiker Zeitung*¹¹, který byl zaznamenán i v časopisem *Nature*¹². Již o rok později ale vychází článek s jistou počůchlostí nazvaný *Bohemium – An Obituary*¹³. Konec prvku přinesla rentgenová spektroskopie, přesněji stejně jako v případě Fermiho, Ida Noddacková⁹. Ještě dříve byl Charlesem Baskervillem popsán prvek č. 93 označený jako carolinium – autor vycházel z klasických analytických technik a měření atomových hmotností, kdy dospěl k závěru, že thorium je složeno z více prvků¹⁴. Do diskuze se zapojil i český profesor Bohuslav Brauner, který ale v oznámení nového prvku viděl americkou touhu po senzaci^{15,16}.

Když tedy nebylo možné žádný těžší prvek najít, bylo třeba přijít aspoň s vysvětlením, proč žádný takový prvek neexistuje. To se stalo několikrát docela zajímavým způsobem – detailní rozbor nalezně čtenář v práci uznávaného historika vědy Helge Kragha⁶. Na základě Bohrovy teorie atomu se dalo argumentovat, že u těžších prvků se elektrony pohybují po orbitách, které jsou tak blízko atomového jádra, že dojde k jejich kolapsu do jádra^{6,17}. Připomeňme, že před objevem neutronů byl fenomén izotopie vykládán modelem atomového jádra, ve kterém se protony v jádře kombinují s elektrony – přirozené vysvětlení, vždyť při beta rozpadech vylétají z jader elektrony, takže v nich předtím musí být! Různá jádra tak mají různou hmotnost, i když mají stejný náboj. Z pohledu Occamovy britvy je to vlastně přijatelnější vysvětlení než předpokládat nějakou další částici s nenulovou hmotností, ale nulovým nábojem! Pád elektronu do jádra pak přirozeně vede k poklesu náboje jádra a těžší prvek tak nemůže vzniknout. Různé výpočty vedly k různým maximálním protonovým číslům, od $Z = 68$ pro $Z = 137$ (cit.^{18–20}).

Jiné vysvětlení bylo založeno na předpokladu kvantování času – pokud existuje nějaké nejmenší kvantum času (někdy se takové kvantum času nazývá chrononem), pak atomy, ve kterých by elektrony musely oběhnout rychleji než za jedno kvantum času, jednoduše nemohou existovat²¹. Typicky se toto kvantum času pokládalo rovno $\Delta T = h / m_0 c^2$, kde h je Planckova konstanta, m_0 je klidová hmotnost elektronu a c je rychlost světla ve vakuu (jde o Comptonovu vlnovou délku vydělenou rychlostí světla). Kvantitativní odhady v rámci výše uvedených vysvětlení vedly k maximálnímu náboji atomu 137, resp. 97, při započítání relativistické korekce²². Pozdější odhad na základě Diracovy relativistické teorie elektronu vedl k maximální hodnotě protonového čísla $Z = 90,5 \pm 0,5$ (cit.²³). Toto číslo podivuhodně dobře sedělo s protonovým číslem uranu ($Z = 92$). Z vlastivědného hlediska je zajímavé, že v poznámce pod čarou u tohoto článku je zmíněna konverzace s Philippem Frankem, Einsteinovým nástup-

cem na pražské německé univerzitě. Ten navrhl, že maximální protonové číslo bude dáno podmínkou, že de Broglieova vlnová délka $\lambda = h / mc$ musí být větší než Comptonova vlnová délka $h / m_0 c$, což vede opět k podmínce maximálního protonového čísla 97 (hmotnost m a klidová hmotnost m_0 se liší).

3. Meze periodické tabulky směrem shora

Všem zajímavým úvahám z předchozí kapitoly učinil přítrž objev transuranů ve čtyřicátých letech. Periodická tabulka uranem nekončí! Přijmeme nicméně hypotézu, že periodický systém nějaký konec má. Ten může být dán různými důvody: (a) atomová jádra těžších prvků nejsou dostatečně stabilní, (b) dojde ke kolapsu elektronového systému, (c) zhroutí se periodický systém (tj. atomy se v závislosti na nábojovém čísle budou chovat zcela libovolně a neperiodicky). Proberme jednotlivé možnosti.

Nejnápadnějším důvodem omezení periodické tabulky je jaderná nestabilita. Stabilitu jader můžeme v nejjednodušším případě studovat v rámci jednoduchého kapkového modelu, ve kterém si jádro představujeme jako nestlačitelnou kapalinu tvořenou protony a neutrony²⁴. Tento model umožňuje vypočítat vazebnou energii jader pomocí semiempirické rovnice:

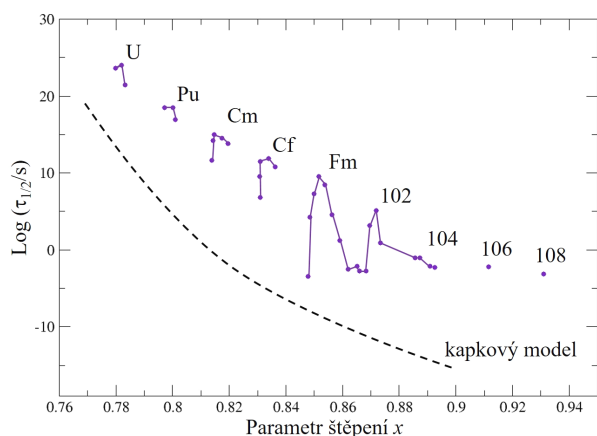
$$E_B = c_{vol} A - c_{surf} A^{2/3} - c_{coul} Z^2 A^{-1/3} - c_{sym} (A - 2Z)^2 A^{-1}$$

s přibližnými hodnotami parametrů:

$$c_{vol} \approx 14 \text{ MeV}, c_{surf} \approx 13 \text{ MeV}, c_{coul} \approx 0,6 \text{ MeV}, c_{sym} \approx 20 \text{ MeV}.$$

Z je počet protonů, N počet neutronů a $A = N + Z$. S vědomím, že objem kapičky roste s počtem nukleonů A a jeho poloměr tedy s $\Delta T = h / m_0 c^2$, nahlédneme, že první člen popisuje objemovou energii, druhý člen povrchovou energii a třetí člen coulombovské odpuzování protonů. Poslední člen je neklasický a souvisí s Pauliho vylučovacím principem. Z modelu například vyplývá, že atomy nepřestanou existovat spontánní emisí neutronů – resp. stalo by se tak až při extrémně vysokých protonových číslech. Jádra se mohou štěpit také na dvě jádra menší. Těžká jádra především ale ochotně ztrácejí mimořádně stabilní částici ⁴He (alfa částice), ale okamžitému rozpadu brání často vysoká energetická bariéra. Nejtěžším známým stabilním izotopem je ²⁰⁸Pb, ale poločas rozpadu ²⁰⁹Bi o hodnotě $1,9 \cdot 10^{19}$ let je natolik ohromný (uvažme, že stáří Země je odhadováno v různých zdrojích v rozmezí 6000–4,5 miliardy let), že samotné změření tohoto rozpadu představuje heroický výkon²⁵. Těžší jádra ale ztrácí alfa částice dosti ochotně. Doba života nejtěžšího prvku ²⁹⁴Og je pouze 0,89 ms, dost na detekci daného atomu, ale málo na detailní chemické studie. Pokud by se jádra řídila kapkovým modelem, byla by jejich doba života ještě menší (viz obr. 2)²⁶.

Jaderná stabilita patří historicky spíše do gesce fyziků, podívejme se, co se děje s elektrony. Elektronový ob-



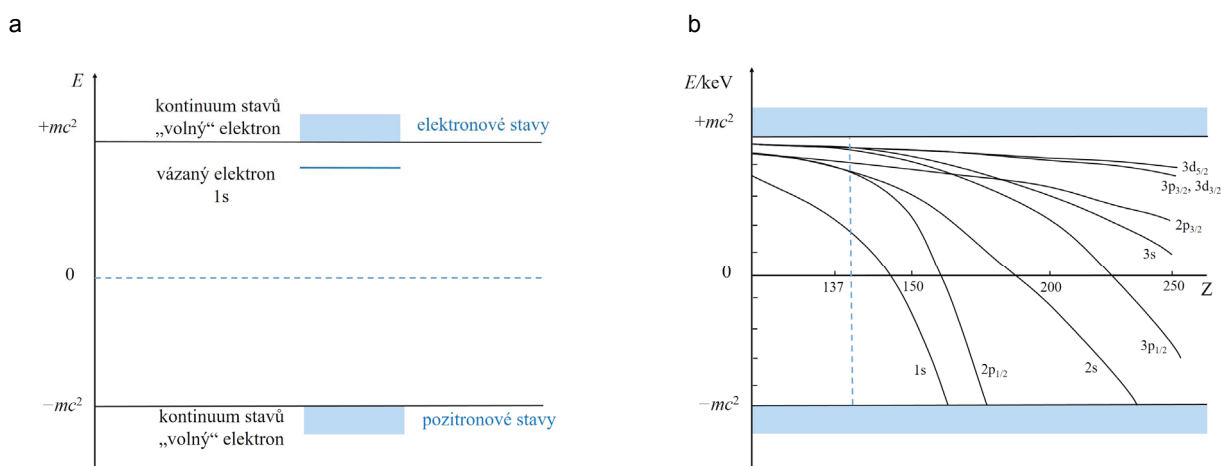
Obr. 2. Poločas spontánního štěpení jako funkce parametru štěpení. Experimentální hodnoty (pospojované body) jsou srovnány s predikcí v rámci kapkového modelu. Obrázek je upraven podle cit.²⁷

lak se především musí ustavit – dle dohody Mezinárodní unie pro čistou a užitou fyziku (IUPAP) k tomu potřebuje elektron alespoň 10^{-14} s, takže jádra žijící kratší dobu nemohou vůbec atomy vytvářet. Elektrony ve velmi těžkých atomech se navíc mohou chovat způsobem, na který nejsme zvyklí^{28,29}. Pohybují se nesmírně rychle, s rychlostí srovnatelnou s rychlostí světla. Na obr. 3 je znázorněno energetické spektrum atomu vodíkového typu v rámci Diracovy relativistické teorie elektronu. Elektron vázaný v atomu má nižší energii než je jeho energie klidová, u atomu vodíku o 13,6 eV. Z Diracovy rovnice ale vyplývá, že u energií rovných $-m_0c^2$ se objevuje kontinuum stavů, které Dirac interpretoval (po jistém váhání) jako stavy pozitronové. Z obr. 3b vidíme, že se zvyšujícím se nábojem jádra budou mít elektrony stále nižší energii, až

se začnou blížit energetickému kontinuu pozitronových stavů. Není moc jasné, co se v takovou chvíli stane. Jedna možnost je, že hranice nikdy nebude překročena, energie se bude spíše limitně blížit. Druhá možnost je vznik elektronově-pozitronových párů. Na každý pád standardní techniky kvantové teorie molekul i s relativistickými korekcemi v tu chvíli přestanou dávat smysl. Úvahy o dalším vývoji se tak většinou zastavují okolo prvku číslo 172 – pořad o dost výše, než nám realisticky umožní stabilita atomových jader v jakémkoliv dohledné budoucnosti.

I když těžké atomy budou existovat, není vůbec zaručeno, že by měly respektovat nějakou formu periodického zákona. Obr. 4 ukazuje několik možných tvarů periodické tabulky, které vychází z různých představ. Obr. 4a ukazuje tabulku, která respektuje známé Madelungovo pravidlo – podle něj jsou elektrony umístěny do jednoelektronových stavů (orbitalů), které jsou seřazeny v pořadí $n + l$, kde n je hlavní kvantové číslo a l je vedlejší kvantové číslo. Toto pravidlo vede ke známé řadě 1s, 2s, 2p, 3s, 3p... – nejde ale v žádném případě o nenarušitelné dogma, dané pořadí může být jiné u iontů a zdaleka ne vždy platí také pro neutrální atomy³¹. Pokud provedeme kvantově-chemické výpočty, pořadí jednoelektronových stavů a výstavbový princip bude zásadním způsobem pozměněné^{32,33}. Je přitom třeba uvažovat relativistickou povahu elektronů v těžkých atomech. Pravděpodobně nejrealističtější periodická tabulka do protonového čísla 172 pochází od Pekky Pyykköho a je ukázána na obr. 4b (cit.³⁴). Vidíme, že po prvek 118 uzavírající sedmou periodu je v souladu s naivním očekáváním založeném na Madelungově pravidlu. V dalších periodách ale již dochází k zásadním změnám.

V této chvíli se sluší čtenáře varovat. Periodický zákon můžeme formulovat tak, že vlastnosti prvků jsou periodickou funkcí jeho protonového čísla. Do tabulky pod sebe pak seřazujeme prvky stejných vlastností. Od vzniku kvantové mechaniky jsme si pak zvykli pod sebe seřazovat



Obr. 3. a) Energetické spektrum atomu vodíkového typu v rámci Diracovy relativistické teorie, b) relativistické orbitální energie pro nejnižší orbitály u atomů s $Z = 100–250$ (upraveno podle cit.³⁰)

a

Z	s blok	g blok	f blok	d blok	p blok	Z
1	□					2
3	□□					10
11	□□					18
19	□□					36
37	□□					54
55	□□					86
87	□□					118
119	□□	□□□□□□□□□□□□□□□□	□□□□□□□□□□□□□□□□	□□□□□□□□□□□□□□□□	□□□□□□□□□□□□□□□□	168

b

Z	s blok	g blok	f blok	d blok	p blok	Z
1	□					2
3	□□					10
11	□□					18
19	□□					36
37	□□					54
55	□□					86
87	□□					118
119	□□	□□□□□□□□□□□□□□□□	□□□□□□□□□□□□□□□□	□□□□□□□□□□□□□□□□	□□□□□□□□□□□□□□□□	140
141			□□□□□□□□□□□□□□□□	□□□□□□□□□□□□□□□□		164
165	□□				□□□□□□□□□□□□□□□□	172

Obr. 4. a) Periodická tabulka sestavená na základě Madelungova pravidla. Elektrony jsou umístěny do orbitalů seřazených v pořadí $n + l$, b) rozšířená periodická tabulka zahrnující spinově-orbitální relativistické efekty, které stabilizují $8p_{1/2}$ a $9s$ hladiny. Upraveno podle cit.^{1,4,34}

prvky s analogickou elektronovou strukturou, například sodík s valenčním elektronem v orbitalu 3s stojí nad draslíkem s valenčním elektronem v orbitalu 4s. Jenže zatímco protonové číslo jádra je přesně dané, elektronová konfigurace představuje koncept pouze přibližný. I v základním stavu atomu může do výsledné vlnové funkce přispívat ve srovnatelné míře několik elektronových konfigurací.

Je proto zajímavé testovat předpovědi vlastností prvků kvantově chemickými metodami na nejtěžších prvcích, které ale mají dostatečně dlouhou dobu života³⁵. Zajímavým případem je hassium – prvek číslo 108. Leží pod rheniem a osmiem, takže na základě Mendělejevových postupů bychom měli očekávat existenci sloučenin s hassiem v osmém oxidačním stupni. Možná překvapivě se skutečně podařilo připravit oxid hassičelý, HsO_4 (^{269}Hs má dosti dlouhou dobu života 9,7 s).

Seaborgium (prvek číslo 106) zase vytváří hexakarboonylové sloučeniny, podobně jako nad ním stojící wolfram³⁶. Zajímavá je otázka kopernicia (prvek č. 112), který je umístěn v periodické tabulce pod rtuť. Již v roce 1975 Kenneth S. Pitzer ve své teoretické práci předpokládal³⁷, že by se tento atom měl chovat spíše jako vzácný plyn nežli jako kov. Experimenty ale naznačují, že jeho vlastnosti jsou bližší rtuť než třeba radonu³⁵.

Kopernicium je nejtěžší experimentálně prozkoumaný prvek. Můžeme zatím předběžně soudit, že periodický systém dosud nevykazuje žádné anomálie. U těžších prvků jsme odkázáni na (nesnadné) výpočty. Z těch plyne³⁸, že třeba prvek č. 118 má elektronovou strukturu vzácných plynů. Pokud by se ale podařilo shromáždit dostatečný počet atomů, šlo by o vskutku podivný vzácný plyn. Za normálních podmínek by se choval jako pevná látka. Šlo by o reaktivní atom s malou ionizační energií a kladnou hodnotou elektronové afinity. Zajímavé jsou i předpovězené vlastnosti ještě těžších prvků²⁸. Ty by mohly vykazovat sklon k extrémně vysokým oxidačním číslům (možná až 12). V této souvislosti poukazujeme na nedávné názvoslovné iniciativy J. Kotka a P. Slavíčka³⁹, resp. systematictější pojaté studie slovenských autorů⁴⁰, ve kterých jsou navrhovány vhodné koncovky pro tyto oxidační stupně.

4. Je periodická tabulka omezena zdola?

Otázka, zda periodická tabulka začíná vodíkem, ní možná na první pohled podivně. Mendělejev sám ovšem takový nápad za nijak šílený nepředpokládal. V životě se mu již vyplatilo předpovědět nové prvky interpolací – ve své tabulce nechal místo skandiu, germaniu a galii. Na

konci svého života učinil ještě jeden pokus, předpovědět nové prvky extrapolací. Navrhnul dva prvky, coronium a newtonium. Motivací k této odvážné – a mylné – extrapolaci byla snaha zachránit tzv. luminoforní ether, hypotetické prostředí, ve kterém se mělo šířit elektromagnetické záření. Prvky umístil nad sloupec vyhrazený vzácným plynům a vodíku (viz obr. 5). Nejlehčí možný prvek měl odpovídat etheru. Jako horní mez hmotnosti použil periodický zákon a vyšla mu relativní hmotnost 0,17. Dále se obrátil ke kinetické teorii plynů a hledal maximální relativní hmotnost, která umožní například únik z gravitačního pole Slunce – vyšlo mu 0,000013. Nakonec dospěl k hmotnosti, která odpovídá přibližně milióntině hmotnosti atomu vodíku, přičemž předpokládal rychlost 2250 km/s (cit.^{41,42}).

Dlužno dodat, že Mendělejevův návrh se objevil jen několik málo let před Einsteinovou speciální teorií relativity, se kterou ether nadobro mizí z vážně míněných vědeckých úvah. Těžší z prvků měl představovat prvek, o kterém se předpokládalo, že se vyskytuje ve sluneční koróně.

Za zmínku stojí, že prvky lehčí než vodík se objevují v periodických tabulkách některých prominentních mladších chemiků. Tak například takovýto prvek můžeme spat-

řit v tabulce Alfreda Wernera z roku 1905 (cit.⁴⁴). Zajímavější je ale tabulka von Antropoffa z roku 1926 (cit.⁴⁵). Von Antropoff postuluje existenci prvku s protonovým číslem nula, ale s nenulovou hmotností. Prvek označuje jako neutronium – několik let před objevem neutronu Jamesem Chadwickem!

Neutron je vlastně skutečně správná extrapolace periodické tabulky.

5. Exotické atomy

Atomy, na které jsme zvyklí, jsou tvořeny atomovým jádrem a elektrony. Existuje ale řada dalších částic nesoucích elektrický náboj, které pak mohou být vázány do struktur analogických atomům. Na tyto atomy se můžeme také dívat jako na rozšíření periodické tabulky.

Čtenáře asi napadne jako první možný atom antiproton – soustava tvořená pozitronem a antiprotonem. Takovýto atom byl poprvé vytvořen v CERN v roce 1995 (cit.⁴⁶), ale pro chemika vlastně moc zajímavý není, chová se víceméně stejně jako atom vodíku. Zajímavějším exotickým atomem je pozitronium – atom tvořený elektronem a pozitronem. Pozitronium se chová jako atom vodíku, ve kterém obíhá elektron s poloviční hmotností. Byl připraven již v roce 1951 (cit.⁴⁷) a v roce 2007 se pak podařilo dokonce připravit analogii molekuly vodíku, di-pozitronium⁴⁸. Čtenář může být na pochybách, jak takovýto atom může existovat, když elektron a pozitron při svém setkání musí anihilovat za vzniku alespoň dvou fotonů. Pozitronium taktéž nakonec skutečně skončí, žije ale dost dlouho, aby se na něm dalo ledacos naměřit. Podle relativní orientace spinu elektronu a pozitronu se pozitronium může nacházet ve dvou stavech: singletním 1S_0 (tzv. para forma, *p*-Ps s dobou života 125 ps)⁴⁹ a tripletním 3S_1 (tzv. ortho forma, *o*-Ps s dobou života 142 ns)⁵⁰.

Jiným exotickým atomem je tzv. mionium Mu, částice tvořená elektronem a antimionem⁵¹, částicí asi dvěstěkrát těžší než elektron. Tento atom žije asi 2,2 μ s (cit.⁵²), což umožňuje vytvoření řady sloučenin, například mionidu sodného NaMu nebo chloridu mionia MuCl. Energetické spektrum atomu mionia se liší jen velmi málo od spektra atomu vodíku. Reakce s atomy mionia jsou velmi vhodné pro studium kvantových efektů u chemických reakcí^{55,56}, neboť jde o lehčí variantu atomu vodíku a kvantové efekty jako například tunelování jsou zde výraznější.

Exotické atomy své místo v periodické tabulce zatím nemají. Můžeme se ale tázat, zda nepředstavují legitimnější formu atomů než nejtěžší z transuranů. Na rozdíl od nich jsme již schopni vytvářet s těmito atomy sloučeniny. Bylo by ale třeba vytvořit novou dimenzi periodické tabulky.

6. Pár slov na závěr

Periodická tabulka byla vytvořena před 150 lety. Poslední výrazná změna nastala v roce 1945, kdy Glenn Seaborg vytvořil prostor pro tehdy se objevující transurany.

Периодическая система элементов по группам и рядамъ.

Рядъ.	ГРУППЫ ЭЛЕМЕНТОВЪ:											
	0	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII			
0	x	—	—	—	—	—	—	—	—			
1	у	Водо- родъ. H 1,008	—	—	—	—	—	—	—			
2	Гелий. He 4,0	Литий. Li 7,03	Берил- лий. Be 9,1	Боръ. B 11,0	Угле- родъ. C 12,0	Азотъ. N 14,01	Кисло- родъ. O 16,00	Фторъ. F 19,0	—			
3	Неонъ. Ne 19,9	Натрий. Na 23,06	Маг- ний. Mg 24,36	Алю- миний. Al 27,1	Крем- ний. Si 28,2	Фос- форъ. P 31,0	Сѣра. S 32,06	Хлоръ. Cl 35,45	—			
4	Ар- гонъ. Ar 38	Каль- ций. Ca 39,15	Каль- ций. Ca 40,1	Сканди- й. Sc 44,1	Титанъ. Ti 48,1	Вана- дий. V 51,2	Хромъ. Cr 52,1	Мар- ганецъ. Mn 55,0	Же- лезно. Fe 55,9	Кобальтъ. Co 59	Никель. Ni 59	(Cu)
5	—	Мѣдь. Cu 63,6	Цинкъ. Zn 65,4	Гал- лий. Ga 70,0	Гер- маний. Ge 72,3	Мышь- акъ. As 75	Селенъ. Se 79,2	Бромъ. Br 79,95	—	—	—	—
6	Крип- тонъ. Kr 81,8	Рубидий. Rb 85,5	Строн- ций. Sr 87,5	Ит- трий. Y 89,0	Цир- коний. Zr 90,5	Нобий. Nb 94,0	Молиб- денъ. Mo 96,0	—	Руте- ний. Ru 101,7	Родий. Rh 103,0	Палладий. Pd 106,5	(Ag)
7	—	Сере- бро. Ag 107,93	Кад- мий. Cd 112,4	Индий. In 113,0	Оло- во. Sn 119,0	Сурь- ма. Sb 120,2	Тел- луръ. Te 127	Йодъ. J 127	—	—	—	—
8	Ксе- нонъ. Xe 128	Цезий. Cs 132,9	Барий. Ba 137,4	Лан- танъ. La 138,9	Церий. Ce 140,2	—	—	—	—	—	—	—
9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
10	—	—	—	Иттер- бий. Yb 173	—	Тан- талъ. Ta 183	Вольф- рамъ. W 184	—	Ос- сий. Os 191	Ири- дий. Ir 193	Платина. Pt 194,8	(Au)
11	—	Зо- лото. Au 197,2	Ртуть. Hg 200,0	Талий. Tl 204,1	Свин- ецъ. Pb 206,9	Вис- мутъ. Bi 208,5	—	—	—	—	—	—
12	—	—	Радий. Rd 225	—	Торий. Th 232,5	—	Уранъ. U 238,5	—	—	—	—	—

Obr. 5. Periodická tabulka D. Mendělejeva z roku 1905 (cit.⁴³). V tabulce jsou nad vzácnými plyny zatím neznámé prvky označe-
né jako x a y

V poslední době se proměňuje pouze nevýrazně na okrajích, díky ojedinělým objevům nových prvků. Přesto může docházet k dalším změnám. Stále například probíhají diskuze, zda lutecium a lawrencium patří mezi f-prvky nebo by měly být zařazeny mezi d-prvky do třetí skupiny^{1,57,58}. Objevují se také alternativní tabulky. Mezi geology je například populární *Earth Scientist's Periodic Table*, kde jsou prvky uspořádány podle vlastností svých iontů a podobnosti geochemických reakcí⁵⁷. Periodický zákon lze vyjádřit také v jiných grafických formách než je tabulka, působivý přehled nabízí například některé webové stránky.⁵⁹

Velký prostor pro další růst nabízí periodická tabulka zdánlivě objevených prvků – prvků, o jejichž objevu byli autoři v jisté chvíli přesvědčeni, ale později se ukázala informace jako mylná. Periodická tabulka neexistujících prvků je podstatně větší než tabulka prvků skutečně existujících. Velkou zásluhu na zmapování této oblasti má český fyzikální chemik a historik vědy Vladimír Karpenko, z jehož publikace⁵⁸ vychází i novější rozsáhlá publikace *Lost elements*⁸. Zatímco v českých zemích žádný existující prvek objeven nebyl, mezi neexistujícími prvky několik prominentních zástupců máme. Kromě již zmíněného bohemia se setkáme třeba s dvi-manganem (dnešním rheniem) Václava Dolejška a Jaroslava Heyrovského^{60,61}. Do periodické tabulky neexistujících prvků můžeme kromě omylů zařadit také prvky, jejichž objev byl spojen s přímým podvodem – to byl případ např. prvku číslo 118 (cit.⁶²). Když už se vydáváme do sféry neexistujících prvků, zajímavým cvičením je diskuze periodického systému ve dvourozměrném světě⁶³, který má v naší kultuře díky Edwinu Abbottovi a jeho knize *Flatland*⁶⁴ nezanedbatelné místo.

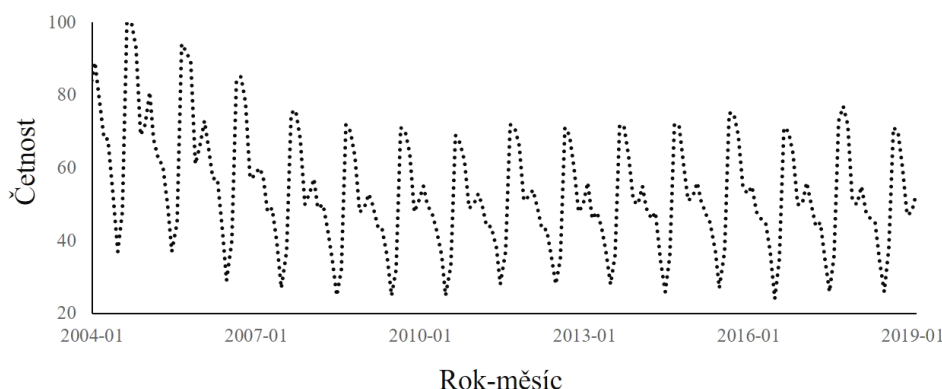
Z pohledu praktikujícího chemika se mohou zdát úvahy z tohoto článku odtažité – úplně si vystačí s menší podmožinou již existujících prvků. Periodická tabulka je ale také – a možná především – učební látka. To se dá snadno demonstrovat analýzou nástrojem *Google trends*. Periodická tabulka ztrácí přes polovinu svých vyhledávání mimo školní měsíce, viz obr. 6. I z tohoto důvodu se vyplácí vě-

novat otázkám spojeným s budoucností periodické tabulky určitou část naší intelektuální kapacity.

Autoři děkují Ing. Š. Sršňovi za technickou pomoc.

LITERATURA

1. Scerri E., Restrepo G.: *Mendeleev to Oganesson: A Multidisciplinary Perspective on the Periodic Table*, Oxford University Press Oxford, New York 2018.
2. Mendělejev D.: *Opyt Sistěmy Elementov Osnovannojo Na Ich Atomnom Vese I Chimičeskom Schodstve* 1869.
3. Mendělejev D.: Ueber Beziehungen Eig. Zu Den Atomgewichten Elem. Relatsh. Prop. Elem. Their At. Weights 12, 405 (1869).
4. Karol P. J.: *J. Chem. Educ.* 79, 60 (2002).
5. Newlands J. A. R.: *Chemical News* 7, 70 (1878).
6. Kragh H.: *Eur. Phys. J. H* 38, 411 (2013).
7. Fermi P. E.: *Nature* 133, 898 (1934).
8. Fontani M., Costa M., Orna M. V.: *The Lost Elements: The Periodic Table's Shadow Side*, Oxford University Press, Oxford 2014.
9. Noddack I.: *Angew. Chem.* 47, 653 (1934).
10. Stern A.: *J. Soc. Chem. Ind.* 53, 678 (1934).
11. Koblíček O.: *Chemiker Zeitung* 58, 683 (1934).
12. Editorial, *Nature* 134, 55 (1934).
13. Speter M.: *Science* 80, 588 (1934).
14. Baskerville C.: *J. Am. Chem. Soc.* 26, 922 (1904).
15. Brauner B.: *Nature* 69, 606 (1904).
16. Brauner B., Pavlíček F.: *Proc. Chem. Soc.* 67 (1901).
17. Muchová E., Slavíček P.: *Chem Listy* 108, 638 (2014).
18. Bohr N.: *Ann. Phys.* 71, 228 (1923).
19. Sommerfeld A.: *Atombau und Spektrallinien*, Vieweg & Sohn, Braunschweig 1924.
20. McLennan J. C.: *On The Origin of Spectra.*, Brit. Assoc. Adv. Sci., Report (1923).
21. Kragh H., Carazza B.: *Stud. Hist. Philos. Sci. Part A* 25, 437 (1994).



Obr. 6. Frekvence vyhledávání periodické tabulky v daném měsíci a roce. Analýza byla provedena pomocí nástroje *Google trends*

22. Flint H. T., Richardson Owen Willans: Proc. R. Soc. Lond. Ser. Contain. Pap. Math. Phys. Character 117, 637 (1928).
23. Glaser W., Sitte K.: Z. Phys. 87, 674 (1934).
24. Weizsäcker C. F. V.: Z. Phys. 96, 431 (1935).
25. de Marcillac P., Coron N., Dambier G., Leblanc J., Moalic J.-P.: Nature 422, 876 (2003).
26. Ackermann D., Theisen C.: Phys. Scr. 92, 083002 (2017).
27. Münzenberg G.: *Extended Density Functionals in Nuclear Structure Physics, chap. The Structure of Heavy Nuclei – from Lead to Superheavy Elements*, Springer-Verlag, Berlin 2004.
28. Pyykkö P.: Chem. Rev. 112, 371 (2012).
29. Pyykkö P.: Annu. Rev. Phys. Chem. 63, 45 (2012).
30. Greiner W., Müller B., Rafelski J.: *Quantum Electrodynamics of Strong Fields: With an Introduction into Modern Relativistic Quantum Mechanics*, Springer-Verlag, Berlin 985.
31. Schwarz W. H. E.: Angew. Chem. Int. Ed. 52, 12228 (2013).
32. Schwarz W. H. E.: J. Chem. Educ. 87, 444 (2010).
33. Schwarz W. H. E., Rich R. L.: J. Chem. Educ. 87, 435 (2010).
34. Pyykkö P.: Phys. Chem. Chem. Phys. 13, 161 (2011).
35. Türler A., Pershina V.: Chem. Rev. 113, 1237 (2013).
36. Loveland W.: Science 345, 1451 (2014).
37. Pitzer K. S.: J. Chem. Phys. 63, 1032 (1975).
38. Jerabek P., Schuetrumpf B., Schwerdtfeger P., Nazarewicz W.: Phys. Rev. Lett. 120, 053001 (2018).
39. Slaviček P., Kotek J.: Chem. Listy 104, 286 (2010).
40. Krivosudský L., Galamboš M., Levická J.: Chem. Listy 111, 509 (2017).
41. Mendělejev D.: *Vestník i Bibliotěka Samoobrazovani-ja* 1–4, 165 (1903).
42. Gordin M. D.: Angew. Chem. Int. Ed. 46, 2758 (2007).
43. Mendělejev D.: Popytka chimičeskogo ponimanija mirovogo efira, (1905).
44. https://www.meta-synthesis.com/webbook/35_pt/pt_database.php?PT_id=64, staženo 28. 2. 2019.
45. Antropoff A. V.: Angew. Chem. 39, 722 (1926).
46. Baur G., Boero G., Brauksiepe A., Buzzo A., Eyrih W., Geyer R., Grzonka D., Hauffe J., Kilian K., Lovetere M., Macri M., Moosburger M., Nellen R., Oelert W., Passaggio S., Pozzo A., Röhrich K., Sachs K., Schepers G., Sefzick T., Simon R. S., Stratmann R., Stinzing F., Wolke M.: Phys. Lett. B 368, 251 (1996).
47. Deutsch M.: Phys. Rev. 82, 455 (1951).
48. Cassidy D. B., Mills Jr A. P.: Nature 449, 195 (2007).
49. Al-Ramadhan A. H., Gidley D. W.: Phys. Rev. Lett. 72, 1632 (1994).
50. Asai S., Orito S., Shinohara N.: Phys. Lett. B 357, 475 (1995).
51. Goli M., Shahbazian S.: Phys. Chem. Chem. Phys. 17, 7023 (2015).
52. Griffiths D. B.: *Introduction to Elementary Particles*, 2. vyd., Wiley-VCH, Weinheim 2008.
53. Fleming D. G., Cottrell S. P., McKenzie I., Macrae R. M.: Phys. Chem. Chem. Phys. 14, 10953 (2012).
54. Hollas D., Muchová E., Slaviček P.: Chem. Listy 110, 394 (2016).
55. Jensen W. B.: J. Chem. Educ. 59, 634 (1982).
56. Landau L. D., Lifshitz E. M.: *Quantum Mechanics*, Pergamon, London 1959.
57. <http://www.gly.uga.edu/railsback/PT.html>, staženo 28. 2. 2019.
58. Karpenko V.: Ambix 27, 77 (1980).
59. https://www.meta-synthesis.com/webbook/35_pt/pt_database.php?PT_id=3, staženo 28. 2. 2019.
60. Dolejšek V., Heyrovský J.: Nature, Lond. 116, 782 (1925).
61. Heyrovský J.: Nature, Lond. 135, 870 (1935).
62. Dalton R.: Nature 420, 728 (2002).
63. Zaslav B.: J. Ariz. Acad. Sci. 6, 165 (1970).
64. Abbott E. A.: *Flatland: A Romance of Many Dimensions*, Dover Publications, New York 1992.

P. Slaviček and E. Muchová (*Department of Physical Chemistry, University of Chemistry and Technology, Prague*): **The Limits of the Periodic Table**

In this work, we briefly discuss the boundaries of the periodic table: where it begins and where it ends. Uranium was for a long time considered as a natural end of the periodic table. We discuss this aspect in the first part of the manuscript. We then address a question whether the periodic table has some “end”, i.e. whether arbitrarily heavy elements can be experimentally prepared up at least in principle. In the second part, we devote to “elements”, which were supposedly lighter than hydrogen. Next, we discuss exotic atoms, which are not composed of electrons and nuclei made of protons and neutrons. We show that the 150-years old concept of the periodic table is still a living and evolving system.

Keywords: Periodic table of elements, relativistic effects, history of chemistry, higher oxidation states, exotic atoms