



## Výfučtení: Zákony zachování

„Světů je neomezené množství, neustále vznikají a zanikají. Nic nevzniká z ničeho a nezaniká v nic.“

Demokritos

Už ve starém Demokritově učení se psalo o jistém principu „setrvačnosti“, kdy objekty měnily svůj stav jen tehdy, když vyloženě existovala příčina změny. Takováto filozofická prohlášení znamenají platnost něčeho, co si nazveme jako „zákony zachování“, které můžeme okolo sebe pozorovat v nejrůznějších formách. V tomto Výfučtení se však budeme zabývat těmi nejzákladnějšími z nich, a to zákonem zachování energie, hybnosti a momentu hybnosti.

### Energie

O *energii* jakožto fyzikální veličině jste už určitě slyšeli. Každému objektu náleží jisté množství energie. Vzhledem k tomu, že při práci tělesem se jeho energie spotřebovává, můžeme říci, že energie je schopnost tělesa práci konat.

Jednotka energie je totožná s jednotkou práce, udáváme ji tedy v joulech (J). Pro představu je 1 J práce, kterou musíme vykonat, abychom zvedli kilogramové těleso přibližně do výšky 10 cm. Jednotka je pojmenovaná po britském fyzikovi Jamesi P. Jouleovi a v soustavě základních jednotek SI je rovna

$$J = N \cdot m = \text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}.$$

V přírodě můžeme pozorovat různé formy energie. Zde si uvedeme několik nejběžnějších forem, které bychom měli znát.

### Kinetická energie

Tuto energii má každý předmět, který se pohybuje nenulovou rychlostí. Říká nám, jak velkou práci je třeba vykonat pro rozpohybování tohoto předmětu na danou rychlost.

Těleso o hmotnosti  $m$  pohybující se rychlostí  $v$  má kinetickou energii  $E_k$  rovnou

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

Ukážeme si, že tento vzorec není žádný výmysl, ale skutečně se shoduje s vyjádřením práce, kterou musíme konat, abychom těleso z klidového stavu urychlili na rychlost  $v$ . Pokud těleso urychlujeme se zrychlením  $a$  po dobu  $t$ , jeho rychlost se z nulové rychlosti změní na rychlost  $v = at$ . Urychlení tělesa jsme docílili působením síly  $F = ma$  na těleso na dráze  $s = 1/2 \cdot at^2$ . Vykonali jsme tedy práci  $W = Fs = ma \cdot 1/2 \cdot at^2$ . Po dosažení za zrychlení  $a$  čas je tento výraz roven  $1/2 \cdot mv^2$ .

Speciálním případem kinetické energie je *rotační energie*, která se zavádí pro popis rotace tělesa okolo zvolené osy. Pokud se těleso otáčí úhlovou rychlostí<sup>1</sup>  $\omega$ , jeho rotační energie bude

$$E_r = \frac{1}{2}J\omega^2.$$

<sup>1</sup>Úhlová rychlost vyjadřuje, o jaký úhel se těleso pootočí za sekundu.

Veličina  $J$  se nazývá *moment setrvačnosti* a charakterizuje odpor tělesa vůči roztáčení. Tato trochu záhadná veličina v podstatě hovoří o rozložení hmoty v tělese, tedy o jeho tvaru, hustotě a velikosti. Jednodušším tělesům není problém najít hodnotu  $J$  klidně i v tabulkách. Například moment setrvačnosti koule vůči ose procházející jejím středem je přesně  $J = 2/5 \cdot MR^2$ , kde  $M$  je její hmotnost a  $R$  její poloměr.

### Potenciální energie

Je to energie, která se objevuje tehdy, když na nás působí nějaké silové pole (nejčastěji se setkáme s gravitačním nebo tíhovým). Pokud těleso v tomto poli změni svoji polohu, změní se i jeho potenciální energie. Například zvedneme-li vědro o hmotnosti  $m$  ze země do výšky  $h$ , vykonáme práci  $W = F_g h$ . Tím dodáme tělesu potenciální energii rovnou

$$E_p = mgh.$$

Je důležité dát si pozor na to, že  $h$ , vystupující ve vzorci není libovolná vzdálenost, ale *výškový rozdíl*, který těleso překoná. Musíme si také uvědomit, že nulová hladina potenciální energie je na úrovni země (toto zavedení má svoje důvody, ale pro jejich náročnost je nebudeme uvádět).

### Teplo

Každá látka se skládá z atomů nebo molekul konajících neuspořádaný či kmitavý pohyb. Teplem nazýváme celkovou kinetickou energii všech těchto částic v látce. Tuto veličinu označujeme písmenem  $Q$  a jako další formu energie ji taktéž udáváme v joulech. Vyčíslit tuto energii přesně je ale prakticky nemožné. K tepelnému popisu látky tedy namísto samotného tepla používáme veličinu, která je jeho vnějším projevem a nazývá se *teplota*.

### Zákon zachování energie

Energie v reálném světě velmi často mění svoje formy v závislosti na dané situaci. Například při volném pádu tělesa se potenciální energie mění na kinetickou (výška tělesa od země je stále menší, ale jeho rychlost roste). Když kopneme do míče, odevzdáme mu kinetickou energii díky práci našich svalů. Postupně se celá kinetická energie vlivem tření přemění na teplo, které přijme okolní vzduch a tráva, a proto se míč nakonec zastaví. Jistě bychom mohli vyjmenovat mnoho dalších příkladů z běžného života, kde nastávají přeměny nejrůznějších druhů energie, dokonce nemusí jít nutně o fyziku: příjmem potravy získáváme energii, díky které si udržujeme vědomí a můžeme dělat vše, co nám tělo dovolí (běhat, vylézt na kopec, ...). Všechny příklady přeměn energie mají ale něco společného.

Výše jsme zmínili, že energie nemůže vzniknout z ničeho a stejně tak nemůže ani zaniknout v nic. Může se pouze přeměnit na jiné formy energie. Na základě těchto pozorování fyzici vyslovili myšlenku, že celková energie uzavřeného systému<sup>2</sup> se s časem nemění. Právě tento princip nazýváme *zákonem zachování energie* (ZZE).

Speciálním případem ZZE je zákon zachování *mechanické* energie, který se liší pouze tím, že předpokládáme, že jediná změna energie, která může nastat, je přelévání mezi kinetickou a potenciální energií. Zákon zachování mechanické energie platí tedy jen pokud zanedbáváme

<sup>2</sup>Uzavřený systém je něco, co je úplně izolované od vnějších vlivů.

ztráty energie třením, tepelnými přenosy, deformacemi, apod. Matematicky můžeme zákon popsat rovnicí

$$\Delta E_k + \Delta E_r + \Delta E_p = 0.$$

Tato rovnice říká, že pokud se jedna z energií systému zvětší, pak se součet zbylých dvou energií musí zmenšit o stejnou hodnotu.

### Zákon zachování hybnosti

*Hybnost* je fyzikální veličina, která vyjadřuje „míru setrvačnosti“ tělesa. Značíme ji malým psacím písmenem  $p$  a její jednotka je

$$[p] = \text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

Z jednotky lze uhodnout, že hybnost tělesa je jednoduše součin jeho hmotnosti a rychlosti

$$p = mv.$$

Ve skutečnosti u hybnosti definujeme kromě její velikosti i její směr,<sup>3</sup> který je stejný jako směr rychlosti. V jiných oblastech fyziky lze hybnost definovat i pomocí jiných veličin, o tom se ale ve Výfúčení nebudeme zmiňovat.

Zákon zachování hybnosti se těší oblibě zejména při srážkách předmětů, částic apod. Představme si, že máme 2 kuličky na přímce, na které nepůsobí žádné vnější síly, tvoří tedy uzavřený systém. Kuličky mají hmotnosti  $m_1$  a  $m_2$  a rychlosti  $v_1$  a  $-v_2$ . Znaménko  $-$  vyjadřuje, že kuličky se pohybují proti sobě, tedy směr jejich rychlostí je opačný a kuličky se srazí. Celková hybnost soustavy je pak rovna

$$p = p_1 + p_2 = m_1 v_1 - m_2 v_2.$$

Následně se kuličky srazí. Předpokládejme, že srážka trvá kratičký čas  $\Delta t$ , po který kuličky působí mezi sebou silami  $-F_1$  (síla na první kuličku) a  $F_2$  (síla na druhou kuličku). Různá znaménka znovu značí různé směřování sil. Tentokrát je ale mínus při síle  $F_1$ , protože uvažovanou „čelní“ srážkou se zjevně kuličky zpomalí.

Za tento čas se hybnost prvního tělesa vlivem síly  $F_1$  změní o  $\Delta p_1$  a hybnost druhého tělesa vlivem síly  $F_2$  o  $\Delta p_2$ . Mezi působící silou a hybností platí

$$\Delta p_1 = -F_1 \Delta t, \quad \Delta p_2 = F_2 \Delta t.$$

Tedy celková změna hybnosti bude

$$\Delta p = \Delta p_1 + \Delta p_2 = -F_1 \Delta t + F_2 \Delta t = (-F_1 + F_2) \Delta t.$$

Ze zákona akce a reakce musí ale platit, že síly  $F_1$  a  $F_2$  musí být stejně velké. Jedná se o tzv. vnitřní síly soustavy. Z poslední rovnice tedy dostáváme

$$\Delta p = 0 \text{ N} \cdot \Delta t = 0 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

Vyšlo nám, že celková hybnost se během srážky nemění. Z toho vyplývá, že nepůsobí-li na soustavu žádné *vnější* síly, celková hybnost na začátku a na konci je stejná. Tím jsme zformulovali znění zákona zachování hybnosti, který jsme navíc elegantně odvodili. Samozřejmě zákon lze zobecnit i pro více těles a libovolné směřování rychlostí. Je k tomu ale potřeba složitější matematika.

<sup>3</sup>Pro starší: jedná se tedy o vektor hybnosti  $\mathbf{p}$  – vektory v literatuře nejčastěji píšeme tučně.

## Zákon zachování momentu hybnosti

*Moment hybnosti*, též někdy označován jako kinetický moment, plní úlohu hybnosti při otáčení těles. Stejně jako moment setrvačnosti je i moment hybnosti veličina, která se určuje vzhledem k nějaké ose. Značíme jej velkým písmenem  $L$  a jeho jednotka je

$$[L] = \text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}.$$

Při otáčení nějakého tělesa je moment hybnosti jedné jeho částice definován vztahem

$$L = pr,$$

kde  $r$  je tzv. průvodič, tedy vzdálenost částice od osy otáčení, a  $p$  je již známá hybnost částice.<sup>4</sup> Stejně jako  $p$  i  $L$  má svůj směr, a to překvapivě ve směru osy otáčení.

Pomocí metod statistické fyziky dokážeme sečíst momenty hybností všech částic v tělese. Do hry se vrací známý moment setrvačnosti a dostáváme

$$L = J\omega.$$

Jak tedy vypadá zákon zachování momentu setrvačnosti? Formulace je podobná jako v předěšlých případech. V izolované soustavě se moment hybnosti nemění. Změníme-li moment setrvačnosti tělesa, musí se zákonitě změnit i úhlová rychlost otáčení a opačně.

Korektní odvození tohoto zákona opravdu není jednoduchá záležitost. Časem se to určitě naučíte.

Fyzikální korespondenční seminář je organizován studenty MFF UK. Je zastřešen Oddělením pro vnější vztahy a propagaci MFF UK a podporován Katedrou didaktiky fyziky MFF UK, jejími zaměstnanci a Jednotou českých matematiků a fyziků.

Toto dílo je šířeno pod licencí Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported.  
Pro zobrazení kopie této licence, navštivte <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>.

<sup>4</sup>Pokud není průvodič kolmý na směr rychlosti, musíme součin  $pr$  ještě vynásobit číslem  $\sin \alpha$ , kde  $\alpha$  je úhel mezi průvodičem a směrem rychlosti.