

Princip relativity v proměnách věků

Jan Novotný, Přírodovědecká fakulta MU v Brně

Z přístavu opět plujem – i tratí se země i města. (Vergilius, Aeneis)

Když má všechno stejný pohyb, nepohybuje se zdánlivě nic – jako na lodi. Ženou-li se do bezuzdnosti všichni, jako by se nehnal nikdo. Ten, kdo se zastaví, jako pevný bod vyjeví bezhlavý hon ostatních. (B. Pascal, Myšlenky)

Stínohlas pohodil hlavou a hlasitě zaržál, jako když ho trubka volá do bitvy. Pak skočil kupředu. Oheň mu odletoval od kopyt, noc kolem něho svištěla. Když Pipin pomalu usínal, měl zvláštní pocit: On a Gandalf jsou nehybní jako kámen, sedí na soše běžícího koně, zatímco svět se dole pod jeho nohama valí s hlasitým hučením větru. (J. R. R. Tolkien, Dvě věže)

Když se Aeneova družina po útěku z hořící Tróje uchýlila na loď, bylo pobřeží obsazeno řeckými vojsky a posádka se často musela před nimi zachraňovat vyplutím na moře. Loď – nikoliv pevnina – se Trójanům na dlouhou dobu stala bezpečným domovem. Když básník vyjádřil jejich vztaženost k lodi, netušil, že jednou Mikuláš Koperník přečte jeho větu jako fyzik a bude se jí v 1. knize *Oběhů nebeských sfér* dovolávat k obhajobě heliocentrického systému: nevnímáme pohyb Země a vztahujeme k ní pohyb vesmíru jako Aeneovi námořníci nevnímali pohyb své lodi a vztahovali k ní pohyb pobřeží [1, s. 72].

Relativita pohybu a popisu fyzikálních dějů je běžnou lidskou zkušeností. Mohli bychom ji označit za relativitu pozorovatele, který má právo vylíčit, jak se mu věci z jeho stanoviště jeví. Existuje však i vyšší typ relativity, vzhledem k němuž jsou různé popisy rovnoprávné z hlediska zákonů přírody? Je Pipinův pocit nehybnosti pouze jeho zdáním nebo jde o fyzikálně legitimní stanovisko podložené *principem relativity*? A vztahuje se tento princip nejen k setrvačně se pohybující lodi, ale i k zrychlující se raketě či k rotujícímu kolotoči?

Takové otázky by možná přivedly do rozpaků i dnešního studenta u státnice. Nejspíše by si vzpomněl na postulát speciální teorie relativity o rovnoprávnosti *inerciálních* vztažných soustav. Pak by se zarazil – slyšel patrně také o obecném principu relativity, podle něhož by měly být rovnoprávné *všechny* vztažné soustavy. V relativistické kosmologii však vztahujeme pohyby částic i světla k rozpínajícímu se vesmíru – ten potom realizuje jediný *privilegovaný* vztažný systém.

Nabízejí se tak tři odpovědi – která je nejlepší? První z nich je spojována již se jménem Galilea Galileiho, jehož ideu Einstein převzal a pozměnil pouze způsob přepočtu souřadnic a času mezi inerciálními systémy. Druhá odkazuje k Ernstu Machovi, který odporoval Newtonovu názoru, že zakřivená hladina vody v rotujícím vědru svědčí o jeho otáčení vůči absolutnímu prostoru. Machovy myšlenky inspirovaly Einsteina k práci na obecné teorii relativity. Třetí odpověď by mohla být chápána jako nová varianta učení Isaaca Newtona o absolutním prostoru, která vyplynula z aplikace Einsteinových rovnic na vesmír. Komu tedy dnes dává za pravdu (s přihlédnutím k nezbytným modifikacím původního stanoviska) teorie Alberta Einsteina – Galileimu, Machovi nebo Newtonovi?

Pokusíme se na tuto otázku odpovědět. Nemůžeme se ovšem věnovat podrobné argumentaci ani detailně sledovat historii. Zvolíme proto pro obeznámení s problémem formu jakési procházky minulostí s pozastaveními na významných místech. Tato procházka nám snad ukáže, že otázka rovnoprávnosti či privilegovanosti vztažných systémů se vine dějinami fyziky vskutku jako červená nit a zároveň směřuje k jistému vyústění.

Aristotelés

Autorovi prvního dochovaného spisu nazvaného *Fyzika* je často přisuzován názor odpovídající zdravému rozumu a běžným pozorováním: pohybující se tělesa se časem "sama od sebe" zastavují. Jejich klid pak definuje privilegovaný vztažný systém, který je spojen s povrchem Země. Že Aristotelův postoj byl mnohem složitější, dosvědčí citát z 4. knihy jeho díla věnované *zkoumání o místě* [2, s. 110-111]:

Avšak jak bude přirozený pohyb, když v prázdnu a neomezenu není rozdílu? [...] Tedy buď není nikde pro žádnou věc od přírody pohyb, nebo je-li tento, není prázdno. Mimoto, skutečnost je taková, že vržená tělesa jsou pohybována, aniž se jich dotýká ten, kdo je vyhodil, a to buď vzájemným přemísťováním, jak někteří říkají, nebo proto, že je hnaný vzduch žene rychlejším pohybem, než je pohyb v prostoru vrženého tělesa, jímž se těleso pohybuje na místo sobě vlastní. V prázdnu však nic takového nemůže být a nebude vůbec možné, aby se něco v prostoru pohybovalo, leč jako to, co se veze. Dále, nikdo asi nedovede říci, proč se něco, je-li uvedeno v pohyb, někde zastaví. Neboť proč spíše zde než tam? A tak buď bude v klidu, nebo se do neomezena bude nutně pohybovat v prostoru, nebude-li něco silnějšího překážet.

Pozornost budí zejména poslední věta, skladbou i volbou slov předjímající první Newtonův zákon. Znal ji Newton a reagoval svou formulací na Aristotela? Text lze pochopit tak, že Aristotelés vlastně vyslovuje zákon setrvačnosti jako důsledek symetrie vakua, který mu ovšem připadá natolik absurdní, že na jeho základě existenci vakua popírá. Jako by byl příliš realistou, než aby si uvědomil, že právě odvážná idealizace na prvý pohled odporující zkušenosti může být plodná. Podrobnější zamyšlení nad citovanými větami podkryje i "machovský" aspekt Aristotelových úvah: může být pohyb sám o sobě, který není k čemu vztáhnout?

Aristotelovi bývá připisován i názor, že rychlost, s níž tělesa padají k zemi, závisí na jejich tíze. Vzhledem k tomu je překvapující jeho úvaha [2, s. 113]:

Vidíme totiž, že to, co má větší sílu ať tíže nebo lehkosti, pakliže všechno ostatní se chová stejně, pohybuje se skrze stejný prostor rychleji, a to podle poměru, v kterém jsou k sobě velikosti věcí. A tak by tomu muselo být i skrze prázdno. Ale to je nemožné. Neboť z které příčiny by se pohybovalo rychleji? Musí však tomu tak býti v plnu, neboť co je větší, svou silou je rychleji rozdělit; buď je totiž rozdělit svým tvarem nebo svojí tíží, kterou má to, co je v pohybu, nebo to, co je vyhozeno. Tedy v prázdnu bude všechno stejně rychlé. Ale to je nemožné.

V předposlední větě je možno vidět předtuchu, že přirozený pohyb ve vakuu bude (za stejných počátečních podmínek) pro všechna tělesa stejný – čili v moderním jazyce světočáry volných částic jsou geodetikami prostoročasu. Opět je toho využito k (empiricky zcela oprávněnému) popření existence vakua.

Aristotelovy předtuchy nelze jistě přeceňovat. Jeho způsob práce s pojmy, neopírající se o matematický aparát, nedovoľoval jich náležitě využít ani odhalit, zda neprotiřečí jiným myšlenkám *Fyziky*. Jasnozřivost velkého Řeka je přesto hodná obdivu a nemohu odolat, abych nepřipojil ještě jednu jeho předtuchu, byť s principem relativity přímo nesouvisí. Snad to bylo marné hledání nějaké pomůcky ke psaní, které ho přimělo k povzdechu anticipujícímu existenci "šipky času" [2, s. 127, 131]:

... též obyčejně říkáme, že čas všechno stravuje a že všechno časem stárne a že působením času zapomínáme, ale nikoli, že jsme se něčemu naučili, ani že působením času něco nabylo mládí nebo krásy. [...]

Všechny věci pak vznikají a zanikají v čase. Proto jej také jedni nazývali nejmoudřejším, pythagorovec Parón však správněji řekl, že je nejhlopější, poněvadž se v něm i zapomíná. Je tedy zjevné, že čas o sobě je příčinou spíše zanikání než vznikání ...

Galilei

Snad nejčastěji citovaným místem Galileiho *Dialogu* je pasáž z druhého dne rozhovoru, která se vryla do srdce každého čtenáře – relativisty [3, s. 185-186]:

Vejděte s některým přítelem do velké místnosti nacházející se pod palubou nějaké lodi a zásobte se mouchami, motýly a podobným hmyzem. Vezměte si i velkou nádobu s vodou, do které dáte rybičky. Zavěste dále nahoru nějaké malé vědro, z něhož bude kapat voda do druhé nádoby s nízkým hrdlem, postavené dole. Když se loď nebude pohybovat, pozorujte dobře, jak ten hmyz stejně rychle létá na všechny strany místnosti. Ryby, jak uvidíte, budou indiferentně plavat všemi směry. Padající kapky dopadnou všechny do podložené nádoby. Bude-li třeba něco hodit příteli, nemusíte to hodit silněji na jednu stranu než na druhou, budou-li vzdálenosti stejné. Budete-li skákat naráz oběma nohama, uděláte stejně velké skoky na obě strany. Jakkoliv pečlivě budete pozorovat všechny tyto věci, není pochyby, že se to stane, když se loď nebude pohybovat. Uveďte potom loď do pohybu libovolnou rychlostí. Bude-li její pohyb rovnoměrný a nebude-li se nahýbat na jednu či na druhou stranu, nenajdete ani nejmenší změnu ve všech připomenutých úkazech a ani z jednoho nezjistíte, zda se loď pohybuje, anebo ne. Při skákání uděláte stejně dlouhé skoky jako předtím a když se bude loď třeba i velmi rychle plavit, nebudou skoky k zadní části lodi delší než k přední, třebaže zatímco jste ve vzduchu, se podlaha pod vámi pohybuje opačným směrem. Hodíte-li něco svému příteli, není třeba to házet silněji, bude-li se nacházet v přední části lodi a vy v zadní, než kdybyste byli postaveni opačně. Kapky padnou jako předtím do spodní nádoby a ani jedna nepadne na zadní část lodi, ačkoliv zatímco letí kapka vzduchem, loď se přemístí dopředu o mnoho dlaní. Ryby ve vodě nebudou s větším úsilím plavat k přední než k zadní části nádoby, ale stejně lehce dospějí k potravě položené na kterémkoliv místě okraje nádoby. A konečně i motýli a mouchy budou indiferentně létat na všechny strany a nikdy neusednou na zadní část lodi jen proto, že by byli unaveni ze stálého sledování rychlé plavby lodi, od níž jsou po celou dobu svého létání odpoutáni.

Zaslouženou slávu textu jistě nezmenšíme dvěma připomínkami: Má Galilei skutečně na mysli rovnoměrný a přímočarý pohyb vzhledem k inerciálnímu systému? Popis pokusu s lodí dovoluje i výklad, že jde o kruhový pohyb po povrchu Země. Možná chtěl Galilei ukázat, že jakkoliv rychlá rotace kolem osy se neprojeví, je-li laboratoř dobře uzavřena? Zdálo by se, že kdyby si byl Galilei plně vědom, že jím popsán princip relativity se vztahuje k inerciálním systémům, musel by si položit otázku, proč planety obíhají kolem Slunce, a byl by na nejlepší cestě k objevu gravitačního zákona. Na této správné stopě však patrně v druhém dnu rozhovoru také byl, jak ukazují slova Salviatihovo [3, s. 232]:

Ví-li ten autor, na základě jakého principu jsou v kruhovém pohybu jiná tělesa ve vesmíru, jež se bezpečně takto pohybují, pak odpovím, že to, co způsobuje pohyb Země, je týž princip, díky němuž se pohybuje Mars či Jupiter a celá hvězdná sféra. Dokáže-li mi definovat, co způsobuje pohyb jednoho z těchto nebeských těles, zavazují se, že mu dokáží odpovědět, co způsobuje

pohyb Země. Co víc, jsem připraven udělat totéž, dokáže-li mě poučit, co způsobuje pohyb částičky Země směrem dolů.

Prostoduchý Simplicio ještě dodává, že *příčina toho je všeobecně známa a každý ví, že je to gravitace*, aby poskytl Salviatimu příležitost vyložit, že ve vědě nestačí něco pojmenovat, chceme-li tomu porozumět. Dnešní čtenář má ovšem asi na tomto místě pocit promarněné příležitosti. Jak daleko sahala předtucha Galileiho?

Galilei si také není vědom jemné úlohy, kterou hraje gravitace v jeho experimentech na lodi. Její vinou není situace stojící a jedoucí lodi zcela identická z hlediska principu relativity, byť se to díky jejím specifickým vlastnostem nepozná. V druhém případě se loď pohybuje vůči zdroji gravitačního pole a za úspěšnou demonstraci "relativity" vděčíme jen okolnosti, že působení tohoto pole nezávisí na rychlosti těles, jež se v něm nacházejí – samozřejmě v nerelativistickém přiblížení, v němž nepočítáme s efekty "gravomagnetismu", tj. s vlivem pohybu zdrojů i testovacích částic na gravitační působení. Zjištění tohoto vlivu na přesné místo dopadu kapek může být pěkným cvičením pro čtenáře obeznámeného s obecnou teorií relativity.

Zárodečnou podobou Galileiho nevlivnějšího díla byl spisek *Rozprava o příčinách přílivu a odlivu moře*. Vysvětlení těchto příčin podané ve čtvrtém dnu *Dialogu* mělo být korunou díla. Někdy však bývá označováno za fyzikální fiasko – nemyslím, že zcela zasloužené. Povšimněme si, jak Galilei vysvětluje svůj záměr [3, s. 410-411]:

My jsme už dávno prozkoumali a dokázali, že všechny pozemské jevy dokazující nepohyblivost Země a pohyblivost Slunce a nebeské klenby se nám musí jevit podobně i při pohyblivosti Země a nepohyblivosti Slunce a nebeské klenby; jedině prvek vody jako prvek nejrozšířenější, který není spojen a spjat se zeměkoulí tak těsně jako jiné její pevné částice, tento prvek díky své tekutosti zůstává částečně sui iuris a volný a jedině on ze všech sublunárních věcí nám umožňuje zpozorovat nějakou stopu nebo poukaz na to, jak se chová Země vzhledem k pohybu či klidu.

Když dále poukazuje na svá pozorování rozkývání vody v nádržích při jejich nerovnoměrném pohybu, můžeme to v dnešním jazyce vyložit jako postřehnutí rozdílu mezi inerciálními a neinerciálními soustavami. A také jako pochopení, že neinerciálnost soustavy lze fyzikálními prostředky zjistit a že takovým způsobem by mohl být prokázán neinerciální pohyb Země. V tom dosahuje Galilei nezanedbatelného úspěchu, když rozšiřuje své úvahy na vzduch a poukazuje na pasátní větry, i když vysvětlení, které podává, je ještě příliš primitivní [3, s. 431]:

... kde se na povrchu zeměkoule nacházejí velké a rovné prostory a kde jsou menší zemské výpary, tam částečně mizí příčina, pro niž kroužící vzduch se musí plně podrobit unášející činnosti otáčení Země; potom na takových místech v důsledku toho, že Země se točí směrem na východ, bylo by nutně cítit neustálý pohyb vzduchu vanoucího z východu na západ a takové vanutí by bylo nutně cítit silněji tam, kde otáčení zeměkoule je nejrychlejší ...

Dmutí mořských vod připisuje Galilei nerovnoměrnému pohybu mořských pánví vzniklému složením denního otáčení a ročního oběhu Země. Dnešní čtenář snadno postřehne základní chybu v jeho úvaze: kruhovost ročního oběhu v ní nehraje žádnou roli a Galilei tedy fakticky skládá kruhový pohyb s pohybem rovnoměrným a přímočarým; kdyby plně chápal princip relativity, bylo by mu jasné, že přidání druhého z nich nemá žádné pozorovatelné důsledky. Galilei tak především nebyl schopen vyvodit ze své teorie správné závěry.

Co by se dělo s mořskými vodami, kdyby jejich pohyb nebyl ovlivňován měsíční sluneční gravitací, ale jen neinerciálním pohybem Země? Taková situace by nastala, kdyby oběžný pohyb Země kolem Slunce nepůsobila gravitace, ale obr, který by ji držel v prstech. Vody by se pak neustále hromadily na odvrácené, noční straně Země, a to v míře mnohonásobně převyšující skutečný příliv. Stejně tak je možno si představit obra, který drží rotující Zemi na místě a brání jí padat k Slunci. Gravitace by pak stejně mohutně jako v předchozím případě hromadila vody na denní straně. Z hlediska newtonovské mechaniky se gravitace a fiktivní setrvačná síla vzniklá neinerciálním pohybem téměř ruší: co zbude, je důsledek nehomogenity gravitačního pole Slunce (či z hlediska obecné teorie relativity křivosti prostoročasu). Pak je ovšem ihned patrné, že větší vliv než Slunce má na mořská dmutí Měsíc.

Zřejmý vliv Měsíce na mořská dmutí Galilei nepopíral. V této souvislosti mluví o *síle, která hýbe Měsícem a Zemí kolem Slunce*, a spojuje její působení s ovlivňováním zemského pohybu Měsícem, které je podobné tomu, co se děje [3, s. 444]

... při regulování chodu hodin, přičemž Měsíc představuje to závaží, které se zavěšuje jednou dále od středu, aby se tyč kývala méně často, a jindy blíže ke středu, aby kývání bylo častější.

Zde máme opět pocit, že Galilei se setkává a mýjí s gravitačním zákonem.

Nemůžeme asi Galileimu vytykat, že ze své teorie nedokázal vyvodit závěry, jaké z ní skutečně plynou. Spíše mu můžeme mít za zlé, že se příliš nestaral o to, nakolik jeho mylné vývody odpovídají realitě, a povrchní podobnosti ukvapeně pokládal za důkaz. Zde se neblaze projevila jeho bojovnost, kterou mu později vytykal Einstein. Lze se též dohadovat, že tu hrálo roli jeho počáteční pozorování rozhoupání vody v nádržích. To v něm mohlo vzbudit představu, že příliv a odliv jsou v podstatě vybuzenými vlastními kmity a jejich podoba tedy výrazně závisí na tvaru nádrže, takže dílčí pozorování nemají obecnou platnost a nelze z nich mnoho získat.

Samotná myšlenka rozlišení inerciálních a neinerciálních soustav je přesto hodná uznání a sledování pokusů o její uplatnění je i po staletích poutavé.

Newton

Vztah Newtonova díla, vytyčujícího na dvě století program, do něhož se měla uložit celá fyzika, k principu relativity je paradoxní. Na jedné straně *Lex I* podepírá (speciální) princip relativity: základní fyzikální zákon, umožňující identifikovat inerciální soustavy jako ty, v nichž těleso nepodrobené vnějším silám zůstává v klidu nebo v rovnoměrném a přímočarém pohybu, ponechává těmto soustavám naprostou rovnoprávnost. Na druhé straně je Newton horlivým zastáncem absolutního prostoru, jak dosvědčuje slavná pasáž z *Principií* [4, s. 412-413]:

Efekty rozlišující absolutní pohyb od relativního pohybu jsou síly odpuzování od osy kruhového pohybu. Neboť při čistě relativním kruhovém pohybu jsou tyto síly nulové, zatímco při pravém a absolutním kruhovém pohybu jsou větší či menší v úměrnosti k velikosti pohybu. Visí-li vědro na velmi dlouhém provaze a tento provaz je neustále otáčen, dokud se z něho nestane zkroucená šňůra, a je-li poté vědro naplněno vodou a je v klidu vůči vodě, načez je nějaká náhlá síla roztočí v opačném směru a jak se provaz rozvine, vědro nějaký čas setrvává v tomto pohybu, pak hladina vody bude zpočátku rovná, právě tak jako byla, než se vědro počalo otáčet. Později však nádoba silou, kterou postupně působí na vodu, způsobí, že voda se rovněž začne pozorovatelně otáčet a bude se postupně zvedat od středu a stoupat ke stěnám nádoby, zaujímajíc konkávní tvar (jak mi ukázala zkušenost), a ve stále rychlejším pohybu

bude stoupat dál a dál, dokud se nezačne otáčet v témž čase jako nádoba a nebude vzhledem k ní relativně v klidu. Vzestup vody odráží její snahu vzdalovat se ose pohybu a z takové snahy můžeme nalézt a změřit pravý a absolutní kruhový pohyb vody, který je zde pravým opakem jejího relativního pohybu. Na počátku, když relativní pohyb vody v nádobě byl největší, pohyb nedával vzniknout žádné snaze ustupovat od osy; voda se nehrnula k obvodu zvedajíc se ke stěnám nádoby, ale zůstávala rovná, a tudíž její pravý kruhový pohyb ještě nezačal. Ale potom, když se relativní pohyb vody zmenšil, její vzestup ke stěnám nádoby prokázal její snahu vzdálit se od osy, a toto chování ukázalo, že pravý kruhový pohyb vody neustále roste a posléze se stává největším, když je voda relativně v klidu k nádobě. Toto chování tudíž nezávisí na změně polohy vody vůči okolním tělesům, a tak pravý kruhový pohyb nemůže být určen pomocí takovýchto změn polohy. Pravý kruhový pohyb každého otáčejícího se tělesa je jediný, což odpovídá jedinému chování jakožto jeho vlastnímu a podstatnému efektu, zatímco relativních pohybů je nespočetně mnoho v závislosti na jejich rozličných vztazích k vnějším tělesům, a stejně jako tyto vztahy úplně postrádají pravé efekty, které vznikají jen v té míře, jak se podílejí na pravém a jediném pohybu.

Tento text sice obhazuje "pravý pohyb", ale neumožňuje jej plně identifikovat, když odhaluje pouze rotační a nikoliv translační pohyby vůči pravému, absolutnímu prostoru. Bylo by sice možno obměnit popsany experiment tak, aby vyloučil i translační pohyb se zrychlením. Při zrychleném pohybu nádrže by se voda vzdouvala k některé z jejích stěn, jak to pozoroval Galilei. Zde by však bylo vyloučení poněkud problematictější, protože zvedání vody by bylo možno připsat také vzdálenému zdroji homogenního gravitačního pole, a bylo by třeba ověřit či postulovat, že takový zdroj neexistuje. Žádná obměna experimentu s vědrem však neodhalí rovnoměrný a přímočarý pohyb, takže absolutní pohyb zůstává v podstatné míře neidentifikován. Newton si jej mohl představovat jako pohyb vzhledem k "pevným hvězdám", jež jako by byly majáky, kterými označil absolutní prostor sám Bůh. Pozdější poznatky o hvězdách ovšem ukázaly, že i ony se vzájemně pohybují a že kromě hvězd viditelných okem v naší Galaxii existují i další galaxie, jež se vzájemně translačně i rotačně pohybují.

Absolutní prostor a pohyb však jako by splňoval nějakou hlubokou psychologickou potřebu lidí – naděje na jeho odhalení přetrvávala. V rámci Newtonovy mechaniky se mohla opírat o možnost nalezení interakčních sil, které závisí na absolutních rychlostech částic. Další posilu načerpala z Maxwellovy teorie elektromagnetického pole, podle níž se světlo šíří ve vakuu ve všech směrech stejnou rychlostí – rozumí se, že vůči absolutnímu prostoru.

Mach

Jakkoliv je Machovo dílo rozsáhlé, úctyhodné a v oblasti experimentální fyziky a historických bádání jsou jeho zásluhy nezpochybnitelné, největší příspěvek v citačním indexu a zároveň mnohdy nejostřejší kritiku mu přinesla slova z jeho *Mechaniky* [5, s. 56, 60-61]:

Newtonův pokus s rotujícím vědrem s vodou ukazuje pouze to, že otáčení vody vzhledem ke stěnám nádoby nevyvolává pozorovatelné odstředivé síly, ale že tyto síly jsou vyvolány rotací vzhledem k hmotě Země a dalším nebeským tělesům. Nikdo nemůže říci, jak by pokus dopadl, kdyby stěny nádoby byly tlustší a masivnější, takže jejich tloušťka by nakonec přesáhla několik mil. Máme jen jednu zkušenost a nezbyvá nám nic jiného, než ji uvést do souladu se všemi ostatními nám známými fakty, nikoliv s libovolnými výtvoři naší fantazie. [...]

Rotuje-li těleso vzhledem k nehybným hvězdám, vznikají odstředivé síly, zatímco rotuje-li vzhledem k jinému tělesu, a nikoliv k nebi nehybných hvězd, pak tyto síly nevznikají. Nemám

nic proti tomu, aby se první pohyb nazval *absolutním*, pokud nezapomeneme, že to neznamena nic jiného nežli rotaci *vzhledem k nebi nehybných hvězd*. Můžeme snad, zatímco držíme nehybně Newtonovo vědro s vodou, otáčet vzhledem k němu hvězdami a dokázat, že v tomto případě odstředivé síly nevzniknou?

Takový pokus je neuskutečnitelný, ale v principu nemůže mít žádný smysl, protože *oba případy jsou pro naše smyslové orgány neodlišitelné*. Proto považují *oba případy za jeden a týž případ*, a rozdíl, který mezi nimi dělá Newton, za iluzi.

Je ovšem pravda, že v balónu se vždy můžeme za mlhy orientovat pomocí tělesa, které *nerotuje vzhledem k nehybnému hvězdnému nebi*. To však není nic jiného, než jeden ze způsobů, jak se orientovat vzhledem k nehybnému hvězdnému nebi; jde prostě o mechanickou orientaci namísto optické.

Starší čtenář postřehne v Machově argumentaci motiv, který kdysi tak rozčilil Lenina – pro Macha je realitou to, co je bezprostředně vnímáno. Sovětští fyzikové se v období zmírnění ideologického tlaku odvážili hájit Macha tím, že fyzikální důsledky jeho názoru posilují roli hmoty a vyjadřují *jeden z nejdialektičtějších předpokladů o povaze prostoročasu* [6, s. 194]. Ideologickou nepřízeň k Machovi už "odnes čas", jeho myšlenka však dodnes vyvolává silný dojem. Představme si civilizaci, jíž zaprášenost kosmického okolí nedovoluje vidět hvězdy, takže si její fyzikové chování Foucaultova kyvadla vykládají bez váhání podobně jako Newton. Pak se v důsledku exploze supernovy obzory vyčistí, kolem nich se začne zjevovat hvězdné nebe a je patrné, že kyvadlo si zachovává rovinu svých kyvů vzhledem k němu. Že by hvězdy s jeho chováním neměly nic společného?

Mach sám nepodal matematickou teorii odpovídající jeho vysvětlení setrvačnosti. Taková teorie může být založena na představě *kinematické relativity* – rovnoprávnosti všech tuhých vztažných systémů. Jednoduchou verzí machovské mechaniky najde čtenář ve Votrubových *Základech speciální teorie relativity*, kde je rovněž ukázáno, že pozorovatelé obklopení sféricky symetricky rozloženou kosmickou hmotou nepozorují žádné odchylky od platnosti Newtonových zákonů; setrvačné síly v soustavách, které jsou z newtonovského hlediska "neinerciální", se však vysvětlují interakcí s hmotami celého vesmíru [7, s. 33-39, 374-376].

Většina diskusí navazujících na Machovy myšlenky však probíhá na půdě obecné teorie relativity.

Einstein I

Einsteinova slavná práce z roku 1905 se věcně nazývá *K elektrodynamice pohybujících se těles*. Připomeňme si její úvodní slova [8, s. 97]:

Je známo, že Maxwellova elektrodynamika v té podobě, jak je dnes obvykle chápána, vede v aplikaci na pohybující se tělesa k asymetrii, jež patrně není vlastní samotným jevům. Vezměme například elektromagnetickou interakci mezi magnetem a vodičem. Pozorovaný jev tu závisí pouze na relativním pohybu mezi magnetem a vodičem, třebaže podle obvyklých představ je třeba oba případy, kdy se pohybuje buď jedno nebo druhé z těchto těles, přísně rozlišovat.

Einstein se dále odvolává na *neúspěšné pokusy odhalit pohyb Země vůči "světlonosnému prostředí"* a vyslovuje předpoklad, že [8, s. 97]:

... pro všechny souřadnicové soustavy, v nichž jsou splněny rovnice mechaniky, platí tytéž elektrodynamické a optické zákony ...

Má ovšem přitom zřejmě na mysli vůbec všechny fyzikální zákony, a proto lze toto tvrzení chápat jako vyslovení 1. postulátu speciální teorie relativity. Sám o sobě se takovýto princip relativity ničím neliší od principu, který je připisován Galileimu. Revoluci ve fyzice znamená teprve jeho spojení s 2. postulátem [8, s. 97-98]:

... světlo se ve vakuu vždy šíří s určitou rychlostí V, jež nezávisí na pohybovém stavu vyzářujícího tělesa.

Aby druhý postulát nebyl v rozporu s prvním, je třeba vzdát se představy o absolutní současnosti a nahradit Galileiho transformace spojující inerciální souřadnicové soustavy transformacemi Lorentzovými. Ty vlastně vyjadřují metrické vlastnosti plochého prostoročasu Minkowského, který to r. 1908 ohlašuje slovy [8, s. 167]:

Vážení pánové! Názory na prostor a čas, které mám v úmyslu před vámi rozvinout, vznikly na základě fyzikálního experimentu. V tom je jejich síla. Od nynějška prostor sám o sobě a čas sám o sobě jsou nuceny se změnit ve fikci a samostatnou existenci si musí zachovat jen jistý druh jejich sjednocení.

Rovnoprávnost inerciálních vztažných systémů tak nabývá hlubokého geometrického podkladu. V dnes nejobvyklejší terminologii a označení jej můžeme vyjádřit takto: *Interval* Δs , "vzdálenost" mezi událostmi prostoročasu, splňuje v Minkowského *plochém* prostoročase v *pseudokartézských* souřadnicích $X^i = (X^0, X^1, X^2, X^3) = (cT, X^\alpha)$, kde c je rychlost světla, T časová souřadnice, X^α ($\alpha = 1, 2, 3$) prostorové souřadnice, vztah

$$\Delta s^2 = (c \Delta T)^2 - \Delta L^2 = \eta_{ik} \Delta X^i \Delta X^k \quad (1)$$

(užíváme Einsteinovy sumační symboliky, ΔL je prostorová vzdálenost počítaná podle Pythagorovy věty). Veličiny $\eta_{ik} = \eta_{ki}$ jsou komponenty pole metrického tenzoru (stručněji metrického pole či metriky) v pseudokartézských souřadnicích, kde mají diagonální tvar

$$\eta_{00} = 1, \quad \eta_{0\alpha} = 0, \quad \eta_{\alpha\beta} = -\delta_{\alpha\beta} \quad (2)$$

($\delta_{\alpha\beta}$ je jednotková matice). Geometricky privilegované a rovnocenné jsou ty souřadnicové soustavy, v nichž si metrika uchovává svůj shora uvedený "kanonický" tvar. Jsou spojeny lineárními transformacemi

$$X'^i = C^i_k X^k + B^i \quad (3)$$

kde matice C^i_k splňují vztahy analogické relacím ortonormality známým z eukleidovské geometrie

$$\eta_{ab} = C^i_a C^k_b \eta_{ik} \quad (4)$$

Grupa transformací (3), (4) se nazývá Poincarého grupou; omezíme-li se na transformace beze změny počátku ($B^i = 0$), mluvíme o Lorentzově grupě. Poincarého a Lorentzova grupa umožňují pomocí svých reprezentací transformovat také jiné veličiny než souřadnice.

Vyjasněme ještě pro přesnost vztah mezi pojmy *souřadnicové* a *vztažné* soustavy. Vztažná soustava je definována *světočarami*, tj. křivkami spojujícími události, které se vzhledem k dané soustavě odehrávají ve stejném místě. Souřadnicové soustavě tedy přísluší vztažná soustava se světočarami $x^\alpha = \text{const.}$, naopak v rámci jediné vztažné soustavy může ještě být zavedeno nekonečně mnoho souřadnicových soustav. V dalším budeme většinou posuzovat

rovnoprávnost souřadnicových soustav v prostoročase, což v sobě zahrnuje i problém rovnoprávnosti vztažných soustav s vhodně vybranými souřadnicemi.

Po této "technické vložce" se můžeme vrátit k principiální stránce problému. Zdálo by se přirozené, že geometrická rovnoprávnost má za následek i rovnoprávnost fyzikální. "Paradigma" (základní myšlenku, v jejímž rámci se teorie rozvíjí) speciální teorie relativity bychom tedy mohli vyjádřit slovy, že tvar fyzikálních zákonů je stejný ve všech soustavách spojených transformacemi Poincarého grupy (se zahrnutím indukovaných transformací fyzikálních veličin v jejích reprezentačních prostorech). Velkým překvapením, které přinesla šedesátá léta 20. století, bylo, že toto tvrzení neplatí v plném rozsahu. Pozorování jevů mikrosvěta prokázalo, že je musíme omezit na *vlastní* Lorentzovu, resp. Poincarého grupu, která nezahrnuje prostorová zrcadlení a obrácení směru času, tj. transformace, k nimž nelze dojít spojitou cestou. Matematicky to znamená, že se omezujeme na transformace, při nichž

$$C = \text{Det } C^i_k = 1, C^o_o \geq 1 \quad (5)$$

zatímco (4) vyžaduje pouze $|C| = 1, |C^o_o| \geq 1$. Současná fyzika mikrosvěta předpokládá navíc invarianci fyzikálních zákonů vůči CPT transformacím, kde P znamená prostorové zrcadlení, T obrácení směru času a C nábojovou konjugaci (záměnu částic za antičástice). Tyto transformace tak spojují povahu prostoročasu se základní vlastností hmoty.

Princip relativity se tak vyvinul v požadavek, aby zákony fyziky byly v oblasti makrosvěta invariantní vůči transformacím vlastní Poincarého grupy, což zahrnuje klasický princip relativity jakožto požadavek rovnoprávnosti inerciálních systémů; v oblasti mikrosvěta mají navíc být invariantní vůči CPT transformacím. V hledání takovýchto zákonů učinila fyzika během dvacátého století velký pokrok, své možnosti však ještě zdaleka nevyčerpala. Jedinou silou přírody, která se speciálně relativistickému paradigmatu nepoddala, byla gravitace.

Einstein II

Ve své práci *Základy obecné teorie relativity* z roku 1916 Einstein zdůvodňuje, proč musel při hledání relativistického gravitačního zákona překročit hranice speciální relativity, odvoláním na Macha [5, s. 148-149]:

Klasická mechanika a v nemenší míře speciální teorie relativity trpí z hlediska teorie poznání jistým nedostatkem, kterého si patrně poprvé jasně povšiml E. Mach. Vysvětlíme jej pomocí následujícího příkladu. Necht' dvě kapalná tělesa stejné velikosti a složení se volně vznášejí v prostoru v tak velké vzdálenosti od sebe navzájem (a ode všech ostatních hmot), že stačí brát do úvahy pouze ty gravitační síly, jimiž na sebe působí částice jednoho a téhož tělesa. Necht' vzdálenost mezi těmito tělesy zůstává neměnná. Necht' dále nedochází k vzájemným přemístěním částí jednoho a téhož tělesa. Necht' se však každá hmota, sledovaná pozorovatelem, který je v klidu vůči druhé hmotě, otáčí kolem přímky spojující hmoty s konstantní úhlovou rychlostí (tento relativní pohyb obou hmot je vždy možno zjistit). Nyní si představme, že povrchy obou těles (S_1 a S_2) jsou změřeny pomocí měřítek (jež jsou vůči těmto tělesům v klidu); necht' výsledkem měření je, že povrch S_1 tvoří kouli, zatímco povrch S_2 je rotační elipsoid.

Nyní vzniká otázka: proč se tělesa S_1 a S_2 chovají různě? Odpověď na ni může být uznána za uspokojivou z hlediska teorie poznání, pokud okolnost, udaná jako příčina, je pozorovaným faktem zkušenosti; neboť princip příčinnosti má jen tehdy povahu tvrzení o jevech ve světě zkušenosti, když se v úloze příčin a následků koneckonců objevují jen pozorovaná fakta.

Newtonova mechanika nedává na tuto otázku uspokojivou odpověď. Říká následující. Zákony mechaniky platí pro prostor R_1 , vzhledem k němuž je těleso S_1 v klidu, ale neplatí pro prostor R_2 , vzhledem k němuž je v klidu těleso S_2 . Avšak galileovský prostor R_1 (a pohyb vzhledem k němu), který se přitom zavádí, je fiktivní příčinou, a nikoliv pozorovaným faktem. Je tedy zřejmé, že newtonovská mechanika v daném případě vyhovuje požadavku příčinnosti nikoliv v jeho podstatě, ale pouze zdánlivě, když přičítá odpovědnost za pozorované odlišné chování těles S_1 a S_2 fiktivní příčině – prostoru R_1 .

Uspokojivá odpověď na shora položenou otázku může být pouze taková: fyzikální systém sestávající z těles S_1 a S_2 sám o sobě nedává možnost stanovit příčinu, která by mohla vysvětlit různé chování těles S_1 a S_2 . Příčina tedy musí ležet vně tohoto systému. Odtud vyplývá, že obecné zákony pohybu, určující tvar těles S_1 a S_2 , musí být takové, aby mechanické vlastnosti těles S_1 a S_2 byly v podstatné míře určeny vzdálenými hmotami, jež jsme do uvažovaného systému nezahrnuli. Tyto vzdálené hmoty (a jejich relativní pohyby vzhledem k uvažovaným tělesům) je tedy třeba považovat za nositele principiálně pozorovatelných příčin chování uvažovaných těles S_1 a S_2 ; ony zaměňují fiktivní příčinu R_1 . Mezi všemi myslitelnými prostory R_1 , R_2 atd. pohybujícími se libovolným způsobem ani jeden nesmí mít apriorní přednost, chceme-li odstranit zmíněný nedostatek z hlediska teorie poznání. Zákony fyziky musí být formulovány tak, aby platily pro libovolně se pohybující souřadnicové soustavy. Dospíváme tedy k rozšíření principu relativity.

Machovy myšlenky tak naznačily cestu k obecnému principu relativity. Z pozdějších analýz se však může zdát, že sehrály podobnou úlohu jako sekera, která sice v pohádce umožnila uvařit polévku, ale nijak se neprojevila v jejím výsledném složení a chuti. I v obecné teorii relativity lze uvažovat o dvou vzdálených tělesech v asymptoticky plochém prostoru, z nichž jedno se točí a druhé nikoliv – tato tělesa mají nejen odlišný tvar povrchu, ale budí také různá gravitační pole. Dynamika Sluneční soustavy by podle obecné relativity vypadala stejně, i kdyby hustota hmotnosti okolních hvězd a galaxií byla jiná, třeba i nulová. Gödelovy modely rotujících vesmírů ukazují, že rotace vesmíru kolem vědra není jen jiným způsobem popisu rotace vědra ve vesmíru.

Obecný princip relativity přitom může být zdůvodněn i bez odvolání na Macha. Při budování teorie relativity Einstein spojil dva zdánlivě odlišné úkoly – formulovat fyziku v neinerciálních systémech a vytvořit relativistickou teorii gravitace. První úkol se zdá být čistě technický: stačí přepsat známé rovnice do křivočarých souřadnic. Druhý si vyžaduje nalezení nových rovnic. A přece je mezi oběma problémy hluboká souvislost, spočívající v tom, že (v důsledku zákona rovnosti tíhové a setrvačné hmotnosti) se částice v poli setrvačných sil i v gravitačním poli pohybuje za daných počátečních podmínek stejným způsobem bez ohledu na svou hmotnost a jiné parametry (*princip ekvivalence*). V plochém prostoročase její pohyb vytyčuje přímku – geodetickou čáru. V neinerciálním systému se to jeví jako důsledek působení sil, jež jsou dány prvními derivacemi metrických koeficientů g_{ik} , které v zakřivených souřadnicích již nemají jednoduchý tvar (2) a získají se přepočtem výrazu pro kvadrát intervalu (1) v infinitesimálním tvaru do křivočarých souřadnic

$$x^i = x^i(X^k) \quad (6)$$

čímž dostáváme

$$ds^2 = g_{ik}(x^j) dx^i dx^k \quad (7)$$

Princip ekvivalence nyní napovídá, že i permanentní gravitační pole buzené hmotami je popsáno metrikou zakřiveného prostoročasu, pohyb volné částice je geodetickou čarou této metriky a nezrušitelné projevy gravitace – slapové síly, odchylka geodetických čar – jsou projevy křivosti odvozené z metriky a jejích derivací do druhého řádu. Einstein tak sjednotil

výklad gravitačních a setrvačných sil, když je vysvětlil jako projev vlastností prostoročasu (tyto vlastnosti jsou ovšem rozložením hmot ovlivněny), zatímco v Machově duchu by bylo postupovat spíše opačně a vyložit tyto síly jednotně jako projev přímé interakce kosmických hmot.

Běžnou gravitační sílu můžeme vždy *lokálně* (tj. v těsném okolí zvolené události) zrušit použitím volně padající *lokálně geodetické soustavy*, v níž jsou v daném bodě prostoročasu první derivace metrických koeficientů nulové a samy tyto koeficienty mají tvar (2). Lokálně geodetické soustavy příslušné dané události jsou spojeny transformacemi (3) a hrají tedy úlohu místních inerciálních soustav. *Globálně* (tj. v celém prostoročase nebo v jeho konečné oblasti) však v případě zakřivení nemůžeme najít žádnou jednoznačně privilegovanou soustavu souřadnic, a je proto přirozené požadovat splnění obecného principu relativity, podle něhož jsou fyzikální zákony vyjádřeny stejnými rovnicemi ve všech soustavách spojených vztahy

$$x'^i = x'^i(x^k) \quad (8)$$

kde předpokládáme pouze dostatečnou hladkost závislostí a obvykle i to, aby jedna z nových souřadnic si podržela časový a tři prostorový charakter.

Důležité je zdůraznit, že "stejnými rovnicemi" míníme rovnice, v nichž metrické koeficienty g_{ik} vystupují v úloze proměnných, za něž není dosazeno jejich konkrétní vyjádření jakožto funkcí prostoročasových souřadnic. Toto vyjádření je – na rozdíl od vyjádření (2), které je stejné ve všech inerciálních soustavách s pseudokartézskými souřadnicemi spojených transformacemi (3) – obecně odlišné. Proto ani neinerciální soustavy v rámci speciální teorie relativity nejsou ekvivalentní z hlediska svých metrických vlastností, což se projevuje přítomností setrvačných sil, jež záleží na druhu pohybu neinerciální soustavy. Tím spíše nejsou ekvivalentní různé soustavy v zakřiveném prostoročase. V tomto smyslu je obecný princip relativity slabší než speciální.

Vyvstaly proto pochybnosti o jeho fyzikálním smyslu. Není tento princip – nazývaný také *principem obecné kovariance* – jen formálním požadavkem, kterému lze rozšířením počtu proměnných vždy vyhovět? Například i rovnice speciální teorie relativity lze napsat tak, že po zahrnutí metrických koeficientů mezi proměnné mají stejný tvar ve všech souřadnicových systémech. A dokonce lze tyto metrické koeficienty považovat za řešení soustavy diferenciálních rovnic, vyjadřujících nulovost tenzoru křivosti. Čím se takto formulovaná speciální relativita zásadně liší od relativity obecné?

I když tato otázka má velmi delikátní aspekty, lze na ni v zásadě odpovědět tak, že rozdíl je v *absolutní* povaze metrických koeficientů ve speciální relativitě a jejich *dynamickém* charakteru v relativitě obecné. Ve speciální relativitě je metrika pevnou rekvizitou jeviště, na němž se odehrávají fyzikální děje, které ji nijak neovlivňují. V obecné relativitě, popřípadě v různých jejích modifikacích a zobecněních, je metrika ovlivňována fyzikálními ději – gravitační pole jí představované hraje spolu s ostatními herci. Krásná a vzrušující diskuse těchto otázek je obsažena v Kuchařově knize *Základy obecné teorie relativity* [9, s. 149-158].

Einstein III

V roce 1917 přistoupil Einstein k pokusu řešit na základě svých gravitačních rovnic kosmologický problém, tj. najít po zprůměrování přes velké oblasti prostoru a času metriku vesmíru. O svých předpokladech píše v článku *Problémy kosmologie a obecná teorie relativity* [5, s. 293-294]

Podle obecné teorie relativity je metrická povaha (křivost) prostoru určena v každém jeho bodě hmotou, která se tam nachází, a jejím stavem. Proto v důsledku nerovnoměrnosti rozložení hmoty může být metrická struktura takového kontinua velmi spleťitá. Mluvíme-li však o struktuře prostoru jako celku, můžeme si představit hmotu jakoby rovnoměrně rozmazánu přes velmi velkou oblast prostoru, takže hustota jejího rozložení se stává velmi pomalu se měnící funkcí. Postupujeme v daném případě stejně, jako geodetové, kteří povrch Země, krajně složitý v detailech, přibližně zaměňují elipsoidem.

Nejdůležitější ze všeho, co víme ze zkušenosti o rozložení hmoty, je to, že relativní rychlosti hvězd jsou velmi malé ve srovnání s rychlostí světla. Proto předpokládám, že pro začátek můžeme naše úvahy založit na následujícím přibližném předpokladu: existuje souřadnicový systém, vzhledem k němuž je možno pokládat látku během dostatečně dlouhé doby za nehybnou. [...] Skalár ρ (střední) hustoty rozložení může apriori být funkcí prostorových souřadnic. Pokud však učiníme předpoklad, že svět je prostorově uzavřen, je přirozené vyslovit hypotézu, že ρ nezávisí na místě; na této hypotéze založíme další úvahy.

Einstein tak především na základě poznatku, že relativní rychlosti kosmických hmot jsou malé, dospěl k představě o privilegované vztažené soustavě, vůči níž je kosmická hmota v klidu. Vzhledem k tomu, že metrika vesmíru je určena skalární veličinou, kterou pokládá za konstantní, je vesmír v této soustavě všude a ve všech směrech stejný (homogenní a izotropní). Tento předpoklad, dnes dobře potvrzený pozorováním, bývá označován za *kosmologický princip*. Einstein dále zkoumal možnost, zda takovýto vesmír může být časově neproměnný. Zjistil, že jeho původní rovnice to (pokud je hustota hmotnosti nenulová) nedovolují. Zavedl proto do svých rovnic "kosmologický člen", který mu umožnil najít první obecně relativistický kosmologický model – Einsteinův statický vesmír.

Často bývá připomínán Einsteinův výrok, že *zavedení kosmologického členu byl největší omyl, jehož se v životě dopustil*. Není pravděpodobně obsažen v žádném z Einsteinových spisů. Podle Gamowovy knihy *Moje světočára* jej Einstein vyslovil během rozhovoru s autorem [10, s. 43]. Einstein přitom kosmologický člen nijak vehementně neprosazuje a konstatuje, že jej zavedl pouze v zájmu nalezení statického řešení [5, s. 297]. Současná kosmologie i mikrofyziika se staví ke kosmologickému členu příznivě a spojuje jej s fyzikálními vlastnostmi vakua. Není vyloučeno, že budoucí věrohodné změření velikosti "kosmologické konstanty" promění "omyl" v další triumf.

Domnívám se, že Einstein nespátroval omyl v samotném zavedení kosmologického členu, ale v tom, že se připravil o možnost předpovědět rozpínání vesmíru, které později v rámci obecné relativity učinil Friedmann a pozorováním rudého posuvu potvrdil Hubble. Interval v homogenním a izotropním vesmíru je obecně vyjádřen výrazem (Robertsonova – Walkerova metrika)

$$ds^2 = (c dt)^2 - R^2(t) d\Sigma^2 \quad (9)$$

kde $d\Sigma$ je interval třírozměrného homogenního a izotropního prostoru, což podle geometrických poznatků může být jedině prostor konstantní křivosti, pro nějž přicházejí do úvahy tři možnosti: Riemannův prostor kladné křivosti, eukleidovský prostor nulové křivosti a Lobačevského prostor záporné křivosti. Současná kosmologická pozorování [11] a pokusy o sjednocovací teorie činí obzvláště populární prostřední možnost, kdy v eukleidovském prostoru je přirozené zavést kartézské souřadnice, takže

$$ds^2 = (c dt)^2 - R^2(t) (dX^2 + dY^2 + dZ^2) \quad (10)$$

Tomuto vesmíru se někdy říká Einsteinův – de Sitterův vesmír, protože tito otcové relativistické kosmologie v společném článku *O souvislosti mezi rozpínáním a střední*

hustotou vesmíru [12, s. 396-398] upozornili na možnost nulové prostorové křivosti vesmíru (kterou nesmíme směřovat s křivostí prostoročasu). Časově závislá veličina $R(T)$ ve vztazích (9), (10) se nazývá škálový faktor a udává, jak se mění vzdálenosti ve vesmíru s časem. Konkrétní závislost škálového faktoru na čase se najde řešením Einsteinových gravitačních rovnic a závisí na tom, jakým druhem hmoty je vesmír vyplněn.

Není však naším úkolem zabývat se podrobněji relativistickou kosmologií. Pro naše účely je podstatné, že symetrie nestatického vesmíru je menší než symetrie plochého prostoročasu. Z hlediska vesmírné geometrie odpadá nejen symetrie vůči posunutí v čase, ale i relativita vůči rovnoměrnému a přímočarému pohybu. Vesmír se v čase mění a pozorovateli, který se vůči němu pohybuje, se nejeví jako izotropní. Ve vesmíru je pouze jeden privilegovaný vztažný systém, který se rozpíná spolu s kosmickou hmotou. Zbývají toliko symetrie vlastní geometrii homogenního a izotropního prostoru. V případě Einsteinova – de Sitterova vesmíru jsou to symetrie eukleidovského prostoru, v němž jsou privilegovány kartézské soustavy souřadnic.

Kdo měl pravdu?

V úvodní části jsme mluvili o třech historicky vzniklých přístupech k problému relativity čili rovnoprávnosti nebo privilegovanosti vztažných soustav. Existuje privilegovaná třída takových soustav anebo jsou všechny rovnoprávné či je privilegovaná pouze jedna? Předchozí výklad naznačil, že každé z těchto stanovisek má jisté oprávnění a že obecná teorie relativity je jistou jejich syntézou. Pokusme se to nyní shrnout.

Pro názornost budeme používat analogie: představme si, že máme zmapovat – tj. zavedením souřadnicové sítě zobrazit do roviny – část zakřiveného povrchu. Existují privilegované – tj. mimořádně prosté a vzájemně ekvivalentní – způsoby mapování anebo jsou všechny způsoby v podstatě stejně dobré či je optimální způsob jediný?

(I) Od Galileiho k lokálně geodetickým soustavám

Část zemského povrchu dostatečně malá, aby bylo možno zanedbat kulatost Země, a zároveň dostatečně velká, aby bylo možno zanedbat místní nerovnosti, může být považována za rovinu a lze na ní zavést kartézské souřadnice, jejichž pomocí je bez zkrácení geometrických vztahů zobrazena na mapě. Ke každému místu na zemském povrchu tedy existuje privilegovaný soubor map věrně zobrazujících jeho okolí a jim příslušných kartézských sítí lišících se směrem os. Podobně lze věrně zmapovat i okolí křivky na povrchu Země (např. Sibiřské magistrály). Stačí k ní na glóbu přilepit tenký proužek papíru a po zakreslení mapy jej rozvinout do roviny.

Prostoročasuovou analogií kartézské mapy je lokálně geodetická soustava, kterou lze zavést v okolí události či světočáry, je-li toto okolí dostatečně malé, aby se na něm neprojevila makroskopická křivost prostoročasu, a dostatečně velké, aby se na něm neprojevil (současnými prostředky nezjistitelné) vlivy mikroskopických objektů na křivost. Lokálně geodetické soustavy jsou místními inerciálními soustavami, které nastupují na místo globálních inerciálních soustav z předrelativistické a speciálně relativistické fyziky. Speciální princip relativity, odvozující se již od Galileiho srovnávání dějů v kajutě lodi, vyjadřuje jejich rovnoprávnost. Od neinerciálních soustav mohou být experimentálně odlišeny. Např. střed Země je neustále v klidu v místní inerciální soustavě zavedené podél jeho světočáry a obíhání Země kolem Slunce nelze proto zjistit pozemskými experimenty (pozorování aberace světla hvězd ovšem čistě pozemským experimentem není a zjišťuje změny pohybu místní soustavy vůči "větší" inerciální soustavě spojené s hvězdami). Naproti

tomu soustava otáčející se spolu se Zemí kolem její osy není inerciální a denní otáčení Země může být prokázáno interferometrickými pokusy založenými na Sagnacově jevu (vzhledem k rotujícímu systému má světlo v různých směrech různou rychlost), což uskutečnili Michelson a Gale již r. 1925. Lokálně geodetická soustava spojená se světočarou fotonu umožňuje redukovat "gravitační" a "kosmologický" rudý posuv na speciálně relativistický Dopplerův jev, jak ukázal velký relativista Synge [13, str. 110-113].

(II) Od Macha k obecné kovarianci

Kdybychom měli mapovat mimořádně nepravidelný a nerovný povrch, jaký mají např. některé asteroidy, museli bychom se smířit s tím, že žádná mapa jen trochu rozsáhlejší oblasti není ideální a geometrii povrchu zkresluje. Protože dvojrozměrnost povrchu umožňuje podrobit metrické koeficienty dvěma podmínkám, mohli bychom volbou těchto podmínek dospívat k různým speciálním soustavám, ty by však nemusely být vždy nejvýhodnější. Pro zkoumání geometrických zákonitostí na takovém povrchu by bylo proto vhodné užívat vztahů, v nichž hodnoty metrických koeficientů nejsou specifikovány a které platí ve všech souřadnicových soustavách (tj. pro všechny mapy).

Obdobná situace nastává v zakřiveném prostoročase. Připomněli jsme, jak byl Einstein k tomuto závěru inspirován Machovými myšlenkami a jak později vznikla pochybnost o tom, co z těchto myšlenek v obecné teorii relativity nakonec zbylo. Myslím, že obecná relativita je ve shodě s Machem přinejmenším v tom, že nedovoluje formulovat paradox, který spatřoval v newtonovské mechanice. Podle ní mohou existovat kinematicky totožné a tedy podle Macha smyslově nerozlišitelné situace (vědro rotující ve vesmíru a vesmír rotující kolem vědra), které jsou odlišné dynamicky, ačkoliv by měly představovat jen rozličný popis téhož jevu. V tomto názoru se, jak jsme viděli, Einstein shodoval s Machem. V obecné relativitě však neexistuje žádná "absolutní" geometrická struktura, která by byla nezávislá na fyzikálních dějích a umožňovala definovat kinematickou totožnost dynamicky odlišných dějů. Prostoročas v rotující hvězdě a v jejím okolí je jiný než ve hvězdě, která nerotuje, a podobně je tomu s rotujícím a nerotujícím vesmírem. Nelze tedy mluvit o totožné kinematice a různém popisu téhož jevu. V tomto smyslu princip obecné kovariance v sobě obsahuje machovské zrno. Mnozí fyzikové se ovšem stále domnívají, že z Macha zůstalo v obecné relativitě víc a že jeho "princip", podle něhož vzdálený vesmír ovlivňuje lokální děje, se v ní při pečlivějším zkoumání přece jen odhalí. Tyto myšlenky jsou spojovány s gravomagnetismem, uzavřeností vesmíru, přítomností kosmologického členu v Einsteinových rovnicích, obohacením těchto rovnic o vliv skalárního pole apod. – viz např. [14, s. 192-200]. Názory na tyto otázky tvoří široké spektrum a zahrnují i popírání významu daného problému; přesto je to téma stále živé – nedávno jsem například viděl preprint o možné souvislosti mezi setrvačností a topologií vesmíru. Rád bych užil příležitosti a připomněl sborníky z vědeckých setkání, kterými 150. výročí Machova narození vzpomnělo jeho rodné město a rodná země [15], [16].

(III) Od Newtona ke kosmologickému principu

Tvar rotačního elipsoidu, který má naše Země, způsobuje, že nepoužitelnější souřadnicovou soustavou na ní je soustava rovnoběžek a poledníků. Počátek odečítání poledníků je sice z geometrického hlediska nahodilý, ale míníme-li "soustavou" pouze souřadnicové čáry (obdobně je vztažný systém určen pouze světočarami a nikoliv jejich konkrétním očíslováním), můžeme říci, že tato soustava je jediná. Geometrie zemského povrchu a její symetrie tedy určuje privilegovanou souřadnicovou soustavu.

Analogicky geometrie a symetrie daná kosmologickým principem určuje privilegovanou vztažnou soustavu ve vesmíru. Tato soustava je vázána na rozpínající se kosmickou hmotu a galaxie ji zviditelňují podobně jako hvězdy měly zviditelňovat Newtonův absolutní prostor. V tomto vesmíru je definována také privilegovaná současnost určovaná synchronizovanými hodinami, jež se účastní jeho rozpínání, a odpovídající stejnému dosaženému stupni jeho vývoje. To je možno chápat jako určitý druh návratu k Newtonovu absolutnímu času. Rozpínající se vesmír má dokonce, jak ukazuje příklad v *Teorii pole* Landaua a Lifšice, jistý "aristotelovský" rys: rychlost volně se pohybujících těles v něm asymptoticky klesá k nule [17, s. 474]. To vše ale nemůžeme považovat za pokorný návrat k starým představám. Nejde tu o absolutní prostor a čas, který by byl nezávislý na fyzikálním dění a zároveň pro ně "závazný" v jakémkoliv měřítku. Naopak dnešní podoba geometrie prostoročasu "na vesmírné škále" je výsledkem dosud z velké části neznámých zákonitostí vzniku a vývoje vesmíru.

Je obecně relativistická syntéza poznatků o prostoru a čase již posledním slovem fyziky? Nevylučoval bych, že v kosmickém a makroskopickém měřítku tomu tak vskutku je, i když ani zde není překvapení vyloučeno. Jinak je tomu v mikrosvětě, kde toužené dovršení sjednocovacího úsilí je nerozlučně vázáno na hluboké pochopení souvislostí mezi kvantovými a obecně relativistickými idejemi, a tedy patrně na podřízení prostoru a času kvantovým principům.

Literatura

- [1] Koperník, M.: Obehy nebeských sfér. SAV, Bratislava 1974.
- [2] Aristotelés: Fyzika. Rezek, Praha 1996.
- [3] Galilei, G.: Dialóg o dvoch systémoch sveta. SAV, Bratislava 1962.
- [4] Newton, I.: The Principia. University of California Press, Berkeley 1999.
- [5] Al'bert Ejnštejn i teórija gravitacii (sborník). Mir, Moskva 1979.
- [6] Micevič, N. V.: Fizičeskije polja v obščej teorii otноситel'nosti. Nauka, Moskva 1969.
- [7] Votruba, V.: Základy speciální teorie relativity. Academia, Praha 1969.
- [8] Princip otноситel'nosti (sborník). Atomizdat, Moskva 1973.
- [9] Kuchař, K.: Základy obecné teorie relativity. Academia, Praha 1968.
- [10] Gamow, G.: Moje světočára. Mladá fronta, Praha 2000.
- [11] Boomerang Experiment. <<http://www.1.slb.com/seed/watch/cosmos/boomerang.htm>>
- [12] Einstein, A.: Sobranije naučnych trudov 2. Nauka, Moskva 1966.
- [13] Synge, J. L.: Obščaja teoriija otноситel'nosti. IIL, Moskva 1963.
- [14] Misner, Ch., Thorne, K., Wheeler, J.: Gravitacija, tom 2. Mir, Moskva 1977.
- [15] Ernst Mach and the Development of Physics (sborník). UK, Praha 1988.
- [16] Pocta Ernstu Machovi (sborník). FVS JČSMF, Brno 1988.
- [17] Landau, L. D., Lifšic, E. M.: Teoriija polja. Nauka, Moskva 1973.

(Překlady citovaných textů ze slovenštiny, angličtiny a ruštiny provedl autor.)

Předneseno na X. semináři o filosofických problémech matematiky a fyziky pořádaném JČMF v srpnu 2000 ve Velkém Meziříčí, bude publikováno v seminárním sborníku.

