Výfučtení: Energie

Úvod

Energie je fyzikální veličina, jejíž pravý fyzikální význam nebývá vždy zcela zřetelný, přestože se s tímto pojmem setkáváme ve fyzice či v běžném životě každodenně. V tomto Výfučtení si představíme různé formy energie a jejich význam v reálném světě. Stejně tak se budeme snažit osvětlit i pravý fyzikální význam energie.

Fyzikální význam energie

Energie má mnoho různých druhů. Důležité je si uvědomit, že všechny tyto druhy jsou zaměnitelné, a díky tomu také mají úplně všechny jednotku Joule (čteme [džaul] či [džoul]) podle Jamese Prescotta Joula. Právě on popsal různé druhy energie a jejich změny a dokázal, že neexistují různé neslučitelné formy energie.

Nejspíš jste již slyšeli o zákonu zachování energie, zkráceně ZZE, případně o prvním termodynamickém zákonu. Energie se zachovává univerzálně[1] – nemůže být vytvořena ani zničena, pouze přeměněna na jinou formu. Další důležitý fakt spojený s energií je, že uzavřený systém se bude vždy snažit zaujmout konfiguraci s co nejmenší možnou potenciální energií.

Většinou uváděná definice energie je následovná – energie popisuje schopnost hmoty konat práci. To je zatím v našem případě nejlepší způsob, jak pohlížet na energii v různých výpočtech. Ukazuje nám, jak moc je těleso, popř. pole schopno provádět různé činnosti. Pokud bychom chtěli více „odbornou“ definici, dočetli bychom se, že energie a její zachování má důsledek v symetrii vzhledem k posunutí času. To už je ale nad rámec středoškolské fyziky, pokud by byl čtenář velmi zvídavý, doporučujeme si vyhledat pojem Teorém Noetherové.

Práce a síla

V definici energie jsme představili další nový pojem: práce. Objasnili jsme tak neznámý pojem jiným neznámým pojmem. Proto si ho raději pojďme rychle vysvětlit. Říkáme, že (mechanická) práce W je vykonána posunutím tělesa konstantní silou F o vzdálenost s:

$$W = Fs\,.$$

Tuto veličinu pojmenováváme práce, neboť ji můžeme využít k nějaké pro nás užitečné věci – např. když natáhneme hodiny, vykonáme práci, a díky tomu budou měřit čas. Otázka je, kolik práce můžeme z tělesa maximálně dostat:[2] to právě popisuje energie E. Tělesa mohou totiž mít i jiné formy energie (kinetickou, rotační, tepelnou) a Joule si uvědomil, že je lze přeměnit na práci. Proto má také stejnou jednotku jako energie: $[W] = \mathrm{J} = [E]$.

[1] Např. u některých speciálních příkladů se musí pohlížet na hmotu jako formu energie pomocí známého vzorce $E = mc^2$.

[2] Převodem obecné energie na užitečnou práci se obecně zabývá termodynamika.

Mechanická energie

Mechanická forma energie se využívá při výpočtech v ideálních soustavách. Když zanedbáme odpor vzduchu a tření, energie se přemění dokonale. Zahrnuje v sobě totiž kinetickou energii E_k, kterou má těleso ve formě své rychlosti, i energii potenciální E_p, kterou má ve své poloze (potenciálu). Potenciální energie gravitační se v nejjednodušším případě (blízko povrchu Země) vypočítá pomocí vztahu

$$E_\mathrm{pg} = mgh\,,$$

kde m značí hmotnost tělesa, g tíhové zrychlení a h je výška oproti referenční nulové hladině (např. podlaze). Stanovení nulové výšky je přitom čistě na nás. Pohyb tělesa se odvíjí od toho, jak se potenciální energie mění s polohou, její absolutní velikost pohyb neovlivní. Proč má tento vztah právě tuto podobu si můžeme odůvodnit jednoduše pomocí práce, kterou vykonáme při zvedání tělesa. Když budeme těleso o hmotnosti m zvedat z nulové výšky, kde má nulovou potenciální energii, do výšky h, budeme muset působit silou $F = mg$ a celková vykonaná práce poté bude $W = mgh$. A jelikož mělo těleso na počátku nulovou potenciální energii, bude mít na konci energii rovnou vykonané práci.

Dále existuje potenciální energie pružnosti, která je dána tuhostí pružiny k a prodloužením y vzhledem k rovnovážné délce (vzhledem k tomu, že je ve vzorci y^2, vyžaduje stlačení i prodloužení pružiny stejné množství energie):

$$E_\mathrm{pp} = \frac{1}{2}ky^2\,.$$

Kinetickou energii dělíme podle druhu pohybu, který těleso provádí – posuvný nebo rotační. Pro posuvný pohyb definujeme kinetickou energii následovně:

$$E_\mathrm{kp} = \frac{1}{2}mv^2\,,$$

kde v je okamžitá rychlost tělesa. Obdobný vzorec platí i pro energii rotační, kde se místo hmotnosti m používá moment setrvačnosti[3] J, veličina určující rozložení hmoty pro různé objekty, a místo rychlosti v úhlová rychlost ω.

$$E_\mathrm{kr} = \frac{1}{2}J\omega^2\,.$$

Obě tyto formy energie jsou spojeny pomocí zákona zachování mechanické energie (ZZME), který platí za podmínky ideálnosti soustavy těles (zmíněno na začátku kapitoly):

$$E_\mathrm{k} + E_\mathrm{p} = \mathrm{konst}$$

ZZME umíme využít u mnoha problémů ke zjednodušení výpočtů, jelikož obecně potřebujeme znát pouze parametry hmotnost a tíhové zrychlení, a tím dostaneme vztah mezi proměnnými rychlosti a polohy tělesa. To můžeme ukázat na výpočtu rychlosti míčku při volném pádu.

[3] Pro hmotný bod o hmotě m rotující kolem osy po dráze o poloměru r je moment setrvačnosti $J = mr^2$, pro kouli o poloměru r rotující kolem osy procházející jejím těžištěm $J = 2mr^2/5$.

Mějme míček, který pustíme. Zajímá nás, jakou rychlost bude mít po uražení vzdálenosti h. Při použití ZZE víme, že potenciální energie E_p, kterou měl na začátku, se přeměnila na energii kinetickou E_k. Platí rovnost

$$\begin{aligned}\Delta E_\mathrm{p} &= \Delta E_\mathrm{k}\,,\\ mgh &= \frac{1}{2}mv^2\,,\\ v &= \sqrt{2gh}\,,\end{aligned}$$

z níž už výslednou rychlost vyjádříme snadno.

Ten samý výsledek můžeme dostat jiným, ale výpočetně těžším způsobem: pohybovými rovnicemi. Při takovém popisu si vzpomeneme na rovnice rovnoměrně zrychleného pohybu:

$$\begin{aligned}x &= \frac{1}{2}at^2\,,\\ v &= gt\,,\\ a &= g\,.\end{aligned}$$

Musíme nejdříve vyloučit čas, nejlépe dosazením z rychlosti v do polohy x

$$x = \frac{1}{2}\frac{v^2}{g}$$

a až poté vyjádřit výslednou rychlost (dostaneme stejný výsledek). I když se oba postupy mohou zdát poměrně podobné, je dobré mít k dispozici oba a moci si vybrat pro danou příležitost ten výhodnější: např. existují situace, ve kterých není možné pohybové rovnice přesně vyřešit, ale přístup pomocí energií nám může poskytnout odpověď na zadanou otázku.

Gravitační energie

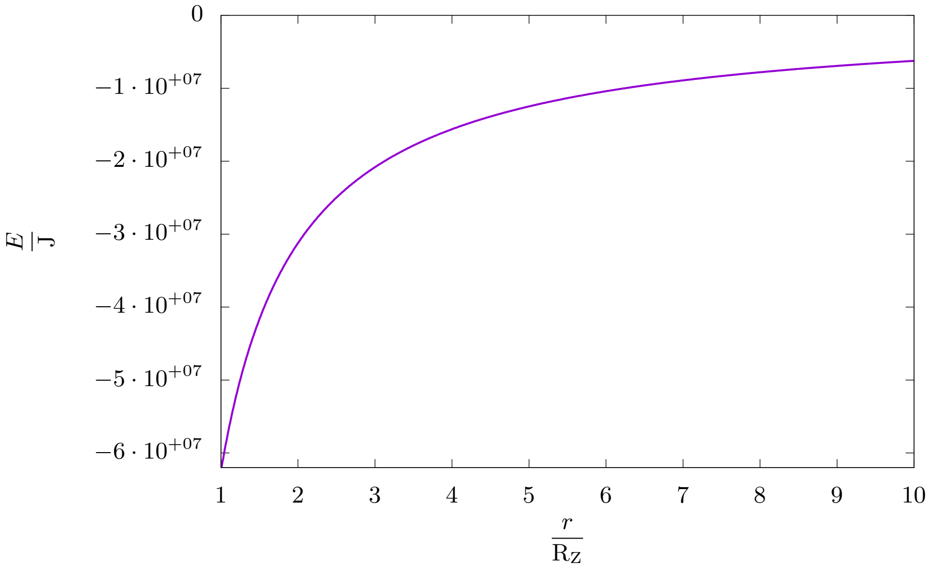
Gravitační potenciální energii jsme již v předchozím oddíle představili na jednoduchém případě tělesa blízko povrchu Země, kde je gravitační pole přibližně konstantní. Pro její výpočet jsme využili zjednodušený vztah $E_\mathrm{pg} = mgh$. Co když však budeme chtít například poslat sondu k jiné planetě? Při tomto pohybu se už gravitační síla Země působící na sondu bude postupně zmenšovat a pro výpočet potenciální energie musíme využít vzorec

$$E = -G\frac{mM}{r}\,.$$

Zde $G = 6{,}67 \cdot 10^{-11}\,\mathrm{m^3{\cdot}kg^{-1}{\cdot}s^{-2}}$ je gravitační konstanta, m a M jsou hmotnosti sondy a Země a r je jejich vzájemná vzdálenost. Co však znamená to znaménko mínus? Jak jsme již zmínili, absolutní velikost potenciální energie nehraje žádnou roli, důležitý je pro nás pouze rozdíl potenciálních energií v jednotlivých bodech. Kvůli zjednodušení výpočtů se proto fyzici domluvili, že pokud se nějaká dvě tělesa (např. naše sonda a Země) od sebe dostatečně vzdálí, bude potenciální energie rovna nule (můžete si vyzkoušet, že když do kalkulačky zadáte 1/(hodně velké číslo) bude výsledek skoro nula). Dostatečnou vzdáleností rozumíme takovou vzdálenost, kde už na sebe tělesa prakticky gravitačně nepůsobí.[4] Zároveň víme, že blíž k Zemi

[4] Se slovním spojením *prakticky nepůsobí* musíme být opatrní. Gravitační síla má neomezený dosah, proto libovolná dvě tělesa se budou vždy gravitačně přitahovat. Je potom na nás (fyzicích), abychom zhodnotili, zda je toto působení dostatečně slabé na to, abychom ho mohli zanedbat. Například když budeme počítat pohyb Země kolem Slunce, nemusíme přitom uvažovat gravitační působení Pluta apod.

se potenciální energie zmenšuje (to známe už z vzorce $E = mgh$), takže když je energie daleko od Země rovna nule, musí být blízko u ní záporná, což nám ve vzorci zajistí znaménko mínus. Jak potenciál v praxi vypadá, můžete vidět na obrázku 1.



Obr. 1: Graf potenciální energie gravitačního pole Země pro těleso o hmotnosti $m = 1\,\mathrm{kg}$. Na ose x je vzdálenost od středu Země v poloměrech Země. Vidíme, že blízko povrchu (vzdálenost $1R_Z$) funkce vypadá jako přímka – to odpovídá klasickému vzorci $E = mgh$. Ve větších vzdálenostech se však potenciální energie chová úplně jinak, proto vzorec $E = mgh$ můžeme použít skutečně jen pro vzdálenosti blízko povrchu.

Teplo

Tepelná energie neboli teplo Q je takovou „odpadní“ energií. Při mnoha procesech, často právě při konverzi mezi různými druhy energií, dochází ke vzniku i energie tepelné kvůli nestoprocentní účinnosti našich procesů. Tepelná energie v sobě kromě pozorovatelného tepla zahrnuje i teplo skupenské, které je spotřebováno na převedení dané látky do jiného skupenství (pevné $\Rightarrow$ kapalné $\Rightarrow$ plynné). Toto teplo můžeme znovu uvolnit převáděním mezi skupenstvími v opačném směru. Důležité je nezaměňovat pojmy teplota a teplo: teplota je to, co určuje chování našeho předmětu (druhý termodynamický zákon nám říká, že teplota tělesa určuje, zda bude teplo odevzdávat nebo přijímat), teplo je forma energie, jejímž dodáním můžeme zvýšit teplotu daného tělesa – to, kolik ho musíme dodat, nám říká měrná tepelná kapacita c.

Pro zjištění potřebného tepla ke zvednutí teploty tělesa o určitý počet stupňů se používá kalorimetrická rovnice

$$Q = cm\Delta t\,,$$

kde c je již zmíněná měrná tepelná kapacita látky, materiálová konstanta určující, kolik tepla je potřeba k ohřátí kilogramu dané látky o jeden stupeň Celsia. Měrná kapacita vody je $c \doteq 4\,180\,\mathrm{J{\cdot}kg^{-1}{\cdot}{}^\circ C^{-1}}$.

Podobně určujeme teplo nutné k přeměně skupenství látky, tzv. měrné skupenské teplo tání/tuhnutí, varu/kondenzace a sublimace/desublimace (přímá přeměna pevné látky do plynného skupenství a obráceně). Obecně jsou značeny písmenem L s indexem podle druhu přeměny, např. pro změnu vody o hmotnosti m na led potřebujeme odebrat teplo

$$Q = L_\mathrm{t} m\,.$$

Pro vodu je měrné skupenské teplo tání $L_\mathrm{t} = 334\,\mathrm{kJ{\cdot}kg^{-1}}$ a varu $L_\mathrm{v} = 2\,260\,\mathrm{kJ{\cdot}kg^{-1}}$.

Bernoulliho rovnice

Bernoulliho rovnice představuje analogii k ZZE pro nestlačitelné kapaliny. Popisuje energii kapaliny vzhledem k výšce h, rychlosti kapaliny v a tlaku v kapalině p:

$$\frac{1}{2}\rho v^2 + p + \rho g h = \mathrm{konst}$$

Bernoulliho rovnice se liší od ZZE použitím ρ místo m a přidáním dalšího členu p. První změna je způsobena přepočtem energie na jednotku objemu, což je přirozenější při výpočtech s kapalinami oproti hmotným objektům. Člen p představuje jakousi obdobu potenciální energie (někdy se setkáme s pojmem tlaková energie). Můžeme si ho představit pomocí trubice naplněné vodou. Pokud bude na jeden její konec působit větší tlak než na druhý, budou mít tlaky tendenci se vyrovnat a na vodu tak bude působit nenulová síla [5]. Voda je tedy při pohybu trubkou urychlována tak, že v místech s velkým tlakem má menší rychlost než v místech s malým tlakem (zde je ta analogie s potenciální energií – když hodíme míček ze střechy domu, tak nahoře má menší rychlost než u země).

Elektrická a magnetická energie

Elektrická a magnetická energie jsou způsobeny pohybem nabitých částic, většinou elektronů. Tyto energie jsou spjaty s elektrickým a magnetickým polem. Nejjednodušší příklad energie elektrického pole je deskový kondenzátor či baterie (sloužící právě k úschově energie). Pro magnetické pole se energie projevuje hlavně u cívek.

Ve fyzice se setkáváme u elektřiny s Joulovým teplem. Když součástkou o odporu R prochází napětí U a proud I, vygeneruje se v ní za čas t teplo podle vzorce

$$Q = UIt\,.$$

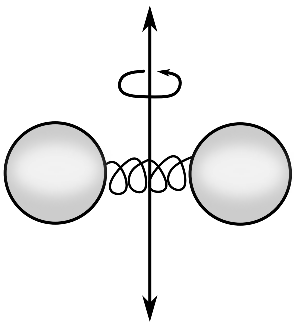
Elektrická energie se při průchodu spotřebičem mění na její jinou formu. Může konat práci, ohřívat (viz Joulovo teplo) nebo svítit. Stejně tak se různé formy energie (chemická, světelná, jaderná, …) přeměňují v elektrárnách na elektrickou energii.

[5] Velikost síly není rovna $F = (p_1 - p_2) \cdot S$ (S je obsah průřezu trubky), jak by se mohlo zdát. Přesný výpočet síly a vykonané práce je komplikovanější a je bohužel nad rámec tohoto textu.

Vnitřní energie

Obdobně jako kapalinám můžeme i plynům přiřadit energii. U plynů obecně používáme zjednodušení, že jednotlivé molekuly mezi sebou neinteragují a jejich energie vychází pouze z jejich pohybu. Určení celkové energie plynu je jednoduché – stačí sečíst všechny kinetické energie molekul. Problém tkví v tom, že plyn se skládá z nepřeberného množství částic a není v našich silách určit rychlost všech molekul. Proto zavádíme střední kvadratickou rychlost. Ta plní podobnou funkci jako průměrná rychlost v tom, že je to jeden údaj vypovídající o velkém statistickém souboru. Nejsou to však synonyma a nedají se zaměnit. Střední kvadratická rychlost je definovaná tak, že celková kinetická energie systému zůstává stejná, pokud se rychlosti všech částic nahradí touto rychlostí. A přesně to děláme při analýze plynu – pro zjednodušení počítáme s tím, že všechny molekuly mají stejnou rychlost, tedy střední kvadratickou.

Dále musíme představit ekvipartiční teorém. Ten spojuje teplotu systému s energií a se stupni volnosti, které popisují, kolika směry se mohou molekuly pohybovat. To lze hezky ukázat na dvouatomovém plynu, například O_2. Kinetická teorie látek na dvouatomový plyn pohlíží jako na dvě malé kuličky spojené pružinkou. Takováto molekula kyslíku se může pohybovat ve třech směrech, dále může rotovat kolem dvou os (osu rotace spojující oba kyslíky neuvažujeme, protože na atomy pohlížíme jako na kuličky bez vnitřní struktury a tedy nepoznáme, jestli se pootočí kolem své osy nebo ne). Dále může molekula díky pružince, která spojuje obě kuličky, kmitat. Pružinka má kinetickou a potenciální energii, to jsou další 2 stupně volnosti. Máme tedy celkem 7 stupňů volnosti. U běžných dvouatomových plynů, jako je např. vodík nebo kyslík, se při normálních teplotách kmitání neprojevuje, obecně proto počítáme s 5 stupni volnosti pro dvouatomový plyn a 3 pro jednoatomový plyn. Pokud bychom chtěli další stupně volnosti „odemknout“, museli bychom zvednout teplotu.



Obr. 2: Klasická představa dvouatomové molekuly tvořené dvěma kuličkami spojenými pružinkou. Na obrázku je znázorněna i jedna z os, v jejímž směru se molekula může pohybovat a kolem které se může otáčet.

Podle ekvipartičního teorému lze spočítat energii celého plynu. Na každý atom připadá podle teorému za jeden stupeň volnosti energie o velikosti

$$E = \frac{1}{2}kT,$$

kde $k \doteq 1{,}38 \cdot 10^{-23}\,\mathrm{J{\cdot}K^{-1}}$ je Boltzmannova konstanta a T termodynamická teplota souboru atomů.

Ekvipartiční teorém lze využít pro výpočet střední kvadratické rychlosti. Rychlosti odpovídá pouze posuvný pohyb, máme proto 3 stupně volnosti pro libovolnou molekulu. Na základě ekvipartičního teorému má posuvný pohyb energii:

$$E = \frac{3}{2}kT\,.$$

Tato energie tedy musí být rovna kinetické energii. Molekula má hmotnost m, střední kvadratickou rychlost tak můžeme vyjádřit jako:

$$\frac{1}{2}mv_\mathrm{k}^2 = \frac{3}{2}kT\,,$$

$$v_\mathrm{k} = \sqrt{\frac{3kT}{m}}\,.$$

Světelná energie

V dnešní době světlo považujeme za druh elektromagnetického záření. Díky poznatkům kvantové teorie víme, že toto záření není spojité, ale skládá se z částí – balíků energie, kterým říkáme fotony (můžeme si je také představit jako částice). Světelnou energii zachytáváme pomocí solárních elektráren, kde ji měníme na energii elektrickou. Jednotlivým fotonům můžeme přiřadit energii podle jejich frekvence f

$$E = hf = h\frac{c}{\lambda}\,,$$

kde $h \doteq 6{,}63 \cdot 10^{-34}\,\mathrm{J{\cdot}s}$ je Planckova konstanta, $c \doteq 3 \cdot 10^{8}\,\mathrm{m{\cdot}s^{-1}}$ je rychlost světla a λ vlnová délka fotonu.

Ke světelné energii se vztahuje i jev, za jehož objevení dostal A. Einsten Nobelovu cenu – fotoelektrický jev. Při dopadu záření na povrch může nastat situace, kdy fotony předají energii elektronu, a tím ho vytrhnou z vazby. Pokud budeme mít světlo o nízké vlnové délce a posvítíme jím na kov, zjistíme, že se elektrony neuvolňují, zvedneme-li jeho intenzitu (přesněji se zvedne počet emitovaných fotonů o stejné energii) nenastane v kovu žádná změna.

Avšak použijeme-li zdroj s fotony o vysoké frekvenci, budou se elektrony uvolňovat při libovolné intenzitě zdroje. Nezáleží totiž na počtu fotonů, ale na jejich energii. Pro překonání fotoelektrické bariéry (a k uvolnění elektronu) je potřeba prahová frekvence f_0. Vzniká nám jednoduchá podmínka

$$E_\mathrm{f} = E_{f_0} + E_\mathrm{k}\,,$$

$$hf = hf_0 + \frac{1}{2}m_\mathrm{e}v^2\,,$$

kde m_e je hmotnost elektronu.

Dopadající záření musí tedy mít větší frekvenci než f_0, přebytečná energie se uloží do kinetické energie elektronu. Fotoelektrický jev tak ukazuje, že na fotony se musíme dívat jako na částice, neboť kdyby světlo bylo „jen vlnění“, tak by u malé frekvence stačilo zvednout jeho intenzitu k uvolnění elektronu.

Chemická energie

Chemická energie je energie v chemických vazbách. Kdybychom znali hodnotu energií všech chemických vazeb u molekul, byli bychom pravděpodobně schopni předpovídat (nebo alespoň nasimulovat) všechny možné chemické reakce. Tuto energii ale dokážeme, alespoň částečně, uvolnit, a to ne rozbíjením molekul na atomy, ale tvořením stabilnějších molekul (s nižší chemickou energií vazeb). Častým procesem, při němž se uvolňuje energie, je hoření. Obvykle hoří látky jako např. uhlí, benzín nebo nafta, z nichž se obvykle odtrhává uhlík, který v reakci s kyslíkem vytváří oxid uhličitý.

Ke kvantitativnímu popisu látek se používá veličina výhřevnost $[H] = \mathrm{J{\cdot}kg^{-1}}$, která popisuje kolik tepla Q se uvolní při shoření 1 kg dané látky. Vzorcem

$$Q = Hm$$

jsme schopni určit energii při spalování. Pro ilustraci – výhřevnost černého uhlí je přibližně $26\,\mathrm{MJ{\cdot}kg^{-1}}$, hnědého $14\,\mathrm{MJ{\cdot}kg^{-1}}$ a zemního plynu $33\,\mathrm{MJ{\cdot}kg^{-1}}$.

Jaderná energie

Jaderná energie se liší od chemické tím, že neměníme pozici elektronů, ale samotnou strukturu jader atomů. K tomu dochází v jaderných reaktorech, které jsou schopny za přesně daných podmínek generovat obrovské množství energie z relativně malého množství látky. Vše se řídí pomocí známého Einsteinova vztahu, který jsme již v úvodu zmiňovali

$$E = mc^2\,.$$

Pro ilustraci můžeme porovnat, jaké množství energie by se teoreticky uvolnilo při perfektní přeměně 1 kg uhlí čistě na energii oproti jeho spálení, které představuje uvolnění chemické energie. Teplo vycházející z totální přeměny je $Q_j \doteq 1 \cdot (3 \cdot 10^8)^2\,\mathrm{J}$ a chemické $Q_{\mathrm{ch}} \doteq 1 \cdot 20 \cdot 10^6\,\mathrm{J}$. V poměru je tedy první energie $4{,}5 \cdot 10^9$krát větší. Ilustrace ukazuje, že štěpení radioaktivních prvků (např. izotopu uranu $^{235}\mathrm{U}$) je neporovnatelně efektivnější než spalování libovolné suroviny.

Závěr

Ukázali jsme si skoro desítku druhů energií, čímž jsme chtěli spíše upozornit na rozmanitost fyzikálních jevů, než provést nějaký vyčerpávající výčet. V praxi můžeme zavést mnohem více druhů a ne vždy jsou od sebe naše definice snadno rozlišitelné. Naposled chceme připomenout, že tyto druhy energie můžeme mezi sebou převádět, protože je energie pouze a jenom jedna.

Václav Verner
`vasek@vyfuk.mff.cuni.cz`

Patrik Kašpárek
`patrik@vyfuk.mff.cuni.cz`

Korespondenční seminář Výfuk je organizován studenty a přáteli MFF UK. Je zastřešen Oddělením propagace a mediální komunikace MFF UK a podporován Katedrou didaktiky fyziky MFF UK, jejími zaměstnanci a Jednotou českých matematiků a fyziků. Realizace projektu byla podpořena Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy.