

WEBOVÉ STRÁNKY A ZDROJE DOSTUPNÉ NA INTERNETU

Mnoho internetových zdrojů je komentováno přímo v textu této publikace, zde se proto omezíme na obecněji zaměřené webové stránky a stručný přehled již zmíněných odkazů.

Encyklopedie energie: www.energyweb.cz

Tento web obsahuje materiály týkající se všech druhů energie, výklad jednotlivých pojmů a jevů, slovníček cizích slov, návody na pokusy, medailonky důležitých osobností a mnoho dalších materiálů. Jeho obsah vyšel i na CD.

FyzWeb – fyzikální stránky pro každého: www.fyzweb.cuni.cz

Server zaměřující se na podporu fyzikálního vzdělávání na všech úrovních.

Blažková I.: Jaderné elektrárny, jejich perspektivy a nové koncepce

www.physics.muni.cz/~blazkova/dp/index.htm

Tyto rozsáhlé webové stránky vznikly v rámci diplomové práce autorky. Naleznete zde mnoho detailních a přístupně zpracovaných informací o jaderných elektrárnách, jejich principech i širším kontextu.

Ullman V.: Jaderná fyzika a fyzika ionizujícího záření

www.astronuklfyzika.cz/Fyzika-NuklMed.htm

Jedná se o řadu vzájemně propojených odborných článků na vysokoškolské úrovni z oblastí jaderné a radiační fyziky včetně mnoha aplikací. Díky detailnímu zpracování i širokému záběru jsou vhodné pro získání hlubších znalostí této problematiky i pro učitele a nadané středoškolské studenty.

Vědecké databáze údajů o jádrech atomů

www.nds.iaea.org – IAEA (International Atomic Energy Agency) Nuclear Data Centre

www.nndc.bnl.gov/nudat2/index.jsp – interaktivní tabulka nuklidů a jejich vlastností

Organizace zabývající se využitím jaderné energie a radiační ochranou

www.suro.cz – Státní ústav radiační ochrany

www.sujb.cz – Státní úřad pro jadernou bezpečnost

www.unscear.org/unscear – Vědecký výbor OSN pro účinky atomového záření (UNSCEAR)

www.world-nuclear.org – World Nuclear Association

www.iaea.org – Mezinárodní agentura pro atomovou energii – MAAE (International Atomic Energy Agency – IAEA)

Úvod	4
Přemýšlíme o jaderné fyzice – aktivity pro žáky a studenty	5
Fúze nebo štěpení?	6
Kolik energie dává jaderná elektrárna?	22
Radioaktivní kalendář	30
Moje roční dávka	41
Jak (se) chránit před zářením?	46
Atomové jádro v dějinách	53
Hrdinové jaderné fyziky	63
Paradoxní jaderné otázky	72
Popis kapitol publikací Učíme jadernou fyziku a Jaderné hrátky	75
Přehled veličin a jednotek pro ionizující záření	82
Fyzikální konstanty a další užitečné vztahy	86
Zdroje informací o jaderné fyzice a energii	87
Přehled vzdělávacích materiálů společnosti ČEZ	87
Knihy zabývající se jadernou fyzikou	88
Webové stránky a zdroje dostupné na internetu	90

ÚVOD

Vážení kolegové,

publikace **Učíme jadernou fyziku**, kterou právě držíte v ruce, volně navazuje na brožuru **Jaderné hrátky**, která vyšla na podzim roku 2006. Na rozdíl od ní se neobrací přímo na žáky a studenty, ale je určena učitelům, rodičům nebo vedoucím přírodovědných kroužků. Obě brožury jsou součástí vzdělávacího programu **Svět energie** akciové společnosti ČEZ.

Na stránkách této knižičky najdete další **nápady na činnosti**, které můžete využít při výuce tématu jaderná fyzika a energie na základní i střední škole. Tentokrát se nejedná o aktivity „hravé“, ale spíše o aktivity, ve kterých se uplatní jednoduché výpočty, vyhledávání informací, společné diskuze či jiná práce s konkrétními údaji. Dále zde naleznete několik nápadů na **neobvyklé, „paradoxní“, otázky**, které můžete použít např. k motivaci v úvodu hodiny, zadat hledání odpovědi jako domácí úkol či je využít jako úvodní problém pro delší projekt.

Na několika stranách v závěru se ještě vrátím i k obsahu brožury **Jaderné hrátky**. V přehledu aktivit z obou publikací uvádím jejich cíle a návaznost na RVP. Naleznete zde i návrh, jak zkombinovat nápady z obou knížek do výuky.

V úplném závěru brožury uvádím stručný **přehled veličin a jednotek** používaných v souvislosti s ionizujícím zářením a seznam vzdělávacích materiálů společnosti ČEZ, několika dalších knih a webových stránek, které se mohou stát cennými **zdroji informací** pro vás i vaše studenty.

Jak můžete obsah této brožury využít?

Rozhodně není nutné, abyste zde uvedené nápady převzali všechny a se všemi zde uvedenými detaily. Je na vás, které si vyberete a jak je do své výuky začleníte, v závislosti na tom, kolik času chcete věnovat výuce daných partií, jak je chcete zdůraznit a na dalších podmínkách.

Možná již máte vlastní způsob, jak toto téma vyučovat, a nové nápady nehledáte. Potom věřím, že oceníte konkrétní a zajímavé informace, kterými jsem se snažila jednotlivé kapitoly v této brožurě co nejvíce doprovázet.

Na tomto místě bych chtěla poděkovat všem lidem, kteří svými poznámkami a návrhy přispěli k současné podobě této publikace. Moje poděkování patří zejména prof. Ing. Tomáši Čechákovi, CSc. za pomoc při tvorbě kapitoly týkající se dozimetrických veličin a upozornění na další nepřesnosti v textu.

Přeji vám hodně úspěchů i radosti při výuce jaderné fyziky.
RNDr. Zdeňka Broklová

ale o velmi čtivě a s vtipem podané příběhy. Kniha je určena nepoučenému, leč zvědavému čtenáři.

Augusta P. a kol. (2001): Velká kniha o energii. L.A. Consulting Agency, Praha
Rozsáhlá encyklopedie věnovaná elektroenergetice upoutá především zvědavé žáky druhého stupně ZŠ a jejich učitele. Srozumitelný text je doplněn množstvím fotografií, obrázků, grafů a tabulek. Celá encyklopedie je přehledně členěna do sedmi kapitol. Sešitová verze této encyklopedie s aktualizovaným obsahem je součástí vzdělávacích materiálů společnosti ČEZ.

Klener V. (editor, 2000): Principy a praxe radiační ochrany. SÚJB a Azin CZ, Praha
Velmi obsáhlá monografie, která se podrobně a zároveň přehledně věnuje celé problematice radiační ochrany.

Halliday D., Resnick R., Walker J. (2000): Fyzika – část 5, Moderní fyzika. Překlad: B. Lencová, J. Obdržálek a P. Dub, Vutium, Brno
Kvalitní moderně zpracovaná pětidílná učebnice fyziky stojící svojí úrovní někde mezi středoškolskou a vysokoškolskou látkou. Text učebnice je dobře srozumitelný a umožňuje pochopení jevů a zákonitostí. Výklad motivuje ke studiu každé partie, je uvedena i řada praktických aplikací odrážejících současný stav poznání a technologií. Její pátý díl se věnuje mimo jiné i jaderné fyzice.

Buhrke T. (1999): Převratné objevy fyziky – od Galileiho k Lise Meitnerové. Překlad: L. Eckertová, Academia, Praha
Čtivě napsané životopisy 12 významných fyziků, kteří hráli významnou roli při rozvoji fyziky a devět z nich i při rozvoji jaderné fyziky. Kniha popisuje nejenom jejich úsilí věnované fyzikální práci, ale zasazuje jejich život i do kontextu dané doby.

Koláč M., Matas J. (1983): Svět čísel, atomů a molekul. Albatros, Praha
Kniha spíše encyklopedického charakteru shrnuje nejzajímavější poznatky z matematiky, fyziky a chemie (dle výběru autorů), každé dílčí téma je zpracováno v rámci jedné dvojstrany a text doplňují názorné ilustrace. Informace jsou podány na úrovni přístupné i žákům základní školy.

Sedláček K., Tůma J. (1986): Atom skrývá naději. Naše vojsko, Praha
O něco starší kniha, která se na velmi populární úrovni věnuje jaderné energetice, její historii, současnosti i výhledům do budoucnosti.

Pišút J., Zajac R. (1983): O atómech a kvantování. Alfa, Bratislava
Kniha obsahuje historický přehled vývoje názorů na atomy, světlo a záření a zároveň uvádí základní poznatky kvantové mechaniky bez užití náročného matematického aparátu.

Jaderná energetika v číslech (2005)

Praktický materiál s důležitými statistickými údaji (tabulkami, grafy) o jaderných elektrárnách ve světě.

Pokročilé jaderné technologie a Skupina ČEZ (2007)

Radioaktivní odpady a Skupina ČEZ (2007)

elektronicky: www.cez.cz/cs/vzdelavani/pro-studenty/podklady-ke-studiu/tiskoviny/1.html.

DVD – Jaderná elektrárna Temelín při pravidelné odstávce na výměnu paliva (2004)

4 dokumentární filmy v celkové délce 20 minut zachycují nejdůležitější činnosti, které probíhají v jaderné elektrárně během pravidelné odstávky reaktoru na výměnu paliva

DVD – Vybrané filmy z videotéky ČEZ (2002)

16 krátkých filmů o výrobě elektrické energie, jaderných elektrárnách a dalších souvisejících tématech

Další informační letáky o konkrétních tématech, např.: Sklad použitého jaderného paliva pro jadernou elektrárnu Temelín, Transmutace použitého jaderného paliva, Přeprava čerstvého paliva pro jaderné elektrárny, Mezinárodní stupnice pro hodnocení jaderných událostí a další. I když mají obvykle velmi malý rozsah, poskytují zajímavé informace k danému konkrétnímu tématu.

KNIHY ZABÝVAJÍCÍ SE JADERNOU FYZIKOU

McCracken G., Stott P. (2006): Fúze. Energie vesmíru. Překlad: M. Řípa a J. Mlynář, edice Kolumbus, Mladá fronta, Praha

Kniha zabývající se jadernou fúzí, čili procesem probíhající na Slunci, snahou vědců využít tento proces pro získávání energie, ale i problémy, se kterými se na této cestě setkávají. Popisuje stavbu tokamaků, zařízení ke zkoumání jaderné fúze, a zabývá se jak historií výzkumu a experimentálního ověřování fúze, tak současný stav našeho poznání.

Mackintosh R. a kol. (2003): Jádru, cesta do srdce hmoty. Překlad: D. a J. Adamovi, Academia, Praha

Publikace prezentuje na úrovni přístupné široké veřejnosti podstatné stránky jaderné fyziky: její historii a úlohu při vzniku moderní kvantové fyziky, hlavní otázky, které si klade, nejdůležitější výsledky, přesah do jiných vědních disciplín i aplikace v průmyslu, energetice a medicíně. Text doplňuje mnoho atraktivních fotografií a ilustrací.

Bodanis D. (2002): $E=mc^2$. Životopis nejslavnější rovnice na světě. Překlad: J. Placht, Dokořán, Praha

Na prvním místě stojí v této knize pochopitelně příběh bernského patentového úředníka Alberta Einsteina následován epizodami o dalších fyzících, kteří působili před Einsteinem i po něm. Nejedná ale o suché záznamy života v laboratořích,

PŘEMÝŠLÍME O JADERNÉ FYZICE – AKTIVITY PRO ŽÁKY A STUDENTY

V této části brožury naleznete několik nápadů pro výuku, které by měly studentům pomoci s pochopením klíčových pojmů z jaderné fyziky. Jejich charakter sice není experimentální, jako tomu bylo v Jaderných hrátkách, ale stejně jako tam je i zde velký důraz kladen na aktivní přístup žáků a studentů a na jejich vlastní nápady. **Vyučující by měl oceňovat veškeré nápady studentů**, i když jsou nereálné nebo nepřesné, a studenty postupně dovést k poznání, proč je daná myšlenka nerealizovatelná nebo jak je nutné ji upravit. **Je velmi důležité opravdu vycházet z nápadů studentů a hlavně z jejich vlastních formulací**, protože tím zvýšíte jejich motivaci zabývat se problémem a navíc se získané poznatky stávají pro ně srozumitelnějšími. Popis jednotlivých aktivit v této brožurě má podobnou strukturu jako v Jaderných hrátkách. Nejprve je nastíněn nějaký problém nebo otázka či uveden krátký výklad. Tyto informace by měly posloužit učitelům k motivaci žáků do další práce.

Po úvodní části následuje zadání konkrétních úkolů a popis činností, které mohou studenti dělat. Protože tato část obsahuje i mnoho metodických a organizačních poznámek, obracím se většinou přímo na vás, učitele. Na několika místech je uveden konkrétní příklad, jak může být daný úkol zadán studentům.

Základní linie aktivity je dále doplněna dalšími rozšiřujícími otázkami a množstvím zajímavých informací, které se vztahují k tématu, a které učitel může zařadit dle své úvahy. Kapitola je obvykle ukončena shrnutím či závěrečnými otázkami, kterými lze aktivitu se studenty uzavřít.

Pokud je to pro aktivitu vhodné, je doplněna pracovními listy připravenými k nako-pírování, konkrétními údaji či grafy, které studenti mohou při práci potřebovat. Také je uvedeno několik příkladů studentských nápadů a jejich zpracování, ale jak bylo napsáno výše, pro studenty je mnohem hodnotnější, budou-li pracovat s vlastními nápady, i když to může být pro vás jako vyučujícího náročnější.

Většinu zde uvedených aktivit lze použít na středních školách. I když informace, se kterými studenti pracují, místy mírně překračují středoškolskou látku, jejich zpracování a pochopení nevyžaduje žádné speciální předchozí dovednosti a je tedy v silách studentů středních škol. Množství podrobností a rozšiřujících poznámek, které do konkrétní hodiny vyučující zařadí, jednoduše pozmění obtížnost i časovou náročnost jednotlivých činností (v textu na takové možnosti upozorňuji). Věřím, že díky tomu zde inspiraci najdou i učitelé ze základních škol, a naopak při použití rozšiřujících otázek a materiálů mohou některé činnosti posloužit i při práci se studenty s hlubším zájmem o fyziku nebo jako vstup do studia jaderné fyziky v úvodních vysokoškolských kurzech. Obtížnost si na základě metodických poznámek nejlépe uzpůsobí každý učitel sám, protože zná schopnosti svých žáků a také rozhoduje o množství času, který chce danému tématu věnovat.

FÚZE NEBO ŠTĚPENÍ?

Atomové jádro se skládá z kladně nabitých **protonů** a neutrálních **neutronů** (oběma částicím říkáme souhrnně **nukleony**), které drží velmi pevně pohromadě díky silným jaderným silám. Pokud bychom velmi přesně vážili atomová jádra, zjistili bychom, že jsou o malý kousek lehčí, než odpovídá součtu hmotností částic, ze kterých jsou složena. Tento **hmotnostní úbytek** (schodek) odpovídá vazbové energii*¹ a charakterizuje, jak moc jádro drží pohromadě.

Pokud chceme nějaké jádro „rozebrat“ na jednotlivé nukleony, potřebujeme k tomu dodat energii, která se rovná vazbové energii. Pokud naopak necháme osamocené nukleony spojit a vytvořit jádro, získáme (uvolní se) energie odpovídající vazbové energii.

Jak je tedy možné, že štěpením jader atomu získáváme energii? Nemělo by to být tak, že na rozbití atomového jádra bychom měli energii vždy spíše dodávat než ji tak získávat?

POPIS ČINNOSTI

Všichni studenti určitě vědí, že v jaderných elektrárnách získáváme energii štěpením jader uranu. Z výkladu vazbové energie uvedeného v úvodu této aktivity se ale na první pohled může zdát, že na štěpení atomů potřebujeme dodávat energii a naopak, když se atomy slučují, tak energii získáme. Tento „nesoulad“ můžeme využít ke zvýšení motivace k podrobnějšímu seznámení se s vazbovou energií a její závislostí na hmotnostech atomu.

Tato kapitola je rozdělena na několik částí. V první části si studenti v nějakém vhodném tabulkovém procesoru (např. MS Excel) zpracují tabulku s potřebnými charakteristikami jader jednotlivých atomů. Soubor **jadra.xls** potřebný k této práci je k dispozici na adrese **fyzweb.cuni.cz/broklava**. Nachází se zde i hotová tabulka (v souboru **jadra_reseni.xls**), kterou lze použít ke kontrole práce studentů, ale také může posloužit v případě, že se rozhodnete (ať už z časových nebo organizačních důvodů) tuto část aktivity vynechat. Potom je nutné, aby studenti v dalších částech vycházeli z této hotové tabulky, kterou lze i vytisknout.

V další části se studenti naučí počítat energii získanou v různých jaderných reakcích. Můžete je nechat zjistit energetickou bilanci libovolných jimi vymyšlených reakcí. Naleznete zde i vzorové výpočty nejdůležitějších fúzních i štěpných reakcí. Celá aktivita je ukončena vytvořením grafů vazbové energie a vazbové energie připadající na jeden nukleon a diskuzí nad tím, proč lze energii získat slučováním lehkých jader, ale naopak štěpením jader těžkých.

Poznámka: Na následující stránce se obracím přímo na studenty, aby bylo možné tuto stránku studentům okopírovat jako pracovní list. I když jsou v jeho textu pojmy hmotnostní úbytek a vazbová energie jádra stručně zmíněny, doporučuji je se studenty prodiskutovat, aby jim správně rozuměli.

*¹ Hmotnost na energii můžeme přepočítat pomocí Einsteinova vztahu $E = mc^2$. Jestliže si hmotnostní úbytek označíme Δm , tak vazbová energie se rovná $E_v = \Delta mc^2$.

ZDROJE INFORMACÍ O JADERNÉ FYZICE A ENERGIÍ

V této kapitole najdete seznam dostupných materiálů, knih a dalších zdrojů, ze kterých lze čerpat informace o jaderné fyzice. Tento stručný přehled zcela jistě není úplný a dal by se obohacovat o další materiály. Výběr uvedených materiálů byl dán tím, s čím jsem se setkala a co se mi osvědčilo. Věřím, že i tak může dobře posloužit jako inspirace či vodítko při orientaci v široké nabídce knih a dalších publikací.

PŘEHLED VZDĚLÁVACÍCH MATERIÁLŮ SPOLEČNOSTI ČEZ

Přehled veškerých dostupných vzdělávacích materiálů společnosti ČEZ naleznete na adrese: **www.cez.cz/vzdelavaciprogram**.

Broklová Z. (2006): *Jaderné hrátky*

Brožura obsahující devět aktivit, ve kterých mohou žáci a studenti názorně modelovat důležité děje na úrovni atomu a atomového jádra pomocí běžných pomůcek.

Domácí pokusy z jaderné fyziky (2001, 2004)

Předchůdce Jaderných hrátek, dostupné na **www.cez.cz/presentation/static/DPZJF/index.html**.

Řípa M. a kol. (2005): *Řízená termojaderná syntéza*

Knih, která přístupnou formou, ale dostatečně podrobně shrnuje historii i současnost využití fúzních reakcí pro energetické účely. Elektronickou verzi naleznete na adrese: **www.cez.cz/vzdelavaciprogram** pod odkazem *Vzdělávací tiskoviny*.

Užitečné záření

Tenký sešit obsahující přehled aplikací jaderného záření v různých oborech – archeologii, zemědělství, lékařství, ...

Encyklopedie energetiky – Jaderná energie (2003)

V této části celkem šestidílné obrazové encyklopedie je velmi přístupným a přitažlivým způsobem s mnoha obrázky a fotografiemi zpracována celá oblast jaderné fyziky i energetiky.

Atomy a jaderná energie (2005)

Sada 15 barevných fólií pro zpětný projektor, každá fólie je doplněna stručným výkladem zobrazené látky.

FYZIKÁLNÍ KONSTANTY A DALŠÍ UŽITEČNÉ VZTAHY

Hodnoty jsou převzaty z publikace Matematické, fyzikální a chemické tabulky a vzorce pro střední školy (Prometheus, Praha, 2007). Čísla v závorce za hodnotou uvádějí standardní odchylku posledního dvojčíslí.

atomová hmotnostní konstanta	$m_u = 1,660\,538\,86\,(28) \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 1 \text{ u}$
hmotnost protonu	$m_p = 1,672\,621\,71\,(29) \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 1,007\,276\,466\,88\,(13) \text{ u}$
hmotnost neutronu	$m_n = 1,674\,927\,28\,(29) \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 1,008\,664\,915\,60\,(55) \text{ u}$
hmotnost elektronu	$m_e = 9,109\,382\,6\,(16) \cdot 10^{-31} \text{ kg}$
elementární náboj	$e = 1,602\,176\,53\,(14) \cdot 10^{-19} \text{ C}$
Avogadrova konstanta	$N_A = 6,022\,141\,5\,(10) \cdot 10^{23} \text{ mol}$
rychlost světla	$c = 2,997\,924\,58 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ (přesně)
Planckova konstanta	$h = 6,626\,069\,3\,(11) \cdot 10^{-34} \text{ Js}$
převod mezi jednotkami energie	1 eV = $1,602\,176\,53\,(14) \cdot 10^{-19} \text{ J}$ 1 MeV = $1,602\,176\,53\,(14) \cdot 10^{-13} \text{ J}$

KOLIK HMOTNOSTI SE ZTRATÍ PŘI VYTVOŘENÍ ATOMOVÉHO JÁDRA?

Atomové jádro tvoří protony a neutrony. Při jejich „slučování“ ale dojde k tomu, že část hmotnosti těchto částic se „ztratí“, tedy jádro je lehčí než součet hmotností částic, které ho tvoří. „Chybějící hmotnosti“ říkáme **hmotnostní úbytek** Δm a odpovídá vazbové energii $E_v = \Delta mc^2$, která charakterizuje, jak moc jádro drží pohromadě, tj. kolik energie musíme dodat na jeho úplné rozebrání.

Vaším úkolem teď bude z hmotností známých atomů určit onu „ztracenou“ hmotnost a dopočítat vazbové energie držící jádra pohromadě. Protože atomů je známo mnoho, použijeme na zpracování údajů počítač. V souboru **jadra.xls** je připravena tabulka, jež obsahuje existující atomy, jejich nukleonová (hmotnostní) čísla A , protonová čísla Z a relativní atomové hmotnosti A_r (hmotnost v atomových hmotnostních jednotkách).

Pro všechny atomy spočtete

- jejich hmotnost m v kilogramech
- součet hmotností částic, ze kterých jsou složeny
- hmotnostní schodek Δm a vazbovou energii jádra E_v
- podíl vazbové energie a hmotnostního čísla (= počtu nukleonů)

Při výpočtech budete potřebovat údaje jako hmotnosti jednotlivých částic, velikost atomové hmotnostní konstanty a rychlost světla. Jejich hodnoty jsou uvedeny v souboru, se kterým budete pracovat, nebo si je můžete vyhledat např. v tabulkách. Pracujte s velmi přesnými hodnotami všech potřebných konstant.

Poznámka o jednotkách energie: 1 eV je energie, kterou získá elektron po urychlení elektrickým napětím 1 V, tato energie se rovná součinu náboje elektronu a urychlovacího napětí.
 $E = QU = eU = 1,602\,189\,2 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 1 \text{ V} = 1,602\,189\,2 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

Úkoly

- 1) Vyhledejte v tabulce hmotnostní úbytek a energii, kterou bychom získali sloučením: protonu a neutronu (vznikne deuteron = těžký vodík ${}^2_1\text{H}$), 2 protonů a 1 neutronu (vznikne jádro helia ${}^3_2\text{He}$), protonu a dvou neutronů (vznikne jádro tritia ${}^3_1\text{H}$). Jakou část hmotnosti (kolik procent) představuje v těchto případech hmotnostní úbytek (tj. jaká část hmotnosti se při sloučení „ztratí“)?
- 2) Kolik energie musíme dodat na úplné rozebrání jádra ${}^4_2\text{He}$ a jádra ${}^6_3\text{Li}$?
- 3) Najděte jádro s největší vazbovou energií a jádro s největší vazbovou energií připadající na jeden nukleon.
- 4) Nalezněte nejstabilnější izotop uhlíku a kyslíku. Porovnejte s výskytem jednotlivých izotopů v přírodě (vyhledejte v tabulkách).
- 5) Vyhledejte v tabulce vazbovou energii a vazbovou energii připadající na jeden nukleon jádra uranu ${}^{235}_{92}\text{U}$ (palivo jaderných elektráren). Porovnejte nalezené hodnoty s hodnotami podobně těžkých jader.

Tabulka bude vypadat asi takto (zde je uvedeno několik řádků pro kontrolu)

značka	Z	A	A_r	m [kg]	součet hmotnosti částic v atomu $Zm_p + (A - Z)m_n + Zm_e$ [kg]	hmotnostní úbytek Δm [kg]	vazbová energie $E_\nu = \Delta mc^2$ [J]	vazbová energie [MeV]	vazbová energie připadající na 1 nukleon E_ν/A [MeV]
n	0	1	1,008665	$1,674927 \cdot 10^{-27}$	$1,674927 \cdot 10^{-27}$				
H	1	1	1,007825	$1,673533 \cdot 10^{-27}$	$1,673533 \cdot 10^{-27}$				
H	1	2	2,014102	$3,344494 \cdot 10^{-27}$	$3,348460 \cdot 10^{-27}$	$3,965659 \cdot 10^{-30}$	$3,564157 \cdot 10^{-13}$	2,225	1,112
H	1	3	3,016049	$5,008267 \cdot 10^{-27}$	$5,023387 \cdot 10^{-27}$	$1,512018 \cdot 10^{-29}$	$1,358934 \cdot 10^{-12}$	8,482	2,827
He	2	3	3,016029	$5,008234 \cdot 10^{-27}$	$5,021993 \cdot 10^{-27}$	$1,375869 \cdot 10^{-29}$	$1,236569 \cdot 10^{-12}$	7,718	2,573
H	1	4	4,027806	$6,688329 \cdot 10^{-27}$	$6,698314 \cdot 10^{-27}$	$9,985401 \cdot 10^{-30}$	$8,974431 \cdot 10^{-13}$	5,601	1,400
He	2	4	4,002603	$6,646478 \cdot 10^{-27}$	$6,696920 \cdot 10^{-27}$	$5,044161 \cdot 10^{-29}$	$4,533466 \cdot 10^{-12}$	28,296	7,074
Li	3	4	4,027186	$6,687298 \cdot 10^{-27}$	$6,695525 \cdot 10^{-27}$	$8,227110 \cdot 10^{-30}$	$7,394158 \cdot 10^{-13}$	4,615	1,154

Tkáňové váhové faktory

tkáň, orgán	tkáňový váhový faktor w_T
gonády	0,2
červená kostní dřeň	0,12
tlusté střevo	0,12
plíce	0,12
žaludek	0,12
močový měchýř	0,05
mléčná žláza	0,05
játra	0,05
jícen	0,05
štítná žláza	0,05
kůže	0,01
povrchy kostí	0,01
ostatní	0,05

Úvazek ekvivalentní/efektivní dávky [Sv]

Pro posouzení dlouhodobých účinků radioaktivní látky (tzv. radiotoxicity), která se dostane do organismu, se zavádí tzv. úvazek ekvivalentní, resp. efektivní dávky, což je absorbovaná ekvivalentní resp. efektivní dávka ionizujícího záření, kterou způsobí v daném orgánu nebo tkáni příslušná radioaktivní látka za dobu 50 let (u dětí za 70 let) od příjmu do organismu. Závisí nejen na fyzikálních parametrech radioaktivní látky (poločas rozpadu, druh a energie záření), ale i na chemických vlastnostech kontaminované tkáně (metabolismus, distribuce látky do jednotlivých orgánů, způsob vylučování). Jednotkou je sievert (Sv).

Pro posuzování skupin obyvatelstva se zavádí tzv. kolektivní dávka, resp. kolektivní ekvivalentní/efektivní dávka a kolektivní úvazek příslušné dávky, které představují součet hodnot daných veličin všech jednotlivců v dané skupině.

Poznámka: Ve Spojených státech stále používají pro aktivitu jednotku curie, pro dávku jednotku rad (radiation absorbed dose) a pro dávkový ekvivalent jednotku rem (rentgen equivalent man, tj. biologický ekvivalent rentgenu), kde $100 \text{ rem} = 1 \text{ Sv}$.

Pokud zahrneme do našich úvah i tento fakt, hovoříme o tzv. *efektivní dávce*. Při jejím určení se používají ještě váhové faktory pro jednotlivé části těla (tkáňové váhové faktory w_T). Efektivní dávka je součtem vážených středních hodnot ekvivalentních dávek v různých tkáních lidského těla, tj.

$$E = \sum w_T H_T$$

H_T je ekvivalentní dávka v dané tkáni a w_T je váhový faktor, který vyjadřuje relativní příspěvek dané tkáně k celkové zdravotní újmě způsobené při rovnoměrném ozáření celého těla. Sčítáme přes všechny orgány (tkáně v těle). Součet samotných váhových faktorů se rovná 1.

Výhodou efektivní dávky je, že umožňuje vyjádřit radiační zátěž jediným číslem i při nerovnoměrném ozáření organismu, či ozáření jen určitých orgánů. To umožňuje porovnávat nejrůznější způsoby ozáření organismu. Hodnoty efektivních dávek záření absorbovaného při různých činnostech naleznete u aktivity *Moje roční dávka*.

Poznámka: Uvědomíme-li si, že sievert má rozměr J/kg, vidíme, že ekvivalentní i efektivní dávka jsou vztaženy na 1 kg tkáně.

Tabulky radiačních a tkáňových váhových faktorů převzaty z přílohy č. 5 vyhlášky SÚJB o radiační ochraně (307/02 Sb., www.sujb.cz/docs/v307_02.pdf)

Radiační váhové faktory

typ záření (případně jeho energie)	radiační váhový faktor w_R
fotony	1
elektrony, miony	1
neutrony (méně než 10 keV)	5
neutrony (10 keV–100 keV)	10
neutrony (100 keV–2 MeV)	20
neutrony (2 MeV–20 MeV)	10
neutrony (více než 20 MeV)	5
protony (více než 2 MeV, mimo odražené)	5
částice alfa, těžká jádra, štěpné fragmenty	20

METODICKÉ A DALŠÍ POZNÁMKY

Je velmi pravděpodobné, že studentům zabere nějakou dobu, než se zorientují v potřebných vzorcích a hlavně v převodních vztazích mezi jednotkami energie. Je možné, že budou postupovat i metodou pokus-omyl, až se jim podaří dosáhnout výsledku shodného s uvedeným vzorem. Právě ale nutnost samostatně se zorientovat v číslech jim může pomoci lépe pochopit dané vztahy. Po vytvoření tabulky je nechte vyhledat a vysvětlit i další hodnoty, kromě několika uvedených na pracovním listu.

Poznámka: Ve vypočtené vazbové energii je zahrnuta i vazbová energie mezi elektrony a jádrem. Vzhledem k tomu, že její velikost je na úrovni maximálně jednotek keV, tj. je minimálně o čtyři řády menší než vazbová energie jádra, nebudeme tuto korekci uvažovat.

Se studenty můžete také diskutovat o tom, že existence hmotnostního úbytku neznamená, že by byl porušen zákon zachování hmotnosti, ale že je třeba uvažovat ekvivalenci mezi hmotností a energií a místo zákona zachování hmotnosti, který dobře platí v klasické fyzice, používat obecnější zákon zachování energie.

Úlohy 3 a 4 uvedené na pracovním listě by měly posloužit k tomu, aby si studenti uvědomili, že celková vazbová energie jádra není nejvhodnějším parametrem pro porovnávání stability („pevnosti“) jader, ale že vhodnější je dívat se na průměrnou vazbovou energii, která připadá na jeden nukleon.

Další doplňující otázky a úkoly*²

- Musíme veškeré použité konstanty a další hodnoty znát/měřit tak přesně (na 8 platných míst) nebo by stačilo používat zaokrouhlené hodnoty? Proč?
- Proč má uhlík $^{12}_6\text{C}$ relativní atomovou hmotnost přesně 12? Je to náhoda, nebo to má nějakou příčinu? Ostatní nuklidy sice mají relativní hmotnosti také hodně blízké celým číslům, ale žádná z nich není přesně celé číslo.
- Je nějaký rozdíl ve složení mezi lehkými a těžkými atomy, pokud porovnáme zastoupení protonů a neutronů?
- Vyberte z tabulky nejstabilnější nuklid s daným hmotnostním číslem lehkých prvků (přibližně $A < 30$). Pozorujete nějakou zvláštnost v počtu protonů a neutronů těchto nuklidů?

UVOLNĚNÁ ENERGIE PRO SLOŽITĚJŠÍ PROCESY

Slučování více nukleonů neprobíhá tak, jak je uvedeno v předcházejícím textu. Je velmi nepravděpodobné, že by se v jednom místě najednou potkaly tři nukleony. Reálně se při syntéze tritia nejprve sloučí proton s neutronem a teprve potom vzniklý deutron zachytí proton nebo neutron. Diskutujte se studenty, jak určit energii, která se uvolní spojením deuteronu a protonu. Možná bude třeba studenty znovu upozornit, že vazbové energie spočítané v tabulce jsou energie, které se uvolní, pokud jádro skládáme z jednotlivých osamocených nukleonů.

Možné přístupy

- Umíme spočítat celkovou energii uvolněnou při sloučení tří nukleonů na jádro tritia. Představme si, že slučování probíhá postupně: nejprve se spojí proton a neu-

*² Řešení a další komentáře k úkolům z pracovního listu i k těmto otázkám naleznete v závěru této kapitoly na straně 16.

tron a uvolní se část energie, potom se k této dvojici nukleonů přidá další neutron a uvolní se přitom další energie. Součet energií z postupných kroků se (díky zákonu zachování energie) musí rovnat energii získané při sloučení naráz. Pro řešení úkolu tedy stačí odečíst od vazbové energie jádra tritia vazbovou energii deuteronu.*³

- 2) Získanou energii určíme tak, že si představíme, že nejprve „rozebereme“ deuteron na jednotlivé nukleony, na to vynaložíme energii rovnou jeho vazbové energii. Potom necháme sloučit tři nukleony, tím získáme energii rovnou vazbové energii jádra tritia. Celkovou energii, kterou jsme tak získali, spočteme odečtením obou energií.

Oba přístupy jsou v podstatě totožné, vycházejí pouze z mírně odlišné představy. Studenti mohou své myšlenky formulovat ještě dalšími způsoby, které povedou ke správnému výpočtu. Například uvolněnou energii lze počítat také na základě porovnání klidových hmotností jader na začátku a na konci dané reakce. Je ale důležité jim zdůraznit, že u výše uvedených přístupů s „rozebíráním“ jader se jedná o naši představu, která nám pomáhá spočítat energetickou bilanci dané jaderné reakce z údajů, jež jsou k dispozici, a ne o popis reálného děje.

Dále nechte studenty formulovat postup, jímž by spočítali získanou/potřebnou energii ve složitějších reakcích, např. při rozštěpení jádra na dvě menší nebo sloučení dvou jader v jedno. K tomu může být vhodná právě představa mezikroku, ve kterém původní jádra „rozebereme“ na jednotlivé nukleony. Na to musíme dodat energii rovnou součtu jejich vazbových energií. Potom z jednotlivých nukleonů poskládáme nová jádra (ať už větší nebo menší než původní) a přitom získáme energii rovnou součtu vazbových energií. Podle toho, zda jsme více energie museli dodat, nebo naopak jsme jí více získali, je daná reakce nevhodná či vhodná pro energetické účely (získávání energie).

Nechte studenty na základě údajů z tabulky počítat energie různých jaderných reakcí, které si vymyslí. Můžete společně hledat nejvýhodnější reakci, tj. takovou, ze které získáme co nejvíce energie. Studenti sami tak mohou zjistit, že štěpení těžkých jader na jádra „středně těžká“ vede k uvolnění energie.

NĚKOLIK DŮLEŽITÝCH PŘÍKLADŮ

1) Štěpení uranu

Jádro uranu $^{235}_{92}\text{U}$ zachytí pomalý neutron (tj. neutron s velmi malou kinetickou energií, kterou můžeme zanedbat) a díky tomu se s velkou pravděpodobností rozpadne na 2 části (jádra) – velmi často pro jedno jádro platí $90 < A < 100$ a pro druhé $135 < A < 145$. Při této reakci se uvolní obvykle 2 až 3 samostatné neutrony, které po zpomalení mohou způsobit rozštěpení dalšího jádra $^{235}_{92}\text{U}$ (řetězová reakce). Existuje několik desítek různých způsobů, jak se může jádro uranu rozštěpit. Na následujících řádcích naleznete výpočet energie, kterou získáme rozštěpením jednoho jádra uranu pro jeden vybraný způsob štěpení. Vzhledem k tomu, že k provedení výpočtu jsou zapotřebí pouze základní aritmetické operace a potom tabulka vazbových energií vytvořená v předchozí části, je tento postup zvládnutelný i na střední škole a studentům může celý proces štěpení přiblížit.

*³ Vazbová energie deuteronu je 2,225 MeV, vazbová energie jádra ^3He je 7,718 MeV. Při sloučení deuteronu a protonu se tedy uvolní $(7,718 - 2,225) \text{ MeV} = 5,493 \text{ MeV}$.

Expozice X [C/kg]

Pro charakterizaci účinku fotonů, tj. elektromagnetického záření, se dříve používala veličina zvaná *expozice* X . Elektromagnetické záření vytváří ve vzduchu volné ionty, elektrony a pozitrony (sekundární částice), které mohou vzduch dále ionizovat a vysílat další fotony (tzv. brzdné záření). Expozici udává celkový náboj všech kationtů vytvořených při interakci fotonů v 1 kg vzduchu a při úplném zastavení vzniklých elektronů a pozitronů. Započítávají se kationy vytvořené primárními fotony a sekundárními elektrony a pozitrony, nezapočítávají se kationy vzniklé sekundárními fotony, tj. např. absorpcí brzdného záření nebo vyzářeného charakteristického záření. Tyto „nezapočítané“ jevy nelze zanedbat pro fotony s vysokou energií (více než 2 MeV). Navíc měření expozice takových fotonů není možné, protože dolet vzniklých elektronů a pozitronů je příliš velký.

Jednotkou expozice je C/kg. Dříve se pro expozici používala jednotka rentgen ($1 \text{ R} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ C/kg}$). Expozice je definována pouze pro vzduch. V dnešní době se od ní již upouští a místo expozice se i pro fotony udává kerma (pro vzduch nebo jinou látku).

Dávkový ekvivalent H [Sv]

Až doposud jsme se zabývali dobře měřitelnými, a tedy fyzikálními veličinami a jejich jednotkami. Jak je ale napsáno v kapitolách *Moje roční dávka* a *Jak se chránit před zářením*, účinky záření na organismy nejsou závislé pouze na energii, kterou záření tkáni předá, ale také na typu a dalších charakteristikách záření. To se snažil postihnout tzv. dávkový ekvivalent $H = QD$. Jedná se o součin dávky a bezrozměrného jakostního činitele Q pro daný typ záření. Pro dávkový ekvivalent se používá jednotka sievert (Sv), jejíž rozměr je stejný jako rozměr jednotky dávky, tj. J/kg. Dávkový ekvivalent není fyzikální veličinou v pravém slova smyslu, protože nelze přesně určit (změřit) vliv daného záření na látku, tj. příslušné jakostní činitele. Místo dávkového ekvivalentu se nyní užívají následující dvě veličiny.

Ekvivalentní dávka H_T [Sv]

Pokud chceme číselně vyjádřit i to, že různé typy záření mají na organismus různý vliv, používá se veličina zvaná ekvivalentní dávka H_T . Tu spočítáme tak, že vynásobíme radiační váhový faktor w_R (viz tabulka dále) s dávkou D_R daného typu záření absorbovanou v organismu nebo jeho části a tyto příspěvky sečteme pro všechny typy záření, kterému je organismus vystaven.

$$H_T = \sum w_R D_R$$

Jednotkou ekvivalentní dávky je sievert (Sv) s rozměrem J/kg. Od dříve používaného dávkového ekvivalentu se odlišuje hlavně odlišnou metodikou určování hodnot faktorů vyjadřujících vliv různých typů záření na organismus (a tedy i jejich hodnotami).

Efektivní dávka E [Sv]

Různé orgány těla jsou různě citlivé na záření a jejich ozáření je různě závažné pro celý organismus. Nejcitlivější na záření jsou rychle se množící buňky (zárodek dítěte, pohlavní buňky, kostní dřev), ve kterých tělo nestačí „opravovat“ vzniklá poškození, ale také třeba trávicí soustava. Naopak celkem odolné proti ozáření jsou svaly nebo nervová soustava.

PŘEHLED VELIČIN A JEDNOTEK PRO IONIZUJÍCÍ ZÁŘENÍ

Aktivita zdroje A [Bq]

„Mohutnost“ zdroje záření je charakterizována jeho aktivitou A , která je definována jako počet radioaktivních přeměn ve zdroji záření za jednotku času. To znamená, že je úměrná počtu částic, které vylétávají ze zdroje záření. Jednotkou je becquerel (Bq), jehož rozměr odpovídá s^{-1} . To znamená, že ve zdroji s aktivitou 1 Bq dojde průměrně k jedné radioaktivní přeměně za sekundu.

Starší jednotkou používanou pro aktivitu zdroje byl curie (Ci). Tato jednotka byla zavedena na počest Pierra Curie a jeho příspěvku ke studiu radioaktivity. Jednalo se o aktivitu 1 g ^{226}Ra . Převodní vztah je: $1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$.

Někdy je vhodné vyjádřit aktivitu nějakého „standardního“ množství zářiče – např. jednoho gramu. Potom mluvíme o měrné aktivitě (hmotnostní, objemové).

Dávka D [Gy]

Pro popis celkového působení ionizujícího záření dopadajícího na nějaký materiál se používá tzv. dávka D . Jedná se o střední hodnotu veškeré energie, kterou záření předalo 1 kg látky. Není totiž důležité, kolik částic na danou látku dopadne, ale co jsou schopny způsobit. Vliv záření na látku kvantifikujeme tím, kolik energie předá záření dané látce.

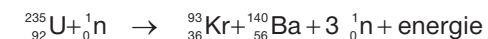
Jednotkou dávky je gray (Gy), jehož rozměr je J/kg.*⁴²

Dřívější jednotkou dávky byl rad (1 rd = 0,01 Gy). Používá se i veličina zvaná dávkový příkon, tj. dávka předaná kilogramu materiálu za 1 s.

KERMA [Gy]

Dávka popisuje celkové působení ionizujícího záření. U nepřímo ionizujícího záření (záření, které v látce vytvoří nejprve jiné, sekundární částice a teprve ty způsobují ionizaci, např. fotony, neutrony) se popisuje vliv vzniklých sekundárních částic na látku. K tomuto účelu se používá veličina zvaná KERMA (= Kinetic Energy Released in Material). Kerma je součet počátečních kinetických energií sekundárních částic vzniklých v 1 kg látky. Předávání energie látce sekundárními částicemi může být opožděné a proběhnout v jiném místě, než kam dopadá primární záření. KERMA má jednotku stejnou jako dávka.

*42 Velikosti dávek záření používaných v lékařství při terapii a aktivitu používaných zářičů lze najít např. ve vyhlášce č. 307/2002 Sb. (novelizované vyhláškou 499/2005 Sb.) o radiační ochraně (www.sujb.cz/?c_id=87).

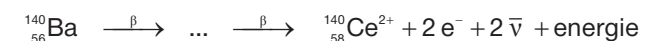


$$\text{uvolněná energie} = E_{\nu}(^{93}_{36}\text{Kr}) + E_{\nu}(^{140}_{56}\text{Ba}) - E_{\nu}(^{235}_{92}\text{U})$$

$$= (786,5 + 1169,5 - 1783,9) \text{ MeV} \doteq \mathbf{172 \text{ MeV}}$$

Vzniklá jádra mají přebytek neutronů, proto se dále rozpadají β rozpadem nebo v menším počtu případů vyzáří přímo neutron.*⁴ V těchto následných jaderných reakcích se uvolní další energie. Jak uvidíme z následujících výpočtů, jedná se o více než 10 % energie připadající na jedno rozštěpené jádro. Reakce s krátkým poločasem rozpadu proběhnou ještě v době, kdy je palivo v reaktoru. Rozpady s delším poločasem probíhají i po vyjmutí paliva z reaktoru, proto musí být zajištěno dostatečné chlazení i vyhořelého paliva.

Předpokládejme, že se jádra vzniklá štěpením budou dále přeměňovat beta rozpadem. Tento typ jaderného záření nemění hmotnostní číslo atomu (viz kapitola Jak (se) chránit před zářením). Pro obě vzniklá jádra tedy vyhledáme v tabulce nuklidů se stejným A a zároveň největší vazbovou energií.*⁵ Tak zjistíme kolik β rozpadů za sebou proběhne.



Protože při beta přeměně dochází ke změně neutronu na proton, elektron a antineutrino, musíme k energii, která se uvolní díky tomu, že nukleony ve vzniklém jádře budou lépe vázány, připočítat i to, že součet hmotností vzniklých částic je menší než hmotnost původního neutronu. Uvedená změna hmotnosti je rovna $m_n - m_p - m_e = 1,4 \cdot 10^{-30} \text{ kg}$ (antineutrino můžeme velmi dobře považovat za nehmotné), což odpovídá energii přibližně $E_{\beta} = 0,78 \text{ MeV}$.*⁶

V následných rozpadech jádra $^{93}_{36}\text{Kr}$ tedy získáme energii:

$$\text{uvolněná energie} = E_{\nu}(^{93}_{40}\text{Zr}) - E_{\nu}(^{93}_{36}\text{Kr}) + 4E_{\beta} = (806,5 - 786,5 + 4 \cdot 0,78) \text{ MeV} \doteq \mathbf{23 \text{ MeV}}$$

*4 Tyto neutrony jsou časově opožděné oproti neutronům vzniklým při štěpení. I když jich je méně než jedno procento ze všech neutronů emitovaných v reaktoru, zvětšují průměrnou dobu, za kterou je neutron emitován, o několik řádů (až na úroveň sekund) a díky tomu mají velký význam při řízení štěpné reakce v reaktoru.

*5 Pomocí databáze NuDat (www.nndc.bnl.gov/nudat2/index.jsp) si můžeme zkontrolovat, zda se dané nuklidy opravdu takto rozpadají a zda je poločas rozpadu takový, že k rozpadu dojde ještě v době, kdy je palivo v reaktoru. Získáme tak přesnější představu o celém procesu.

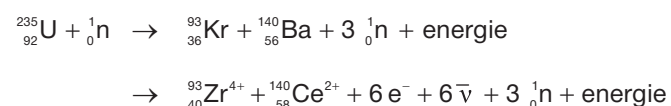
*6 Pokud vám uvedená úvaha přijde složitá, spočítejte si uvolněnou energii pomocí změny hmotnosti částic na začátku a na konci celé reakce. Nezapomeňte ale, že v tabulce jsou uvedeny hmotnosti atomů, nikoli jader či iontů. Hmotnost elektronu zanedbat nemůžeme, ale vazbovou energii mezi elektrony a jádrem i hmotnost antineutrin zanedbáváme.

V následných rozpadech jádra $^{140}_{56}\text{Ba}$ získáme energii:

$$\text{uvolněná energie} = E_{\nu}(^{140}_{58}\text{Ce}) - E_{\nu}(^{140}_{56}\text{Ba}) + 2E_{\beta} = (1172,7 - 1169,5 + 2 \cdot 0,78) \text{ MeV} \doteq \mathbf{5 \text{ MeV}}$$

Celkem na jedno jádro rozštěpené uvedeným způsobem připadá energie **200 MeV**.

Vzhledem k tomu, že počítáme energetickou bilanci daného děje, mohli bychom celkovou energii získanou rozštěpením jednoho jádra uranu získat přímo z počátečního a koncového stavu:

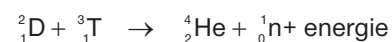


$$\begin{aligned} \text{uvolněná energie} &= E_{\nu}(^{93}_{40}\text{Zr}) + E_{\nu}(^{140}_{58}\text{Ce}) - E_{\nu}(^{235}_{92}\text{U}) + 6E_{\beta} \\ &= (806,5 + 1172,7 - 1783,9 + 6 \cdot 0,78) \text{ MeV} \doteq \mathbf{200 \text{ MeV}} \end{aligned}$$

Spolu se studenty si můžete ověřit, že celému postupu určení energie rozštěpením jádra uranu rozumíte, tak, že zkusíte samostatně v tabulce dohledat, kolik energie získáme, pokud by se jádro uranu rozštěpilo na jádra $^{89}_{35}\text{Br}$ a $^{144}_{57}\text{La}$. Na jaké izotopy se budou tyto produkty štěpení přeměňovat v následných beta rozpadech a kolik energie tak ještě získáme? Řešení je také uvedeno v závěru kapitoly.

V dostupné literatuře se opravdu uvádí, že průměrná využitelná energie připadající na rozštěpení jednoho jádra uranu ^{235}U či jádra plutonia ^{239}Pu (palivo tzv. rychlých množivých reaktorů) je asi 200 MeV. Energii získáme ve formě kinetické energie fragmentů štěpení (vzniklých jader), neutronů, beta částic (elektronů) a antineutrin vzniklých v beta rozpadech a ve formě gama záření (fotonů) vyzařeného při vlastním štěpení a v následných rozpadech. Kromě energie, kterou odnášejí antineutrino (cca 5 %), jsou ostatní formy energie v reaktoru pohlceny, tj. přeměněny na teplo.

2) Reakce dávající naději na využití termojaderné fúze



$$\text{uvolněná energie} = E_{\nu}(^4_2\text{He}) - E_{\nu}(^2_1\text{D}) - E_{\nu}(^3_1\text{T}) = (28,3 - 2,2 - 8,5) \text{ MeV} = \mathbf{17,6 \text{ MeV}}$$

Poznámka: Při termojaderné fúzi je látka ionizována a tvoří plasma. Aby došlo ke sloučení jader, musí být dostatečně „rychlá“, aby překonala elektrostatické odpuzování a dostala se dostatečně blízko k sobě. Rychlost částic se zvyšuje s rostoucí teplotou. Problém praktického využití termojaderné reakce je v tom, že zatím neumíme „udržet pohromadě“ dostatečně horké plasma o dostatečné hustotě po dostatečně dlouhou dobu. Ze všech reakcí, při kterých se slučují velmi lehká jádra, probíhá uvedená reakce při nejnižší teplotě.*⁷

*⁷ Více o termojaderné syntéze a jejím využití najdete v publikaci Milana Řípy a kol.: Řízená termojaderná syntéza, Ústav fyziky plazmatu AV ČR a ČEZ, a.s., 2005 (elektronickou verzi této publikace naleznete na adrese: www.cez.cz/vzdelavaciprogram pod odkazem Vzdělávací tiskoviny). Dále lze doporučit knihu Fúze. Energie vesmíru od Garyho McCrackena a Petera Stotta (edice Kolumbus, Mladá fronta, Praha, 2006).



Hrdinové jaderné fyziky

- Cíl:** Seznámit žáky s historickými osobnostmi, které hrály při rozvoji poznání atomu a atomového jádra významnou roli.
Ukázat lidský rozměr osobností podílejících se na rozvoji tohoto oboru.
- Popis:** Žáci v této aktivitě k sobě přiřazují kartičky se jmény významných vědců a jejich objevy. Kromě popisu objevu je na kartičce občas uvedena i nějaká podrobnost či zajímavost ze života daného fyzika.
Dále jsou zde připraveny tři křížovky s příjmeními těchto lidí.

Poznámka: Předchozí aktivita Atomové jádro v dějinách může vhodně doplnit tuto aktivitu.

Poznámka: Doporučuji vyučujícímu se před uvedením této aktivity seznámit se základními veličinami a jednotkami, které se pro ionizující záření a v dozimetrii používají (viz následující kapitola). Účinky záření na organismus a ochranou organismů před zářením se podrobněji zabývá následující aktivita Jak (se) chránit před zářením?



Jak (se) chránit před zářením?

Cíl: Seznámit žáky se základními typy jaderného záření a jejich vlastnostmi. Na základě znalosti o schopnosti daného záření procházet látkou by měl žák umět odhadnout nebezpečnost daného záření a navrhnout ochranu před ním.

Popis: V první části aktivity si studenti vyhledají informace o třech základních typech jaderného záření (dle uvedeného seznamu otázek). V druhé části aktivity je uveden scénář diskuze, ve které lze studenty postupně dovést k formulování základních pravidel ochrany před radioaktivním zářením.

Poznámka: Tato aktivita úzce souvisí s předcházející aktivitou Moje roční dávka, která se zabývá zdroji záření.

RVP: Žák navrhne možné způsoby ochrany člověka před nebezpečnými druhy záření. (RVP G)

Aktivita pokrývá učivo ochrana lidí před radioaktivním zářením. (RVP ZV)



Stopování elementárních částic

Cíl: Ukázat princip dráhových detektorů elementárních částic – bublinové a mlžné komory.

Popis: Velmi jednoduchý experiment – do perlivé vody hodíme několik zrníček soli, řetězku bublinek, který za zrníčkem vznikne, nám zviditelní pád zrníčka podobně jako bublinky či kapičky zviditelňují trajektorii elementární částice v příslušném detektoru.

Poznámka: Na tuto velmi jednoduchou aktivitu lze navázat vyhodnocováním reálných snímků z bublinové komory. Podrobný popis postupu, jak tuto činnost do výuky zařadit (včetně snímků a připravených výukových materiálů) lze nalézt na adrese (anglicky): www.teachers.web.cern.ch/teachers/archiv/HST2005/bubble_chambers/BCwebsite/index.htm

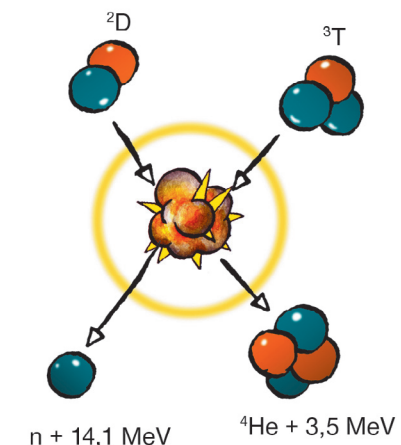


Atomové jádro v dějinách

Cíl: Zasadit důležité fyzikální objevy z jaderné fyziky a aplikace tohoto oboru do historického a společenského kontextu.

Popis: V aktivitě jsou připraveny kartičky s důležitými objevy či událostmi týkajícími se jaderné fyziky a další kartičky s různými historickými či společenskými událostmi. Úkolem žáků je seřadit tyto kartičky na časovou osu.

Poznámka: Tuto aktivitu lze kombinovat s aktivitou Hrdinové jaderné fyziky.



3) „Pohon Slunce“

Schéma na následující stránce naznačuje reakce, kterými se při teplotách čtyři až dvacet miliónů kelvinů uvolňuje energie uvnitř Slunce (tzv. proton-protonový řetězec). V prvním kroku dochází k přeměně beta plus, při které se proton změní na neutron, pozitron (antielektron) a neutrino. Energii této přeměny vypočteme podobně jako v předchozím příkladě: změna hmotnosti je rovna $m_p - m_n - m_e = -3,22 \cdot 10^{-30}$ kg (hmotnost neutrino zanedbáme, hmotnost pozitronu je stejná jako hmotnost elektronu), což odpovídá energii přibližně $E_{\beta^+} = -1,80$ MeV. *⁸ Tento krok trvá v celém řetězci nejdéle (tato reakce má malou pravděpodobnost).

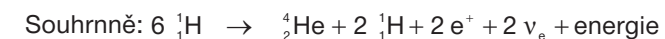
Dílčí kroky

Získaná energie: *⁹



Celkem (pozor, první dvě reakce musí proběhnout dvakrát):

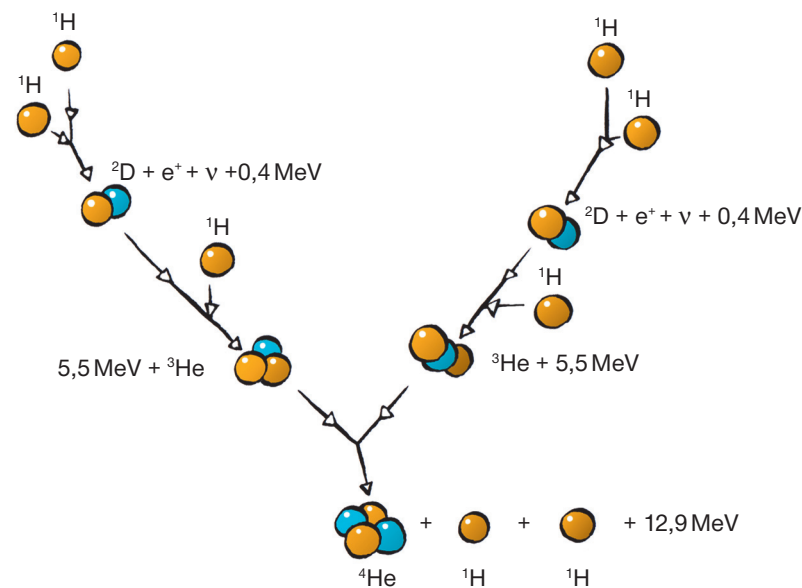
$$(2 \cdot 0,43 + 2 \cdot 5,49 + 12,86) \text{ MeV} \doteq \mathbf{24,7 \text{ MeV}}$$



$$\text{uvolněná energie} = E_{\nu}({}^4_2\text{He}) + 6E_{\beta^+} = 28,30 - 2 \cdot 1,80) \doteq \mathbf{24,7 \text{ MeV}}$$

*⁸ Tato přeměna tedy naopak nějakou energii „spotřebuje“. Obvykle ji získá na úkor vazbové energie. Z toho plyne, že přeměna beta plus je možná pouze v jádře a volný (osamocený) proton se na neutron nezmění. Volný neutron naopak je nestabilní a přeměňuje se beta přeměnou na proton s poločasem přeměny asi 10 minut.

*⁹ Ve výpočtech není uváděna nulová vazbová energie jádra vodíku, jedná se o samostatný proton.



Positrony e^+ anihilují s volnými elektrony e^- ve Slunci. Při anihilaci jedné dvojice pozitron-elektron vzniknou fotony o celkové energii $2m_0c^2 = 1,02 \text{ MeV}$. Ty jsou pohlceny a jejich energie také přispívá k ohřevu Slunce. Neutrína projdou celým Sluncem do kosmického prostoru a odnášejí asi 2–5 % celkové energie.

Slunce přeměňuje vodík na helium. Až klesne koncentrace vodíku uvnitř Slunce („vodík dojde“), jádro Slunce zkolabuje, čímž se zvýší jeho teplota na stovky miliónů stupňů. Při této teplotě může probíhat slučování jader helia (3 jádra helia vytvoří jádro uhlíku, tzv. CNO cyklus), což se na nějakou dobu stane novým zdrojem energie Slunce.*¹⁰

GRAFY ANEB CO NÁM ŘEKNE OBRÁZEK

Na základě údajů v tabulce nechte studenty vytvořit na počítači graf závislosti celkové vazbové energie E_v a „průměrné“ vazbové energie, kterou je vázán jeden nukleon, na zvyšujícím se počtu nukleonů A . Požádejte studenty, aby nejprve popsali průběh obou grafů, jejich souvislost a potom se pokusili na jejich základě vysvětlit, proč můžeme získat energii štěpením těžkých jader jako je uran.

Z prvního grafu je vidět, že vazbová energie roste s počtem nukleonů. Pro lehká jádra je její růst téměř lineární, ale pro těžší jádra se graf začne odchylovat od přímky. Vazbová energie těžších jader je menší, než odpovídá vzrůstajícímu počtu nukleonů. To je také důvod, proč má význam nakreslit si graf, jak se mění vazbová energie na jeden nukleon. Z tohoto grafu je vidět, že nejvíce jsou vázány nukleony v atomech střední velikosti.

*¹⁰ Více se o jaderných reakcích probíhajících uvnitř hvězd můžete dozvědět v knihách *Jádro, cesta do srdce hmoty* od Raye Mackintoshe a kol. (Academia, Praha, 2003) nebo *Fyzika hvězd a vesmíru* od Martina Šolce (SPN, Praha, 1983).



Poločas poklesu pивní pěny

Cíl: Ukázat žákům průběh děje, který je podobný procesu radioaktivní přeměny a naznačit problémy s výpočtem poločasu přeměny.

Popis: Jedná se o jednoduchou laboratorní úlohu. Žáci proměří časovou závislost poklesu pивní pěny a provedou srovnání získaných experimentálních hodnot (s pomocí počítače) s chováním radioaktivního rozpadu a určí poločas poklesu pěny.

Poznámka: Pokud máte k dispozici soupravu GamaBeta i s doplňkovým zářičem o krátkém poločasu rozpadu, lze stejným postupem zpracovávat i data z měření skutečného radioaktivního rozpadu. Poločas přeměny může být žákům přiblížen pomocí předcházející poměrně jednoduché aktivity *Rozpad čochky*.

RVP: Žák využívá zákon radioaktivní přeměny k předvídání chování radioaktivních látek. Žák měří vybrané fyzikální veličiny vhodnými metodami, zpracuje a vyhodnotí výsledky měření. (RVP G)



Radioaktivní kalendář

Cíl: Seznámit žáky s principem radiouhlíkového datování archeologických nálezů a s mezemi použitelnosti této metody.

Popis: Jedná se o praktické použití rozpadového zákona. Nejprve je uveden krátký výklad principu této metody a potom sada otázek k diskusi a úloh k výpočtům, které mají studentům ukázat praktické možnosti, přesnost, ale i omezení tohoto způsobu určování stáří archeologických nálezů. V závěru kapitoly je uvedena řada zajímavostí týkajících se uvedené metody i několik slavných příkladů jejího použití.

Poznámka: Aktivita předpokládá, že žáci znají zákon radioaktivního rozpadu a rozumí pojmu poločas rozpadu. S těmito pojmy se mohou seznámit v předchozích dvou aktivitách s názvy *Rozpad čochky* a *Poločas poklesu pивní pěny*. Úlohy jsou vhodné i pro žáky, kteří neumějí počítat s logaritmy – místo výpočtů mohou hodnoty buď odhadovat pomocí tabulky, nebo odečítat z připravených grafů.

RVP: Žák využívá zákon radioaktivní přeměny k předvídání chování radioaktivních látek. (RVP G)



Moje roční dávka

Cíl: Ukázat žákům hlavní přírodní a umělé zdroje radioaktivního záření, kterému jsou v běžném životě vystaveni, a jejich relativní příspěvek k roční efektivní dávce.

Seznámit žáky s pojmem efektivní dávka a její jednotkou sievert.

Popis: Aktivita obsahuje pracovní list, pomocí něhož si studenti jednoduše odhadnou efektivní dávku za poslední rok. Tuto hodnotu potom mohou porovnat s hodnotami, jež povolují normy, a s nebezpečnými hodnotami.

Společně s předchozí aktivitou pokrývá učivo jaderná energie (RVP ZV i RVP G), syntéza a štěpení jader atomů (RVP G).



Kolik energie dává jaderná elektrárna?

Cíl: Žáci si vytvoří představu o množství energie, které je možné získat štěpením uranu v jaderných elektrárnách v porovnání s jinými formami energie běžnějšími v každodenním životě.

Popis: V první části aktivity se využívá pracovní list, pomocí něhož žáci spočítají teoretický výkon JE Dukovany. Výpočet je velmi zjednodušený, proto dává pouze řádovou shodu se skutečnou hodnotou (odlišnost výsledku je zde zdůvodněna). V druhé části si studenti sami navrhnou a spočítají nějaké vhodné přirovnání pro množství elektrické energie, kterou tato elektrárna vyrobí za 1 minutu.

RVP: Pokrývá částečně učivo jaderná energie, jaderná elektrárna a reaktor. (RVP ZV i RVP G)



Řetězové štěpení a jeho řízení

Cíl: Seznámit žáky s principem řetězové štěpné reakce a jejího řízení.

Popis: Pro modelování řetězové reakce je zde použito tzv. dominového efektu – kostek domina (či jiné vhodné stavebnice), které se postupně kácují. Žáci sami vymýšlejí uspořádání kostek, které by ukázalo neřízenou a řízenou štěpnou reakci.

RVP: Aktivita pokrývá učivo řetězová štěpná reakce. (RVP ZV i RVP G)



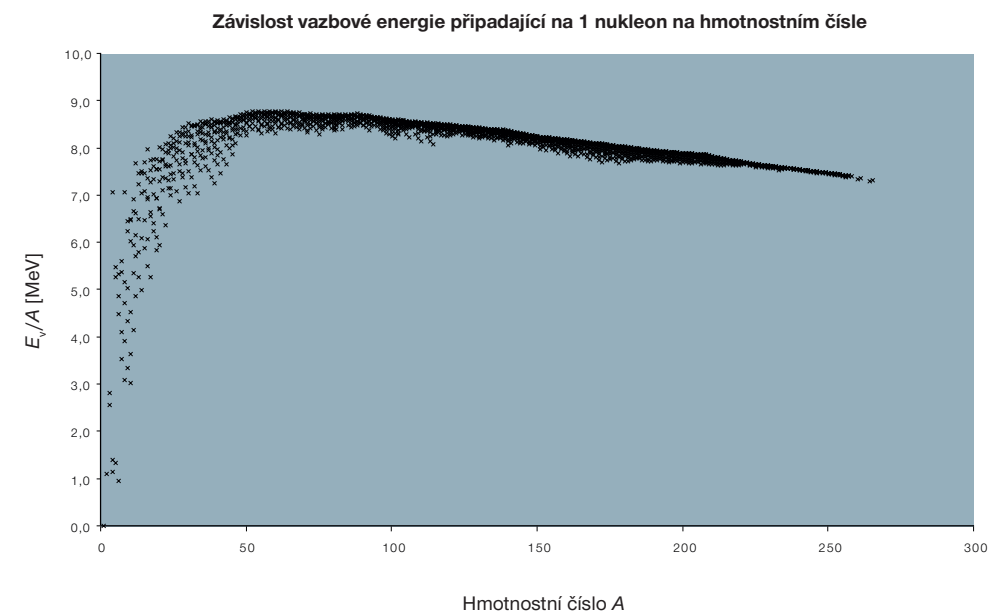
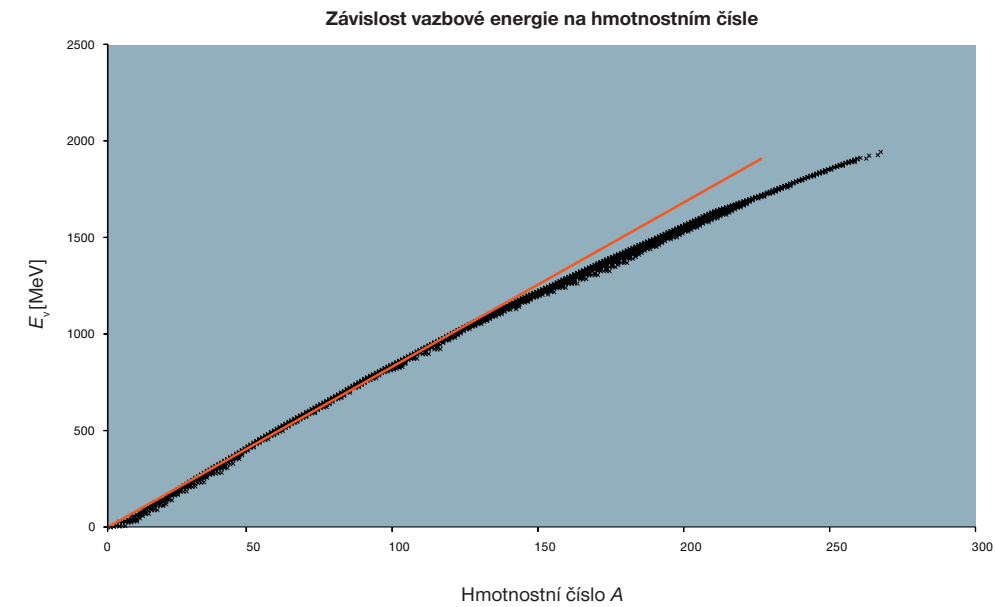
Rozpad čočky

Cíl: Přiblížit žákům pravděpodobnostní povahu rozpadových procesů, pojem poločas rozpadu a exponenciální závislost počtu nerozpadlých jader na čase (rozpadový zákon).

Popis: V aktivitě se používají ploché předměty s odlišnými stranami (např. mince, označená zrníčka čočky, ...). Tyto předměty se promíchají a hodí na stůl. Zhruba polovina jich bude ležet označenou stranou nahoru – tyto předměty představují „jádra, která se za daný poločas rozpadla“. Dále jsou zde uvedeny nápady, jak studentům přiblížit stochastickou povahu procesu a nutnost velkého počtu jader.

Poznámka: Měřením poločasu přeměny se zabývá následující aktivita s názvem Poločas poklesu pивní pěny. Jako ukázka aplikace zákona jaderné přeměny může posloužit aktivita Radioaktivní kalendář, která se zabývá metodou radiouhlíkového datování.

RVP: Žák využívá zákon radioaktivní přeměny k předvídání chování radioaktivních látek. (RVP G)



Energeticky výhodné je přecházet do takových konfigurací, ve kterých jsou jednotlivé nukleony vázány co nejvíce. Protože energie, kterou je vázán jeden nukleon v jádře, nejprve roste s hmotností jader, je výhodné slučovat lehká jádra. Jednotlivé nukleony jsou ale v těžkých jádrech vázány slaběji než v „středně těžkých“ jádrech, proto získáme energii rozštěpením velkého jádra na dvě menší, ale více vázaná jádra.*¹¹

DALŠÍ INFORMACE

Údaje o hmotnostech jsou převzaty z IAEA (International Atomic Energy Agency) Nuclear Data Centre – Nuclear Data Service (www-nds.iaea.org), kde lze najít mnoho dalších údajů o jádrech atomů, např. v databázi NuDat dostupné na adrese www.nndc.bnl.gov/nudat2/index.jsp naleznete tabulku známých nuklidů a jejich vlastností uspořádaných do tzv. Segrého diagramu. Na vodorovné ose je počet neutronů a na svislé počet protonů v jádře. Barva vyjadřuje buď poločas rozpadu (nuklidy s krátkým poločasem rozpadu mají malou vazbovou energii a stabilní nuklidy mají velkou vazbovou energii) nebo typ přeměny pro nestabilní jádra. Tomuto obrázku se také říká „údolí stability“ (čím větší vazbová energie, tím je nuklid níže). Pokud si zobrazíme typ přeměny jednotlivých nuklidů a uvědomíme si, jakým způsobem jednotlivé typy jaderných přeměn mění jádro (o jaký „posun“ v tabulce jde), uvidíme, že se nuklidy svými přirozenými přeměnami „snaží dostat na dno údolí“ (stejně jako sněhová koule na kopci).

ŘEŠENÍ ÚLOH

Úlohy z pracovního listu pro studenty:

1)

	m [kg]	Δm [kg]	$\Delta m/m \cdot 100$ %	E_ν [MeV]
^2_1H	$3,344494 \cdot 10^{-27}$	$3,965659 \cdot 10^{-30}$	0,12 %	2,225
^3_1H	$5,008267 \cdot 10^{-27}$	$1,512018 \cdot 10^{-29}$	0,30 %	8,482
^3_2He	$5,008234 \cdot 10^{-27}$	$1,375869 \cdot 10^{-29}$	0,27 %	7,718

Vidíme, že hmotnostní úbytek Δm činí několik promile hmotnosti jádra.

- 2) Na úplné rozebrání jádra musíme dodat energii, která se rovná vazbové energii, tedy pro jádro ^4_2He se jedná o energii asi 28,3 MeV a pro jádro ^6_3Li o energii asi 32,0 MeV.
- 3) Každý nukleon je v jádře vázán energií, která se pohybuje u většiny atomů v rozmezí 6–8 MeV. Největší vazbovou energii má tedy největší jádro uvedené v tabulce, jedná se o $^{265}_{106}\text{Sg}$ (seaborgium). Zde lze začít se studenty diskutovat, že celková vazbová energie není nejlepším ukazatelem toho, jak dobře je jádro vázáno, a že lepší je vazbová energie připadající na jeden nukleon. Nejvíce vázané nukleony má nuklid $^{62}_{28}\text{Ni}$, kdy na jeden nukleon připadá vazbová energie 8,795 MeV.

*¹¹ Uvědomte si, že žádná jaderná přeměna, fúze (slučování) ani štěpení jádra nemění celkový počet nukleonů.

a počítání fazolů určují průměrnou hmotnost jedné fazole přímo i jako vážený průměr hmotností jedné fazole každého druhu.

Poznámka: Pojem vážený průměr je zde vysvětlen, není nutné, aby ho žáci znali a uměli používat předem. Je ale vhodné poukázat na jeho případné dřívější použití či naopak později žákům připomenout jeho užití v této aktivitě.



Štěpení jádra

Cíl: Seznámit žáky s kapkovým modelem jádra (modelem „jaderné kapaliny“) jako jednou z možností, jak si představovat atomové jádro. Ukázat žákům průběh štěpení atomového jádra v rámci kapkového modelu jádra.

Popis: Modelem jádra jsou mastné (olejové) skvrny na hladině vody. Pomocí např. příborového nože se žáci snaží skvrnu nejprve rozdělit na dvě, potom naopak spojit dvě skvrny v jednu a popisují jejich chování. Dále je zde uvedena diskuze, v čem se tento jednoduchý model shoduje s reálným popisem štěpení v rámci kapkového modelu jádra. Aktivita je doplněna variantou složitější na realizaci, ve které si žáci nejprve připraví směs vody a alkoholu, ve které se vznáší kapka oleje. Tuto kapku pak následně „štěpí“ a pozorují.



Fúze nebo štěpení?

Cíl: Vysvětlit pojmy hmotnostní schodek (úbytek) a vazbová energie jádra. Na základě závislosti vazbové energie na hmotnostním čísle vysvětlit, proč energii lze získat slučováním lehkých jader a štěpením těžkých jader.

Popis: Aktivita má několik částí. V první si studenti na základě znalosti hmotností jednotlivých nuklidů sestaví tabulku vlastností atomových jader. Přitom se naučí nebo si zopakují převod mezi jednotkami energie joule (J) a elektronvolt (eV) a pojmy jako relativní atomová hmotnost, protonové a hmotnostní číslo. V další části se na základě vytvořené tabulky naučí určovat energii, kterou získáme nebo kterou musíme naopak dodat, pro různé jaderné reakce. V textu je proveden detailní výpočet několika důležitých reakcí. V poslední části aktivity studenti vytvoří grafy závislosti vazbové energie a závislosti vazbové energie na jeden nukleon na hmotnostním čísle. Pomocí těchto grafů je vysvětleno, proč lze energii získat slučováním lehkých jader a štěpením jader těžkých.

Poznámka: Pro zpracování údajů o vlastnostech jader a pro vytváření grafů je využito počítače, konkrétně vhodného tabulkového procesoru, např. MS Excel. Názornou představu o průběhu štěpení a slučování jader podle kapkového modelu jádra mohou studenti získat pomocí předchozí aktivity Štěpení jádra. Jednotlivé typy jaderných přeměn, se kterými se zde pracuje, jsou obsahem aktivity s názvem Jak (se) chránit před zářením?

RVP: Žák posoudí jadernou přeměnu z hlediska vstupních a výstupních částic i energetické bilance. (RVP G)



Jak velký je atom?

- Cíl:** Ukázat, že atom je nepředstavitelně malý a běžnými prostředky nedosažitelný.
- Popis:** Nejprve se studenti pomocí obrázku a výpočtu seznámí s tím, že zmenšení tisíckrát (tj. o tři řády) lze přibližně nahradit desetkrát provedeným půlením. Spočítají, kolik půlení 10 cm dlouhého pásku papíru je třeba provést, abychom dostali „délku“ odpovídající průměru atomu. Potom provedou půlení pásku papíru. Prakticky lze zvládnout asi třetinu potřebného počtu půlení, což názorně ukazuje, jak náročné je zkoumat děje na úrovni atomů.



Rozptylování

- Cíl:** Přiblížit žákům metodu nepřímého měření. Seznámit je s vytvářením hypotéz (resp. modelů) na základě výsledků pozorování.
- Popis:** Žáci pracují ve dvojicích. První z nich umístí pod neprůhlednou podložku nějaký předmět. Druhý pouští pod desku kuličku a podle směrů, do kterých se odrazila, se snaží uhodnout, jaký tvar má předmět pod podložkou.

Poznámka: Na tuto aktivitu přímo navazuje složitější aktivita s názvem Pecka nebo puding?



Pecka nebo puding?

- Cíl:** Seznámit žáky s principem rozptylového experimentu (příkladem nepřímého měření), kterým bylo objeveno atomové jádro.
- Popis:** Jedná se o model Rutherfordova pokusu. Místo zlaté fólie zde slouží sklenice (model jednoho atomu či jádra) a místo alfa částic žáci použijí kuličky. Postupným pouštěním kuliček modelují svazek alfa částic. Ze záznamů úhlů, do kterých se kulička v závislosti na počáteční poloze rozptýlila, mohou studenti sestavit graf. Aktivita ale spíše slouží k ilustraci průběhu myšlenky než k měření závislosti úhlu rozptylu (přesnost je velmi malá). V textu jsou diskutována i zkreslení, kterých se použitý model dopouští.

Poznámka: Pro ilustraci principu rozptylového experimentu a metody nepřímého měření lze využít předchozí jednodušší aktivitu nazvanou Rozptylování.



Hmotnost fazolia

- Cíl:** Seznámit žáky s pojmy prvek, izotop/nuklid, izotopová směs. Pomoci žákům pochopit (relativní) atomovou hmotnost jako průměrnou hmotnost atomu daného prvku.
- Popis:** Modelem různých izotopů jednoho prvku (s hypotetickým názvem fazólium) jsou různé druhy fazolí. Žáci určují složení této směsi a pomocí vážení

Zajímavost:

Jaderné reakce, při kterých se slučují lehké prvky na těžší, dodávají energii hvězdám. Jedním z velmi běžných prvků ve Sluneční soustavě je železo $^{56}_{26}\text{Fe}$, a proto se většinou uvádí, že v jeho jádře jsou nukleony nejvíce vázány, a jde tedy o nejstabilnější jádro. Jak jsme se díky tabulce hmotností nuklidů přesvědčili, největší vazbovou energii připadající na jeden nukleon má nikl $^{62}_{28}\text{Ni}$. Vyskytuje se ale ve sluneční soustavě mnohem méně. Důvod je jednoduchý: nestačí, aby jádro bylo nejstabilnější, ale musí také existovat efektivní cesta, jak ho vyrobit z jiných jader.

4) Nejstabilnější je takový izotop, ve kterém jsou nukleony nejvíce vázány, tj. má největší vazbovou energii na jeden nukleon. (Izotopy se navzájem liší počtem nukleonů, proto se nemůžeme řídit celkovou vazbovou energií.) Pohledem do tabulky vidíme, že mezi izotopy uhlíku se jedná o $^{12}_6\text{C}$ a mezi izotopy kyslíku o $^{16}_8\text{O}$. V obou případech se jedná o izotopy, které tvoří asi 99 % přírodní izotopové směsi daného prvku.

Poznámka: Zkusme řešit stejnou úlohu pro dusík. Nejstabilnější izotop dusíku $^{14}_7\text{N}$ tvoří ani ne půl procenta veškerého dusíku, většinu dusíku na zemi tvoří izotop $^{15}_7\text{N}$, jehož vazbová energie na jeden nukleon je o něco málo menší. Toto lze vysvětlit tím, že atomy $^{14}_7\text{N}$ vznikají v tzv. CNO cyklu, který probíhá ve hvězdách poměrně často. (Všechny prvky, které se na Zemi vyskytují, vznikly dříve slučováním lehkých prvků ve hvězdách.) Vznik izotopu $^{15}_7\text{N}$ je poměrně vzácný. Oba uvedené izotopy jsou stabilní.

5) Celková vazbová energie uranu $^{235}_{92}\text{U}$ je 1 783,863 MeV a vazbová energie na jeden nukleon je 7,591 MeV. Tyto hodnoty se příliš neliší od hodnot okolních jader. Můžeme si povšimnout, že vazbová energie na jeden nukleon asi od čtvrtiny tabulky do jejího konce mírně klesá. Na začátku tabulky hodně kolísá.

Doplňující otázky:

- a) Ano, obzvláště hmotnosti jednotlivých částic a atomovou hmotnostní konstantu musíme brát velmi přesně, protože se jedná o velmi blízká čísla a v průběhu výpočtu je od sebe odčítáme.
- b) Studenti si při práci s tabulkou mohou této „zvláštnosti“ atomu uhlíku ^{12}C sami povšimnout. Pokud si uvědomíme, jak je definována atomová hmotnostní konstanta, tak se jedná o velmi triviální otázku, která může studenty chvíli potrápít a pomoci jim pochopit rozdíl mezi hmotnostním číslem a relativní atomovou hmotností.
- c) Pro lehká jádra platí, že dobře vázaná, stabilní jádra mají v jádře přibližně stejný počet protonů jako neutronů. U těžších jader si můžeme povšimnout, že počet neutronů začne nad protony převažovat a u velmi těžkých jader je neutronů asi 1,5krát více než protonů. Větší počet neutronů než protonů i klesající vazbová energie na jeden nukleon v těžkých jádrech souvisí s krátkým dosahem jaderné interakce, která drží jádra pohromadě a působí mezi nukleony (nerozlišuje mezi protony a neutrony). Tato jádra jsou „větší“ než je dosah této interakce. Proti této přitažlivé síle působí elektrické odpuzování protonů, které svůj dosah nemá omezený na krátké vzdálenosti.
- d) „Nejstabilnější“ izobary:
Tabulka ukazuje, že velmi lehká jádra mají velkou vazbovou energii na jeden nukleon, pokud mají počet protonů (Z) a neutronů ($A-Z$) stejný. V případě, že to není možné (pro lichá A), je výhodnější, aby bylo více neutronů. Již ale u $A = 10$ (a dále

pro $A = 14, 18$, atd.) můžeme v tabulce nejstabilnějších izobarů vysledovat, že není ani výhodné, aby počet neutronů i protonů byl vyjádřen lichým číslem. V přírodě se skutečně vyskytuje nejvíce stabilních nuklidů se sudým počtem protonů i neutronů, o něco méně je stabilních nuklidů, kde jedno z čísel je sudé a jedno liché, ale jen 4 stabilní nuklidy mají oba počty liché.

	A	Z	A-Z	E_{ν}/A [MeV]
H	2	1	1	1,11
H	3	1	2	2,83
He	4	2	2	7,07
He	5	2	3	5,48
Li	6	3	3	5,33
Li	7	3	4	5,61
Be	8	4	4	7,06
Be	9	4	5	6,46
Be	10	4	6	6,50
B	11	5	6	6,93
C	12	6	6	7,68
C	13	6	7	7,47
N	15	7	8	7,70
O	16	8	8	7,98
O	17	8	9	7,75
O	18	8	10	7,77
F	19	9	10	7,78
Ne	20	10	10	8,03

Pokud nahlédneme do přehledu stabilních nuklidů (např. v MFCh tabulkách), zjistíme například, že i přes velkou vazbovou energii nuklidy ${}^3_2\text{He}$ a ${}^8_4\text{Be}$ nejsou stabilní a dokonce mají velmi krátký poločas rozpadu. Tím, že jsme vyhledali nejstabilnější nuklidy vždy ze skupiny jader se stejným počtem nukleonů (tj. mezi izobary), jsme se omezili pouze na beta přeměnu jádra, která počet nukleonů nemění (viz kapitola Jak (se) chránit před zářením?), dokáže ale nastavit nejvýhodnější poměr počtu protonů a neutronů. Tento typ přeměny je typický pro lehká jádra. V tabulkách (nebo databázi NuDat) najdeme, že neexistuje stabilní jádro, které by mělo 5 nukleonů. To je dáno tím, že energeticky nejvýhodnější uspořádání pěti nukleonů je jádro ${}^4_2\text{He}$ a osamělý nukleon. Podobně v případě 8 nukleonů je nejvýhodnější z nich poskládat dvě jádra hélia ${}^4_2\text{He}$.

Stabilní není ani nuklid ${}^{10}_4\text{Be}$, ale jeho poločas rozpadu je více než milion let.

POPIS KAPITOL PUBLIKACÍ UČÍME JADERNOU FYZIKU A JADERNÉ HRÁTKY

Jaderná fyzika se zabývá věcmi tak vzdálenými našim smyslům, jako je atom a atomové jádro, takže neumožňuje studentům využít vlastní zkušenost ani nenabízí mnoho možností k experimentování v tom pravém slova smyslu. I přes tyto obtíže se domnívám, že není nutné se při probírání tohoto tématu uchýlit k pouhému výkladu současně uznávaných teorií, ale že je možné toto téma studentům přiblížit názorně s využitím jejich aktivního přemýšlení a modelování daných jevů.

V knížečce *Jaderné hrátky* naleznete celkem devět kapitol, aktivit, které se zaměřují na modelování jednotlivých jevů, jejich podstaty či vhodných analogií pomocí jednoduchých a běžně dostupných pomůcek. Publikace *Učíme jadernou fyziku* obsahuje sedm dalších kapitol s činnostmi, ve kterých studenti vyhledávají informace, posuzují vlastní nápady na řešení problémů, počítají a diskutují. Obě publikace se tak doplňují a měly by poskytnout učitelům inspiraci pro výuku celého tématu jaderné fyziky. Aktivity v obou publikacích lze modifikovat podle věku a schopností žáků, takže jsou použitelné jak na střední, tak na základní škole.

Pro ulehčení orientace v obou brožurách zde uvádím seznam, cíl a velmi stručný popis všech aktivit z obou knížeček. Dále navrhuji jejich vhodné pořadí a v poznámkách upozorňuji na případné návaznosti či pojmy, se kterými musí být žáci předem seznámeni. Samozřejmě, že jako vyučující nemusíte převzít celé navržené schéma aktivit. Předpokládám, že si spíše vyberete jednotlivé aktivity či jejich části, které budete považovat za vhodné pro obohacení vašich vyučovacích hodin.

Pokud aktivita úzce souvisí s některým očekávaným výstupem nebo učivem RVP ZV*⁴⁰ nebo RVP G*⁴¹, upozorňuji na to v popisu aktivity části označené RVP.

Legenda:

aktivita z brožury *Jaderné hrátky*



aktivita z brožury *Učíme jadernou fyziku*



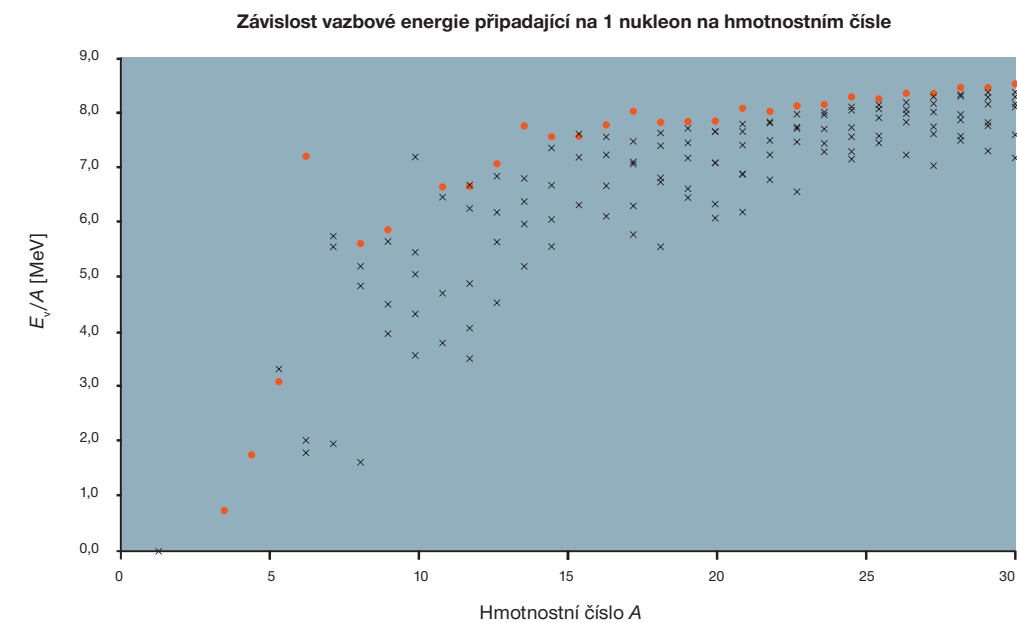
*40 Rámcový vzdělávací program pro základní vzdělávání platný od 1. září 2005.

*41 Rámcový vzdělávací program pro gymnázia schválený MŠMT 24. 7. 2007.

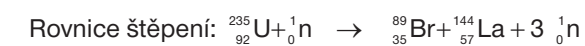
energii (zpomalují) a nejvíce energie předají látce těsně kolem místa, kde se úplně zastaví.^{*39} Volbou vhodné energie iontů můžeme ozařovat nádory různě hluboko. Další možností by bylo „zabudovat“ radioaktivní izotop do nějaké chemické sloučeniny, která se hromadí v místě nádoru. Tělo by si tak samo dopravilo zářič přímo na místo nádoru, aniž by bylo nutné pacienta operovat. Podobný postup se používá pro diagnostiku různých onemocnění nebo například při onemocnění štítné žlázy (používá se nuklid ^{131}I , protože jód se hromadí ve štítné žláze). V praxi musí vždy lékař hledat kompromis mezi přínosem, kterým pro pacienta představuje zničení nádoru, a rizikem plynoucím z poškození zdravých tkání.

*39 Toto chování iontů popisuje tzv. Braggova křivka.

Následující graf ukazuje detail závislosti vazbové energie na jeden nukleon na hmotnostním čísle A pro velmi lehká jádra. Červenými tečkami jsou vyznačeny stabilní nuklidy. Z obrázku je patrné, že vazbová energie na jeden nukleon velmi závisí na tom, o jaký izotop se jedná (u těžších jader jsou již „křížky“ v mnohem užším pásmu). Pokud bychom se zajímali pouze o stabilní nuklidy, vidíme, že vazbová energie na jeden nukleon zde není jednoduchou rostoucí funkcí, ale má několik lokálních maxim. Díky nim lze získat při slučování některých jader opravdu hodně energie. Vysvětlení existence těchto maxim bychom ale museli hledat v mnohem složitějším modelu atomového jádra.^{*12}



Výpočet štěpení uranu (úloha ze strany 12)

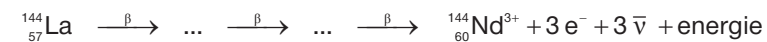


$$\begin{aligned} \text{uvolněná energie} &= E_v({}_{35}^{89}\text{Br}) + E_v({}_{57}^{144}\text{La}) - E_v({}_{92}^{235}\text{U}) \\ &= (759,5 + 1192,6 - 1783,9) \text{ MeV} \approx \mathbf{168 \text{ MeV}} \end{aligned}$$

*12 Podobným „hraním“ s tabulkou vazbových energií můžeme objevit i další „zákonitosti“, které jsou shrnuty v poloempirickém vzorci popisujícím energii jádra (tzv. Weizsäckerově formuli), nebo se pokusit „vystopovat“ tzv. magická čísla (počty protonů či neutronů, pro která jsou jádra stabilnější). Podrobný rozbor těchto věcí ale přesahuje jak středoškolskou látku, tak rozsah tohoto metodického materiálu. Detailní popis příslušné teorie lze najít ve vysokoškolských učebnicích, např. Fyzika jádra od M. A. Prestona (Academia, Praha, 1970).

Následné beta rozpady:

$$\text{uvolněná energie} = E_{\nu}({}_{39}^{89}\text{Y}) - E_{\nu}({}_{35}^{89}\text{Br}) + 4E_{\beta} = (775,5 - 759,5 + 4 \cdot 0,78) \text{ MeV} \doteq \mathbf{19 \text{ MeV}}$$



$$\text{uvolněná energie} = E_{\nu}({}_{60}^{144}\text{Nd}) - E_{\nu}({}_{57}^{144}\text{La}) + 3E_{\beta} = (1199,1 - 1192,6 + 3 \cdot 0,78) \text{ MeV} \doteq \mathbf{9 \text{ MeV}}$$

V databázi NuDat můžeme zkontrolovat, že se skutečně dané nuklidy rozpadají rozpadem beta a poločasy rozpadu jsou dostatečně krátké, aby alespoň k části z nich došlo ještě v době, kdy je palivo v reaktoru. Celkově se uvolní energie **196 MeV**.

TERMINOLOGICKÉ POZNÁMKY

Prvek = látka, jejíž atomy mají stejné protonové číslo, tj. stejný počet protonů v jádře, a tedy i elektronů v atomovém obalu – z chemického hlediska mají tyto atomy stejné vlastnosti, protože chemické vlastnosti jsou dány stavbou atomového obalu, hmotnost jádra je ovlivňuje jen velmi nepatrně. Pokud se nejedná o ionizované atomy (ionty), je počet elektronů vždy roven počtu protonů, např. atom uhlíku má vždy 6 elektronů v obalu a 6 protonů v jádře, počet neutronů v jádře se pohybuje mezi 2–14.

Nuklid = látka s úplně stejnými atomy, tj. všechny atomy mají v jádře daný počet protonů a daný počet neutronů, např. nuklid uhlíku ${}_{6}^{12}\text{C}$ = látka, jejíž všechny atomy mají v jádře 6 neutronů a 6 protonů (a v obale samozřejmě 6 elektronů).

Izotopy = nuklidy se stejným protonovým číslem, tj. nuklidy stejného prvku, např. ${}_{6}^{11}\text{C}$, ${}_{6}^{12}\text{C}$, ${}_{6}^{13}\text{C}$, ${}_{6}^{14}\text{C}$ a další, v přírodě se prvky vyskytují obvykle jako směs různých izotopů, jejich zastoupení lze vyhledat v tabulkách.

Poznámka: Termín izotop či izotopy se používá, pokud chceme zdůraznit, že se jedná o nuklidy stejného prvku. Tedy směs různých izotopů automaticky znamená, že se jedná o jeden prvek (tj. chemicky neodlišitelné atomy), ale směs různých nuklidů může obsahovat atomy různých prvků. Je ale jedno, zda mluvíme o nuklidu ${}_{6}^{12}\text{C}$ nebo izotopu ${}_{6}^{12}\text{C}$.

Izotony = nuklidy se stejným počtem neutronů v jádře, liší se počtem protonů, např. ${}_{5}^{11}\text{B}$, ${}_{6}^{12}\text{C}$, ${}_{7}^{13}\text{N}$ a další.

Obyvatelé žijící v blízkosti jaderných elektráren dostávají jodové preparáty (léky obsahující hodně jódu), které si mají vzít v případě úniku radioaktivity. Dokáže jód ochránit před zářením?

Pokud by došlo k úniku radioaktivity z elektrárny, byl by jedním z velmi nebezpečných radioaktivních izotopů jód ${}^{131}\text{I}$. Štítná žláza zachycuje jód, který se dostane do organismu vdechnutím nebo jídlem. Jak již bylo napsáno několikrát, z chemického hlediska jsou všechny izotopy totožné. Pokud by došlo ke zvýšení koncentrace radioaktivního izotopu jódu, bude se dostávat i do lidského těla, hromadit se ve štítné žláze a ohrožovat tak organismus. Pokud si ale člověk vezme velkou dávku jódu, „zahltí“ tímto stabilním jodem štítnou žlázu, ta již nebude další jód přijímat a vdechnutý radioaktivní jód se jako přebytečný zase z těla vyloučí.

Proč lidé jezdí do lázní v Jáchymově, kde je vyšší radioaktivita? Není to spíš nebezpečné?

Léčebné lázně Jáchymov^{*35} se zaměřují na léčbu chorob pohybového aparátu a využívají k tomu hlavně minerální vodu, která obsahuje hodně radioaktivního plynu radonu, zdroje alfa záření s malou energií. Koupele v této vodě mají protizánětlivé účinky, zlepšují prokrvení a také dlouhodobě ulevují od bolesti. Přesný princip účinků těchto malých dávek záření (lázeňský pobyt je z hlediska „ozáření organismu“ srovnatelný s rentgenovým snímkem) není úplně jasný (viz poznámka na konci kapitoly Jak (se) chránit před zářením?), ale diskutuje se o jejich působení na žlázy s vnitřní sekrecí, hlavně zvýšení produkce kortizolu.^{*36}

Při ozařování orgánů uložených hluboko v těle musí lékaři nějak zajistit, aby nedošlo k poškození zdravé tkáně, která stojí záření v cestě a kterou musí záření projít. Jak je možné „ozářit“ nějaké místo uvnitř těla, aniž bychom „poničili“ vše, co je cestě?

Tento problém musí řešit lékaři, pokud chtějí pomocí gama záření ničit nádory, které nejsou přímo na povrchu (tj. jiné než nádory kůže). Gama záření se totiž absorbuje podél celé dráhy, takže intenzita jeho svazku postupně klesá, tím klesá i energie předaná dané tkáni a její poškození. To znamená, že k největšímu poškození by došlo zcela nevhodně na povrchu a těsně pod povrchem těla. Hojně používanou metodou, která tento problém řeší, je ozařování mnoha svazky. Velké množství paprsků záření je namířeno na nádor z různých stran. Každý paprsek je poměrně slabý, takže nepoškodí tkáň, kterou prochází. V místě nádoru ale působí všechny paprsky a nádor tak mohou zničit. Toto je princip tzv. Leksellova gama nože.^{*37}

Další možnost poskytují svazky lehkých iontů (tzv. hadronová terapie).^{*38} Lze je použít pro nádory, které nejsou příliš hluboko v těle, protože ani velmi urychlené ionty se nedokáží dostat příliš hluboko do tkáně. Tyto částice nepředávají nejvíce energie na povrchu (jako je tomu u záření gama), ale tím, jak postupují látkou, postupně ztrácejí

^{*35} www.laznejachymov.cz

^{*36} Více viz např. příspěvek Jáchymovská lázeňská léčba MUDr. J. Šimka ze 7. konference Sdružení lázeňských míst z roku 2004 (www.spas.cz/konference7.htm).

^{*37} Toto zařízení vlastní od roku 1992 např. i nemocnice Na Homolce v Praze ([www.homolka.cz/cz/stereotakticka_a_radiacni_neurochirurgie_\(OSRN\)](http://www.homolka.cz/cz/stereotakticka_a_radiacni_neurochirurgie_(OSRN))).

^{*38} O hadronové terapii se lze poučit např. na stránkách www.particle.cz/medicine/index.php?art=0 (autoři jsou z FZÚ AV ČR).

PARADOXNÍ JADERNÉ OTÁZKY

V této části brožury naleznete několik zdánlivě paradoxních otázek a problémů, které mohou sloužit k motivaci vyučovací hodiny, ale také jako problémová úloha pro studenty nebo zadání menšího projektu, ve kterém mají studenti sami vyhledat informace nebo k nim zaujmout stanovisko.

Jak je možné, že získáváme energii štěpením jader atomu? Nemělo by to být tak, že na rozbití atomového jádra bychom měli energii vždy dodávat, než ji tak získávat?
Detailní odpověď se nachází v kapitole Fúze nebo štěpení?

Únik radioaktivních látek je až o dva řády větší z klasických uhelných elektráren než z elektráren jaderných. Je to možné? Kde se bere radioaktivita v uhelných elektrárnách?

Uhlí obsahuje určité množství těžkých radioaktivních izotopů. Spalování (tj. chemická reakce) neovlivňuje vlastnosti jader reagujících atomů, takže množství radioaktivních izotopů se nezmění a tyto izotopy se koncentrují v popílku. Odlučovače popílku instalované v uhelných elektrárnách zabraňují, aby se tyto látky dostaly do ovzduší. Po zjištění vysoké radioaktivity elektrárenského popílku se přestal používat pro výrobu stavebních materiálů. Při dalším využití je pečlivě kontrolován, zda jeho radioaktivita není příliš vysoká.

Jak je možné, že aktivita použitých palivových článků z jaderných reaktorů je podstatně vyšší než aktivita čerstvého paliva reaktoru?

Jaderné palivo obsahuje hlavně izotopy uranu ^{238}U a ^{235}U , jejichž poločasy rozpadu jsou řádově miliardy let. Aktivita je nepřímo úměrná poločasu rozpadu, takže aktivita paliva je poměrně malá. Rozštěpením uranu v reaktoru vznikají izotopy, které mají mnohem kratší poločasy rozpadu T , tj. větší rozpadovou konstantu λ a tedy i větší aktivitu A .

Plyn radon není jedovatý. Patří mezi vzácné plyny, které téměř chemicky nereagují. Přesto se jeho výskyt pečlivě sleduje a snažíme se jeho množství v bytech snižovat. Proč? Jak je nebezpečný? Odkud pochází?

Nejčastěji se v přírodě vyskytuje izotop radonu ^{222}Rn , který je součástí rozpadové řady uranu ^{238}U . Radon opravdu chemicky téměř nereaguje, není tedy nebezpečný „jako jed“ tím, že by chemicky reagoval s molekulami v organismu. Ale jádro radonu není stabilní a rozpadá se s poločasem rozpadu asi 4 dny. Tento plyn se hromadí v podzemí, v nevětraných prostorách a dostává se i do podzemních vod. V bytech je jeho zdrojem podloží (půda) a použité stavební materiály (přírodní kámen, v některých starších domech prefabrikáty z elektrárenských popílků, ...). Množství radonu se pečlivě sleduje a podrobné mapy jeho koncentrace můžete najít na stránkách Státního ústavu radiační ochrany (www.suro.cz). Záření radonu je jedním z největších příspěvatelů k roční efektivní dávce.

Izobary = nuklidy se stejným hmotnostním (nukleonovým číslem), tj. nuklidy s téměř stejnou hmotností, např. $^{12}_5\text{B}$, $^{12}_6\text{C}$, $^{12}_7\text{N}$ a další.

Izomer daného nuklidu = nuklid s jádrem v excitovaném stavu, který je metastabilní (tj. má relativně dlouhou dobu života).^{*13}

Lehký vodík = nejběžnější izotop vodíku, jeho jádrem je jediný proton, tj. vodík ^1_1H .

Deuteron = jádro deuteria, **deuterium** = vodík ^2_1H , tj. atom s jedním elektronem a jádrem, které se skládá z neutronu a protonu. Někdy se mu také říká „těžký vodík“ a používá se pro něj značka D, tj. ^2_1D .

Tritium [trícium] = „ještě těžší“ vodík ^3_1H , někdy se pro něj používá značka T.

^{*13} Pro jádro existuje kromě kapkového modelu (viz aktivita Štěpení jádra v brožurě Jaderné hrátky) i tzv. slupkový model, ve kterém si představujeme, že protony a neutrony obsazují jednotlivé energetické hladiny obdobně jako elektrony v atomovém obalu. V izomerech je tedy nějaký proton nebo neutron excitován na hladinu s vyšší energií, toto označení má smysl jen ve spojení s nuklidem v základním stavu. Slupkový model jádra také vysvětluje existenci magických čísel, tj. toho, proč jsou některá jádra stabilnější než jiná, podobně veliká.

KOLIK ENERGIE DÁVÁ JADERNÁ ELEKTRÁRNA?

V této kapitole se pokusíme získat lepší představu o množství energie, které získáváme v jaderné elektrárně. Celá aktivita se skládá ze dvou oddělitelných částí. V první části se společně se studenty pokusíte z technických parametrů jaderné elektrárny spočítat, zda její udávaný výkon, případně energie, kterou dodá do elektrické sítě za rok, odpovídají vám známým základním fyzikálním principům. V druhé části se studenti pokusí získat představu o „velikosti“ energie dodané elektrárnou na základě porovnání s jinými formami energie a jejími přeměnami.

VÝKON JADERNÉ ELEKTRÁRNY

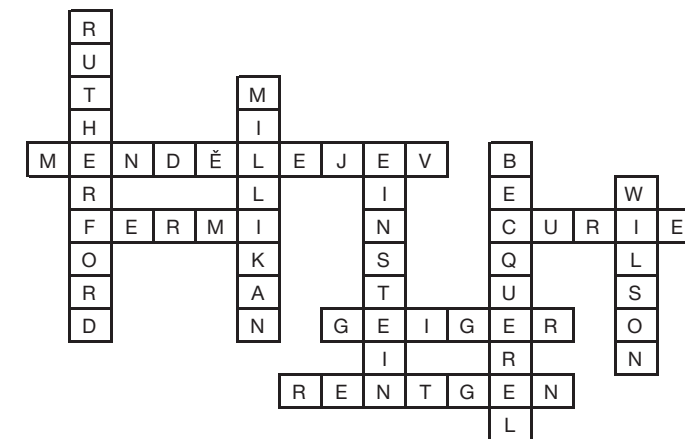
Na následující stránce naleznete pracovní list pro studenty s postupem, jak spočítat množství energie, které jsme schopni získat štěpením jader uranu v jaderných elektrárnách, na konkrétním příkladu JE Dukovany. Technické parametry reaktoru a další údaje mohou studenti vyhledat sami, můžete jim společně s pracovním listem nakopírovat jejich vhodný přehled*¹⁴ či jim nezbytné údaje dát k dispozici jiným způsobem. Přehled nutných údajů naleznete v komentovaném řešení pracovního listu, který je uveden dále.

Pokud máte velmi šikovné studenty, můžete jim úlohu předložit jako otevřený problém bez pracovního listu: Ověřte, že uváděné množství energie, které vyrobila jaderná elektrárna Dukovany za minulý rok, odpovídá množství spotřebovaného paliva.

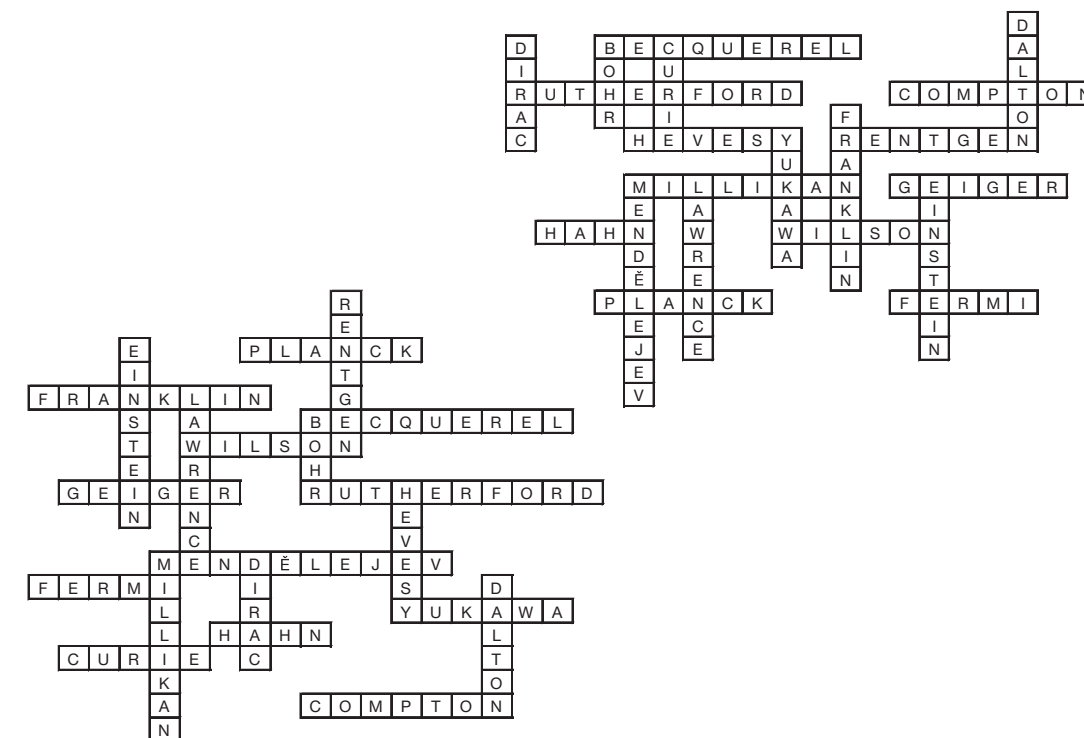
*14 Přehledně lze veškeré technické parametry JE Dukovany najít např. v příloze Národní zprávy ČR pro účely Úmluvy o jaderné bezpečnosti z roku 2004 (www.sujb.cz/?c_id=279, konkrétně v příloze 1 na adrese www.sujb.cz/docs/NZ_Priloha1.pdf).

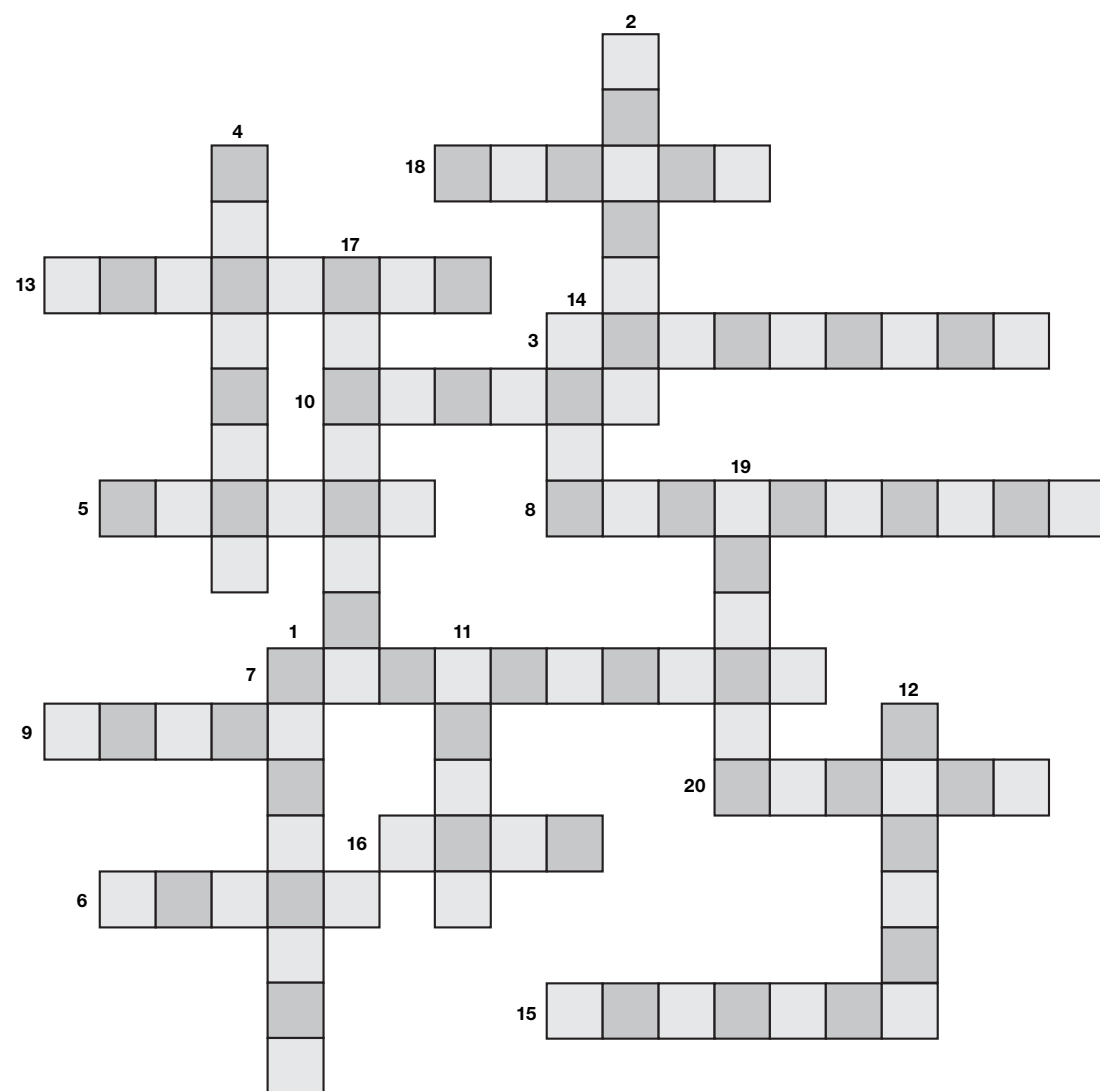
ŘEŠENÍ KŘÍŽOVEK

Pro základní sadu:



Pro obě sady:





ROZUMÍME VÝKONU JADERNÉ ELEKTRÁRNY















Možná jste už někde slyšeli, že jaderná elektrárna Dukovany vyrobí ročně asi 14 TWh elektrické energie. Také víme, že energie se v jaderné elektrárně získává štěpením jader uranu $^{235}_{92}\text{U}$. Pojďme teď společně spočítat, že energie, kterou tato elektrárna „vyrobí“, odpovídá množství spotřebovaného paliva.

Postupujte krok po kroku, požadované informace buď vyhledejte v knize, nebo spočítejte na kalkulačce z předchozích hodnot. Během výpočtu budeme pracovat se značně zjednodušeným modelem a přibližnými hodnotami parametrů reaktoru. Naším cílem je řádově odhadnout výkon elektrárny, ne provést detailní výpočet.

Užitečné údaje:

$$m_u = 1 \text{ u} \approx 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

$$1 \text{ eV} \approx 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

-  Kolik paliva je v jednom reaktoru elektrárny Dukovany? t = kg
-  Jaká chemická sloučenina tvoří palivo jaderné elektrárny?
-  Kolik váží 1 molekula této sloučeniny? u = kg
-  Kolik je celkem atomů uranu v reaktoru? atomů
-  Kolik procent atomů uranu odpovídá izotopu ^{235}U (přibližně)? %
-  Kolik atomů uranu ^{235}U je tedy v reaktoru? atomů
-  Kolik energie průměrně získáme rozštěpením 1 jádra ^{235}U ? MeV = J
-  Kolik energie bychom získali rozštěpením všech jader ^{235}U v reaktoru? J
-  Jak dlouho je palivo v reaktoru? r
-  Kolik energie získáme štěpením v jednom reaktoru za jeden rok? J
-  Na elektrickou energii se přemění asi 30 % této energie, tj. J
-  Kolik reaktorů je v jaderné elektrárně Dukovany? Jsou stejné?
-  Kolik energie by tedy měla vyrobit JE Dukovany za jeden rok? J
-  Porovnejte spočtenou energii s údajem, který uvádí ČEZ a.s.:

$$14 \text{ TWh} = 14 \text{ TWh} \cdot 1 \text{ h} = 14 \cdot \dots \text{ W} \cdot \dots \text{ s} = \dots \text{ W} \cdot \text{s} = \dots \text{ J}$$

ROZUMÍME VÝKONU JADERNÉ ELEKTRÁRNY – ŘEŠENÍ PRACOVNÍHO LISTU

Zde naleznete řešení předchozího pracovního listu včetně několika komentářů a metodických poznámek. Tento text není tedy určen k přímému okopírování žákům, ale měl by být vodítkem pro vás, učitele.

Vzhledem k tomu, že celý mechanismus zisku energie v jaderné elektrárně jsme velmi zjednodušili, je náš výpočet jen orientační a budeme pracovat s přibližnými a zaokrouhlenými hodnotami. Při volbě jiného počtu platných míst, na které svoje mezivýsledky zaokrouhlíte, mohou vycházet čísla mírně odlišná.

Kolik paliva je v jednom reaktoru elektrárny Dukovany?

42 t = 42 000 kg

Jaká chemická sloučenina tvoří palivo jaderné elektrárny?

UO₂

Kolik váží 1 molekula této sloučeniny?

$(238 + 2 \cdot 16) u = 270 \cdot 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = \mathbf{4,5 \cdot 10^{-25} \text{ kg}}$

Kolik je celkem atomů uranu v reaktoru?

$(42\,000 \text{ kg}) / (4,5 \cdot 10^{-25} \text{ kg}) = 9,3 \cdot 10^{28}$ molekul UO₂, v každé je jeden atom uranu, tj. celkem je v reaktoru **9,3 · 10²⁸ atomů uranu**

Kolik procent atomů uranu odpovídá izotopu ²³⁵U (přibližně)?

přibližně **3 %**

V přírodních sloučeninách uranu se nachází méně než jedno procento izotopu ²³⁵U, většina atomů uranu je izotop ²³⁸U. Při výrobě paliva pro jadernou elektrárnu se ale podíl izotopu ²³⁵U uměle zvětšuje (palivo se obohacuje). V Dukovanech se používá palivo s různým stupněm obohacení. Protože v tomto výpočtu nám jde spíše o odhad daných hodnot, budeme uvažovat tuto přibližnou hodnotu.

Kolik atomů uranu ²³⁵U je tedy v reaktoru?

$0,03 \cdot 9,3 \cdot 10^{28} = \mathbf{2,8 \cdot 10^{27} \text{ atomů } ^{235}\text{U}}$

Kolik energie průměrně získáme rozštěpením 1 jádra ²³⁵U?

asi $200 \text{ MeV} = 200 \cdot 10^6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J} = \mathbf{3,2 \cdot 10^{-11} \text{ J}}$

Kolik energie bychom získali rozštěpením všech jader ²³⁵U v reaktoru?

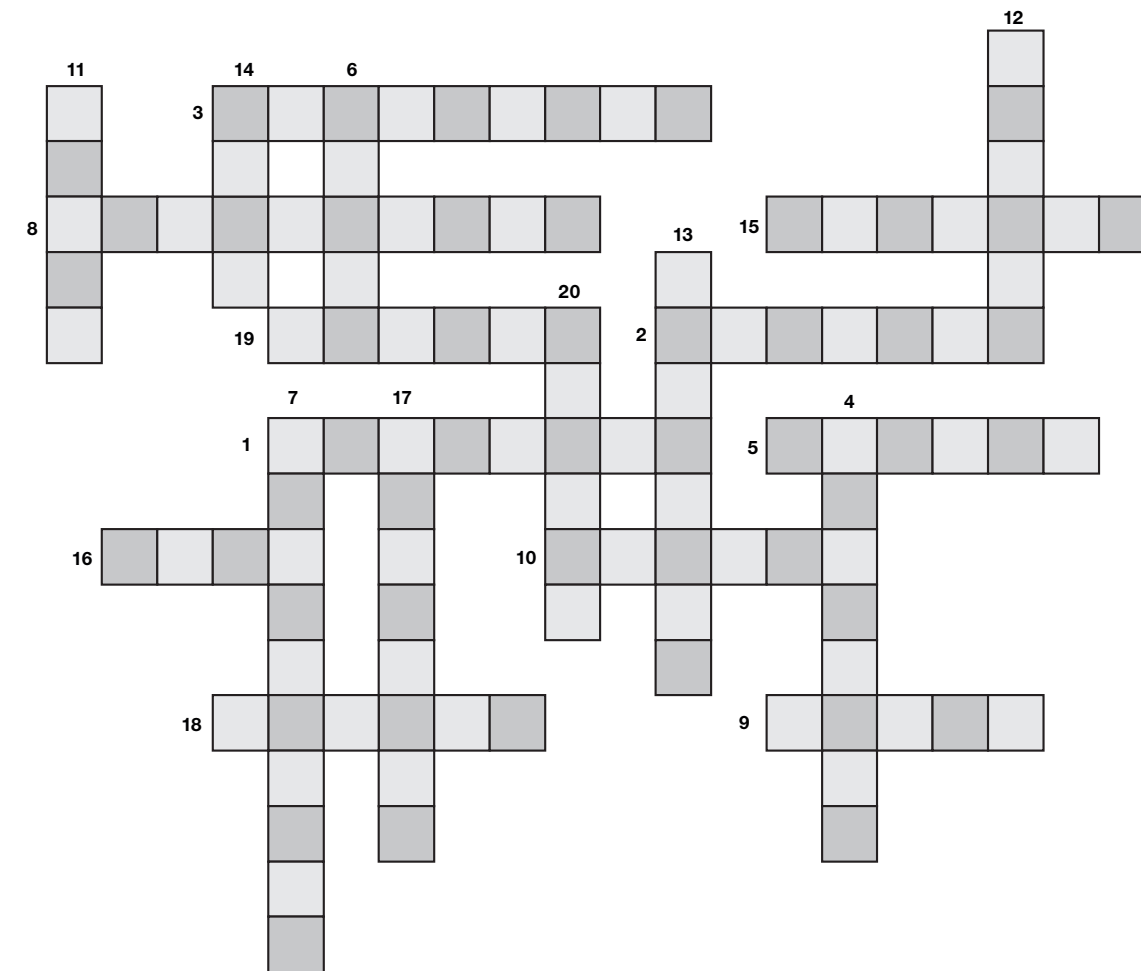
$(2,8 \cdot 10^{27}) \cdot (3,2 \cdot 10^{-11} \text{ J}) = \mathbf{9,0 \cdot 10^{16} \text{ J}}$

Jak dlouho je palivo v reaktoru?

4 r

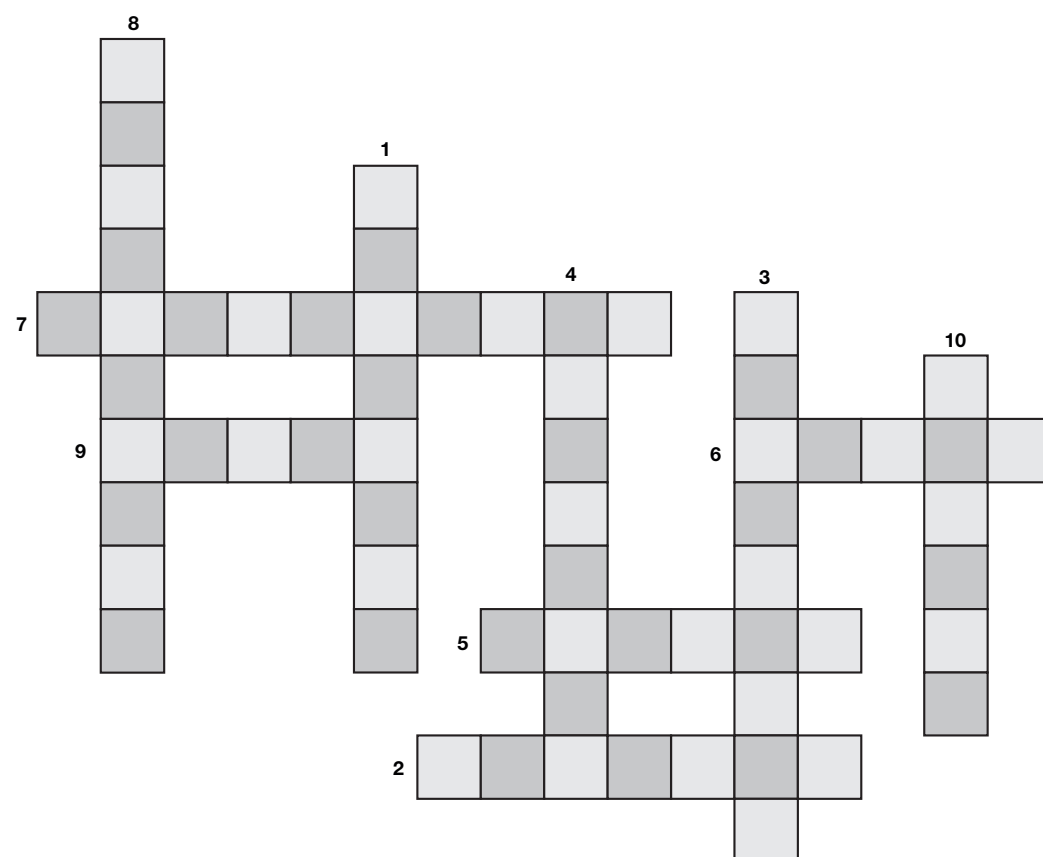
S palivem se v reaktoru hýbe každý rok při tzv. odstávce na výměnu paliva. Při této příležitosti je asi čtvrtina paliva vyměněna za nové a zbytek se dle potřeby přerovná. Průměrně tedy je palivová tyč v reaktoru 4 roky. Postupně JE Dukovany přechází na pětiletý cyklus výměny paliva.

Pro obě sady:



KŘÍŽOVKY

Pro základní sadu:



Kolik energie získáme štěpením v jednom reaktoru za jeden rok?

$$(9,0 \cdot 10^{16} \text{ J}) / 4 = \mathbf{2,3 \cdot 10^{16} \text{ J}}$$

Na elektrickou energii se přemění asi 30 % této energie, tj.

$$0,3 \cdot 2,3 \cdot 10^{16} \text{ J} = \mathbf{0,69 \cdot 10^{16} \text{ J}}$$

Kolik reaktorů je v jaderné elektrárně Dukovany? Jsou stejné?

4

Jaderná elektrárna Dukovany má 4 bloky, každý obsahuje reaktor VVER 440. Původně byla v každém bloku turbína o výkonu 440 MW, v roce 2005 byl zvýšen dosažitelný výkon turbíny 3. bloku na 456 MW a v roce 2007 se očekává stejná změna i na bloku č. 4.

Kolik energie by tedy měla vyrobit JE Dukovany za jeden rok?

$$4 \cdot 0,69 \cdot 10^{16} \text{ J} = \mathbf{2,8 \cdot 10^{16} \text{ J}}$$

Porovnejte spočtenou energii s údajem, který uvádí ČEZ a. s.:

$$14 \text{ TWh} = 14 \text{ TW} \cdot 1 \text{ h} = 14 \cdot 10^{12} \text{ W} \cdot 3600 \text{ s} = 5,0 \cdot 10^{16} \text{ W} \cdot \text{s} = \mathbf{5,0 \cdot 10^{16} \text{ J}}$$

Z výsledků vidíme, že i z poměrně jednoduchého výpočtu „teoretického výkonu“ jaderné elektrárny nám vyšla hodnota, která se řádově shoduje s udávanou hodnotou. Výpočet byl velmi zjednodušen^{*15} – např. v reaktoru se rozhodně nerozštěpí veškerý ²³⁵U, několik desítek procent původního množství ho zůstává ve vyhořelém palivu. Jak jsme viděli v předchozí kapitole Fúze nebo štěpení?, tak hodnota 200 MeV zahrnuje i energii, kterou získáme při následných rozpadech produktů štěpení. Tyto rozpady také nemusí proběhnout v reaktoru všechny. Navíc neuvažujeme to, že část uvolněné energie nedokážeme využít (např. cca 5 % odnášejí neutrina).

A teď si uvědomme, že zahrnutí těchto efektů spočtenou energii zmenšuje. A nám vyšla teoreticky spočtená energie nižší než je skutečný výkon JE Dukovany. **Co je dalším zdrojem energie JE Dukovany? Nebo snad vyrábějí „energii z ničeho“?** Zkuste tuto otázku zdramatizovat i se studenty a hledat vysvětlení. Provéřt každý krok výpočtu či úvahy, hledat jejich slabiny, vytvářet hypotézy, co by mohlo být jinak či na co jsme mohli při výpočtu zapomenout.

Ve skutečnosti probíhá v reaktoru mnoho různých jaderných reakcí, jejichž detailní výpočet je velmi komplikovaný. Jedním z nejdůležitějších procesů, který jsme do našich úvah nezahrnuli, je získání energie ze štěpení jiných jader než ²³⁵U. V reaktoru je velké množství jader U, která pohlcují neutrony.^{*16} Vznikají z nich tak další nové nuklidy, z nichž některé jsou štěpitelné a v reaktoru opravdu dochází k jejich štěpení (např. ²³⁹Pu, ²⁴¹Pu). Přispívají tak nezanedbatelně k získané energii. Tyto štěpitelné izotopy jsou také součástí vyhořelého paliva a mohou být po přepracování paliva znovu využity.

^{*15} Podrobně je fyzika i technický popis reaktorů uveden v knize *Jaderné reaktory* od Bedřicha Heřmanského (SNTL, Praha, 1981).

^{*16} V tepelných reaktorech, mezi které dukovanské lehkovodní reaktory VVER 440 patří, téměř nedochází ke štěpení jader ²³⁸U. Tyto jádra lze dobře štěpit pouze rychlými neutrony, kterých se v reaktoru produkuje poměrně málo a navíc jsou zpomalovány moderátorem.

POROVNÁVÁME MNOŽSTVÍ ENERGIE

JE Dukovany vyrobí asi 14 TWh elektrické energie za rok, což je sice konkrétní číslo, ale asi příliš názornou představu o množství získané energie nedává. Můžeme se ptát sami sebe nebo studentů: Je to hodně energie nebo málo? Nejvhodnější by bylo získanou energii porovnat s nějakými jinými „zdroji“ či „spotřebiči“ energie.*¹⁷ V učebnicích či sbírkách příkladů naleznete velmi často úlohu spočítat množství uhlí, které by se muselo spálit v uhelné elektrárně o stejném výkonu. Zkusme pojmut přiblížení „velikosti“ výkonu jaderné elektrárny trochu netradičněji. Nechte studenty vymyslet nějaké „zdroje“ nebo „spotřebiče“ energie. Jakékoli. Potom ať spočítají, z jakého množství (hmotnosti, objemu, kusů, ...) by získali stejné množství energie, případně na co by spotřebovali stejné množství energie, jako získáme v jaderné elektrárně např. za 1 minutu.*¹⁸ Získaná množství můžete dále přepočítávat na nějaké představitelnější jednotky – vagóny uhlí, plochu lesa, ujetou vzdálenost, viz řešené příklady dále.

Příklady možných „zdrojů“ a „spotřebičů“ energie

- kolik tatraneč (cukru, tuku, ...) musím sníst, abych přijala stejné množství energie, kterou by moje tělo umělo využít, kolik tříd jako je ta naše by tyto tatranky vyplnily
- kolik plných nádrží benzínu by bylo třeba natankovat do auta
- kolik dřeva (biomasy) by bylo třeba spálit, jaké ploše lesa (pole) by to odpovídalo*¹⁹
- jak dlouho by na tuto energii svítila 100 W žárovka, kolik žárovek bychom museli koupit, jestliže by průměrná životnost žárovky byla 1000 hodin (nebo můžeme počítat s „úspornou žárovkou“ o stejné svítivosti)
- kolikrát lze ohřát vodu v rychlovarné konvici, kolik van by tato voda vyplnila
- jakou vzdálenost bychom urazili a jak dlouho bychom mohli jezdit automobilem
- kolik rodin se stejnou průměrnou spotřebou elektrické energie, jako má vaše rodina, může JE Dukovany zásobovat, kolika městům jako je to vaše (případně jaké jeho části) by to odpovídalo

Studenti jistě vymyslí mnoho dalších příkladů.

V této aktivitě platí více než v kterékoli jiné, že každý nápad je dobrý. Nebojte se podněcovat fantazii studentů. Čísla, se kterými se zde manipuluje, jsou příliš velká nebo naopak příliš malá, a proto velmi těžko představitelná. Je proto vhodné provést různá přirovnání a např. i množství tatraneč přepočítat třeba na počet kamionů naložených tatrankami, dobu, za kterou bychom je byli schopni sníst, apod. **Každému člověku může pomoci při vytváření názorné a realistické představy o poměrech různých druhů energie přirovnání k něčemu jinému.**

*¹⁷ Zákon zachování energie nám sice zcela jasně říká, že energii nelze ani vyrábět, ani spotřebovávat, ale v běžné řeči se často mluví o výrobě elektrické energie v elektrárnách či o spotřebě energie v domácnostech. Proto sice budu v dalším textu používat běžné formulace, ale uvozovkami zdůrazním a připomenou, že se vždy jedná jen o přeměnu jedné formy energie na jinou.

*¹⁸ 1 minuta je zde zvolena jako dobře představitelný časový úsek: 14 TWh/rok = 27 MWh/min = 96 GJ/min, stejné výpočty lze provádět i pro jiné doby.

*¹⁹ Vlastnosti různých druhů paliv lze najít v databázi Energetického informačního systému www.eis.cz. Nachází se zde mnoho zajímavých informací, které mají vztah ke spotřebě a úspoře energie.

<p>Otto Hahn (1879–1968)</p>	<p>16 Německý fyzik, který jako první v roce 1938 ostřelováním neutrony rozdělil jádro uranu na dvě, zhruba stejně velké části. Vysvětlení a název „štěpení“ pochází od jeho kolegyně Lisy Meitnerové.</p>
<p>Ernest Orlando Lawrence (1901–1958)</p>	<p>17 Americký fyzik, který postavil první kruhový urychlovač částic – cyklotron, urychlující protony na rychlost dostatečnou k rozštěpení atomového jádra. První zařízení bylo sestaveno z kusů plechu, skla, drátu a poslepováno pečutním voskem – v celkové ceně několika desítek dolarů.</p>
<p>Max Karl Ernst Ludwig Planck (1858–1947)</p>	<p>18 Německý fyzik, zakladatel kvantové teorie. Pomocí hypotézy o kvantování energie se mu podařilo popsat a vysvětlit tepelné záření těles. Byl také velmi hudebně nadaný, miloval operu a hrál na několik hudebních nástrojů.</p>
<p>George de Hevesy (1885–1966)</p>	<p>19 Fyzik maďarského původu, který vymyslel metodu radioaktivního stopování – k nějakému prvku přidáme malé množství jeho radioaktivního izotopu, jehož záření odhalí, kam se tento prvek dostává. Údajně takto odhalil, že jeho bytná mele nedojedené maso druhý den do karbanátků.</p>
<p>Hideki Yukawa (1907–1981)</p>	<p>20 Japonský fyzik, který předpověděl existenci mezonů – částic, jejichž hmotnost je větší než hmotnost elektronu, ale menší než hmotnost protonu. Pomocí nich vysvětlil, proč drží atomové jádro pohromadě.</p>

ROZŠÍŘUJÍCÍ SADA

<p>Paul Adrien Maurice Dirac (1902–1984)</p>	<p>11 Dokázal „smířit“ kvantovou mechaniku popisující velmi malé věci a speciální teorii relativity, která popisuje velmi rychlé objekty. Z rovnic mu vyšlo, že musí existovat antičástice – tedy částice lišící se od běžných částic znaménkem náboje. Později se je podařilo najít i experimentálně.</p>
<p>John Dalton (1766–1844)</p>	<p>12 Anglický učitel, který je považován za otce novodobé atomové teorie. Zjistil, že atomy jednoho prvku mají stejnou hmotnost a atomy různých prvků se svými hmotnostmi liší. Zajímal se také o meteorologii, vlastnosti kapalin a plynů a barvoslepost, kterou sám trpěl.</p>
<p>Benjamin Franklin (1706–1790)</p>	<p>13 Americký politik, přírodovědec a spisovatel – experimentoval s atmosférickou elektřinou (pomocí papírových draků) a tím se mu podařilo dokázat, že existují dva druhy elektrického náboje, kterým začal říkat kladný a záporný. Sestrojil bleskosvod.</p>
<p>Niels Henrik David Bohr (1885–1962)</p>	<p>14 Dánský fyzik – jeden ze zakladatelů kvantové fyziky. Upravil klasický (planetární) model atomu zavedením povolených drah, na kterých elektrony nevyzařují energii. Kromě fyziky také výborně hrál fotbal, ale do dánské olympijské reprezentace se dostal pouze jeho bratr.</p>
<p>Artur Holly Compton (1892–1962)</p>	<p>15 Americký fyzik – pozoroval a vysvětlil rozptyl rentgenového záření na volných elektronech. Jeho výsledky ukazovaly, že elektromagnetické záření má zároveň vlnové i částicové vlastnosti.</p>

Skutečnost, že studenti budou pracovat se svými vlastními nápady a možná se také trochu předhánět v originalitě nápadů, zvýší jejich motivaci problém vyřešit.

ŘEŠENÍ DVOU PŘÍKLADŮ

Dále je uvedeno řešení dvou příkladů možných porovnání. Berte je spíše jako námět, jak pracovat s návrhy studentů, než jako daný postup, který studentům ukážete. Stejně jako v první části této kapitoly se nejedná o přesné výpočty, ale spíše o řádové odhady, které nám mají pomoci udělat si představu o velikosti daného čísla. Potřebné údaje pro výpočty mohou studenti vyhledat v tabulkách, knihách či na internetu (upozorněte je na nutnost ověřit si správnost údajů uváděných na internetu) nebo jejich hodnotu alespoň zhruba změřit, resp. odhadnout. Vyhledání konkrétních údajů, provádění odhadů i výpočtů nechte provádět samotné studenty, pouze směřujte jejich snažení.

Tatranky

Údaje na tatrance: energetický obsah 100 g výrobku je 2300 kJ, hmotnost 50 g, z jedné tatranky tedy získáme energii přibližně $1200 \text{ kJ} = 1,2 \cdot 10^6 \text{ J}$.

V jaderné elektrárně Dukovany vyrobí za 1 minutu $96 \text{ GJ} = 9,6 \cdot 10^{10} \text{ J}$ elektrické energie, což odpovídá $9,6 \cdot 10^{10} / 1,2 \cdot 10^6 = 80\,000$ tatrankám. To není málo. Zkuste si spočítat, jak dlouho byste jedli „minutovou produkci elektrické energie JE Dukovany“, pokud by byla uložena v tatrankách.

Hmotnost všech tatranek: $80000 \cdot 50 \text{ g} = 4 \text{ tuny}$

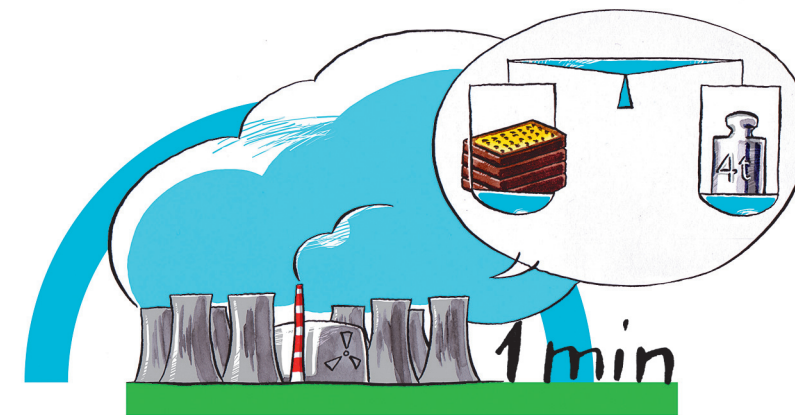
Rozměry tatranky: 11,5 cm, 4,5 cm, 1,5 cm,

Objem tatranky = $11,5 \cdot 4,5 \cdot 1,5 \text{ cm}^3 = 78 \text{ cm}^3 = 78 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$

Objem všech tatranek: $80000 \cdot 78 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 = 6,2 \text{ m}^3$

Rozměry třídy (konkrétní třídu je třeba změřit!): 8 m, 6 m, 3 m, objem třídy = 144 m^3

Tatranky s energií odpovídající 1 minutě provozu Dukovan tedy třídu nevyplní.



Pokryjeme jimi podlahu?

1 vrstva tatranek na podlaze (tatranky klademe na podlahu největší stranou) = počet tatranek v řádku krát počet tatranek ve sloupečku = $(8 \text{ m}/0,115 \text{ m}) \cdot (6 \text{ m}/0,045 \text{ m}) = 69 \cdot 133 = 9200$ tatranek v jedné vrstvě na podlaze třídy.

počet vrstev = $80000/9300 = 8,6$

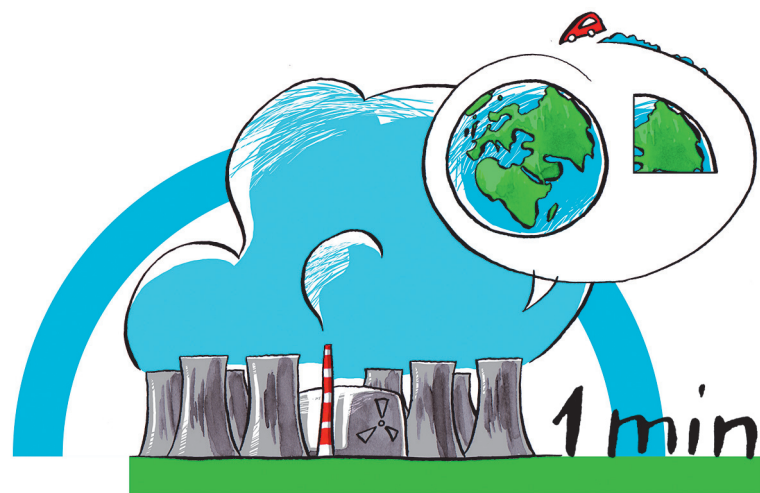
Tatrankami se stejnou využitelnou energií, jakou vyrobí JE Dukovany za 1 minutu, bychom pokryli podlahu v naší třídě více než osmkrát. Pokud by JE Dukovany tyto tatranky produkovala, tak naši třídu vyplní přibližně za $(144/6,2) \text{ min} = 23 \text{ min}$.

Benzín a jízda autem

Údaje z tabulek: měrné spalné teplo benzínu*²⁰: 46 MJ/kg, hustota benzínu asi 700 kg/m³

V jaderné elektrárně Dukovany vyrobí za 1 minutu $96 \text{ GJ} = 9,6 \cdot 10^{10} \text{ J}$ elektrické energie, což odpovídá teplu získanému spálením asi $(9,6 \cdot 10^{10}/46 \cdot 10^6) \text{ kg} = 2100 \text{ kg}$, tj. $(2100/700) \text{ m}^3 = 3,0 \text{ m}^3 = 3\ 000$ litrů benzínu.

Představitelem osobního automobilu pro další výpočty jsme zvolili Škodu Fabia, dle údajů výrobce má toto auto objem nádrže 45 l a průměrnou spotřebu 6 litrů na 100 km.



*²⁰ Teplo získané spálením benzínu závisí na jeho složení i způsobu spalování. Také je otázkou, zda bychom na tomto místě měli uvažovat měrné spalné teplo nebo výhřevnost. Vzhledem k tomu, že obě uvedené hodnoty si jsou velmi blízké a děláme pouze orientační výpočty (ne o mnoho přesnější než řádové odhady), můžeme si dovolit tyto detailní úvahy ponechat stranou.

<p>Marie Curie (1867–1934)</p>	<p>6 Původem polská fyzička, která společně se svým manželem objevila radium a polonium – dva nové radioaktivní prvky. Několik miligramů těchto prvků získala (izolovala) z několika tun horniny zvané smolinec, kterou si nechala do Paříže dovážet z českého Jáchymova.</p>
<p>Dmitrij Ivanovič Mendělejev (1834–1907)</p>	<p>7 Ruský fyzik a chemik, který uspořádal v té době známé chemické prvky do tabulky a pro zatím neobjevené nechal volná místa, která se později postupně zaplňovala nově objevenými prvky.</p>
<p>Ernest Rutherford (1871–1937)</p>	<p>8 V roce 1911 společně se svými studenty proměřil, jak se odchylojí částice alfa při průchodu zlatou fólií, a zjistil, že atom je vlastně „skoro“ prázdný až na malinkaté jádro uprostřed, které tak objevil. V praktickou využitelnost jaderné energie sám ale nevěřil.</p>
<p>Enrico Fermi (1901–1954)</p>	<p>9 Italský fyzik, později před fašismem emigroval do USA. Experimentoval s pomalými neutrony (údajně i v zahradní fontánce se zlatými rybičkami) a v roce 1942 sestavil a spustil první pokusný jaderný reaktor ve sportovní hale Chicagské university.</p>
<p>Charles Thomson Rees Wilson (1869–1959)</p>	<p>10 Skotský fyzik, který sestrojil mlžnou komoru – přístroj, který umožňuje zviditelnit dráhu částic pomocí malinkých kapiček, které za nimi vznikají při průletu podchlazenými parami.</p>

ZÁKLADNÍ SADA

Robert Andrews Millikan (1868–1953)	1 Americký fyzik, který pozorováním pohybu malých nabitých kapiček oleje změřil velikost náboje elektronu.
Wilhelm Conrad Röntgen (1845–1923)	2 Německý objevitel neznámých paprsků, které pojmenoval paprsky X. Později byly pojmenovány jeho jménem. Tyto paprsky mu umožnily „vyfotografovat“ kostru ruky své manželky (na obrázku je kromě kostí vidět i její prsten).
Antoine Henri Becquerel (1852–1908)	3 Francouzský objevitel radioaktivity. Nejprve se domníval, že neviditelné záření vycházející z uranové horniny je nový typ fosforescence (světélkování po osvětlení světlem). Když hornina „zářila“ stejně silně i po několika dnech strávených v tmavé zásuvce, uvědomil si, že se jedná o něco jiného, zatím neznámého.
Albert Einstein (1879–1955)	4 Německý fyzik, autor teorie relativity, jejíž součástí je asi nejslavnější fyzikální vzorec $E = mc^2$. Protože byl židovského původu, musel odejít před nacisty do USA. Do konce svého života nepřijal správnost kvantové fyziky.
Johannes (Hans) Wilhelm Geiger (1882–1945)	5 Německý fyzik – ještě jako student proměřoval rozptýl alfa částic na zlaté fólii a pomohl tak objevit atomové jádro. Později společně se svým kolegou Waltherem Müllerem sestrojili detektor jednotlivých částic – procházející částice v něm ionizuje plyn, čímž vytvoří elektrický signál.

To znamená, že energie vyrobená za 1 minutu v JE Dukovany odpovídá 67 plným nádržím a ujeté vzdálenosti $(3000/6) \cdot 100 \text{ km} = 50$ tisíc kilometrů (to je jeden a čtvrt obvodu zeměkoule). Při průměrné rychlosti 100 km/h bychom tuto vzdálenost jeli bez přestávky 21 dní.

V předchozích výpočtech jsme porovnávali elektrickou energii vyrobenou v JE Dukovany s teplem získaným spálením benzínu. Porovnejme stejným způsobem ještě teplo získané štěpením uranu s teplem získaným spálením benzínu. Víme, že účinnost převodu tepla na elektrickou energii je asi 30 %. Tj. za 1 min vznikne štěpením uranu $96 \text{ GJ}/0,3 = 320 \text{ GJ}$ tepla, což odpovídá $7\,000 \text{ kg} = 9,9 \text{ m}^3 = 9\,900$ litrům benzínu. To je 220 nádrží Škody Fabia, ujetá vzdálenost 165 000 km a doba jízdy asi 69 dní bez přestávky.

ZÁVĚREČNÉ SHRNUTÍ

Na závěr aktivity je dobré nechat každého studenta vybrat pro něj nejnázornější příměr, který mu přiblíží množství energie, které získáme jaderným štěpením.

RADIOAKTIVNÍ KALENDÁŘ

Archeologové používají při určování stáří některých nálezů organického původu tzv. **radiouhlíkovou metodu**. Tuto metodu objevil v padesátých letech minulého století Američan Williard Frank Libby. Za tento objev obdržel v roce 1960 Nobelovu cenu za chemii.

Radiouhlíková metoda je založena na tom, že v atmosféře je kromě běžného a stabilního izotopu uhlíku ^{12}C i malé množství radioaktivního izotopu ^{14}C , který vzniká ve vrchních vrstvách atmosféry ostřelováním atomů dusíku ^{14}N neutrony z kosmického záření. Příslušnou jadernou reakci můžeme zapsat takto: $^{14}_7\text{N} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^{14}_6\text{C} + {}^1_1\text{p}$. Radioaktivní izotop ^{14}C se rozpadá beta rozpadem ($^{14}_6\text{C} \rightarrow {}^{14}_7\text{N} + {}^0_{-1}\text{e}^- + \bar{\nu}$) s poločasem rozpadu 5 730 let.*²¹

Radioaktivního uhlíku ^{14}C je v atmosféře velmi málo. Poměr obou izotopů je asi 10^{-12} , tj. jeden radioaktivní uhlík připadá přibližně na milion milionů neradioaktivních. Zdá se, že poměr obou izotopů byl dlouhodobě konstantní, tedy že ^{14}C vzniká „stejně rychle“, jako se rozpadá.

Z chemického hlediska jsou ale oba izotopy uhlíku zcela totožné. Pro chemické reakce a tvorbu molekul je totiž důležitý pouze elektronový obal atomu, který mají oba izotopy stejný. To, že v malinkatém jádře uprostřed atomu jsou dva neutrony navíc, prakticky neovlivní „pohyb“ elektronů kolem jádra.

Rostliny získávají uhlík jako základní surovinu pro svůj růst a existenci převážně ze vzduchu (přesněji z CO_2 , který je obsažen ve vzduchu). Odtud ale čerpají směs obou izotopů. Dokud žijí (a dýchají), tak se v jejich těle udržuje poměr obou izotopů stejný jako v atmosféře. Zvířata získají „stavební“ uhlík z potravy, kterou tvoří čerstvě usmrcené rostliny nebo jiní živočichové. Tedy i v tělech zvířat je poměr stabilního a radioaktivního uhlíku stejný jako v atmosféře.

V okamžiku úmrtí organismus přestane vyměňovat látky s okolím. To znamená, že atomy uhlíku, ze kterých je vytvořeno jeho tělo, se již nemohou vyměnit s jinými atomy. Izotop ^{12}C je stabilní a v těle zůstane, ale izotop ^{14}C se postupně rozpadá = „ztrácí se“. Za každých 5 730 let se rozpadne právě polovina jader uhlíku ^{14}C na dusík. To znamená, že se mění poměr počtu atomů obou izotopů.

Jestliže tedy archeologové chtějí zjistit, jak stará je např. nalezená kost, změří v ní současný poměr zastoupení obou uvedených izotopů uhlíku. Z toho určí, kolik ^{14}C z původního množství v ní ještě zbývá, a podle toho zjistí, kdy asi daný organismus zemřel. Vzhledem k tomu, že jde o měření velmi malých množství ^{14}C , jedná se o technicky velice náročné měření.

*²¹ Při beta rozpadu se v jádře jeden neutron přemění na proton, elektron (tomu se z historických důvodů také říká částice beta) a antineutrino. Proton zůstává v jádře, čímž se zvýší náboj jádra, což znamená, že se atom změní na atom jiného prvku. Elektron a antineutrino z jádra „vylétnou“.

HRDINOVÉ JADERNÉ FYZIKY

Tato kapitola je zaměřena na slavné osobnosti, které přispěly k rozvoji atomové nebo jaderné fyziky. Měla by ukázat studentům, že fyzikální objevy dělají lidé.

„PEXESO“

Kartičky na následující stránce okopírujte (případně zvětšete) a rozstříhejte. Jsou zde kartičky dvou typů. První obsahují jméno, datum narození a úmrtí fyzika, který významně přispěl k rozvoji jaderné fyziky. Na kartičkách druhého typu jsou velmi stručně popsány objevy těchto vědců, občas doplněné nějakou informací, která se „běžně v učebnicích nepíše“. Tyto informace mají za úkol ztraktivnit informace o objevech, dát daným osobnostem „lidský rozměr“, ale svojí neobvyklostí mohou také vést studenty, ale i vás, učitele, k vyhledání podrobností ze života daného vědce. Úkolem studentů je ve dvojicích nebo v malých skupinkách najít dvojice kartiček, které patří k sobě. Tento úkol se velmi dobře hodí pro opakování v době, kdy již většina uvedených jmen ve vyučování zazněla.

Kartičky jsou rozděleny do dvou sad. První desetičlenná sada obsahuje 10 známějších osobností, se kterými se studenti mohou seznámit i v rámci učiva základní školy. Dále je zde uvedeno dalších 10 jmen jako rozšiřující sada pro pokročilejší studenty.

KŘÍŽOVKA

Příjmení fyziků pouze ze základní sady i z obou sad dohromady jsou sestavena do jednoduchých křížovek, které naleznete včetně řešení na konci této kapitoly. Kartičky s charakteristikami tvoří legendu křížovky. Tuto křížovku můžete použít samostatně a nechat studenty vymýšlet či dohledávat příjmení fyziků. Také ji můžete studentům poskytnout jako pomůcku při sestavování dvojic kartiček.

Metodická poznámka: Tuto aktivitu lze velmi dobře zkombinovat s předcházející aktivitou *Atomové jádro v dějinách*. Studenty pak lze dovést k tomu, že některé věci musejí logicky předcházet jiným a že je také možné se řídit obdobím, ve kterém daní vědci žili. Případně můžete uvést další životopisné podrobnosti a zajímavosti.

Poznámka: Některé okolnosti v pozadí jednotlivých objevů, které jsou použity na následujících kartičkách, patří mezi „historky“, které se uvádějí v knihách a učebnicích. Lze tedy předpokládat, že mají nějaký reálný základ, ale že postupem doby byly pozměněny – jak se tak historikům stává.

VĚDA A TECHNIKA

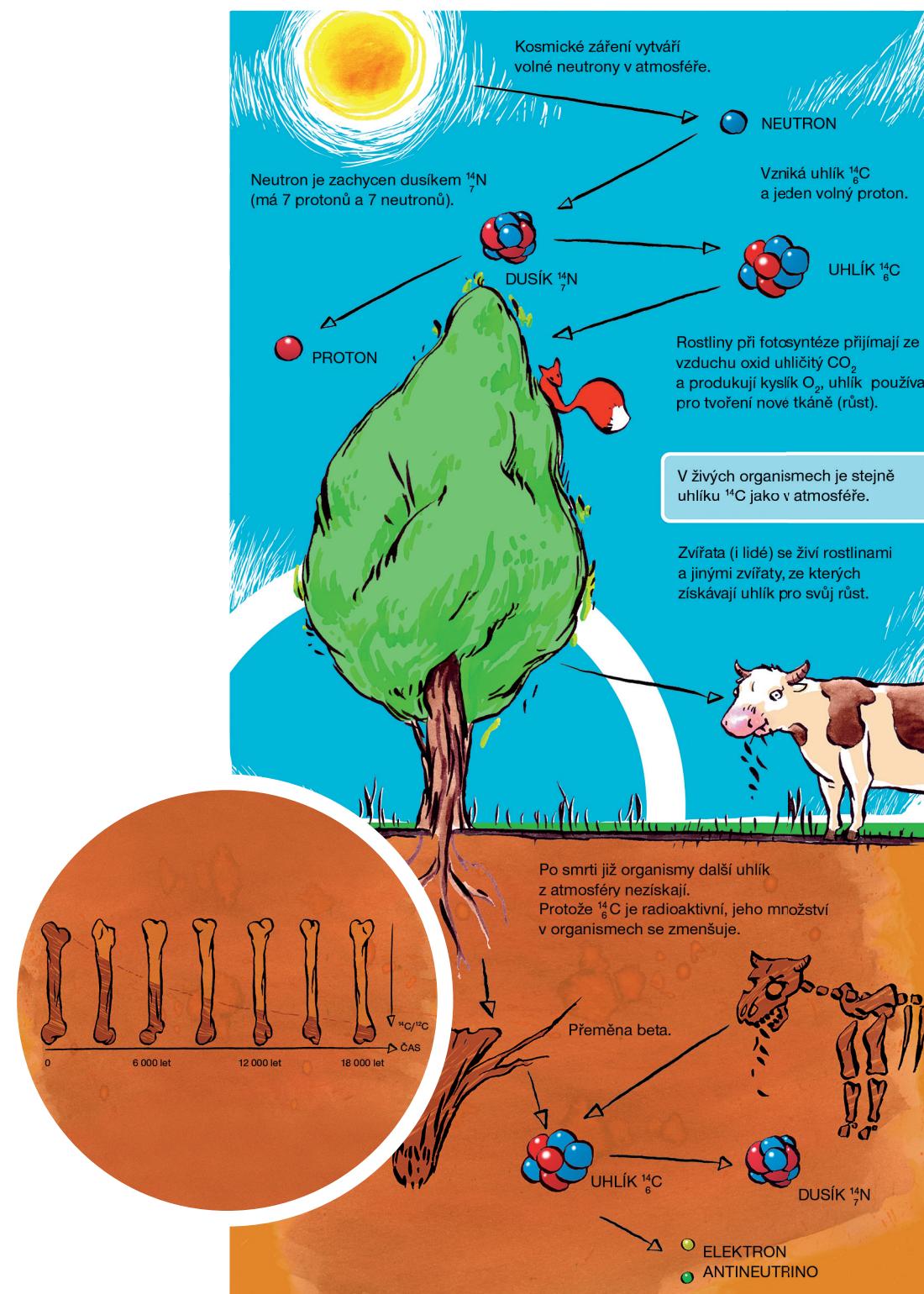
- 1889 Postavena Eiffelova věž
- 1892 Ve Spojených státech je podán patent na jezdící schody.
- 1893 Vytvořen a patentován zip (zdrhovadlo)
- 1905 Albert Einstein uveřejnil speciální teorii relativity.
- 1923 První komerčně prodávané elektrické lednice
- 1928 Objev penicilínu (Alexander Fleming)
- 1954 Začátek pravidelného televizního vysílání na našem území
- 1961 První člověk ve vesmíru
- 1969 První člověk na Měsíci
- 1995 Vytvoření hudebního formátu MP3

SPOLEČNOST

- 1886 John Pemberton poprvé namíchal CocaColu.
- 1887 První lyže v Čechách
- 1896 První novodobé mezinárodní olympijské hry
- 1912 Potopení Titaniku
- 1914 Charlie Chaplin natáčí své první filmy.
- 1938 Vycházejí první sešity Rychlých šípů od Jaroslava Foglara
- 1946 Francouzové Louis Réard a Jacques Heim představují v Paříži první dvoudílné dámské plavky – bikiny.
- 1952 Emil Zátopek získává 3 zlaté olympijské medaile.
- 1965 V televizi běží první Večerníček.
- 1970 Do kin přichází film MASH, na který navázal úspěšný seriál.
- 1977 Natočen první díl hvězdných válek (Star Wars).
- 1985 První případ nemoci AIDS v naší republice

OSOBNÍ UDÁLOSTI

- Moje narození
- Rok narození matky
- Rok narození dědečka
- Rok založení naší školy
- Zavedena kanalizace v našem městě



POPIS ČINNOSTI

Tato kapitola začala textem, který můžete využít k tomu, aby se žáci seznámili se základními principy metody radioaktivního datování. Případně jim můžete text dát k dispozici při řešení úloh této kapitoly.

Celá kapitola slouží jednak jako ukázka použití rozpadového zákona, jednak by měla pomoci studentům pochopit tuto metodu a meze její použitelnosti. Základem celé činnosti je soubor na sebe navazujících úloh, o kterých by studenti měli diskutovat a řešit je nejlépe v malých skupinách. Zadání úloh předpokládá, že studenti mají představu o tom, jak probíhá radioaktivní rozpad (přeměna jader) a co je to poločas rozpadu. K ilustraci tohoto pojmu lze použít například kapitoly z publikace *Jaderné hrátky s názvy Rozpad čochky a Poločas poklesu pивní pěny*.

V následujících úlohách budou studenti mimo jiné převádět koncentraci ^{14}C na stáří vzorku. Pokud znají logaritmy, mohou používat přímo rozpadový zákon. Pokud je neznají nebo si v nich nejsou „příliš jisti“, mohou pro řešení úloh využít tabulku závislosti zbývajícího množství ^{14}C na čase a údaje odhadnout nebo odečíst příslušné údaje z grafů této závislosti. Domnívám se, že i pro starší studenty, kteří již logaritmy probírali, může být použití těchto metod pro kontrolu výpočtu velmi názorné. Také zde uvádím postup, jak si tabulku „zahustit“, tj. přidat mezi dva řádky další a tím získat podrobnější informaci. Pro zajímavost zde také uvádím postup, jak stáří vzorku či koncentraci ^{14}C , které se nacházejí „mezi dvěma známými hodnotami“ dopočítat pomocí lineární interpolace. Ponechávám na vyučujícím, aby se dle schopností svých žáků rozhodl, se kterou metodou (či se kterými metodami) převodu stáří na koncentraci a naopak studenty seznámí. Úlohy lze řešit libovolnou z nich.

Užití zákona radioaktivní přeměny

Zákon radioaktivní přeměny: $N = N_0 2^{-\frac{t}{T}}$, kde N_0 je původní množství radioaktivní látky (v našem případě tedy budeme dosazovat $N_0 = 100\%$), N je množství radioaktivní látky v čase t (vyjde v procentech) a T je poločas rozpadu ($T = 5730$ let, tj. i čas t budeme dosazovat v letech). Pokud potřebujeme naopak ke známému množství N vypočítat stáří t , vyjádříme si t ze zákona radioaktivní přeměny:

$$N = N_0 2^{-\frac{t}{T}} \Rightarrow \frac{N_0}{N} = 2^{\frac{t}{T}} \Rightarrow \log \frac{N_0}{N} = \log 2^{\frac{t}{T}} = \frac{t}{T} \log 2 \Rightarrow t = T \frac{\log \frac{N_0}{N}}{\log 2}$$

Vyhledávání údajů z tabulky

Nechte žáky, aby si připravili tabulku podle následujícího vzoru s asi 12 řádky. Pro konkrétní stáří či koncentraci ^{14}C vyhledají řádky, mezi kterými se nachází, a neznámý údaj odhadnou na základě toho, které krajní hodnotě se známý údaj více přibližuje.

Počet poločasů rozpadu	Čas v letech	Kolik ještě zbývá ^{14}C z původního množství
0	0	100 %
1	5 730	50 %
2	11 460	25 %
...

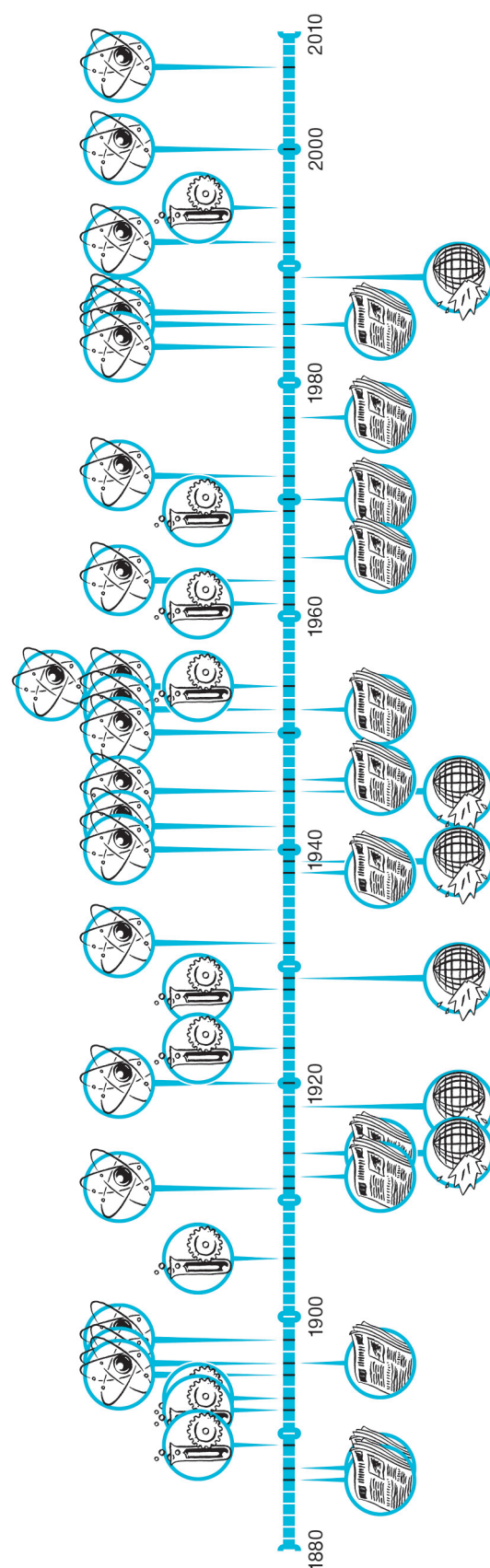
ŘEŠENÍ

JADERNÁ FYZIKA

- 1895 Objev paprsků X, později pojmenovaných po jejich objeviteli rentgenové záření
- 1896 Henry Becquerel objevil přirozenou radioaktivitu.
- 1898 Marie a Pierre Curieovi objevili nový prvek – rádium.
- 1911 Ernest Rutherford experimentálně zjistil, že atom je velmi prázdný, objevil atomové jádro a formuloval planetární model atomu.
- 1920 Ernest Rutherford objevil a pojmenoval proton.
- 1932 James Chadwick objevil neutron.
- 1940 Týmu vědců z Berkeley (Kalifornie) se podařilo poprvé vyrobit plutonium bombardováním uranu neutrony a deuterony a později ho i izolovat.
- 1942 Enrico Fermi se podařilo spustit první řízenou řetězovou štěpnou reakci v prvním pokusném reaktoru na Univerzitě v Chicagu.
- 1945 První použití atomové zbraně
- 1950 První pokusné použití zobrazování pomocí pozitronové emisní tomografie (PET)
- 1952 Pokusný výbuch vodíkové pumy „Mike“
- 1954 Na moře vyjela první ponorka s jaderným pohonem – Nautilus (USA).
- 1954 Byla spuštěna první jaderná elektrárna, která dodávala energii do elektrické sítě (Obninsk jihozápadně od Moskvy, výkon 5 MW).
- 1963 Byla spuštěna 1. jaderná teplárna na světě blízko hlavního města Švédska Stockholmu (Agesta, výkon asi 65 MW).
- 1972 Spuštění jaderné elektrárny A1 v Jaslovských Bohunicích (na území Slovenské republiky)
- 1983 V britském Culhamu spuštěn JET, největší tokamak na světě – první zařízení na principu jaderné fúze vyrábějící energii.
- 1985 Spuštění jaderné elektrárny Dukovany
- 1986 Havárie v jaderné elektrárně Černobyl
- 1992 Do nemocnice Na Homolce v Praze byl zakoupen Leksellův gama nůž.
- 2000 Jaderná elektrárna Temelín dodala do rozvodné sítě první elektrickou energii.
- 2007 Zahájena stavba prvního fúzního reaktoru ITER

HISTORICKÉ UDÁLOSTI

- 1914 Začátek první světové války
- 1918 Konec první světové války
- 1929 Krach newyorské burzy, začátek celosvětové hospodářské krize
- 1939 Začátek druhé světové války
- 1945 Konec druhé světové války
- 1989 Pád komunismu ve střední a východní Evropě



„Zahušťování tabulky“

Vyhledávání v tabulce by bylo přesnější, pokud by mezi jednotlivými řádky nebyly takové rozdíly. Pojďme se tedy společně zamyslet, jak bychom mohli se studenty jednoduše odvodit postup pro vložení řádku mezi dva známé řádky.

Ve sloupečku čas se na další řádek dostanu vždy tak, že přičtu poločas rozpadu – „krok“ zde znamená přičíst 5730. Pokud bych chtěla udělat jen „půlkrok“, tak přičtu jen polovinu, tj. 2865, protože takové dva „půlkroky“ (tj. dvojnásobek přičtení 2865) budou stejné jako jeden „krok“ (přičtení 5730).

Ve sloupečku s množstvím ^{14}C se údaj na novém řádku rovná polovině hodnoty řádku nad ním (tj. „krok“ znamená „vyděl dvěma“). „Půlkrokem“ zde tedy bude dělení odmocninou ze dvou*²², protože platí: $\sqrt{2} \cdot \sqrt{2} = 2$, takže když něco vydělím číslem $\sqrt{2}$ a výsledek znovu vydělím tímto číslem, dostanu přesně polovinu původní hodnoty.

Začátek „zahuštěné tabulky“ bude vypadat následovně.

Počet poločasů rozpadu	Čas v letech	Kolik ještě zbývá ^{14}C z původního množství
0	0	100 %
	2 865	71 %
1	5 730	50 %
	8 595	35 %
2	11 460	25 %
...

Výpočet hodnot „mezi řádky“ tabulky – lineární interpolace

- Nalezneme, mezi kterými dvěma řádky se hledaný údaj nachází
- Údajům v horním řádku budeme říkat: „stáří před“ a „koncentrace před“
- Údajům ve spodním řádku budeme říkat: „stáří po“ a „koncentrace po“
- Podle toho, zda neznáme stáří nebo koncentraci ^{14}C použijeme jeden z následujících vzorců:

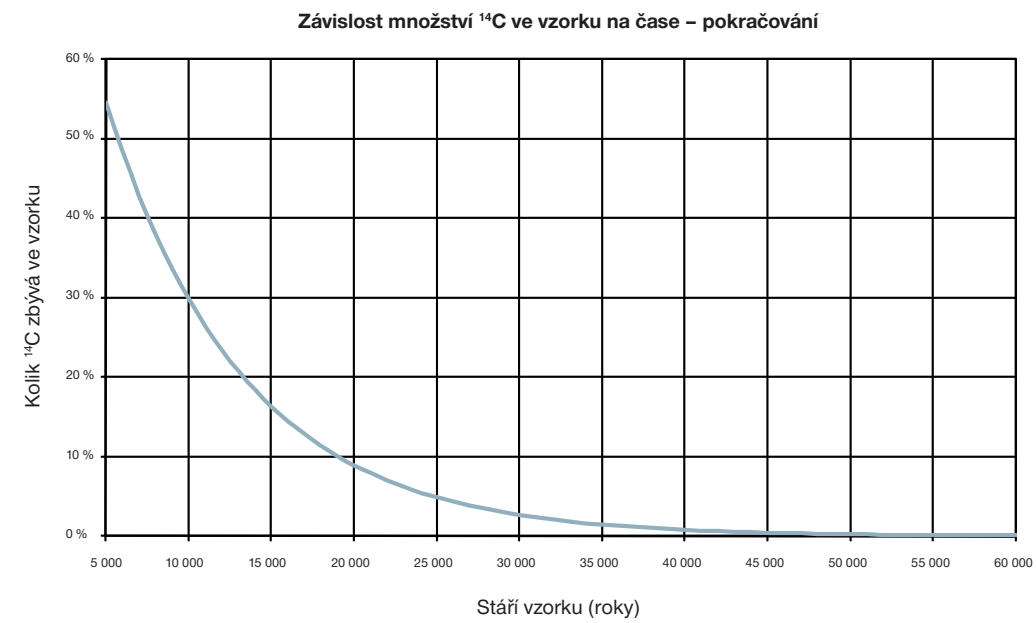
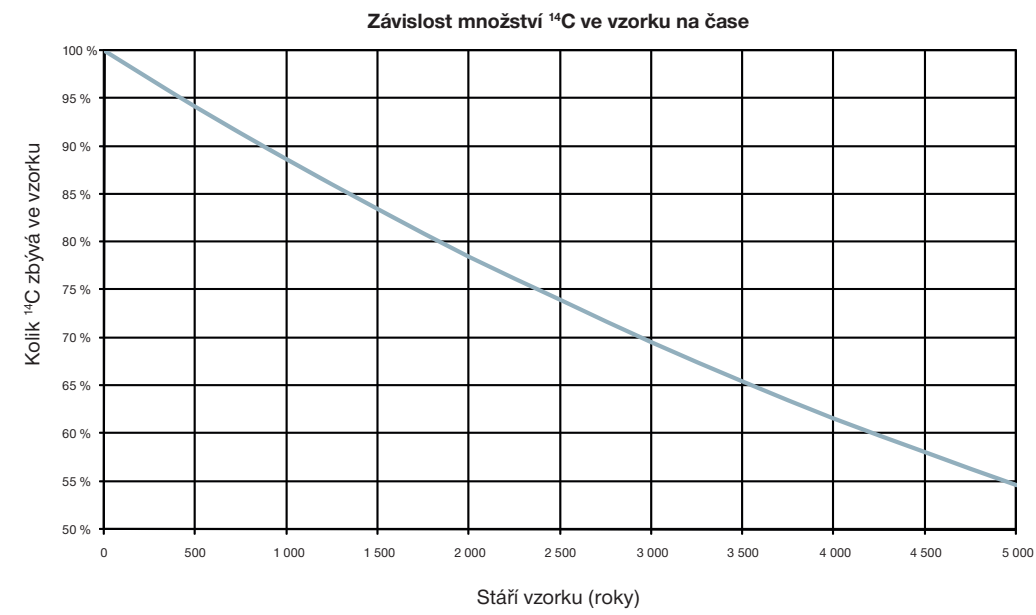
$$\text{hledané stáří} = \text{stáří před} + \frac{\text{koncentrace před} - \text{koncentrace teď}}{\text{koncentrace před} - \text{koncentrace po}} \cdot \text{poločas rozpadu}$$

$$\text{hledaná koncentrace} = \text{koncentrace před} - \frac{\text{stáří teď} - \text{stáří před}}{\text{poločas rozpadu}} \cdot (\text{koncentrace před} - \text{koncentrace po})$$






Poznámka: Pokud použijeme pouze základní tabulku koncentrací (tj. v celých násobcích poločasu rozpadu ^{14}C), dává lineární interpolace výsledky s poměrně velkou chybou. Chyba je mnohem větší, než jaké se dopustíme, pokud budeme hodnoty odečítat z grafů.

*²² $1/\sqrt{2} \doteq 0,71$ resp. $100\% / \sqrt{2} \doteq 71\%$, tj. získaná „mezihodnota“ bude menší než by odpovídalo aritmetickému průměru sousedních hodnot (tj. použití lineární interpolace).

Odečítání hodnot z grafu



 Rok narození dědečka	 Rok narození matky
 Zavedena kanalizace v našem městě	 Rok založení naší školy
	

 První lyže v Čechách	 První novodobé mezinárodní olympijské hry
 Do kin přichází film MASH, na který navázal úspěšný seriál.	 Francouzové Louis Réard a Jacques Heim představují v Paříži první dvoudílné dámské plavky – bikiny.
 První případ nemoci AIDS v naší republice	 Potopení Titaniku
 Emil Zátopek získává 3 zlaté olympijské medaile.	 Natočen první díl hvězdných válek (Star Wars).
 Vycházejí první sešity Rychlých Šípů od Jaroslava Foglara.	 Moje narození

ÚLOHY O UŽITÍ RADIOUHLÍKOVÉ METODY

1) Odhadněte, jak stará byla dřevěná soška, pokud v ní zbývalo 5 % z původního množství ^{14}C .

2) Množství ^{14}C nelze určit zcela přesně. Představte si, že jeho množství leží někde v rozmezí 4–6 % původní koncentrace. Určete rozmezí stáří tohoto vzorku. Co myslíte, stačí takto „přesný“ výsledek archeologům?

Poznámka: Současné měřicí metody umožňují určovat poměr koncentrace obou izotopů uhlíku s relativní přesností lepší než 1 %. To znamená, že jestliže změříme, že zbývá 5 % ^{14}C , je skutečná hodnota v intervalu 4,95 % až 5,05 % či spíše ještě užším.

3) V rodině mého kamaráda pečlivě opatrují dřevěné vyřezávané srdce a tvrdí o něm, že ho před mnoha lety vyřezal prapradědeček praprababičce z lásky. Dalo by se touto metodou ověřit, že tato rodinná pověst je pravdivá a že se nejedná o srdce vyřezané před několika málo lety?

4) Nejstarší člověk na světě tvrdí, že je starý 120 let. Dal by se jeho věk ověřit touto metodou? Proč ano, proč ne?

5) A co použít tuto metodu na věci o něco „starší“. Kolik z původního množství ^{14}C zbývá a jak přesně bychom tento údaj museli určit, abychom odlišili stáří dřevěného křížku z doby Cyrila a Metoděje (přišli na Velkou Moravu roku 863 n. l.) a dřevěné násady řemdihu Jana Žižky (zemřel roku 1424)? Nebo kousek z mumie egyptského faraóna Cheopse (zemřel někdy mezi lety 2600–2500 před n. l.) a památky z doby vzniku Chamurapiho zákoníku ve starověkém Babylóně (kolem roku 1700 př. n. l.)?

6) Jak malé koncentrace ^{14}C bychom museli umět spolehlivě měřit, pokud bychom chtěli touto metodou určovat stáří kostí dinosaurů?

Poznámka: Dinosauri žili v druhohorách. Objeví se už v období zvaném trias přibližně před 248 miliony let a žili do konce období zvaného křída. Vyhnuli přibližně před 65 miliony let.

7) Archeologové našli zcela nové naleziště – jeskyni se zbytky po osídlení. Mimo jiné našli několik lidských koster, zbytky ohniště, kovové šperky, hliněné sošky, zbytky oblečení, paroží, zvířecí kosti, skořápky vajec, několik drobných bronzových a železných nástrojů neznámého účelu, speciálně opracované kameny zřejmě na drcení zrna, několik keramických nádob a nástěnné malby. U kterých z těchto předmětů je možné určit jejich stáří pomocí radiouhlíkové metody? Které předměty jsou pro tuto metodu nevhodné? Proč?

DOPLŇKOVÉ ÚLOHY

8) Zkuste odhadnout, kolik atomů radioaktivního uhlíku se přibližně nachází v 1 g organické tkáni. Uhlík tvoří asi 20 % živé hmoty.

9) Odhadněte aktivitu (počet rozpadů za sekundu) 1 g živé tkáně danou přítomností ^{14}C , ostatní radioaktivní prvky přítomné v organismech neuvažujte.

STRUČNÁ ŘEŠENÍ ÚLOH

1) výpočet při znalosti logaritmu:

$$N = N_0 2^{-\frac{t}{T}} \Rightarrow t = T \frac{\log \frac{N_0}{N}}{\log 2} = 5730 \cdot \frac{\log \frac{1}{0,05}}{\log 2} \text{ let} \approx 24\,800 \text{ let}$$

„zahuštěná“ tabulka ukazuje, že hledané stáří se bude pohybovat okolo 25 000 let

z grafu odečteme stáří přibližně 25 000 let

výpočet pomocí lineární interpolace:

hledaný údaj se nachází mezi 4. a 5. poločasem rozpadu (asi uprostřed)

stáří před = 22 920 let

stáří po = 28 650 let

koncentrace před = 6,25 %

koncentrace po = 3,13 %

$$\text{hledané stáří} = \left(22\,920 + \frac{6,25 - 5}{6,25 - 3,13} \cdot 5730 \right) \text{ let} \approx 25\,200 \text{ let}$$

$$2) t_{\max} = (5730 \cdot \log_2 \frac{1}{0,04}) \approx 26600 \text{ let}$$











$$t_{\min} = (5730 \cdot \log_2 \frac{1}{0,06}) \approx 23300 \text{ let}$$










3) Budeme-li uvažovat, že průměrný věk rodičů při narození dítěte je 25 let a že současnému studentovi je 15 let, potom se jeho prapradědeček narodil cca před 115 lety, srdce mohl vyřezávat asi jako 15 až 20letý, to znamená, že pokud si k vyřezávání nevybral nějaké velmi „staré“ dřevo, byl příslušný strom pokácen přibližně před 100 lety.

$$\text{Ve dřevě zbývá } 2^{-\frac{100}{5730}} \cdot 100 \% = 98,8 \% \text{ } ^{14}\text{C}.$$

Tato koncentrace by měla být současnými analytickými metodami odlišitelná od původní koncentrace (viz poznámka u zadání úlohy 2). Chyba určení ale bude několik desítek let, takže úplně spolehlivý ukazatel to být nemusí. Dalším zdrojem nepřesnosti mohou být velké výkyvy v koncentraci uhlíku ^{14}C v atmosféře během posledních 100 let (viz poznámka na konci této kapitoly).

4) Z předchozí úlohy plyne, že stáří 120 let se sice nepřesně, ale dá touto metodou dokázat. Problém je, že „stáří“ vzorku se v tomto případě začne počítat až ve chvíli, kdy dotyčný člověk zemře a přestane „vyrovnávat“ koncentraci ^{14}C ve svém těle a v atmosféře. Z tohoto důvodu je radiouhlíková metoda pro tento případ zcela nevhodná.

	Ve Spojených státech je podán patent na jezdící schody.		Objev penicilínu (Alexander Fleming)
	Vytvoření hudebního formátu MP3		Vytvořen a patentován zip (zdrhovadlo)
	Začátek pravidelného televizního vysílání na našem území		Albert Einstein uveřejnil speciální teorii relativity.
	První člověk ve vesmíru		John Pemberton poprvé namíchal CocaColu.
	Charlie Chaplin natáčí své první filmy.		V televizi běží první Večerníček.

 Byla zahájena stavba prvního fúzního reaktoru ITER.	 Začátek první světové války
 Krach newyorské burzy, začátek celosvětové hospodářské krize	 Konec první světové války
 Konec druhé světové války	 Začátek druhé světové války
 Pád komunismu ve střední a východní Evropě	 Postavena Eiffelova věž
 První komerčně prodávané elektrické lednice	 První člověk na Měsíci

5)

období	stáří	koncentrace ^{14}C – – z rozpadového zákona	hodnoty koncentrací ^{14}C odečtené z grafů	koncentrace ^{14}C – – určená pomocí lineární interpolace
863 n. l.	1144	87,1 %	87 %	90 %
1424 n. l.	583	93,2 %	93 %	95 %
2600–2500 př. n. l.	asi 4500–4600	57,3–58,0 %	57–58 %	60–61 %
asi 1700 př. n. l.	asi 3700	63,9 %	64 %	68 %

Z tabulky je vidět, že oba předměty lze radiouhlíkovou metodou datování pohodlně rozlišit.

Poznámka: Poslední sloupec tabulky je zde jako ilustrace „nepřesnosti“ lineární interpolace počítané ze základní tabulky.

6) Za tak dlouhou dobu nezůstane v kosti již žádný radioaktivní uhlík ^{14}C .^{*23} Jeho koncentrace klesne pod měřitelnou hodnotu již po uplynutí doby rovnající se asi 10 poločasům rozpadu, tj. 60 000 let. To znamená, že touto metodou nejsme schopni určit stáří ani všech nálezů týkajících se lidské kultury. Toto stáří odpovídá konci středního paleolitu.

7) Radiouhlíková metoda je použitelná na veškeré materiály organického původu, jako je dřevo, semena, dřevěné uhlí, kosti, ulity živočichů, kůže, rašelina, jezerní nánosy a sedimenty, pyly, vlasy, ptačí vejce, papír, paroží, pozůstatky hmyzu, koralý, ale třeba také na nástěnné malby (dělané organickými barvivy) nebo údajně i pro železné odlitky (pokud obsahují stopy uhlíku). Z uvedených předmětů je tedy metoda zcela nevhodná na kamenné nástroje a její použití je také sporné (v různých pramenech nalezneme odlišné názory) pro kovové předměty, včetně železných, i když uhlík obsahují.

8) Jestliže uhlík tvoří průměrně asi 20 % živého organismu, potom v 1 g organického

vzorku je asi 0,2 g uhlíku, to odpovídá přibližně $= \frac{2 \cdot 10^{-4}}{12 \cdot 1,6 \cdot 10^{-27}} \cdot 10^{22}$ atomům.

Poměr počtu atomů izotopů uhlíku je asi 10^{-12} (viz úvodní text), tj. ve vzorku organické tkáně o hmotnosti 1 g máme asi $10^{22} \cdot 10^{-12} \text{ g} = 10^{10}$ atomů uhlíku ^{14}C .

9) Aktivita vzorku A je úměrná celkovému počtu dosud nepřeměněných jader N , platí tedy vztah $A = \lambda N$, kde λ je tzv. přeměnová konstanta. Počet nepřeměněných jader

můžeme vyjádřit také jako $N = N_0 2^{-\frac{t}{T}} = N_0 e^{-\lambda t}$ a odtud plyne, že $\lambda = \frac{\ln 2}{T}$.

V našem případě $\lambda \doteq 4 \cdot 10^{-12} \text{ s}^{-1}$ a $A = 0,04 \text{ Bq}$.

^{*23} Poměr obou izotopů uhlíků ve vzorku, který by odpovídal době vyhynutí dinosaurů, by byl přibližně 0,0... 01, kde mezi desetinou čárkou a jedničkou je více než 3400 nul.

Aktivita vzorku organické tkáně o hmotnosti 1 g daná rozpady jader ^{14}C je **0,04 Bq**, což odpovídá průměrně asi **2–3 rozpadům za minutu**.

DALŠÍ PODROBNOSTI A ZAJÍMAVOSTI

- Meze přesnosti určení stáří (bez započtení kalibrace – viz níže):

Stáří (roky)	Chyba určení stáří (roky)
0–2000	±25 až ±40
2000–5000	±30 až ±45
5000–10 000	±40 až ±60
10 000–15 000	±50 až ±100
15 000–30 000	±100 až ±300
30 000–45 000	±300 až ±2000

zdroj: www.radiocarbon.pl/quality_tests.htm

- Kromě izotopu ^{12}C existuje ještě jeden stabilní izotop uhlíku ^{13}C . Tvoří asi 1 % v přírodní směsi uhlíku. Ve skutečnosti se při datování vzorků určují poměry koncentrací izotopu uhlíku ^{14}C vůči oběma stabilním izotopům ^{12}C i ^{13}C .
- Pro archeology je také důležité, že měření poměrů koncentrací obou uhlíků je destruktivní – vzorek se při něm zničí. Na druhou stranu pro měření stačí velmi malá množství dané látky, obvykle s hmotností několika miligramů (záleží na tom, co se analyzuje). Při zpracování se vzorek nejprve spálí, aby se uhlík navázal do plynného oxidu uhličitého CO_2 (spalování je chemická reakce, tudíž její energie je malá a jádra atomů neovlivní). Potom se analyzuje buď jeho aktivita, nebo se provede hmotnostní spektroskopie s pomocí urychlovače.

Celá metoda je založena na předpokladu, že se koncentrace izotopu uhlíku ^{14}C v atmosféře neměnila za několik posledních desítek tisíc let. Tento předpoklad ale není splněn. Koncentraci ^{14}C ovlivňuje dlouhodobě kolísání intenzity kosmického záření a sluneční aktivity, změny magnetického pole Země a složení vrchních vrstev atmosféry (obojí ovlivňuje množství kosmického záření dopadajícího za Zemi). V posledních několika desítkách let se koncentrace izotopu ^{14}C měří, takže vidíme, jak se jeho koncentrace mění vlivem člověka. Masivním spalováním fosilních paliv od poloviny 19. století docházelo ke snižování koncentrace radioaktivního uhlíku v atmosféře (uhlí je velmi „staré“, neobsahuje tedy již žádný radioaktivní uhlík, spalování přidává neradioaktivní uhlík do atmosféry), naopak testy jaderných bomb v atmosféře v 50. – 60. letech minulého století vedly k jejímu dočasnému zvýšení. Z důvodu změn množství izotopu ^{14}C je nutné „stáří vzorku“ získané výpočtem na základě měření obsahu ^{14}C kalibrovat (opravit s ohledem na měnící se koncentraci ^{14}C). Ke kalibraci se používají letokruhy stromů (tzv. dendrochronologické datování) – dřevo, které v daném roce naroste a vytvoří letokruh, se již nemění, můžeme pomocí něj určit koncentraci ^{14}C v daném roce. Protože se předpokládá, že širší letokruhy pocházejí z teplých a vlhkých let a užší letokruhy z let studených a suchých, je pořadí letokruhů zcela charakteristické pro danou oblast. Díky tomu můžeme na sebe navazovat vzorky z různých stromů. Tímto způsobem se podařilo získat data



Pokusný výbuch vodíkové pumy „Mike“



Havárie v jaderné elektrárně Černobyl



Ernest Rutheford objevil a pojmenoval proton.



Na moře vyjela první ponorka s jaderným pohonem – Nautilus (USA).



Do nemocnice Na Homolce v Praze byl zakoupen Leksellův gama nůž.



James Chadwick objevil neutron.



Byla spuštěna první jaderná elektrárna, která dodávala energii do elektrické sítě (Obninsk jihozápadně od Moskvy, výkon 5 MW).



Jaderná elektrárna Temelín dodala do rozvodné sítě první elektrickou energii.



V Berkeley (Kalifornie) se podařilo poprvé vyrobit plutonium bombardováním uranu neutrony a deuterony a později ho i izolovat.



Byla spuštěna první jaderná teplárna na světě blízko hlavního města Švédska Stockholmu (Agesta, výkon asi 65 MW).

 <p>Objev paprsků X, později pojmenovaných po jejich objeviteli rentgenové záření</p>	 <p>Enrico Fermimu se podařilo spustit první řízenou řetězovou štěpnou reakci v prvním pokusném reaktoru na Univerzitě v Chicagu.</p>
 <p>Spuštění jaderné elektrárny A1 v Jaslovských Bohunicích (na území Slovenské republiky)</p>	 <p>Henry Becquerel objevil přirozenou radioaktivitu.</p>
 <p>První použití atomové zbraně</p>	 <p>V britském Culhamu spuštěn JET, největší tokamak na světě – první zařízení na principu jaderné fúze vyrábějící energii.</p>
 <p>Marie a Pierre Curieovi objevili nový prvek – rádium.</p>	 <p>První pokusné použití zobrazování pomocí pozitronové emisní tomografie (PET)</p>
 <p>Spuštění jaderné elektrárny Dukovany</p>	 <p>Ernest Rutherford experimentálně zjistil, že atom je velmi prázdný, objevil atomové jádro a formuloval planetární model atomu.</p>

pro kalibraci z několika stovek let zpět do historie. Pokud se pro kalibraci použijí i další metody datování, získáme kalibrační křivku pro vzorky z posledních asi 24 000 let.*²⁴

Druhým problémem, který změny koncentraci ¹⁴C přináší, je zvětšení chyby této metody, ale i možnost dvojznačného výsledku. Mohlo by se totiž stát, že současné koncentraci ¹⁴C ve vzorku odpovídají dvě rozdílná stáří – buď je předmět starý a pochází z období, kdy byla koncentrace ¹⁴C větší, nebo je předmět mladší a pochází z období, kdy byla koncentrace ¹⁴C naopak menší.

- Kromě radiouhlíkové metody se pro určování stáří používají ještě **další metody**. Pro určování stáří hornin se používají metody založené na rozpadech izotopů s mnohem delším poločasem rozpadu, např. ²³⁸U, ²³⁵U, ²³²Th, ⁸⁷Rb, ⁴⁰K a další. Často se využívá porovnání koncentrací více izotopů v dané rozpadové řadě nebo porovnání několika metod. U těchto metod je problematické určit počáteční koncentraci radioaktivního izotopu a jsou omezeny na ty horniny, u kterých nedocházelo k výměně příslušných izotopů a produktů přeměny s okolím. Tyto metody pomohly určit i stáří Země.

SLAVNÉ PŘÍKLADY POUŽITÍ

Turínské plátno*²⁵

Církev věří, že do tohoto lněného plátna bylo zabaleno tělo Ježíše Krista a že se na plátno zázračně otiskla jeho tvář a tělo. V roce 1988 byl kousek plátna podroben zkoumání radiouhlíkovou metodou nezávisle v Zurichu, Oxfordu a Tusconu (Arizona, USA). Ve všech třech laboratořích radiouhlíkovou metodou určili (s velkou přesností) datum vzniku plátna (pokosení lnu, ze kterého bylo utkáno) kolem přelomu 13. a 14. století našeho letopočtu. Církev se ale s těmito výsledky, které pravost plátna popírají, nesmířila a zpochybňuje výsledek např. možností zanesení pozdějšího uhlíku mikroorganismy, sazemi od svíček nebo poškozením při velkém požáru v roce 1532 v Chambéry, kde bylo plátno uloženo. Způsob, jak vznikl na plátně otisk tváře a těla, je dodnes nevysvětlen.

Poznámka: První písemné zmínky o existenci tohoto plátna jsou z roku 1353.

Koruna Karla Velikého*²⁶

Dalším příkladem je určení stáří železné koruny Karla Velikého. Historikové a archeologové se o její pravost dlouho přeli, až v r. 1996 zjistili, že drahokamy jsou v koruně upevněny směsí obsahující včelí vosk, jehož stáří se dá zjistit radiouhlíkovou metodou. V australské laboratoři stanovili datum vzniku mezi lety 700–780 n. l. Karel Veliký žil v letech 782 až 814, což velmi dobře odpovídá.

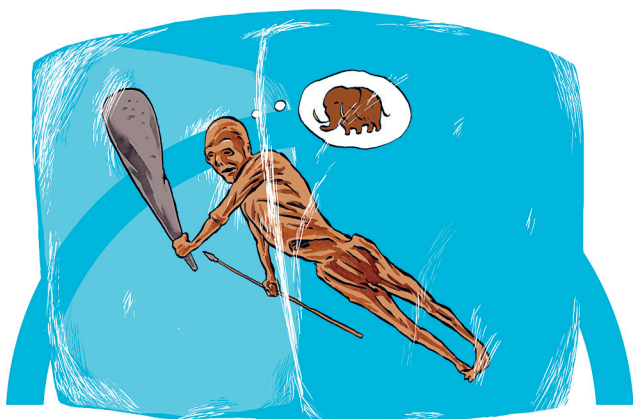
*²⁴ Výzkum změn koncentrace ¹⁴C v atmosféře a tvorba kalibrační křivky je popsána v článku na adrese www.radiocarbon.ideo.columbia.edu, kromě obrázku kalibrační křivky zde naleznete i program pro korekci stáří vypočtenou pomocí koncentrace ¹⁴C. O něco populárnější text o této metodě včetně popisu kalibrace lze také nalézt na adrese: www.c14.arch.ox.ac.uk/embed.php?File=webinfo.html pod odkazem „Radiocarbon dating“.

*²⁵ Více podrobností a odkazy na původní výzkumy naleznete v článku Pochybnosti o datování turínského plátna od Václava Cílka (Vesmír 73, 75, 1994/2, www.vesmír.cz/clanek.php3?CID=2460).

*²⁶ Podrobnosti lze nalézt přímo na stránkách příslušné laboratoře: www.ansto.gov.au (do okna vyhledávání vepište „Charlesmagne crown“).

Ledový muž Ötzi*²⁷

Radiouhlíková metoda také přispěla k objasnění osudu „nešťastníka“, jehož ledem mumifikované tělo našli roku 1991 turisté v Alpách (na hranicích Itálie a Rakouska). Nejdříve se myslelo, že se jedná o turistu nebo horolezce, který v horách zahynul před několika desítkami let. Po důkladném ohledání těla a předmětů v jeho okolí se ukázalo, že se jedná o muže, který zde zahynul přibližně před 5 200 lety. Toto stáří bylo určeno radiouhlíkovou metodou a shoduje se s obdobím, ve kterém dle archeologů se v této oblasti používaly předměty podobné těm, co měl Ötzi u sebe. Zemřel zřejmě vyčerpáním a na následky svých zranění.

**ZÁVĚREČNÉ SHRNUTÍ**

Metoda radiouhlíkového datování je vhodná pro určení stáří předmětů organického původu (kostí, dřevěných předmětů, ...). Lze ji použít pro předměty mladší než cca 50–60 tisíc let (10 poločasů přeměny). Ve starších materiálech je již příliš malá koncentrace ^{14}C . Touto metodou určíme, kdy daný člověk, zvíře nebo rostlina zemřela. Naprosto nevhodná je tato metoda pro věci, které nemají organický původ – jako jsou např. kamenné předměty. I přes výše naznačené problémy se jedná o důležitou metodu pro archeology.

KDE HLEDAT DALŠÍ INFORMACE

www.radiocarbon.org – mezinárodní časopis orientovaný na tuto metodu. Naleznete v něm mnoho populárních i technických informací, ale hlavně seznam světových laboratoří, z nichž některé mají na svých webových stránkách velmi detailní technické podrobnosti (např. nutnou velikost vzorku, dosahovanou přesnost, apod.).
www.nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/1960 – informace o objeviteli této metody W. F. Libbym včetně jeho přednášky, kterou přednesl při udělení Nobelovy ceny.

*27 Více viz kniha od K. Spindlera **Muž z ledovce** (Edice Kolumbus, Mladá fronta, Praha 1998).

ATOMOVÉ JÁDRO V DĚJINÁCH

Cílem této kapitoly je zařadit důležité objevy z jaderné fyziky do širšího historického kontextu. Naleznete zde kartičky s různými objevy a událostmi z oboru jaderné fyziky, ale i z jiných oblastí vědy, společnosti a historie z naší republiky i ze světa. Kartičky jsou rozděleny do několika skupin. Pracovní listy rozstříhejte na jednotlivé kartičky. Úkolem studentů bude přiřadit jednotlivé události k příslušným letopočtům vyznačeným na časové ose. Dále je zde několik volných kartiček. Povzbudte studenty, aby na ně doplnili takové události, které je zajímají, a aby je také časově zařadili. Mohou jich vyrobit samozřejmě více.

Tento úkol můžete pojmout více jako tipovací a nechat studenty spíše **diskutovat** a **odhadovat**, kdy k daným objevům došlo. A následně jim správné pořadí prozradit. Při takovém pojetí lze vyzdvihnout logické argumenty, které studenti použijí. Druhá možnost, jak tuto aktivitu ve třídě zadat, se opírá o rozvíjení dovednosti **vyhledávat informace**. Úkol zařadit historické události na časovou osu dejte studentům na delší dobu (např. jako domácí projekt) a nechte je při řešení využívat různé informační zdroje, poznámky, učebnice, encyklopedie, internet ... Při tomto pojetí se studenti velmi pravděpodobně dostanou sami ke správnému řešení. Při dohledávání údajů mohou nalézt další zajímavé podrobnosti, o kterých můžete dále ve třídě diskutovat. Také je možné se domluvit s vyučujícím dějepisu a propojit tak tyto dva předměty.

Obě varianty této aktivity je vhodné zakončit alespoň krátkou diskuzí nad tím, zda studenty něco překvapilo. Studenti by měli získat jakýsi přehled, kdy asi docházelo k největšímu rozvoji jaderné fyziky a které historické události ho urychlovaly a proč.

ZÁKLADNÍ TYPY IONIZUJÍCÍHO ZÁŘENÍ

Typ záření	alfa záření	beta záření	gama záření
Podstata záření	těžké kladně nabitě částice alfa částice = jádra helia , které se skládají ze dvou protonů a dvou neutronů	lehké nabitě částice beta částice = elektrony v případě záření beta minus, záření beta plus je tvořeno proudem pozitronů = antielektronů	fotony (jedná se tedy o elektromagnetické záření) o záření gama hovoříme u elektromagnetického záření velmi krátkých vlnových délek (méně než 300 pm)
Typické zdroje tohoto záření	hlavně těžké atomy ($A > 150$) při přeměně alfa klesne o dva počet protonů i počet neutronů v jádře	hlavně lehké a středně těžké atomy přeměna beta nemění počet nukleonů v jádře (tj. atomové hmotnostní číslo), ale změní počet protonů a neutronů (tj. náboj jádra)	toto záření doprovází záření alfa a beta, jádro po vyzáření alfa nebo beta částice není v základním stavu a přebytečné energie se zbaví vysláním fotonu = = zářením gama atom zůstává atomem stejného prvku, pouze s menší energií
Interakce s materiálem	silně ionizuje atomy látky podél své dráhy, tím postupně snižuje svoji energii, až se zastaví	ionizuje atomy podél své dráhy, vysílá fotony (brzděné záření), energie beta částice se postupně snižuje, ale zároveň i klesá počet částic, v porovnání s alfa částicemi se mnohem více rozptyluje do stran	s látkou interaguje vždy celý foton, může být pohlcen, rozptýlen, vyrazit z atomu elektron (fotoefekt) nebo se proměnit na dvojici elektron a pozitron, snižuje se počet fotonů (intenzita záření)
Jak daleko doletí (přibližné hodnoty, konkrétní hodnoty závisejí jak na energii daného záření, tak na materiálu)	ve vzduchu několik centimetrů, ve vodě méně než milimetr, neprojdou listem papíru nebo tenkou kovovou fólií	ve vzduchu několik metrů až desítek metrů, ve vodě několik milimetrů až centimetrů, neprojdou kovovou destičkou o tloušťce několika milimetrů	* ³⁴ ve vzduchu stovky metrů, ve vodě několik desítek centimetrů, v kovech několik milimetrů až centimetrů, lépe stíní těžké kovy jako např. olovo

*³⁴ Svazek fotonů se při průchodu látkou postupně zeslabuje, zde uvádíme tloušťku látky, která svazek zeslabí na desetinu původní hodnoty.

MOJE ROČNÍ DÁVKA

Radioaktivita (tzv. **přírodní radioaktivní pozadí**) je součástí přírody a naši planetu provází od jejího vzniku. I my jsme tedy neustále vystavováni jejímu působení. Množství záření, které na nás dopadá, se ale velmi liší. Záleží jak na místě bydliště, tak i na životním stylu každého z nás.

Je ale toto záření velké nebo malé? Je nebezpečné nebo zcela zanedbatelné? Co ho zvyšuje?

Poznámka: Název této kapitoly může u mnoha studentů vytvořit asociaci s „dávkou drogy“. Lze to využít jako drobný „vtípek“ na úvod a společně se studenty zjišťovat, odkud se vlastně ty naše „radioaktivní dávky berou“ a za jakých okolností nám hrozí „předávkování“ radioaktivitou (na což navazuje následující kapitola s názvem Jak (se) chránit před zářením?).

POPIS ČINNOSTI

Pro popis záření a jeho vlivu na látku se používají veličiny **dávka, ekvivalentní dávka** či **efektivní dávka**. Přehled základních veličin a jednotek používaných pro popis ionizujícího záření je uveden v závěru této publikace.

Na konci této kapitoly naleznete pracovní list, pomocí něhož si studenti mohou jednoduše spočítat svoji roční efektivní dávku (tj. množství záření, které za jeden rok obdrží). Údaje byly převzaty převážně ze zpráv Vědeckého výboru OSN pro účinky atomového záření (UNSCEAR, viz komentář v závěru kapitoly) a dalších materiálů. Protože se ale jedná o celosvětové průměrné hodnoty, můžete v různých jiných materiálech najít i čísla mírně odlišná (záleží na tom, za jaké období a území se provede „průměrování“, jak detailně se rozlišují jednotlivé zdroje záření, ale i na metodice měření). Pozornost je třeba zaměřit spíše na poměrné zastoupení jednotlivých zdrojů záření a na porovnání průměrné běžné hodnoty s povolenými hodnotami.

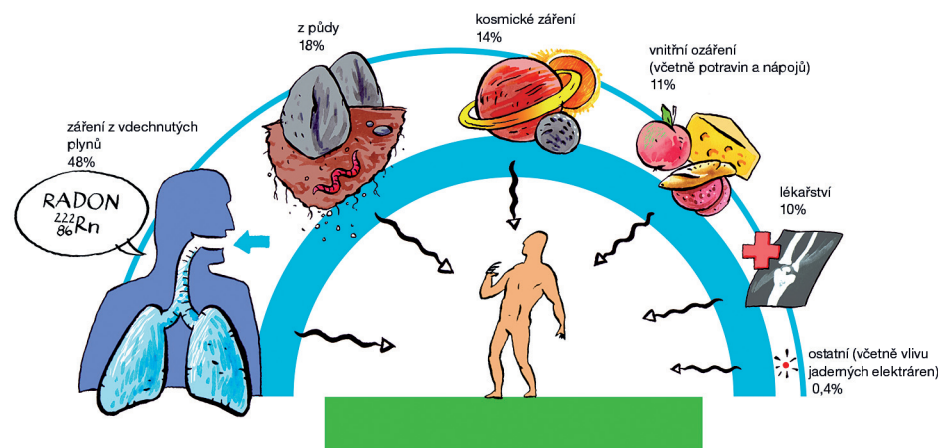
Otázky pro diskuzi po výpočtu:

- Objevili jste při výpočtu něco překvapivého? Nějaký zdroj záření, o kterém jste dříve nevěděli?
- Co je hlavními zdroji záření, kterému jste vystaveni? Šly by nějak omezit?
- Jaké zdroje záření jste považovali za nebezpečné, ale zjistili jste, že jejich příspěvek ve skutečnosti není tak velký v porovnání s jinými zdroji?

Diskutujte a porovnejte se studenty množství záření z přírodního pozadí, hodnoty efektivních dávek, které povolují normy pro obyčejné lidi a profesionály (osoby pracující s radioaktivními látkami), skutečně nebezpečné hodnoty, při kterých dochází k nemocem z ozáření, a hodnoty, které doprovázely různé jaderné havárie. Příslušná čísla jsou uvedena na konci kapitoly v rámci pracovního listu.

DALŠÍ MOŽNOSTI

Na tomto místě je vhodné vybědnout studenty, aby se pokusili nějak graficky vyjádřit, jaké zdroje přispívají k radioaktivnímu záření, kterému jsou vystaveni, a jaký je jejich podíl na jejich celoroční efektivní dávce. Kromě standardních koláčových nebo sloupkových grafů studenti jistě vymyslí i jiná netradiční ztvárnění.



Také můžete zkusit se studenty spočítat, jak dlouho by člověk musel létat, dívat se na televizi, kolikrát jít na rentgen, aby byly překročeny povolené limity. Je ale třeba se vyvarovat toho, aby si studenti odnesli mylný dojem, že u těchto činností vůbec žádné riziko nehrozí. Více o vlivu záření na člověka je uvedeno v následující kapitole Jak (se) chránit před zářením?

ZAJÍMAVOSTI

- Na Zemi existují místa s velmi vysokým přírodním pozadím, více než stokrát větším než je průměrná světová hodnota, resp. průměrná hodnota pro naši republiku. Mezi nejznámější území patří Kerala v Indii, Guapari v Brazílii či delta Nilu v Egyptě (větší aktivita je způsobena výskytem a těžbou monazitu či monazitových písků – horniny obsahující thorium a další radioaktivní prvky), ale patří sem i lokality ve Švýcarských Alpách, v Itálii nebo Francii.^{*28} I na těchto místech žijí zcela normálně lidé a nebyl zde zaznamenán zvýšený výskyt rakoviny.
- Různé potraviny se liší svojí radioaktivitou, přesněji obsahem radioaktivních látek a jejich aktivitou. Typickým příkladem jsou houby, které pohlcují a hromadí radioaktivní látky, zejména ^{137}Cs , ale i další. I když je radioaktivita hub až stokrát či tisíckrát větší než radioaktivita jiných potravin^{*29}, stále je tak nízká, že normální konzumace hub není z tohoto hlediska zdravotně nebezpečná. Největší podíl na radioaktivitě potravin a živých organismů má radioaktivní izotop draslíku ^{40}K , neboť draslík je významným biogenním prvkem. Tento izotop je také zodpovědný za radioaktivitu umělých zahrádkářských a zemědělských hnojiv.

^{*28} Podrobnosti viz příloha B zprávy UNSCEAR 2000 – Sources and effects of ionizing radiation na str. 91 a 121 (zpráva je dostupná ve formátu pdf na adrese www.unscear.org/unscear/en/publications/2000_1.html).

^{*29} Naměřené hodnoty radioaktivity vybraných potravin za několik posledních let lze najít na stránkách SÚRO (www.suro.cz/cz/rms/pozivatiny). Nejvyšší přípustné hodnoty pro potraviny jsou uvedeny v tabulce č. 4 přílohy 8 vyhlášky č. 307/2002 Sb. (novelizované vyhláškou 499/2005 Sb.) o radiační ochraně (www.sujb.cz/?c_id=87).

při práci se zářiči lze najít v dokumentech Zabezpečení osobního monitorování při činnostech vedoucích k ozáření, část I. – zevní ozáření (SÚJB, 2003) a Zabezpečení osobního monitorování při činnostech vedoucích k ozáření, část II. – vnitřní ozáření (SÚJB, 2005) – obojí dostupné na stránce www.sujb.cz/?c_id=88.

POZNÁMKY K TABULCE

- Přehledně si můžete zobrazit jaderné přeměny jednotlivých nuklidů v databázi NuDat (www.nndc.bnl.gov/nudat2/index.jsp) kliknutím na tlačítko „Decay Mode“ v pravé části obrazovky (více o této databázi v kapitole Fúze nebo štěpení?).
- Rozptyl fotonů (tzv. Comptonův rozptyl) sice mění jejich energii, ale také při něm dochází k výrazné změně směru letu fotonu, tj. foton, který se „comptonovsky rozptýlí“ na elektronu v kovu, má menší energii než původní foton, ale také změni svůj směr pohybu, proto i u této interakce fotonů s materiálem uvažujeme snižování intenzity svazku spíše než změnu energie fotonů.

Co znamená dolet pro různé typy částic:

- Svazek těžkých nabitých částic (alfa částice, urychlené ionty) doletí v dané látce přibližně do stejné vzdálenosti, lze pro ně tedy poměrně jednoduše definovat tzv. dolet.
- U elektronů dochází jak k zeslabování svazku (snižování počtu elektronů), tak k jejich zpomalování, existuje tedy tloušťka materiálu, kterou již elektrony s danou energií neprojdou, pomocí této vzdálenosti můžeme definovat dolet pro elektrony.
- U fotonů dochází pouze ke zeslabování intenzity svazku. Toto zeslabování je exponenciální, to znamená, že libovolně tlustá vrstva materiálu propustí nějakou část původního záření. Proto se pro fotony udává tloušťka materiálu, která zeslabí původní svazek na nějakou jeho část (typicky polovinu, desetinu, apod.)
- Další podrobnosti o průchodu záření látkou můžete najít v různých vysokoškolských učebnicích jaderné fyziky, přístupnou formou je toto téma zpracováno v knize **Atomy, jádra, částice** od I. Úlehly a kol. (Academia, Praha, 1990).

ZÁVĚREČNÉ SHRNUÍ

Na závěr celé diskuze nechte studenty stručně shrnout a zapsat si, v čem spočívá nebezpečnost ionizujícího záření pro člověka a jak se před ním můžeme účinně chránit.

DALŠÍ INFORMACE

- Vliv záření na živý organismus je velmi složitý. Podrobný popis účinků záření včetně popisů různých pohledů na jeho vliv na organismus lze nalézt v páté kapitole učebnice jaderné fyziky V. Ulmanna na adrese: www.astronuklfyzika.cz/Fyzika-NuklMed.htm.
- Ve skutečnosti neexistuje jednotný názor na vliv velmi malých dávek záření na živý organismus. Problémem je, že se tento vliv velmi špatně odlišuje od jiných negativních vlivů nesouvisejících se zářením. Neexistují totiž lidé, kteří by nebyli vystaveni žádnému záření. Přírodní radioaktivita je všude kolem, ale i uvnitř nás. Podle jedné teorie může zdravý poškodit, i když pouze s velmi malou pravděpodobností, libovolně malé množství záření. Se zvětšující se dávkou tato pravděpodobnost stoupá (tzv. bezprahová teorie). Poškození organismu má náhodný (stochastický) charakter a navíc se vůbec nemusí projevit, protože každý organismus má mechanismy, kterými tato poškození „opraví“. Podle jiné teorie by malé dávky záření nemusely organismus ovlivňovat nebo by mohly být pro organismus dokonce prospěšné, protože povzbudí ochranu organismu a jeho odolnost vůči dalším vlivům včetně záření (tzv. teorie radiační hormese).
- Princip ALARA (as low as reasonably achievable)^{*33}: Tento princip vychází z toho, že zatím není prokázáno, že by velmi malé dávky nepředstavovaly žádné riziko pro živé organismy. Proto každý, kdo využívá jadernou energii nebo provádí činnost související se zářením, je povinen udržovat riziko ohrožení života, zdraví osob a životního prostředí tak nízké, jak lze rozumně dosáhnout. Tento princip říká, že je třeba posoudit, zda má význam investovat další prostředky do zlepšování ochrany při použití jaderných technologií, nebo jsou tato rizika srovnatelná s riziky plynoucími z jiných činností člověka (nebo dokonce menší) a nutné prostředky na další snižování rizika velmi vysoké, takže je vhodnější použít je na něco jiného.
- Příručka pro učitele základních a středních škol Ochrana člověka za mimořádných událostí by měla pomoci začlenit do vzdělávání tematiku ochrany člověka za mimořádných událostí. Obsahuje i kapitolu věnující se radiačním haváriím. Příručka je dostupná na stránkách Ministerstva vnitra www.mvcr.cz/udalosti/prirucky/proskoly/ochrana_cloveka.html.
- V naší republice právně ošetřují používání zdrojů radioaktivity a ochranu obyvatel před zářením **Zákon č. 18/1997 Sb., o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření (www.sujb.cz/docs/Atomovy_zakon_II.pdf)** a **Vyhláška SÚJB o radiační ochraně (307/02 Sb., resp. její novela 499/05 Sb., obojí dostupné na stránce www.sujb.cz/?c_id=87)**. Podrobné doporučení jak zajistit ochranu lidí

*33 Více viz www.suro.cz/cz/odkazy/alara/document_view.

- Různé organismy jsou na záření různě citlivé. Citlivější než člověk je např. prase, naopak mnohem odolnější proti záření jsou některé druhy bakterií nebo prvoků (měňavky, trepky).^{*30}
- Na 3. až 4. místě mezi zdroji záření, kterým jsme vystaveni, se nachází záření používané v lékařství pro diagnostické či terapeutické účely. V obou případech musí lékaři vždy pečlivě zvažovat, zda předpokládané poškození zdravých částí organismu pacienta použitým zářením a jeho množstvím je dostatečně vyváženo pozitivním vlivem, byť třeba nepřímým (tím, že poskytne lékařům cenné informace).

KDE HLEDAT DALŠÍ INFORMACE

- Státní ústav radiační ochrany – www.suro.cz
Na webových stránkách SÚRO naleznete mnoho užitečných a konkrétních informací, čísel a grafů, které můžete použít při diskuzích o zdrojích a hodnotách radiačního pozadí, např. aktivitu různých potravin (měřeno po několik let), koncentraci nejvýznamnějších radioizotopů v atmosféře v posledních letech, aktuální situaci v naší republice (několikrát denně aktualizovanou), velmi podrobnou mapu rizika spojeného s výskytem radonu, ale i informace o metodách měření kontaminace vody, stavebních materiálů, historii měření radiace v Čechách a mnoho dalšího.
- Státní úřad pro jadernou bezpečnost – www.sujb.cz
Tento úřad vykonává státní správu a dozor při využívání jaderné energie a ionizujícího záření, v oblasti radiační ochrany a v oblasti jaderné, chemické a biologické ochrany. Na jeho webových stránkách lze nalézt veškeré zákony, vyhlášky a jiné legislativní dokumenty, které se týkají jak využití jaderné energie a záření, tak ochrany před jejich účinky.
- Vědecký výbor OSN pro účinky atomového záření (UNSCEAR) – www.unscear.org/unscear/en/publications.html
Ve zprávách UNSCEAR lze nalézt velké množství konkrétních, detailních a důvěryhodně podložených čísel a grafů, které se týkají zdrojů a vlivu ionizujícího záření (např. UNSCEAR 2000 Report: „Sources and effects of ionizing radiation“).
- Detailní informace o havárii v Černobylu lze nalézt na stránkách SÚJB (www.sujb.cz/ odkaz **Černobyl** vpravo – např. překlad studie Mezinárodní agentury pro atomovou energii ve Vídni v rámci aktivit tzv. Černobylského fóra) nebo na stránkách UNSCEAR (www.unscear.org/unscear/en/chernobyl.html).

*30 Více viz Encyklopedie energetiky, Jaderná energie, str. 37.

MOJE ROČNÍ DÁVKA – VÝPOČET ROČNÍ EFEKTIVNÍ DÁVKY

V následující tabulce jsou v prvním sloupečku uvedené různé zdroje záření a uprostřed tabulky jsou uvedeny průměrné příspěvky daného zdroje k efektivní dávce. Do posledního sloupce si запиšte příspěvky ke **své** efektivní dávce **za poslední rok**. Ty potom sečtete.

Zdroj záření	Příspěvek	Příspěvek k mé hodnotě
Přírodní zdroje		
Kosmické záření		
Bydlím na úrovni moře	0,30 mSv/rok	}
Bydlím v nadmořské výšce 300 m	0,33 mSv/rok	
Bydlím v nadmořské výšce 600 m	0,38 mSv/rok	
Bydlím v nadmořské výšce 1000 m	0,45 mSv/rok	
Záření z půdy	0,48 mSv/rok	0,48 mSv/rok
Záření z vdechnutých plynů – průměr:		
Bydlíme v dřevěném domě	odečti 0,135 mSv/rok	}
Náš dům je obložený žulou	přičti 1,35 mSv/rok	
Nevětráme (pravidelně)	zdvojnásob hodnotu z vdechnutých plynů	
Vnitřní ozáření – záření z radioaktivních látek v těle, z potravin a nápojů (průměr)		
	0,29 mSv/rok	0,29 mSv/rok
Lidské vlivy z minulosti i současnosti (celosvětové průměry)		
Jaderné testy v atmosféře	0,005 mSv/rok	.....
Neštěstí v Černobylu	0,002 mSv/rok	.....
Jaderné elektrárny (normální provoz)	0,0002 mSv/rok	.....
Životní styl		
Topíme uhlím, v našem okolí se topí hodně uhlím nebo bydlíme blízko uhelné elektrárny	0,04 mSv/rok	.....
Bydlíme velmi blízko jaderné elektrárny	0,005 mSv/rok	.....
Sleduji barevnou televizi	0,002 mSv/rok při 1 h denně	.....
Lety na velké vzdálenosti	0,0006 mSv/hodina letu	.....

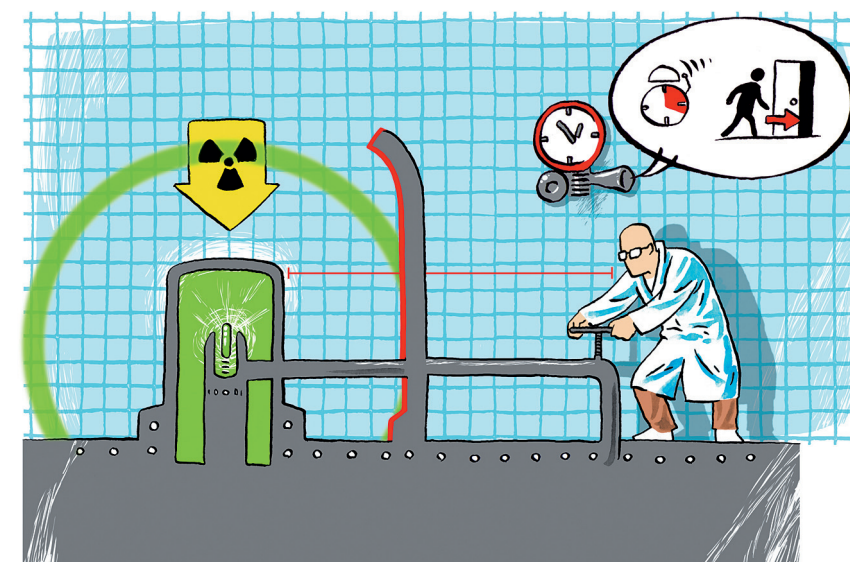
- množství energie, kterou záření předá látce – jestliže záření projde materiálem, aniž by v něm zanechalo energii, nedojde k žádnému poškození, takové záření tedy není nebezpečné (jedná se např. o neutrina, která interagují velmi málo).
- na jakou část a jak velkou část organismu záření dopadá – různé orgány jsou různě citlivé na ozáření, nejcitlivější jsou na záření buňky kostní dřeně, buňky střeva, buňky pohlavních žláz a buňky kožní, naopak odolné proti záření jsou buňky nervové, svalové, kostní a pojivové.

Studenti budou nápady vymýšlet postupně, snažte se je k jednotlivým charakteristikám postupně dovést, stejně tak se snažte, aby svoje formulace sami zpřesňovali.

Jak se můžeme chránit před zářením?

Jakkoli se to může zdát triviální, nejjednodušší ochranou před zářením je maximálně snížit dobu, po kterou jsme záření vystaveni, a co možná nejvíce snížit jeho množství (zvětšením vzdálenosti, vhodným stíněním). Stručně řečeno *utěct*.

Na druhou stranu nejnebezpečnější je, pokud se zářič dostane přímo do organis-



mu – spolknutím (viz radioaktivita potravin v kapitole *Moje roční dávka*) nebo vdechnutím (velké nebezpečí radonu, ale také radioaktivních látek dostávajících se do těla kouřením cigaret).

Možná vás napadla námitka, že rada utéci se nehodí pro lidi, kteří se zářiči pracují např. v průmyslu nebo v lékařství. I zde se ale pracuje se stejnými principy ochrany. Vždy je snaha používat co nejslabší zářiče. Při práci se musí dodržovat přísně stanovené pracovní postupy. Ty zajišťují to, aby s vlastním zářičem byl pracovník ve styku po co nejkratší možné dobu, aby používal vhodné ochranné pomůcky, ale dbají i na monitorování množství záření, kterému byl pracovník vystaven.

Je velmi důležité si uvědomit, že záření není vidět, slyšet ani nezapáchá, takže nám zbývají dvě možnosti, jak se o jeho přítomnosti dozvědět – mít nějaký speciální detektor záření nebo se spolehnout na povinné označení záříčů. Proto je důležité, aby zdroje záření podléhaly přísným bezpečnostním pravidlům.

Jakým způsobem jsou jednotlivé typy záření pro člověka nebezpečné? Které záření je pro nás nebezpečnější?

Jednotlivé typy záření interagují s organizmem různě, proto je velmi obtížné porovnávat jejich nebezpečnost a říci, které je nejvíce nebezpečné. Například alfa záření ionizuje („poškozuje“) materiál (tedy i organismus) velmi intenzivně, ale je zcela odstíněno několikacentimetrovou vrstvou vzduchu nebo velmi tenkou vrstvou materiálu. Alfa záření pronikne maximálně do vnější vrstvy odumřelých buněk pokožky. Ozářit naše vnitřní orgány může jen v případě, že bychom záříč snědli nebo vdechli. Přejde vám to nepravděpodobně? Uvědomte si, že zdrojem alfa záření je mimo jiné i radon – plyn, který se uvolňuje z půdy, hromadí se v podzemních a nevětraných prostorách a který vdechujeme. Proto je tak nebezpečný. Z podobných důvodů jsou nebezpečné zdroje záření alfa i beta, které mají tendenci se hromadit v potravinách. Elektrony (beta záření) jsou mnohem lehčí a méně ionizují, tj. méně poškozuji látku a dají se celkem dobře odstínit. Ze zkoumaných tří typů záření se nejhůře odstiňuje gama záření, k dostatečnému zeslabení (gama záření nelze zcela odstínit – viz tabulka a poznámky k ní na konci kapitoly) je zapotřebí silné vrstvy materiálu. Nejlépe stíní gama záření těžké kovy, například olovo.

Poznámka o stínění neutronů a neutronů: Pro zpomalení neutronů se naopak mnohem lépe hodí lehké prvky. Nenabití neutrony nemohou ztrácet svoji energii ionizací, ale interagují přímo s jádry atomů. K jejich stínění se používají prvky, jejichž jádra jsou schopna neutrony pohlcovat (např. bór, používá se kyselina boritá nebo různé plasty s příměsí bóru). Druhou možností je použití látek, které obsahují hodně vodíku (voda, plasty, apod.). Jádra vodíku jsou protony s prakticky stejnou hmotností jako neutrony. Pokud neutron narazí do jádra vodíku, tak mu předá polovinu své energie, a tím se velmi zpomalí (pokud by narazil do těžkého jádra, tak se od něj odrazí s pouze nepatrně menší energií).

Neutrína nejsou nabitá a neinteragují ani s atomovými jádry. Je velmi těžké je nějak zastavit, odstínit či ovlivnit jejich dráhu. Dokážou „bez povšimnutí“ prolétnout Zemí či Sluncem. Na druhou stranu díky tomu, že neinteragují, tak při průletu materiálem nebo organismem ani nezpůsobí žádné poškození a nejsou tedy nebezpečné. Každou sekundu projede jedním centimetrem čtverečním několik desítek miliard neutronů, aniž bychom si toho nějak povšimli.

Různé typy záření jsou různě nebezpečné. Jaké další parametry mohou ovlivňovat nebezpečnost záření pro lidský organismus? Představte si, že stojíte blízko nějakého zdroje záření. Na čem bude záviset nebezpečnost této situace pro vás?

Možné odpovědi:

- charakteristiky zdroje: typ záření, energie příslušných částic, intenzita záření
- doba expozice (jak dlouho se nechám ozařovat)
- vzdálenost od zdroje – pokud se nejedná o speciální směrový zdroj záření, tak díky zvětšující se vzdálenosti od něj dopadne ve větší vzdálenosti na stejně velkou plochu méně záření (pokles odpovídá druhé mocnině vzdálenosti plochy od záříče), dále bude záření ještě zeslabováno interakcí se vzduchem
- překážky mezi mnou a zdrojem záření (stínění)

Zdroj záření	Příspěvek	Příspěvek k mé hodnotě
Lékařská vyšetření		
Rentgen zubů	0,01–0,1 mSv/snímek	.....
Rentgen končetin/klobouků	0,06 mSv/snímek	.....
Rentgen plic	0,05 mSv/snímek	.....
Rentgen trávicího traktu	3 až 8 mSv/vyšetření	.....
Rentgen kyčlí/pánve	1,3 mSv/snímek	.....
Běžný mamogram	0,07–0,5 mSv/vyšetření	.....
Radiofarmaceutické vyšetření (PET, NMR, ...)	přibližně 1–10 mSv/vyšetření	.....
Terapeutické ozařování	použité dávky se velmi liší dle typu a umístění nádoru, dosahují stovek mSv i mnohonásobně více.	.....
Průměrný roční příspěvek z lékařských vyšetření (pro státy s dobrou zdravotní péčí) je asi 1,2 mSv.		
Některá zaměstnání také zvyšují efektivní dávku (průměrné hodnoty):		
Práce přímo v jaderné elektrárně	0,4 mSv/rok	.....
Pilot nebo letuška	3 mSv/rok	.....
Horník	2,7 mSv/rok	.....
Hutník (zpracování hornin)	1 mSv/rok	.....
Práce při zpracování uranu	1,8 mSv/rok	.....
Práce ve zdravotnictví se záříči	0,3 mSv/rok	.....
součet:		..... mSv

Poznámka: V tabulce jsou uvedeny průměrné hodnoty. Hodnoty záření z půdy a atmosféry se liší podle lokality bydliště, mohou být i dvojnásobně větší nebo menší. Podobně jsou uvedeny průměrné hodnoty i u lékařských vyšetření, kde záleží i na konkrétním typu použitého přístroje. Nejsou zde také vyjmenovány úplně všechny „umělé“ zdroje záření, které souvisejí se životním stylem či zaměstnáním.

Porovnejte svoji efektivní dávku s následujícími údaji:

- při používání zdrojů ionizujícího záření je **únosné riziko pro běžné obyvatele** spojeno s navýšením efektivní dávky o 1 mSv/rok
- **limit pro pracovníka se zářením** – součet efektivní dávek při profesním ozáření (tj. v souvislosti se zaměstnáním) **za pět let nesmí převýšit 100 mSv**, ale v žádném průběžném roce nesmí převýšit 50 mSv
- **obyvatelé evakuovaní z okolí Černobylu** – 0,1–380 mSv (během havárie), průměrná hodnota se pohybovala okolo 30 mSv
- **polovina ozářených lidí umírá** v důsledku okamžitého poškození organismu (hlavně infekce a porucha krve tvorby) při efektivních dávkách 3 000–5 000 mSv za krátký časový úsek (tzv. letální dávka)
- při vysokých dávkách nastává **akutní nemoc z ozáření**, která se vyznačuje hlavně poškozením centrálního nervového systému a vede během několika hodin až dní k úmrtí
- **staré hodinky s luminofory** („svítícími ručičkami“) z barvy s obsahem uranu zvyšovaly efektivní dávku o 0,01 mSv/rok, dnes se již nevyrobějí

JAK (SE) CHRÁNIT PŘED ZÁŘENÍM?

“Soudružko, nač jsou ty sáčky?”

“No jo, Horák zas vyrušuje!

Na nohy, Horáku, a též na ručky,
to záření pohlcuje.“

úryvek z písňe Pochodové cvičení od Slávka Janouška

Pamatujete se na doby, kdy se konala pravidelná branná cvičení i s nácivky ochrany proti útokům zbraní hromadného ničení? Na běhání v pláštěnkách s igelitovými sáčky na rukou a nohou? Vyprávění zážitků z podobných akcí můžete použít k získání pozornosti žáků.

Přemýšleli jste ale někdy nad tím, zda by igelitový sáček opravdu ochránil tělo před zářením?^{*31} A víte, jak se správně chovat, abyste se v případě styku se zářičem (tím nemyslím ani jadernou válku, ani havárii, ale třeba vyšetření u lékaře nebo práci se zdroji záření v průmyslu) nevystavili zbytečnému riziku?

Tato kapitola se v první části věnuje vlastnostem jednotlivých typů záření a ve druhé části se zabývá možnostmi, jak omezit vliv záření na člověka, resp. na látku.

RŮZNÉ TYPY ZÁŘENÍ A JEJICH VLASTNOSTI

V této kapitole budeme pod pojmem záření chápat jen **ionizující záření**, tedy takové záření, jež v látce, kterou prochází, vytváří ionty.^{*32} Nebudeme si zde tedy všimát elektromagnetického záření o velkých vlnových délkách, jako je záření radiových a televizních vysílačů, mobilních telefonů, záření v mikrovlnných troubách, tepelné záření nebo viditelné světlo. Často se pro ionizující záření také používají termíny radioaktivní nebo jaderné záření, protože toto záření vzniká obvykle při procesech v atomovém jádře. Doprovází přeměny atomového jádra (dané záření a k němu příslušející přeměna jádra se označuje stejným názvem, tj. alfa záření vzniká při alfa přeměně jádra).

Nejprve se zaměříme na tři základní typy záření. Studenty rozdělte na (nejméně) tři skupiny a přiřďte jim označení – alfa, beta nebo gama. Úkolem žáků bude o **jaderném záření**, které nese stejné jméno jako jejich skupina, společně vyhledat odpovědi na následující otázky:

- Jaká je podstata tohoto záření? O jaké částice se jedná, jaké jsou jejich základní vlastnosti? K jakému ději dochází v atomovém jádře při vyslání tohoto typu záření (při této jaderné přeměně)?
- Jaké jsou typické zdroje tohoto záření?

^{*31} Pláštěnky a sáčky měly ochránit člověka před zamořením spadem, tj. před tím, aby drobné částičky (prach, popílek, ...) obsahující radioaktivní látky ulpěly na jeho těle. Před vlastním pronikavým zářením téměř žádnou ochranu nepředstavovaly.

^{*32} Rozlišujeme tzv. **přímo a nepřímo ionizující záření**. Přímo ionizující záření tvoří nabitě částice s dostatečnou energií, které díky elektromagnetické interakci ionizují atomy látky podél své dráhy a ztrácejí při tom postupně svou energii (např. alfa částice, elektrony = beta částice, urychlené ionty). Nenabitě částice (fotony, neutrony) neionizují látku přímo, ale ionizaci způsobují až produkty jejich interakce s látkou. Proto o nich hovoříme jako o nepřímo ionizujícím záření.

- Jak interaguje toto záření s materiálem? Jaké procesy zde probíhají?
- Jakými materiály prochází toto záření dobře? Jaké materiály ho naopak pohlcují?
- Do jaké hloubky je schopno v materiálu proniknout?
- Zjistili jste něco zajímavého o tomto typu záření (jak bylo objeveno, čím se odlišuje od ostatních, jaké má zvláštní vlastnosti, jaké je jeho využití, apod.)?

S nalezenými odpověďmi poté seznámí celou třídu tak, aby všichni studenti měli k dispozici informace o všech typech záření. Informace mohou sestavit např. do přehledné tabulky.

Poznámka: Tabulka se stručnými odpověďmi na položené otázky je uvedena na konci této kapitoly. Stránku s tabulkou můžete studentům také okopírovat jako stručné shrnutí vlastností základních typů ionizujícího záření. Dále můžete studenty nechat vyhledat informace i o dalších typech záření (např. o záření „beta plus“, svazcích neutronů, urychlených iontech, neutrinech).

ZÁŘENÍ A JÁ

Následuje sled otázek či témat k diskusi se stručným komentářem. Nechte studenty o každé otázce chvíli diskutovat. Podporujte je, aby při argumentaci používali vlastnosti jednotlivých typů záření, které našli v předchozí části nebo se kterými se seznámili jiným způsobem. Poté krátce shrňte jejich nápady, řekněte, co uváděli správně a upozorněte je, kde se mylili či kde je třeba doplnit další informace, případně je doplňte sami.

Jak poznám, že někde je nějaký zdroj záření?

Zdroj záření poznáme pouze pomocí specializovaného měřicího přístroje. Člověk bohužel nemá žádný smysl citlivý na ionizující záření. Pokud bychom vliv záření na organismus pozorovali přímo např. jako teplo nebo jiné změny na kůži, tak už by se jednalo opravdu o velmi nebezpečné množství záření neslučitelné se životem.



Označení radioaktivních látek, ionizující záření, nebezpečí ozáření ionizující záření



Neionizující záření



Ionizující záření, (nový doplňkový symbol schválený MAAE 15. 2. 2007, u nás zatím nepoužívaný)



Biologicky nebezpečné látky (baktérie, viry, apod.)



Jedovaté (toxické) látky