

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

L. Infeld

Od Kopernika k Einsteinovi

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 1 (1956), No. 2, 189--197

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/137091>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1956

Institute of Mathematics of the Academy of Sciences of the Czech Republic provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This paper has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://project.dml.cz>

LEOPOLD INFELD,
řádný člen Polské akademie věd

OD KOPERNIKA K EINSTEINOVÍ

От Коперника до Эйнштейна, *Voprosy filosofii*, 1955, č. 4, str. 122—130.

I

Mikuláš Kopernik není jen zakladatelem moderní astronomie; vědecký význam jeho osobnosti a díla je v tom, že jím začíná novodobá věda o vesmíru a přírodě vůbec, neboť studium nebeské mechaniky dává nejlépe poznat, že existují zákonitosti, jimiž se řídí příroda.

Z historie lidského bádání je známo, že nejobtížnější bývá první krok. V poznávání vesmíru učinil tento první krok Kopernik — krok nejtěžší a nejdůležitější. Tímto krokem je Kopernikova heliocentrická soustava. Kopernikovi tak vděčíme za to, že se dnes můžeme v duchu přenášet nejen se Země na Slunce, ale dále ke hvězdám, že můžeme myslí obsáhnout celou naši Galaxii a že ani zde nekončí hranice pro lidský duch. Astronom dnes zkoumá vesmír daleko za hranicemi Galaxie. První krok k tomu učinil, jak již řečeno, Mikuláš Kopernik.

V 16. století, kdy se v Itálii rodila renesance, kdy se svět začal zbavovat před-
sudků středověku, vyžadovalo tvrzení, že Země a ostatní planety obíhají kolem Slunce, velké vědecké fantasie. Obhajoba této myšlenky pak vyžadovala velkého vědeckého a lidského hrdinství. Historie podává o tom sdostatek svědectví.

Cílem této stati není rozbor Kopernikových prací a jeho zásluh. Chci zde jen ukázat, jaký byl vliv Kopernikův na pozdější rozvoj vědy, především mechaniky a theorie gravitace. Mohu pochopitelně osvětlit jen několik mezníků v tomto rozvoji, těch, které pokládám sám za nejdůležitější. A tu se setkáváme jen s několika málo jmény: s Keplerem, Galileim, Newtonem a Einsteinem.

Za života Kopernikova vládly v tehdejším vědeckém světě dva principy:

že Země je v klidu a ostatní nebeská tělesa obíhají kolem ní,

že nejdokonalejším pohybem je rovnoměrný pohyb po kružnici.

Je zajímavé, že Kopernik osvobodil vědu od prvního z těchto před-
sudků. To znamená, že měl za to, že planety obíhají kolem Slunce po kružnicích. Dnes se zdá, že by bylo bývalo snadnější vyvrátit druhý z uvedených principů. Bylo k tomu však třeba kolem 80 let, než se tak stalo. Učinil to Jan Kepler (1571—1630) z Prahy, královský hvězdář na dvoře císaře Rudolfa II.

Keplerovy zákony se mohou studujícímu zdát na první pohled dogmatické, značně speciální. Příčina toho je hlavně ve způsobu jejich výkladu ve škole. Každý vědecký objev koření v minulosti a svými důsledky zasahuje do budoucnosti. Jinak řečeno, každý vědecký objev je článkem řetězu. Jeho úlohu nelze plně pochopit, bereme-li jej izolovaně, vně onoho řetězu. Kepler svoje tři zákony formuloval mnohem živěji a svěžeji, než jak se dnes podávají ve škole. Jsou obsaženy v jeho díle »Harmonie světa« (*Harmonices mundi libri V., geometricus, astronomicus, harmonicus, psychologicus, astronomicus cum appendice continens mysterium cosmographicum*, Linč 1619). Uveďme Keplerovu formulaci prvního z těchto zákonů: »Dokázal jsem, že oběžné dráhy planet jsou elipsy, a že Slunce je v ohnisku

každé z těchto elips.« Kepler odvodil svůj zákon na podkladě pozorování Tychona de Brahe. S jakou hrdostí a fantasií píše Kepler o svém objevu, ukazuje tento citát: »Dílo, na němž jsem s Tychonem de Brahe pracoval větší část svého života, spatří konečně světlo světa. Nic mne již nezdržuje. Alea acta est. Kniha je napsána, a je lhostejné, bude-li čtena dnes, nebo budou-li ji číst teprve budoucí pokolení. Možná že bude čekat 100 let na svého čtenáře, avšak bůh čekal na svého poznatele 6000 let.«

II

Kopernikovo a Keplerovo dílo představuje v jistém smyslu ucelenou etapu. Koperník a Kepler se tu zabývají popisem pohybů planet kolem Slunce. To je ovšem první krok. Druhým krokem je formulace příslušných pohybů z á k o n ů. Popis sám obecně neumožňuje předvídat budoucí stav soustavy. Mechanika — nauka o pohybu a základ různých jiných přírodních nauk — se obvykle dělí na kinematiku, která je jakýmsi úvodem k mechanice, a na dynamiku, nauku o pohybových zákonitostech. Je možno říci, že v době Kopernikově a Keplerově se věda omezovala na kinematiku, to jest na popis pohybů. Okolnost, že v astronomii i jen kinematický přístup k věci umožňuje předvídat, se vysvětluje perioditou zkoumaných jevů.

S hlediska dynamického přistupují k otázkám pohybů nebeských těles teprve Galilei a Newton. Problém, který oba řeší — Galilei zčásti, Newton úplně — je v jádru tento: Představme si planety Merkura, Mars, Země, obíhající kolem Slunce. Jaké síly způsobují tento pohyb? Nejen řešení, ale i sama formulace problému jsou možné teprve tehdy, až se objasňuje ve fyzice pojem zrychlení, a skutečnost, že síla je se zrychlením spjata.

Dříve, v období aristotelovské fyziky, se domnívali, že rychlost je spjata se silou, že těleso se pohybuje tím rychleji, čím větší síla na ně působí. Mělo se za to, že vůz tažený čtyřmi koňmi se pohybuje dvakrát tak rychle jako vůz tažený jen dvěma koňmi. Teprve po 2000 letech byl tento omyl zásluhou Galileiho a Newtona napraven. Pochopení faktu, že nikoli rychlost, nýbrž zrychlení je úměrno síle, znamená počátek mechaniky, začátek fyziky.

Vraťme se na chvíli ke kopernikovskému problému, nechme pro jednoduchost stranou Keplerovy objevy, a představme si podle Koperníka, že planeta, řekněme Země, se pohybuje rovnoměrně kolem Slunce. Podle starých antiokých představ musí síla působit ve směru tečny ke kružnici, to jest ve směru rychlosti. Při eliptickém pohybu musí tedy síla působit ve směru tečny k elipse. Je však známo, že při rovnoměrném pohybu po kružnici působí síla směrem ke středu kružnice. Slovo »zrychlení« není v daném případě nejvhodnější. Jde o to, že v případě rovnoměrného pohybu po kružnici se rychlost mění jako vektor, to jest mění se směr rychlosti, i když absolutní velikost rychlosti zůstává stejná. Jde-li o rovnoměrný přímočarý pohyb, pak buď vůbec není žádné síly, nebo se všechny působící síly vzájemně ruší. Není-li síly, není zrychlení, a síla je podle Newtonových zákonů úměrná zrychlení. Jde-li však o rovnoměrný pohyb po křivce, existuje zrychlení, je tedy síla, neboť rychlost se mění, mění se co do směru, i když ne co do absolutní velikosti. A tak teprve v 17. století, 140 let po Kopernikově smrti, se začalo chápat, že směr síly musí souhlasit se směrem zrychlení, a že v nejjednodušším případě oběhu planety kolem Slunce, to jest v případě kruhového oběhu, působí síla nikoli ve směru tečny k oběžné dráze, nýbrž ve směru poloměru, spojujícího střed planety se středem Slunce. Stejně je tomu v případě eliptického oběhu kolem Slunce. Ani kámen, vržený vodorovně, nepadá svisle, nýbrž po parabole, a stejně

jako při horizontálním vrhu směr síly nesplyvá se směrem rychlosti, nesplyvá směr síly se směrem rychlosti ani v případě oběhu planety kolem Slunce. Kdybychom totiž vypálili, řekněme s vrcholku nějaké vysoké hory, střelu s dostatečně velkou počáteční rychlostí, mohli bychom z ní učinit umělou planetu, a to nikoli »přes to«, že je přitahována Zemí, nýbrž právě »proto«, že je Zemí přitahována, že jí však byla zároveň udělena velká rychlost v jiném směru.

Bylo třeba velkého rozletu vědecké fantazie, aby se pochopilo, že všechny tyto pohyby, pohyb padajícího kamene na Zemi, pohyb Měsíce kolem Země, oběhy planet kolem Slunce a všechny ostatní pohyby ve vesmíru, že všechny tyto pohyby jsou podřízeny jediné obecné zákonitosti — obecnému gravitačnímu zákonu:

Dvě libovolná tělesa ve vesmíru se přitahují vzájemně silou přímo úměrnou součinu jejich mass a nepřímo úměrnou čtverci jejich vzdálenosti.

Historika s padajícím jablkem, které prý přivedlo Newtona k tomuto obecnému přírodnímu zákonu, je pravděpodobně jen literární anekdotou. Newton ve skutečnosti přemýšlel o tomto problému přes 15 let, až mohl svou theorii ověřit na oběhu Měsíce kolem Země.

Tak se rodila dynamika; byly formulovány pohybové zákony; po popisu nastupuje dedukce jako další podstatný krok v historii lidského poznání.

V souhlase s principy Newtonovy dynamiky a na podkladě jednoduchého gravitačního zákona lze sestavit pohybové rovnice pro oběh planety kolem Slunce. Tyto rovnice jsou diferenciálními rovnicemi 2. řádu. Čiště matematickou cestou z nich plyne, že planety obíhají kolem Slunce po elipsách. Znamení Keplerův zákon je tu jen důsledkem newtonovských principů. To však není vše. Ukázalo se, že i druhý a třetí Keplerův zákon (o nichž jsme tu nehovořili) jsou důsledky Newtonova zákona. Skutečnost se nám tak najednou ukazuje velmi prostou, i když k jejímu pochopení potřebujeme umělé dedukce ve formě theorie diferenciálních rovnic. Každému vědeckému pracovníku je skutečnost pochopitelnou, může-li z jednoduchých faktů činit závěry o faktech složitých. Ukazuje se jednoduchou přes to, že řetěz dedukcí může být dlouhý. Postupným rozvojem fyziky se tento řetěz stále prodlužuje. Pochopit to je podstatné, chceme-li pochopit ducha vědy, pro nějž názorným příkladem je srovnání Keplerových a Newtonových zákonů a jejich vzájemného vztahu. Keplerovy zákony se zdají umělými, nepochopitelnými; Kepler sám k nim došel dlouhým a pracným zkoušením a přemýšlením. U Newtona jsou prostým důsledkem jednoduché theorie. A navíc se ukazuje, že Newtonova theorie je jen prvním přiblížením. Z newtonovské fyziky pramení nové, skutečnost přesněji popisující zákony, než jsou ty, které vyslovil Kepler. O tom je třeba rovněž několik slov.

Newton sformuloval zákony mechaniky do tří základních principů, jejichž hlubší pochopení není nejsnadnější, i když se vykládají již ve středoškolských kursech fyziky. Pak sformuloval Newton gravitační zákon.

Jednou ze základních obtíží Newtonovy mechaniky je pojem soustavy. O tom je třeba pohovořit podrobněji, neboť otázka souvisí jednak s Kopernikovým učním, jednak s rozvojem vědy vůbec. Při formulaci Newtonova zákona vzniká otázka: k jaké soustavě se zákon vztahuje? Uvedme jednoduchý příklad. Udělme kuličku, spočívající na hladké podlaze pokoje, malý impuls, třeba lehkým nárazem. Kulička se tím uvede do pohybu, který bude tím bližší pohybu rovnoměrnému, čím menší tření bude na podlaze pokoje. Newtonův závěr, že kulička by se pohybovala rovnoměrně, kdyby nepůsobily žádné síly, je v podstatě idealisací skutečnosti. Představme si nyní, že tento pokus provedeme na rychle se otáčejícím kolotoči. Výsledek pokusu bude jiný. Kulička se bude všemožně snažit vzdálit

se od nehybného bodu na ose, kolem se kolotoč otáčí. Vidíme tak, že první Newtonův princip se vztahuje (ve větší nebo menší míře) k pokoji, nikoli však ke kolotoči.

Podle Kopernika se naše Země otáčí, a to kolem vlastní osy jednou za den a kolem Slunce jednou za rok. Ptejme se: k jaké soustavě se vztahují dynamické zákony Newtonovy? Takovou soustavou není ani kolotoč, ani pokoj, který se otáčí spolu se Zemí. Objeví-li se někde nějaká obtíž, objeví se také nové slovo. Tímto novým slovem v našem případě je termín *inerciální soustava*. Tak se nazývá soustava, k níž se vztahují zákony dynamiky.

Nazveme kopernikovskou soustavou soustavu, v níž budeme popisovat pohyb za předpokladu, že Slunce je v klidu a že Země kolem Slunce obíhá; ptolemaiovskou soustavou pak nazveme soustavu, v níž předpokládáme klidnou Zemi a Slunce a planety obíhající kolem Země. Velikost Kopernikova objevu je v tom, že Koperník dokázal proti názorům tehdejšího vědeckého i mimovědeckého světa, že heliocentrická soustava lépe popisuje skutečnost, než soustava geocentrická. Dlouhou dobu, i po Kopernikově smrti, stál vědecký svět a zejména také katolická církev proti Kopernikovi. Ještě o tom budeme hovořit; zde se o tom zmiňujeme jen proto, že nelze plně docenit Kopernikovu velikost, nebereme-li v úvahu vědeckou atmosféru tehdejší doby.

Newtonova mechanika dává Kopernikovu objevu vystupovat v novém světle. Podle ponewtonovské terminologie lze říci, že jednou ze stránek velikosti Kopernikova objevu je skutečnost, že inerciální soustavou, to jest soustavou, k níž se vztahují zákony mechaniky, je spíše Slunce než Země. Vztáhneme-li totiž pohyb planety ke Slunci, můžeme problém pohybu planety pokládat za problém jednoho tělesa. Říkáme, že Slunce je v klidu a planeta obíhá kolem něho. To je možné vzhledem k tomu, že těžiště takové hmotné soustavy je prakticky ve středu Slunce. Kdybychom si však představili, že massa Slunce je jen nemnohokrát větší než massa Země, museli bychom podle Newtonovy teorie vztáhnout pohyb k soustavě spjaté s těžištěm, které by v tomto případě bylo mimo Slunce. Pak by se Slunce i planeta pohybovaly po elipsách, jejichž společné ohnisko by bylo těžištěm této hmotné soustavy. Vidíme, že v takovém případě by bylo třeba pozměnit Keplerovy zákony. Pro jednoduchost budeme i takové soustavě říkat *kopernikovská soustava*.

Kopernikovská soustava je jistě více inerciální než soustava ptolemaiovská. Avšak již z přednewtonovské fyziky a ještě více z fyziky ponewtonovské je jasné, že kopernikovská soustava není ideálně inerciální. Celá sluneční soustava se totiž pohybuje jako celek, naše Galaxie se otáčí, a žádná otáčející se soustava nemůže být přísně inerciální.

Uvedená krátká úvaha již sama ukazuje podstatné slabiny klasické mechaniky. V souvislosti s tím vzniká otázka: kde je taková ideální inerciální soustava? Co v přírodě, v objektivním světě odpovídá inerciální soustavě? Klasická mechanika na to odpověď nedává. Klasická mechanika říká pouze, že soustava A je více inerciální než soustava B, neříká však, že ta nebo jiná soustava je inerciální.

Představme si soustavu, kterou bychom mohli pokládat za inerciální. Pak je podle klasické mechaniky každá jiná soustava, která se vzhledem k dané pohybuje rovnoměrně přímočaře rovněž inerciální. Máme proto v klasické mechanice co činit vždy ne s jednou inerciální soustavou, nýbrž s grupou inerciálních soustav. Tím je — snad poněkud náročně — vyjádřen prostý fakt, že ve vlaku platí tytéž zákony jako na Zemi, pokud se vlak pohybuje po přímé dráze a zcela rovnoměrně.

A co se stane, budou-li se soustavy pohybovat vzájemně nerovnoměrně? Krátce: Newtonovy zákony platí jen v inerciálních soustavách. Na kolotoči na příklad platí jiné zákony, jež dovedeme formulovat, víme-li, jak se daná soustava (kolotoč) pohybuje vzhledem k inerciální soustavě. Vznikají nové síly, v daném případě tak zvané síly d'Alembertovy. Někdy se také mluví o fiktivních d'Alembertových silách. Já sám mám pochybnosti o tom, že slovo »fiktivní« odpovídá podstatě věci.

Shrňme stručně, co jsme řekli. Koperníkův velký objev znamená počátek soudobé vědy. Kepler nahrazuje Koperníkovy kruhové oběžné dráhy planet drahami eliptickými. Galileiovská a newtonovská mechanika umožňuje nejen popis, ale i předvídání pohybů. Keplerovy zákony jsou důsledkem Newtonova gravitačního zákona. Gravitace působí ve směru zrychlení, nikoli ve směru rychlosti. Z klasické mechaniky vyplývá, že Koperníkova soustava (jde o pohyby planet) je inerciální, i když ne ideálně inerciální, jak ukázal pozdější vývoj fyziky. Za koperníkovskou soustavu je nutno spíše brát soustavu spjatou s těžištěm planetárního systému, nikoli se středem Slunce, i když rozdíl je vzhledem k velkému rozdílu massy Slunce proti úhrnné masse planet nepodstatný.

Pravda o přednosti Koperníkovy soustavy před soustavou Ptolemaiovou se rodila a prosazovala v těžkém boji, zejména s katolickou církví. Za tuto pravdu dal život na hranici Giordano Bruno, za tuto pravdu prošel 70letý Galilei inkvizicí, která ho přinutila, aby na kolenou odvolal svoje »bludy«. Legenda mluví o tom, že Galilei po odvolání zvolal »a přece se točí«. Ve skutečnosti tomu tak nebylo, avšak lid vždy vytváří legendy o mužích, kteří stojí za pravdou a kteří za ni bojují.

III

Přejdeme k třetí otázce, k vztahu mezi Koperníkovou teorií a teorií relativity.

Teorií relativity se obvykle nazývá tak zvaná speciální teorie relativity. Zde však jde o koperníkovský problém, proto nás tu zajímá především tak zvaná obecná teorie relativity, vypracovaná — ne bez jistých omylů — v letech 1911 až 1916 Albertem Einsteinem. Obecná teorie relativity se po prvé po Newtonovi zabývá opět gravitací. Jejím cílem je — jako v každé nové fyzikální teorii — popsat lépe objektivní svět kolem nás, v daném případě popsat lépe jev gravitace a pohyby nebeských těles.

Viděli jsme již, že Newtonova teorie zavádí důležitý pojem inerciální soustavy. Absolutní inerciální soustavy v přírodě není. Koperníkova soustava je jen více inerciální než soustava spjatá se Zemí. Bylo by tedy na místě vzdát se pojmu inerciální soustavy. Teorie, která by tohoto pojmu nepoužívala, by byla mnohem jednodušší, takovou teorii je však třeba vypracovat. Teorie relativity je skutečně logicky jednodušší, avšak řetěz úvah, vedoucí k pozorování a k popisu reálného světa, je značně dlouhý. Jako vždy je třeba více dedukcí, je-li méně předpokladů.

Avšak jednoduchost předpokladů není jediným kriteriem, které určuje význam teorie. Vývoj vědy stále dokazuje, že každá teorie má jen omezený okruh aplikability. Skutečnost se ukazuje badateli stále obtížněji popsitelná, rozvoj vědy odhaluje hranice platnosti dřívějších teorií. Hledáme stále nové teorie, které by obsáhly nová fakta a které by tak lépe popsaly a vyložily skutečnost, než jak to činí teorie staré. A tyto nové teorie se opět ukazují ohraničené co do platnosti, opět se hledá dále. Tak neustále hledáme absolutní pravdu, věduce, že to je věc dosažitelná jen v jistém přiblížení, ovšem stále lepším a lepším. Před lid-

stvem je tak cíl popsat okolní materiální svět a jeho zákonitosti, a také druhý cíl, využít těchto zákonů pro blaho a štěstí lidstva.

Vraťme se k teorii relativity. Naší snahou v dalším bude podat stručný výklad této teorie a jejího vztahu k teorii Kopernikově a Newtonově.

Pohovoříme nejprve o jedné důležité otázce — o struktuře matematické fyziky. Jsou totiž věci, které pro fyzika jsou naprosto jasné, filosofovi však činí jisté potíže. Aby spolupráce obou — fyzika a filosofa — byla zdárná, je třeba ony věci objasnit. Je také třeba odstranit některá nedorozumění, jež se vyskytují v literatuře. Myslím, že není obtížné otázku, o níž budeme hovořit, formulovat v soulase s principy dialektického materialismu.

Je třeba rozlišovat matematickou strukturu fyzikálního zákona a jeho fyzikální obsah. Příčinou mnoha nedorozumění je, že se tak nečiní. Ukážeme příklad: Mysleme si danu jednoduchou matematickou rovnici, na příklad rovnici popisující pohyb kyvadla při malých výkyvech. Rovnice téhož typu popisuje chvění ladičky, kmity elektrického proudu, kmitání elektronů. Bylo by jistě nesmyslné říkat, že kyvadlo je totéž co ladička nebo elektron. Matematická struktura rovnice nám ničeho neříká o popisovaném zlomku skutečnosti, pokud symboly, které v rovnici vystupují, nekonfrontujeme se skutečností. Tyto symboly představují jisté objekty reálného světa. Pokud nezjistíme, jaké jsou to objekty, je naše teorie abstraktní, má určitou matematickou strukturu, nemá však žádného fyzikálního obsahu. To neznamená, že nás tato matematická struktura nezajímá. Naopak, velmi nás zajímá, neboť známe-li dobře matematickou strukturu teorie (známe-li na příklad metodu řešení nějaké diferenciální rovnice), pak, pokud víme, co představuje tento zlomek skutečnosti, můžeme rychle odvodit z teorie závěry již pouhou dedukcí, a vztahy znovu převést do jazyka, jímž se daný zlomek skutečnosti popisuje. Matematické rovnice spjaté se skutečností dávají fyzikální teorii.

Taková teorie popisuje skutečnost správně, jestliže závěry, k nimž se došlo matematickou cestou, a jež se pak interpretují fyzikálně, souhlasí s experimentem. Teorie dobře popisuje zlomek okolní skutečnosti potud, pokud další bádání naukáže rozpor se zkušeností a s pokusem, a tedy potřebu teorii změnit. Každou fyzikální teorii je proto nutno charakterisovat nejen její matematickou strukturou, ale i tím, jak je spjata s onou částí materiálního světa, k níž se vztahuje. Uveďme konkrétní příklad: Principy newtonovské mechaniky lze vyjádřit rovnicemi, vztahujícími se k jisté soustavě. Fyzikální teorií se tyto matematické vztahy stanou tehdy, znamená-li m hmotnost, a zrychlení a f sílu. V matematické struktuře je soustavou trojice vzájemně po dvou k sobě kolmých přímkách, tak zvaných os. Co však odpovídá ve skutečnosti těmto osám? Těmto osám odpovídá ve skutečnosti inerciální soustava, to jest hmotná soustava spjatá s nějakým hmotným vztahným tělesem. Kde však je taková soustava? A tu se vracíme k tomu, co již bylo řečeno: jde-li o pohyb planet, je takovou soustavou kopernikovská soustava. Jde-li o pohyb celé sluneční soustavy, musíme inerciální soustavu hledat někde za jejími hranicemi. Vidíme tedy, že souvislost mezi abstraktním pojmem matematické soustavy a fyzikálním pojmem inerciální soustavy lze určit jen přibližně.

V teorii relativity takové obtíže není, neboť v matematické struktuře této teorie není pojmu soustavy. Matematické rovnice teorie relativity jsou na pojmu matematické soustavy nezávislé. V matematické struktuře teorie relativity neodpovídá vůbec nic onomu nesmírnému rozdílu mezi Kopernikovou a Ptolemaiovou soustavou, který znamenal začátek nauky o světě. V tom je také

rozdíl mezi Newtonovou a Einsteinovou teorií. V Newtonově teorii je pojem inerciální soustavy, v Einsteinově teorii pojmu soustavy není. Avšak teorie — jak jsme již řekli — zahrnuje vedle své matematické struktury také souhlas se skutečností. Nepokládám proto kritiku faktu, že matematická struktura teorie neobsahuje nic, co by odpovídalo rozdílu mezi ptolemaiovskou a kopernikovskou soustavou, za zdůvodněnou, neboť o fyzikální teorii lze činit soud teprve tehdy, když matematická struktura této teorie je spjata se skutečností; teprve pak se stává fyzikální teorií. Tvrdím proto: abychom mohli spojit matematickou strukturu teorie relativity se skutečností, musíme především zvolit ve fyzikálním světě jistou soustavu. Pro pohyb planet musí být touto soustavou soustava kopernikovská, nikoli ptolemaiovská. Kopernikova soustava má v teorii relativity větší úlohu než v Newtonově teorii, a všechny námitky v tomto směru se zakládají na nepochopení rozdílu mezi matematickou strukturou teorie a jejím fyzikálním obsahem.

K osvětlení ilustrujeme charakter otázky jedním, snad nejdůležitějším příkladem. Podle Newtonovy teorie se Merkur pohybuje kolem Slunce po elipse. Slunce je v jednom ohnisku této elipsy. Vyplývá z teorie relativity totéž? Především je jasné, že jsou-li nějaké odchylky, musí být zanedbatelné, neboť jinak by Newtonova teorie musela být dávno vyvrácena. Dále se musí takové eventuální odchylky týkat jen Merkura, neboť tato planeta je Slunci nejbližší. Konečně lze takové odchylky posoudit jen tehdy, pozorujeme-li pohyb v téže soustavě, jednou vzhledem k Newtonově teorii, pak podle teorie relativity. Rozdíly, jsou-li nějaké, je potom třeba konfrontovat s pozorováním. A hle, teorie relativity předpovídá newtonovský pohyb, to jest pohyb Merkura po elipse, zároveň však předpovídá, že celá tato elipsa se zvolna stáčí. Jde o tak zvané stáčení perihelu Merkura. Tento pohyb Merkurova perihelu je kruhový, je však tak pomalý, že za 100 let činí jen 42 obloukových vteřin. Tento závěr byl bezpečně potvrzen pozorováním. Předpověď teorie relativity velmi dobře s tímto pozorováním souhlasí. Abychom však mohli tuto předpověď s pozorováním porovnat, je třeba — jak již bylo řečeno — vztáhnout pohyb ke kopernikovské soustavě.

Je tedy nesprávné tvrdit, že teorie relativity může stejně dobře použít ptolemaiovské soustavy. V případě eliptického oběhu Merkura kolem Slunce problému Země vůbec není. Celý, dosti složitý výpočet se týká mezi jiným problému: jak se pohybuje velmi malé těleso (Merkur) v poli velkého těžkého tělesa (Slunce), které je v klidu? Jde o tak zvaný problém jednoho tělesa v poli těžkého tělesa. Máme tu typický kopernikovský problém, kde se dokonce nemluví ani o pohybu těžiště, neboť se předpokládá, že Slunce je nekonečněkrát těžší než planeta. Popis má zcela objektivní charakter, neboť okolnost, že pozorovatel je na Zemi, se nikde neprojevuje. Problém jednoho tělesa je v teorii relativity poměrně jednoduchý, ač i tu činí ve srovnání s newtonovským výpočtem jisté potíže.

Problém dvou těles, na příklad dvojhvězdy, není v Newtonově teorii obtížnější než problém jednoho tělesa malé massy, pohybujícího se v poli tělesa velké massy (Slunce, planeta). Jde ve skutečnosti o týž výpočet, jen je třeba pohyb vztáhnout k těžišti soustavy, tvořené oběma tělesy. V teorii relativity je problém dvou těles srovnatelně velkých mass mnohem obtížnější. Problém sám má dlouhou historii. První řešení bylo podáno v roce 1938. Ještě dnes je tento problém popudem mnohých bádání.

Ptejme se znovu, v čem se liší předpověď teorie relativity v problému pohybu dvou těles od předpovědi newtonovské. Odpověď zní: V teorii relativity bereme

při řešení tohoto problému soustavu spjatou s těžištěm obou těles, tedy touž soustavu jako v koperníkovské teorii. Ptolemaiovská soustava nemá s tímto problémem nic společného. Zase pak dostáváme jako odchylku od newtonovského pohybu pomalé stáčení perihelu.

Vzpomeneme ještě jednoho příkladu, který se často uvádí jako jeden z důkazů správnosti teorie relativity, a to ohyb světelného paprsku. Světelný paprsek, ať přichází z kterékoli hvězdy, se ohýbá v gravitačním poli Slunce. A znovu tu vztahujeme úlohu ke Slunci, nikoli k ptolemaiovské soustavě. V theoretické analýze těchto jevů nemá ptolemaiovská soustava žádnou úlohu, a popis těchto faktů je zcela objektivní, nezávislý na pozorovateli. Tato fakta ovšem pozoruje a ověřuje člověk na Zemi. Má k tomu jisté přístroje, a aby mohl objektivně jevy pozorovat, musí znát zákony, jimž jeho přístroje podléhají, i zákony, které vymezují zvláštnosti jeho stanoviska. Dejme tomu, že světelný paprsek prochází právě kolem Slunce. Podle teorie relativity se od své původní dráhy odchýlí. Mysleme si dále, že paprsek dopadne do našeho oka. Musíme nyní znát fyziologický zákon, že vidíme hvězdu v prodloužení paprsku po tečně. Totéž se stane ve fotografickém přístroji. Jinak řečeno, fotografie skupiny hvězd, pořízená z okolí Slunce v době slunečního zatmění, bude jiná, než fotografie téže skupiny hvězd pořízená za jasné noci. To se také skutečně potvrdilo.

Z popsáního měření vyplývá, že teorie měření je nutným doplňkem teorie relativity, umožňujícím ověřit, popisuje-li tato teorie skutečnost správně nebo nikoli. Teorie měření vyžaduje v každém případě toto: Pozorování se koná ve velké vzdálenosti od Slunce. Předpokládá se při tom, že tam, kde je pozorovaný objekt, je gravitační pole velmi slabé a že tam platí euklidovská geometrie, to jest platí tam zákony speciální a nikoli obecné teorie relativity. Tento předpoklad vystupuje zřetelně také v jiném jevu, který lze experimentálně zjistit: spektrum atomu nacházejícího se na Slunci je poněkud posunuto směrem k červené oblasti ve srovnání se spektrem stejného atomu na Zemi. Vzhledem k tomu, že atom na Slunci je ve velmi silném gravitačním poli a atom na Zemi v gravitačním poli velmi slabém, je možno toto gravitační pole zanedbat. Země je v daném případě bodem od Slunce velmi vzdáleným.

Snažil jsem se odstranit alespoň jedno z mnohých nedorozumění v interpretacích teorie relativity. Často se říká, že s hlediska teorie relativity není rozdílu mezi Koperníkovou a Ptolemaiovou soustavou. To je nesprávné. Odpovědní za tento omyl jsou někdy popularisátoři, kteří ne dost přesně vyslovují svoje myšlenky. Kdo se však zabývá hlouběji teorií relativity, nemůže nikdy činit takový závěr. V matematické struktuře teorie se ovšem žádný takový rozdíl neprojevuje, neboť tato struktura je nezávislá na pojmu soustavy — podtrhuji, že v matematické struktuře teorie. Zcela jinak je tomu však, jde-li o fyzikální obsah teorie.

Matematický popis konkrétní části skutečnosti, na příklad popis pohybu planet, pohybu dvou těles atd., je zcela objektivní, a vztahuje se buď k soustavě spjaté se Sluncem, nebo k soustavě spjaté s těžištěm uvažované hmotné soustavy. Teorie relativity používá koperníkovské soustavy ve stejné míře jako Newtonova teorie, má však proti této výhodu, že nepotřebuje pojmu inerciální soustavy, a dále, že ve svých závěrech přesněji souhlasí se skutečností než Newtonova teorie.

Pokládám za nesporné, že teorie relativity je nesmírným krokem vpřed v poznání přírody, a že její principy jsou v plném souhlasu s principy dialektického materialismu. Okolnost, že některé formulace teorie relativity mají idealistický charakter, lze vysvětlit tím, že jde o velmi obtížnou teorii, vyžadující velkého

promyšlení a znalost matematických prostředků, a že byla vypracována na západě, kde je silný sklon k idealistickým interpretacím. Filozofové pak často nechápou — ani při nejlepší snaze — fyzikální obsah teorie relativity, což zase vede k odsuzování teorie, která představuje jeden z největších úspěchů bádání člověka.

Zkráceně přeložil Josef Veselka

Akademik V. A. FOK

HOMOGENNOST, KOVARIANTNOST A RELATIVNOST V THEORII PROSTORU A ČASU

Понятия однородности, ковариантности и относительности в теории пространства и времени, *Voprosy filosofii*, 1955, č. 4, str. 131—135.

S geometrického hlediska je přirozené dělit teorii prostoru a času na teorii homogenního (galileovského) prostoru a času a na teorii nehomogenního (riemannovského a einsteinovského) prostoru a času. Pro stručnost budeme někdy říkat místo »prostor a čas« prostě »prostor«.

Galileovský prostor je maximálně homogenní, což je dáno těmito jeho vlastnostmi:

- a) všechny body a časové okamžiky galileovského prostoru jsou ekvivalentní,
- b) všechny směry v galileovském prostoru jsou ekvivalentní,
- c) všechny inerciální soustavy, pohybující se vzájemně přímočaře a rovnoměrně, jsou ekvivalentní (Galileův princip relativity).

Homogennost prostoru a času je dána existencí grupy transformací, které zachovávají čtyřrozměrnou vzdálenost dvou bodů (interval). Výraz pro interval má v teorii prostoru a času velkou úlohu, neboť je přímo spjat s formami, jimiž se vyjadřují základní fyzikální zákony, zejména pohybový zákon volného hmotného bodu a zákon šíření čela vlny ve volném prostoru. Výše uvedené charakteristiky homogenního galileovského prostoru a), b), c) jsou spjaty s těmito transformacemi:

1. ekvivalence všech bodů a časových okamžiků odpovídá posunutí počátku souřadnic a počátečního časového okamžiku. Tato transformace obsahuje čtyři parametry (tři souřadnice počátku souřadnic a počáteční okamžik);

2. ekvivalence všech směrů odpovídá otočení souřadnicových os. Tato transformace obsahuje tři parametry (tři úhly);

3. ekvivalence všech inerciálních soustav odpovídá přechodu od dané vztažené soustavy k jiné, která se vzhledem k dané soustavě pohybuje rovnoměrně a přímočaře. Tato transformace obsahuje tři parametry (tři složky relativní rychlosti).

Nejobecnější transformace obsahuje deset parametrů. Je to Lorentzova transformace.

Je známo, že grupa transformací v n -rozměrném prostoru, která zachovává výraz pro čtverec vzdálenosti dvou »nekonečně blízkých« bodů, může obsahovat nejvýše $\frac{1}{2}n(n+1)$ parametrů. Existuje-li grupa transformací, která obsahuje právě tento počet parametrů, nazývá se prostor maximálně homogenním. Takový prostor má konstantní křivost. Je-li tato křivost rovna nule, je prostor euklidovský (nebo pseudo-euklidovský).