

Kapitola 2

Einstein a jeho teorie

Účinky gravitace všichni dobře známe. Když upustíme nějaký předmět, spadne na zem. Do kopce se nám běží hůř než z kopce. Leč pro fyziky gravitace znamená mnohem víc než jen tyto každodenní záležitosti. Důležitost gravitace vzrůstá spolu s tím, jak uvažujeme o vyšších a vyšších strukturách. Gravitace drží Zemi na oběžné dráze kolem Slunce, Měsíc kolem Země a rovněž způsobuje příliv a odliv. Na astronomických měřítkách hraje gravitace prim. Takže chceme-li pochopit vesmír jako celek, musíme porozumět gravitaci.

Univerzální gravitace

Gravitace je jednou z fundamentálních přírodních sil. Představuje obecnou tendenci veškeré hmoty přitahovat ostatní hmotu. Ve skutečnosti existují čtyři fundamentální (základní) síly – krom gravitace to jsou elektromagnetická, silná a slabá jaderná síla. Univerzalita gravitace se ukazuje například v případě dvou nabitých těles. Existují dva druhy elektrického náboje, kladný a záporný. Zatímco elektrické síly mohou vést buďto k přitahování (mezi nesouhlasnými náboji), nebo k odpuzování (mezi souhlasnými náboji), gravitace je vždycky silou přitažlivou. Proto je pro kosmologii tak důležitá.

V mnoha ohledech je gravitace velmi slabou silou. Většina těles drží pohromadě díky elektrickým silám mezi

atomy, silám, které jsou o mnoho řádů silnější než příslušná gravitační síla. Ale bez ohledu na svou přirozenou slabost je gravitace v astronomické říši silou číslo jedna, protože tělesa na astronomických vzdálenostech, kromě několika vzácných výjimek, vždy obsahují stejné množství kladného a záporného náboje, takže na sebe nikdy nepůsobí silou elektrického charakteru.

Jedním z prvních skvělých úspěchů teoretické fyziky byla Newtonova teorie univerzální gravitace, která sjednotila to, co tehdy vypadalo jako mnoho různorodých fyzikálních jevů. Newtonova mechanika je zakódovaná do tří jednoduchých zákonů:

1. Každé těleso setrvává v klidu nebo rovnoměrném přímočarém pohybu, dokud není vnější silou, která na něj působí, přinuceno tento stav změnit.
2. Změna hybnosti je přímo úměrná působící síle a děje se v tom směru, ve kterém síla působí.
3. Ke každé akci existuje reakce.

Tyto tři pohybové zákony jsou obecné a platí stejně přesně jak pro chování kulečnickových koulí, tak i pro pohyb nebeských těles. Newton pouze musel přijít na to, jak gravitaci matematicky popsat. Uvědomil si, že na těleso, které se pohybuje po kružnici, jako Měsíc kolem Země, působí síla směřující do centra pohybu (stejně jako u závaží připevněného ke konci kusu řetězu omotaného kolem něčího krku). Newton zjistil, že tento pohyb může způsobovat gravitace, jež nutí padat i jablka ze stromů k zemi. V obou těchto případech síla směřuje do středu Země. Newton přišel na to, že správný tvar matematické rovnice popisující gravitační sílu je „zákon převrácených čtverců“: přitažlivá síla mezi jakýmikoliv dvěma tělesy závisí na součinu hmotnosti těchto těles a na čtverci (tj. druhé mocnině) vzdálenosti mezi nimi.

Triumfem Newtonovy teorie, založené na zákoně univerzální gravitace vyjádřené vztahem převrácených čtverců, bylo, že vysvětlila zákony pohybu planet, které vytvořil Johannes Kepler o více než století dříve. Úspěch to byl natolik velkolepý, že představa vesmíru řízeného Newtonovými pohybovými zákony se stala dominantou vědeckého myšlení na další více než dvě století. Až do té doby, než na scénu vstoupil Albert Einstein.

Einsteinova revoluce

Albert Einstein se narodil 14. března 1879 v německém městečku Ulm, ale s rodinou se brzy přestěhoval do Mnichova, kde strávil svá školní léta. Mladý Einstein nebyl nijak zvláště dobrý student a se školou zcela skončil, když se jeho rodina přestěhovala do Itálie. Poté, co jednou neprošel u přijímacích zkoušek, byl nakonec roku 1896 přijat do švýcarského Technologického institutu v Curychu. Třebaže v Curychu byl docela dobrým studentem, nepodařilo se mu najít žádnou akademickou práci na švýcarských univerzitách. Důvodem byla jeho pověst šileně líného člověka. Akademickou púdu tedy opustil a v roce 1902 začal pracovat na Patentovém úřadu v Bernu. Toto místo mu přineslo nejen slušný plat, ale – protože úkoly mladých patentových úředníků nebyly nikterak zvlášť obtížné – i spoustu volného času, který věnoval fyzice.

V roce 1905 Einstein publikoval speciální teorii relativity. Je považována za jeden z nejskvostnějších intelektuálních úspěchů v historii lidského myšlení. Celé je to o to pozoruhodnější, že Einstein v té době stále pracoval na pozici patentového úředníka a fyzika pro něj byla pouze náročným koníčkem. A co víc, on sám téhož roku také publikoval klíčové práce týkající se fotoelektrického jevu (který byl odrazovým můstkem pro vývoj kvantové mechaniky)

a Brownova pohybu (mihotání mikroskopických částic, které jsou popoháněny pohybem atomů). Ale důvodem, proč speciální teorie relativity ční nad tyto jeho vlastní práce a práce jeho kolegů v hlavním proudu fyziky, je, že Einstein zcela rozbořil představu času coby absolutní veličiny, času, který všem a všemu ubíhá stejně. Takováto představa je vetkána do newtonovského obrazu světa a drtivá většina z nás ji považuje za tak zřejmou, že stojí mimo jakékoliv dohady. Je třeba skutečného génia, aby koncepční bariéry takového významu padly.

S myšlenkou relativity nepřišel původně Einstein. Skoro o tři století dříve jako první její první principy vymezil Galileo. Tvrdil, že záleží pouze na relativním pohybu. Prohlašoval, že pokud budete na palubě lodi, která po klidném jezeře pluje stálou rychlostí, neexistuje žádný experiment, kterým byste se v kabině se zataženými okny mohli dozvědět o svém pohybu. Samozřejmě, v Galileových časech se toho o fyzice moc nevědělo, takže experimenty, o kterých mluvil, měly svá omezení.

Einsteinova verze principu relativity se jednoduše promítla do tvrzení, že všechny přírodní zákony musejí být naprosto stejné pro všechny pozorovatele, kteří se vůči sobě nacházejí v relativním pohybu. Einstein především usoudil, že tento princip musí platit i pro teorii elektromagnetismu zformulovanou Jamesem Clerkem Maxwellem. Tato teorie kromě jiného popisuje síly mezi nabitými tělesy, o nichž jsem se již zmiňoval dříve. Jeden z důsledků Maxwellovy teorie je, že rychlost světla se v rovnicích objevuje ve formě univerzální konstanty (obvykle označované symbolem „ c “). Pokud budeme princip relativity brát opravdu vážně, dojdeme k závěru, že všichni pozorovatelé musejí naměřit stejnou hodnotu c , a to bez ohledu na svůj vlastní pohybový stav. To sice vypadá samozřejmě, ovšem důsledky takového závěru jsou v pravdě revoluční.

Einstein se zabýval specifickými otázkami, jež se týkaly toho, co bychom pozorovali u určitých experimentů, při

kterých dochází k výměně světelných signálů. Einstein si liboval ve svých *gedanken* experimentech, myšlenkových pokusech. Kupříkladu si představte žárovku uprostřed vagónu jedoucího po trati. Na obou koncích vagónu jsou hodiny, takže když je žárovka osvětí, vidíme, kolik je hodin. Jakmile ze žárovky vyjde světlo, světelný signál se z hlediska pasažérů sedících ve voze dostane k oběma koncům vagónu současně. A ti na obou hodinách vidí tentýž čas.

Teď si představte, k čemu dochází z hlediska pozorovatele, který stojí v blízkosti kolejí, vzhledem k nimž je v klidu. Světelný záblesk se ve vztažné soustavě s ním spojené pohybuje stejnou rychlostí jako v soustavě spojené s pasažéry [Nezapomeňte, že toto tvrzení, totiž že světlo se v těch dvou vztažných soustavách (jedné spojené s pozorovatelem, který je vůči kolejím v klidu, a druhé spojené s jedoucím vlakem) pohybuje stejnou rychlostí, pochází z principu relativity, podle kterého je rychlost světla ve vakuu stálá, neměnná a nezávislá na pohybovém stavu pozorovatele.]. Z jeho pohledu se ovšem pasažéři v zadní části vozu pohybují směrem k záblesku, kdežto ti vepředu se od něj vlastně vzdalují. Tento vnější pozorovatel proto uvidí, že hodiny vzadu budou osvětleny dříve než hodiny v přední části. Ovšem když se hodiny vepředu rozsvítí, ukazují stejný čas jako hodiny vzadu! Zmatený pozorovatel dojde tedy k závěru, že s hodinami ve vlaku něco není v pořádku.

Tento příklad demonstruje, že pojem současnosti je relativní. Ve vztažné soustavě spojené s jedoucím vlakem oba paprsky dorazí k hodinám současně, ale v soustavě spojené s tratí dorazí oba v jiný okamžik. Další z příkladů podivných relativistických jevů je například dilatace času (pohybující se hodiny se zpomalují) a kontrakce délek (pohybující se pravítko je kratší). [Dilatace času se samozřejmě vztahuje vůči pozorovateli, vzhledem k němuž se hodiny pohybují. Pozorovatel pohybující se společně s hodinami nic zvláštního pozorovat nebude, pro něj budou hodiny tikat známým

tempem. To se týká i ostatních částí textu.] Tyto jevy jsou důsledkem předpokladu, že všichni pozorovatelé musejí naměřit stejnou rychlost světla. Ovšemže výše uvedené příklady jsou víceméně nerealistické. Aby se relativistické efekty ukázaly v plné kráse, příslušné rychlosti se musejí blížit rychlosti světla. A těch dozajista s osobními vlaky dosáhnout nemůžeme. Nicméně při nespočtu experimentů se prokázalo, že třeba taková dilatace času je skutečným jevem. Nestabilní částice, které se během krátké doby rozpadávají, žijí déle, pokud se pohybují vysokými rychlostmi, protože jejich vnitřní hodiny odtikávají čas pomaleji.

Teorie relativity zplodila rovněž onu nejznámější rovnici fyziky: $E = mc^2$. Ta vyjadřuje ekvivalenci hmoty a energie. Tato ekvivalence byla též experimentálně otestována; krom jiného stojí tento princip v pozadí jak atomových, tak i chemických bomb.

Ačkoliv speciální teorie relativity je bezesporu pozoruhodnou teorií, je neúplná, protože se zabývá tělesy, která se vzhledem k sobě pohybují výhradně konstantními rychlostmi. I první kapitola zákonů přírody napsaná Newtonem byla postavená na příčinách a následcích rychlostí, které se s časem mění. Druhý Newtonův zákon se týká změny hybnosti tělesa, což je laicky řečeno zrychlení. Speciální relativita je přitom omezena na takzvané inerciální pohyby, což jsou například pohyby částic, na které nepůsobí žádná vnější síla. Speciální relativita proto nemůže popsat žádné zrychlené pohyby a hlavně není s to se vypořádat s pohybem způsobeným gravitací.

Princip ekvivalence

Einsteinovi se posléze podařilo proniknout hluboko do problému, jak začlenit gravitaci do teorie relativity. Pro začátek uvažujme o Newtonově teorii gravitace. V této te-

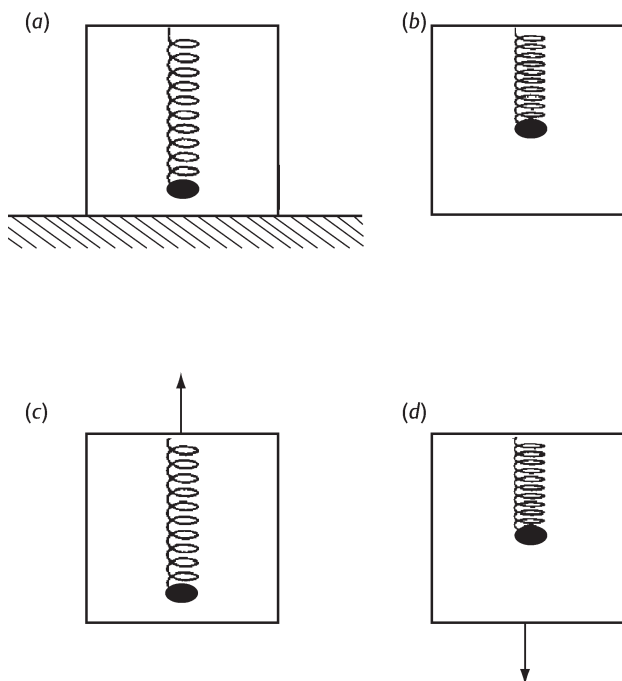
orii síla, kterou částice o hmotnosti M působí na částici o hmotnosti m , závisí na součinu těchto dvou hmotností a čtverci (druhé mocnině) vzdálenosti mezi nimi. Podle Newtonových pohybových zákonů se v důsledku této síly začne druhá částice pohybovat se zrychlením a plynoucím ze vztahu $F = ma$, kde F je působící síla. Hmotnost m se v tomto vztahu nazývá setrvačnou hmotností částice. Tato hmotnost určuje míru odporu částice ke změnám pohybu, ke zrychlení. Podle pravidla převrácených čtverců, které je součástí gravitačního zákona, je však hmotnost m mírou toho, jak částice reaguje na gravitační pole generované jinou částicí, a proto se nazývá pasivní gravitační hmotností. Newtonův třetí pohybový zákon ale také říká, že pokud těleso A působí silou na těleso B, potom těleso B působí stejnou silou v opačném směru na těleso A. To znamená, že hmotnost m musí být rovněž aktivní gravitační hmotností (pokud chcete, říkejte tomu gravitační náboj). V Newtonově teorii jsou všechny tyto tři hmotnosti – setrvačná, aktivní a pasivní gravitační hmotnost – ekvivalentní. Ale na první pohled neexistuje žádný důvod, proč by tomu tak mělo být. Mohly by snad být rozdílné?

Einstein usoudil, že tato totožnost musí být odrazem hlubšího principu, zvaného princip ekvivalence. Jeho vlastními slovy to znamená, že „všechny lokální volně padající laboratoře jsou ekvivalentní a lze v nich provést všechny fyzikální experimenty“. To v podstatě znamená, že člověk může gravitaci odstranit ze seznamu samostatných přírodních sil a na místo toho ji považovat za důsledek pohybu mezi zrychleně se pohybujícími vztažnými soustavami.

Abyste pochopili, jak je to možné, představte si výtah vybavený fyzikální laboratoří. Když je výtah v klidu v přízemí, experimenty odhalí přítomnost gravitace, která působí na cestující – například tak, že na strop výtahu připevníme pružinu a na ni zavěsíme závaží. Pod vlivem gravitace se pružina natáhne směrem k podlaze. Dále si představte, že

s výtahem vyjedeme do horního patra a poté jej necháme volně padat dolů. V padajícím výtahu pak nepostřehneme žádnou přítomnost gravitace. Pružina se nenatáhne, jelikož závaží vždy padá stejnou rychlostí jako zbytek kabiny, třebaže se rychlost výtahu může měnit. Tohle by se stalo i tehdy, kdybychom výtah vynesli do vesmírného prostoru, daleko od gravitačního pole Země. Nepřítomnost gravitace z tohoto důvodu vypadá jako stav volného pádu coby reakce na gravitační sílu. A co víc, představte si, že by náš výtah byl skutečně ve volném vesmírném prostoru (mimo dosah gravitace) a byla k němu připevněna raketa. Jakmile by raketa nastartovala, uvedla by výtah do zrychleného pohybu. Ve vesmíru sice není žádné nahoru nebo dolů, ale představte si, že raketa je k němu připevněna tak, že výtah bude zrychlovat ve směru stropu.

Co se stane s pružinou? Odpověď zní, že zrychlení způsobí, že závaží se bude pohybovat v opačném směru vzhledem k výtahu, čili pružina se natáhne směrem k podlaze. (Je to stejné jako v případě, když automobil prudce zrychlí – hlava řidiče a spolujezdců s sebou trhne směrem dozadu.) Ale to je totéž, k čemu došlo, když kabina výtahu byla v gravitačním poli Země, v poli, které tahalo závaží k podlaze. Pokud by výtah pokračoval ve zrychleném pohybu, pružina by zůstala natažená, jako by byla ve výtahu, který byl v klidu a nacházel se v gravitačním poli. Einstein došel k závěru, že nejenže tyto situace si jsou podobné, nýbrž jsou naprosto nerozlišitelné. Jakýkoliv experiment provedený ve zrychleně se pohybujícím výtahu ve volném kosmickém prostoru podá naprosto identické výsledky jako ten, který byl provedený v relativně klidném výtahu, na který působí gravitace. Abychom myšlenku dokončili, představte si, že výtah je umístěný do oblasti s gravitačním polem, ve kterém může volně padat. Vše uvnitř něj zažívá stav beztlíže a pružina se nenatáhne. Tento případ je ekvivalentní situaci, kdy výtah je v klidu a nepůsobí na něj žádné gravitační síly. Volně



Obr. 2. Myšlenkový experiment ilustrující princip ekvivalence. Závaží je připevněné k pružině, která je zavěšená na strop výtahu. (a) Výtah se nepohybuje, gravitační síla působí směrem dolů; pružina se pod tíhou závaží natáhne. (b) Výtah se nachází ve volném kosmickém prostoru mimo všech zdrojů gravitace a nepohybuje se zrychleně; pružina se neroztahuje. (c) Gravitační pole, jak bylo řečeno v případě (b), zde neexistuje, ale výtah se pohybuje zrychleně směrem vzhůru za pomoci rakety; pružina se roztáhla. Zrychlení v případě situace (c) vyvolá též efekt jako gravitační síla v situaci (a). (d) Kabina výtahu volně padá v gravitačním poli se zrychlením směřujícím dolů, takže nic a nikdo v kabině nemůže gravitaci pocítovat; pružina se nenatáhne, protože v tomto případě je závaží ve stavu beztíže. Situace je ekvivalentní případu (b).

padající pozorovatel může říct, že se nachází v inerciálním pohybu.

Obecná teorie relativity

V tu chvíli už Einstein věděl, jak zkonstruovat obecnou teorii relativity. Ale trvalo mu dalších 10 let, než ji přetvořil do finální podoby. Musel najít soubor zákonů, které by si poradily s jakoukoliv formou zrychleného pohybu a jakoukoliv podobou gravitačního efektu. K tomu musel studovat sofistikované matematické techniky, například tenzorovou analýzu a Riemannovu geometrii. Rovněž musel zavést dostatečně obecný formalismus schopný popsat všemožné pohybové stavy. To se mu nakonec podařilo, ale cesta k tomu samozřejmě nebyla jednoduchá. Zatímco jeho původní články z roku 1905 byly charakteristické brilantní jasností myšlenek a neobjevovalo se v nich přespříliš matematických výpočtů, pozdější práce překypují náročnými technickými prvky. Říká se, že Einstein vyrostl ve vědce, až když vyvíjel obecnou teorii relativity. Pokud tomu tak opravdu bylo, byl to pro něj zřejmě namáhavý proces.

Pochopit technickou stránku obecné teorie relativity je opravdu skličující úkol. I na koncepční úrovni je těžké této teorii porozumět. Relativita času zakomponovaná ve speciální teorii relativity je obsažena také v obecné teorii relativity, ale v důsledku přítomnosti gravitace se k ní připojují ještě další efekty, například dilatace času a kontrakce délek. A problémy nekončí s časem! Alespoň prostor se chová ve speciální relativitě normálně. V obecné teorii ale už ani tohle neplatí: prostor se zakřivuje.

Zakřivení prostoru

Představit si, že prostor se může zakřivovat, je natolik obtížné, že dokonce ani fyzikové se o něco podobného ve skutečnosti nepokoušejí. Naše chápání geometrických vlastností přírodního světa se zakládá na úspěších generací starořeckých matematiků, zejména na Eukleidových axiomech (dvě rovnoběžné přímky se nikdy neprotnou, součet úhlů trojúhelníku je 180° apod.) a Pythagorově větě. Všechna tato pravidla mají své místo v kánonu eukleidovské geometrie. Ale tyto zákony a teorémy nejsou jen abstraktní matematikou. Z každodenních zkušeností víme, že stejně tak popisují vlastnosti fyzikálního světa, a to velmi dobře. Eukleidovy zákony dennodenně používají architekti, zeměměřiči, konstruktéři i kartografové – ve skutečnost každý, kdo pracuje s tvary objektů a jejich umístěním v prostoru. Geometrie je skutečná.

Proto vypadá samozřejmě, že tyto vlastnosti prostoru, s nimiž jsme vyrůstali, by měly platit i za hranicemi našich budov a pozemků, které máme před očima. Měly by platit pro celý vesmír. Eukleidovy zákony musejí být vetkány do struktury světa. Nebo ne? Třebaže Eukleidovy zákony jsou matematicky elegantní a logicky přesvědčivé, nepředstavují jediný soubor pravidel, podle kterých lze sestavit geometrický systém. Matematici v devatenáctém století, jako třeba Gauss a Riemann, si uvědomili, že Eukleidovy zákony reprezentují pouze speciální případ geometrie v plochém prostoru. Mohou být zkonstruovány i odlišné systémy, v nichž tyto zákony neplatí.

Uvažte například trojúhelník nakreslený na plochém listu papíru. Zde platí Eukleidovy věty, takže součet vnitřních úhlů trojúhelníka musí být 180 stupňů. Ale nyní si představte, co se stane, když trojúhelník nakreslíme na povrch koule. Na povrch koule se trojúhelník s třemi pravými úhly dá nakreslit docela dobře. Například, vyznačte jeden bod na „severním

pólu“ a dva na „rovníku“ oddělené čtvrtinou obvodu. Tyto tři body po propojení tvoří trojúhelník se třemi pravými úhly, trojúhelník, který porušuje Eukleidovou geometrii.

O těchto problémech se nám dobře přemýšlí, dokud se pohybujeme na půdě dvojrozměrné geometrie. Náš vesmír má ale prostor se třemi dimenzemi. Představit si zakřivený trojrozměrný prostor je mnohem obtížnější. V každém případě je pravděpodobně chybou vůbec „o prostoru“ přemýšlet. Koneckonců člověk nemůže prostor měřit. Můžeme tak akorát měřit vzdálenosti v prostoru mezi tělesy v něm umístěnými, a to buď pravítkem, nebo – jak je tomu na astronomických měřítkách – světelnými paprsky. Když si představujeme prostor coby plochý nebo zakřivený papír, pěstujeme v sobě domnění, že prostor jako takový je něčím hmatatelným. Einstein se vždycky snažil oprostít od entit, jako je „prostor“, jehož existenční kategorie byla nejistá. [O problémech, zda prostor je „něčím“, nebo zda jde jen o jazyk k popsání toho, kde se věci nacházejí, se dlouhá staletí vedly spory. První přístup zastával např. Newton, kdežto druhý, relacionistický přístup byl obhajovaný Leibnizem. O těchto otázkách se leccos dozvíte v knize Briana Greena *Struktura vesmíru* (Paseka, 2006.)] Raději uvažoval o tom, co pozorovatel daným experimentem zjistí, než o tom, co by ve skutečnosti měl čekat, že zjistí.

Držme se tedy této linie a položme si otázku, po jaké dráze se pohybují světelné paprsky v obecné teorii relativity. V eukleidovské geometrii se světlo pohybuje po přímkách. Přímost trajektorie světla můžeme pokládat za totéž co plochost prostoru. Ve speciální teorii relativity se světlo vždy pohybuje po přímce a rovněž prostor je plochý. Ovšem uvědomte si, že obecná teorie relativity se zabývá zrychleným pohybem nebo pohybem v přítomnosti účinků gravitace. Co se v tom případě děje se světlem?

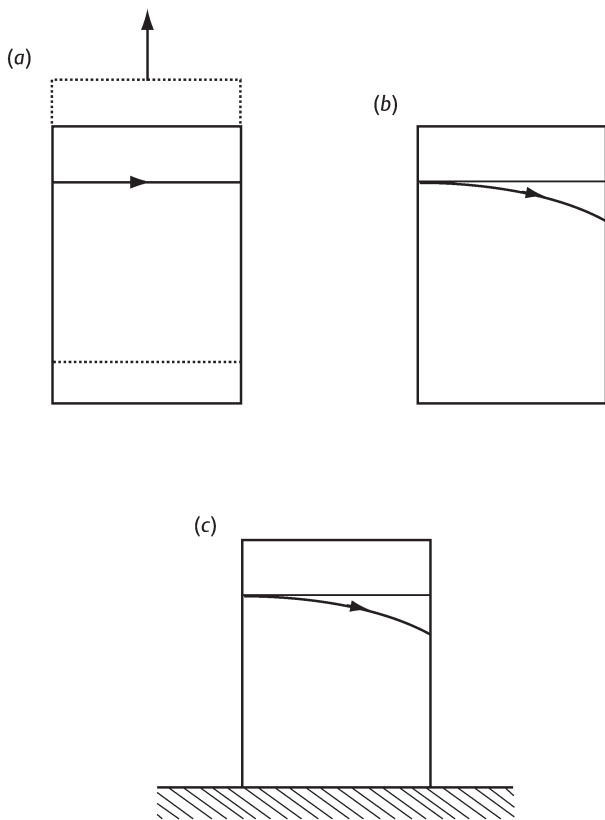
Vraťme se zpátky k myšlenkovému experimentu s kabinou výtahu. Namísto pružiny se závaží je na stěnu výtahu

přípevněn laser. Výtah se nachází v hlubokém vesmíru, daleko od jakýchkoliv gravitačních zdrojů. Jestliže se nepohybuje nebo se pohybuje konstantní rychlostí, laserový paprsek dopadne na stěnu na místo přesně naproti laseru. Tohle je předpověď speciální teorie relativity. Teď si ale představte, že k výtahu je přípevněna raketa, která nastartuje a výtahu udělí zrychlení směrem vzhůru. Vnější pozorovatel, který je v klidu, vidí, jak se od něj výtah pohybuje zrychleně, ale kdyby z vnější perspektivy mohl vidět i laserový paprsek, byl by podle něj pořád rovný. Na druhou stranu fyzik uvnitř výtahu si povšimne něčeho podivného. Za krátký čas, který světlo potřebuje k tomu, aby urazilo dráhu mezi dvěma stěnami, se pohybový stav výtahu změnil. Kabina se zrychlovala, takže ve chvíli, kdy světlo dopadá na stěnu, se pohybuje rychleji než v době, kdy paprsek opouštěl laser. To znamená, že bod, na který světlo dopadá, je trochu níž než startovní bod na druhé straně. Podle pohledu pozorovatele uvnitř zrychlení „ohnulo“ světelný paprsek směrem dolů.

Nyní si vzpomeňte na případ s pružinou a na princip ekvivalence. To, k čemu dochází, když není přítomen zrychlený pohyb, ale gravitační pole ano, je velmi podobné zrychleně se pohybujícímu výtahu. Představte si výtah stojící na povrchu Země. Světelný paprsek se musí chovat úplně stejně jako ve zrychleném výtahu: ohýbá se směrem dolů. Docházíme tak k závěru, že gravitace ohýbá světlo. A jestliže tedy dráhy světelných paprsků nejsou přímé, ale prohnuté, pak prostor není plochý, nýbrž zakřivený.

Jedním z důvodů, proč je těžké si představit a chápat zakřivený prostor, je, že normálně ve všedním životě nic takového nepozorujeme. To proto, že gravitace je za běžných okolností velmi slabá. Dokonce i na měřítku sluneční soustavy je gravitace natolik slabá, že zakřivení, které vyvolává, je nepatrné. Světlo se pohybuje po drahách tak velmi blízkých přímkám, že rozdíl od skutečné přímky není vůbec patrný. Newtonovy pohybové zákony jsou v těchto situacích velice

dobrym priblizhenim toho, co se doopravdy odehrava. Ovsem jsou i takova mista, kde musime byt pripraveni se vypořadat se silnou gravitaci a vsechny dusledky, které z toho plynou.

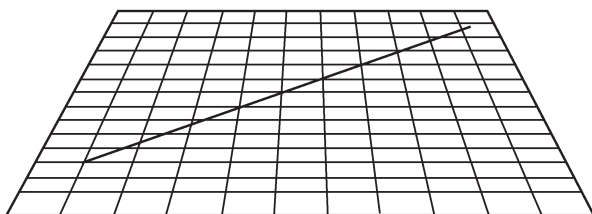


Obr. 3. Ohyb světla. (a) Výtah se pohybuje zrychleně směrem vzhůru jako na obrázku 2(c). Viděno z vnějšku, laserový paprsek letí po přímce. (b) Pohled zevnitř výtahu, světelný paprsek se zakřivuje dolů. Efekt ve stacionárním výtahu umístěném v gravitačním poli je týž, jak vidíme na obrázku (c).

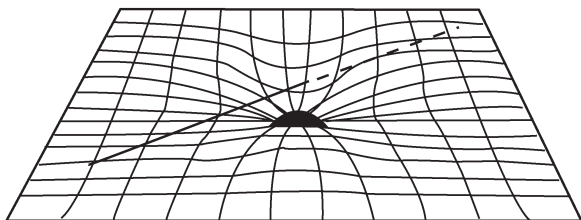
Černé díry a vesmír

Jedním z příkladů, kdy se Newtonova gravitace hroutí, je situace, kdy je velké množství hmoty koncentrováno do velmi malé oblasti prostoru. Gravitace je pak natolik silná a prostor tak zakřivený, že světlo se nejen ohne, ale v této oblasti prostoru doslova uvízne. Takovým objektem je černá díra.

(a)



(b)



Obr. 4. Zakřivení prostoru. Při nepřítomnosti zdroje gravitace se světlo pohybuje po přímce. Je-li do cesty světlu umístěn masivní objekt, deformace časoprostoru světlo ohne.

Nápad, že by něco jako černá díra mohlo existovat, se datuje už do roku 1783 a jeho autorem byl duchovní John Michell. [V těchto dobách se nepřemýšlelo nad geometrií časoprostoru či o gravitačně zhroucených objektech. John Michell hovořil o hvězdě, jejíž gravitace je natolik silná, že světlo, pokud se pohybuje konečnou rychlostí, nedokáže přemoci její gravitaci, nemůže dosáhnout únikové rychlosti, takže je na povrchu hvězdy lapeno, a my tudíž hvězdu nemůžeme pozorovat.] I Laplace se podobnou myšlenkou zabýval. Takovéto objekty ale nejčastěji spojujeme s Einsteinovou teorií relativity. Vskutku, jedno z vůbec prvních matematických řešení Einsteinových rovnic popisovalo přesně takovýto objekt. Proslulé „Schwarzschildovo řešení“ získal Karel Schwarzschild pouze rok po zveřejnění Einsteinovy obecné teorie relativity, čili roku 1916. Karel Schwarzschild zanedlouho poté padl na východní frontě. Jeho řešení se týká kulově symetrického rozložení hmoty a původně jím autor chtěl popsat základy matematického modelu stavby hvězd. Brzy si ale fyzikové uvědomili, že ze Schwarzschildova řešení plyne pro jakýkoliv hmotný objekt existence mezního poloměru (nyní nazývaného Schwarzschildův poloměr). Pokud hmotný objekt leží zcela pod svým Schwarzschildovým poloměrem, potom z povrchu takového tělesa nemůže světlo nikdy uniknout. Hodnota tohoto kritického poloměru pro Zemi je pouhý jeden centimetr, zatímco pro Slunce zhruba tři kilometry. Vznik černých děr je doprovázen stlačováním hmoty na neobyčejné hustoty. Od času první pionýrské Schwarzschildovy práce je výzkum černých děr velmi intenzivní. Třebaže pro jejich existenci v přírodě ještě neexistuje žádný opravdový přímý důkaz, vědci mají v rukávu nespočet nepřímých důkazů, podle kterých se černé díry ukrývají v řadě astronomických objektů. Silné gravitační pole kolem černé díry s hmotností asi jednoho sta milionů Sluncí je podle vědeckých teorií motorem zodpovědným za ohromnou svítivost určitého typu galaxií. Novější observač-

ní studie dynamiky hvězd, jež se nacházejí blízko center galaxií, ukazují na velice vysoké koncentrace hmoty, které obvykle dáváme do souvislosti s černými děrami o hmotnostech blízkých uvedené hodnotě. Mezi vědci dnes převládá názor, že skoro všechny galaxie mají ve svém jádře černou díru. Černé díry mnohem menších rozměrů pak vznikají na koncích života hvězd, kterým docházejí zásoby paliva a pod svou vlastní tíhou se do sebe hroutí.

O problematiku černých děr je v současné fyzice velký zájem, ale jelikož nejsou ústředním tématem kosmologie, nebudu se jim už v dalším textu věnovat. Raději se v příští kapitole soustředíme na roli Einsteinovy teorie v chápání chování vesmíru jako celku.