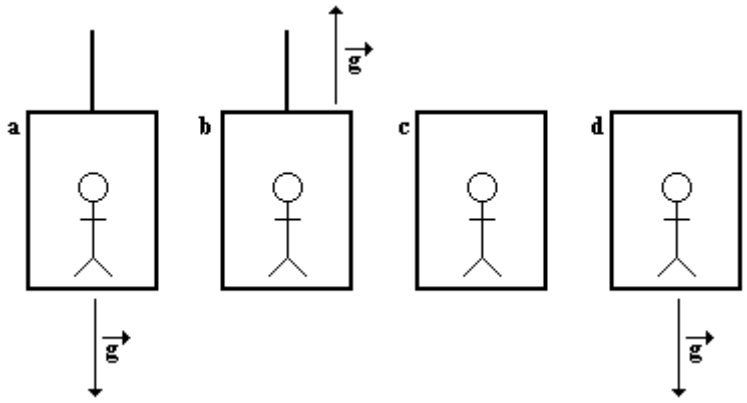
Princip ekvivalence

Obecná teorie relativity je teorií gravitace, proto bude užitečné gravitaci blíže prozkoumat a zjistit, jak souvisí s pohybem těles s nenulovým zrychlením (tj. se zrychleným pohybem).

Nejjednodušší pohyb, který má nenulové zrychlení, je volný pád.

Ten je pro nás zajímavý i dalšími svými vlastnostmi: jedná se pohyb se stálým zrychlením, tj. je to rovnoměrně zrychlený pohyb. Navíc v sobě „spojuje“ vlastnosti gravitačního pole a zrychleně se pohybujících těles.



Obr. 88

Na obr. 88 jsou znázorněny čtyři základní myšlenkové experimenty, které vedly Einsteina k výchozím principům obecné teorie relativity. Základem těchto myšlenkových experimentů je (Einsteinova) zdviž, v níž probíhají následující experimenty:

Experimenty probíhají prostě v běžném výtahu.

1. Zdviž je v klidu v gravitačním poli Země a ní probíhají mechanické experimenty (volný pád těles, vrhy těles, kmitání na pružině, ...), v nichž se projevuje **gravitační hmotnost těles**. Všechna tělesa ve zdviži se pohybují s gravitačním zrychlením $\vec{g}$ (viz obr. 88a).
2. Zdviž se nachází mimo gravitační pole a je tažena se zrychlením $\vec{g}$ ve směru vzhůru (viz obr. 88b). Fyzikální situace je naprosto totožná se situací na obr. 88a. Pokud není možné podívat se do okolí a zjistit, která ze dvou uvedených situací nastala, není možné uvedené situace rozlišit. Pro pozorovatele, který se nachází mimo zdviž, se projevuje **setrvačná hmotnost těles**.

V prvním experimentu jsou tělesa ve zdviži tažena směrem dolů určitou silou. V tomto případě to je gravitační síla. Ve druhém experimentu jsou tělesa ve zdviži také tažena směrem dolů určitou silou. To, že se v tomto případě jedná o setrvačnou sílu, ovšem pozorovatel uvnitř zdviže to nepozná - bude „cítit“ (stejně jako v prvním případě) sílu, která ho táhne směrem dolů. A bez toho, že by se podíval z okna zdviže, nepozná, jaká síla to je (gravitační síla nebo setrvačná síla) - proto jsou oba experimenty fyzikálně ekvivalentní.

3. Zdviž se nachází mimo gravitační pole a nepůsobí na ní žádné vnější síly (viz obr. 88c) - zdviž se nachází v beztížném stavu.

Nalézt místo ve vesmíru, které by bylo zcela mimo gravitační pole jakékoliv objektu ve vesmíru, není jednoduché - dosah gravitačních sil je totiž neomezený (nekonečný). Přesto je možné tohoto stavu docílit: buď být skutečně velmi daleko od všech zdrojů gravitačního pole (velikost síly je ve velké vzdálenosti již velmi malá, protože její hodnota klesá s druhou mocninou vzdálenosti od zdroje pole) a nebo docílit pohybu po kružnici. Bude-li se totiž pohybovat zdviž po kružnici

v gravitačním poli určitého tělesa, bude v ní také beztížný stav. Tento případ je ale pro popisovaný experiment nevhodný.

4. Zdviž padá volným pádem v gravitačním poli s gravitačním zrychlením $\vec{g}$ (viz obr. 88d) - zdviž se nachází opět v beztížném stavu (dynamickém). Opět bez pohledu do okolí není možné situaci na obr. 88c a obr. 88d rozlišit.

Ve všech popsaných experimentech je nutné předpokládat homogenní gravitační pole. V radiálním gravitačním poli by byla situace komplikovanější.

Na základě právě uvedených experimentů 1 a 2 Einstein usoudil, že gravitační hmotnost a setrvačná hmotnost jsou ekvivalentní. To znamená, že zrychlení udělené tělesu vlivem gravitačního pole nebo rovnoměrného zrychleného pohybu mají na těleso stejné účinky.

Gravitační hmotnost tělesa udává, jak se těleso „brání“ působení gravitační síly. Setrvačná hmotnost udává, jak se totéž těleso „brání“ působení síly, která ho uvádí do pohybu (a ruší tak stav jeho setrvačnosti v daném pohybovém stavu), tj. síla definovaná druhým Newtonovým zákonem.

Einstein usoudil, že případy 1 a 2 resp. 3 a 4 jsou fyzikálně ekvivalentní a to nejen pro mechanické děje, ale i pro děje nemechanické (tedy i pro elektromagnetické záření). Platí tedy tzv. slabý princip ekvivalence:

POHYB TĚLES V GRAVITAČNÍM POLI JE LOKÁLNĚ EKVIVALENTNÍ POHYBU V NEINERCIÁLNÍ SOUSTAVĚ BEZ GRAVITACE.

Slovo „lokálně“ souvisí s tím, že jsme se omezili na homogenní gravitační pole - tj. pole, jehož vektory gravitační intenzity jsou navzájem rovnoběžné a mají stejnou velikost. To globálně (obecně), tj. v radiálním gravitačním poli, neplatí.

Bude-li mít zdviž z obr. 88 v levé stěně okénko, dopadne světelný paprsek procházející tímto otvorem v případech 3 a 4 (které jsou pro pozorovatele uvnitř zdviže ekvivalentní) přesně naproti okénku (tj. do stejné výšky nad podlahou zdviže). Pro pozorovatele ve zdviži se světlo pohybuje po přímce.Vnější pozorovatel ale vidí, že v případě 4 zdviž padá a než paprsek dorazí k pravé stěně, urazí zdviž určitou vzdálenost směrem k Zemi. Přesto uvidí tento vnější pozorovatel dopad paprsku na pravou stěnu přesně proti otvoru v levé stěně. Vysvětlení tohoto jevu je na první pohled překvapující, ale přesto jediné možné: **světelný paprsek se v gravitačním poli zakřivuje**.

Zakřivení světelného paprsku je pozorovatelné pouze tehdy, pokud zdviž padá s velkým zrychlením (jinak se trajektorie světla nezakřiví tak výrazně). To znamená, že tento jev nastává pouze v silných gravitačních polích.

Fakt, že stejné závěry platí jak pro mechanické experimenty, tak pro expedienty z oblasti optiky, elektřiny a magnetismu a další oblastí fyziky, nám umožňuje vyslovit silný princip ekvivalence:

ENERGIE ELEKTROMAGNETICKÉHO POLE SE TAKÉ PROJEVUJE JAKO SETRVAČNÁ HMOTNOST. I TATO HMOTNOST MÁ SVÉ GRAVITAČNÍ ÚČINKY.

Na základě Einsteinova vztahu mezi hmotností a energií se tedy každá energie projevuje jako setrvačná hmotnost, která má (podle principu ekvivalence) také gravitační účinky.

Gravitační interakce je studována takto detailněji proto, že na rozdíl od všech ostatních silových interakcí má některé vlastnosti, které zatím nejsou uspokojivě vysvětleny: nebyla zatím objeveny částice, která tuto interakci zprostředkovává, gravitaci jako jedinou z interakcí nelze žádným způsobem odstínit, ...

© Encyklopedie Fyziky (http://fyzika.jreichl.com); Jaroslav Reichl, Martin Všetička
Licence http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/ zakazuje úpravy a komerční distribuci.