

O pohybu a klidu (Od Aristotela k Einsteinovi)

Pavel Krtouš

Úvod

Základními kameny popisu přírody klasickou fyzikou jsou umístění světa do geometrického prostoru a odečítání pohybu jednotlivých objektů vůči tomuto prostoru. Toto rozvržení však není samozřejmé a v průběhu vývoje vědy se objevilo mnoho jeho variant. V této práci bychom chtěli proto porovnat několik základních koncepcí popisu pohybu a ukázat, že lze vycházet z poměrně odlišných východisek.

Přitom se zaměříme na tradiční linii popisu pohybu, kterou bychom mohli vystihnout nejlépe jako *geometrickou*. Budeme se zabývat popisy pohybu, které zkoumané objekty primárně umisťují do nějakého prostoru a tomuto prostoru přisuzují jednodušší či složitější struktury.

Nebudeme tedy diskutovat např. popis pohybu užívaný v moderní kvantové fyzice, ve kterém se vytlačuje geometrický prostor na okraj zájmu a místo toho se pracuje s obecnými pozorovatelnými. Pozorovatelné reprezentují naši schopnost měřit vlastnosti zkoumaného systému. Mezi ně samozřejmě patří i pozorovatelná polohy. Ta však nezujímá ve struktuře kvantového popisu tak význačné místo, jak tomu je u polohy v klasické fyzice. Kvantová pozorovatelná polohy stojí v základech kvantového popisu na stejné úrovni jako jiné negeometrické pozorovatelné. Svoji význačnost dostává až díky tomu, že většina interakcí je lokálních a lokalita se vyjadřuje právě pomocí pozorovatelné polohy. Problematika kvantového pohybu by nás však zavedla příliš daleko.

Vyhneme se též diskuzi komplexních jevů, u kterých se na jisté úrovni vynořují nové charakteristiky pohybu, které nejsou zakódované pouze rozkladem na vlastnosti elementárních podsystémů, nýbrž závisejí i na komplexnosti uspořádání systému. Pomineme tak otázky statistické fyziky a termodynamiky či otázky chaosu.

Zaměříme se zejména na otázku jak vůbec popisovat jednoduchý *mechanický pohyb*. Budeme se ptát, vůči čemu pohyb odečítáme, co znamená, že se těleso nepohybuje a co určuje míru pohybu. Centrem našeho zájmu bude pohyb a s ním nutně spojený pojem klidu.

Půjde nám o pohyb, který jen mírně zobecňuje geometrii. Geometrie odhlíží od všech vlastností těles mimo jejich polohy a tvaru. Mechanika, kterou chceme studovat, přidává ještě možnost změn těchto geometrických charakteristik v čase.

Je až podivuhodné, že na tak jednoduché pojmy jako pohyb a klid existovala řada až diametrálně odlišných náhledů. Představíme si některé z těch nejzákladnějších. Ne vždy se bude jednat o dokonalé fungující modely světa. Některé z nich jsou z hlediska experimentálního ověření nepřesné a někdy i do velké míry chybné. Nicméně jsou

představitelné, popisují (více-méně) svět jak se nám na určité hladině přesnosti jeví, případně jaký by mohl být, aniž by se výrazně odchýlil od naší běžné zkušenosti.

Různými koncepcemi pohybu se budeme zabývat ne abychom je vyvrátili či potvrdili. Ale abychom si ohmatali různé možnosti nahlédnutí pojmů pohybu a klidu.¹ Uvidíme, že některé přístupy se opakují, některé představy v jeden okamžik mizí jako naivní, aby se pak v daleko sofistikovanější podobě vrátily v moderním matematickém hávu.

V první kapitole vyložíme aristotelovskou fyziku, která určovala chápání pohybu od starověku až po novověk. Následující kapitola je trochu jiného rázu – snaží se dokumentovat vývoj od aristotelovské fyziky k novověké přírodovědě a obsahuje trochu nesourodý soubor názorů různých myslitelů. K ucelené koncepci pohybu se vrátíme ve třetí kapitole kde probereme základy newtonovské fyziky. Po té se budeme zabývat Machovou kritikou newtonovského absolutního prostoru a konečně, v páté kapitole, změnami, které přinesla teorie relativity.

¹ Poznamenejme ještě, že prezentované systémy nemají být historickou studií názorů jednotlivců, přestože je po jednotlivcích nazýváme. Sledujeme spíše myšlenkovou strukturu teorii, jak vznikly nejen rukou jejich zakladatelů, ale i přispěním dalších následovníků. Ne vždy proto používáme původní názvosloví a často si vypomůžeme anachronickými doplňky a formulacemi. Jde nám o uchopení obsahu základních myšlenkových systémů, ne o jejich historickou genezi.

1. Aristotelovská fyzika

Přehled aristotelovské fyziky

První koncepci pohybu a klidu budeme nazývat aristotelovská fyzika. Budeme se v ní snažit zachytit chápání pohybu dominantní v evropském prostředí před příchodem novověké přírodovědy, chápání, které vycházelo zejména z učení Aristotela.

Začneme aristotelovským chápáním *prostoru* a *místa*. Kupodivu Aristotelův postoj k povaze prostoru obsahuje jistý vnitřní rozpor. Na jednu stranu se explicitně staví proti koncepci prázdného homogenního prostoru, do kterého by se izolovaně umísťovala materiální substance (čímž se vyhraňuje zejména vůči atomistům). Prázdnost zavrhuje buď jako přímo neexistující či alespoň zcela nedostupné. Vše kolem nás je vyplněno plnem – prostředím různé povahy. Pojem místa je založen na jisté „topologické“ blízkosti – místo zaujímané tělesem je určeno jeho okolím, vymezuje se vztahem k bezprostředně ohraničujícímu okolí. Vedle tohoto relativního vymezení pojmu místa však Aristoteles v některých kontextech mlčky předpokládá a používá prostor jako takový či alespoň některé jeho vlastnosti. Celá jeho kosmologická koncepce světa je zasazena do prostoru, který je konečný a nehomogenní a má však rysy samostatné entity – určuje např. střed vesmíru, který hraje klíčovou roli v dynamice, či určuje pojem klidu pro sublunární sféru. Přirozeně se též předpokládá, že se jedná o prostor geometrický, tj. že se v něm lze řídit pravidly euklidovské geometrie. I když tedy aristotelovská fyzika proklamuje „relativní“ koncept místa a prostorových vztahů, v mnoha konkrétních aplikacích používá geometrické chápání prostoru jako pevné základny pro popis objektů, které se v něm nacházejí.

Aristotelovská kosmologie vymezuje svět jako konečný a sférický. Dělí ho na pozemskou a nebeskou část, z nichž každá se řídí poměrně odlišnými zákonitostmi. Část pozemská se nachází kolem středu vesmíru a sahá až k tzv. lunární sféře. Nad ní se nachází nebeská část rozdělená postupně koncentrickými sférami Merkura, Venuše, Slunce, Marsu, Jupitera a Saturnu. Svět je pak uzavřen sférou stálic, Ouranem. Za sférou stálic se již nic nenachází a to ve smyslu, že zde nemá smysl ani mluvit o pojmu místa či prostoru. Je zde pouze „umísťován“ *prvotní hybatel* (v pozdější tradici ztotožňován s Bohem) který hraje roli zdroje všeho pohybu ve světě. Nebeské sféry jsou ideálně sférické, pevné (mluví se o „křišťálových“ sférách), otáčející se přirozeným pohybem, nesoucí „znaménko“ planety (či stálic v případě poslední sféry) viditelné na noční obloze. Prostor mezi sférami je vyplněn éterem (kvintesencí), zprostředkovávající působení mezi sférami.

Sféry se pohybují *rovnoměrným kruhovým pohybem*. Kruhovatá a rovnoměrná povaha pohybu je vnímána jako fundamentální princip, který hrál klíčovou roli v astronomii až do Keplera. Ideálnost kruhového pohybu do velké míry nahrazovala dynamiku v dnešním smyslu – jednalo se o rys, který již byl natolik základní a zřejmý, že odůvodňoval vysvětlovaný pohyb. Pozorované pohyby planet po noční obloze nejsou sice kruhové, měly by však být vysvětlitelné jako složení několika kruhových pohybů jednotlivých nebeských sfér. Když totiž mluvíme o rovnoměrném kruhovém pohybu, je zde tento pohyb myšlen v relativním smyslu – vůči sousedním sférám. Již v době Aristotela však bylo jasné, že pozorovaný pohyb nelze získat složením kruhových pohybů základních nebeských sfér planet. Mezi ně se proto vkládají sféry další – postupně až přes 40 sfér – umožňujících vysvětlit pozorované dráhy planet rozkladem do relativních kruhových pohybů.

Jak bylo řečeno, „ideálnost“ kruhového pohybu hraje v astronomii roli vysvětlujícího principu po celou dobu starověku a středověku. Profesionální astronomové však vbrzku opouštějí koncept relativních kruhových pohybů a namísto toho zformulují klasický geocentrický systém, v němž jsou planety nadále spojeny s nebeskými sférami, ty se však pohybují rovnoměrným kruhovým pohybem vůči *společnému klidnému prostoru*. Nerovnoměrnosti pozorovaných drah se vysvětlují vyskládáním základního pohybu sfér s dalšími kruhovými pohyby tzv. epicyklů (kruhových drah kolem středu pohybujícího se na nebeských sférách či na předchozích epicyklech), případně mírným rozcentrováním nebeských sfér či oddělením středu sféry od středu rovnoměrného pohybu po sféře (tzv. deferent). Z původní aristotelovské nebeské mechaniky tak zbývá hlavně geocentrismus a princip kruhového pohybu.

Kruhový pohyb sfér je považován za přirozený. Přesto je potřeba příčina k tomu, že se tento pohyb vůbec koná. Jak uvidíme v dynamice uplatňované v pozemské části světa, pohyb se neděje bez příčiny. Proto je v aristotelovské kosmologii za poslední sféru ohraničující celý svět umístována příčina všeho pohybu – *prvotní hybatel*. Ten rozpohybovává Ouranos a skrze něj postupně všechny další sféry až po sféru Lunární. Ta pak vnáší prvotní příčinu pohybu pro děje pozemské.

V pozemské části světa, v sublunární oblasti, se pohyb věcí řídí dvěma základními příčinami: tělesa se buď snaží dostat na své přirozené místo – v takovém případě se jedná o pohyb přirozený – či se pohybuje pohybem vynuceným, který musí mít příčinu v nějaké působící síle. Pojmy přirozeného pohybu a přirozeného místa představují aristotelovský popis gravitace, vynucené pohyby jsou aristotelovskou analogií dynamiky moderní fyziky.

Popis gravitace je založen na koncepci čtyř elementů – všechny pozemské věci se skládají ze čtyř základních prvků (elementů, substancí): *země, vody, vzduchu a ohně*. Každý z těchto elementů má své *přirozené místo*. Země ho má okolo středu vesmíru, voda nad ní, přirozené místo vzduchu je okolo vody a nejvýše patří oheň. Těleso složené z těchto základních elementů má své přirozené místo dané množstvím jednotlivých elementů – kámen skládající se hlavně ze země má své přirozené místo blízko středu světa, dým, skládající se hlavně ze vzduchu a ohně má přirozené místo vysoko nad námi.

Pokud je těleso na svém přirozeném místě a nepůsobí na něj žádné další vlivy, setrvává tam v klidu. Pokud těleso není na svém přirozeném místě, snaží se na ně dostat. Pokud na ně nepůsobí další vnější vlivy, přesunuje se na své přirozené místo *přirozeným pohybem* a to tím rychleji, čím je těleso větší. Tímto aristotelovská fyzika vysvětluje převážně pohyb vertikální – směrem ke středu světa, tj. dnešními slovy pohyby způsobené hlavně gravitací.

Jakýkoli jiný pohyb než právě popsaný přirozený pohyb musí mít svojí příčinu. Věci na svém přirozeném místě se pohybují pouze působením nějaké *síly*. Bez účinku síly se těleso nepohybuje jinak než svým přirozeným pohybem. Pojem síly je však značně odlišný od toho, který známe od Newtona. Aristotelovská síla spíše označuje příčinu pohybu a to jak příčinu materiální, tak duchovní. Aristotelovská fyzika je kvalitativní, při odůvodňování pohybu se nesnaží zodpovědět přesně otázku „Jak se těleso přesně pohybuje?“, ale „Proč se těleso pohybuje?“. Jako síla se kvalifikuje jak běžné fyzické působení (např. vítr opírající se do plachet lodě), tak i naše intence, naše vůle přesunout těleso z místa na místo.

Díky tomuto širokému chápání síly aristotelovská fyzika nezná konkrétnější zákony zachování. Pochopení, že pohyb nelze konat „zadarmo“, je vytvořeno jen mlhavě – na jednu stranu se uplatňuje princip, že nepřirozený pohyb potřebuje příčinu. Ale příčinou pohybu tělesné schránky člověka může být jeho vůle pocházející z duše, pohyb duše je

přítom způsoben zpětně působením těla. V pozdější tradici se však dodává, že schopnost duše býti příčinou pohybu musí mít svůj zdroj a to opět prvotního hybatele, tj. Boha.

Vymezení vynucených pohybů mlčky předpokládá jasný pojem klidového stavu. Ve vertikálním směru je klidový stav dán přirozeným místem tělesa. To však neurčuje jednoznačně polohu předmětů v horizontálním směru (přesněji ve směru povrchu Země). V těchto směrech si jsou jednotlivá místa rovnocenná, existuje však vydělený pojem klidu. Jedná se o klid vůči prostoru (světu) jako takovému. Prakticky je tento klid identifikován tvrzením, že Země je nepohyblivá. Má tedy smysl říci, že nebeské sféry se pohybují, kdežto Země je v klidu a nejedná se zde pouze o relativní výrok, nýbrž o výrok absolutní. Existence absolutního klidu je dokumentována např. (ve skutečnosti experimentálně chybným) příkladem loď plující po klidné hladině – tvrdí se, že pokud na přídi plující lodi vyhodím dostatečně vysoko do vzduchu kámen, ten dopadne na zádi, protože loď mezitím popojede. Aristotelovská fyzika tedy nereflektuje princip setrvačnosti pro pozemské pohyby.

Musí se však vypořádat s některými situacemi, kde setrvačnost těles hraje roli. Konkrétně se potýká s problémy typu, proč letí šíp vystřelený z luku, když na něj během letu již nic viditelného nepůsobí? Proč letí hozený kámen v horizontálním směru? Aristotelovská fyzika nedává na tyto otázky jednoznačnou uspokojivou otázku. Respektive, dává více nepřilíš uspokojivých odpovědí. Jeden přístup říká, že pokud hodíme kámen, tak též rozvíříme vzduch kolem kamene a ten tlačí na další vzduch ve směru letu kamene a vznikající víry postupně posouvají kámen kupředu. Každý, kdo házel kamenem, však cítí, že zas tak velkou vichřicí rukou nezpůsobuje a že kvantitativně vysvětlení pomocí vírů je spíše problematické.

Druhé tradiční vysvětlení je, že při hodů kamene či výstřelu šípu jim předáme hybnou sílu, tzv. impetus. Ty si ji chvíli s sebou nesou a postupně ji spotřebovávají. Podle Hipparcha se impetus vtištěný tělesu vyčerpává sám o sobě, postupně slabne, nezávisle na působení ostatních sil (např. odporu prostředí). Časovou škálu vyčerpání impetu lze odhadnout z doby, po které se vystřelený šíp či hozený kámen přestanou pohybovat. Takto formulovaná teorie impetu však, stejně jako doslovná interpretace Aristotela vyžadující pro každý (nepřirozený) pohyb přítomnost síly, nevysvětluje tak jednoduché systémy jako je např. pohyb kyvadla. Podle Aristotela nemá kyvadlo důvod kývat se směrem nahoru – nejedná se o přirozený pohyb a není přítomna žádná explicitní síla, která by kyvadélko zvedala. Ani impetus v duchu Hipparcha nepomůže – po několika kyvech již v kyvadélku žádný impetus nemůže zůstat a přesto se kyvadélko typicky kýve velmi dlouho.

Charakter impetu byl proto postupně modifikován. V 11. století zavádí Avicenna impetus, který se sám o sobě nevyčerpává. Jedná se o hybnou sílu vtištěnou do tělesa zdrojem pohybu. Ta v pohybujícím se tělese zůstává a dále působí jeho pohyb. Impetus se zmenšuje pouze skrze jiné síly, typicky odporem prostředí. V tomto podání lze pohyb kyvadla vysvětlit. Před jeho puštěním musí být kyvadélko drženo mimo svou rovnovážnou polohu silou kompenzující snahu kyvadla o přirozený pohyb dolů. Tato síla vloží po uvolnění kyvadla do kyvadla impetus, který způsobí kyvy kyvadla – alespoň do chvíle, než se skrze působení odporových sil impetus vyčerpá. Impetus tak začíná popisovat setrvačnost těles. Prozatím však není setrvačný pohyb pohybem přirozeným. Je k němu stále potřeba síla vtištěná v podobě impetu do tělesa zvenčí.

Poznámky a souvislosti

Po tomto krátkém představení aristotelovské fyziky uveďme několik poznámek motivovaných srovnáním různých koncepcí klidu, pohybu a gravitace.

Nejprve se vraťme k pojmu přirozeného místa. Bylo řečeno, že element země má své místo ve středu světa, element vody okolo země, atd. Ve světle relativního chápání místa (místo tělesa je dáno jeho bezprostředním okolím) se přirozeně nabízí otázka, čím přesně je střed světa (či přirozené místo elementu země) vymezen. Jedná se opravdu o geometrický střed vesmíru, jakousi prostorovou nehomogenitu, či je střed světa (přirozené místo elementu země) určen umístěním velkého množství hmoty tvořící Zemi? Je jistě myslitelné, že by přirozené místo země mohlo být určeno konkrétním uspořádáním hmoty, střed světa by mohl být relativně určen polohou Země. Otázku po této linii si Aristoteles opravdu pokládá – ptá se, kam by směřovaly tělesa konající přirozený pohyb na své přirozené místo v případě, kdyby „někdo přeložil Zemi, kde se nyní nachází Měsíc“ a odpovídá, že na to samé místo, kam směřují *nyní*, tj. do středu světa. Aristotelův prostor je tak opravdu nehomogenní, s význačným středem určujícím univerzální gravitaci ve vertikálním² směru. Poznamenejme, že relativní chápání centra gravitace se objevuje explicitně až např. u Galilea, ale to je již v době, kdy Koperník rozpochoval Zemi a kdy se bortí nebeské sféry.

Podobnou otázku bychom mohli vznést na původ klidu, vůči kterému se určuje horizontální pohyb. Je klid určený absolutním pevným prostorem či se jedná relativní klid daný rozložením hmoty, tj. daný vzhledem k Zemi? Neboli, jak by se pohybovala (a nepohybovala) tělesa, kdyby někdo roztočil Zemi? Točila by se tělesa, která jsou v *klidu*, spolu se Zemí nebo by jim ujížděla Země pod „nohama“? Podle očekávání, aristotelovská odpověď je (v analogii k otázce středu světa), že klid je dán samotným prostorem. Relativní koncepce – že je klid určený Zemí jako takovou – by však více sledovala koncepci relativního určování místa. Uvidíme, že otázka původu klidu se nám bude vracet jako evergreen všech koncepcí pohybu.

Poznamenejme ještě, že vydělení středu světa by šlo chápat relativně jeho určením nebeskými sférami. Tj., správným okolím pro pozemskou sféru jsou sféry nebeské a v konečném důsledku Ouranos a ty určují kde je střed světa. Podobnou úvahu však nelze provést při vydělení klidu. Nebeské sféry jsou v pohybu a to včetně sféry stálic. Aristoteles, jako filosof zaměřující se na vysvětlení bezprostředně poznávaného světa spojuje základy svého modelu s naší každodenní zkušeností nepohyblivé Země. Profesionální astronom by asi měl větší tendenci zvolit druhého přirozeného kandidáta pro klid a to sféru stálic (což v praxi astronomové samozřejmě dělali – automaticky odečítali denní pohyb hvězd a pracovali se soustavou spojenou se stálicemi). Klidné stálice však vedou k empiricky nevnímanému a bez principu setrvačnosti nepochopitelnému pohybu povrchu Země a všech pozemských těles. To byla ještě dlouho příliš velká překážka zabraňující opustit klid pevně spojený se Zemí.

Nakonec si všimněme podivné směsi „dynamických principů“ užitých v různých částech aristotelovské fyziky. Nám asi nejznámější newtonovská mechanika má dynamiku, kterou budeme označovat jako *dynamiku druhého řádu*. V takové dynamice vnější působení na těleso určuje až zrychlení pohybu. Pokud je těleso volné, nic na něj nepůsobí, pohybuje se bez zrychlení, tj. konstantní rychlostí. V aristotelovském pohledu se s náznakem takové dynamiky setkáváme u nebeských sfér. Vskutku, na nebeské sféry nic nepůsobí a ony se pohybují přirozeným rovnoměrným pohybem. Platí tedy pro ně jakýsi princip (kruhové) setrvačnosti.³ Nepůsobení síly znamená vymizení zrychlení, tj.

² Užívání označení „vertikálního“ a „horizontálního“ směru v kosmologických úvahách může být matoucí. Budeme užívat tyto označení pouze v kontextu, kdy hraje primární roli Země. Vertikální směr pak bude směr radiální, od středu Země, a horizontální směr bude jakýkoli směr kolmý na vertikální.

³ Přesněji řečeno, v původním aristotelovském náhledu byl kruhový pohyb sfér rovnoměrný relativně, postupně mezi sférami. V ptolemaiovské geocentrické soustavě se však již jedná o rovnoměrné pohyby vůči prostoru, zde však již se složitou strukturou epicyklů a deferentů.

druhé časové derivace polohy. V kontextu nebeských sfér se však u Aristotela nemluví o změnách pohybu či vnějším působením (mimo počátečního rozpočívání prvotním hybatelem), čili lze jen těžko mluvit o plnohodnotné dynamice.

Nicméně vedle tohoto náznaku dynamiky druhého řádu pro nebeské sféry je aristotelovská koncepce pozemských pohybů primárně dynamikou *prvního řádu*. Zaměřme se na pohyby těles, které již jsou na svém přirozeném místě, tj. na pohyby převážně horizontální (podél povrchu Země). Zde platí princip, že těleso, na které nepůsobí síla, je v klidu, má nulovou rychlost (první časovou derivaci polohy). Pro nenulovou rychlost je potřeba vnější působení. Dynamika prvního řádu je teorie pohybu bez principu setrvačnosti, uznává však homogenitu prostoru – v tomto případě homogenitu v horizontálním směru podél povrchu Země.

Pro vertikální směr však nacházíme náznaky dynamiky *nultého řádu*. Pokud na těleso nepůsobí vnější síla, těleso nejen že se nepohybuje, ale snaží se zaujmout konkrétní místo (je určena nultá derivace polohy). Nebolí už na to, aby těleso setrvalo na jiném než na svém přirozeném místě, je potřeba vyvinout sílu.

Zajímavé je, že se v aristotelovské fyzice úzce proplétá popis pohybu a gravitačního působení. Gravitace je pro pozemské jevy tak dominantním činitelem, že se její pochopení a vysvětlení zabudovává přímo do stavby dynamiky, do popisu pohybu jako takového. Gravitace není jedna ze sil, ale vlastnost prostoru určující přirozené místo věci. Takto akcentovaná pozice gravitace do velké míry znemožňuje uchopení plné homogenity prostoru⁴ a principu setrvačnosti. To lze dokumentovat i tím, že princip setrvačnosti se nejprve objevuje ve formě setrvačnosti kruhových pohybů kolem středu světa (nebeské sféry a později princip kruhové setrvačnosti u Galilea).

Newtonovská univerzální gravitace, jakožto síla působící mezi všemi tělesy, je tak obrovským přelomem otevírajícím možnost zcela nového jednotného vysvětlení pohybu jak pozemských objektů, tak nebeských těles. Pozoruhodné však je, že v Einsteinově obecné teorii relativity se gravitace opět popisuje jako vlastnost prostoročasu. Opět se vyděluje od ostatních sil a její popis je spojen se samotným popisem struktury prostoru a pojmu klidu.

Jak již bylo řečeno, impetus je vtištěná síla způsobující pokračování pohybu tělesa i po té, co na těleso přestal působit primární zdroj pohybu. V pozdějším chápání se impetus vložený na těleso sám o sobě nespotebovává, k jeho vytěšňování dochází pouze působením jiných sil. Takto chápaný impetus má již blízko k formulaci principu setrvačnosti. Nicméně impetus je stále plně zakotven v aristotelovské fyzice – jedná se o sílu a těleso se pohybuje pouze díky působení sil. Setrvačný pohyb je naproti tomu pohyb přirozený, bezsilový.

⁴ Ta je uchopena v případě geometrie, ne však v případě dynamiky, tj. při vysvětlování pohybů.

2. Počátky novověké přírodovědy

Astronomie

Nyní bychom chtěli velmi stručně sledovat erozi aristotelovského náhledu vedoucí k newtonovské revoluci v popisu pohybu. Aristotelovská koncepce pozemských pohybů vydržela poměrně netknutá v podstatě až do 17. století. Popis pohybů nebeských těles se naproti tomu vyvíjel již ve starověku. Na konci prvního století n. l. již existoval ucelený kvantitativně přesný model vysvětlující dráhy Slunce, planet a stálic po obloze, kanonizovaný Ptolemaiem. Jak jsme se již zmínili, jedná se geocentrický systém, kdy jednotlivá nebeská tělesa obíhají kolem Země. Po příslušné nebeské sféře se však nepohybuje přímo planeta, ale střed tzv. epicyklu – další kruhové dráhy, po níž se pohybuje střed dalšího epicyklu či nakonec samotné těleso. Navíc ptolemaiovský systém používá několik důmyslných nástrojů umožňujících vystihnout nerovnoměrnost pozorovaného pohybu planet a Slunce.

Charakteristickým rysem helénské a středověké astronomie byla rezignace na dynamiku. Cílem astronomů bylo nalézt model popisující co nejlépe pozorované pohyby. Pro tento účel bylo v rámci jistých pravidel povoleno „cokoli“. Vskutku, existovaly různé způsoby vysvětlit stejný pozorovaný fakt a oba se používali alternativně zároveň. Hlavní princip, který byl společný všem modelům, byl *kruhový pohyb* a *rovnoměrnost* pohybu. Bylo však „povolené“ kruhové pohyby skládat a s jistou volností operovat se středem vůči, kterému je pohyb rovnoměrný. Pevným základem pro odečítání pohybu a určování klidu byla Země, běžně se však užívala soustava spojená se stálicemi. Metafyzická povaha klidu (např. zda je klid dán Zemí či prostorem samotným) byla relativně irelevantní.

Ptolemaiovský systém je ukázkou pragmatické teorie, jejíž hlavním cílem je „popsat“ a ne „pochopit“ – i když vymezení obsahu slova „pochopit“ není vůbec jednoduché a je kontextově závislé. Když zde naznačujeme, že ptolemaiovský systém „nevysvětluje“ pohyby, máme na mysli absenci dynamiky, absenci principů vymezujících obecně charakter pohybu aplikovatelných na velkou třídu jevů. Ptolemaiovský systém popisuje jedinečný systém a ve snaze co nejpřesněji popsat pozorované dráhy planet připouští poměrně vysokou úroveň složitosti (počet epicyklů dosahoval až stovek), ve které se ztrácí dynamická příčina pohybu. V moderním jazyce by se jednalo spíše o jakýsi rozvoj pozorovaných drah do kruhových pohybů, kde přesnost přiblížení lze zvyšovat počtem členů v rozvoji. Pro středověké astronomy však ptolemaiovský systém jistě představoval „porozumění“ nebeským pohybům. Skutečnost, že na základě složitých výpočtů šlo předpovědět jevy jako zatmění či konjunkci planet jistě v tomto přesvědčení utvrzovala.⁵

Všeobecně helénská a středověká astronomie silně podceňovala rozměry nebeských objektů a vzdálenosti mezi nimi. Toto podcenění vedlo i k podpoře geocentrického systému – v případě pohybu Země kolem Slunce (které by bylo ve středu sféry stálic) by totiž měl být pozorován drobný relativní pohyb stálic vůči Zemi v průběhu roku (tzv. roční paralaxa. Ten však pozorován nebyl, tudíž Země musí být ve středu sféry stálic. Ve skutečnosti drobné pohyby stálic nejsou prostým okem pozorovány z důvodu, že jsou velice malé, což je dáno tím, že hvězdy jsou velmi vzdálené. Taková vzdálenost však

⁵ Rozdíl mezi vnímáním „porozumění“ či „vysvětlení“ v různých kontextech dokumentuje např. i fakt, že Kepler – který přišel se skutečně novou dynamickou koncepcí pohybu planet – si sám více cenil své teorie vysvětlující vzdálenosti planet postupným vnořováním platónských těles mezi nebeské sféry. Teorie z dnešního hlediska zcela nefyzikální.

byla pro tehdejší astronomy nepředstavitelná. Ještě Tycho Brahe – jeden z největších astronomů – umisťoval Zemi do středu světa právě proto, že jinak by hvězdy musely být „příliš“ daleko.

Mikuláš Koperník

Zásadní zlom v popisu nebeských těles přichází s Koperníkem a jeho heliocentrickou soustavou. Koperník byl veden snahou zjednodušit Ptolemaiovův systém mnoha epicyklů. Využívá toho, že ptolemaiovský systém s vhodně korelovanou velikostí epicyklů je ekvivalentní systému, kdy se všechny planety pohybují po epicyklech se společným středem – konkrétně Sluncem, které obíhá kolem Země. Pak je již jen krůček obrátit role, zastavit Slunce a nechat kolem něj obíhat všechny planety včetně Země. Koperník tak dostává systém, v němž všechny planety hrají rovnoprávnou roli, systém, který určuje relativní vzdálenosti planet (vynucené kinematickou ekvivalencí s ptolemaiovským systémem) a tím zmenšuje počet epicyklů potřebných k vysvětlení pozorovaného pohybu.

Koperníkův systém však nadále není dynamický. Koperník nezkoumá příčinu pohybů. Používá nadále princip kruhového pohybu. Má však potíže s neuniformitou pohybu Země a ostatních planet kolem Slunce a nevyhne se tak použití epicyklů a deferentů. I z tohoto důvodu Slunce neleží přesně ve středu světa (planety obíhají kolem tzv. „průměrného Slunce“), nýbrž se kolem něj mírně pohybuje.

Klid Koperník vztahuje ke stálícím. Odmítá však klid spojený s prostorem samotným. Požaduje referenci k něčemu pozorovatelnému. Používá tak relativní vydělení pohybu, nejedná se však o relativitu vůči bezprostřednímu okolí, ale relativitu vůči stálícím.

K dosažení konzistence pohybu Země s nepozorovaným ročním pohybem stálic Koperník vzdaluje výrazně hvězdy. Jak bylo řečeno, Tycho Brahe se tento krok zdráhá učinit – místo toho nabízí v podstatě Koperníkův systém, ve kterém je ale Země nehybná ve středu sféry stálic, Slunce obíhá kolem ní a ostatní planety pak kolem Slunce. Kinematická ekvivalence obou modelů co se týče pohybu planet byla astronomům zřejmá. Potíž s přijímáním heliocentrického systému však pramenila z hluboce zakořeněného pocitu klidné Země.

Johannes Kepler

Během dvou generací však dochází k výraznému oslabení tradičního vidění kosmologie. Supernovy v letech 1572 a 1604 zpochybňují neměnnost stálic a kometa z r. 1577 prolétávající skrze sluneční soustavu doslova rozbíjí kříšťálové nebeské sféry. Po té, co Galileo uviděl v čerstvě objeveném teleskopu měsíce Jupitera a našel skvrny na Slunci, stávají se nejen z planet, ale postupně i ze Slunce a hvězd tělesa podobné povahy jako věci pozemské. „Provokatéři“ jako Giordano Bruno hlásají homogenní nekonečný prostor osídlený mnoha hvězdami se svými planetárními soustavami (nekonečnost a homogenita světa zejména v časovém směru byla pro církve, spolu s jinými Brunovými postoji, až příliš velké sousto). Ale i astronomové par excellence jako byl Kepler přicházejí se spojováním světa pozemského a nebeského.

Na základě rozsáhlých astronomických dat napozorovaných Tycho Brahem buduje Kepler nový astronomický systém, jež bude zásadně odlišný právě v popisu a vysvětlování pohybu. Kepler opouští princip kruhového pohybu – nalézá, že pozorovaný pohyb planet lze přesněji a efektivněji popsat pohybem planet po elipsách. Opouští též princip rovnoměrného pohybu a formuluje zákon ploch. Nalézá i vztah mezi vzdálenostmi planet a periodou jejich oběhu. Tento model umožňuje předpovědět pohyby planet elegantněji a s mnohem větší přesností. Vedle toho však Kepler musí změnit

dynamiku nebeských pohybů. Spolu se zrušením rovnoměrného kruhového pohybu odvrhává i přirozený pohyb nebeských sfér. Místo toho přenáší dynamiku pozemských pohybů i na pohyby planet – k pohybu planet je potřeba příčina a příčinu nalézá ve Slunci. Planety se podle něj nemohou pohybovat kolem geometrického bodu, musejí mít zdroj otáčení a tím je Slunce. Předpovídá rotaci Slunce,⁶ která pak má působit na jednotlivé planety. Toto působení je vizualizované pomocí jakýchsi „loukotí“ mezi Sluncem a Zemí. Tato sluneční síla působí i na všechna tělesa na Zemi a proto necítíme pohyb Země kolem Slunce. Síla, jíž Slunce působí na planety, podle Keplera se vzdáleností klesá, proto různé planety obíhají Slunce v různých periodách. Kepler začíná používat pojem síly v mnohem modernějším smyslu, vytlačuje z něj animalistický náboj, mluví více o mechanické, slepé síle mezi tělesy.

Dopad Keplerova díla však není v jeho době takový, jaký by si zasloužil. Elipticita planetárních drah zapadá do „odborné“ literatury a poslouží až Newtonovi při formulaci jeho teorie gravitace. Ocenění přesnosti Keplerova planetárního modelu se dostavuje až po vydání Rudolfských tabulek po r. 1627. Dynamické představy a koncepce síly vysvětlující pohyb planet se z Keplerova díla vytlačuje zcela do pozadí. Důraz na dynamiku se definitivně vrací až u Newtona.

Galileo Galilei

Současně s Keplerem aristotelovské pojetí pohybu přetváří další významná postava počátků novověké přírodovědy – Galileo Galilei. Tak jako Kepler přenáší zákony pozemských pohybů do nebeských sfér, tak naopak Galilei přenáší nebeské zákony na Zemi. Galileo přenáší princip přirozeného kruhového pohybu nebeských sfér na Zemi a formuluje princip setrvačnosti pro kruhový pohyb okolo Země. Galileo přebírá Koperníkův heliocentrický systém, neakcentuje ale ani tak pohyb Země a planet kolem Slunce, jako fakt, že Země není klidná, že se pohybuje vůči klidu danému pevnými stálicemi. Musí tedy čelit námitce, proč necítíme rotaci, při které se Země každý den otočí kolem své osy. Stojí proti přesvědčení, že pokud by se Země skutečně točila, všechna tělesa nepřipevněná k Zemi by musela závratnou rychlostí ulétat k západu a my bychom museli pocítovat vichřici způsobenou stojícím vzduchem, v němž rotuje Země. Galileo se s těmito argumenty vypořádává tím, že mění pojem přirozeného pohybu pro pozemské objekty – převezme pro ně princip užívaný pro nebeské sféry: kruhový pohyb kolem centra Země se stává pohybem přirozeným.

Galileo však k tomuto názoru nedospívá jen myšlenkovou úvahou vynucenou potřebou zkonkretizovat heliocentrický systém. Galileo pokládá další základní kámen novověké přírodovědy tím, že provádí cílené experimenty, ve kterých zkoumá pohyb těles. Do té doby byla teorie pohybu záležitostí filosofů a objevovala se jako okrajová zmínka při vykládání obrazu světa – v podstatě nikoho však nenapadlo kvalitativní tvrzení o pozemských pohybech ověřovat přesněji. Aristotelovská nauka o pohybech fungovala na úrovni běžné zkušenosti – je však až překvapivé, jak je tato běžná zkušenost bez schopnosti přesněji měřit zejména časové úseky velmi nepřesná. Člověk prostým okem jen těžko rozezná, jak rychle padají různě velká tělesa – všimne si jen zjevného rozdílu při pádu kamene a peříčka. A jen obtížně získá cit pro velikost tření a odporu prostředí bez podrobnějšího zkoumání a experimentování. Bez tohoto citu nelze fundovaně rozhodnout mezi dynamikou prvního řádu bez principu setrvačnosti, kdy se těleso pohybuje jen pod vlivem síly, a dynamikou druhého řádu, kdy se volné těleso pohybuje rovnoměrně svojí setrvačností. Galileo byl jeden z prvních přírodovědců, který si

⁶ Kterou Galileo zanedlouho potvrzuje – jak úspěšná teorie! Přitom podle našeho současného chápání mezi rotací Slunce a pohybem planet samozřejmě žádná souvislost není.

nejenom kladl přesné otázky, ale též na ně hledal v přírodě přesné odpovědi. Zjistil tak, že při eliminaci odporu prostředí se začíná projevovat jasněji setrvačnost horizontálních pohybů. A též zjistil, že vertikální pohyby oproštěné od třecích sil probíhají stejně, nezávisle na velikosti (a hmotnosti) tělesa.⁷

Při pohybující Zemi musí Galileo též modifikovat aristotelovskou teorie gravitace. Drží dále teorii čtyř elementů, přirozené místo elementů však není již určeno středem světa, ale středem Země. To je první krok k Newtonově univerzální gravitaci, kdy gravitační sílu generuje každé hmotné těleso. Explicitně též formuluje možnost rozkladu obecného pohybu do jeho vertikální a horizontální složky.

Dalším zásadním přínosem Galilea byl objev možnosti matematizace popisu jevů kolem nás. Galileo začal klást přírodě přesné experimentální otázky a s překvapením obdržel přesné odpovědi, které lze zachytit do matematických vztahů. Fakt, že pohyb tělesa po nakloněné rovině se odehrává podle jednoduché formuly – za každý další pravidelný časový okamžik těleso popojede o úsek daný jistým násobkem prvního úseku a to konkrétně násobkem daným vždy následujícím lichým číslem. Po jednoduché matematické úvaze docházíme k zákonu kvadratické závislosti dráhy na čase. Tato triviální formulka však otevírá dveře do vědy v dnešním slova smyslu.

Galileo postuluje matematizovatelnost přírodních jevů. To pokládá za odraz „pravého zákona přírody“. Galileo však přitom nevytváří dynamiku v dnešním smyslu. Nehledá příčinu pohybů. Je unešen již jen schopností popisovat pozemské pohyby se stejnou přesností a exaktností, jak to dělali astronomové s pohyby nebeskými. Přesto do světa pozemských pohybů přináší klíčový rys dynamiky druhého řádu – princip setrvačnosti. Tento princip mu umožňuje zformulovat i princip relativity – všechny soustavy, které se od sebe liší přirozeným pohybem, si jsou navzájem ekvivalentní. Díky tomu můžeme tak úspěšně ignorovat pohyb Země. Země se točí, ale popis vůči soustavě spojené se Zemí je stejný, jako kdyby Země byla v klidu.

Poznamenejme ale, že v tento okamžik je gravitace stále ještě natolik dominantní působení, že se jí stále přizpůsobuje celá koncepce popisu pohybů. Prostor určující dynamiku a gravitaci je stále nehomogenní s centrem ve středu Země a přirozený pohyb je pohyb kruhový, kolem tohoto centra.

Jak bylo řečeno, Kepler přenesl dynamiku pozemských pohybů mezi nebeské sféry, Galileo přenáší naopak setrvačnost nebeských sfér na Zemi. Z hlediska dalšího vývoje byla Keplerova dynamika pohybu planet chybná. Jednalo se o dynamiku prvního řádu – spíše o spekulaci a metafyziku, nepodloženou dostatečnou kvantitativní analýzou na základě přesných dat (podobnou té, kterou Kepler udělal při odhalování kinematiky planetárních drah). Nicméně se jednalo o zásadní přínos v tom, že se začala vůbec pokládat otázka vzájemného působení nebeských těles a objevila se snaha vysvětlit pozemské a nebeské jevy na základě stejných principů. Galileo jde po podobné cestě – uvědomuje si homogenitu našeho světa a hledá tomu odpovídající popis. A tento společný popis nachází v matematice.

René Descartes

V závěru této kapitoly se věnujme krátce dalšímu zakladateli moderní přírodovědy, René Descartovi. Dotkneme se však jen několika jeho myšlenek týkajících se vývoje chápání a popisu pohybu. Descartes kanonizuje racionální metodu pro poznávání přírody.

⁷ Navzdory tradovaným historkám Galileo zřejmě nikdy neházel různě těžké kameny po turistech ze šikmé věže v Pise. Nicméně dělal velmi přesné pokusy s pohybem těles po nakloněné rovině, při kterých objevil „zákon rozdílů“ – v dnešní řeči kvadratickou závislost výšky tělesa na čase – a to nezávisle na velikosti zkoumaného tělesa.

Spolu s Galileem vyzdvihuje matematizovatelnost přírody – explicitně podřizuje svět přírodním zákonům formulovatelným v řeči matematiky.

V rámci této koncepce Descartes překládá svět geometrie do analytického jazyka a aplikuje tento matematický popis na prostor světa kolem nás. Rozepíná tak svět do nekonečného homogenního prostoru euklidovské geometrie. Sluneční soustava se stává jedním z planetárních systémů ve vesmíru vyplněném mnoha hvězdami.

A v tomto homogenním prostoru Descartes jasně formuluje princip setrvačnosti pro přímočaré pohyby. Při formulaci teorie pohybu však u něj dochází podivuhodnému zvratu. V roce 1633 má připravené k tisku dílo *Le Monde, ou traité de la lumiere*, ve kterém formuluje teorii pohybu vůči pevnému geometrickému prostoru. V tomto kontextu má princip setrvačnosti pro přímočarý pohyb jasný význam. Stejně tak lze jednoznačně říci, že Země se pohybuje kolem Slunce. V této době se však Galileo dostává do konfliktu s církví. Snad pod vlivem těchto událostí Descartes stahuje rukopis svého díla. Teorii pohybu přepracovává a v *Principia philosophiae* o 11 let později prezentuje zcela jinou teorii pohybu. Pohyb zde chápe jako ryze relativní. Má smysl mluvit pouze o pohybu tělesa vůči svému bezprostřednímu okolí. Descartes je plenista, svět je podle něj vyplněn materiálním prostředím. Toto prostředí se může různě pohybovat a vůči němu pak odečítáme pohyb těles. Díky tomu můžeme mít systém planet obíhajících kolem Slunce, které se však nepohybují vůči svému bezprostřednímu okolí, jelikož to je strháváno v jakémsi kosmickém víru kolem Slunce. Descartovi to umožňuje relativizovat výroky o pohybujiící se Zemi a vyhýbat se tak konfrontaci s církví. Jeho systém se ale stává těžko uchopitelný právě v kontextu důsledného užívání racionální metody. V rámci relativních pohybů není např. plně jasné, jak vlastně formulovat princip setrvačnosti či jaký je vztah geometrického prostoru k materii vyplňující náš svět.

Descartes užívá pojmu síly. Jedná se však o sílu lokální, dotekovou, nezná působení na dálku zavedené později Newtonem pro popis gravitace. Navíc při kvantifikaci síly zůstává u skalární veličiny a nedaří se mu proto např. přesně podchytit teorii rázů.

Ač jak Descartes, tak Galileo přicházejí s konceptem exaktního popisu světa v řeči matematiky, je mezi nimi propastný rozdíl. Galileo je praktický experimentátor, který matematické vztahy objevuje v konkrétních experimentech. Descartes je programový teoretik, který se experimentu nedotkl a proklamativně ho i odmítal. Přes velký přínos Descarta v zavedení racionální metody při popisu světa lze na jeho případu i dokumentovat, že popis reálného světa čistě racionálně dělat nelze. Z fyzikálních úvah Descarta v podstatě nic nepřežilo, jeho teorie rázů je značně problematická, výsledná koncepce relativních pohybů rozporuplná. Je vidět že bez experimentálního dialogu se světem se může racionální metoda zvrhnout ve stavění vzdušných zámků. Při kvalitativním popisu užívaném např. v aristotelovské fyzice lze poměrně volně přijímat ryze metafyzické argumenty, jelikož v užívané úrovni přesnosti nám pomáhají pochopit svět kolem. Při použití mnohem přesnější racionální metody s popisem pomocí matematických vztahů se však již námi formulované přírodní zákony musejí konfrontovat se skutečným chováním přírody s mnohem větší přesností. Descartes dal novověké přírodovědě mocný nástroj racionálního popisu, nedokázal ho však sám uspokojivě uplatnit.

3. Newtonovská mechanika

Absolutní prostor

Po příchodu matematizace do popisu světa a posunu k výrazně detailnějšímu a kvantitativně přesnějšímu zkoumání přírody začalo být zjevné, že kvalitativní pravidla aristotelovské fyziky jsou nedostatečná. Jak jsme viděli v předchozí kapitole, postupně se jednotlivé dílky v aristotelovském modelu začínají nahrazovat novými. Nicméně zásadní přerod k novému ucelenému pohledu na pohyb těles přichází až v díle Isaaca Newtona a to zejména v jeho *Principiích (Philosophiæ naturalis principia mathematica)* vydaných r. 1687. Zde Newton nejen pokládá základy dynamiky moderní fyziky a formuluje teorii gravitace, ale též zakládá diferenciální a integrální počet jakožto základní nástroj kvantitativního popisu spojitých jevů.

Newton zasazuje svět do *euklidovského geometrického prostoru* a identifikuje nezávisle běžící *absolutní čas*. Geometrie prostoru umožňuje měřit vzdálenosti a tvary těles a po vzoru Descarta popisovat polohu tělesa vzhledem ke zvolené souřadné soustavě. Jedná se již o homogenní isotropaní nekonečný prostor – Newton se již definitivně vymaňuje z geocentrického konečného prostoru.

Absolutní čas ukazuje na existenci jisté speciální míry v měření času. Potenciálně bychom mohli jako hodiny použít libovolný opakující se děj, ne všechny takové hodiny by ale byly stejně dobré. Ukazuje se totiž, že existuje význačný způsob měření času. Většina jednoduchých jevů se totiž děje synchronně. Kyvadélko kývá pravidelně ve stejném smyslu jako kmitání pružinky či rotace setrvačníku. Existuje způsob měření času, v němž se tyto jevy dějí pravidelně, synchronně, a idealizace tohoto měření dává pojem absolutního času.

K popisu pohybu však potřebujeme více. Potřebujeme říci, vůči čemu pohyb vztahujeme, co znamená se nepohybovat. Newton proto zavádí pojem *absolutního prostoru* – prostoru, v němž lze v absolutním smyslu říci, že jeho body se nepohybují, že zůstávají v klidu. Vůči této pevné základně lze pak odečítat absolutní polohu těles.⁸ Můžeme mluvit o poloze v absolutním smyslu, ve smyslu vůči absolutnímu prostoru. A zejména můžeme mluvit o pohybu vůči absolutnímu prostoru.

Newton přiřazuje každému tělesu míru jeho pohybového stavu – *hybnost* – která je dána součinem rychlosti a hmotnosti.⁹ U těles, na která nic nepůsobí, se tato míra pohybu nemění. Zavádí tak dynamiku druhého řádu, kdy přirozeným stavem volného tělesa je stav konstantní hybnosti, tj. přímočarý rovnoměrný pohyb.

Poznamenejme, že tímto formulovaný princip setrvačnosti – volné těleso se pohybuje nejjednodušším možným pohybem, po přímé trajektorii konstantní rychlostí – využívá

⁸ Tato schopnost je však okamžitě zproblematizována vysokou symetrií prostoru – ten je homogenní a isotropaní a nemůžeme proto určit nějakým kanonickým způsobem význačný počátek či směr souřadných os. To však můžeme vnímat jen jako problém zavedení a identifikace vhodné soustavy. Důležité je, že nám absolutní prostor dává schopnost mluvit o nehybných bodech, o jednom prostoru v různých časech. K problematice identifikace absolutního prostoru, identifikace klidu se budeme ještě podrobně věnovat níže.

⁹ Hmotnost ale Newton zavádí velmi povrchně – jako součin objemu a hustoty. Je přitom zřejmé, že má správnou intuici: hmotnost charakterizuje setrvačné vlastnosti tělesa a tato charakteristika je neredukovatelná např. na pouhý objem. Neumí se však vymanit z kruhu, kdy se hmotnost tělesa definuje jako míra odolnosti vůči vnějšímu působení a zároveň se toto působení měří skrze pohybovou odezvu tělesa – při tom však již potřebujeme znát hmotnost tělesa. Konzistenci implicitní definice hmotnosti skrytou v Newtonových zákonech vyjasňuje až Lange a Mach koncem 19. století.

všech tří ingrediencí zmíněných výše: pro určení rovnoměrnosti pohybu potřebujeme umět měřit jak vzdálenosti, tak absolutní čas a navíc musíme vědět, co je klidná soustava, vůči níž má být pohyb přímočarý rovnoměrný.

Již fakt, že umíme identifikovat rovnoměrný přímočarý pohyb, je vysoce netriviální. Z čistě geometrického hlediska, bez struktury absolutního prostoru, tuto schopnost nemáme. Rovnoměrný pohyb vůči jedné soustavě se jeví jako nerovnoměrný vůči soustavě, která se vůči původní soustavě např. otáčí. Pokud neumíme vybrat z obou soustav tu význačnější, nevíme, který z obou popisů je fundamentálnější. Newton si však všimá, že my *máme* schopnost identifikovat význačné soustavy dynamicky – a to např. právě pomocí pohybu volných těles. Absolutní prostor je přesně taková soustava, v níž se volná tělesa pohybují rovnoměrně přímočaře.

Vztah mezi strukturou absolutního prostoru a dynamikou jednoduchých systémů je tak obousměrný. Pomocí absolutního prostoru můžeme zformulovat zákon pohybu těchto systémů (např. princip setrvačnosti), na druhou stranu absolutní prostor pomocí těchto jednoduchých systémů identifikujeme a definujeme. Netrivialita této konstrukce (a to, že se nejedná o logický kruh) spočívá v tom, že ji lze vůbec provést. Spočívá vůbec v možnosti zavést absolutní prostor s popsány vlastnostmi a v možnosti popsat pohyby volných těles jako rovnoměrné pohyby vůči speciální soustavě. Lze si totiž hypoteticky představit i svět, v němž by toto nebylo možné – různá volná tělesa by se mohla pohybovat zcela nezávisle a různorodě a žádná společná soustava, vůči níž by jejich pohyb vypadal jednoduše, by nemusela existovat.

Newtonova formulace však musí čelit problému, ke kterému se ještě podrobněji vrátíme níže. Absolutní prostor není uvedeným kritériem určen jednoznačně. Požadovaná rovnoměrnost a přímočarost pohybu volných těles sice zúží výběr klidové soustavy, neurčí ji však úplně. Volná tělesa se totiž nepohybují rovnoměrně přímočaře pouze vzhledem k absolutnímu prostoru, nýbrž také vůči libovolné soustavě, jež se sama pohybuje vůči absolutnímu prostoru rovnoměrně přímočaře. Takovéto soustavy se nazývají *inerciální soustavy*. Ukazuje se, že z hlediska newtonovské mechaniky jsou si všechny inerciální soustavy rovnocenné. Proto lze celou newtonovskou mechaniku budovat i bez explicitního odkazu na absolutní prostor – vystačí si pouze s referencí k obecné inerciální soustavě.

Síly

Postupme nyní k pohybům pod vlivem vnějšího působení. Každé vnější působení je podle Newtona charakterizované silou, která určuje změnu pohybového stavu tělesa, tj. změnu hybnosti. Za malý časový interval dt se vlivem síly F změní hybnost tělesa p o množství $dp = F dt$. Oproti např. Descartovi zavádí Newton sílu vektorovou, určující jak velikost, tak směr působení. Samotná síla přitom musí být určena nezávislým fyzikálním zákonem charakterizujícím to které působení, přičemž síla může záviset pouze na okamžité poloze a rychlosti tělesa, ne však na zrychlení či vyšších časových derivacích polohy.

Newton v *Principiích* rozebírá různé druhy sil¹⁰ a to jak kontaktní síly (hrající roli např. při rázech či tření), tak síly působící na dálku. Toto byl poměrně netriviální krok od

¹⁰ Newton ve svých ranných pracích a částečně i v *Principiích* používá i pojem setrvačné síly (též tzv. „innate“ či „inherent force“). Jde zde o dědictví impetu z aristotelovského modelu – jedná se totiž o odkaz na „sílu“ potřebnou k udržení rovnoměrného pohybu. Takovýto pojem síly je však samozřejmě v rozporu s newtonovským chápáním síly – se silou určující *změnu* pohybového stavu. Tento rozdíl je Newtonovi zřejmý a frázi „setrvačná síla“ používá pouze okrajově, jako kontakt s v jeho době běžně zaužívanými

zažité intuice – připustit působení, které neprobíhá skrze „viditelný“ a „hmatatelný“ kontakt mezi tělesy. Díky této možnosti byl Newton schopen zformulovat velice úspěšnou teorii gravitace a vytvořil tak prototyp teorie pro „čisté“, „fundamentální“ síly.¹¹

Newton používá pojem síly již jen pro fyzické síly. Vytlačuje zcela z popisu síly duševní, intenci, naše cíle či motivy. Zužuje tím svojí mechaniku samozřejmě na mnohem užší třídu jevů, než aspirovala vysvětlit aristotelovská fyzika. Díky tomu je však schopen popsat jevy, které ho zajímají, mnohem přesněji. Už nevysvětluje pouze obecné charakteristiky pohybů, zato je schopen spočítat jejich přesný průběh.

Fenomenálního úspěchu dosáhl Newton při popisu gravitace. Jak bylo řečeno, popisuje ji jako jednu ze sil. To je změna oproti aristotelovské fyzice, kde je gravitace popsána jako vlastnost prostoru. Newton tak završuje snahu spojit zákony pozemských a nebeských jevů. Přichází s tím, že gravitační působení je univerzální působení mezi libovolnými dvěma tělesy, jak těmi na Zemi, tak v kosmu. Jedná se o okamžité působení na dálku, jehož velikost je úměrná hmotnosti obou zúčastněných těles a které klesá se čtvercem vzdálenosti. Díky univerzální gravitační síle vysvětluje jak parabolický pohyb hozeného kamene na Zemi, tak eliptické dráhy planet kolem Slunce. Např. z Měsíce se tak stává pouze velký kámen padající na Zem.¹² Tento široký rozsah použitelnosti gravitační interakce byl velký triumf abstrakce, podařilo se zachytit rozsáhlou škálu jevů pomocí několika mála jednoduchých principů.

Shrnuto, základními kameny newtonovské teorie pohybu jsou euklidovský prostor umožňující měření vzdálenosti, absolutní čas umožňující měřit význačným způsobem čas, absolutní prostor definující pojem klidu a pohybová rovnice vztahující změnu pohybového stavu (zrychlení) s vnějším působením reprezentovaným silou.

Neinerciální soustavy

Vraťme se nyní k význačnosti inerciálních soustav. Jak již bylo řečeno, pomocí mechanických experimentů nelze mezi inerciálními soustavami identifikovat absolutní prostor. Velice důležité však je, že třídu inerciálních soustav lze odlišit od všech ostatních soustav. Má smysl mluvit o pohybu v „absolutním smyslu“. O pohybu řekneme, že je ve svém základním stavu či že je triviální, pokud se děje rovnoměrně přímočaře vůči nějaké inerciální soustavě. Naopak, pohyb je v absolutním smyslu netriviální, pokud se děje se zrychlením vůči inerciální soustavě. Dynamicky lze totiž jednoznačně odlišit pohyb urychlený od pohybu rovnoměrného přímočarého: k urychlení v absolutním smyslu je potřeba vnější působení, naopak volná tělesa se pohybují rovnoměrně přímočaře vůči inerciální soustavě.

Jinými slovy, popis pohybu v neinerciálních soustavách bude složitější. I volná tělesa se v nich budou pohybovat po zakřivených drahách a k vysvětlení tohoto jevu musíme zavádět tzv. nepravé či inerciální síly – jako např. sílu odstředivou, Coriolisovu či lineární setrvačnou sílu.

pojmy. Navíc postupně přechází k používání tohoto pojmu spíše ve smyslu odporu vůči změně pohybového stavu.

¹¹ Zde je však zajímavé poznamenat, že v dalším vývoji byl toto spíše úrok stranou. Moderní popis interakcí se vrací k lokalizovanému působení pouze mezi těmi částmi systémů, které si jsou prostorově blízké. Pro popis působení na dálku se zavádí prostředník, který toto působení lokálním způsobem přenáší z jednoho místa na druhé. Legitimita Newtonova působení na dálku pak spočívá v obrovské rychlosti, kterou se jednotlivé interakce šíří.

¹² Velký padající kámen, který se vyhne srážce se Zemí jen díky dostatečně velké horizontální složce rychlosti, která ho vždy odnese trochu stranou – což se, složeno s volným pádem v radiálním směru, vyskládá v eliptický pohyb kolem Země.

Vezměme si jako příklad situaci, kdy nám z rychle se točícího kolotoče uletí vyzutá bota. V inerciální soustavě spojené se Zemí tento jev vysvětlujeme jako přímočarý pohyb volné boty, která si drží rychlost kolotoče, již měla v okamžik vyzutí (alespoň co se týče horizontálního pohybu). V neinerciální soustavě spojené s rotujícím kolotočem je však bota v okamžiku vyzutí v klidu. Abychom vysvětlili to, že se nám bota vzdálí, musíme zavést odstředivou a Coriolisovu sílu. Ta způsobí její pohyb z hlediska neinerciální soustavy.

Jako další příklad vezmeme situaci v rozjíždějící se tramvaji, kdy se musíme držet, abychom neupadli. V neinerciální soustavě spojené s tramvají vysvětlíme náš klid zavedením nepravé setrvačné síly, kterou kompenzujeme tím, že se držíme madla (působení skutečné síly) tak, že ve výsledku na nás nepůsobí žádná síla a my setraváme v klidu vůči tramvaji. Z hlediska inerciální soustavy spojené s okolím tramvaje však mají lidi v tramvaji tendenci se pohybovat rovnoměrně, zatímco tramvaj se jim urychluje pod nohama. Jen díky tomu, že stojí na podlaze a drží se madla, působí na ně síla, která je urychluje spolu s tramvají.

Zmiňme ještě klasický Newtonův příklad vědra s vodou. Voda ve vědru stojícím v inerciální soustavě bude mít hladinu rovnou – působí zde pouze gravitace kolmo na hladinu vody, která se vyrovná s působením stěn vědra a podložky pod vědrem. Naproti tomu hladina vody v rotujícím vědru bude prohnutá. Z hlediska neinerciální soustavy spojené s vědrem bude vědro klidné, ale hladina vody nebude rovná! Dynamicky tak poznáme rozdíl mezi vědrem v klidu v inerciální a v neinerciální soustavě. K vysvětlení prohnutí hladiny v neinerciální soustavě pak musíme zavést odstředivou sílu.

Inerciální soustavy jsou tedy dynamicky význačné. Vystačíme si v nich bez nepravých sil. Jednoduché jevy se v nich jeví jednoduše.

V tomto kontextu Newton důrazně odmítá koncepci relativního pohybu. Odmítá Descartovo chápání pohybu vztáženému vždy pouze k bezprostřednímu okolí, chápání pohybu pouze ve vztahu k jiným tělesům. Podle Newtona má význam mluvit o absolutní míře pohybu – pohybu vůči absolutnímu prostoru. Zrychlení není pouze konvenční záležitost, ale veličina absolutně definovatelná a měřitelná skrze působící síly.

Princip relativity a inerciální soustavy

Vraťme se však ještě jednou k otázce identifikace absolutního prostoru. Newton vkládá pojem klidu přímo do struktury prostoru a dělá to tím nejjednodušším způsobem – prohlásí, že existují body, místa, které zůstávají v čase neměnná. Jedná se přímočaré rozšíření geometrie připuštěním časově závislých jevů v neměnném geometrickém prostoru. Problém tohoto přístupu je, že dynamické argumenty sloužící k identifikaci absolutního prostoru neurčují absolutní prostor jednoznačně.

Problém s identifikací absolutního prostoru vzniká díky tomu, že v newtonovské dynamice druhého řádu platí princip relativity všech inerciálních soustav. Veškeré zákony mechaniky zformulované vůči jedné inerciální soustavě vypadají zcela stejně i vůči libovolné druhé inerciální soustavě. Jedná se o přeformulování Galileova principu relativity, tentokrát pro rovnoměrné přímočaré pohyby.¹³ Na základě pozorování jevů popsaných pouze zákony mechaniky tudíž nelze vybrat nějakou výjimečnou inerciální soustavu, nelze identifikovat absolutní prostor. To by bylo možné např. v dynamice

¹³ Newton si byl principu relativity samozřejmě vědom a uvádí ho mezi základními charakteristikami své mechaniky. Nicméně je až s podivem, jak málo princip relativity využívá – což vynikne zvláště ve srovnání s pracemi Newtonova současníka Huygense, který tento princip užíval poměrně intenzivně. Podle všeho to souvisí právě se skutečností, že se Newton snaží zákony formulovat vůči jedné význačné inerciální soustavě – vůči absolutnímu prostoru – a tak ekvivalenci ostatních inerciálních soustav nezdůrazňuje.

prvního řádu. Ve světě, v němž by se všechna volná tělesa vůči sobě vůbec nepohybovala, by šlo identifikovat absolutní prostor jako právě tu soustavu, v níž jsou volná tělesa v klidu. Newtonovská dynamika však připouští pro volná tělesa pohyb libovolnou konstantní rychlostí a to nestačí k určení, která z inerciálních soustav je totožná s absolutním prostorem.

Proto Newton nabízí dvě další kritéria pro identifikaci absolutního prostoru. První je ryze pragmatické a lehce použitelné. Není však založené na obecných zákonech, nýbrž využívá odkazu na konkrétní rozložení hmoty ve vesmíru. Podle něj je totiž absolutní prostor ten, vůči němuž se nepohybují stálice. Absolutní prostor je ten, vůči němuž je v klidu těžiště naší sluneční soustavy.¹⁴

Druhé kritérium je metafyzické. Existenci absolutního prostoru vykládá Newton jako nutnou, protože jedna z inerciálních soustav musí dávat pojem přirozeného univerzálního klidu – a jedná se konkrétně o soustavu, vůči níž je v klidu Bůh. Odhlédneme-li od teologického náboje tohoto kritéria, lze ho chápat tak, že přiznáváme existenci prostoru jako takovému, že chápeme prostor jako jakési prostředí, které má svojí vlastní identitu. Pokud body v prostoru existují samy o sobě a existují nezávisle na běhu času, musíme být schopni s těmito body spojit pojem klidu. Toto metafyzické kritérium tedy říká, že absolutní prostor existuje a že jedna z inerciálních soustav je v klidu vůči němu, nedává však odpověď na otázku, která z inerciálních soustav to je.

Z ryze operacionalistického hlediska ale kritérium pro identifikaci absolutního prostoru v rámci newtonovské mechaniky nemáme. Odkaz na stálice je spíše definice, prostě si inerciální soustavu spojenou se stálicemi označíme jako privilegovanou. Skutečná identifikace absolutního prostoru by měla vycházet ze samotné povahy fyzikálních zákonů – to však v případě zákonů mechaniky díky principu relativity není možné.

Poměrně dlouho ale převládalo přesvědčení, že absolutní prostor bude možné identifikovat pomocí nemechanických jevů – např. v rámci optiky či pomocí elektrických a magnetických sil. A vskutku, po formulaci Maxwellových rovnic pro elektromagnetické pole bylo zřejmé, že ty newtonovský princip relativity nesplňují. Zbývalo tedy „pouze“ změřit, vůči které inerciální soustavě mají Maxwellovy rovnice známý jednoduchý tvar, či vůči které soustavě dávají význačné předpovědi jako např. izotropii rychlosti šíření světla. Překvapivý experimentální výsledek – že se světlo šíří všemi směry stejnou rychlostí ve *všech* inerciálních soustavách – musel mít proto devastující dopady. Kupodivu nebyl tento výsledek zničující pro Maxwellovy rovnice, ale pro fundamentálnější strukturu samotných inerciálních soustav – ale o tom až v páté kapitole.

Prostoročas a inerciální struktura

Newton formuluje svoji mechaniku vůči absolutnímu prostoru. Nyní však již víme, že tento prostor je mezi ostatními inerciálními soustavami nerozlišitelný. Pokud vezmeme princip relativity skutečně vážně, měli bychom se pokusit zformulovat newtonovskou mechaniku bez reference k absolutnímu prostoru, ponechat pouze odkazy na třídu inerciálních soustav. To však není tak přímočaré, jak by se mohlo zdát. Problém je s identifikací prostoru v různých časech. Pokud dáme prostoru až skoro materiální identitu, je pak obtížné říkat, že všechny inerciální soustavy si jsou ekvivalentní. Jedna z nich je vždy spojena s nepohyblivými geometrickými body. My bychom ale potřebovali

¹⁴ Zde Newton předpokládá, že se Slunce se svou planetární soustavou vůči stálicím nepohybuje. Přesněji, Newton mluví o klidném „těžišti světa“ a o tom, že těžiště soustavy Slunce, Země a planet se nepohybuje. Rovnoměrný pohyb, který se též nabízí, označuje Newton za „nepravděpodobný“ a rozhodne se ho neuvažovat.

formulaci, v níž jsou všechny soustavy rovnocenné. To v podstatě vylučuje zavedení časově neměnných bodů v třídímním geometrickém prostoru.

Cesta, jak všechny inerciální soustavy zrovnoprávnit i po formální stránce matematické formulace teorie však vyžaduje zcela novou ingredienci. Ingredienci, která se naplno využívá až v teorii relativity.¹⁵ Řešení problému neměnných prostorových bodů leží ve změně popisu prostoru a času. Místo umístění světa do třídímního prostoru bodů, ve kterém běží nezávislý čas, zasadíme historii našeho světa do tzv. *prostorochasu*. Jedná se o čtyřdímní prostor jehož body představují *události* ve vývoji světa. Každá událost je určena svojí prostorovou polohou a časovou lokalizací, je určena odpovědí na otázky *kde* a *kdy*. V případě newtonovské mechaniky si *prostorochas* můžeme nejjednodušeji představit jako sled třídímních prostorů, pro každý časový okamžik jeden. Každému jednomu z těchto třídímních prostorů se říká *nadplocha konstantního času*, či *nadplocha současnosti*.

Rozdělením prostorových bodů na události jsme se vyhnuli nezbytné identifikaci nepohyblivých bodů. Vývoj prostorového bodu v čase se totiž v *prostorochase* zobrazí jako sekvence událostí, jako křivka – tzv. *světočára* – protínající postupně všechny nadplochy současnosti. Pohyb tělesa se též reprezentuje světočárou (či světotrubicí pro prostorově rozlehlé tělesa) – sekvencí událostí, které těleso postupně „zažívá“. K tomu, abychom však mohli o některé z těchto světočar prohlásit, že odpovídá urychlenému či rovnoměrně pohybu, potřebuje dát *prostorochasu* určitou geometrickou strukturu.

Shrňme však nejdříve, jaké geometrické struktury v newtonovském *prostorochase* přirozeně máme. V první řadě si zachová strukturu absolutního času a euklidovské prostorové geometrie. Formálně se to realizuje tak, že na *prostorochase* máme zadanou časovou funkci t reprezentující absolutní čas. Třídímní nadplochy $t = \text{konst.}$ odpovídají nadplochám současnosti a každá z nich má strukturu euklidovské geometrie.

Dále však potřebujeme provázat nadplochy současnosti v různých časech. Potřebujeme zavést *vztažnou soustavu*, která nám „poslepuje“ či identifikuje události v různých časech. Při tomto poslepování budeme respektovat euklidovskou geometrii platnou v každém čase – útvary daných rozměrů musejí přejít na útvary stejných rozměrů. K tomuto účelu stačí vybrat v každém čase čtyři body tvořící stále stejně velký čtyřstěn. Čtyři světočáry dané vývojem vrcholů čtyřstěnu již identifikují *vztažnou soustavu*, která nám určuje, jak na sebe jednotlivé nadplochy současnosti navazují. O obecné světočáře řekneme, že je v klidu vůči takto zvolené soustavě, pokud události, které ji tvoří, mají ve všech časech stále stejné vzdálenosti od všech čtyř světočar definujících soustavu (od vrcholů zvoleného čtyřstěnu).

Pokud bychom měli k dispozici pouze absolutní čas a euklidovskou strukturu jednotlivých nadploch současnosti, všechny možné volby *vztažných soustav* by si byly ekvivalentní. My však již víme, že v newtonovské mechanice umíme dynamicky identifikovat význačnou třídu soustav – inerciální soustavy. Jsou to ty soustavy, vůči nimž se volné tělesa pohybují rovnoměrně přímočaře. Tj., jsou to konkrétně ty soustavy, jejichž klidné světočáry (např. čtyři definující světočáry čtyřstěnu) reprezentují pohyby volných částic.

Jinými slovy, nalezneme-li systém volných částic, který je tuhý (vzdálenosti jednotlivých částic se s časem nemění), tyto částice realizují inerciální *vztažnou soustavu*.

¹⁵ Formulace newtonovské mechaniky bez absolutního prostoru vznikla ve skutečnosti až zpětně, po vzniku teorie relativity. Tato formulace je zajímavá spíše z koncepčního hlediska – oprošťuje se i na formální úrovni od neidentifikovatelného absolutního prostoru a začíná používat jazyk, který přetrvává i ve speciální teorii relativity.

Z předchozí diskuze víme, že inerciální soustava není určena jednoznačně. Dvě inerciální soustavy se vůči sobě pohybují rovnoměrně přímočaře.¹⁶ Co je však dynamicky určeno, je *třída* inerciálních soustav. Existenci a význačnost inerciálních soustav budeme nazývat *inerciální strukturou* newtonovského prostoročasu.

Ukazuje se, že tuto inerciální strukturu lze poměrně jednoduše zakódovat tím, že newtonovskému prostoročasu přiznáme vedle časové funkce t a euklidovské geometrie nadploch $t=\text{konst.}$ ještě strukturu afinního prostoru. Afinní prostor je takový prostor, v němž jsou definované přímé čáry a pojem rovnoběžnosti. Pokud taková přímá čára bude ležet v jedné nadploše současnosti, budeme vyžadovat, aby to byla i přímka ve smyslu třídimenzionální euklidovské geometrie. Netriviální ale budou přímé čáry neležící v jedné nadploše současnosti – právě ty identifikujeme se světočarami volných těles. Pohyb volných těles bude tedy reprezentován v newtonovském prostoročase přímými liniemi ve smyslu afinní struktury prostoročasu. Inerciální soustava pak bude soustava, jejíž osy jsou realizované pomocí přímých čar. A tělesa v klidu vůči zvolené inerciální soustavě budou mít za světočáry přímé linie, které jsou navzájem rovnoběžné.

V takto zavedeném prostoročase lze pak jednoduše zapsat pohybový zákon spojující zrychlení tělesa (v novém jazyce ekvivalentní zakřivení příslušné světočáry) se silou, která na těleso působí.

Prostoročasová formulace newtonovské mechaniky je již i formálně neutrální vůči výběru inerciální soustavy.¹⁷ Inerciální soustavy jsou zkrátka ty, které respektují afinní strukturu prostoročasu.

Všimněme si i, že prostoročasová formulace zrovnoprávnila pohyb všech volných těles. V původní formulaci v absolutním prostoru vždy měla volná tělesa konstantní rychlost, ale některá z nich měl rychlost nulovou. Nabízelo se tedy, že jsou jistým způsobem význačnější. Až princip relativity tvrdil, že tomu tak není. V prostoročasové formulaci je světočára volného tělesa reprezentována přímou linií. A všechny přímé čáry si jsou rovnocenné. Není mezi nimi žádná, která by byla více v klidu než jiná. Dvě přímé světočáry mohou být v prostoročase vůči sobě různě skloněné (tzn., že se vůči sobě pohybují), nelze však určit absolutní sklon světočáry – není vůči čemu.

V tomto smyslu by byl absolutní prostor přirozenější pro dynamiku prvního řádu – v ní se volná tělesa vůči sobě nepohybují a definují tak jednoznačný pojem klidu. Absolutní prostor by zde byl jednoznačně dán. Pro dynamiku druhého řádu je přirozenější inerciální struktura prostoročasu. V tomto případě je totiž třída volných těles širší – mohou se vůči sobě i rovnoměrně pohybovat. A v prostoročasové formulaci právě třída všech volných těles definuje inerciální strukturu – jejich světočáry definují pojem přímých linií v prostoročase.

¹⁶ Toto není logická nutnost, zde se jedná o netriviální experimentální zkušenost. Obecně by se tuhé soustavy volných částic mohly vůči sobě pohybovat obecnějším způsobem. Ve světě naší běžné zkušenosti tomu tak není.

¹⁷ I původní Newtonova formulace s absolutním prostorem je nezávislá na volbě inerciální soustavy – platí zde princip relativity. Ve formálním popisu však vystupuje absolutní prostor, který symetrii inerciálních soustav nerespektuje.

4. Machův princip

Klasická fyzika až do konce 19. století – zasazená do newtonovského rozvržení prostoru a pohybu – byla neuvěřitelně úspěšná. Podařilo se jí popsat a predikovat velkou část neživé přírody. Její úspěšnost vedla až k přesvědčení, že se fyzice daří odrážet „pravé zákony přírody“, vnitřní mechanismy, jak příroda „skutečně funguje“. Newtonův absolutní prostor byl přitom jednou ze struktur, která měla velice prominentní a apriorní pozici. Zdálo se, že se jedná nezbytný základ, díky kterému lze vůbec pohyb těles popisovat.

Koncem 19. století ale vystoupil s kritikou absolutního prostoru Ernst Mach. Ve své *Mechanik (Die Mechanik in ihrer Entwicklung: Historisch-kritisch dargestellt)* zpochybňuje apriorní pozici absolutního prostoru či třídy inerciálních soustav. Mach tvrdí, že všechny soustavy si jsou z hlediska platnosti fyzikálních zákonů zcela ekvivalentní. Že nelze zavést pojem absolutního zrychlení, protože ve skutečnosti nemáme kanonicky vydělenou třídu inerciálních soustav. Podle Macha má smysl mluvit pouze o relativním pohybu těles, ne o pohybu tělesa vůči soustavě, protože souřadná soustava je až náš pomocný nástroj, který nemůže zásadním způsobem figurovat v přírodních zákonech. Empiricky pozorované setrvačné vlastnosti těles pak navrhuje vysvětlit interakcí těles s veškerou hmotou ve vesmíru skrze jistou novou speciální interakci. Tento postoj se dnes formuluje jako tzv. *Machův princip*: setrvačné vlastnosti těles jsou dány rozložením hmoty ve vesmíru.

Mach bere vážně Newtonovo tvrzení, že absolutní prostor je ten, vůči němuž jsou v klidu stálice. Tvrdí, že toto není jen koincidenční chování stálic umožňující identifikovat absolutní prostor. Naopak, systém velmi hmotných vůči sobě se nepohybujících stálic teprve vybírá privilegovanou soustavu a dává jí dynamickou význačnost. Absolutní prostor je produkt rozložení hmoty ve vesmíru, ne apriorní struktura, vůči níž jsou stálice v klidu. Jinými slovy, kdyby bylo rozložení stálic ve vesmíru jiné, byly by setrvačné vlastnosti těles jiné. Kdyby nebyl vesmír vyplněn stálicemi vůbec, tělesa by neměla setrvačné vlastnosti, resp. ty by byly velice odlišné.

Bude názorné si Machův princip dokumentovat na Newtonově příkladu s vědrem. Podle Newtona prohnutá hladina vody ve vědru rotujícím vůči inerciální soustavě ukazuje, že rotující soustava spojená s vědrem není s inerciální soustavou ekvivalentní – v inerciální soustavě by hladina vody v nehybném vědru byla rovná. Podle Macha však pronutí hladiny nezpůsobuje rotační pohyb vůči inerciální soustavě, nýbrž otáčivý pohyb vědra vůči stálicím, vůči hmotě vyplňující vesmír. Kdyby se nám kolem rotujícího vědra podařilo roztočit i veškerou hmotu ve vesmíru, hladina vody by se opět vyrovnala. Naopak, kdybychom stálice roztočili kolem nehybného vědra, hladina vody v něm by se prohnula.

Mach navíc dodává, že oba tyto experimenty můžeme lehce provést. Rotující stálice kolem rotujícího vědra jsou totiž zcela ekvivalentní situaci s nehybnými stálicemi a nehybným vědrem. Stejně tak rotující stálice kolem stojícího vědra je totožná situace jako rotující vědro mezi stojícími stálicemi. Podle Macha se jedná se jen o různý způsob popsání jedné identické situace. Jediné, co má totiž invariantní smysl je relativní pohyb tělesa a stálic. Podle Macha je absolutní prostor jen naše konstrukce, jedná se jen o označení soustavy, která je privilegovaná polohou stálic.

Pokud by stálice byly rozloženy ve vesmíru jinak – například by nebyly kolem nás rozloženy isotropně – setrvačné vlastnosti těles by byly jiné. Např. hmotnost vystupující

v pohybové rovnici vůči soustavě spojené se stálicemi by mohla být směrově závislá, korelovaná s neizotropií rozložení stálic.

Stálice ale nevybírají s nimi spojenou soustavu pouze konvenčně. Jak bylo zmíněno, v machovské mechanice je potřeba k běžným silám přidat ještě velmi slabou dalekodosahovou sílu působící mezi všemi tělesy. Díky tomu, že je tato síla slabá, můžeme ignorovat její působení od blízkých těles. Pokud však vezmeme v úvahu všechnu vzdálenou hmotu ve vesmíru a daleký dosah této interakce, bude úhrnný příspěvek machovské síly netriviální.

Konkrétně, pohyb tělesa v machovské mechanice je určen podmínkou, že součet všech sil (včetně machovské síly) musí být během pohybu nulový. Při vhodném rozložení hmoty ve vesmíru pak příspěvek machovské síly F_M od všech vzdálených stálic vede ke vztahu $F_M = -m a$, kde a je zrychlení vůči klidové soustavě stálic. Machova pohybová rovnice $F_M + F_{\text{ostatní}} = 0$ tak vede na Newtonův pohybový zákon $m a = F_{\text{ostatní}}$.

Pokud bychom chtěli Machův návrh formalizovat (v *Mechanice* Mach nabízí pouze kvalitativně popsanou koncepci), máme k dispozici opět dvě alternativy, obdobně jako při formulaci newtonovské teorie.

První by byla v rámci třidimenzionálního popisu. Abychom se však vyhnuli zavedení absolutního prostoru, musíme v tomto případě rezignovat i na zavedení geometrického prostoru s časově neměnnými body. Euklidovskou geometrii budeme používat pouze k měření vzdáleností mezi tělesy a nic jiného než relativní vzdálenosti těles ani nebudeme používat. Tj. nebudeme mluvit o poloze v prostoru či rychlosti vůči prostoru. Můžeme pouze mluvit o vzájemných vzdálenostech těles a o časových změnách těchto vzdáleností. Nebudeme mít však žádné propojení mezi polohami těles v různých časech.

Alternativně bychom mohli použít prostoročasový jazyk. Oproti newtonovskému případu však machovský prostoročas nemá afinní strukturu. Všechny způsoby navázání různých nadploch současnosti (konzistentní s prostorovou geometrií) si jsou rovnocenné. Experimentálně pozorovanou inerciální strukturu do machovského prostoročasu vnáší teprve přítomnost stálic – teprve jejich světočáry vybírají jednu konkrétní soustavu. A teprve machovská síla zajistí, že každé další volné těleso (těleso, na něž působí jen machovská síla) se vůči stálicím bude pohybovat rovnoměrně přímočaře.

Mach se v podstatě snaží zformulovat dynamiku klidu – snaží se vysvětlit pojem klidu (a rovnoměrného setrvačného pohybu) na základě interakce hmoty. Snaží se vytěsnit metafyzické pojmy, mezi které řadí i absolutní prostor. Pojem inerciální soustavy získává až jako druhotný, jako důsledek konkrétního rozložení hmoty ve vesmíru.

5. Einsteinova teorie relativity

Speciální teorie relativity

Teorie pohybu založená na Machových idejích však neměla dostatek času, aby se rozvinula v samostatnou plnohodnotnou konkurenci newtonovské mechaniky. Přišla totiž revoluce, která byla z hlediska měřitelných výsledků mnohem závažnější. Jak už jsme se zmínili, na přelomu 19. a 20. století totiž fyzika stála před možností identifikovat Newtonův absolutní prostor pomocí jiných než mechanických jevů. Teorie elektromagnetických jevů – elektřiny, magnetismu, ale i světla – byla již jasně zformulována a nebyla invariantní při přechodu od jedné inerciální soustavy k druhé. Maxwellovy rovnice popisující elektromagnetické pole nemohou mít stejný tvar ve všech inerciálních soustavách, pokud se tyto inerciální soustavu realizují jako navzájem rovnoměrně se pohybující soustavy v Newtonově absolutním prostoru či newtonovském prostoročasu. Jedna z neinvariantních předpovědí je např. isotropie šíření světla – světlo se podle Maxwellových rovnic šíří všemi směry stejnou rychlostí. Použitím standardního newtonovského skládání rychlostí okamžitě dostáváme, že vůči jiné soustavě se musí světlo pohybovat v různých směrech různě rychle.

V konfrontaci s touto neinvariantní povahou elektromagnetismu se předpokládalo, že Maxwellovy rovnice platí pouze vůči absolutnímu prostoru.¹⁸ Ve všech jiných inerciálních soustavách bychom měli používat transformované Maxwellovy rovnice, které dávají odlišné předpovědi. Asi nejznámější experiment, který se snažil nalézt, vůči které soustavě Maxwellovy rovnice platí (konkrétně, chtěl určit rychlost, kterou se pohybuje Země vzhledem k soustavě, v níž platí Maxwellovy rovnice) byl Michelsonův–Morleyho experiment provedený r. 1887. Výsledky tohoto a dalších experimentů však byly zcela překvapivé. Vypadalo to tak, že se světlo šíří isotropně stejnou rychlostí ve všech inerciálních soustavách.

Znamenalo to, že v teorii prostoru, času, pohybu a elektromagnetických jevů bylo potřeba něco změnit. A překvapivě se ukázalo, že změna se netýkala Maxwellových rovnic, ale struktury prostoru a času. Roku 1905 Albert Einstein publikuje *speciální teorii relativity*, v níž modifikuje newtonovské provázání prostoru a času. Přijímá isotropii a konstantnost rychlosti světla ve všech inerciálních soustavách za fakt a rozšiřuje platnost principu relativity inerciálních soustav na všechny jevy v přírodě. Těmto postulátům přizpůsobí transformační vztahy mezi různými inerciálními soustavami a dostává novou strukturu prostoru a času.

Výsledek se nejlépe vykládá v řeči prostoročasu. Prostoročas speciální teorie relativity se nazývá *Minkowského prostoročas*.¹⁹ Je tvořen opět událostmi a je tedy opět čtyřdimenzionální – má tři prostorové rozměry a jeden rozměr ve směru času. Základní rozdíl oproti newtonovskému prostoročasu však je ten, že neexistuje jeho kanonické rozštěpení na sekvenci nadploch současnosti. Každá inerciální soustava dává k dispozici svoji časovou souřadnici a tedy i své nadplochy současnosti – ty jsou však pro různé

¹⁸ Též se uvažovalo o jejich platnosti vůči éteru – jakémusi prostředí vyplňující prostor kolem nás. Tato alternativa byla dědictvím mechanistického chápání vlnění – dlouho převládal názor, že elektromagnetické vlnění musí být vlnění nějakého materiálu (podobně jako je zvuk vlnění vzduchu). Existence éteru též otvírala možnost, že by se éter mohl sám pohybovat vůči absolutnímu prostoru. Mohl by být např. strháván velkými tělesy – Země by si mohla nést svůj oblak éteru, který by určoval soustavu, v níž platí Maxwellovy rovnice.

¹⁹ Prostoročasový popis speciální teorie relativity zformuloval Hermann Minkowski tři roky po Einsteinovi.

inerciální soustavy různé. V našem světě totiž neexistuje jednoznačný pojem globální současnosti, současnost lze zavést pouze jako pomocný pojem při volbě soustavy.²⁰

Stejně jako v newtonovském prostoročase mají nadplochy současnosti euklidovskou geometrii. Z hlediska teorie pohybu je však nejdůležitější, že Minkowského prostoročas má opět inerciální strukturu. Formálně to znamená, že je v něm jasně definovaný pojem přímých linií, které opět identifikujeme se světočarami volných těles. Inerciální soustava je soustava tvořená přímými liniemi, tj. jedná se o soustavu realizovatelnou pomocí volných pozorovatelů.

Co se týče definice inerciální soustavy a rovnoměrného přímočarého pohybu se tedy speciální teorie relativity od newtonovského prostoročasu příliš neliší. Změnil se hlavně způsob měření času, který je nyní odlišný pro různé inerciální soustavy. A právě tato změna způsobuje, že Maxwellovy rovnice vypadají ve všech inerciálních soustavách stejně. Dávají tak předpověď isotropního šíření světla stejnou rychlostí ve všech inerciálních soustavách – což je přesně v souladu s experimentem.

Speciální teorie relativity zásadně mění naše porozumění provázání času a prostoru. Z hlediska pohybu je však v podstatě totožná s prostoročasovou formulací newtonovské fyziky. V prostoročase je apriorně dána inerciální struktura, která určuje pojem rovnoměrného přímočarého pohybu – základního pohybového stavu, jež realizují tělesa, na která nepůsobí žádné síly. Vnější působení pak způsobuje odklon pohybu od onoho základního stavu. Působení sil určuje zakřivení světočar.

Minkowského prostoročas již neuznává Newtonův absolutní prostor – jednu význačnou soustavu zadávající absolutní klid. Stále však obsahuje pojem neměnné apriorní inerciální struktury umožňující popis pohybu.

Obecná teorie relativity

Speciální teorie relativity je nekompatibilní s newtonovskou teorií gravitace a nenabízí pro ni ani jednoduchou alternativu. Speciální teorie relativity gravitaci ignoruje, opětovně zahrnutí gravitace do popisu totiž vede k zásadní změně v mnoha směrech. Dochází k němu až v *obecné teorii relativity*, kterou Einstein dokončuje roku 1915.

Ve snaze skloubit gravitaci s teorií relativity si Einstein uvědomuje speciální vlastnosti gravitace, které ji vydělují mezi ostatními interakcemi a umožňují ji popsat zcela odlišným způsobem. Gravitace je univerzální – účastní se jí každý druh hmoty. Zdrojem gravitace je hmotnost²¹ a ta je vždy kladná – gravitace má proto vždy přitažlivý charakter. S tím souvisí fakt, že gravitaci nelze odstínit.

Nejzvláštnější rys gravitace však spočívá v tom, že pasivní gravitační náboj – parametr udávající, jak je těleso na gravitaci citlivé – je také hmotnost, tedy veličina, která zároveň charakterizuje setrvačné vlastnosti. To má za důsledek, že s větší hmotností působí sice na těleso větší gravitační síla, zároveň však s větší hmotností je těleso schopno ji lépe odolávat. Výsledný efekt je ten, že gravitace způsobuje stejné zrychlení u všech těles, nezávisle na jejich hmotnosti.

²⁰ Toto je samozřejmě velmi neintuitivní výrok, odporující naší běžné zkušenosti. Naše bezprostřední zkušenost se ale zakládá na poznání velmi malé části světa. Vychází zejména z oblasti rychlostí mnohem menších, než je rychlost světla. Problémy s definicí současnosti nastávají ve chvíli, kdy pracujeme s rozměry a časovými úseky, pro které je podstatné, jak dlouho se světlo šíří z jednoho místa na druhé.

²¹ Přesněji řečeno, zdrojem gravitace v obecné teorii relativity je energie, hybnost, tok energie a tok hybnosti. Již podle speciální teorie relativity však je hmotnost ekvivalentní energii. Hybnost je pak vlastně tok energie. A tok hybnosti se dostává do hry z důvodů platnosti principu relativity lokálních inerciálních soustav.

Tento fakt byl samozřejmě známý už Newtonovi. Nicméně u Newtona hraje pouze roli zajímavé koincidence. Nevstupuje význačným způsobem do samotných fyzikálních zákonů. Einstein si však uvědomil, že tímto se gravitace podobá jinému druhu sil, se kterými jsme se již setkali – podobá se nepravým silám, které v newtonovské fyzice musíme zavést, pokud chceme svět popisovat v neinerciální soustavě.

Připomeňme, že nepravé síly vznikají jako oprava neinerciálnosti použité soustavy. Dostaneme je prostě přetransformováním jednoduchých zákonů platných v inerciální soustavě do soustavy, která se netriviálně pohybuje. V podstatě musíme do pohybové rovnice přidat členy se zrychlením, které je dáno pohybem soustavy. Tyto členy mají též univerzální charakter: „působí“ na všechnu hmotu, nelze je odstínit a způsobují stejný pohyb, nezávisle na hmotnosti – a to proto, že to jsou čistě opravné členy způsobené špatnou volbou soustavy.

Inspirován podobností s nepravými silami si Einstein položil otázku, zda i gravitace není nepravá síla. Zda to není pouze korekce na to, že si běžně volíme „špatnou“ soustavu. Navrhl považovat soustavu spojenou s povrchem Země za „neinerciální“. Pohybová rovnice vůči ní pak obsahuje korekční člen, který my nazýváme gravitací. Při takovéto interpretaci se však musíme ptát: Co je „správná“ inerciální soustava? V tradici zavedení inerciální struktury by to měla být soustava spojená s volnými tělesy, tj. s tělesy, na které nepůsobí síly. Pokud jsme však gravitaci vyloučili z rodiny pravých sil, v definici volného tělesa se gravitace nesmí vyskytovat. Volné těleso je tedy takové, na které nepůsobí síly, které umíme ovlivnit, které umíme vypnout, odstínit, vyrušit.

Volným tělesem tedy není horizontálně po ledu se pohybující puk (ani přibližně, při zanedbání tření) – působí na něj totiž síla podkladu a to ve vertikálním směru. Kdyby led na puk nepůsobil, pohyboval by se puk jinak – volně by padal. Volná tělesa jsou tedy *volně padající objekty*. V newtonovské fyzice by se volně padající tělesa za volná tělesa nekvalifikovala, protože by na ně podle Newtona působila gravitační síla. Podle Einsteina však gravitace není pravá síla a její působení se „nepočítá“.

Správnou inerciální soustavou tedy je soustava spojená s volně padajícími pozorovateli. Při přechodu do neinerciální soustavy spojené s povrchem Země musíme zavést opravnou nepravou sílu a tu nazveme gravitací.

Bohužel tato úvaha nefunguje dokonale. Lze ji udělat pouze lokálně, na malých rozměrech a pro malé časové úseky. Soustavu spojenou s volně padajícími pozorovateli totiž nelze definovat globálně, v celém prostoročase. Rozhodně ne tak, aby v ní šly zavést nadplochy současnosti s euklidovskou geometrií a aby byla tato soustava homogenní v čase. Volně padající pozorovatelé kolem Země se vůči sobě pohybují se zrychlením – nelze mezi nimi vybrat třídu pozorovatelů, kteří by se navzájem nepřibližovali a vůči nimž by se ostatní pohybovali rovnoměrně přímočaře. Nelze tedy očekávat podobnou rigidní inerciální strukturu, jakou jsme měli v newtonovském či Minkowského prostoročase.

Einstein však obětoval globálnost a rigidnost inerciální struktury, aby udržel lokální interpretaci gravitace jako nepravé síly. Výsledná podoba teorie je poměrně složitá a potřebuje pokročilou matematickou výbavu. Pokusíme se nastínit alespoň některé její kvalitativní rysy.

Obecná teorie relativity je opět budována v čtyřdimenzionálním prostoročase, který se skládá z událostí. V tomto prostoročase nemáme kanonické rozštěpení na prostor a čas, nicméně jedna třída směrů – těch časových – je odlišná od směrů zbývajících. Můžeme si sice zavést pomocné rozštěpení prostoročasu na sekvenci nadploch současnosti – třídimenzionálních prostorů – a obecná teorie relativity nám řekne, jak v těchto prostorech měřit vzdálenosti a jak rychle zde běží čas. Geometrie těchto prostorů již však

obecně není euklidovská, může se dokonce měnit bod od bodu. Stejně tak měření času nemusí být homogenní. Matematicky se toto vyjadřuje tak, že geometrie prostoročasu obecné teorie relativity je obecně zakřivená.

Časový a prostorový směr je nadále provázán inerciální strukturou. Ta se však také mění v závislosti na poloze v prostoročase. Inerciální struktura nám umožňuje říci, co jsou nejpřímější linie – tzv. geodetiky – v zakřiveném prostoročase. Ty budou opět popisovat světočáry volných těles.

Díky zakřivení prostoročasu mohou geodetiky, ač se jedná o nejpřímější linie, vypadat poměrně složitě. To by odpovídalo přítomnosti netriviálního gravitačního působení. Spolu s Einsteinem jsme totiž sice gravitaci prohlásili za nepravou sílu vzniklou jen transformací od inerciální soustavy, jelikož jsme ale umožnili, aby se pojem inerciální struktury měnil bod od bodu, můžeme netriviální gravitační působení zakódovat právě do proměnnosti inerciální struktury.

Například prostoročas naší sluneční soustavy popisujeme jako zakřivený. Nejpřímější světočáry v něm jsou jakési spirály navíjející se kolem centrální světočáry Slunce. Tento čtyřdimenzionální obrázek si překládáme jako obíhání těles kolem Slunce po (zhruba) eliptických orbitách. Planety tedy nejsou přitahovány ke Slunci gravitační silou. Podle obecné teorie relativity je gravitace zakódovaná do zakřivení prostoročasu a planety se v tomto zakřiveném prostoročase pohybují kolem Slunce po nejpřímějších světočarách.

Pokud může být prostoročas zakřivený, musíme samozřejmě též říci, *jak* má být zakřivený. A to určuje Einsteinův gravitační zákon. Ten říká, že zakřivení prostoročasu je dáno rozložením energie a hybnosti – čím hmotnější těleso, tím více prostoročas kolem sebe zakříví. Dominantním zdrojem zakřivení prostoročasu sluneční soustavy je Slunce, nejpodstatnější pokřivení prostoročasu u nás na Zemi způsobuje Země.

Vraťme se ale k popisu pohybu. Co se změnilo oproti speciální teorii relativity a co zůstalo stejné? I nadále máme prostoročas vybavený inerciální strukturou, která nám charakterizuje pohyb volných těles. Vůči ní máme pohybovou rovnici spojující síly se zrychlením tělesa (zakřivením jeho světočáry). Zásadní rozdíl však spočívá v tom, že inerciální struktura není apriorní, daná a neměnná. Naopak, stává se z ní dynamický objekt, který se mění v závislosti na poloze v prostoročase a pro který máme fyzikální zákon, jež ho spojuje s rozložením hmoty ve vesmíru. Navíc, tato struktura nese též informaci o gravitačním působení.

Okamžitě si uvědomíme podobnost s Machovými úvahami – a ne náhodou. Einstein explicitně oceňuje motivaci Machovým principem. Obecná teorie relativity vskutku vysvětluje setrvačné vlastnosti těles jako dynamický důsledek působení ostatní hmoty ve vesmíru. Rozložení hmoty určuje geometrii prostoročasu a to včetně pojmu přímých světočar, které charakterizují setrvačný pohyb volných těles. Změní-li se rozložení hmoty, změní se i setrvačné vlastnosti. V tomto směru je Machův princip jistě naplněn.

V jiných rysech se však obecná teorie relativity s Machem rozchází. Ukazuje se totiž, že Minkowského prostoročas speciální teorie relativity splňuje Einsteinův gravitační zákon v situaci, kdy není přítomna žádná hmota, která by prostoročas zakřivovala. Jak očekáváme, speciální teorie relativity je obecná teorie relativity bez gravitace. To ovšem znamená, že i v případě zcela prázdného vesmíru existuje v tomto vesmíru inerciální struktura, konkrétně globální homogenní inerciální struktura definující globální inerciální soustavu speciální teorie relativity. Podle Macha by však v prázdném vesmíru neměla mít tělesa žádné setrvačné vlastnosti. V tomto směru tedy obecná teorie relativity Machovu vizi nenaplnuje.

Obecná teorie relativity je tak zajímavý kompromis mezi newtonovským a machovským pojetím setrvačnosti. Stejně jako v newtonovském přístupu definujeme pohyb

volných těles jako přirozený pohyb vzhledem k inerciální struktuře. V duchu Machova principu je však tato inerciální struktura daná rozložením hmoty. Na rozdíl od Macha však inerciální struktura zůstává i při absenci hmoty. Jedná se o samostatnou entitu řídící se vlastními zákony. Tato struktura hraje roli prostředníka realizujícího Machovo působení na dálku.

Oproti speciální teorii relativity se do hry vrací gravitace. Na rozdíl od newtonovské fyziky se však nepopisuje jako síla, nýbrž její působení je zahrnuto přímo do geometrických vlastností prostoročasu. Gravitace se popisuje jako vlastnost prostoročasu. V daleko rafinovanější a složitější podobě se v tomto vracíme k aristotelovskému pojetí – gravitace je tak fundamentální, že je zahrnuta přímo do definice pojmů klid a přirozený pohyb. Na rozdíl od aristotelovského popisu však gravitační působení není apriorní, nýbrž je spojené s konkrétním rozložením hmoty.²²

²² Vzpomeňme si na Aristotelovu diskuzi, kam by padala tělesa, kdyby se Země přemístila na jiné místo. Kdyby Aristoteles navázal přirozené místo elementů ne na střed světa, ale na hmotu soustředěnou v Zemi, předběhl by na kvalitativní úrovni Einsteina o více než dvě tisíciletí.

Závěrem

Relativní a absolutní pohyb

Popis pohybu můžeme rozdělit podle několika kritérií. Jedno z hledisek je, vůči čemu pohyb odečítáme. Buď je pohyb vztahován k nějaké prostorové struktuře, k jakémusi geometrickému jevišti, na kterém se pohybují popisovaná tělesa. Nebo můžeme mluvit pouze o pohybu relativním, o pohybu jedněch těles vůči druhým. V tomto případě se podstatně potlačuje role geometrického pozadí – to pak neurčuje pojem klidu či přirozeného pohybu, ale nanejvýše umožňuje proměřovat vzdálenosti a tvary těles.

S relativním chápáním pohybu jsme se setkali u Descarta v jeho pozdní teorii pohybu. Descartes mluví o pohybu vůči prostředí vyplňující bezprostřední okolí tělesa. Toto prostředí však samo může konat složitý pohyb, jak to dokumentuje teorie planetárních vírů. S relativním popisem pohybu jsme se též setkali u Macha. Ten cíleně vytěšňuje roli absolutního prostoru či jiné struktury, vůči které bychom pohyb mohli odečítat, a na místo toho chce mluvit pouze o relativním pohybu těles. Fyzikální zákony by podle něj měly být formulované pouze v řeči relativních vzdáleností těles a jejich časových změn. Inerciální struktura určující setrvačné vlastnosti těles se objevuje až jako druhotná, jako jistá speciální volba vydělená konkrétním rozložením hmoty ve vesmíru. V prázdném vesmíru by taková struktura neexistovala.

Většinou se však popis pohybu ubíral po druhé linii – pohyb těles se odečítal vzhledem k nějaké geometrické struktuře. U Aristotela to byl přirozený pojem klidu spojený se světem jako takovým – lze zde absolutně říci, že Země je v klidu a nebeské sféry se točí. Lze říci, zda těleso stojí, či zda se pohybuje. V případě pohybu se pak musí jednat buď o pohyb přirozený, ve smyslu teorie čtyř elementů, či o pohyb způsobený silou.

Absolutní pojem klidu je velmi přirozený při geometrizaci prostoru. Pokud vnímáme prostor jako časově neměnný soubor bodů, dostáváme jako přídavek automaticky pojem klidu. Těleso, které setrvává stále ve stejném geometrickém bodě, se nepohybuje. Tato představa je natolik intuitivní, že často není ani explicitně zmiňována.

Poznamenejme ještě, že u Aristotela se vyskytuje ještě silnější struktura než jen nepohybující se prostor. Aristotelovský prostor je nehomogenní, ve vertikálním směru (tj. ve směru od středu vesmíru) si nejsou různé polohy rovnocenné. Každé těleso má svojí přirozenou polohu, na kterou se snaží dostat. Pokud není pod vlivem vnějšího působení, nejen že se přestane pohybovat, ale přestane se pohybovat na konkrétním místě. Tato nehomogenita popisuje gravitační působení. V horizontálním směru (ve směru povrchu Země) podobnou strukturu nemáme. Zde je prostor homogenní a určuje pouze, co znamená být v klidu.

Obdobný pojem klidu přetrvává i u Newtona ve formě absolutního prostoru – tentokrát již homogenního ve všech směrech. Stojí v pozadí celé mechaniky – vůči němu se formulují fyzikální zákony.

Experimentálně (alespoň co se týče mechanických experimentů) ale nelze absolutní prostor odlišit od ostatních inerciálních soustav. Proto se newtonovská fyzika může též přeformulovat do jazyka, kdy pozadím, vůči kterému určujeme pohyb, není absolutní prostor, ale inerciální struktura určující třídu inerciálních soustav. Matematicky to lze realizovat zavedením newtonovského prostoročasu, ve kterém je vydělen pojem přirozeného pohybu volných těles – pohybu přímočarého rovnoměrného vůči inerciální struktuře. Nemůžeme zde již mluvit o klidu, máme však stále význačnou třídu „triviálních pohybů“.

Tato struktura v podstatě nezměněná přetrvává i ve speciální teorii relativity. V obecné teorii relativity však dochází k zásadní změně. I nadále máme lokálně zadanou inerciální strukturu, která nám říká, co jsou rovnoměrně přímočaré pohyby. Tato struktura samotná se však stává dynamická. Stává se proměnná a ovlivnitelná a jsou pro ni zformulovány fyzikální zákony. Samotná geometrie prostoru a času, včetně inerciální struktury, která prostor a čas svazuje, je určena rozložením hmoty ve vesmíru. Jevišťe, vůči kterému pohyb odečítáme, se samo stává pohyblivé a určované hmotným obsahem, který se po něm pohybuje.

Charakter dynamiky

S absolutním chápáním pohybu a povahou onoho jeviště, vůči kterému se pohyb odečítá, úzce souvisí i charakter dynamiky. Jak jsme shrnuli v předchozích odstavcích, geometrická struktura v pozadí určuje, jak se chovají volná tělesa, tělesa, na která nic nepůsobí. A chování volných těles naopak slouží k identifikaci této struktury.

Působení na těleso se popisuje silami a pohybová odezva na působící síly je dána typem dynamiky. Aristotelovská fyzika je převážně dynamikou prvního řádu – síly jsou potřeba k tomu, aby těleso mělo nenulovou rychlost.²³ Newtonovská mechanika a její následovníci mají již dynamiku druhého řádu. Vnější síly určují zrychlení tělesa, na které působí. To samozřejmě rozšiřuje třídu pohybů volných těles a pomocí těchto pohybů již nelze identifikovat absolutní klid.

S typem dynamiky souvisí i to, co nazýváme pohybovým stavem tělesa. U dynamiky druhého řádu pohybový stav tělesa v daný okamžik není dán pouze polohou tělesa, nýbrž musí být specifikována i jeho rychlost. Zrychlení je pak určeno zadáním sil. U dynamiky prvního řádu je v jeden okamžik dostatečné zadat pouze polohu tělesa – jeho rychlost je již determinována působícími silami.

Gravitace

Gravitace je dominantní působení v pozemských systémech. Díky své univerzálnosti a dalekému dosahu pak hraje klíčovou roli v kosmologii. Mezi její speciální vlastnosti patří zejména její neodstítnost a nezávislost jejích účinků na hmotnosti tělesa, na které působí. Z těchto důvodů gravitace často vstupuje do dynamiky speciálním způsobem – může ovlivňovat, co se považuje za přirozený pohybový stav.

Připomeňme, že „přirozeným pohybem“ se pohybují volná tělesa. Pojem *volného tělesa* se však může v různých teoriích měnit. Vždy je to těleso, které je odstíněné od vnějších vlivů – nepůsobí na něj žádné síly. Může se ale měnit, co všechno mezi vnější působení započítáváme. Pokud se pokusíme pojem volného tělesa vydělit u Aristotela, asi bychom měli na mysli těleso konající pouze přirozený pohyb. Tj. těleso, které buď stojí, nebo se snaží dostat na své přirozené místo. Mezi síly tedy nezapočítáváme gravitaci – ta je díky teorii přirozeného místa zahrnuta již v charakteristice prostoru.

U Newtona se z gravitace stává typická síla. Jedná se o působení mezi tělesy, které ovlivňuje jejich trajektorii. Padající těleso se nepohybuje přirozeným pohybem, je pod vlivem gravitace a má tedy nenulové zrychlení vůči absolutnímu prostoru.

V obecné teorii relativity se však gravitace opět přesouvá mezi vlastnosti prostoročasu – popis gravitace je zahrnut v proměnnosti inerciální struktury. Volné těleso znamená volně padající těleso. Těleso, na které nepůsobí nic jiného, než čemu v newtonovském jazyku říkáme gravitační působení. I z toho je však zřejmé, že třída přirozených pohybů

²³ Jak jsme však diskutovali, aristotelovská fyzika obsahuje i rysy dynamiky nultého řádu v případě vertikálních pohybů a dynamiky druhého řádu u pohybu nebeských sfér.

realizovaných právě volnými tělesy již vůbec není jednoduchá. V okolí hmoty zakřivující prostorčas není jednoduché určit, co je přímočarý rovnoměrný pohyb, jak se budou pohybovat volná tělesa. Znamená to řešit úlohu vzájemného gravitačního působení těles.

Charakter popisu světa

Aristotelovská fyzika je kvalitativní. Je to vyprávění o tom, jak věci vypadají a jak si je můžeme vysvětlovat. Používá různé analogie a příběhy. Aspiruje na vysvětlování poměrně široké třídy jevů – od neživé přírody až k popisu zvířat a lidí. Její predikční schopnost je však poměrně nízká.

Novověká přírodověda si pole své působnosti zprvu výrazně zužuje – pouze na některé části neživé přírody. Zároveň je však kvantitativní a dosahuje úžasné predikční schopnosti. Dokáže namodelovat velmi úspěšně chování mnoha systémů. To jí posiluje sebevědomí natolik, že se odváží tvrdit, že našla skutečný mechanismus fungování základních stavebních kamenů přírody. Oslněna touto ambicí rozšiřuje opět svoji aplikovatelnost – alespoň v potenciálním smyslu. Je sice zřejmé, že vývoj složitých systémů nebudeme schopni spočítat rozkladem na základní elementy. Nicméně podle nového paradigmatu to alespoň v principu možné je a vývoj i složitých systémů je tak znalostí základních zákonů determinován.

Tato koncepce „velkého hodinového stroje světa“ u něhož již rozumíme, jak se otáčejí malá kolečka, se rozsykala až s fyzikálními revolucemi 20. století. Teorie relativity ukazuje, že newtonovský popis není konečný, že lze vylepšit a zpřesnit. Vylepšuje ho sice v podobném duchu, ve stejné linii uvažování. Ale jasně ukazuje, že Newtonovy zákony nejsou ty pravé zákony přírody.

Kvantová teorie mikrosvěta pak rozbíjí klasický popis přírody na daleko hlubší úrovni. Ustupuje od geometrizace světa a opouští klasický determinismus. Kodaňská a mnohé další interpretace kvantové teorie navíc rezignují na modelování přírody. Jejich cílem je pouze utřídovat a předpovídat výsledky experimentů. Kvantová teorie není již teorií světa kolem nás ale teorií našich znalostí o světě.

Moderní fyzika tak již neaspiruje na odhalování fundamentální teorie všeho,²⁴ která by rozkladem na elementární zákonitosti vysvětlovala – i když třeba jen v principu – všechny jevy okolo nás. Je zřejmé, že k podchycení komplexních jevů je potřeba zavést vždy odpovídající úroveň popisu. Popis na makroúrovni sice musí být konzistentní s popisem elementárnějších podsystémů, z ničeho však nevyplývá, že by měl být popisem podsystémů plně determinován. Popis komplexního systému musí zodpovídat otázky, které mají smysl pouze v kontextu takového systému. Na úrovni podsystémů mohou být tyto otázky irelevantní.

Oprostíme-li se tedy od metafyzického náboje, který získaly fyzikální teorie zejména v éře klasické mechaniky, můžeme zpětně porovnávat různé teorie pohybu jako metafyzicky rovnocenné popisy, které zachycují skutečnost na různé úrovni přesnosti. Některé z nich dávají lepší předpovědi, někdy je to však za cenu přílišné složitosti. V některých situacích jsou tyto teorie i chybné a je proto potřeba hledat hranice jejich

²⁴ Je nutno přiznat, že toto tvrzení nebude asi univerzálně přijímané. Jistě se nalezne mnoho špičkových fyziků, kteří o „teorii všeho“ mluví. Je si však potřeba vždy vyjasnit, co pod ní konkrétně myslí. Většinou se jedná o fyzikální teorii zastřešující základní interakce, teorii snažící se konzistentně a s minimálním počtem volných parametrů vysvětlit většinu jevů mikrosvěta na jedné straně a kosmologie na straně druhé. Nakolik by však tato elementární teorie determinovala i chování a hlavně popis komplexních systémů je zcela nejasné. Našlo by se však asi ale jen málo fyziků, kteří by sdíleli naivní víru klasické fyziky 19. století, že zákonitosti které zapisujeme v řeci rovnic třebas oné „teorie všeho“ jsou již ty pravé a konečné, podle kterých „skutečně funguje“ příroda.

použitelnosti. Zajímavé však je, že se během vývoje našeho pohledu na pohyb měnily i poměrně základní koncepce jeho popisu. Většinou však právě změna náhledu na samotné základy toho, jak chápeme pohyb, umožnila udělat další netriviální krok při hledání přesnější a obecnější teorie.

Z tohoto hlediska tedy nemá smysl hledat odpověď např. na otázku, zda je metafyzicky správnější a věrnější obraz newtonovského absolutního prostoru či machovský obraz relativních pohybů. Obě koncepce odrážejí náš svět na určité úrovni přesnosti a v určitém okruhu jevů. Machovská mechanika se dá zformulovat rigorózně a za určitých předpokladů o rozložení hmoty ve vesmíru lze ukázat její ekvivalenci s mechanikou newtonovskou při popisu pozemských nerelativistických pohybů. V tomto kontextu si jsou obě teorie rovnocenné. Rozšíření kontextu pak může jednu z těchto teorií preferovat. Jak jsme ale viděli na případě vztahu k obecné teorii relativity, širší teorie může navazovat plnohodnotně na obě jednodušší.

Nelze tedy jednu z těchto teorií pokládat za fundamentálnější. Obě splňují kritéria rozumné ověřené vědecké teorie. Přitom však používají odlišné pojmy. Ptát se, jak je to tedy s absolutním prostorem „doopravdy“ – zda *existuje* či *neexistuje* v nějakém hlubokém smyslu – nemá význam. Absolutní prostor je pojem newtonovské fyziky – jedné naší teorie pohybu. Teorie, která je funkční a úspěšně použitelná. Tím je pojem absolutního prostoru plně ospravedlněn. Nicméně k newtonovské mechanice obsahující absolutní prostor existuje ve stejném kontextu alternativa, machovská mechanika, která se bez absolutního prostoru obejde. Stejně tak absolutní prostor nepřežije (bez výrazných změn) ani rozšíření do obecné teorie relativity. To však nejsou důvody proč ho ztratit. Jen musíme rezignovat na to, že bychom v našich teoriích odhalovali již ty pravé kaménky ve stavbě světa. My pouze odhalujeme a pojmenováváme, jak se nám tyto kaménky jeví.