

Rozhledy matematicko-fyzikální

Vladimír Wagner

Hranice Mendělejevovy tabulky prvků

Rozhledy matematicko-fyzikální, Vol. 94 (2019), No. 1, 32–44

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/147681>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 2019

Institute of Mathematics of the Czech Academy of Sciences provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This document has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://dml.cz>

Hranice Mendělejevovy tabulky prvků

Vladimír Wagner, Ústav jaderné fyziky AV ČR, FJFI ČVUT, Praha

V tomto roce se slaví 150. výročí Mendělejevovy tabulky prvků. V této souvislosti byl rok 2019 vyhlášen „Mezinárodním rokem periodické tabulky“. Pozornost věnovaná tomuto výročí je plně oprávněná. Jde totiž o jeden z nejvýznamnějších objevů v dějinách lidstva, který tvoří základy chemie i fyziky.

Periodická tabulka prvků

Mendělejev ukázal, jak lze popsat chemické vlastnosti prvků. Zjistil, že jsou periodickou funkcí jejich relativních atomových hmotností. To mu umožnilo předpovědět existenci nových, dosud neznámých prvků a jejich vlastností. V té době jich bylo známo 62 a v tabulce byla řada bílých míst. Po jejich zaplnění se chemici a fyzikové soustředili na hledání stále těžších prvků.

Dnes víme, že periodicitu v tabulce je dána strukturou atomu. Ten se skládá z atomového jádra, kde je soustředěna téměř veškerá jeho hmotnost, a elektronového obalu. Jádro obsahuje kladně nabitě protony a elektricky nenabitě neutrony. Protože velikost náboje protonu a elektronu je stejná, liší se pouze znaménkem, musí mít neutrální atom stejný počet protonů v jádře jako elektronů v obalu. Uspořádání elektronového obalu určuje chemické vlastnosti prvků.

Identita prvku je určena počtem protonů v jádře. Počet neutronů může být pro příslušný prvek různý. Každý prvek tak má řadu různých izotopů, které se liší právě počtem neutronů v jádře. Počet neutronů má vliv na stabilitu jádra a jeho další vlastnosti, neovlivňuje však chemické vlastnosti atomu.

Na mapu jader tak můžeme přidávat nové izotopy známých prvků s větším či menším počtem neutronů. Můžeme také nahradit jeden nebo více neutronů hyperonem a dostat tak hyperjádra. Zde je ještě větší prostor pro hledání nových hyperjader. Periodickou soustavu prvků můžeme dále rozšiřovat směrem ke stále těžším prvkům. Po doplnění bílých míst v tabulce se tak hledání nových prvků soustředilo na ty stále těžší. Dnes se tak snažíme produkovat a tím prokázat existenci tzv. supertěžkých jader.

Produkce supertěžkých prvků

Problémem je, že jádra těžší než bismut nemají stabilní izotop. Uran a thorium mají izotopy s poločasem rozpadu srovnatelným s existencí Země, takže se tyto prvky a produkty jejich rozpadu v přírodě stále vyskytují. Prvky těžší než uran však musíme připravovat uměle pomocí jaderných reakcí. Některé z těch jen o málo těžších, než je uran, se daří připravovat pomocí ozařování uranu intenzivními neutronovými toky. Supertěžké prvky je však nutné získávat v reakcích lehčího až středně těžkého iontu urychleného urychlovačem s těžkým jádrem terče. Dříve se nově vzniklé prvky identifikovaly pomocí chemické analýzy. Ovšem s růstem jejich hmotnosti dramaticky klesala pravděpodobnost jejich produkce, tím i dosažitelné množství a přesnost chemické analýzy.

Existují tři typy přeměny nestabilních jader, při kterých se jedno jádro mění na jiné. Jde o přeměnu beta, kdy se neutron mění na proton nebo proton na neutron. V rozpadu alfa se vyzáří jádro helia a počet neutronů i počet protonů se sníží o dva. U těch nejtěžších jader může také docházet k samovolnému štěpení jader, kdy se původní jádro rozštěpí na dvě středně těžká jádra a navíc se emituje ještě několik samostatných neutronů. Kromě toho může jádro při tzv. přeměně gama ještě vyzářit energii ve formě záření gama. V tomto případě však máme stále stejné jádro, jen s nižší energií.

Nestabilní velmi těžká jádra se většinou rozpadají přeměnou alfa nebo samovolným štěpením. V takovém případě pak dostaneme sekvenci rozpadů alfa v některých případech přerušenu samovolným štěpením. Rozpad beta se hlavně pro supertěžká jádra vyskytuje jen ve velmi omezené míře.

Další pokrok v produkci supertěžkých prvků závisel na nalezení metody bezrozporné identifikace jednotlivých atomů. Ta využívá právě identifikaci jednotlivých rozpadů alfa v sekvenci a identifikaci konečných jader. Zařízení, která takovou analýzu umožňovala, začala pracovat v německé laboratoři GSI Darmstadt a v mezinárodním ústavu SÚJV Dubna v Rusku. Při reakcích vznikají různá jádra. Nejdříve je tak vhodné vybrat pomocí elektrických a magnetických polí supertěžká jádra s hledaným poměrem náboje a hmotnosti. Jádra, která projdou selektorem, jsou zachycena v zastavovací fólii, která je obklopena detektory alfa částic. Ty uloví všechny tyto částice vzniklé v sekvenci postupných rozpadů. Ta končí u jádra, které se rozpadne samovolným štěpením nebo má velmi dlouhý poločas rozpadu. Poslední jádra sekvence a parametry jejich roz-

padu (energie zachycené částice alfa, doprovodné gama záření, poločas rozpadu, ...) jsou známy a umožňují jádra přesně identifikovat. Počet alfa částic, které vznikly před známými jádry, pak umožňuje určit počáteční jádro sekvence rozpadů.

Právě zmíněné laboratoře byly těmi hlavními, které spolu s ostatními přispěly k tomu, že dnes je známo již 118 prvků. Čtyři, které doplnily a uzavřely sedmou periodu Mendělejevovy periodické tabulky, byly uznány v roce 2015. Dostaly jména nihonium (^{113}Nh), moscovium (^{115}Mc), tennessine (^{117}Ts) a oganesson (^{118}Og). Oganesson uzavírá sedmou periodu a stejně jako třeba xenon, krypton, argon či radon by měl být z chemického hlediska vzácným plynem. Jestli jím je opravdu, zatím nevíme.

Otázka, zda se periodicitu pozorovaná v Mendělejevově tabulce projevuje i pro takto těžké prvky, je hlavní příčinou, proč se uvedený výzkum dělá. Kvůli zvyšujícímu se náboji jádra a rostoucímu elektrickému poli se hlavně elektrony v nejnižších slupkách stávají relativistickými a to může ovlivnit celou strukturu elektronového obalu. Očekává se, že už nejsme daleko od potenciálního zlomu v jeho vlastnostech a vlastnostech periodické tabulky. Zatím nejtěžší prvek, u kterého se podařilo zkoumat chemické vlastnosti, je prvek flerovium (^{114}Fl). Zdá se, že až po toto protonové číslo chemické vlastnosti odpovídají poloze v Mendělejevově tabulce. Zkoumání chemie jednotlivých atomů je jednou z největších výzev chemie a fyziky, kterou se daří realizovat.

Studijní text k Fyzikální olympiádě 2019

Produkce a studium supertěžkých prvků je jednou z nejzajímavějších oblastí jaderné fyziky a chemie. Proto jsme se rozhodli vybrat toto téma pro studijní text k Fyzikální olympiádě v roce 2019 [1]. V něm po historickém úvodu a seznámení s problematikou následuje popis praktické fyziky spojené s touto oblastí experimentální jaderné fyziky s uvedením řešených příkladů, které výklad názorně osvětlují. Nejdříve se čtenář v této kapitole seznámí se zákonitostmi, které platí na mikroskopické úrovni. Při popisu mikrosvěta se nelze obejít bez speciální teorie relativity a kvantové fyziky. Je třeba vzít v úvahu, že objekty mikrosvěta mají běžně rychlosti blízké rychlosti světla. Zároveň mají objekty s rozměry srovnatelnými s atomem a atomovým jádrem řadu podivných kvantových vlastností. Mají například tzv. duální povahu, což znamená, že chování mikroskopických objektů lze někdy popisovat stejně jako vlny, v jiných případech je podobné chování hmotných bodů, ale jsou i případy, kdy se chovají nepodobně čemukoli, co známe z běžného života.

Je také výhodné využívat jednotky vhodné velikosti. Náboj se vyjadřuje v násobcích velikosti náboje elektronu e . Jako jednotka energie se používá elektronvolt [eV], což je kinetická energie, kterou získá částice s nábojem o velikosti rovné náboji elektronu, pokud je urychlena potenciálovým rozdílem jednoho voltu. Používané násobné jednotky pak jsou kiloelektronvolty [keV], megaelektronvolty [MeV] a gigaelektronvolty [GeV]. Podobně rychlost se vztahuje k rychlosti světla ve vakuu c . Díky proslulému Einsteinovu vztahu $E = mc^2$ i hmotnost udáváme pomocí odpovídající energie [MeV/ c^2] a podobně udáváme hybnost v [MeV/ c].

V druhé části textu jsou popsány ty vlastnosti atomových jader, které určují jejich stabilitu a způsoby rozpadu. Silná interakce, která drží neutrony a protony pohromadě v jádře, má omezený dosah a každý nukleon může interagovat jen s limitovaným počtem okolních nukleonů. Roste tak pomaleji s počtem neutronů a protonů než elektrická odpudivá síla, která má nekonečný dosah, s počtem protonů. Proto musí u těžkých jader růst počet neutronů rychleji než protonů. Těžká jádra tak mají pro nejstabilnější izotopy jiný poměr mezi počtem protonů a neutronů než jádra lehká. Zároveň se projevuje skutečnost, že se jedná o fermiony. Tedy částice, které se podřizují Pauliho vylučovacímu principu, a může tak být v konkrétním stavu pouze jedna. To vede k tomu, že pro specifické počty protonů a neutronů (tzv. magická čísla) jsou jádra stabilnější. A právě tato vlastnost umožňuje existenci supertěžkých prvků. Teoretické předpovědi založené na slupkovém modelu předpovídají ostrov jader s delší dobou života pro počet protonů okolo 114 a neutronů 184.

Supertěžká jádra vznikají splynutím dvojice lehčích jader. Jde o dva objekty s kladným elektrickým nábojem, které se vzájemně odpuzují. Aby byla elektrostatická síla překonána, je lehčí jádro urychleno a srazí se s těžkým jádrem terče. Třetí část studijního textu se proto věnuje pohybu nabitých částic a iontů v elektrických a magnetických polích a principům různých urychlovačů. Při srážce jader a jejich rozpadu se uplatňují zákony zachování energie a hybnosti. Čtvrtá část textu je tak zaměřena na kinematiku jaderných reakcí a rozpadů. V páté části se text věnuje popisu pravděpodobností reakcí pomocí veličiny účinný průřez. Po prostudování těchto částí a řešených příkladů je možné porozumět tomu, jak se v současnosti supertěžké prvky produkují a jak tuto produkci fyzikálně popisujeme.

Vytvořená supertěžká jádra jsou nestabilní a dochází k jejich rozpadu prostřednictvím sekvence rozpadů alfa. Popis rozpadů radioaktivních ja-

der umožňuje rozpadový zákon, jehož rozboru a využití se věnuje šestá část. Radioaktivitě a jejímu popisu byl věnován i článek *Detekce přítomnosti radionuklidů v atmosféře* v tomto časopisu [2].

Poslední, sedmá část je zaměřena na základní vlastnosti elektronového obalu atomu supertěžkých prvků. Ten je specifický zvláště tím, že hlavně jeho vnitřní elektrony mají rychlosti blízké rychlosti světla a jsou relativistické. Při jeho popisu je využit jednoduchý kvantový Bohrov model atomu.

Na závěr studijního textu je umístěno několik neřešených příkladů, které doplňují řešené ve všech částech předchozího textu. Snahou bylo vytvořit pro středoškolačka srozumitelný návod pro pohyb v jaderném světě se zaměřením na pochopení produkce a výzkumu nových jader, zvláště supertěžkých. Cílem bylo, aby porozuměl experimentálními metodám, které se zde využívají, např. fungování urychlovačů a detekce částic.

Studijní materiál *Hranice Mendělejevovy tabulky* [1] si přiblížíme dvěma tématy, která se v textu rozebírají.

První ukázka: Nástroje a jednotky využívané v mikrosvětě

V mikrosvětě se na jedné straně setkáváme s extrémně malými hodnotami některých veličin (vzdálenost, náboj, energie, ...), na druhé straně naopak některé veličiny mohou snadno nabývat hodnot extrémně velkých, např. rychlost tak může být velmi blízká rychlosti světla. Je tak třeba při řešení fyzikálních úloh používat přiměřené jednotky a fyzikální teorie, které umožňují tyto procesy a jevy popsat.

Rozměr atomu je zhruba 10^{-10} m, tedy 0,1 nm. Je tak rozumné při popisu rozměrů atomů využívat jednotku nanometr. Rozměr jádra je zhruba 10^{-15} m = 1 fm, zde se tak využívá jednotka femtometr. Velikost náboje elektronu je stejná jako protonu a v jednotkách SI je v současnosti udaná s přesností na čtyři platné cifry jako $1,602 \cdot 10^{-19}$ C. Náboj ve světě atomů, jader a elementárních částic je tak vhodné vyjadřovat v násobcích velikosti náboje elektronu e . Pokud částici s nábojem $1e$ urychlíme pomocí potenciálového rozdílu (napětí) 1 V, získá kinetickou energii jeden elektronvolt (1 eV). Takto zavedená jednotka energie a její násobky (keV, MeV či GeV) se využívají pro energii v mikrosvětě. Protože kinetickou energii E_k , kterou získá při urychlení napětím U náboj Q , dostaneme ze vztahu $E_k = QU$, platí pro vztah mezi elektronvoltem a jednotkou energie v SI (joulem) s přesností na čtyři platné číslice: $1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$.

První nutnou teorií, bez které se při popisu mikrosvětla neobejdeme, je speciální teorie relativity. Ta umožňuje popsat pohyb částic s rychlostmi blízkými rychlosti světla. Rychlosti částic jsou většinou v mikrosvětě o mnoho řádů větší než v našem známém prostředí a mohou se rychlosti světla dost blížit, proto je vhodné je vyjadřovat právě v jednotkách rychlosti světla. Vyjádřeno v jednotkách SI je to $c = 2,997\,924\,58 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Vzhledem k definici metru a sekundy je tato hodnota přesná. Pracujeme tak s relativní rychlostí vzhledem k rychlosti světla, kterou značíme $\beta = v/c$.

U relativistických částic je kinetická energie srovnatelná s energií spojenou s klidovou hmotností objektu nebo větší a je tak vhodné pracovat s celkovou energií E částice. Ta je dána její klidovou energií E_0 a kinetickou energií E_k :

$$E = E_0 + E_k. \quad (1)$$

Podívejme se na klíčové vztahy, které se při popisu relativistických částic používají. Jejich odvození je ve studijním textu pro řešitele Fyzikální olympiády [3]. Klidová energie je dána slavným Einsteinovým vztahem:

$$E_0 = m_0 c^2. \quad (2)$$

Vztah mezi celkovou energií E , klidovou energií E_0 a rychlostí v je:

$$E = \frac{E_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}. \quad (3)$$

Vztah mezi celkovou energií E , klidovou energií E_0 a hybností p je pak:

$$E^2 = E_0^2 + p^2 c^2. \quad (4)$$

Einsteinův vztah umožňuje vyjadřovat hmotnost nebo hybnost v energetických jednotkách. Hmotnosti částic tak lze vyjadřovat v MeV/c^2 či GeV/c^2 a hybnosti pak v MeV/c a GeV/c .

Rozhodování, kde vystačíme s nerelativistickým přiblížením a kde musíme zapojit speciální teorii relativity, závisí na přesnosti, kterou u řešení požadujeme. V běžném případě, například při urychlování na nerelativistickém urychlovači cyklotronu, vystačíme s nerelativistickým přiblížením. Hranicí je situace, kdy kinetická energie je zhruba jedno procento klidové energie a rychlost je přibližně 0,14c.

Stejně tak je při popisu částic v mikrosvětě potřeba využívat kvantovou fyziku. Jednou z jejich základních vlastností je to, že každý objekt

má zároveň vlnové a částicové vlastnosti. Světlo a elektromagnetické záření má tak nejen vlnové vlastnosti, ale také částicové. Energie a hybnost elektromagnetického záření se vyznačuje, pohlcuje i šíří v diskrétní kvantované podobě ve formě částic – fotonů.

V kvantové fyzice je potřeba nová fundamentální konstanta – tzv. Planckova konstanta h . Jde o fyzikální konstantu, která má stejný rozměr jako moment hybnosti. V jednotkách SI je její experimentálně určená hodnota $h = 6,626\,070\,15 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ [4]. Při řešení našich úloh vystačíme s přesností na čtyři platné cifry $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$. V jednotkách využívaných v mikrosvětě je to pak $h = 4,136 \cdot 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$, zde už uvádíme jen hodnotu s přesností na čtyři platné cifry. Velice často se využívá redukovaná hodnota Planckovy konstanty \hbar :

$$\hbar = \frac{h}{2\pi}. \quad (5)$$

Velice vhodné je pak při výpočtech využívat součin redukované hodnoty Planckovy konstanty a rychlosti světla, který má snadno zapamatovatelnou hodnotu vyjádřenou v jednotkách spojených s mikrosvětlem (uvádíme hodnotu s přesností na čtyři platné cifry):

$$\hbar c = 197,3 \text{ MeV} \cdot \text{fm} = 197,3 \text{ eV} \cdot \text{nm} \doteq 200 \text{ eV} \cdot \text{nm}.$$

Energie fotonů je dána jejich frekvencí f nebo vlnovou délkou λ a dá se vyjádřit právě pomocí Planckovy konstanty:

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda} = \frac{2\pi\hbar c}{\lambda}. \quad (6)$$

Naopak částice, jako jsou elektrony a protony, mají také vlnový charakter a svoji charakteristickou tzv. de Broglieho vlnovou délku λ :

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{2\pi\hbar c}{pc} \Rightarrow pc = \frac{2\pi\hbar c}{\lambda}. \quad (7)$$

Ze vztahu je vidět, že de Broglieho vlnová délka λ je nepřímo úměrná hybnosti p .

Pokud využijeme relativistický vztah mezi celkovou energií E , hybností p a klidovou energií E_0 v případě fotonu a fakt, že klidová energie je v jeho případě nulová, dostaneme:

$$E^2 = E_0^2 + p^2c^2 = 0 + p^2c^2 \Rightarrow E = pc. \quad (8)$$

Dosadíme-li za energii fotonu ze vztahu mezi jeho energií a vlnovou délkou (6), pak dostaneme i pro foton stejný vztah mezi jeho vlnovou délkou a hybností jako v případě částic s nenulovou klidovou hmotností:

$$pc = \frac{2\pi\hbar c}{\lambda}.$$

Vlnová délka také ukazuje, jaká je nejistota v určení polohy dané částice. Pokud takovou částici využíváme pro určení rozměru či polohy jiného objektu, nemůže být nejistota určení těchto veličin menší než její vlnová délka.

Ukázkový příklad 1. Vypočítejte rychlosti (vyjádřete je jako $\beta = v/c$), hybnosti, poměry mezi relativistickou a klidovou hmotností a de Broglieho vlnové délky protonů urychlených na urychlovačích v laboratoři CERN, nejdříve na protonovém synchrotronu PS ($E_k = 28$ GeV), potom na LHC ($E_k = 7$ TeV).

Řešení. Kinetické energie jsou dokonce větší než klidová energie protonu, která je okolo 1 GeV (přesněji 938,272 081 MeV). Je tak třeba počítat relativisticky. Relativistický vztah mezi celkovou energií E a klidovou energií E_0 je:

$$E = E_0 + E_k = \frac{E_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}. \quad (9)$$

Umocníme:

$$(E_0 + E_k)^2 = \frac{E_0^2}{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2} \Rightarrow 1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2 = \frac{E_0^2}{(E_0 + E_k)^2}.$$

Vyjádříme rychlost protonu:

$$\frac{v}{c} = \sqrt{1 - \frac{E_0^2}{(E_0 + E_k)^2}}. \quad (10)$$

Vyjádříme číselně.

Pro PS:

$$\beta = \frac{v}{c} = \sqrt{1 - \frac{(0,938 \text{ GeV})^2}{(0,938 \text{ GeV} + 28 \text{ GeV})^2}} \doteq 0,999 475,$$

FYZIKA

pro LHC:

$$\beta = \frac{v}{c} = \sqrt{1 - \frac{(0,938 \text{ GeV})^2}{(0,938 \text{ GeV} + 7000 \text{ GeV})^2}} \doteq 0,999999910.$$

Relativistickou hmotnost m lze získat pomocí Einsteinova vztahu z celkové energie částice:

$$E = mc^2 \Rightarrow m = \frac{E}{c^2} = \frac{E_0 + E_k}{c^2}.$$

Poměr mezi relativistickou a klidovou hmotností je:

$$\frac{m}{m_0} = \frac{\frac{E_0 + E_k}{c^2}}{\frac{E_0}{c^2}} = \frac{E_0 + E_k}{E_0}.$$

Číselně:

pro PS:

$$\frac{m}{m_0} = \frac{0,938 \text{ GeV} + 28 \text{ GeV}}{0,938 \text{ GeV}} \doteq 30,9,$$

pro LHC:

$$\frac{m}{m_0} = \frac{0,938 \text{ GeV} + 7000 \text{ GeV}}{0,938 \text{ GeV}} \doteq 7464.$$

Vztah mezi celkovou energií E , hybností p a klidovou energií E_0 je (využijeme vztahy (1) a (4)):

$$E^2 = (E_0 + E_k)^2 = E_0^2 + p^2 c^2 \Rightarrow p^2 c^2 = 2E_k E_0 + E_k^2.$$

Součin hybnosti a rychlosti světla je:

$$pc = \sqrt{2E_k E_0 + E_k^2}. \quad (11)$$

Dosadíme číselně.

Pro PS:

$$pc = \sqrt{2 \cdot 28 \text{ GeV} \cdot 0,938 \text{ GeV} + (28 \text{ GeV})^2} \doteq 28,9 \text{ GeV},$$

pro LHC:

$$pc = \sqrt{2 \cdot 7000 \text{ GeV} \cdot 0,938 \text{ GeV} + (7000 \text{ GeV})^2} \doteq 7001 \text{ GeV}.$$

Vyjádříme de Broglieho vlnovou délku λ (využijeme vztahy (7) a (11)):

$$\lambda = \frac{2\pi\hbar c}{pc} = \frac{2\pi\hbar c}{\sqrt{2E_k E_0 + E_k^2}}. \quad (12)$$

Dosadíme číselně.

Pro PS:

$$\lambda = \frac{2 \cdot \pi \cdot 197,3 \text{ MeV} \cdot \text{fm}}{28,9 \text{ GeV}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 197,3 \text{ MeV} \cdot \text{fm}}{28\,900 \text{ MeV}} \doteq 0,043 \text{ fm},$$

pro LHC:

$$\lambda = \frac{2 \cdot \pi \cdot 197,3 \text{ MeV} \cdot \text{fm}}{7\,000 \text{ GeV}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 197,3 \text{ MeV} \cdot \text{fm}}{7 \cdot 10^6 \text{ MeV}} \doteq 0,18 \cdot 10^{-3} \text{ fm}.$$

Rychlosti protonů, které opustí urychlovače PS a LHC, jsou $0,999\,475c$ a $0,999\,999\,991\,0c$. Je vidět, že už na protonovém synchrotronu PS jsou protony urychleny na rychlost velmi blízkou rychlosti světla. U LHC se rychlost protonů liší od rychlosti světla zanedbatelně. V tomto případě se jedná o tzv. ultrarelativistické přiblížení, kdy klidová energie je zanedbatelná oproti kinetické. Vztah mezi hybností a energií se tak blíží vztahu pro foton, tedy vztahu (8). Hybnosti protonů jsou u PS a LHC $28,9 \text{ GeV}/c$ a $7\,000 \text{ GeV}/c$. Poměry mezi relativistickou a klidovou hmotností jsou u urychlovače PS $30,9$ a u LHC pak téměř $7\,464$. To znamená, že objekt urychlený pomocí PS má hmotnost téměř 31 krát větší než v klidu a u LHC je to téměř $7\,500$ krát. De Broglieho vlnová délka protonu na PS je $0,043 \text{ fm}$ a na LHC dokonce $0,18 \cdot 10^{-3} \text{ fm}$. Znamená to, že tak velké detaily ve struktuře atomového jádra či protonu můžeme zkoumat.¹⁾ Urychlovač LHC tak může zkoumat detaily, které jsou o čtyři řády menší, než je rozměr protonu. I proto, aby se zkoumaly stále jemnější rozměrové podrobnosti, se budují stále větší urychlovače.

Druhá ukázka: Nestabilita jader, radioaktivita a rozpadový zákon

Ve druhé ukázce se budeme věnovat rozpadům radioaktivních jader. Jádra mohou být stabilní, ale daleko více jich je nestabilních. Kvan-

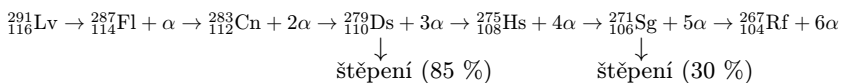
¹⁾Je třeba připomenout, že rozměr protonu je zhruba 1 fm . Při srážkách protonů s touto energií se již srážejí jednotlivé částice, které proton tvoří a které se označují jako partony. Proton má velice složitou strukturu vytvářenou velmi intenzivním kvantovým polem silné interakce. Partony tak lze spojit s kvarky a gluony (částice zprostředkující silnou interakci). Ty mají z našeho současného pohledu rozměry bodové, v každém případě o mnoho řádů menší, než je rozměr protonu.

toová fyzika je nutná i pro popis průběhu přeměny radioaktivních jader. U jednotlivého konkrétního nestabilního jádra nemůžeme říci, kdy se rozpadne. Známe jen pravděpodobnost, že se dané jádro rozpadne za časovou jednotku. Tato veličina, která je konstantní a nezávisí na předchozí době existence nestabilního jádra, se označuje jako *rozpadová konstanta* λ . Jednotkou této veličiny je $[\lambda] = \text{s}^{-1}$. Převrácená hodnota rozpadové konstanty je tzv. *střední doba života* $\tau = 1/\lambda$.

Rozpadovému zákonu je věnován již zmíněný článek [2]. Zde si popíšeme řešení jiného typu úlohy, která analyzuje sekvenci rozpadů alfa končící samovolným štěpením. Právě supertěžké prvky se rozpadají takovým způsobem. Jde o příklad, který je v textu zařazen mezi neřešené.

Ukázkový příklad 2. Jádro livermoria ^{291}Lv se může rozpadat velmi dlouhou kaskádou šesti rozpadů alfa až na jádro rutherfordia ^{267}Rf , které se rozpadá pouze samovolným štěpením. V řadě rozpadů jsou však dvě místa, kde se jádro může rozpadnout buď štěpením, nebo rozpadem alfa. Jde o darmstadtium ^{279}Ds (85 % štěpení) a seaborgium ^{271}Sg (30 % štěpení). Jaká je pravděpodobnost, že řada rozpadů skončí až u rutherfordia? Jaká je pravděpodobnost, že při produkci 40 jader ^{291}Lv budeme pozorovat 8 případů rozpadu alfa ^{279}Ds a zároveň 5 případů rozpadu alfa ^{271}Sg ?

Řešení. Při rozpadu alfa se zmenšuje počet protonů o dva a celkový počet nukleonů o čtyři. Pomocí Mendělejevovy tabulky tak lze sestavit danou rozpadovou řadu:



Jednotlivé rozpady jsou nezávislé děje, takže celková pravděpodobnost po sobě jdoucích rozpadů je dána součinem pravděpodobností postupně po sobě jdoucích rozpadů. Pokud dochází v daném kroku pouze k rozpadu alfa, je jeho pravděpodobnost 100 %. Pokud může dojít jak k rozpadu alfa, tak ke štěpení, je jejich pravděpodobnost p_α a $1 - p_\alpha$. Pravděpodobnost rozpadu alfa zároveň v případě darmstadtia i seaborgia je $p = p_\alpha(\text{Ds}) \cdot p_\alpha(\text{Sg})$. Číselně:

$$\begin{aligned}
 p_\alpha(\text{Ds}) &= 1 - 0,85 = 0,15, & p_\alpha(\text{Sg}) &= 1 - 0,30 = 0,70, \\
 p &= 0,15 \cdot 0,70 = 0,105 = 10,5 \%.
 \end{aligned}$$

Pravděpodobnost, že se rozpadová řada dostane až k rutherfordiu, je 10,5 %.

Dále máme zjistit, jaká je pravděpodobnost, že z pozorovaných 40 případů rozpadu livermoriuma má 8 případů vést i k rozpadu alfa darmstadtia a 5 i k rozpadu alfa seaborgia. Přeměnu 40 jader darmstadtia můžeme chápat jako 40 náhodných nezávislých pokusů se dvěma možnými výsledky. Příznivý výsledek má nastat právě 8krát. Jde o kombinace (nezáleží na pořadí). Počet kombinací je dán vztahem:

$$C_8(40) = \binom{40}{8} = \frac{40!}{8! \cdot 32!} = 76\,904\,685,$$

$$p(\text{Ds}) = C_8(40) \cdot p_\alpha^8 \cdot (1 - p_\alpha)^{32}.$$

Pro výpočet pravděpodobnosti p můžeme se stejným výsledkem použít Bernoulliho schéma. Číselně ($p_\alpha = 0,15$, $1 - p_\alpha = 0,85$):

$$p(\text{Ds}) = \binom{40}{8} \cdot p_\alpha^8 \cdot (1 - p_\alpha)^{32} =$$

$$= 76\,904\,685 \cdot 0,15^8 \cdot 0,85^{32} \doteq 0,108\,66 \doteq 10,9 \, \%.$$

V našem případě vznikne pouze 8 jader seaborgia a z nich požadujeme 5 případů rozpadu alfa a 3 štěpení. V tomto případě je počet kombinací:

$$C_5(8) = \binom{8}{5} = \frac{8!}{5! \cdot 3!} = 56,$$

$$p(\text{Sg}) = C_5(8) \cdot p_\alpha^5 \cdot (1 - p_\alpha)^3.$$

Číselně ($p_\alpha = 0,70$, $1 - p_\alpha = 0,30$):

$$p(\text{Sg}) = \binom{8}{5} \cdot p_\alpha^5 \cdot (1 - p_\alpha)^3 = 56 \cdot 0,70^5 \cdot 0,30^3 \doteq 0,254\,1 \doteq 25,4 \, \%.$$

Jde o dva nezávislé děje a pravděpodobnost jejich současného uskutečnění dostaneme jako součin jejich pravděpodobností:

$$p = p(\text{Ds}) \cdot p(\text{Sg}) = 0,108\,66 \cdot 0,254\,1 \doteq 0,027\,6 \doteq 0,028 = 2,8 \, \%.$$

Pravděpodobnost, že jádro livermoriuma ^{291}Lv kaskádou rozpadů alfa dospěje až k jádru rutherfordia ^{267}Rf , je 10,5 %. Pravděpodobnost, že při produkci 40 jader ^{291}Lv budeme pozorovat 8 případů rozpadu alfa ^{279}Ds a zároveň 5 případů rozpadu alfa ^{271}Sg , je 2,8 %.

Literatura

- [1] Wagner, V., Vícha, V., Janout, Z.: *Hranice Mendělejevovy tabulky*. Studijní text pro řešitele FO a ostatní zájemce o fyziku, dostupné z: <http://fyzikalniolympiada.cz/texty/supertezke.pdf>
- [2] Wagner, V.: Detekce přítomnosti radionuklidů v atmosféře. *Rozhledy matematicko-fyzikální*, roč. 92 (2017), č. 2, s. 10–22.
- [3] Šedivý, P.: *Kapitoly ze speciální teorie relativity*. Studijní text pro řešitele FO a ostatní zájemce o fyziku, dostupné z: <http://fyzikalniolympiada.cz/texty/str2.pdf>
- [4] *Resolutions of the 26th CGPM*, 2018, dostupné z: <https://www.bipm.org/utils/common/pdf/CGPM-2018/26th-CGPM-Resolutions.pdf>

* * * * *

POZOROVAL HVĚZDY A SPADL DO JÁMY

Za prvního evropského vědce, filozofa, matematika a fyzika je považován Thalés z Milétu. Ať už byly jeho vědecké výsledky a zásluhy jakékoliv, k zajištění nesmrtelnosti mu stačí jediná, mimochodem překrásná, geometrická věta o obvodovém úhlu nad průměrem kružnice spjatá s jeho jménem. Dokud bude existovat naše civilizace, budou žáci na celém světě v hodinách geometrie jeho jméno vyslovovat.

O Thalétovi se také traduje první evropská anekdota. Zaznamenal ji Platón v dialogu Theaitétos. Sókrates v něm říká: „Když Thalés, zkoumaje hvězdy a hledě vzhůru, spadl do studně, tu se mu jedna thrácká služka, chytrá a vtipná, prý posmívala, že se snaží znát věci na nebi, ale co je před ním a u jeho nohou, že mu zůstává neznámo.“ Tuto historku, kterou Platón možná skutečně slyšel od Sókrata, můžeme považovat za předobraz anekdot o roztržitých profesorech, kteří zapomínají deštníky, padají ze schodů, vaří hodinky na řetízku a sledují přítom vajíčko, zapomínají, kde zaparkovali auto a zda vůbec přijeli autem.

Ale už Platón si uvědomoval, že anekdota má hlubší podtext. Vědec, který je zaujat zkoumáním přírody a je na stopě jejím zákonům, prožívá takové vzrušení a zaujetí, že nedbá na běžné životní konvence a starosti a zapomíná na své okolí. V historii vědy máme mnoho takových příkladů. A můžeme říci, že je štěstím pro lidstvo, že vždy byli a budou myslitelé, kteří budou obracet svůj zrak vzhůru k nebi a nebudou se ohlížet na jámy a příkopy, posměšky, překážky a nebezpečí nebo malý plat.

I. Štoll: Historky o slavných fyzicích a matematicích