

PŘÍPRAVA A STABILITA SUPERTĚŽKÝCH PRVKŮ

ČESTMÍR JECH

Ústav fyzikální chemie Jaroslava Heyrovského, Akademie věd České republiky, Dolejškova 3, 182 23 Praha 8

Došlo dne 3.XI.1999

Klíčová slova: supertěžké prvky, ostrůvky stability

Obsah

1. Úvod
2. Výskyt a stabilita nuklidů
3. Struktura atomových jader
4. Transuranové a blízké transfermiové prvky
5. Ke břehům ostrůvku stability
6. Technika přípravy a průkazu supertěžkých prvků
7. Prvky 114, 116, 118

1. Úvod

Rozvoj jaderné fyziky umožnil nejen připravit celou řadu radioaktivních nuklidů od převážné většiny prvků vyskytujících se v přírodě ve formě stabilních izotopů, ale otevřel i cestu k přípravě a zkoumání vlastností prvků s atomovými čísly vyššími než 92 (tj. ležících za uranem). Uplatnily se zde zejména pokroky v technice urychlování těžkých jaderných projektilů a manipulace s energetickými iontovými svazky, dále pak spektroskopie jaderného záření i poznatky o vnitřní struktuře a stabilitě atomových jader. Pionýrskou roli v tomto směru sehrály práce amerického chemika Glenna Seaborga¹, který má významné zásluhy zejména o postupné vytváření nových transuranových prvků. Seaborg zemřel v únoru 1999 a tento referát je věnován jeho památce.

Navážeme na článek, který jsme o supertěžkých prvcích pro Chemické listy² napsali před více než čtvrt stoletím a který nyní doplníme o nejnovější poznatky, a čtenáři přiblížíme současný stav oboru. Aby byl výklad přístupný i pro chemiky, kterým je tato oblast poněkud vzdálenější, zopakujeme v úvodu nejdůležitější poznatky o výskytu, struktuře a stabilitě atomových jader.

2. Výskyt a stabilita nuklidů

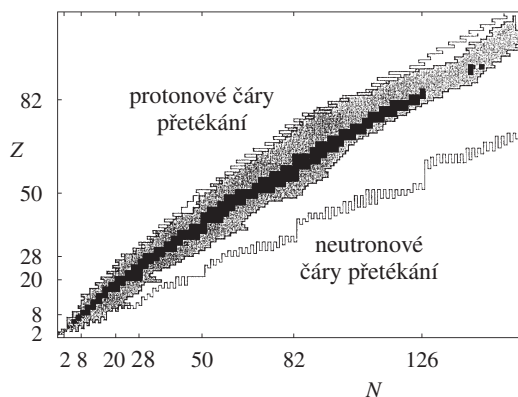
Z prvků běžně se vyskytujících v přírodě má nejvyšší protonové číslo ($Z=92$) uran, jehož izotopy ^{235}U a ^{238}U vznikly ve vesmíru primordiální nukleogenezi patrně při výbuchu supernov a zachovaly se na Zemi (jsou radioaktivní) díky dlouhým poločasům rozpadu ($7 \cdot 10^8$ a $4,5 \cdot 10^9$ let). Podobně zde od dob původní nukleogeneze přežívají velmi dlouhodobé izotopy, např. ^{40}K , ^{87}Rb , ^{147}Sm . Celá řada poměrně dlouhodo-

bých (avšak ve srovnání se stářím Země krátce žijících) nuklidů zde vznikla až druhotně jadernými reakcemi vyvolanými neutrony kosmického záření např. ^{237}Np a ^{239}Pu v uranových horninách nebo ^{14}C a ^3H v ovzduší Země.

Prakticky od všech prvků se dodnes podařilo připravit radioaktivní izotopy uměle bombardováním stabilních terčových jader vhodnými jadernými střelami, především neutrony. Soubor v přírodě se vyskytujících stabilních i uměle vytvořených nuklidů lze nejlépe znázornit v souřadnicích protonových (Z) a neutronových čísel (N) jak to ukazuje³ obr. 1. Zde je 273 stabilních nuklidů vyznačeno černými čtverečky a tvoří jakousi páteř soustavy. K ní zespodu přiléhá množina uměle připravených nestabilních nuklidů, které mají (oproti stabilním nuklidům) vyšší počty neutronů v jádře. U nich dochází k nitrojaderným přeměnám neutronů v protony (za současné emise elektronu) a k snižování poměru N/Z tak, aby odpovídal oblasti stability. Podobně v nestabilních jádrech ležících nad oblastí stability probíhá úprava N/Z nitrojadernou přeměnou protonu v neutron spojenou s emisí pozitronu nebo elektronovým záchytem příp. i jinými procesy (záření alfa). Hodnoty poměru N/Z jsou u lehkých stabilních jader blízké jedničce, u těžších stabilních jader se tento poměr blíží $3/2$. Takové poměrně ostré vymezení oblasti jaderné stability je výsledkem působení přitažlivých jaderných sil působících mezi protony i neutrony a coulombických odpuzivých sil mezi protony. Vyznačeny zde jsou i tzv. „čáry přetékání“ (drip lines) definované jako nejlehčí a nejtěžší izotopy určitého prvku, v nichž poslední nukleon již není vázán a jádro se rozpadá v čase kratším než 10^{-22} s (což je hodnota srovnatelná s dobou průletu nízkooenergetického protonu jádrem).

3. Struktura atomových jader

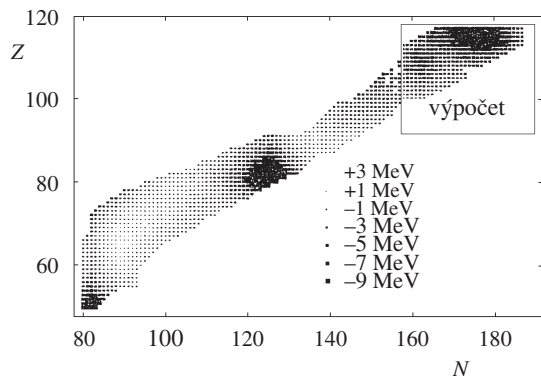
Je známo, že úhrnná energie vazby všech nukleonů v jádrech roste s jejich počtem nukleonů a dosahuje u těžkých jader až 2 GeV. Střední vazebná energie nukleonu (celková



Obr. 1. Znázornění stabilních a velmi dlouhodobých nuklidů nacházejících se v přírodě (černé čtverečky) a uměle připravených radioaktivních nuklidů (šedá plocha) v souřadnicích protonových (Z) a neutronových (N) čísel

energie vazby dělená počtem nukleonů) vykazuje závislost na hmotnostním číslu, kterou lze objasnit pomocí kapkového modelu jádra. Ten je založen na určité analogii mezi chováním molekul v kapalně fázi a chováním „jaderné kapaliny“ tvořené nukleony, mezi nimiž působí jaderná přitažlivost. Pomocí této představy lze dobře vysvětlit např. trhání „kapek jaderné tekutiny“ při štěpení jader.

Je zřejmé, že celková vazebná energie jádra určuje jeho stabilitu, kterou lze vyjadřovat pomocí příslušného parciálního poločasů např. spontánního štěpení. Bylo zjištěno, že zvláště pevně vázaná a tedy stabilní jsou např. jádra ⁴He, ¹⁶O, ⁴⁰Ca a obecně pak jádra, jejichž protonová a neutronová čísla nabývají hodnot 2, 8, 20, 28, 82, 126 (pro neutrony), která se nazývají čísla magická. To jsou počty protonů a neutronů,



Obr. 2. Rozdělení experimentálně stanovených slupkových korekčních energií (velikost korekce je znázorněna velikostí čtverečku) a hodnot předpovídaných pro oblast supertěžkých nuklidů⁶ (v obdelníčku)

u nichž podle slupkového modelu jádra je dokončeno obsazování jaderných slupek (v analogii s obsazováním elektronových slupek u atomů). Jednočásticový slupkový model jádra rozpracovaný zejména Goepertovou-Meyerovou a Jensenem⁴ vysvětluje magická čísla a některé jiné vlastnosti jader interakcí jednotlivých nukleonů se silovým polem vytvářeným ostatními nukleony. Jestliže jádro obsahuje sudý počet protonů a neutronů (súdo-sudé jádro), vyskytují se v něm jen zaplněné energetické podhladiny, protože každá hladina může obsahovat dvě částice (s opačnými spiny). Taková jádra jsou stabilní a jejich výskyt převažuje, zatímco lichá-lichá jádra jsou spíše výjimkou.

Kolektivní model jádra kombinuje neúspěšnější prvky obou předešlých modelů a uvažuje i možnost kmitání a deformace jader v důsledku jejich rotace.

K hlubšímu objasnění systematiky jaderné stability, např. zvýšené stability jader s uzavřenými jak protonovými tak neutronovými slupkami (tak zvaná dvojnásobně magická jádra) zavedl Strutinsky⁵ v roce 1967 pojem slupkové korekční energie. Podle něj představuje slupková korekce malou odchylku (zvyšující vazebnou energii) oproti stejnoměrnému rozdělení hladin jednočásticového modelu a tato odchylka se používá ke korekci energií vypočtených podle kapkového modelu. Její hodnoty lze stanovit na podkladě hmotnostního úbytku jádra a pro oblast hypotetických supertěžkých jader teoreticky předpovědět. Rozložení hodnot slupkových korekčních energií pro oblast těžkých a supertěžkých prvků ukazuje názorně obr. 2. Zde je jasně patrná oblast se zvýšenou stabilitou zejména u dvojnásobně magických jader charakterizovaných zřejmě dalším magickým protonovým číslem Z = 114 a magickým neutronovým číslem N = 184. Podle některých autorů leží oblast se zvýšenou stabilitou až u jader se Z = 126 a N = 194.

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|----|-----------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|-----|----|----|--|
| 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 18 | |
| H | | | | | | | | | | | | | | | | | He | | |
| 1 | 2 | | | | | | | | | | | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 2 | | |
| Li | Be | | | | | | | | | | | B | C | N | O | F | Ne | | |
| 3 | 4 | | | | | | | | | | | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | | |
| Na | Mg | | | | | | | | | | | Al | Si | P | S | Cl | Ar | | |
| 11 | 12 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | | |
| K | Ca | Sc | Ti | V | Cr | Mn | Fe | Co | Ni | Cu | Zn | Ga | Ge | As | Se | Br | Kr | | |
| 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | | |
| Rb | Sr | Y | Zr | Nb | Mo | Tc | Ru | Rh | Pd | Ag | Cd | In | Sn | Sb | Te | I | Xe | | |
| 37 | 38 | 39 | 40 | 41 | 42 | 43 | 44 | 45 | 46 | 47 | 48 | 49 | 50 | 51 | 52 | 53 | 54 | | |
| Cs | Ba | La* | Hf | Ta | W | Re | Os | Ir | Pt | Au | Hg | Tl | Pb | Bi | Po | At | Rn | | |
| 55 | 56 | 57 | 72 | 73 | 74 | 75 | 76 | 77 | 78 | 79 | 80 | 81 | 82 | 83 | 84 | 85 | 86 | | |
| Fr | Ra | Ac ⁺ | Rf | Db | Sg | Bh | Hs | Mt | 110 | 111 | 112 | | | | | | | | |
| 87 | 88 | 89 | 104 | 105 | 106 | 107 | 108 | 109 | 110 | 111 | 112 | | | | | | | | |
| | | | Th | Pa | U | Np | Pu | Am | Cm | Bk | Cf | Es | Fm | Md | No | Lr | | | |
| | | | 90 | 91 | 92 | 93 | 94 | 95 | 96 | 97 | 98 | 99 | 100 | 101 | 102 | 103 | | | |
| | | | Ce | Pr | Nd | Pm | Sm | Eu | Gd | Tb | Dy | Ho | Er | Tm | Yb | Lu | | | |
| | | | 58 | 59 | 60 | 61 | 62 | 63 | 64 | 65 | 66 | 67 | 68 | 69 | 70 | 71 | | | |

Obr. 3. Periodická tabulka prvků, + aktinidy, * lantanidy

Tabulka I

Posloupnost dosud připravených transfermiových a supertěžkých prvků

| Z | Název | Rok objevu | Místo objevu ^a | Reakce vzniku ^b | Citace |
|-----|-------------------|------------|---------------------------|--------------------------------------------------------------|--------|
| 101 | Mendelevium, Md | 1955–58 | Berkeley | $^{253}\text{Es} (^4\text{He}, n) ^{256}\text{Md}$ | |
| 102 | Nobelium, No | 1958–65 | Dubna | $^{243}\text{Am} (^{15}\text{N}, 4n) ^{254}\text{No}$ | |
| 103 | Lawrencium, Lr | 1961–71 | Berkeley, Dubna | $^{249-252}\text{Cm} (^{10-11}\text{B}, xn) ^{258}\text{Lr}$ | |
| 104 | Rutherfordium, Rf | 1964–69 | Dubna | $^{249}\text{Cf} (^{12}\text{C}, 4n) ^{257}\text{Rf}$ | 9 |
| 105 | Dubnium, Db | 1968–70 | Dubna | $^{243}\text{Am} (^{22}\text{Ne}, 4n) ^{261}\text{Db}$ | |
| 106 | Seaborgium, Sg | 1974 | Berkeley, Livermore | $^{249}\text{Cf} (^{18}\text{O}, 4n) ^{263}\text{Sg}$ | |
| 107 | Bohrium, Bh | 1981 | GSI, Darmstadt | $^{209}\text{Bi} (^{54}\text{Cr}, 1n) ^{262}\text{Bh}$ | 15 |
| 108 | Hassium, Hs | 1984 | GSI, Darmstadt | $^{208}\text{Pb} (^{58}\text{Fe}, 1n) ^{265}\text{Hs}$ | 16 |
| 109 | Meitnerium, Mt | 1982 | GSI, Darmstadt | $^{209}\text{Bi} (^{58}\text{Fe}, 1n) ^{266}\text{Mt}$ | 17 |
| 110 | | 1994 | GSI, Darmstadt | $^{208}\text{Pb} (^{62}\text{Ni}, 1n) ^{269}110$ | 18 |
| 111 | | 1994 | GSI, Darmstadt | $^{209}\text{Bi} (^{64}\text{Ni}, 1n) ^{272}111$ | 19 |
| 112 | | 1996 | GSI, Darmstadt | $^{208}\text{Pb} (^{70}\text{Zn}, 1n) ^{277}112$ | 20 |
| 114 | | 1999 | Dubna | $^{244}\text{Pu} (^{48}\text{Ca}, 3n) ^{289}114$ | 23 |
| 116 | | 1999 | Berkeley | $^{293}118$ rozpadem alfa na $^{289}116$ | 24 |
| 118 | | 1999 | Berkeley | $^{208}\text{Pb} (^{86}\text{Kr}, 1n) ^{293}118$ | 24 |

^a Berkeley – Lawrence Berkeley National Laboratory, California; Livermore – Lawrence Livermore National Laboratory, California; Dubna – Spojený ústav jaderného výzkumu, Rusko; GSI – Gesellschaft für Schwerionenforschung, Darmstadt, SRN,

^b jaderné reakce jsou uvedeny ve schématu: terčové jádro (střela, lehký produkt) těžký produkt

4. Transuranové a blízké transfermiové prvky

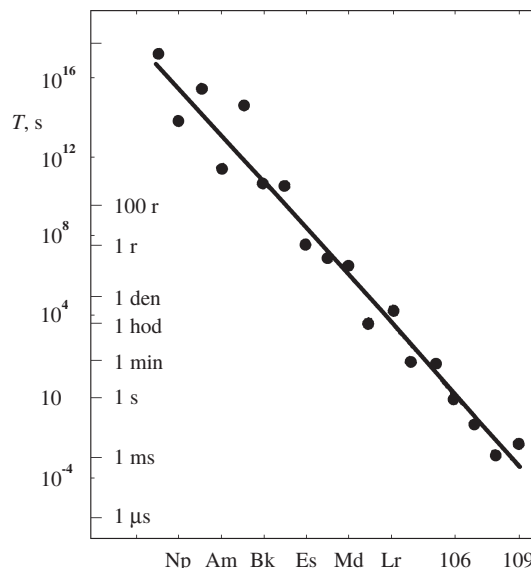
Snahy připravit nové prvky z oblasti za stávajícím koncem periodické tabulky (obr. 3) byly původně motivovány touhou poznat jejich vlastnosti a zařadit je do soustavy prvků. Jak se však ukázalo, sehrály již první připravené transurany velmi významnou roli v rozvoji jaderné energetiky a jaderných zbraní, další transurany pak našly praktické uplatnění jako zdroje záření alfa pro standardizační účely, neutronové zdroje, statické eliminátory, radioizotopové zdroje elektřiny aj. Úsilí připravit supertěžké prvky bylo pak živeno potřebou prověřit naše poznatky o jaderné stabilitě, reakčních mechanismech vedoucích ke vzniku málo stabilních těžkých jader a zejména pak hypotézy o předpokládané existenci ostrůvku (nebo ostrůvků) jaderné stability.

K pokusům o přípravu prvků s protonovými a atomovými čísly vyššími, než mají nejtěžší přírodní prvky, bylo nejprve využito jaderných reakcí záchytu neutronů. Byl to vlastně postup, který objevil Fermi, když studoval záchyt neutronů na jádrech ^{207}Tl . Složená jádra ^{208}Tl jsou nestabilní a jejich stabilita se obnovuje přeměnou beta, kterou se mění na jádra s protonovým číslem o jednotku vyšším – tedy na jádra ^{208}Pb . Tohoto postupu bylo, jak známo, využito též při přípravě prvních transuranových prvků – neptunia 239 a plutonia 239, a opakováním reakce záchytu neutronu na dříve připravených nižších transuranech (jako terčových jádrech) i k získání transuranů dalších až po fermium (se $Z = 100$). Dále postupovat touto cestou možné nebylo, protože žádný z izotopů fermia se nepřeměňuje rozpadem beta.

K syntéze dalších prvků za hranicí fermia^{8,9} pak bylo využito zejména jaderných reakcí vyvolaných bombardováním nejtěžších, v té době dostupných nuklidů částicemi alfa a urychlenými lehkými jádry (^{14}C , ^{15}N , ^{18}O , ^{22}Ne). Příklady takovýchto syntéz transfermiových prvků se $Z = 101$ až 106 jsou uvedeny na prvních řádcích v tab. I spolu s časovým

údajem a pracovišti vědeckých týmů, kterým byla priorita objevu nových prvků přiznána. (Zde jsme se přidrželi názorů vyslovených v přehledném článku¹³ a závěrů specializované komise IUPAC.) Dodnes bylo připraveno více izotopů transfermiových prvků navíc k těm, které jsou jako příklady uvedeny v tabulce.

Při zkoumání vlastností těchto prvků bylo zjištěno, že s rostoucím Z se snižují parciální poločasy jejich spontánního štěpení, jak je to znázorněno na obr. 4. Podobně se snižují



Obr. 4. Závislost poločasů spontánního T štěpení nejdéleobdobnějších izotopů prvků na protonovém čísle Z (pro prvky se Z v rozmezí 94 až 109)

i poločasy jejich přeměn alfa a to ukazuje na jejich menší stabilitu, jak to ostatně vyplývá i z představ kapkového modelu jádra. Tato skutečnost je důležitá nejen z hlediska teoretických úvah, ale má to i určité praktické důsledky při přípravě a identifikaci těžkých a supertěžkých prvků. Znamená to, že u prvků se stále vyšším Z máme stále méně času k dispozici k provedení separace a identifikace nového prvku. Zatímco v oblasti prvních transfermiových prvků při tom lze využít ještě různých rychlých chemických reakcí ke stanovení jejich vlastností, v oblasti supertěžkých prvků, kde poločasy rozpadu prvků jsou řádově v sekundách až desetinách milisekundy, jsou separace a identifikace proveditelné jen fyzikálními postupy, které jsou blíže vysvětleny v dalších odstavcích. Chemické techniky separace a identifikace stopových množství (často jen desítky nebo stovky atomů) nových prvků daly vznik speciální vědní oblasti, o jejíž rozvoj se zasloužil zejména I. Zvara¹⁰. Informace o nich lze získat v souborné práci¹¹. Jako příklad uveďme pionýrské studie chemických vlastností rutherfordia, které ukázaly, že se tento prvek chová jako transaktinid (má podobné vlastnosti jako zirkonium a hafnium) a patří do 4. skupiny periodické tabulky (viz obr. 3, aktinidová řada končí u lawrencia). U seaborgia, jehož izotopy 265 a 266 mají sekundové poločasy, bylo možno pomocí chemických postupů dokázat, že tento prvek je hexavalentní a řadí se do 6. skupiny periodické soustavy. Předpokládá se, že prvky 106 až 112 doplňují přechodovou řadu 6d a zařazují se do skupin 6 až 12 periodické soustavy jako homology prvků W až Hg.

5. Ke břehům ostrůvku stability

Jaderné reakce vedoucí ke vzniku další skupiny nových těžkých prvků, založené na bombardování poměrně lehkými jádry, se označují jako „horká fúze“, protože při nich vznikají produkty (složená jádra) se značnou vnitřní excitací (kolem 50 MeV) a deexcitují emisí několika neutronů, což nežádoucím způsobem ubírá na hmotnosti posléze vytvořeného jádra.

V roce 1975 upozornil Oganessian se spolupracovníky¹² na to, že nežádoucí excitaci při fúzních reakcích lze omezit, když se jako terčového jádra použije dvojnásobně magického ^{208}Pb (nebo sousedního ^{209}Bi) a jako střel středně těžkých jader (např. ^{50}Ti nebo ^{54}Cr) a energie se volí tak, aby právě jen dostatočovala k překonání fúzní bariéry. K určité excitaci zde sice nutně rovněž dochází, ale ta je výrazně nižší (méně než 20 MeV) než v případě horké fúze a k deexcitaci stačí emise jediného neutronu. Tento typ reakce se označuje jako „studená fúze“. To co zbytek z fúzního produktu po deexcitačním vypaření neutronu (nukleonů) se označuje jako odparkový zbytek (EVR, evaporation residue) a v tomto případě zachovává vysokou hmotnost^{13,14}.

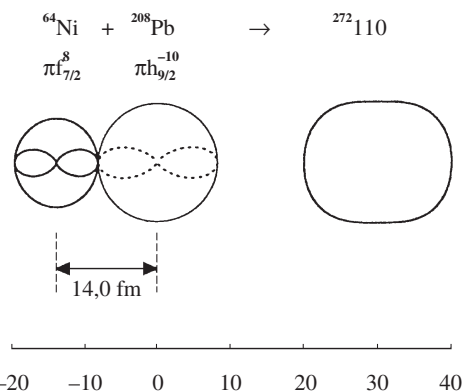
Této cesty úspěšně využili pracovníci GSI (Gesellschaft für Schwerionenforschung) a v poměrně krátké době (1981–86) se jim podařilo připravit postupně šest dalších prvků, jejichž protonová čísla se již blížila magickému číslu $Z = 114$ (cit.^{15–20}).

Příprava supertěžkých prvků cestou studené fúze těžkých jader má určité výhody u syntézy jader s Z větším než 106. Popišme nyní stručně, jak probíhá např. fúze terčového jádra ^{208}Pb s jádrem střely ^{64}Ni , znázorněná na obr. 5. Při vzájemném přibližování obě jádra nejprve překonávají vzájemné odpuzování a pronikají fúzní bariérou, danou tzv. Bassovým poten-

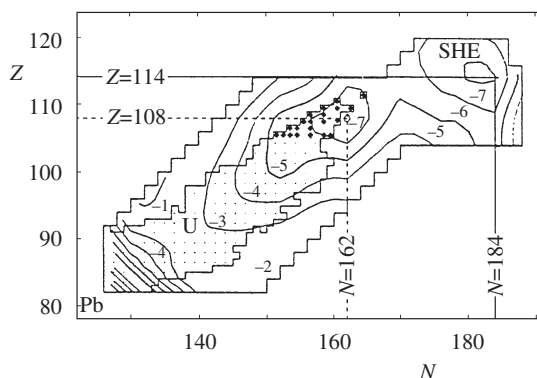
ciálem²¹, který lze odvodit z představ kapkového modelu jádra. V další fázi pak obě jádra postupně splývají při zachování struktury terčového jádra ^{208}Pb a konečně po deexcitaci emisí neutronu vzniká jádro–produkt, kterému v následném rozpadu brání jeho štěpná bariéra. To je rozložení potenciálu bránícího podle kapkového modelu kritickému protažení jádra a jeho transformaci na (obvykle dvě) menší jádra. Pro vznik supertěžkého složeného jádra je kritický okamžik, kdy se při vzájemné srážce obě jádra dotknou a kdy dochází k přesunu nukleonů (nebo jejich párů) mezi orbity obou partnerů. V uvedeném příkladu fúze jader je tato vzdálenost 14 femtometrů, protonová podslupka v jádru olova $h_{11/2}$ je obsazena a protony přecházejí z obsazeného orbitu $f_{7/2}$ niklu do volné orbity podslupky $h_{9/2}$ olova a vzniká deformovaný fúzní produkt $^{272}110$, který má excitační energii pouze 10,2 MeV.

Na výsledné stabilitě jádra se podílí různé faktory. V oblasti prvků se Z mezi 80 a 90 např. spontánní štěpení není významnou složkou rozpadu a teprve u Z vyšších než 90 se stává výraznou formou rozpadu. To souvisí s relativním snížením štěpné bariéry podle představ kapkového modelu jádra. U jader se Z vyšším než 100 se konečně začínají uplatňovat i slupkové korekce, které zde jsou srovnatelné s výškou štěpné bariéry. V oblasti supertěžkých prvků (které jsou právě tímto definovány) o stabilitě plně rozhodují slupkové korekce a to jak v případech deformovaných, tak kulově symetrických jader.

Podívejme se ještě jednou na vrstevnicovou mapu slup-



Obr. 5. Fáze přiblížení jader při kterém nastává mezi nimi přesun nukleonů a vzniká deformované složené jádro supertěžkého prvku 110



Obr. 6. Pomocí vrstevnic se stejnou úrovní slupkových korekčních energií (v MeV) znázorněná „krajina“ v oblasti velmi těžkých a supertěžkých nuklidů

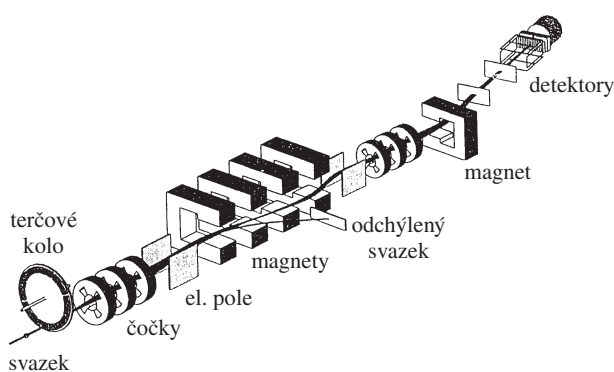
kových korekcí těžkých a supertěžkých jader²² znázorněnou na obr. 6. Zde se nám zleva jeví obraz mírně se svažující krajiny, která přechází do dvou plochých rybníčků (to je obrácený obraz ostrůvků stability). Jejich středy odpovídají pro deformovaná jádra zhruba souřadnicím $Z = 108$ a $N = 162$ a pro jádra kulově symetrická $Z = 114$ a $N = 184$. Za zmínku stojí připomenout, že vazebná energie např. olova je z důvodu slupkové korekce o 11 MeV větší než jakou bychom očekávali u nestrukturované kapičky jaderného materiálu se stejným počtem protonů a neutronů.

K tomu, aby bylo možné prokázat vznik nového prvku, je třeba ovšem připravit alespoň několik jeho atomů, takže závažná je i otázka výtěžku příslušné produkční jaderné reakce, který závisí především na jejím účinném průřezu. Obecně jsou produkční účinné průřezy vzniku supertěžkých jader horkou i studenou fúzí velmi nízké – řádu nano (nb) až pikobarnu (pb), ($1 \text{ barn} = 10^{-28} \text{ cm}^2$). Pro vznik jader se Z kolem 106 jsou účinné průřezy horkých fuzních reakcí o více než jeden řád nižší než u studených fúzí, ale i zde klesají účinné průřezy při zvýšení Z o jednotku o součinitel 5. Excitační funkce těchto reakcí (závislosti účinných průřezů na energii) jsou velmi úzké a proto je nastavení energie střel velmi kritické.

6. Technika přípravy a průkazu supertěžkých prvků

Již jsme naznačili, že k úspěšné syntéze supertěžkých prvků je třeba nejen vybrat nejvhodnější reakční cestu, ale splnit řadu náročných experimentálních podmínek. K realizaci ať již horké nebo studené fúze jader je zapotřebí urychlovače, který poskytuje svazky střel (izotopicky separovaná jádra) středně těžkých prvků s energií 200 až 450 MeV a tokem částic řádově 10^{12} za sekundu. Při tom je třeba, aby energie částic byla ostře vymezena a na zvolené energii udržovaná ve stabilním režimu po dobu až několika týdnů. Takovými urychlovači jsou vybaveny jen některé laboratoře a tak pouze několik málo týmů (uvedených např. na konci tab. I) může rozvíjet práce v tomto směru. K těmto pracím lze využívat jak urychlovačů lineárního tak kruhového (cyklotronového) typu.

Další kritickou součástí zařízení je oblast terčového ohniska, odkud je třeba nově vytvořené atomy vyčlenit k provedení přímých měření fyzikálních nebo chemických charakteristik, což přímo v ohnisku není možné. Transport těchto atomů



Obr. 7. Zařízení pro separaci a identifikaci supertěžkých prvků SHIP 94

z terčové oblasti lze uskutečnit například mechanicky, nebo k tomu lze využít vlastní kinetické energie, se kterou tyto atomy vznikají.

Příkladem prvního způsobu je technika heliové trysky, kde atomy nově vytvořených prvků vznikají ve velmi tenkém terčíku a když ho s vlastní kinetickou energií opustí, jsou zabrzděny v plynném heliu a jeho proudem odnášeny dlouhou trubicí a konečně deponovány na povrchu otočného kola. Takto separovaná aktivita se po určité době přesune pod polovodičové detektory a zde se změní energie jimi emitovaných paprsků alfa nebo štěpných trosk.

Poněkud odlišná je technika rotujícího kola, při které je tenká vrstva terčového materiálu nanesena na plášťovém povrchu rotujícího válce, na nějž v určitém místě tangenciálně dopadá svazek střel. Při otáčení válce jsou v terčové oblasti vytvořené nové atomy velmi rychle přenášeny do blízkosti stopových detektorů (slídové destičky), ve kterých se registují štěpné stopy vyzářené při rychle probíhajícím spontánním štěpení. Výhodou této techniky je vysoká účinnost registrace stop (poměr počtu zaznamenaných stop k počtu částic vyzářených), nevýhodou je, že se nezískají informace o energii vyzářovaných částic alfa.

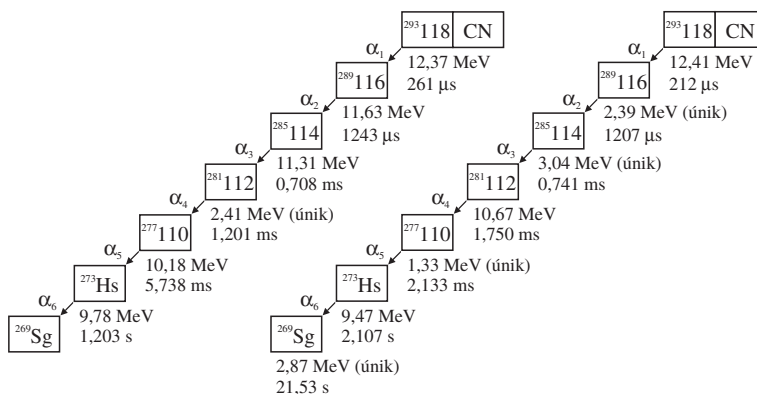
V poslední době se nejvíce používá zařízení, ve kterých se k oddělení nově vytvořených jader od ostatních parazitních produktů jaderných reakcí a terčíkem prolétlých střel využívá jejich vlastní kinetické energie, se kterou opouštějí terčík. To se uskutečňuje ve vakuových neb plynem při nízkém tlaku plněných komorách pomocí elektrických neb magnetických separátorů. Jako příklad je na obr. 7 znázorněno zařízení SHIP (Separator for Heavy Ion Reaction Products) zkonstruovaného v laboratoři GSI v Darmstadtu, kterého bylo v postupně zdokonalované formě použito při objevu prvků 107 až 112.

Svazek urychlených iontů (střel) zde dopadá ve vakuu na rotující terčík tvořený uhlíkovou folií $50 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$, na níž je nanesena tenká vrstva terčového materiálu, např. olova. Zde vzniklá supertěžká jádra jsou od ostatních reakčních produktů a svazku střel, které prolétly terčíkem, oddělena za letu pomocí elektrického a magnetického rychlostního filtru. Částice odpovídající hmotnostními a rychlostními charakteristikami supertěžkým prvkům jsou pak zavedeny do vlastní analytické části přístroje.

V této části zařízení částice nejprve prolétnou dvěma spektrometry, kde na základě doby průletu je stanovena přesně jejich energie a dopadají pak na povrch polovodičového křemíkového detektoru, do kterého se naimplantují. Tyto (pozičně citlivé) detektory mají speciální dělenou strukturu, pomocí níž lze určit do které části jádro dopadlo a ovšem i přesnou dobu a energii s níž se implantace uskutečnila. Emise částic alfa a příp. štěpných trosk z oblasti jednotlivých naimplantovaných nových atomů je pak energeticky i časově analyzována pomocí další soustavy křemíkových detektorů a pomocí germaniových detektorů měřena i energie průvodného záření gama a rentgenového.

7. Prvky 114, 116, 118

Rok 1999 byl velmi bohatý na přírůstky do rodiny supertěžkých prvků a přinesl i některá překvapení. V lednu tohoto roku oznámili pracovníci z Dubny, že se jim podařilo ve spolupráci s livermorským pracovištěm prokázat vznik



Obr. 8. Sekvence rozpadů alfa u dvou uměle vytvořených jader prvku 118 (únik značí, že pouze část energie částice alfa se zaznamenala v detektoru, CN značí složené jádro)

zatím jediného atomu prvku 114. Při těchto experimentech nebylo použito klasického schématu studené fúze, ale jako terčovými jader aktinidu ^{244}Pu a jako střely poměrně lehkého ^{48}Ca . Záznamy z detektorů, které monitorovaly tento experiment, byly interpretovány jako vznik atomu prvku $^{289}\text{114}$, který po době života asi 30 s prodělal postupně sekvenci tří rozpadů alfa a spontánního štěpení. Bohužel při tom atom procházel transformací přes dosud neznámé nuklidy, takže objev prvku 114 bude třeba verifikovat vytvořením dalších atomů. Doba života 30 s naznačuje zvýšenou stabilitu i když u zástupců ostrůvku stability byly očekávány doby života výrazně delší.

Bylo-li oznámení o objevu prvku 114 tímto typem syntézy určitým překvapením, tím větší pozornost vyvolala koncem července 1999 zpráva, že se berkeleyjské skupině podařilo vytvořit podle klasického schématu studené fúze tři atomy prvku 118. Podle dosavadních zkušeností s touto reakcí (snížení účinného průřezu s rostoucím Z) sotva bylo možno očekávat, že by tento prvek vznikl s účinným průřezem vyšším než 0,01 pikobarnu a sotva by byl na stávajících zařízeních zjištělný. Smolanczuk²⁵, pracující s berkeleyjskou skupinou však upozornil na to, že by při použití dvojnásobně magických terčovými jader ^{208}Pb bombardovaných svazkem 455 MeV střel tvořených magickým ^{86}Kr , (dosud nejtěžším jádrem použitým jako střely) se teoreticky daly očekávat výrazně zvýšené účinné průřezy pro vznik prvku 118. Berkeleyjská skupina tedy využila právě dokončeného plynem plněného separátoru iontů (nutného k oddělení nově vytvářených atomů od ostatních částic) k experimentu, kdy po jedenáct dnů bombardovali terčík olova kryptonovými ionty z 88 palcového cyklotronu a v záznamech detektorů, do kterých se eluzivní jádra implantovala, pátrali po signálech, které by mohly odpovídat 118 prvku. Našli tři takové případy vzniku $^{293}\text{118}$ a všechny tyto atomy se během velmi krátké doby sekvencí šesti přeměn alfa postupně transformovaly až na ^{269}Sg (viz obr. 8). Nutně během této sekvence muselo dojít k vytvoření i dalšího supertěžkého prvku 116 a to izotopu $^{289}\text{116}$. Z počtu vytvořených atomů a podmínek při bombardování se dalo odvodit, že produkční účinný průřez vzniku prvku 118 reakcí uvedenou v poslední řádce tab. I byl 2,2 (+2,6–0,8) pikobarn, což bylo sice méně, než předpovídal Smolanczuk²⁵, ale více než hodnota, na kterou ukazovala pesimistická extrapolace.

I když se tedy již podařilo vytvořit prvky s protonovými čísly odpovídajícími poloze předpokládaného ostrůvku stability, nemají dosud přípravné izotopy nijak výrazně dlouhé poločasy. To je zřejmě dáno tím, že jejich neutronová čísla jsou nízká (až o 8 jednotek u izotopu $^{289}\text{114}$) oproti příslušnému neutronovému magickému číslu $N = 184$. K tomu aby se podařilo vytvořit izotopy ležící blíže středu ostrůvku stability by bylo třeba použít jako reakčních partnerů (tedy terčíku a střely) jader více bohatých na neutrony. Taková jádra existují, ale jsou radioaktivní. Tak například místo dlouhodobého ^{244}Pu by se dalo uvažovat o použití izotopu ^{246}Pu , který však má poločas 11 dnů a jen velmi obtížně by se z něj realizoval terčík, který by vydržel několikátý denní bombardování. Podobně by z hlediska neutronové bohatosti bylo výhodné použít jako střel jader ^{96}Kr , která mají však poločas jen několik sekund a realizovat z nich dostatečně vydatný svazek k bombardování je zatím technicky nemožné.

Čeho že se tedy v reálné době zatím můžeme dočkat? Především jistě bude v dalších laboratořích prověřována cesta použitá v Dubně k přípravě prvku 114. V Berkeley se chystají svazkem ^{86}Kr bombardovat místo olova blízké jádro ^{209}Bi , což by mělo vést ke vzniku prvku 119. Ke stejnému prvku by měla vést studená fúze jader ^{208}Pb s jádrem ^{87}Rb . Bude se patrně hledat i odpověď na otázku, zda střed ostrůvku stability leží u $Z = 114$, nebo spíše u $Z = 120$, nebo dokonce až u $Z = 126$.

LITERATURA

Seznam odborné literatury citované v informativním článku předkládaného rozsahu a záběru může pochopitelně být jen velmi omezený. Pokusili jsme se do něj zahrnout alespoň nejdůležitější knižní práce o jaderné stabilitě, dále pak základní přehledné články o metodách přípravy umělých transuranových a supertěžkých prvků a konečně i základní práce o způsobech identifikace nejtěžších prvků, které se dosud podařilo připravit. Citovaná literatura by měla být užitečným vodítkem pro další podrobnější studium.

1. Seaborg G. T., Loveland W.: *The Elements Beyond Uranium*. Wiley, New York 1990. Katz J. J., Seaborg G. T., Morss L. R.: *Chemistry of the Actinide Elements*. Chapman and Hall, London 1986.
2. Jech Č.: Chem. Listy 66, 785 (1972).
3. Mueller A. C., Sherill B. M.: Annu. Rev. Nucl. Part. Sci. 43, 529 (1993).

4. Goppert-Mayer M., Jensen J. H. D.: *Elementary Theory of Nuclear Shell Structure*. Wiley, New York 1955.
5. Strutinsky V. M.: Nucl. Phys. A 95, 420 (1967).
6. Wapstra A. H., Audi G.: Nucl. Phys. A 431, 1 (1985).
7. Myers W. D., Swiatecky W. J.: Nucl. Phys. 81, 1 (1966).
8. Armbruster P.: Annu. Rev. Nucl. Part. Sci. 43, 135 (1985).
9. Münzenberg G.: Rep. Prog. Phys. 51, 57 (1988).
10. Zvara I., Chuburkov Yu. T., Caletka R., Zvarova T. S., Shalaevsky M. R., Shilov B. V.: At. Energ. 21, 8 (1966); J. Nucl. Energ. 21, 60 (1966).
11. Schädel M.: Radiochim. Acta 70/71, 207 (1995).
12. Oganessian Yu. T., Iljinov A. S., Demin A. G., Tretyakova S. P.: Nucl. Phys. A 239, 353 (1975).
13. Hofmann S.: Rep. Prog. Phys. 61, 639 (1998).
14. Armbruster P.: Rep. Prog. Phys. 62, 465 (1999).
15. Münzenberg G., Hofmann S., Hessberger F. P., Reisdorf W., Schmidt K. H., Schneider J. H. R., Armbruster P., Sahm C. C., Thuma B.: Z. Phys. A 300, 107 (1981).
16. Münzenberg G., Armbruster P., Folger H., Hessberger F. P., Hofmann S., Keller J., Poppensieker K., Reisdorf W., Schmidt K. H., Schött H. J., Leino M. E., Hingmann R.: Z. Phys. A 309, 89 (1982).
17. Münzenberg G., Reisdorf W., Hofmann S., Agarwal Y. K., Hessberger F. P., Poppensieker K., Schneider J. R. H., Schneider W. F. W., Schmidt K. H., Schött H. J., Armbruster P., Sahm C. C., Vermeulen D.: Z. Phys. A 317, 145 (1984).
18. Hofmann S., Ninov V., Hessberger F. P., Armbruster P., Folger H., Münzenberg G., Schött H. J., Popeko A. G., Yeremin A. V., Andreyev A. N., Šáro S., Janík R., Leino M.: Z. Phys. A 350, 277 (1995).
19. Hofmann S., Ninov V., Hessberger F. P., Armbruster P., Folger H., Münzenberg G., Schött H. J., Popeko A. G., Yeremin A. V., Andreyev A. N., Šáro S., Janík R., Leino M.: Z. Phys. A 350, 281 (1995).
20. Hofmann S., Ninov V., Hessberger F. P., Armbruster P., Folger H., Münzenberg G., Schött H. J., Popeko A. G., Yeremin A. V., Šáro S., Janík R., Leino M.: Z. Phys. A 354, 229 (1996).
21. Bass R.: Nucl. Phys. A 231, 45 (1974).
22. Smolanczuk R., Skalski J., Sobiczewski A.: Phys. Rev. C 52, 1871 (1995).
23. Oganessian Yu. Ts., Yeremin A. V., Popeko A. G., Bogomolov S. L., Buklanov G. V., Chelnokov M. L., Chepigin V. I., Gikal B. N., Gorshkov. M. L., Gulbekian G. G., Itkis M. G., Kabachenko A. P., Lavrentev A. Yu., Malyshev O. N., Rohac J., Sagaidak R. N., Hofman S., Šáro S., Giardina G., Morital K.: Nature 400, 242 (1999).
24. Ninov V., Gregorich K. E., Loveland W., Ghiorso A., Hoffman D. C., Lee D. M., Nitsche H., Swiatecki W. J., Kirbach U. W., Laue C. A., Adams J. L., Patin J. B., Shaughnessy D. A., Strellis D. A., Wilk P. A.: <http://user88.lbl.gov/e118/paper.html>.
25. Smolanczuk R.: Phys. Rev. C 59, 2634 (1999).

Č. Jech (*J. Heyrovský Institute of Physical Chemistry, Academy of Sciences of the Czech Republic, Prague*): **Preparation and Stability of Superheavy Elements**

A brief review is presented of the recent achievements in the field of production and identification of superheavy elements up to $Z = 118$. Possible reaction paths leading to the synthesis of the nuclei in the vicinity of the island of relatively stable nuclei are discussed.