Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

Zdeněk Horák

Sto let Machova principu

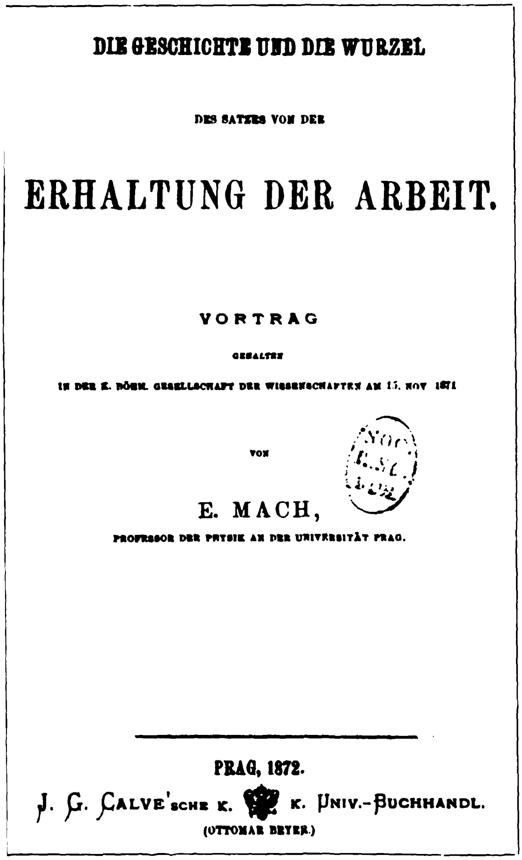
Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 18 (1973), No. 3, 123--131

Persistent URL: http://dml.cz/dmlcz/139294

Sto let Machova principu

Zdeněk Horák, Praha

V roce 1872 vydal Ernst Mach, tehdejší profesor fyziky na pražské universitě, drobnou knížku [1], v níž bylo s několika dodatky otištěno Machovo německé pojednání o zákonu zachování energie, přednesené před Královskou učenou českou společností. V prvním z těchto dodatků (na str. 47–50) byla poprvé tiskem zveřejněna Machova pronikavá kritika NEWTONOVA zákona setrvačnosti, která vychází z přesvědčení, že *všechny pohyby* (nevyjímaje pohyby zrychlené, křivočaré a otáčivé) jsou relativní a že zákon setrvačnosti musí být tak formulován, aby zůstal v platnosti, i když připustíme, že Země stojí a stálice se otáčejí kolem ní. Mach vykládá novým způsobem známý Newtonův pokus s rotujícím vědrem naplněným vodou a dospívá k myšlence, že *setrvačnost není absolutní* (*svébytnou*) *vlastností tělesa samotného*, *ale vlastností relativní podmíněnou všemi ostatními tělesy*, *zejména tělesy rozloženými ve světovém prostoru* (Weltraum), která k setrvačnosti každého tělesa přispívají úměrně svým hmotnostem.*)


DIE GESCHICHTE UND DIE WURZEL

DES SATZES VON DER

ERHALTUNG DER ARBEIT.

VORTRAG

GEHALTEN

IN DER K. BÖHM. GESELLSCHAFT DER WISSENSCHAFTEN AM 15. NOV 1871

VON

E. MACH,

PROFESSOR DER PHYSIK AN DER UNIVERSITÄT PRAG.

PRAG, 1872.

J. G. CALVE'SCHE K. K. UNIV.-BUCHHANDL.

(OTTOMAR BEYER.)

Titulní stránka Machova pojednání [1].

Newtonovo pojetí setrvačnosti a hlavně jím zavedené apriorní pojmy absolutního prostoru a absolutního času vyvolaly námitky již v jeho době. Tyto pojmy odmítal zejména LEIBNIZ a filosof BERKELEY již tehdy spatřoval původ setrvačnosti ve hvězdách. Proti této myšlence se naopak stavěl EULER pokládaje ji za nevědeckou.

Také Machova myšlenka, v podstatě shodná s názorem Berkeleyovým, od počátku vyvolávala pochybnosti i námitky, z nichž nejzávažnější byla námitka PLANCKOVA (1908). Vytýkal, že Machův názor zastírá nesmírný pokrok, který představuje Koperníkovo učení ve srovnání se sta-

*) Populární výklad problému setrvačnosti je v článku [2].

rým názorem geocentrickým. Podobné námitky se během času opakovaly a jen málo chybělo, aby myšlenka relativnosti všech pohybů zůstala fyzikům skryta na dlouhou dobu (srov. [9], [10]).

Nebyl to nikdo menší než EINSTEIN, kdo první pochopil hluboký a dalekosáhlý fyzikální obsah Machovy ideje, kterou učinil jedním ze základních pilířů obecné teorie relativity a nazval ji *Machovým principem.* Tento princip vyjadřuje zcela nový názor na setrvačnost, který v Einsteinově pojetí znamená:

(I) *Setrvačnost, stejně jako gravitace, je dána vzájemným působením těles a mechanické vlastnosti prostoru jsou úplně určeny hmotou v něm rozloženou.*

Einstein si velmi cenil tuto myšlenku a doznával, že ho vedla k vybudování obecné teorie relativity. V nekrologu o Machovi napsal (1916), že Mach by byl patrně dospěl k obecné relativitě, kdyby ho byl objev stálé rychlosti světla zastihl v mladším věku. Ačkoli Mach teorii relativity (speciální) neuznával, byl v občasném písemném styku s Einsteinem, který jeden ze svých dopisů Machovi podepsal: „Váš žák Einstein".

Je zřejmé, že Berkeley a zvláště Mach do značné míry anticipovali *obecný princip relativity*, který vyjadřuje v podstatě jejich názor, že vůbec všechny pohyby jsou relativní, a který Einstein formuloval takto:

(II) *Všechny vztažné soustavy (inerciální i neinerciální) jsou stejně oprávněné a rovnocenné pro popis fyzikálních jevů.*

Proto musí být fyzikální zákony vyjádřeny „obecně kovariantními" tenzorovými rovnicemi, které mají stejný obecný tvar ve všech vztažných soustavách. Ale skutečnému řešení problému setrvačnosti se Einstein přiblížil teprve na základě svého *principu ekvivalence* mezi silami gravitačními a setrvačnými, podle něhož

(III) *Setrvačné a gravitační síly mají stejnou fyzikální podstatu.*

Na základě principů (I), (II), (III), které nejsou navzájem nezávislé, dospěl Einstein ke svým známým rovnicím gravitačního pole. Tyto rovnice, určující geometrii (metriku) čtyřrozměrného prostoročasu, by měly logicky vést v inerciálních soustavách k dostatečně přesné platnosti zákona setrvačnosti a v soustavách neinerciálních by z nich měly vyplývat setrvačné síly známé z Newtonovy mechaniky. Tyto síly jsou ovšem ve smyslu obecné teorie relativity skutečné síly, které mají původ ve skutečných — byť velmi vzdálených — kosmických objektech, jak to odpovídá duchu Machova principu.

Takový výsledek Einstein opravdu očekával od obecné teorie relativity, která je v podstatě teorií gravitace platnou v libovolné vztažné soustavě. Je třeba otevřeně říci, že v otázce, do jaké míry Einsteinova teorie tento úkol splňuje, nedospěli fyzikové dodnes k jednotnému názoru. Pokusím se stručně vysvětlit, proč tomu tak je.

Einsteinovy rovnice gravitačního pole jsou parciální diferenciální rovnice, z nichž je třeba vypočítat deset složek tzv. *metrického tenzoru*, který určuje pohyb částice v gravitačním poli na základě daného rozložení energie a toku energie v prostoru. K úplnému řešení je třeba znát (jako u všech parciálních diferenciálních rovnic) okrajové podmínky, které musí být voleny podle fyzikální povahy problému. Chceme-li např. dostat pohybové rovnice pro volnou částici, na kterou nepůsobí žádné pozemské těleso ani tělesa sluneční soustavy, bude rozhodující rozložení energie a jejího toku v kosmickém prostoru. A právě v tom směru jsou naše informace dosud velmi kusé.

Einsteinovy rovnice jsou rovnice „polní", tj. určují pohyb částice na základě stavu gravitačního pole v místě částice, takže není třeba přihlížet ke konečné rychlosti šíření pole, která je podle obecné teorie relativity rovna rychlosti světla. Z hlediska elementárního pojetí Machova principu by však mohla vzniknout otázka retardace setrvačných sil podobně jako u elektromagnetických sil vzbuzených rychlými náboji.

Z uvedených důvodů je samozřejmé, že během doby vzniklo široké spektrum velmi různých stanovisek v otázce platnosti Machova principu a jeho vztahu k obecné teorii relativity.

Einstein jako první naznačil již r. 1917 cestu k řešení problému gravitace a setrvačnosti ve své slavné práci, v níž položil základy relativistické kosmologie. Volil vysoce idealizovaný model homogenního statického vesmíru a dospěl k výsledku, že má všude stejnou křivost a je v sebe uzavřen. Tím odstranil najednou obtíž plynoucí z okrajových podmínek i obtíž související s retardací. V této práci zavedl Einstein do svých rovnic tzv. *kosmologický člen*, o jehož účelnosti později on i mnoho jiných fyziků pochybovalo. V novější době se však zdá, že jsou pádné důvody pro jeho ponechání v Einsteinových rovnicích. Einstein sám nebyl tímto řešením uspokojen a dnes se jeho model statického vesmíru pokládá za překonaný. Je ovšem třeba zdůraznit, že vyhovuje v plné míře Machovu principu.

Relativistická kosmologie se od r. 1917 rychle rozvíjela a objevila se řada problémů týkajících se souvislosti obecné teorie relativity s Machovým principem. Zdá se, že většina se přiklání k názoru, že tento princip nevyplývá z Einsteinových rovnic, což se zdůvodňuje hlavně faktem, že tyto rovnice připouštějí pro homogenní izotropní vesmír kromě Einsteinova řešení, které je ve shodě s Machovým principem, ještě druhé řešení, které odvodil GÖDEL (1949). Fyzikální smysl Gödelova řešení je ten, že „kompas setrvačnosti" se otáčí vzhledem ke kosmické hmotě, a proto je v rozporu s Machovým principem. Toto „antimachovské" řešení je však také v rozporu s izotropií vesmíru a neodpovídá tedy (na rozdíl od Einsteinova řešení) daným fyzikálním podmínkám. Proto je nelze pokládat za přijatelné fyzikální řešení.

Na důkaz neshody Einsteinovy teorie gravitace s Machovým principem se uvádí zejména, že Einsteinovy rovnice připouštějí *ve zcela prázdném vesmíru* dvě jednoduchá řešení, ověřená zkušeností:

(a) pro úplně volnou částici platí pseudoeuklidovská (Lorentzova) metrika vedoucí k platnosti zákona setrvačnosti;*)

(b) pro částici v gravitačním poli bodového zdroje vychází známé řešení SCHWARZSCHILDOVO, z něhož byla vypočtena rychlost stáčení perihelu Merkura v úplné shodě s pozorováním.

K tomu je třeba říci, že oba tyto výsledky jsou experimentálně ověřeny nikoli v prázd-

*) *Úplné* Einsteinovy rovnice (s kosmologickým členem) toto řešení v prázdném vesmíru nepřipouštějí.

ném vesmíru, ale ve vesmíru skutečném, jehož dosud pozorovaná část (tzv. *metagalaxie*) obsahuje ohromné množství galaxií s celkovou hmostností M řádu 10^{54} kg rozloženými v prostoru s průměrnou hustotou $\varrho \approx 10^{-26}$ kgm^{-3}. Nahradíme-li při řešení obou úloh (a), (b) prázdný vesmír metagalaxií, dostaneme v mezích přesnosti pozorování stejné výsledky jako v dokonale prázdném vesmíru. Při obvyklém odvození v prázdném prostoru se vlastně výsledek anticipuje a neplyne přímo z Einsteinových rovnic (viz [3]).

V novější době byly uplatněny proti Machovu principu dvě další námitky, které se zakládají na elementárních představách o setrvačných silách jako dálkovém působení jednotlivých hvězd.

První námitka vyplynula z myšlenky (uveřejněné v r. 1958 COCCONIM a SALPETEREM), že setrvačná síla, kterou každá hvězda působí na pokusnou částici, by mohla záviset na směru spojnice částice s hvězdou a že by se tedy excentrická poloha Země v naší Galaxii mohla projevit tím, že by setrvačnost částice závisela na úhlu, který svírá směr pohybu částice s její spojnicí se středem Galaxie. Byly navrženy dosti citlivé experimentální metody ke zjištění takové „asymetrie setrvačnosti", ale při žádném z provedených pokusů nebyl nalezen ani nepatrný zlomek očekávané hodnoty. Kdyby se tato asymetrie potvrdila měřením, znamenalo by to přímé experimentální potvrzení Machova principu. Avšak i negativní výsledek je s tímto principem slučitelný, jak tvrdí např. DICKE a EPSTEIN.

Druhá námitka vychází z bezesporného předpokladu, že gravitační, a tedy i setrvačné síly, se šíří prostorem rychlostí světla. Proto setrvačná síla vzniklá zrychleným pohybem některé galaxie v neinerciální vztažné soustavě by se měla projevit na pozorované částici se zpožděním úměrným vzdálenosti, které by dosahovalo až miliard let. WHEELER z toho usuzuje, že by se mělo upustit od pokusů o elementární formulaci Machova principu a vyslovuje názor, že na tento princip je možno pohlížet jako na okrajovou podmínku pro Einsteinovy rovnice gravitačního pole.

Domnívám se, že Machův princip vyjadřuje tak zásadní fyzikální myšlenku, že ji nelze nahradit nějakým matematickým předpisem. Pokud jde o působení vzdálených galaxií, musíme si uvědomit, že do místa, kde částici urychlujeme vzhledem ke galaxiím, dospělo gravitační pole, jehož součástí jsou síly setrvačné, rychlostí c z poloh, které galaxie zaujímaly před mnoha miliony až miliardami let a kde je dnes také vidíme. Při urychlování částice je tedy gravitační pole již v místě pokusu přítomno a projeví se tedy setrvačnou silou současně se změnou rychlosti částice. O správnosti této úvahy svědčí jev známý jako *aberace stálic* (viz např. [4] str. 579). Odchylka směru, ve kterém stálici vidíme, odpovídá v každém čase *okamžité* rychlosti Země v soustavě spojené se stálicemi. Aberační úhel je stejný pro všechny stálice, ačkoli jejich vzdálenosti leží mezi několika světelnými roky až desítkami tisíců světelných roků a ačkoli se rychlost Země mění během půl roku v opačnou. V soustavě spojené se Zemí mají tedy stálice zrychlení, které se projeví *okamžitou* změnou aberace bez ohledu na jejich vzdálenost.

Otázka platnosti Machova principu není zdaleka řešena a vzbuzuje stále mnoho pochybností. Někteří fyzikové se staví zásadně proti jeho uznání (SYNGE) nebo popírají vůbec platnost obecného principu relativity (FOK). Jiní pokládají Machův princip buď za paradoxní (BRIDGMAN), nebo za výplod „obskurní filosofie 19. století" a požadují jeho matematickou formulaci. Podle mého názoru je Machův princip rovnocenný s obecným principem relativity a z něho plynoucími Einsteinovými rovnicemi gravitačního pole, které vedly k řadě fundamentálních objevů potvrzených pozorováním. Jakákoli formulace Machovy myšlenky, jako nezávislého principu by se stala zbytečnou, kdyby z Einsteinových rovnic vyplynulo, že v soustavě spojené se *skutečným* vesmírem platí zákon setrvačnosti, a že tedy v soustavách vzhledem k ní zrychlených působí pozorované setrvačné síly. Abychom to mohli přijmout jako prokázaný fakt nebo to popřít, musili bychom získat dosti přesné poznatky o *skutečném* vesmíru, jak jsem již na začátku zdůraznil. V tom smyslu je Machův princip „selekčním principem", který nás může vést při výběru vhodného modelu vesmíru, jenž by splňoval výše uvedené požadavky. Z toho lze např. usuzovat (Wheeler, Hönl), že vesmír musí být prostorově uzavřený (jako model Einsteinův).

Zdá se tedy, že problém setrvačnosti nemůže být ani v dosti vzdálené budoucnosti rozřešen s konečnou platností, protože je velmi obtížné rozhodnout, které kosmické objekty mohou mít měřitelný vliv na pohyb těles a šíření světla v našem nejbližším okolí. Věřím však, že takový skepticismus by nebyl zcela namístě, neboť se domnívám, že následující fakta a úvahy připouštějí optimističtější pohled na řešení tohoto starého problému.

Odedávna je známo, že odstředivá síla vzniká při rotaci vzhledem ke hvězdám; již Galilei ve své teorii přílivu a odlivu volil soustavu spojenou se stálicemi. Z hlediska Newtonova by bylo možno vysvětlit inerciálnost této soustavy tím, že hvězdy jsou tak řídce rozloženy v prostoru, že se pohybují v absolutním prostoru jako volná tělesa podle zákona setrvačnosti. Protože se však hvězdy shlukují v galaxie a kupy galaxií, mohli bychom snad pokládat za volné nějaké vyšší kosmické útvary. To však nelze nijak ověřit, jak upozornil již Einstein, neboť že je nějaké těleso volné, poznáváme právě jen podle toho, že se pohybuje podle zákona setrvačnosti. Podstatné je ovšem, s jakou přesností je možno soustavu spojenou s viditelnými hvězdami pokládat za inerciální. O tom diskutoval před deseti lety Dirac s Bondim a v r. 1964 ukázal Schiff ([5]), že inerciální soustava zjištěná z pohybů vnitřních planet souhlasí se soustavou stálic v mezích přesnosti měření, která odpovídá nesmírně pomalé rotaci 0,4″ za 100 let. To je však úhlová rychlost stejného řádu, s jakou obíhá Slunce kolem středu naší Galaxie následkem jejího otáčeni vzhledem k metagalaxii. Protože však je naše Galaxie silně zploštělá, usuzuje se, že inerciální soustavy jsou dány spíše celou metagalaxií než naší Galaxií, a není vyloučeno, že tento fakt bude možno dosti přesným měřením ověřit. Kdyby se to podařilo, stal by se úkol kauzálně vysvětlit příslušnost metagalaktické vztažné soustavy k inerciálním soustavám velmi naléhavým a řešení otázky pravdivosti Machova principu velmi žádoucím.

Domnívám se však, že ani nedávné Schiffovo konstatování nelze pokládat za bezvýznamnou a náhodnou koincidenci, a proto se nyní pokusím naznačit, jak je možno elementárními úvahami dospět k názoru, že Machův princip odpovídá zásadám teorie relativity a není ve sporu s dnešními astronomickými a kosmologickými poznatky.

Jedním z nejvýznamnějších přínosů speciální teorie relativity je bezesporu objev ekvivalence hmotnosti a energie vyjádřený Einsteinovým vztahem*)

$$W = mc^2.$$

*) Podle obecné teorie relativity i podle nejpřesnějších měření je setrvačná hmotnost totožná s hmotností gravitační. Proto značím obě stejným písmenem *m*.

Všeobecně se soudí, že tento vztah platí pro všechny druhy energie, ale je známo, že v konzervativním poli je celková energie částice (tělesa) stálá a rovná se součtu její energie kinetické W_k a potenciální W_p:

$$W_k + W_p = \text{konst.} \tag{2}$$

Kdyby tedy rovnost (1) platila pro celkovou energii, neměnila by se hmotnost částice při pohybu v konzervativním poli a rychlost částice by mohla neomezeně stoupat a překročit rychlost světla c. To by odporovalo poznatkům speciální teorie relativity ověřeným velmi přesnými pokusy s urychlovanými elektrony, jejichž hmotnost roste úměrně s kinetickou energií. Je tedy zřejmé, že (1) platí pro kinetickou energii, takže přírůstek hmotnosti Δm podle (2)

$$\Delta m = c^{-2} \Delta W_k = - c^{-2} \Delta W_p \tag{3}$$

je ekvivalentní poklesu potenciální energie. Potenciální energie je v klasické fyzice definována až na aditivní konstantu, ale je evidentní, že nekonečně vzdálený zdroj pole nemůže mít vliv na hmotnost částice, protože neexistuje v žádném dosažitelném bodě prostoru, a nemá tedy fyzikální existenci. Proto musíme položit v nekonečné vzdálenosti od zdroje místního pole $W_p \to 0$. Má-li tedy částice nekonečně daleko od zdroje místního pole hmotnost m^*, má v konečné vzdálenosti od tohoto místního zdroje hmotnost

$$m = m^* - c^{-2} W_p, \tag{4}$$

je-li W_p její potenciální energie v poli zdroje. Protože každá hmotná částice má v gravitačním poli vždycky *zápornou* energii $W_g < 0$, vidíme, že přiblížením jiných těles k částici vzroste její hmotnost. Vzdálíme-li všechny místní zdroje gravitačního pole do nekonečna, klesne hmotnost částice na hodnotu m^*, které ovšem vzhledem k ekvivalenci hmotnosti a energie odpovídá jistá energie. Je-li přitom částice v klidu, je m^* rovno její klidové hmotnosti m_0, které přísluší klidová energie částice $m_0 c^2$. Částice, na kterou nepůsobí žádná síla, tedy ani místní konzervativní pole, se chová jako volná a pohybuje se podle zákona setrvačnosti. Nemůžeme však tvrdit, že nemá žádnou potenciální energii, neboť vůbec žádná, a tedy ani volná částice, ve skutečnosti *není osamocena*. Je totiž obklopena nesmírným množstvím galaxií, z nichž každá jí dává zápornou gravitační energii, takže její výsledná potenciální energie v gravitačním poli všech kosmických objektů je také záporná. Chová-li se částice přesto jako volná, musí patrně výslednice tohoto kosmického gravitačního pole být neměřitelně slabá, což snadno vyložíme tím, že galaxie jsou rozloženy souměrně kolem částice, takže jejich přitažlivé síly se vcelku ruší. To znamená, že gradient výsledného gravitačního potenciálu všech galaxií je nulový a potenciál sám je tedy nezávislý na poloze. To můžeme vysvětlit prostou představou, že naše fyzikální měření jsou omezena na středovou dutinu v kulovém homogenním vesmíru, ve které proto platí zákon setrvačnosti.

Podle předešlého můžeme tedy hmotnost volné částice pokládat za ekvivalentní její — s opačným znaménkem vzaté — potenciální energii W_g^*, kterou má v gravitačním poli všech galaxií a setrvačnost částice vyložit jako setrvačnost této energie. Můžeme tak ovšem učinit jen s výhradou, že velikost energie W_g^* odhadnutá na základě astronomických pozorování a kosmických poznatků má takovou hodnotu, že hmotnost jí ekvivalentní je rovna právě hmotnosti m^* volné částice. Snadno pak odvodíme podmínku nutnou k splnění tohoto požadavku.

Potenciální energie částice hmotnosti m v gravitačním poli je rovna součinu

$$W_g = m\Phi ,$$

kde Φ je skalární potenciál pole v místě částice. Energie volné částice, na kterou nepůsobí žádné místní pole, je podobně

$$W_g^* = m^*\Phi^* , \tag{5}$$

značí-li Φ^* gravitační potenciál vzbuzený všemi galaxiemi neboli *kosmický gravitační potenciál.*

Hmotnost volné částice je tedy ekvivalentní energii W_g^*, vzaté s opačným znaménkem:

$$m^* = c^{-2}(-W_g^*) = -c^{-2}m^*\Phi^* , \tag{6}$$

odkud plyne nutnost splnění podmínky

$$\Phi^* = -c^2 , \tag{7}$$

která znamená, že kosmický potenciál má *stálou* zápornou hodnotu $-9.10^{16}\ \mathrm{m^2\,s^{-2}}$, a to v souhlase s tím, že pro volné těleso platí zákon setrvačnosti. Zrychlení částice v gravitačním poli je totiž rovno intenzitě pole, která je dána záporným gradientem potenciálu. Zrychlení je tedy nulové, protože gradient stálého potenciálu vymizí.

Je-li tedy Machův princip pravdivý, musí vesmír vyhovovat výše uvedenému překvapivě jednoduchému vztahu (7). Gravitační potenciál můžeme určit u některých relativistických modelů vesmíru. Tak pro Einsteinův uzavřený vesmír o poloměru křivosti R_E platí rovnice (k = Newtonova gravitační konstanta, ϱ = hustota vesmíru)

$$4\pi k\varrho R_E^2 = c^2 ,$$

z níž plyne, že střední hodnota Newtonova potenciálu v tomto vesmíru je $-c^2$ (viz např. [6]). Podobně pro rozpínavý vesmír FRIEDMANNŮV má Newtonův potenciál stálou hodnotu $-\frac{3}{4}c^2$ a dosti blízké hodnoty vycházejí i pro řadu dalších modelů. To ovšem pouze naznačuje, že Machův princip je ve shodě s obecnou teorií relativity, jejíž důsledky se až dosud potvrzují měřením.

Pokud jde o přímé ověření vztahu (7) na základě kosmologických poznatků, můžeme se o to pokusit pouze pro pozorovanou část vesmíru, tj. metagalaxii.

Nejsilnějšími radioteleskopy byly zjištěny kosmické objekty až ve vzdálenosti R řádově rovné 10^{26} m $\approx 10^{10}$ světelných let. Galaxie vytvářejí shluky galaxií, o nichž se dnes většinou předpokládá, že jsou v prostoru rozloženy rovnoměrně s průměrnou hustotou ϱ, jejíž odhady se pohybují kolem hodnoty $10^{-26}\ \mathrm{kgm^{-3}}$. To nám dává možnost vypočítat Newtonův gravitační potenciál ve středu kulové metagalaxie podle známého vzorce

$$-\Phi = \int \frac{k\mathrm{d}M}{r} = k\varrho \int_0^R \frac{4\pi r^2 \mathrm{d}r}{r} = 2\pi k\varrho R^2 \approx 4\,.\,10^{16}\mathrm{m^2s^{-2}} \approx \tfrac{1}{2}c^2 .$$

I když hodnoty R a ϱ jsou velmi nejisté, můžeme říci, že odhadnutá hodnota potenciálu metagalaxie je v dobré shodě s rovnicí (7). Je to ostatně jen přesnější a zároveň obecnější vyjádření podmínky:

$$\frac{k\varrho R^2}{c^2} \approx 1 \quad \text{nebo} \quad \frac{kM}{Rc^2} \approx 1\,, \tag{8}$$

jejíž splnění se v kosmologické literatuře běžně předpokládá a kde M a R značí celkovou hmotnost a „poloměr" vesmíru. Její význam pro výklad setrvačnosti znovu před dvaceti lety vyzdvihl anglický astrofyzik SCIAMA, který podal jednoduchou machovskou teorii setrvačnosti založenou na předpokládané obdobě gravitačního a elektrického pole (viz např. populárně psanou knížku [7]). Vztah (8) označuje Dicke jako „machovskou zpětnovazební podmínku", protože se obvykle pokládá za vazbu mezi rozložením hmot ve vesmíru a gravitační konstantou, přičemž se na c pohlíží jako na apriorně danou univerzální konstantu. Ve smyslu Machova principu musíme ovšem právě naopak pokládat potenciál vesmíru za daný uspořádáním galaxií a velikost rychlosti světla za jednu z veličin určujících metriku prostoročasu, která podle Einsteinovy teorie je výsledkem gravitačního působení vesmíru. Pak skutečně v dokonale *prázdném* vesmíru je $c = 0$ a metrika prostoročasu není regulární: neexistuje žádný předpis pro pohyb volné částice a rychlost světla je nulová. Pohyb osamocené částice není tedy definován, a to v souhlase s tím, že nemůže být vztažen k žádnému reálnému tělesu.

Je-li však hustota vesmíru konečná a potenciál Φ^* má stálou zápornou hodnotu, šíří se světlo ve vakuu rychlostí $\sqrt{(-\Phi^*)}$ a volná částice se pohybuje podle zákona setrvačnosti ve všech soustavách, které se vzhledem ke galaxiím pohybují rovnoměrně přímočaře. V ostatních soustavách (neinerciálních) podléhá volná částice setrvačným silám, které plynou transformací setrvačného pohybu do neinerciální soustavy, v níž se galaxie pohybují zrychleně. Můžeme tedy právem spatřovat původ setrvačných sil ve zrychleném pohybu galaxií zcela ve smyslu Machova principu. Plyne to ostatně přímo ze vzorce (6). Koná-li např. zvolená neinerciální soustava vzhledem ke galaxiím translační pohyb se zrychlením $-\boldsymbol{a}$, mají v ní všechny galaxie i volná částice zrychlení $\boldsymbol{a}$. To znamená, že částice podléhá setrvačné síle

$$m^*\boldsymbol{a} = -c^{-2}W_g^*\boldsymbol{a}\,. \tag{9}$$

Poznámka

Poznatek o ekvivalenci hmotnosti a energie má obecnou platnost. Podobně jako jsme rovnice (4) užili pro gravitační potenciální energii, můžeme ji užít pro každou potenciální energii, především pro elektrostatickou energii W_e nabité částice v poli jiného náboje. Obdobným postupem jako pro neutrální částici v gravitačním poli bychom dospěli k výsledku, že zrychleným pohybem zdroje elektrostatického pole vzniká akcelerační elektrická síla obdobná (9):

$$-c^{-2}W_e\boldsymbol{a} = -\frac{q\varphi}{c^2}\boldsymbol{a}\,, \tag{10}$$

kde φ je elektrostatický potenciál vzbuzený zdrojem v místě částice s nábojem q a vektor $\boldsymbol{a}$

je zrychlení zdroje v pozorovací soustavě. Síla daná vzorcem (10) skutečně existuje a projevuje se např. v sousedství vodiče, v němž se zrychlují elektrony, jako síla indukovaná časovou změnou proudu (viz např. [8], [4] str. 511). Vzhledem k této analogii mluvil Einstein o „indukčním působení zrychlovaných těles" a Sciama ([7]) uvádí „zákon inerciální indukce". Je zřejmé, že setrvačná síla i akcelerační elektrická síla jsou dány obecným indukčním zákonem

$$\mathbf{F} = -c^{-2} W_p \mathbf{a}\,, \tag{11}$$

kde W_p značí libovolnou potenciální energii urychlovaného zdroje pole. Při jeho odvození jsme se neodvolávali na analogii mezi elektrickým a gravitačním polem, ale vyšli jsme z obecně platné ekvivalence energie a hmotnosti, která vede k zákonu (11) pro každé konzervativní pole.

Uvedl jsem tuto poznámku, aby bylo zřejmé, že setrvačnost potenciální energie se velmi výrazně projevuje nejen v gravitačním, ale i v elektrickém poli. To podle mého názoru nasvědčuje pravdivosti Machova principu.

Podaný elementární výklad setrvačnosti zde byl načrtnut v nejjednodušším tvaru platném jen pro malé rychlosti a ověřen na velmi idealizované představě o pozorované části vesmíru. Jak ukázal Sciama ([7]), může být také uveden v soulad s rozpínáním metagalaxie.

Nicméně k exaktnímu řešení problému setrvačnosti bude možno dospět v rámci obecné teorie relativity jen na podkladě co nejúplnějších poznatků observační a teoretické kosmologie.

V následujícím seznamu literatury uvádím z velikého množství prací uveřejněných o Machově principu jen několik publikací většinou přístupných čtenáři s obecným fyzikálním vzděláním.

Literatura

[1] Mach E., *Die Geschichte und die Wurzel des Satzes von der Erhaltung der Arbeit*, J. G. Calve, Praha 1872.

[2] Horák Z., *O původu setrvačných sil*, Rozhledy matematicko-fyzikální *46* (1968) 281—284; 315 až 318.

[3] Horák Z., *Machian Interpretation of General Relativity*, Bul. Astronomical Institutes of Czechoslovakia *21* (1970) 96.

[4] Horák Z., Krupka F., *Fyzika*, SNTL, Praha 1966.

[5] Schiff L. I., *Observational Basis of Mach's Principle*, Reviews of Modern Physics *36*, (1964) 510.

[6] Horák Z., *Inertia, Relativity and Cosmology*, Czech. J. Phys. B *19* (1969) 703.

[7] Sciama D. W., *The Physical Foundations of General Relativity*, Doubleday Co., New York 1969. Ruský překlad od B. A. Ugarova „Mir", Moskva 1971.

[8] Horák Z., *Relativistické pojetí elektromagnetismu ve výuce na vysokých školách*, Elektrotechn. obzor *60* (1971) 287.

[9] Zich O., *Mikuláš Koperník a současnost*, Vesmír *52* (1973) 38.

[10] Horák Z., *Svět se točí kolem Koperníka*, Vesmír *52* (1973).