

# Lze vysvětlit paradox dvojčat v rámci speciální teorie relativity?

[Jiří Langer](#)

Publikováno: Vesmír 78, 490, [1999/9](#)

Obor: [Fyzika](#)

Rubrika: [Odpověď na každou otázku](#)

- Čemu se říká paradox dvojčat? Jedním **ze základních kamenů** speciální teorie relativity je relativní zpomalení (dilatace) času. Hodiny, které se pohybují vzhledem k inerciálnímu systému (v němž platí princip setrvačnosti), jdou pomaleji než hodiny, které jsou v daném systému v klidu. **Výrok o dilataci v systému, který se pohybuje, ovšem může prohlásit pouze pozorovatel v klidu. Toto zpomalení chodu času závisí pouze na rychlosti hodin, ne na jejich zrychlení vůči inerciální soustavě. To není zcela dobře interpretováno.** „Rychlost hodin“, (říkejme spíš rychlost soustavy tělesa, v níž jsou jisté mechanické hodiny), je „stop-stav“ toho tělesa-hodin-soustavy, kterému měříme, my pozorovatel v klidu v inerciální soustavě, **jeho >chod času<**. Chod času, *jisté* tempo plynutí času, aby se změnilo, musí těleso-hodiny s jeho soustavou změnit svou rychlost a to může jedině pomocí >zrychlení<. Při pohybu zrychleném mění těleso tempo plynutí času, mění tedy velikost dilatace času. Pak...pak těleso svůj zrychlený pohyb ustálí na rovnoměrném pohybu, tedy na konkrétní jiné hodnotě rychlosti „ $v(n)$ “. **Rychlosti různé  $v(1)$  až  $v(n)$  jsou „stop-stavy“ v nerovnoměrném zrychleném pohybu. Zrychlený pohyb je tedy podmínkou ke změně rychlosti a tedy i ke změně velikosti dilataci času.** Tato skutečnost (*že zpomalení času závisí jen na rychlosti, pouze jen na rychlosti, jak píše Langr*) je velmi spolehlivě experimentálně ověřena. Zpomalení času, konkrétní velikost zpomalení, „měří“, tj. vyhodnocuje pozorovatel v klidu, který dostává údaje-informace z tělesa letícího nějakou rychlostí  $v(n)$ , tj. informaci i z letících hodin. **„Na hodinách“ čas nedilataje, mechanismus ukrajování intervalů je stále stejný. Dilataci pozoruje !!!!! pouze pozorovatel v klidu ve své základní inerciální soustavě. Jev dilatace, efekt dilatace, realizace dilatace je dílem pootočení soustavy letícího předmětu-hodin, které vysílají fotony-informace o pootočení jeho vlastní soustavy, od soustavy pozorovatele, a ...a to je důvod dilatace. Dilataci pouze pozorujeme jakožto průmět z pootočené „soustavy“, průmět pootočené časové dimenze toho pohybujícího se předmětu-hodin.** Efekt závisí na druhé mocnině poměru rychlosti hodin k rychlosti světla, a proto je za běžných okolností zanedbatelně malý.

Jestliže netrpělivě přecházíme po chodbě, když čekáme na úřadě, počínáme si sice z hlediska teorie relativity správně, protože náš čas běží pomaleji než čas sedícího úředníka, rozdíl v uběhnuvším čase je však příliš malý, než aby jej nejlepší hodinky dokázaly změřit. I kdybychom přecházeli rychlostí rovnou polovině rychlosti světla, ušetřili bychom necelých dvacet procent času. Velikost efektu však dramaticky narůstá pro rychlosti blízké rychlosti světla, jimiž se pohybují částice v urychlovačích či v kosmickém záření.

Tento efekt se popularizoval příkladem, jehož autorem je snad sám Albert Einstein: Ze Země odletí raketa, v níž cestuje jedno z dvojčat, zatímco druhé zůstane na Zemi. (Dvojčata představují dvoje identicky sestrojené hodiny.) Raketa se urychlí na rychlost blízkou rychlosti světla, a v tomto momentu pozorovatel na Zemi dostane informaci světlem-fotonama ( fotonama letícíma rychlostí světla, od rakety k nám, které už vyletěly „v pootočeném stavu“ a které po cestě k pozorovateli už nepotáčejí svou soustavu a doletí ve stavu pootočeném podle soustavy  $S'$  ) někde ve vesmíru se obrátí a vrátí se na Zemi. Ano, vrací se k Zemi rychlostí blízkou rychlosti světla a stále má svou soustavu pootočenou vůči soustavě Pozemšťana, čili Pozemšťan stále dostává informace o „jeho“ dilataci času, čili o jeho pootočené soustavě časové (  $3+3D$  soustavě )...ale při přiletu, aby mohl velitel lodi přistát do soustavy pozorovatele „v klidu“, musí brzdit...brzdit znamená nejen měnit „brzdné zpomalení“, ale i pootáčet jeho, raketovou soustavou  $S'$  opačným směrem, tedy >srovnávat se< na původní natočení, což vede i k „rychlému stárnutí“, ( dilatace nenarůstá, ale naopak se zmenšuje ), tedy k vracení se na původní tempo času, na původní rychlost stárnutí. Takže dvojče z rakety doletí na Zem stejně staré jako je jeho pozemský bratr. Tam svého bližence očekává stařec, astronaut však zestárl jen málo. Ne !! Ne !! Pan Langer svou přednášku v závěru „ukousnul“ nedokončil a umlčel podstatný zbytek výkladu...v němž měl dokázat, že i při brždění dilatace „na raketě“ narůstá. Ne, nenarůstá, naopak. A dokonce to nepozoruje dvojče na raketě, ale pozorujete Pozemšťan v soustavě v klidu ( dostává z rakety informace tj. modrý posuv ve spektrech, nikoliv červený.

Zní to podivně, zatím však nejde o žádný paradox. Ten se objeví v okamžiku, kdy astronaut učiní chybnou úvahu: Podle teorie relativity je veškerý pohyb relativní. Během své cesty jsem pozoroval, že se Země ode mne vzdaluje určitou rychlostí, Přesně v tomto momentu nastal špatný Langerův výklad : nikdy nelze s výkladem popisu „fyzikální reality“ ( relativity obzvlášť ) přeskakovat ze soustav do jiné soustavy. Hodnotit musí jen jeden, pouze jeden a stále jen jeden, soustava v klidu. pak se otočila a začala se ke mně vracet. Hodiny umístěné na Zemi jdou tedy pomaleji než hodiny, které si vezu s sebou, Výrok : „ hodiny pozemské „jdou tedy“ pomaleji než ty „moje na raketě“ ovšem říká astronaut, ve své soustavě , která je právě v tu situaci „v klidu“, pasované do klidu, astronaut je v roli pozorovatele, a vyhodnocuje on, a který dostává ze Země informace o chodu , tempu času „na Zemi“; ( Tato situace nevyovídá o změnách dilatace času „na raketě“ když se raketa vrací do základny a brzdí...a dilataci měří Pozemšťan ) ; ty informace z rakety jsou také pootočené tak jak je pootočená soustava Země vůči soustavě rakety astronauta...; na Zemi čas běží původním tempem, ovšem astronaut „vidí“ měří ( do své soustavy ) chod času „na Zemi“ v dilatační podobě proto, že >Země se pohybuje skororychlostí světla vůči němu<, astronaut je v klidu, neb on měří a pozoruje do „své nyní základní soustavy“...- Jenže takto přeskakování ze soustavy do soustavy se problémem „o dilataci“ neřeší. a můj sourozenec tedy bude po mém návratu mladší než já. Po setkání bratrů však už nelze argumentovat relativitou pohybu – jejich vzájemné stáří nakonec porovnáme v jediném vztažném systému. Ano, vztažný systém pozemského pozorovatele  $S$  a vztažný systém rakety  $S'$  si oba vzájemně „vrátí“, vrátí si svá pootočení do původního stavu a oba budou bez pootočení, a tedy budou oba pozorovat navzájem ( do své soustavy ) stejně plynutí času, stejně stáří.

- Co tvrdí speciální princip relativity? Podle jejího základního postulátu jsou všechny inerciální systémy rovnoprávné. Jsme-li v uzavřené místnosti bez oken, nemůžeme

rozhodnout, zda je místnost vzhledem k určitému inerciálnímu systému v klidu, nebo zda se vzhledem k němu rovnoměrně přímočaře pohybuje. **Kde je tedy chyba v kosmonautově úvaze?** **Ne v kosmonautově, ale v úvaze fyziků jako je Langer** Postulovali jsme, že hodiny jdou pomaleji, jestliže se pohybují vzhledem k inerciálnímu systému, ale systém spojený s raketou inerciální není! Jinak by se totiž raketa neurychlila a nemohla by se vrátit. Astronautova úvaha, která vedla k paradoxu, byla neoprávněná.

O paradoxu se z hlediska neinericiálního systému diskutuje v učebnicích obecné relativity, protože potřebný matematický aparát je s aparátem obecné teorie relativity téměř shodný. Jde však o pouhý přepis vztahů speciální relativity do neinericiálních systémů, tedy o teorii plochého prostoročasu v obecných souřadnicích. A ta je obdobou výkladu newtonovské mechaniky v neinericiálních systémech, kde však je matematická obtížnost tohoto rozšíření malá. **Obecnou teorii relativity se zpravidla rozumí až teorie zakřiveného prostoročasu, a dokud fyzikové nebudou ochotni uvažovat, že i čas má tři dimenze jako prostor, tak budou tápat „proč“ ta dilatace času je.** tedy teorie skutečného gravitačního pole buzeného rozložením hmot, ale to je do značné míry věc terminologická.

- **Za zdánlivost může potenciál zdánlivých sil. Síly, které nám působí nepříjemnosti v prudce brzdícím vozidle, jsou síly zdánlivé. ??** Kdo si někdy udělal bouli nárazem hlavy na čelní sklo, nebude nadšen vysvětlením, že za to může **zdánlivá síla. ??** Bouli mu udělala pravá síla, kterou působilo sklo na jeho hlavu, k nárazu však došlo proto, že zatímco automobil brzdil, nepřipoutaný pasažér se snažil pokračovat setrvačností v rovnoměrně přímočarém pohybu a z hlediska vnějších pozorovatelů na něj síla začala působit až v okamžiku nárazu. Proto se síla, která ho vzhledem k automobilu urychluje, označuje jako „zdánlivá“.

Právě díky „zdánlivým“ silám má astronaut v raketě jiné zážitky než sourozenec na Zemi. Za své pomalejší stárnutí zaplatil tím, že při urychlování rakety byl tlačěn do opěradla svého sedadla a při brzdění pozoroval přetížení v opačném směru. **Jistě, ale doposud nikdo nechce uvažovat nad tím, že urychlováním rakety se souběžně s tím pootáčí „vlastní soustava rakety“ vůči >stojící< soustavě pozorovatele a zpomalováním se pootáčí soustava rakety opačným směrem , tj. do polohy původního pootočení ( neprobíhá už dilatace času, ale naopak zrychlení času, zrychlení stárnutí ) – to vše v sounáležitosti se zakřivením ( zakřívováním ) časoprostoru.** Pokud se tedy spokojí jen s kvalitativním vysvětlením, sourozenec na Zemi stárl rychleji proto, že při urychlovací a brzdící fázi letu volně padal v poli zdánlivých sil, nerozeznatelných od účinků stejnorodého gravitačního pole. **V souladu se zakřivením časoprostoru samého** Matematický popis situace pak ukáže, že hodiny na Zemi jdou z hlediska systému spojeného s raketou skutečně rychleji. **Protože raketa brzdila a tím „narovnávala“ své pootočení vůči Zemi a to znamená, že dilatace se změnila na kontradilataci času tedy na rychlejší chod času ( což pozoroval astronaut, nikoliv pozemšťan...**

Proti tomuto vysvětlení můžeme protestovat. Představme si, že máme trojčata, obě zároveň nasedla do raket, třetí zůstalo na Zemi. Dvě rakety se celý rok urychlovaly na rychlost blízkou rychlosti světla. Po roce začalo první dvojčete brzdit, raketu otočilo a vrátilo se na Zemi. Druhé několik let pokračovalo v rovnoměrně přímočarém pohybu, a pak se teprve vrátilo na Zemi stejným způsobem jako jeho sourozenec. Uvažujeme-li o situaci z hlediska inerciálních pozorovatelů na Zemi, dojdeme

k závěru, že po opětném setkání bude nejstarší ten sourozenec, který zůstal doma, a nejmladší ten, který letěl nejdéle. **Nikoliv, všichni tři budou po návratu stejně staří** Předtím jsme ale řekli, že rychlejší chod hodin na Zemi lze z hlediska raket vyložit přítomností pole zdánlivých inerciálních sil v systému raket. Jenže oba astronauti provedli urychlovací a brzdící manévry naprosto stejným způsobem, jejich zážitky i trvání těchto období jsou naprosto stejné, stejně dlouho pociťovali účinky zdánlivého gravitačního pole. Jak tedy vysvětlit rozdíl v přírůstku času na pozemských hodinách z hlediska systémů spojených s raketami?



Odpověď je, že chod hodin v jejich systémech nezávisí na intenzitě zdánlivého gravitačního pole, nýbrž na jeho potenciálu. Gravitační síla, která na nás působí v pátém a desátém patře budovy, je stejná. K vystoupení do desátého patra však potřebujeme vykonat větší práci než vyjít do pátého, a naopak pádem z desátého patra získáme větší pohybovou energii než pádem z pátého. V druhém patře máme větší potenciální energii, která je součinem naší hmotnosti a potenciálu gravitačního pole. A chod hodin v neinerciální soustavě závisí na potenciálu, ne na intenzitě zdánlivé gravitační síly. Když druhý z astronautů provádí otáčecí manévry, je Země dále, než když se otáčel jeho sourozenec, a tedy je na vyšším potenciálu. Bez matematického zápisu těžko vyložím, jak to přesně funguje, ale chci jen poukázat na to, že situace v systémech spojených s oběma raketami není identická ani během otáčecího manévru, a proto popis chodu hodin na Zemi vypadá v každém z uvedených případů jinak.

- Paradox dvojčat jako prostředek pro kosmické testování. Efekty dilatace času i efekty vlivu zdánlivého i skutečného gravitačního pole a jejich nerozlišitelnost jsou dnes velice spolehlivě experimentálně ověřeny. **Jistě, ale vysvětlení příčiny a důvodu „proč“ je chybné. Důvodem je pootáčení soustav, soustavy rakety vůči soustavě ( v klidu ) pozorovatele. Čím větší má raketa rychlost ( jakožto derivaci zrychlení, tj. rychlost jako „stop-stav“ v pohybu zrychleném ) tak tím víc má pootočenou soustavu. Při brždění se pootáčení vrací a tedy se dilatace mění v kontradilataci. Dtto i s kontrakcí délek.** V sedmdesátých letech Hafele a Keating vzali tři identické standardy času, jeden nechali v laboratoři, druhé dva poslali na leteckou cestu kolem světa (jeden západním a jeden východním směrem). Protože se Země otáčí směrem k východu a rychlost obou letů byla přibližně stejná, sčítala se s rychlostí rotace Země při letu na východ a odečítala se od ní při letu na západ. Výsledný efekt byl sice neobyčejně malý, ale měřitelný, a dopadl podle teorie. Hodiny letící na východ ukazovaly po srovnání s hodinami v laboratoři méně, hodiny letící na západ o něco více. (Použitelnost dilatace času pro kosmické putování bývá zpochybňována tím, že stárnutí člověka je něco jiného než běh ideálních hodin.)

Předpokládejme ale, že se raketa pohybuje s konstantním zrychlením, takže po celou dobu letu astronaut cítí stejnou tíži, jako když sedí na Zemi. Pokud platí, že účinek zdánlivé gravitace v raketě je stejný jako účinek skutečného gravitačního pole, pak se zdá přijatelný předpoklad, že astronaut bude stárnout stejně rychle vzhledem k hodinám, které si veze s sebou, jako jeho „pozemský“ druh vůči identickým hodinám na Zemi. Tento princip ekvivalence „skutečné“ a „zdánlivé“ gravitace je

však úhelným kamenem obecné teorie relativity, takže obecná relativita nám sem zadními vrátky přecejzen vstupuje.

Z tohoto hlediska je „pomalejší stárnutí astronautů“ legitimní rekvizitou pro sci-fi. Pokud by cesta astronauta, který by celou dobu pociťoval pozemskou tíži, trvala z jeho hlediska rok, rozdíl v přírůstku času na Zemi by byl řádově měsíc. Pokud by ale trvala deset let, na Zemi by zatím uběhly desítky tisíc let a astronaut by mohl doletět až k hranicím Galaxie. Možnost sestrojít raketu, která by se takto pohybovala, je však mizivá. Jestliže se rychlost rakety blíží rychlosti světla, roste její energie do obrovských hodnot – v mezním případě rychlosti světla by vzrostla k nekonečnu. Je tedy vcelku oprávněné, že od té doby, co Isaac Asimov vymyslel cestování hyperprostorem, upadla tato metoda cestování po Galaxii u autorů sci-fi v nemilost. Cesty hyperprostorem sice v současné fyzice nemají žádné oprávnění, alespoň však netrpí tím nedostatkem, že se kosmický agent vyslaný na druhý konec Galaxie vrátí, až když se na Zemi vystřídá spousta generací.

Lze tedy v rámci speciální teorie relativity vysvětlit paradox dvojčat? Odpověď zní: ano, s malým i když... (viz výše).<sup>1)</sup>

## Literatura

Václav Votruba: Základy speciální teorie relativity, Academia, Praha 1969  
Karel Kuchař: Základy obecné teorie relativity, Academia, Praha 1968

## Poznámky

1) Otázku položil Jan Erben, e-mail: [erben@ecm.iol.cz](mailto:erben@ecm.iol.cz)

## Soubory

Článek ve formátu PDF: [1999\\_V487-491.pdf](#) (349 kB)

## Diskuse

Počet příspěvků: 2  
[Vstup do diskuse](#) »