

Pár slov o teórii relativity

čo je vlastne čas (a priestor)

prečo práve teraz?

- ❖ inerciálne a neinerciálne vzťažné sústavy veľmi úzko súvisia so špeciálnou a všeobecnou teóriou relativity
- ❖ takže možno stojí za to urobiť si krátku odbočku a povedať si niečo o teórii relativity
- ❖ bude to ale len extrémne kratučký úvod, v ktorom iba načrtneme niekoľko zaujímavých vecí
- ❖ na naozajstnejšie porozumenie treba oveľa viac času

Albert Einstein (1879-1955)

Najväčšia vedecká celebrita všetkých čias (celkom zaslúžene). V roku 1905 (26-ročný) napísal štyri články, z ktorých každý by si zaslúžil Nobelovu cenu. Prvý znamenal zásadný krok ku kvantovej fyzike, druhý umožnil jasne dokázať existenciu atómov, v treťom sformuloval (špeciálnu) teóriu relativity, vo štvrtom našiel vzťah $E = mc^2$, ktorý je základom využitia jadrovej energie. V roku 1915 sformuloval všeobecnú teóriu relativity.



špeciálna teória relativity

- ❖ stojí na dvoch základných postulátoch:

princíp relativity
princíp rovnakej rýchlosti svetla

- ❖ zo spojenia týchto dvoch princípov vyplýva niekoľko mimoriadne prekvapujúcich vecí:

relatívnosť súčasnosti
spomalovanie pohybujúcich sa hodín
skracovanie pohybujúcich sa tyčí

3. Zur Elektrodynamik bewegter Körper; von A. Einstein.

Daß die Elektrodynamik Maxwells — wie dieselbe gegenwärtig aufgefaßt zu werden pflegt — in ihrer Anwendung auf bewegte Körper zu Asymmetrien führt, welche den Phänomenen nicht anzuhaften scheinen; ist bekannt. Man denke z. B. an die elektrodynamische Wechselwirkung zwischen einem Magneten und einem Leiter. Das beobachtbare Phänomen hängt hier nur ab von der Relativbewegung von Leiter und Magnet, während nach der üblichen Auffassung die beiden Fälle, daß der eine oder der andere dieser Körper der bewegte sei, streng voneinander zu trennen sind. Bewegt sich nämlich der Magnet und ruht der Leiter, so entsteht in der Umgebung des Magneten ein elektrisches Feld von gewissem Energiewerte, welches an den Orten, wo sich Teile des Leiters befinden, einen Strom erzeugt. Ruht aber der Magnet und bewegt sich der Leiter, so entsteht in der Umgebung des Magneten kein elektrisches Feld, dagegen im Leiter eine elektromotorische Kraft, welcher an sich keine Energie entspricht, die aber — Gleichheit der Relativbewegung bei den beiden ins Auge gefaßten Fällen vorausgesetzt — zu elektrischen Strömen von derselben Größe und demselben Verlaufe Veranlassung gibt, wie im ersten Falle die elektrischen Kräfte.

Beispiele ähnlicher Art, sowie die mißlungenen Versuche, eine Bewegung der Erde relativ zum „Lichtmedium“ zu konstatieren, führen zu der Vermutung, daß dem Begriffe der absoluten Ruhe nicht nur in der Mechanik, sondern auch in der Elektrodynamik keine Eigenschaften der Erscheinungen entsprechen, sondern daß vielmehr für alle Koordinatensysteme, für welche die mechanischen Gleichungen gelten, auch die gleichen elektrodynamischen und optischen Gesetze gelten, wie dies für die Größen erster Ordnung bereits erwiesen ist. Wir wollen diese Vermutung (deren Inhalt im folgenden „Prinzip der Relativität“ genannt werden wird) zur Voraussetzung erheben und außerdem die mit ihm nur scheinbar unverträgliche

princíp relativity

- ❖ fyzika po rozlúčke s absolútnym priestorom:
- ❖ namiesto absolútneho priestoru máme nekonečne veľa rovnocenných inerciálnych vzťažných sústav
- ❖ mechanika je vo všetkých tých sústavách rovnaká
- ❖ prečo len mechanika, prečo nie celá fyzika?
- ❖ Einsteinov princíp relativity:

celá fyzika je vo všetkých inerciálnych vzťažných sústavách rovnaká



V hlbokom zármutku oznamujeme všetkým príbuzným, priateľom a známym, že nás navždy opustil zdanlivo nevyhnutný, ale v skutočnosti úplne zbytočný

Absolútny Priestor

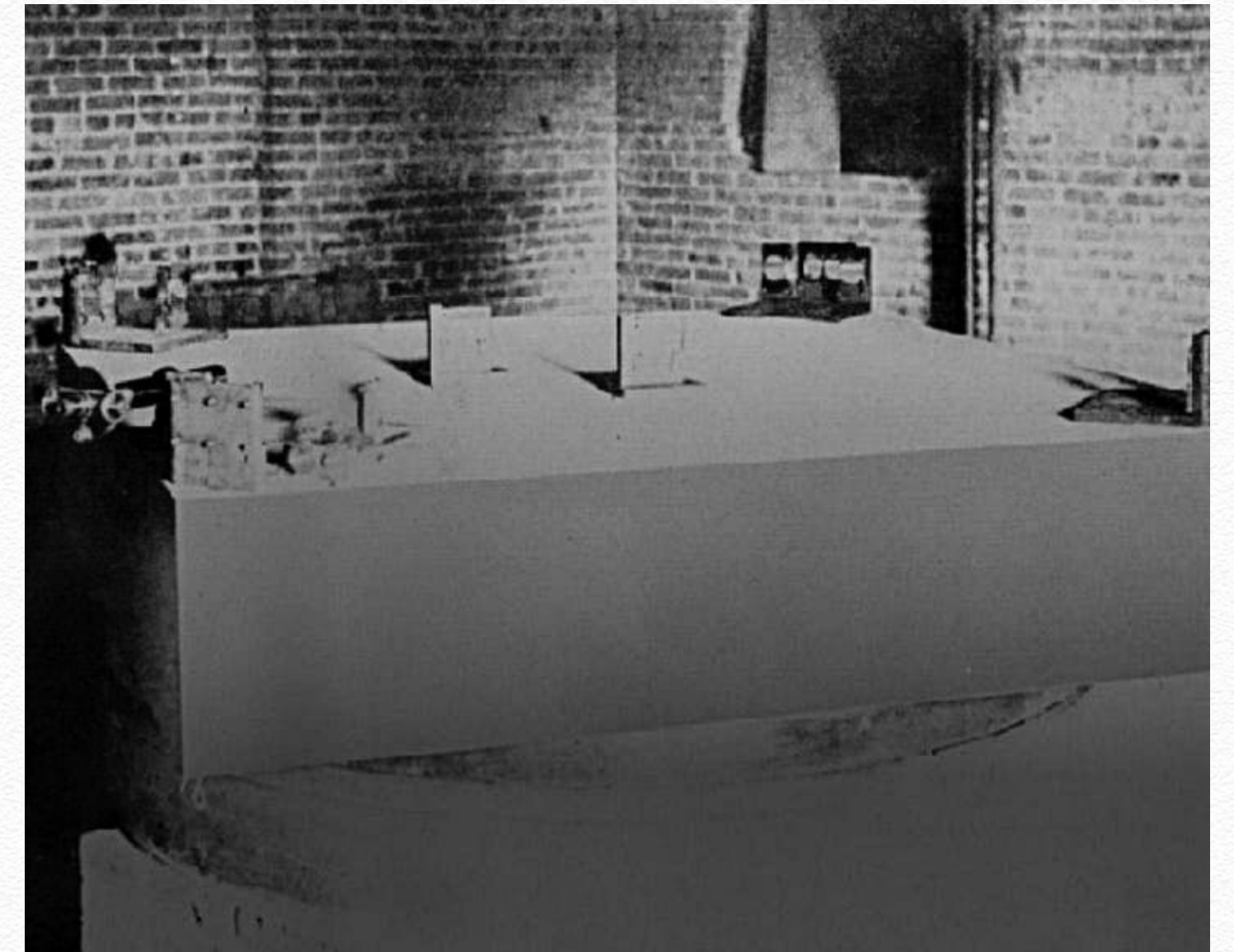
Jeho úlohu odteraz v plnej miere preberá ľubovoľná inerciálna vzťažná sústava.

Česť jeho pamiatke.

princíp rovnakej rýchlosti svetla

- ❖ vyplýva z Maxwellových rovníc a z princípu relativity (ale my prváci tie rovnice ešte nepoznáme)
- ❖ vyplýva aj z výsledkov istých optických experimentov (ale optiku sme my prváci ešte nemali)
- ❖ takže pre nás to proste bude akási zjavená pravda (je to od Einsteina, tak tomu celkom radi uveríme)

rýchlosť svetla je vo všetkých inerciálnych vzťažných sústavách rovnaká a nezávisí od rýchlosti zdroja ani od rýchlosti prijímača



Michelsonov a Morleyho interferometer, ktorý ukázal, že rýchlosť svetla je pre všetkých pozorovateľov rovnaká

! pozor !

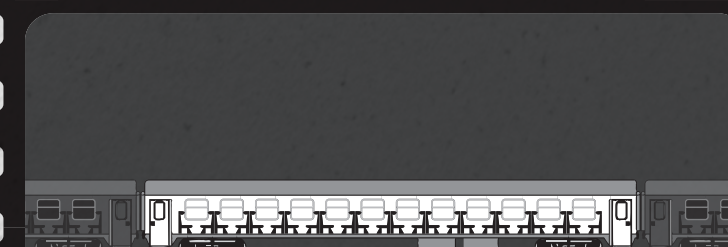
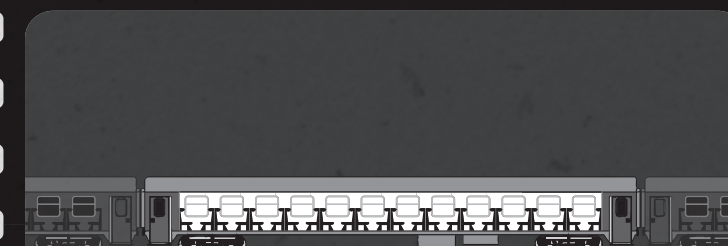
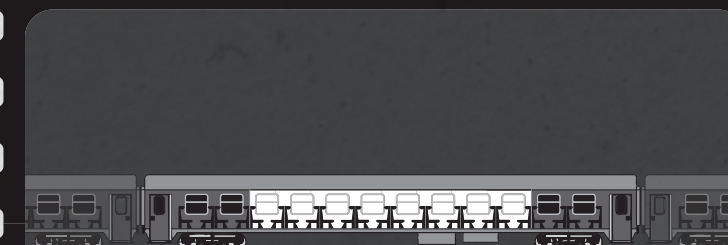
- ❖ princíp rovnakej rýchlosti svetla vyzerá na prvý pohľad nevinne, ale v skutočnosti má extrémne silné dôsledky
- ❖ pre telesá nič také neplatí (premýšlite si, že rýchlosť hodeného oštepú je v rôznych inerciálnych sústavách rôzna a že závisí od rýchlosti lovca aj srnky)
- ❖ princíp rovnakej rýchlosti svetla je v skutočnosti úplne bizarný a (zdanlivo) bizarné sú aj jeho dôsledky

relatívnosť súčasnosti

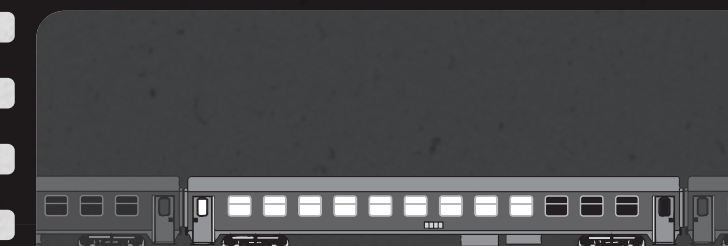
- ❖ v strede vozňa rozsvietime žiarovku
- ❖ nech je rýchlosť svetla $c = 2$ okná za sekundu a nech vlak ide rýchlosťou $v = 1$ okno za sekundu
- ❖ dorazí svetlo k predným a zadným dverám naraz?
- ❖ v inerciálnej sústave vlak áno (obrázok, prvý stĺpec)
- ❖ v inerciálnej sústave most nie (obrázok, druhý stĺpec)

čo je pre jedného pozorovateľa súčasné,
pre druhého nie je súčasné

Vo vlaku
Dr. Einsteina



Pri vlaku
Dr. Einsteina



dôležitá poznámka

- ❖ relativnosť súčasnosti (ktorá je v nejakom zmysle “dušou” teórie relativity) sa týka udalostí, ktoré sú nesúmiestne v smere pohybu jednej inerciálnej vzťažnej sústavy vzhľadom k druhej
- ❖ ak sú udalosti nesúmiestne v smere kolmom na smer rýchlosti, nijakú relativnosť súčasnosti nedostaneme
- ❖ v smere kolmom na rýchlosť sa “nič relativistické nedeje”, a z toho vyplýva mimoriadne významný dôsledok: relativnosť času
- ❖ v smere rýchlosti sa však niečo relativistické deje: relativnosť dĺžky (kvôli nej treba obrázky mosta a vlaku na minulom slide opraviť, ale oprava nezmení závery o relativnosti súčasnosti)

čo je vlastne čas?

- ❖ relatívna nie je len súčasnosť, ale aj samotný čas
- ❖ je to ďalší príklad toho, že niekedy sa oplatí 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
- ❖ v každej inerciálnej sústave je len jeden objektívny čas, t.j. rôzne 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 jedna aj druhá
- ❖ ukážeme, že ak je rýchlosť svetla rovnaká pre všetkých pozorovateľov, potom pohybujúce sa hodinky merajú iný čas ako nepohybujúce sa hodinky (za predpokladu, že v smere kolmom na rýchlosť hodiniek sa “nič relativistické deje”, čo sme si už povedali, že platí)
- ❖ ak pre navzájom nepohybujúce sa hodinky pritom stále platí, že idú všetky rovnakým tempom, potom nahliadnutá relatívnosť sa nebude týkať len tempa pohybujúcich sa hodiniek, ale aj samotného času inými slovami: ukážeme, že objektívny čas je relatívny

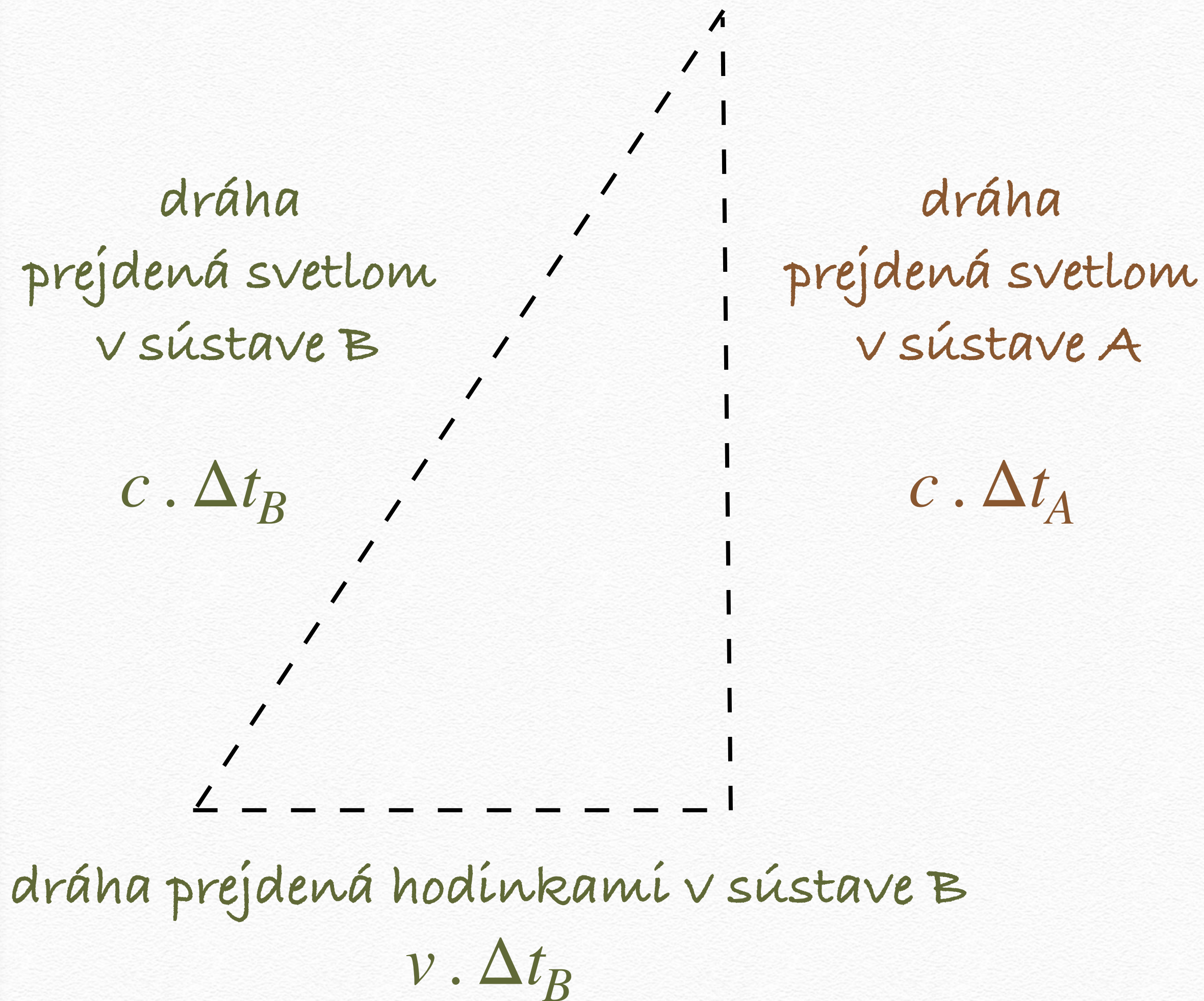
Einsteinove svetelné hodinky



- ❖ svetelný lúč sa odráža hore-dole od dvoch zrkadiel
- ❖ 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 (pohybujúcim sa hodinkám trvá tiknutie dlhšie ako stojacim hodinkám)

dilatácia času



❖ 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

kontrakcia dĺžky

- ❖ pre priestorové vzdialenosti platí podobná bizarnosť: dĺžka pohybujúcej sa tyče je kratšia, ako dĺžka úplne rovnakej stojacej tyče
- ❖ faktor skrátenia je rovnaký ako v prípade času

$$l_B = l_A \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

l_B je dĺžka pohybujúcej sa tyče, l_A dĺžka stojacej tyče

- ❖ z časových dôvodov sa v tejto prednáške budeme venovať iba času a pri dĺžke sa obmedzíme len na základné informácie na úrovni klebety



obidve tyče stoja



tyč sa pohybuje rýchlosťou $c/2$ vzhľadom k stojacej tyči

oprava obrázkov vlak-most



most je 0.87 násobne skrátenej



vlak je 0.87 násobne skrátenej

prečo nám to pripadá čudné

- ❖ pretože sa s tým nikde v bežnom živote nestretávame a naša intuícia je vybudovaná len na skúsenostiach, v ktorých sa relativistické efekty nijako pozorovateľne neprejavujú
- ❖ prečo je to tak? pretože typický (všadeprítomný) relativistický faktor

$$\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

sa pre bežné každodenné rýchlosti s vysokou presnosťou rovná 1

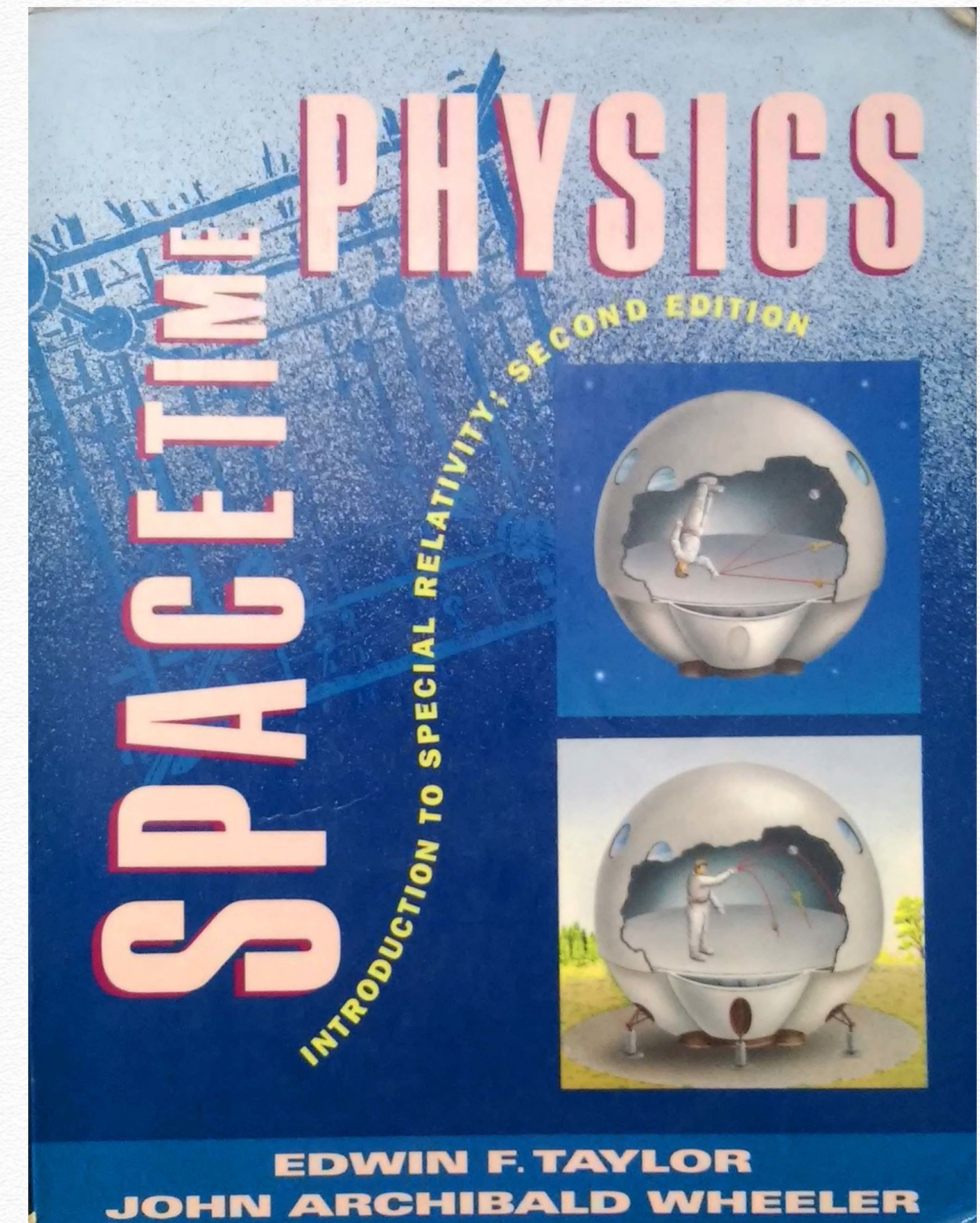
- ❖ len tak pre srandu: čomu je rovný tento faktor pre $v = 100 \text{ km/h}$?

nie je v tom celom spor?

- ❖ pohybujúce sa hodiny idú pomalšie (ako sme nahliadli)
- ❖ lenže ak sa hodiny A pohybujú vzhľadom k hodinám B, tak aj hodiny B sa pohybujú vzhľadom k hodinám A, čiže A by mali ísť pomalšie a zároveň rýchlejšie ako B
- ❖ to isté platí pre dĺžky tyčí
- ❖ vyzerá to na celkom evidentný a hlboký logický spor, ale pri precíznejšom uvažovaní spor úplne zmizne

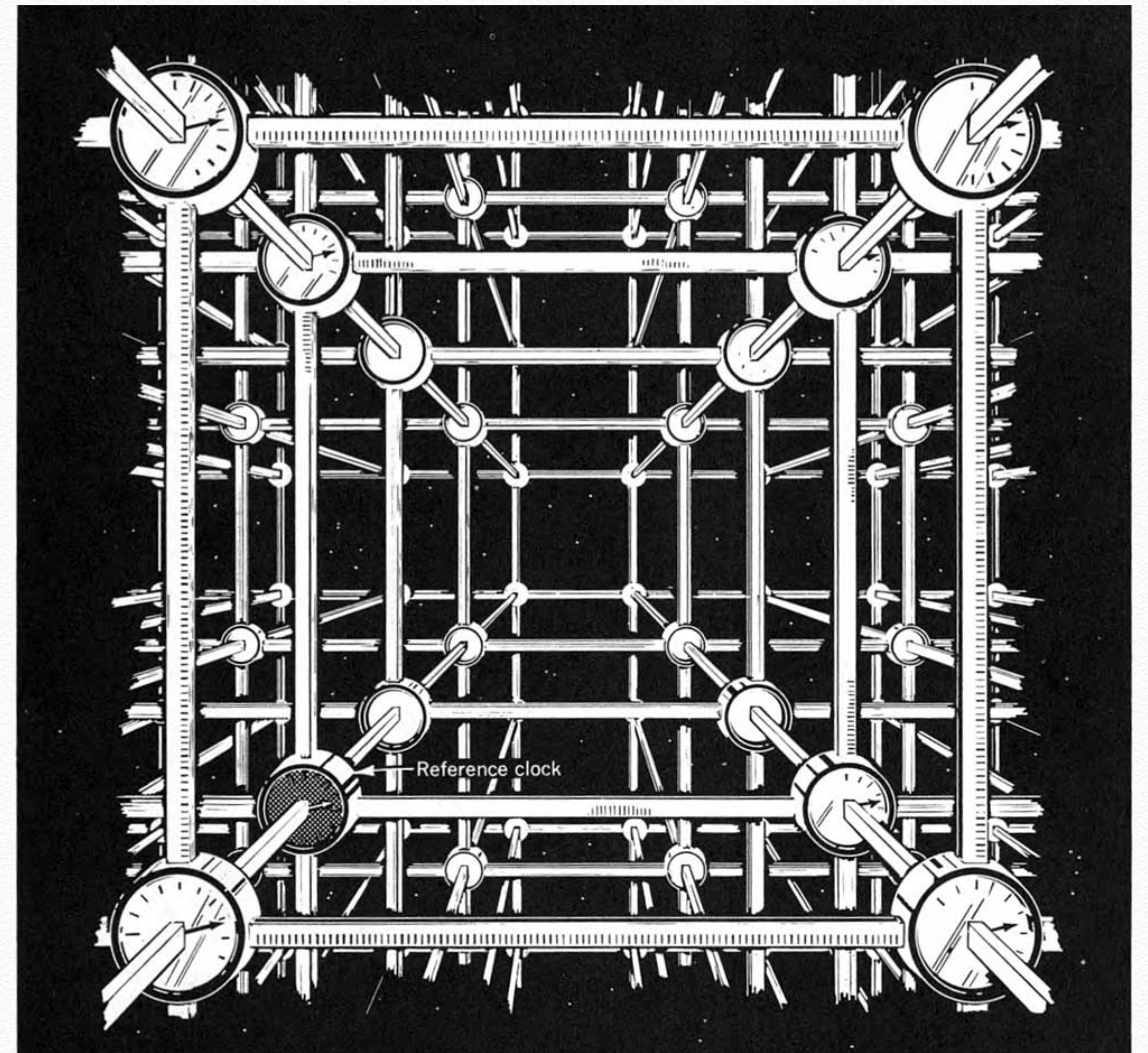
precíznejšie uvažovanie

- ❖ na precíznejšie uvažovanie nás táto naša prednáška, žiaľ, dostatočne nepripravila
- ❖ **varovanie:** na základe tejto prednášky sa nikdy nepúšťajte do obrany teórie relativity pred jej popieračmi – táto prednáška na to vôbec neposkytuje dostatočnú kvalifikáciu
- ❖ ak chcete byť schopní precízne relativisticky uvažovať, treba si k tomu naštudovať viac
- ❖ ťažko nájdete lepšiu a ľahšiu knihu ako Taylor, Wheeler: Spacetime physics



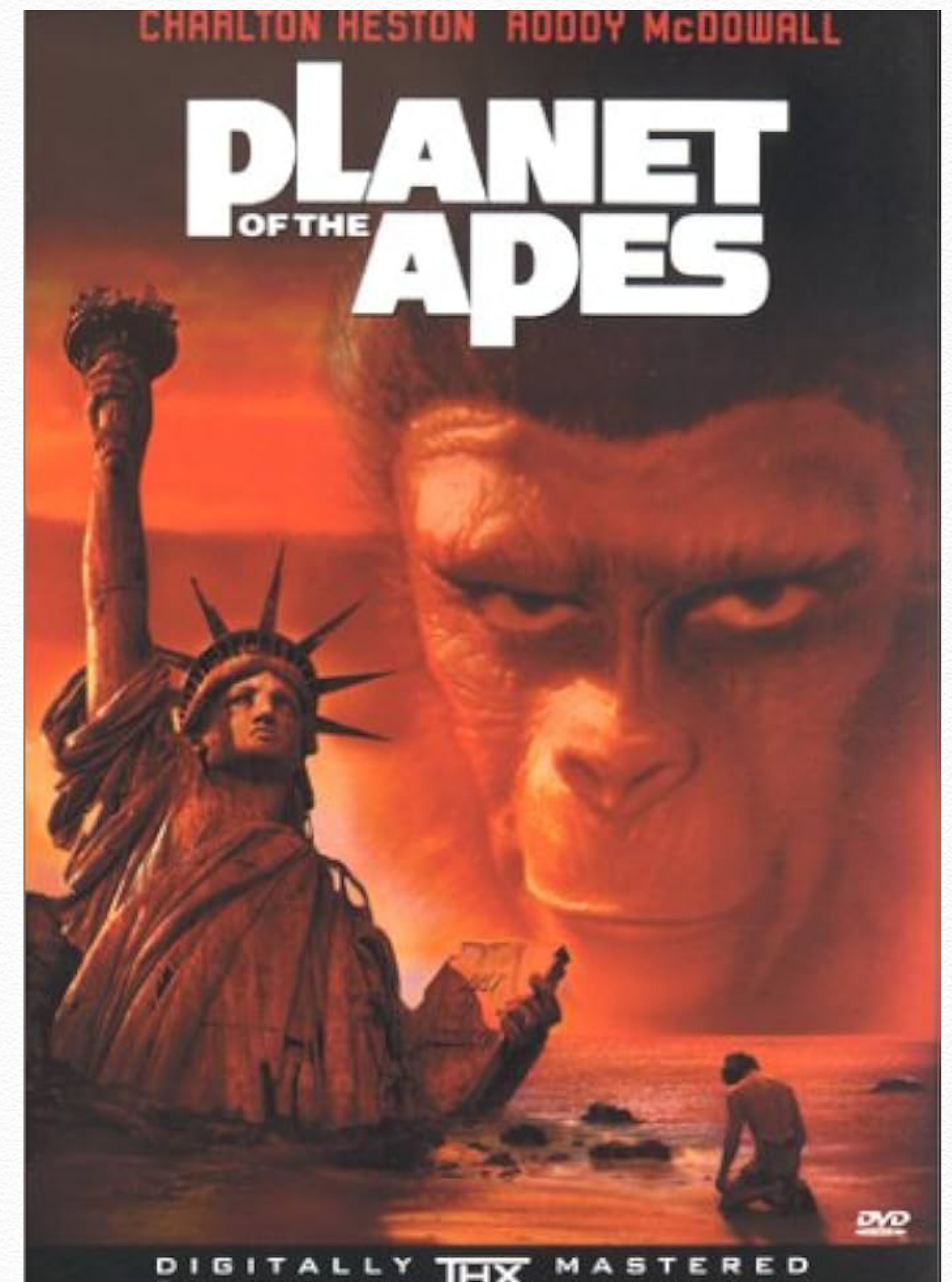
spoiler (prezradenie pointy)

- ❖ základom precíznejšieho uvažovania je časopriestorová mriežka hodín
- ❖ uvažujú sa dve také mriežky, pohybujúce sa jedna vzhľadom k druhej rovnomerne priamočiarno
- ❖ väčšina zdanlivých paradoxov teórie relativity spočíva v tom, že sa uvažuje len jeden relativistický efekt a na iný (väčšinou na relatívnosť súčasnosti) sa zabudne
- ❖ pointou precíznejšieho uvažovania je skoro vždy uváženie všetkých efektov



paradox dvojčiat

- ❖ existuje však jeden známy paradox, ktorý sa nedá vysvetliť správnym zahrnutím relativnosti súčasnosti do našich úvah
- ❖ ide o astronauta, ktorý odíde zo Zeme a po čase sa vráti
- ❖ ak si pred štartom aj po návrate porovná hodinky (alebo vek) so svojim dvojčaťom, ktoré zostalo na Zemi, ide v obidvoch prípadoch o súmiestne udalosti, pri ktorých nie je súčasnosť relatívna
- ❖ podľa toho, z pohľadu ktorého brata sa na to pozeráme, dostaneme buď, že mladší je astronaut alebo jeho dvojča



nie je to paradox

- ❖ paradox dvojčiat vyzerá, že je naozajstný a vážny, ale nie je
- ❖ na to, aby sa dvojičky opäť stretli, musí aspoň jeden z nich spomaliť (alebo sa otočiť) a začať sa vracat' späť
- ❖ počas spomaľovania či otáčania je jeho vzťažná sústava neinerciálna, a v takej špeciálna teória relativity neplatí (práve preto je len špeciálna)
- ❖ všetky naše úvahy teda boli správne len v inerciálnej sústave
- ❖ Zem je s veľkou presnosťou inerciálna sústava, tam sú naše úvahy OK
- ❖ čiže správny je (len) pozemský pohľad a mladší bude astronaut

jemnosti paradoxu dvojčiat

- ❖ pri riešení paradoxu dvojčiat sa (často mlčky) predpokladá, že hodiny v neinerciálnej sústave idú vzhľadom k Zemi rovnakým tempom, ako (iné) hodiny v inerciálnej vzťažnej sústave, ktorá má vzhľadom k Zemi rovnakú rýchlosť ako tá neinerciálna (tzv. comoving frame)
- ❖ tento predpoklad sa pri podrobnejšom preskúmaní ukáže byť rozumný len pre neinerciálne vzťažné sústavy s nie je príliš veľkým zrýchlením
- ❖ podľa princípu ekvivalencie (opäť Einstein) sú neinerciálne vzťažné sústavy ekvivalentné inerciálnym sústavám s gravitačným poľom
- ❖ dôsledok: v nie príliš intenzívnom gravitačnom poli beží čas pomalšie a pomocou špeciálnej teórie relativity vieme vypočítať koľkokrát pomalšie

dôležitá praktická aplikácia: GPS

- ❖ v satelitoch GPS má na rýchlosť chodu hodín vplyv ich pohyb vzhľadom k Zemi aj gravitačné pole Zeme (ktoré je slabšie ako na povrchu Zeme)
- ❖ hodiny v satelitoch GPS idú rýchlejšie ako na povrchu Zeme ($38 \mu s$ za deň)
- ❖ za ten čas prejde svetlo zhruba 10 km
- ❖ bez korekcií na spomaľovanie času by teda GPS malo už po jednom dni rádovo takéto veľké chyby, inými slovami bez relativistických korekcií by GPS vôbec nefungovalo
- ❖ poznámka: tieto korekcie sa robia sčasti hardvérovo a sčasti softvérovo

tip na záver

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

