

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



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 výtahu

- ❖ analogická vec sa deje v prípade voľne padajúceho výtahu
- ❖ v pohybovej rovnici $\cancel{m}\ddot{z} = -\cancel{m}g$ sa hmotnosť m vždy vykrátí
- ❖ to znamená, že výtah 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 (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 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

čo je vlastne čas?

- ❖ zo všetkých efektov špeciálnej teórie relativity si niečo málo povieme len o takzvanom spomaľovaní času
- ❖ ďalší príklad toho, že niekedy sa oplatí dosť podrobne preskúmať zdanlivo evidentné veci (tak ako hmotnosť)
- ❖ všetci vieme ako čas subjektívne prežívame aj ako ho objektívne meriame
- ❖ ale ako môže objektívne meraný čas bežať raz rýchlejšie a inokedy pomalšie?



vnímanie a meranie času

- ❖ subjektívne vnímame čas pamäťou
- ❖ ak si pamätám seba dnes ráno, a pritom si pamätám, že som si už vtedy pamätal posledné Vianoce, tak to interpretujem, že tie Vianoce boli skôr ako dnešné ráno
- ❖ takto nejako môže vzniknúť v našej pamäti subjektívny pocit časového zoradenia udalostí
- ❖ objektívne meriame čas hodinkami
- ❖ hodinky sú ľubovoľný periodický dej (rok, deň, kyvadlo, pružina), počítame počet periód a ten chápeme ako odmeraný čas
- ❖ vlastnosť tohto sveta: je len jeden objektívny čas, t.j. rôzne naozaj periodické deje nemenia svoje tempo jeden vzhľadom na druhý

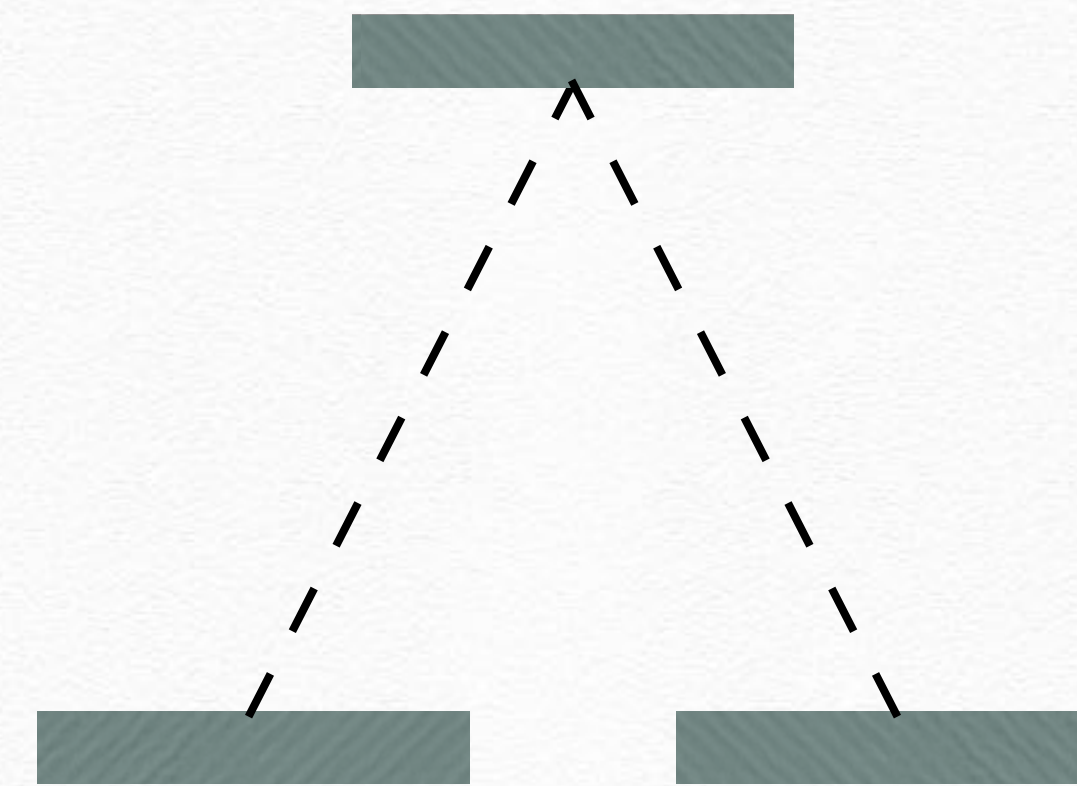
Einstein a objektívny čas

- ❖ Einstein: dve dôležité vlastnosti tohto sveta (rovnaká rýchlosť svetla pre všetkých pozorovateľov a rovnaký čas pre všetkých pozorovateľov) nemôžu platiť spolu
- ❖ ukážeme, že ak je rýchlosť svetla naozaj rovnaká pre všetkých pozorovateľov, potom pohybujúce sa hodinky merajú iný čas ako nepohybujúce sa hodinky
- ❖ ak pre navzájom nepohybujúce sa hodinky pritom stále platí, že idú rovnakým tempom, potom relativnosť sa netýka len tempa pohybujúcich sa hodínok, ale samotného času (čiže objektívny čas je relatívny)

Einsteinove svetelné hodinky

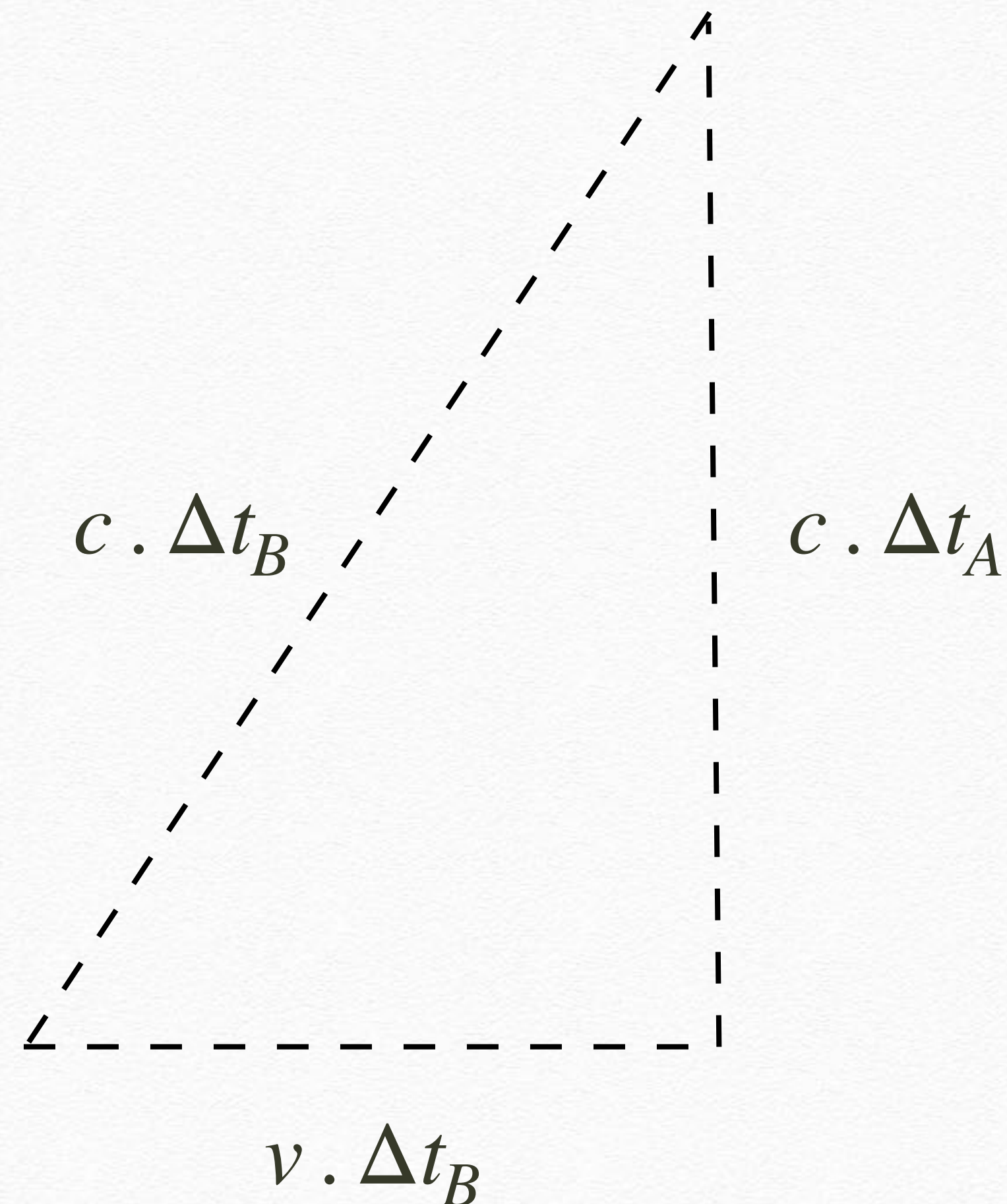


- ❖ svetelný lúč sa odráža hore-dole od dvoch zrkadiel (akože)
- ❖ pozorovateľ A, vzhľadom ku ktorému hodinky stoja, počíta počet periód a takto meria svoj objektívny čas



- ❖ pre pozorovateľa B, vzhľadom ku ktorému sa hodinky pohybujú, prejde svetlo dlhšiu dráhu, než akú videl prvý pozorovateľ
- ❖ ak je rýchlosť svetla rovnaká, musí to trvať dlhší čas (pohybujúce sa hodinky tikajú pre B pomalšie ako jeho stojace hodinky)

koľkokrát pomalšie?



❖ Pytagorova veta:

$$(c \cdot \Delta t_A)^2 + (v \cdot \Delta t_B)^2 = (c \cdot \Delta t_B)^2$$

❖ elementárna úprava:

$$\Delta t_A = \Delta t_B \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

❖ toto je vzorček pre dilatáciu času

spomalenie času v gravitačnom poli

- ❖ jedným zo základných výsledkov ŠTR je spomalenie času meranom hodinami, ktoré sa vzhľadom k nám pohybujú rovnomerne priamočiara (práve to sme si teraz odvodili, aspoň náznakom)
- ❖ tento výsledok sa dá v ŠTR dosť ľahko rozšíriť aj na hodiny pohybujúce sa so zrýchlením (nie príliš veľkým)
- ❖ to sa dá pomocou princípu ekvivalencie preložiť do spomaľovania času, ktorý meriame hodinami v gravitačnom poli (nie príliš intenzívnym)
- ❖ dôležitá praktická aplikácia: GPS
- ❖ v satelitoch GPS má na rýchlosť chodu hodín vplyv ich pohyb vzhľadom k Zemi aj gravitačné pole (ktoré je slabšie ako na povrchu Zeme)
- ❖ hodiny v satelitoch GPS idú rýchlejšie ako na povrchu Zeme (38 μ s za deň)
- ❖ za ten čas prejde svetlo zhruba 1 km
- ❖ bez korekcií na spomaľovanie času by GPS už po jednom dni malo také chyby

tip na záver

- ❖ spomalenie času v silných gravitačných poliach (napríklad pri čiernej diere) opisuje až VTR
- ❖ často sa vyskytuje v sci-fi, napríklad v známom filme *Interstellar*
- ❖ film nie je bohviečo, ale autor námetu a nositeľ Noelovej ceny Kip Thorne k nemu dodatočne napísal vynikajúcu populárno-vedeckú knihu
- ❖ rozhovor s Kipom Thornom [tu](#)

