I. První pohled na problematiku

Dříve než se pustíme do podrobnějšího výkladu speciální teorie relativity, bude vhodné připomenout některá fakta, popisy a principy, z nichž vychází. Některé důsledky teorie lze pak z výchozích principů přímo odvodit pomocí jednoduchých myšlenkových pokusů, tak jak se to dělá ve středoškolské fyzice.

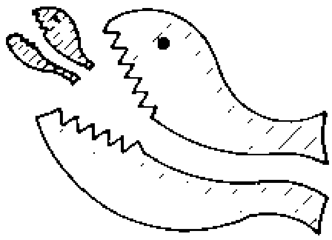
I.1. Obecné vlastnosti prostoru a času

Teorie relativity je teorií prostoru a času ve fyzice. Vyvrací či mění některé zdánlivě samozřejmé představy, založené na zkušenostech z běžného života, resp. klasické fyziky. Z řady známých vlastností prostoru a času však vychází a nechává je nedotčeny nebo na ně poskytuje nový pohled. Které jsou tyto obecné vlastnosti prostoru a času? Všimněme si jich spíše názorně, bez snahy o zcela přesný rozbor:

- **Dimenzionalita** (počet rozměrů)

Počet rozměrů prostoru je dán počtem vzájemně kolmých směrů, které lze z libovolného bodu vést. Matematik má pro stanovení počtu dimenzí prostoru i jiné, obecnější prostředky; pro skutečný prostor a čas, v němž žijeme a v němž zkoumáme fyzikální procesy, však všechny dávají shodné výsledky. Prostor je trojrozměrný, čas jednorozměrný.

Teoreticky bychom si dokázali představit i prostor o jiném počtu rozměrů. Fyzika by v něm však byla podstatně jiná. Tak třeba ve dvourozměrném prostoru by byly jiné dráhy planet, elektromagnetický rozruch vyslaný vysílačem by přijímač přijal s nekonečně dlouhým dozníváním atd. Navíc dvourozměrné bytosti, často využívané v populární literatuře při výkladu vícerozměrných prostorů, by zřejmě měly potíže se zažíváním: pokud by jimi procházela trávicí trubice, byly by nutně rozděleny na dvě oddělené části (viz obr. I.1.).



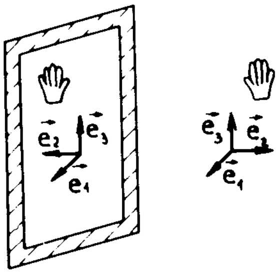
Obr. I.1. Dvourozměrné bytosti se zažívací trubicí
by se nutně skládaly ze dvou oddělených částí.

Vícerozměrný čas si lze jen těžko představit, i když i takovéto modely se někdy v teoretické fyzice objevují.

Opusťme však výše zmíněné hříčky a vraťme se zpět k teorii relativity. Ta se počtu rozměrů prostoru a času nijak nedotkla. Jak však uvidíme, umožňuje chápat prostor a čas dohromady jako jediný objekt, prostoročas, s dobře definovanými geometrickými vlastnostmi. Prostoročas má pak samozřejmě 3 + 1 = 4 rozměry. Ovšem čtenář by se měl vyvarovat jakýchkoli „metafyzických“ úvah o čtyřrozměrném prostoru atd. dokud se s geometrií prostoročasu blíže neseznámí. (To učiníme v kap. VII. a VIII.). Podobně by měl čtenář v budoucnu poněkud usměrňovat rozlet některých svých žáků, jejichž fantazie je fascinována pojmem „čtvrtý rozměr“ a přiživována ať již sci-fi či někdy nepřesnou popularizací.

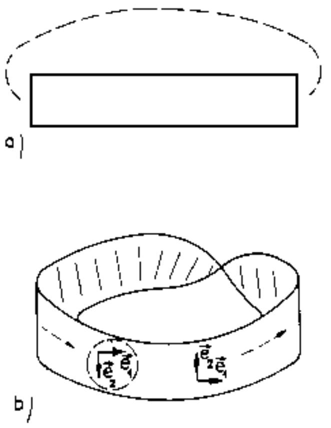
- **Orientovanost**

Pravá a levá rukavice jsou zrcadlově obrácené. Jednu nepřeměníme v druhou prostým otáčením. Stejně tak pravotočivá a levotočivá soustava souřadnic. (Viz obr. I.2.).



Obr. I.2. Odzrcadlením se změní pravá rukavice v levou
a pravotočivá soustava souřadnic v levotočivou.

Pravotočivý trojhran můžeme přemisťovat po libovolné dráze a libovolně otáčet a přesto se po návratu nebude lišit od jiného pravotočivého trojhranu, který zůstal na místě. Že by tomu tak teoreticky nemuselo být, ukazuje příklad známého Möbiova pásku – viz obr. I.3.



Obr. I.3. Möbiův pásek
a) Vytvoření Möbiova pásku slepením proužku papíru (aby se šipky kryly).
b) Přenosem podél Möbiova pásku vznikne z pravotočivé dvojice vektorů dvojice levotočivá

Na něm není možné zvolit v jednom bodě dvojici vektorů, prohlásit ji za pravotočivou a přenosem konzistentně definovat pravotočivé dvojice na celém pásku. Ve skutečném prostoru to s pravotočivým trojhranem udělat jde – skutečný prostor je **orientovatelný**. V čase lze také zvolit jednu orientaci a prohlásit ji za orientaci od minulosti k budoucnosti.

Jinou otázkou je, zda fyzikální zákony děje rozlišují pravotočivé a levotočivé soustavy. Kdybychom se „odzrcadlili“ spolu s levou rukavicí, budeme ji stále navlékat na tu ruku, která bude blíže k srdci. Poznali bychom vůbec, kdyby se přes noc „ odzrcadlil“ celý vesmír?

Ukazuje se, že většina dějů skutečné pravotočivé a levotočivé soustavy nerozlišuje. Některé reakce elementárních částic (reakce nezachovávající paritu, např. rozpad K-mezonu) však neprobíhají stejně v obou vzájemně zrcadlových podobách – pravděpodobnost těchto reakcí při různých orientacích je různá.

Podobně příroda rozlišuje i mezi orientací času do budoucnosti a do minulosti. Řada procesů, zejména na mikroskopické úrovni, je sice reverzibilních (např. v zákonech mechaniky lze klidně zaměnit t za $-t$, aniž by se cokoli změnilo), ale makroskopické procesy jsou většinou v zásadě ireverzibilní. Rozjetý automobil se působením tření zastaví, míček odrážející se od podložky skáče postupně níž a níž, entropie izolované soustavy roste. Ale i mezi reakcemi elementárních částic jsou známy takové, které neprobíhají stejně v obou směrech, byť jde o vzácnou výjimku (rozpad mezonu K^0). Souvislosti těchto procesů, určujících shodně „časovou šipku" a sama podstata časové šipky (tj. orientace od minulosti do budoucnosti) nejsou ještě fyzikálně zcela jasné.

Pro teorii relativity samotnou není orientovatelnost prostoru příliš důležitá. Orientovanost času naopak musíme brát v úvahu vždy, když se jedná o vyslání a přijetí nějakého signálu nebo obecně o příčinu a následek. (Toto konstatování bývá označováno jako **princip kauzality**.) Nebo jste snad již zažili situaci, kdy by třeba nejprve hřebík sám zalezl do dřeva až po hlavičku a vy jste na něj až pak udeřili kladívkem? Jak uvidíme později (v kap. IV), má princip kauzality v teorii relativity důležité a poněkud neočekávané důsledky.

S principem kauzality souvisí ještě další skutečnost. Speciální teorie relativity sice svazuje čas s prostorem, ale orientace časové šipky zůstává v celém prostoru stejná, neexistují oblasti, kde by čas plynul nazpátek.

- **Souvislost**

Prakticky veškerá dnešní fyzika bere jako daný fakt, že prostor není složen ze vzájemně oddělených částí, ale že je **souvislý**. Stejně je tomu i s časem.

Na globální úrovni to znamená, že prostor není tvořen několika oddělenými a navzájem nepropojenými vesmíry. To je vcelku rozumný předpoklad, protože různé vesmíry, které by spolu v principu vůbec nemohly interagovat, by sice mohly být vděčným objektem pro fantastickou literaturu, ale nebylo by je možné jakkoli fyzikálně zkoumat a tedy o nich z hlediska fyziky cokoli říci ani vůbec ověřit jejich existenci.

Kdyby nebyl prostor souvislý na lokální úrovni, znamenalo by to například, že na jednotkovou úsečku by nebylo možno zobrazit reálná čísla od 0 do 1 tak, jak to známe ze školy. Některé body by třeba byly v prostoru jakoby „vynechány", prostor by mohl být tvořen mřížkou vzájemně oddělených bodů apod. Současné fyzikální modely prostoru předpokládají, že tomu tak není, že tedy prostor (a podobně i čas) tvoří **kontinuum**.

Jde samozřejmě o předpoklad velmi výhodný, který umožňuje při formulaci fyzikálních zákonů i řešení problémů jednoduše užívat derivací, integrálů a vůbec celého aparátu matematické analýzy. Dosud žádný experimentální fakt není s tímto předpokladem ve sporu. Není ovšem jasné, zda prostor a čas nejsou ve skutečnosti nespojité (diskrétní) ve velmi malých měřítkách, nepřístupných dosud experimentálnímu zkoumání. Délková škála přístupná dnes fyzikálnímu zkoumání, je řádově 10^{-19} až 10^{26} m; tomu odpovídá časová škála 10^{-27} až 10^{18} s. Horní hranice odpovídají rozměrům a stáří pozorovaného vesmíru. Dolní hranice jsou dána energiemi, dostupnými na velkých urychlovačích. K určení nějaké délky totiž potřebujeme částice (např. fotony) a odpovídající (nebo menší) vlnovou délku λ. Tyto částice mají podle de Broglieova vztahu energii

$$E = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda}$$

Po dosazení hodnot Planckovy konstanty h a rychlosti světla c dostaneme

$$\lambda \doteq \left(\frac{1\text{GeV}}{E}\right)\cdot 10^{-15}\ m$$

V současnosti jsou na urychlovačích dostupné energie do asi 10 TeV (tedy 10^4 GeV) – tomu odpovídá výše uvedená hranice 10^{-19} m. Příslušné časy odpovídají $\frac{1}{\upsilon} = \frac{\lambda}{c}$

Model časoprostorového kontinua snad platí i na podstatně kratších škálách. Z úvah o možném kvantování gravitace však plyne, že efekty kvantování by měly být podstatné na délkách řádu 10-35 m a odpovídajících časových intervalech 10-43 s. Na těchto škálách by pak prostor a čas mohly mít vlastnosti velice odlišné od těch, které dnes známe. Mohly by mít diskrétní strukturu a možná, že na těchto škálách prostoročasový popis vůbec ztrácí smysl. Prostoročasové kontinuum by pak bylo vhodným modelem jen ve větších měřítkách. Bylo by samozřejmě modelem přibližným, ovšem i tak velmi dobře použitelným. (Podobně jako mluvíme třeba v termodynamice o teplotě či hustotě plynu, přestože velmi dobře víme, že tyto pojmy nejsou použitelné v oblastech s rozměry srovnatelnými s rozměry molekul.)

Teorie relativity je teorií klasickou, žádné kvantování prostoru a času neuvažuje a proto samozřejmě na prostoročas pohlíží jako na kontinuum.

- **Homogenita**

Tvrzením, že prostor je homogenní, konstatujeme, že jeho vlastnosti jsou ve všech místech stejné. Z fyzikálního hlediska to znamená, že ve všech místech mají fyzikální zákony stejný tvar, že na místě v prostoru nezávisí hodnoty fyzikálních konstant apod. Ve starověké fyzice tomu tak nebylo. Země byla privilegovaným místem v prostoru a jiné fyzikální zákony měly platit v její blízkosti (v sublunární sféře) a jiné ve sféře supralunární.

Prostor ve sluneční soustavě je dnes přístupný výzkumu pomocí kosmických sond a tak o nějaké supralunární sféře dnes bude sotva někdo uvažovat. Na první pohled by se však mohlo zdát obtížné ověřit platnost fyzikálních zákonů ve vzdáleném vesmíru. Změny fyzikálních zákonů či hodnot konstant by se ale musely projevit ve spektru hvězd a dalších objektů. Proměřováním spekter a jejich rozborem se přesvědčujeme, že tomu tak není.

Změn fyzikálních zákonů či konstant na poněkud kratších délkových škálách bychom si ostatně mohli povšimnout i na Zemi. Ta se totiž spolu se Sluncem pohybuje rychlostí zhruba 300 $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ kolem středu Galaxie. Změna fyzikálních zákonů na různých místech, kudy Země prolétá, by se tedy projevila i ve všech pozemských laboratořích.

Podobně je tomu i s homogenitou času. Jsou k dispozici přesná měření a rozbory řady efektů (od již zmíněných spekter vzdálených objektů přes radarová měření vzdáleností planet až po „přírodní jaderný reaktor“ OKLO v Gabunu, v němž před téměř dvěma miliardami let samovolně započala a probíhala jaderná reakce). A tyto rozbory s velkou přesností potvrzují, že fyzikální konstanty a zákony se s časem nemění. Z hlediska fyzikálních zákonů a konstant proto také neexistuje žádný privilegovaný okamžik.

Speciální teorie relativity bere homogenitu prostoru a času jako daný fakt a nijak jeho platnost nezpochybňuje. Situace je poněkud komplikovanější u obecné teorie relativity, která pomocí geometrie prostoru a času vyjadřuje charakter gravitačního pole. V blízkosti např. neutronové hvězdy jsou proto geometrické vlastnosti prostoru jiné než ve vzdálenějších oblastech. I podle OTR jsou však fyzikální zákony i konstanty ve všech místech prostoru stejné.

- **Izotropie**

Izotropií prostoru rozumíme nezávislost jeho vlastností na směru. Případná anizotropie by se mohla fyzikálně projevit třeba tak, že stejně velké síly působící v tomtéž bodě na danou částici by jí udělovaly v různých směrech různá zrychlení, přičemž síla a zrychlení by obecně ani nemusely mít tentýž směr.

Podle starověkých představ prostor izotropní nebyl. Pojmy „nahoru" a „dolů" měly absolutní význam; v každém bodě tedy existoval privilegovaný směr – směr k Zemi. Již newtonovská fyzika však dospěla k poznání, že žádný privilegovaný směr v prostoru neexistuje. Dnes je tento fakt experimentálně ověřen s vysokou přesností. Izotropie prostoru patří i k východiskům speciální teorie relativity. (U času vzhledem k jeho jednorozměrnosti nemá význam o izotropii mluvit; otázkou záměny $t \to -t$ jsme se zabývali výše.)

V obecné teorii relativity je opět situace složitější a geometrické vlastnosti prostoru mohou obecně vykazovat anizotropii.

Již z uvedeného zběžného přehledu vidíme, že v silných gravitačních polích, které je nezbytné popisovat pomocí obecné teorie relativity, se vlastnosti prostoru a času mohou zřejmě velmi značně lišit od těch, které běžně známe. Proto nejprve gravitaci z našich úvah zcela vyloučíme. V tom případě jsou vlastnosti prostoru a času vystiženy speciální teorií relativity. I ta přináší na prostor a čas řadu nových pohledů – a před jakoukoli diskusí o obecné relativitě se s ní stejně musíme podrobněji seznámit. Navíc bychom snad mohli již jen poznamenat, že obecná teorie relativity speciální relativitu nevyvrací, ale zobecňuje a určuje meze její platnosti.

I.2. Vztažné soustavy a soustavy souřadnic

Výše jsme uvedli některé základní vlastnosti prostoru a času, které ani speciální teorie relativity nepopírá, ale na nichž naopak staví. Všechny tyto vlastnosti vystihuje známý matematický model: euklidovský prostor. Vystihuje i řadu dalších vlastností, běžně přijímaných za samozřejmé a známých třeba ze školské geometrie. Prakticky veškerá geometrie vyučovaná ve školách je geometrií euklidovského prostoru. Vlastnosti euklidovského prostoru jsou zobecněním zkušeností s vlastnostmi prostoru v běžném životě, v běžných makroskopických měřítkách. Je to zobecnění tak úspěšné, že téměř až do konce minulého století se pokládalo za samozřejmé, že skutečný prostor je euklidovský a vládla představa, že jiná geometrie ani nemůže existovat. (Výše zmiňovaná nehomogenita a anizotropie podle starověkých představ byla připisována fyzikálním aspektům prostoru, nikoli geometrickým.) Z představy, že skutečný prostor je euklidovský, pak celkem oprávněně vychází i celá klasická fyzika. Podobně čas se v klasické fyzice pokládá za jednorozměrný euklidovský prostor.

Tak jsme se od obecných vlastností dostali zpátky k běžné představě o prostoru a času.

Fyzika ovšem nepracuje jen s abstraktními matematickými pojmy a nestačí jí obecné geometrické teorémy. Musí popisovat a měřit pohyby těles, tj. jejich polohu a její změny. Měřit je ale možné jen vůči něčemu. Potřebujeme tedy nějaký systém těles, vůči němuž bude možno měření vztahovat. Takový systém těles nazýváme **vztažná soustava**. V rámci teoretických úvah nemusíme ovšem měření vztahovat jen k tělesům reálně se v prostoru vyskytujícím. Vztažnou soustavu je pak vhodné chápat tak, že může být tvořena i myšlenými tělesy.

Je ale vhodné přijmout i určité omezení. Měření by se zřejmě obtížně interpretovala, kdyby byla prováděna třeba vzhledem ke skupině chobotnic, plovoucích v oceánu. Vhodnější jistě bude zvolit tělesa, která jsou navzájem v klidu a jejichž jednotlivé body jsou rovněž navzájem v klidu – to znamená, jejichž vzájemné vzdálenosti se nemění s časem.

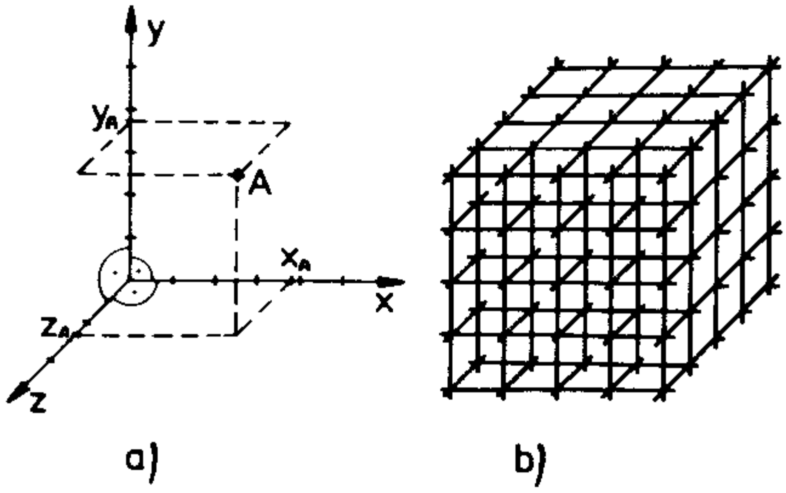
Vztažnou soustavu lze tedy definovat jako

> systém skutečných nebo myšlených těles, která jsou navzájem v klidu.

Takovýmito vztažnými soustavami mohou být například podlaha a stěny laboratoře, železniční vagón, raketa, kolotoč, zeměkoule, či soustava stálic (chápaných zde ovšem spíše jako myšlená tělesa; vzájemné pohyby skutečných stálic musíme odkorigovat).

Polohu objektů vůči vztažné soustavě bychom v principu mohli určovat slovním popisem „v levém předním dolním rohu laboratoře“, „u špičky rakety“. Bylo by to však složité a nepříliš přesné. Proto při měření polohy nějakého tělesa vůči vztažné soustavě užíváme prakticky vždy **soustavu souřadnic**. Poloha libovolného bodu je pak určena trojicí souřadnic.

V euklidovském prostoru je nejpřirozenější soustavou **kartézská soustava souřadnic**, užívající tří kolmých os a kolmých průmětů z měřeného bodu na osy pro určení jednotlivých souřadnic (viz obr. I.4a). Měřítka na všech třech osách jsou stejná. Fyzikálně by bylo možno kartézskou soustavu realizovat krychlovou mříží z tuhých měřících tyčí. (Viz obr. I.4b).



Obr.I.4. Kartézská soustava souřadnic
a) Určování souřadnic daného bodu, b) Fyzikální realizace kartézské soustavy

Každý průsečík tyčí má pak přesně určené souřadnice. V principu by mohla být soustava tyčí tak hustá, že bychom s její pomocí mohli s předem zadanou přesností určit souřadnice libovolného bodu v prostoru. Takováto soustava samozřejmě ve skutečnosti neexistuje (a asi by také dost vadila fyzikálním procesům, které chceme popisovat a zkoumat). Pro úvahy o měření délek a podobné myšlenkové pokusy je však velmi výhodné představit si, že souřadnice libovolného bodu v dané soustavě souřadnic můžeme změřit pomocí měřících tyčí.

V zadané vztažné soustavě (a v ní zadané soustavě souřadnic) můžeme již popisovat fyzikální děje. Před fyzikou zde ovšem stojí důležitá otázka:

> Jakou zvolit vztažnou soustavu a v ní soustavu souřadnic,
> aby v ní popis fyzikálních dějů byl co nejjednodušší?

Samotná volba (kartézské) soustavy souřadnic v již zadané vztažné soustavě může být vcelku libovolná. Díky homogenitě prostoru je totiž jedno, kde zvolíme počátek soustavy souřadnic, a díky izotropii prostoru nezáleží na natočení soustavy os. Ovšem při volbě vztažné soustavy je zde navíc další možnost: **vztažné soustavy se mohou navzájem pohybovat!**

Jak tedy volit vztažnou soustavu? Jednou z možností by bylo spojit ji s nějakým význačným tělesem – například se Zemí (jak to bylo obvyklé ve starověkých představách) nebo se Sluncem či soustavou stálic. Zajímá-li nás ale „lokální fyzika“, tj. třeba experimenty prováděné v laboratoři, nemusíme se odvolávat na Slunce či stálici. Rozhodující pro nás budou výsledky laboratorních experimentů.

Ze zkušenosti víme, že v řadě vztažných soustav se projevují zvláštní efekty: v rozjíždějící se tramvaji nás „jakási“ síla přitlačuje k zadní stěně, na rotujícím kolotoči nás podobná síla odtahuje od osy otáčení, Foucaultovo kyvadlo na zeměkouli stáčí svou rovinu kyvu… Vždy zde jde o působení sil, které nemají svůj původ v interakci s jinými tělesy. (Nepřitahuje nás zadní stěna tramvaje, ani nás neodpuzuje osa kolotoče.) Takovéto síly nazýváme **setrvačné**. (Dříve se též užívalo názvu **zdánlivé**.) Setrvačné síly nepochybně komplikují popis fyzikálních dějů.

Zkušenost nás však rovněž učí, že existují vztažné soustavy (a s nimi spojené soustavy souřadnic), v nichž žádné setrvačné síly nepůsobí. Tyto soustavy nazýváme **inerciální soustavy souřadnic**, nebo kratčeji **inerciální systémy**. A právě inerciální systémy jsou soustavami, v nichž je popis fyzikálních dějů nejjednodušší.

Až doposud jsme poměrně podrobně diskutovali určování polohy a stranou jsme nechávali určování času (například času počátku či konce určitého děje nebo obecně času libovolných událostí). K měření času potřebujeme samozřejmě hodiny – ať už mechanický chronometr, hodiny s kmitajícím křemenným krystalem či velmi přesné „atomové“ hodiny. Porovnány navzájem jdou všechny tyto hodiny až na drobné, fyzikálně vysvětlitelné odchylky, stejně. Právě to nás přesvědčuje, že lze definovat stejný čas pro všechny druhy fyzikálních procesů. Volba časového počátku, $t = 0$, je ovšem věcí libovůle (díky homogenitě času).

Podrobněji se zatím problematice měření času věnovat nebudeme. Zmíníme se raději o dvou výchozích principech speciální teorie relativity a pomocí jednoduchých myšlenkových pokusů vyvodíme některé důsledky.

I.3. Základní principy speciální teorie relativity a některé jejich důsledky

Z řady pokusů vyplývá, že inerciální systém neexistuje pouze jeden. Každý systém, pohybující se rovnoměrně přímočaře vzhledem k danému inerciálnímu systému, je rovněž inerciální. Inerciálních systémů tedy dokonce existuje nekonečně mnoho. Přitom pomocí experimentů prováděných v rámci daného systému nelze rozlišit jeden inerciální systém od druhého. Aniž bychom vyhlédli z rakety, nezjistíme uvnitř ní pomocí žádného mechanického, elektronického či optického zařízení, jak rychle se pohybuje vzhledem ke stálicím či k Zemi. Jednoduše bychom samozřejmě mohli zjistit, zda se raketa pohybuje se zrychlením např. v důsledku působení vnějšího elektromagnetického pole nebo práce motorů. **(Jak?)** Raketa s vypnutými motory izolovaná od vnějších vlivů je však přímo prototypem inerciálního systému a určit její rychlost vzhledem k jinému inerciálnímu systému je bez vyhlédnutí ven nemožné.

Toto zjištění je obsahem prvního principu, z něhož vychází speciální teorie relativity, tzv. **principu relativity**. Stručně jej lze formulovat např. větou:

> Všechny inerciální systémy jsou rovnoprávné.

nebo ekvivalentně:

> Žádný inerciální systém není privilegován.

případně tvrzením:

> Libovolný stejně připravený pokus dá ve všech inerciálních systémech stejný výsledek.

které konkretizuje výše uvedené formulace.

Druhým základním principem speciální teorie relativity, vycházející z experimentů, je **princip konstantní rychlosti světla**, který tvrdí:

> Světlo se ve vakuu šíří vůči libovolnému inerciálnímu systému ve všech směrech stejnou rychlostí (nezávislou na pohybu jeho zdroje).

Oba výchozí principy budeme ještě podrobněji diskutovat dále a budeme se také seznamovat s tím, jak z nich lze speciální teorii relativity budovat. Již přímo z výchozích principů, bez jakéhokoli zvláštního formalismu, lze však pomocí několika myšlenkových pokusů odvodit některé důležité výsledky.

- **Skládání rychlostí**

Z principu konstantní rychlosti světla je okamžitě vidět, že neplatí jedna z věcí, které se v klasické mechanice zdály naprosto samozřejmé: **rychlosti se nesčítají algebraicky**. Z běžného života jsme zvyklí, že kráčí-li průvodčí ve vagóně rychlostí 1 m/s směrem dopředu a vagón přitom jede rychlostí 20 m/s, je rychlost průvodčího vzhledem k trati 21 m/s. Ovšem vyšleme-li ve vagóně směrem dopředu světelný signál, je jeho rychlost vzhledem k vagónu rovna c, ale rychlost vzhledem k trati není c + 20 m/s, nýbrž opět pouze c. Jinak by totiž byl porušen princip konstantní rychlosti světla.

Ve výše uvedené formulaci myšlenkového pokusu bychom mohli najít určité nepřesnosti. (Zkuste je najít dříve, než si přečtete další větu!) Tyto nepřesnosti jsou dány stručností, s níž jsme myšlenkový pokus formulovali, a lze je samozřejmě odstranit. Předně bychom měli explicite konstatovat, že soustava souřadnic spojená s tratí je inerciální, za druhé, že vlak jede rovnoměrně přímočaře a konečně má-li se světelný signál šířit rychlostí c (rychlostí světla ve vakuu), muselo by ve vagóně vakuum skutečně být, resp. pokus by se musel konat ve vakuové aparatuře. Tím není řečeno, že bychom o skládání rychlostí nemohli mluvit i v jiných případech; je však vhodné, aby myšlenkový pokus byl co nejjednodušší.

Abychom nemuseli popisy myšlenkových pokusů komplikovat množstvím podrobností a přesto se příliš neprohřešovali proti přesnosti, zavedeme následující **úmluvu:**

Pokud o libovolné vztažné soustavě či soustavě souřadnic neprohlásíme nic jiného, bude se vždy jednat o soustavu inerciální. Pohyby všech těles budou rovnoměrné přímočaré, tělesa se nebudou otáčet a nebude mezi nimi působit tření ani jiné dissipativní síly, pokud nebudeme explicite tvrdit něco jiného. Nebudeme-li specifikovat prostředí, v němž se bude šířit světlo či obecně elektromagnetické vlnění, půjde vždy o šíření ve vakuu.

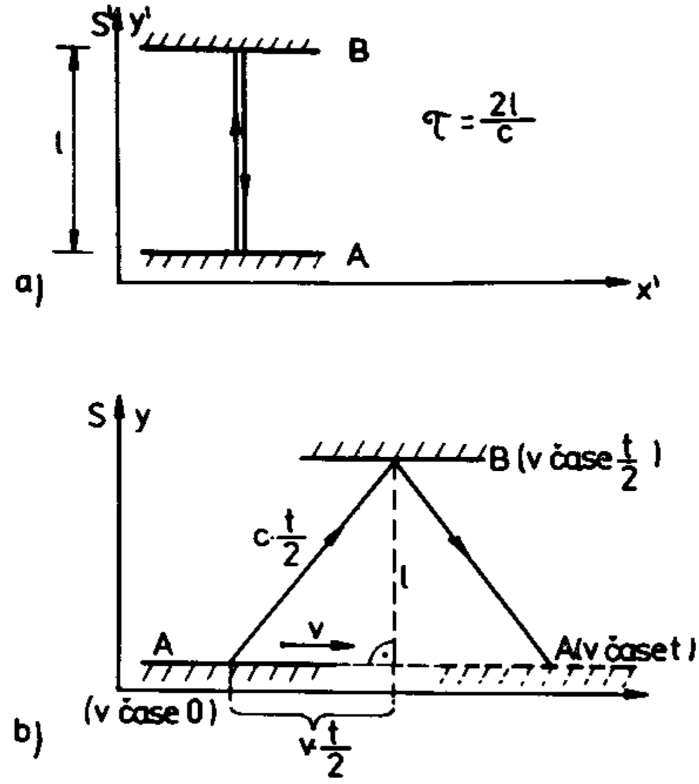
- **Dilatace času**

Dalším důsledkem, který lze jednoduše odvodit, je **dilatace času**. Týká se chodu hodin, které se vzhledem k inerciální soustavě pohybují.

Pro rozbor situace je samozřejmě nutno volit co nejjednodušší model hodin. Vhodným modelem jsou tzv. **světelné hodiny**, sestávající se ze dvou rovnoběžných zrcadel, jejichž vzájemná vzdálenost je l a mezi nimiž se odráží světelný signál (šíří se kolmo k ploše zrcadel; viz obr. I.5a). Každý odraz signálu na jednom ze zrcadel, třeba na zrcadle A, budeme považovat za „tik“ hodin. V soustavě S' spojené s hodinami, je doba mezi dvěma tiky, tj. perioda hodin, zřejmě rovna

$$\tau = \frac{2l}{c} \tag{I.1}$$

neboť podle principu konstantní rychlosti světla je rychlost šíření signálu rovna c.



Obr. I.5. Světelné hodiny
a) v soustavě, v níž stojí, b) v soustavě, v níž se pohybují rychlostí υ

Nechť se nyní hodiny spolu se soustavou *S'* pohybují rovnoměrně přímočaře vzhledem k inerciální soustavě *S* ve směru její osy *x* rychlostí υ. (Viz obr. I.5b.) V soustavě *S* se již světelný signál nepohybuje kolmo k zrcadlům. Musí se pohybovat šikmo, aby „dohnal“ zrcadlo B a urazí tedy dráhu delší než *l*. Označíme-li *t* periodu daných hodin, naměřenou v soustavě *S*, posune se za polovinu periody zrcadlo B doprava o $\upsilon \cdot \frac{t}{2}$. Světelný signál (jehož rychlost šíření je i v soustavě *S* rovna *c*) urazí za tutéž dobu vzdálenost $c \cdot \frac{t}{2}$. Z obrázku je zřejmé, že můžeme použít Pythagorovu větu

$$\left(c \cdot \frac{t}{2} \right)^2 = \left(\upsilon \cdot \frac{t}{2} \right)^2 + l^2$$

z níž lze jednoduše vyjádřit *t* jako $t = \frac{2l}{c} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}}}$

a po dosazení (1)

$$t = \frac{\tau}{\sqrt{1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}}} \quad > \quad \tau \qquad \text{(I.2)}$$

Doba mezi dvěma tiky hodin, naměřená v soustavě *S*, je tedy delší než doba mezi tiky, naměřená v soustavě *S'* spojené s hodinami. (Proto tedy **dilatace**, tj. prodloužení času.)

Za jednotku času v soustavě *S* proto „stihnou" pohybující se hodiny méně tiků, než kdyby vůči této soustavě stály – můžeme tedy říci, že **pohybující se hodiny se zpožďují**.

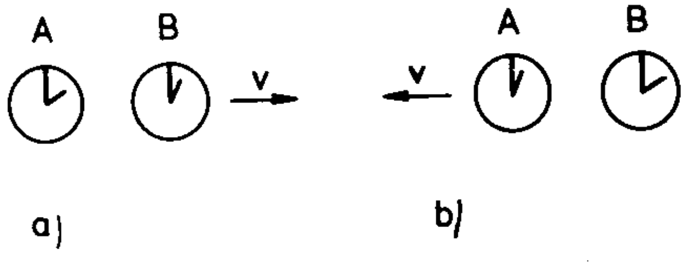
Soustava *S'*, v níž uvažované hodiny stojí, je ovšem inerciální systém jako každý jiný a dané hodiny v ní nemají žádné zvláštní postavení. Jejich chod v ní lze srovnávat s chodem křemenných hodin, náramkových hodinek, rychlostí tepů srdce určitého člověka a obecně s rychlostí libovolných fyzikálních procesů (vše v soustavě *S'*). Tik křemenných hodin může nastat třeba po 100 tisících ticích světelných hodin, určitá fáze tepu vždy po miliónu tiků apod. Z toho je ovšem zřejmé, že naměříme-li v systému *S* periodu světelných hodin prodlouženou, musíme naměřit příslušné prodloužení i periody křemenných hodin, tepu srdce atd. Tato úvaha platí pro všechny fyzikální procesy, což se někdy vyjadřuje poněkud mlhavým tvrzením:

> V pohybující se soustavě plyne čas pomaleji.
>
> (Promyslete si, proč je toto tvrzení nepřesné!)

Jednoduchost popsaného myšlenkového pokusu je přesvědčivá. Situace však začne vypadat zdánlivě paradoxně, uvědomíme-li si, že může nastat i situace obrácená: světelné hodiny mohou stát v soustavě *S* a my budeme měřit rychlost jejich chodu ze soustavy *S'*. Ve vyhrocené podobě, s níž na nás může přijít žák, pak problém může vypadat třeba takto:

„Mějme hodiny A a jiné hodiny B, které se vzdalují od A rychlostí v (viz obr. I.6a). Protože pohybující se hodiny jdou pomaleji než hodiny, které stojí, hodiny B se vůči hodinám A zpožďují. To ale znamená, že A se musí vůči B předbíhat. (Zpožďují-li se mé náramkové hodinky vůči hodinám na věži, pak se samozřejmě věžní hodiny předbíhají vůči mým hodinkám.) Ovšem vzhledem k hodinám B jsou to hodiny A, které se pohybují rychlostí v (viz obr. I.6b), takže by se měly vůči B zpožďovat. (Úvahu se světelnými hodinami lze přece opakovat v případě, že pohybujícími se světelnými hodinami jsou hodiny A.)

Tak které hodiny se vlastně zpožďují?"



Obr. I.6. K diskusi zpožďování hodin.

Žákovi budeme muset odpustit podobnou poněkud nepřesnou formulaci problému a třeba i to, že dodá: „Ta relativita je nějaká divná." Bude na nás mu vysvětlit, proč uvedený příklad teorii relativity nevyvrací a proč je jen zdánlivým paradoxem.

Problém jsme tedy nastínili, ale jeho další diskusi zatím odložíme. Čtenáři, kteří již alespoň částečně znají speciální teorii relativity, si zde řešení problému jistě sami připomenou nebo se o něj pokusí i bez zvláštního vybízení. Jinak je vhodné vyčkat, až budeme mít solidněji vybudované základy teorie.

- **Relativita současnosti**

Budeme se teď věnovat dalšímu důsledku základních principů, důsledku, který „zlobí" řadu laiků zřejmě nejvíc a jehož nepochopení nebo odmítání je často ať už zjevnou nebo skrytou příčinou různých „vyvrácení" či „vylepšení" speciální teorie relativity. S faktem, že pohybující se hodiny se zpožďují, se snad většina lidí ještě vyrovná. Intuitivní představa, že čas je nezávislý na prostoru, volbě vztažné soustavy apod. se však projevuje v přesvědčení, že řeknu-li „teď", znamená to „teď v celém vesmíru", že tedy přítomný okamžik je dán absolutně v celém prostoru. A že tedy třeba s kosmonauty, letícími k Proximě Centauri, bychom se mohli bez problémů shodnout na tom, zda novoroční přípitek u nás v Praze a u nich na raketě nastal současně nebo ne.

Jednoduchý myšlenkový pokus nás přesvědčí, že situace není tak triviální. Uvažujme vagón, jedoucí rovnoměrně přímočaře rychlostí υ. Uprostřed vagónu je umístěno zařízení, které vyšle světelný záblesk do všech směrů. Nás budou zajímat časy, v nichž tento záblesk dopadne na přední a zadní stěnu vagónu. V inerciální soustavě *S'* spjaté s vagónem je situace jednoduchá – viz obr. I.7a. Záblesk se šíří všemi směry rychlostí *c*, přední a zadní stěna jsou od zdroje záblesku stejně vzdáleny, takže časy dopadu záblesku na přední stěnu (t'_A) a na zadní stěnu (t'_B) musí být nutně stejné:

$$t'_A = t'_B \tag{I.3}$$

Z hlediska soustavy *S* spojené s tratí vypadá situace jinak (viz obr. I.7b). Záblesk se I vzhledem k *S* šíří všemi směry rychlostí *c*. Zadní stěna vagónu však jde záblesku vstříc rychlostí υ. Položme v okamžiku záblesku $t = 0$ a označme čas (měřený v soustavě *S*), v němž paprsek dostihne zadní stěnu (bod B) symbolem t_B. Pak do okamžiku setkání se zábleskem urazila zadní stěna dráhu $\upsilon \cdot t_B$ a záblesk samozřejmě dráhu $c \cdot t_B$. Je-li *l* polovina délky vagónu, je zřejmě

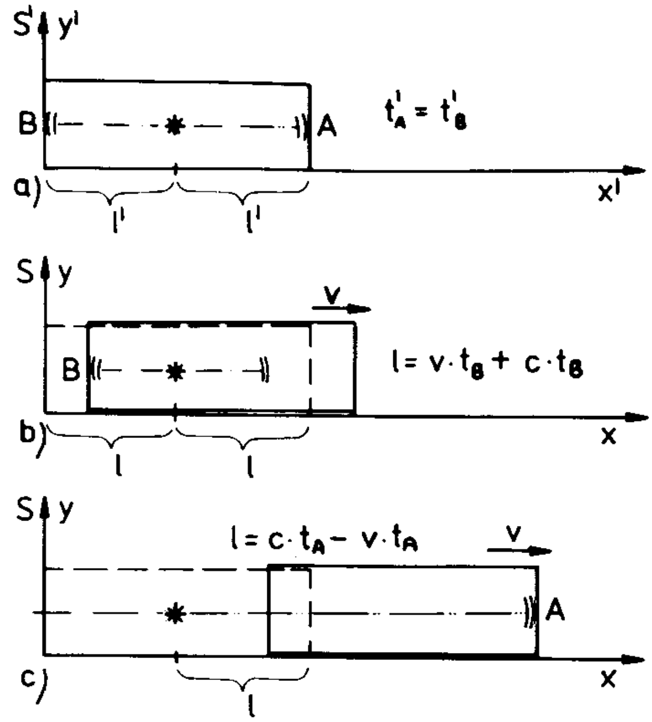
$$l - \upsilon \cdot t_B = c \cdot t_B$$

z čehož

$$t_B = \frac{l}{c+\upsilon} \tag{I.4}$$

V tomto čase ovšem ještě přední čelo záblesku nemohlo dostihnout přední stěnu vagónu, která před ním ustupuje. Dostihne ji až v čase t_A, který lze určit ze vztahu (viz obr. I.7c) $l + \upsilon \cdot t_A = c \cdot t_A$ jako

$$t_A = \frac{l}{c-\upsilon} \tag{I.5}$$



Obr. I.7. Myšlenkový pokus k výkladu relativity současnosti
a) Situace z hlediska soustavy spojené s vagónem,
b) Situace z hlediska S v čase t_B, c) Situace z hlediska S v čase t_A

Srovnání (4) a (5) potvrzuje to, co již je z předchozí diskuse zřejmé:

$$t_B < t_A \tag{I.6}$$

Události, které jsou současné v jednom inerciálním systému,
nejsou tedy obecně současné v jiném.

(Pozn.: **Událostí** rozumíme to, co se stalo na určitém místě v určitém okamžiku – např. ťuknutí do stolu, dopad světelného signálu na stěnu vagónu atd.)

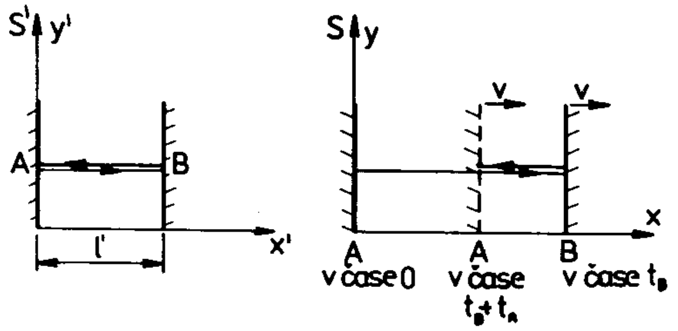
Současnost událostí není pojem absolutní; mluvíme proto o **relativitě současnosti**. Ať už se to komu líbí nebo nelíbí, novoroční přípitky (v Praze a na raketě letící k Proximě Centauri) mohou být současné z hlediska rakety, ale z hlediska Země mohl jeden nastat dříve.

(Který?)

- **Kontrakce délek**

Posledním důsledkem, který v této kapitole odvodíme, je známý efekt **kontrakce délek**.

Uvažujme znovu světelné hodiny v klidu v soustavě *S'*, tentokrát orientované tak, že zrcadla jsou kolmá na osu *x*'. Jejich vzdálenost v soustavě *S'* označíme *l'*. (Viz obr. I.8.)



Obr. I.8. K odvození kontrakce délek

Pozn.: Při odvozování dilatace času jsme vzdálenost zrcadel značili *l*, neboť byla stejná v *S* i *S'*. Tento předpoklad – že vzdálenosti kolmé na směr pohybu jsou v obou systémech stejné – jsme brali jako samozřejmost a ani jsme se o něm nezmínili. (Povšimli jste si toho na daném místě?) Jde o předpoklad, který i ve speciální teorii relativity skutečně platí. (Čtenáři již znalí teorie relativity by si měli připomenout nebo odvodit proč.)

Vzdálenosti ve směru pohybu, o nichž se v klasické mechanice stejně samozřejmě předpokládá, že se rovněž nemění, ovšem stejné být nemohou, jak ihned uvidíme.

Perioda uvažovaných světelných hodin v *S'* je

$$\tau = \frac{2l'}{c} \tag{I.7}$$

V soustavě *S*, vůči níž se *S'* pohybuje rychlostí v ve směru osy *x* (rovnoběžné s *x*', viz obr. I.7b), ovšem zrcadlo B „utíká“ světelnému signálu. Za čas t_B urazí zrcadlo B dráhu $v \cdot t_B$. Světelný signál tedy musí za t_B urazit dráhu $l + v \cdot t_B$, kde *l* je vzdálenost zrcadel měřená v soustavě *S*. Rychlost světelného signálu je *c*, je tedy

$$c \cdot t_B = l + v \cdot t_B$$

Doba t_B, za níž signál dorazí k zrcadlu B, je odtud

$$t_B = \frac{l}{c - v} \tag{I.8}$$

Po odrazu jde zrcadlo A vstříc signálu rychlostí v. Označíme-li t_A dobu, kterou signál letí zpět k zrcadlu A, je tedy

$$c \cdot t_A = l - v \cdot t_A$$

a odtud

$$t_A = \frac{l}{c + v} \tag{I.9}$$

Perioda hodin v soustavě *S* je

$$t = t_B + t_A = \frac{l}{c - v} + \frac{l}{c + v} = \frac{2lc}{c^2 - v^2} = \frac{2l}{c} \cdot \frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}} \tag{I.10}$$

Dilatace času ovšem nemůže záviset na orientaci světelných hodin. Proto mezi periodou τ světelných hodin v soustavě *S'* a jejich periodou naměřenou v *S* musí platit vztah (2):

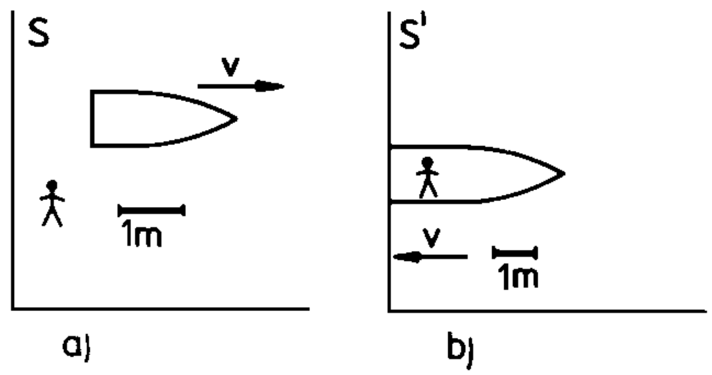
$$t=\frac{\tau}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}=\frac{2l'}{c}\cdot\frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}\ ;$$

zde jsme již dosadili (7). Porovnáním s (11) pak již okamžitě dostáváme

$$l=l'\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}} \tag{I.11}$$

Délku světelných hodin – a obecně libovolného pohybujícího se předmětu – tedy musíme naměřit ve směru pohybu kratší než v soustavě, v níž předmět stojí.

Stručně, ovšem opět poněkud nepřesně, to lze vyjádřit tvrzením „pohybující se předměty se ve směru pohybu zkracují“. S tím se lze konec konců smířit. Potíže s interpretací ovšem nastávají, uvědomíme-li si, že efekt je symetrický: pohybuje-li se vůči mně raketa, naměřím její délku zkrácenou (viz obr. I.9a). Vůči pozorovateli v raketě se ovšem pohybuji já i se svou měřící tyčí – tuto tyč tedy naopak pozorovatel v raketě musí naměřit zkrácenou (obr. I.9b). Mohl by tedy očekávat, že zkrácenou měřící tyčí naměřím jeho raketu delší.



Obr. I.9. Zdánlivý paradox při pozorování délek měřící tyče a pohybující se rakety.

(Naměří-li mou tyč zkrácenou třeba na polovinu, může čekat, že se jich do délky rakety vejde dvakrát víc, než kdyby se nezkracovaly.) Z jeho hlediska vzniká tedy zdánlivě záhada:

Jak to, že já zkrácenou tyčí nenaměřím raketu delší ale kratší?

Vidíme, že z výchozích principů lze sice pomocí myšlenkových pokusů mnohé efekty odvodit, ale při jejich diskusi se můžeme snadno dostat do potíží. Stačí trochu nepřesnosti v úvahách či formulacích. Ať si to přiznáme nebo ne, snažíme se totiž tyto efekty interpretovat v rámci názorných zkušeností z běžného života. Alespoň zpočátku, než si jejich rozbor pořádně promyslíme. Běžnou zkušenost jsme totiž zvyklí vydávat za „zdravý rozum“. Proto se nám stále vnucují otázky typu: Která měření jsou tedy vlastně správná? Které hodiny jdou ve skutečnosti pomaleji? apod. A snad nás i explicite napadne, zda by nebylo možno nějak „zachránit“ klasickou mechaniku s jejím názorným pohledem na prostor a čas. Jsou výchozí principy speciální teorie relativity skutečně experimentálně tak podložené, že se bez nich nelze obejít?

To je otázka, na níž je třeba odpovědět, ještě než se začneme s formalismem a detaily teorie relativity blíže seznamovat. Dalším úkolem, který nás pak zcela zřejmě čeká, je zpřesnit úvahy o měření délek a času.