

Naše soudobé poznatky o pohybu těles vycházejí z myšlenek Galileiho a Newtonových. Před nimi převažoval Aristotelův názor, který tvrdil, že přirozeným stavem všech těles je klid a že se tělesa pohybují pouze tehdy, jsou-li k tomu nucena působením nějaké síly. Podle Aristotelovy teorie by těžká tělesa měla padat rychleji, než padají tělesa lehká, protože jsou k zemi více přitahována.

Aristotelovi žáci zastávali názor, že člověk je schopen odhalit veškeré přírodní zákony ryzím uvažováním, že se obejde bez neustálého prověřování cestou experimentu a pozorování. A tak nikdo příliš nezkoumal, jak to s různě těžkými padajícími tělesy je ve skutečnosti. Až Galilei. Traduje se, že dokázal neplatnost Aristotelova pojetí mechanického pohybu, když pozoroval závaží padající z nakloněné věže v italské Pise. Historika je to téměř jistě nepravdivá, nicméně Galilei provedl rovnocenný pokus: pouštěl různě těžké koule dolů po nakloněné rovině. V takto uspořádaném pokusu jsou měření snazší a přesnější, protože rychlosti těles vzrůstají pomaleji než při volném pádu. Galileiho měření ukázala, že gravitační zrychlení všech těles je stejné a vůbec nezávisí na jejich váze. Upustíme-li olovené závaží, bude pochopitelně padat rychleji než lehké pírkó. Za to ovšem může odpor vzduchu, který brzdí peří více než závaží. Je-li odpor vzduchu proti pohybu nepatrný, jako je tomu například u těžkých závaží, padají tělesa se stejným zrychlením.

Výsledky Galileiho výzkumů využil Newton při formulaci nových zákonů pohybu. V Galileiho pokusech byla tělesa kutálející se dolů ze svahu postrkována silou stálé velikosti (jejich vahou), a v důsledku toho bylo i jejich zrychlení konstantní. To ukazovalo, že působící síla mění rychlost tělesa, a ne že ho pouze udržuje v pohybu, jak se dříve myslelo. Zároveň to také znamenalo, že když síla přestane působit, těleso se bude dále pohybovat v přímém směru neměnnou rychlostí. Tato myšlenka byla poprvé jednoznačně formulována v *Principiích* z roku 1687 a je známa jako Newtonův první zákon. Druhý Newtonův zákon se zabývá tím, co se stane, začne-li síla působit. Tvrdí, že se těleso bude urychlovat neboli měnit svou rychlost v míře úměrné působící síle. Kupříkladu zrychlení vyvolané dvojnásobnou silou bude dvojnásobné. Zrychlení je tím menší, čím větší je množství hmoty (neboli hmotnost) tělesa; stejnou silou působící na těleso o dvojnásobné hmotnosti dosáhneme pouze polovičního zrychlení. Všem je jistě zřejmý následující příklad ze současnosti: čím silnější motor pohání automobil, tím většího zrychlení docílí; pro určitý typ motoru však bude zrychlení tolikrát menší, kolikrát je vůz těžší.

Kromě pohybových zákonů objevil Newton také zákon gravitační. Podle něho je každé těleso přitahováno všemi okolními tělesy silami úměrnými jejich hmotnostem. Síla mezi dvěma tělesy se tedy zdvojnásobí, zdvojnásobí-li se hmotnost jednoho z nich (označme je těleso A). To je velmi přirozené, protože nové těleso A si můžeme představit jako složené ze dvou částí s původní hmotností. Každá z nich přitahuje druhé těleso (B) určitou silou a výsledná síla mezi A a B je tedy dvojnásobná ve srovnání se silou původní. Jestliže hmotnost prvního tělesa zvětšíme například dvojnásobně a hmotnost druhého tělesa ztrojnásobíme, bude výsledná síla šestinásobná. Teď tedy už víme, proč všechna

tělesa padají se stejným zrychlením: těleso o dvojnásobné váze bude přitahováno k Zemi dvojnásobnou silou, je-li také jeho hmotnost je dvojnásobná. Podle Newtonových zákonů se oba vlivy navzájem přesně zruší, takže zrychlení je ve všech případech stejné.

Newton dále tvrdí, že síla mezi tělesy klesá s jejich vzdáleností. Přitažlivost hvězdy bude čtvrtinová oproti přitažlivosti podobné hvězdy, která se nachází pouze v poloviční vzdálenosti. Tento gravitační zákon předpovídá dráhy Země, Měsíce a planet s pozoruhodně vysokou přesností. Kdyby přitažlivá síla klesala se vzdáleností rychleji, než je tomu v Newtonově zákonu, dráhy planet by nebyly eliptické. Pokud by naopak klesala příliš pomalu, gravitační síly vzdálených hvězd by převládly nad přitažlivostí Slunce.

Snad nejvýrazněji dělí Aristotelovy myšlenky od Galileiho a Newtonových předpoklad o tom, že existuje stav klidu, k němuž směřují všechna tělesa, pokud na ně nepůsobí žádná síla. Aristoteles se domníval, že celá Země je ve stavu klidu. Naproti tomu podle Newtonovy teorie takový klidový stav neexistuje. Vzájemný pohyb dvou objektů lze popsat tak, že těleso A setrvává v klidu, zatímco B se pohybuje stálou rychlostí vůči A, i obráceně, že B je v klidu a pohybuje se A. Obě tvrzení jsou stejně pravdivá. Jestliže si na okamžik odmyslíme zemskou rotaci a oběh kolem Slunce, můžeme říci, že Země je v klidu a jedoucí vlak se po ní pohybuje k severu. Ale také lze říci, že vlak stojí a Země se pohybuje stokilometrovou rychlostí jižním směrem. Vykonáme-li různé pokusy s pohybujícími se objekty, zjistíme, že matematická podoba Newtonových zákonů je stejná jak na povrchu Země, tak i ve vlaku. Zahrajeme-li si kupříkladu během jízdy ping-pong, bude se míček pohybovat po stejných drahách jako na stole stojícím vedle tratí. Není možné rozhodnout, zda je to vlak či Země, co se pohybuje.

Jestliže stav absolutního klidu neexistuje, nelze stanovit, zda se dvě události, ke kterým došlo v různých časových okamžicích, odehrály na jednom místě prostoru, či zda nastaly v různých polohách. Náš pingpongový míček, který poskočí nahoru a dolů na stole ve vlaku, se dotkne povrchu stolu – viděno pozorovatelem stojícím u trati – v místech vzdálených od sebe několik desítek metrů, protože se vlak i se stolem mezi jednotlivými dopady míče posunul. Proto není možné určit absolutní polohu v prostoru. Rozmístění událostí a vzdálenosti mezi nimi se pro různé pozorovatele liší a není důvodu některého z nich upřednostňovat.

Newtona tento protiklad obzvláště znepokojoval, protože mu nešel dohromady s jeho pojetím absolutního Boha. Nakonec se rozhodl pojem absolutního prostoru nepřijmout, ačkoli k jeho zavedení Newtonova teorie přímo vybízí. Za tento nelogický krok byl mnoha lidmi tvrdě kritizován. Zmíňme se alespoň o biskupu Georgi Berkleyem, filozofovi, který věřil, že veškeré objekty, prostor i čas, nejsou ničím více než pouhou iluzí. (Když se však slavný dr. Samuel Johnson dozvěděl o Berkleyho názoru, zvolal: „To lehce vyvrátím!“ A vši silou kopnul palcem do velkého kamene...)

Jak Aristoteles, tak i Newton věřili v absolutní čas. Jinými slovy, domnívali se, že lze jednoznačně určit časový interval mezi dvěma událostmi a že tato doba je stejná pro všechny pozorovatele, pokud mají své hodiny v pořádku. Čas byl od prostoru zcela oddělen a jejich naprostá nezávislost souhlasila s nejrozšířenějším názorem na vzájemný vztah prostoru a času. Avšak tento názor jsme museli odvrhnout. Vede sice k uspokojujícím výsledkům, pokud se zajímáme o padající jablka nebo planety, které se pohybují z astronomického hlediska nepatrnými rychlostmi, ale nevyhovuje u těles letících rychlostí blízkou rychlosti světla.

Skutečnost, že se světlo šíří konečnou, i když velmi vysokou rychlostí, odhalil roku 1676 Ole Christensen Römer. Tento dánský astronom si ke svým měřením zvolil Jupiterovy měsíce, protože jejich pohyb lze v dalekohledu dobře sledovat. Römer zaznamenával časové okamžiky, kdy měsíce zakrývala jejich mateřská planeta. Přestože měsíce obíhají kolem Jupitera po stálých drahách, Römer zjistil, že intervaly mezi zákryty se mění. Brzy si uvědomil, že příčinou zjištěných nepravidelností je oběžný pohyb Země a Jupitera kolem Slunce. Prodlěvy mezi zákryty narůstají v době, kdy se obě planety od sebe vzdalují (dráha, kterou musí světlo od Jupitera k Zemi proletět, se zvětšuje), a naopak jsou stále kratší, když se planety přibližují (dráha se zkracuje). Römer správně rozpoznal, že tento jev souvisí s konečnou rychlostí světla, a na základě svých nepřilíš přesných měření odhadl její velikost na 225 000 kilometrů za sekundu. Dnešní přesnější měření dávají hodnotu asi 300 000 kilometrů za sekundu. Römerův důkaz konečné rychlosti světla a měření, která vykonal jedenáct let před vydáním Newtonových *Principií*, byly ve své době vskutku pozoruhodným výsledkem. Na zrod životaschopné teorie, popisující šíření světelných signálů, však bylo třeba ještě počkat.

Teprve roku 1865 se britskému fyzikovi Jamesi Clerku Maxwellovi podařilo sjednotit částečné teorie, používané do té doby k popisu sil elektrických a magnetických. Maxwellovy rovnice předpovídají, že se prostorem mohou šířit určité poruchy spojeného elektromagnetického pole, podobné vlnkám na hladině rybníku. Rovnice také ukazují, že rychlost pohybu těchto vln je neměnná. Je-li vlnová délka (vzdálenost mezi hřebeny sousedních vln) větší než asi jeden metr, jeví se nám jako rádiové vlny. Kratší vlny známe jako mikrovlny (jejich vlnová délka je několik centimetrů) nebo infračervené záření (kolem tisícin centimetru). Viditelné

světlo má vlnovou délku mezi čtyřiceti a osmdesáti miliontými centimetru. Ještě kratší vlnovou délku má ultrafialové záření, rentgenové záření (paprsky X) a záření gama.

Maxwellova teorie tedy tvrdí, že by se rádiové i světelné vlny měly šířit určitou stálou rychlostí. Ale Newtonova teorie opustila myšlenku absolutního klidu, takže bychom měli říci, k čemu tuto konstantní rychlost vztahovat. Zdálo se, že jediným možným řešením je předpoklad o existenci substance nazývané éter, přítomné všude – i v „prázdném“ prostoru. Světlo se podle této hypotézy šíří éterem tak, jako se zvuk šíří vzduchem. Rychlost světla bychom tedy měli určovat vzhledem k éteru. Pozorovatelé, kteří se sami v éteru pohybují, by naměřili nejrůznější rychlosti světla vzhledem k sobě, ale vůči éteru by světelná rychlost zůstávala neměnná. Tak například pohyb Země kolem Slunce způsobí, že rychlost světla od zdroje ležícího ve směru zemského pohybu (tedy když se ke zdroji přibližujeme) by měla být vyšší než rychlost měřená v kolmém směru. Roku 1887 provedl Albert Michelson (pozdější první americký nositel Nobelovy ceny) a Edward Morley v Caseově škole užitě vědy v Clevelandu velmi pečlivý experiment. Porovnali při něm rychlosti světla v obou směrech a k velikému údivu vědeckého světa zjistili, že jsou stejné.

Mezi lety 1887 a 1905 bylo učiněno několik pokusů, zejména dánským fyzikem Hendrikem Lorentzem, vysvětlit výsledek Michelsonova-Morleyho experimentu na základě předpokladu o zkracování objektů a zpomalování hodin pohybujících se éterem. Avšak roku 1905 ukázal Albert Einstein, do té doby vcelku neznámý zaměstnanec švýcarského patentového úřadu, že zavádění éteru není nezbytné, pokud se vzdáme myšlenky absolutního času. K podobnému výsledku dospěl o několik týdnů později slavný francouzský matematik Henri Poincaré. Einsteinovy

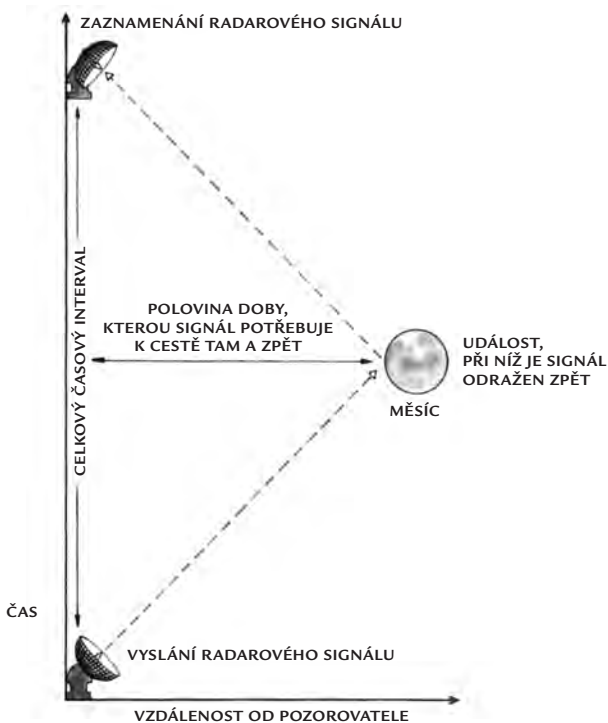
argumenty však měly blíže k fyzice, neboť Poincaré přistupoval k problému především z pozice matematika. Proto je Einsteinovi přiznávána hlavní zásluha za vytvoření nové teorie – speciální teorie relativity –, k níž ovšem Poincaré značným dílem rovněž přispěl.

Základem Einsteinovy teorie je požadavek, aby zákony vědy byly stejné pro všechny volně se pohybující pozorovatele, ať se pohybují jakoukoli rychlostí. Tento požadavek splňovala již teorie Newtonova, avšak nyní byl rozšířen i na Maxwellovu teorii pro jevy elektromagnetické povahy včetně tvrzení o neměnné světelné rychlosti: všichni pozorovatelé naměří ve vzduchoprázdnu stejnou rychlost světla, nezávisle na svém vlastním pohybu. Z této nesložitě myšlenky lze matematickou cestou odvodit pozoruhodné důsledky. Snad nejproslulejším z nich je ekvivalence hmoty a energie, vyjádřená slavnou Einsteinovou rovnicí $E=mc^2$ (v níž E značí množství energie, m hmotnost tělesa, c rychlost světla), a tvrzení, že se žádný fyzikální objekt nemůže pohybovat rychleji než světlo. Z ekvivalence mezi hmotou a energií můžeme dále dovodit, že pohybová energie tělesa, související s jeho přemísťováním, mu přidává na hmotnosti. Jinými slovy, čím vyšší je rychlost objektu, tím obtížnější je jeho další urychlování. Tento jev je významný pouze u těles letících rychlostí téměř světelnou. Tak kupříkladu rychlost o velikosti deseti procent rychlosti světla (30 000 kilometrů za sekundu) zvýší hmotnost tělesa o pouhou jednu polovinu procenta. Ale při devadesáti procentech rychlosti světla se už hmotnost více než zdvojnásobí. S dalším urychlováním narůstá hmotnost stále rychleji, takže zvyšování rychlosti stojí více a více energie. Světelné rychlosti nemůže dosáhnout žádný objekt, protože v tom okamžiku by se jeho hmotnost stala nekonečně velikou a – podle zákona ekvivalence – museli bychom mu dodat nekonečné množství energie. A tak

teorie relativity předpovídá, že se všechny objekty musejí pohybovat podsvětelnou rychlostí. Pouze světlo samo, které nemá svou vnitřní hmotnost, se šíří světelnou rychlostí.

Neméně pozoruhodným výsledkem teorie relativity je způsob, jakým změnila naše představy o prostoru a času. Vyšleme-li světelný záblesk z jednoho místa na jiné, pak podle Newtonovy teorie se všichni pozorovatelé shodnou na době, kterou světlo ke své cestě potřebovalo (čas je absolutní), ale nemusí se vždy shodnout na vzdálenosti, již světlo urazilo (prostor absolutní není). Protože rychlost světla je rovna vzdálenosti, kterou světelný signál proletěl, dělené potřebným časovým intervalem, různí pozorovatelé by měli zjistit různé hodnoty světelné rychlosti. Naproti tomu podle relativity pozorovatelé musí přistoupit na jednu hodnotu rychlosti světla. Ovšem vzdálenost, kterou světlo urazilo, a čas, jehož k tomu bylo třeba, souhlasit nemusí. Vždyť potřebná časová prodleva se rovná právě rychlosti světla – a ta je pro všechny stejná – vynásobené vzdáleností, která však stejná být nemusí. Řeceno ještě jinými slovy, teorie relativity nepřipouští myšlenku absolutního času. Každý pozorovatel si musí nést s sebou vlastní hodiny. A přitom časové údaje měřené hodinami stejné konstrukce, které však náležejí různým pozorovatelům, se mohou různit.

Jinou cestu k určování poloh a časových rozpětí bychom mohli nazvat principem radaru. Pozorovatel vyšle do prostoru světelný či rádiový signál, jehož část se odrazí od vzdáleného tělesa a po čase je opět zachycena. Získáme tak informaci o události, o níž řekneme, že nastala přesně uprostřed doby mezi odesláním signálu a přijetím jeho odrazu. Vzdálenost k místu, v němž k události došlo, se rovná polovině celkové časové prodlevy násobené rychlostí světla. Událostí se zde rozumí nějaký jev, kterému lze přiřadit přesně jeden bod v prostoru i v čase. Situace je znázorněna na



OBRÁZEK 2.1 Na tomto obrázku se čas měří podél svislé osy a vzdálenost od pozorovatele podél vodorovné osy. Dráha pozorovatele v prostoru a času je vyznačena svislou čarou na levém okraji. Dráhu světelných paprsků k události a od ní vyznačují úhlopříčné čárkované úsečky.

obrázku 2.1. Jde o příklad prostoročasového diagramu. Pomocí popsaného postupu přisoudí jednotliví pozorovatelé jedné události různé časové okamžiky a prostorové polohy. Ale o žádném z výsledků nemůžeme tvrdit, že by byl správnější než ostatní; mezi všemi existuje určitá souvislost. Kterýkoli z pozorovatelů je schopen odvodit také výsledky svých kolegů, pokud zná vzájemné rychlosti. Právě tuto metodu dnes používáme při přesných měřeních velkých vzdáleností,

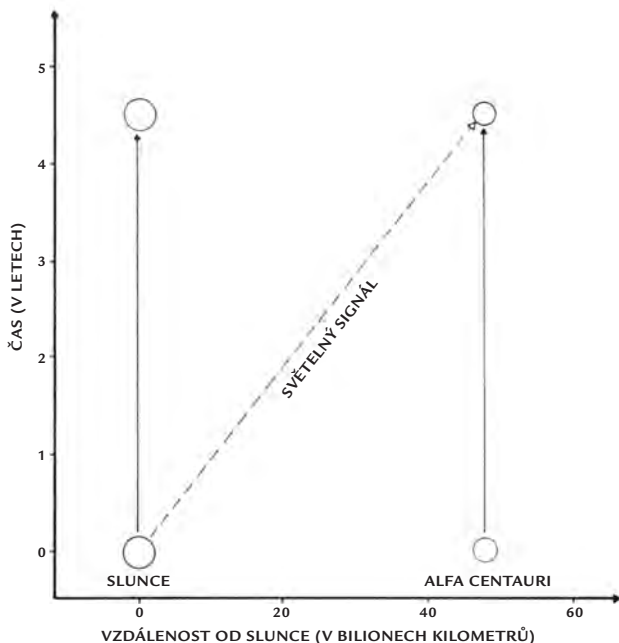
protože časové intervaly umíme určit přesněji než délky. Například metr lze zavést jako vzdálenost, již světlo urazí za 0,000 000 003 335 640 952 sekundy – měřeno přesnými césiiovými hodinami. Uvedené číslo bylo zvoleno tak, aby se dosáhlo souhlasu s historickou definicí metru jako vzdálenosti mezi dvěma ryskami na speciální platinové tyči uchovávané v Paříži. Namísto metru bychom mohli zavést novou jednotku vzdálenosti, světelnou sekundu, vymezenou jednoduše jako vzdálenost, již světlo uletí za jednu sekundu. V teorii relativity definujeme vzdálenost právě pomocí času a rychlosti světla, čímž je automaticky zachyceno to, že všichni pozorovatelé měří tutéž světelnou rychlost (podle definice 1 metr za 0,000 000 003 335 640 952 sekundy). Není žádného důvodu k zavádění éteru, který beztak nelze odhalit, jak to ukázal Michelsonův-Morleyho pokus i další experimenty. Teorie relativity nás tak přiměla od základů přebudovat názory na prostor a čas. Museli jsme připustit, že čas není zcela oddělen od prostoru a není nezávislý na něm, nýbrž jsou spolu navzájem propojeny a tvoří jediné „jsoucno“ zvané prostoročas.

Každodenní zkušenost nás přesvědčuje, že k jednoznačnému určení polohy v prostoru je třeba tří čísel – souřadnic. Kupříkladu žárovka svítící ve vašem pokoji může být dva metry od stěny, jeden metr od sousední stěny a dva metry nad podlahou. Bylo by rovněž možné určit polohu tohoto místa tak, že udáme zeměpisnou šířku, zeměpisnou délku a nadmořskou výšku žárovky. V principu jsou použitelné souřadnice jakéhokoli druhu, i když z praktického hlediska je vhodnost jednotlivých typů omezená. Nebudeme asi určovat polohu Měsíce v kilometrech severním a západním směrem od Piccadilly a v metrech nad hladinou mořskou. Namísto toho by astronomové spíše použili vzdálenost Měsíce od Slunce, jeho vzdálenost od roviny oběžné dráhy

Země a úhel mezi spojnicí Měsíce se Sluncem a spojnicí Slunce s blízkou hvězdou alfa v souhvězdí Kentaura. Ani tyto souřadnice by nám nebyly moc platné, kdybychom chtěli určit pozici Slunce v naší galaxii či umístění Galaxie v místní skupině galaxií. Celý vesmír popisujeme pomocí řady jeho částí. A v každém takovém útržku můžeme užít nejvhodnějšího systému tří souřadnic k určení prostorových vztahů. Jednotlivé části na sebe navazují a umožňují spojitý přechod z jednoho systému do dalšího.

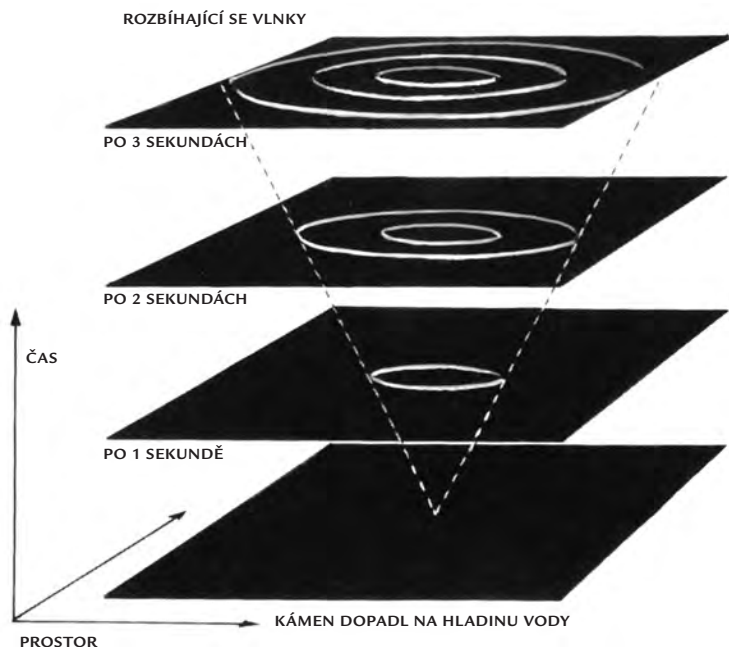
Připomeňme si, že událostí rozumíme v teorii relativity každý jev, který lze charakterizovat jedním bodem v prostoru a jemuž lze přiřadit přesný časový okamžik. Událost v prostoročasu tedy můžeme specifikovat pomocí čtyř čísel. Jejich výběr je opět zcela libovolný; lze užít jakékoli dobře definované prostorové souřadnice a libovolné míry času. Tak jako není velkého rozdílu mezi třemi prostorovými souřadnicemi, není v relativitě ani zásadního rozdílu mezi prostorovou a časovou souřadnicí. Je-li to výhodné pro výpočty, měření či pro interpretaci našich pozorování, můžeme přejít k novým souřadnicím, u nichž bude například první prostorová souřadnice kombinací dvou starých prostorových souřadnic. Místo abychom určovali polohu na Zemi v kilometrech severně od Piccadilly a v kilometrech západně od Piccadilly, můžeme udávat vzdálenosti v kilometrech směrem severovýchodním a směrem severozápadním od tohoto slavného londýnského náměstí. A nová časová souřadnice může být určena třeba jako součet původního času v sekundách a vzdálenosti ve světelných sekundách severně od Piccadilly...

Často je užitečné chápat čtyři čísla, která rozlišují jednotlivé události, jako souřadnice ve čtyřrozměrném světě nazývaném prostoročas. Není v našich silách si takový svět představit. Já sám mám velké obtíže, když se snažím



OBRÁZEK 2.2

představit si třírozměrné objekty, ale je snadné kreslit dvou-
 rozměrné diagramy, jako například povrch Země. Zemský
 povrch je dvourozměrný, protože polohu každého místa na
 něm lze určit dvěma zeměpisnými souřadnicemi – délkou
 a šířkou. Nejčastěji se používají takové diagramy, v nichž
 čas narůstá směrem vzhůru a jedna z prostorových sou-
 řadnic se mění podél vodorovné osy. Zbývající dvě prosto-
 rové souřadnice buď nejsou na diagramu zachyceny, nebo
 se v perspektivě znázorňuje pouze jedna z nich. (S příkla-
 dem prostoročasového diagramu jsme se již setkali na ob-
 rázku 2.1.) Na obrázku 2.2 je podél svislé osy vyneseno čas
 v letech. Vodorovně je pak vyznačena vzdálenost v kilome-
 trech od Slunce k alfi Centauri – našemu blízkému hvězd-



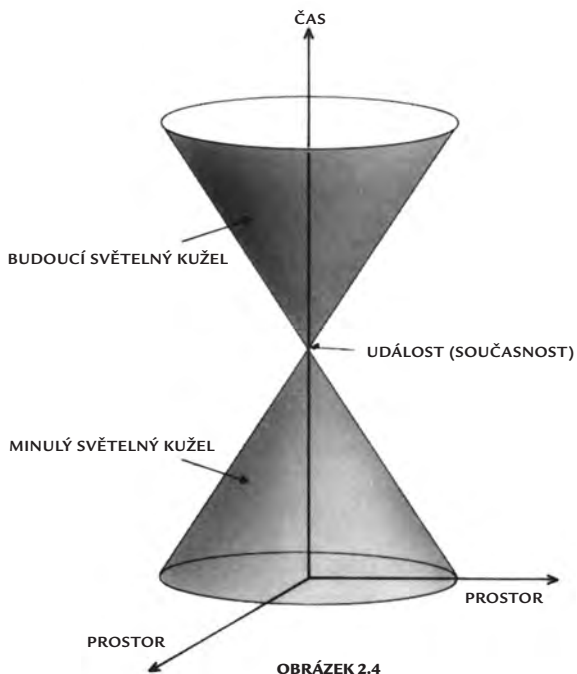
OBRÁZEK 2.3

nému sousedu. Dráhy Slunce a alfy Centauri prostoročásem, světočáry, jsou znázorněny plnými čarami po obou stranách diagramu. Světelný paprsek vyslaný ze Slunce ke hvězdě se v diagramu pohybuje úhlopříčně a svého cíle dosáhne asi po čtyřech letech.

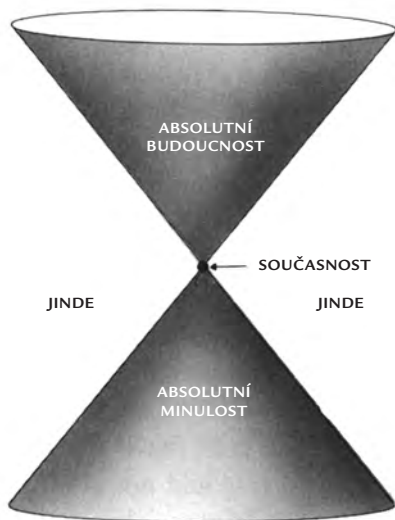
Jak jsme už uvedli, Maxwellovy rovnice předpovídají neměnnou, na pohybu zdroje nezávislou rychlost světla a tato předpověď byla potvrzena přesným měřením. Odtud je patrné, že světelný záblesk vyslaný v určitý okamžik do všech směrů se bude rozšiřovat jako světelná koule, jejíž rozměr ani poloha nikterak nezávisí na pohybu zdroje. Po první miliontině sekundy vyplní záření povrch sféry o poloměru 300 metrů; na konci druhé miliontiny sekundy bude její

poloměr činit už 600 metrů atd. Světlo se šíří jako vlnky utíkající po zčeřené hladině rybníka od místa, kde do vody spadl kámen. Vlnky tvoří na hladině kruhy, které se s časem postupně zvětšují. Představíme-li si teď třírozměrný model, který sestává z dvourozměrné hladiny rybníka a jednorozměrného času, vytvoří narůstající kruhy v prostoročasném diagramu kužel. Jeho vrchol leží v místě dopadu kamene na hladinu (obr. 2.3). Podobně světlo vyzářené při nějaké události vytváří třírozměrný kužel ve čtyřrozměrném prostoročasu. Nazýváme jej budoucím světelným kuželem. Obdobným způsobem můžeme sestojit také minulý světelný kužel: ten tvoří všechny události, z nichž může světelný záblesk dosáhnout danou událost (obr. 2.4).

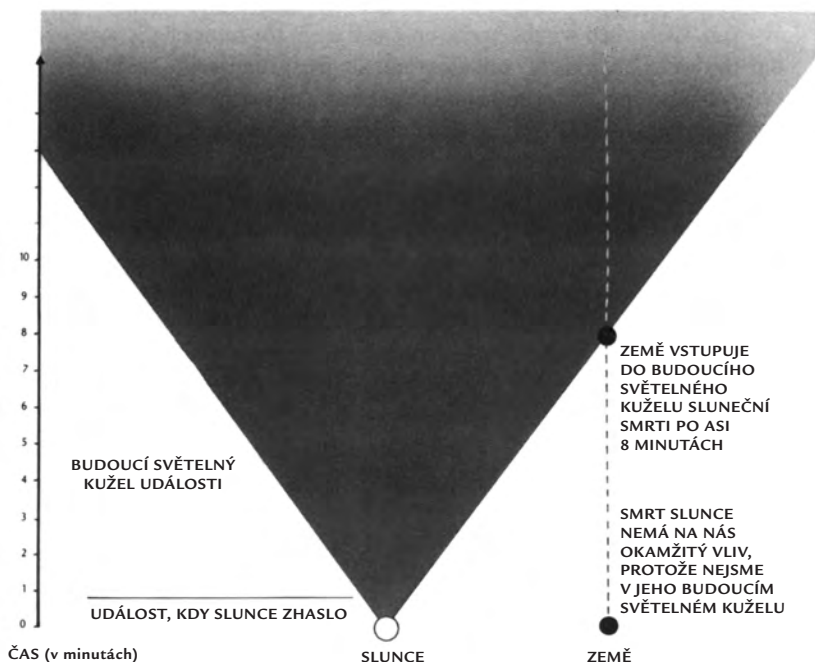
Minulý a budoucí světelný kužel události (označme ji P) rozdělují prostoročas na tři oblasti (obr. 2.5): První z nich je absolutní budoucnost události P , kterou tvoří oblast uvnitř budoucího světelného kuželu vycházejícího z P . Události ležící v absolutní budoucnosti P mohou být v principu ovlivněny tím, co se v P stalo. Naopak ty události, které leží vně světelného kuželu z P , nemůže žádný signál z ní vyslaný zasáhnout, protože nic se nešíří rychleji než světlo. Absolutní minulost P je oblast uvnitř minulého světelného kuželu. Signály šířící se z této oblasti podsvětelnou rychlostí mohou dosáhnout událost P , pokud jsou vyslány vhodným směrem. Události ležící vně obou světelných kuželů nemohou událost P ovlivnit ani jí nemohou být samy ovlivněny. Kdyby třeba najednou Slunce přestalo svítit, lidé na Zemi by si zprvu ničeho nepovšimli. Dokud se Země nachází vně budoucího světelného kuželu této události, nemůže dění na naší planetě ovlivnit (obr. 2.6). Až po osmi minutách, které potřebuje světlo k překonání vzdálenosti od Slunce k Zemi, bychom poznali, že s naší hvězdou není něco v pořádku. Teprve po této době totiž



OBRÁZEK 2.4



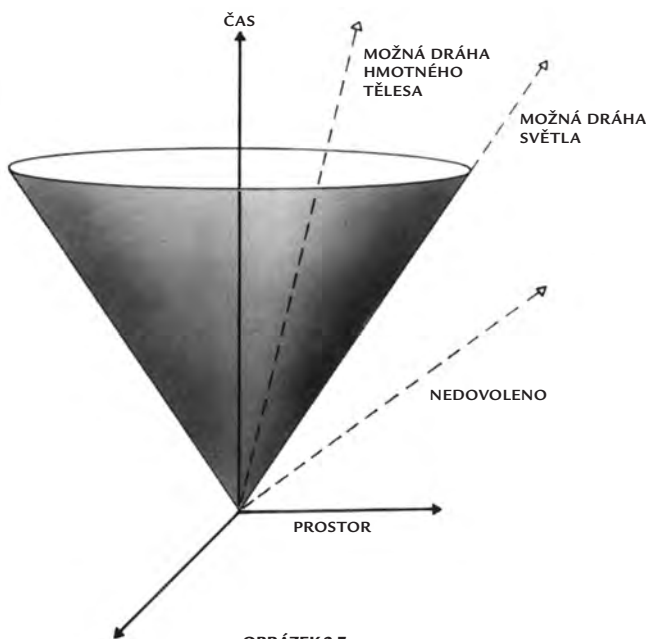
OBRÁZEK 2.5



OBRÁZEK 2.6

vstupuje Země do budoucího světelného kuželu události, která se odehrála na Slunci. Ze stejného důvodu nevíme nic o tom, co se děje ve velmi vzdáleném vesmíru. Světlo, které k nám přichází od dalekých galaxií, bylo vysláno před miliony let a nejbližší vesmírné objekty, které jsme schopni pozorovat, opustilo dokonce před osmi miliardami let. Pohlížíme-li na vesmír, vidíme jej takový, jaký byl v minulosti.

Zanedbáme-li gravitační působení mezi objekty, jak to udělal Einstein a Poincaré před rokem 1905, bude nejlepší teorií popisující zbytek fyziky speciální teorie relativity. Tato teorie je ve shodě s pozorováním v tom, že se žádné



OBRÁZEK 2.7

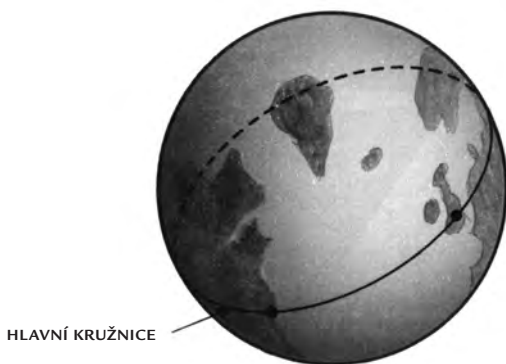
těleso nemůže pohybovat rychleji než světlo. V řeči našich diagramů to znamená, že světočára každého fyzikálního objektu leží uvnitř světelných kuželů všech událostí, které nastaly v průběhu celé jeho historie (obr. 2.7).

Speciální teorie relativity velice úspěšně objasnila, proč všichni pozorovatelé zjišťují tutéž hodnotu rychlosti světla, a také popsala jevy, které nastanou, když se rychlost tělesa blíží rychlosti světelné. Není však slučitelná s Newtonovým pojetím gravitace a s jeho gravitačním zákonem. Podle Newtonova zákona závisí přitažlivá síla mezi tělesy na jejich okamžité poloze. Jinými slovy – gravitační efekty by se měly šířit nekonečnou rychlostí namísto rychlosti světelné či podsvětelné. Mezi lety 1908 a 1914 se Einstein několikrát neúspěšně pokusil nalézt takovou teorii gravitace,

kteřá by byla slučitelná se speciální relativitou. Až konečně roku 1915 navrhl úspěšnou teorii, dnes známou pod názvem obecná teorie relativity.

Revolučnost Einsteinova přístupu spočívá v novém chápání gravitační interakce, která je odlišná od interakcí příslušných ostatním druhům sil. Gravitační můžeme chápat jako důsledek toho, že prostoročas není takzvaně plochý, jak se dříve předpokládalo; je zakřivený účinkem hmotnosti a energie, kterou obsahuje. V řeči obecné relativity se tělesa, jako například Země, nepohybují po svých zakřivených drahách proto, že by k tomu byla nucena přitažlivou silou ostatních vesmírných objektů. Namísto toho se pohybují po křivkách, které v zakřiveném prostoročasu představují nejtěsnější obdobu přímých čar, po geodetikách. Nejkratší spojnice dvou bodů – to je právě geodetika. I zemský povrch je zakřiveným prostorem, ovšem pouze dvourozměrným. Geodetikami jsou v něm hlavní kružnice (kružnice, jejichž střed leží v centru Země). Geodetiky určují nejkratší cesty mezi letišti, a proto piloti na mezikontinentálních linkách létají právě podél těchto křivek (obr. 2.8). V obecné relativitě se tělesa pohybují po nejpřímějších čarách čtyřrozměrného prostoročasu, avšak v našem třírozměrném prostoru se jejich dráhy jeví zakřivené. Je to trochu tak, jako bychom pozorovali letadlo vznášející se nad kopcovitou krajinou. Ač v třírozměrném prostoru sleduje letadlo nejpřímější dráhu, jeho stín se na nerovném zemském povrchu pohybuje po dráze zakřivené.

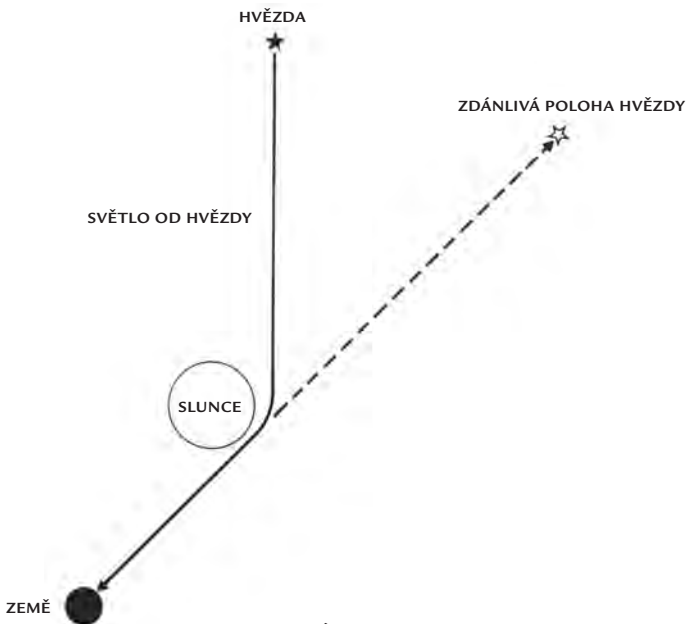
Hmota Slunce tedy zakřivuje prostoročas takovým způsobem, že se nám prostoročasová geodetika Země jeví jako eliptická dráha v třírozměrném prostoru. Tvar planetárních drah vypočtených podle obecné relativity je téměř přesně stejný jako tvar drah v Newtonově gravitační teorii. Výjimkou je Merkur, obíhající ze všech planet Slunci nejbliže,



OBRÁZEK 2.8

a pociťující proto nejvýraznější gravitační vlivy. Navíc má Merkur poněkud výstřednou dráhu. Rovnice obecné relativity předpovídají postupné stáčení jeho orbity asi o jeden stupeň za 10 000 let. Jakkoli je tato hodnota nepatrná, astronomové ji změřili už před rokem 1915 a posloužila tak jako jedno z prvních potvrzení správnosti Einsteinovy teorie. V posledních letech se zdařilo pomocí radaru stanovit ještě podstatně menší odchylky drah dalších planet od newtonovské předpovědi a také ty jsou ve shodě s výsledky obecné relativity.

Rovněž světelné paprsky se prostoročasně pohybují podél geodetik. I v tomto případě způsobuje zakřivení prostoročasu, že světelné paprsky nejsou v prostoru přímkami. Obecná teorie relativity předpovídá, že se paprsky budou vlivem gravitace ohýbat. To znamená, že světelný paprsek od vzdálené hvězdy, shodou okolností procházející těsně nad slunečním povrchem, bude o malý úhel ohnut, takže se pozemskému hvězdáři bude hvězda jevit nepatrně posunutá (obr. 2.9). Samozřejmě kdyby světlo hvězdy procházelo vždy kolem Slunce, nemohli bychom rozhodnout, zda bylo



OBRÁZEK 2.9

odkloněno či zda se hvězda skutečně nachází tam, kde ji vidíme. Protože však Země obíhá kolem Slunce, dostávají se postupně různé hvězdy blízko ke slunečnímu disku a jejich světlo je odkláněno. Hvězdy tak zdánlivě mění vzájemnou polohu o nepatrnou hodnotu. Normálně je nadmíru obtížné ohyb paprsků zaznamenat, neboť jasný sluneční kotouč neumožňuje pozorovat na obloze hvězdy blízko Slunce. Je to však uskutečnitelné během úplného zatmění, při němž je sluneční záření odstíněno Měsícem. Einsteina předpověď ohybu světelných paprsků nemohla být vzhledem k událostem první světové války testována hned v roce 1915, a tak teprve o čtyři roky později potvrdila výpočty britská expedice, která se vydala za zatměním Slunce do západní Afriky. Ověření teorie německého autora brit-

skými vědci bylo ve své době oslavováno jako významný akt usmíření mezi oběma státy. Ironií osudu prokázalo pozdější pečlivé prozkoumání fotografií přivezených expedicí, že chyby měření byly stejně veliké jako hledaný efekt. Snad pomohla šťastná náhoda, nebo možná svou roli sehrála znalost výsledku, který pozorovatelé toužili nalézt. Ohyb paprsků však byl přesněji ověřen řadou pozdějších pozorování.

Další předpověď obecné teorie relativity tvrdí, že čas v blízkosti hmotných těles probíhá pomaleji. Je to dáno vztahem mezi energií záření a jeho frekvencí (tj. počtem světelných vln za sekundu): čím větší je energie záření, tím vyšší má i frekvenci. Je-li paprsek vyslán vzhůru v gravitačním poli Země, ztrácí postupně svou energii, a tak jeho frekvence klesá (prodlužuje se interval mezi příchodem vlnových hřebenů k pozorovateli nacházejícímu se ve výšce). Pozorovateli nacházejícímu se ve velké výšce se pak zdá, že události dole trvají delší dobu. Tento jev byl testován roku 1962 s pomocí dvojice vysoce přesných hodin umístěných v přízemí a na vrcholu jedné vodárenské věže. Hodiny položené dole šly pomaleji, přesně v soulase s obecnou teorií relativity. Znalost nestejného chodu hodin v různých výškách nad zemským povrchem má dnes značný praktický význam při zavádění nesmírně přesných navigačních systémů, které využívají kosmických družic. Kdybychom ignorovali korekce obecné teorie relativity, udávané polohy by byly o několik kilometrů nesprávné.

Newtonovy zákony pohybu znamenaly konec možnosti stanovit absolutní polohu objektů v prostoru. Teorie relativity se zbavila i absolutního času. Představme si dvojčata, z nichž jedno žije na vrcholku hory, zatímco druhé u moře. První z dvojčat bude stárnout rychleji než jeho sourozenec; setkají-li se po čase, bude starší. Rozdíl je v tomto případě zanedbatelný, ale mohl by být mnohem výraznější, kdyby

se jeden ze sourozenců vydal na dlouhou kosmickou cestu rychlostí blízkou rychlosti světla. Tento pozoruhodný jev je znám jako paradox dvojčat, ale paradoxem se stane pouze tehdy, setrváme-li u myšlenky absolutního času. V relativitě neexistuje žádný jednoznačně daný absolutní čas; namísto něj má každý jednotlivec svou vlastní míru času, závislou na tom, kde se nachází a jak se pohybuje.

Před rokem 1915 jsme prostor a čas považovali za jeviště, na němž se odehrávají události, ale jež události samy nikterak ovlivňují. Bylo to pravdou i v rámci speciální teorie relativity. Tělesa se pohybovala, síly přitahovaly a odpuzovaly, ale prostor a čas zůstávaly neměnné. Bylo tedy přirozené předpokládat, že prostor i čas existují věčně.

S příchodem obecné teorie relativity se situace od základu změnila. Prostor a čas jsou nyní dynamickými veličinami. Pohybující se objekt či působící síla ovlivňují křivost prostoru a času – a naopak struktura prostoročasu působí na pohyb těles a silové efekty. Prostor a čas určují veškeré dění ve vesmíru a samy jsou tímto děním proměňovány. Tak jako není možné hovořit o událostech ve vesmíru bez pojmů prostoru a času, tak v obecné relativitě nemá ani prostor, ani čas vně hranic vesmíru smysl.

V desetiletích následujících po zrodu relativistické fyziky změnilo nové chápání prostoru a času náš celkový obraz vesmíru. Stará myšlenka v podstatě neměnného vesmíru byla nahrazena dynamickým modelem rozpínajícího se vesmíru, který se patrně zrodil před konečnou dobou a jež možná v konečném čase opět skončí. O této proměně hovoří příští kapitola. Řadu let později se stala výchozím bodem mé práce v teoretické fyzice. Společně s Rogerem Penrosem se nám zdařilo na základě Einsteinovy teorie prokázat, že vesmír měl nepochybně svůj počátek a snad dospěje i ke svému konci.