autorská verze článku do Rozhledů MF (publikováno v č.4, 2021 (ročník 96), s. 30-41)

Jak provokovat, když dostanete úlohu o pádu železné a dřevěné koule III

Leoš Dvořák

V prvních dvou článcích této série ([1] a [2]) jsme řešili, jak je to s dobou pádu železné a dřevěné koule. V prvním z uvedených článků jsme trochu víc provokovali a „šťourali", v druhém jsme poctivě počítali, jak vzduch pád těchto těles ovlivní. Pojďme se opět vrátit trochu k provokování, a to v případě, který se zdá naprosto jasný: když tělesa padají ve vakuu.

V tom případě, jak víme, v daném gravitačním poli všechna tělesa padají se stejným zrychlením. Takže ze stejné výšky musí na zem dopadnout za stejnou dobu. Tak kde je tady prostor pro nějakou provokaci? Pojďme se podívat. Takže:

Vzhůru do vakua!

Nechme stranou možnost, že dřevěná koule by mohla být navlhlá a odpařovala by se z ní voda, přesněji vzato by se vyvařovala do vakua. A kdyby to bylo nesymetricky, třeba by i tento drobný „raketový efekt" mohl pád koule ovlivnit. (Vida, jak by se také dalo provokovat.) Uvažujme dvě homogenní koule stejného poloměru, z nichž se nic neuvolňuje, jen bude mít každá jinou hmotnost. Na začátku dáme první kouli do určité výšky h, necháme padat (s nulovou počáteční rychlostí) a změříme dobu pádu. Vše se děje ve vakuu. Pak provedeme přesně totéž s druhou koulí. Dopadnou za stejnou dobu?

Inu, zcela přesně vzato nedopadnou. Proč?

Pojďme se na celou situaci podívat „zvenku", z inerciálního systému *S*, ve kterém je Země na počátku v klidu. Neuvažujeme přitom žádné další vlivy působící na Zemi, tedy další kosmická tělesa nebo to, že někdo třeba v Austrálii pouští na zem různé krychle… Prostě si celý problém idealizujeme: Máme jednu velkou tuhou sféricky symetrickou kouli, tj. Zemi, a z výšky h od jejího povrchu na ni pustíme menší kouli. Abychom situaci ještě víc zjednodušili, nebudeme uvažovat rotaci Země nebo budeme pokus dělat na severním pólu.

V systému S ovšem nejen padá naše železná nebo dřevěná koule k Zemi (se zrychlením $g \doteq 10$ m/s^2), ale také Země směrem ke kouli. Obě se totiž přitahují stejně velkou silou. Je tedy

$$m_K a_K = M_Z a_Z \,,$$

kde M_Z je hmotnost Země (asi $6 \cdot 10^{24}$ kg) a a_Z její zrychlení. Podobně značíme veličiny koule, přitom zrychlení koule $a_K = g$. Zrychlení Země je tedy

$$a_Z = \frac{m_K}{M_Z} g \,, \tag{1}$$

čili mnohem menší než zrychlení koule – ale je nenulové. A závisí na hmotnosti koule. Čili pro železnou kouli je větší než pro dřevěnou. Vzdálenosti, které Země a koule při pádu urazí, jsou také v poměru m_K / M_Z. Kdybychom kouli o hmotnosti 6 kg pouštěli z výšky 1 metr, urazila by Země do dopadu vstříc kouli jen 10^{-24} m. To není moc, jen zhruba miliardtina průměru atomového jádra. Dřevěná koule je méně hmotná, Země k ní tedy padá s menším zrychlením – čili dřevěná opravdu dopadne na povrch Země o chviličku později. Ovšem rozdíly, jak vidíme, jsou velmi nepatrné.

Aby byl efekt výraznější, museli bychom naši železnou kouli mít větší. Nebuďme troškaři a uvažujme kouli o poloměru asi 6 kilometrů, tedy skoro tisícinu poloměru Země. Pak už by zrychlení Země bylo miliardtinou zrychlení koule. A kdybychom naši kouli zvedli o deset metrů, při pádu koule by se Země posunula o deset nanometrů. To už je délka, kterou si lze představit, rozměry řádu nanometrů mají dnes struktury v polovodičových čipech. A pád Země o deset nanometrů by znamenal, že doba vzájemného pádu koule a Země (než by se dotkly), by byla kratší o necelou nanosekundu oproti případu, kdyby padala koule o zanedbatelné hmotnosti. A nanosekunda, to se také dá změřit; procesory v našich smartphonech „tikají“ rychleji, než je tato doba.

„Šedá každá teorie…“ aneb problematika pokusu s pádem velké koule v praxi

Teorie ve skutečnosti není šedá, konec konců jsme se s ní v předchozích článcích „vyřádili“ docela barvitě. Ale realita je vždy ještě složitější. Takže technicky bychom s výše popsaným pokusem měli řadu problémů.[1]

Pomiňme teď „drobnost“ typu, že Země má atmosféru a daný pokus má být ve vakuu. Takže bychom museli mít budovu o výšce, šířce a délce alespoň 12 kilometrů a vyčerpat z ní vzduch.[2] V ní už pokus pohodlně provedeme.

No, pohodlně. Nejdřív tu kouli musíme o deset metrů zvednout.

- Problém 1: Máme dost energie?

Kolik je ke zvednutí koule potřeba energie? Při zvedání o tak malý kousek můžeme gravitační pole Země považovat za homogenní a pro změnu potenciální energie koule použít známý výraz $E_p = mgh$. Je h = 10 m, $g \doteq 10\ \mathrm{m/s^2}$, [3] jen ta hmotnost koule je trochu velká, pro kouli ze železa asi $7 \cdot 10^{15}$ kg. Potřebná energie je tedy asi $7 \cdot 10^{17}$ J. Máme ji k dispozici?

Vzato celosvětově, máme. Celosvětová spotřeba energie v roce 2019 byla asi 173 tisíc terawatthodin, tento údaj najdeme například na [3] nebo též na Wikipedii. Přepočet na jouly dá $173\,000 \cdot 10^{12}\ \mathrm{W} \cdot 3600\ \mathrm{s} \doteq 6{,}2 \cdot 10^{20}$ J. Pokud budeme nedůvěřiví, můžeme si tento údaj ověřit ještě nějakým nezávislým zdrojem, například [4]. Tam se uvádí celosvětová produkce energie v roce 2019 necelých 15 tisíc Mtoe. Jak se můžeme poučit na [5], Mtoe je megatuna ropného ekvivalentu, tedy množství energie, které se uvolní spálením miliónu tun ropy. Dozvíme se tam také, že 1 Mtoe = $4{,}1868 \cdot 10^{16}$ J. 15 tisíc Mtoe dá po tomto přepočtu opravdu asi $6{,}2 \cdot 10^{20}$ J. Pro náš pokus je potřeba asi tisícina tohoto množství. Takže když přesvědčíme celý svět, aby na nějakých deset hodin přestal spotřebovávat energii, máme jí dost.

- Problém 2: Máme dost železa?

Trochu větší problém bude s potřebným množstvím železa. Na webu si můžeme dohledat, viz např. [6] nebo [7], že světová produkce oceli v roce 2019 byla necelých 1 870 milionů tun. To vypadá impozantně, ale je to $1{,}87 \cdot 10^{12}$ kg. Našich $7 \cdot 10^{15}$ kg se při stejné produkci dočkáme za více než 3 700 let. Bude to tedy chtít trpělivost…[4]

[1] Občas se říká, že „nic není problém, všechno je výzva“. Takže bychom měli řadu výzev… ☺ Jak uvidíme, tak nemalých.

[2] Jestli by to šlo vůbec udělat a budova by mohla odolat tlaku vzduchu (zřejmě ne), to teď nebudeme řešit. Také byste si mohli představit, že máme někde jinde kouli o rozměrech a hmotnosti Země, ale ve vakuu, a pokus provádíme na ní.

[3] Pro odhad nám stačí takto přibližná hodnota.

[4] A také výřečnost, přesvědčit svět, že po skoro 4 tisíce let mu spotřebujeme všechno železo. A také hooodně tučné konto. A možná ani to nebude stačit, protože celosvětové zásoby železa (z dosud nevytěžené železné rudy) se odhadují na 85 miliard tun, viz např. [8]. To by na naši kouli zdaleka nestačilo. Ale řekněme, že nějakým způsobem půjde získávat další železo ze zemské kůry, podle [8] ho má být v zemské kůře 4,65 %.

- Problém 3: Pevnost materiálu.

Tím ovšem problémy nekončí. Jestlipak takhle velká železná koule vůbec vydrží vlastní tíhu? I kdybychom si problém zjednodušili a uvažovali jen železný resp. ocelový válec vysoký 12 km, řekněme o ploše podstavy 1 m^2, bude mít objem 1,2·10^4 m^3, a tedy hmotnost asi 9,4·10^7 kg. Na materiál u jeho spodní podstavy tedy bude působit síla přes 9·10^8 N, čili tlak přes 900 MPa. Vydrží to materiál, nezačne se hroutit?

Abychom to zjistili, potřebujeme najít hodnotu pevnosti železa v tlaku. Ta se obecně hledá hůře než pevnost v tahu, ale když zadáme do Googlu „compressive strength", můžeme najít například stránku [9], kde je hodnota pro železo uvedena. Ale ouha, je jen 220 MPa. To znamená, že železo tlak 900 MPa nevydrží. Museli bychom vzít nějaké pevnější typy oceli. To by pomohlo. Když na stránkách [9] dáme vyhledat termín „compressive strength steel", dostaneme se třeba k článku, jehož název začíná „O1 Tool Steel", a tam je mezi mechanickými vlastnostmi uvedena pevnost až 2200 MPa.

Otázkou ovšem je, jestli by naši kouli udržela podložka, třeba skála, na níž bychom kouli položili. Podle [10] je mez pevnosti žuly v tlaku jen 130 MPa;[5] koule by se tedy propadla do podloží.

Proč se dostatečně velká koule určitě musí propadnout, případně se sama zhroutí svou vahou? Odpověď lze najít v článku V. Weisskopfa [11], v němž jednoduše zdůvodňuje, proč na Zemi nemáme hory vyšší než zhruba 10 km. Když hora (nebo naše koule) trochu poklesne, klesne její potenciální energie. A uvolněná energie stačí na plastickou deformaci materiálu v základně hory (nebo pod koulí).

Rozeberme si to na příkladu našeho dvanáct kilometrů vysokého železného sloupu s podstavou 1 m^2. Uvažujme vrstvu železa vysokou třeba 1 cm na spodku sloupu. Její objem je 0,01 m^3 a hmotnost asi 79 kg. Energii potřebnou pro plastickou deformaci můžeme (podle [11]) odhadnout z měrného skupenského tepla tání, to je pro železo podle [12] rovno 250 kJ/kg.[6] Na plastickou deformaci 79 kg tedy bude potřeba energie E = 79·250 kJ ≐ 2·10^7 J. Aby se tato energie získala poklesem sloupu o Δh = 1 cm, musí být $mg\Delta h \doteq E$. Odtud $m = E/(g\Delta h) \doteq 2\cdot 10^8$ kg. To je o něco víc než dvojnásobek hmotnosti našeho dvanáctikilometrového sloupu. Takže můžeme odhadnout, že zhruba třicetikilometrový či vyšší sloup už by vlastní tíhu neudržel.

Vidíme ovšem, že na planetě s nižším tíhovým zrychlením by tíhu vydržely sloupy vyšší. Ostatně, podobně je tomu i s horami: na Marsu, kde je tíhové zrychlení jen 3,7 m/s^2, je hora výrazně vyšší než pozemský Mont Everest: Olympus Mons má výšku asi 24 km. (Oba údaje viz např. [13].)

Poznamenejme, že problém, jak velká koule by dokázala vzdorovat gravitaci, by byl samozřejmě složitější než náš zjednodušený model se sloupem. Koule je výrazně hmotnější, takže kdyby se o zem opírala jen částí svého spodního povrchu, byl by tlak na podloží vyšší než v případě sloupu. Navíc by „střední část" koule musela nést i okrajové vrstvy, takže by se zřejmě musela uvažovat i mez pevnosti ve smyku… celé by to asi byl zajímavý, ale složitý problém z oblasti fyziky známé jako mechanika kontinua.

- Problém 4: Drtivý dopad…

Jestliže byl problém už v tom, aby se velká koule nepropadla materiálem, na němž leží, tím spíše bude problém, co se stane, když na povrch Země dopadne, byť jen z výšky deseti metrů. Jak jsme uvedli výše, má hmotnost asi 7·10^{15} kg, takže ve výšce 10 m má energii asi 7·10^{17} J. (Toto číslo vlastně už známe, byla to práce na zvednutí koule.) A tato energie se při dopadu uvolní…

---

[5] V příslušné tabulce na dané webové stránce jsou i mnohem větší čísla, ale ta jsou v jednotkách „psi", což je „pound per square inch" tedy libra na čtvereční palec. Přepočítávat takovéto jednotky musí být radost, zlatá soustava SI!

[6] Jiné zdroje uvádějí poněkud vyšší hodnotu, ale ne dramaticky vyšší, pro náš odhad uvedená hodnota postačí.

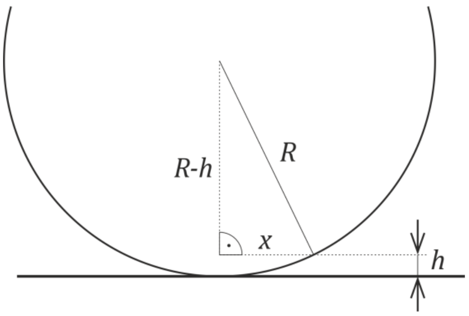
Nebudeme zde domýšlet ani dohledávat, co by se při takovém dopadu stalo. Stojí však za to, porovnat tuto energii například s energií výbuchu atomové bomby. Většinou se energie výbuchů uvádí v tunách TNT; u atomových bomb pak v kilotunách nebo megatunách TNT. Podle [14] i dalších zdrojů je 1 tuna TNT rovna 4,184 GJ. Jde o energii, která se uvolní při výbuchu jedné tuny trinitrotoluenu. (Toto je konvenčně stanovený přepočet, reálně může být energie výbuchu poněkud vyšší či nižší, viz [14].) V zásadě v těchto jednotkách můžeme vyjadřovat libovolně velké či malé energie. Jako kuriozitu lze uvést, že [14] prezentuje i údaj, že jedna kilokalorie (kcal) se rovná 10^{-12} megatun TNT. Výživové hodnoty potravin ovšem asi nezačneme vyjadřovat v bilióntinách megatun TNT…☺ [7]

Našich $7 \cdot 10^{17}$ J uvolněných při dopadu velké železné koule odpovídá asi 167 megatunám TNT. To je více než desetitisíckrát víc, než byla energie atomového výbuchu v Hirošimě, víc než trojnásobek energie největší vodíkové bomby, která kdy explodovala (Car-bomba měla při testu energii asi 50 Mt TNT), a téměř tolik, jako byl výbuch sopky Krakatoa v roce 1883 (200 Mt TNT; všechny uvedené údaje dle [14]). Takže dopad by to byl opravdu drtivý.

- Problém 5: Stačíme utéct zpod padající koule?

Vzhledem k tomu, jak destruktivní účinky by dopad zjevně měl, je náš poslední problém vlastně ryze teoretický: Kdyby koule padala na pevnou podložku a *kdyby* se do ní vůbec nezabořila a sama se nezdeformovala, stihli bychom utéct, kdybychom si těsně před začátkem pádu zálibně prohlíželi místo pod jejím středem?

Záporná odpověď je asi celkem jasná, ale přece jen: Kdyby se koule opravdu vůbec nezabořila a země pod ní byla absolutně rovná, jak daleko bychom museli utéct, aby nás koule nepřimáčkla?



Obr. 1. K určení místa pod koulí dotýkající se vodorovné podložky

Pokud chceme mít k dispozici výšku h, dejme tomu alespoň 30 cm, je zřejmé, že musí platit (viz obrázek 1)

$$x^2 + (R-h)^2 = R^2 \ .$$

Odtud

$$x^2 = 2Rh - h^2 \doteq 2Rh, \qquad (2)$$

protože $h \ll R$. Pro $R = 6000$ m a $h = 0{,}3$ m vyjde $x = 60$ m. Za asi 1,4 s, které trvá pád koule z výšky deseti metrů, bychom tuto vzdálenost rozhodně neuběhli.

[7] Moment, bilióntina megatuny je vlastně jeden gram. Takže není divu, že se pohybujeme v jednotkách kJ. Řádově stejné energie získáme při spalování paliv, v obou případech jde o chemické reakce. (Ke hmotnosti ovšem musíme připočítat i hmotnost kyslíku, který se při reakci spotřebuje.) A podobné hodnoty najdeme opravdu i v nutričních tabulkách potravin, viz např. [15]. Do hmotnosti potravin bychom ovšem opět museli započítat hmotnost kyslíku, který se příslušných reakcí v organizmu účastní; jinak nás překvapí, že nutriční hodnota třeba másla (28,3 kJ/g) je výrazně vyšší, než 4,184 kJ uvolněných při explozi 1 g TNT. Ale to už by bylo téma na jiný článek…

- Problém 6: Ono by to bylo ještě složitější…

V reálném pokusu by se nepochybně uplatnil minimálně jeden další vliv, který jsme zatím neuvažovali. Dosud jsme si představovali, že když kouli pustíme, začne padat naráz jako celek. Ve skutečnosti, kdybychom ji měli nějak podepřenou a podpěru naráz odstranili (neřešme teď, jak), nezačnou současně padat spodní i horní části koule. Horní části koule jsou totiž podpírány těmi spodními, díky tomu, že v materiálu koule je mechanické napětí. (Prostě, materiál koule je stlačen, díky tomu je v něm síla podpírající horní vrstvy koule.) A toto mechanické napětí nezmizí okamžitě, jakmile dole uvolníme podpěru.

Jednoduše řečeno, když dole uvolníme podpěru, materiál v horních vrstvách se o tom „dozví“, až za chvíli, až k němu „doputuje informace“, že se něco mění. Tedy že se mění stlačení materiálu. A tahle informace se v materiálu šíří rychlostí zvuku. Ta je v oceli (jak můžeme zjistit např. v oblíbených tabulkách [12]) necelých 6 km/s. A jéje – takže k vrstvám na vrchu koule by tato informace dorazila až za 2 s. Ale to je doba delší, než je samotná doba pádu z 10 m, ta je jen asi 1,4 s. Tohle z naší jednoduché představy o pádu koule jako jednoho tuhého celku nenechává kámen na kameni.[8]

Reálně by po uvolnění podpěry na spodní část koule působila síla stlačeného materiálu z horních vrstev směrem dolů, takže by se spodní vrstvy pohybovaly k Zemi s větším zrychlením, než g. Podobná situace, ale v opačném smyslu nastává, když pustíme nataženou pružinu, kterou jsme drželi za horní konec. Dobře je to vidět na pružině typu „slinky“ – krásně a přehledně to popisuje příspěvek doc. Bochníčka [16].

Reálnější by byl pokus v menším měřítku: pojďme pády provést na asteroidu

Řady popsaných problémů bychom se zbavili, kdybychom pokus provedli v menším měřítku. Menší by přitom neměla být jen padající koule, ale i nebeské těleso, které ji přitahuje. Zkusme uvažovat asteroid o poloměru 600 m [9] a kouli o poloměru 60 m. Zvedneme ji (spodním okrajem) 10 m nad povrch asteroidu a pustíme.

Gravitační zrychlení na povrchu koule o poloměru R a hmotnosti M je

$$a = G\frac{M}{R^2} = G\frac{\frac{4}{3}\pi R^3\rho}{R^2} = \frac{4\pi}{3}G\rho R \ , \qquad (3)$$

kde G je gravitační konstanta Newtonova gravitačního zákona a ρ je průměrná hustota koule. Pokud by asteroid měl průměrnou hustotu stejnou jako Země, vidíme, že gravitační zrychlení by na jeho povrchu bylo tolikrát menší než g, kolikrát je asteroid menší, než Země. V případě asteroidu s průměrem 600 m je na něm tedy gravitační zrychlení asi desetitisíckrát menší, než g,[10] tedy asi 10^{-3} m/s^2.

Železná koule o poloměru 60 m bude mít hmotnost asi $7 \cdot 10^9$ kg, tedy 7 miliónů tun. To je hodně, ale méně než půl procenta roční světové produkce oceli, takže žádný problém.[11]

---

[8] Představa tedy dopadá podobně jako země, na níž by koule dopadla… ☺

[9] Asteroidy těchto velikostí mívají nepravidelný tvar. Ale řekněme, že jste objevili nějaký prakticky kulového tvaru, nebo jste si vhodný asteroid upravili do tvaru koule…

[10] Při našich přibližných výpočtech zde nebudeme rozlišovat, zda má Země poloměr 6 tisíc km nebo 6378 km; ostatně, chcete-li, najděte si asteroid s poloměrem 637,8 m. ☺

[11] Pomineme problém ceny; řekněme, že váš pokus sponzoruje štědrý miliardář. Nebudeme zde uvádět odkazy, ale lze dohledat, že podle cen z roku 2019 by 7 miliónů tun surového železa stálo asi 2,5 miliardy dolarů. To by štědrý miliardář mohl skousnout. (A třeba byste dostali množstevní slevu, tedy pokud by naopak zvýšený zájem o železo nevyhnal cenu nahoru…)

7 miliónů tun může stále připadat hodně na zvedání, ale na asteroidu je menší gravitační zrychlení, bylo by to, jako zvedat na Zemi 700 tun. Energie potřebná na zvednutí o 10 m by byla $7{\cdot}10^7$ J, to je necelých 20 kWh. Což je oproti ostatním nákladům skoro nic. Samozřejmě, trochu problém by byl dostat na asteroid těch 7 miliónů tun železa, asi by bylo vhodné těžit železo někde přímo v pásu asteroidů.[12]

Pevnost materiálu také nebude problém, stodvacetimetrový ocelový sloup dokážeme postavit i na Zemi. Kdyby měl, jak jsme uvažovali výše, průřez 1 m^2, měl by hmotnost necelých tisíc tun a tedy (při gravitačním zrychlení 10^{-3} m/s^2) působil na základnu silou asi 1000 N. Čili tlak na základnu by byl asi 1 kPa, tedy stokrát méně než je atmosférický tlak na Zemi.

Energie uvolněná při pádu by byla stejná, jako energie potřebná na zvednutí koule, takže necelých 20 kWh. To by moc drtivý dopad nebyl.

Uhnout zpod padající koule by šlo bez problémů. Ze vztahu $s = \frac{1}{2}at^2$ pro zrychlení $a = 10^{-3}$ m/s^2 a s = 10 m vypočteme, že pád by trval asi 140 s. Přemístit se o 60 metrů stranou by šlo pomalou chůzí.[13]

Jaký vliv by měla skutečnost, že koule není absolutně tuhá, to by bylo potřeba propočítat důkladněji. Informace, že jsme pod koulí odstranili podpěru, by se do horní části koule dostala rychlostí zvuku za 20 ms. To je proti době pádu velmi málo, ale koule by se zřejmě mohla rozkmitat, a to by mohlo mít vliv na to, kdy se její základna při pádu přesně dotkne povrchu asteroidu. Ale to už zde opravdu rozebírat nebudeme.[14]

Jak by to bylo s dobou pádu koulí z různého materiálu na asteroidu

Kdyby byl asteroid ze železa, byl by tisíckrát hmotnější, než naše železná koule. (To okamžitě plyne z jednoduché úvahy: je desetkrát větší, takže má tisíckrát větší objem.) Čili když koule k asteroidu spadne o 10 m, asteroid se směrem ke kouli pohne o 1 cm. Stejně velká dřevěná koule[15] by asteroid přitahovala výrazně méně a hnula by s ním o méně než milimetr. Takže železná koule by opravdu dopadla pozorovatelně dříve, než dřevěná.

O kolik dříve, to už spočteme lehce. Rychlost dopadu koule z výšky h = 10 m je $v = \sqrt{2ah}$, což po dosazení dává asi 0,14 m/s. Doba, za níž se touto rychlostí urazí 1 cm, je asi 70 milisekund. Zhruba takový časový rozdíl by tedy byl v časech dopadu železné a nějaké velmi málo hmotné koule. Přesnější rozdíl mezi časy dopadu železné koule a dřevěné koule s určitou hustotou, případně ještě v závislosti na hustotě asteroidu, si už, jak se říká, jistě dopočte laskavý čtenář sám…

---

[12] O dopravu na asteroid a další technické náležitosti zkuste říct třeba Elonu Muskovi. Asi ho budete muset trochu přemlouvat, ale zřejmě to bude jednodušší, než přemluvit celý svět, aby se víc jak tři tisíce let obešel bez přísunu železa…

[13] Je ovšem otázkou, jak by šlo při tak malém gravitačním zrychlení chodit. Spíš by to chtělo odrazit se do strany a nad povrchem asteroidu se pohybovat způsobem typu „šikmý vrh“. Ale nezapomeňte se pak něčeho chytit, abyste neodletěli do kosmu, úniková rychlost z našeho asteroidu by byla jen okolo jednoho metru za sekundu.

[14] Máte-li zájem, vystudujte fyziku na některé VŠ, zaměřte se ve studiu na mechaniku kontinua, a tento problém vyřešte. (Autorovi článku není známo, že by někde v literatuře byl zrovna tento problém řešen. Ono, kdo by se takovými „provokacemi“, jako se tu bavíme my, zabýval, že. ☺ Ale třeba by se nějaké články, které by řešily související problematiku, našly.)

[15] Pomineme otázku, kde v pásu asteroidů získat přes 900 tisíc kubíků dřeva…

Závěr

To jsme si dobře zaprovokovali, že?[16] Samozřejmě, byla to do velké míry hra. A taky to v těch třech článcích naší série byla trochu „cesta tam a zase zpátky". Od možných provokativních námitek vůči zadání úlohy resp. hledání cestiček, jak by šlo „správné učebnicové" řešení obejít, jsme se dostali k seriózním výpočtům vlivu odporu prostředí na pád těles. A pak jsme se zase vrátili k trochu provokujícím a snad až příliš rozevlátým úvahám o vlivu padajících koulí na těleso, na něž padají.[17]

Vždy jsme ovšem vycházeli ze známé a ověřené fyziky – a leccos jsme se přitom naučili. O pádu těles, vlivu odporu prostředí, a mimochodem třeba i o tom, proč nejsou na Zemi hory vysoké třicet kilometrů. Ale také o tom, že je potřeba věci precizovat a hledat, které i malé faktory mohou nebo nemohou ovlivnit výsledky pokusů. Tohle je samozřejmě důležité i ve fyzice samotné, tedy ve fyzikálním výzkumu. Když před více než půlstoletím testovali Dicke, Krotkov a Roll v Princetonu platnost principu ekvivalence,[18] ověřovali výpočtem i to, zda jejich experiment nenaruší skutečnost, že v blízkém lesíku padne každé ráno rosa (viz [17], poznamenejme, že nenarušila).

Ve fyzice se ostatně setkáme i s dalšími věcmi, s nimiž jsme se potkali při naší „cestě tam a zase zpátky": přibližné odhady, konkrétní hodnoty veličin, s nimiž pracujeme, a nechybí ani smysl pro humor. Například ve zmíněném článku [17] R. Dicke pro ilustraci citlivosti jejich měření uvádí, že rozdíl zrychlení, který mohli detekovat, by za rok zrychlil těleso z klidu na *velkolepou rychlost* („magnificent velocity") $2{\cdot}10^{-4}$ cm/s, tedy 7 milimetrů za hodinu. (Samozřejmě také uvedl hodnotu citlivosti, 10^{-11}. Tak malý relativní rozdíl ve zrychleních těles mohl jejich pokus změřit. Dodejme, že dnes je princip ekvivalence ověřen pomocí měření na satelitu již s přesností 10^{-14}, viz [18].)

Ufff, to se nám tato série článků natáhla. Kdo jste vydrželi až sem, díky a palec nahoru! A přitom jsme téma pádu těles a věci související zcela jistě nevyčerpali. Určitě by nám mohlo sloužit jako odrazový můstek k dalším drobným „provokacím", hrátkám s fyzikou i k poučení. Ovšem proč se omezovat jen na pád těles? Je spousta dalších témat, otázek a problémů, které nám mohou sloužit jako východisko k cestám a poutím fyzikou. Ať se vám po těch cestách dobře šlape a ať z toho máte radost.

Když na nich budete i trochu provokovat, tak to bude v pořádku – ale prosím ne nejapně, se snahou někoho shodit. Raději přátelsky a se znalostí věci. Pak nám vzájemné diskuse, byť někdy třeba bouřlivější, mohou pomoci k lepšímu pochopení a poznání. Tak šťastnou cestu, a třeba někdy na těch cestách a v těch diskusích na shledanou.

Literatura:

[1] Dvořák L.: *Jak provokovat, když dostanete úlohu o pádu železné a dřevěné koule I*. Rozhledy matematicko-fyzikáln, roč. 96 (2021), č. 2, s. 57–67

[2] Dvořák L.: *Jak provokovat, když dostanete úlohu o pádu železné a dřevěné koule II*. Rozhledy matematicko-fyzikální. , roč. 96 (2021), č. 3, s. 59–68.

[16] Zde parafrázujeme výrok loupežníka Lotranda ze známého filmu: „Dobře jsme si zaloupili…".

[17] Omluva všem, komu se dané úvahy zdály až příliš absurdní. Ale tento článek vás opravdu nevyzývá, abyste skupovali veškerou světovou produkci železa či připravovali expedici na asteroid.

[18] Tedy, jednoduše řečeno, tvrzení, že všechna tělesa padají se stejným zrychlením. Jde jeden ze základních principů, na nichž stojí Einsteinova obecná teorie relativity – a konec konců to souvisí s naším problémem pádu koulí z různých materiálů.

[3] Ritchie H.: *Energy Production and Consumption*. (na webu Our World in Data) Dostupné online: https://ourworldindata.org/energy-production-consumption

[4] Enerdata: *Global Energy Statistical Yearbook 2000*. Dostupné online: https://yearbook.enerdata.net/total-energy/world-energy-production.html

[5] Energy Education: *Tonne of oil equivalent*. Dostupné online: https://energyeducation.ca/encyclopedia/Tonne_of_oil_equivalent

[6] Ocelářská unie: Globální produkce surové oceli za rok 2019 se oproti roku 2018 zvýšila o 3,4 %. Dostupné online: https://www.ocelarskaunie.cz/globalni-produkce-surove-oceli-za-rok-2019-se-oproti-roku-2018-zvysila-o-34/

[7] Wikipedia: *List of countries by steel production*. Dostupné online: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_countries_by_steel_production

[8] Ložiska nerostů – rudy. Dostupné online: http://geologie.vsb.cz/loziska/loziska/loziska_rud.html#%C5%BDELEZO

[9] AZO materials: *An Introduction to Iron*. Dostupné online: https://www.azom.com/properties.aspx?ArticleID=619

[10] The Engineering Toolbox: *Compression and Tension Strength of some common Materials*. Dostupné online: https://www.engineeringtoolbox.com/compression-tension-strength-d_1352.html

[11] Weisskopf V.F.: *Search for Simplicity: Mountains, waterwaves, and leaky ceilings*. American Journal of Physics 54, 110 (1986). Dostupné online: https://doi.org/10.1119/1.14702 (celý článek není volně přístupný, ale náhled první stránky obsahuje argument týkající se maximální výšky hor)

[12] Mikulčák J., Charvát J.: *Matematické, fyzikální a chemické tabulky a vzorce pro střední školy*. Prometheus, Praha, 2006.

[13] Wikipedie: *Mars (planeta).* Dostupné online: https://cs.wikipedia.org/wiki/Mars_(planeta)

[14] Wikipedia: *TNT equivalent*. Dostupné online: https://en.wikipedia.org/wiki/TNT_equivalent

[15] nzip.cz: *Tabulky nutričních hodnot*. Dostupné online: https://www.nzip.cz/clanek/612-tabulky-nutricnich-hodnot

[16] Bochníček Z.: *Padající pružina*. In: Veletrh nápadů učitelů fyziky 25. (Sborník z konference.) Ed.: V. Koudelková, P. Kácovský. MarfyzPress, Praha 2020. ISBN 978-80-7378-432-4. s. 26-34. Dostupné online: https://vnuf.cz/2020/sbornik_VNUF_2020.pdf

[17] Roll P.G., Krotkov R, Dicke, R.H.: *The equivalence of inertial and passive gravitational mass*. Annals of Physics 26 (1964), p. 442-517. Dostupné online: https://doi.org/10.1016/0003-4916(64)90259-3 (bohužel volně je dostupný jen abstrakt článku)

[18] M. Rini: *Space Tests of the Equivalence Principle*. Physics 10, s.133. Dostupné online: https://physics.aps.org/articles/v10/s133