

# Gravitace

Lukáš Anderle, Alexei Andreev, Aleš Černý

Gravitace je jedna ze čtyř základních interakcí. Má však mezi nimi jisté význačné postavení: jako jediná není výběrová a působí na všechny objekty ve vesmíru. Je to nejuniverzálnější síla hýbající vesmírem. Jako první byla popsána fyzikální teorií, i když je to interakce ze všech nejslabší. Má však pouze přitažlivý charakter, a tak se působení všech částic sčítá a ve větších měřítkách hraje gravitace vysoce dominantní roli, která určuje strukturu vesmíru.

První opravdovou fyzikální teorií gravitace, která má matematickou podobu, umožňuje děláni předpovědí a je ji proto možno ověřit experimentem je Newtonův zákon všeobecné gravitace. Sir Isaac Newton vycházel jednak z experimentů, které prováděl Galileo Galilei. Ten sledoval volný pád, pohyb po nakloněné rovině a pohyb kyvadla a dokázal odvodit základní zákony těchto pohybů. Odvodil také tzv. Galileiho princip relativity. Dalším, kdo Newtona ovlivnil byl Johannes Kepler, který na základě pozorování Tycha Brahe formuloval své tři zákony o pohybu planet. Newton na základě těchto objevů vyřkl tři pohybové zákony a vytvořil známý zákon gravitace, který říká, že síla, kterou se dvě tělesa přitahují je přímoúměrná součinu hmotností obou těles a nepřímoúměrná druhé mocnině jejich vzdálenosti. Z tohoto zákona je potom možné vypočítat volný pád, šikmý vrh, pohyby planet, Měsíce nebo třeba gravitační působení galaxií. Keplerovy zákony jsou přímým důsledkem tohoto zákona, i když byly odvozeny samostatně a dříve z pozorování.

Newtonův zákon dokázal objasnit a předpovědět mnoho jevů a to s vysokou přesností. Na počátku dvacátého století už ale nebylo pochyb, že Newtonův zákon není úplně správný. Nevystupuje v něm čas, což znamená, že gravitační interakce se podle něho šíří nekonečnou rychlostí - změní-li nějaké těleso svou polohu, dozvědí se o tom všechna ostatní tělesa ve Vesmíru okamžitě! Newtonův zákon není relativistický - nepočítá s dilatací času, kontrakcí délek, nesplňuje Lorentzovu transformaci. Pracuje se silou, což je pojem, který se dá velmi těžko definovat. Kromě těchto vnitřních nesrovnalostí se objevil i problém v praktickém použití - šlo o stáčení perihelia planety Merkur. Jeho dráha totiž není uzavřená křivka. Jakoby se Merkur pohyboval po elipse, která se otáčí kolem Slunce. Většinu tohoto pohybu se podařilo vysvětlit jako působení okolních planet, ale zbyla malá část (asi 43" za sto let), která byla jakoby „navíc“.

V roce 1915 Albert Einstein dokončil novou teorii gravitace - obecnou teorii relativity. Tato teorie již je relativistická (dokonce narozdíl od speciální teorie relativity platí v jakémkoli vztažném systému), udává tedy maximální možnou rychlost šíření informace (rychlost světla) a navíc odstranila problém síly, protože gravitační působení vysvětluje křivostí prostoročasu a převádí otázku gravitační síly na geometrický problém. Proč zakřivený prostoročas? Již Galileo Galilei při pokusech s volným pádem přišel na to, že všechna tělesa padají z určité výšky stejnou dobu, nezávisle na jejich hmotnosti (to samozřejmě platí jen ve vakuu, jinak se projevuje odpor prostředí). To je důsledkem principu ekvivalence, který říká, že setrvačná a gravitační hmotnost tělesa si jsou úměrné a při vhodné volbě jednotek si jsou rovné. Gravitační a setrvačné jevy od sebe tedy nelze odlišit. Kdybychom letěli raketou, která by se pohybovala se stálým zrychlením, všechna tělesa uvnitř by měla tendenci pohybovat se směrem k podlaze a po dopadu by na ní zůstala, byla by k ní tlačena setrvačnou silou. Fyzik v takové raketě bez oken by potom žádným experimentem nemohl rozpoznat, jestli se nachází v gravitačním poli nebo v neinerciálním (zrychleném) systému. V důsledku tohoto principu ekvivalence se tedy různá tělesa budou v gravitačním poli pohybovat po stejných trajektoriích. To přivedlo Alberta Einsteina k myšlence, že křivost trajektorií je vlastností samotného prostoru a času. Tělesa svou přítomností zakřivují prostor i čas kolem sebe a v tomto zakřiveném prostoročase se pak pohybují po nejrovnějších možných drahách (geodetikách). Zakřivený trojrozměrný prostor si lze jen těžko představit. Pro ilustraci se často používá dvourozměrná plocha. Zakřivenou plochou může být třeba povrch koule. Geometrie na takové zakřivené ploše je pak zcela jiná, než jak ji známe. Původní, Eukleidovské geometrie platí jen v

plochem (nezakřiveném) prostoru. Součet úhlů v trojúhelníku nemusí být v zakřiveném prostoru roven  $180^\circ$ . Ukažme si to na naší kulové ploše, ještě lépe glóbu - dvě strany budou tvořeny severními polovinami dvou poledníků a třetí strana bude část rovníku mezi nimi. Takový trojúhelník má dva pravé úhly u své základny a libovolně velký úhel u vrcholu. (Jde o tzv. sférický trojúhelník.) Podobné jevy nás mohou potkat i zakřiveném prostoru - součet úhlů v trojúhelníku není  $180^\circ$ , obvod kruhu není  $2\pi r$ , čtyři kolmé přímky nevytvoří obdélník... Strávíme-li křivost prostoru, musíme se ještě zamyslet nad tím, co si představit pod zakřivením času. Znamená to vlastně, že v různých místech zakřiveného prostoročasu jdou hodiny různě rychle. Hodiny, které jsou dále od hmotného tělesa jdou rychleji, než hodiny, které jsou blíže k tělesu (jsou tedy v silnějším gravitačním poli - prostoročas kolem nich je více zakřiven). Důsledkem zakřivení prostoru dochází také ke stáčení perihelia planet, které se nejvíce projevuje u Merkuru, který je nejbližší Slunci a pohybuje se tedy v nejvíce zakřiveném prostoru.

Důsledky obecné teorie relativity jsou vskutku zajímavé: Albert Einstein přišel na to, že křivost prostoročasu svým pohybem nesledují pouze hmotná tělesa, ale třeba i světlo. Předpověděl, že světelný paprsek se v gravitačním poli ohýbá a navrhl také způsob ověření tohoto jevu. Světlo přicházející k nám ze vzdálených hvězd by se mohlo odklonit od původního směru o pozorovatelnou hodnotu, kdyby prošlo dostatečně blízko kolem Slunce. Hvězdy v blízkosti slunečního kotouče ale můžeme pozorovat pouze při zatmění Slunce. V roce 1919 se proto za zatměním Slunce vydala výprava sira Eddingtona, která opravdu naměřila odchylku, která se přibližně shodovala s odchylkou, kterou vypočítal Einstein. S tímto jevem souvisí i jev tzv. gravitační čočky - pokud se mezi námi a pozorovaným světelným zdrojem ve vesmíru nachází velmi hmotný objekt (např. galaxie), bude jeho gravitační pole zakřivovat světelné paprsky zdroje tak, jako velká čočka a my uvidíme zvětšený obraz zdroje (nebo spíše jako prstenec, protože přímému průchodu světla brání galaxie, která plní funkci čočky) - tak to tedy funguje pokud je zdroj, galaxie i pozorovatel na jedné přímce. Pravděpodobnost, že taková situace nastane je ale velmi malá, a tak Einstein vypočítal, co budeme pozorovat, když budou objekty mírně vyosené. Výsledkem mohou být dva cípy, čtyřnásobný obraz zdroje (Einsteinův kříž) nebo i vícenásobný obraz při větší výchylce. Takové útvary byly skutečně pozorovány. Závislost rychlosti chodu hodin na výšce nad povrchem Země byla také potvrzena experimentem, tedy hned několika, když experimentátoři porovnávali údaje naměřené hodinami na zemi s hodinami, které byly v letadle letícím kolem světa nebo v raketě, ve výšce deset tisíc kilometrů. Obecná teorie relativity také předpovídá existenci gravitačních vln, které je ale velmi těžké detekovat a na jejich konečné experimentální potvrzení se stále čeká. Asi nejzajímavějším a velmi populárním důsledkem obecné relativity jsou černé díry. Obecně jsou to objekty, které jsou tak hmotné, že úniková rychlost je u nich větší než rychlost světla - nic se tedy z černé díry nedostane, dokonce ani světlo. Jejich výskyt ve vesmíru může být poměrně hojný, protože černou dírou se může stát hvězda, jejíž hmotnost je tak velká, že po vyčerpání svého jaderného paliva nic nemůže zabránit jejímu gravitačnímu hroucení, takže se nakonec celá zhroutí do jediného bodu. Tento bod (singularita) je místem, kde je křivost prostoročasu nekonečná a až do jisté vzdálenosti (Schwarzschildův poloměr) od tohoto bodu je úniková rychlost větší než rychlost světla. Černou díru můžeme popsat jen třemi veličinami: hmotností, momentem hybnosti a elektrickým nábojem. Všechny ostatní informace o tělese, které se zhroutilo až na černou díru nebo o tělese, které do ní spadlo se ztrácí. Černé díry se staly inspirací pro mnoho spisovatelů sci-fi, ale ještě více pro mnoho fyziků. Černá díra totiž poskytuje velmi zajímavé „pracovní prostředí“.

V blízkosti singularit stejně jako ve velmi raném Vesmíru, těsně po Velkém třesku se musíme pohybovat ve velmi malých měřítkách a ve velmi silných gravitačních polích. Svět malých rozměrů popisuje kvantová teorie, která nedokáže popsat gravitaci, což ale nebylo dříve příliš na obtíž, protože gravitace je interakcí velmi slabou a za normálních okolností (soustava elementárních částic) ji lze zanedbat vzhledem k dalším, mnohonásobně silnějším interakcím (silná, elektromagnetická). Obecná relativita je použitelná pro silná gravitační pole, je to však klasická teorie - nekvantová. Vytvoření kvantové teorie gravitace se zatím nedaří. Pokus přímo kvantovat obecnou relativitu se nedaří - taková teorie není renormalizovatelná. Někteří fyzikové se snaží

zobecnit standardní model elementárních částic a získat tak finální, všesjednocující teorii všeho včetně gravitace. Vznikají tak různé teorie strun, které popisují elementární částice jako různé módy vibrace strun. To jsou jednorozměrné objekty, které jsou tím nejelementárnějším objektem vesmíru. Pozorujeme-li je jako různé částice, je to proto, že struny různě vibrují. Takové struny mohou být otevřené, uzavřené, mohou se spojovat nebo dělit, to vše v prostoru o jedenácti, šestnácti nebo třeba dvaceti šesti dimenzích, které teorie potřebují, aby dávaly správné výsledky. Více dimenzí není velký problém - to, že vnímáme pouze tři, vysvětlují teoretici tak, že zbylé dimenze jsou neuvěřitelně zakřivené a uzavírají se samy do sebe. Takové dimenze jsou potom prostě příliš úzké na to, aby jimi mohla pohybovat třeba částice.

Problém gravitace tedy není stále vyřešen. Newtonova teorie dává dostatečně přesné výsledky jen pro slabá gravitační pole, obecná teorie relativity se zase nedá použít na velmi malé vzdálenosti, kde se již projevují kvantové jevy a lepší teorii zatím nemáme. Strunné teorie jsou sice pěkné, ale nedávají jedinou ověřitelnou předpověď a k fyzikálním teoriím mají ještě daleko - zatím jsou pouze krásnou matematickou konstrukcí.

### **Literatura:**

Jiří Grygar - Vesmír, jaký je  
Stephen Hawking - Černé díry a budoucnost vesmíru  
Brian Greene - Elegantní vesmír  
+World Wide Web (informací je tam opravdu spousta)