Toto je reakce na přednášku:
Václav Vavryčuk: Paradox dvojčat a relativita času (KS ČAS 14.6.2023)
na kanále LLionTV. Tato reakce byla umístěna do diskuze k přednášce a zde se jedná o její souhrnou podobu.

Speciální teorie relativity

Speciální teorie relativity (STR) shrnuje naše současné představy o propojení prostoru a času. Reflektuje experimentální zkušenost, která nás zhruba před 100 lety přesvědčila o tom, že struktura času je složitější, než naivní představa absolutního času, kterou si každý z nás vytvoří z běžné zkušenosti. V tomto smyslu STR zachycuje jednu z největších myšlenkových revolucí daleko přesahující pouze pole fyziky.

STR zachycuje fakt, že neexistuje pouze jeden čas. V moderní podobě tuto zkušenost popisuje pomocí prostoročasového popisu. STR je v podstatě geometrie prostoročasu. Tento pojem zavedl pár let po zformulování STR matematik H. Minkowski. Prostoročasu STR se proto říká Minkowského prostoročas. Einstein tuto geometrickou koncepci následně zobecnil v obecné teorii gravitace (OTR), která zahrnuje vliv gravitace. Gravitaci popisuje jako zakřivení geometrie prostoročasu.

STR se brzy po svém vzniku stala základním jazykem pro mnoho dalších teorií. Teorie elektromagnetismu si STR v podstatě vynutila – Maxwell zformuloval rovnice elektromagnetismu koncem 19. století a Lorentz a Einstein vybudovali aparát STR hlavně proto, aby dali Maxwellovým rovnicím pevné základy. V jazyku STR se pak budovala kvantová teorie pole, která je dnes základem teorie elementárních částic a modelem struktury hmoty. Jak bylo řečeno, zobecněním STR je OTR, teorie gravitace, popisující vesmír jako celek. Bez STR bychom neměli ani standardní model, ani současnou kosmologii.

Vskutku, pokud by se nalezla chyba v STR, musely by se s tím vypořádat Maxwellova teorie elektromagnetismu (všechny klasické elektrické a magnetické jevy), kvantová elektrodynamika (teorie fotonů a elektronů zahrnující kvantové chování), standardní model (teorie veškeré hmoty jak ji dnes rozumíme), obecná teorie relativity (teorie gravitace). Všechny tyto teorie by nekonzistenci v STR okamžitě pocítily. Lze si jen velmi obtížně představit, že všechny experimenty potvrzující tyto teorie by se nějak vyhnuly "evidentním" nekonzistencím ve svých základech.

Proto je přirozené se stavět skepticky k vyhlášením, že někdo našel v STR elementární chyby. STR není zas tak složitá teorie. Je to blízká analogie euklidovské geometrie. Ano, je obtížnější porozumět její interpretaci a pochopit nový pojmový aparát, který se v ní rozvíjí. Nicméně za posledních 100 let to zvládly milióny vědců. Vědců, kteří se se STR seznámili a běžně ji ve svém výzkumu používají.

V přednášce dr. Vavryčuka se opakovaně explicitně říká, že STR obsahuje elementární chyby (34:00, 39:30, 55:10, 1:05:10, 1:12:45, 1:53:45). Přednáška uvádí několik známých myšlenkových experimentů, na kterých se přednášející snaží dokumentovat "chybnost" STR, uvádí různé zavádějící komentáře k uskutečněným experimentům, chybná odvození vložená do úst Einsteina, a několik "nových vhledů" přednášejícího.

Bohužel většina těchto tvrzení není pravdivá nebo je hrubě zkreslená a poukazuje na elementární neporozumění situaci. Přednáška obsahuje zjevné nepravdy a chyby v základní matematice.

Jelikož se přednáška objevila na prestižním popularizačním kanálu ve společnosti kvalitních přednášek z různých oborů a byla přednesena dr. V. Vavryčukem, DrSc. na půdě Matematického ústavu AV ČR, má potenciálně velký dopad na veřejnost se zájmem o fyziku a vědu obecně. Může vyvolat velmi zkreslený dojem o povaze STR a zmást mnoho posluchačů, kteří se o tuto problematiku zajímají, nemají ale dostatek času sami se se STR dostatečně hluboko seznámit.

Proto jsem se rozhodl zareagovat v diskuzi k této přednášce a upozornit posluchače na nepřesnosti a nepravdy, které přednáška obsahuje. Chybných a nepřesných výroků je ale tolik, že na všechny ani nejde reagovat. Vybral jsem několik příkladů, které lze okomentovat bez složitých rovnic. I tak jsou příslušné komentáře dlouhé a přesahující rozumný rozsah pro youtubeovskou diskuzi. Chtěl jsem ale ukázat, že se bohužel nejedná jen o drobnosti.

Zaměřil jsem se na základy STR. Vynechal jsem např. komentáře k zavádějícím výrokům o Michelsonově-Morleyově experimentu či Dopplerově jevu, protože zde jsou vysvětlení složitější. I tak toho bude až příliš.

Samozřejmě internetová diskuze není správná platforma na seriózní výklad vědecké teorie. Naštěstí, existuje nepřeberné množství zdrojů přístupných v literatuře či na webu, kde se zájemce může seznámit se STR v dostatečné hloubce, aby sám mohl posoudit, jak se situace má. STR není tajné učení úzké sekty. Jedná se o obecně známou teorii, se kterou se seznamuje každý student fyziky zhruba v druhém ročníku univerzity.

Připadá mi až urážlivé opakované zmínky přednášejícího, že zástupy fyziků studujících v posledním století STR pouze "papouškují chybná tvrzení Einsteina" (48:55) a že přebírají bezmyšlenkovitě pomýlené závěry (37:35, 1:08:05). Takovou vědeckou slepotu přednášející přisuzuje i fyzikům jako jsou M. Born, P. Dirac, L. Landau či R. Feynman (36:10,1:13:40).

Věřte mi, každý zvídavý student si STR poctivě promýšlí a v každém ročníku se najde několik špičkových studentů, kteří si všechny souvislosti a závěry STR pečlivě přeformulují a STR si pro sebe znovu vybudují. Je to intelektuální výzva, ve které STR opakovaně prochází kontrolou logické konzistence a fyzikální relevantnosti.

V přednášce se tvrdí, že STR potlačuje jakoukoli kritiku (38:55, 1:13:10). Rovnou říkám, že tato má reakce není pouhé mainstreamovské odmítání "oprávněné" kritiky. Nejde zde o spor o svobodu vyjádření. Je to jen reakce na zavádějící a špatnou přednášku. Upozornění posluchačům, ať si hledají lepší zdroje informací. Není zde žádné spiknutí elit, žádná tajná organizace zavádějící prostý lid na scestí teorie relativity. Nepodsunujte vědcům tento konspirační nesmysl.

V následujících příspěvcích upozorním na problematická místa v přednášce a přidám pár obecných komentářů k tématům, která jsou důležitá a často špatně pochopená. Nemůže to suplovat ucelený výklad STR. K tomu na odborné úrovni existují kurzy na VŠ. Uvedu kurzy u nás na MFF: `http://utf.mff.cuni.cz/vyuka/NOFY023/`. Na popularizační úrovni doporučuji např. přednášky prof. J. Podolského či prof. P. Kulhánka. Zde si zájemce může sám vytvořit názor o čem STR je.

prof. Pavel Krtouš, ředitel ÚTF MFF UK

Obsah

Komentáře

1) Paradox dvojčat a Langevinovo řešení [15:30, 19:30, 1:08:00, 1:29:10]

Paradox dvojčat vskutku zpopularizoval francouzský fyzik Paul Langevin a to na Mezinárodním filosofickém kongresu v Boloni v roce 1911. Přednesl tady filosofům a fyzikům poutavě vyložený důsledek STR explicitně ukazující, že různě pohybující se objekty budou stárnout různým způsobem. Zavedl ikonická dvojčata a důsledek STR vyostřil převedením ze světa elementárních částic do kontextu každodenního života. Zároveň podal jasné vysvětlení, proč se nejedná o skutečný paradox.

Poznamenejme, že v roce 1911 ještě obecná teorie relativity neexistuje - Einstein ji publikuje v roce 1915. Kolem roku 1911 teprve vzniká - Einstein ji teprve začíná vytvářet, mimochodem i během svého pobytu v Praze.

Není tedy pravda tvrzení z přednášky, že řešení paradaxu dvojčat potřebuje OTR. Langevinovo řešení paradoxu dvojčat nemá nic společného s obecnou teorií relativity a Langevin se na OTR nijak neodkazuje. Jedná se o diskuzi čistě v rámci STR. STR umí bez problémů popisovat i obecné zrychlené pohyby, včetně rakety, která se během své cesty otočí.

Více viz komentář 19 o vztahu STR a OTR a komentář 15 k paradoxu dvojčat.

2) Paradox dvojčat a symetricky letící rakety [19:30]

"Paradoxnost" paradoxu dvojčat se většinou formuje tak, že 1) moje dvojče, který se vůči mně pohybuje, zestárne méně než já a 2) všichni pozorovatelé si jsou ekvivalentní. 3) Jako důsledek mé dvojče musí být mladší než já, ale zároveň i já musím být mladší než mé dvojče. Což je spor.

Langevin upozorní, že v běžné formulaci paradoxu dvojčat nejsou oba pozorovatelé ekvivalentní (ten na Zemi se pohybuje po celou dobu po velmi přímé prostoročasové trajektorii, ten v raketě se pohybuje oklikou k sousední hvězdě). Proto tvrzení, že pozorovatel na Zemi bude starší, není sporné.

Naopak, v případě symetricky letících raket budou obě dvojčata z raket po návratu stejně stará. Tento výsledek se dostane výpočtem v jakékoli soustavě. Dospěje k tomu jak pozorovatel na Zemi, tak kterýkoli z obou cestovatelů. Jen musíme správně použít vzorečky. Tvrzení z 21:25, že se různí pozorovatelé dopočítají jiných výsledků, není pravda.

Častým zdrojem zmatků je vágnost tvrzení, že když se někdo vůči mně pohybuje, tak zestárne méně. To je pravda pouze tehdy, pokud se já pohybuji bez zrychlení. Tj. pokud se já pohybuji rovnoměrně přímočaře (např. jsem v klidu v inerciální soustavě). Když v takové situaci ode mne odběhne kolega, bude pobíhat (pokud možno relativisticky) kolem mne, tak po té, co se znovu potkáme, bude kolega mladší. Já jsem se pohyboval po časově nejdelší trajektorii (ta bez zrychlení) a všichni ostatní se pohybují po časově kratších trajektoriích.

Pokud bychom se mezi začátkem a koncem pohybovali se zrychlením oba, je nutné podrobně zkoumat, jak jsme se pohybovali a zjistit, kdo z nás zestárne více a kdo méně. Závisí to na konkrétních trajektoriích. A v STR umíme spočítat, která trajektorie je časově delší a která kratší. V případě symetricky letících raket bude jejich vlastní čas stejný.

Více viz komentář 15 – hlavní komentář k paradoxu dvojčat.

3) Dlouhé rakety letící proti sobě [22:10]

Příklad dvou míjejících se dlouhých raket uváděný v čase 22:10 je docela zajímavý a poučný. Nemá sice moc společného s paradoxem dvojčat, jak je naznačováno, ale to nevadí. Přednášející se tímto příkladem spíš snaží ukázat spornost dilatace času. Chybně a nesprávně.

Příklad naopak pěkně ukazuje na jinou zajímavou skutečnost v STR a to na problém synchronizace hodin ve dvou navzájem pohybujících se soustavách.

Argument na přednášce je, že hodiny na přídích obou raket v okamžik jejich míjení ukazují stejně a taktéž hodiny na zádích obou raket v okamžik jejich míjení ukazují stejně. Nemůže tak docházet k dilataci času a STR se mýlí.

STR se nemýlí. Dilatace času se přitom uplatní. Ale uplatní se také odlišná synchronizace času.

Pokud chceme popsat celou situaci, měli bychom si vybrat soustavu. Vybereme si soustavu jedné z raket. Z hlediska této rakety uplyne na druhé raketě díky dilataci času méně času. Ale nesmíme zapomenout na různou synchronizaci hodin v obou raketách. Díky ní totiž hodiny na zádi letící rakety ukazovaly z hlediska stojící rakety v okamžik míjení přídí již nenulový čas! Když k němu přičtu dilatovaný čas během průletu raket, dostanu, že hodiny na zádích obou raket v okamžik jejich míjení ukazují stejnou hodnotu.

Stejný argument můžu udělat i opačně, z hlediska druhé rakety.

V obou případech dá STR s použitím dilatace času konzistentně stejný výsledek – hodiny na zádích raket ukazují v okamžik míjení stejně. Dilatace času se započítá, ale k žádnému sporu to nevede.

V následujícím textu vyložím celou situaci podrobněji i s náznakem výpočtu. Začnu s komentářem k synchronizaci.

Při budování inerciální soustavy se pozorovatelé tvořící soustavu musí dohodnout na společném čase. Musejí si spolu synchronizovat hodiny. Jelikož se jakýkoli fyzikální signál pohybuje konečnou rychlostí, nelze synchronizaci provést "okamžitě", pomocí nekonečně rychlého "pípnutí". Když centrální pozorovatel vyšle signál, podle kterého si ostatní pozorovatelé mají nastavit čas na svých hodinách, tento signál dorazí ke vzdálenějším pozorovatelům později. Ti proto musejí udělat při nastavování svých hodin opravu na dobu šíření. To není problém. Když všichni pozorovatelé v jedné soustavě tuto opravu správně započítají, mohou si nastavit hodiny na společný synchronizovaný čas t. Okamžik t=konst. pak v prostoročase vybírá tzv. nadrovinu současnosti. Vybírá všechny události, které se vzhledem k dané soustavě staly "současně".

Pro nováčka v STR ale bude překvapivé, že tato současnost je závislá na zvolené soustavě. Vezměme si druhou inerciální soustavu pohybující se vůči té první nenulovou rychlostí. Pokud si pozorovatelé této soustavy synchronizují své hodiny (podle stejného postupu jako v soustavě první) tak dostanou jinou synchronizaci, jinou časovou souřadnici t', jiné nadroviny současnosti. Proto Lorentzovy transformace nemají stejné t a t'! V těchto dvou soustavách budou pozorovatelé používat různý čas.

Pokud podle principu relativity trváme na tom, že žádná z inerciálních soustav není preferovaná, tak se této odlišné synchronizaci hodin nelze vyhnout. Ve všech soustavách musejí používat stejný postup synchronizace odkazující se pouze na jejich soustavu a to nevyhnutelně vede k odlišné volbě času.

V našem světě neexistuje něco jako globální univerzální současnost. Nejlepší, co umíme definovat je současnost inerciálních soustav zadefinovaná pomocí synchronizace hodin. A inerciální soustavy, které se vůči sobě pohybují, mají současnost různou.

Příklad popisovaný přednášejícím je přesně tento případ. S oběma raketami můžeme spojit inerciální soustavy. Jelikož se vůči sobě rakety pohybují, synchronizace času v obou raketách bude různá. V obou raketách budou používat různý čas.

To bohužel přednášející zcela pominul. V 23:05 říká, že hodiny všech 4 pozorovatelů v horním obrázku budou v jeden okamžik ukazovat stejný čas. V jaký okamžik? Vůči které soustavě?

Přednášející definoval okamžik tak, že se zrovna míjí přídě raket. A pak řekne, že uvažujeme zádě raket v okamžiky, které mají s událostí "míjení přídí" synchronizované hodiny. Ale vůči které raketě tuto synchronizaci provedeme? Vůči levé či pravé?

Vyberme si levou raketu a nakresleme obrázek z hlediska její soustavy - a to v čase $t = 0$. To se zrovna přídě raket míjejí a oboje hodiny na přídích ukazují $t = 0$ a $t' = 0$. Na zádi levé rakety budou hodiny díky synchronizaci samozřejmě ukazovat také $t = 0$. Pokud se ale v čase $t = 0$ (současnost levé lodi) koukneme na hodiny na zádi pravé rakety, zjistíme, že tyto hodiny budou ukazovat nenulový čas $t' = \tau$. To proto, že synchronizace hodin pravé rakety je jiná. V té si nastavili hodiny na $t' = 0$ jinak než v levé soustavě.

Obdobný obrázek můžeme nakreslit i vzhledem k pravé raketě v čase $t' = 0$ (současnost pravé rakety). Situace bude zcela symetrická. Hodiny na přídi i zádi pravé rakety budou ukazovat $t' = 0$, hodiny na přídi levé rakety budou ukazovat $t = 0$ a hodiny na zádi levé rakety budou ukazovat $t = \tau$.

Místo jednoho horního obrázku z přednášky (23:14) musíme nakreslit dva obrázky, pro každou raketu jeden. A ani v jednom nebudou všechny 4 hodiny ukazovat najednou stejný čas. Neexistuje společná současnost pro obě rakety.

Překlad mezi oběma obrázky dávají přesně Lorentzovy transformace. Z nich dopočteme, že $c\ \tau = v/c\ L_o$, kde L_o je klidová délka rakety. (Je potřeba zkombinovat obě transformace a použít, že L_o je délka rakety v soustavě, ve které raketa stojí.)

Rakety nyní letí kolem sebe a nadejde okamžik, kdy se budou míjet jejich zádě. Z důvodů symetrie celé situace lze vytušit, že v tuto událost by hodiny na zádích obou raket měly ukazovat to samé, nějaký čas $t = t' = T$. To přednášející konstatuje v 24:10. Z toho následně usoudí, že nedochází k žádné dilataci času. Že dilatace času předpovídaná STR je "logický nonsense".

Kde že se má vzít dilatace času? To přednášející vysvětluje o chvilku dříve 23:30. Z hlediska pozorovatele Joe se Jim pohybuje a tak by mu měly jít hodiny "pomalejc", měly by tedy ukazovat méně. A opačně, vzhledem k Jimovi se pohybuje Joe a jeho hodiny by měly ukazovat méně. Přitom jsme se výše shodli, že by měly oboje hodiny ukazovat stejně!

Jak to tedy je? Odpověď už známe: dilatace času se uplatní, ale musíme vzít v úvahu i problém se synchronizací hodin. Vysvětlení můžeme podat z hlediska obou raket. Udělejme to z hlediska Jimovy rakety (na začátku to byla levá raketa).

V ní Jim měří úsek mezi nadrovinami $t = 0$ (míjení přídí) a $t = T$ (míjení zádí). Jelikož se pravá Joeova raketa pohybuje rychlostí v a v Jimově soustavě má kontrahovanou délku $L = L_0/\gamma$, záď se musí přesunout o $L_0 + L$ (délka obou raket dohromady). Potřebný čas je $T = (L_0+L)/v$. Tento čas budou nakonec ukazovat hodiny na zádi Jimovy rakety.

Naproti tomu Joe se vůči Jimovi pohybuje a tak časový úsek, o který zestárne mezi oběma událostmi, bude podle dilatace času $\Delta t' = T/\gamma$. Joeův čas je vskutku kratší čas než uvádí Jim.

Nesmíme ale zapomenout, že v okamžiku $t = 0$ (tj. na nadrovině $t = 0$) ukazovaly Joeovy hodiny už $t' = \tau$. Na nadrovině $t = T$ tak budou ukazovat

$$t' = \tau + \Delta t' = \text{trocha počítání} = T\ .$$

(Ta trocha počítání používá pouze vztahy uvedené výše a vztah pro γ. Je to na dva řádky. Zkuste si to.)

Neboli, i Joeovy hodiny budou ukazovat v okamžik míjení zádí $t' = T$, stejně jako Jimovy hodiny. Započítali jsme přitom dilataci času, ale také odlišnou synchronizaci hodin. Stejnou analýzu bychom mohli udělat v soustavě Joeovy rakety se stejným výsledkem. Žádný "logický nonsense" se nekoná. Pouze člověk musí vzít v úvahu, že synchronizace hodin je v obou raketách různá.

4) Žebřík pohybující se skrz garáž [14:30, 24:30]

Ach jo. Zde si přednášející opravdu neudělal domácí úkoly. Tento "paradox" samozřejmě napadne úplně každého, kdo se se STR seznamuje. A na každém pořádném kurzu STR se vysvětluje. Na stránkách MFF např. v mém kurzu naleznete podrobné vysvětlení včetně animace této situace.

Krátce, když chceme porovnávat délky objektů, musíme říci, jak je měříme. V STR je to důležité. Pokud chci změřit ve své soustavě délku tyčky (žebříku, garáže), musím odečíst polohy jejích konců ve stejném čase.

Uvědomme si, není snadné říci "Přiložím k tyčce pravítko." Nemohu být na obou koncích pravítka současně. Nemohu se spolehnout na signál letící ke mně od vzdáleného konce. Musím se dohodnout s kolegyní, která bude hlídat druhý konec, a musíme se dohodnout, kdy polohu tyčky odečteme. Pokud bychom to neudělali ve stejném čase, tyčka nám mezitím poodletí a my budeme porovnávat polohy jejích konců zahrnující tento pohyb.

No jo, ale synchronizace hodin v mé soustavě je jiná než synchronizace hodin v pohybující se soustavě. Pokud tedy naopak na tyčce provedou obdobné měření mého pravítka, budou měřit něco úplně jiného, než měřím já.

Proto může být pravda, že já konstatuji, že pohybující tyčka je zkrácená, a pozorovatelé na tyčce naopak řeknou, že mé pravítko je zkrácené. Neboli já budu tvrdit, že v můj jeden okamžik byl celý žebřík v garáži. A zároveň pozorovatelé sedící na žebříku budou tvrdit, že v jejich jeden okamžik čouhal žebřík ven na obou koncích garáže. Není to v rozporu, protože mluvíme o jiných současnostech.

Toto je jeden ze základních kamenů STR. Současnosti navzájem pohybujících se inerciálních soustav nejsou stejné. Pokud toto budeme ignorovat, samozřejmě dostaneme nesmysly.

Konstatujme, že i symetrické situaci popisované v 24:30 lze dát smysl. Zde žebřík a garáž nahradily pravítka. Pokud bychom porovnávání délek pravítek provedli z hlediska soustavy, vůči které se obě pravítka pohybují stejnou rychlostí, jedno doprava a druhé doleva, tak by v této soustavě byly obě pravítka stejně zkrácena a jejich měřítka by spolu lícovala, jak se tvrdí v 26:10. Tentokrát se ale jedná o úplně jinou současnost, než současnost pravítek. Jedná se o pohled ze symetrické soustavy a tak obrázek bude vskutku symetrický. V soustavě jednoho nebo druhého pravítka by však měřítka spolu nelícovala - pohybující se pravítko by bylo kratší.

Situace v prostoročase si lze "připodobňovat" v euklidovské geometrii. Lze se ptát, jak by zkoumaný příklad vypadal v obyčejné geometrii. Samozřejmě, to není to samé, ale často nám taková analogie může trochu pomoci s pochopením, co v STR děláme. Popíšu tedy euklidovskou variantu příkladu s žebříkem a garáží.

Představme si dva trámy, široké 10cm a dlouhé 2m. Přiložme je k sobě, aby tvořily písmenko X. Nyní se můžu z hlediska prvního trámu (budu ho nazývat "můj") zeptat, jak dlouhý vrták potřebuji, abych ho provrtal skrz. Budu samozřejmě vrtat kolmo na svůj trám a tak potřebuji 10cm dlouhý vrták. Co když ale chci udělat rovnoběžnou díru i do druhého trámu? Tam mi 10cm dlouhý vrták stačit nebude, budu potřebovat delší vrták v závislosti na sklonu druhého trámu. Mohu tak říci, že "moje" šířka druhého trámu je větší než "šířka" mého trámu.

Lehce si ale rozmyslíte, že vlastník druhého trámu bude argumentovat úplně stejně. Na svůj trám bude potřebovat 10cm vrták a na můj bude potřebovat delší vrták. Protože vrtá kolmo na svůj trám. Samozřejmě není zde žádný paradox. Přestože oba tvrdíme, že cizí trám je širší než náš trám, není to v rozporu. Mluvíme totiž o jiné veličině. Jednou o šířce kolmou na trám 1 a jednou o šířce kolmou na trám 2.

S žebříkem a garáží to je podobně. Prostoročasový popis žebříku je jakýsi "pásek" v prostoročase - užší rozměr je délka žebříku v prostorovém směru a delší rozměr je historie žebříku v čase. Podobně pro garáž. (Ignoruji rozměry kolmé na vzájemný pohyb, abychom si to byli schopni představit.)

To, že se žebřík pohybuje vůči garáži, znamená, že příslušné prostoročasové "pásky" jsou vůči sobě skloněné. Směr díry kolmo na trám 1 odpovídá současnosti vzhledem ke garáži, směr díry kolmo na trám 2 současnosti vzhledem k žebříku. Jelikož jsou "pásky" vůči sobě skloněné, nejsou tyto kolmé směry shodné. Není tedy divu, že délky měřené vhledem k těmto současnostem budou různé.

Rozdíl od trámů je ten, že musíme použít Minkowského geometrii. Proto "šířka" skloněného pásku bude **menší** než toho neskloněného. Neboli pohybující žebřík bude kratší, než kdyby stál.

Lze namítnout, že takováto "délka" je hodně konvenční, že neodráží skutečnou vlastnost pohybujícího se objektu. Tak jako šikmá díra skrz trám necharakterizuje dobře šířku trámu.

Ano. O tom ale celý příklad se žebříkem je. Jeho cílem není strkat žebřík do garáže. Je přeci zřejmé, že tohoto jevu nelze využít na schování žebříku do garáže v tradičním smyslu – žebřík musí skrze garáž letět relativistickou rychlostí, aby se uplatnila kontrakce délek. Je to příklad, který ukazuje, co relativistická kontrakce délek vlastně měří. V tomto případě se jedná "zdánlivou" veličinu, která má smysl pouze v soustavě určené nějakým externím objektem. Musíme mít důvod, proč nás zajímá délka pohybujícího se objektu (žebříku) měřená vzhledem k soustavě (garáži), vůči které se objekt pohybuje.

Takový důvod často máme. Je spoustu situací, kdy se kontrahovaná vzdálenost hodí do výpočtů. Přestože to je "jen" jakási "méněcenná" délka "vzhledem" k soustavě.

Více komentáře 10 a 11 o kontrakci délek a dilataci času.

5) Rychlost světla a synchronizace hodin [27:25, 27:45]

V čase 27:25 se přednášející ptá, k čemu se v příkladu žebříku a garáže potřebuje rychlost světla. Rychlost světla (resp. maximálně rychlý signál) je potřeba při synchronizaci času inerciálních soustav.

Při porovnávání délek pravítek musím určit, v jaké současnosti délky měřím.

A díky různé synchronizaci nebudou mít v příkladě s raketami obě rakety stejnou časovou souřadnici a proto argumenty 27:45 přednášejícího nefungují.

Rychlost světla se též může použít k měření vzdáleností. Pomocí něj se převede měření vzdálenosti na měření času.

Více viz následující podrobné komentáře 6, 7, 8 a 9 o rychlosti světla.

6) Povaha rychlost světla v STR

Mnohokrát padla výtka, že STR používá pojem rychlost světla ve vakuu (např. 29:00,1:11:10). Namítá se, že přece rychlost světla závisí na prostředí, ve kterém se světlo šíří a jak tedy může tato rychlost něco říkat o vlastnostech prostoru a času.

Explicitně a velmi precizně tato námitka zazněla v diskuzi (1:44:40): "Co má společného rychlost světla, která je elektromagnetická veličina, s prostorem a časem?"

Tázající si rovnou odpovídá, že žádnou. Nemá pravdu.

Ano, má pravdu v tom, že elektromagnetická interakce (elektřina, magnetismus, světlo,...) není příčinou struktury prostoročasu. Je to totiž naopak! Struktura prostoročasu si vynutí, že elektromagnetické pole se musí šířit ve shodě s touto strukturou. Že se musí šířit speciální rychlostí zakódovanou přímo v prostoročase. A protože světlo je nejčastější příklad hmoty šířící se touto rychlostí, říkáme této rychlosti "rychlost světla".

Co je tato speciální rychlost zakódovaná ve struktuře prostoročasu?

Jedno z nejdůležitějších pozorování teorie relativity je, že v našem světě existuje maximální rychlost šíření jakéhokoli fyzikálního signálu. Že nelze rychlost hmotných objektů (včetně fyzikálních polí) zvyšovat libovolně nade všechny meze.

Když pošleme libovolné signály k nejbližší hvězdě (nebo planetě - chcete-li mluvit o prakticky proveditelném experimentu) a od ní se tyto signály odrazí a poletí zpět, žádný z těchto signálů se nevrátí okamžitě. V případě hvězdy to bude trvat roky, než se první signál vrátí; v případě blízké planety minuty. Nenajdete žádný signál, který by se vrátil hned. A ukazuje se, že nejrychlejší signál bývá světlo. Mohlo by ho sice něco zbrzdit (průlet prostředím, se kterým interaguje, "zakopává" o něj). Ale když odstraníte překážky, světlo dorazí na čele pelotonu všech možných signálů.

Pro STR je podstatná tato principiální maximální rychlost. STR je jedno, jestli se touto rychlostí šíří světlo (vlna) či foton (částice) či cokoli jiného. Důležitý je fakt, že takováto konečná maximální rychlost existuje. To je ta rychlost, která se v STR vyskytuje.

A je velmi dobře ověřený fakt, že v našem světě se opravdu maximální signál šíří konečnou rychlostí. Je to tak dobře ověřený fakt, že mu dnes rozumíme jako jedné z vlastností prostoru a času. Chápeme ho dnes jako součást struktury prostoročasu. A všechny fyzikální teorie, které popisují jevy s velkými rychlostmi a energiemi jsou vybudované na podkladu prostoročasu STR (nebo OTR, pokud je ve hře i gravitace).

Např. v již zmíněném elektromagnetismu se tato maximální rychlost vyskytuje přímo ve fundamentálních Maxwellových rovnicích. Ty se nazývají Maxwellovy rovnice "ve vakuu", protože popisují šíření čistého elektromagnetického pole v prázdném prostoru. Z těchto rovnic se odvodí vlnová rovnice pro šíření elektromagnetického pole a zjistí se, že se vlny šíří právě onou maximální rychlostí, kterou v sobě má prostoročas zakódovanou.

Shrnutí: Vysoce netriviální fakt odpozorovaný z našeho světa je, že nejrychlejší fyzikální signál se šíří konečnou rychlostí.

S tímto faktem jsou samozřejmě v rozporu naše naivní newtonovské představy o prostoru a času. A STR tento rozpor řeší.

---

7) Světlo v prostředí [28:50]

Jak bylo řečeno výše, pro STR je relevantní pouze rychlost maximálního signálu, kterou se šíří např. světlo ve vakuu. Rychlost světla v prostředí nehraje pro STR žádnou roli.

Pokud chceme zkoumat šíření světla v nějakém prostředí, musíme nejdřív zkoumat interakci prostředí a elektromagnetického pole. Ukazuje se, že tato interakce lze často efektivně popsat tak, že se jenom změní dvě konstanty v Maxwellových rovnicích určující elektrické a magnetické vlastnosti prostředí. Tyto pozměněné konstanty též určují, že světlo se v daném prostředí šíří efektivně jinou rychlostí.

Ale tento jev lze vždy vysvětlit též jako superpozici elektromagnetického pole, které do prostředí vletělo a pole, které se vyzářilo z atomů prostředí rozhýbaných původním polem. Přičemž všechna tato pole se šíří podle vakuových Maxwellových rovnic. Pouze jejich superpozice efektivně vypadá, jako by se šířila jinou rychlostí.

Většinou je tato efektivní rychlost nižší než maximální rychlost šíření signálu. Najdete ale i speciální situace, kdy se efektivní rychlost jeví jako vyšší než rychlost maximálního signálu. To je však jen zdánlivé překonání maximálního signálu. Jedná se většinou o jakousi stacionární situaci, kdy se vám zdá, že se elektromagnetické vlnky v prostředí vlní "rychleji". Když se ale podíváte na čelo vlny, tj. na první okamžik, kdy vám vlna přinese informaci o tom, že se šíří, zjistíte, že se čelo vlny opět šíří nejvýše rychlostí maximálního signálu. Teprve dál za čelem vlny se ustálí situace, kdy se vám zdá, že se vlny předbíhají. Ale ani zde toho nelze využít pro posílání signálu rychlejšího než maximální signál.

V těchto diskuzích se vyskytují pojmy jako fázová rychlost a grupová rychlost, které padly na přednášce. Tyto jevy můžou být zajímavé z různých hledisek. Ale nic nemění na tom, že veškeré elektromagnetické vlnění lze chápat jako superpozici elektromagnetického pole ve vakuu šířícího se rychlostí předepsanou základními Maxwellovými rovnicemi. Všechny indexy lomu, disperze, fázové a grupové rychlosti jsou jen nadstavba popisující složitější interakce s prostředím. Nemění však nic na fundamentální rychlosti c zakódované přímo v Maxwellových rovnicích.

Jinak výroky přednášejícího, že rychlost světla ve vakuu není dobře definovaná veličina (30:17, 30:55), dokumentují neznalost teorie elektromagnetického pole. Elektromagnetismus je fyzikální teorie popisující veškeré elektrické a magnetické jevy včetně šíření světla. Rychlost tohoto šíření v jinak prázdném prostředí je zakódovaná v Maxwellových rovnicích. S pomocí Maxwellových rovnic jsme vyrobili rádia, televize, mobily. Plácat, že rychlost světla ve vakuu nemá dobrý význam, je prostě ostuda.

8) Rychlost světla v OTR [29:52]

Tvrzení, že rychlost světla v OTR je díky zakřivení prostoročasu na různých místech různá, není pravda. Alespoň pokud se rychlost světla tradičně chápeme "vůči lokální inerciální soustavě". Taková rychlost je pořád stejná - jak daleko, tak blízko černá díry.

Pokud začneme mluvit o rychlosti světla vůči libovolné soustavě, tak toho o její hodnotě moc říci nemůžeme. Jelikož v obecné soustavě si mohu nadefinovat souřadnice jak chci, souřadnicová hodnota rychlosti světla může být libovolná. Pokud chci ale mluvit o skutečné délce za skutečný čas s rozumnou synchronizací hodin – tj. o rychlosti vůči lokální inerciální soustavě – tak ta je pořád stejná.

9) Rychlosti světla, inerciální soustavy a velikost rychlosti světla

Při seznamováním se se STR může být velmi matoucí, co znamená, že rychlost světla je ve všech soustavách 299792458 m/s přesně. Když se podíváte na definici jednotek v SI soustavě, zjistíte, že tato hodnota je zvolená! Jaký je pak netriviální obsah toho, že říkáme, že rychlost světla je konstantní - když jsme si to sami zvolili?

Netriviální je, že si to tak zvolit můžeme! Že to lze!

Přesné tvrzení zní: Rychlost světla ve všech inerciálních soustavách je stejná. Ještě přesněji, tvrzení říká: Rychlost světla lze ve všech inerciálních soustavách zvolit stejně.

V předchozím komentáři 6 jsem vysvětlil, že nám ve skutečnosti nejde o rychlost konkrétně světla. Jde nám o maximální rychlost fyzikálního signálu. To, že se světlo ve vakuu šíří zrovna touto maximální rychlostí, je pouze konkrétní realizace maximálního signálu. Nicméně je to velmi užitečná skutečnost, protože světlo umíme snadno vyrábět. Ale při budování teorie prostoročasu je podstatné, že se jedná o maximálně rychlý signál.

Tvrzení o konstantnosti rychlosti světla vůči inerciálním soustavám naleznete ve všech popularizačních textech. Ne vždy ale naleznete vysvětlení, co že to ty inerciální soustavy jsou a jak v nich rychlost měříme. A jak to, že si hodnotu rychlosti světla můžeme zvolit?

Stručné vysvětlení je:

Inerciální soustavy jsou soustavy rovnoměrně přímočaře pohybujících se pozorovatelů, kteří vůči sobě stojí a kteří se "dobře" dohodli na tom, jak budou měřit vzdálenosti a časy.

Ukazuje se, že tyto soustavy jsou si z hlediska fyzikálních zákonů ekvivalentní.

Jakýkoli experiment, který můžete připravit v jedné takové soustavě, můžete se stejným výsledkem připravit i v ostatních inerciálních soustavách. Tomu se říká princip relativity a víme o něm již od Newtona.

Einstein si uvědomil, že existence konečného maximálního signálu znamená, že tento signál musí vypadat (co se týče rychlosti) stejně ve všech inerciálních soustavách.

To je však nekonzistentní s Galileovými transformacemi (transformace mezi inerciálními souřadnicemi v newtonovské fyzice). Proto musel použít Lorentzovy transformace. Konkrétně se ukazuje, že navzájem se pohybující inerciální soustavy nemohou používat stejný čas. Žádná rozumná volba jednoho společného času neexistuje.

Díky odlišnému způsobu měření času pak je možné, že hodnota rychlosti maximálního signálu je ve všech inerciálních soustavách stejná. Maximální signál tak žádnou z inerciálních soustav nepreferuje.

O něco podrobněji:

Inerciálních soustav je spousta. Tyto soustavy mohou být vůči sobě posunuté, otočené; a hlavně, mohou se vůči sobě rovnoměrně přímočaře pohybovat.

Při definici inerciální soustavy je potřeba rozebrat onu "dobrou" volbu měření vzdáleností a času. Inerciální pozorovatelé si většinou zvolí 3 prostorové souřadnice a jednu časovou souřadnici, tzv. inerciální čas. Tyto souřadnice si v každé soustavě zvolí podle stejných pravidel. Tj. např. budou používat na sebe kolmé prostorové osy se stejnými jednotkami (kartézskou soustavu) a rozumně synchronizované hodiny.

V moderních výkladech STR se většinou při budování inerciální soustavy již přímo používá maximální signál. Myšlenka je, že každý pozorovatel umí měřit svůj čas (čas, podle kterého stárne, tluče mu srdce, podle kterého mu tikají blízké hodiny, kývají kyvadélka, kmitají pružinky, vrtí se/pulzují atomy). A pomocí maximálního signálu může komunikovat s dalšími pozorovateli kolem něj. Sousední pozorovatelé si mohou své hodiny porovnávat. Mohou si zavést vzdálenost pomocí doby, za jakou tuto vzdálenost urazí maximální signál. Mohou si synchronizovat hodiny. Teprve souhrn takovýchto předpisů definuje, co je inerciální soustava.

V tomto kontextu volbou numerické hodnoty rychlosti světla pouze říkáme, jak spolu souvisí veličina vzdálenosti (metr) a času (sekunda). V SI se nezávisle definuje sekunda a pomocí rychlosti světla se pak dodefinuje, co je metr. Fyzici zabývající se velkými rychlostmi, energiemi či vzdálenostmi často volí jiné jednotky. Zvolí si, že rychlost světla je 1. Neboli, čas a vzdálenost měří ve stejných jednotkách. Nejznámější příklad je 1 světlený rok, což je jednotka vzdálenosti odvozená od jednotky času 1 rok. Rychlost světla je pak

1 světelný rok/rok. (Naopak 1 metr je hodně krátký čas - v sekundách je to cca 3.3 ns.) To, že mohu zvolit svoji hodnotu rychlosti světla, stojí na existenci maximálního signálu.

Ano, v celé této konstrukci inerciální pozorovatelé zásadně využívají existenci maximálního signálu. Maximálního signálu, na kterém se všichni shodnou.

To, že se všichni shodnou, je důležitá vlastnost! Uvědomme si: jelikož se jedná o nejrychlejší signál, žádný jiný nejrychlejší signál ho nemůže předběhnout. To znamená, že se všechny maximální signály šíří stejně. Šíří se nezávisí na rychlosti zdroje. Nelze ho "postrčit", aby letěl rychleji. Nejrychlejší znamená nejrychlejší pro všechny. Proto se ve všech inerciálních soustavách musí (co se týče rychlosti) jevit maximální signál stejně.

Podobná konstrukce nefunguje např. se zvukem. U něj totiž závisí na tom, jak se pohybuje nosič signálu - vzduch. A inerciální soustavy nejsou vůči vzduchu rovnocenné - v jedné z nich je vzduch v klidu.

Konstantní rychlost světla vůči inerciální soustavě je tak do velké míry součást definice inerciální soustavy. Netriviální je, že lze zavést inerciální soustavy tak, aby ve všech vypadal maximální signál stejně.

Jediná logická alternativa je, že by maximální signál byl nekonečně velký. Že žádné omezení na rychlost šíření neexistuje. Toto předpokládala newtonovská fyzika. Experimentální zkušenost ale ukazuje, že v našem světě má maximálně signál konečnou rychlost.

10) Kontrakce délek a dilatace času

Všichni znají vzorečky pro kontrakci délek a dilataci času. Ne vždy se ale tyto vzorce správně interpretují. Často se objevují výroky, že tyto jevy jsou jen "zdánlivé" a závisí více na vztahu pozorovatele a pozorovaného než na samotném pozorovaném jevu. Že se jedná o něco podobného jako je perspektiva či optické klamy (brčko ve sklenici).

Tyto komentáře jsou v jistém ohledu opodstatněné. Tyto dva jevy opravdu popisují situace, kdy je důležitý vztah pozorovaného a pozorovatele. Ale ony nás takové situace zajímají velmi často a proto jsou i tyto "zdánlivé" jevy velmi užitečné a důležité.

Dilatace času říká, jaký je vztah vlastního času pozorovatele pohybujícího se rovnoměrně mezi dvěma událostmi a souřadnicového času mezi těmito událostmi v inerciální soustavě, ze které pozorovatele sledujeme.

Představme si, že sedíme ve své inerciální soustavě a kolem nás letí malá raketa. Jak porovnáme náš čas s časem měřeným na raketě? Samozřejmě umíme měřit svůj vlastní čas (naivně: např. počítáme počet tepů svého srdce - a když nás nikdo nerozčiluje tak to dobře měří čas). Stejně tak pozorovatel v raketě umí měřit svůj vlastní čas. Dělá to stejně, jako to děláme my. Jen v letící raketě.

Jak to ale porovnat? Můžeme si zapsat čas na našich hodinách, když raketa prolétá přímo kolem nás. Ale pokud raketa letí rovnoměrně přímočaře, tak už kolem nás znovu nikdy nepoletí. Můžeme ale pozorovat její čas na jiném místě naší inerciální soustavy. Požádáme kolegyni z naší soustavy (která má s námi synchronizované hodiny), aby např. kilometr od nás odečetla čas na svých hodinách v okamžiku, kdy kolem ní raketa proletí. Pak uděláme rozdíl mezi časem zapsaným kolegyní a námi a dostaneme čas T mezi těmi dvěma průlety v naší soustavě. Pozorovatel v raketě si odečte svůj čas T_o mezi oběma průlety. Pro něj se průlety staly "na stejném místě" - sedí pořád ve své raketě. Nemusí tak do hry zapojovat žádné kolegy.

Fakt je, že takto změřené časy T a T_o budou různé. Vztah mezi nimi bude

$$T = \gamma\, T_o$$

(viz komentář 11), kde γ je gama-faktor závisející na rychlosti. Tento faktor je vždy větší než jedna.

Že jsou oba časy různé, není tak překvapivé. Jejich definice je dost odlišná. Jednou se jedná o vlastní čas jednoho pozorovatele, v druhém případě o rozdíl časů dvou pozorovatelů, kteří se spolu předem dohodli na synchronizaci hodin. Tato synchronizace přitom souvisí se soustavou a je zcela nezávislá na raketě.

Vztah obou časů v podstatě říká, kolik je projekce vlastního času pozorovatele v raketě na časovou osu inerciální soustavy. V tomto smyslu se čas T jeví jen jako jakási pomocná veličina. Jedná se "pouze" o projekci na osu naší soustavy.

V euklidovské analogii odpovídá čas T_o skutečné délce nějaké úsečky a T velikosti projekce této úsečky na zvolený směr. V euklidovské geometrii je projekce vždy kratší než skutečná délka. V Minkowského geometrii tomu je naopak, projekce T je vždy delší než vlastní čas T_o. Může za to modifikace Pythagorovy věty v Mikowského geometrii.

Podobně kontrakce délky je dána způsobem jak délku měříme. Princip je popsán v komentáři 4 k žebříku v garáži. Euklidovsky to odpovídá měření šířky trámu měřeného šikmo přes trám.

Kritici STR často zakládají svojí kritiku na rozčarování, že některé veličiny začínají být více závislé na definici a použití. A po tomto zjištění tvrdí, že všechny relativistické efekty jsou jenom nějaké čarování s definicemi. Není to pravda. I pomocí těchto "zdánlivých" veličin dopočítáváme jasně definované a měřitelné výsledky.

Je ale i spousta jevů, které tyto "zdánlivé" veličiny, definované "jen" vůči soustavě, ke svému vysvětlení nepotřebují. Situace popisovaná v paradoxu dvojčat je z těchto situací asi nejznámější. Fakt, že dvojčata, která se setkají po netriviálním pohybu jednoho z nich, nejsou stejně stará, nezávisí na žádné volbě soustavy. To je absolutně formulovatelný závěr ověřený experimenty.

11) "Kde udělal Einstein chybu?" [39:35]

Nyní k odvození vzorců pro dilataci času a kontrakci délek. Přednášející v čase 40:00 předkládá své vysvětlení "Kde udělal Einstein chybu?" Napíše skoro správně Lorentzovu transformaci, která spojuje souřadnice t, x a t', x' dvou inerciálních soustav (u všech časů chybí konstanta c, jinak by rovnice neměly správný rozměr – to je ale detail). Všímá si, že se v transformacích mixují jak čas, tak poloha (to je, jak jsme již diskutovali, díky odlišné synchronizaci času). A prohlašuje, že to je špatně, protože dilatace času dává vztah jen mezi časy a kontrakce délek jen mezi délkami.

To jsou ale výroky o úplně jiných veličinách. Lorentzovy transformace dávají vztah souřadnic dvou inerciálních soustav. Dilatace času a kontrakce času popisují dvě konkrétní situace, ve kterých se porovnávají specificky definované veličiny. Tvrzení přednášejícího zcela ignorují skutečný význam uvedených veličin a dokumentují nepochopení, co Lorentzovy transformace a vztahy pro dilataci a kontrakci říkají.

V přednášce následuje výklad (42:18) mluvící o ortogonalizaci a diagonalizaci, který nemá hlavu ani patu a obsahuje elementární matematické chyby. K němu se vrátím v následujícím komentáři 12.

Pak přednášející tvrdí (49:00), že Einstein dilataci a kontrakci odvodil tak, že škrtnul nediagonální členy v Lorentzově transformaci a ad hoc změnil jeden diagonální člen. A že to Einstein odůvodnil nějakou "podivnou" intuicí, ve které předpokládá, že jedno x je "na stejném místě". A kvůli determinantu změnil jeden diagonální člen z γ na $1/\gamma$. "Takovéto úvahy se přeci dělat nesmí!" horlí přednášející.

Pak přednášející dodá (50:57), že Einstein je ale bravurní myslitel a tak když budete jeho odvození číst, tak tam chybu nenajdete.

Ano, v Einsteinově odvození chybu nenajdete, protože nic z popisovaných nesmyslů Einstein nikdy neříkal a nenapsal. Přednášející si chybné odvození prostě vymyslel a vsunul je Einsteinovy do úst. Uvedená tvrzení jsou zcela nehorázná a nepravdivá. Stejně jako tvrzení, že všichni další fyzici se jen "opičí" a bez invence zmíněné vysvětlení opisují (49:00).

Ono to ani není odvození, protože to, co přednášející v tomto kontextu označuje za dilataci a kontrakci, nedává smysl. Přednášející nepochopil, co je dilatace času a kontrakce délek, nepochopil smysl Lorentzovy transformace, vymyslel si náhodné úpravy vedoucí od jedněch vzorečků z učebnic k jiným vzorečkům z učebnic a tyto úpravy zkritizoval.

Nebo vám snad něco, co v této pasáži přednášející říká, dává smysl?

Jak se tedy např. dilatace času opravdu odvozuje? Samozřejmě, lze ji odvodit z Lorentzových transformací. Pojďme na to postupně.

Lorentzovy transformace popisují překlad souřadnic události (bodu v prostoročase) v jedné inerciální soustavě na souřadnice v druhé inerciální soustavě. Tento překlad funguje pro jakoukoli událost.

Význam dilatace času jsem podrobně popsal v předchozím komentáři 10. Teď si můžeme na základě této definice odvodit konkrétní vzoreček. Dilatace porovnává vlastní čas T_0 letícího pozorovatele (rakety v předchozím komentáři) a souřadnicový čas T stojící soustavy. Vztah pro dilataci dostaneme (přesně podle Einsteina) z Lorentzových transformací následovně:

S letícím pozorovatelem v raketě spojíme soustavu t', x'. Naší stojící soustavu označíme t, x. Letící pozorovatel sedí v počátku své soustavy a proto je jeho poloha pořád $x' = 0$. Kolem počátku naší soustavy prolétá přesně ve svém čase $t' = 0$. Kolem druhé pozorovatelky v naší soustavě prolétne raketa po čase T_0 (měřeno v raketě). Tento vlastní čas T_0 je však přímo čas měřený v inerciální soustavě rakety, čili $T_0 = t' - 0$. Souřadnice míjení rakety s druhou pozorovatelkou tedy jsou $t' = T_0$ a $x' = 0$.

V naší stojící soustavě raketa nejdříve prolétá kolem našeho počátku $t = 0$, $x = 0$ (což se lorentzovsky transformuje na $t' = 0$, $x' = 0$). Kolem naší kolegyně stojící na nějakém konkrétním x (viz komentář 10) prolétne v čase t. Naše doba T mezi průlety je tak $T = t - 0$. Jelikož se raketa se pohybuje vůči naší soustavě rychlostí v, máme $x = v\,T$.

Souřadnicemi minutí rakety a kolegyně tak jsou $t' = T_0$, $x' = 0$ v soustavě rakety a $t = T$, $x = v\,T$ v naší soustavě. Tyto souřadnice jsou spojeny Lorentzovou transformací. Z požadavku $x' = 0$ dostaneme, že $x = \beta\, ct$ (používám Lorentzovy transformace uvedené např. v čase 42:30, pouze jsem přidal chybějící c u všech t-éček – to tam prostě má být). Dostáváme $\beta = v/c$ v souhlase s tím, co je v přednášce uvedeno. Z druhé rovnice Lorentzovy transformace dostaneme

$ct' = \gamma\, ct - \gamma\, \beta\, v\, t = 1/\gamma\, ct$.

Dostáváme tak $t' = t/\gamma$ neboli vzoreček pro dilataci času

$T = \gamma\, T_o$.

(V úpravě rovnice výše jsme použili vyjádření γ pomocí rychlosti v uvedené v přednášce.)

Odvození by bylo jednodušší, kdybychom použili inverzní Lorentzovu transformaci

$ct = \gamma\, ct' + \gamma\, \beta\, x'$,
$x = \beta\, \gamma\, ct' + \gamma\, x'$.

Zde stačí v první rovnici prostě položit $x' = 0$ a dostáváme $t = \gamma\, t'$, tj. opět

$T = \gamma\, T_o$.

Druhý postup asi nejvíc připomíná "škrtání" nediagonálního členu, které používá přednášející. Ale my jsme nediagonální člen spolu s Einsteinem neškrtli proto, že by se nám nelíbil. Člen vypadl, protože letící pozorovatel sedí v počátku své soustavy a má neustále $x' = 0$. Využili jsme vlastnost konkrétní situace, se kterou je spojena dilatace času.

Odvození vzorce pro dilataci je přímočaré - pokud víme, co odvozujeme. Vzoreček pro dilataci popisuje pouze uvedenou situaci. Pokud bychom chtěli transformaci časů pro složitější situaci, museli bychom použít původní Lorentzovy transformace.

Podobně lze odvodit i kontrakce délek.

---

12) Zmatky kolem diagonalizace [42:18]

Nyní k zmatené pasáži (začínající 42:18) o diagonalizaci.

Dilatace ani kontrakce nemají absolutně nic společného s diagonalizací Lorentzovy transformace. Žádnou diagonalizací Lorentzovy transformace se vzorce pro dilataci a kontrakci neodvozují. Ani se neodečítají z metrického tenzoru, který by na diagonále obsahoval nějaké gama faktory.

Pasáž o diagonalizaci Lorentzovy transformace 1) nedává žádný smysl, 2) je matematicky špatně. Překvapuje mě, že přítomní matematici nezareagovali okamžitě. I když chápu, že zasahovat hned do přednášky nemusí být příjemné.

Lorentzova transformace je transformace mezi inerciálními soustavami zachovávající tvar Minkowského metriky (jak je správně uvedeno v čase 46:16). Takové transformace se nazývají pseudo-ortogonální (ortogonální ve smyslu grupy SO(1,3)). Nejedná se tedy o rotace (tvrzeno v 44:15) ale o pseudo-rotace (rotace v Minkowského geometrii) - ale to je jen názvosloví. Obecně, transformační matici nemá moc smysl diagonalizovat. Rozhodně to nepovede k dilataci času a kontrakci délek (jak se tvrdí v 42:55).

Ale jistě se můžeme o diagonalizaci pokusit. A ano, souhlasím s přednášejícím, že je to elementární operace, kterou by na půdě matematického ústavu měl zvládnou každý (43:36). Proč to tedy, k čertu, není uděláno správně? Proč je výsledek špatně? Diagonální tvar není a ani nemůže být jednotková matice 44:36! (Žádná nejednotková matice nemůže mít za diagonální tvar jednotkovou matici. Lineární algebra v prvním ročníku.)

Pokud se rozhodnu matici Lorentzovy transformace diagonalizovat, znamená to hledání vlastních vektorů a vlastních čísel. U rotací v euklidovském prostoru bych tak našel osu rotace (to je zachovávající se směr). V případě Lorentzových transformací též nalezneme invariantní směry. V rovině t-x to budou tzv. světelné směry, tj. směry, ve kterých se šíří maximální signál. To vlastně znovu ukazuje náš původní požadavek, že směr šíření maximálního signálu musí vypadat ve všech inerciálních soustavách stejně a transformace mezi nimi tyto směry musí zachovat.

Vlastní čísla (hodnoty na diagonále diagonalizované matice) jsou $\exp(u)$ a $\exp(-u)$ ve značení z času 44:25. Nebo $(1+\beta)\gamma$ a $(1-\beta)\gamma$ v řeči původních koeficientů β a γ. Přednášející tvrdí v diskuzi 1:32:20, že diagonalizaci provedl s těmito parametry. Ale jako výsledek uvádí chybně jednotkovou matici. Zdiagonalizovat matici a najít vlastní čísla je přitom opravdu triviální úkol, který dnes zvládne i každý software pro symbolické manipulace.

V čase 1:40:00 se přednášející opět rozčiluje, že diagonalizací nelze dostat na diagonále γ a $1/\gamma$. Ano nelze. Ale rozhodně nelze dostat jednotkovou matici. Na diagonále se dostanou čísla ve tvaru α a $1/\alpha$ kde $\alpha = \exp(u) = (1+\beta)\gamma$. Tyto čísla mají mimochodem význam při diskuzi Doplerova jevu. Říkají nám, jak se mění při Lorentzově transformaci energie fotonů.

---

13) K závěrům přednášky [1:04:58]

Zde budu stručný. Všechny body závěru uváděné přednášejícím jsou chybné.

Dilataci času, význam konstantnosti rychlosti světla, paradox dvojčat, paradox s žebříkem či "diagonalizaci" jsem probral podrobně výše a k paradoxu dvojčat se ještě vrátím.

Uváděné závěry o Doplerově jevu a Michelsonově-Morleyově experiment jsou též chybné, ale už nemám sílu se o nich rozepisovat. Na youtubovské diskuzní fórum by to příliš technické. Stačí ale jen trochu googlit a naleznete nespočet výkladů MM experimentu. Tvrdit, že experimentátoři v případě MM experimentu špatně pochopili teoretiky a naopak teoretici experimentátory je směšné. Vždyť se jedná o jeden z nejdiskutovanějších experimentů moderní fyziky.

Přednášející se v závěru znovu vrací (1:06:15) k paradoxu dvojčat a tvrdí, že jelikož vyvrátil dilataci času, tak neplatí ani tvrzení paradoxu dvojčat. Zazní (1:07:12): "Takže ve skutečnosti ve chvíli, kdy se ta dvojčata potkají, tak budou [mít] exaktně ten samý čas a to samé stáří."

TOTO NENÍ PRAVDA!

Přednášející se mýlí. Pokud se dvojčata pohybovala různým pohybem, budou při opětovném setkání různě stará.

To není výrok závislý na nějaké definici, vztažné soustavě či perspektivě. To je absolutní výrok měřený opravdu stářím oněch dvojčat. Když jedno z nich poletí daleko a rychle, dvojče, které zůstalo na Zemi, před návratem sourozence zestárne a umře. Dvojče z rakety po návratu vystoupí zestárlé jen o pár let.

Ano, neprovedli jsme tento experiment s lidmi. Nemáme tak rychlé rakety. Ale provedli jsme tento experiment s částicemi. Jednu jsme si nechali doma a druhou poslali urychlovačem na cestu. Ta doma se nám po čase rozpadla – protože i částice "umírají". Její dvojče ale krouží dál urychlovačem a může mnohem později z urychlovače vystoupit "mladé a veselé", přitom dávno po rozpadu první částice.

Jelikož paradox dvojčat opravdu podchycuje velmi netriviální vlastnost našeho světa, věnuji mu níže ještě jedenu dlouhou poznámku – komentář 15.

Komentář 19 dále věnuji vztahu STR a OTR. V závěru přednášky opět zaznívá mylné tvrzení, že k vysvětlení paradoxu dvojčat je potřeba obecná teorie relativity (1:08:10). Není tomu tak.

---

14) Paradoxy STR [1:07:21, 1:08:00]

V kontextu STR se uvádí spousta "paradoxů". Většinou se jedná o na první pohled sporná tvrzení. Jejich zdánlivá spornost pramení z konfliktu naší nerelativistické intuice s nově chápanými pojmy ve STR. Většinou se jedná o nedorozumění v definicích a používání pojmů.

Není pravda, že by se tyto paradoxy přehlížely. Naopak, jsou velmi populární a na většině úvodních přednášek STR se diskutují. Pedagogové je rádi používají při výkladu STR, aby na nich vysvětlili, jak se má správně relativisticky uvažovat. Nikdo nechce skutečně zavírat dlouhé auto do krátké garáže s pomocí kontrakce délek. Ale na tomto případě lze zajímavě vysvětlit, co kontrakce délek opravdu znamená. Stejně tak nám nejde o relativistickou myš padající do kanálu, relativistický rytířský souboj s kopími či o podepisování závěti v hodně rychle jedoucím vlaku. Jenže na těchto "paradoxech" se pěkně vysvětluje, jak se mají pojmy STR správně používat.

Podívejte se na obsah kurzů na MFF, uvidíte sami: http://utf.mff.cuni.cz/vyuka/NOFY023/

15) Paradox dvojčat

Paradox dvojčat je jedno z nejúžasnějších pozorování našeho světa, které přesahuje svými důsledky za hranice fyziky. Ano, tento jev ukazuje, že čas má jiný charakter, než jsme si dlouho mysleli. Neexistuje globální univerzální absolutní čas společný pro všechny. Ne, každá částice, každé těleso, každý pozorovatel má svůj vlastní čas.

Mylnou představu o univerzálním charakteru času jsme si vytvořili proto, že skoro veškerá naše běžná zkušenost pracuje s objekty, které se vůči sobě pohybují příliš pomalu. U takových objektů se jejich čas liší jen velmi málo.

Po té, co jsme ale z klece pomalých rychlostí vystoupili, zjistili jsme, že to jak objektům ubíhá čas (jak kmitají, jak pulzují, jak se točí či co vše mohou dělat - a pro nás je asi nejdůležitější: jak stárneme) závisí na pohybu v prostoročasu. Závisí to na tom, jak se prostoročasem "prodíráme". Množství času, které částice vyčerpá, které pozorovatel prožije, závisí na trajektorii v prostoročase.

To jsou dnes již nesčetněkrát ověřená experimentální fakta. Přestože přednášející několikrát tvrdil, že účastníci paradoxu dvojčat budou po návratu všichni stejně staří (např. závěrečný výrok 1:53:44), není to pravda! Pokud se dva pozorovatelé (ve skutečně realizovaných experimentech se jedná o neživá tělesa, částice) rozletí v jednom okamžiku z jednoho místa a pak se v jiný okamžik opět potkají na jednom místě, prožijí během tohoto experimentu obecně různé množství času. V případě lidí by opravdu jedno dvojče mohlo být kmet a druhé stále mladice; v případě částic, jedna by se dávno rozpadla a druhá to nerozpadnutá "přežila".

Kdo z těchto pozorovatelů/částic nažije více a kdo méně času závisí na pohybu pozorovatelů/částic. Není zas tak důležité, zda zrychlují málo či hodně, zda letí doprava či doleva. Výsledek závisí na globálním charakteru trajektorie. Obecné pravidlo v STR je, že nejvíc času nažije pozorovatel/částice bez zrychlení. To ale neznamená, že příčinou jiné míry zestárnutí pozorovatelů by bylo přímo zrychlení.

Intuitivně si lze představit, že čas objektu je něco jako délka jeho prostoročasové trajektorie. Akorát tuto délku musíme počítat pomocí prostoročasové geometrie. V případě STR se jedná o Minkowského prostoročas, jehož geometrie je dána Minkowského metrikou. Tato metrika sice hodně zrovnoprávnila prostor a čas, přesto v ní ale rozdíl mezi časovými a prostorovými směry zůstal. Minkowského délka se tak nepočítá stejně jako v euklidovském prostoru, ale do hry vstupují nějaká odlišná znaménka v časových směrech ve vzorečku analogickém k Pythagorově větě. Proto číselně vycházejí některé závěry jinak, než bychom si mohli myslet při zkoumání euklidovských analogií. Přesto je porovnání Minkowského prostoročasu a obyčejné euklidovské geometrie velmi užitečné.

V euklidovské analogii paradox dvojčat odpovídá následující situaci: Představme si, že nás zajímá, kolik toho ujdeme při cestě z jednoho města do druhého. Počet kroků samozřejmě závisí na tom, jakou cestu si zvolíme. Nejkratší cesta bude přímá cesta - ta, na které nebudeme vůbec zatáčet. Ale můžeme se rozhodnout hodně kličkovat. To většinou znamená, že ujdeme delší cestu. Ale ne nutně o moc. Mnohem delší cestu můžeme např. ujít, pokud vyrazíme špatným směrem a po dlouhé přímé cestě si toho všimneme, jednou se otočíme zpět do správného směru a vyrazíme do cíle. Ujdeme mnohem víc, ale zatočili jsme jen jednou.

V tomto případě jasně rozumíme tomu, že důležitá je délka křivky spojující obě města. Nejkratší je přímá křivka. Ostatní jsou delší. Ale délku lze "nasbírat" různým způsobem. Buď kličkováním nebo chozením po obcházkách.

Je též jasné, že pokud si vymyslíme dvě cesty, které budou navzájem symetrické, tak budou i stejně dlouhé.

V Minkowského prostoročasu to s trajektoriemi funguje velmi podobně. Čas podél nich mezi startem a cílem závisí na tom, jak jsou "prostoročasově" dlouhé. Jelikož je ale tato prostoročasová geometrie trochu jiná než ta euklidovská, některé závěry se změní. Rovná trajektorie (trajektorie bez zrychlení, tj. rovnoměrně přímočarý pohyb) má vždy **nejdelší** čas (oproti nejkratší vzdálenosti v euklidovské geometrii). Ostatní trajektorie jsou časově kratší. Čím víc se budeme blížit svojí rychlostí k pohybu maximálního signálu, tím méně času mezi startem a cílem nažijeme. Maximální signál by v tomto smyslu "nenažil" žádný čas. (Maximální rychlostí se ale mohu pohybovat pouze částice nulové klidové hmoty, nám se to proto nikdy nepovede.)

Toto je asi nejintuitivnější způsob, jak různým časům rozumět. A taky to nejdůležitější pro pochopení podstaty paradoxu dvojčat.

Vše ostatní je již technika, jak vlastní čas spočítat. Z euklidovské analogie je nám jasné, že počítání délky složitých křivek bude obtížné. Typicky musíte spočíst tečný vektor podél křivky ve zvolené parametrizaci, pak spočíst jeho délku (pomocí Minkowského metriky) a tu zintegrovat podél křivky. Těžké, ale umíme to.

Mnohem jednodušší je zvolit si jednoduchou křivku. V euklidovské analogii si můžeme např. zvolit 1) úsečku spojující obě města nebo 2) cestu skládající se z dvou úseček či 3) oblouk kružnice. Tyto příklady bychom upočítali se středoškolskou geometrií.

Ze stejných důvodů v diskuzi paradoxu dvojčat si při popularizaci skoro vždy zvolíme 1) přímou trajektorii, 2) jednou zalomenou trajektorii a (když jsme technicky odvážní) 3) něco jako Minkowského kružnici. První dva případy mají výhodu, že se pohyb skládá z rovnoměrně přímočarých úseků a v těchto úsecích si můžeme zvolit inerciální soustavu sledující pohybující se dvojče. Samozřejmě v případě 2) máme "otočku", kde se tato přizpůsobená inerciální soustava musí změnit.

Nechci tady teď provádět technický výpočet. Ten je nakonec velmi jednoduchý a naleznete ho v každém kurzu STR (např. viz odkazy na kurzy na MFF). Uvedu jen několik poznámek.

- Nemusíme používat přizpůsobené inerciální soustavy. Celý výpočet vlastního času jak trajektorie 1), tak 2) lze provést v libovolné inerciální soustavě. A vždy vyjde stejný výsledek: přímá trajektorie bude časově delší než ta zahnutá. Výhoda přizpůsobených inerciálních soustav je, že v nich se vyhnu Minkowského Pythagorově větě, protože si zvolím soustavu tak, že částice letí podél osy soustavy. Představte si to v euklidovské analogii. Délky úseček mohu spočítat v libovolné kartézské soustavě pomocí Pythagorovy věty. Nebo si můžu natočit soustavu tak, aby jedna osa byla podél zkoumané úsečky. Pak stačí odměřit délku úsečky na ose. Pro pohyb 2) ale musím použit dvě soustavy a délky správně posčítat.

- Nemusíme používat vzorečky pro dilataci času. Ale můžeme. Musíme ale rozumět, co nám přesně říkají. Tyto vzorečky říkají, jak se projektuje (časová) délka úsečky na nepřizpůsobenou soustavu. Když chci vše spočítat v jedné soustavě, tak se samozřejmě takový vzoreček hodí. Ale lze použít i přímo Minkowského Pythagorovu větu.

- Nejedná se o žádný skutečný logický "paradox". Paradoxnost by měla být v tom, že "přece vše je relativní a trajektorie 1) a 2) by tak měly být ekvivalentní a proto nemůže jeden z pozorovatelů nažít více času". Takto formulovaná úvaha je ale chybná. Různé trajektorie obecně nejsou ekvivalentní. To je jako bychom tvrdili, že jedna strana trojúhelníku by měla být ekvivalentní zbývajícím dvěma stranám trojúhelníku a proto by dvě cesty po těchto stranách měly být stejně dlouhé. Proč? To je přece jasně chybná úvaha.

- Pokud ale vymyslím dvě trajektorie, které jsou symetrické (jedna raketa doprava, jedna raketa doleva, a pak zpět), tak tyto trajektorie budou časově stejně dlouhé. Nicméně klasická situace z paradoxu dvojčat mluví o jednom stojícím pozorovateli a druhém netriviálně se pohybujícím. Pak je přímá trajektorie časově nejdelší.

16) Paradox dvojčat v uzavřeném vesmíru [1:20:20]

Zajímavá otázka padla v diskuzi v čase 1:20:20. Co kdybychom porovnávali dvě přímé trajektorie, které by se rozletěly a později potkaly díky tomu, že vesmír je uzavřený? Tady ani jedna z raket nezrychluje, obě se pohybují celou dobu přímo. Uplyne mezi jejich setkáními stejný čas? Odpověď závisí na konkrétní geometrii uzavřeného vesmíru a na "směru" trajektorií vůči tomuto vesmíru.

Abychom zůstali v matematice STR, představme si obyčejný Minkowského prostoročas, ve kterém by byly body o souřadnici $x = -1$ AU ztotožněny s body o souřadnici $x = +1$ AU a to vždy ve stejném čase t. Vyrobíme tak jakýsi Minkowského válec s periodickou prostorovou souřadnicí. Pokud na tento válec nakreslíme dvě přímky směřující v časupodobném směru začínající v jednom bodě, tyto přímky se v budoucnosti znovu protnou. Oběhnou válec dokola a tam se znovu potkají. A my se ptáme, zda budou oba úseky mezi průsečíky stejně časově dlouhé nebo ne?

Pokud zvolíme obě přímky symetricky, pozorovatelé zestárnou stejně. V soustavě, ve které jsme válec slepovali, to znamená, že pokud se obě rakety pohybují stejnou rychlostí, jedna nalevo a druhá napravo, tak se potkají ve stejném vlastním čase. Pokud ale jeden pozorovatel bude v klidu v té soustavě, ve které válec vyrábíme, a druhý se bude v této soustavě pohybovat, tak stojící pozorovatel bude při znovu-setkání opět starší.

Zkuste si to představit na obyčejném euklidovském válci. Nakreslete si tam různé přímky a rozmyslete si, jak jsou dlouhé úseky mezi jejich průsečíky.

Ve zkoumaném případě nabourává symetrii prostoročasu ono slepení. Neplatí zde již globální princip relativity. Všechny inerciální soustavy už nejsou rovnoprávné. Slepení jsme provedli vůči jedné vybrané soustavě a ta se tak stává výjimečná.

17) Užití STR v GPS [1:24:30]

V diskuzi padl dotaz (1:24:30), zda není STR potřeba - a tedy i potvrzována - v GPS. Přednášející správně uvedl, že GPS používá opravy na obecnou teorii relativity. Ale GPS neužívá je korekce na gravitační pole. Při synchronizaci hodin a dopočítávání polohy jsou srovnatelně důležité i efekty související s korekcí na rychlost řádu v^2/c^2. Což jsou typicky efekty, se kterými se potkáváme v STR. Čili ano, funkčnost GPS je založena i na užití speciálně relativistických efektů.

Tvářit se, že OTR je v pořádku a STR ne, je navíc nekonzistentní. STR popisuje lokální chování OTR. A Minkowského prostoročas STR je speciální příklad řešení rovnic OTR. Nemůžete mít správně OTR a chybně STR.

18) Miony, miony, ...

V diskuzi v čase 1:30:00 přednášející zcela neopodstatněně odmítá standardní experimenty s miony ukazujících potřebu STR.

Příklad s mionovou magnetickou pastí přesně dokumentuje paradox dvojčat. To, že jsou miony urychlené (běhají po kružnici), neznamená, že nemůžu použít STR. Samozřejmě, že můžu! Řešit obecný pohyb částic pohybujících se velkými rychlostmi je základní úloha relativistické mechaniky. To, že se částice pohybuje zrychleně, není problém. Máme pro to rovnice, které nám říkají, jak zrychleně se má pohybovat.

STR pouze předpokládá, že v experimentu nehraje roli gravitace a že ho celý mohu popsat z inerciální soustavy (v tomto případě z laboratoře).

A zpochybňovat chování mionů pod vlivem magnetického pole je též úsměvné. Čím si sakra myslíte, že se fyzici v CERNU po desetiletí zabývají? Že by pohybem částic v magnetickém poli?

Druhý příklad jsou miony vzniklé při dopadu kosmického záření do atmosféry. Takový mion se pohybuje velmi rychle k Zemi. Ale ani touto rychlostí by podle nerelativistického pohledu neměl doletět dále, než jen pár stovek metrů. On ale běžně ulétne několik kilometrů. Jak to? Protože v našem světě funguje STR.

Můžeme nabídnout dvě (navzájem konzistentní) vysvětlení z hlediska soustavy Země a soustavy mionu.

1) Mion má k dispozici krátkou dobu života $T_o = 2.2$ μs. Vůči soustavě Země se ale pohybuje rychlostí cca 99% rychlosti světla. Nerelativisticky bychom řekli, že může uletět kolem 660 m. Uvedená rychlost ale odpovídá gama-faktoru cca 8. Proto, díky dilataci času, v soustavě Země má na let dobu $T = \gamma\, T_o$, asi osmkrát delší. Za tuto dobu již ty kilometry ulétne.

2) Situaci můžeme také popsat z hlediska soustavy spojené s mionem. V této soustavě mion stojí a za dobu T_0 = 2.2 μs se rozpadne. Proti němu letí rychlostí 99% c Země. Díky kontrakci délek je ale dráha k Zemi zkrácená. Místo např. 5 km máme v soustavě mionu pouze 625 m (= 5 km / 8). O tolik stačí Země popoletět, než se mion rozpadne.

Ano, skutečný experiment je trochu složitější. Není ale neprůkazný, jak tvrdí přednášející. Poločas rozpadu není přesně čas, kdy se mion rozpadne. Ve skutečnosti měříme spoustu mionů a porovnáváme, kolik jich vidíme např. ve dvou kilometrech nad Zemí a kolik na Zemi. A ze zákona rozpadu spočteme, kolik by se jich mělo na této vzdálenosti rozpadnout. Naměřený výsledek je zcela v souladu s relativistickým výpočtem.

Jedná se o experiment, který mohou dělat studenti v praktiku. Mnohokrát zreprodukovaný a vyhodnocovaný. Říkat, že jde o neprůkaznou statistiku je prostě popírání faktů (1:30:40). Otevřete si příslušné články a přečtěte si, co a jak se měřilo. Včetně výsledků a konkrétních čísel.

Podrobnější výklad obou experimentů s odkazy na literaturu naleznete např. v mém kurzu STR na adrese: `http://utf.mff.cuni.cz/vyuka/NOFY023/2021/`.

19) STR, OTR a zrychlení

V přednášce se mnohokrát (např. 18:08,1:08:15,1:28:40,1:38:54) chybným způsobem tvrdí, že ve chvíli, kdy se v úvahách objeví zrychlení, tak se jedná o obecnou teorii relativity.

Toto není pravda a většina souvisejících výroků je značně zavádějících.

Speciální teorie relativity (STR) popisuje náš svět v oblastech, kde nehraje podstatnou roli gravitační pole. Obecná teorie relativity (OTR) popisuje případy, kdy gravitační pole je podstatné. Einsteinova OTR je překvapivá v tom, že gravitaci popisuje jako zakřivení prostoročasu. Tím je zajištěno, že gravitace působí univerzálně na všechno, co se v prostoročase pohybuje.

STR je speciální případ OTR. STR je konkrétní řešení Einsteinových rovnic OTR s triviálním gravitačním polem. Tomuto řešení též říkáme Minkowského prostoročas.

Je holá nepravda, že by "speciální relativisti" nepoužívali geometrický popis Minkowského prostoročasu a že by toto vymyslel a dělal pouze přednášející (viz 52:07 či 1:42:10). Ano, geometrickou interpretaci nezavedl Einstein, ale Minkowski. Ale Einstein ji velmi rychle adoptoval a geniálně zobecnil v OTR. Dnes je to zcela standardní jazyk STR, který je běžně používaný.

Ale jak je to tedy se zrychleným pohybem a STR? Vždyť princip ekvivalence říká, že zrychlený pohyb je v jistém smyslu ekvivalentní s gravitací.

Ano, takovou úvahu lze provést. A taková úvaha vskutku patří až do OTR. Říká nám, že i v STR lze použít některé technické výsledky OTR.

Ale nikdo nás nenutí to dělat. STR popisuje prostoročas bez gravitačního pole a většina fyziky si s tím vystačí. V STR jsme schopni popisovat jakékoli pohyby částic, ať už se pohybují s nebo bez zrychlení. STR samozřejmě má rovnici, která říká, jak souvisí zrychlení částice s působící sílou (analogie 2. Newtonova zákona, pouze správně vylepšená pro STR). V STR samozřejmě umíme počítat částice pohybující se např. s konstantním zrychlením (tzv. hyperbolický pohyb) či rovnoměrně po kružnici (zrychlení v radiálním směru). Výroky přednášejícího, že mezony pohybující se v magnetickém poli na kruhové dráze nelze popsat v STR (1:28:10) ukazují na nepochopení, čím se STR zabývá. Popis pohybů a fyzika částic v urychlovačích by bez STR nebyla možná.

Uznávám, že přesvědčení, že zrychlení patří do OTR, je častý omyl. Můžou za to často samotní fyzici, kteří se snaží popularizovat STR pro neodborníky. Abychom nemuseli vysvětlovat složitější matematiku, snažíme se při populárních přednáškách omezit jenom na jednoduché pohyby - a přímočarý rovnoměrný pohyb bez zrychlení je ten nejjednodušší. Ale umíme samozřejmě popisovat i pohyby složitější.

Další matoucí aspekt je, že v STR hodně zdůrazňujeme význam inerciálních soustav. Ano, STR skoro vždy popisujeme z hlediska inerciální soustavy. A inerciální soustavy jsou soustavy pozorovatelů pohybujících se bez zrychlení. To ale neznamená, že by tito pozorovatelé nemohli pozorovat a popisovat zrychlenou částici či nějakého pozorovatele letícího v zrychlující raketě. To je naopak základní úloha, která se v dynamice STR řeší.

Zkusím to přeformulovat pomocí euklidovské geometrické analogie, kterou jsem již několikrát použil výše. Vezměme si pro jednoduchost dvoudimenzionální příklad - abychom si to uměli představit. Analogie Minkowského prostoročasu je dvourozměrná euklidovská rovina. Absence gravitace v Minkowského prostoročasu odpovídá tomu, že rovina není zakřivená. Naopak prostoročas s gravitací by odpovídal pokřivené rovině.

Jednou z úloh geometrie jak v rovné rovině, tak v pokřivené rovině, je studovat křivky. Všechny křivky, ne jenom přímky. Chceme měřit jejich délky nebo říkat jak jsou přímé nebo křivé. To samozřejmě děláme i v rovné euklidovské rovině. I v rovné rovině umíme měřit délku kružnice, paraboly, hyperboly. Umíme říci, že křivky jsou či nejsou rovné, a jak moc jsou zakřivené. A k tomuto nepotřebujeme nic z geometrie křivých ploch. Na to nám stačí euklidovská geometrie roviny. Samozřejmě, když jste nuceni pracovat s křivými plochami, musíte se naučit lepší matematiku. Ale i v obyčejné euklidovské rovině umíme zkoumat křivé čáry.

A zcela analogicky v STR umíme proměřovat trajektorie obecně se pohybujících těles. Ty jsou v Minkowského prostoročasu popsané křivkami (tzv. světočáry). Umíme říci, jak jsou dlouhé (vlastní čas), jak jsou pokřivené (zrychlení). A umíme to bez odboček do OTR. Ano, pokud nám někdo zapne velké gravitační pole, pak se musíme naučit počítat tyto věci ve složitějších křivých prostoročasech. Ale pro popis částic v urychlovači to nepotřebujeme.

Ještě k použitelnosti STR na Zemi. Mohli bychom namítnout, že tady přeci gravitační pole máme a tak bychom STR neměli použít. Efekt pozemského gravitačního pole na relativisticky se pohybující částice je však tak zanedbatelný, že s klidným svědomím můžete použít STR. A ano, ti počtářsky zdatnější zkontrolovali, že započtením efektů OTR většinou nic důležitého nepřinese. (A když přinese, tak to umíme pomocí OTR zahrnout - viz např. komentář 17)

Je to zhruba tak, že přestože je povrch Země sféra, u sebe na zahradě pro proměřování záhonků můžete používat euklidovskou geometrii. Můžete si to představit tak, že k té obrovské kouli přiložíme na zahrádce rovinu a používáme geometrii roviny. Zjednodušení, které to přináší, je mnohem důležitější než chyby, kterých se dopouštíme. Podobně si v laboratoři ke gravitačně zakřivenému prostoročasu přikládáme rovný Minkowského prostoročas.

20) Čemu věřit?

S některými pasážemi plně souhlasím, např. 38:40: [o kritice STR] "... ale vychází to v časopisech, které jsou na chvostu, pokud porovnáváme časopisy, co se týče kvality nebo renomé. V dnešní době vám žádný kvalitní časopis, renomovaný, neopublikuje článek, který zpochybňuje speciální relativitu. To prostě není možný. To si žádný editor nevezme na triko. Takže to jsou časopisy třetí čtvrté kategorie."

Bohužel tento výrok je přednášejícím předkládán, jako dokumentace potlačování kritiky STR. Nevím, asi špatně rozumím významu slov "kvalita", "renomé", "na chvostu". Recenzní proces v odborných časopisech zaručuje, že se v nich publikují pouze vědecky hodnotné výsledky. Tvářit se, že existuje celosvětové spiknutí, které pokřivuje úsudek všech recenzentů a editorů a zabraňuje publikovat informaci o chybách STR, je opravdu paranoidní.

Je pravda, že se kritika STR objevuje znovu a znovu – tato přednáška je tomu příkladem. Ale racionálně myslící lidé, kteří jsou ochotni naslouchat logickým argumentům a věnují tomu dostatek času, teorii relativity pochopí a porozumí ji. STR je logicky konzistentní a je základem současné fyziky.

Pak je tu ale skupina lidí, kteří se vnitřně rozhodnou, že prostě STR nepřijmou. Chtějí stát v opozici. Nevím, možná je oslovuje pocit, že kritizují Einsteina? Potřebují se vydělit, mít nějakou vlastní pravdu? Nevím.

Ale odcituji další pasáž z přednášky (36:25):
"Diskuze [mezi zastánci a kritiky STR] trvala léta, ale nebyl tam žádný závěr, ty tábory se vzájemně nepřesvědčily. Dingle nepřesvědčil relativisty o tom, že ta relativita je chybná a oni nepřesvědčili jeho. Vtipný na tom je, že třeba Max Born - už měl v té době 80 let, už byl v pokročilém věku – a už potom ani nechtěl diskutovat s tím Dinglem a říkal, že ho to otravuje, že nemá čas trávit nad takovými neplodnými diskuzemi s člověkem, který tomu nerozumí, který je povrchní a který prostě nechápe principy relativity. A naopak Dingle se nenechal odbýt a stál si za svým."

Bože, jak já Maxi Bornovi rozumím.

Prohlásit, že diskuze mezi fyzikální komunitou a Dinglem skončila otevřená, protože se obě strany nepřesvědčily, je absurdní. Tady přeci nejde o tom donutit jednotlivce aby "odvolal". Pan Dingle si konec konců může tvrdit, co chce.

O vědeckých teoriích se totiž nehlasuje. Vědecké teorie se ověřují konzistencí, srovnáním s experimenty a použitelností v praxi. Teorie je užitečná, pokud vám pomůže orientovat se ve světě, chápat co vidíte a nakonec vymyslet na jejím základě fungující přístroje. Všechno toto STR vrchovatě naplňuje.

Ano nepotřebujete ji při procházce po parku. Ale televizi bez ní nevyrobíte. Šíření elektromagnetických vln je bytostně spojeno se STR. Maxwellovy rovnice bez ní nedávají smysl. Svět elementárních částic bez ní nepochopíte. STR je v základech kvantové teorie pole. A strukturu vesmíru bez ní také nepochopíte – STR je zakódovaná v lokální struktuře OTR, naší teorie gravitace.

Můžete prohlašovat, že věříte na astrologii, horoskopy, plochou Zem. Ale vsadíte na to své prostředky, své bydlení či dokonce svůj život? Budete se řídit podle horoskopu, pokud půjde opravdu o něco vážného? A budete odmítat relativitu, pokud půjde o něco vážného? Nasedli byste do letadla, které by se řídilo podle navigace, která by neměla relativistické korekce? Opravdu?

21) Proč tolik slov?

Rozsah mých komentářů k přednášce dr. Vavryčuka je samozřejmě neúměrný. Je mi jasné, že není jednoduché je číst. Není to ten správný formát pro vědeckou diskuzi.

Mým cílem není přesvědčit dr. Vavryčuka, že nemá pravdu. Nemyslím, že by se to ani po libovolně dlouhé diskuzi mohlo povést.

Tyto komentáře jsou pro posluchače kanálu LLionTV a posluchače diskutované přednášky. Tato přednáška je zavádějící a vědecky zcela pomýlená. Chtěl jsem na to upozornit.

Možná až nadměrné detaily uvádím proto, aby bylo vidět, že na předložené pochybnosti STR umí odpovídat.

Nebudu v této diskuzi na tomto fóru pokračovat. Není to správná platforma.

STR vykládáme v základních kurzech. Kurzy na MFF můžete nalézt na adrese: http://utf.mff.cuni.cz/vyuka/NOFY023/ STR jsme s kolegy popularizovali v mnoha přednáškách. Již jsem doporučil přednášky prof. Podolského či prof. Kulhánka. Na LLionTV naleznete celé série přednášek týkajících se struktury prostoru a času v rámci cyklu Fyzika jako dobrodružství poznání.

V popularizaci teorie relativity budeme i nadále pokračovat. Během jara 2024 uspořádáme na MFF další veřejnou přednášku o STR. Všichni jste srdečně zvaní a slibuji, že se pokusím zodpovědět na jakékoli Vaše otázky ohledně relativity.

01 02 03 04 05 06 07 08 09 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21