

Gravitační síla, beztlížný stav

Obsah

Cíle	1
Pomůcky	1
1. hodina – Úvod	2
1. hodina, pokračování – Gravitační síla, Cavendishův experiment.....	2
Poznámka 1 – Tíhová síla.....	5
Poznámka 2 – Padání těles s různou hmotností.....	5
2. hodina – Beztížný stav	6
Poděkování	8
Literatura	8

S gravitační silou se všichni setkáváme od malička. Už malé dítě zkouší, jestli lžička, kterou hodí na zem, tam dopadne poprvé, podruhé i podesáté (tak dlouho, dokud je dospělý ochoten mu ji zvedat). Stejně tak má zkušenost, že kostičky postavené do věže po jejím zboření spadnou na podlahu a nebudou se vznášet v prostoru. Jednoduché, že? Ovšem snaha vysvětlit, proč a jak tělesa padají, dovedla fyziky až k tomu, že gravitaci v obecné teorii relativity popisují zakřivením prostoročasu. A někde mezi těmito úrovněmi je třeba gravitaci vysvětlit dětem na základní škole.

Tématu Gravitační síla je vhodné věnovat jednu vyučovací hodinu. Druhá hodina (která nemusí nutně navazovat), je pak zaměřena na beztížný stav. Pokud zadáte dětem zjišťování názoru rodičů, je třeba tématu věnovat ještě část další hodiny, kdy budou děti referovat, co doma zjistily.

Téma doporučujeme zařadit do druhého pololetí šestého ročníku. V šesté třídě je většina témat buď hodně experimentálních (vlastnosti látek, magnetismus) nebo méně zajímavých (měření fyzikálních veličin), proto se domníváme, že gravitaci a beztížný stav je vhodné sem zařadit, právě proto, že jsou to témata poměrně myšlenkově náročná, a tím mohou být pro žáky jiná, zajímavá.

Cíle

- Žák se seznámí s různými způsoby měření gravitační síly v minulosti.
- Žák popíše a vysvětlí chování těles v beztížném stavu.

Pomůcky

magnety, hřebíčky, kompas, tyč a látka na elektrostatiku, pružina, dřevěný kvádr, voda, sklenička, model Cavendishova pokusu (špejle, modelína, nit, zrcátko)

1. hodina – Úvod

Pomocí výše uvedených pomůcek (či dalších, které budou žáci potřebovat) nechte žáky předvádět různé síly, se kterými se již ve fyzice setkali.

Například:

- Magnet působí silou na hřebíčky.
- Země působí silou na magnetku.
- Zelektrovaná tyč působí silou na papírky, lístky alobalu.
- Svaly člověka působí silou na židli, dveře, ...
- Vzduch působí silou na píšť, na lodní plachtu, na hladinu vody.
- Stlačená pružina působí silou na kvádr položený na stole.
- Kvádr na stole se pohne, když do něj strčím.

Potom učitel upozorní žáky na existenci dalších sil, o kterých se ve fyzice ještě nemluvílo.

- Vezme suchou skleničku, nalije do ní vodu, tu vyleje, a ukáže žákům kapky, které zůstaly na skle. Musí tam tedy být nějaká síla mezi vodou a sklem.
- Kamínek puštěný z výšky se pohybuje, i když do něj nikdo nestrčil. Učitel požádá žáky, aby zapomněli, že to znají, a začali se na tento jev dívat jako na něco nového, co nyní budou zkoumat.

1. hodina, pokračování – Gravitační síla, Cavendishův experiment

Další část hodiny můžete vést podle následujícího imaginárního rozhovoru. Odpovědi žáků jsou očekávané, avšak ve skutečnosti mohou být zcela odlišné a učitel musí samozřejmě reagovat na to, co mu žáci říkají.

Učitel: První myšlenka, která by nás mohla napadnout, když vidíme, jak kamínek padá na stůl, je, že kamínek je přitahován stolem. Dalo by se nějak zjistit, jestli to tak skutečně je?

Žák: Není, když hodíme kamínek vedle stolu, spadne na podlahu.

U: Tedy ho přitahuje podlaha?

Z: Ne, když hodíme kamínek z okna, spadne na trávník.

U: Takže se může zdát, že by kamínek mohl přitahovat nějaký velký kámen, který je v zemi. Dalo by se nějak ověřit, že to tak je?

Z: Kámen bagrem vyndáme a vyzkoušíme to.

U: To bychom asi kolem školy udělali dost nepořádku, nešlo by to jinak, jednodušeji?

Z: Tak najdeme někde v přírodě velký kámen na povrchu země.

U: To je výborný nápad. Velké kameny jsou například útesy či hory. A co očekáváme, pokud bychom tento experiment udělali a útes kamínek skutečně přitahoval? (Učitel kreslí obrázek na tabuli – kolmou skálu, kamínek padající vedle ní, maličko šikmo, pád se zakřivuje směrem ke skále.)

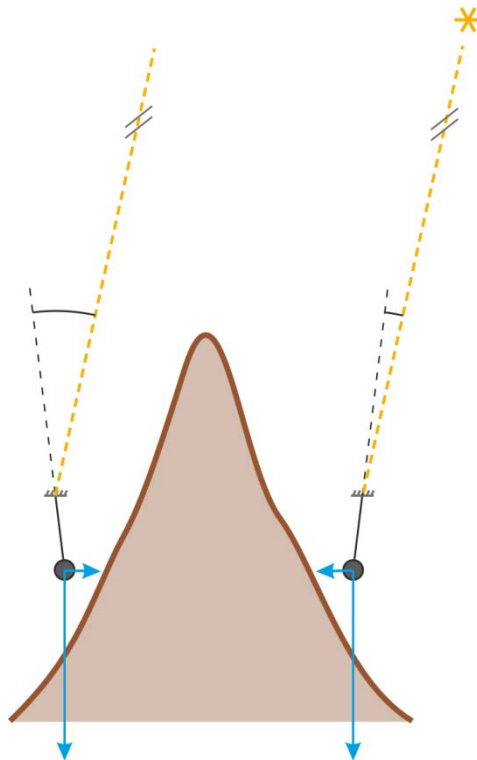
Z: Kamínek spadne o kousek blíž ke skále, nebude padat přímo dolů.

U: Přesně tak. Pojďme ale zkusit, zda by šlo experiment ještě vylepšit, aby v tom nehrál tak velkou roli odpor vzduchu a to, jak přesně se nám podaří kamínek pustit.

Z: Tak kamínek pověsíme na nit a pověsíme vedle skály. Když ho bude skála přitahovat, tak nebude viset rovně dolů¹.

U: Přesně tak (doplní obrázek o kamínek na závěsu). A tyto experimenty se také prováděly. Například v roce 1738 Pierre Bouguer na vyhaslém vulkánu Chimborazo v Ekvádoru a roku 1774 Nevil Maskelyne u skotské hory Schiehallion [1]. Problémem u těchto druhů měření však bývá zjistit rozměry a hustotu kopce či hory, u kterého se tyto pokusy provádí. Výchytky byly velmi malé (na obrázku je to přehněáno), přesto měřitelné. Hora tedy skutečně kamínek (ve skutečnosti olovnici) přitahovala.

Poznámka: V článku [1] je měření podrobně popsáno. Vědci prováděli měření na sever a na jih od hory, odchylku směrů závěsu určovali pomocí světla hvězd, viz obr. 1.



Obr. 1 Olovnice na sever a na jih od hory visí v trochu jiném směru, protože hora jejich závaží přitahuje. Odchylka těchto směrů byla určena z úhlů, který s těmito „lokálními svislicemi“ svírají paprsky ze vzdálené hvězdy.

(Rozměry olovnice i odchylky úhlů jsou v obrázku výrazně přehněány.)

U: Co myslíte, bylo by možné experiment ještě vylepšit, aby bylo měření citlivější a přesnější a k přitahování jsme nepotřebovali celé hory? Vědci to dokázali, použili ale jiný princip měření.

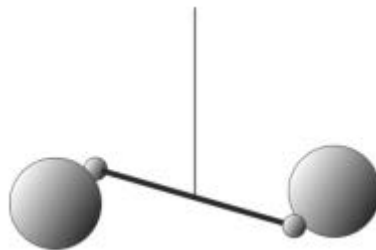
¹ Zde se samozřejmě objevuje problém, co to znamená „rovně dolů“. To je směr, který ukazuje olovnice, což je právě to, co zkoumáme. Přesněji by bylo potřeba porovnávat směr u útesu a o kus dál. V této fázi uvažování doporučuji to se žáky neřešit, nechat to na úrovni částečného porozumění.

Učitel si předem připraví dva stejné kousky modelíny, špejli a nit na zavěšení. Modelínu dá na konce špejle, pomocí nitě celou soustavu pověsí tak, aby špejle byla vodorovná.

U: Podívejte se, mám tady špejli, na kterou jsem připevnil dva kousky modelíny. Modelína nám představuje malé kamínky, špejli zavěsíme na nitku. Špejle je vodorovně a může se snadno otáčet kolem svislé osy. Při reálných experimentech se používá kovová tyčka, olověné kuličky a celé to visí na tenkém drátku. Ten se dá snadno zkroutit, takže k natočení tyčky stačí i velice malá síla působící na kuličky. Celému zařízení se říká torzní váhy. (Protože torze = zkroucení.)

Kam máme nyní dát to velké těleso, abychom pozorovali, že se k němu olověná kulička přitahuje?

Z: Z boku, a ještě lépe použít dva velké kameny, každý z jedné strany.



Obr. 2 Model torzních vah (převzato z [2])

U: Výborně. Toto je princip experimentu, který provedl Henry Cavendish v letech 1797-1798. Nechal přitahovat velké olověné koule a malé olověné kuličky.

Poznámka: H. Cavendish pomocí tohoto experimentu změřil hustotu Země (od hodnoty určené dnes se jeho výsledek lišil jen asi o 1,2%). Podrobnější a přesnější popis a výsledky experimentu jsou uvedeny v [2].

Při experimentu se používá zrcátko připevněné ke středu špejle, na které se svítí paprskem světla. Co budeme pozorovat?

Z: Uvidíme světelné prasátko na zdi.

U: A co když se špejle maličko pootočí?

Z: Tak se to prasátko pohne a bude to líp vidět, než přímo na té špejli.

U: Můžeme tedy udělat závěr, že přitahování různých věcí (jablek, kamenů, apod.) k Zemi není dáno jen nějakým „magickým působením Země“, ale stejně tak jsou různé věci přitahovány horami, olověnými koulemi apod. To, že toto přitahování okolo sebe nepozorujeme, je dáno tím, že přitažlivá síla je pro běžná tělesa velmi malá (závisí na hmotnosti obou těles). Vědci ověřili, že se na to přitahování dá aplikovat Newtonův gravitační zákon, který Isaac Newton formuloval pro vzájemné působení vesmírných těles v roce 1687.

Tedy jakákoliv hmota přitahuje jinou hmotu, není to působení ani magnetické, ani elektrické, ale gravitační ("gravis" – latinsky těžký²), tj. dělá to věci těžké, cítíme jejich tíhu.

Na Zemi působí na závaží o hmotnosti 100 gramů gravitační síla o velikosti 1 N. Měsíc má menší hmotnost než Země, tedy působí na stejné závaží menší gravitační silou (asi 1/6 toho, co na Zemi).

U: Rozmyslete si, jak se budou chovat dvojmiskové (rovnoramenné, laboratorní) váhy s kilogramovým kamenem a závažím na Zemi a na Měsíci, a jak se bude chovat siloměr, na kterém bude stejný kámen zavěšen.

Z: Váhy budou na Zemi i na Měsíci v rovnováze, obojí bude přitahováno navzájem stejnou silou, siloměr bude na Měsíci ukazovat šestkrát menší hodnotu než na Zemi.

Poznámka 1 – Tíhová síla

Podle našeho názoru není na základní škole nutné rozlišovat mezi gravitační a tíhovou silou. Tím, že zavedeme odstředivou sílu, která se projevuje POUZE v rotujících (a tedy neinerciálních) systémech, vnášíme do výuky mechaniky zmatek. Obvykle se na základní škole nevykládá rozdíl mezi těmito systémy, neboť je to myšlenkově poměrně náročné a i středoškoláci mají s hlubším pochopením neinerciálních soustav problém. Tíhová síla bývá jediným příkladem, kdy se odstředivá (tedy zdánlivá) síla na základní škole zmiňuje. Doporučujeme rozdíl mezi gravitační a tíhovou silou vůbec nevykládat a používat obě slova jako synonymum. Ostatně odchylka svislého směru na rotující Zemi oproti směru, kdy by se Země neotáčela, je asi jedna desetina stupně (viz [2]), tedy skutečně zanedbatelná. Pokud by se některý žák na rozdíl mezi tíhovou a gravitační silou zeptal, nebo pokud by učitel považoval za důležité se o tom zmínit, tak podrobnější výklad lze nalézt ve zmíněném textu [2].

Poznámka 2 – Padání těles s různou hmotností

Jako doplňkový materiál je možné se žáky řešit otázkou, zda a proč padá kámen rychleji než peříčko a objasnit jim tak vliv odporu vzduchu. Vhodným experimentem je například padání listu papíru a papírové koule ze zmačkaného stejného papíru. Obě tělesa mají stejnou hmotnost, přesto každé padá s jinou rychlostí.

Doporučujeme žákům pustit video, kde je natočený pád těžšího a velmi lehkého tělesa ve vakuu (například [3]), případně v mnohem větším měřítku natočený pád bowlingové koule a ptačího pera z výšky několika metrů v největší vakuové komoře na světě [4]. Je dostupný i původní experiment prováděný astronauty v rámci mise Apollo 15 na Měsíci [5].

Na úrovni střední školy je možné ověřovat, že odporová síla je úměrná druhé mocnině rychlosti, případně pomocí padajících těles určovat i hodnotu koeficientu odporu prostředí [6].

² Podobně – gravidita = obtěžkání.

2. hodina – Beztízný stav

Tato hodina je myšlenkově poměrně náročná, s problematikou beztízného stavu mají potíže i mnozí dospělí. Přesto je ale podle našeho názoru důležité se této otázce věnovat.

Doporučujeme na začátku hodiny žákům pustit některou reportáž z mezinárodní vesmírné stanice (ISS). Pěkné a relativně krátké video je například [7]. Video je možné pustit dvakrát – jednou celé s hudbou pro celkový dojem, podruhé bez zvuku, zastavovat ho na vhodných místech a nechat žáky popisovat, co zajímavého pozorují. Doporučuji upozornit žáky na „odložení“ holicího strojeku vedle kosmonauta v čase zhruba 0:35.

Po skončení videa se učitel zeptá žáků, čím je způsobeno, že je na ISS beztízný stav. Obvykle mají žáci představu, že na ISS nepůsobí gravitace³.

Pak učitel nakreslí na tabuli Zemi (například o poloměru zhruba 65 cm, aby byla v měřítku) a zeptá se žáků, jak daleko by v tomto měřítku byl Měsíc. Bývá pro ně velmi překvapivá informace, že Měsíc je ve vzdálenosti 60 zemských poloměrů, tedy ve vzdálenosti téměř 4 metry. Pak učitel nechá žáky odhadnout vzdálenost ISS od nakreslené Země. Stejně jako u Měsíce žáci obvykle nemají představu a kreslí to zcela libovolně. Opět je pro ně značným překvapením, že ISS se pohybuje zhruba 400 km nad povrchem Země (tedy ze Země na ISS je to zhruba stejně daleko jako z Prahy do Bratislavy, ale nahoru ☺). Na tabuli tedy bude ISS ve vzdálenosti asi 4 cm od Země. (A tomu říkáme, že dobýváme vesmír ☺.) Vzhledem k tomu, že Země svojí gravitací udrží Měsíc, bylo by tedy divné, že by na ISS nebyla gravitace.

Jako další argument někdy žáci říkají, že za beztízný stav na ISS může odstředivá síla, která vyrovná gravitaci, takže je tam nulová výsledná síla. Ovšem i pokud žáci ještě neznají Newtonovy zákony, dokážou odpovědět na položenou otázku, jak by se pohybovalo těleso, na které by nepůsobila žádná síla (pořád rovně, přímočarým pohybem). ISS se ale pohybuje dokola kolem Země, takže argument, že výsledná síla je nulová, je zjevně nesprávný (když situaci popisujeme „zvenku“, kdy vidíme, jak ISS Zemi obíhá⁴).

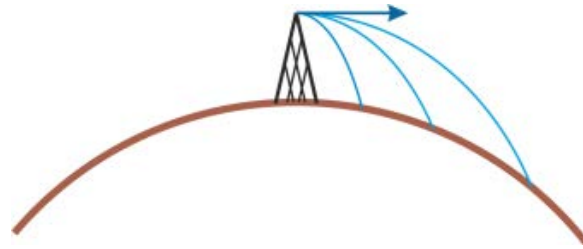
Vysvětlení doporučujeme začít tak, že učitel nakreslí Zemi (může použít obrázek, který už má na tabuli, nebo ji nakreslí znovu, menší), na které stojí vysoká věž.

U: Co by se stalo, kdyby někdo z věže vodorovným směrem hodil míč?

Z: Spadne na zem, kus od věže. (Učitel kreslí trajektorii padajícího míče.)

³ V angličtině se používá termín „zero gravity“.

⁴ Při popisu z hlediska rotující soustavy je argument s odstředivou silou správně – a lze tak například jednoduše vysvětlit, proč geostacionární družice z pohledu Země „visí“ stále nad stejným místem rovníku. Ovšem, jak už jsme uvedli, je lepší vše popisovat z hlediska inerciální soustavy a rotující soustavy sem neplést. (Pozn.: Proč nespádnou geostacionární družice, lze samozřejmě vysvětlit i z hlediska inerciálního systému: Geostacionární družice prostě obíhá právě takovou rychlostí, že jak se Země otáčí, zůstává pod družicí stále totéž místo na rovníku.)



Obr. 3 Hod z vysoké věže

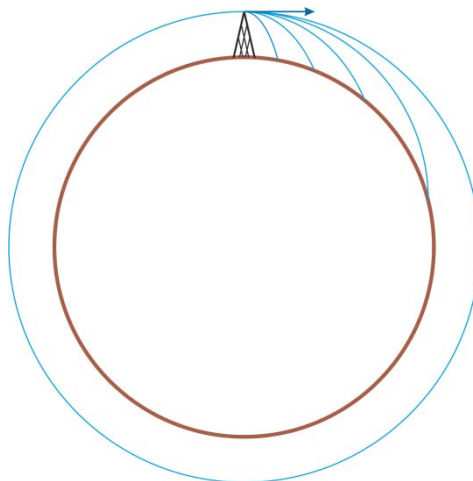
U: Co když ho hodíme větší rychlostí?

Z: Dopadne dál.

U: A když ještě větší rychlostí?

Z: Tak dopadne ještě dál.

U: Pokud bychom míč (nebo spíše jiné vhodné těleso) hodili ještě větší rychlostí (skoro 8 km/s), tak by sice pořád padalo, ale Země pod ním uhýbá, takže by se to těleso pohybovalo po kružnici kolem Země (viz Obr. 4). A přesně to se děje s ISS. Pořád padá k Zemi.



Obr. 4 Hod z vysoké věže, kruhový pohyb tělesa

Poznámka: Pokud učitel uzná za vhodné, může informaci o padání ISS doplnit ještě o další zajímavost. Stanice je sice hodně vysoko nad oblačností a hustými vrstvami atmosféry, přesto se i v této výšce dají zaznamenat pozůstatky atmosféry. Jedná se sice téměř o vakuum, ale těch pár molekul vzduchu stačí na to, aby stanici postupně zpomalovaly. A protože zpomalení by způsobilo i pokles dráhy, časem by ISS shořela v atmosféře. Z tohoto důvodu se proti tomuto přirozenému klesání používají urychlovací zážehy (angl. reboost) motorů připojených kosmických lodí. Korekce se provádějí jednou za několik týdnů a stanice je při nich vytažena o několik kilometrů výš [8]. Graf závislosti aktuální střední výšky ISS na čase je k dispozici na webu [9].

U: Chcete zažít beztlížný stav? Pokud ano, tak si stoupněte, udělejte dřep a vyskočte. Právě jste byli v beztlížném stavu (po celou dobu výskoku, kromě okamžiku odrazu a dopadu).

No a co se děje, když něco padá? Představte si, že budete držet v ruce aktovku a budete seskakovat ze židle. Budete během pádu cítit váhu aktovky? Padáte vy a stejně rychle vedle vás padá taška, tedy na vaši ruku taška nepůsobí. Pokud by taška visela na siloměru, bude současně padat vaše tělo, aktovka i siloměr, ten tedy nebude ukazovat nic.

Pojďme se podívat na video, které ukazuje totéž.

Učitel pustí video z cyklu Rande s fyzikou - Tíha a beztížný stav [10] (buď celé, ale stačí i část mezi časy 4:00 a 5:53). Připomene žákům situaci z reportáže na ISS, kdy si kosmonaut vedle sebe „odložil“ holicí strojek stejně jako dívka na trampolíně „odložila“ kladivo.

U: V beztížném stavu jsou lidé i při parabolickém letu letadla [11].

U: Takže už víme, že na mezinárodní vesmírné stanici je beztížný stav proto, že stanice a vše, co je v ní, neustále padá směrem k Zemi. A každý z nás beztížný stav může jednoduše zažít. Můžete se za domácí úkol zeptat rodičů, co si myslí o tom, proč se na ISS všechno vznáší a zkuste jim to vysvětlit, pokud to budou mít špatně.

V další vyučovací hodině se pak učitel zeptá žáků na jejich zážitky s domácí „výukou“ rodičů.

Poděkování

Realizace byla v roce 2022 podpořena MŠMT v rámci opatření na podporu studijních programů, zaměřených na přípravu budoucích učitelů na pedagogických i nepedagogických fakultách veřejných vysokých škol.

Literatura

[1] Schiehallion experiment, Wikipedia, the free encyclopedia. Dostupné online https://en.wikipedia.org/wiki/Schiehallion_experiment

[2] L. Dvořák: Gravitace: od starověku k obecné teorii relativity, prozatímní učební text. Dostupné online https://kdf.mff.cuni.cz/vyuka/FOS/FOS_02_Gravitace_ver01.pdf. Cavendishův pokus je tam popsán na s. 9-10.

[3] La caduta dei gravi - L'esperimento di Galileo. alfacen68. Youtube. Dostupné online https://www.youtube.com/watch?v=i-UCK6397_k

[4] The Hammer-Feather Drop in the world's biggest vacuum chamber. Human Universe – BBC. Dostupné online <https://thekidshouldseethis.com/post/the-hammer-feather-drop-in-the-worlds-biggest-vacuum-chamber>

[5] Hammer vs Feather - Physics on the Moon. AIRBOYD. Youtube. Dostupné online <https://www.youtube.com/watch?v=KDp1tiUsZw8>

[6] L. Dvořák: Jak věci padají (ve vzduchu). Sborník příspěvků z konference Veletrh nápadů učitelů fyziky 2022, UP v Olomouci 2022. Dostupné online https://vnuf.upol.cz/vnuf27_sbornik.pdf

[7] Inside the space station....Awesome !!!!! wingnutz27. Youtube. Dostupné online <https://www.youtube.com/watch?v=SmC2v4G5zq0>

[8] D. Majer: Cygnus poprvé v historii urychlil stanici ISS. Kosmonautix.cz. Dostupné online <https://kosmonautix.cz/2018/07/cygnus-poprve-v-historii-urychlil-stanici-iss/>

[9] Výška ISS. Heavens above. Dostupné online <https://www.heavens-above.com/IssHeight.aspx?lat=0&lng=0&loc=Unspecified&alt=0&tz=UCT>

[10] Tíha a beztížný stav. Rande s fyzikou. Dostupné online <https://www.ceskatelevize.cz/porady/10319921345-rande-s-fyzikou/211563230150006/>

[11] Minuta ve stavu beztíže. Časopis Vesmír. Youtube. Dostupné online https://www.youtube.com/watch?v=w4c_GHFy8k