

## GRAVITACE OKOLO NÁS 05

**KLÁRA** Martine, na začátku dnešního rande by, myslím, bylo velmi vhodné říct, co to ta gravitace vlastně je.

**MARTIN** Gravitace je schopnost hmoty přitahovat k sobě jinou hmotu. Touto univerzální vlastností je vybaven každý objekt ve vesmíru, bez výjimek. Takže máme-li jakékoli hmotné těleso, jeho automatickou vlastností je, že k sobě přitahuje všechna ostatní tělesa.

**KLÁRA** Počkej, to tedy znamená, že kdybych si vyšla na skutečné rande s nějakým klukem, tak já jako hmotné těleso bych ho přitahovala?

**MARTIN** Pokud ti tedy nevdá, že se na rande budeš nazývat hmotným tělesem. Ale přitahovat budeš nejen ty jeho. I on tebe. Poněvadž také on je hmotné těleso. A ty síly, kterými se takhle vzájemně přitahujete, jsou dokonce stejně velké, jenom mají opačný směr.

**KLÁRA** Ale počkej, Martine, já jsem v praxi nikdy žádnou takovou sílu nepociťovala.

**MARTIN** To je v pořádku. Ona totiž ta gravitační síla u běžných předmětů okolo nás je zanedbatelně malá, čas-

to skoro neměřitelná. Ale u výrazně těžších těles, jako jsou planety nebo hvězdy, už tahle přitažlivá síla patrná je. Ostatně jedné přitažlivé síly si všimneš na první pohled. Gravitační sílu naší Země přece cítíš na každém kroku.



**KLÁRA** To ano. Ještě by mě zajímala jedna věc. Na jakou vzdálenost působí má gravitační přitažlivost? Kam až dosáhne její působení?

**MARTIN** Teoreticky na neomezenou vzdálenost. Jde jen o to, že se vzrůstající vzdáleností tvoje gravitační působení výrazně klesá. Dokonce se dá říct, že nějaké neměřitelné stopy tvé přitažlivosti existují třeba až na Měsíci. I mnohem dál.

**KLÁRA** To je úžasné, že jsem přitažlivá až na Měsíci.

**MARTIN** Ty jsi, Kláro, přitažlivá úplně všude.

**KLÁRA** Takže, pánové, až pozvete na rande nějakou slečnu, určitě jí řeknete, že je přitažlivá. Z fyzikálního hlediska budete mít zaručeně pravdu. Ale zpět k vědě. Co je vlastně příčinou toho, že se veškerá hmota k sobě přitahuje?

**MARTIN** Existuje několik teorií, ale samotná podstata gravitace není dosud uspokojivě vysvětlena. Musíme to spíš brát jako danou věc. Můžeme si leda říkat, že hmota je taková společenská, neboť má tendenci se shromažďovat. Alespoň je s ní legrace. Nebýt totiž hmoty, zřejmě by nebyl náš svět, nebyli bychom my a ani naše rande s Fyzikou.

**KLÁRA** Když jsem nadcházející pasáž natáčela v televizním Rande s Fyzikou, režisér pořadu po mně chtěl, abych





při moderování zároveň prováděla akrobatickou sestavu na závěsných šálách. Ptala jsem se proč a rejža mi odpověděl: „Protože je to jednak tvůj koníček a jednak výšková akrobacie je vlastně takový zápas s gravitací, takže se to sem hodí.“ A tak jsem moderovala a zároveň při tom akrobatila ve výšce několika metrů nad zemí. Podle dřívějšího Martinova vysvětlení jsme se já i zeměkoule měly v tu chvíli vzájemně přitahovat dvojjíci stejně velkých gravitačních sil, ale opačně orientovaných. Ovšem když jsem se pustila, stáhla mě planeta okamžitě k sobě dolů. Najednou se mi nezdálo, že by ty síly byly stejně velké. Naopak se mi zdálo, že přitažlivá síla Země je mnohem větší než ta moje. Jak to tedy je?

**ZDENĚK** Kláro, ač se to nezdá, obě síly jsou skutečně stejně veliké. To plyne ze Třetího Newtonova pohybového zákona, zákona o akci a reakci. Jak působí Země na tebe, tak působí i ty na naši zeměkouli. Ale vysvětluje to



i druhý pohybový zákon. Čím má těleso větší hmotnost, tím větší síly je zapotřebí, abychom změnili jeho pohybový stav.

**KLÁRA** Ano, pamatuji si. Hmotnost vyjadřuje něco jako nechuť tělesa se rozhybat.

**ZDENĚK** Uvědom si, že tvoje vlastní hmotnost je nicotná ve srovnání s hmotností Země. Ten rozdíl je o celých 23 řádů. Takže není divu, že mnohem těžší Země má obrovskou nechuť k jakékoli změně pohybu. I když na sebe se Zemí působíte stejně, v praxi je posun zeměkoule vyvolaný gravitací člověka tak malý, že je vlastně neznamenatelný. Nicméně existuje.





**KLÁRA** Takhle, jak to vysvětluješ, je to vlastně logické. A mně se na tom vysvětlení obzvláště líbí dvě věci. Jednak že dokážu pohnout zeměkoulí, i když tak málo, že to ani nejde změřit, a jednak, že se v této souvislosti hovoří o mé hmotnosti jako o nicotné. To potěší každou ženu. A pokud byste čirou náhodou chtěli vidět můj akrobatický výkon při moderování, můžete se na něj podívat na webu České televize. Najdete ho na odkazu [www.ceska-televize.cz/rsf/13](http://www.ceska-televize.cz/rsf/13) anebo se k němu dostanete ještě snadnějším způsobem přes QR kód.

**KLÁRA** Martine, dá se velikost vzájemné gravitační síly, kterou na sebe působí dvě tělesa, nějak spočítat? Máme na to nějaký vztah?

**MARTIN** Tu zákonitost, podle které se počítá velikost gravitační síly, objevil kolem roku 1666 Isaac Newton. Myslitelé v 17. století byli schopni uvažovat o gravitaci jen v souvislosti s nebeskými tělesy, zejména oběhem planet

okolo Slunce. I když se o to tehdy vedly spory, Newtona pravděpodobně jako prvního napadlo, že síla přitahující předměty k Zemi má stejný původ jako ta, která působí na Měsíc, a že tytéž zákonitosti platí i pro pohyb planet okolo Slunce. Nejen Newton, ale například i v Praze působící německý astronom Johannes Kepler či anglický fyzik Robert Hook tušili, že přitažlivá síla mezi planetami klesá s druhou mocninou jejich vzdálenosti. Jenže Isaac Newton



jako první jednotlivé kousky puzzle poskládal a vytvořil ucelený obraz gravitace. I když nutno přiznat, že o jejich příčinách odmítl spekulovat. Každopádně dnes je formulace na jeho počest nazvána jako Newtonův gravitační zákon a zní: Velikost gravitační síly, kterou se přitahují dvě tělesa, je přímo úměrná součinu jejich hmotností a nepřímo úměrná druhé mocnině jejich vzdálenosti. Dokázala bys tento zákon zapsat v matematické formuli?

**KLÁRA**

$$F \sim \frac{m_A \cdot m_B}{r^2}$$

**MARTIN** Isaac Newton věděl, že ve vztahu musí být ještě nějaká konstanta. Té konstantě se později začalo říkat gravitační konstanta a jako svoji značku dostala řecké písmenko kappa –  $\kappa$ . Takže celý vzorec, podle kterého se dá vypočítat velikost vzájemné gravitační síly, vypadá takto:

$$F = \kappa \cdot \frac{m_A \cdot m_B}{r^2}$$

Kde  $m_A$ ,  $m_B$  jsou hmotnosti těles a  $r$  je jejich vzájemná vzdálenost. Newton ovšem ve své době ještě nedokázal dopočítat hodnotu gravitační konstanty. Uměl sice změřit, jakou silou se přitahuje Země s nějakým běžným tělesem, uměl to pokusně těleso i zvážit, ale neznal hmotnost Země. Tu se sice snažil odhadnout z její hustoty, ale výsledky byly příliš nepřesné.



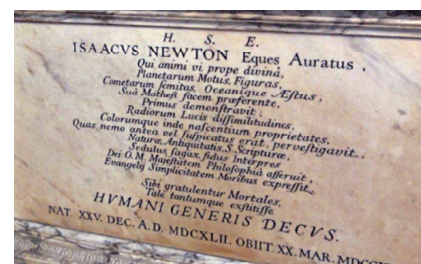
Edmond Halley

**KLÁRA** Takže Newton ani neměl možnost svůj gravitační zákon v praxi nějak ověřit?

**MARTIN** Platnost gravitačního zákona pomohl ověřit astronom Edmond Halley. V roce 1682 zářila na nebi velmi jasná kometa. Halley na základě historických svědectví o předchozích výskytech komety a svých výpočtů odhadl, že bude vidět zase v prosinci 1758. Protože si ale s určením trajektorie komety nevěděl rady, konzultoval vše s Newtonem. Ten mu gravitační

zákon prozradil i s poznatkem, že kometa se bude pohybovat po elipse. Halley pak Newtona přemluvil, aby své poznatky a objevy publikoval. Sám pak výpočtem za pomoci gravitačního zákona potvrdil svůj dřívější odhad dalšího přiletu komety.

**KLÁRA** To ale bylo za dalších 76 let.



I přes nespornou užitečnost Newtonova gravitačního zákona, má tento zákon několik nedostatků. Například neumožňuje vysvětlit možné modely vesmíru. Zásadní také je, že předpokládá nekonečně rychlé šíření informace, což podle poznatků starých už více než 110 let není pravda. Odporuje to totiž Einsteinově teorii relativity, podle které se interakce může šířit maximálně rychlostí světla. Tedy rychlostí omezenou a nikoli nekonečnou.

Newtonovy zákony nepočítají ani s tak zvanou relativností času a délky – nepočítají s tím, že v soustavách, které se vůči sobě pohybují velkými rychlostmi, nemusí plynout čas stejně a délky jednotlivých předmětů se mohou také lišit.

Každopádně je ale Newton velikánem, který posunul lidské vědění o obrovský krok kupředu. Vypůjčíme si text na jeho náhrobku v katedrále ve Westminsterském opatství v Londýně, překlad od Ivo Krause:

*„... rytíř, který téměř božskou silou  
jako první osvětlil pochodní své matematiky  
tajemství pohybu a tvary planet, drah komet, i přílivy oceánů...  
Tento horlivý, bystrý a svědomitý badatel vyložil přírodu,  
historii dávnověku i Písmo svaté...  
Smrtelníci se mohou radovat, že mezi nimi byla taková ozdoba  
lidského rodu...“*

**MARTIN** Newton ani Halley se toho samozřejmě už nedožili. Ale datum návratu komety se obdivuhodně shodovalo s jejich výpočtem. Tím se gravitační zákon považoval za prokázaný. Na počest tohoto astronoma byla kometa pojmenována jako Halleyova. Nicméně, stále nebyla známá gravitační konstanta kappu.

**KLÁRA** A tu se podařilo změřit kdy?

**ZDENĚK** Více než sto let po publikování Newtonova gravitačního zákona. To měření provedl anglický fyzik Henry Cavendish a do dějin fyziky vstoupilo jako Cavendishovo vážení zeměkoule.

**KLÁRA** Jak se dá taková Země zvážit? To by mě tedy zajímalo.

**ZDENĚK** Abychom byli k dějinám spravedliví, Cavendish použil nápad reverenda Johna Michella, který chtěl změřit hustotu Země. Zemřel však dříve, než se k uskutečnění svého plánu dostal. Cavendish na něj navázal a pomocí aparatury, kterou po něm zdědil, dokázal dostatečně přesně změřit gravitační působení mezi běžně těžkými předměty. To nebylo vůbec jedno-

duché, protože taková přitažlivost je neuvěřitelně malá. A když Cavendish dostatečně přesně změřil přitažlivost mezi dvěma předměty, u kterých znal jejich hmotnosti i vzájemnou vzdálenost, nebyl problém dopočítat velikost gravitační konstanty. To ale už nebyla jeho zásluha. Konstanta byla vypočtena až mnoho let po Cavendishově smrti za pomoci jeho výsledků měření a poznámek.

**KLÁRA** A můžeme si říct, jak ta Cavendishova aparatura vypadala a na jakém principu pracovala?

**ZDENĚK** Správně bychom měli asi říkat, že to byla aparatura i Johna Michella. Každopádně pracovala na takzvaném principu torzního kyvadla. A protože šla z výsledků měření vypočítat hmotnost Země, říká se aparatuře Cavendishova váha. Jejím základem jsou dvě velké olověné koule na otočné konstrukci, mezi kterými je na tenkém lanku zavěšeno vahadélko, které má tvar činky (dvě malé kuličky na dlouhé tenké tyčce). Zařízení zjednodušeně řečeno měří velikost gravitačních sil, kterými se přitahují malé kuličky a velké olověné koule.



Henry Cavendish

**KLÁRA** Jenže jak, když je gravitační síla tak malá?

**ZDENĚK** Když velké koule přiblížíme k těm malým, tak se vlákno, na kterém visí tyčinka s malými kuličkami, stočí o nepatrný úhel. Ale tuto pouhým okem sotva postřehnutelnou torzi vlákna jsme schopni změřit.

*Zdeněk představil Cavendishovu aparaturu (váhu) umístěnou v posluchárně Matematicko-fyzikální fakulty UK v Praze – Troji. Hmotnost velkých koulí je 18,8 kg, zatímco hmotnost malých kuliček je 35 gramů.*



**KLÁRA** Jak?

**ZDENĚK** Na vláknech je připevněno velmi malé, lehké zrcátko. A když na něj posvítíme paprskem světla (v dnešní době se to dělá pomocí laseru), paprsek se odrazí a promítne na vzdálenou stěnu. I nepatrné zkroucení vlákna posune průmět paprsku o nějakou už změřitelnou vzdálenost. A z tohoto posunu jsme schopni vypočítat silové působení větších koulí na torzní kyvadélko. I když připouštím, že ten výpočet není zrovna jednoduchý.

**KLÁRA** To ti věřím. Tak abyste měli představu, jak taková Cavendishova torzní váha ve skutečnosti vypadá, můžete se podívat na naše páteřní televizní Rande s Fyzikou. Tam uvidíte aparaturu, která je instalovaná v budově Matfyzu v pražské Troji. Video najdete na webu České televize na odkazu [www.ceskatelevize.cz/rsf/14](http://www.ceskatelevize.cz/rsf/14) nebo prostřednictvím uvedeného QR kódu.

**ZDENĚK** Jen pro představu dodávám, že u naší Cavendishovy váhy má každá ze dvou velkých olověných koulí hmotnost 18,8 kg. Malé kuličky na vahadélku pak mají hmotnost po 35 g, tedy 0,035 kg. Průmět paprsku odečítáme na zdi, která je od torzního vlákna vzdálená 9 m.

**KLÁRA** Když se tedy našly v pozůstatosti Cavendishovy zápisky, co z nich vlastně vyšlo?

**ZDENĚK** Hodnota gravitační konstanty, která se jen málo lišila od dnešní uváděné hodnoty:

$$G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$$

**KLÁRA** To je tak malá hodnota, že za desetinnou čárkou je nejdříve deset nul, než se tam objeví první nenulová číslice.

$$G = 0,000\,000\,000\,066\,742 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$$



Můžeme si vysvětlit, co ta gravitační konstanta přesně znamená? Co vyjadřuje?

**ZDENĚK** Můžeme. Gravitační konstanta vlastně udává velikost gravitační síly, kterou jsou k sobě přitahována dvě kilogramová závaží, vzdálená od sebe jeden metr. Tak malou sílu si ani nedokážeme představit. Vždyť třeba i takové chmýříčko z pampelišky tlačí na naši dlaň silou zhruba desettisíckrát větší.



**KLÁRA** Aha, tak už je mi jasné, že když jdu s nějakým klukem na rande, nemohu cítit opravdovou gravitační přitažlivost mezi námi dvěma. Něco, co je o několik řádů menší než tíha pampeliškového semínka, se opravdu nedá cítit. Jen mi, Zdeňku, není jasné, proč se tomu pokusu říkalo Cavendishovo vážení zeměkoule, když se vlastně nic nevážilo.

**ZDENĚK** Stačí hodnotu gravitační konstanty dosadit do Newtonova gravitačního zákona a snadno vypočteš hmotnost Země. Z výsledků Cavendishových měření vyšla hmotnost Země s chybou asi 1 %. Tedy nečekaně přesně.

**KLÁRA** A kolik tedy naše Země vlastně váží?

**ZDENĚK** Přibližně  $5,972 \cdot 10^{24}$  kg. Kdyby to číslo rozepsala, vypadalo by takhle:

$m_z = 5\ 972\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ \text{kg}$

**KLÁRA** Už chápu, proč jsi na začátku tohoto rande nazval moji hmotnost nicotnou ve srovnání s hmotností Země. A to ji ani nemusím před čtenáři prozrazovat. Gravitace naší planety je tedy natolik velká, že nás stále přitahuje k jejímu povrchu. Skoro se dá říct, že nás na něm a v přilehlém tenkém pásu atmosféry uvěznila. Mimořádně i ta atmosféra je držena zase jen gravitačním působením Země. Ale jedna věc mi ještě není úplně jasná. Naše Země svojí gravitací působí i na Měsíc a rovněž ho k sobě přitahuje. Je to tak?

**ZDENĚK** Ano. Země a Měsíc se přitahují vzájemnou gravitační silou, jejíž přibližná hodnota je  $2,05 \cdot 10^{20}$  N.

**KLÁRA** Jak to, že pak Země k sobě Měsíc nepřitáhne, stejně jako všechny ostatní předměty?

**ZDENĚK** Měsíc totiž vůči Zemi není v klidu, ale obíhá ji. Trajektorie se s jistým přimhouřením oka dá nazvat kruhovou. Oběžnou rychlost získal Měsíc už v době vzniku naší sluneční soustavy. A protože je Měsíc za hranicí naší atmosféry, kde nepůsobí žádné brzdící síly vzduchu, pohybuje se tam už několik miliard let. A gravitační síla Země pak účinkuje jako dostředivá (zátáčecí) síla, která způsobuje, že pohyb Měsíce se stáčí zhruba po kružnici.

**MARTIN** A úplně stejné je to s našimi umělými družicemi. Ty se také udrží na oběžné dráze jenom díky tomu, že jim po vynesení do správné výšky udělíme dostatečnou rychlost ve směru rovnoběžném s povrchem Země. Na kosmickou loď nacházející se na oběžné dráze působí vlastně jenom jedna síla. Tou je gravitační síla naší Země. Jejím působením se dráha pohybu družice nepřetržitě stáčí k zemskému povrchu. Ovšem při dostatečně vysoké rychlosti letu zemský povrch díky svému zakřivení před klesající vesmírnou lodí plynule uhýbá. Vesmírná loď tedy sice bez přestání padá, ale zároveň nikdy nespadne. I když bych měl otevřeně přiznat, že družicím, které obíhají

