

Počátek revoluce

Fyzika 20. století radikálním způsobem zmodifikovala newtonovský obraz světa. Nově učiněné kroky tvoří základ valné části dnešních pokročilých technologií. Naše hlubší porozumění světu vychází ze dvou velkých teorií: obecné relativity a kvantové mechaniky. Obě vyžadují odvážné přehodnocení tradičních názorů na podstatu světa: prostoru a času v relativitě; hmoty a energie v kvantové teorii.

V této části knihy popíšeme obě teorie poněkud podrobněji. Pokusíme se objasnit jejich samu podstatu a zdůraznit koncepční revoluci, kterou přinesly. Právě zde našla svůj počátek magie fyziky 20. století. Studium těchto dvou teorií a snaha jim do hloubky porozumět je okouzlující dobrodružství.

Obě teorie – relativita a kvantování – jsou východiskem, na kterém se dnes snažíme budovat kvantovou teorii gravitace. Poskytují nám základ, ze kterého se pokoušíme pokročit vpřed.

3. Albert

Otec Alberta Einsteina stavěl elektrárny v Itálii. Když byl Albert malý chlapec, byly Maxwellovy rovnice staré jen pár desetiletí. Itálie vstupovala do průmyslové revoluce a turbíny i transformátory, které jeho otec stavěl,

z těchto rovnic už vycházely. Velká moc nové fyziky byla zřejmá.

Albert byl rebel. Jeho rodiče ho zanechali v Německu, aby navštěvoval střední školu, ale pro něj byl německý školský systém příliš zkostrnatělý a militaristický. Autoritářskou školu nemohl vystát, a tak studií zanechal. Připojil se k rodičům v italské Pavii a nějaký čas strávil lenošením. Později odešel studovat do Švýcarska, ale zpočátku neuspěl u přijímacích zkoušek na Polytechniku v Curychu, kam se toužil dostat. Po dokončení univerzitního studia nemohl najít místo coby vědec, a tak, aby mohl žít s dívkou, do které se zamiloval, přijal zaměstnání na patentovém úřadu v Bernu.

Pro úspěšného absolventa fyziky to nebylo vysněné místo v oboru, ale Albertovi poskytlo čas na nezávislé přemýšlení a práci. A on přemýšlel a pracoval. Koneckonců, dělal to už od svého raného dětství: místo naslouchání tomu, co ho učili ve škole, četl Eukleidovy *Základy* a Kantovu *Kritiku čistého rozumu*. Sledujete-li vyježděné koleje, nikdy se nedostanete na nová místa.

Když bylo Einsteinovi dvacet pět let, poslal do *Annalen der Physik* tři články. Každý z nich byl hoděn Nobelovy ceny. Ba co víc: všechny tři se staly pilíři našeho dnešního chápání světa. O prvním z těchto článků jsme už hovořili. Mladý Albert v něm spočítal rozměry atomů a po třiačtyřiceti stoletích dokázal, že Demokritovy ideje byly správné: hmota má opravdu zrnitou strukturu.

Druhý článek Einsteina proslavil nejvíc – zavedl v něm teorii relativity. A právě teorii relativity je věnována tato kapitola.

Vlastně existují dvě teorie relativity. Obálka, kterou pětadvacetiletý Einstein odeslal, obsahovala výklad první z nich: teorie, kterou dnes nazýváme „speciální relativita“.

Šlo o zásadní vyjasnění skutečné podstaty prostoru a času. Popíšeme ho zde předtím, než přejdeme ke druhé a nejdůležitější Einsteinově teorii: k obecné relativitě.

Speciální relativita je rafinovaná a koncepčně obtížná teorie. Je obtížnější ji vstřebat než obecnou relativitu a čtenář by neměl být zastrášen, jestli mu následující stránky budou připadat poněkud nesrozumitelné. Teorie především ukazuje, že Newtonova vize světa musí být radikálně modifikována, nikoli jenom, že v ní něco chybí. Musí být modifikována způsobem, který jde zcela proti zdravému rozumu. Je to první skutečný krok k revizi našeho intuitivního chápání světa.

Rozšířená současnost

Newtonova a Maxwellova teorie si navzájem odporují. Maxwellovy rovnice určují unikátní rychlost: rychlost světla. Ale Newtonova mechanika není s existencí této fundamentální rychlosti slučitelná, protože do Newtonových pohybových rovnic vstupuje zrychlení, nikoli rychlost. V Newtonově fyzice může být rychlost *jenom rychlostí něčeho vůči něčemu*. Už Galileo zdůraznil fakt, že Země se pohybuje vůči Slunci, přestože tento její pohyb nevnímáme, neboť pojmem „rychlost“ obvykle myslíme „rychlost vůči Zemi“. Říkáme, že rychlost je *relativní* veličina. To znamená, že rychlost objektu sama o sobě nemá žádný smysl: existuje pouze rychlost jednoho objektu vůči jinému objektu. To se učili studenti fyziky v 19. století a totéž se učí i dnes. Ale je-li tomu tak, vůči čemu pak je vztažena rychlost světla určená Maxwellovými rovnicemi?

Jednou z možností je, že existuje nějaký univerzální substrát, vůči němuž se světlo pohybuje a má tuto rychlost. Vypadá to však, že předpovědi Maxwellovy teorie

jsou na tomto substrátu nezávislé. Všechny experimentální pokusy změřit rychlost pohybu Země vůči tomuto hypotetickému substrátu (éteru) selhaly, od konce 19. století až dosud.

Einstein tvrdil, že na správnou cestu ho nepřivedl žádný experiment, ale jenom úvahy nad zjevným rozporům mezi Maxwellovými rovnicemi a Newtonovou mechanikou. Sám sebe se ptal, zdali existuje způsob, jak vzájemně propojit Newtonovy a Galileiho zásadní objevy s Maxwellovou teorií.

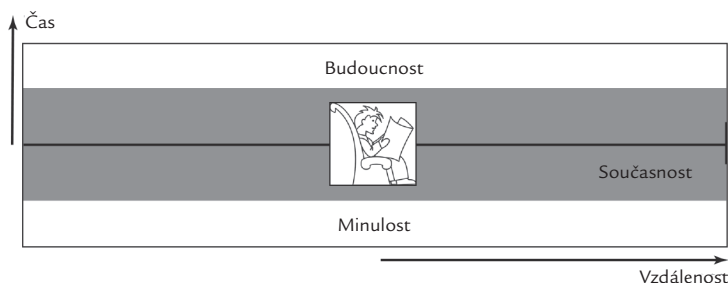
Při tom Einstein dospěl k ohromujícímu objevu. Abyste mu porozuměli, představte si všechny minulé, současné i budoucí události (vůči okamžiku, ve kterém se právě nacházíte) a znázorněte si je jako na obrázku 3.1.

Nuže: Einsteinův objev spočívá v tom, že tento obrázek je nesprávný. Ve skutečnosti je to tak, jak znázorňuje obrázek 3.2.

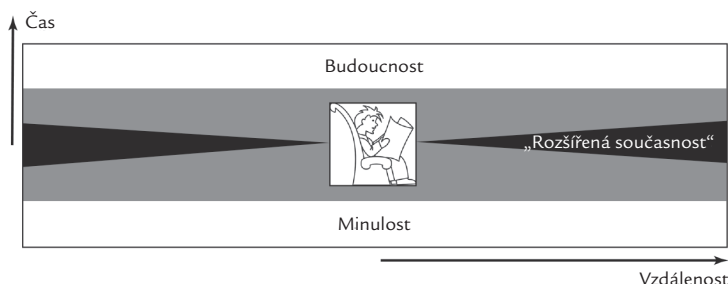
Mezi minulostí a budoucností dané události (například mezi minulostí a budoucností vás samotných právě zde v okamžiku, kdy toto právě čtete) leží „přechodová zóna“, či „rozšířená současnost“. Tato zóna není ani minulostí, ani budoucností. Právě tento objev učinila speciální relativita.

Délka trvání této přechodové zóny,* která není ani vaší minulostí, ani vaší budoucností, je velmi krátká. A závisí na tom, kde se daná událost nachází ve vztahu k vám, jak ilustruje obrázek 3.2. Čím větší je vzdálenost události od vás, tím delší dobu trvá rozšířená současnost. Několik metrů od vás činí délka vaší přechodové zóny, kde není ani minulost, ani budoucnost, jenom pár nanosekund. Tedy

* Je to množina událostí, které leží v prostorupodobné vzdálenosti od referenčního bodu.



Obr. 3.1: Prostor a čas před Einsteinem.



Obr. 3.2: Struktura „prostoročasu“. Pro každého pozorovatele existuje „rozšířená současnost“, která je přechodovou oblastí mezi minulostí a budoucností.

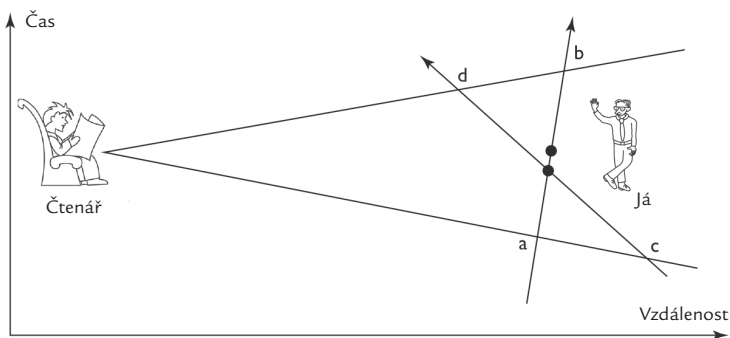
skoro nic (jedna vteřina obsahuje asi tolik nanosekund, kolik je vteřin ve třiceti letech). To je mnohem méně, než si dokážeme povšimnout. Na druhé straně oceánu trvá vaše přechodová zóna tisícinu sekundy, což je stále ještě pod schopností našeho rozlišení, které činí řádově desetinu vteřiny. Ale na Měsíci trvá rozšířená současnost už pár sekund, a na Marsu čtvrt hodiny. To znamená, že lze říci, že na Marsu existují události, které se vůči právě tomu okamžiku zde na Zemi už odehrály v minulosti, pak události, které se teprve stanou, a také čtvrt hodina, během níž se odehrají události, které nejsou ani v naší minulosti, ani v naší budoucnosti.

Jsou jinde. Nikdy předtím jsme si toto „jinde“ neuvědomili, protože blízko nás je toto „jinde“ příliš krátké. Jsme moc pomalí na to, abychom si ho všimli. Přesto existuje a je zcela reálné.

Proto nelze udržet zcela hladkou konverzaci mezi Zemí a Marsem. Představte si, že já jsem na Marsu a vy tady. Já se vás na něco zeptám a vy mi odpovíte hned, jakmile se dozvíte můj dotaz. Vaše odpověď mě zastihne čtvrt hodiny poté, co jsem položil dotaz. Tato čtvrt hodina je právě čas, který neleží ani v minulosti, ani v budoucnosti vůči okamžiku, kdy jste mi odpovídali. Einstein pochopil klíčový fakt o přírodě, totiž že tato čtvrt hodina je nevyhnutelná. Žádným způsobem ji nelze zredukovat na kratší úsek. Je vetkána přímo do předejívá událostí v prostoru a čase. Nemůžeme ji zkrátit, stejně jako nemůžeme poslat dopis do minulosti.

Je to divné, ale svět je zkrátka takový. Je to stejně divné jako fakt, že v Sydney žijí lidé vzhůru nohama: divné, ale pravdivé. Člověk si na tuto skutečnost zvykne, pak se pro něj stane normální a rozumnou. Struktura prostoru a času je takto uspořádána.

Plyne z toho, že nemá žádný smysl říkat, že daná událost se na Marsu odehrává „právě teď“, protože unikátní „právě teď“ neexistuje (obr. 3.3). Řečeno odborně, Einstein pochopil, že neexistuje „absolutní současnost“. Ve vesmíru neexistuje žádný jednoznačný soubor událostí, které by existovaly „teď“. Soubor událostí ve vesmíru nelze popsat jako následnost jedné současnosti, jako jednoznačnou posloupnost. Má složitější strukturu ilustrovanou na obrázku 3.2. Obrázek popisuje to, co ve fyzice nazýváme prostoročas. Je to množina všech minulých i budoucích událostí, ale také událostí, které „nejsou ani



Obr. 3.3: Relativita současnosti.

minulé, ani budoucí“. Ty tvoří jediný okamžik. Samy mají své vlastní trvání*.

V galaxii v Andromedě trvá tato rozšířená současnost (vůči nám) 2 miliony let. Vše, co se tam stane během oněch 2 milionů let, neleží ani v naší minulosti, ani v naší současnosti. Kdyby se tamní pokročilá a přátelská civilizace rozhodla vyslat flotilu kosmických lodí a navštívit nás, nedávalo by žádný smysl ptát se, zdali flotila „nyní“ už odletěla

* Rafinovaný čtenář by mohl namítnout, že okamžik ležící přesně v polovině mého čtvrt hodinového intervalu by mohl být považován za současný s okamžikem, kdy vy zrovna odpovídáte. Čtenář, který studoval fyziku, v tom rozpozná „Einsteinovu konvenci“, kterou opravdu lze současnost definovat. Tato definice současnosti však závisí na tom, jak se pohybují, a tudíž nedefinuje současnost mezi dvěma událostmi jednoznačně, ale jenom současnost *relativně* vůči pohybovému stavu konkrétních objektů. Na obrázku 3.3 je bod ležící přesně uprostřed „a“ a „b“, což jsou body, kdy já vystoupím z minulosti čtenáře a vstoupím do jeho budoucnosti. Druhá tečka leží přesně uprostřed „c“ a „d“, což jsou body, kdy bych vystoupil z minulosti a vstoupil do budoucnosti stejného čtenáře, kdybych se pohyboval po jiné trajektorii. Obě prostřední tečky jsou dle výše zmíněné definice „současnosti“ současně vzhledem ke čtenáři, ale zjevně se odehrávají v jiných časech. Obě různé tečky jsou současné se čtenářem, ale relativně ke dvěma mým různým pohybům. Odtud pramení pojem „relativita“ v názvu Einsteinovy teorie.

anebo ještě ne. Jedinou smysluplnou otázkou je, kdy my zachytíme z flotily první signál: teprve od toho okamžiku – a nikoli dříve – bude odlet flotily ležet v naší minulosti.

Objev struktury prostoročasu, který v roce 1905 učinil mladý Einstein, má konkrétní důsledky. Fakt, že prostor a čas jsou spolu úzce propojeny jako na obrázku 3.2, má za následek, že je nutno restrukturalizovat Newtonovu mechaniku. Einstein to rychle provedl v letech 1905 a 1906. Prvním výsledkem této restrukturalizace bylo, že podobně jako byl prostor s časem sloučen to jediného konceptu prostoročasu, tak i elektrické pole a magnetické pole byly navzájem sloučeny do jediné entity, kterou dnes nazýváme elektromagnetické pole. Složitě rovnice, které napsal Maxwell pro dvě odlišná pole, se v tomto novém jazyce dokonce velmi zjednodušily.

Z teorie plyne i další důsledek, který má velmi závažné dopady. Pojmy „energie“ a „hmota“ jsou spolu zkombinovány stejně jako prostor a čas nebo elektrické a magnetické pole. V nové mechanice splývají. Před rokem 1905 se zdálo, že jistě platí dva obecné principy: zachování hmoty a zachování energie. První byl důkladně ověřen chemiky: při chemických reakcích se celková hmotnost nikdy nemění. Druhý princip, zákon zachování energie, plynul přímo z Newtonových rovnic, a byl proto pokládán za nejvíc *nezpochybnitelný* ze všech zákonů. Einstein si ale uvědomil, že energie a hmotnost jsou jenom dva aspekty téže entity, tak jako elektrické a magnetické pole jsou dva aspekty téhož pole, a prostor a čas jsou dva aspekty téže struktury, prostoročasu. Z toho plyne, že hmota se sama o sobě nezachovává. Ani energie – jak se do té doby věřilo – se nezávisle také nezachovává. Jedno lze přeměnit na druhé a naopak. Pro hmotu a energii tudíž existuje jenom jeden zákon zachování, nikoli dva oddělené. Zachovává

se součet hmoty a energie, nikoli každá veličina zvlášť. Musí existovat procesy, které přeměňují energii na hmotu a hmotu na energii.

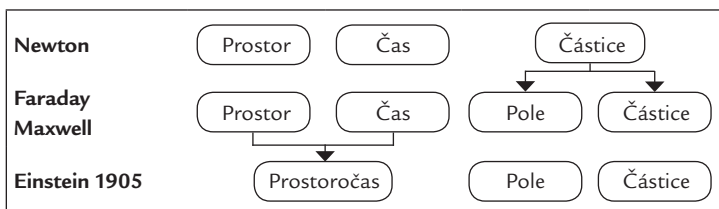
Rychlý výpočet Einsteinovi ukázal, kolik energie se získá přeměnou jednoho gramu hmoty. Jedná se o slavný vzorec $E = mc^2$. A protože rychlost světla c je velmi velké číslo, a c^2 je ještě mnohem větší, je energie získaná přeměnou jediného gramu hmoty enormní. Rovná se energii výbuchu milionu bomb současně. Dost na to, aby rozsvítila celé město a poháněla továrny po celé měsíce. Anebo naopak byla schopna v sekundě zničit desítky tisíc lidských bytostí, jako tomu bylo v Hirošimě.

Teoretické úvahy mladého Einsteina přenesly lidstvo do nové éry: éry jaderné energie, éry nových možností i nových nebezpečí. Díky inteligenci vzdorovitého mladíka, jenž nedodržel zavedená pravidla, dnes máme prostředky, jak přinést světlo do domovů 10 miliard lidských bytostí, které budou brzy obývat naši planetu, cestovat kosmickým prostorem k jiným hvězdám, anebo zničit sebe navzájem a celou planetu zdevastovat. Záleží pouze na naší volbě. Na vůdcích, jež necháme za nás rozhodnout.

Struktuře prostoročasu, kdysi navržené Einsteinem, dnes dobře rozumíme a opakovaně ji ověřujeme v laboratořích. Pokládáme ji za jednoznačně potvrzenou. Čas a prostor jsou jiné, než jak si představoval Newton a mnozí po něm. Prostor neexistuje nezávisle na čase. V rozšířeném prostoru obrázku 3.2 neexistuje žádný privilegovaný řez, který by oproti jiným řezům mohl oprávněněji představovat „prostor v tomto okamžiku“. Naše intuitivní představa současnosti jako souboru všech událostí, které se „právě teď“ odehrávají v celém vesmíru, je jenom důsledek naší slepoty, naší neschopnosti rozeznat krátké

časové intervaly. Je to neoprávněná extrapolace naší omezené zkušenosti.

Se současností je to jako s plochostí Země: je to pouhá iluze. Kdysi jsme si představovali plochou Zemi, protože naše smysly byly omezené a my si neviděli o moc dál než na špičku vlastního nosu. Kdybychom jako Malý princ žili na asteroidu o průměru pár kilometrů, snadno bychom si uvědomili, že je kulatý. Kdyby naše mozky a naše smysly byly přesnější a my jsme vnímali nanosekundové časové intervaly, nikdy bychom nepřišli s představou „současnosti“ rozprostírající se libovolně daleko. Snadno bychom si uvědomili existenci přechodové zóny mezi minulostí a budoucností. Uvědomili bychom si, že říkat „tady a teď“ sice dává smysl, ale že říkat „teď“ pro vymezení událostí, které se ve vesmíru „právě nyní odehrávají“, smysl nedává. Je to jako ptát se, jestli je naše Galaxie „nad“ nebo „pod“ galaxií v Andromedě. Taková otázka je také nesmyslná, protože pojmy „nahore“ a „dole“ mají smysl na povrchu Země, nikoli ve vesmíru. V kosmickém prostoru žádné „nahore“ a „dole“ není. A podobně neexistuje ani žádné jednoznačné „před“ a „po“ ve vztahu dvou událostí ve vesmíru. Výslednou propojenou strukturu, kterou spolu utváří prostor s časem, jak ji znázorňují obrázky 3.2 a 3.3, fyzikové nazývají „prostorčas“ (obrázek 3.4).



Obr. 3.4: Z čeho se skládá svět?

Když časopis *Annalen der Physik* otiskl Einsteinův článek, ve kterém se tohle všechno náhle objasnilo, mělo to na fyzikální svět nedozírný dopad. Zdánlivý rozpor mezi Maxwellovými rovnicemi a Newtonovou fyzikou byl dobře známý, ale nikdo nevěděl, jak ho vyřešit. Einsteinovo řešení, šokující a nesmírně elegantní, každého překvapilo. Povídá se, že kterýsi odměřený profesor fyziky vyběhl ze své pracovny na tlumeně osvětlenou chodbu starobylé Krakovské univerzity, mával Einsteinovým článkem a vykřikoval: „Zrodil se nový Archimedes!“

Avšak i přes smršť nadšení vyvolanou pokrokem, jehož v roce 1905 Einstein dosáhl, stále to není jeho mistrovské dílo. Einsteinovým opravdovým triumfem je *druhá* teorie relativity, *obecná teorie relativity*, kterou publikoval o deset let později, když mu bylo třicet pět let.

Teorie „obecné relativity“ je nejkrásnější teorie, jakou kdy fyzika stvořila. Je to první z pilířů kvantové gravitace, takže leží v samém srdci příběhu naší knihy. Tady začíná skutečná magie fyziky 20. století.

Nejkrásnější z teorií

Poté, co publikoval speciální teorii relativity, se z Einsteina stal slavný fyzik a obdržel nabídky z mnoha univerzit. Něco ho však přesto trápilo: speciální relativita nešla dohromady s gravitací v tehdy známé podobě. Uvědomil si to, když sepsal přehledovou práci o své teorii, a začal přemýšlet, zdali by neměla být přehodnocena i ctihodná teorie „univerzální gravitace“ od otce fyziky Newtona, aby se stala slučitelnou s jeho relativitou.

Jádro problému je snadné pochopit. Newton se pokusil vysvětlit, proč tělesa padají a planety obíhají. Představil si „sílu“ přitahující všechna tělesa k sobě navzájem,

„sílu gravitace“. Nebylo jasné, jakým způsobem tato síla dokáže přitahovat vzdálené objekty, aniž by se mezi nimi nic nenacházelo. Jak jsme viděli, sám Newton měl po-
dezření, že myšlenka síly působící na dálku mezi vzdá-
lenými tělesy, která nejsou v přímém kontaktu, je čímsi
neúplná. Aby Země přitahovala Měsíc, musí mezi nimi
ležet cosi, co tuto sílu přenese. Řešení našel o dvě stě let
později Faraday, ale ne pro gravitační sílu, nýbrž pro elek-
trické a magnetické síly. Tímto řešením je pole. Elektrická
a magnetická pole „přenášejí“ silové elektrické a magne-
tické působení.

Je tedy jasné, a každý rozumný člověk to musí nahléd-
nout, že i gravitační síla musí mít své specifické Faradayovy
siločáry. Na základě analogie je také jasné, že přitažlivou
sílu mezi Sluncem a Zemí nebo mezi Zemí a padajícími
tělesy lze připisat působení určitého pole – v tomto případě
pole gravitačního. Řešení problému „co přenáší sílu“, jež
nalezli Faraday a Maxwell, musí být aplikovatelné nejen na
elektrinu, ale také na gravitaci. Musí existovat gravitační
pole. A také příslušné rovnice podobné Maxwellovým, jež
dokážou popsat, jak se Faradayovy gravitační siločáry cho-
vají. V prvních letech 20. století byla tahle věc jasná kaž-
dému dostatečně chytrému člověku. To znamená jenom
Albertu Einsteinovi.

Einstein, kterého od dětství fascinovalo elektromagne-
tické pole, jež roztáčelo rotory v elektrárnách jeho otce,
začal zkoumat ono gravitační pole a hledat, jaký mate-
matický aparát by ho mohl popsat. Zcela se ponořil do
tohoto problému. Trvalo deset let, než ho vyřešil. Deset
let šíleného studia, pokusů, omylů, zmatků, brilantních
nápadů, chybných myšlenek, dlouhé série článků obsa-
hujících nesprávné rovnice, dalších omylů a stresu. Ko-
nečně, v roce 1915, odevzdal do tisku článek obsahující

úplné řešení, které nazval *obecná teorie relativity*. Je to jeho mistrovské dílo. Podle Lva Davidoviče Landaua, vynikajícího sovětského teoretického fyzika, je to „nejkrásnější z teorií“.

Není těžké nahlédnout, v čem spočívá krása této teorie. Einstein totiž vymýšlel nejen matematickou podobu gravitačního pole a hledal příslušnou rovnici, ale pustil se i do jiného nevyřešeného problému v samém srdci Newtonovy teorie. A obě otázky navzájem propojil.

Newton se vrátil k Demokritově představě, podle níž se tělesa pohybují *prostorem*. Tento *prostor* musí být cosi jako velký a prázdný „kontejner“, pevná krabice pro celý vesmír. Obrovské lešení, ve kterém se tělesa pohybují po přímkách, dokud se jejich dráha nezakříví působením sil. Ale co to je onen „prostor“, jenž obsahuje svět? Co je prostor?

Představa prostoru se nám zdá přirozená. Ale jen proto, že dobře známe newtonovskou fyziku. Když se nad tím hlouběji zamyslíme, prázdný prostor určitě není součástí naší běžné zkušenosti. Od Aristotela po Descarta, tedy celá dvě tisíciletí, nebyla Demokritova idea prostoru coby zvláštní entity odlišné od věcí vůbec pokládána za rozumnou. Pro Aristotela, stejně jako pro Descarta, mají věci rozlehlost čili velikost: rozlehlost je vlastnost věcí. Rozlehlost sama o sobě neexistuje, když nemáme nic, co by se dalo měřit. Mohu vylít vodu ze skleničky, ale hned ji zaplní vzduch. Viděli jste snad někdy zcela prázdnou sklenici?

Jestliže mezi dvěma věcmi nic není, uvažoval Aristoteles, pak toto nic neexistuje. Jak by tam mohlo něco (prostor) být a současně nebýt? Co by měl být tento prázdný prostor, ve kterém se pohybují věci? Je to něco, anebo nic? Je-li to nic, pak to neexistuje a my se bez toho obejdeme.

Pokud to něco je, může být jeho jedinou vlastností pouze být, aniž by cokoli dělalo?

Představa prázdného prostoru, nacházejícího se někde mezi věcí a ne-věcí, trápila myslitele už od antiky. Ani sám Demokritos, který položil prázdny prostor přímo do základů svého světa zaplněného pohybujícími se atomy, si nebyl v této záležitosti zcela jistý: napsal, že prázdny prostor je cosi „mezi bytím a nebytím“. Simplicius říká:¹ „Demokritos postuloval plné a prázdne, první nazývá ‚Bytí‘ a to druhé ‚Nebytí‘.“ Atomy jsou bytí. Prostor je nebytí – „nebytí“, které nicméně existuje. Jen stěží může být něco nesrozumitelnějšího.

Newton, který Demokritovu ideu prostoru vzkřísil, se pokusil slepit věci dohromady tvrzením, že prostor je *sensorium Dei*, orgán Božího vnímání. Nikdo nikdy nepochopil, co tím Newton myslel, možná ani on sám. Je zřejmé, že Einstein, který představě Boha (s orgánem vnímání i bez něj) dával jenom malý kredit, vyjma metaforického užití ve svých slavných rétorických hříčkách, pokládal Newtonovo vysvětlení podstaty prostoru za naprosto nepřesvědčivé.

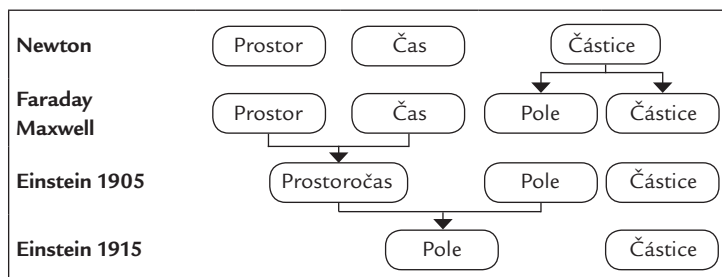
Newton se usilovně snažil překonat odpor vědců a filozofů vůči jeho oživení Demokritova konceptu prostoru. Zpočátku ho nikdo nebral vážně. Jenom mimořádná efektivnost jeho rovnic, které dokázaly předpovědět správné výsledky, kritiku postupně umlčela. Pochyby kolem oprávněnosti Newtonova konceptu prostoru přetrvávaly a Einstein, který četl filozofickou literaturu, si jich byl velmi dobře vědom. Ernst Mach, jehož inspirující vliv Einstein rád a veřejně uznával, byl přírodovědec a filozof, který poukázal na koncepční obtíže Newtonovy představy prostoru – tentýž Mach, který nevěřil v existenci atomů. (Mimočodem, je to dobrý příklad, jak tatáž osoba může

být v jednom aspektu krátkozraká, zatímco v jiném nesmírně prozíravá.)

Einstein se tedy pustil do řešení nikoli jednoho, ale hned dvou problémů naráz. Zaprvé, jak můžeme popsat gravitační pole? Zadruhé, co je Newtonův prostor?

A právě zde se projevila Einsteinova výjimečná genialita. Byl to jeden z největších myšlenkových rozletů v dějinách lidského intelektu: Co kdyby gravitační pole ve skutečnosti bylo Newtonovým záhadným prostorem? Co když Newtonův prostor není nic jiného než gravitační pole? Tato nesmírně prostá, nádherná, brilantní myšlenka je jádrem obecné teorie relativity.

Svět tedy tvoří prostor + částice + elektromagnetické pole + gravitační pole. Svět se skládá jen z částic + polí, z ničeho dalšího. Už není nutno přidávat prostor jako dodatečnou ingredienci. Newtonův prostor je gravitační pole. Anebo naopak, což říká totéž: gravitační pole je prostor. Přesněji: prostoročas (obr. 3.5).



Obr. 3.5: Z čeho se skládá svět?

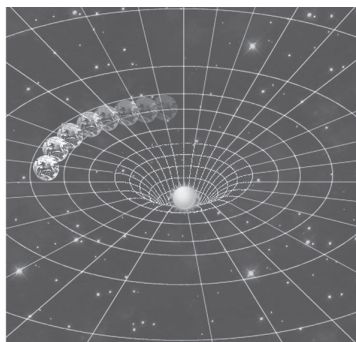
Na rozdíl od Newtonova prostoru, který je plochý a neměnný, gravitační pole – právě proto, že je to pole – se mění, vyvíjí a vibruje podle jistých rovnic. Podobně jako Maxwellovo elektromagnetické pole, jako Faradayovy siločáry.

Je to naprosto zásadní zjednodušení světa. Prostor už není něco jiného než hmota. Je jednou z „materiálních“ složek světa, podobně jako elektromagnetické pole. Je to zcela reálná entita, která se vlní, proměňuje, ohýbá a bortí.

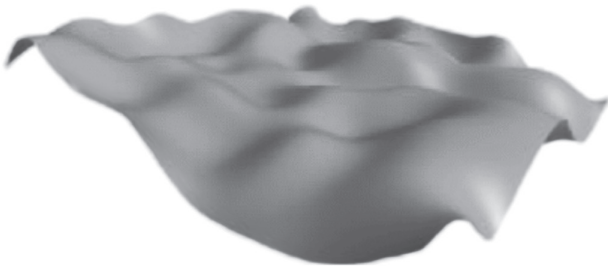
Nenacházíme se v neviditelném a pevném lešení. Jsme vnořeni do gigantického a ohebného měkkýše (to je Einsteinova metafora). Slunce ohýbá prostor kolem sebe, zakřivuje ho, takže Země kolem něj krouží nikoli kvůli záhadné síle působící na dálku, ale běží co nejpřímočařeji v prostoru, který je prohnutý. Jako když se kulička valí v trychtýři: střed trychtýře také nepůsobí žádnou záhadnou silou, je to zahnutý tvar trychtýře, jenž nutí kuličku běhat dokola. Planety krouží kolem Slunce a věci padají dolů na zem proto, že prostor kolem nich je zakřivený (obr. 3.6).

Abychom byli přesnější: zakřivuje se prostoročas, nikoli jenom prostor. Tentýž prostoročas, o kterém Einstein deset let předtím sám dokázal, že je strukturovaným sjednocením prostoru a času, nejen absolutní poslopností okamžiků.

To je hlavní myšlenka teorie. Einsteinovi zbývalo vyřešit jediný problém, totiž najít rovnice, které vše unikátním



Obr. 3.6: Země obíhá kolem Slunce, protože prostoročas kolem Slunce je zakřivený, podobně jako kulička valící se zahnutým trychtýřem.



Obr. 3.7: Zakřivený (dvourozměrný) povrch.

způsobem zrealizují. Jak se dá popsat zakřivení prostoročasu? A tady měl Einstein velké štěstí: tento problém už před ním vyřešili matematikové.

Největší matematik 19. století Carl Friedrich Gauss, „kníže matematiků“, napsal matematické formule popisující zakřivené dvourozměrné povrchy, třeba kopcovitou krajinu či plochu znázorněnou na obrázku 3.7.

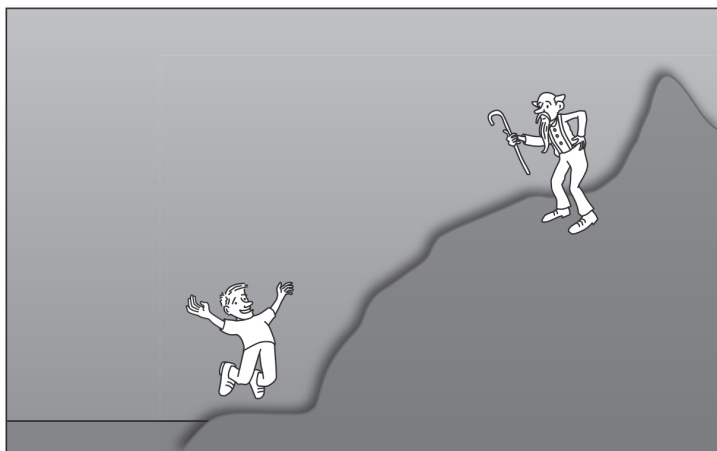
Pak požádal svého nadaného studenta, aby tuto matematiku zobecnil na zakřivené prostory ve třech a více dimenzích. Student, jmenoval se Bernhard Riemann, sepsal nezáživnou doktorskou dizertaci, která se zdála být naprosto neúčinná.

Riemannův výsledek byl, že vlastnosti zakřiveného prostoru (anebo prostoročasu) jsou v libovolné dimenzi popsány speciálním matematickým objektem, který se dnes nazývá Riemannův tenzor křivosti a označuje se symbolem R . Představíte-li si krajinu obsahující planiny, kopce a hory, pak křivost R povrchu je nulová na planinách, které jsou ploché, „bez zakřivení“. Tam, kde jsou údolí anebo kopce, bude křivost nenulová. Největší bude na ostrých špičkách hor, tedy tam, kde je povrch nejméně plochý neboli nejvíce zakřivený. Pomocí Riemannovy teorie lze popsat libovolný tvar zakřivených prostorů ve třech i čtyřech dimenzích.

S velkým úsilím, a za pomoci přátel zběhlejších v matematice, se Einstein naučil Riemannovu matematiku. A napsal rovnici, kde je křivost R úměrná energii hmoty. Řečeno slovy: prostoročas se více zakřivuje tam, kde je více hmoty. To je všechno. Einsteinova rovnice se velmi podobá Maxwellovým rovnicím, jenom se místo elektromagnetismu týká gravitace. Rovnici lze napsat na půl řádku. Nic už není třeba dodávat. Vize – že prostor se zakřivuje – byla vtělena do rovnice.

Ale v této jediné rovnici se nachází celý aktivní vesmír. Právě zde se otevírá doslova magické bohatství teorie, z níž záhy vyplynul fantasmagorický sled předpovědí, které vypadaly jako delirické blouznění šilence, ale které se všechny postupně prokázaly. Ještě kolem roku 1980 skoro nikdo nebral většinu z těchto fantastických předpovědí úplně vážně. A přesto se jedna po druhé experimentálně potvrdily. Podívejme se na pár z nich.

Začněme tím, že Einstein spočítal, jaký vliv má hmota Slunce na zakřivení prostoru kolem něj, a stanovil, jaký vliv má toto zakřivení na pohyby planet. Zjistil, že planety se v podstatě řídí Keplerovými a Newtonovými rovnicemi. Ale ne úplně přesně: v blízkosti Slunce je efekt zakřivení prostoru silnější a předpovědi se více liší od popisu pomocí Newtonových sil. Einstein spočítal dráhu Merkura, planety obíhající nejbližší Slunci, pro kterou je rozpor mezi jeho novou a Newtonovou teorií největší. Zjistil měřitelnou odchylku: bod, kde je Merkur na své eliptické dráze Slunci nejbližší, se oproti newtonovské předpovědi každým rokem posouvá o 0,43 úhlové sekundy. Je to nepatrná odchylka, ale astronomové ji dokážou změřit. Srovnání Einsteinovy předpovědi s astronomickým pozorováním dává jednoznačný a nezpochybnitelný verdikt: Merkur obíhá po trajektorii předpovězené Einsteinem,



Obr. 3.8: Dvojčata prožila svůj život v různých nadmořských výškách, jedno u moře a druhé na horách. Když se znovu setkají, bude to z hor starší. Jedná se o takzvanou gravitační dilataci času.

nikoli po trajektorii předpovězené Newtonem. Merkur, rychlý posel bohů, bůh s okřídlenými sandály, poslouchá Einsteina, nikoli Newtona.

Einsteinovy rovnice také popisují, jak se prostor zakřivuje blízko každé hvězdy. Díky tomuto zakřivení se světelné paprsky ohýbají. Einstein předpověděl, že i Slunce způsobuje ohyb světla ve svém okolí. V roce 1919 byla provedena měření: ohyb světelných paprsků byl prokázán a hodnoty plně souhlasily s Einsteinovou předpovědí.

Nezakřivuje se však jenom prostor. Čas také. Einstein předpověděl, že čas na Zemi plyne rychleji ve vyšších nadmořských výškách nežli v nižších. Efekt byl změřen, a i v tomto případě se prokázala správnost předpovědi. Dnes máme v mnoha laboratořích k dispozici nesmírně přesné hodiny a dokážeme tento prapodivný jev změřit dokonce na vzdálenost jen několika centimetrů. Dejte své hodinky na podlahu a stejné dejte na stůl. Pro ty na

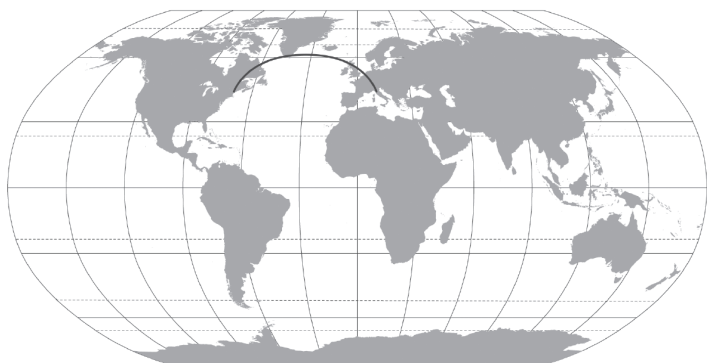
podlaze poplyne čas pomaleji než pro ty na stole. Proč? To proto, že čas není univerzální a neměnný. Je to cosi, co se natahuje anebo zkracuje, podle toho, kolik se v okolí nachází hmoty. Země jako každá jiná hmota deformuje prostoročas, a tím zpomaluje chod času v jejím blízkém okolí. Sice jenom nepatrně – ale dvojčata, z nichž jedno by žilo na úrovni moře, zatímco druhé nahoře v kopcích, by opravdu stárла jiným tempem. Kdyby se znova potkala, to druhé by bylo starší než první (obr. 3.8).

Tento jev nabízí zajímavé vysvětlení, jak věci padají na zem. Podíváte-li se na mapu světa a na dráhu letadla třeba z Říma do New Yorku, vůbec nevypadá jako přímka: je to oblouk vyklenutý více na sever. Proč? Protože povrch Země je zakřivený, rovnoběžky, které jsou blíže severnímu pólu, jsou kratší. Čím jste severněji, tím kratší je vzdálenost mezi poledníky. Takže chcete-li si zkrátit cestu, je výhodné vydat se víc na sever (obr. 3.9).

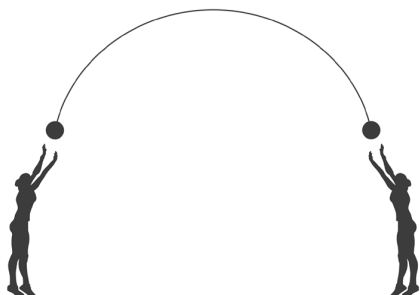
Nuže, ať už mi to uvěříte, nebo ne, míč vyhozený do výšky padá zpátky na zem ze stejného důvodu. Stoupáním vzhůru totiž „získává čas“, protože nahoře plyne jinak. V obou případech sleduje letadlo i míč přímou trajektorii v prostoru (či prostoročase), který je zakřivený (obr. 3.10).*

Předpovědi teorie však jdou mnohem dál za rámec těchto nepatrných efektů. Hvězdy svítí, dokud mají dostatek vodíkového paliva. Pak zahynou. Tlak způsobený teplem se sníží a přestane držet zbylý materiál hvězdy,

* Letadlo i míč se pohybují po takzvané geodetice v zakřiveném prostoru. V případě míče je geometrie přibližně dána metrikou $ds^2 = (1 - 2\Phi(x)) dt^2 - dx^2$, kde $\Phi(x)$ je Newtonův gravitační potenciál. Působení gravitačního pole se zde redukuje na časovou dilataci ve vyšších výškách. Čtenář obeznámený s teorií relativity si všimne podivuhodné změny znaménka: skutečná fyzikální trajektorie maximalizuje vlastní čas.



Obr. 3.9: Čím více na sever se vydáte, tím kratší je vzdálenost mezi poledníky.



Obr. 3.10: Čím výše něco je, tím rychleji pro to plyne čas.

která se svou vlastní váhou gravitačně zhroutí. Když se to stane dostatečně hmotné hvězdě, je její váha tak obrovská, hmota stlačena tak hodně a prostor zdeformován tak silně, že se doslova propadne do díry, kterou utvoří. Do černé díry.

Když jsem studoval univerzitu, černé díry byly pokládány za nepřilíš důvěryhodný důsledek ezoterické teorie. Dnes jich pozorujeme stovky a astronomové je podrobně

studují. Jedna z těchto černých děr o hmotnosti řádově milionu Sluncí se nachází přímo ve středu naší vlastní Galaxie – můžeme přímo sledovat pohyby hvězd, které kolem ní obíhají. A ty, které se dostanou příliš blízko, jsou zničeny silnou gravitací.

Teorie navíc předpovídá, že prostor se vlní jako hladina moře a že tyto vlny se v leccems podobají elektromagnetickým vlnám, díky nimž funguje například televize. Následky těchto „gravitačních vln“ můžeme na obloze sledovat u dvojhvězdných systémů: vyzařováním gravitačních vln ztrácejí energii a obě hvězdy se k sobě pomalu spirálovitě blíží.* Gravitační vlny generované srážkou a splynutím dvou velkých černých děr byly poprvé přímo pozorovány detektorem na Zemi v září roku 2015 a oznámení tohoto historického objevu na jaře 2016 opět vyrazilo lidem dech. Znova se totiž přesně potvrdila další ze zdánlivě bláznivých předpovědí Einsteinovy teorie.

A k tomu ještě teorie předpovídá, že se celý vesmír rozpíná a že se před 14 miliardami let vynořil z gigantické kosmické exploze. Tohle téma za chvíli probereme podrobněji.

Celá tato bohatá a složitá plejáda jevů – ohyb paprsků světla, modifikace Newtonovy síly, zpomalování chodu hodin, černé díry, gravitační vlny, rozpínání vesmíru, velký třesk – vyplynula z pochopení skutečnosti, že prostor není jen nějaký netečný kontejner, ale že je obdařen vlastní dynamikou, svou vlastní „fyzikou“, tak jako hmota a jiná pole. Demokritos by se bezpochyby radostně usmíval, kdyby mohl vidět, že jeho idea prostoru

* Sledování binárního systému PSR B1913+16 prokázalo, že obě kolem sebe obíhající hvězdy vyzařují gravitační vlny. Toto pozorování vyneslo v roce 1993 Russellu Hulseovi a Josephu Taylorovi Nobelovu cenu.

bude mít tak impozantní budoucnost. Je pravda, že prostor označil za „nebytí“, ale „bytím“ (δέν) myslel hmotu. A napsal, že jeho nebytí, prázdnota, nicméně „má určitou fyziku“ (φύσιν) a svou vlastní hmatatelnost.* Měl hlubokou pravdu.

Bez pojmu pole, který zavedl Faraday, bez spektakulárních schopností matematiky, bez Gaussovy a Riemannovy geometrie, by tato „určitá fyzika“ zůstala zcela nepochopitelná. Vyzbrojen novými koncepčními nástroji a matematikou Einstein vytvořil rovnice, jež popisují Demokritovou prázdnotu, a zjistil, že její „určitá fyzika“ plodí barvitý a ohromující svět, kde explodují vesmíry, prostor se hroutí do bezedných děr, čas zpomaluje svůj běh v blízkosti planet a nezměrné rozlohy mezihvězdného prostoru se vlní a houpou jako hladina oceánu...

To vše zní jako příběh vyprávěný idiotem, plný rámusu a běsnění, které nic neznamená. A přesto je to naopak pohlednutí směrem ke skutečné realitě. Anebo spíše zahlédnutí reality, kterou nyní vidíme o trochu odhalenější než v našem banálním každodenním životě. Reality, která se zdá být utvořena ze stejné substance jako naše sny, ale která je nicméně mnohem skutečnější než naše zastřené denní fantazie.

A tohle všechno je jenom důsledek elementární intuice, že prostoročas a gravitační pole jsou jedno a totéž. A prostá rovnice. Nemohu odolat, abych ji zde nenapsal, přestože sami ji téměř jistě nedokážete rozluštit. Ale i tak snad někdo ocení její nádhernou jednoduchost:

$$R_{ab} - \frac{1}{2} R g_{ab} + \Lambda g_{ab} = 8\pi G T_{ab}.$$

* Plútarchos, *Adversus colotem*, 4, 1108. Slovo φύσιν znamená „podstata“ a má též význam „povaha něčeho“.

V roce 1915 byla tato rovnice dokonce ještě jednodušší, protože člen „ Λg_{ab} “ dosud neexistoval. Einstein ho doplnil až dva roky poté (a ještě o něm budeme mluvit).^{*} Veličina R_{ab} závisí na Riemannově tenzoru křivosti a spolu s $\frac{1}{2}R g_{ab}$ představuje zakřivení prostoročasu. Veličina T_{ab} vyjadřuje energii hmoty, G je stejná konstanta, jakou pro gravitaci našel Newton a která určuje velikost gravitační síly.

Toť ono. Vize a rovnice.

Matematika, nebo fyzika?

Než budeme pokračovat fyzikou, rád bych se teď na chvíli zastavil a učinil několik poznámek týkajících se matematiky. Einstein nebyl velký matematik. S matematikou docela zápasil. Sám to o sobě říkal. V roce 1943 takto odpověděl devítileté dívce jménem Barbara, která mu napsala dopis o svých potížích s matematikou: „Netrap se, že máš s matematikou potíže, mohu tě ujistit, že moje problémy s ní jsou ještě mnohem závažnější!“² Může to znít jako vtip, ale Einstein si nedělal legraci. S matematikou často potřeboval pomoci: nechal si ji vysvětlovat od trpělivých spolužáků a přátel, jako byl Marcel Grossmann. Úžasná byla zejména jeho fyzikální intuice.

Během posledního roku, kdy dokončoval budování své teorie, Einstein zjistil, že soutěží s Davidem Hilbertem, jedním z největších matematiků všech dob. Einstein v Göttingenu pronesl přednášku, které se Hilbert

^{*} Tento člen se nazývá „kosmologický“, protože se projevuje pouze na extrémně velkých, tedy kosmologických, vzdálenostech. Konstanta Λ se nazývá „kosmologická konstanta“ a její nenulová hodnota byla změřena koncem minulého tisíciletí. Astronomové Saul Perlmutter, Brian P. Schmidt a Adam G. Riess za to získali v roce 2011 Nobelovu cenu.