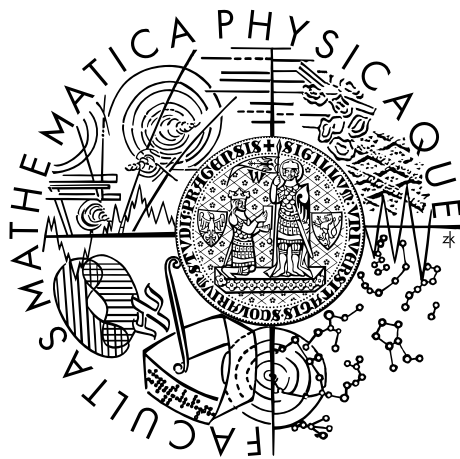


Univerzita Karlova v Praze  
Matematicko-fyzikální fakulta



RNDr. Marek Scholz, Ph.D.

## Středoškolské úlohy na pomezí fyziky, chemie, biologie a medicíny

Konzultanti: RNDr. Jitka Houfková, Ph.D.

Praha 2016

# Obsah

Úvod	2
<b>1 Různé formy energie</b>	<b>3</b>
1.1 Mechanická energie . . . . .	4
1.2 Vnitřní energie a teplo . . . . .	6
1.3 Chemická energie a teplo . . . . .	8
1.4 Elektrostatická energie a ionizační energie . . . . .	9
1.5 Energie elektromagnetického vlnění . . . . .	11
1.6 Ekvivalence energie a hmoty, jaderná energie . . . . .	13
1.7 Řešení úloh . . . . .	15
<b>2 Energetika lidského těla</b>	<b>23</b>
<b>3 Energie ze slunce</b>	<b>29</b>
<b>4 Fotosyntéza</b>	<b>35</b>
Literatura	39

# Úvod

Přestože jsou mezipředmětové vazby explicitně uváděny ve školních vzdělávacích programech gymnázií, často na jejich uplatnění ve vyučovací hodině nezůstává prostor ani energie. Někteří studenti pak vnímají jednotlivé předměty jako oddělené a uniká jim komplexní přírodovědný obraz světa. Cílem práce je napomoci řešení tohoto problému.

Z mnoha mezioborových témat na pomezí fyziky, chemie a biologie jsem si vybral pro podrobnější rozpracování téma energie, což je ústřední a jednotící pojem všech přírodních věd. Schopnost pracovat s pojmem energie a rozumět konceptu zachování a transformací energie je snad jeden z nejdůležitějších výstupů středoškolské fyziky.

Připravil jsem čtyři studijní texty doplněné otázkami a úlohami, které z různých úhlů pohledu zkoumají téma energie. Pro potřeby učitele jsou zvláště uvedena stručná řešení úloh. Vzhledem ke komplexnosti a průřezovosti tématu najdou uplatnění asi spíše v seminářích nebo u starších studentů, kteří mají aspoň do určité míry ucelené znalosti fyziky.

První studijní text nazvaný "Formy energie" ve zhuštěné podobě shrnuje, jakých podob energie může nabývat (kinetická, potenciální, tepelná, vnitřní, elektrostatická, chemická, energie elektromagnetického vlnění a jaderná energie) a sleduje procesy vzájemných přeměn těchto forem energie. Tento studijní text a seznam úloh je poněkud rozsáhlejší a ve výuce tedy mohou být použity vybrané části.

Další tři studijní texty se zaměřují na konkrétní témata na pomezí různých přírodních věd (Energetika lidského těla, energie ze slunce a fotosyntéza). Nejsou tak rozsáhlé a mohou proto být použity přímo ve vyučovací hodině nebo jako domácí práce. Mnoho informací potřebných k řešení úloh je uvedeno právě ve studijním textu, takže je dobré studenty explicitně upozornit na nutnost text dobře prostudovat.

Předkládané úlohy byly zpracovány na základě následujících základních požadavků:

a) početní úlohy se snaží ptát na praktické otázky, které by si člověk mohl přirozeně položit a přirozeně být zvědavý na odpověď. Výsledek úlohy by měl být pokud možno porovnatelný s praktickou zkušeností a/nebo vyvolávat diskusi o relevanci a významu výsledku.

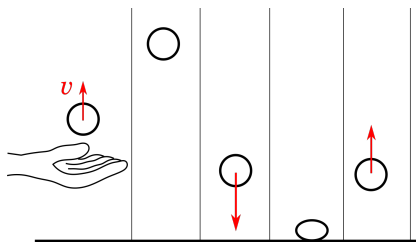
b) Často záměrně nejsou uvedeny všechny potřebné údaje v zadání úlohy. Údaje je třeba najít ve studijním textu, rozumně odhadnout, nebo dohledat na internetu (internet je dnes dostupný téměř všude a všem skrze mobilní zařízení a studenti obvykle vyhledávají rádi, pro vypracování úloh tedy studentům internet povolíme a dokonce doporučíme). Reálné problémy zřídka obsahují přesné zadání všech vstupních hodnot a z vlastní zkušenosti vím, že studenti nejsou vůbec zvyklí řešit takto nekompletně zadané úlohy.

Studijní texty byly pro otestování předloženy dvěma studentům septimy se zájmem o přírodní vědy. Oba se shodli na tom, že studijní texty jsou vcelku srozumitelné, úlohy zajímavé, ovšem často obtížné zejména vzhledem k nutnosti zorientovat se v problému.

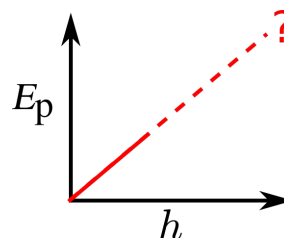
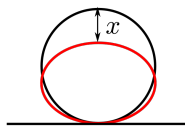
# 1 Různé formy energie

Energie je ústřední pojem fyziky. Rozlišujeme mnoho různých druhů energie (např. kinetická, potenciální tíhová nebo pružnosti, elektrická, chemická, jaderná atd.). Energie může měnit svou formu, ale její celkové množství se v izolované soustavě zachovává. To je jeden z nejdůležitějších zákonů fyziky. V případě kinetické energie je třeba působit silou na těleso po určité dráze, čímž těleso získá rychlost. Energie je potom “uložena” v pohybu tělesa. Naproti tomu tíhová potenciální energie, elastická energie, či energie elektrostatická mají jinou povahu a nevyplývají z pohybu, nýbrž ze vzájemné polohy těles. Pokud se například tělesa přirozeně přitahují (třeba gravitační nebo elektrostatickou silou), pak k jejich oddálení je potřeba působit silou opačného směru a vykonat práci: např. zvedáme závaží od země, oddalujeme od sebe jednotlivé části pružiny při jejím natahování, nebo oddalujeme záporně nabitý elektron od kladně nabitého jádra. Systém takto získal polohovou energii a při spontánním návratu do původního stavu je schopen vykonat práci, např. tak že při znovupřiblížování jsou tělesa postupně urychlována. Vnitřní energie tělesa zahrnuje jak kinetickou energii neuspořádaného pohybu částic, tak polohovou energii částic, které na sebe vzájemně silově působí. Ve středoškolské fyzice se v rámci vnitřní energie tělesa zaměřujeme obvykle na kinetickou energii neuspořádaného pohybu částic tělesa, protože její změny se projevují jako změny teploty tělesa.

Charakter polohové energie má částečně i chemická energie, kde energie molekuly vyplývá ze vzájemných poloh atomů a rozložení elektronů, a přeskupením těchto atomů do jiných molekul, tedy jiných vzájemných poloh, vzniká uspořádání s jinou, třeba menší energií. Rozdíl počáteční a koncové energie se potom uvolní jako teplo, rozuměj vede k nárůstu neuspořádaného pohybu částic. Ovšem molekuly nejsou statické objekty, neustále se v nich pohybují elektrony a detailnější analýza je mnohem složitější. Je možné shledat určité podobnosti energie chemické a energie atomových jader, kde určitá uspořádání protonů a neutronů mají nižší energii než uskupení jiná. Při jaderné přeměně nebo rozpadu je energie odnášena vylétajícími hmotnými částicemi nebo elektromagnetickým vlněním. Speciálním typem energie je energie nesená elektromagnetickou vlnou. Podobně jako vlna na vodě může nadzvednout loď, elektromagnetická vlna silově působí na elektricky nabitě částice nebo magnetické částice, ovšem na rozdíl od vlny na vodě se elektromagnetická vlna může šířit i prázdným prostorem.



Obrázek 1:



Obrázek 2:

## 1.1 Mechanická energie

Nejdříve jsme se učili o mechanické práci a energii. Když odhazují míček, moje ruka působí silou na míček po určité dráze a ruka tak vykoná na míčku práci  $W = Fs$ . Míček působením síly postupně získal rychlost a chemická energie ve svalch se tak přeměnila na pohybovou energii míčku (zároveň byla energie svalů přeměněna na rozpohybování ruky). To, že má míček energii, znamená, že má schopnost vykonat práci, např. rozbít okno. Když se jedno těleso pohybuje vůči druhému (např. míček proti oknu), je možné mu přisoudit kinetickou (pohybovou) energii, která roste s hmotností  $m$  a kvadrátem rychlosti tělesa  $v$

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2. \quad (1)$$

Když míček vyhodíme směrem vzhůru, bude v důsledku tíhové síly postupně zpomalovat až v nejvyšším bodě úplně zastaví. Tam jeho kinetická energie vůči zemi bude nulová. Je ovšem ve velké výšce a při pádu bude postupně zrychlovat a při dopadu na zem bude schopný zase něco rozbít. Při vzestupu se tedy kinetická energie postupně přeměňovala na tíhovou potenciální energii, pro kterou v blízkosti povrchu země platí

$$E_p = mgh, \quad (2)$$

kde  $g$  je gravitační zrychlení a  $h$  výška nad zemí (nebo jinou zvolenou referenční hladinou). Při následném pádu míček zase zrychluje a jeho tíhová potenciální energie se mění na kinetickou. Při dopadu na zem se míček zdeformuje. V určitém okamžiku je jeho rychlost i výška nulová a má tedy nulovou kinetickou i potenciální energii. Míček je ovšem stlačený a získal tak potenciální energii pružnosti. Energie pružnosti (elastická energie) je dána přibližně vztahem

$$E_e = \frac{1}{2}kx^2, \quad (3)$$

přičemž  $x$  je míra deformace (velikost stlačení vyjádřená v jednotkách délky) a  $k$  tuhost míčku. Tuhost míčku vyjadřuje, že ke stlačení míčku o délku  $x$  je na něj potřeba působit silou  $F = kx$ . Stlačený míček se ovšem vrací do původního tvaru a tím se odráží od země. Elastická energie se tak zpět mění v kinetickou a ta při vzestupu v potenciální tíhovou. Míček ale nevyskočí do takové výšky, z jaké padal. Proč? Jednak hraje roli odpor vzduchu ("tření o vzduch"), kvůli kterému se kinetická energie částečně přeměnila v teplo, jak už to u tření bývá (vzpomeň na zahřívání meteoroidu při pádu atmosférou nebo na zahřívání pily při řezání). Dále se také část energie přeměnila na teplo v důsledku vnitřního tření při deformaci míčku a podlahy. Navíc ještě určitá malá část energie byla odnesena zvukovou vlnou.

**1.1 Tyčka:** Skokan o tyči vyskočí mnohem výše než skokan bez tyče. Vysvětlete proč. Popište, k jakým přeměnám energie dochází během skoku o tyči. Odhadněte, jak vysokou laťku může skokan o tyči teoreticky překonat a porovnejte vypočtenou výšku s hodnotou světového rekordu. Diskutujte rozdíly.

**1.2 K nebesům:** Závislost potenciální energie na výšce nad zemí lze v blízkosti země vyjádřit rostoucí lineární funkcí. Jak se tento graf začne odchylovat od lineárního nárůstu, pokud budeme zvětšovat výšku dále mimo bezprostřední blízkost povrchu Země?

Chtělo by to ještě nějakou úlohu na elastickou energii, např. něco v následujícím smyslu:

**1.3** K Vánocům jste dostali trampolínu. V příbalovém letáku se uvádí, že nosnost trampolíny je sice 300 kg, ale že tak těžký člověk by na trampolíně už neměl ani skákat, smí si tam jen stoupnout. Když si na trampolínu stoupnete Vy o váze 60 kg, trampolína se prověsí o deset centimetrů. Zajímalo by Vás, z jaké maximální výšky můžete na trampolínu dopadnout, aniž byste se museli bát, že praskne.

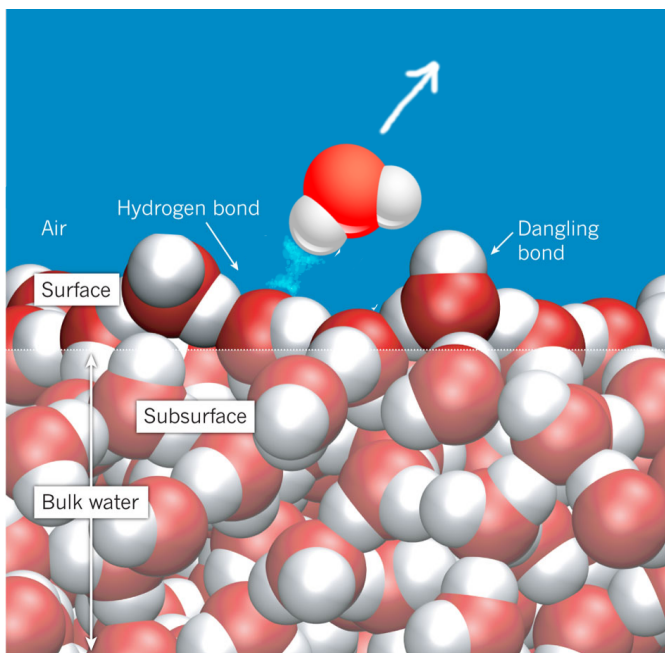
## 1.2 Vnitřní energie a teplo

Při tření dvou těles, např. pilky o dřevo, dochází působením sil na styčné ploše k vychylování atomů/molekul z rovnovážných poloh, což vede k jejich následnému “rozkmitání”. Energie uspořádaného pohybu těles se tak mění na neuspořádaný pohyb<sup>†</sup> částic uvnitř těles – dochází k nárůstu teploty styčných ploch a přenosu tepla do okolí.

Změnu vnitřní energie tělesa  $U$  v důsledku zahřátí je možné vyjádřit vztahem

$$\Delta U = mc\Delta T, \quad (4)$$

kde  $c$  je měrná tepelná kapacita materiálu tělesa a  $m$  hmotnost tělesa. Měrná tepelná kapacita vyjadřuje množství tepla potřebného ke zvýšení teploty 1 kg látky o 1 °C. Měrná tepelná kapacita kovů je relativně malá (např.  $c_{\text{Al}} = 896 \text{ J/kg}$ ,  $c_{\text{Fe}} = 450 \text{ J/kg}$ ) a stačí malé množství energie k jejich zahřátí o určitou teplotu. Naproti tomu měrná tepelná kapacita vody je jedna z největších mezi běžnými látkami ( $c \approx 4,18 \text{ kJ/kg}$ ).<sup>\*</sup> Je třeba velké množství energie na její zahřátí, ale zároveň voda uvolní velké množství tepla při chladnutí. To je obrovsky významné pro život na zemi, protože oceány a vodní plochy stabilizují teplotu na zemi, která by jinak měla daleko větší výkyvy. Na základě měrné tepelné kapacity vody se definuje alternativní jednotka kilokalorie (kcal), která vyjadřuje množství energie potřebné pro zahřátí 1 kg vody o 1 °C ze 14,5 °C na 15,5 °C, tedy  $1 \text{ kcal} \approx 4,185 \text{ kJ}$ . Měrná tepelná kapacita je vztažena na jednotku hmotnosti. V některých případech by ale mohlo být relevantnější zajímat se o tepelnou kapacitu vztaženou na jednotku objemu, nebo tepelnou kapacitu vztaženou na počet částic v tělese (viz úlohu níže).



Obrázek 3: Vypařování z povrchu kapaliny. Přízpusobeno podle [http://www.nature.com/nature/journal/v474/n7350/fig\\_tab/474168a\\_F1.html](http://www.nature.com/nature/journal/v474/n7350/fig_tab/474168a_F1.html)

vypařování kapaliny z hladiny: ty nejrychlejší molekuly kapaliny, které měly dostatečnou kinetickou energii, se vymaní ze silového působení okolních molekul, opouští kapalinu a přecházejí do plynného stavu (viz obr. 3) Vnitřní potenciální energie celého systému přitom roste a vnitřní

Jak již bylo řečeno, při nárůstu kinetické energie neuspořádaného pohybu dochází k nárůstu teploty a naopak. Vnitřní energie ovšem kromě kinetické energie částic zahrnuje i jejich potenciální (polohovou) energii. Částice v látce na sebe vzájemně mohou silově působit. V pevných látkách nebo kapalinách atomy/molekuly kmitají okolo rovnovážných poloh, tedy míst, kde se silová působení všech možných sil od všech okolních objektů vzájemně kompenzují. Při vychýlení částice z této rovnovážné polohy se ovšem síly změní, už nebudou v rovnováze, a jejich výslednice se bude snažit vrátit atom/molekulu zpět do původní polohy.

Pokud má ovšem molekula dostatečnou kinetickou energii, může překonat síly, které ji vrací zpět do rovnovážné polohy a vymanit se tak z jejich působení. Kinetická energie částice při překonávání protisměrných sil klesá, ovšem potenciální energie naroste, podobně jako narůstá potenciální energie míčku, který se vzdaluje od země. Toto se děje například při

<sup>†</sup>Co rozumíme neuspořádaným pohybem částic? V případě jednoatomových plynů, např. He, to je “poletování” jednotlivých atomů. V případě složitějších plynů se přidává rotace molekul a kmitání atomů v rámci molekuly, takzvané vibrace, kdy např. může docházet k periodickému prodlužování a zkracování chemické vazby. V případě kapalin nebo pevných látek, kde nacházíme těsné uspořádání molekul, nedochází k volnému poletování molekul jako u plynů, nýbrž molekuly kmitají okolo rovnovážných poloh v silovém poli ostatních molekul.

<sup>\*</sup>Dokonce ještě o trochu větší měrnou tepelnou kapacitu má amoniak.

kinetická energie klesá, čímž dochází ke známému efektu ochlazování při vypařování (např. místo na ruce potřísněné etanolem chladí).

Když zahříváme vodu na sporáku, dodáváme jí teplo a roste její teplota a tedy i vnitřní kinetická energie. V určitou chvíli ovšem voda začne vřít. Sporák stále dodává teplo, ale pokud bychom do vody dali teploměr, uvidíme, že voda má stále stejnou teplotu. Jak je to možné, že dodáním tepla nenarůstá teplota? Teplota nemůže narůstat, protože ty nejrychlejší molekuly, které dodáním tepla získaly dostatečnou kinetickou energii, se vymaní ze silového působení a přechází do plynného stavu. Narůstá ovšem potenciální energie systému voda-pára. Dodané teplo bylo spotřebováno na “vytržení” molekul z jejich rovnovážných poloh. Teplo potřebné k přeměně jednoho kg kapaliny na plyn při teplotě varu se nazývá měrné skupenské teplo varu a pro vodu činí  $L = 2257 \text{ kJ/kg}$ .

**Kontrolní otázky:** Jaký význam a důsledky má fakt, že voda má relativně velkou měrnou tepelnou kapacitu? Jak je definována jednotka kilokalorie a kolik kcal obsahuje potravina s energetickým obsahem 1000 kJ? Čím se vyznačuje rovnovážná poloha tělesa/objektu? Proč dochází při vyšší teplotě k intenzivnějšímu odpařování kapalin? Proč místo na ruce potřísněné vodou nebo etanolem chladí? Jak je možné, že při varu vody v hrnci plotna stále dodává teplo, aniž by se zvyšovala teplota vody?

**1.4 Zahřívání kovů:** Měrná tepelná kapacita různých kovových materiálů se značně liší, např. olovo  $0,128 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ , hliník  $0,9 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ . a) Podívejte se do tabulek a pokuste se vypočítat, jak souvisí měrná tepelná kapacita  $c$  kovu s hmotností atomu daného kovu! b) Vyberte si několik různých kovů a určete pro každý takzvanou molární tepelnou kapacitu, tedy množství tepla potřebného k ohřátí jednoho molu dané látky o 1 K. Co pozorujete? Pokuste se vysvětlit.

**1.5 Molární tepelná kapacita:** Pokuste se vysvětlit následující jevy na základě takzvaného ekvipartičního teorému: a) Molární tepelná kapacita plynného kyslíku ( $21,1 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ) je výrazně větší než molární tepelná kapacita argonu ( $12,5 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ), b) molární tepelná kapacita většiny kovů (např. hliník  $24,4 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ) je zhruba dvojnásobná proti kapacitě argonu.

**1.6 Čaj:** Pepíček si ráno uvařil čaj, ale ten je příliš horký a Pepíček spěchá do školy, aby tam mohl vyprávět sprosté vtipy. Nechce se mu čaj ředit studenou vodou. Napadne ho tedy, že do hrnku s čajem hodí pět čajových lžiček najednou a tím čaj ochladí. a) Má použít ocelové nebo hliníkové lžičky? b) Kdybychom chtěli určit, o kolik se tím čaj ochladí, jaké všechny parametry potřebujeme znát? Záleží na tom, zda lžička bude ponořená celá nebo jen způlky? c) Potřebné parametry odhadněte nebo změřte a spočítejte, o kolik se čaj ochladí vhozením lžiček.

**1.7 Vejvar:** V rychlovarné konvici o výkonu 2 kW ohříváme půl litru vody. a) Jak dlouho trvá, než voda začne vřít a dále jak dlouho trvá, než se všechna voda vyvaří (tedy stane se z ní pára)? Směle předpokládáme, že všechno teplo z topné spirály je předáno vodě a že stěny konvice jsou dokonale tepelně izolované. b) Kvalitativně popište, jak by se výsledky změnily, pokud by v konvici byl namísto vody kuchyňský olej, případně slivovici.



### 1.3 Chemická energie a teplo

K nárůstu teploty systému dochází i při exotermických chemických reakcích. Chemická energie vazeb mezi atomy se v takovém případě přemění na energii neuspořádaného pohybu atomů a molekul. Exotermickou chemickou reakcí je např. hoření uhlovodíků v přítomnosti kyslíku, kdy dochází k oxidaci molekul a vzniku stabilnějších produktů jako  $\text{CO}_2$  a  $\text{H}_2\text{O}$ . Atom kyslíku se velmi rád obklopuje elektrony (má vysokou elektronegativitu) a má tedy tendenci se zabudovávat do ostatních molekul a “nasát” tak elektrony, což v konečném důsledku vede k rozpadu molekul na produkty jako  $\text{CO}_2$  a  $\text{H}_2\text{O}$ , protože atomy sdílí elektrony s kyslíkem namísto aby sdílením elektronů vytvářely chemickou vazbu mezi sebou. Při spojování atomů do nových těsnějších vazeb, tedy při virtuálním zapadnutí atomu do jakési hlubší potenciálové jamky, dochází ke vzniku mohutných vnitřních kmitů nových molekul. Nárůst neuspořádaného pohybu se projeví jako nárůst teploty. Z tělesa o vysoké teplotě můžeme odebírat teplo a zahřívát tak třeba vodu za vzniku páry, která pohání turbínu elektrárny.

Proces nárůstu teploty systému při chemické přeměně si můžeme představit následovně: máme dvě jamky vedle sebe, levá je mělká a pravá hlubší, přičemž v levé je na dně kulička. Levá jamka s kuličkou představuje molekulu, kde jamka je jeden atom a kulička druhý atom. Pravá jamka je samostatný atom, který touží po druhém atomu - kuličce. Při nízké teplotě systému kulička v levé jamce vykonává malé kmity okolo rovnovážné polohy. Když zvýšíme teplotu systému, dojde k nárůstu neuspořádaného pohybu a kulička začne v levé jamce kmitat s výrazně větší výchylkou. Když teplota bude dostatečně vysoká (zápalná teplota), kmity kuličky budou tak velké, že se kulička může z jamky vykutálet a přeskočit do pravé jamky! Při kutálení směrem ke dnu pravé jamky kulička zrychluje a bude velkou rychlostí kmitat okolo rovnovážné polohy na dně. Energie tohoto kmitavého pohybu se postupně předá do okolí, čímž se okolí molekuly zahřeje a dojde k nárůstu teploty celého systému. Výšku bariéry mezi jamkami nazýváme aktivační energií.

Slučováním molekul s kyslíkem (oxidací) se uvolňuje velké množství energie ve formě tepla. Například dokonalým spálením 1 kg nafty na  $\text{CO}_2$  a  $\text{H}_2\text{O}$  vznikne 45 MJ tepla, spalné teplo metanu je 55 MJ/kg a spalné teplo vodíku  $\text{H}_2$  dokonce 142 MJ/kg, pro dřevo nebo uhlí se hodnoty pohybují okolo 20 MJ/kg.

**Kontrolní otázky:** Co je produktem dokonalého hoření uhlovodíků? Proč při vzniku těchto nových molekul dochází k nárůstu teploty? Co znamená pojem aktivační energie chemické reakce? Jak by se musela změnit situace na obrázku 4, aby znázorňoval endotermickou chemickou reakci?

**1.8 Rozjezd:** Kolik nafty se spotřebuje na prudký rozjezd auta z nuly na 100 km/h, pokud je v motoru účinnost přeměny tepelné energie na mechanickou rovna 30%? Další potřebné hodnoty odhadněte nebo dohledejte.

**1.9 Srovnání energií:** Určete velikost energie v následujících případech a seřadte od nejmenší po největší. Potřebné parametry vhodně odhadněte: pohybová energie sprintera; tatranka; tužková baterie s kapacitou 2000 mAh a napětím 1,5 V; litr nafty; tepelná energie potřebná pro přípravu hrnku kávy. pohybová energie tenisáku při házení ve třídě; pohybová energie auta na dálnici;

Bylo by dobré doplnit nějakou úlohu na aktivační energii, ať to nevyzní úplně do prázdna.

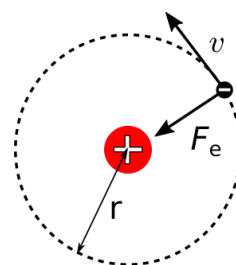


Obrázek 4: “Jamkový” model exotermické chemické reakce

## 1.4 Elektrostatická energie a ionizační energie

Při chemických reakcích dochází k přeskupování rozložení elektronů. V minulé kapitole jsme si ukázali, že při vzniku nových molekul s jiným uskupením atomů a elektronů se může uvolňovat energie ve formě tepla.

Elektrony se v molekulách pohybují v elektrickém poli, které vytvářejí kladně nabitá jádra a ostatní záporně nabitě elektrony. Vezměme si nejjednodušší příklad, atom vodíku, který má jádro tvořené jedním protonem a obal jedním elektronem. Původní Bohrova představa atomu, která byla již překonána, ale je stále velmi užitečná a názorná, předpokládá, že se elektron pohybuje po kruhové dráze v elektrickém poli jádra podobně jako se planeta pohybuje v gravitačním poli okolo Slunce. Elektron a proton na sebe vzájemně působí elektrostatickou silou podle Coulombova zákona. Čím je elektron dál od jádra, tím je jeho potenciální energie větší, protože k jeho oddálení musíme vykonat práci, stejně jako konáme práci při zvedání závaží od země. Elektrostatická potenciální energie elektronu ve vzdálenosti  $r$  od jádra je



$$E_p = -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r}, \quad (5)$$

přičemž nulovou hladinu potenciální energie klademe do nekonečné vzdálenosti od jádra. Pokud tedy oddalujeme elektron od jádra, zvyšujeme jeho potenciální energii a musíme k tomu vykonat úměrně velkou práci.

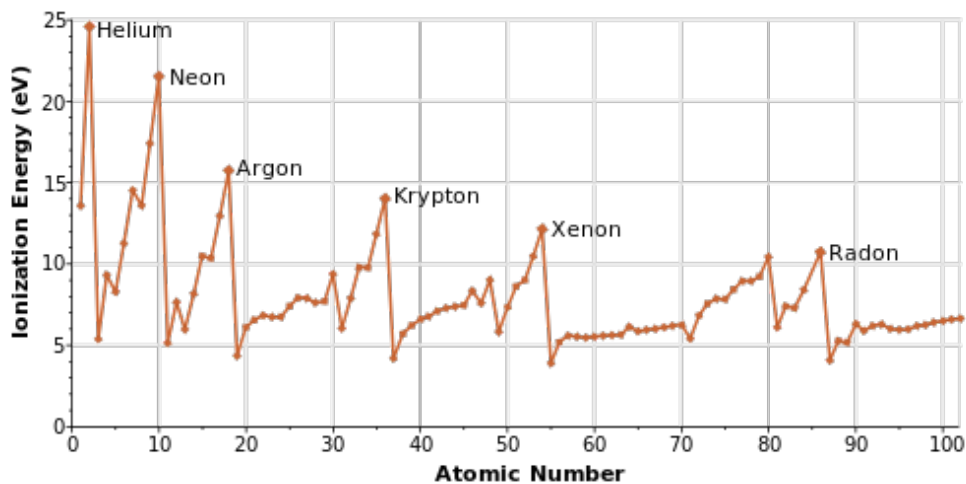
Energii potřebnou k vytržení elektronu z atomu nazveme ionizační energií. Čím je  $r$  větší, tím stačí k ionizaci elektronu menší energie. Pro vyjadřování ionizační energie a energie elektronů obecně se velmi hodí alternativní jednotka energie elektronvolt (eV). Odpovídá kinetické energii, kterou získá elektron je-li urychlen napěťovým rozdílem 1 V. Tedy pokud máme dvě opačně nabitě desky (ve vakuu) mezi kterými je napěťový rozdíl 1 V a k záporně nabitě desce přiložíme elektron, elektron bude zrychlovat směrem ke kladné desce a těsně před dopadem na kladnou desku bude mít kinetickou energii o velikosti 1 eV. 1 eV odpovídá maličkému zlomku jednotky Joule a hodí se proto k vyjadřování energií jednotlivých elementárních částic, atomů a molekul. Například ionizační energie atomu vodíku je 13,6 eV, tedy elektron urychlený ve vakuu napětím  $\geq 13,6$  V je schopen z atomu vodíku “vyšťouchnout” elektron.

**Kontrolní otázky:** V čem spočívá Bohrova představa atomu a v čem byla již překonána? Co praví Coulombův zákon? Je elektrostatická energie ve vzorci 5 rostoucí nebo klesající funkcí  $r$ ? Jak je definována jednotka energie elektronvolt? Co znamená pojem ionizační energie elektronu/atomu?

**1.10 Tvar křivky:** Načrtněte do grafu, jaký je tvar závislosti elektrostatické potenciální energie elektronu na vzdálenosti od protonu. Do stejného grafu nakreslete také tvar závislosti velikosti elektrostatické síly mezi tímto elektronem a protonem.

**1.11 Održení elektronu:** Mají v atomu větší ionizační energii elektrony které jsou blízko jádru, nebo ty, které jsou vzdálenější od jádra? A které mají větší elektrostatickou potenciální energii?

**1.12 Ionizační pila:** Obrázek znázorňuje ionizační energii elektronu z nejrvejší slupky v závislosti na protonovém čísle jádra. Graf má tvar jakési pily. Na základě znalostí z chemie a elektronové struktury zdůvodněte: a) Proč ionizační energie stoupá směrem k vzácným plynům, pro které nabývá maximální hodnoty, b) proč pro prvek následující za vzácnými plyny ionizační energie prudce klesá.

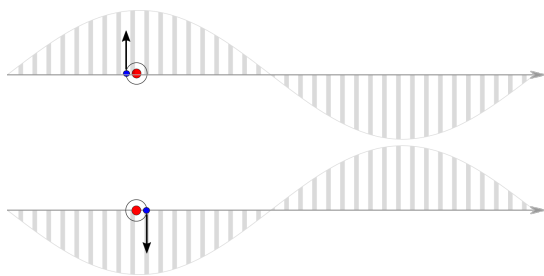


Obrázek: První ionizační energie prvků, <http://www.wikiskripta.eu/index.php/Ionizace>, navštíveno 25.6.2016.

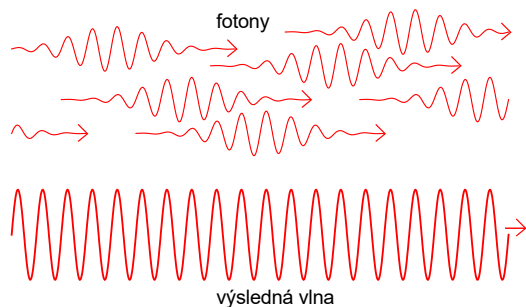
**1.13 Bohrův poloměr:** Na základě ionizační energie atomu vodíku (viz Obrázek 1 v předchozí úloze) určete takzvaný Bohrův poloměr, tedy vzdálenost elektronu od jádra, pokud by vykonával kruhový pohyb. Srovnajte s tabulkovou hodnotou.

*Nápověda: Na základě rovnice 5, Coulombova zákona a znalostí mechaniky kruhového pohybu vyjádřete celkovou energii (potenciální a kinetickou) elektronu obíhajícího kolem protonu v závislosti na poloměru jeho dráhy.*

**1.14 Atomový poloměr:** Vysvětlete, jak je možné, že atomový poloměr klesá v řadě Li, Be, B, C, N, O, F, přestože počet protonů v jádře a počet elektronů v obalu narůstá.



Obrázek 5: Elektromagnetická vlna působící na obíhající elektron.



Obrázek 6: Rozklad vlny do jednotlivých “zavlnění” - fotonů.

## 1.5 Energie elektromagnetického vlnění

V předchozím odstavci jsme hovořili o ionizaci plynu, tedy o procesu odtržení elektronu a jeho oddálení od kladně nabitého atomového jádra. K odtržení je potřeba dodat energii. Jistě si z hodin o elektrickém proudu v plynech pamatujete, že atomy je možné ionizovat například působením ionizujícího elektromagnetického záření o dostatečně vysokých frekvencích a krátkých vlnových délkách, konkrétně krátkovlnné UV, rentgenové a gamma záření. Elektromagnetické záření si představujeme jako vlnění elektromagnetického pole, kdy se prostorem šíří výchylka elektrické intenzity a magnetické indukce.

Když prochází elektromagnetické vlnění oblastí atomu, kmitající elektrické pole působí silou na elektrony. Aby však toto kmitající elektrické pole účinně ovlivnilo dráhu elektronu a vedlo např. k ionizaci, musí kmitat se správnou frekvencí. Proč? Představme si, že elektron krouží kolem jádra (je to sice již překonaná Bohrova představa atomu, ale pro jednoduché úvahy je často užitečná). Čím je přitažlivost elektronu a jádra větší, tím musí elektron obíhat rychleji, aby se udržel na své kruhové dráze. Elektron vykonává kruhivý pohyb s určitou kruhovou frekvencí. Aby postupující elektromagnetické vlnění mohlo účinně urychlit elektron a tím způsobit jeho vzdálení od jádra, musí elektrická síla působit na elektron ve směru jeho pohybu v různých částech jeho trajektorie, a proto musí elektrické pole kmitat se stejnou frekvencí jako je frekvence oběhu elektronu (viz obrázek 5)

**Pozor, uhlova frekvence cirkulárního pohybu elektronu ( $4.13e16$ ) vychází dvojnásobně oproti frekvenci záření ( $2.07e16$ )! Jak je to možné? Je model popsán obrázkem vůbec správně? Pokud ne, vyřadit.**

Elektromagnetické vlnění vydávané určitým zdrojem (např. žárovkou), je možné rozložit do mnoha elementárních záření (obrázek 6). Vlnu tak rozložíme do částí, které nazveme fotony a můžeme je nazvat “částice světla”. Každý foton nese energii

$$E = hf = hc/\lambda, \quad (6)$$

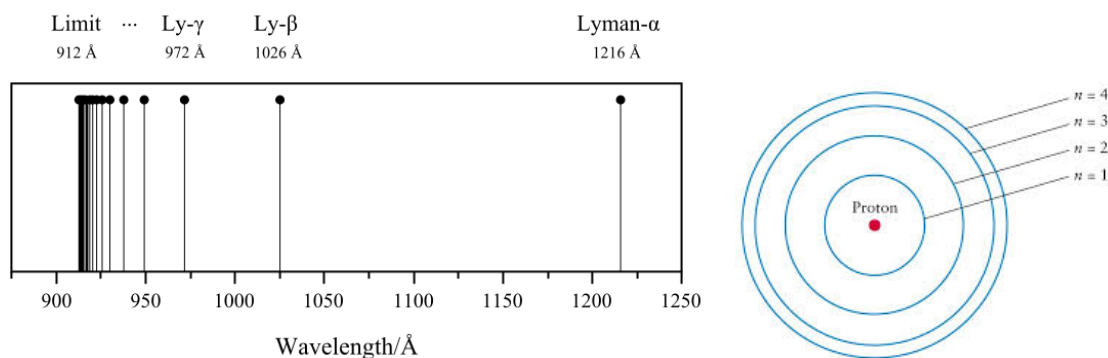
kde  $h$  je Planckova konstanta - energie fotonu je přímo úměrná jeho frekvenci a nepřímo úměrná jeho vlnové délce. Energie, kterou vydává monochromatický zdroj vlnění je tedy součinem energie jednoho fotonu a počtu těchto fotonů. K přímému odtržení elektronu z atomu je třeba fotonů vysoké frekvence. Ani velký počet fotonů nízké frekvence není schopen přímo odtrhnout elektron, ale zase se v materiálu energie takového vlnění může přeměnit na teplo tím, že rozkmitá atomy a molekuly (a materiál dosáhne vysoké teploty, která také může sekundárně vést k ionizaci)

**Kontrolní otázky:** Které druhy elektromagnetického záření mají dostatečnou frekvenci k ionizaci atomů a které naopak nikoli? Proč musí obíhat rychleji elektrony které jsou blíže k jádru? Co ve fyzice míníme pojmem rezonance? Všimli jste si nějakého jiného nefyzikálního kontextu kde se využívá tento pojem? Co je to foton? Jak souvisí energie fotonu s jeho vlnovou délkou? Jaktože může infračervený laser odpařovat a řezat materiály, když nemá dostatečnou frekvenci k ionizaci? Vyhledejte si, co je to takzvaný fotoelektrický jev a jak se zapsal do historie: Jak to souvisí s naším povídáním?

**1.15 Lymanova série:** Na obrázku dole jsou znázorněny polohy některých absorpčních čar mezihvězdného plynu atomárního vodíku (tzv. Lymanova série čar). Absorpční čára vzniká v důsledku absorpce fotonu, při které dojde k vysunutí elektronu na vyšší (vzdálenější) hladinu. (Å(Angstrom) = 0,1 nm je často užívanou jednotkou délky v atomárních měřících, odpovídá řádově vzdálenosti atomů v molekulách.)

a) Která absorpční čára odpovídá ionizaci základního stavu atomárního vodíku? O jaký typ elektromagnetického vlnění se jedná?

b) Jakou vlnovou délku v nm musí mít foton, aby měl energii 1 eV, pokud víte, že ionizační energie atomu vodíku je 13,6 eV?



[https://en.wikipedia.org/wiki/Lyman\\_series](https://en.wikipedia.org/wiki/Lyman_series), navštíveno 25.6.2016

**1.16 Infračervená absorpce:** Infračervené záření nemá dostatečnou frekvenci ke způsobení přímé ionizace, ale může velice účinně rozkmitat atomy spojené chemickou vazbou, např. v molekule jako HCl nebo HBr. Tyto molekuly proto absorbují infračervené vlnění určité specifické frekvence/vlnové délky; dochází k takzvané rezonanci mezi elektromagnetickým vlněním a kmitáním molekuly. Vibrace/kmitání dvouatomové molekuly lze připodobnit ke kmitání dvou závaží spojených pružinou (v beztížném stavu). Na základě kvalifikovaného odhadu určete, zda bude mít vyšší frekvenci vibrací molekula HCl nebo HBr! A která bude absorbovat na delší vlnové délce? Z hodin chemie víme, že HBr je ještě o trochu silnější kyselina než HCl.

K uloze IR asi obrazek dvou teles spojenych pruzinou.

## 1.6 Ekvivalence energie a hmoty, jaderná energie

Pravděpodobně vůbec nejznámějším fyzikálním vztahem i mezi laickou veřejností je Einsteinův vzorec

$$E = mc^2, \quad (7)$$

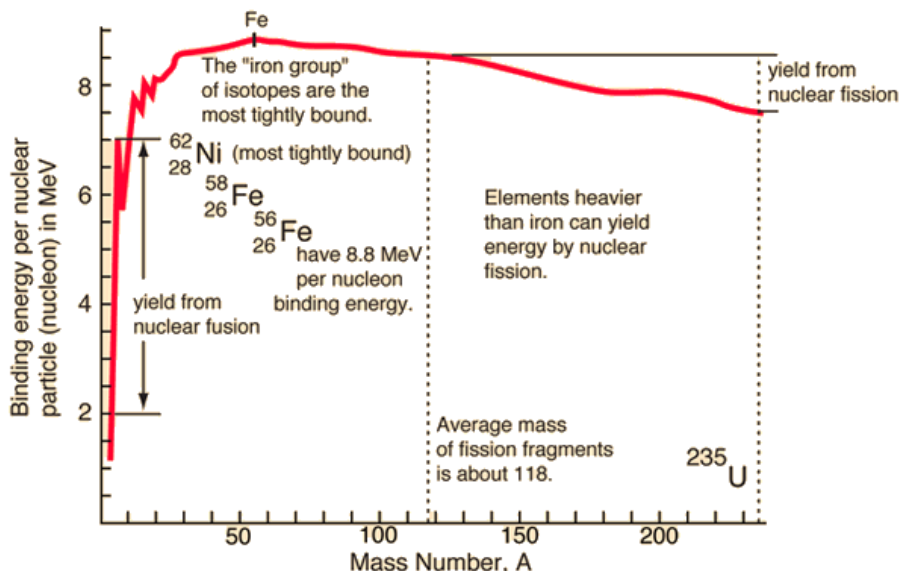
kteřý vyjadřuje vztah mezi celkovou energií tělesa (kinetická, potenciální tíhová, pružnosti, elektrostatická, vnitřní... ) a jeho hmotností, přičemž  $m$  ve vzorci je takzvaná relativistická hmotnost. Jelikož  $c$  je konstanta, ze vzorce plyne, že pokud se celková energie tělesa zvětší o  $\Delta E$  (například v důsledku nárůstu rychlosti tělesa), pak se jeho relativistická hmotnost změní o  $\Delta m = \Delta E/c^2$ , tedy urychlení tělesa vede k nárůstu jeho relativistické hmotnosti! Naopak, i pokud je těleso v dané vztažné soustavě v klidu, pak je v něm ukryto podle tohoto vztahu obrovské množství energie, takzvaná klidová energie  $E = m_0c^2$ , kde  $m_0$  je klidová hmotnost, tedy hmotnost jak ji známe. Vztah vlastně říká, že hmotnost tělesa vyplývá z jeho energie, hovoříme o ekvivalenci hmoty a energie. Pokud těleso odevzdá nějakou energii, pak klesne jeho hmotnost. Například když shoří kus uhlí nebo dojde k rozpadu jádra uranu na štěpné produkty, je výsledná klidová hmotnost produktů nepatrně menší než hmotnost reaktantů. (Kromě štěpení těžkých jader je možné uvolňovat jadernou energii slučováním lehkých jader, jak se tomu děje při termojaderné fúzi v nitrech hvězd.)

Jak je možné z tělesa dostat všechnu energii ukrytou v jeho hmotě? Úplné přeměny hmoty na energii je dosaženo při setkání hmoty s antihmotou, kdy dochází k jejich anihilaci. Zaniká hmota a uvolní se obrovské množství energie ve formě elektromagnetického vlnění (gamma záření). Z hlediska energetiky je anihilace ovšem nepoužitelná: Nemáme žádný vhodný zdroj antihmoty a bylo by extrémně obtížné s ní manipulovat. Přestože se anihilace hmoty a antihmoty možná jeví jako hodně divoké sci-fi, existují případy, kdy se to děje.

**1.17 Hmotnost nukleonu:** Jaká je přibližně hmotnost jednoho molu nukleonů? *Nápověda:* Vzpomeňte si, zda znáte hmotnost jednoho molu atomů uhlíku.

**1.18 Vazebná energie:** Obrázek dole znázorňuje jadernou vazebnou energii připadající na jeden nukleon v závislosti na počtu nukleonů v jádře. Pokud tuto energii vynásobíme počtem nukleonů, dostaneme energii, která by byla hypoteticky potřeba k rozbití jádra na jednotlivé samostatné nukleony. Pozorně si graf prohlédněte a odpovzte na otázky:

- Jak se anglicky řekne “jaderné štěpení” a “jaderné slučování”?
- Kolikrát jsou řádově větší jaderné vazebné energie (tedy síly mezi nukleony) než vazebné energie mezi elektrony a jádry (lze uvážit např. ionizační energii atomu vodíku)?
- Je možné získat více energie rozštěpením 1 kg těžkých jader nebo sloučením 1 kg lehkých jader?
- Jaké jsou nejčastější štěpné produkty při štěpení uranu 235?
- Výpočtem odhadněte přibližně množství energie, která se uvolní při rozštěpení 1 kg jader uranu 235.
- Srovnajte s energií uvolněnou při spálení 1 kg běžných paliv a energií uvolněnou při anihilaci 1 kg hmoty s antihmotou.



<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/nucene/nucbin.html>,

navštíveno 25.6.2016

**1.19 Hmotnostní schodek:** Atomová jednotka ( $u$ ) je definována jako přesně  $\frac{1}{12}$  hmotnosti atomu uhlíku, který obsahuje šest protonů, neutronů a elektronů.  $1u$  tedy odpovídá přibližně hmotnosti nukleonu. Pohledem do tabulek ale zjistíme, že hmotnost izolovaného protonu je  $\approx 1,0073u$  a hmotnost neutronu  $\approx 1,0087u$ .

a) V čem je to zajímavé? Jak vysvětlíte tento rozpor? Bylo by možné na tomto principu získávat energii?

Jednou z významných jaderných reakcí je fúze deuteria a tritia za vzniku helia a uvolnění neutronu. Hmotnost deuteria je  $2.0141 u$ , hmotnost tritia  $3.0160 u$  a hmotnost helia  $4.0026 u$ .

b) Napište rovnici této jaderné reakce, kde u každého elementu uvedete protonové a nukleonové číslo.

c) Jak velká energie se uvolní v této reakci při vzniku jednoho gramu jader helia?

d) Kolikrát je to více než energie vzniklá rozštěpením jednoho gramu uranu 235 nebo spálením jednoho gramu benzínu?

e) S jakými obtížemi se potkávají pokusy o energetické využití fúzních reakcí? Jaké výhody by to naopak mělo oproti konvenčním zdrojům energie?

**1.20 PET:** Při jednom ze základních typů radioaktivního rozpadu vzniká částice antihmoty. O jakou částici se jedná a při přeměně čeho vzniká? Najděte si, co je principem lékařské zobrazovací metody PET. Kolik gamma fotonů vzniká v tomto případě při anihilaci a co lze říci o směrech jejich šíření?

**1.21 Antihmota:** Představte si hypotetickou situaci, že ve vesmíru nedaleko Země byl objeven oblak plynu nebo asteroid, který je tvořen antihmotou. Navrhněte způsob, jak tento potenciální zdroj obrovského množství energie využít.



## 1.7 Řešení úloh

**1.1 Tyčka:** Skokan o tyči vyskočí mnohem výše než skokan bez tyče. Vysvětlete proč. Popište, k jakým přeměnám energie dochází během skoku o tyči. Odhadněte, jak vysokou laťku může skokan o tyči teoreticky překonat a porovnejte vypočtenou výšku s hodnotou světového rekordu. Diskutujte rozdíly.

Dopředná kinetická energie běžce se mění na energii pružnosti tyče a ta poté na energii tíhovou potenciální. Před odrazem tyčkař běží rychlostí sprintera  $v_0 \approx 10$  m/s. Pokud se tato energie beze ztrát přemění v tíhovou potenciální, pak se těžiště tyčkaře zvedne o  $\Delta h = v_0^2/2g = 5$  m. Při původní výšce těžiště 1 m by pak výška výskoku byla 6 m. Tyčkař se na konci výskoku ještě od tyčky odpíchne rukama, z čehož dostáváme, že výška skoku by měla být maximálně něco přes 6 metrů. Světový rekord drží Renaud Lavillenie výkonem 616 cm (2014, Doněck). Jsme tedy na hraně teoretických možností. Poznámka: Žáci v úloze musí odhadnout rychlost běžce, na což ovšem mohou přijít, protože je všeobecně známo že při sprintu se běží 100 m cca za 10 s.

**1.2 K nebesům:** Závislost potenciální energie na výšce nad zemí lze v blízkosti země vyjádřit rostoucí lineární funkcí. Jak se tento graf začne odchylovat od lineárního nárůstu, pokud budeme zvětšovat výšku dále mimo bezprostřední blízkost povrchu Země?

Graf bude konkávní a hodnoty  $E_p$  se budou postupně odchylovat směrem dolů vůči lineární funkci.

**1.3 K Vánocům** jste dostali trampolínu. V příbalovém letáku se uvádí, že nosnost trampolíny je sice 300 kg, ale že tak těžký člověk by na trampolíně už neměl ani skákat, smí si tam jen stoupnout. Když si na trampolínu stoupnete Vy o váze 60 kg, trampolína se prověsí o deset centimetrů. Zajímalo by Vás, z jaké maximální výšky můžete na trampolínu dopadnout, aniž byste se museli bát, že praskne.

**TODO**

**1.4 Zahřívání kovů:** Měrná tepelná kapacita různých kovových materiálů se značně liší, např. olovo  $0,128 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ , hliník  $0,9 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ . a) Podívejte se do tabulek a pokuste se vypočítat, jak souvisí měrná tepelná kapacita  $c$  kovu s hmotností atomu daného kovu! b) Vyberte si několik různých kovů a určete pro každý takzvanou molární tepelnou kapacitu, tedy množství tepla potřebného k ohřátí jednoho molu dané látky o 1 K. Co pozorujete? Pokuste se vysvětlit.

a) Měrná tepelná kapacita kovů je nepřímo úměrná hmotnosti jejich atomů. Proč? Zjednodušeně se dá říci, že dodaná energie ve formě tepla se rozdělí spravedlivě mezi jednotlivé atomy materiálu (ekvipartiční teorém), přičemž na každý atom připadá vnitřní energie o střední velikosti  $3k_B T$ . Čím více má materiál atomů v 1 kg, tím více bude potřeba dodat tepla ke zvýšení teploty materiálu. Kovy s těžšími atomy mají atomů v 1 kg méně a mají tedy menší měrnou tepelnou kapacitu.

b) Molární tepelná kapacita (tepelná kapacita vztažená na počet částic, nikoli na hmotnost) je proto pro většinu kovů téměř totožná a pohybuje se okolo  $25 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ . Její hodnotu dostaneme vynásobením měrné tepelné kapacity molární hmotností kovu, přičemž si dáme pozor na jednotky (kilogramy versus gramy). Např. pro hliník

$$c_{\text{molární}}(\text{Al}) = c_{\text{měrná}}(\text{Al})M_r(\text{Al}) = 0,896 \text{ J/g} \cdot 27 \text{ g/mol} = 24,2 \text{ J/mol}.$$

**1.5 Molární tepelná kapacita:** Pokuste se vysvětlit následující jevy na základě takzvaného ekvipartičního teorému: a) Molární tepelná kapacita plynného kyslíku ( $21,1 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ) je výrazně větší než molární tepelná kapacita argonu ( $12,5 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ), b) molární tepelná kapacita většiny kovů (např. hliník  $24,4 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ) je zhruba dvojnásobná proti kapacitě argonu.



a) Zpřesníme tvrzení z předchozí úlohy: na každý stupeň volnosti připadá podle ekvipartičního teorému energie  $\frac{1}{2}k_B T$ . Argon je jednoatomový plyn a na každý atom proto připadají pouze tři translační stupně volnosti a z toho plyne molární tepelná kapacita  $1.5R$  (molární plynová konstanta  $R = N_A k_B$ ). Dvouatomová molekula kyslíku má kromě tří translačních stupňů volnosti ještě dva rotační a jeden vibrační stupeň volnosti. Vibrační stupně ovšem nemusí být za pokojové teploty aktivní a z toho plyne molární kapacita kyslíku ca.  $2.5R$ .

b) Atomy kovů jsou vázány v krystalové mříži, každý atom se může vychylovat ve třech kolmých směrech a vibrovat kolem rovnovážné polohy, přičemž energie se ukládá jednak do potenciální energie vibrace a jednak do kinetické energie, dohromady  $6 \times \frac{R}{2} = 3R$ .

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/tables/heatcap.html>,

<http://farside.ph.utexas.edu/teaching/sm1/lectures/node71.html>

**1.6 Čaj:** Pepíček si ráno uvařil čaj, ale ten je příliš horký a Pepíček pospíchá do školy, aby tam mohl vyprávět sprosté vtipy. Nechce se mu čaj ředit studenou vodou. Napadne ho tedy, že do hrnku s čajem hodí pět čajových lžiček najednou a tím čaj ochladí. a) Má použít ocelové nebo hliníkové lžičky? b) Kdybychom chtěli určit, o kolik se tím čaj ochladí, jaké všechny parametry potřebujeme znát? Záleží na tom, zda lžička bude ponořená celá nebo jen způlky? c) Potřebné parametry odhadněte nebo změřte a spočítejte, o kolik se čaj ochladí vhozením lžiček.

a) Hliník má sice asi dvojnásobnou měrnou tepelnou kapacitu než ocel, ale hliníková lžička bude mít při stejné velikosti téměř třikrát menší hmotnost než ta ocelová, takže je k ochlazení lepší použít ocelové lžičky.

b,c) Budeme vycházet z následujících parametrů: Hmotnost čaje o objemu 200 ml je  $m_c = 200$  g, počáteční teplota čaje  $T_0 = 80^\circ\text{C}$ , teplota místnosti a lžiček  $T_a = 20^\circ\text{C}$ , měrná tepelná kapacita materiálu lžičky  $c_l = 0,45 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$  a čaje  $c_c = 4,2 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ . Objem nebo hmotnost lžičky je obtížné odhadnout a tak ji nejlépe zvážíme, přičemž pro ocelovou lžičku dostaneme přibližně  $m_l = 0,0 \text{ g}$ . Nebude příliš záviset na tom, zda je lžička ponořená celá nebo jen částečně, protože se díky dobré tepelné vodivosti kovů stejně ohřeje celý objem.

Finální teplotu čaje a lžiček označíme  $T$  a dále postupujeme podle kalorimetrické rovnice:

$$\begin{aligned} Q_{\text{odevzdane vodou}} &= Q_{\text{prijatelzickami}} \\ m_c c_c (T_0 - T) &= 5 m_l c_l (T - T_a) \\ (m_c c_c + 5 m_l c_l) T &= m_c c_c T_0 - 5 m_l c_l T_a \\ T &= \frac{m_c c_c T_0 - 5 m_l c_l T_a}{m_c c_c + 5 m_l c_l} \end{aligned}$$

Po dosazení dostáváme výslednou teplotu  $T = 0,0^\circ\text{C}$  a teplotní rozdíl  $T_0 - T = 0,0^\circ\text{C}$ .

**1.7 Vejvar:** V rychlovarné konvici o výkonu 2 kW ohříváme půl litru vody. a) Jak dlouho trvá, než voda začne vřít a dále jak dlouho trvá, než se všechna voda vyvaří (tedy stane se z ní pára)? Směle předpokládáme, že všechno teplo z topné spirály je předáno vodě a že stěny konvice jsou dokonale tepelně izolované. b) Kvalitativně popište, jak by se výsledky změnily, pokud by v konvici byl namísto vody kuchyňský olej, případně slivovici.

Pokud je počáteční teplota vody  $T_0 = 20^\circ\text{C}$  a její hmotnost  $m = 0,5 \text{ kg}$ , pak voda dojde varu za čas  $t_1 = mc(T_{\text{var}} - T_0)/P = 82 \text{ s}$ . Potom bude voda vřít po dobu  $t_2 = mL/P = 9,4 \text{ min}$ .

**1.8 Rozjezd:** Kolik nafty se spotřebuje na prudký rozjezd auta z nuly na 100 km/h, pokud je v motoru účinnost přeměny tepelné energie na mechanickou rovna 30%? Další potřebné hodnoty odhadněte nebo dohledejte.

Budiž hmotnost auta 1500 kg. Kinetická energie auta vzroste o  $\Delta E_k = \frac{1}{2}mv^2 = 580 \text{ kJ}$ .

Pokud je spalné teplo nafty  $H = 40 \text{ MJ/kg}$ , pak je třeba spálit

$$m = \frac{\Delta E_k}{\eta H} = 42 \text{ g},$$

čož je asi 50 ml nafty (velký panák).

**1.9 Srovnání energií:** Určete velikost energie v následujících případech a seřadte od nejmenší po největší. Potřebné parametry vhodně odhadněte: pohybová energie sprintera; tatranka; tužková baterie s kapacitou 2000mAh a napětím 1,5V; litr nafty; tepelná energie potřebná pro přípravu hrnku kávy. pohybová energie tenisáku při házení ve třídě; pohybová energie auta na dálnici;

Tenisák jednotky J; sprinter  $\sim 4 \text{ kJ}$ ; baterie  $\sim 11 \text{ kJ}$ ; hrnek kávy  $\sim 80 \text{ kJ}$ ; auto  $\sim 600 \text{ kJ}$ ; tatranka  $\sim 1 \text{ MJ}$ ; litr nafty  $\sim 40 \text{ MJ}$

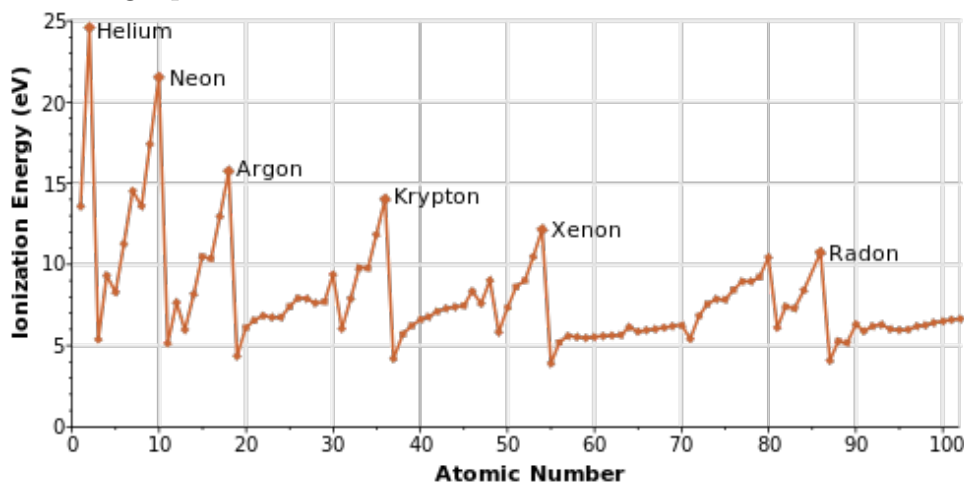
**1.10 Tvar křivky:** Načrtněte do grafu, jaký je tvar závislosti elektrostatické potenciální energie elektronu na vzdálenosti od protonu. Do stejného grafu nakreslete také tvar závislosti velikosti elektrostatické síly mezi tímto elektronem a protonem.

TODO

**1.11 Održení elektronu:** Mají v atomu větší ionizační energii elektrony které jsou blízko jádru, nebo ty, které jsou vzdálenější od jádra? A které mají větší elektrostatickou potenciální energii?

Elektronům dále od jádra stačí dodat k odtržení menší energii. Potenciální energie vzdálenějších elektronů je naopak větší, protože k oddálení elektronu od jádra by bylo potřeba konat práci.

**1.12 Ionizační pila:** Obrázek znázorňuje ionizační energii elektronu z nejvrchnější slupky v závislosti na protonovém čísle jádra. Graf má tvar jakési pily. Na základě znalostí z chemie a elektronové struktury zdůvodněte: a) Proč ionizační energie stoupá směrem k vzácným plynům, pro které nabývá maximální hodnoty, b) proč pro prvek následující za vzácnými plyny ionizační energie prudce klesá.



Obrázek: První ionizační energie prvků, <http://www.wikiskripta.eu/index.php/Ionizace>, navštíveno 25.6.2016.

a) V rámci jedné periody ionizační energie obecně rostou. Efektivní náboj jádra, který "cítí" elektrony ve vnější slupce se totiž zvětšuje, protože kladný náboj jádra roste a elektrony nacházející se rovněž ve vnější slupce nevedou k účinnému stínění jaderného náboje. V rámci periody má maximální ionizační energii její poslední prvek, tedy vzácný plyn se zaplněnou slupkou.

b) Přidáním jednoho dalšího protonu a elektronu obsadíme vyšší slupku a dostaneme prvek první skupiny. Náboj jádra pak bude efektivně stíněn vnitřními elektrony a vnější valenční elektron bude přitahován k jádru relativně malou silou. Ionizační energie vzácných plynů se zmenšuje s rostoucím atomovým číslem, protože vzdálenost elektronů vnější slupky od jádra se zvětšuje.

**1.13 Bohrov poloměr:** Na základě ionizační energie atomu vodíku (viz Obrázek 1 v předchozí úloze) určete takzvaný Bohrov poloměr, tedy vzdálenost elektronu od jádra, pokud by vykonával kruhový pohyb. Srovnajte s tabulkovou hodnotou.

*Nápověda:* Na základě rovnice 5, Coulombova zákona a znalosti mechaniky kruhového pohybu vyjádřete celkovou energii (potenciální a kinetickou) elektronu obíhajícího kolem protonu v závislosti na poloměru jeho dráhy.

Častou chybou v této úloze (pokud není uvedena nápověda) je úplné opomenutí kinetické energie.

*Chybný postup:* K uvolnění elektronu je třeba vykonat práci

$$W = e^2/4\pi\epsilon_0 r = 13,6 \text{ eV},$$

odtud

$$r = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 \cdot 13,6 \text{ eV}} = \frac{e}{4\pi\epsilon_0 \cdot 13,6 \text{ V}} = \frac{1,6 \times 10^{-19} \text{ C}}{1,1 \times 10^{-10} \text{ C V}^{-1} \text{ m}^{-1} \cdot 13,6 \text{ V}} = 1,07 \times 10^{-10} \text{ m}$$

Skutečný Bohrov poloměr je však polovina této hodnoty,  $r_B = 0,53 \times 10^{-10} \text{ m}$ .

*Korektní postup:* Elektron v Bohrově atomu vodíku má potenciální energii  $E_p = -e^2/4\pi\epsilon_0 r$ , ale nutně musí mít i kinetickou energii. Dostředivou sílu na elektron vyjádříme pomocí jeho kinetické energie jako  $F_d = 2E_k/r$  a elektrostatickou (Coulombovskou) přitažlivou sílu k protonu v jádře vyjádříme pomocí potenciální energie jako  $F_C = -E_p/r$ . Z rovnosti  $F_d = F_C$  dostáváme  $E_k = -E_p/2$ . Tedy součet kinetické a potenciální energie je roven polovině potenciální energie a tomu také odpovídá ionizační energie  $13,6 \text{ eV} = \frac{1}{2}|E_p|$ . Dosazením do vztahů

$$E_p = e^2/4\pi\epsilon_0 r = 2 \times 13,6 \text{ eV}$$

$$r = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 \cdot 27,2 \text{ eV}} = \frac{e}{4\pi\epsilon_0 \cdot 27,2 \text{ V}} = \frac{1,6 \times 10^{-19} \text{ C}}{1,1 \times 10^{-10} \text{ C V}^{-1} \text{ m}^{-1} \cdot 27,2 \text{ V}} = 0,53 \times 10^{-10} \text{ m},$$

což nám již dává správnou hodnotu Bohrova poloměru. Úvahu  $E_k = -E_p/2$  lze zobecnit takzvaným viriálovým teorémem, který si laskavý čtenář vyhledá.

**1.14 Atomový poloměr:** Vysvětlete, jak je možné, že atomový poloměr klesá v řadě Li, Be, B, C, N, O, F, přestože počet protonů v jádře a počet elektronů v obalu narůstá.

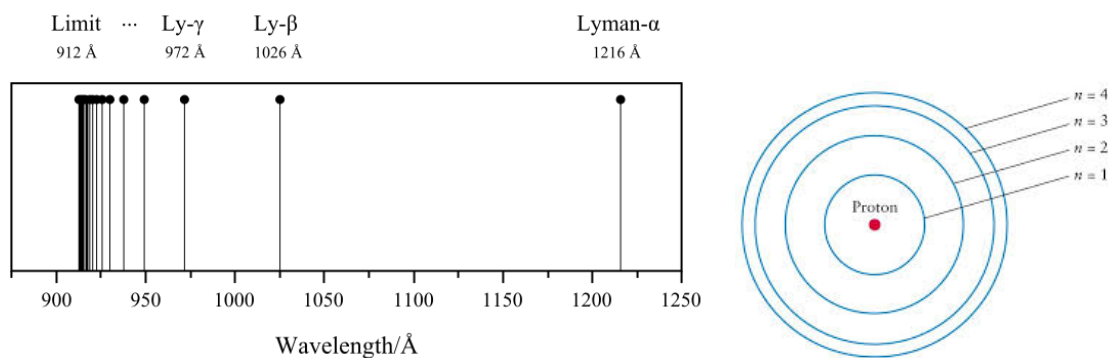
Toto zdánlivě paradoxní chování je dáno tím, že se elektrony uspořádávají do slupek. Jedná se o prvky druhé periody, jejichž náboj jádra postupně narůstá. Jelikož se postupně zaplňují orbitály  $s$  a  $p$  druhé slupky (hlavní kvantové číslo 2), ale náboj jádra narůstá, elektrony jsou "přitahovány" těsněji k jádru a atomový poloměr je menší.

**1.15 Lymanova série:** Na obrázku dole jsou znázorněny polohy některých absorpčních čar mezihvězdného plynu atomárního vodíku (tzv. Lymanova série čar). Absorpční čára vzniká v důsledku absorpce fotonu, při které dojde k vysunutí elektronu na vyšší (vzdálenější) hladinu. (Å (Angstrom) = 0,1 nm je často užívanou jednotkou délky v atomárních měřících, odpovídá řádově vzdálenosti atomů v molekulách.)

a) Která absorpční čára odpovídá ionizaci základního stavu atomárního vodíku? O jaký typ elektromagnetického vlnění se jedná?

b) Jakou vlnovou délku v nm musí mít foton, aby měl energii 1 eV, pokud víte, že ionizační

energie atomu vodíku je 13,6 eV?



[https://en.wikipedia.org/wiki/Lyman\\_series](https://en.wikipedia.org/wiki/Lyman_series), navštíveno 25.6.2016

- Ionizaci odpovídá čára na nejkratší vlnové délce  $912 \text{ \AA} = 91,2 \text{ nm}$  (tedy foton nejvyšší energie). Tato čára leží hluboko v UV oblasti.
- Uvedená absorpční čára na  $91,2 \text{ nm}$  odpovídá ionizační energii 13,6 eV, jak bylo uvedeno ve studijním textu. Vzhledem k nepřímé úměrnosti energie fotonu a vlnové délky potom  $1 \text{ eV}$  odpovídá vlnové délce  $91,2 \text{ nm} \times 13,6 = 1240 \text{ nm}$ , což je v IR.

**1.16 Infračervená absorpce:** Infračervené záření nemá dostatečnou frekvenci ke způsobení přímé ionizace, ale může velice účinně rozkmitat atomy spojené chemickou vazbou, např. v molekule jako HCl nebo HBr. Tyto molekuly proto absorbují infračervené vlnění určité specifické frekvence/vlnové délky; dochází k takzvané rezonanci mezi elektromagnetickým vlněním a kmitáním molekuly. Vibrace/kmitání dvouatomové molekuly lze připodobnit ke kmitání dvou závaží spojených pružinou (v beztížném stavu). Na základě kvalifikovaného odhadu určete, zda bude mít vyšší frekvenci vibrací molekula HCl nebo HBr! A která bude absorbovat na delší vlnové délce? Z hodin chemie víme, že HBr je ještě o trochu silnější kyselina než HCl.

Dvouatomovou molekulu si představíme jako dvě závaží spojená pružinou. Z mechanické analogie víme, že čím jsou závaží spojena tužší pružinou, tím kmitají s menší frekvencí. HBr jakožto silnější kyselina snáze odštěpuje vodík a drží ho tedy menší silou. Vazba v HBr je proto slabší než v HCl. (Navíc Br má větší hmotnost než Cl, což se ale ve frekvenci kmitů promítne jen málo vzhledem k velmi malé hmotnosti vodíku.) Vibrační frekvence HBr je tedy menší než pro HCl a vlnová délka IR absorpce HBr je naopak větší ( $\approx 3,77 \mu\text{m}$  vs.  $\approx 3,34 \mu\text{m}$ )

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/molecule/vibspe.html>,

[http://www.dsfi.unica.it/~sandro/Materiale\\_Corso/Molec/Dentroeder\\_rotovibrazioni.pdf](http://www.dsfi.unica.it/~sandro/Materiale_Corso/Molec/Dentroeder_rotovibrazioni.pdf)

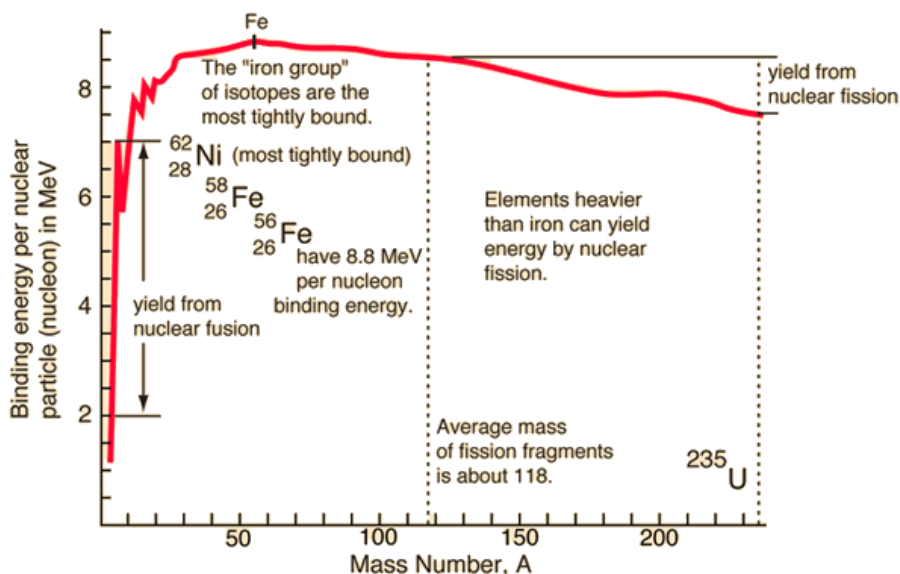
**1.17 Hmotnost nukleonu:** Jaká je přibližně hmotnost jednoho molu nukleonů? *Nápověda:* Vzpomeňte si, zda znáte hmotnost jednoho molu atomů uhlíku.

Molární hmotnost atomu vodíku je asi 1 g/mol a jelikož vodík má v jádře jen jeden proton, je toto i přibližná molární hmotnost nukleonu (hmotnost neutronu je nepatrně větší než hmotnost protonu, což souvisí s tím, že neutron je narozdíl od protonu nestabilní.)

**1.18 Vazebná energie:** Obrázek dole znázorňuje jadernou vazebnou energii připadající na jeden nukleon v závislosti na počtu nukleonů v jádře. Pokud tuto energii vynásobíme počtem nukleonů, dostaneme energii, která by byla hypoteticky potřeba k rozbití jádra na jednotlivé samostatné nukleony. Pozorně si graf prohlédněte a odpovězte na otázky:

- Jak se anglicky řekne “jaderné štěpení” a “jaderné slučování”?
- Kolikrát jsou řádově větší jaderné vazebné energie (tedy síly mezi nukleony) než vazebné energie mezi elektrony a jádry (lze uvážit např. ionizační energii atomu vodíku)?
- Je možné získat více energie rozštěpením 1 kg těžkých jader nebo sloučením 1 kg lehkých jader?

- d) Jaké jsou nejčastější štěpné produkty při štěpení uranu 235?
- e) Výpočtem odhadněte přibližně množství energie, která se uvolní při rozštěpení 1 kg jader uranu 235.
- f) Srovnajte s energií uvolněnou při spálení 1 kg běžných paliv a energií uvolněnou při anihilaci 1 kg hmoty s antihmotou.



<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/nucene/nucbin.html>,  
navštíveno 25.6.2016

- a) “jaderné štěpení” = “nuclear fission”, “jaderná fúze” = “nuclear fusion”
- b) V grafu vidíme jaderné vazebné energie připadající na jeden nukleon v řádu jednotek MeV, pro srovnání ionizační energie atomu vodíku je 13.6 eV, tedy  $\sim 1 \times 10^5 - 1 \times 10^6 \times$  menší.
- c) Z grafu je vidět, že rozštěpením těžkých jader, např. uranu, na běžné štěpné produkty získáme asi 1 MeV na nukleon. Pro fúzní reakce probíhající například na slunci je možné získat několik MeV.
- d) V grafu je znázorněno, že průměrná hmotnost štěpných produktů je asi poloviční oproti hmotnosti jádra uranu. Jádro uranu se ovšem obvykle neštěpí symetricky na dvě stejně hmotná jádra, nýbrž nejčastěji jde o jádra se  $\sim 100$  a  $\sim 135$  nukleony.
- e) Při jaderném štěpení se podle grafu uvolní přibližně energie 1 MeV na jeden nukleon. Hmotnost nukleonu je přibližně 1 g/mol a v jednom kg je proto ca 1000 molů nukleonů. Uvolněná energie tedy

$$E = 1000 \cdot N_A \cdot 1 \text{ MeV} = 10^3 \cdot 6,02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1} \cdot 10^6 (1,6 \times 10^{-19} \text{ C} \cdot \text{V}) \approx 1 \times 10^{14} \text{ J}$$

- f) Spálením 1 kg benzínu dostaneme ca  $5 \times 10^7$  J, tedy milionkrát méně, anihilací  $E = mc^2 = 9 \times 10^{16}$  J, což je naopak tisíckrát víc.

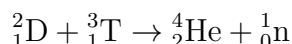
**1.19 Hmotnostní schodek:** Atomová jednotka ( $u$ ) je definována jako přesně  $\frac{1}{12}$  hmotnosti atomu uhlíku, který obsahuje šest protonů, neutronů a elektronů.  $1u$  tedy odpovídá přibližně hmotnosti nukleonu. Pohledem do tabulek ale zjistíme, že hmotnost izolovaného protonu je  $\approx 1,0073u$  a hmotnost neutronu  $\approx 1,0087u$ .

- a) V čem je to zajímavé? Jak vysvětlíte tento rozpor? Bylo by možné na tomto principu získávat energii?

Jednou z významných jaderných reakcí je fúze deuteria a tritia za vzniku helia a uvolnění neutronu. Hmotnost deuteria je 2.0141 u, hmotnost tritia 3.0160 u a hmotnost helia 4.0026 u.

- b) Napište rovnici této jaderné reakce, kde u každého elementu uvedete protonové a nukleonové číslo.
- c) Jak velká energie se uvolní v této reakci při vzniku jednoho gramu jader hélia?
- d) Kolikrát je to více než energie vzniklá rozštěpením jednoho gramu uranu 235 nebo spálením jednoho gramu benzínu?
- e) S jakými obtížemi se potkávají pokusy o energetické využití fúzních reakcí? Jaké výhody by to naopak mělo oproti konvenčním zdrojům energie?

- a) Atom uhlíku je lehčí než součet hmotností nukleonů ze kterých se skládá (a to jsou v atomu uhlíku ještě i elektrony!).
- b) V reakci deuteria s tritiem vzniká helium a neutron:



- c) Změna celkové hmotnosti v jaderné reakci je  $\Delta m = 4.0026 \text{ u} + 1.0087 \text{ u} - 2.0141 \text{ u} - 3.0160 \text{ u} = -0.0188 \text{ u}$ , což činí 0.5% hmotnosti vzniklého helia. Při vzniku 1 g He je tedy  $\Delta m = 5 \times 10^{-6} \text{ kg}$  a uvolní se energie  $E = \Delta mc^2 = 5 \times 10^{-6} \text{ kg} \cdot 9 \times 10^{16} \text{ m}^2\text{s}^{-2} = 4,5 \times 10^{11} \text{ J}$ .

Poznámka 1: Při probírání příkladů na energii uvolněnou v jaderných reakcích je dobré se studentů ptát, v jaké formě se energie uvolní. Studenti obvykle odpovídají “ve formě tepla”, ovšem co to vlastně je teplo? Zde je dobré připomenout, že energie uvolněná při jaderné reakci/rozpadu se primárně přeměňuje na kinetickou energii produktů reakce, případně je část vyzářena ve formě gamma fotonů.

Poznámka 2: Při výpočtu jsme uvažovali klidové hmotnosti atomů, nikoli samotných jader. Počet elektronů se ovšem v reakci zachovává a nemusí nás to tedy trápit.

- d) Spálení 1 g benzínu dá asi  $4,5 \times 10^3 \text{ J}$ , štěpení 1 g uranu  $8 \times 10^{10} \text{ J}$ . Fúze je tedy v tomto případě energeticky účinnější než jaderné štěpení. Dále je potřeba si uvědomit, že uvedená fúzní reakce (3 nukleony + 2 nukleony  $\rightarrow$  4 nukleony + 1 nukleon) využívá pouze malou část potenciálu fúzní energie. Navíc byl uvolněn neutron, který může vstupovat do dalších jaderných reakcí.
- e) Potíží je více, hlavní problém je udržet stabilitu plazmatu při teplotách desítek milionů Kelvinů a zamezit jeho styku s nádobou. Výhodou oproti jadernému štěpení je relativní dostupnost a takřka nevyčerpatelnost paliva, “vyhořelé” palivo není radioaktivní, a principiálně je menší riziko fatální havárie.

**1.20 PET:** Při jednom ze základních typů radioaktivního rozpadu vzniká částice antihmoty. O jakou částici se jedná a při přeměně čeho vzniká? Najděte si, co je principem lékařské zobrazovací metody PET. Kolik gamma fotonů vzniká v tomto případě při anihilaci a co lze říci o směrech jejich šíření?

Při  $\beta^+$  radioaktivní přeměně vznikají pozitrony. Toho využívá pozitronová emisní tomografie, kde je zářičem obvykle atom  ${}^{18}\text{F}$ , který je součástí nějaké sloučeniny, která se akumuluje v určité tkáni/oblasti. Při anihilaci vzniklého pozitronu s okolním elektronem vznikají dva fotony gama, které se šíří vzájemně opačnými směry. Gama fotony jsou detekovány a následně je možné lokalizovat místo jejich vzniku.

**1.21 Antihmota:** Představte si hypotetickou situaci, že ve vesmíru nedaleko Země byl objeven oblak plynu nebo asteroid, který je tvořen antihmotou. Navrhněte způsob, jak tento potenciální zdroj obrovského množství energie zužitkovat.

Zde necháme zcela průchod fantazii. Možná v diskuzi narazíte na problematiku udržení antihmoty, tedy na otázku, jak zabránit jejímu styku s hmotou. Podobný problém je třeba řešit ve fúzních reaktorech (např. tokamaky), kde pro změnu médium má obrovskou teplotu

a nesmí přijít do přímého kontaktu s žádným materiálem. Médium má však formu plazmatu, kde jednotlivé částice nesou elektrický náboj a je tak možné je ovládat pomocí elektrických a magnetických polí, což by nebylo možné v případě neutrálních atomů.

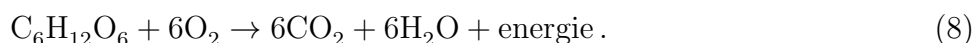


## 2 Energetika lidského těla

Všichni víme, že lidské tělo vydává energii (např. ve formě tepla a mechanické práce), přičemž tuto energii získává “spalováním” potravy. Co to ale znamená spalovat potravu? Jak je všem dobře známo, při hoření složitější molekuly reagují s kyslíkem za vzniku  $\text{CO}_2$  a  $\text{H}_2\text{O}$ . Jedná se o exotermickou reakci, při které se energie uvolní ve formě tepla. V živých organismech probíhá svým způsobem podobný proces, akorát se energie neuvolňuje primárně ve formě tepla.

Energii tělo získává procesem buněčného dýchání. V mitochondriích dochází k řízené oxidaci větších organických molekul, zejména cukrů a tuků. Mitochondrii se proto také někdy říká buněčná elektrárna. Oxidací těchto molekul až na  $\text{CO}_2$  a  $\text{H}_2\text{O}$  se uvolní energie. Oxidace je exotermická reakce, ovšem narozdíl od hoření je v organismech tato exotermická reakce spřažena s endotermickou reakcí, při které dochází k syntéze jiné energetické molekuly, a sice adenosintrifosfátu (ATP). ATP je takzvaná makroergní sloučenina, přenašeč energie, jakýsi mobilní, univerzální a velmi rychle použitelný zdroj chemické energie. ATP má schopnost vstupovat do obrovského množství metabolických procesů, jako je syntéza a transport molekul, svalová kontrakce, nebo buněčné dělení. Při tom se z molekuly ATP odděluje fosfátová skupina ( $\text{P}_i$ ), která reaguje s okolními molekulami. ATP ochuzené o jednu fosfátovou skupinu se nazývá adenosindifosfát (ADP). V těle tedy dochází ke kontinuálnímu rozpadu a nové recyklaci (produkci) molekul ATP. Exotermický rozpad ATP je v metabolických procesech spřažen s různými endotermickými reakcemi, což umožňuje jejich průběh. Rozštěpením jednoho molu molekul ATP na ADP a  $\text{P}_i$  je možné získat volnou energii o velikosti  $E_{\text{mol,ATP}} = 51,6 \text{ kJ/mol}$ .

Typickým “palivem” pro buněčné dýchání je monosacharid glukóza. Proces oxidace glukózy během buněčného dýchání je možné popsat úhrnnou rovnicí



Energie uvolněná při oxidaci je využita k syntéze cca 30 molekul ATP z jejich prekurzorů - ADP a  $\text{P}_i$ .

**2.1 Respire:** Jaká je účinnost přeměny energetického obsahu glukózy na rychle dostupnou energii uloženou v ATP? (Molární hmotnost glukózy  $M_r = 180 \text{ g/mol}$ , měrné spalné teplo  $E_s = 15 \text{ kJ/g}$ .)

Denní energetický výdej závisí na míře námahy, hmotnosti konkrétního člověka a dalších faktorech, průměrný denní energetický výdej se pohybuje okolo  $10\,000 \text{ kJ/den}$ . Tato energie se uvolní ve formě tepla, mechanické práce, nebo pohání metabolické procesy a syntézu potřebných molekul. Výkon lidského těla můžeme přirovnat k výkonu dvou svíček, které postupně pomalu spalují vosk, zatímco my oxidativně rozkládáme potravu.

**2.2 Příkon těla:** Jaký je přibližně průměrný příkon lidského těla ve wattech?

Oxidací sacharidů (mono-, di- i polysacharidy) až na  $\text{CO}_2$  a  $\text{H}_2\text{O}$  získáme energii  $\approx 17 \text{ kJ/g}$ . To je také energie, která by se uvolnila ve formě tepla při shoření sacharidu v peci – jedná se o takzvané spalné teplo dané sloučeniny. Pro srovnání, spalné teplo benzínu nebo vosku je zhruba  $2 - 3 \times$  větší, okolo  $40 - 50 \text{ kJ/g}$ . Tomu se blíží využitelná energetická hodnota tuků, která činí  $\approx 40 \text{ kJ/g}$  a opět odpovídá spalnému teplu. Vedle cukrů a tuků jsou ještě energeticky nejvýznamnější složkou potravy bílkoviny. Spalné teplo bílkovin činí v průměru asi  $23 \text{ kJ/g}$ , ale jejich využitelná energetická hodnota je jen  $17 \text{ kJ/g}$ . Lidské tělo tedy nedokáže kompletně využít veškerou energii bílkovin. To je dáno tím, že bílkoviny nejsou metabolicky oxidovány dokonale – obsahují značné množství atomů dusíku, jehož konečným metabolickým produktem je močovina, která ještě nese relativně velké množství chemické energie. Vedle sacharidů, tuků a bílkovin potraviny mohou obsahovat určité nestravitelné složky a hlavně také velké množství vody, která nijak nepřispívá k energetickému obsahu. Zde je na místě poznamenat, že sacharidy by měly pokrývat asi dvě třetiny energetické spotřeby člověka. Mezi sacharidy jednak patří “rychlé” cukry, tedy mono- a disacharidy, jejichž energii je možno využít v krátkém čase po konzumaci, a jednak “pomalé” komplexní polysacharidy, které je třeba rozštěpit na jednodušší cukry předtím než mohou být energeticky metabolizovány.



**2.3 Struktura:** Jak byste na základě chemické struktury zdůvodnili, že spalné teplo tuků je podobné jako spalné teplo vosku nebo benzínu, zatímco energetický obsah cukrů je asi poloviční?

**2.4 Sušina:** Náš energetický výdej by měly z největší části pokrývat sacharidy (hlavně ovšem ty pomalé). Jaká by přibližně měla být hmotnost sušiny, kterou za den skonzumujeme? Jakou přibližně hmotnost suchých potravin je potřeba si vzít na týdenní horský přechod?

**2.5 Tatranka:** Energetický obsah tatranky vážící 50 g necht' je 1100 kJ, přičemž tatranka je v podstatě suchá a skládá se jen ze sacharidů a tuků. Jaký je poměr zastoupení sacharidů a tuků v tatrance? Srovnejte s údaji výrobce. Kolik tatraneč by pokrylo denní energetickou potřebu člověka?

**2.6 Hibernace:** Když se křeček probouzí ze zimního spánku, musí zvýšit svou tělesnou teplotu přibližně o 30 °C. Jaké množství tuku na probuzení z hibernace spotřebuje, pokud má křeček hmotnost 100 g. Další potřebné hodnoty vhodně odhadněte (zdroj: Kodíček, Karpenko)

**2.7 Mozek:** Denní spotřeba energie lidského mozku odpovídá asi 100 g glukózy. Vypočítejte průměrný příkon mozku ve wattech a srovnejte s příkonem běžných spotřebičů, např. notebooku. Jaká přibližně část celkové spotřeby energie lidského těla připadá na mozek? (zdroj: Kodíček, Karpenko)

I když ležíme a nic neděláme, tělo neustále spotřebovává ATP na nezbytné metabolické procesy, zejména udržování správných hladin látek (např. iontů  $\text{Na}^+$  a  $\text{K}^+$ ) v tkáních, funkci orgánů (např. srdce) a termoregulaci, a to i ve spánku. Tomu odpovídá takzvaný bazální metabolický výdej, který činí v průměru přibližně 6000 kJ/den, ovšem silně závisí na konkrétním jedinci. Už samotné bytí a nicnedělání je tedy vcelku energeticky náročné - všimněte si, že bazální metabolismus představuje 60% veškerého energetického výdeje průměrně aktivního jedince! Většina této energie se nakonec přemění v teplo a tělo má tedy nezanedbatelný tepelný výkon. Abychom si to představili, odpovídá to zhruba tepelnému výkonu svíčky. ATP v těle proto musí být syntetizováno neustále a neustále musí docházet i k oxidaci složitějších molekul na  $\text{CO}_2$  a  $\text{H}_2\text{O}$ . Proto pořád musíme dýchat, čímž se do krve vstřebává kyslík potřebný pro oxidaci a zároveň je z krve odstraňován oxid uhličitý, který je produktem oxidace. Při zvýšeném výkonu přirozeně dýcháme intenzivněji.

Vzduch, který vdechujeme, obsahuje  $\approx 21\%$   $\text{O}_2$  a pouze  $\approx 0,03\%$   $\text{CO}_2$  (objemově - tedy co do počtu molekul), zatímco vydechovaný vzduch obsahuje asi  $\approx 15\%$   $\text{O}_2$  a  $\approx 4\%$   $\text{CO}_2$ . Objem nádechu v klidu bývá okolo půl litru. Pokud množství kyslíku ve vdechovaném vzduchu klesne pod jednu polovinu normální hodnoty, dostavuje se nevolnost a vážné potíže, při poklesu na třetinu se vzduch stává "nedýchatelný" a dochází ke ztrátě vědomí a posléze udušení. Wikipedia také uvádí, že závažné zdravotní potíže a rychlé dušení nastává pokud koncentrace  $\text{CO}_2$  stoupne na 7 – 10%, i přestože by kyslíku bylo dostatečné množství.

**Kontrolní otázky:** Co je to ATP a při jakém procesu v těle vzniká? Jaká je přibližně denní energetická spotřeba průměrného člověka? Jaké jsou energetické hodnoty (spalná tepla) běžných složek stravy? Co je to bazální metabolismus? Za jakých podmínek se vzduch stává nedýchatelný?

**2.8 Třetí plyn:** Víte, jaký je třetí nejzastoupenější plyn v atmosféře?

**2.9 Hubnutí:** O kolik zhubneme, když celý den budeme jen ležet a nebudeme vůbec jíst? Pokud zhubneme, kam se ale hmotnost poděje?

**2.10 Rakev:** Pokud je člověk v rakvi pohřben zaživa, kolik času mu zbývá doufat, že ho někdo zachrání?

a) Sepište, jaké podstatné parametry a informace budete pravděpodobně potřebovat k řešení úlohy. Jejich hodnotu vhodně odhadněte nebo dohledejte.

b) Pokuste se na základě těchto parametrů vypočítat zbývající čas.

**2.11 Přehřátí:** Tělní teplota nad  $42^\circ\text{C}$  je smrtelná. Za jak dlouho dosáhne tělo této teploty, pokud by bylo dokonale tepelně izolováno (tedy je znemožněno i odpařování potu)? Předpokládáme průměrného člověka o hmotnosti 70 kg. (zdroj: Kodíček, Karpenko)

**2.12 Pot:** Jste na poušti, kde je teplota vzduchu ve stínu  $37^\circ\text{C}$ . Jaké množství vody musíte vypotit (a odpařit) za jednu hodinu/den?

**2.13 Hory:** V jaké nadmořské výšce bude již téměř nedýchatelný vzduch, pokud by byl atmosférický tlak v nadmořské výšce  $h$  dán barometrickou rovnicí

$$p(h) = p_0 \exp\left(-\frac{\rho_0}{p_0}gh\right)?$$

Pro jednoduchost předpokládáme, že teplota atmosféry ani její složení se s výškou nemění.

## Řešení úloh

**2.1 Respirace:** Jaká je účinnost přeměny energetického obsahu glukózy na rychle dostupnou energii uloženou v ATP? (Molární hmotnost glukózy  $M_r = 180 \text{ g/mol}$ , měrné spalné teplo  $E_s = 15 \text{ kJ/g}$ .)

Jak je uvedeno ve studijním textu, oxidací jedné molekuly glukózy získáno ca. 30 molekul ATP, přičemž volná energie každé z nich je  $E_{\text{mol,ATP}} = 51,6 \text{ kJ/mol}$ . Jeden mol glukózy má energetický obsah roven součinu  $M_r E_s$  a tedy účinnost přeměny je

$$\eta = 30E_{\text{mol,ATP}}/M_r E_s = 0.57.$$

Zbytek energie se jako obvykle uvolní ve formě tepla. Účinnost je tak výrazně větší než účinnost přeměny chemické energie paliva na mechanickou energii ve spalovacích motorech a generátorech elektrického proudu, ovšem je nutné poznamenat, že při dýchání dochází ke konverzi chemické energie opět na chemickou, nikoli na mechanickou.

**2.2 Příkon těla:** Jaký je přibližně průměrný příkon lidského těla ve wattech?

Vydělíme denní energetickou spotřebu délkou dne v sekundách:  $P = E/t = 10\,000 \text{ kJ}/(24 \times 60 \times 60 \text{ s}) \approx 100 \text{ W}$ .

**2.3 Struktura:** Jak byste na základě chemické struktury zdůvodnili, že spalné teplo tuků je podobné jako spalné teplo vosku nebo benzínu, zatímco energetický obsah cukrů je asi poloviční?

Vosk a benzín jsou nenasycené uhlovodíky (tedy složeny pouze z atomů C a H spojených jednoduchými vazbami). Větší část molekuly tuku je však rovněž uhlovodíkový nenasycený řetězec. Naproti tomu sacharidy obsahují množství OH skupin a jsou tedy již částečně oxidovány.

**2.4 Sušina:** Náš energetický výdej by měly z největší části pokrývat sacharidy (hlavně ovšem ty pomalé). Jaká by přibližně měla být hmotnost sušiny, kterou za den skonzumujeme? Jakou přibližně hmotnost suchých potravin je potřeba si vzít na týdenní horský přechod?

Pokud je denní energetický výdej  $10000 \text{ kJ}$ , pak by bylo třeba skonzumovat  $10\,000 \text{ kJ}/17 \text{ kJ g}^{-1} \approx 600 \text{ g}$  sacharidů. Pokud by sacharidy tvořily dvě třetiny hmotnosti a zbylou jednu třetinu tuky, pak by stačilo  $10000/(17\frac{2}{3} + 40\frac{1}{3}) \approx 400 \text{ g}$ . Ve stravě ovšem reálně samozřejmě musí být i bílkoviny a nestravitelná složka (např. vláknina). Na týdenní horský přechod je tedy třeba minimálně 3-4 kg suchých potravin.

**2.5 Tatranka:** Energetický obsah tatranky vážící 50 g nechť je  $1100 \text{ kJ}$ , přičemž tatranka je v podstatě suchá a skládá se jen ze sacharidů a tuků. Jaký je poměr zastoupení sacharidů a tuků v tatrance? Srovnajte s údaji výrobce. Kolik tatraneček by pokrylo denní energetickou potřebu člověka?

Pro relativní podíl sacharidů ( $x$ ) je možné psát rovnici

$$1100 \text{ kJ} = 50 \text{ g}(x \cdot 17 \text{ kJ/g} + (1 - x) \cdot 40 \text{ kJ/g}).$$

A po zkrácení jednotek

$$1100 = 50(17x + 40(1 - x)).$$

Řešením je  $x = 0.7$ , tedy podíl sacharidů asi 70%.

Reálně je v tatrance ještě malé množství bílkovin, které mají podobný energetický obsah jako sacharidy a součet hmotnosti sacharidů a bílkovin dává asi 63%. Dále je v tatrance jistě ještě určité malé množství nestravitelné složky. (<http://www.zdravapotravina.cz/susenky/tatranky-cokoladove-opavia-lu>) Denní energetickou spotřebu by teoreticky pokrylo zhruba devět tatraneček, ale tuto dietu radši nezkoušejte.

**2.6 Hibernace:** Když se křeček probouzí ze zimního spánku, musí zvýšit svou tělesnou teplotu přibližně o  $30^\circ\text{C}$ . Jaké množství tuku na probuzení z hibernace spotřebuje, pokud má křeček hmotnost  $100\text{ g}$ . Další potřebné hodnoty vhodně odhadněte (zdroj: Kodíček, Karpenko)

Měrná tepelná kapacita těla křečka nechť je v průměru  $c = 3,3\text{ kJkg}^{-1}\text{K}^{-1}$  (viz [2], studenti ovšem mohou klidně počítat s měrnou tepelnou kapacitou vody). Spalné teplo tuku je podle studijního textu  $H_{\text{tuk}} = 40\text{ kJ g}^{-1}$ . Potom platí

$$\begin{aligned}m_{\text{tuk}}H_{\text{tuk}} &= M_{\text{křeček}}c\Delta T \\m_{\text{tuk}} &= M_{\text{křeček}}c\Delta T/H_{\text{tuk}} \\&= 0,1\text{ kg} \cdot 3,3\text{ kJkg}^{-1}\text{K}^{-1} \cdot 30\text{ K}/40\text{ kJ g}^{-1} = 0,25\text{ g},\end{aligned}$$

tedy pouze velmi malá část hmotnosti křečka.

**2.7 Mozek:** Denní spotřeba energie lidského mozku odpovídá asi  $100\text{ g}$  glukózy. Vypočítejte průměrný příkon mozku ve watttech a srovnajte s příkonem běžných spotřebičů, např. notebooku. Jaká přibližně část celkové spotřeby energie lidského těla připadá na mozek? (zdroj: Kodíček, Karpenko)

Sto gramů glukózy má energetický obsah  $1,5\text{ MJ}$ , výkon potom  $P = E/t = 1,5\text{ MJ}/(24 \cdot 60 \cdot 60\text{ s}) = 17\text{ W}$ . To je zhruba příkon malého notebooku.

**2.8 Třetí plyn:** Víte, jaký je třetí nejzastoupenější plyn v atmosféře?

Není to  $\text{CO}_2$ , jehož objemový podíl činí pouze asi  $0,03\%$ , nýbrž vzácný plyn argon s podílem okolo  $1\%$ .

**2.9 Hubnutí:** O kolik zhubneme, když celý den budeme jen ležet a nebudeme vůbec jíst? Pokud zhubneme, kam se ale hmotnost poděje?

Nechť náš denní bazální metabolický výdej činí  $E_{\text{BMV}} \approx 6000\text{ kJ}$ . Předpokládejme, že je energetický výdej krytý spalováním našich tukových zásob. Energetický obsah tuku činí asi  $E_{\text{tuk,g}} = 40\text{ kJ/g}$ . Potom hmotnost metabolizovaného tuku je

$$m = E_{\text{BMV}}/E_{\text{tuk,g}} = 150\text{ g}.$$

Ztratíme tedy  $150\text{ g}$  tuku. Tuk se oxiduje na  $\text{CO}_2$  a  $\text{H}_2\text{O}$ , přičemž  $\text{CO}_2$  vydýcháme a vodu vydýcháme, vypotíme a vyloučíme močí. Dalo by se říci, že naše hmotnost klesne a zvětší se hmotnost vzduchu.

**2.10 Rakev:** Pokud je člověk v rakvi pohřben zaživa, kolik času mu zbývá doufat, že ho někdo zachrání?

a) Sepište, jaké podstatné parametry a informace budete pravděpodobně potřebovat k řešení úlohy. Jejich hodnotu vhodně odhadněte nebo dohledejte.

b) Pokuste se na základě těchto parametrů vypočítat zbývající čas.

*První varianta řešení:* Pokud vyjdeme z údaje objem nádechu půl litru a klidová frekvence nádechů  $15$  za minutu (to si mohou žáci snadno změřit), dostaneme prodýchaný objem  $450\text{ l}$  za hodinu. Jak se uvádí ve studijním textu, průchodem přes plíce se vzduch ochudí o pět procentních bodů kyslíku a naopak obohatí o čtyři procentní body  $\text{CO}_2$ . Jak bylo řečeno, k vážným zdravotním potížím s následkem smrti dochází při poklesu koncentrace kyslíku pod cca  $10\%$  a nárůstu  $\text{CO}_2$  nad  $7\%$ . Ke znehodnocení vzduchu je proto třeba každý litr prodýchat dvakrát, za hodinu tedy znehodnotíme  $225\text{ l}$  vzduchu.  $1\text{ m}^3$  bychom proto znehodnotili zhruba za čtyři a půl hodiny.

*Druhá varianta řešení:* Ke spálení jedné molekuly glukózy je třeba šest molekul  $\text{O}_2$  a uvolní se energie  $15\text{ kJ/g}$ . Jednodenní spotřebu bazálního metabolismu tedy pokryje  $400\text{ g}$  glukózy, což

odpovídá látkovému množství  $n = 400 \text{ g}/180 \text{ g mol}^{-1} = 2,2 \text{ mol}$ . Množství  $\text{O}_2$  spotřebovaného za den je šestinásobné, což činí  $n(\text{O}_2) = 13 \text{ mol/den}$ .

Molární objem plynu za normálních podmínek je  $V_m = 22,41/\text{mol}$ . Vzhledem k zastoupení kyslíku  $q = 0,21$  se potřebné denní množství kyslíku nachází ve vzduchu o objemu

$$V = n(\text{O}_2)V_m/q \approx 14001/\text{den}.$$

Při poklesu množství kyslíku na polovinu a odpovídajícím nárůstu množství  $\text{CO}_2$  již nastávají velmi vážné potíže, takže nutné množství vzduchu je dvojnásobné, a sice  $28001/\text{den} = 2,8 \text{ m}^3/\text{den} = 1171/\text{h} = 1,941/\text{min}$ . Pokud by rakev měla objem okolo  $1 \text{ m}^3$ , pak by člověk rakev vydýchal přibližně za osm a půl hodiny. To je poněkud odlišný výsledek než v předchozím odstavci, ale vzhledem k nepřesnosti mnoha z použitých údajů to je zřejmě snesitelný rozdíl.

**2.11 Přehřátí:** Tělní teplota nad  $42^\circ\text{C}$  je smrtelná. Za jak dlouho dosáhne tělo této teploty, pokud by bylo dokonale tepelně izolováno (tedy je znemožněno i odpařování potu)? Předpokládáme průměrného člověka o hmotnosti  $70 \text{ kg}$ . (zdroj: Kodíček, Karpenko)

Nechť je průměrná tepelná kapacita těla o něco menší než pro vodu,  $c = 3,3 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ . Při tepelném výkonu o velikosti bazálního metabolismu  $P = 6000 \text{ kJ/den} = 250 \text{ kJ/h}$  je doba dosažení teploty  $42^\circ\text{C}$ , tedy navýšení o  $\Delta T = 5^\circ\text{C}$ , rovna

$$t = mc\Delta T/P = 4,6 \text{ h}. \quad (9)$$

**2.12 Pot:** Jste na poušti, kde je teplota vzduchu ve stínu  $37^\circ\text{C}$ . Jaké množství vody musíte vypotit (a odpařit) za jednu hodinu/den?

Opět vyjdeme z tepelného výkonu bazálního metabolismu  $P = 6000 \text{ kJ/den} = 250 \text{ kJ/h}$ . Měrné skupenské teplo mírně klesá s teplotou (nelineárně), přičemž při  $37^\circ\text{C}$  je  $L \approx 2400 \text{ kJ/kg}$  (srovnej se skupenským teplem varu  $L_{\text{var}} \approx 2257 \text{ kJ/kg}$ ). Za hodinu je tedy třeba odpařit vodu o hmotnosti

$$m = P/L = 0,104 \text{ kg} = 104 \text{ g}. \quad (10)$$

Za den tedy vypotíme 1-2 litry vody.

**2.13 Hory:** V jaké nadmořské výšce bude již téměř nedýchatelný vzduch, pokud by byl atmosférický tlak v nadmořské výšce  $h$  dán barometrickou rovnicí

$$p(h) = p_0 \exp\left(-\frac{\rho_0}{p_0}gh\right)?$$

Pro jednoduchost předpokládáme, že teplota atmosféry ani její složení se s výškou nemění.

Jak bylo uvedeno ve studijním textu, pokud koncentrace kyslíku klesne na polovinu normálního množství, dostaví se velmi závažné potíže. To nám dává rovnici pro exponenciální člen v barometrické rovnici

$$\begin{aligned} \exp\left(-\frac{\rho_0}{p_0}gh\right) &= \frac{1}{2} \\ h &= -\ln\left(\frac{1}{2}\right)\frac{p_0}{\rho_0g} \approx 5500 \text{ m}. \end{aligned}$$

kde bylo dosazeno  $p_0 = 101 \text{ kPa}$  a  $\rho_0 = 1,27 \text{ kg/m}^3$ . To je vcelku uvěřitelný výsledek.

### 3 Energie ze slunce

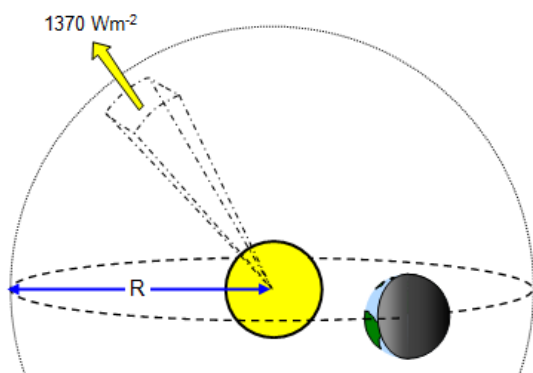
Za téměř veškerou energii, kterou na Zemi máme, vdčíme slunečnímu záření. Sluneční záření pohání fotosyntézu, růst rostlin, koloběh vody, větry. . . Fosilní paliva jako ropa nebo uhlí představují také vlastně jen energii slunečního záření zaskladovanou ve formě organických sloučenin.

Jaké množství sluneční energie na Zemi dopadá? Na čtvercovou desku o velikosti  $1\text{ m}^2$  orientovanou směrem ke slunci a umístěnou na družici nad zemskou atmosférou dopadne za jednu sekundu energie  $1,361\text{ kJ}$ , tedy výkon slunečního záření je  $s = 1361\text{ W/m}^2$  (tzv. solární konstanta). Výkon záření jež projde na zemský povrch orientovaný kolmo ke slunci je o trochu menší, za jasného dne přibližně  $1\text{ kW/m}^2$ . To zhruba odpovídá tepelnému výkonu rychlovarné konvice. Kdybychom tedy pomocí velké čočky šikovně soustředili tuto energii na černou nádobu, mohli bychom v nádobě přivést k varu vodu podobně jako v rychlovarné konvici.

Celkový zářivý výkon dopadající na Zemi je dán součinem solární konstanty a plošného průřezu Země. Přibližně 30% energie záření se od Země odrazí (od mraků, ledu, pouští, ...). Solární výkon absorbovaný Zemí je potom dán jako

$$P_{\text{in}} = s(1 - a)\pi R_Z^2, \quad (11)$$

kde  $R_Z$  je poloměr Země a  $a = 0.3$  její albedo, což je podíl záření, které se odrazí (od mraků nebo od povrchu) aniž by bylo absorbováno. Výsledkem je, že Země absorbuje  $P_{\text{in}} = 173\,000\text{ TW}$  solárního výkonu. Pro srovnání, celkový světový instalovaný výkon elektráren činí asi  $6\text{ TW}$  (jako 3000 elektráren Temelín). V průměru na metr čtverečný vhodně orientovaného zemského povrchu dopadne za rok



Obrázek 7: Solární konstanta †

sluneční energie o velikosti asi  $2\text{ MWh}$  (V ČR přibližně  $1\text{ MWh/rok}$ , protože tato hodnota značně závisí zejména na množství oblačnosti v dané oblasti). Spotřeba elektrické energie české domácnosti činí asi trojnásobek, okolo  $3\text{ MWh}$ .

K přímé konverzi energie slunečního záření na elektrickou energii slouží solární články, nejčastěji na bázi křemíkových polovodičových materiálů. Při dopadu fotonu na PN přechod dochází k vytržení elektronu z vázaného stavu a dochází k prostorovému oddělení elektronu od vzniklé díry, čímž vzniká elektrické napětí. Současná účinnost fotovoltaických článků se pohybuje okolo 15%, tedy 15% veškeré energie záření dopadající na plochu panelu je přeměněno na elektrickou energii. Možná se vám to zdá málo, ale z mnoha úhlů pohledu to je pozoruhodná účinnost. Později si ukážeme, že proces fotosyntézy má leccos společného s fotovoltaickými články.

Solární články ovšem dodávají elektrinu jen za slunečního dne, tedy nestabilně. Je vhodné je proto kombinovat s akumulátory, kde se elektrická energie reverzibilně mění na energii chemickou. Skladování elektrické energie pomocí akumulátorů je ovšem problematické a zatím není dobře zvládnuté. Uvažuje se proto o možnosti rovnou na místě pomocí elektrické energie vyrábět paliva. Jako případ může sloužit elektrolytický rozklad vody na kyslík a vodík, které lze skladovat a jejich pozdějším exotermickým slučováním je možné uvolnit značné množství energie. Lákavým se také jeví nápad použít fotovoltaickou elektrickou energii k syntéze organických sloučenin (např. methanol) z atmosferického  $\text{CO}_2$  a vody. Při transformacích energie ovšem dochází nutně ke ztrátám. Pokud bychom vyrobili pomocí elektrické energie palivo a to někde jinde použili v elektrárně opět pro výrobu elektrické energie, dojde velmi pravděpodobně k energetické ztrátě výrazně větší než 50%. Uvažuje se také o umělé fotosyntéze, kdy dochází k přímočařejší přeměně světelné energie na energii chemických sloučenin, tedy paliv, a to bez fotovoltaického kroku.

Když na Zemi pořád dopadá takové množství sluneční energie, jak je možné, že teplota na Zemi pořád dál a dál neroste? Země musí nutně nějakou energii ztrácet a děje se tak vyzařováním v infračervené (IR) oblasti. Každé teplé těleso vyzařuje IR záření. Čím je těleso teplejší, tím jsou

†Převzato z [http://www.schoolphysics.co.uk/age16-19/Nuclearphysics/Nuclearenergy/text/Solar\\_energy/index.html](http://www.schoolphysics.co.uk/age16-19/Nuclearphysics/Nuclearenergy/text/Solar_energy/index.html)



vlnové délky vyzařování kratší. Povrch slunce má teplotu okolo 6000 K a vyzařuje proto hlavně ve viditelné oblasti spektra (400–700 nm), zatímco Země má teplotu mnohem menší, průměrně asi 290 K, a vyzařuje především na mnohem delších vlnových délkách v IR oblasti s maximem na 10  $\mu\text{m}$ . Výkon vyzařovaný teplým tělesem roste dokonce se čtvrtou mocninou teploty a je dán Stefan-Boltzmannovým vztahem<sup>†</sup>

$$P_{\text{out}} = S\sigma T^4, \quad (12)$$

kde  $S$  je plocha povrchu a  $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ . Jelikož je Země téměř v teplotní rovnováze, musí si být množství přicházející a odcházející energie rovny, tedy  $P_{\text{in}} = P_{\text{out}}$ .

**Kontrolní otázky:** Co vyjadřuje solární konstanta a jaká je její hodnota? Srovnajte hodnotu solární konstanty s něčím známým! Kolik přibližně rychlovarných konvic by dokázala zásobovat elektřinou elektrárna Temelín? Popište stručně princip činnosti fotovoltaického článku! Jaká je zhruba jeho účinnost a co tato účinnost vyjadřuje? Jaká jsou úskalí fotovoltaické energetiky a jaké jsou možné směry jejich řešení? Když na Zemi pořád dopadá takové množství sluneční energie, jak je možné, že teplota na Zemi pořád dál a dál neroste? Jak závisí vlnová délka vyzařování na teplotě objektu?

**3.1 Nesolár:** Jsou na Zemi ještě jiné zdroje energie, které nemají původ v energii ze Slunce? Které typy elektráren využívají tyto “nesolární” zdroje energie?

**3.2 Benzín vs. baterie:** Ropa vznikla konverzí sluneční energie na chemickou. Spálením jednoho litru benzínu se uvolní tepelná energie asi 34 MJ, přičemž tuto tepelnou energii je možné ve spalovacích motorech nebo elektrárnách přeměnit na mechanickou nebo elektrickou energii s účinností okolo 30%. Benzín tedy v malém objemu nese velké množství využitelné energie. Pro srovnání si vezměme baterii smartphonu o rozměrech 0.5x5x6 cm, která má kapacitu 2200 mAh a dodává relativně konstantní napětí 3,7 V dokud se nevybije. Srovnajte “hustotu využitelné energie” (energie vztahovaná na objem) v benzínu s moderní Li-ion baterií. Diskutujte na základě výpočtu, zda jsme již skutečně na začátku éry elektromobilů.

**3.3 Střecha:** Představte si, že veškerou spotřebu elektřiny své domácnosti chcete pokrýt pomocí solárních panelů v kombinaci s vhodným akumulátorem. Bude Vám na to stačit plocha střechy vašeho domku?

**3.4 Temelín:** Kolikrát by musela být plocha solárních panelů větší než je rozloha jaderné elektrárny Temelín, pokud by měla dodávat stejné množství elektrické energie?

**3.5 Sahara:** Představte si, že jste prezident světa a chcete konečně vyřešit celosvětový energetický problém. Na Sahaře, v Arábii nebo v Austrálii je roční úhrn dopadající energie slunečního záření 2,5 MWh/rok/ $\text{m}^2$ . Tomu odpovídá průměrný sluneční výkon přibližně  $p = 300 \text{ W}/\text{m}^2$ . Vaši rádčové Vám doporučují v těchto oblastech postavit solární elektrárnu tvaru čtverce, která bude pokrývat veškerou světovou potřebu elektrické energie. Jak velká bude strana tohoto čtverce? Jaké problémy by byly spojeny s takovouto světovou energetickou strategií?

**3.6 Domácí elektrárna:** Chcete si pořídit solární elektrárnu, abyste nemuseli odebírat elektřinu ze sítě a platit za ni. Firma Solární panely.cz s.r.o nabízela v roce 2016 ke koupi za 300 tisíc Kč fotovoltaickou elektrárnu následujících parametrů: plocha FV pole 15,3  $\text{m}^2$ ; výkon fotovoltaických panelů 2,25 kWp; životnost FV systému 30+ let. Součástí dodávané elektrárny jsou akumulátory pro uskladnění elektřiny a měnič napětí který převádí napětí na střídavé 230 V. Co znamená údaj 2,25 kWp? Jaká je návratnost této investice, pokud není výroba fotovoltaické elektřiny nijak dotována a cena elektrické energie je 5 Kč/kWh?

<sup>†</sup>Tento vztah platí pro takzvané *absolutně černé těleso*, což je významný fyzikální pojem. Slovo *černý* je zde ovšem poněkud matoucí, protože nesprávně evokuje dojem, že takové těleso nevyzařuje. Laskavý čtenář nechť si tento pojem vyhledá v literatuře.

**3.7 Řepka:** V současné době je povinné do pohonných hmot dávat určitý podíl biopaliv. Nejčastěji jsou to deriváty řepkového oleje. Výnos z jednoho hektaru řepkového pole se v ČR udává 3,5 tuny řepkového semene, přičemž z tohoto množství je vyrobena asi jedna tuna řepkového oleje, jehož spalné teplo je  $\approx 40$  MJ/kg, srovnatelné s běžnou naftou. Jakou účinnost má takováto konverze sluneční energie na palivo? Z různých hledisek diskutujte vhodnost využití řepky pro výrobu paliv!

**3.8 Globální ochlazování:** Vypočítejte, jakou průměrnou povrchovou teplotu by měla mít Země, aby dopadající a vyzářená energie byly v rovnováze, pokud by vyzářená energie byla přesně dána Stefan-Boltzmannovým vztahem (budeme tedy předpokládat, že veškeré tepelné záření vycházející ze země unikne do vesmíru).



## Řešení úloh

**3.1 Nesolár:** Jsou na Zemi ještě jiné zdroje energie, které nemají původ v energii ze Slunce? Které typy elektráren využívají tyto “nesolární” zdroje energie?

Určité množství energie přichází z nitra Země, kde jsou původem hlavně jaderné rozpady. Toto množství energie je ovšem vcelku zanedbatelné oproti množství energie přinášené slunečním zářením. Rovněž slapové síly způsobující příliv a odliv nemají původ ve slunečním záření. Co se týče energetiky, jaderné, geotermální a přílivové elektrárny nespolehají na energii slunečního záření, ostatní ano.

**3.2 Benzín vs. baterie:** Ropa vznikla konverzí sluneční energie na chemickou. Spálením jednoho litru benzínu se uvolní tepelná energie asi 34 MJ, přičemž tuto tepelnou energii je možné ve spalovacích motorech nebo elektrárnách přeměnit na mechanickou nebo elektrickou energii s účinností okolo 30%. Benzín tedy v malém objemu nese velké množství využitelné energie. Pro srovnání si vezměme baterii smartphonu o rozměrech 0.5x5x6 cm, která má kapacitu 2200 mAh a dodává relativně konstantní napětí 3,7 V dokud se nevybije. Srovnajte “hustotu využitelné energie” (energie vztahovaná na objem) v benzínu s moderní Li-ion baterií. Diskutujte na základě výpočtu, zda jsme již skutečně na začátku éry elektromobilů.

Hustota využitelné energie pro benzín je po uvážení účinnosti motoru  $\rho_{\text{ben}} \approx 10 \text{ MJ/l}$ . Pro Li-ion baterii je uschovaná energie

$$E = UIt = 3,7 \text{ V} \times 2,2 \text{ A} \times 3600 \text{ s} = 29 \text{ kJ}$$

a její hustota

$$\rho_{\text{bat}} = E/V = 29 \text{ kJ}/15 \times 10^{-3} \text{ l} \approx 1,9 \text{ MJ/l},$$

to jest asi  $5 \times$  méně než pro benzín.

**3.3 Střecha:** Představte si, že veškerou spotřebu elektřiny své domácnosti chcete pokrýt pomocí solárních panelů v kombinaci s vhodným akumulátorem. Bude Vám na to stačit plocha střechy vašeho domku?

Ve studijním textu bylo řečeno, že přibližná spotřeba domácnosti se pohybuje okolo  $E = 3 \text{ MWh/rok}$ , úhrn sluneční energie v ČR je asi  $\sigma = 1 \text{ MWh/m}^2/\text{rok}$  a účinnost solárních článků  $\eta \approx 15\%$ . Potom potřebná plocha je  $S = E/(\sigma\eta) = 20 \text{ m}^2$ , tedy na střechu se vejde.

**3.4 Temelín:** Kolikrát by musela být plocha solárních panelů větší než je rozloha jaderné elektrárny Temelín, pokud by měla dodávat stejné množství elektrické energie?

Lze snadno dohledat, že Temelín má rozlohu přibližně  $1 \text{ km}^2$  a roční výrobu  $14\,000 \text{ GWh}$ . Roční produkce  $1 \text{ m}^2$  solárních panelů je v našich podmínkách  $1 \text{ MWh/m}^2/\text{rok} \cdot 0,15 = 150 \text{ GWh/km}^2/\text{rok}$ . Teoreticky by tedy byla třeba plocha panelů  $93 \text{ km}^2 \approx 10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$ , což odpovídá asi pětině území celé Prahy. Rozloha solární elektrárny by ovšem musela být samozřejmě ještě o něco větší než je samotná plocha panelů.

**3.5 Sahara:** Představte si, že jste prezident světa a chcete konečně vyřešit celosvětový energetický problém. Na Sahaře, v Arábii nebo v Austrálii je roční úhrn dopadající energie slunečního záření  $2,5 \text{ MWh/rok/m}^2$ . Tomu odpovídá průměrný sluneční výkon přibližně  $p = 300 \text{ W/m}^2$ . Vaši rádcové Vám doporučují v těchto oblastech postavit solární elektrárnu tvaru čtverce, která bude pokrývat veškerou světovou potřebu elektrické energie. Jak velká bude strana tohoto čtverce? Jaké problémy by byly spojeny s takovou světovou energetickou strategií?

Ve studijním textu bylo řečeno, že výkon světových elektráren je asi  $P = 6 \times 10^{12} \text{ W}$ .

Potřebná plocha elektrárny je tedy  $S = P/p$ , což odpovídá čtverci o hraně

$$a = \sqrt{P/p} = \sqrt{6 \times 10^{12} \text{ W} / 300 \text{ W m}^{-2}} = 141 \text{ km}$$

To je obrovský, nicméně představitelný rozměr. Potíže jistě zvládnete diskutovat sami, např. nutnost akumulovat energii, zanášení prachem a pískem, umístění v politicky nestabilních nebo vzdálených oblastech, přílišná centralizace, atp.

**3.6 Domácí elektrárna:** Chcete si pořídit solární elektrárnu, abyste nemuseli odebírat elektřinu ze sítě a platit za ni. Firma Solární panely.cz s.r.o nabízela v roce 2016 ke koupi za 300 tisíc Kč fotovoltaickou elektrárnu následujících parametrů: plocha FV pole  $15,3 \text{ m}^2$ ; výkon fotovoltaických panelů  $2,25 \text{ kWp}$ ; životnost FV systému  $30+$  let. Součástí dodávané elektrárny jsou akumulátory pro uskladnění elektřiny a měnič napětí který převádí napětí na střídavé  $230 \text{ V}$ . Co znamená údaj  $2,25 \text{ kWp}$ ? Jaká je návratnost této investice, pokud není výroba fotovoltaické elektřiny nijak dotována a cena elektrické energie je  $5 \text{ Kč/kWh}$ ?

Udávaný výkon  $2,25 \text{ kWp}$  je zřejmě maximální výkon za ideálních slunečních podmínek, nejedná se tedy o průměrný výkon. Nicméně z tohoto údaje můžeme dopočítat, že za ideálních podmínek je výkon na metr čtverečný roven  $2250 \text{ W} / 15,3 \text{ m}^2 = 147 \text{ W/m}^2$ , z čehož ověřujeme, že účinnost fotovoltaického článku je  $\eta = 15\%$ . Při uvážení, že v ČR dopadá sluneční energie  $\sigma = 1000 \text{ kWh/m}^2/\text{rok}$ , je cena vyprodukované energie

$$c = S\sigma\eta \cdot 5 \text{ Kč/kWh} \approx 11\,000 \text{ Kč/rok}.$$

Návratnost tak činí 27 let, což je v rámci deklarované životnosti. Při dotacích na solární energii by návratnost byla samozřejmě podstatně kratší.

**3.7 Řepka:** V současné době je povinné do pohonných hmot dávat určitý podíl biopaliv. Nejčastěji jsou to deriváty řepkového oleje. Výnos z jednoho hektaru řepkového pole se v ČR udává  $3,5$  tuny řepkového semene, přičemž z tohoto množství je vyrobena asi jedna tuna řepkového oleje, jehož spalné teplo je  $\approx 40 \text{ MJ/kg}$ , srovnatelné s běžnou naftou. Jakou účinnost má takováto konverze sluneční energie na palivo? Z různých hledisek diskutujte vhodnost využití řepky pro výrobu paliv!

Snadným výpočtem určíme, že získaná energie vázaná v oleji činí  $4 \text{ MJ/m}^2$ . Za rok ale na metr čtverečný půdy dopadne úhrnná sluneční energie  $1 \text{ MWh} = 3,6 \text{ GJ/m}^2$ . Úhrnná účinnost konverze proto je pouze  $0,11\%$ . Samozřejmě je nutné si uvědomit, že vegetační období řepky je mnohem kratší než celý rok a že kromě oleje řepka uloží energii i ve formě značného množství biomasy. Každým pádem je ovšem využití řepky pro výrobu paliv spíše nevhodné, nehledě na další problémy, které jsou s řepkovými poli spojeny. Ne vše co je nazýváno biopalivem je ve skutečnosti šetrné k životnímu prostředí.

**3.8 Globální ochlazování:** Vypočítejte, jakou průměrnou povrchovou teplotu by měla mít Země, aby dopadající a vyzářená energie byly v rovnováze, pokud by vyzářená energie byla přesně dána Stefan-Boltzmannovým vztahem (budeme tedy předpokládat, že veškeré tepelné záření vycházející ze země unikne do vesmíru).

Z rovnosti  $P_{\text{in}} = P_{\text{out}}$  plyne

$$s\pi R_Z^2(1 - a) = 4\pi R_Z^2\sigma T^4$$

a vyjádřením teploty

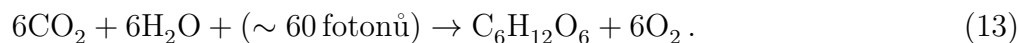
$$T = \left( \frac{s(1 - a)}{4\sigma} \right)^{\frac{1}{4}} = 254,6 \text{ K} = -18,5 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Teplota vychází tak nízká, protože jsme považovali atmosféru za transparentní pro vycházející infračervené záření. Neuvažovali jsme efekt skleníkových plynů, které infračervené záření

vycházející ze Země částečně absorbují a vysílají zpět. Určitá rozumná míra skleníkového efektu je tedy nezbytná pro zajištění příjemné teploty na Zemi. Nejvýznamnějším skleníkovým plynem jsou vodní páry, obvykle se ovšem mluví zejména o oxidu uhličitém, který vzniká ve velké míře v důsledku činnosti člověka.

## 4 Fotosyntéza

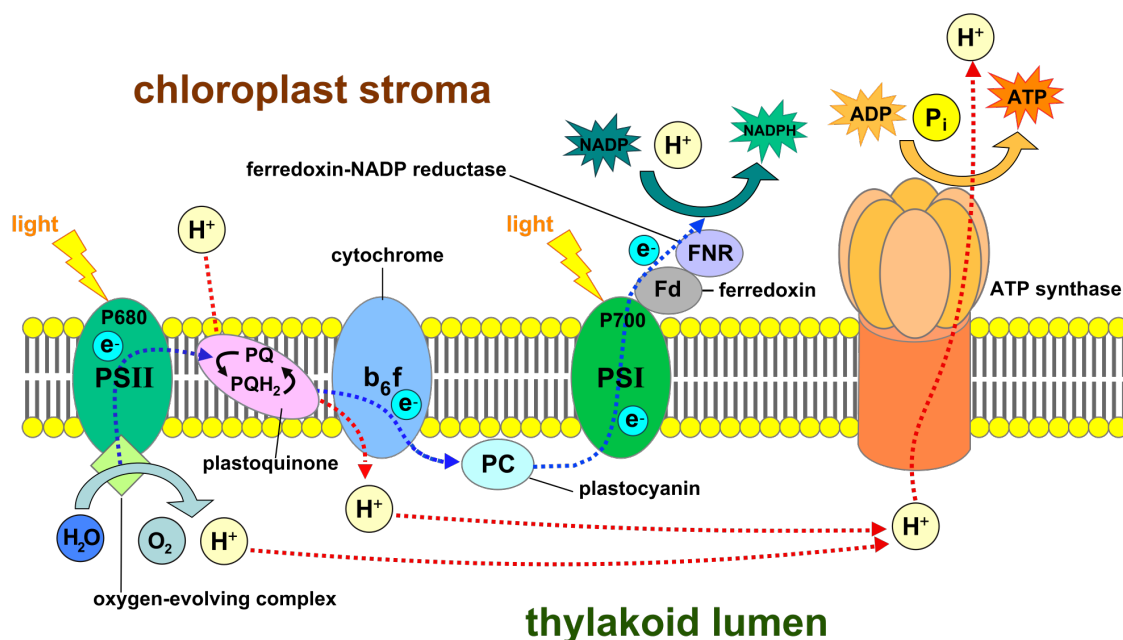
V předchozím jsme si vysvětlili, jakým způsobem organismy získávají energii dýcháním: exotermická oxidace složitějších organickým molekul na jednoduché  $\text{CO}_2$  a vodu je spřažena s endotermním slučováním  $\text{ADP}$  a  $\text{P}_i$  za vzniku makroergní sloučeniny  $\text{ATP}$ . Kde se ale vezmou složitější molekuly, jmenovitě cukry? Opačným procesem oproti buněčné respiraci je fotosyntéza, při které dochází k asimilaci uhlíku z  $\text{CO}_2$  a syntéze složitějších molekul z jednoduchých, k čemuž je potřeba dodat reakcím energii. Příkladem může být opět biosyntéza glukózy, jejíž úhrnná rovnice je



Jak všichni víme, při fotosyntéze je ze vzduchu vázána molekula  $\text{CO}_2$  a zároveň je uvolněna molekula  $\text{O}_2$ . To je příčinou vzniku tolik potřebné kyslíkové atmosféry na Zemi. Při syntéze energeticky bohaté glukózy je třeba do systému dodat dostatek energie ve formě světla, zde konkrétně je třeba přibližně 60 světelných kvant (fotonů) vhodné energie. Energie fotonů je využita nejdříve k syntéze  $\text{ATP}$  a vzniklé  $\text{ATP}$  potom k syntéze glukózy. Fotosyntéza je pozoruhodný a velmi důmyslný proces, při kterém dochází mnohokrát k transformaci jedné formy energie na jinou. Z technické praxe ovšem víme, že každá transformace energie (např. energie paliva na pohybovou energii v motoru auta) je spojena se značnými ztrátami. Účinností fotosyntézy se zabývá úloha na konci textu.

Popišme si základní procesy světelné fáze fotosyntézy, které probíhají v buněčných organelách zvaných chloroplasty. V chloroplastech se nacházejí ještě menší funkční jednotky, thylakoidy, což jsou tělíska ohraničená membránou. V membráně thylakoidů se poté nacházejí různé proteinové komplexy a funkční struktury, viz obrázek 1.

Takzvaná fotosyntetická anténa/světlosběrný komplex je tvořen mnoha molekulami organických barviv. Molekuly organických barviv, nejčastěji chlorofyly, absorbují foton viditelného světla, čímž se dostanou do tzv. excitovaného stavu, kdy je elektron z jejich valenční vrstvy vybuzen do určité vyšší hladiny. Molekuly chlorofylu jsou schopny tuto excitaci předávat okolním molekulám chlorofylu dokud excitace nedospěje do reakčního centra, což je proteinový komplex opatřený pigmentem označovaným  $\text{P680}$ . V reakčním centru je excitace předána pigmentu  $\text{P680}^*$  (hvězdička značí excitaci). Tento excitovaný stav má velké nutkání se zbavit elektronu, je to tedy silné redukční činidlo. Elektron je proto předáván k tomu určeným okolním molekulám, které elektron předávají dalším molekulám. Obecně platí, že každá další molekula v tomto řetězci má



Obrázek 1, en.wikipedia.org/wiki/Photosynthesis, navštíveno 25.6.2016

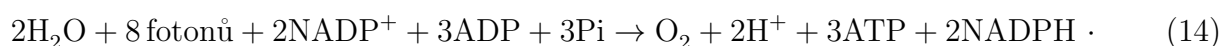
menší nutkání se elektronu zbavit. Z P680 se poté stává kation P680<sup>+</sup> v základním stavu, kterému naopak elektron zoufale chybí. Oddělený elektron takto putuje membránou thylakoidu a dostává se dále od reakčního centra; tomuto mechanismu se říká elektronový transportní řetězec.

Během putování membránou se elektron váže na molekulu chinonu (Q), která díky tomu na sebe může navázat H<sup>+</sup> z vnějšku membrány za vzniku QH<sub>2</sub>. QH<sub>2</sub> poté putuje membránou k dalšímu komplexu (cytochrom), kterému dva elektrony předá a uvolní 2H<sup>+</sup> do vnitřku thylakoidu, čímž se Q zpět regeneruje do své původní podoby. Zde nastává klíčový moment. Během procesu přenosu elektronu došlo k přesunutí iontů H<sup>+</sup> z vnějšku thylakoidu přes membránu do jeho vnitřku. Takto vzniká mezi vnitřkem a vnějškem koncentrační rozdíl těchto iontů a také vzniká elektrické napětí v důsledku přenosu náboje přes membránu! Excitační energie se tak postupně ukládá do vytvoření koncentračního rozdílu a elektrického napětí. Elektron putuje dále, přičemž po cestě dochází jinými mechanismy k dalšímu přesouvání H<sup>+</sup> směrem dovnitř thylakoidu.

V jiné části membrány je druhý fotosystém – proteinový komplex s pigmentem P700 – který se po absorpci fotonu dostává do excitovaného stavu a ochotně předává elektron dalším molekulám, přičemž vzniká kation P700<sup>+</sup>. Tento kation je regenerován zpět na P700 pomocí elektronu z první části mechanismu. Elektrony uvolněné z druhé části jsou nakonec využity na tvorbu molekuly NADPH v reakci  $\text{NADP}^+ + \text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{NADPH}$ . NADPH je také podobně jako ATP řazena mezi makroergní sloučeniny, přičemž NADPH je redukční činidlo potřebné pro syntézu organických molekul (vzpomeň: při buněčném dýchání dochází k oxidaci molekul a vzniku CO<sub>2</sub> a H<sub>2</sub>O, zatímco pro opačný proces je nutné reaktanty redukovat.)

Ještě je však třeba vyřešit, co s kationem P680<sup>+</sup>, který zbyl po absorpci prvního fotonu a odstěpení elektronu. P680<sup>+</sup> natolik touží přijmout elektron, že je ještě silnější oxidační činidlo než molekulární kyslík a proto odebírá elektrony z molekuly vody, která se tímto rozpadá na 2H<sup>+</sup> a  $\frac{1}{2}\text{O}_2$ . Kyslík tedy vzniká takzvanou fotolýzou vody. Vzniklé H<sup>+</sup> dále navyšuje koncentraci H<sup>+</sup> uvnitř thylakoidu.

K čemu je možné využít nashromážděné protony uvnitř thylakoidu? V membráně thylakoidu jsou zabudovány enzymy zvané ATP-syntázy. Tyto enzymy kontrolovaně vypouští ven H<sup>+</sup>, přičemž se tím roztáčí molekulární rotor (molekulární obdoba turbíny, kterou pohání proud H<sup>+</sup>), který secvakává ADP a P<sub>i</sub> za vzniku ATP. Energie uložená ve formě protonového koncentračního spádu a elektrického napětí přes membránu je tak přeměněna na chemickou energii uloženou ve formě ATP. Má se za to, že na produkci jedné molekuly ATP je třeba vypustit 4H<sup>+</sup>. Úhrnná bilance celého procesu je



Na jednu vygenerovanou molekulu O<sub>2</sub> tak připadá produkce 3 ATP. Přitom jsou přeneseny čtyři elektrony získané fotolýzou vody a na každý přenesený elektron připadají dva absorbované fotony (jeden foton v PSII a druhý v PSI). Čtyři přenesené elektrony zajistí přenos 8 H<sup>+</sup> přes membránu dovnitř thylakoidu a navíc vznikají 4H<sup>+</sup> fotolýzou vody, celkem 12 H<sup>+</sup>. Vyprodukované ATP a NADPH jsou posléze použity k syntéze cukrů z CO<sub>2</sub>, což už ovšem není předmětem tohoto textu.

Při výpočtu účinnosti v předchozím příkladu jsme předpokládali, že jsou absorbovány fotony o vlnové délce, která je právě nejvhodnější. Ve skutečnosti ale na rostlinu dopadá celé spektrum slunečního záření od UV až po infračervené. Energie infračervených fotonů tedy není využita vůbec a naopak z energie modrých fotonů je využita jen část. Navíc ne vždy absorpce fotonů vede k transportu elektronu řetězcem. Zvláště při osvětlení přímým sluncem je fotosyntetický aparát schopen pro syntézu ATP využít jen část absorbovaných fotonů a dále jen určitá část makroergních molekul je využita pro syntézu biomasy. Souhrnem, přibližně pouze několik jednotek procent z celkové energie dopadajícího slunečního záření je zeleným porostem přeměněno na chemickou energii biomasy. Účinnost solárních článků je tedy výrazně větší.

**Kontrolní otázky:** Popište, k jakým přeměnám energie postupně během procesu fotosyntézy dochází! Co znamená pojem excitovaný stav molekuly a jak může vzniknout? Co znamená pojem elektronový transportní řetězec? Co je to  $P_i$ ? Vysvětlete pojem fotofosforylace! Co je a čím je “poháněna” ATP-syntáza? Co znamená pojem fotolýza vody a v důsledku čeho k ní dochází? Co je  $P680^+$  a  $P700^+$ ? K čemu je NADPH? Které vstupní látky se při procesu fotosyntézy spotřebovávají a které naopak vznikají? Které barvy chlorofyl absorbují a které naopak ne?

**4.1 Účinnost fotosyntézy bakterií:** Některé bakterie využívají jednodušší mechanismus fotosyntézy než jsme si ho popsali pro rostliny. Nedochozí při něm k rozkladu vody a vzniku kyslíku. V případě této takzvané cyklické fotofosforylace je pro tvorbu jedné molekuly ATP nutné absorbovat dva fotony. <sup>a</sup> Vypočítejte účinnost konverze sluneční energie do energie ATP, pokud jsou oba absorbované fotony na vlnové délce 650 nm (červená) a změna Gibbsovy volné energie při tvorbě jedné molekuly ATP z ADP a  $P_i$  je v lokálních podmínkách buňky  $\Delta G = 51,6 \text{ kJ/mol}$ .

*Nápověda: Vztah pro určení energie fotonu si jistě pamatujete nebo dohledáte.*

<sup>a</sup>elektronovým transportním řetězcem jsou přeneseny celkem dva elektrony, čímž pádem dojde k přenosu čtyřech  $H^+$  přes membránu, a jejich návrat skrz ATP-syntázu umožní tvorbu jedné molekuly ATP.

**4.2 Koncentrační gradient:** Pro syntézu ATP se využívá volná energie uložená v koncentračním spádu  $H^+$  přes membránu thylakoidu. Velikost této volné energie (tj. energie, kterou je možné získat přenosem jednoho molu iontů  $H^+$  ve směru koncentračního a napěťového spádu) je dána vztahem

$$\Delta G = 2.3RT \log \frac{[H^+]_{in}}{[H^+]_{out}} + ZF\Delta\phi,$$

kde  $[H^+]_{in}$ ,  $[H^+]_{out}$  značí koncentraci vodíkových iontů uvnitř a vně thylakoidu.  $\Delta\phi$  je membránový elektrostatický potenciál, který ovšem pro jednoduchost budeme považovat za nulový. <sup>a</sup> K tvorbě jedné molekuly ATP ( $\Delta G_{ATP} = 51,6 \text{ kJ/mol}$ ) je potřeba přenos  $4H^+$  přes membránu thylakoidu.

Kolikrát musí být koncentrace  $H^+$  uvnitř thylakoidu větší než vně, aby přenosem těchto čtyř iontů byl získán dostatek energie pro tvorbu ATP? Vzpomeňte si, jak je definováno pH – jaký je potom rozdíl pH mezi vnitřkem a vnějškem thylakoidu?

*Nápověda: Uvědomte si, který výraz v rovnici ze zadání je pro nás nyní neznámou, a tento výraz vyjádřete z rovnice. Poté už je třeba dosadit konkrétní hodnoty. Co je potřeba dosadit v rovnici za  $\Delta G$ ?*

<sup>a</sup>protože rozdíl elektrostatického potenciálu mezi vnitřní a vnější stranou thylakoidu vzniklý v důsledku přesunu  $H^+$  je do značné míry disipován protisměrným pohybem záporných iontů jako je např.  $Cl^-$ .

## Řešení úloh

**4.1 Účinnost fotosyntézy bakterií:** Některé bakterie využívají jednodušší mechanismus fotosyntézy než jsme si ho popsali pro rostliny. Nedochozí při něm k rozkladu vody a vzniku kyslíku. V případě této takzvané cyklické fotofosforylace je pro tvorbu jedné molekuly ATP nutné absorbovat dva fotony. <sup>a</sup> Vypočítejte účinnost konverze sluneční energie do energie ATP, pokud jsou oba absorbované fotony na vlnové délce 650 nm (červená) a změna Gibbsovy volné energie při tvorbě jedné molekuly ATP z ADP a P<sub>i</sub> je v lokálních podmínkách buňky  $\Delta G = 51,6 \text{ kJ/mol}$ .

*Nápověda: Vztah pro určení energie fotonu si jistě pamatujete nebo dohledáte.*

<sup>a</sup>elektronovým transportním řetězcem jsou přeneseny celkem dva elektrony, čímž pádem dojde k přenosu čtyřech H<sup>+</sup> přes membránu, a jejich návrat skrz ATP-syntázu umožní tvorbu jedné molekuly ATP.

V úhrnné bilanci je jedna molekula ATP vyprodukována pomocí energie dvou fotonů. Energie dvou fotonů je  $E_{2f} = 2hc/\lambda$ , pro tvorbu jednoho molu ATP je potom absorbovaná energie  $E = 2hcN_A/\lambda = 368 \text{ kJ/mol}$  a účinnost  $\eta = \Delta G/E = 0.14$ .

**4.2 Koncentrační gradient:** Pro syntézu ATP se využívá volná energie uložená v koncentračním spádu H<sup>+</sup> přes membránu thylakoidu. Velikost této volné energie (tj. energie, kterou je možné získat přenosem jednoho molu iontů H<sup>+</sup> ve směru koncentračního a napěťového spádu) je dána vztahem

$$\Delta G = 2,3RT \log \frac{[\text{H}^+]_{\text{in}}}{[\text{H}^+]_{\text{out}}} + ZF\Delta\phi,$$

kde  $[\text{H}^+]_{\text{in}}$ ,  $[\text{H}^+]_{\text{out}}$  značí koncentraci vodíkových iontů uvnitř a vně thylakoidu.  $\Delta\phi$  je membránový elektrostatický potenciál, který ovšem pro jednoduchost budeme považovat za nulový. <sup>a</sup> K tvorbě jedné molekuly ATP ( $\Delta G_{\text{ATP}} = 51,6 \text{ kJ/mol}$ ) je potřeba přenos 4H<sup>+</sup> přes membránu thylakoidu.

Kolikrát musí být koncentrace H<sup>+</sup> uvnitř thylakoidu větší než vně, aby přenosem těchto čtyř iontů byl získán dostatek energie pro tvorbu ATP? Vzpomeňte si, jak je definováno pH – jaký je potom rozdíl pH mezi vnitřkem a vnějším thylakoidu?

*Nápověda: Uvědomte si, který výraz v rovnici ze zadání je pro nás nyní neznámou, a tento výraz vyjádřete z rovnice. Poté už je třeba dosadit konkrétní hodnoty. Co je potřeba dosadit v rovnici za  $\Delta G$ ?*

<sup>a</sup>protože rozdíl elektrostatického potenciálu mezi vnitřní a vnější stranou thylakoidu vzniklý v důsledku přesunu H<sup>+</sup> je do značné míry disipován protisměrným pohybem záporných iontů jako je např. Cl<sup>-</sup>.

Neznámou je podíl koncentrací  $[\text{H}^+]_{\text{in}}/[\text{H}^+]_{\text{out}}$ . Vzpomeneme si ovšem rovnou, že pH je definováno jako záporně vzatý dekadický logaritmus koncentrace iontů H<sup>+</sup>, tudíž

$$\log([\text{H}^+]_{\text{in}}/[\text{H}^+]_{\text{out}}) = (-\log[\text{H}^+]_{\text{out}}) - (-\log[\text{H}^+]_{\text{in}}) = \Delta\text{pH}$$

V zadání bylo zdůvodněno, že druhý člen zanedbáváme. Ze zadané rovnice potom dostáváme

$$\begin{aligned} \Delta G &= 2,3RT\Delta\text{pH} \\ \frac{\Delta G}{2,3RT} &= \Delta\text{pH}. \end{aligned}$$

Dosazením  $\Delta G = \Delta G_{\text{ATP}}/4 = 12,9 \text{ kJ/mol}$  a ostatních hodnot obdržíme  $\Delta\text{pH} \approx 2,3$ , což odpovídá dvěstěnásobnému rozdílu koncentrací H<sup>+</sup> přes membránu thylakoidu. Literatura uvádí, že skutečná hodnota je větší,  $\Delta\text{pH} \approx 3$ , což odpovídá tisícínásobnému rozdílu. Tento rozdíl zřejmě svědčí o tom, že účinnost přeměny energie koncentračního a napěťového spádu do energie ATP není dokonalá, nýbrž činí  $\approx 2,3/3 = 0,77$ .



## Literatura

[1]: *Principles of Biochemistry* je obsáhlá, více než tisícistránková vysokoškolská učebnice biochemie, která je však psána velice přístupně, čtivě a názorně, a obsahuje velké množství poutavých ilustrací. Každá kapitola je zakončena sadou praktických problémů, které mapují pochopení probírané látky, přičemž na konci knihy jsou uvedena stručná řešení. Jedná se o kompletní učebnici biochemie a přirozeně v ní proto nacházíme řadu styčných témat s fyzikou, např. van der Waalsovy slabé interakce a jejich význam pro strukturu proteinů, voda jako rozpouštědlo, hmotnostní spektroskopie pro zkoumání složení biomolekul, radioznačkovací a fluorescenční metody sekvenace DNA, chromatografické metody pro separaci molekul, rentgenová difrakce a elektronová mikroskopie pro studium struktury molekul, buněčné membrány a membránové potenciály, bioenergetika a biotermodynamika, fotosyntéza atd.

[2]: *Biofyzikální chemie* je půvabná vysokoškolská učebnice, která je ovšem pojmuta velice srozumitelně a míří k pochopení jádra věci a je proto přístupná širšímu čtenářskému okruhu. Zabývá se klasickými tématy jako bionenergetika a biotermodynamika, význam nekovalentních interakcí, elektrochemie či polopropustné membrány, a představuje také řadu základních fyzikálních metod pro zkoumání biomolekul a biochemických procesů, jako je optická absorpční a fluorescenční spektroskopie, rentgenová krystalografická analýza, nukleární magnetická rezonance, a radionuklidové metody. Opět je každá kapitola zakončena sadou problémů a početních příkladů, které jsou na konci knihy stručně vyřešeny.

[3]: Učebnici *Fyzika* od Hallidaye, Resnicka a Walkera jistě není třeba učitelům fyziky představovat. Jedná se dle mého názoru o jeden z nejlepších zdrojů pro středoškolské učitele. Svou úrovní se nachází na pomezí středoškolské a vysokoškolské fyziky a učitelé tak poskytují potřebný nadhled, je ovšem psán velmi názorně. Text směřuje k hlubokému pochopení problematiky a navíc je proložen řadou motivačních příkladů z praxe, které propojují fyziku s nejrůznějšími jinými oblastmi. Kniha tak přibližuje a zlidštuje zdánlivě odtažitá fyzikální témata. Každá kapitola obsahuje řešené příklady a rozsáhlou sadu dalších zajímavých příkladů, které jsou typově velmi různorodé a mnoho z nich má praktický základ.

[4]: Kniha *Medicínská biofyzika* je určena převážně pro úvodní ročníky lékařských fakult a příbuzných oborů. Fyzika je v zásadě na středoškolské úrovni a potřebné medicínské znalosti jsou stravitelné. Knihy probírají témata jako akustika a sluch, optika a zrak, biomechanika, tepelná regulace a termoterapie, účinky elektrického proudu na organismus, radioterapie a radioaktivní záření, a dále celou paletu diagnostických a zobrazovacích metod, jako rentgenová diagnostika, ultrazvukové zobrazování, magnetická rezonance, atd. Podobných vysokoškolských skript je na českém trhu vícero.

[5]: *Fyzika v běžném životě* je velice pěkná knížka, která skutečně dostojí svému názvu, a tentokrát je skutečně určena pro výuku na gymnáziu. V první části je seznam zajímavých otázek, které si všímavý člověk může položit v každodenním životě a které lze zodpovědět na základě kvalitních středoškolských znalostí fyziky. V druhé části jsou potom podrobná vysvětlení zkoumaných jevů. Většinou se nejedná o početní příklady, nýbrž o “selské” problémy, které mohou vyvolat diskusi, což je pro studenty atraktivní.

[6]: *Sbírka úloh z fyziky kolem nás pro střední školy* obsahuje povětšinou početní příklady, které ovšem pracují s reálnými parametry a táží se na reálné praktické otázky, takže úlohy nebudí dojem, že byly “vycucány z prstu” pouze pro účel školní výuky. Student má také možnost na základě úloh získat cit pro velikost základních fyzikálních veličin.

[7]: *Wikipedia* je jedním z nejspolehlivějších internetových zdrojů a je dle mého jedním z nejprínosnějších a nejúspěšnějších internetových projektů vůbec. Na rozdíl od naprosté většiny ostatních internetových zdrojů je wikipedia recenzovaným zdrojem, podobně jako odborné knihy a odborné časopisy. Na recenzování se také podílí mnoho čtenářů. Některé aktuální informace se na wikipedii objevují v zásadě okamžitě a oproti jiným zdrojům méně hrozí jejich zastarání. Zde je nutné poznamenat, že anglická verze wikipedie je výrazně spolehlivější než česká verze vzhledem k daleko většímu okruhu čtenářů a recenzentů. Obsah je tvořen komunitou a vzniká organicky, což samozřejmě nutně vede k určité malé míře nepřesnosti. Jako ke každému informačnímu zdroji



je proto nutné k informacím na wikipedii přistupovat s příslušnou opatrností a vždy informace podrobovat kritickému přezkoumání.

[8]: *Hyperphysics* je pěkná online encyklopedie/učebnice fyziky, která pokrývá v podstatě celou fyziku a rigorózně vysvětluje řadu fyzikálních jevů. Jsou zde také rozpracovány některé interdisciplinární vazby. Sympatická je organizace obsahu do formy myšlenkové mapy.

- [1] Nelson D.L., Cox M.M.: Principles of Biochemistry, W.H. Freeman and Company, New York, 2005
- [2] Kodíček M., Karpenko V.: Biofyzikální chemie, Academia, Praha, 2002
- [3] Halliday D., Resnick R., Walker J: Fyzika, Vutium, Brno, 2007
- [4] Navrátil L., Rosina J. a kol.: Medicínská biofyzika, Grada, 2005
- [5] Nahodil J.: Fyzika v běžném životě, Prometheus, 2004
- [6] Nahodil J.: Sběrka úloh z fyziky kolem nás pro střední školy, Prometheus, 2014
- [7] [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org)
- [8] <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hph.html>