

CHEMIE SUPERTĚŽKÝCH PRVKŮ – TEST MEZÍ PLATNOSTI PERIODICKÉHO ZÁKONA

JAN JOHN

*Katedra jaderné chemie, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, České vysoké učení technické v Praze, Břehová 7, 115 19 Praha 1
jan.john@fffi.cvut.cz*

Došlo 27.2.2019, přijato 7.3.2019.

Klíčová slova: supertěžké prvky, SHE, transaktinoidy, chemie jednotlivých atomů, chemie v plynné fázi, relativistické efekty, periodický zákon

Obsah

1. Úvod
2. Metody přípravy supertěžkých prvků (SHE)
3. Stručná historie objevů
 - 3.1. Od rutherfordia k seaborgiu – transfermiové války pokračují
 - 3.2. Bohrium až nihonium – studená fúze v GSI Darmstadt a RIKEN
 - 3.3. Flerovium až oganesson – z jednotlivých laboratoří k široké mezinárodní spolupráci
4. Studium chemických vlastností SHE
 - 4.1. Chemie jednotlivých atomů
 - 4.2. Teoretická chemie
 - 4.3. Experimentální chemie
 - 4.3.1. Chemie v roztocích
 - 4.3.2. Chemie v plynné fázi
5. Závěr

1. Úvod

Pojem „supertěžké prvky“ (Superheavy Elements – SHE) byl do literatury zaveden zejména díky americkému fyzikovi Johnu Wheelerovi, který ho v padesátých letech minulého století používal při svém teoretickém studiu limitů stability jader¹. První použití tohoto termínu v literatuře je ale možno vystopovat již podstatně dříve, obvykle se připisuje americkému chemikovi Laurenci Quillovi, který pojem SHE použil pro hypotetické prvky s protonovým číslem 93–96 v přehledném článku o transuranových elementech vydaném v době, kdy nejtěžším známým prvkem byl uran². V pozdější době byl tento termín používán pro různé skupiny prvků, zejména pro prvky ležící v oblasti teoreticky předpovězeného „ostrova stability“ v okolí protonového a neutronového čísla (Z, N

$\approx (114, 184)$ (cit.^{3,4}). V dnešní literatuře je většinou klade-no rovnítko mezi pojmy supertěžké prvky a transaktinoidy tak, jak to bylo zavedeno ve většině pozdějších monografií a přehledných článků na toto téma^{5–9}.

Rozhodnutím Mezinárodní unie pro čistou a aplikovanou chemii (IUPAC) z 28. listopadu 2016 byl schválen návrh její Divize pro anorganickou chemii z 8. června 2016 na pojmenování čtyř nových chemických prvků, a tím definitivně zkompletována 7. perioda Mendělejevovy tabulky prvků¹⁰. Doplnění 7. periody rozšiřuje možnosti studia platnosti periodického zákona do nové oblasti – oblasti, ve které je teoreticky předpovězen výrazný vliv relativistických efektů na chemické vlastnosti prvků. Vzhledem k velmi nízkým produkčním rychlostem SHE, které se v ideálních případech pohybují v jednotkách atomů za hodinu, a jejich velmi krátkým – často subsekundovým – poločasům přeměny je nutnou podmínkou pro experimentální studium vlastností těchto prvků dostupnost velmi rychlých experimentálních metod umožňujících studovat chemické chování jednotlivých atomů.

Příprava a studium (chemických) vlastností SHE přinesly a přináší nové výzvy nejen v oblasti exaktních věd, ale otvírají i otázky filosofické a sociologické, jako je např. otázka definice chemického prvku, jeho existence, kritérií pro vyhodnocování a přijetí nároků na objev nového prvku, ale i otázky vztahu mezi chemií a fyzikou, nebo dokonce etiky, případně i podvodů ve výzkumné práci. Některých z těchto otázek se stručně dotkneme dále v této stati, jejímž hlavním cílem ale je přehled toho, nakolik jsou nové poznatky o chemických vlastnostech SHE v souladu s periodickým zákonem.

2. Metody přípravy supertěžkých prvků (SHE)

„Zlaté časy“ přípravy nových transuranových prvků ukončil výbuch vodíkové pumy Mike v roce 1952, v jejíž pozůstatcích bylo objeveno fermium a einsteinium⁹. Prakticky všechny do té doby objevené prvky byly syntetizovány jadernou reakcí (α, xn) na terčovém jádru se Z o dva menším než připravovaný prvek. Važitelná množství nových prvků bylo pak možno získat dlouhodobým ozařováním plutonia nebo transplutoniových prvků v jaderném reaktoru s vysokým tokem neutronů, ve kterém probíhala sekvence reakcí (n, γ) následovaných β^- přeměnou. Pro identifikaci nových prvků byla k dispozici jednoduchá chemická metoda poskytující jednoznačné důkazy – eluční chromatografie na silně kyselém měničím kationtů se slabým komplexotvorným činidlem jako eluentem (typicky kyselina α -hydroxyisomáselná, dále α -HIM). Neexistence izotopu fermia, který by se přeměňoval přeměnou β^- , spolu s faktem, že mocenství posledních tří aktinoidů, zejmé-

na nobelia a mendělevia, v roztoku není omezeno na 3+, jako u většiny transamericiových aktinoidů, ale vyskytují se i v oxidačním stavu 2+, u nobelia dokonce stabilnějším než 3+, zkomplikovaly přípravu i charakterizaci nových prvků a ve svém důsledku vedly až k tzv. „transfermiiovým válkám“ – dlouhá léta nerozhodnutým nárokům na prioritu při objevu prvků se Z od 101 do 106, tedy od mendělevia po seaborgium¹. Důsledkem skutečnosti, že transfermiiové prvky nelze připravit sekvencí reakcí (n,γ) následovaných β⁻ přeměnou, je i fakt, že tyto prvky nelze získat ve važitelných množstvích. Přehled jaderných reakcí používaných nebo uvažovaných pro přípravu transfermiiových prvků je shrnut v tab. I.

Pro přípravu supertěžkých prvků se jako nejspěšnější ukázaly dva typy jaderných reakcí – studená a horká fúze. Pojem „studená fúze“ v tomto kontextu nemá žádnou souvislost se studenou fúzí tak, jak byla v roce 1989 údajně objevena Fleischmannem a Pensem.

Studenou fúzí nazýváme procesy, ke kterým dochází při jaderných reakcích vedených s energií jaderné střely jen těsně převyšující výšku coulombovské bariéry. Relativně nízká je potom i excitační energie vznikajících složených jader (~10–20 MeV, proto „studené“), která mají vyšší odolnost vůči štěpení, a tedy i vyšší pravděpodobnost přežití. Takto vzniklá složená jádra pak deexcitují emisí jednoho nebo maximálně dvou neutronů¹³. Obvyklým terčovým materiálem využívaným při těchto reakcích je olovo nebo bizmut, střely se volí podle prvku, na který reakce cílí (např. v případě nihonia se jednalo o urychlené ionty zinku).

Horkou fúzí nazýváme procesy, při kterých dochází ke vzniku vysoce excitovaného složeného jádra (~35 až 45 MeV, proto „horké“), které po svém vzniku deexcituje emisí 3–5 neutronů. Tato „horká“ složená jádra jsou ve srovnání se složenými jádry vzniklými studenou fúzí náchylnější ke štěpení, ve srovnání se studenou fúzí

však reakce horké fúze vedou na izotopy stejných prvků s vyšším počtem neutronů, které jsou bližší oblasti existence sférických jader, pro které je očekávána i vyšší stabilita (delší poločasy přeměny). Při těchto reakcích se jako terčový materiál obvykle využívají aktinoidy, jadernou střílou poskytující nejlepší výsledky (nuklidy s nejdelším poločasem) jsou obvykle urychlené ionty ⁴⁸Ca – nejdostupnějšího stabilního nuklidu s vysokým nadbytkem neutronů oproti počtu protonů⁷. Další výhodou ⁴⁸Ca jako střely je i skutečnost, že excitační energie složeného jádra nepřevyšuje 30–35 MeV.

3. Stručná historie objevů

Jednou skupinou problémů, na které při výzkumech v oblasti SHE narážíme, jsou samy koncepce pojmů „objev“ a „existence“. SHE nejsou objevovány v přírodě, ale vytvořeny nebo připraveny v laboratoři a vzhledem ke svému velmi krátkým poločasům přeměny zmizí prakticky okamžitě poté, co byly vytvořeny. Někteří filosofové argumentují, že předmět, který neexistuje, nemůže být objeven¹¹. Pojem „objev“ navíc nemusí být definitivní (může se ukázat, že se jednalo o omyl) a jednoznačně připisatelný (paralelní nebo nezávislé objevy, znovuoobjevení)¹². V případě objevů transuranových prvků obvykle vycházíme z představy, že „objekt“ musí existovat v okamžiku „objevu“, nemusí existovat ani před, ani po něm, ale jeho příprava musí být reprodukovatelná¹.

Dalším problémem jsou kritéria pro uznání objevu nového prvku. Zde stojí za zmínku méně známá skutečnost, že Komise pro nomenklaturu anorganické chemie IUPAC si sice vyhrazuje právo navrhnout názvy prvků, v její kompetenci ale není rozhodování o potvrzení nároků na objev. Vývoj situace v této oblasti byl dlouhý a složitý, pro účely tohoto přehledu se omezíme na konstatování, že

Tabulka I

Přehled jaderných reakcí používaných nebo uvažovaných pro přípravu transuranových prvků

Metoda	Reakce	První/úspěšné využití
Dlouhodobé ozařování neutrony	Sekvence reakcí (n,γ) následovaných přeměnou β ⁻	Berkeley, USA
Mnohonásobný záchyt neutronů	Současný záchyt mnoha neutronů (xn,γ), kde x je až 17, následovaný sekvencí přeměn β ⁻	Termojaderná exploze
Bombardování urychlenými částicemi	X(č ₁ ,č ₂)Y, kde č ₁ = p, d, α, t a č ₂ = xn	Berkeley, USA
Reakce s urychlenými lehkými ionty	Reakce velmi těžkých jader (např. aktinoidů) s urychlenými lehkými ionty (Be, C, N, O, Ne)	Nobelův institut, Švédsko SÚJV Dubna, Rusko
Studená fúze	Reakce těžkých stabilních jader (typicky Pb nebo Bi) s urychlenými ionty středně těžkých prvků (Cr, Fe atp.) s energií těsně nad coulombovskou bariérou reakce	GSI Darmstadt, Německo RIKEN, Japonsko
Horká fúze	Reakce aktinoidů s urychlenými ionty středně těžkých prvků (⁴⁸ Ca atp.) s vysokou energií	SÚJV Dubna, Rusko
Reakce těžkých jader	Reakce těžkých urychlených jader (Pb, U) s terči obsahujícími rovněž těžké prvky	Úvahy, testy

v současnosti objev uznává společná Joint Working Party (JWP) on Discovery of Elements zřízená IUPAC a International Union of Pure and Applied Physics (IUPAP). Tato JWP akceptovala kritéria vypracovaná dřívější IUPAC/IUPAP Transfermium Working Group (TWG), která je možno shrnout do definice „*Discovery of a chemical element is the experimental demonstration, beyond reasonable doubt, of the existence of a nuclide with an atomic number Z not identified before, existing for at least 10^{-14} s.*“ Tato definice v sobě skrývá dva podstatné aspekty – reprodukovatelnost přípravy („...experimental demonstration, beyond reasonable doubt...“) a požadavek, aby připraveným objektem byl chemický prvek/atom, nikoli pouze jádro, skrytý v požadavku na dobu existence „...at least 10^{-14} s“, dobu potřebnou na konstituování elektronového obalu, bez něž nemůžeme mluvit o atomech a prvku.

3.1. Od rutherfordia k seaborgiu – transfermiové války pokračují

Jak bylo uvedeno výše, pro prvky se Z vyšším než 100 se stala problematickou, od $Z = 104$ (rutherfordium) dokonce nemožnou, možnost jednoduchého chemického důkazu přípravy nových prvků. Alternativou k chemickému důkazu z polohy maxima na eluční křivce se stal fyzikální důkaz pomocí pozorování charakteristického rentgenového záření s odpovídající energií v koincidenci se zářením emitovaným při přeměně nového nuklidu. Vzhledem k technickým problémům při realizaci tohoto důkazu ale tato možnost byla využita jen v několika případech a obvykle jako *ex-post* dodatečný důkaz, nikoliv při objevu samém. Vzhledem k těmto problémům a malému množství připravených nuklidů – jednotlivé atomy, se otázka, kdy bylo podáno „experimental demonstration, beyond reasonable doubt“, stala problematickou a obě vedoucí skupiny – Berkeley a Dubna – navzájem soupeřily, která získá prioritu objevu, a tím i (nepsané) právo navrhnout novému prvku jméno. Díky roli, kterou v uznávání objevů a pojmenovávání prvků hrály velké laboratoře a IUPAC, která se se střídavými úspěchy pokoušela najít kompromisní řešení, se jména prvků po dobu téměř tří desetiletí často měnila a současná jména a sym-

boly (viz tab. II) jsou kompromisem platným až od roku 1997.

Podle v současnosti platného rozhodnutí IUPAC/IUPAP JWP jsou za objevitele rutherfordia a dubnia považovány společně výzkumné skupiny z Berkeley a Dubny, za objevitele seaborgia byla uznána výzkumná skupina z Berkeley. Všechny tyto prvky byly poprvé připraveny v reakcích horké fúze, přičemž terčem bylo ^{242}Pu , ^{243}Am , ^{249}Cf a jadernými střelami $^{12,13}\text{C}$, ^{15}N , ^{18}O nebo ^{22}Ne . Bez ohledu na spory o prioritě si objevy těchto prvků zaslouží několik poznámek. První z nich se týká prvních objevitelských experimentů, provedených v Dubně v letech 1964 až 1966, při kterých byla týmem pod vedením Georgy Flerova deklarována příprava nuklidu $^{260}104$, pro který bylo navrženo jméno kurchatovium a značka Ku. Bez ohledu na to, že v rámci výše zmíněných diskusí bylo toto jméno později navrhováno i pro jiné prvky, nebylo nikdy přijato s argumentací, že podle vynálezce vodíkové pumy, bez ohledu na to, zda se jedná o Rusa nebo o Američana, by neměl žádný prvek nést jméno⁶. Druhá poznámka se týká pokusu o první chemické experimenty s rutherfordiem, jako prvním transaktinoidem. Experiment provedený v Dubně Čechem Ivo Zvárou a kolektivem, jehož členem byl další Čech, Rostislav Caletka, se stal prototypem všech pozdějších chemických experimentů v plynné fázi a bude diskutován níže¹⁴. Třetí poznámka se týká pojmenování seaborgia, kterým bylo (po dlouhých diskusích) prolomeno nepsané pravidlo, podle kterého nemá být nový prvek pojmenován podle žijící osoby. Glen T. Seaborg¹⁵, přezdívaný též „otec transuranových prvků“, mj. autor aktinoidové teorie v její dnešní podobě, byl nepochybně osobností, kvůli níž stálo za to pravidla měnit...

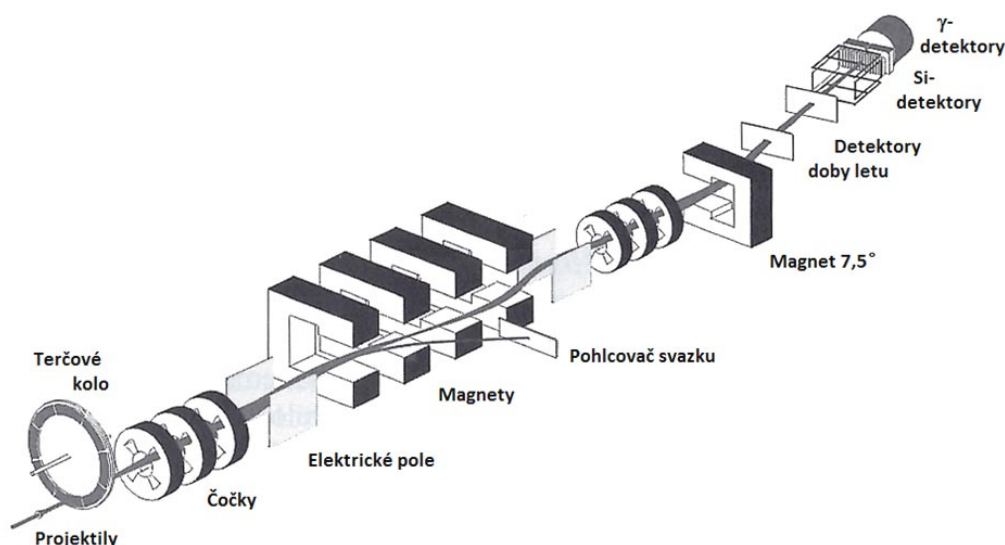
3.2. Bohrium až nihonium – studená fúze v GSI Darmstadt a RIKEN

Již pokusy s předchozími lehčími transaktinoidy naznačily, že možnou alternativou jednoznačného chemického důkazu existence nového prvku pomocí ionexové chromatografie by mohl být fyzikální důkaz založený na detekci sekvence přeměn vedoucích na známý radionuklid (identifikován podle známé doby života a energie záření).

Tabulka II

Jména prvků se $Z = 102$ – 109 navrhovaná v letech 1992 až 1997 (cit.¹)

Z	GSI 1992	ACS 1994	IUPAC 1994	IUPAC 1995	IUPAC 1997
102	jolotium	nobelium	nobelium	flerovium	nobelium, No
103	lawrencium	lawrencium	lawrencium	lawrencium	lawrencium, Lr
104	meitnerium	rutherfordium	dubnium	dubnium	rutherfordium, Rf
105	kurchatovium	hahnium	jolotium	jolotium	dubnium, Db
106	rutherfordium	seaborgium	rutherfordium	seaborgium	seaborgium, Sg
107	nielsbohrium	nielsbohrium	bohrium	nielsbohrium	bohrium, Bh
108	hassium	hassium	hahnium	hahnium	hassium, Hs
109	hahnium	meitnerium	meitnerium	meitnerium	meitnerium, Mt

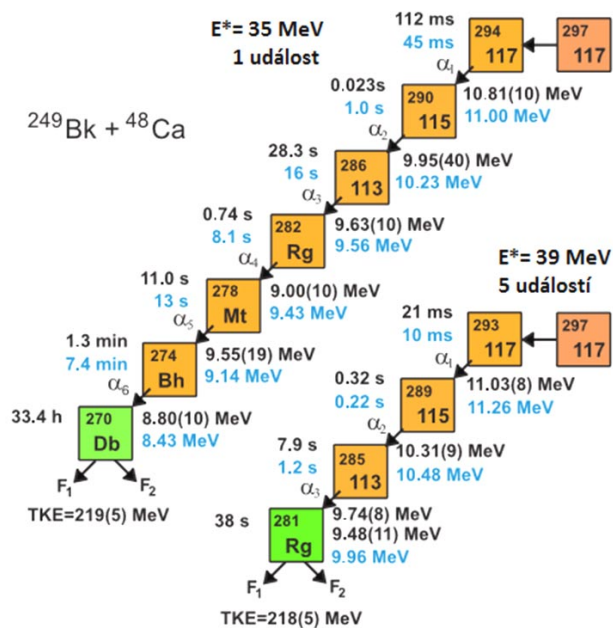


Obr. 1. Schéma separátoru těžkých odražených iontů SHIP (Separator for Heavy Ion Reaction Products) instalovaného na urychlovači UNILAC v GSI Darmstadt, Německo¹⁹ (přepřacováno podle M. Schädel a spol.⁷)

Atomové a hmotnostní číslo výchozího nuklidu sekvence se potom jednoznačně dopočítá pomocí Soddyho-Fajansových posunovacích zákonů^{16,17}. Tuto metodu se podařilo plně realizovat až v Gesellschaft für Schwerionen Physik (GSI) v Darmstadtu v Německu, kde byl koncem sedmdesátých let 20. století na urychlovači UNILAC (UNIversal Linear ACcelerator), schopném urychlovat těžké ionty až po uran, vybudován separátor těžkých odražených iontů pracující na principu Wienova filtru¹⁸. Doba letu odraženého iontu separátorem SHIP byla přibližně 2 μ s, což umožňuje i registraci nuklidů s extrémně krátkými poločasy přeměny.

Mezi detektory, kterými bylo zařízení SHIP (Separator for Heavy Ion reaction Products), zobrazené na obr. 1, vybaveno, měl klíčovou roli polohově citlivý polovodičový detektor. Pokud je v jednom konkrétním pixelu detektoru zaregistrována sekvence událostí počínající implantací iontu a končící přeměnou známého nuklidu (případně nuklidů), můžeme prakticky s jistotou identifikovat původně implantovaný iont. Získané výsledky potom interpretujeme jako přeměnové řady, jejichž příklad je znázorněn na obr. 2.

Na separátoru SHIP bylo v letech 1981–1996 objeveno celkem šest nových prvků. Další prvek připravený pomocí studené fúze – nihonium – byl poprvé syntetizován v roce 2004 v japonském RIKEN. O náročnosti těchto experimentů nejlépe svědčí fakt, že první atom nihonia (izotop ²⁷⁸Nh) byl pozorován po 450 dnech nepřetržitého ozařování bizmutového terče svazkem urychlených iontů zinku! Pro pořádek si uvedme, že první atomy nihonia (izotopy ²⁸³Nh a ²⁸⁴Nh) byly pozorovány již o rok dříve v Dubně jako členy přeměnových řad tam objeveného



Obr. 2. Příklady přeměnových řad složených jader ²⁹⁷Ts (TKE – celková kinetická energie štěpných fragmentů; přepřacováno podle Materials Scientist³⁴)

moskovia (izotopy ²⁸⁷Mc a ²⁸⁸Mc). Přehled objevů všech prvků objevených pomocí studené fúze uvádí tab. III.

Tabulka III
Historie objevů prvků od bohria po nihonium⁷

Z	Jméno	Reakce	Počet atomů	Poločas ²⁰	Rok	Místo
107	bohrium	$^{209}\text{Bi}(^{54}\text{Cr},n)^{262}\text{Bh}$	6	22 ms	1981	GSI Darmstadt
108	hassium	$^{208}\text{Pb}(^{58}\text{Fe},n)^{265}\text{Hs}$	3	1,9 ms	1984	GSI Darmstadt
109	meitnerium	$^{209}\text{Bi}(^{58}\text{Fe},n)^{266}\text{Mt}$	1	1,7 ms	1982	GSI Darmstadt
110	darmstadtium	$^{208}\text{Pb}(^{62}\text{Ni},n)^{269}\text{Ds}$	4	179 ms	1994	GSI Darmstadt
		$^{208}\text{Pb}(^{64}\text{Ni},n)^{271}\text{Ds}$	3	1,63 ms		
111	roentgenium	$^{209}\text{Bi}(^{64}\text{Ni},n)^{272}\text{Rg}$	3	3,8 ms	1994	GSI Darmstadt
112	kopernicium	$^{208}\text{Pb}(^{70}\text{Zn},n)^{277}\text{Cn}$	1	0,69 ms	1996	GSI Darmstadt
113	nihonium	$^{209}\text{Bi}(^{70}\text{Zn},n)^{278}\text{Nh}$	1	0,24 ms	2003	RIKEN Wako

3.3. Flerovium až oganesson – z jednotlivých laboratoří k široké mezinárodní spolupráci

Se 450 dny ozařování potřebnými na přípravu jediného atomu nihonia dosáhla studená fúze zjevně limitu svých současných možností. Zbývajících pět známých prvků bylo objeveno v reakcích horké fúze s ^{48}Ca jako jadernou střelou. Limit tohoto způsobu přípravy nových prvků je dán relativně nízkým atomovým číslem vápníku – $Z_{\text{Ca}} = 20$ a znamená, že jako terčový materiál je třeba volit materiál se Z právě o 20 nižším, než má cílový prvek. Současný limit periodické tabulky – oganesson ($Z = 118$) – tedy zároveň představuje praktický limit syntézy SHE pomocí horké fúze s ^{48}Ca . Pro přípravu oganessonu totiž musíme ostřelovat terč obsahující prvek se $Z = 98$, tedy kalifornium; příprava terčů obsahujících einsteinium je sice možná, ale obtížně představitelná, a příprava terčů obsahujících prvky se Z vyšším než fermium není možná (jak vzhledem k poločasům známých izotopů, tak i chybějícím způsobům jejich přípravy ve važitelném množství).

Tato omezení, spolu s ukončením „transfermiových válek“ a studené války, vedla k navázání úzké spolupráce mezi největšími rivaly na tomto poli – laboratořemi v Berkeley a v Dubně. Americká strana, zejména po rozšíření spolupráce na Oak Ridge National Laboratory

(ORNL) v Tennessee, byla schopna zajistit terčový materiál a výrobu terčů, zatímco ruská strana vládne jedinečnými možnostmi a zkušenostmi z experimentů s urychlenými ionty ^{48}Ca . Po navázání spolupráce proběhlo kompletování sedmé periody Mendělejevovy tabulky prvků poměrně rychle – od objevu flerovia (1999) do syntézy oganessonu (2002–2006) uběhlo pouze sedm let. Přehled objevů posledních pěti známých prvků uvádí tab. IV. Na závěr tohoto odstavce je vhodné upozornit, že pomocí horké fúze se dnes připravují i izotopy lehčích prvků – od bohria po nihonium, protože tato reakce umožňuje přípravu stabilnějších izotopů s vyšším hmotnostním číslem a delším poločasem přeměny.

Přehled známých izotopů všech SHE a údaje o jejich vlastnostech je možno nejsnáze získat z on-line databázi jaderných dat, např. z Národního jaderného centra dat provozovaného Brookhavenskou národní laboratoří v USA a dostupné na adrese <https://www.nndc.bnl.gov/>. Pro „domácí použití“ je možno obdobné údaje získat z mobilní aplikace IAEA Isotope Browser vyvinuté a provozované Sekcí jaderných dat Mezinárodní agentury pro atomovou energii se sídlem ve Vídni a dostupné jak pro systém Android, tak i pro iOS.

Tabulka IV
Historie objevů prvků od flerovia po oganesson

Z	Jméno	Reakce	Počet atomů	Poločas ²⁰	Rok	Místo
114	flerovium	$^{243}\text{Pu}(^{48}\text{Ca},3n)^{289}\text{Fl}$	2	0,97 s	1981	Dubna + LLNL ^a
115	moskovium	$^{243}\text{Am}(^{48}\text{Ca},3n)^{288}\text{Mc}$	4	87 ms	2003	Dubna + LLNL
		$^{243}\text{Am}(^{48}\text{Ca},4n)^{287}\text{Mc}$		32 ms		
116	livermorium	$^{248}\text{Cm}(^{48}\text{Ca},3n)^{293}\text{Lv}$	1	53 ms	2000	Dubna + LLNL
117	tenessin	$^{249}\text{Bk}(^{48}\text{Ca},3n)^{294}\text{Ts}$	1	0,08 s	2009–2010	Dubna + ORNL ^b + LLNL
		$^{249}\text{Bk}(^{48}\text{Ca},4n)^{293}\text{Ts}$		5		
118	oganesson	$^{249}\text{Cf}(^{48}\text{Ca},3n)^{294}\text{Og}$	3	0,69 ms	2002	Dubna + LLNL

^a Lawrence Livermore National Laboratory, USA; ^b Oak Ridge National Laboratory, USA

4. Studium chemických vlastností SHE

4.1. Chemie jednotlivých atomů

Chceme-li mluvit o chemických vlastnostech SHE, je třeba si nejprve položit otázku, zda je vůbec možno studovat chemické vlastnosti systémů, které typicky obsahují jeden, maximálně několik atomů studovaného prvku ve stejném okamžiku. Tato otázka má dva rozměry – experimentální a teoretický. Zařízení umožňující takové studie budou představena níže, zde se soustředíme na klíčovou otázku, zda je možno aplikovat koncepty termodynamiky a kinetiky platné v klasické chemii i na ultrastopové měřítka, v extrému až na jednotlivé atomy.

Teoretické aspekty chemie jednotlivých atomů jsou shrnuty např. v práci C. Le Naoura, D. C. Hoffmana a D. Truberta²². Z úhlu pohledu termodynamiky je zřejmé, že základní mikro- ani makroskopické koncepty termodynamiky nelze uplatnit přímo – například pojem distribuční koeficient pro jeden atom postrádá smysl, protože jeden atom může být přítomen pouze v jedné fázi. Obdobně, pokud je v systému přítomen pouze jeden nebo několik atomů, je pravděpodobnost jeho/jejich vzájemné interakce nulová. Lze ale ukázat, že pokud nahradíme koncept statistického souboru nezávislého na čase konceptem časově závislého chování elementárních entit, dospějeme k závěru, že pokud v zákoně o aktivním působení hmoty nahradíme koncentrace pravděpodobnostmi výskytu příslušné specie v konkrétním stavu a fázi, lze takovýto ekvivalentní zákon o aktivním působení hmoty použít i pro jednotlivé atomy²³. Pro kinetické úvahy je třeba si uvědomit, že se v těchto případech nejedná o studium chování jednoho atomu, ale opakované studium jednoho atomu v jednom okamžiku (One-Atom-at-a-Time Chemistry), k dispozici tedy máme soubor více pozorování. Pro tento případ bude kinetika reakcí vždy „pseudo-prvního“ řádu.

4.2. Teoretická chemie

Teoretická chemie představuje často jediný způsob, jak zjistit – nebo přesněji predikovat – chemické vlastnosti nejtěžších prvků a jejich sloučenin. Podrobnější diskuse používaných postupů přesahuje rámec této stati, čtenáře s hlubším zájmem o tuto oblast odkazují např. na příspěvek V. Pershiny v monografii M. Schädela⁷.

Důvodem očekávaných odchylek chování SHE od základních trendů jsou efekty vyvolané relativistickým nárůstem hmoty elektronů v atomovém obalu SHE. Tento nárůst je způsoben vzrůstem rychlosti elektronů potřebným pro kompenzaci nárůstu přitažlivé síly jader s rostoucím Z . Hlavním relativistickým efektem je kontrakce a stabilizace zejména s a p orbitalů, a to jak vnitřních, tak i vnějších. V 7. periodě je tato kontrakce nejvýraznější u prvku se $Z = 112$, tedy u kopernicia, kde pro s orbitály dosahuje hodnoty 31 %. Relativistická kontrakce s a p orbitalů je doprovázena dvěma dalšími efekty – relativistickou expanzí vnějších d a f orbitalů a spin-orbitálním rozdělením hladin s $l > 0$.

4.3. Experimentální chemie

Chemický experiment s SHE má typicky následující čtyři základní kroky⁷:

1. syntéza příslušného transaktinoidu,
2. rychlý transport vzniklého atomu do chemické aparatury,
3. rychlá izolace požadované specie a příprava preparátu pro měření pomocí jaderné spektroskopie,
4. detekce nuklidu prostřednictvím jeho charakteristických jaderných vlastností.

Výběr chemického systému pro studium nuklidu musí být založen na řadě předpokladů, které musí být splněny současně, aby byla dosažena požadovaná citlivost, hlavními z nich je:

- rychlost – čas mezi vznikem nuklidu a začátkem měření je limitován jeho poločasem přeměny,
- selektivita – mezi hlavní potenciální rušivé příměsi přitom patří současně vznikající izotopy polonia; nejnovější systémy problém řeší zařazením fyzikální kinematické předseparace vzniklých iontů s požadovanou hmotností,
- požadavky chemie jednotlivých atomů – pro dosažení statisticky významného chování musí studovaný atom prodělat opakované rozdělení, nejvhodnější jsou proto chromatografické systémy,
- opakovatelnost – pokud není použitý chemický proces kontinuální, je třeba, aby byl velmi rychle opakovatelný a bylo možno provést i tisíce experimentů,
- detekce – vzhledem k nakládání s jednotlivými atomy je třeba, aby výsledné vzorky byly vhodné pro spektrometrii záření a měření spontánního štěpení.

Tyto podmínky je možno splnit ve čtyřech v současnosti známých systémech – dva z nich jsou založeny na mokré cestě (ionexová nebo extrakční chromatografie, resp. kapalinová extrakce), dva na suché cestě (plynová termochromatografie, resp. izotermální chromatografie).

4.3.1. Chemie v roztocích

Průběh chemických experimentů se SHE na mokré cestě obvykle probíhá následujícím způsobem: „horké atomy“ SHE vytvořené jadernou reakcí v terčově fólii a vyražené z ní získanou odrazovou energií jsou zachyceny na aerosoly (obvykle KCl) a nosným plynem (obvykle He) transportovány plynovou tryskou (gas-jet) do chemické aparatury, kde jsou aerosoly rozpuštěny, upraveno složení roztoku a proveden vlastní (obvykle separační) experiment. Přitom cílem je obvykle získání rozdělovacího koeficientu D (v kapalinově-extrakčních experimentech) nebo K_D (při separaci na pevné fázi). Většina těchto studií probíhá v diskontinuálním režimu, vysoký počet opakování se dosahuje využitím automatizovaných rychlých zařízení, jako je např. ARCA II (Automated Rapid Chemistry Apparatus) nebo AIDA (Automated Ion-Exchange Separation Apparatus Coupled with the Detection System for Alpha Spectroscopy)^{24,25}. Kontinuálního nebo alespoň semikontinuálního režimu je možno dosáhnout použitím

chromatografických systémů s několika kolonami (MCT – Multi Column Technique), případně v zařízení SISAK (Short-Lived Isotopes Studied by the AKUFVE-Technique) doplněném několika průtokovými detektory pro paralelní měření pomocí kapalinové scintilační spektrometrie (obr. 3)^{26,27}.

Na mokré cestě byly dosud studovány prvky se $Z = 104$ – 106 a 108 , Rf–Sg a Hs. Podrobný aktuální přehled výsledků podává monografie M. Schädel⁷. Před shrnutím známých poznatků je třeba, pro jeho mimořádný význam, zmínit historický experiment Silvy a spolupracovníků, kteří v roce 1970 v chromatografickém experimentu na silně kyselém měničích kationtů Dowex-50 \times 12 a s využitím roztoku α -HIM jako elučního činidla prokázali, že Rf tvoří chlorokomplexy, obdobně jako jeho chemické homology Zr a Hf, a chová se zcela odlišně než trojmočné aktinoidy²⁸. Tento experiment, spolu s dřívějším izotermálně chromatografickým experimentem I. Zváry a spolupracovníků¹⁴, byl totiž definitivním potvrzením Seaborgovy Aktinoidové teorie, a tedy definitivním potvrzením současné podoby periodické tabulky prvků²⁹.

V případě rutherfordia probíhají detailní studie jeho chemických vlastností na mokré cestě od konce 80. let minulého století. Největší pozornost byla věnována tvorbě halidových komplexů; pro studie byly využity všechny výše zmíněné experimentální techniky a zařízení. Byla prokázána tvorba záporně nabitých hexachlorido- i hexafluoridokomplexů ($[\text{RfCl}_6]^{2-}$, $[\text{RfF}_6]^{2-}$) analogických komplexů hafnia a zirkonia. Poměrně podrobně je prostudována i hydrolyza rutherfordia. Jak je možno očekávat od přechodového prvku, je podobnost Rf^{4+} s Th^{4+} menší než s Hf^{4+} a Zr^{4+} .

V případě dubnia se první experimenty na mokré cestě zaměřily na srovnání sorpce Db na skle a extrakce jeho fluoridových komplexů do methyl-*iso*-butyl-ketonu s vlastnostmi očekávaných homologů dubnia – tantalem a niobem. Chování dubnia přitom nebylo obdobou chování tantalu, což bylo připsáno možné tvorbě komplexních kationtů s vyšším nábojem jako např. DdF_7^{2-} . Podrobnější extrakční experimenty provedené s tri-*iso*-oktylaminem (TIOA) prokázaly, že v páté skupině dochází za tantalem ke změně trendů chemických vlastností a vlastnosti dubnia

(např. stabilita jeho halidových komplexů) leží mezi Nb a pseudohomologem dubnia – protaktiníem – a výrazně se liší od tantalu. Tato odlišnost se projevuje např. i v tvorbě fluoridokomplexů, kde dubnium tvoří komplex $[\text{DbOF}_4]^-$, obdobně jako Nb, ale ne $[\text{DbF}_6]^-$ jako Ta.

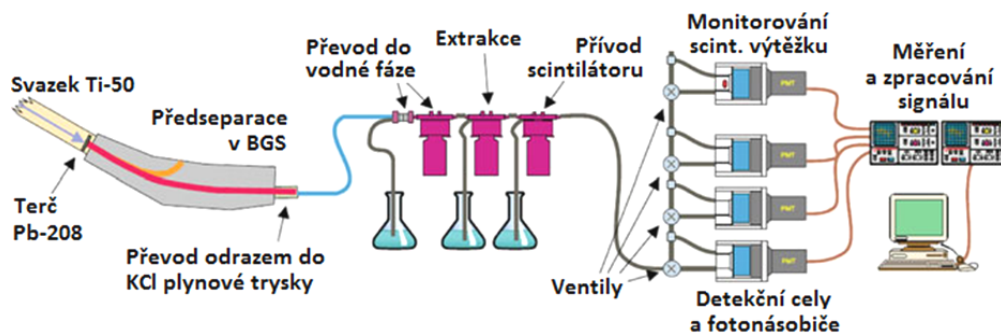
V prvním z chemických experimentů provedených se seaborgiem byl studován záchyt Sg z prostředím obsahujícího fluoridové ionty na silně kyselém měničích kationtů pomocí zařízení ARCA II. Z pozorovaných tří korelovaných přeměn α byl učiněn závěr, že Sg vykazuje chování typické pro šestimočný prvek ze šesté skupiny periodické tabulky a liší se od svého pseudohomologu, uranu. Získané výsledky byly interpretovány jako tvorba komplexu $[\text{SgO}_2\text{F}_3(\text{H}_2\text{O})]$ nebo neutrální specíe $[\text{SgO}_2\text{F}_2]$. Uprěšňující experimenty provedené v nepřítomnosti fluoridových iontů ukázaly slabší tendenci Sg k hydrolyze, než je tomu v případě wolframu.

Posledním z SHE, jehož chování bylo studováno v roztoku, je hassium. V experimentu srovnávacím chování Os a Hs při reakci OsO_4 a HsO_4 s vlhkým povrchem pevného NaOH byla prokázána jejich blízká podobnost – tvorba dihydroxohassičelanu sodného o předpokládaném složení $\text{Na}_2[\text{HsO}_4(\text{OH})_2]$.

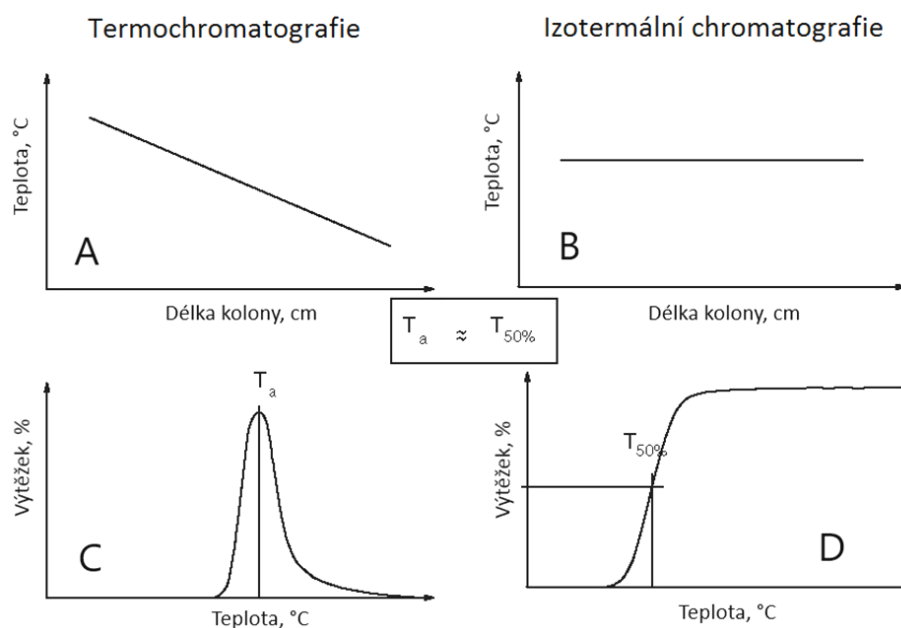
4.3.2. Chemie v plynné fázi

Přestože počet anorganických sloučenin, které jsou dostatečně těkavé při relativně snadno experimentálně dosažitelných teplotách (do cca 1000 °C), je malý, hraje chemie v plynné fázi při studiu chemických vlastností SHE velmi důležitou roli. Předpoklady definované v úvodu kapitoly 4.3. jsou totiž prakticky dokonale splněny pro případ plynové chromatografie těkavých anorganických sloučenin. Jak bylo zmíněno již dříve, byly pro účely studia SHE vyvinuty dvě varianty plynové chromatografie, konkrétně termochromatografie a izotermální chromatografie. Princip obou těchto metod demonstruje obr. 4.

Prototypem moderních zařízení pro plynovou chromatografii SHE se stal tzv. On-Line Gas Chromatography Apparatus (OLGA). Stejně jako v případě studií v roztoku se zde využívá záchytu radionuklidů na aerosoly a transportu pomocí plynové trysky. Aerosoly jsou zachyceny v pínce, kde reagují s reaktivním plynem, vytvoří těkavé



Obr. 3. Schéma systému SISAK pro kapalinovou extrakci SHE připojeného na výstup kinematického separátoru Berkeley Gas-Filled Separator (BGS) sloužícího pro předseparaci (přepřacováno podle J. P. Omtvedt a spol.²⁷)



Obr. 4. Základní principy termochromatografie a izotermální chromatografie. A, B – teplotní profily na koloně používané v termochromatografii a izotermální chromatografii, C, D – depoziční vrcholy radionuklidů a integrální chromatogramy získané termochromatografií, resp. izotermální chromatografií. (T_a – teplota depoziční, $T_{50\%}$ – teplota, při níž kolonou projde právě 50 % vstupujících nuklidů; zpracováno podle M. Schädela a spol.⁷⁾)

sloučeniny a jsou transportovány dále do chromatografické kolony. První verze těchto zařízení využívaly měření radionuklidů na výstupu z kolony. Pro experimenty s hassiumem a koperniciem byl později vyvinut systém IVO (*In-Situ* Volatilization and On-Line Detection), ve kterém k syntéze těžkých sloučenin dochází přímo v komoře, do níž jsou odraženy vzniklé atomy. Pro zvýšení účinnosti měření byla vyvinuta kompletně nová technika, v níž byla původně křemenná chromatografická kolona nahrazena kolonou sestavenou z polovodičových detektorů s pozlaceným povrchem. Tato kolona je používána pro separaci těžkých sloučenin při nízkých teplotách a současně jako detektor. Její poslední verzi je zařízení COMPACT (Cryo On-Line Multidetector for Physics and Chemistry) s tloušťkou chromatografického kanálu pouze 0,6 mm a vnitřní aktivní plochou detektorů 93 %. Tato zařízení byla použita i pro níže zmíněné experimenty s jednotlivými atomy Cn a Fl.

Chromatografické experimenty v plynné fázi využívají skutečnosti, že rovnovážná konstanta jednoduché adsorpční reakce K_{ads} souvisí se standardními termodynamickými veličinami – adsorpční entalpií a entropií, které jsou nezávislé na teplotě³⁰⁾:

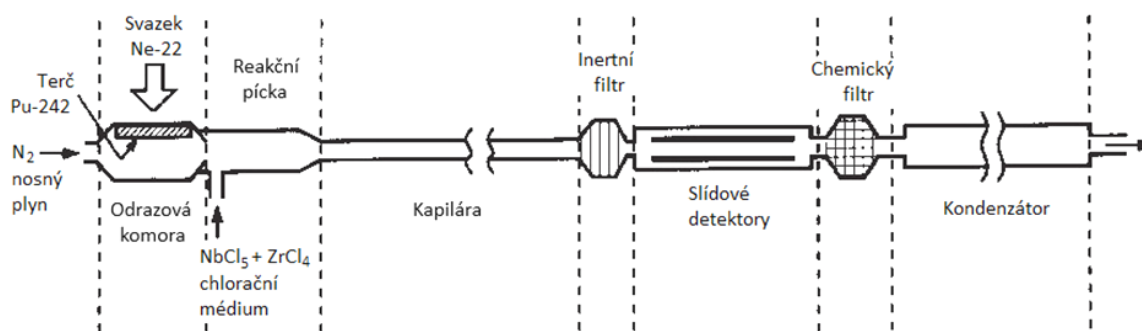
$$\Delta G_{\text{ads}}^0 = -RT \ln(K_{\text{ads}}) = \Delta H_{\text{ads}}^0 - T\Delta S_{\text{ads}}^0$$

Z tohoto modelu lze odvodit, že v případě izotermální chromatografie, vedené za podmínek, kdy právě 50 % sledovaných specií projde kolonou, je retenční doba t_r právě rovna poločasu přeměny nuklidu $T_{1/2}$. Provedeme-li alespoň dva experimenty při dvou různých teplotách, lze po-

mocí tohoto modelu odvodit adsorpční entalpii ΔH_{ads} . Pro případ termochromatografie lze ukázat, že při znalosti parametrů experimentu lze (pro radionuklidy s poločasem přeměny delším než 1 s) ze zjištěné teploty, při níž se sledovaná specie deponuje na stěně kolony, přímo stanovit adsorpční entalpii ΔH_{ads}^0 . Oba přístupy lze aplikovat i v obráceném módu, a predikovat tak volatilitu a termodynamické veličiny. Tento přístup vyžaduje předem stanovit empirickou korelaci mezi volatilitou referenční látky v makromnožství a adsorpčním chováním jejích jednotlivých atomů nebo molekul. Z těchto korelací lze pak z hodnot ΔH_{ads} naměřených pro jednotlivé atomy získat i odhady termodynamických veličin pro sloučeniny v pevné fázi – např. standardní sloučovací nebo sublimační entalpie $\Delta H_{298}^0(s)$, respektive ΔH_{subl}^0 .

V plynné fázi byly dosud studovány prvky se $Z = 104$ až 108, 112 a 114 (Rf–Hs, Cn a Fl). Stejně jako v případě chemie na mokré cestě podává podrobný přehled aktuálních výsledků monografie M. Schädela⁷⁾, metodické aspekty jsou shrnuty v monografii I. Zváry „The Inorganic Radiochemistry of Heavy Elements: Methods for Studying Gaseous Compounds“³³⁾. Před shrnutím známých poznatků je třeba, pro jeho mimořádný význam, zmínit pionýrský experiment Iva Zváry a spolupracovníků, který vytýčil směr celé chemii SHE v plynné fázi.

První chemická studie rutherfordia byla součástí nároků na objev tohoto prvku vznesených kolektivem Laboratoře jaderných reakcí Spojeného ústavu jaderných výzkumů v Dubně (SÚJV). Jejím cílem bylo prokázat, že Rf



Obr. 5. Principiální schéma prvního plynově-chromatografického zařízení použitého pro chemickou separaci rutherfordia ve formě těkavých chloridů (přepřacováno podle I. Zvěra a spol.³¹)

tvorí těkavé chloridy, obdobně jako jeho předpokládané homology Zr a Hf. V experimentu byla použita frontální izotermální plynová chromatografie s $\text{NbCl}_5/\text{ZrCl}_4$ jako chloračnickým činidlem v dusíku použitém jako nosný plyn¹⁴. Směs výsledných produktů byla poté „přefiltrována“ skleněnou kolonou při 250–300 °C s cílem odfiltrovat netěkavé aktinoidy a na následující koloně slidových detektorů bylo při nižší teplotě registrováno spontánní štěpení izotopů rutherfordia. Schéma celého experimentu je zobrazeno

na obr. 5 (cit.³¹). Jak bylo zmíněno již v kapitole o chemii SHE v roztocích, bylo potvrzení homologie Rf s Hf a Zr zároveň definitivním důkazem platnosti Seaborgovy Aktinoidové teorie, a tedy potvrzením současné podoby periodické tabulky prvků²⁹.

Rozebírání všech experimentů provedených se SHE v plynné fázi vysoce překračuje meze tohoto stručného přehledu. Souhrn studovaných prvků, použitých systémů a klíčových závěrů je proto sumarizován v tab. V. Získané

Tabulka V

Přehled SHE studovaných pomocí metod chemie v plynné fázi, použitých systémů a klíčových závěrů (sestaveno z M. Schädel a spol.⁷)

Prvek	Sloučenina	Systém	Výsledky	Závěry
Rf	RfCl_4 , RfBr_4	IC ^a , TC ^b	ΔH_a^0	eka-Zr,Hf
	RfOCl_2	IC	Oxochlorid méně těkavý než chlorid	eka-Zr,Hf
Db	DbCl_5 , DbBr_5	IC	Těkavost bromidů $\text{Db} > \text{Nb} > \text{Ta}$	eka-Nb,Ta
	DbCl_5 , DbBr_5 , DbOCl_3 , DbOBr_3	IC, TC	ΔH_a^0	eka-Nb,Ta
Sg	SgO_2Cl_2	TC, IC	ΔH_a^0 ; ΔH_s^0 (SgO_2Cl_2)	eka-Mo,W
Bh	BhO_3Cl	TC, IC	ΔH_a^0 ; těkavost $\text{TcO}_3\text{Cl} > \text{ReO}_3\text{Cl} > \text{BhO}_3\text{Cl}$	eka-Re,Tc
Hs	HsO_4	TC	$-\Delta H_a^0$ (HsO_4) $>$ $-\Delta H_a^0$ (OsO_4)	eka-Ru,Os
	$\text{Na}_2[\text{HsO}_4(\text{OH})_2]$	RSD ^c	$2 \text{NaOH} + \text{HsO}_4 \rightleftharpoons \text{Na}_2[\text{HsO}_4(\text{OH})_2]$	eka-Ru,Os
Cn	Elementární	TC	7 atomů v několika experimentech \Rightarrow Cn je velmi těkavý ušlechtilý kov	eka-Hg ??
Nh	Elementární, NhOH (??)	TC	Nh méně těkavé než očekáváno (předběžné)	–
Fl	Elementární	TC	3 atomy, nečekaně velká těkavost; $-\Delta H_a^{\text{Au}}$ (Fl) = $44_{-3}^{+20} \text{ kJ mol}^{-1}$	eka-Pb ??

^a Izotermální chromatografie; ^b termochromatografie; ^c „Reactive Surface Deposition“; ΔH_a^0 adsorpční entalpie; ΔH_s^0 sublimační entalpie; eka- – obdoba; ?? – nejisté

výsledky a závěry z nich je možno shrnout do následujících bodů:

- Většina studií byla provedena s použitím jednoho atomu v jednom okamžiku (one-atom-at-a-time), přičemž celkový počet atomů byl menší než 20.
- Prvky od Rf do Hs byly studovány ve formě těkavých halidů, oxohalidů, oxidů-hydroxidů či oxidů a vykazují chování typické pro *d*-prvky, které je pokračováním očekávaných trendů v jejich příslušných skupinách periodické tabulky prvků, jako sloučeniny perspektivní pro další studia se jeví karbonyly.
- Kopernicium a flerovium byly studovány v elementární podobě, pro kterou je předpovídáno chování obdobné těkavým vzácným kovům, přičemž ale existují i teorie, že relativistické efekty mohou jejich chování ovlivnit natolik, že by byly spíše homology vzácných plynů (radonu). Experimenty ukazují, že oba prvky jsou výrazně méně těkavé než radon a zároveň i silněji interagují s materiály použitými jako povrchy chromatografických kolon (zlato, teflon).

5. Závěr

Dosavadní výsledky experimentálního studia chemických vlastností supertěžkých prvků/transaktinoidů (SHE) ukazují, že i přes relativistické vlivy spojené s relativistickým nárůstem hmotnosti elektronů u prvků s vysokým atomovým číslem, které se velmi výrazně projevují na vlastnostech jejich elektronových obalů, je jejich postavení v periodické tabulce prvků jako homologů lehčích prvků ve skupinách daných příslušným protonovým číslem neotřeseno. Výsledky experimentů provedených na mokré cestě i v plynné fázi jasně ukazují, že prvky od Rf do Hs vykazují chování typické pro *d*-prvky, které je pokračováním očekávaných trendů v jejich příslušných skupinách periodické tabulky prvků. Předběžné výsledky studia chování elementárního kopernicia a flerovia naznačují, že i tyto dva prvky patří svými vlastnostmi spíše mezi vzácné kovy než mezi vzácné plyny, jak předpovídaly některé teorie.

V současnosti probíhají první chemické experimenty s nihoniem ($Z = 113$), které zatím neposkytly definitivní závěry³². Vzhledem k vlastnostem známých izotopů je dosavadními postupy možné provést i experimenty s moskoviem ($Z = 115$). Ostatní prvky nejsou prozatím pro experimentální studia dostupné, takže se můžeme opírat pouze o závěry teoretické chemie.

Závěrem je tedy možno konstatovat, že ve světle posledních výsledků studia chemických vlastností SHE zůstává struktura periodické tabulky prvků v její současné podobě nedočetna.

Vypracováno s finanční podporou Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy České republiky v rámci Operačního programu Výzkum, vývoj a vzdělávání, projektu CZ.02.1.01/0.0/0.0/16_019/0000778 – Centrum pokročilých aplikovaných věd.

LITERATURA

1. Kragh H.: *From Transuranic to Superheavy Elements: A Story of Dispute and Creation*, Springer, Cham 2018, ISBN 978-3-319-75812-1. doi: 10.1007/978-3-319-75813-8.
2. Quill L. L.: *Chem. Rev.* 23, 87 (1938).
3. Seaborg G. T., Loveland W. D.: *The Elements Beyond Uranium*, Wiley, New York 1990.
4. Thompson S. G., Tsang C. F.: *Science* 178, 1047 (1972).
5. Hofmann S.: *On Beyond Uranium: Journey to the End of the Periodic Table*, Taylor & Francis, London 2002.
6. Armbruster P., Münzenberg G.: *Eur. Phys. J. H* 37, 237 (2012).
7. Schädel M., Shaughnessy D. (ed.): *The Chemistry of Superheavy Elements*. Springer, Berlin 2014.
8. Oganessian Y. T. a 26 spoluautorů: *Nucl. Phys. A* 734, 109 (2004).
9. Morss L. R., Edelstein N. M., Fuger J.: *The Chemistry of Actinide and Transactinide Elements*, 4. vyd., Springer, Dordrecht 2010.
10. Öhrström L., Reedijk J.: *Pure Appl. Chem.* 88, 1225 (2016).
11. Achinstein P., v knize: *Histories of the Electron: The Birth of Microphysics* (Buchwald J., Warwick A., ed.), str. 403. MIT Press, Cambridge 2001.
12. Olby R. C., v knize: *New Trends in the History of Science* (Visser R. a kol., ed.), str. 197. Ropodi, Amsterdam 1989.
13. Wikipedians (ed.): *Chemistry*. PediaPress, Mainz 2019.
14. Zvara I., Chuburkov Y. T., Caletka R., Zvarova T. S., Shalaevskii M. R., Shilov B. V.: *Sov. At. Energy* 21, 709 (1966).
15. https://en.wikipedia.org/wiki/Glenn_T._Seaborg, staženo 1. 3. 2019.
16. Fajans K.: *Ber. Dtsch. Chem. Ges.* 46, 422 (1913).
17. Soddy F.: *Chem. News* 107, 97 (1913).
18. Wien W.: *Ann. Phys.* 301, 440 (1898).
19. Hofmann S.: *Rep. Prog. Phys.* 61, 639 (1998).
20. National Nuclear Data Center, NuDat 2.7, <https://www.nndc.bnl.gov/nudat2/>, staženo 16. 2. 2019.
21. Hofmann S., Dmitriev S. N., Fahlander C., Gates J. M., Roberto J. B., Sakai H.: *Pure Appl. Chem.* 90, 1773 (2018).
22. Le Naour C., Hoffman D. C., Trubert D., v knize: *The Chemistry of Superheavy Elements* (Schädel M., Shaughnessy D., ed.), 2. vyd., kapitola 4, str. 241. Springer, Berlin 2014.
23. Guillaumont R., Adloff J. P., Peneloux A.: *Radiochim. Acta* 46, 169 (1989).
24. Schädel M., Brüche W., Jäger E., Schimpf E., Kratz J. V., Scherer U. W., Zimmermann H. P.: *Radiochim. Acta* 48, 171 (1989).
25. Nagame Y. a 32 spoluautorů: *Radiochim. Acta* 93, 519 (2005).

26. Szegłowski Z., Bruchertseifer H., Domanov V. P., Gleisberg B., Guseva L. J., Hussonnois M., Tikhomirova G. S., Zvara I., Oganessian Y. T.: *Radiochim. Acta* 51, 71 (1990).
27. Omtvedt J. P. a 27 spoluautorů: *J. Nucl. Radiochem. Sci.* 3, 121 (2002).
28. Silva R. J., Harris J., Nurmia M., Eskola K., Ghiorso A.: *Inorg. Nucl. Chem. Lett.* 6, 871 (1970).
29. Seaborg G. T.: *Chem. Eng. News* 23, 2190 (1945).
30. Eichler R., Eichler B., v knize: *The Chemistry of Superheavy Elements* (Schädel M., Shaughnessy D., ed.), 2. vyd., kapitola 4, str. 375. Springer, Berlin 2014.
31. Zvara I., Timokhin S. N., Chuburkov Y. T., Domanov V. P., Gorski B.: *Joint Institute for Nuclear Research, Laboratory of Nuclear Reactions, Scientific Report 1989–1990, vol. E7-91-75*, str. 34 (1991).
32. Aksenov N. V. a 23 spoluautorů: *Eur. Phys. J. A* 53, 158 (2017).
33. Zvara I.: *The Inorganic Radiochemistry of Heavy Elements: Methods for Studying Gaseous Compounds*, Springer, Haarlem 2008.
34. <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=23856032>, staženo 16. 2. 2019.

J. John (*Department of Nuclear Chemistry, CTU in Prague – FNSPE, Prague*): **Chemistry of Superheavy Elements – Test of the Limits of Validity of the Periodic Law**

Chemistry of „superheavy elements“ / transactinoids (SHE) is a rather rare field of chemistry on the borderline between chemistry and physics that deals with the chemical properties of elements from the 7th period of the Periodic Table of Elements (PTE). Due to the very high proton numbers of these elements Z , the properties of their electron shells are significantly influenced by relativistic effects resulting from the relativistic increase of mass of electrons, the velocities of which steadily increase with increasing Z . Extreme consequence of these relativistic effects could be chemical properties differing from those following from the assumed position of the element in PTE based on its proton number. The goal of this review article is to summarize the existing information about the chemical properties of SHE and to test the assumed validity of the periodic law even for the heaviest elements. The conclusions made from the results of the most recent studies of chemical properties of SHE indicate that the structure of the Periodic Table of Elements in its current form remains intact.

Keywords: superheavy elements, SHE, transactinoids, One-Atom-at-a-Time Chemistry, gas-phase chemistry, relativistic effects, periodic law

Acknowledgements

This study was supported by the Ministry of Education, Youth and Sports of the Czech Republic under the EU Structural Fund Operational Programme Research, Development, and Education, project No. CZ.02.1.01/0.0/0.0/16_019/0000778 – Centre of Advanced Applied Sciences.