

Machův princip a původ setrvačnosti

Existují v zásadě dvě protichůdná stanoviska ke vztahu lokálních a globálních fyzikálních zákonů - k souvislostem mezi zákony "laboratorní fyziky" a vlastnostmi a strukturou vesmíru jako celku. První přístup spočívá v tom, že se vlastnosti vesmíru snažíme odvozovat na základě znalosti **lokálních fyzikálních zákonů** - jejich extrapolací a syntézou. Tak bylo postupováno v celé této knize.

Druhý přístup naopak vychází z představy, že lokální fyzikální zákony mají svůj původ v **globální struktuře celého vesmíru**, nebo že jsou aspoň celkovým rozložením hmoty ve vesmíru ovlivňovány. Tento druhý přístup souvisí s tzv. Machovým principem, jehož vztah k obecné teorii relativity (a tedy k současným představám o gravitaci a struktuře prostoročasu) si zde stručně rozebereme.

Při své kritice Newtonovy koncepce absolutního prostoru a času vyslovil E.Mach [175] některé myšlenky, které spolu s idejemi Riemanna o neeuclidovské geometrii a jejím možném vztahu s fyzikou, sehrály významnou heuristickou úlohu pro Einsteina při vytváření jeho obecné teorie relativity. A.Einstein shrnul a přesněji zformuloval Machovy myšlenky - vznikl tak **Machův princip**, který však, jak se později ukázalo, v obecné teorii relativity obsažen není.

Sledujeme-li zákony pohybu v neinerciální vztažné soustavě (třebas rotující soustavě - známý Newtonův příklad rotujícího vědra s vodou), budou se zde projevovat setrvačné síly, jako jsou např. odstředivé a Coriolisovy síly. Podle Newtona tyto síly vznikají při zrychleném pohybu vůči absolutnímu prostoru. Mach naopak tvrdil, že setrvačné síly vznikají při zrychleném pohybu vzhledem ke vzdáleným hvězdám, čili lépe řečeno při nerovnoměrném pohybu vzhledem k sumární hmotě vesmíru. Mach, který navázal na názory Leibnitze a hlavně Berkeleye, tedy považoval setrvačnost nikoliv za svébytnou vlastnost tělesa samotného, ale za vlastnost podmíněnou všemi ostatními tělesy rozloženými ve vesmíru.

Nejobvyklejší formulace Machova principu jsou následující :

- Setrvačné vlastnosti tělesa jsou určeny rozložením hmoty a energie v celém prostoru.
- Setrvačnost tělesa je způsobena jeho interakcí se všemi ostatními objekty ve vesmíru.
- Setrvačná hmotnost tělesa je určena uspořádáním ostatních hmotných těles ve vesmíru (distribucí veškeré hmoty ve vesmíru).

Během vývoje fyziky gravitace a kosmologie vzniklo velmi široké spektrum nejrůznějších (často zcela protichůdných) názorů a stanovisek k otázce platnosti Machova principu a jeho vztahu k obecné teorii relativity. I z hlediska současného je možný v podstatě dvojitý pohled na původ setrvačných sil projevujících se v neinerciálních vztažných soustavách :

- **a)** Setrvačné síly vznikají při nerovnoměrném pohybu (zkoumané neinerciální soustavy) vzhledem k příslušné inerciální soustavě.
- **b)** Všimnout si, že neinerciálnost vztažné soustavy se projevuje též jejím nerovnoměrným pohybem vzhledem ke vzdáleným "stálícím"; z toho pak vyvodit, že setrvačné síly vznikají při zrychleném pohybu vzhledem ke stálícím prostě proto, že v nich mají svůj původ.

Proti logice přístupu **b)** se dá vznést jednoduchá námitka. Sledujme danou vztažnou soustavu vzhledem k nějakému velmi vzdálenému malému tělísku které je v klidu (i kdyby se toto tělísko ve skutečnosti pohybovalo značně nerovnoměrně, bude se nám zdát že je v klidu, protože jeho pohyby budou vzhledem k velké vzdálenosti prakticky nepozorovatelné. Budeme-li mít neinerciální vztažnou soustavu

v níž působí setrvačné síly, nebylo by jistě rozumné z faktu, že neinerciálnost soustavy se též projevuje jejím nerovnoměrným pohybem vůči uvedenému tělísku vyvozovat, že pozorované setrvačné síly mají svůj původ v tomto vzdáleném tělísku!

Einstein uvedl tři jevy v OTR, které by údajně mohly odpovídat Machovu principu :

- a) Na těleso bude působit urychlující síla, jestliže poblíž ležící tělesa se budou urychlovat, přičemž směr této síly bude stejný se směrem zrychlení okolních těles.
- b) Rotující duté těleso bude uvnitř vytvářet pole Coriolisových sil, způsobující odchylování pohybujících se těles do směru rotace, a též pole radiální odstředivé síly.
- c) Setrvačnost tělesa se zvětší, když se v jeho blízkosti zkoncentrují těžká tělesa.

Všimneme si nejprve efektu c), který je, na rozdíl od prvních dvou, přímým a bezprostředním důsledkem Machova principu a lze ho též zformulovat takto: setrvačná hmotnost tělesa závisí na rozložení hmoty v jeho okolí; kdyby ve vesmíru nebyly žádné jiné hmoty, nemělo by osamocené těleso ani žádnou setrvačnost (setrvačná hmotnost by byla nulová). Tento efekt rozhodně není obsažen v obecné teorii relativity *): podle principu ekvivalence má každé těleso v lokálně inerciální soustavě setrvačnou hmotnost stejnou jako ve speciální teorii relativity. Daná síla (např. síla napnuté pružiny) uděluje v lokálně inerciální vztažné soustavě danému tělesu vždy stejné zrychlení bez ohledu na přítomnost blízkých nebo vzdálených hmot.

*) To, že Einstein zpočátku považoval jev c) za důsledek OTR, bylo způsobeno chybnou interpretací příslušných rovnic, v nichž se projevoval vliv konkrétní použité soustavy souřadnic.

Položme si otázku: Budou se projevovat setrvačné síly i v hypotetickém zcela prázdném vesmíru, v němž nebudou žádné jiné hmoty kromě studované neinerciální (např. rotující) vztažné soustavy? Je jasné, že toto ověřit v praxi není možné, skutečný vesmír je zaplněn hmotou. Einsteinovy gravitační rovnice (bez kosmologického členu) však připouštějí v prázdném vesmíru některá přesná jednoduchá řešení :

1. Minkowskiho prostoročas bez hmot, v němž má každá zkušební částice nenulovou setrvačnou hmotnost odpovídající zákonu setrvačnosti ve speciální teorii relativity.
2. Schwarzschildovo řešení (viz §3.4), ve kterém sice neexistuje globální inerciální soustava, avšak v každém bodě lze zavést lokálně inerciální vztažnou soustavu, v níž setrvačná hmotnost zkušebních částic vůbec nezávisí na tělesu budícím Schwarzschildovo gravitační pole.

Taková jednoduchá a zkušeností prověřená řešení (spolu s některými dalšími, jako je řešení Gödelovo [104]), lze označit za "antimachovská". Vhodně dokumentují skutečnost, že Machův princip ve své původní formulaci je **neslučitelný** s obecnou teorií relativity, protože odporuje principu ekvivalence.

Další námitka proti Machovu principu spočívá v tom, že je těsně spojen s přímým okamžitým působením na dálku. Není jasné, jakým způsobem objekty (třebas galaxie), nacházející se od nás ve vzdálenostech řekněme $\sim 10^8$ světelných let, mohou okamžitě reagovat a působit zpětným vlivem na zrychlující se zkušební těleso nacházející se zde v daném časovém okamžiku. Tyto setrvačné síly by měly být retardovány stejně jako všechna ostatní pole. Na tuto námitku lze odpovědět tak, že pole, kterým vzdálené galaxie působí v daném místě (kde urychlujeme zkušební těleso) zde již je, protože sem rychlostí světla dospělo předtím a zachycuje stav, v němž tyto vzdálené galaxie byly před mnoha miliony nebo miliardami let. Toto pole se tedy může projevit setrvačnou silou současně se změnou

rychlosti sledovaného tělesa. Pokud budeme předpokládat, že pole odpovědné za setrvačnost je pole gravitační (jak je to v duchu OTR - viz §2.1 -2.3), je takto obhajovanému "Machovu principu" ekvivalentní tvrzení: "veškerá hmota ve vesmíru budí gravitační pole, vytváří geometrii prostoročasu a tato geometrie prostoročasu způsobuje setrvačné vlastnosti zkušební tělesa". Avšak prostoročas je všude lokálně eukleidovský (princip ekvivalence) a lokální setrvačné vlastnosti těles vůbec nezávisí na hmotě budící globální gravitační pole. Obsah Machova principu vyjádřený v původní formulaci se nám fakticky vytratil - pokud hledáme původ setrvačnosti v gravitaci, zbude nám zase jen obecná teorie relativity.

Jevy **a)** a **b)**, uváděné často na podporu Machova principu, skutečně podle OTR nastávají ******). Nemají však fakticky mnoho společného s Machovým principem; jsou to vlastně efekty **strhávání lokálních inerciálních soustav**, kdy pohybující se hmota změni geometrii prostoročasu ve svém okolí tak, že lokální inerciální soustavy jsou odlišné od těch, které by zde byly za normálních okolností (význam strhávání inerciálních soustav momentem hybnosti rotujících černých děr byl diskutován v §4.4). Tyto efekty jsou v podstatě stejné povahy jako obyčejné gravitační přitahování, kdy v okolí hmotného tělesa (třeba planety nebo hvězdy) lokální inerciální soustavy padají se zrychlením, zatímco bez přítomnosti gravitujícího tělesa by splývaly s globálními inerciálními soustavami v nekonečno. V těchto zmíněných lokálně inerciálních soustavách však podle principu ekvivalence budou mít testovací tělesa úplně stejné setrvačné vlastnosti, jako ve STR, nezávisle na sebevětším nakupení hmotných těles v jejich okolí.

******) Thirring a Lense [248] vyšetřovali případ, kdy v nekonečném prázdném asymptoticky plochém prostoru se nachází masivní dutá koule. Jestliže se uvnitř ní otáčí kolem jejího středu zkušební tělísko, budou se na něm projevovat odstředivé a Coriolisovy síly. Zůstane-li naopak tělísko v klidu a otáčet se bude dutá koule, budou na těleso opět působit odstředivé a Coriolisovy síly, avšak podstatně menší než v předchozím případě (budou úměrné podílu gravitačního poloměru duté koule k jejímu skutečnému poloměru), i když relativně se jedná o stejný druh pohybu.

V naší literatuře [132],[133],[265] se občas objevuje zajímavá modifikace Machovského přístupu k teorii pole, tzv. megafyzika prof.Z.Horáka; vyšla dokonce monografie [265], v níž se tento přístup rozvádí a předkládá se jako fyzikálně zcela odůvodněný (viz kritickou poznámku pod čarou níže). S názorem, že je tato teorie, používající Machův princip v jeho nejsilnější verzi (např. v prázdném vesmíru vychází rychlost světla rovna nule!), ve shodě s obecnou teorií relativity nelze souhlasit, jak plyne z výše uvedené argumentace. Soulad s OTR lze dokázat jen pro podstatně slabší variantu Machova principu.

Celé jádro nedorozumění v domnělé shodě Machova principu a obecné teorie relativity patrně tkví v příliš přímočarém ztotožňování gravitace a setrvačnosti. V §2.1 jsme si sice ukázali, že gravitace a setrvačnost jsou "dvě stránky jedné mince" a že mají společnou fyzikální podstatu, nedá se z toho však vyvozovat, že jsou zcela totožné. V obecné teorii relativity není pravda, že když přestane působit gravitace, přestane existovat i setrvačnost. Metrický tenzor g_{ik} (který je vždy nenulový!) lze v takovém případě uvést na diagonální tvar, který "diktuje" tělesům běžnou setrvačnost známou ze speciální teorie relativity. Jediné, co je rozložením a pohybem hmoty ovlivňováno, jsou geometrické vlastnosti prostoročasu, a tedy určení (lokálních) inerciálních vztažných soustav jednotlivých těles.

Když se ukázalo, že Machův princip ve své původní silné verzi není obsažen v Einsteinově obecné teorii relativity, rozdělili se fyzikové zhruba na tři skupiny. Někteří prostě odmítli Machův princip jako **nesprávný**. Jiní volili opatrnější stanovisko a snažili se najít vhodnou **slabší formulaci** Machova principu (zachovat jeho "zdravé jádro") slučitelnou s OTR. Ortodoxní zastánci Machova principu se pak snažili **změnit obecnou teorii relativity** "k obrazu" Machova principu *****). Podrobnější popis podobných snah je mimo rámec této knihy (odkazujeme např. na práce [32],[67],[68],[69]); pro ilustraci zde uvedeme jen nejznámější z nich - Bransovu-Dickeovu teorii gravitace.

*****) V knize [265] "Fyzikální pole z hlediska teorie relativity" se dokonce obrací obvyklý logický postup

odvozování STR, jejíž základní postuláty se snaží odvodit v rámci newtonovské mechaniky z určitých "megafyzikálních" úvah o gravitačním potenciálu χ^* vesmíru: ze zákona zachování mechanické energie tělesa v gravitačním poli vesmíru se tam nejprve odvozuje relativistická dynamika, konkrétně vztah

$m = m(v) = m_0 \sqrt{1 - v^2/c^2}$, a na základě toho se teprve odvozuje relativistická kinematika - Lorentzovy transformace. Tento postup, kromě toho že je nelogický a zakrývá vlastní fyzikální podstatu speciální teorie relativity, rozhodně nelze považovat za důkaz souladu Machova principu s teorií relativity, tím méně pak za důkaz STR. Obdržení správných zákonitostí STR je zde třeba považovat spíše za náhodu, protože odvození je založeno na fyzikálně ne zcela korektním postupu při konfrontaci změny hybnosti částice se zákonem zachování energie (např. do celkové energie není zahrnuta potenciální energie částice v poli síly způsobující urychlování částice). Kromě toho samotná koncepce, v níž určité hodnotě χ^* konstantního gravitačního potenciálu je připisován fyzikální význam, principiálně nemůže být konzistentní s použitou klasickou mechanikou, kde potenciál je určen až na libovolnou konstantu, takže případy $\chi^* = (\text{libovolná konstanta})$ a $\chi^* = 0$ jsou fyzikálně zcela ekvivalentní.

Bransova- Dickeova teorie gravitace

Podle **silné verze** Machova principu nejsou setrvačné hmotnosti jednotlivých elementárních částic přírodními konstantami, ale jsou určeny interakcí těchto částic s celkovou hmotou vesmíru, tj. interakcí s určitým "kosmologickým" polem souvisejícím s hustotou hmoty ve vesmíru. Podle principu ekvivalence (setrvačné hmotnosti a pasivní i aktivní tíhové hmotnosti) může být hmotnost m každé částice stanovena pomocí gravitačního zrychlení Gm/r^2 udíleného další testovací částici ve vzdálenosti r . Kosmologické pole machovsky ovlivňující hmotnosti těles by tedy mělo ovlivňovat gravitační konstantu G .

V **Bransově-Dickeově teorii gravitace** [32],[69], která je modifikací Einsteinovy OTR, se v zakřiveném prostoročase \mathbb{M} kromě obvyklých a známých částic a polí postuluje existence tzv. φ -pole (s nulovou klidovou hmotností - pole dalekého dosahu), které zde má některé podstatně odlišné vlastnosti a projevy než ostatní pole. Celkový integrál akce v této teorii se skládá ze tří členů :

$$S = \int \left[\frac{c^3}{16\pi G_0} (-\varphi \cdot R + L_\varphi) + \frac{1}{c} L_m \right] d\Omega, \quad (A.2)$$

kde $G_0 = \text{const.}$ je gravitační konstanta (důvod indexu "0" vyplyne z dalšího), L_m je obyčejný lagrangián běžných částic a negravitačních polí, $L_\varphi = \omega \cdot \varphi_{,i} \varphi^{,i} / \varphi$ je lagrangián hypotetického φ -pole $\varphi = \varphi(x^i) = \varphi(x, y, z, t)$. φ -pole je však součástí i prvního členu v (A.1) popisujícího gravitaci, kde skalární křivost prostoročasu R je násobena funkcí φ . A v tom právě spočívá neobvyklá role φ -pole, jak bude vidět níže.

Diferenciální rovnice pole se jako obvykle získají položením příslušné variace integrálu akce (A.1) rovné nule. Variace metriky g^{ik} vede ke gravitačním rovnicím podobným Einsteinovým rovnicím:

$$R^{ik} - \frac{1}{2} g^{ik} R = (8\pi G_0/c^4) (T_m^{ik} + T_\varphi^{ik}) \quad . \quad (A.2)$$

Variace podle φ dá rovnici

$$(2\omega/\varphi) \cdot \square\varphi - (\omega/\varphi^2) \cdot (\varphi_{,i} \varphi^{,i}) + R = 0 \quad ,$$

kde však skalární křivost R je podle první rovnice (A.2) určena celkovým tenzorem energie-hybnosti $T^{ik} = T_m^{ik} + T_\varphi^{ik}$, takže po dosazení se získá rovnice, popisující jak hmota jako zdroj budí φ -pole:

$$\square\varphi = \frac{8\pi G_0}{(3+2\omega)c^4} T \quad . \quad (A.3)$$

Tenzor energie-hybnosti T_φ^{ik} pole φ vystupuje v rovnici (A.2) spolu s tenzorem energie-hybnosti negravitační hmoty jako zdroj gravitačního pole, což není nic divného. Avšak "efektivní gravitační konstanta" $G = G_0/\varphi$ zde již není univerzální konstantou, protože φ je obecně funkcí místa a času. Tato funkce φ je přitom dána rovnicí (A.3), v níž jako zdroj působí hmota všech těles a negravitačních polí.

φ -pole by zde tedy mohlo být tím polem, které zprostředkovává Machovské ovlivňování fyzikálních zákonů rozložením hmoty ve vesmíru, protože proměnností gravitační konstanty G ovlivňuje efektivně hmotnosti všech částic. Podle rovnice (A.3) pole φ závisí na distribuci hmoty v celém prostoru. Jestliže není žádná hmota, je φ rovno nule, v integrálu akce (A.1) vymizí člen $\varphi \cdot R$ popisující gravitaci a žádná gravitace neexistuje. Z rovnice (A.3) generace φ -pole rozložením hmoty je dále vidět, že zdroje budí φ -pole nepřímo úměrně vzdálenosti r . Pokud uvažujeme vesmír s přibližně homogenním a izotropním rozložením hmoty, hmotnost obsažená v kulové slupce poloměru r a tloušťky Δr roste s poloměrem jako r^2 . Proto je v tomto (jak se zdá realistickém) případě pole φ určeno především vzdálenými zdroji (distribucí hmoty ve vzdálených částech vesmíru) a bude jen velmi málo záviset na přítomnosti blízkých hmot (jako jsou planety, hvězdy nebo i galaxie) za normálních okolností. Tato specifická vlastnost Machovské síly se nabízí pro různé megafyzikální spekulace. Pouze tehdy, když je v blízkosti uvažovaného místa tak husté nakupení hmoty~energie, že gravitační potenciál je blízký jedné ($\sim c^2$ v běžných jednotkách), bude tím podstatně ovlivněno i φ -pole. Tato situace by nastala v blízkosti neutronových hvězd a hlavně černých děr, jejichž fyzika by se v Bransově-Dickeho teorii značně lišila od fyziky černých děr v OTR (popsané v kapitole 4). V Brans-Dickeho teorii by např. mohly existovat podélné vlny φ -pole; takové "podélné gravitační vlny" by se mohly vyzářovat i při sféricky symetrickém gravitačním kolapsu.

Kosmologické důsledky Bransovy-Dickeovy teorie vykazují též určité rozdíly oproti standardní kosmologii v rámci OTR [69]; především se projevuje rychlejší kosmologická expanze, což by mělo samozřejmě vliv na prvotní nukleosyntézu (§5.4), především na obsah hélia. Je možno uvažovat též kosmologická řešení s volným φ -polem, která již nejsou tak přímo spojena s Machovým principem.

Bransova-Dickeova teorie obsahuje volný bezrozměrný parametr ω , přičemž hodnota $\omega = \infty$ odpovídá standardní obecné teorii relativity. Experimentálně ověřovat Bransovu-Dickeovu teorii, tj. stanovit parametr ω , lze v principu trojím způsobem:

- a) Změřením **proměnnosti gravitační konstanty** $(dG/dt)/G$ v důsledku kosmologické evoluce; změna hodnoty G se však může projevit až za velmi dlouhé období.
- b) Stanovením malých oprav v klasických testech OTR, tj. v nebeské mechanice (posun perihelia Merkuru) nebo v ohybu světelných paprsků procházejících kolem Slunce.
- c) Rozborem **kosmologických důsledků** Bransovy-Dickeovy teorie, především vlivu na prvotní nukleosyntézu (která je velmi citlivá na rychlost expanze), a jejich konfrontací se skutečností.

Dosud uskutečněná pozorování tohoto druhu vedou pro hodnotu parametru ω k omezení $|\omega| \geq 6$.

Celkově lze říci, že výsledky pozorování nejsou příznivé pro Bransovu-Dickeovu teorii a preferují spíše obecnou teorii relativity.

Machův princip a experiment; anizotropie setrvačnosti

Mezi Machovým principem (v jeho silné verzi) a obecnou teorií relativity může rozhodnout pouze experiment. Platnost Machova principu by vedla k **anizotropii setrvačnosti** v případě, kdy rozložení okolních hmot ve vesmíru by nebylo izotropní, např. když zkušební těleso by se nacházelo poblíž jiného tělesa o velmi velké hmotnosti, která by nebyla zcela zanedbatelná vůči hmotnosti všech těles ve vesmíru (pokud je vesmír uzavřený a "konečný"; pro nekonečný vesmír ztrácí Machův princip smysl).

Setrvačná hmotnost tělesa by pak závisela na **směru jeho zrychlení** (a směr zrychlení by obecně nesouhlasil se směrem síly, konzervativní síly by přestaly být konzervativní a pod.).

Zdá se, že my se opravdu nacházíme v podobné **asymetrické** situaci; naše Země leží na okraji Galaxie o hmotnosti $\sim 10^{11} M_{\odot}$, takže tato excentrická poloha Země by se měla podle Machova principu projevit tím, že setrvačnost každého tělesa by mírně závisela na úhlu mezi směrem pohybu tělesa a spojnicí se středem Galaxie. Pokud bychom nějaké těleso urychlovali ve směru ke středu Galaxie a pak ve směru opačném, naměřili bychom v obou případech poněkud jinou setrvačnou hmotnost (odpor tělesa vůči zrychlování).

Experiment na prověření izotropie setrvačnosti byl proveden v r.1960 Hughesem a kol. [139]. V tomto experimentu byla sledována rezonanční absorpce fotonů jádru Li^7 v silném magnetickém poli. Pokud jsou zákony jaderné fyziky invariantní vzhledem k pootočení, tj. setrvačnost je izotropní, budou v magnetickém poli všechny čtyři rozštěpené energetické podúrovně základního stavu jádra Li^7 (se spinem $3/2$) ekvidistantní a absorpční spektrum bude vykazovat jediný ostrý pík. Anizotropie setrvačnosti by naproti tomu vedla k porušení ekvidistantnosti rozštěpených energetických hladin, a tedy ke vzniku tří blízkých absorpčních čar. Přesná spektrometrická měření (prováděná vždy po několik hodin, aby se vlivem rotace Země podstatně změnil úhel mezi směrem magnetického pole a směrem k

centru Galaxie) neprokázala žádné měřitelné rozštěpení absorpčního píku (větší než vlastní šířka čáry), což ukazuje, že anizotropie setrvačné hmotnosti nemůže být větší než asi $\Delta m/m \leq 10^{-21}$.

.....

Status Machova principu v obecné teorii relativity

Závěrem můžeme shrnout, že Machův princip je v obecné teorii relativity splněn jen v tom smyslu, když pod výrokem "Rozložení hmoty v celém vesmíru určuje setrvačné vlastnosti těles" budeme rozumět "Rozložení hmoty ve vesmíru určuje lokální inerciální soustavu každého tělesa" *). Jakmile je taková lokálně inerciální soustava jednou nalezena, setrvačné vlastnosti těles ani jiné lokální fyzikální zákony v ní již nezávisí na přítomnosti a rozložení blízkých nebo vzdálených těles.

Po kritické analýze Machova principu a jeho vztahu k obecné teorii relativity tak vidíme, že původní nejasná formulace "Setrvačné vlastnosti každého tělesa jsou dány jeho interakcí s veškerou hmotou ve vesmíru", umožňující nesprávnou interpretaci, je třeba nahradit formulací "Vlastnosti prostoru a času jsou určeny rozložením hmoty~energie ve vesmíru" vystihující podstatu obecné teorie relativity. Jedině toto je "**zdravé jádro**" Machova principu slučitelné s obecnou teorií relativity.

*) Zajímavý přístup k Machovu principu byl vypracován Wheelerem [276], který se pomocí něj nesnaží modifikovat obecnou teorii relativity, ale Machův princip (avšak v podstatně slabším znění než původní formulace) používal k získání okrajových podmínek pro Einsteinovy rovnice jako určitý kosmologický selekční princip. Ve Wheelerově koncepci se již nehovoří o tom, že okamžité rozložení hmoty v celém vesmíru by mělo určovat setrvačné vlastnosti těles v lokálně inerciálních soustavách, ale že geometrie prostoročasu je určena distribucí hmoty~energie na počáteční hyperploše prostorového typu. Machův princip v této aplikaci pak vede k požadavku, aby vesmír byl uzavřený; geometrie prostoročasu v minulosti, přítomnosti i budoucnosti, a tím i "setrvačné vlastnosti" všech částic, jsou pak určeny zadáním trojrozměrné geometrie uzavřeného prostoru ve dvou blízkých časových okamžicích a zadáním hustoty rozložení a proudu energie a hybnosti.

Machův princip a původ setrvačnosti

Existují v zásadě dvě protichůdná stanoviska ke vztahu lokálních a globálních fyzikálních zákonů - k souvislostem mezi zákony "laboratorní fyziky" a vlastnostmi a strukturou vesmíru jako celku. První přístup spočívá v tom, že se vlastnosti vesmíru snažíme odvozovat na základě znalosti **lokálních fyzikálních zákonů** - jejich extrapolací a syntézou. Tak bylo postupováno v celé této knize.

Druhý přístup naopak vychází z představy, že lokální fyzikální zákony mají svůj původ v **globální struktuře celého vesmíru**, nebo že jsou aspoň celkovým rozložením hmoty ve vesmíru ovlivňovány. Tento druhý přístup souvisí s tzv. Machovým principem, jehož vztah k obecné teorii relativity (a tedy k současným představám o gravitaci a struktuře prostoročasu) si zde stručně rozebereme.

Při své kritice Newtonovy koncepce absolutního prostoru a času vyslovil E.Mach [175] některé myšlenky, které spolu s idejemi Riemanna o neeukleidovské geometrii a jejím možným vztahu s fyzikou, sehrály významnou heuristickou úlohu pro Einsteina při vytváření jeho obecné teorie relativity. A.Einstein shrnul a přesněji zformuloval Machovy myšlenky - vznikl tak **Machův princip**, který však, jak se později ukázalo, v obecné teorii relativity obsažen není.

Sledujeme-li zákony pohybu v neinerciální vztažné soustavě (třebas rotující soustavě - známý Newtonův příklad rotujícího vědra s vodou), budou se zde projevovat setrvačné síly, jako jsou např. odstředivé a Coriolisovy síly. Podle Newtona tyto síly vznikají při zrychleném pohybu vůči absolutnímu prostoru. Mach naopak tvrdil, že setrvačné síly vznikají při zrychleném pohybu vzhledem ke vzdáleným hvězdám, čili lépe řečeno při nerovnoměrném pohybu vzhledem k sumární hmotě vesmíru. Mach, který navázal na názory Leibnitze a hlavně Berkeleye, tedy považoval setrvačnost nikoliv za svébytnou vlastnost tělesa samotného, ale za vlastnost podmíněnou všemi ostatními tělesy rozloženými ve vesmíru.

Nejobvyklejší formulace Machova principu jsou následující :

- Setrvačné vlastnosti tělesa jsou určeny rozložením hmoty a energie v celém prostoru.
- Setrvačnost tělesa je způsobena jeho interakcí se všemi ostatními objekty ve vesmíru.
- Setrvačná hmotnost tělesa je určena uspořádáním ostatních hmotných těles ve vesmíru (distribucí veškeré hmoty ve vesmíru).

Během vývoje fyziky gravitace a kosmologie vzniklo velmi široké spektrum nejrůznějších (často zcela protichůdných) názorů a stanovisek k otázce platnosti Machova principu a jeho vztahu k obecné teorii relativity. I z hlediska současného je možný v podstatě dvojitý pohled na původ setrvačných sil projevujících se v neinerciálních vztažných soustavách :

- **a)** Setrvačné síly vznikají při nerovnoměrném pohybu (zkoumané neinerciální soustavy) vzhledem k příslušné inerciální soustavě.
- **b)** Všimnout si, že neinerciálnost vztažné soustavy se projevuje též jejím nerovnoměrným pohybem vzhledem ke vzdáleným "stálícím"; z toho pak vyvodit, že setrvačné síly vznikají při zrychleném pohybu vzhledem ke stálícím prostě proto, že v nich mají svůj původ.

Proti logice přístupu **b)** se dá vznést jednoduchá námitka. Sledujme danou vztažnou soustavu vzhledem k nějakému velmi vzdálenému malému tělísku které je v klidu (i kdyby se toto tělísko ve skutečnosti pohybovalo značně nerovnoměrně, bude se nám zdát že je v klidu, protože jeho pohyby budou vzhledem k velké vzdálenosti prakticky nepozorovatelné. Budeme-li mít neinerciální vztažnou soustavu v níž působí setrvačné síly, nebylo by jistě rozumné z faktu, že neinerciálnost soustavy se též projevuje jejím nerovnoměrným pohybem vůči uvedenému tělísku vyvozovat, že pozorované setrvačné síly mají svůj původ v tomto vzdáleném tělísku!

Einstein uvedl tři jevy v OTR, které by údajně mohly odpovídat Machovu principu :

a) Na těleso bude působit urychlující síla, jestliže poblíž ležící tělesa se budou urychlovat, přičemž směr této síly bude stejný se směrem zrychlení okolních těles.

b) Rotující duté těleso bude uvnitř vytvářet pole Coriolisových sil, způsobující odchylování pohybujících se těles do směru rotace, a též pole radiální odstředivé síly.

c) Setrvačnost tělesa se zvětší, když se v jeho blízkosti zkoncentrují těžká tělesa.

Všimneme si nejprve efektu c), který je, na rozdíl od prvních dvou, přímým a bezprostředním důsledkem Machova principu a lze ho též zformulovat takto: setrvačná hmotnost tělesa závisí na rozložení hmoty v jeho okolí; kdyby ve vesmíru nebyly žádné jiné hmoty, nemělo by osamocené těleso ani žádnou setrvačnost (setrvačná hmotnost by byla nulová). Tento efekt rozhodně není obsažen v obecné teorii relativity *): podle principu ekvivalence má každé těleso v lokálně inerciální soustavě setrvačnou hmotnost stejnou jako ve speciální teorii relativity. Daná síla (např. síla napnuté pružiny) uděluje v lokálně inerciální vztažné soustavě danému tělesu vždy stejné zrychlení bez ohledu na přítomnost blízkých nebo vzdálených hmot.

*) To, že Einstein zpočátku považoval jev c) za důsledek OTR, bylo způsobeno chybnou interpretací příslušných rovnic, v nichž se projevoval vliv konkrétní použité soustavy souřadnic.

Položme si otázku: Budou se projevovat setrvačné síly i v hypotetickém zcela prázdném vesmíru, v němž nebudou žádné jiné hmoty kromě studované neinerciální (např. rotující) vztažné soustavy? Je jasné, že toto ověřit v praxi není možné, skutečný vesmír je zaplněn hmotou. Einsteinovy gravitační rovnice (bez kosmologického členu) však připouštějí v prázdném vesmíru některá přesná jednoduchá řešení :

1. Minkowskiho prostoročas bez hmot, v němž má každá zkušební částice nenulovou setrvačnou hmotnost odpovídající zákonu setrvačnosti ve speciální teorii relativity.

2. Schwarzschildovo řešení (viz §3.4), ve kterém sice neexistuje globální inerciální soustava, avšak v každém bodě lze zavést lokálně inerciální vztažnou soustavu, v níž setrvačná hmotnost zkušebních částic vůbec nezávisí na tělesu budícím Schwarzschildovo gravitační pole.

Taková jednoduchá a zkušeností prověřená řešení (spolu s některými dalšími, jako je řešení Gödelovo [104]), lze označit za "antimachovská". Vhodně dokumentují skutečnost, že Machův princip ve své původní formulaci je **neslučitelný** s obecnou teorií relativity, protože odporuje principu ekvivalence.

Další námitka proti Machovu principu spočívá v tom, že je těsně spojen s přímým okamžitým působením na dálku. Není jasné, jakým způsobem objekty (třebas galaxie), nacházející se od nás ve vzdálenostech řekněme $\sim 10^8$ světelných let, mohou okamžitě reagovat a působit zpětným vlivem na zrychlující se zkušební těleso nacházející se zde v daném časovém okamžiku. Tyto setrvačné síly by měly být retardovány stejně jako všechna ostatní pole. Na tuto námitku lze odpovědět tak, že pole, kterým vzdálené galaxie působí v daném místě (kde urychlujeme zkušební těleso) zde již je, protože sem rychlostí světla dospělo předtím a zachycuje stav, v němž tyto vzdálené galaxie byly před mnoha miliony nebo miliardami let. Toto pole se tedy může projevit setrvačnou silou současně se změnou rychlosti sledovaného tělesa. Pokud budeme předpokládat, že pole odpovědné za setrvačnost je pole gravitační (jak je to v duchu OTR - viz §2.1 -2.3), je takto obhajovanému "Machovu principu" ekvivalentní tvrzení: "veškerá hmota ve vesmíru budí gravitační pole, vytváří geometrii prostoročasu a tato geometrie prostoročasu způsobuje setrvačné vlastnosti zkušebního tělesa". Avšak prostoročas je všude lokálně eukleidovský (princip ekvivalence) a lokální setrvačné vlastnosti těles vůbec nezávisí na hmotě budící globální gravitační pole. Obsah Machova principu vyjádřený v původní formulaci se nám fakticky vytratil - pokud hledáme původ setrvačnosti v gravitaci, zbude nám zase jen obecná teorie relativity.

Jevy a) a b), uváděné často na podporu Machova principu, skutečně podle OTR nastávají **). Nemají však fakticky mnoho společného s Machovým principem; jsou to vlastně efekty **strhávání lokálních inerciálních soustav**, kdy pohybující se hmota změní geometrii prostoročasu ve svém okolí tak, že

lokální inerciální soustavy jsou odlišné od těch, které by zde byly za normálních okolností (význam strhávání inerciálních soustav momentem hybnosti rotujících černých děr byl diskutován v §4.4). Tyto efekty jsou v podstatě stejné povahy jako obyčejné gravitační přitahování, kdy v okolí hmotného tělesa (třebas planety nebo hvězdy) lokální inerciální soustavy padají se zrychlením, zatímco bez přítomnosti gravitujícího tělesa by splývaly s globálními inerciálními soustavami v nekonečnu. V těchto zmíněných lokálně inerciálních soustavách však podle principu ekvivalence budou mít testovací tělesa úplně stejné setrvačné vlastnosti, jako ve STR, nezávisle na sebevětším nakupení hmotných těles v jejich okolí.

**) Thirring a Lense [248] vyšetřovali případ, kdy v nekonečném prázdném asymptoticky plochem prostoru se nachází masivní dutá koule. Jestliže se uvnitř ní otáčí kolem jejího středu zkušební tělisko, budou se na něm projevovat odstředivé a Coriolisovy síly. Zůstane-li naopak tělisko v klidu a otáčet se bude dutá koule, budou na těleso opět působit odstředivé a Coriolisovy síly, avšak podstatně menší než v předchozím případě (budou úměrné podílu gravitačního poloměru duté koule k jejímu skutečnému poloměru), i když relativně se jedná o stejný druh pohybu.

V naší literatuře [132],[133],[265] se občas objevuje zajímavá modifikace Machovského přístupu k teorii pole, tzv. megafyzika prof.Z.Horáka; vyšla dokonce monografie [265], v níž se tento přístup rozvádí a předkládá se jako fyzikálně zcela odůvodněný (viz kritickou poznámku pod čarou níže). S názorem, že je tato teorie, používající Machův princip v jeho nejsilnější verzi (např. v prázdném vesmíru vychází rychlost světla rovna nule!), ve shodě s obecnou teorií relativity nelze souhlasit, jak plyne z výše uvedené argumentace. Soulad s OTR lze dokázat jen pro podstatně slabší variantu Machova principu.

Celé jádro nedorozumění v domnělé shodě Machova principu a obecné teorie relativity patrně tkví v příliš přímočarém ztotožňování gravitace a setrvačnosti. V §2.1 jsme si sice ukázali, že gravitace a setrvačnost jsou "dvě stránky jedné mince" a že mají společnou fyzikální podstatu, nedá se z toho však vyvozovat, že jsou zcela totožné. V obecné teorii relativity není pravda, že když přestane působit gravitace, přestane existovat i setrvačnost. Metrický tenzor g_{ik} (který je vždy nenulový!) lze v takovém případě uvést na diagonální tvar, který "diktuje" tělesům běžnou setrvačnost známou ze speciální teorie relativity. Jediné, co je rozložením a pohybem hmoty ovlivňováno, jsou geometrické vlastnosti prostoročasu, a tedy určení (lokálních) inerciálních vztažných soustav jednotlivých těles.

Když se ukázalo, že Machův princip ve své původní silné verzi není obsažen v Einsteinově obecné teorii relativity, rozdělili se fyzikové zhruba na tři skupiny. Někteří prostě odmítli Machův princip jako **nesprávný**. Jiní volili opatrnější stanovisko a snažili se najít vhodnou **slabší formulaci** Machova principu (zachovat jeho "zdravé jádro") slučitelnou s OTR. Ortodoxní zastánci Machova principu se pak snažili **změnit obecnou teorii relativity** "k obrazu" Machova principu *). Podrobnější popis podobných snah je mimo rámec této knihy (odkazujeme např. na práce [32],[67],[68],[69]); pro ilustraci zde uvedeme jen nejznámější z nich - Bransovu-Dickeovu teorii gravitace.

) V knize [265] "Fyzikální pole z hlediska teorie relativity" se dokonce obrací obvyklý logický postup odvozování STR, jejíž základní postuláty se snaží odvodit v rámci newtonovské mechaniky z určitých "megafyzikálních" úvah o gravitačním potenciálu χ^ vesmíru: ze zákona zachování mechanické energie tělesa v gravitačním poli vesmíru se tam nejprve odvozuje relativistická dynamika, konkrétně vztah

$m = m(v) = m_0 \sqrt{1 - v^2/c^2}$, a na základě toho se teprve odvozuje relativistická kinematika - Lorentzovy transformace. Tento postup, kromě toho že je nelogický a zakrývá vlastní fyzikální podstatu speciální teorie relativity, rozhodně nelze považovat za důkaz souladu Machova principu s teorií relativity, tím méně pak za důkaz STR. Obdržení správných zákonitostí STR je zde třeba považovat spíše za náhodu, protože odvození je založeno na fyzikálně ne zcela korektním postupu při konfrontaci změny hybnosti částice se zákonem zachování energie (např. do celkové energie není zahrnuta potenciální energie částice v poli síly způsobující urychlování částice). Kromě toho samotná koncepce, v níž určité hodnotě

χ^* konstantního gravitačního potenciálu je připisován fyzikální význam, principiálně nemůže být konzistentní s použitou klasickou mechanikou, kde potenciál je určen až na libovolnou konstantu, takže případy $\chi^* = (\text{libovolná konstanta})$ a $\chi^* = 0$ jsou fyzikálně zcela ekvivalentní.