

Gravitace a tíhové pole Země

Gravitace je jednou ze čtyř známých základních fyzikálních sil. Na rozdíl od zbylých tří interakcí působí na veškerou známou hmotu nezávisle na velikosti či hmotnosti těles anebo jejich vzdálenosti. Specifická je rovněž v tom, že má reálné projevy a je patrná v rozměrových škálách našeho běžného života. Gravitace a z ní odvozená tíže vytvářejí prostředí, v němž se odehrávají základní přírodní procesy, které formují Zemi, její reliéf a krajinu. Tento článek má ukázat, jak tato obyčejná a samozřejmě chápáná síla stojí za základními principy fungování Země. Mimo jiné se v něm dozvíte, jak spolu souvisejí gravitace, tíhová síla a tvar Země, proč čas na kyvadlových hodinách plyne v různých zeměpisných šířkách různě rychle, jak studium tíhových odchylek umožňuje zkoumat podzemí a jak gravitace Měsíce ovlivňuje délku dne a klima na Zemi.

Fyzikální pozadí gravitace

Náš svět formují čtyři základní druhy známých interakcí (sil). Kromě gravitační síly, o níž je tento článek, se uplatňují elektromagnetická síla, silná jaderná síla a slabá jaderná síla. Poslední dvě jmenované interakce působí na úrovni atomových jader, resp. jejich částí v případě slabé jaderné síly, a jsou naprosto nezbytné pro existenci atomových jader, a tedy základů veškeré hmoty. Gravitační síla je suverénně nejslabší ze zmíněných čtyř sil (je asi 10^{38} -krát slabší než silná jaderná síla, 10^{36} -krát slabší než elektromagnetická síla a 10^{29} -krát slabší než slabá jaderná síla), avšak pouze ona společně s elektromagnetickou silou nemají omezený dosah (silná jaderná síla má dosah pouhých 10^{-15} m a slabá jaderná síla 10^{-18} m).

Gravitace a její působení jsou pro člověka tak samozřejmé, že si ji v běžném životě ani neuvedomuje, a snad i proto dlouho stála mimo zájem samotné vědy. Prvním, kdo se gravitací jako takovou hlouběji zabýval, byl Isaac Newton, který zjistil, že jakákoliv dvě hmotná tělesa m_1 a m_2 na sebe působí gravitační silou F_g , jež je přímo úměrná součinu jejich hmotností a nepřímo úměrná druhé mocnině jejich vzdálenosti r , tj. $F_g = G \cdot m_1 \cdot m_2 / r^2$, kde G je gravitační konstanta. Hodnotu gravitační konstanty je velmi těžké změřit, jako prvním se to podařilo až Henrymu Cavendishovi v roce 1798, tedy více než po sto letech od publikování Newtonova gravitačního zákona v roce 1687. Hodnota gravitační konstanty odpovídající současným měřením je $6,67428 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ (Mohr et al. 2008). Malá velikost gravitační konstanty je důvodem, proč je gravitační síla slabá a zanedbatelná, pokud hmotnost alespoň jednoho tělesa není velmi velká.

Jak je vidět z rovnice gravitačního zákona, velmi důležitým faktorem je to, že s narůstající

cí vzdáleností slábne gravitační síla s druhou mocninou vzdálenosti, tj. zvětší-li se vzdálenost například třikrát, zmenší se gravitační síla devětkrát. To je velmi důležité zjištění pro výpočet tíhové síly, resp. tíhového zrychlení pro různá místa na Zemi (viz níže).

Jediná rovnice Newtonova gravitačního zákona vysvětluje pohyb planet včetně Země, popsány třemi Keplerovými zákony. V důsledku 2. Keplerova zákona se planety na svých eliptických drahách pohybují rychleji v blízkosti Slunce (tj. v periheliu neboli v přísluní), neboť na ně působí větší gravitační síla Slunce, která je urychluje. Proto je na severní polokouli Země o 7,5 dne kratší astronomická zima než léto, neboť v zimě se Země nachází blíže Slunci (přísluní nastává přibližně 4. ledna), a tudíž se pohybuje nejrychleji (30,27 km/s), naopak v létě se nachází nejdále od Slunce (afélium neboli odsluní nastává zhruba 4. července), a proto se pohybuje nejpomaleji (29,27 km/s). Zdálo by se tedy, že s Newtonovým gravitačním zákonem přišlo úplné vysvětlení pohybů planet, o něž se lidé pokoušeli už od starověku. Pomocí Newtonova gravitačního zákona však nebylo možné vysvětlit nepravidelnosti oběžné dráhy planety Merkur, tzv. stáčení perihelia planety Merkur. To se podařilo vysvětlit až pomocí Einsteinovy obecné teorie relativity (1915), která ukázala, že gravitace vyvolává efekty dilatace prostoru a času. Z toho plyne, že pro malé rychlosti a slabá gravitační pole lze k popisu gravitační interakce těles použít, kvůli jeho jednoduchosti, gravitační zákon v té podobě, jak jej definoval Isaac Newton. Pro silná pole (jako je tomu například v blízkém okolí Slunce, tedy i pro případ Merkuru), velké rychlosti (relativistické, blízké se rychlosti světla) či tam, kde je nutná absolutní přesnost (např. u systému GPS), se používá k popisu gravitace obecná teorie relativity (která samozřejmě platí i pro malé rychlosti a slabá pole).

Tíže a tíhové pole Země

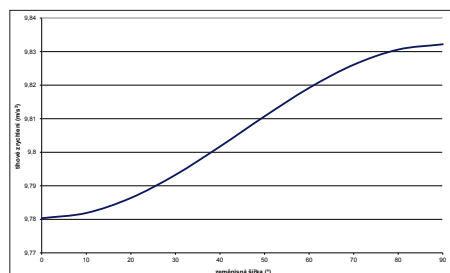
Tíže je síla, kterou planeta přitahuje tělesa u svého povrchu (Kleczek 2002), jinými slovy je to aproximace gravitace planety působící na jejím povrchu a blízko něj. Jako každá síla i tíže uděluje libovolnému tělesu zrychlení $F = m \cdot a$ (kde m je hmotnost tělesa a a je zrychlení), což vyplývá z 2. Newtonova pohybového zákona. Je-li

onou silou gravitace, pak platí, že $F = F_g$, a tedy $m \cdot a = G \cdot M \cdot m / r^2$. Vykrátíme-li hmotnost tělesa m , pak pro tíhové zrychlení a_g platí: $a_g = G \cdot M / r^2$, kde M je hmotnost dané planety a r je její poloměr. Pro Zemi o hmotnosti $M = 5,97 \cdot 10^{24}$ kg a poloměru $r = 6378,1$ km pak platí:

$$6,67428 \cdot 10^{-11} \cdot 5,97 \cdot 10^{24} / 6378100^2 = 3,98455 \cdot 10^{14} / 6378100^2 = 9,79482 \text{ m/s}^2.$$

Takto jsme odvodili přibližnou hodnotu tíhového zrychlení na povrchu Země, ovšem za předpokladu, že by Země měla tvar koule a že by nerotovala kolem zemské osy. U rotující planety se do tíhového zrychlení zahrnuje i odstředivá síla vyvolaná rotací. Navíc víme, že Země je směrem k pólům mírně zploštělá, a s tím je rovněž nutné při stanovení tíhového zrychlení počítat. Z toho plyne, že tíhové zrychlení se mění se zeměpisnou šířkou, tj. na pólech je největší ($9,832 \text{ m/s}^2$), neboť se zde neuplatňuje odstředivá síla, a směrem k rovníku se zmenšuje na $9,780 \text{ m/s}^2$, neboť zde je odstředivá síla rotace největší (obr. 1; v Praze má hodnotu $9,8109 \text{ m/s}^2$). Může se zdát, že rozdíl v tíhovém zrychlení na rovníku a pólech není velký, avšak kyvadlové hodiny na tento rozdíl reagují, a to tak, že směrem k pólům se zrychlují, resp. směrem k rovníku se zpomalují. Kromě toho lze najít lokální odchylky od matematicky vypočtené

Z rovnice tíhového zrychlení plyne, že hmotnost tělesa nemá na velikost tíhového zrychlení žádný vliv. To zjistil už před Newtonem Galileo Galilei, který tvrdil, že všechna tělesa padají k Zemi stejnou rychlostí nezávisle na své hmotnosti. Tedy pokud se vyloučí vliv odporu vzduchu, pak je rychlost pádu všech předmětů stejná. Tímto zjištěním vyvrátil téměř dva tisíce let trvající představu, kterou Aristoteles prezentoval ve svém díle Fyzika, že těžší předměty padají rychleji než lehčí. Ačkoliv lidstvo ví o platnosti Galileiho závěru od 17. století, stále řada lidí i dnes uvažuje v duchu Aristotelovy fyziky a stává se obětí mylných představ. Také proto v rámci projektu Apollo 15 provedl David Scott experiment, při němž na Měsíci upustil kladiwo a pírkó a oba předměty dopadly na povrch současně, což odpovídá Galileiho učení. Tento experiment můžete zhlédnout např. na <https://www.youtube.com/watch?v=4MTsrRZEMwA>.



Obr. 1: Graf proměnlivosti tíhového zrychlení v závislosti na zeměpisné šířce

VÝZKUM A VÝVOJ

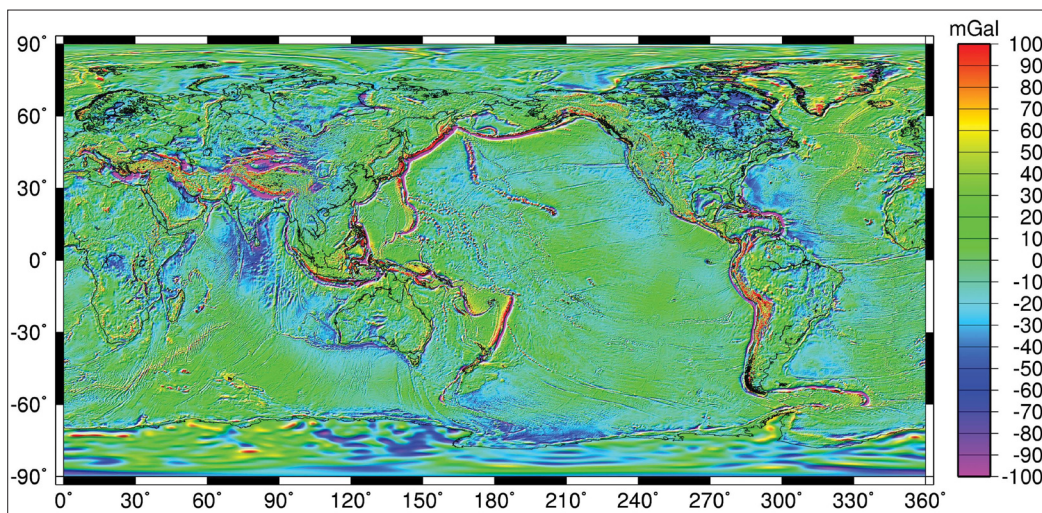
tíhové síly. Tyto anomálie mohou být způsobeny topologií povrchu (např. roli hraje nadmořská výška). Proto byla dohodnuta hodnota normálního tíhového zrychlení $a_{gn} = 9,80665 \text{ m/s}^2$ odpovídající 45° severní zeměpisné šířky při hladině moře a byly stanoveny experimentální rovnice zohledňující zploštění Země pro určení tíhového zrychlení a v závislosti na zeměpisné šířce φ a nadmořské výšce h . Těchto rovnic je několik a liší se hodnotami koeficientů, které odpovídají příslušnému způsobu aproximace tvaru Země. Z těchto rovnic byla vybrána ta, která je v literatuře nejčastěji uváděna:

$$a(\varphi, h) = 9,780327 \cdot$$

$$\cdot (1 + 0,0053024 \cdot \sin^2 \varphi -$$

$$- 0,0000058 \cdot \sin^2 2\varphi) - 3,086 \cdot 10^{-6} \cdot h.$$

Tíhové zrychlení je ještě ovlivněno nerovnoměrným rozložením hmoty pod povrchem Země. Na tyto tíhové anomálie upozornil už Pierre Bouguer (pol. 18. století) a položil tak základy gravimetrie, vědy, která studuje tíhové pole Země. Na základě odchylek tíhového pole je tak možné studovat struktury ukryté pod povrchem Země. Záporné anomálie tíhového pole indikují nedostatek hmoty (např. zvýšenou pórovitost, puklinatost či dutiny). Kladné anomálie odpovídají nárůstu objemové hmotnosti hornin (což může být například způsobeno vyklenutím hustších podložních vrstev směrem k povrchu) (obr. 2). Studium tíhového pole Země umožnilo popsat její tvar a vedlo k definování geoidu, jehož povrch odpovídá ploše zemského tíhového potenciálu, která v místech oceánů splývá s jejich volnou hladinou. Geoid tak představuje matematické těleso, které nejlépe vystihuje tvar Země, což je důležité pro její správné kartografické znázornění, navigaci (včetně systému GPS) a umožňuje definovat nulovou úroveň pro určování výšek nad hladinou moře. S pomocí gravimetrie lze rovněž mapovat ložiska ropy či jiných pod povrchem ukrytých nerostných surovin a zdrojů, včetně možnosti odhalení efektu odčerpávání podzemní vody. Gravi-



Obr. 2: Mapa tíhových anomálií podle EGM2008 (National Geospatial-Intelligence Agency, USA, http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/egm2008/anomalies_dov.html).

Pozn.: 1 Gal odpovídá zrychlení $0,01 \text{ m/s}^2$, tj. 1 mGal odpovídá tíhovému zrychlení $0,00001 \text{ m/s}^2$.

metrie umožňuje odhalovat a mapovat podzemní prostory či pomáhá archeologům hledat zbytky staveb pohřbených pod sedimenty. Na základě přesných družicových měření gravitačního pole lze dokumentovat úbytek ledu pokrývajícího póly nebo studovat změny v zemské kůře doprovázející výraznou sopečnou činnost a zemětřesení. Opakovaná měření tíhového pole Země prokázala, že se hodnoty tíhového zrychlení na jednom místě mění. To je jeden z důkazů toho, že naše Země je stále geologicky aktivní a uvnitř ní dochází k neustálému pohybu hmot.

Gravitace a pohyby Země

V předešlém odstavci jsme se dozvěděli, jak úzce je provázána gravitace a tvar Země, a podobně by bylo možné najít vazby a vztahy k dalším charakteristikám a vlastnostem, které jsou pro naši planetu důležité a umožňují existenci života. Např. gravitační působení Slunce udržuje naši planetu na orbitě uvnitř tzv. obyvatelné zóny, nebo Měsíc svým gravitačním působením stabilizuje zemskou osu (Laskar et al. 1993), jejíž sklon v důsledku toho kolísá jen v rozmezí $22^\circ 02' 33'' - 24^\circ 30' 16''$ (Berger 1976), což má mj. za důsledek, že změny klimatu Země nejsou tak drastické jako např. u Mar-

su, sklon jehož osy k oběžné rovině se chaoticky mění od 0° do 60° (Laskar, Robutel 1993), neboť nemá oporu v tělesu srovnatelném s naším Měsícem, jež by mu mohlo stabilizovat osu rotace. Kromě toho Měsíc a Slunce prostřednictvím vlastních gravitačních sil vyvolávají spolu s rotací Země kolem barycentra (tj. společného těžiště Země-Měsíc) tzv. slapové jevy, které se mj. projevují na mořské hladině přílivem a odlivem. Měsíc navíc v důsledku slapového působení neustále zpomaluje rotaci Země asi o $0,001 - 0,002 \text{ s}$ za století. Například ve středním devonu (tj. před 380 miliony lety) byla rychlost rotace Země větší a jeden den trval přibližně 22 hodin (Varga 1996).

Závěr

Tíhové zrychlení Země není konstantní. Jeho hodnotu ovlivňuje tvar Země, přičemž se tato hodnota mění se zeměpisnou šířkou, nadmořskou výškou a závisí na stavbě a složení Země. Gravitační působení Slunce a Měsíce ovlivňuje polohu Země na oběžné dráze a její pohyby.

Marek Krížek, PřF UK v Praze
marek.krizek@natur.cuni.cz

Gravity and the Gravity of Earth. Gravity and the gravity of Earth. This article examines relationships among gravity, the gravity of Earth, the unique shape of Earth and causes for variability in Earth's gravity. In addition, the article explores how the gravitational forces of the Sun and Moon impact some of Earth's movements.

LITERATURA A ZDROJE DAT:

- BERGER, A. L. (1976): Obliquity and precession for the last 5000000 Years. *Astronomy and Astrophysics*, 51, 127–135.
KLECZEK, J. (2002): *Velká encyklopedie vesmíru*. Academia, Praha, 582 s.
LASKAR, J., JOUTEL, F., ROBUTEL, P. (1993): Stabilization of the Earth's obliquity by the Moon. *Nature*, 361, 615–617.
LASKAR, J., ROBUTEL, P. (1993): The chaotic obliquity of the planets. *Nature*, 361, 608–612.
MOHR, P. J., TAYLOR, B. N., NEWE, D. B. (2008): CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 2006, *Reviews of Modern Physics*, 80, 633–730.

VARGA, P. (1996): Variation of Earth's rotation speed in geological time-scale. In: *The Earth and its rotation*, Heidelberg: Wichmann, 441–474.

APLIKACE DO VÝUKY:

1. Pomocí vzorce pro výpočet gravitačního zrychlení se pokuste vypočítat jeho teoretickou hodnotu pro vaši obec při znalosti její zeměpisné šířky a nadmořské výšky.
2. Pokuste se vysvětlit s pomocí obr. 2 příslušné tíhové anomálie na rozhraní litosférických desek.
3. Zkuste vyjmenovat významné přírodní děje, při nichž se uplatňuje vliv tíhové síly.