



Výfučení: Hybnost a srážky

V prvním Výfučení sedmého ročníku se budeme věnovat neobvyklé fyzikální veličině zvané *hybnost*. Tato veličina se často používá k popisu dynamiky pohybujících se těles, například i tehdy, když mezi tělesy dochází ke vzájemným srážkám.¹ Ve většině školních osnov bývá této veličině neprávem věnován nedostatek pozornosti a my se v tomto textu pokusíme objasnit, k čemu se hybnost může hodit a jak se liší od jiných, častěji používaných veličin (např. energie).

Zavedení hybnosti

Z vlastní zkušenosti víme, že výsledek srážky dvou těles, například tenisového míčku a rakety, závisí nejen na rychlostech jednotlivých těles, ale také na jejich hmotnosti. Lze tušit, že čím větší rychlostí raketa do míčku narazí, tím rychleji míček odpálí. Zároveň ale tušíme, že při odpalu těžšího míčku, například pétanqueové koule, bychom míček odpálili méně rychle.

Hybnost zahrnuje obě veličiny, jak rychlost tělesa v , tak i jeho hmotnost m a to jako jejich součin mv . Hybnost značíme typicky $p = mv$. Toto značení pochází z latinského slova *impetus*. Hybnost neznačíme i , jelikož toto písmeno se používá ke značení indexů, ani m , jelikož tak se označuje hmotnost.

Můžeme si povšimnout, že hybnost závisí na obou veličinách lineárně. Jinými slovy, pokud má nějaké těleso (například míček) hmotnost m a rychlost v , vypočítáme jeho hybnost jako $p = mv$. Máme-li jiný míček se stejnou hmotností a pohybující se dvojnásobnou rychlostí, má také dvojnásobnou hybnost. Stejně tak míček o dvojnásobné hmotnosti, pohybující se stejnou rychlostí, má dvojnásobnou hybnost.

Dále stojí za povšimnutí, že hybnost, stejně jako rychlost, je vektorová veličina. To znamená, že kromě velikosti rychlosti je zajímavý také její směr (hovoříme tedy o vektoru rychlosti \mathbf{v}). Hybnost ve vektorovém tvaru lze pak napsat jako $\mathbf{p} = m\mathbf{v}$. Směr vektoru hybnosti má stejný směr jako vektor rychlosti tělesa.

Propojení hybnosti a síly

V principu při každé srážce dochází ke změně rychlosti těles, byť se mění pouze velikost rychlosti nebo její směr. Z Newtonových zákonů ale víme, že za každou takovou změnou musí být ukryta nějaká působící síla. Mezi raketou a míčkem je to jednoduše síla, kterou na sebe tlačí povrch míčku a úplet rakety.

Je tedy logické, že hybnost, respektive její časová změna, bude nějakým způsobem spojena s působícími silami. Skutečně platí, že pokud působíme na těleso silou \mathbf{F} po dobu t , tak se jeho hybnost změní o $\Delta\mathbf{p} = \mathbf{F}t$.

Vztah výše vlastně vyjadřuje to, že působící síly mohou vyměňovat a dodávat tělesům hybnost. Jednoduše stačí na tělesa působit silami, a to buď dostatečně velkými anebo dostatečně dlouho, neboť změna hybnosti je časově závislá.

Představte si kupříkladu roztlačování odbrzděného auta. Pokud auto roztlačujeme sami, tzn. působíme relativně malou silou, auto se sice nakonec rozjede, ale malou silou musíme

¹Když se dvě tělesa srazí, říkáme tomu srážka, ale někdy se setkáte také s pojmem „ráz“.

působit dostatečně dlouho. Naopak, vezmeme-li si na pomoc kamarády a auto roztlačujeme větší silou, zvládneme jej rozjet na stejnou rychlost za menší čas.

Dále můžeme výše uvedenou rovnici vydělit časem, čímž dostaneme rovnici pro sílu:

$$\Delta p = Ft \quad \Rightarrow \quad F = \frac{\Delta p}{t}.$$

Rovnice v tomto tvaru vyjadřuje následující: pokud pozorujeme těleso, kterému se v čase mění hybnost, můžeme určit, jak velká síla je za tuto změnu zodpovědná.

Zákon akce a reakce a zákon zachování hybnosti

Největší využití hybnosti však spočívá v tzv. *zákonu zachování hybnosti*. Ten nám říká, že celková hybnost v uzavřeném systému (soustavě těles) se nemění. Tento zákon zní možná trochu složitě, ale můžeme ho odvodit z Newtonova třetího zákona (zákona akce a reakce).

Pokud máme uzavřený systém, tak na něj zvenku nepůsobí žádné síly (to je vlastně definice uzavřeného systému). Zároveň můžeme říct, že součet všech sil působících v systému je nula, protože pokud v systému působí nějaká libovolná síla, působí v systému i její reakce, tzn. síla o stejné velikosti, ale v opačném směru. Součet těchto sil se tedy vždy vynuluje. Jelikož je tedy celková síla nulová, je nulová i změna hybnosti a tedy celková hybnost systému se nemění.

Matematicky lze zákon zachování hybnosti formulovat jednoduchou rovnicí $\mathbf{p}_{\text{počátek}} = \mathbf{p}_{\text{konec}}$, kde $\mathbf{p}_{\text{počátek}}$ označuje celkovou hybnost na počátku nějakého děje (například to může být součet hybností koulí před srážkou) a $\mathbf{p}_{\text{konec}}$ je celková hybnost na konci onoho děje.

Vztah hybnosti a energie

Je možné, že s podobným zákonem – zákonem zachování mechanické energie (ZZMH) – jste se již někdy setkali. Tento zákon říká, že se v uzavřeném systému zachovává také mechanická energie, ale pouze tehdy, když v tomto systému neexistují třecí síly (respektive jsou třecí síly zanedbány). Pokud tyto síly působí, část mechanické energie se proměňuje na teplo, přičemž tento proces je nevratný, tzn. teplo se nemůže samo od sebe změnit zpět na mechanickou energii.

Nicméně zákon zachování hybnosti platí i v těchto systémech, neboť změna hybnosti nerozlišuje mezi působením mechanické, třecí anebo jiné síly.

Srážky

Zákon zachování hybnosti se nejčastěji využívá pro popis srážek. Představme si tedy následující situaci. Sledujeme soustavu, ve které se nacházejí dva vlakové vozy, které jedou proti sobě různými rychlostmi. Vozy se srazí, pravděpodobně se částečně zdeformují a nakonec poputují spojené v jednom kusu. Zjevně se tedy jedná o uzavřenou soustavu, neboť jediná dvojice sil, která v průběhu srážky působí, je právě síla, kterou první vůz zatlačil na druhý a naopak.²

²Pro správnost bychom do uzavřené soustavy měli započítat i Zemi, abychom mohli započítat i tíhovou sílu, kterou na ni vozy působí, a příslušnou reakci.

Jelikož na tuto soustavu nepůsobí zvenčí další nenulové síly, zákon zachování hybnosti nám říká, že celková hybnost dvojice se srážkou nezmění. Označíme-li hybnosti jednotlivých vozů \mathbf{p}_1 a \mathbf{p}_2 ,³ a hybnost spojených vozů po srážce jako \mathbf{p}_3 , zákon zachování hybnosti lze zapsat jako

$$\mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2 = \mathbf{p}_3$$

V této rovnici představují \mathbf{p}_1 a \mathbf{p}_2 hybnost obou vozů na začátku pozorování a \mathbf{p}_3 hybnost jednoho tělesa vzniklého spojením dvou vozů po jejich srážce.

Pokud známe počáteční rychlosti vozů \mathbf{v}_1 a \mathbf{v}_2 i jejich hmotnosti m_1 a m_2 , lze vypočítat jejich výslednou rychlost. Směry rychlostí \mathbf{v}_1 a \mathbf{v}_2 jsou dle zadání vůči sobě opačné (vozy jedou proti sobě), což lze v rovnici pro zákon zachování hybnosti vyjádřit tak, že jednu z rychlostí, například v_2 , napíšeme se záporným znaménkem. Zákon zachování hybnosti tak bude mít tvar

$$m_1 v_1 - m_2 v_2 = m_3 v_3, \\ v_3 = \frac{m_1 v_1 - m_2 v_2}{m_1 + m_2}.$$

Mimo jiné jsme v této rovnici využili poznatku, že $m_3 = m_1 + m_2$, jelikož se hmotnost vozů v průběhu srážky zachovává. Směr výsledné rychlosti v_3 poznáme podle jejího výsledného znaménka. Vyjde-li nám rychlost v_3 kladná, bude její směr stejný jako směr rychlosti v_1 (neboť tento směr jsme v rovnici výše psali s kladným znaménkem); v opačném případě (tzn. je-li v_3 záporná) bude směr výsledné rychlosti shodný se směrem rychlosti v_2 .

Takováto srážka, kde se evidentně nezachovává mechanická energie (vozy se deformovaly a mechanická energie se měnila na teplo), se nazývá *nepružná srážka*. Zákon zachování hybnosti je zde náš hlavní nástroj. Existuje i tzv. *pružná srážka*, kde se tělesa od sebe odrazí, přičemž se všechna mechanická energie zachová. I tehdy však při výpočtech můžeme použít zákon zachování hybnosti.

Závěr

V tomto Výfučení jsme si představili pojem *hybnosti*. Vysvětlili jsme si, proč a jak se definuje a jaké vztahy pro ni platí. Také jsme ukázali nejvýznamnější zákon zachování hybnosti a nastínili si jeho použití. Věříme, že Výfučení přispělo k lepšímu pochopení hybnosti, ale hlavně k pochopení toho, proč se vůbec tento pojem definuje, a že oproti mechanické energii má obecnější možnosti použití.

Jindřich Dušek

jindra@vyfuk.mff.cuni.cz

Patrik Švančara

pato@vyfuk.mff.cuni.cz

Korespondenční seminář Výfuk je organizován studenty a přáteli 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/>.

³Velikost hybnosti je součin hmotnosti a rychlosti, směr vektoru hybnosti je stejný jako směr rychlosti jednotlivých vozů.