

# 1,000 000 000 000 000 858

## Relativistický Bolt

Kromě obvyklé fotbalové výstroje jsem ten rok dostal pod stromeček něco zcela neobvyklého. Byl to *slovník* – jeden z těch klasických Collinsových slovníků, za nímž by se člověk mohl schovat, kdyby potřeboval. Není mi zcela jasné, co to rodiče napadlo, koupit desetiletému synovi slovník, když jsem – v té době – projevoval o slovní zásobu minimální zájem. Tou dobou jsem se vášnivě zajímal o dvě věci: o fotbalový klub Liverpool a o matematiku. Pokud si rodiče mysleli, že jejich dárek rozšíří obzory mého zájmu, velice se mýlili. Zvažoval jsem, co s novým dárkem provedu, a usoudil, že by mohl posloužit aspoň k informacím o obrovských číslech. Nejprve jsem vyhledal „bilion“, pak „trilion“ a zanedlouho jsem objevil „kvadrilion“. Pokračoval jsem v hledání a našel úžasný „centilion“. Šest set nul! To všechno se ovšem týkalo staré britské číselné soustavy, než jsme přešli na „zkrácený“ systém. Dneska má centilion ubohých 303 nul a bilion jich má jen devět místo dvanácti.\*

Tím to ovšem končilo. Slovník neobsahoval ani googolplex, ani Grahamovo číslo, natož TREE(3). Tenkrát bych ta monstra miloval. Fantastická čísla jako tahle vás mohou dovést na samou hranici fyzikálního bádání, k objevu fundamentálních zákonů ovládajících naši realitu. Ale naše cesta začne jiným „velkým“ číslem, které rovněž v Collinsovi nebylo, a sice číslem 1,000 000 000 000 000 858.

Předpokládám, že jste zklamaní. Slíbil jsem vám numerické obry, ale k nim má tohle číslo hodně daleko. Dokonce i lovci z kmene Pirahã v amazonském deštném pralese dokážou uvést číslo větší a to jejich číselný systém obsahuje jenom *hoi* (jedna), *hoi* (dvě) a *baagiso* (mnoho). A jako by toho nebylo dost, není to dokonce ani pohledné nebo elegantní číslo, jako jsou třeba  $\pi$  nebo odmocnina ze dvou. Je zajímavé, jak nezajímavé se tohle číslo jeví.

---

\* *Zkrácený systém* (short scale) má jiné hodnoty pro stejná jména, jež užíváme my: např. současný britský bilion je naše miliarda (9 nul), britský trilion je náš bilion (12 nul). Pozn. překl.

## FANTASTICKÁ ČÍSLA A KDE JE NALÉZT

To všechno je pravda, ale jen do okamžiku, kdy začneme přemýšlet o základních vlastnostech času a prostoru a extrémních případech lidské interakce s nimi. Mluvíme o tomto čísle, protože je to svým způsobem rekordní číslo, pokud jde o možnost našich fyzických sil měnit vlastnosti času. Šestnáctého srpna 2009 jamajský sprinter Usain Bolt dokázal zpomalit chod svých hodin 1,000 000 000 000 858krát. Žádné jiné lidské bytosti se nikdy nepodařilo tak výrazně zpomalit čas, tedy bez pomoci nějakých strojů. Můžete si tu událost pamatovat i jinak: jako okamžik, kdy byl na mistrovství světa v Berlíně překonán světový rekord běhu na 100 metrů. Mezi návštěvníky závodu seděli na tribuně i Wellesley a Jennifer Boltovi, jejichž syn dosáhl mezi 60. a 80. metrem závodní dráhy rychlosti 12,42 m/s. Každá sekunda, kterou vnímal jejich syn na tomto úseku dráhy, trvala pro jeho rodiče o něco málo déle – přesně vzato, trvala 1,000 000 000 000 858 s.

Abychom pochopili, jak se Boltovi podařilo zpomalit čas, potřebujeme ho urychlit na rychlost světla. Potřebujeme zjistit, co by se stalo, kdyby se mu to podařilo. Takové úvaze říkáme „myšlený experiment“, ale nezapomeňte, že Bolt překonal tři světové rekordy na pekingské olympiádě, kde se živil kuřecími nugety. Takže si představte, co by dokázal, kdyby se stravoval pořádně!

Aby měl Bolt možnost světlo dohonit, musíme předpokládat, že se světlo pohybuje konečnou rychlostí. To ovšem není vůbec samozřejmé. Když jsem řekl své dceři, že světlo odražené od její knížky nedopadne do jejích očí okamžitě, přijala to s velkou nedůvěrou a trvala na provedení experimentu, který odhalí, jestli mám pravdu. Na mě jdou obvykle mdloby, když se k experimentu jen přiblížím, ale zdá se, že dcera je založená praktičtěji než já. Navrhla následující experiment: já zhasnu, a až zase rozsvítím, bude počítat, jak dlouho to trvá, než světlo uvidí. Je to přesně týž experiment, jaký provedl Galileo se svým asistentem před čtyřmi sty lety s použitím zakrytých luceren. Podobně jako moje dcera dospěl i Galileo k závěru, že k němu světlo dorazilo „když ne okamžitě ... tak mimořádně rychle“. Rychle, ale konečnou rychlostí.

V polovině devatenáctého století se fyzici – kupříkladu Francouz s nádherným jménem Hippolyte Fizeau – začali přibližovat k určení docela přesné (a konečné) hodnoty rychlosti světla. Nicméně abychom dobře pochopili, co to znamená dohonit světlo, musíme se nejdříve seznámit s pozoruhodnou prací skotského fyzika Jamese Clerka Maxwella. Zároveň to bude skvělá ilustrace propojení matematiky a fyziky.

Když se Maxwell zabýval elektřinou a magnetismem, existovaly už náznaky, že oba tyto jevy jsou vlastně jen dvě strany téže mince. Tak kupř. Michael Faraday, jeden z nevlivnějších anglických vědců, přestože neměl žádné formální vzdělání,

už předtím objevil zákon elektromagnetické indukce, když demonstroval, že proměnné magnetické pole vytváří ve vodiči elektrický proud. Francouzský fyzik André Marie Ampère rovněž ukázal na spojitost těchto dvou veličin. Maxwell vyšel z těchto prací a odpovídajících rovnic a snažil se je matematicky přesně zformulovat. Ale všiml si nekonzistence – Ampèrův zákon se vymykal zákonům diferenciálního počtu, kdykoliv byl přítomen proměnlivý elektrický proud. Maxwell vyšel z analogie s rovnicemi pro proudění vody a navrhl vylepšení toho, co zjistili Ampère a Faraday. Matematické úvahy ho dovedly k objevu chybějících kousků elektromagnetické skládačky a vznikl obraz teorie nevidané krásy a elegance. A právě strategie, již použil Maxwell, slouží teoretikům k tomu, aby posunuli hranice fyziky v 21. století.

Když Maxwell vytvořil matematicky konzistentní teorii sjednocující elektřinu a magnetismus, všiml si čehosi pozoruhodného. Jeho nové rovnice měly řešení v podobě *elektromagnetických vln*, v nichž elektrické pole kmitá v jednom směru a magnetické pole kmitá v druhém směru. Abychom pochopili, co Maxwell objevil, představme si, že se potápíme v moři a vidíme dva mořské hady, jak míří přímo k nám. Plují podél jedné přímký, přitom „elektrický“ had se vlní nahoru a dolů a „magnetický“ vlevo a vpravo. A aby to bylo ještě horší, upalují si k nám rychlostí 310 740 000 m/s. Poslední část této analogie zní nejhroživěji a je zároveň tím nejpozoruhodnějším Maxwellovým objevem. Tahle rychlost – 310 740 000 m/s – prostě vyskočila z jeho rovnic jako matematický čertík z krabičky. Kupodivu byla tato cifra velice blízká odhadům *rychlosti světla*, kterou měřili Fizeau a další. Musíme si uvědomit, že tou dobou nikdo neměl ani ponětí, že by elektřina a magnetismus mohly mít něco společného se světlem, a najednou tu byly elektromagnetické vlny, které se šířily touž rychlostí jako světlo. Moderní měření rychlosti světla ve vakuu udávají hodnotu 299 792 458 m/s – parametry Maxwellových rovnic jsou nyní také přesněji a zázračná shoda přetrvávala. Maxwella to přesvědčilo, že světlo a elektromagnetismus *musí být* jedno a totéž. Matematické úvahy tak Maxwella dovedly k odhalení překvapující souvislosti mezi těmito dvěma zdánlivě odlišnými jevy fyzikálního světa.

Je to ale ještě úžasnější: Maxwellovy vlny nepopisují jenom viditelné světlo. V závislosti na frekvenci oscilací – kolikrát sebou mořští hadi zavlní za sekundu –, popisují Maxwellovy rovnice i rádiové vlny, rentgenové záření nebo gama záření. A i když jsou frekvence těchto typů záření různé, rychlost, s níž se šíří prostorem, zůstávává táž. Rádiové vlny poprvé změřil německý fyzik Heinrich Hertz v roce 1887. Když se ho ptali, jaký bude mít jeho objev důsledek, Hertz skromně odpověděl: „Užitečný nebude k ničemu. Byl to jenom experiment, který dokázal,

že maestro Maxwell má pravdu.“ Samozřejmě, kdykoliv vyladíme na rádiu vyžadovanou frekvenci, připomeneme si, jak užitečný Hertzův objev byl. A i když znevažoval svou vlastní roli, Maxwella označil právem jako maestra. Maxwell byl dirigentem té nejelegantnější matematické symfonie v historii fyziky.

Předtím, než Albert Einstein od základu změnil naše chápání času a prostoru, fyzici předpokládali, že světlo ke svému šíření potřebuje nějaké médium – tak jako vlny na moři vyžadují vodu, v níž se šíří. Médium potřebné pro šíření světla se jmenovalo „světlonosný éter“. Na okamžik předpokládejme, že tento éter existuje. Kdyby Usain Bolt dosáhl rychlosti světla, musel by běžet éterem rychlostí 299 792 458 m/s. Kdyby touto rychlostí *skutečně* běžel podél světelného paprsku, *co přesně by viděl?* Světlo by se mu nevzdalovalo, takže by viděl elektromagnetickou vlnu, jak osciluje nahoru-dolů a napravo-nalevo, a přitom stojí v oceánu, aniž by se někam pohnula. (Představte si mořského hada, jak v oceánu klouže nahoru dolů a přitom stojí na místě.) Jenomže neexistuje žádný zřejmý způsob, jak přimět Maxwellovy rovnice, aby připouštěly existenci takové vlny, což znamená, že by fyzikální zákony musely být zcela odlišné, aby popsaly hyperrychlou verzi jamajského sprintera.

To je znepokojující. Když Einstein došel k tomuto závěru, uvědomil si, že s možností pohybu rychlostí světla něco nehraje. Maxwellova teorie je příliš elegantní, než aby ji bylo třeba opustit kvůli tomu, že někdo běhá moc rychle. Einstein také musel přijít na to, jak vzít v úvahu výsledek experimentu, který provedli dva Američani, Albert Michelson a Edward Morley na jaře 1887. Experiment se snažil pomocí důmyslného zařízení s několika zrcátky změřit rychlost Země vůči éteru. Měření prokazovalo, že tato rychlost je nulová. To by znamenalo, že Země – na rozdíl od všech ostatních planet naší sluneční soustavy a všech soustav vzdálenějších – se pohybuje přesně tak jako éter: *přesně stejnou rychlostí a přesně tímž směrem*. Jak se dozvíme v této knize dál, takovéto shody okolností nenastávají bez dobrého důvodu. Řešení je jednoduché: žádný éter neexistuje a maestro Maxwell má *vždycky* pravdu.

Einstein dospěl k závěru, že i když se pohybujeme různými (konstantními) rychlostmi, podoba Maxwellových zákonů – vlastně úplně všech fyzikálních zákonů – zůstává táž. Kdyby vás zavřeli do lodní kabiny, která nemá okna, neexistuje experiment, jenž by umožnil zjistit vaši absolutní rychlost, protože *nic takového jako absolutní rychlost neexistuje*. Se zrychlením je situace jiná, jak později uvidíme, ale pokud kapitán udržuje konstantní rychlost pohybu, tak ať je to 10 uzlů, 20 uzlů nebo skoro rychlost světla, ani vy ani váš experimentátor v kabině o žádném pohybu vědět nebudete. Pokud jde o Usaina Bolta, dneska víme, že jeho

honba za světlem by byla marná. Světelný paprsek by nikdy nedohonil, protože Maxwellovy zákony se nikdy nemění. Ať poběží jakkoliv rychle, světlo před ním bude prchat rychlostí 299 792 458 m/s.

Je to velice neintuitivní. Když gepard poběží po pláni rychlostí 110 km/h a Bolt ho honí rychlostí 50 km/h, naše každodenní zkušenost nás učí, že gepard bude zvyšovat svůj náskok rychlostí 60 km/h, protože jejich vzájemná (relativní) rychlost je 110 km/h – 50 km/h = 60 km/h. Když ale jde o světelný paprsek, nezáleží na tom, jak rychle Bolt běží, světelný paprsek se mu bude vždy vzdalovat rychlostí 299 792 458 m/s.<sup>1</sup> Světlo se touto rychlostí pohybuje vždy: vzhledem k africké pláni, vzhledem k Usainu Boltovi, vzhledem ke stádu prchajících antilop. Opravdu na tom nezáleží. Můžeme to shrnout do jediného tweetu:

*Rychlost světla je rychlost světla.*

Einsteinovi by se to líbilo: vždycky tvrdil, že jeho myšlenky by měly být popsány jako „teorie invariance“, což vyjadřuje jejich nejdůležitější rys: invarianci rychlosti světla a invarianci fyzikálních zákonů. Jméno pro Einsteinovu teorii vymyslel jiný německý fyzik, Alfred Bucherer, který ji nazval „teorie relativity“ – ironicky, aby práci zesměšnil. Nazýváme ji „speciální teorie relativity“, abychom zdůraznili skutečnost, že vše výše řečené platí pouze v systému, který se pohybuje rovnoměrně přímočaře, jinými slovy bez zrychlení. Pro zrychlený pohyb, jako když řidič Formule jedna šlápne na plyn, nebo když raketa odstartuje do vesmíru, potřebujeme obecnější a důmyslnější teorii – Einsteinovu *obecnou* teorii relativity. Podrobněji o ní pojednáme v příštím oddíle, kdy se ponoříme na dno Mariánského příkopu.

Prozatím se omezíme na Einsteinovu speciální teorii relativity. V našem případě tudíž předpokládáme, že Bolt, gepard, antilopa i světlo se pohybují vůči sobě konstantní rychlostí. Tyto rychlosti jsou různé, ale v čase se nemění a co je nejdůležitější, navzdory jejich rozdílnosti, každý z nich vnímá, že světlo se pohybuje rychlostí 299 792 458 m/s. Jak už jsme viděli, toto univerzální vnímání světla porušuje naši každodenní zkušenost, že relativní rychlosti získáme, když prostě jednu rychlost odečteme od druhé. To je ale jenom důsledek faktu, že nejsme přímo zvyklí cestovat po světě rychlostí blízkí se rychlosti světla. Kdyby ano, dívali bychom se na relativní rychlosti zcela jinak.

Problémem je čas.

Jde o to, že naše intuice si počíná, jako kdyby na nebi byl velký chronometr, který nám říká, kolik je hodin. Sice si to neuvědomujeme, ale jakmile začneme

## FANTASTICKÁ ČÍSLA A KDE JE NALÉZT

odečítat vzájemné rychlosti, jak nám naše zkušenost říká, přesně tento předpoklad děláme. Bohužel vás musím zklamat, ale takové hodiny jsou fikce. Neexistují. Jediné, na čem záleží, jsou hodinky na vašem zápěstí nebo na mém zápěstí anebo hodiny, které tikají na palubě Boeingu 747 letícího přes Atlantik. Každý z nás má své vlastní hodiny, svůj vlastní čas, a čas udávaný všemi těmi hodinami spolu nemusí souhlasit, zvláště když někdo tak spěchá, že letí téměř rychlostí světla.

Předpokládejme, že nastoupím do Boeingu 747. Vyletím z Manchesteru, a když budeme přelétat nad Liverpoolem, letadlo bude mít rychlost několik set kilometrů za hodinu. K mírnému podráždění spolucestujících nechám po podlaze letadla několik metrů kutálet míč. Moje sestra Susie, která náhodou bydlí v Liverpoolu, je na pláži, když jí letadlo přelétá nad hlavou. Z jejího pohledu míč cestuje mnohem dál, urazí nějakých dvě stě metrů nebo víc. To na první pohled nevyžaduje žádnou změnu běžného pojetí času. Koneckonců, letadlo míč popovezlo, takže je přirozené, že se z jejího pohledu posunul dál.

Teď ale provedme podobnou věc, ale se světlem. Položím baterku kolmo na podlahu letadla a vyšlu kužel světla kolmo na směr letu. Během velmi krátké doby světlo dorazí ke stropu letadla. Kdyby Susie viděla dovnitř, pozorovala by, že světlo se pohybuje šikmo: stoupá vzhůru ke stropu, ale zároveň také cestuje vodorovně spolu s letadlem.



**Dráha světelného paprsku, jak ji vidí Susie na pláži.**

Vzdálenost pozorovaná Susie (přepona na obrázku) je delší než svislá vzdálenost, kterou jsem naměřil já. Susie tudíž viděla, že světlo urazilo větší vzdálenost, ale přitom se pohybovalo *touž rychlostí*. Z toho plyne jediné: světlo podle Susie potřebovalo delší dobu, než dorazilo k cíli. Z jejího pohledu hodiny uvnitř letadla tikají pomaleji. Tento efekt se jmenuje *dilatace času*.

Jak výrazně se čas zpomalí, záleží na relativní rychlosti – mé rychlosti vzhledem k mé sestře, Boltovy vzhledem k jeho rodičům. Čím je relativní rychlost bližší rychlosti světla, tím víc se čas zpomaluje. Když Usain Bolt běžel v Berlíně, v nejrychlejší úseku běžel rychlostí 12,42 m/s a čas se zpomalil faktorem 1,000 000 000 000 000 858.<sup>2</sup> To je pro lidskou relativitu momentální rekord.

Zpomalení běhu času má ještě další důsledek – pomaleji stárneme. Usain Bolt během berlínského závodu zestárl o 10 femtosekund méně než všichni

ostatní na stadionu. Femtosekunda se nezdá moc dlouhá – je to jen miliontina miliardtiny sekundy ( $10^{-15}$  s) –, nicméně *zestárl méně* –, takže když se zastavil, vkročil do budoucnosti, i když jen nepatrně vzdálené. Když vám běhání nejde tak dobře a chcete zpomalit svůj čas, můžete si vzít na pomoc nějaké mechanické zařízení – pak máte naději, že dopadnete lépe. Ruský kosmonaut Gennadij Padalka strávil ve vesmíru 878 dní, 11 hodin a 31 minut – částečně na stanici Mir, částečně na Mezinárodní vesmírné stanici –, přičemž obíhal Zemi rychlostí zhruba 28 000 km/h. Během svých misí se dostal do budoucnosti posunutý o rekordních 22 milisekund ve srovnání s časem jeho rodiny na Zemi.\*

Ale nemusíte být kosmonautem, abyste si užili toto cestování časem. Taxikář, který jezdí čtyřicet let autem čtyřicet hodin týdně, bude o pár desetin mikrosekundy mladší, než kdyby měl sedavé zaměstnání. Pokud na vás milisekundy a mikrosekundy neudělaly žádný dojem, uvažte, co se stane každé bakterii, která se zúčastní plánované mise *Starshot* k Alfa Centauri. *Starshot* je projekt miliardáře a podnikatele Jurije Milnera, jenž chce postavit plachetnici poháněnou slunečním větrem, která by dokázala plout rychlostí pětiny rychlosti světla k našemu nejbližšímu hvězdnému systému Alfa Centauri vzdálenému od Země 4,37 světelného roku. Na dokončení její mise bychom tak museli čekat víc než dvacet let. Světelná plachetnice a její bakteriální černý pasažér zpomalí svůj čas natolik, že cestu absolvují za necelých devět let.

Teď jste si možná všimli něčeho podezřelého. Když neohrožená bakterie cestuje rychlostí pětiny rychlosti světla po dobu devíti let, urazí méně než dva světelné roky, tedy necelou polovinu vzdálenosti k Alfě Centauri. To samé platí o Usainu Boltovi. Řekl jsem, že běžel o 10 femtosekund kratší dobu, než bychom očekávali, což naznačuje, že běžel kratší vzdálenost. A je tomu skutečně tak. Z Boltova pohledu se dráha pohybovala vůči němu rychlostí 12,42 m/s, takže se musela zkrátit o nějakých 86 femtometrů, což je zhruba tloušťka padesáti protonů. Dalo by se dokonce tvrdit, že Bolt závod vlastně nedokončil. Pro bakterii se prostor mezi Zemí a Alfa Centauri bude velmi rychle pohybovat a díky tomu se tato vzdálenost zmenší na míň než polovinu původní vzdálenosti. Toto zkrácení vzdáleností v mezihvězdném prostoru nebo závodní dráhy v Berlíně se nazývá *kontrakce délek*. Takže během můžete nejen pomaleji stárnout, ale dokonce i zeštíhlíte. Kdybychom běželi rychlostí blízkou světlu, každému, kdo by nás pozoroval, bychom se jevíli zploštělí jako lívanec v důsledku smrštění prostoru, který v něm zaujímáme.

---

\* V tomto čísle je započítán i záporný efekt vyvolaný velkou výškou a slabou gravitací, což jsou jevy, jimiž se budeme zabývat později v této kapitole.

Je tu ale ještě něco, co by nás mělo znepokojovat. Právě jsem řekl, že závodní dráha se vzhledem k Usainu Boltovi pohybovala rychlostí 12,42 m/s. Což znamená, že stejnou rychlostí se vůči němu také pohybovali i jeho rodiče. Ale když si uvědomíme, co jsme si až doteď vysvětlili, znamená to, že jejich syn by pozoroval, že hodiny jeho rodičů se zpožďují, což je hodně podezřelé, protože jak už víme, oni zase pozorují, že se zpožďují jeho hodiny. Ve skutečnosti to ale přesně tak je: Wellesley a Jennifer vidí, že synovi plyne čas pomaleji než jim, a on vidí, že jeho rodičům plyne čas pomaleji než jemu. A to je *opravdu* divné, protože jsem řekl, že Bolt skončil závod o 10 femtosekund mladší, než kdyby byl zůstal v klidu. Nemohli bychom teď úvahu převrátit a podívat se na to z Boltova pohledu? Rodičům ubíhá čas pomaleji, takže nejsou to nakonec oni, kdo zestárne méně? Zdá se, že tu máme paradox – říká se mu *paradox dvojčat* podle příběhu, kterým se obvykle tento paradox vysvětluje. Bolt, bohužel, dvojče nemá. Nevadí. Pravda je taková, že je to Bolt, kdo zestárne méně, kdo o ten zlomek času skončí mladší. Ale proč on a ne jeho rodiče?

Abychom odpověděli na tuto otázku, musíme se zmínit o roli zrychlení. Připomínám, že všechno, co jsme si dosud říkali, platí jen tehdy, když se všichni protagonisté pohybují rovnoměrně a tedy *bez zrychlení*. Ve chvílích, kdy Bolt běží konstantní rychlostí 12,42 m/s, jsou on i jeho rodiče takzvaně *inerciální*, což je jen odborná hantýrka, kterou se chce říct, že nezrychlují – nepocítují žádnou dodatečnou sílu, která by je zrychlovala nebo zpomalovala. V každém takovém případě platí zákony speciální teorie relativity, takže Bolt vidí, že čas jeho rodičů se zpomaluje, a naopak. Jenomže Bolt neběží celý závod konstantní rychlostí: na začátku závodu se jeho rychlost zvyšuje z nuly na maximální rychlost a na konci závodu se jeho rychlost zase snižuje. V časovém intervalu, kdy se jeho pohyb zrychluje nebo zpomaluje, Bolt *není inerciální* – na rozdíl od svých rodičů. Zrychlený pohyb je pohyb zcela jiné kategorie. Kupříkladu, i když jsme zavření v lodní kabině, zcela bezpečně poznáme, když loď zrychluje, protože cítíme sílu, jež na naše tělo působí. Příliš velké zrychlení může člověka i zabít. Boltovi smrt sice nehrozila, ale jeho zrychlování a zpomalování stačilo k tomu, aby se narušila ekvivalence mezi ním a jeho rodiči. A vzniklá asymetrie je vysvětlením paradoxu: podrobnější analýza a pečlivé započtení fáze zrychlení ukáže, že to je Bolt, kdo zestárl nepatrně méně než jeho rodiče.

Je důležité si uvědomit, že nemluvíme jenom o nějakých tricích s rovnicemi. Jde o reálné efekty, které byly opakovaně *naměřeny*. Rychle se pohybující atomové hodiny skutečně tikaly pomaleji než jejich partnerské stacionární hodiny, takže „stárlly pomaleji“, stejně jako Usain Bolt v Berlíně. Jiný důkaz poskytl elementární



částice zvaná mion a její doba života. Mion je podobný elektronům, které krouží kolem atomového jádra, ale je zhruba dvěstěkrát tak hmotný a nežije ani zdaleka tak dlouho jako elektron. Asi po dvou miliontinách sekundy se rozpadá na elektron a malé neutrální částice zvané neutrino. V Brookhaven National Laboratory provedli experiment, v němž byly miony v prstenci urychlovače o obvodu 44 m urychleny na 99,94 procent rychlosti světla. Vzhledem k jejich krátké době života bychom očekávali, že se částice rozpadnou po absolvování 15 oběhů; ve skutečnosti oběhly dokola 438krát. Nebyl to důsledek toho, že by se jim prodloužila doba života – kdybychom cestovali po jejich boku, zjistili bychom, že se rozpadly za dvě miliontiny sekundy – ale také bychom zjistili, že se obvod prstence zmenšil na 1/29 původní velikosti. Mion stihne 438 oběhů, protože díky kontrakci délek obíhal mnohem menší vzdálenost.

Kontrakce délek a dilatace času nám umožňují pochopit, proč nic – ani Usain Bolt – nemůže mít větší rychlost než světlo. Jak se Bolt rychlostí přibližuje víc a víc rychlosti světla. Jeho čas se zpomaluje, až se zcela zastaví, a vzdálenost, kterou má uběhnout, se smrskne na nulu. Víc se čas už zpomalit nemůže, víc se vzdálenosti nemohou smrsknout. Už není kam běžet. Rychlost světla se zjevně stává nepřekonatelnou bariérou a jediný rozumný závěr je, že nikdo se nemůže pohybovat rychleji než světlo.

Jak Bolt zrychluje, aby dosáhl rychlosti světla, jak se snaží zrychlovat víc a víc, spotřebovává také stále víc energie. Jenomže dosažené přírůstky rychlosti jsou stále menší a menší a rychlost světla se rýsuje na obzoru jako nepřekonatelná bariéra a jeho rychlost se nakonec téměř nezvětšuje a zrychlení klesá k nule. Čím více se rychlosti světla blíží, tím větší úsilí to vyžaduje. Jeho *setrvačnost* – vlastnost každého objektu bránit se zrychlení – je větší a větší a roste nade všechny meze. To je ten problém při zrychlení až na rychlost světla: setrvačnost roste do nekonečna.

Ale *kde* se ta setrvačnost bere? Jediné, co Bolt do běhu investuje je jeho energie, takže ta musí být zdrojem jeho rostoucí setrvačnosti. Energie se nikdy neztrácí, jen mění svou podobu, když se mění z jedné formy na druhou. Takže setrvačnost musí být formou energie a musí tomu tak být, *i když je Bolt v klidu*. Skvělé na tom je, že pro Bolta v klidu víme přesně, čemu se jeho setrvačnost rovná: je to jeho hmotnost, protože čím je těžší, tím obtížnější je se hýbat. Hmotnost a energie jsou jedno a totéž, neboli jak to napsal Einstein:  $E = mc^2$ .<sup>3</sup> Je až děsivé, kolik energie ( $E$ ) je obsaženo v hmotnosti ( $m$ ) v důsledku obrovské velikosti rychlosti světla ( $c$ ). Usain Bolt váží v klidu kolem 95 kg, a kdybychom veškerou tuto hmotnost převedli na energii, obdržíme energii 2 miliardy tun TNT. To je víc než sto tisíckrát energie bomby svržené na Hirošimu.

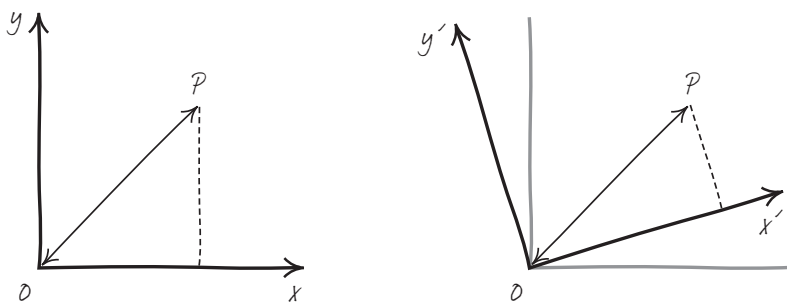
## FANTASTICKÁ ČÍSLA A KDE JE NALÉZT

Teď se podívejme na prostoročas.

Počkat! Jaký prostoročas? Kde ten se tady vzal? Vlastně jsme o něm mluvili v jednom kuse. Kontrakce délek. Dilatace času. Ve všem, o čem jsme mluvili, se čas a prostor zároveň natahují a zkracují v dokonalé shodě. Takže se nelze divit, že jsou vlastně propojeny, že jsou součástí nějakého většího celku. Prvním, kdo vykročil do prostoročasu, byl polsko-litevský matematik Hermann Minkowski, kterého k tomu přivedly Einsteinovy představy. „Samotný prostor a samotný čas,“ prohlásil, „se změnilý jen v pouhé stíny a jenom jejich určité propojení je plnohodnotnou existencí.“ Svět je malý – Minkowski kdysi učil mladého Einsteina na technice v Curychu. Zapamatoval si ho však jako „lenocha“, kterého „matematika nijak nezajímala“.

Co Minkowski vlastně nazýval prostoročasem? Abychom to pochopili, musíme začít se třemi rozměry prostoru. Existují tři prostorové dimenze, protože potřebujete tři nezávislé souřadnice, abyste určili svou polohu v prostoru – mohou to být třeba dvě souřadnice GPS plus nadmořská výška. Teď se podívejme na hodinky a všimněme si času. Počkejme 30 sekund a podívejme se znova. Ty dva okamžiky se odehrály v téměř bodě prostoru, ale v různých okamžicích. Obě události můžeme od sebe odlišit, když jim přiřadíme čas, kdy k nim došlo. Takže se objevila čtvrtá nezávislá souřadnice – čtvrtý rozměr. Když dáme všechny rozměry dohromady, máme prostoročas.

Abychom plně docenili eleganci prostoročasu, musíme si uvědomit, jak měříme vzdálenosti – nejdříve ty v prostoru a pak v prostoročase. Vzdálenosti v prostoru lze měřit pomocí Pythagorovy věty. Nejspíš se na ni pamatujete ze školy, když se mluvilo o pravoúhlém trojúhelníku – čtverec nad předponou je roven součtu čtverců nad odvěsnami. Ale na tomto prastarém teorému je víc, než se na první pohled zdá. Abychom si to uvědomili, namalujme nejprve dvojici vzájemně kolmých os, jako na levém obrázku níže.



Vzhledem k těmto osám má bod P souřadnice  $(x, y)$  a podle Pythagora je jejich vzdálenost od počátku rovna  $d = \sqrt{x^2 + y^2}$ . Když osy pootočíme kolem počátku O, jak je ukázáno napravo, a definujeme dvě nové souřadnice  $(x', y')$ , vzdálenost od počátku zůstává zjevně nezměněná a Pythagorova věta funguje stejně dobře jako předtím

$$d^2 = x^2 + y^2 = x'^2 + y'^2$$

To je krásná vlastnost Pythagorova teorému: zůstává beze změny, i když pootočíme souřadný systém.

Zpátky k prostoročasu. Minkowski nám poradil, abychom propojili prostor a čas. Samozřejmě, ve skutečnosti potřebujeme propojit tři dimenze prostoru s časem, ale pro jednoduchost vezmeme jen jeden prostorový rozměr, jehož souřadnici označíme  $x$ , a ten propojíme s časem  $t$ . Ke změření vzdálenosti  $d$  v tomto prostoročase Minkowski navrhl podivnou formu Pythagorovy věty, a sice

$$d^2 = c^2t^2 - x^2.$$

K tomu „–“ se vrátíme za chvíli, nejdříve něco k výrazu  $c^2t^2$ . Chceme měřit vzdálenost, ale – jak všichni víme – čas není vzdálenost. Abychom z něj udělali veličinu s rozměrem délky, potřebujeme ho vynásobit rychlostí, a co může být lepší než rychlost světla? Pak  $c^2t^2$  můžeme považovat za čtverec vzdálenosti, což je přesně veličina vhodná pro Pythagorovu větu. Takže teď ke znaménku mínus. Měření vzdálenosti v prostoročase by mělo zůstat beze změny při transformaci, jež je analogická prostorové rotaci: je to transformace, která spojí pozorování dvou pozorovatelů, kteří se vůči sobě pohybují. Jako když jsme přešli od rodičů Usaina Bolta k jejich synovi. Tyto rotace se nazývají *Lorentzovy transformace* a mají v sobě zabudováno prodlužování času a zkracování délek, díky kterým je teorie relativity tak nádherně bizarní. To záhadné znaménko mínus je zásadně důležité, chceme-li, aby prostoročasové intervaly zůstávaly beze změny při přechodu mezi inerciálními pozorovateli, kteří se vůči sobě pohybují. Možná nejjednodušeji se tato vlastnost ukazuje na světle, které se pohybuje prostorem rychlostí  $c=x/t$ . Když to dosadíme do Minkovského předpisu,<sup>4</sup> uvidíme, že světlo má nulovou vzdálenost od počátku. Počátek zůstává při všech „rotacích“ prostoročasových souřadnic na místě, takže světlo se jeví všem pozorovatelům stejně. Nic se prostorem nepohybuje rychleji než světlo, ale v prostoročase se světlo nepohybuje vůbec. Proto je tak speciální.

A co vy? Co vy právě děláte v prostoročase? Předpokládám, že někde pohodlně sedíte a čtete tuto knihu. Ale ať už děláte cokoli, víme, že se nepohybujete v prostoru, který by byl definován vzhledem k vám, ale pohybujete se v čase, takže se pohybujete v prostoročase. Jak rychle se pohybujete? Když použijeme definici vzdálenosti v prostoročase a položíme  $x = 0$ , dostáváme  $d = \sqrt{c^2 t^2}$ , z čehož se dá snadno vidět, že se pohybujete prostoročasem rychlostí  $d/t = c$ . Jinými slovy pohybujete se prostoročasem rychlostí světla. Stejně jako každý jiný.

Když Minkowski zkombinoval své prostoročasové souřadnice se vzorcem pro prostoročasovou vzdálenost, začal budovat pozoruhodně elegantní obraz fyziky jazykem čtyřrozměrné geometrie. Když jsou v tomto novém jazyce napsány Maxwellovy rovnice, mají neobyčejně jednoduchý tvar. Když uvažujeme prostor a čas odděleně, je to jako pohlížet na svět skrz mlhu. Jakmile jsou prostor a čas pohromadě, objeví se svět vynikající svou jednoduchostí a krásou. Právě pro tohle je teoretická fyzika takový úžasný obor: čím lépe mu porozumíte, tím je jednodušší. Možná nejzřetelnějším příkladem je, jak Einstein s využitím geometrie zvítězil nad gravitační silou, a ukázal, že gravitace je jen fiktivní síla. Tenhle příběh přijde vzápětí, a jako obvykle bude vyloženo pomocí zpomalování času. Nebudeme ale běhat s Usainem Boltem nebo plout vesmírem jako Gennadij Padalka. Vydáme se k centru Země, kde čas tiká o něco pomaleji než na zemském povrchu.

### Prohlubeň Challenger

„Víc než co jiného doléhá na člověka pocit izolace, vědomí, jak je nepatrný v tom obrovském, černém, neznámém a neprozkoumaném místě.“

To jsou slova kanadského filmového režiséra Jamese Camerona. Prozrazují očividný pocit strachu z vědomí, že už není pánem situace, že je vydán na milost a nemilost něčemu mocnějšímu. Mohly by být klidně napsány ve scénáři jeho nejslavnějšího filmu *Titanic*, ale ve skutečnosti tím Cameron vyjádřil pocity po návratu z výpravy do prohlubně Challenger, do nejhlubšího známého bodu na Zemi na dně Mariánského příkopu ležícího téměř 11 km pod hladinou. Cameron tam sestoupil 26. března 2012 na palubě hlubinné ponorky *Deepsea Challenger* a tři hodiny tam zkoumal tamní neznámý svět, zcela sám uprostřed nejnepřátelštějšího prostředí na celé planetě.

Cameron byl prvním člověkem, jenž se ponořil takhle hluboko po výpravě amerického námořnictva před padesáti lety, a byl první, kdo se ponořil sám. Ale možná tím nejzajímavějším faktem této výpravy je skutečnost, že když se vynořil na povrch, poskočil v čase o 13 nanosekund.