

MODERNÍ FYZIKA A ČAS

- **Время — одно из основных понятий повседневной жизни — представляет собою тоже одно из важнейших понятий философии и науки. В этой статье разъясняются физические аспекты проблем связанных с временем. Мы занимаемся проблемой измерения времени, определения одновремениности, и свойствами времени в общей теории относительности, астрофизике и космологии. В конце статьи уделится внимание вопросу направления времени и его связи с вторым началом термодинамики.**

Čas nás provází po celý život. „Čas plyne,“ říkáme a máme tím na mysli, že vjemy, obrazy událostí se v našem vědomí neustále řadí za sebou. Materialistická filosofie považuje čas za univerzální formu existence hmoty, kterou vědomí specifickým způsobem odráží. S pojmem času jsou těsně spojeny základní filosofické pojmy, jako bytí, dění, pohyb a příčinnost. Čas hraje významnou roli snad ve všech přírodních a společenských vědách. Pro další rozvoj věd je nezbytné seznamovat se s exaktními poznatky, které o čase přináší moderní fyzika. Tento článek podává informace o některých již dosažených výsledcích a o vznikajících problémech, i když zdaleka nemůže téma vyčerpat.

Prvým problémem, který musí fyzika řešit, je problém měření času. Abychom se orientovali v čase, dáváme co nejpřesněji definovaným a stále se opakujícím událostem úlohu očíslovaných značek. Těmito značkami mohou být průchody Slunce nad poledníkem, úder věžných hodin, tepy srdce či prostě vyslovovaná jména přirozených čísel. Každý takový způsob očíslování můžeme nazvat hodinami v širším smyslu slova. Každé „hodiny“ existují ovšem jen po určité době a vykonávají v ní jen konečný počet „tiků“. Domyslíme však vzájemný vztah mezi časem a čísly takovým způsobem, že předpokládáme existenci vzájemně jednoznačného přiřazení mezi množinou všech okamžiků v určitém místě a mezi množinou všech reálných čísel. Vztahu „dříve – později“ mezi událostmi pak odpovídá vztah „menší – větší“ mezi čísly. V tomto předpokladu je obsažena extrapolace i interpolace, která nemusí být přímo ověřena a jejíž oprávněnost může mít i své hranice. Její důsledky však umožňují užívat ke zkoumání změn veličin v čase mohutných prostředků matematické analýzy s úspěchem, který jí plně opravňuje.

Kterým hodinám však dát přednost? Jinými slovy, kdy považovat intervaly mezi dvěma údery hodin za stejné? Jaký přesný význam má srovnávání délky časo-

vých intervalů dokonce i mezi událostmi v různých dobách a na různých místech, srovnání, které běžně v praxi provádíme? Na tyto otázky fyzika v zásadě odpověděla již dávno. Různé přírodní děje – rotace Země, projevující se v zdánlivém pohybu hvězd na nebi, kyvy kyvadla, kmity pružiny či elektrického oscilátoru, biologické jevy jako je tep srdce, a dokonce i naše subjektivní vnímání času jeví při nezměněných vnějších podmínkách stejný rytmus. V tom se obráží platnost přírodních zákonů a kvantitativně určený čas je pak tím časem, v němž se matematické vyjádření přírodních zákonů nemění, tedy čas odpovídající symetrii přírodních zákonů. Možnost takovéto volby míry času je tedy vyjádřením objektivního poznatku o symetrii (časově neproměnnosti) přírodních zákonů a díky tomu právě tato volba dovoluje tyto zákony účinně zjišťovat a ověřovat.

„Ideální hodiny“ měřící čas přírodních zákonů nejprve představovala rotující Země. Tento tzv. astronomický čas se obráží i v donedávna ještě platné definici časové jednotky – sekundy. Moderní fyzika však umožňuje ideální hodiny realizovat s mnohonásobně větší přesností pomocí atomů vysílajících elektromagnetické záření jisté frekvence. Makroskopické mechanismy v závislosti na podmínkách, v nichž se nalézají, „stárnou“ a mění svůj chod. Na rozdíl od nich jsou částice mikrosvětla podrobeny principu totožnosti. Dva atomy v daném stavu nenesou na sobě žádnou stopu své minulosti a nemohou být nijak rozlišeny. Navíc diskrétnost stavů, vyplývající z kvantové teorie, umožňuje různé stavy jasně odlišit. Máme proto všechny důvody předpokládat, že údaje atomových hodin nejlépe odpovídají „ideálnímu času“. Současná technika umožňuje konstruovat atomové hodiny, jejichž chyba nepřesahuje sekundu za 100 000 let.

Problém měření času však ještě není vyčerpán. Je třeba dát přesný význam běžně užívanému tvrzení, že dvě události v různých místech nastaly současně. Zjevná omezení na definici současnosti kladou představy o příčinnosti. Kdybychom například považovali poledne v různých místech zeměkoule za současná, mohlo by dojít k tomu, že rozhlasová zpráva by byla „dříve“ přijata než vyslána. Jak ale určit současnost v rámci tohoto omezení? Běžný způsob určení – přenášení hodin – nám sice vyhovuje v běžném životě, ale u atomových hodin, které se mohou pohybovat velkými rychlostmi, by zklamal. Při rychlostech blízkých se rychlosti světla by údaj přenesených hodin závisel na rychlosti, s níž hodiny cestovaly. Doplněním požadavku, aby hodiny při synchronizaci cestovaly pomalu, si nepomůžeme. Vznikne totiž nová otázka: Vzhledem k čemu pomalu? A tak problém, co znamená současnost v různých místech, je nerozlučně spojen s problémem, co znamená být na stejném místě v různých dobách.

V praxi se užívá různých vztažných systémů, k nimž pak vztahujeme údaje o poloze. Příklady těchto systémů mohou být naše zeměkoule, plující loď či lidské tělo. Newton byl přesvědčen, že pohyby těles je třeba vztahovat k absolutnímu prostoru. Vzájemné vzdálenosti bodů tohoto prostoru zůstávají ne-

proměnné a řídí se eukleidskou geometrií. Spolu s absolutním prostorem postuloval Newton také existenci absolutního času, a tedy i absolutní současnosti. Vlastnosti „absolutního pohybu“ jsou pak charakterizovány zákonem setrvačnosti, podle něhož těleso nepodrobené silám koná rovnoměrný a přímočarý pohyb. Tuto vlastnost ovšem vykazuje pohyb ve všech vztažných systémech, které se vůči systému absolutnímu pohybují rovnoměrně a přímočaře. Takové systémy se nazývají inerciálními.

Newtonovská fyzika předpokládá okamžitě silové působení na dálku. Kdyby toto působení skutečně existovalo, dovolovalo by nám určit absolutní současnost. Tato absolutní současnost, společná všem vztažným systémům, byla až do začátku našeho století považována za něco samozřejmého. A. Einstein ji však za samozřejmou nepovažoval. Roku 1905 podal definici současnosti založenou na prosté a prakticky realizovatelné myšlence: Máme dvojce ideální hodiny, tvořící vztažné body inerciálního systému. Vyšleme z bodu A světelný signál do bodu B a odrazme jej zrcadlem zpět. Uplynula-li od vyslání do návratu signálu doba T na hodinách A, pak na hodinách B v okamžiku odražení signálu by měl být nastaven čas $T/2$ (jinými slovy tento okamžik prohlašujeme za současný s okamžikem $T/2$ na hodinách A).

Zdálo by se, že Einsteinova definice současnosti je správná jen v tom systému, kde se světlo šíří ve všech směrech stejnou rychlostí. Uvědomme si však, že rychlost je podíl vzdálenosti a času, a vzdálenost můžeme určovat teprve tehdy, když víme, co je to současnost. Je v souladu s Einsteinovou definicí měřit vzdálenost časem, který světlo (či jakékoli elektromagnetické záření) potřebuje k jeho proběhnutí. Takovým způsobem se dnes skutečně měří radiolokací vzdálenosti Měsíce a planet od Země. Pak stejná rychlost světla ve všech směrech je důsledkem definice, která pouze vyžaduje, aby rychlost světla nezávisela na jeho druhu ani na rychlosti jeho zdroje, jinak řečeno, aby „světlo nikdy nepředhánělo světla.“ Einsteinova definice odpovídá jistým symetriím přírody – zákony šíření světla (a elektromagnetických jevů vůbec) jsou při ní popsány stejně ve všech inerciálních systémech. Dosahujeme toho za tu cenu, že současnost už není absolutní; co je současné v jednom inerciálním systému, nemusí být současné v systému jiném.

Ale také zákony Newtonovy mechaniky jeví obdobnou symetrii vůči volbě inerciálního systému – ovšem jsou-li jevy sledovány v absolutním čase. Zdálo by se tedy, že je jen jeden systém, v němž absolutní současnost splývá se současností definovanou podle Einsteina – a pohyb vůči tomuto absolutnímu systému by měl být pokusy zjištělný. Tak také uvažovala na přelomu století většina fyziků; ti se dlouho nedovedli zbavit předsudku, že se jejich měřidla času a délky podrobují zákonům Newtonovské fyziky. Když pokusy nedávaly očekávané výsledky, snažili se to vysvětlit komplikovanými hypotézami. Einstein (a v poněkud méně kategorické formě i Poincaré) však došli k závěru, že symetrie elektromagnetických jevů je symetrií všech přírodních jevů, a že je

tedy nutno přebudovat zákony mechaniky, které v Newtonově formulaci platí jen přibližně. Tak vznikla speciální teorie relativity (1905).

Tato teorie se dnes již stala klasickou. Její chápání nečiní už po řadu let fyzikům žádné potíže. Byla potvrzena nejen velkým množstvím přímých pokusů, ale i tím, že na jejích základech se rozvinuly další úspěšné teorie. Tyto základy musí ovšem ovládnout a pochopit každý, kdo chce o fyzikálních aspektech času uvažovat na úrovni našeho století. Některé důsledky teorie se ale i dnes mohou zdát laikovi podivné. Je to zejména proslulý „paradox hodin“, spočívající v tom, že na hodinách nalézajících se v klidu v inerciálním systému uplyne vždy větší čas než na hodinách, které mají stejné místo startu a cíle, ale mezitím „cestovaly“. Toto tvrzení není pro fyzika o nic více „paradoxní“ a „přičífcí se rozumu“ než věta, že přepaova trojúhelníka je kratší než součet délek jeho odvěsen. Je navíc dostatečně ověřeno zejména pozorováním dob života pohybujících se nestabilních částic. Námítky, i dnes ještě někdy publikované, jsou zpravidla založeny na omylu či nepochopení autora.

Setkáváme se též s pochybnostmi, zda se těmto zákonitostem podrobují i biologické jevy, o zda tedy kosmonaut bude po návratu z dlouhé a rychlé cesty mladší než jeho současníci, kteří zůstali na Zemi. I bez detailních znalostí biologie nevidí fyzik žádné důvody, proč by se biologický čas neměl podřizovat symetriím fyzikálního času. Ovšemže na stárnutí kosmonauta v raketě mohou mít vliv faktory tuto symetrii narušující: velká zrychlení při startu, nepřítomnost gravitačního pole během letu, jiná úroveň radiace i odlišná psychologická situace. Není však pochyby o tom, že vyspělá technika, která by dokázala připravit mezihvězdný let, by dovedla snížit vliv těchto faktorů na minimum. Obtíž je spíše v tom, že táž teorie relativity, která nám otevírá lákavou vyhlídku „cest do budoucnosti“, nám ji zase sama poněkud zahaluje. K dosažení potřebných rychlostí je třeba dodání energie o ta podle ní roste mnohem prudceji než podle klasické mechaniky. Energie potřebná k dosažení rychlosti světla vzrůstá nad všechny meze.

To je jeden z důvodů pro přesvědčení, že rychlost světla je nepřekročitelnou mezí pro pohyb hmoty i signálů předávajících informaci. Druhý důvod spočívá v tom, že při pohybech nadsvětelnou rychlostí by se staly relativními i pojmy „dříve“ a „později“ a to by bylo v rozporu s naším chápáním příčinnosti. V posledním desetiletí fyzikové přestali tyto důvody pokládat za postačující. Problém existence tachyonů (částic rychlejších než světlo) však přesahuje rozsah našeho článku.

Nezůstalo ovšem při speciální teorii relativity. Náš příklad s trojúhelníkem nebyl jen formální analogií. Výzkumy Minkowského (1908) ukázaly, že vztahy speciální teorie relativity lze chápat jako důsledek čtyřrozměrné geometrie prostoročasu. Zatímco klasická fyzika rozlišovala dva nezávislé pojmy – dobu mezi dvěma událostmi a vzdálenost mezi dvěma místy, v teorii relativity je jen jeden druh vzdálenosti – interval. Projevilo se to už na místě, kde jsme uvedli, že „prosto-

rově" vzdálenosti lze měřit pomocí doby, kterou světlo potřebuje k jejich proběhnutí. Pohyb odpovídá v čtyřrozměrné geometrii křivce určitého typu, rovnoměrně a přímočarě pohyby těles nepodrobených silám jsou „přímkami“ této geometrie. Délka takovéto křivky – to je právě čas měřený ideálními hodinami. Může být ovšem překvapivé, že „časová“ přímka čtyřrozměrné geometrie je nejdelsí, a nikoliv nejkratší spojnicí dvou bodů (to je onen paradox hodin). To je způsobeno odlišností geometrie Minkowského od geometrie eukleidovské. Třírozměrná eukleidovská geometrie prostoru je ovšem „součástí“ geometrie Minkowského.

Nyní se přirozeně nabízí myšlenka, která by mimo rámec geometrie nemohla být vůbec formulována. Nemůže být prostoročas zakřiven? Pojem délky křivky – tedy měření času – přitom neztrácí svůj význam, jako neztrácí význam měření délky čáry na zakřiveném povrchu koule. Přímky však budou nahrazeny čarami extrémní délky, tzv. geodetikami. Einstein dospěl k závěru (1916), že zakřivení prostoročasu je právě to, co nazýváme gravitací. Tělesa, na něž působí pouze gravitace, se pohybují po geodetikách, čímž je objasněn podivuhodný fakt, že všechna tělesa padají v gravitačním poli se stejným zrychlením. Prostoročas je zakřívován tělesy a fyzikálními poli, která se v něm nacházejí. Souvislost mezi energií a impulsem těchto těles a polí a mezi zakřivením geometrie udávají Einsteinovy rovnice. Na nich založená teorie prostoru, času a gravitace se nazývá obecnou teorií relativity. I když tato teorie není tak bohatě podepřena experimenty jako teorie speciální, její základní myšlenka, myšlenka dialektického vztahu mezi prostoročasem a hmotou, je přijímána všeobecně.

A zde se již dostáváme na současnou úroveň problémů. Z čistě matematického hlediska nabízí čtyřrozměrná zakřivená geometrie možnosti hodně fantastického románu. Uveďme příklady – „časová smyčka“ (časová křivka se protínají samy se sebou), „velký výbuch“ (všechny časové křivky vycházejí z jediného bodu), „černá díra“ (žádná časová křivka vcházející do určité oblasti už nevychází ven). Všechny tyto neobvyklosti je třeba klasifikovat, zda je musíme vyloučit či zda aspoň některým z nich odpovídá něco reálného. Je to vděčné pole pro další spolupráci matematiky s fyzikou.

Zdálo by se ovšem, že jde o značně umělé problémy. Tak také do nedávna smýšlela většina fyziků; v počáteční fázi rozvoje teorie relativity se jim jevily tyto příklady jako něco „patologického“. Ve světle nových objevů však tento postoj není již možný. Uveďme například objevy v kosmologii. Stavební prvky vesmíru, galaxie, jsou podle nich rozloženy alespoň přibližně homogenně a izotropně, přičemž jejich vzájemná vzdálenost se stále zvětšuje. Galaxie tedy realizují jakýsi privilegovaný vztahový systém, a čas, měřený vzhledem k tomuto systému, je kosmický čas, v němž můžeme sledovat vývoj vesmíru. V té fázi vývoje, v níž se nyní s naší galaxií nacházíme, probíhají ovšem kosmické změny mnohem pomaleji než běžné přírodní děje, takže kosmický čas nemá smysl určovat ani s přesností na milióny let. Pozorování i teorie však napovídají, že v minulosti

tomu bylo jinak – rozpínající se kosmická hmota byla asi před deseti miliardami let v neobyčejně zhuštěném stavu a rozpínala se tak rychle, že se stav vesmíru měnil doslova za zlomky sekund. Přirozeně to, o čem mluvíme, má při dnešní úrovni poznání charakter hypotézy. Kdo může vyloučit, že čas fakticky není do nekonečna dělitelný jako interval reálných čísel a že právě v podmínkách obrovské křivosti geometrie a velkého nahuštění hmoty, kde i činnost atomových hodin selhává, se projeví výrazně jeho diskrétní struktura? Takovéto problémy už nemohou být řešeny bez využití myšlenek kvantové teorie.

Obdobné problémy vznikají také v astrofyzice. Podle jejich teorií dostatečně masivní hvězdy se po vyhoření jaderného paliva musejí nezadržitelně zhroutit. Problém „konce hvězdy“ připomíná – v lokálním měřítku – problém „počátku vesmíru“. Je tu však ještě další zajímavý jev: okolo středu zhroutené hvězdy se vytváří oblast, z níž hmota, a dokonce ani světlo nemůže uniknout do vnějšího prostoru, tj. hvězda se stává „černou dírou“. Pozorování z poslední doby napovídají, že složky některých dvojhvězd jsou patrně černými dírami.

Na závěr jsme si ponechali problém nejtěžší a přitom snad nejlépe vztušující. Všechny fyzikální teorie, jichž jsme se v předchozím dotkli, klasická i kvantová mechanika, speciální i obecná teorie relativity, si kladou za úkol najít rovnice popisující chování hmoty v prostoru a čase (obecná relativita popisuje také vliv rozložení hmoty na prostor a čas). Tyto rovnice pak dovolují ze známého stavu v jednom čase vypočítat stav v čase jiném, tedy budoucí stav je podle nich určován stavem přítomným a přítomný opět stavem minulým (ponecháme-li stranou komplikace, které by mohla přinést složitá geometrie v obecné teorii relativity). Z tohoto hlediska však přítomnost nemá žádný zvláštní význam, „počáteční podmínky“ rovnic by se stejným úspěchem mohly být zjištěny v kterémkoliv okamžiku.

Ať už jsou úspěchy zmíněných rovnic jakkoliv veliké, přece jen uvedené závěry domyšleny do důsledků jsou v rozporu s lidskou praxí. V ní vycházíme z představ přítomnosti jako posuvné hrany, jež svým pohybem neustále ubírá budoucnosti a mění ji v narůstající minulost. Minulost nemůže již být změněna, můžeme si ji však zapamatovat, poznávat ji a svého poznání využívat k ovlivňování budoucnosti.

Zmíněný rozpor mezi lidským vnímáním světa a jeho striktně deterministickým popisem v rámci fyzikálních teorií nemůže fyzika sama o sobě úplně vysvětlit. Dovoluje nám však hlouběji do něho vniknout, zejména v dílčí otázce směru času. Je známo, že tvar základních rovnic popisujících přírodní děje se nemění záměnou směru času. (Výjimku patrně tvoří některé nedávno zjištěné jevy na atomové úrovni – tzv. narušení T-invariance; jejich vliv na makroskopické děje lze však považovat za zanedbatelný.) Pozorovatel, jemuž je promítán pozpátku záznam přírodních dějů, konstatuje, že tyto děje přírodním zákonům neodporují. Toto tvrzení se zdá být v rozporu se skutečností. Většina dějů, které na filmu pozorujeme, je přece v přírodě naprosto nemožná. Říkáme, že to jsou děje ne-

vratné. Představme si třeba místnost vyplněnou kouřem, z níž otevřeme dveře do sousedního pokoje. Kouř se po chvíli rovnoměrně rozptýlí po obou místnostech. Nikdo však ještě neviděl, že by se rozptýlený kouř sám od sebe koncentroval v jedné místnosti. Přitom rozptylování kouře se děje prostřednictvím srážek molekul a každá z nich sama o sobě je dějem vratným. Ale nejen děje na naší Zemi, například i hoření hvězd se vyznačuje touto nevratností. Chování hmotných systémů je podrobeno dvěma principům termodynamiky. První z nich je zákon zachování energie; ten těsně souvisí s neměnností fyzikálních zákonů v čase. Děje na filmovém pásu pozpátku promítaném tomuto zákonu ovšem neodporují. Jinak je tomu s druhým principem – principem růstu entropie. Nevratné děje se vyznačují tím, že při nich entropie roste. Naopak směr času od minulosti k budoucnosti lze definovat jako směr růstu entropie. Význam entropie osvětlila statistická fyzika. Předpokládejme, že daný stav systému lze uskutečnit mnoha stejně pravděpodobnými způsoby. Pak entropie je logaritmus počtu těchto způsobů (takže je-li počet způsobů pro složený systém roven součinu počtu způsobů pro jeho části, entropie je podle známé matematické poučky rovna součtu). Stav, který lze uskutečnit větším počtem způsobů, je pravděpodobnější, zákon růstu entropie tedy říká, že systém přechází do pravděpodobnějšího, a tedy méně uspořádaného stavu. Koncentrace kouře, popsaná v minulém odstavci, není absolutně vyloučena, je však tak vysoce nepravděpodobná, že se odehraje jednou za dobu přesahující trvání naší galaxie.

Vzniká tak nová otázka: Jeli stav s největší entropií nejpravděpodobnější, proč je mu námi pozorovaná část vesmíru tak vzdálena? Je snad tato část jen místní odchylkou (fluktuací) na pozadí vesmíru s maximální entropií? Nastane stav s maximální entropií v budoucnu? Vždy byly především vyslovovány pochybnosti, zda principy termodynamiky lze aplikovat na celý vesmír. Dříve se namítalo, že tyto principy ztrácejí smysl díky nekonečnosti vesmíru. Dnes, kdy nejsme o nekonečnosti vesmíru (ve smyslu objemu či počtu atomů v něm) přesvědčeni, soudí se, že tyto principy pozbývají smyslu, započítává-li se do systému i jeho vlastní gravitační pole. Může existovat souvislost mezi nevratným vývojem vesmíru jako celku (jeho rozpínání), který zabraňuje nastolení rovnováhy, a mezi zákonem růstu entropie. Sovětští fyzikové Landau a Lifšic pak vidí původ zákona růstu entropie v kvantové fyzice; její zákony sice směr času neurčují, ale mohou být nalezeny jedině pomocí nevratného procesu měření. Sami však konstatují, že zmíněná souvislost není ještě hlouběji pochopena. Vidíme tedy, že mnohé z otázek, které si moderní fyzika v souvislosti s časem klade, mají ještě daleko k odpovědím. Srovnáváme-li však, jak vzrostly naše vědomosti o těchto problémech zejména od konce minulého století, musíme se obdivovat pokroku, jehož bylo za tu dobu dosaženo a závidět našim potomkům, kteří budou vědět daleko více než my.



Láčková (Nepenthes)

Literatura

- Filosofské problémy teorii tĳagotenija Ejnštejna i reljativistskoj kosmologii, Naukova Dumka, Kijev 1965 (sborník);
 Vremja i sovremennaja fizika, Mir, Moskva 1970
 Vremja i sovremennaja fizika, Mir, Moskva 1970 (sborník, překlad z francouzštiny);
 L. D. Landau, E. M. Lifšic: Statističeskaja fizika, Nauka, Moskva 1964.