

# O bezváhovom stave

čo je vlastne hmotnosť



# veselá príhoda na úvod

niekedy v roku 2010 ma požiadali, aby som pre Detskú Univerzitu Komenského pripravil hodinovú prednášku na tému: Prečo je vo vesmíre bezváhový stav?

DUK som sa dovtedy radšej vyhýbal, pretože sú to na fyziku príliš malé deti

ale teraz som sa potešil, lebo som vedel, že takáto prednáška sa dá pripraviť ľahko

môj prvý slide vyzeral takto →





# veselá časť veselej príhody

môj druhý slide vyzeral takto →

a kým som sa klaňal a oni tleskali,  
na plátne sa prehrávalo toto krátke  
video zo Space Shuttle →

v zvyšnom čase som sa im pokúsil  
vysvetliť, prečo vo vesmíre nie je  
bezváhový stav (pri rozumnej definícii  
slova váha) a čo sme to vlastne videli,  
ak tam nie je bezváhový stav

**Vo vesmíre nie je  
bezváhový stav.**



Ďakujem Vám za pozornosť.



# gravitačná sila je všade

- ❖ pod váhou bežne rozumieme gravitačnú silu pôsobiacu na teleso
- ❖ gravitačná sila  $\vec{F} = -\kappa \frac{M \cdot m}{r^2} \frac{\vec{r}}{r}$  má nekonečný dosah
- ❖ nech sme akokoľvek ďaleko, nikdy nie je nulová  
(preto nikde nie je bezváhový stav v zmysle nulovej gravitácie)
- ❖ dostatočne ďaleko môže byť gravitačná sila zanedbateľná,  
ale to určite nie je prípad z videa na predchádzajúcom slide
- ❖ tak čo sme to tam videli?



# ak nie bezváhový stav, tak čo to je?

- ❖ je to pohyb všetkých vecí v satelite s (prakticky) rovnakým zrýchlením
- ❖ v pohybovej rovnici  $\cancel{m} \ddot{\vec{r}} = - \cancel{K} \frac{M}{r^2} \frac{\vec{r}}{r}$  sa hmotnosť  $m$  vždy vykrátí
- ❖ keďže polohové vektory (vzhľadom k stredu Zeme) satelitu a telies v ňom sú prakticky rovnaké, všetci majú prakticky rovnaké zrýchlenie
- ❖ to ale znamená, že vzájomné zrýchlenia satelitu a telies sú nulové a ak sú ich vzájomné zrýchlenia nulové, vyzerá to ako bezváhový stav



# smutný prípad padajúceho vytáhu

- ❖ analogická vec sa deje v prípade voľne padajúceho vytáhu
- ❖ v pohybovej rovnici  $\cancel{m}\ddot{z} = -\cancel{m}g$  sa hmotnosť  $m$  vždy vykrátí
- ❖ to znamená, že vytáh aj človek v ňom padajú s rovnakým zrýchlením  $g = \kappa M/R^2$  čo zas znamená, že ich vzájomné zrýchlenie je nulové
- ❖ ak sú vzájomné zrýchlenia telies nulové, vyzerá to ako bezváhový stav



odtiaľto až do konca je to nepovinná prednáška

# prečo sa hmotnosti vykrátili?

- ❖ videli sme, že (zdanlivo) bezváhový stav je dôsledkom vykrátenia hmotností v pohybovej rovnici s grav. silou
- ❖ ale prečo sa tie hmotnosti tak jednoducho vykrátili?
- ❖ čo je to za otázku? (sú rovnaké, tak sa vykrátili)
- ❖ je to veľmi hlboká otázka s veľmi hlbokou odpoveďou
- ❖ fyzika má v sebe väčšie hĺbky, než vidno na prvý pohľad oplatí sa ich vidieť, aj keď to nie je celkom zadarmo



# čo je vlastne hmotnosť?

- ❖ všetci vieme, ako hmotnosť meriame (tak ako v zelovoci alebo mäsiarstve)
- ❖ ale čo to je? čo to vlastne meriame?
- ❖ odpoveď úzko súvisí práve s tým meraním, pričom primárne je meranie, veličina je odvodená z merania





# zákon rovnoramenných váh

❖ vlastnosť nášho sveta (sformulovaná bez pojmu hmotnosť)

❖ ak **A** je v rovnováhe s **B** a **B** je v rovnováhe s **C**  
potom **A** je v rovnováhe s **C**



❖ na základe tohto zákona môžeme zaviesť hmotnosť takto:  
závažie hmotnosti  $e$  = čokoľvek v rovnováhe s etalónom  $e$   
**A** má hmotnosť  $m$  v jednotkách  $e$ , ak je v rovnováhe s  $m e$

❖ a teraz môžeme sformulovať uvedenú vlastnosť sveta takto:  
telesá sú v rovnováhe práve vtedy, keď majú rovnakú hmotnosť



# súvis zákona a veličiny

- ❖ všimnime si, ako tu (a je to tak aj v iných prípadoch) súvisí prírodný zákon a fyzikálna veličina
- ❖ prírodný zákon sa dá sformulovať bez tej veličiny
- ❖ veličina sa rozumne definuje pomocou toho zákona
- ❖ zákon sa elegantne sformuluje pomocou tej veličiny



# tri zákony a záhada hmotnosti

- ❖ pozrime sa teraz, ako vystupuje hmotnosť v troch dôležitých fyzikálnych zákonoch

- ❖ Newtonov zákon sily

$$\vec{F} = m \cdot \vec{a}$$

- ❖ Newtonov gravitačný zákon

$$\vec{F} = -\kappa \frac{M m}{r^2} \frac{\vec{r}}{r}$$

- ❖ Coulombov zákon

$$\vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{Q q}{r^2} \frac{\vec{r}}{r}$$



$$\vec{F} = m \cdot \vec{a}$$

*prečo je tam to isté  $m$ ?*

*$m$  a  $q$  spolu nesúvisia*



$$\vec{F} = -\kappa \frac{M m}{r^2} \frac{\vec{r}}{r}$$

*$m$  a  $q$  spolu nijako nesúvisia*

$$\vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{Q q}{r^2} \frac{\vec{r}}{r}$$



# prečo je tam to isté $m$ ?

- ❖ to  $q$  v Coulombovom zákone nazývame elektrický náboj
- ❖ to  $m$  v gravitačnom zákone nazývame gravitačná hmotnosť (aj keď rovnako prirodzený termín by bol gravitačný náboj)
- ❖ to  $m$  v zákone sily voláme zotrvačná hmotnosť
- ❖ prečo sa gravitačná hmotnosť rovná zotrvačnej hmotnosti?



# Newton

- ❖ je to proste experimentálny fakt
- ❖ z hľadiska klasickej mechaniky ide o náhodný fakt: dve veličiny, ktoré nemajú v princípe nič spoločné, sa úplne presne rovnajú
- ❖ pre tento fakt nemá Newtonova mechanika nijaké vysvetlenie, len ho jednoducho berie do úvahy
- ❖ ako vyzerajú tie experimenty?
- ❖ napríklad voľný pád: rovnaké gravitačné zrýchlenie pre všetky telesá znamená, že hmotnosti sa v pohybovej rovnici vykrátia
- ❖ presnejšie merania gravitačného zrýchlenia: kyvadlo (Newton), torzné kyvadlo (Eötvös)



# Einstein

- ❖ neexistujú nijaké dve hmotnosti
- ❖ zotrvačná a gravitačná hmotnosť je jedno a to isté (tomto tvrdeniu sa hovorí princíp ekvivalencie)
- ❖ glücklichste Gedanke meines Lebens: “pre človeka padajúceho zo strechy neexistuje nijaké gravitačné pole” (to je ten bezváhový stav vo výťahu, spomínaný na začiatku prednášky)
- ❖ všeobecná teória relativity:
- ❖ neexistuje nijaká gravitačná sila, gravitácia je v skutočnosti iba prejavom zotrvačnosti
- ❖ to, čo sa nám javí ako pôsobenie gravitačnej sily, je v skutočnosti len prejav voľného pohybu, lenže v časopriestore zakrivenom v súlade s Einsteinovými rovnicami



# teória relativity

## ❖ špeciálna teória relativity

- ❖ kľúčový experimentálny fakt: rýchlosť svetla je úplne rovnaká pre všetkých pozorovateľov
- ❖ kľúčový dôsledok: mnohé iné veci (napr. výsledky meraní času alebo dĺžky) sú pre rôzne pre navzájom sa pohybujúcich pozorovateľov

## ❖ všeobecná teória relativity

- ❖ kľúčové experimentálne fakty: konštantná rýchlosť svetla (ŠTR) plus princíp ekvivalencie
- ❖ kľúčový dôsledok elementárny: spomalenie času v gravitačnom poli kľúčový dôsledok zložitejší: zakrivenie celého časopriestoru



# upútavka na záver

- ❖ otázka čo je vlastne hmotnosť nás priviedla až k teórii relativity, a to dokonca nielen k jednoduchšej špeciálnej, ale k zložitejšej všeobecnej teórii relativity
- ❖ asi by sme teda mali niečo povedať aj o teórii relativity
- ❖ tak si teda o nej niečo málo povieme, ale ešte predtým sa pozrieme na tzv. inerciálne a neinerciálne vzťažné sústavy (patrí to presne sem a hodí sa to aj k teórii relativity)