

Rozhledy matematicko-fyzikální

Michal Růžek

Co kdybychom se všichni pohybovali v medu?

Rozhledy matematicko-fyzikální, Vol. 100 (2025), No. 2, 73–78

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/153045>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 2025

Institute of Mathematics of the Czech Academy of Sciences provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



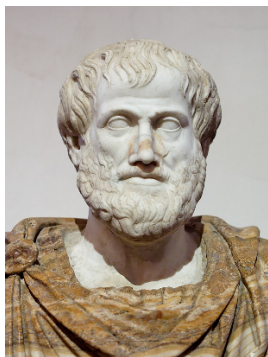
This document has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ*:
The Czech Digital Mathematics Library <http://dml.cz>

Co kdybychom se všichni pohybovali v medu?

Michal Růžek, INSA Lyon, Francie

Naše schopnost zkoumat přírodní jevy a objevovat jejich zákonitosti dosti závisí na našich možnostech sledovat děje kolem nás. Naše smysly, naše velikost, rychlost pohybu nebo délka života nám umožňují snadno vidět určité jevy, přemýšlet o nich a dříve či později najít jejich fyzikální podstatu. Pokud se ovšem daný jev vymyká běžným lidským zkušenostem a měřítkům, pak může trvat velmi dlouho, než jej lidstvo pochopí. Takový byl patrně i případ jednoho z nejznámějších zákonů fyziky, a to druhého Newtonova zákona neboli zákona pohybu.

Na tomto místě mi dovoluje krátkou osobní poznámku, která též popisuje moji motivaci k tomuto článku. V roce 2004 jsem studoval v prvním ročníku na FJFI ČVUT dějiny fyziky u doc. Štolla. Nemohl jsem tehdy pochopit, jak je možné, že Aristotelova představa o dynamice, přes svoji chybnost, mohla přetrvat celý středověk až do novověku. Tato otázka mě nahlodávala posledních dvacet let, než jsem objevil knihu od Károly Simonyi [1]. Tato kniha velmi detailně rozebírá vztah fyziky a kulturního kontextu v historii lidstva. Objevy a omyly fyziky jsou zde zasazené jako rostlina uprostřed zahrady, tzn. se vztahem k okolí. Její přečtení mě inspirovalo k napsání následující úvahy.



Obr. 1: Aristotelés, zák Platónův, žil v letech 384–322 př. n. l. v antickém Řecku. Patří k nejvýznamnějším intelektuálním autoritám své doby. Významným způsobem zasáhl do celé řady oborů a disciplín [2].

Aristotelés se prochází po Athénách a přemýšlí o pohybu

Řecký polyhistor Aristotelés je jistě právem označován za jednoho z nejvýznamnějších starověkých myslitelů. Kromě mnoha jiných děl zanechal svůj vliv též ve fyzice, konkrétně v dynamice. Než přistoupíme k jeho teoriím, pokusme si představit myšlenkový pochod, který mohl provázet tohoto učenice ve 4. století před našim letopočtem.

Představme si následující situaci: Aristotelés se prochází po přístavním molu přístavu Pireus a sleduje okolní shon. Všude se něco pohybuje, otroci nosí balíky, mladý chlapec přibíhá celý uřícený se zprávou z Athén, veslaři zabírají a triéra opouští přístaviště. V odpoledním horku se všude lesknou upoceně svaly mládenců, kteří jsou hybateli těchto činností. Zdá se, že každý pohyb je vykoupen lidskou, případně zvířecí silou. Navíc je patrné, že pro větší rychlost je třeba více této síly, vždyť dva otroci táhnou břemeno rychleji než jeden. Dále se filozof zastavuje u stánku s uzenými rybami pro malé občerstvení. A hle, kouř stoupá vzhůru, lehce a jakoby sám od sebe. Není tu žádný upocený sval, ani tu nikdo nefouká z plných plic. Náhle zaslechne známý zvuk mince, která vypadla prodáváči z ruky a spadla na zem. Opět bez přičinění. „Tyto pohyby nahoru a dolů jsou jaksi samovolné,“ říká si filozof a pokračuje v úvaze: „ale ty předcházející by nebyly bez vynaložení síly živých organismů.“ Přemítání o světě a dlouhá diskuze s několika žáky vytrhují Aristotela ze zamyšlení a celé odpoledne i večer utečou jako voda. Za soumraku se vrací zpátky do Athén a nad hlavou se postupně rýsuje noční obloha. Slunce už zapadlo a planety ekliptiky jsou teď jasně vidět. Pozornému oku Aristotela neujde, že nejsou ve stejné pozici jako před několika týdny. I ony se pohybují bez přičinění živé síly. Jak je to možné?

Aristotelova versus Newtonova dynamika

Skládáním podobných zkušeností došel Aristotelés k formulování svých „zákonů dynamiky“ – podotkněme, že jsou všechny chybné (více informací poskytne například [3, 4]):

- 1) Pohyb nebeských těles je věčný a neměnný,
- 2) naproti tomu pohyb na Zemi je možné charakterizovat následujícím způsobem:
 - i) Pohyb *přirozený*, kde každé těleso se samovolně vrací na svou přirozenou polohu (lehké stoupá, těžké padá).

- ii) Pohyb *nepřirozený* (později latinsky motus violentus). Tento pohyb existuje díky živým organismům.

Posledně jmenovaný, tzv. *motus violentus*, bude předmětem našeho zájmu dále. O nuceném pohybu říká Aristotelés následující. Rychlost pohybu určují dva faktory: síla F a odpor proti pohybu R . Čím větší síla, tím rychlejší pohyb, naproti tomu čím větší odpor, tím pomalejší pohyb. O mnoho století po Aristotelovi bychom dnes napsali tento zákon ve tvaru:

$$v = \frac{F}{R}.$$

Tato (chybná) dynamika nepotřebuje definovat zrychlení, rychlost je přímo úměrná síle. Dalším zajímavým faktem je, že bez síly není pohyb. Tento výsledek zhruba odpovídá zkušenosti: pokud nikdo netáhne za provaz, tak se mramorová deska nikam neposunuje, pokud táhnou dva, tak se sune rychleji apod.

Pokusme se podívat na příklad z dynamiky, kde porovnáme řešení dané správnou formulací, tedy pozdější Newtonovou, a nesprávnou Aristotelovou. Zde se na scénu dostává slibovaný med. Představme si homogenní kouli padající v důsledku tíže skrz kapalinu, v tomto případě velmi viskózní, jakou je med. Newtonova pohybová rovnice bude zapsána následovně:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{F - Rv}{m}.$$

kde m je hmotnost koule, $F = mg$ je tíhová síla a R je koeficient síly odporu prostředí. Tento koeficient je možné dále vyjádřit pro daný problém známou Stokesovou rovnicí $R = 6\pi r\eta$, kde r je poloměr koule, η viskozita kapaliny. Tato pohybová rovnice je separovatelná v proměnných v a t a je možné ji integrovat s počátečními podmínkami $v(0) = 0$. Řešení je možné získat tímto způsobem. Nejprve separujeme proměnné v a t :

$$\frac{dv}{F - Rv} = \frac{dt}{m},$$

kde na levé straně je pouze funkce v a na pravé straně pouze funkce t . Pokud se tyto funkce rovnají, tak se také rovnají jejich primitivní funkce, tzn. integrály (až na prozatím neznámou konstantu C):

$$-\frac{\ln(F - Rv)}{R} = \frac{t + C}{m}.$$

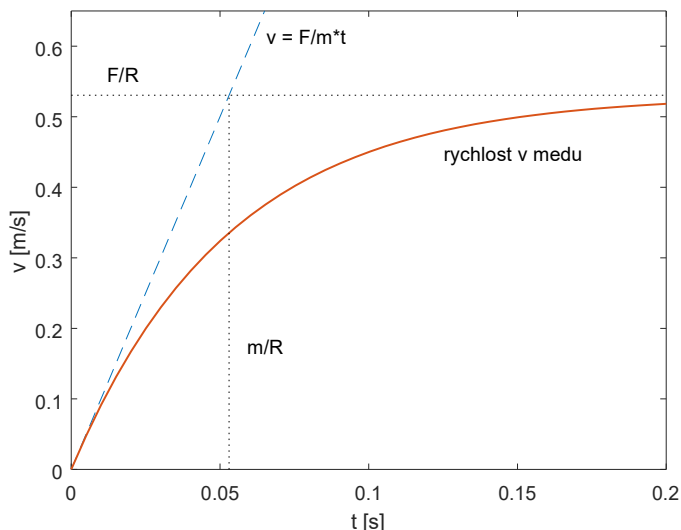
Následně využijeme počáteční podmínky $v(0) = 0$, která nám umožní identifikovat konstantu C :

$$-\frac{\ln F}{R} = \frac{C}{m}.$$

Dosazením této konstanty do rovnice výše a algebraickými úpravami získáme konečný tvar funkce $v(t)$:

$$v(t) = \frac{F}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{m}t} \right).$$

Pro hodnoty $m = 1 \text{ kg}$, $r = 0,1 \text{ m}$, $\eta = 10 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ je výsledek zobrazen na obr. 2.



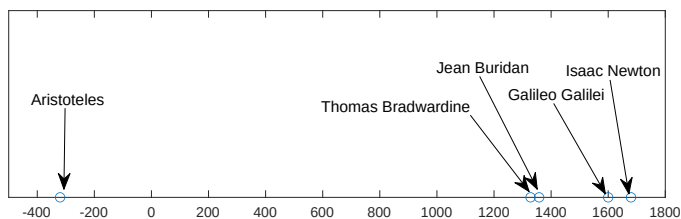
Obr. 2: Závislost rychlosti na čase pro padající kouli.

Zde můžeme učinit zajímavý poznatek. Řešení Newtonovy rovnice se pro rostoucí čas blíží k hodnotě F/R , tedy k hodnotě určené teorií Aristotelovy dynamiky. Čili ani Aristotelova představa není úplně špatná. Zde je důležité si uvědomit význam časových intervalů. Pro pohyb v medu je hodnota m/R , která se objevuje v exponenciále, velmi malá (v řádu 50 ms). Tato hodnota je poměrem inerciální (setrvačné) hmoty a odporu prostředí. Má jednotku času a udává charakteristicky

čas, po který přibližně trvá zrychlený/zpomalený pohyb, než nastane dominance rovnoměrného pohybu. V tomto případě je počáteční zpomalený pohyb téměř nepostřehnutelný. Kdybychom všichni žili a pohybovali se v medu, tak bychom měli jenom velmi malou zkušenost se zrychlením kolem nás s uvážením obvyklých časových škál. Dovedu si představit, že takový byl i důvod dlouhověkosti Aristotelovy dynamiky. Celá staletí byl pohyb relativně pomalý a zrychlené části pohybu byly krátké ve srovnání s dobou ustáleného pohybu. Navíc lidstvu chyběly nástroje, jak spolehlivě zaznamenat zrychlený pohyb. Všechny přístroje pro měření času byly pro takto přesné experimenty nevhodné. Jako jedna z výjimek, kde zrychlený pohyb byl vždy nutně přítomen, je volný pád. Ovšem po celá staletí neexistovaly výškové budovy, ze kterých by bylo možné provádět experimenty s pádem.

Závěrem

Aristotelova dynamika přežila více než 1500 let bez úhony, ale nakonec i na tuto teorii přišel soumrak (obr. 3).

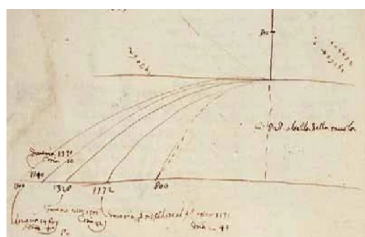


Obr. 3: Obrázek ilustruje dlouhé rozmezí mezi počátkem a koncem Aristotelovy představy o dynamice. Na ose úseček jsou letopočty.

První trhliny nastaly s rozvojem univerzit v Evropě. I přes odpor oficiální univerzitní a církevní reprezentace té doby bylo čím dál tím více možné diskutovat a kritizovat dávné autority jako byl Aristotelés. Je zajímavé, že zásadní kritika Aristotelovy dynamiky přišla ve 14. století z obou stran kanálu La Manche téměř současně, od Jeana Buridana (Paříž) a Thomase Bradwardina (Oxford). Thomas Bradwardine argumentoval tím, že pro velmi malou sílu se objekt nepohybuje, tudíž výraz $v = F/R$ nemůže být správný. Navrhl vlastní řešení, které je sice též chybné, ale jeho zajímavostí je použití logaritmu $v = \log(F/R)$ (toto je dnešní formulace, v té době ještě logaritmus nebyl znám). Jean Buridan oproti Aristotelovi argumentoval některými pozorováními. Například tvrdil, že když veslaři přestanou loď pohánět svými vesly, tak loď

stále ještě pluje, byť se po určité době zastaví. To je v protikladu k Aristotelovi, který pohyb bez působící síly zapovídá. Buridan navíc též jako první mluvil o hybnosti namísto rychlosti, což je další střípek do mozaiky pozdějšího Newtonova zákona pohybu.

Asi posledním hřebíkem do rakve Aristotelovy dynamiky byly experimenty Galilea Galileiho kolem roku 1600. Galileo geniálním způsobem vyřešil problém nepřesného měření času a namísto volného pádu zkoumal pohyb po nakloněné rovině (obr. 4). Nyní již nebylo pochyb o tom, že pohyb pod účinkem tíhy je pohyb zrychlený a nevyhovuje Aristotelově představě.



Obr. 4: Vlevo: Freska od Guizeppa Bezzuoli v Tribunu di Galileo ve Florencii (1841) znázorňuje Galilea demonstrujícího svůj koncept zrychleného pohybu po nakloněné rovině. Vpravo: Patrně první dochované zobrazení parabolické trajektorie z Galileových diářů ukazuje myšlenkový experiment volného pádu projektilu vystřeleného vodorovně.

Majíce dostatečně přesné měření, lidstvo nakonec záhadu zákona pohybu rozluštilo. Všechno by ale mohlo být i jinak, pokud bychom žili a pohybovali se v medu. To by Aristotelovy teorie mohly být doposud považovány za pravdivé. Popravdě řečeno, život v medu by asi žádný med nebyl.

Literatura

- [1] Károly, Simonyi: *A fizika kulturtörténete a kezdetektől a huszadik század végéig*. Akadémiai kiadó, 2011, (pouze v maďarštině, česky: Kulturní historie fyziky od počátků do dvacátého století.).
- [2] <https://en.wikipedia.org/wiki/Aristotle>.
- [3] Štoll, I.: *Dějiny fyziky*. Prometheus, Praha, 2010.
- [4] Kaiser Science: <https://kaiserscience.wordpress.com/2016/10/21/aristotles-laws-of-motion/>.