

Pedro G. Ferreira

Nádherná teorie

Sto let
obecné teorie relativity

VYŠEHRA D

The Perfect Theory
Copyright © Pedro G. Ferreira 2014
Translation © Jifi Langer 2015

ISBN 978-80-7429-532-4

Obsah

Prolog 9

1. Jaké to je volně padat 17
2. Nejcennější objev 29
3. Správná matematika, ohavná fyzika 46
4. Kolabující hvězdy 66
5. Zcela bláznivý Einstein? 86
6. Dny rádia 105
7. Wheelerovštiny 120
8. Singularity 140
9. Útrapy se sjednocením 160
10. Vidět gravitaci 177
11. Temný vesmír 198
12. Konec prostoročasu 219
13. Působivá extrapolace 235
14. K něčemu dojde 250

Poděkování 265

Poznámky 267

Literatura 291

Ediční poznámka 306

Jmenný rejstřík 307

Kapitola 2.

Nejcennější objev

ALBERT EINSTEIN se jednou svěčil Ottu Sternovi, svému příteli a kolegovi: „Víte, jakmile začnete počítat, dříve než si to uvědomíte, beznadějně se do toho zahrabete.“ Ne, že by neznal matematiku poměrně dobře. Ve škole v ní exceloval a ovládal ji jistě natolik, aby uměl své myšlenky matematicky vyjádřit. V jeho člancích byla fyzikální argumentace dokonale vyvážená s matematickým formalismem, který dával jeho myšlenkám jasnou formu. Ale předpovědi důsledků jeho zobecněné teorie byly matematicky nedotažené – jeden z jeho curyšských profesorů popsal jeho argumentaci jako „matematicky neobratnou“. Einstein matematikou jakoby trochu pohrdal, říkal, že je to „nadbytečné vzdělání“ a vyslovoval poznámky jako: „Od té doby, co se na mou teorii vrhli matematici, jí nerozumím ani já sám.“ Ale v roce 1911, když se znovu vrátil k myšlenkám o gravitaci, uvědomil si, že potřebuje právě matematiku, aby se pohnul trochu dále.

Zamyslel se nad svým principem relativity a vrátil se k účinku světla na gravitaci. Představme si, že letíme prostorem v kosmické lodi, daleko od všech planet i hvězd. Okénkem na pravoboku vnika do lodi světelný paprsek ze vzdálené hvězdy, proletí lodí a opouští ji okénkem na levoboku. Představme si dále, že v lodi jsou sedačky jako v letadle. Je-li loď vzhledem ke vzdáleným hvězdám v klidu, paprsek ji opouští okénkem ve stejné řadě, jako je to, kterým do kabiny vnikl. Jestliže ovšem loď letí velkou rychlostí, paprsek opouští kabinu okénkem o jednu či více řad dále k zádi lodi, protože během doby, kterou potřeboval k průletu kabinou, se loď o kus posunula. Paprsek bude vnikat do okénka

pod určitým úhlem. Když je ale rychlost lodi neměnná, pod stejným úhlem se bude šířit kabinou a pod tímž úhlem bude loď opouštět. Pozorovatelům v lodi se paprsek bude stále jevit jako přímka. Jiné to je, když se loď během průletu paprsku *zrychluje*. Paprsek se v tom případě dostane až ke vzdálenějšímu okénku a pozorovatelům v kabině se bude jevit *zakřivený*.

A zde se projevil Einsteinův úžasný vhled do povahy gravitace. Pozorovatelé v kosmické lodi, která se urychluje vzhledem k inerciálnímu systému, budou pociťovat přesně totéž co pozorovatelé v lodi, v níž směrem k zádi působí odpovídající gravitační síla. Jak si Einstein uvědomil, na té nejjednodušší úrovni se nedá odlišit gravitace od vlivu zrychlení neinerciálního systému. Kosmonaut sedící v kosmické lodi, jež přistála na povrchu planety, na kterou díky její gravitaci padají předměty s určitým zrychlením, bude pociťovat totéž, co cítí, když loď letí širým prostorem daleko od gravitaci budících těles, jestliže loď zapnula tryskový pohon a zrychluje se. A také šíření paprsku lodí bude v obojím případě vypadat stejně. Gravitace tedy ohýbá světelný paprsek podobně, jako to dělá čočka.

Aby byl ovšem gravitační ohyb světla pozorovatelný, musí být gravitace opravdu silná – gravitační pole na povrchu planety na měřitelný efekt nestačí. Einstein navrhl jednoduchý pozorovací test, využívající mnohem masivnějšího objektu, než je planeta. Při něm se měl měřit ohyb světelného paprsku, který se šíří od zdroje za Sluncem těsně kolem jeho okraje. Úhlová pozice vzdálených hvězd by se měla změnit o nepatrnou hodnotu, o necelou jednu úhlovou vteřinu, jestliže paprsek od hvězdy, která ho vyslala, běží těsně kolem slunečního disku. To je hodnota na hranici měřitelnosti tehdejšími přístroji. Pozorování by se muselo uskutečnit při úplném zatmění Slunce, protože jinak Slunce hvězdy ve svém okolí přezářuje, takže není šance je pozorovat.

Einstein sice vymyslel způsob, jak testovat platnost svých nových myšlenek, na cestě ke své nové teorii však zatím nedosáhl žádného podstatného pokroku. Stále ale promýšlel tutéž představu člověka padajícího volným pádem, která ho napadla ještě

na patentovém úřadě. I když ho netížily pedagogické povinnosti a mohl většinu času věnovat myšlenkovým experimentům a přemítání o nové teorii, nebyl ve svém pražském působišti šťastný. Jeho rodina se rozrostla – ještě před příchodem do Prahy se narodil syn Eduard. Mileva se však v Praze cítila nepříjemně a opuštěně, daleko od světa, kterému přivykla v Bernu a pak Curychu. A tak se Einstein v roce 1912 chopil příležitosti vrátit se do Curychu, tentokrát však na místo profesora na ETH.

BĚHEM SVÉHO POBYTU V PRAZE si Einstein uvědomil, že k vyjádření svých myšlenek potřebuje jiný jazyk, i když byl nedůvěřivý k příliš abstraktní matematice; bál se, že by mohla zatemnit jeho krásné fyzikální myšlenky. Pár týdnů po příjezdu do Curychu navštívil jednoho ze svých nejstarších přátel, matematika Marcela Grossmanna, a obrátil se na něj s prosbou: „Musíš mi pomoci, nebo se zblázním!“ Grossmann byl skeptický k lajdáckému způsobu, kterým fyzikové postupují při řešení problémů, ale svého přítele se snažil podpořit ze všech sil.

Einstein chtěl popsat co se děje, když jsou předměty urychlovány gravitací nebo když se pohybují vzhledem k urychlovanému systému. Jejich dráhy jsou zakřivené, nejsou to přímky, jako když se v inerciálním systému pohybuje bod, na který nepůsobí žádné síly. Ukazovalo se, že k popisu pohybu v zrychlených soustavách – který měl též odpovídat pohybu pod vlivem gravitace – bude třeba sáhnout k obecnější geometrii, než byla geometrie euklidovská. Grossmann dal Einsteinovi učebnici neeuklidovské neboli riemannovské geometrie.

Téměř sto let před tím, než Einstein začal přemýšlet nad zobecněním svého principu relativity, kolem roku 1820, učinil německý matematik Carl Friedrich Gauss podstatný krok k osvobození od Eukleidovy geometrie. Eukleides stanovil pravidla pro čáry a tvary v plochem prostoru. Jeho geometrii se stále učíme ve škole a víme tedy, že k dané přímce lze nějakým bodem vést právě jednu přímku, která se s danou přímkou neprotne, tedy právě jednu rovnoběžku. Víme také, že přímky se obecně protnou

právě v jednom bodě. Také si ze školy pamatujeme, že součet úhlů v trojúhelníku je 180 stupňů a že čtverec má u čtyř vrcholů čtyři pravé úhly. V této geometrii platí řada pravidel, která aplikujeme, když například rýsujeme na čtvrtce papíru nebo na tabuli, a zjišťujeme, že fungují výborně.

Co by se ale dělo, kdybychom museli pracovat na pokrouceném papíře? Co když se budeme pokoušet rýsovat geometrické obrazce na hladký fotbalový míč? Pak zjistíme, že naše prostá euklidovská pravidla neplatí. Vezměme si zeměpisný globus. Když nakreslíme kolmo k rovníku dva poledníky, měly by být rovnoběžné, neměly by se nikdy protnout. Ale víme, že se protnou na obou pólech, přestože poledník i rovník jsou v dobrém smyslu nejpřímější čáry. Můžeme si vybrat speciální poledníky – greenwichský a poledník na devadesátém stupni třeba západní délky. Ty se protnou na severním pólu pod úhlem 90 stupňů a spolu s rovníkem vytvářejí trojúhelník, u něž součet úhlů není 180, nýbrž třikrát 90, tedy 270 stupňů. Slavné pravidlo o součtu úhlů v trojúhelníku tedy také neplatí.

Ve skutečnosti každá uzavřená plocha – povrch koule, pneumatiky či preclíku – má svou vlastní geometrii, pro kterou platí vlastní pravidla. Gauss stanovil pravidla pro *každý* povrch, který si můžeme představit. Přistupoval k problému demokraticky – na všechny povrchy se musíme dívat stejným způsobem a jejich popis musí být určen nějakým obecným pravidlem. Gaussova geometrie byla účinná a obtížná. V padesátých letech devatenáctého století rozvinul Gaussovy myšlenky jiný německý matematik Bernhard Riemann a zobecnil je do více dimenzí. Vznikla složitá a náročná oblast matematiky, natolik obtížná, že i Grossmann, který ji Einsteinovi doporučil, měl pocit, že Riemann ji formuloval příliš abstraktně, než aby mohla být k praktickému užitku pro fyziku. Riemannova geometrie byla složitá, objevovala se v ní celá řada funkcí a nelineárních konstrukcí, ale skrývala veliké možnosti. Kdyby ji Einstein ovládl, mohla by mu ukázat cestu k vysněné teorii.

Proto se do ní ponořil a snažil se zvládnout tento nadějný nástroj k zobecnění teorie relativity. Stála před ním velická výzva – něco jako naučit se od základů sanskrt a hned v něm napsat román.

Počátkem roku 1913 se Einstein seznámil s novou geometrií a spolu s Grossmannem napsali dva články, které představovaly náčrt (německy *Entwurf*) nové teorie. Jednomu z kolegů tehdy Einstein řekl: „Otázka gravitace je vyjasněná k mé plné spokojenosti.“ Články byly napsány v jazyce nové matematiky, Grossmann v nich vysvětloval užitý matematický aparát pro širší obec fyziků. Einsteinovi se podařilo dát fyzikálním zákonům tvar, který zůstával stejný ve všech vztažných systémech, nejenom v systémech inerciálních. Uměl tak zapsat elektromagnetismus i Newtonovy pohybové zákony, tak jako je uměl dříve zapsat v souladu se speciálním principem relativity v inerciálních systémech. Ve skutečnosti měl úspěch se všemi zákony s *výjimkou* gravitace. Nový gravitační zákon, který Einstein s Grossmannem navrhli, stále stál stranou zákonů ostatních a obecnému principu relativity nevyhovoval. Ani s podporou nové matematiky tento pozměněný gravitační zákon nesplňoval požadavky, které Einsteinovi diktovala jeho intuice. Nicméně Einstein byl přesvědčen, že je na správné cestě a že teď už stačí jen malé úpravy, aby jeho teorie byla úplná. Byl však příliš optimistický. Konečný úsek cesty k jeho nové teorii prostoročasu nepřipomínal hladký běh, bylo na něm ještě mnoho klopýtnutí.

V ROCE 1914 se Einstein konečně usadil. Byl povolán do čela nově založeného Fyzikálního ústavu císaře Viléma v Berlíně, kde byl velmi dobře placen a neměl žádné pedagogické povinnosti. Stal se členem Pruské akademie věd a byl obklopen špičkovými fyziky, jako byli Max Planck nebo Walther Nernst. To bylo pro něj skvělé postavení, v rodinném životě však současně přišla roztržka s manželkou. Mileva už byla unavená cestováním po Evropě a zůstala s oběma syny v Curychu. Od té doby žili

rozloučení až do rozvodu v roce 1919. V témže roce se Einstein oženil se svou mladší sestřenicí Elsou Löwenthalovou, se kterou začal nový život a zůstal s ní až do její smrti v roce 1936.

Einstein přijel do Berlína na začátku první světové války a měl pocit, že je „chycen v blázinci“ německého nacionalismu. Extrémní nacionalismus ovlivňoval téměř vše. Kolegové z jeho okolí odcházeli na frontu nebo vyvíjeli nové zbraně, například obávaný hořčičný plyn – yperit. V říjnu 1914 se objevila *Výzva kulturnímu světu* jednoznačně podporující německou vládu. Podepsalo ji 93 německých vědců, spisovatelů a dalších představitelů kulturního světa a byla zamýšlená jako obrana proti údajným dezinformacím šířeným o Němcích po světě. Výzva, která vešla ve známost pod názvem *Manifest devadesáti tří*, tvrdila, že Němci nejsou zodpovědní za válku, která právě propukla. Text Manifestu se opatrně vyhýbal faktu, že Němci napadli Belgii a zničili město Lovan, a tvrdil, že „naši vojáci se nedotkli života ani majetku jediného belgického občana“. Byl to text útočný, podvrtný a z velké části nepravdivý.

Einstein byl šokován tím, co se kolem něho dělo. Jako přesvědčený pacifista a internacionalista se připojil k podpoře anti-manifestu nazvaného *Výzva Evropanům*. V něm se jeho signatáři, mezi nimi Einstein a hrstka jeho kolegů, distancovali od *Manifestu devadesáti tří*, ostře kritizovali ty, kteří ho podepsali, a vyzývali „vzdělané lidi všech států“, aby bojovali proti zuřící ničivé válce. Tato iniciativa však zůstala vcelku bez ohlasu. Pro okolní svět byl Einstein jedním z dalších z německých vědců, kteří podporují *Manifest devadesáti tří*, a tedy nepřítel. Takto se na něj dívali přinejmenším v Británii.

ANGLIČAN ARTHUR EDDINGTON proslul svými jízdami na kole na značné vzdálenosti. Svou cyklistickou vytrvalost hodnotil pomocí jím definovaného čísla *E*. Toto číslo reprezentovalo počet dní v jeho životě, kdy ujel více než *E* mil. Pochybuji, že mé číslo *E* dosahuje větší hodnoty než 5 nebo 6. Asi jsem více než šest mil za den neujel na kole víckrát než šestkrát – nic moc, já

vím. Když Eddington zemřel, jeho číslo *E* bylo 87, to znamená, že podnikl 87 jízd, při kterých najel více než 87 mil. Mimořádná životní energie a vytrvalost mu skvěle sloužily a pomohly mu dosáhnout vrcholných výsledků během celé jeho životní dráhy.

V době, kdy se Einstein úporně snažil založit svou vědeckou kariéru, se Eddington rychle dopracoval vrcholného postavení v anglické vědě. Při prosazování svých myšlenek byl někdy arogantní, pohrdavý a nepříjemně tvrdohlavý, byl ale také vytrvalým vědcem, který málokdy chyběl při některém výjimečně obtížném astronomickém pozorování a který se stále učil i té nejabstraktnější matematice. Byl vychován v hluboce věřící kvakerské rodině, od dětství mimořádně vynikal ve škole. V šestnácti letech začal studovat matematiku a fyziku v Manchesteru. Nakonec skončil v Cambridgi, kde byl studentem s nejlepšími výsledky v ročníku, jemuž se v Cambridgi říkalo *Senior Wrangler*. Když získal magisterský titul, stal se okamžitě asistentem královského astronoma a členem Trinity College v Cambridge.²

Univerzita v Cambridgi je špičková vědecká instituce a Eddington byl obklopen skvělými učiteli. Byl zde například objevitel elektronu Joseph John Thomson nebo Alfred North Whitehead a Bertrand Russell, kteří společně napsali dílo *Principia Mathematica*, jež se stalo biblí logiků. Časem přibyli Ernest Rutherford, Ralph Fowler, Paul Dirac – samé velké osobnosti fyziky dvacátého století. Eddington do této společnosti skvěle zapadal. Po několika letech, kdy působil na greenwichské observatoři v Londýně, se do Cambridge vrátil. V pouhých jednatřiceti letech zde získal prestižní plumeovskou profesuru astronomie a experimentální filosofie (tradiční název po jejím

² Titul *Senior Wrangler* lze přeložit jako „Nejlepší z diskutérů“. Název má historický původ z dob, kdy se na univerzitách vysoce cenila schopnost disputace. V Cambridgi získávají titul *Wrangler* studenti matematických disciplín, kteří dosáhli nejlepších výsledků. *Senior Wrangler* je pak nejlepší z nich.

Královský astronom, Astronomer Royal je prestižní titul udělovaný vždy jednomu vynikajícímu astronomovi. Donedávna býval *Astronomer Royal* automaticky i ředitelem greenwichské observatoře. V současné době je královským astronomem astrofyzik sir Martin Rees. Pozn. překl.

prvním držiteli v roce 1704 Johnu Plumeovi). Stal se též ředitelem cambridgeské observatoře na předměstí Cambridge, kde bydlel se svou sestrou a matkou. V následujících letech byl uznávaným vůdcem britské astronomie. V Cambridge už zůstal až do konce svých dnů. Aktivně se účastnil života kolejí s formálními večeremi a neustálými debatami, pravidelně navštěvoval zasedání Královské astronomické společnosti, kde prezentoval své výsledky, a občas cestoval do různých konců světa za účelem astronomických pozorování.

S Einsteinovými myšlenkami o gravitaci se Eddington poprvé setkal právě na jedné takové cestě. Einstein předpověděl ohyb světla a několik astronomů se této myšlenky chopilo a snažili se tento efekt změřit. Vydávali se po celé zeměkouli, do Ameriky, Ruska i Brazílie, aby zachytili úplné zatmění Slunce za podmínek umožňujících měřit malý odklon světelných paprsků od vzdálených hvězd. Během pozorování zatmění v Brazílii se Eddington s jedním z těchto astronomů setkal. Byl to Američan Charles Perrine a Eddingtona upoutalo, čím se zabývá. Po návratu do Cambridge se rozhodl, že se s Einsteinovými novými myšlenkami o gravitaci seznámí podrobněji.

Když vypukla první světová válka, Eddington byl jedním z osamocených hlasů, které odporovaly fanatickému nacionalismu, jenž se zmocňoval jeho kolegů i celé jeho vlasti. Uvádělo ho to v zoufalství. V základním časopise britských astronomů *The Observatory* vyšla řada ostrých článků od vlivných britských astronomů proti spolupráci s německými vědci. Oxfordský profesor astronomie Herbert Turner to vyjádřil velice jasně: „Můžeme Německo znovu přijmout do mezinárodního společenství a zároveň snížit naše standardy mezinárodního práva na jeho úroveň, nebo je vyloučit a standardy pozdvihnout. Třetí cesty není.“ Animosita proti všemu německému byla tak silná, že prezident Královské astronomické společnosti, který měl německé předky, byl vyzván k rezignaci. Po dobu války byly vztahy mezi britskými vědci a jejich německými kolegy zcela zmrazeny.

Eddington uvažoval a jednal jinak. Jako kvaker byl vášnivě proti válce. Během rostoucí nenávisti proti Němcům se vyjadřoval nesouhlasně. „Nemyslete na symbolického Němce, ale na svého bývalého přítele, například profesora X,“ nabádal své kolegy. „Nazývejte ho Hunem, pirátem, zabíječem dětí a snažte se myslet na něj s nenávistí. Uvidíte, jak je to absurdní.“ A nejen to. Eddington odmítal i vstoupit do armády a bojovat. Když viděl, jak někteří z jeho přátel a kolegů odpluli na pevninu na frontu a pak padli v boji, začal vést kampaň proti válce. Protože mu byla udělena výjimka na základě „národní důležitosti“ – Eddington byl pro národ důležitější jako astronom než jako infanterista – udělal si tak málo přátel.

SÁM V BERLÍNĚ, obklopen válečným zmatkem, pracoval Einstein na dokončení své teorie. Vypadala dobře, ale potřebovala ještě vylepšit po matematické stránce. Tak se vydal na univerzitu v Göttingen, tehdejší mekku moderní matematiky, aby navštívil Davida Hilberta. Hilbert byl vědecký kolos a vládl světu matematiky. Pozměnil přístup k celému oboru a snažil se položit neotřesitelné základy, ze kterých by bylo možné odvodit veškerou matematiku. V matematice by nezůstala žádná volnost, vše by se dalo odvodit ze základních principů pomocí dobře stanovených formálních pravidel. Matematické pravdy měly být *skutečnými* pravdami jen tehdy, když by byly odvozeny pomocí těchto pravidel. Tento scénář byl nazván „Hilbertův program“.

Hilbert se obklopil řadou kolegů, kteří patřili k těm nejvýznamnějším světovým matematikům. Jedním z jeho spolupracovníků byl například Hermann Minkowski, který Einsteinovi ukázal, jak se vztahy jeho speciální teorie relativity dají zapsat v mnohem elegantnějším matematickém jazyce, který však Einstein tehdy pokládal za zbytečný. (Minkowski ovšem už v roce 1909 zemřel.) Hilbertovi studenti a asistenti – jako byl Hermann Weyl, John von Neumann a Ernst Zermelo – se pak sami stali vůdčími osobnostmi matematiky dvacátého století. Hilbert se svou

skupinou v Göttingen měl ambiciózní plán: založit úplnou teorii fyzického světa na několika základních principech, podobně jako to chtěl udělat v matematice. Einsteinovo snažení pro něj představovalo integrální součást celého projektu.

Během své krátké návštěvy v Göttingen v červnu 1915 Einstein přednášel a Hilbert si dělal poznámky. Podrobně diskutovali o detailech – Einstein byl silný ve fyzice a Hilbert zase v matematice. Neudělali však žádný pokrok. Pro Einsteina, který se stále trochu bál matematiky a jehož porozumění riemannovské geometrii stále nebylo dokonalé, bylo těžké plně pochopit Hilbertovy detailní technické připomínky.

Krátce poté, co se vrátil ze zdánlivě neplodné návštěvy, začal pochybovat o své nové teorii relativity. Už věděl, že není opravdu obecná – když v roce 1913 dokončil spolu s Grossmannem články o zobecněné teorii, byl si vědom, že gravitační zákon do ní *stále* úplně nezapadá. A některé její předpovědi nebyly v pořádku. Sice předpovídala posun perihelia Merkura, ale předpověď nesouhlasila *plně* s pozorováním. Einstein se musel na své rovnice podívat znova.

Během pouhých tří neděl se rozhodl odvrhnout gravitační zákon, který s Grossmannem navrhli a který obecnému principu relativity nevyhovoval. Hledal zákon, který by platil ve všech vztažných systémech, tak jako tomu bylo s ostatními fyzikálními zákony. Při jeho formulaci chtěl vycházet z matematického aparátu riemannovské geometrie, kterou se naučil od Grossmanna. Každých pár dní pozměňoval to, co krátce před tím udělal, měnil některé předpoklady, jež měl zákon splňovat, a nahrazoval je jinými. A přitom se více a více nořil do komplikované matematiky, kterou se naučil. Zjišťoval, že i když ho zatím během jeho zářné kariéry vedla především skvělá fyzikální intuice, musí dávat pozor, aby nezastínila velké poselství, jež přinášela matematika.

Koncem listopadu 1915 najednou zjistil, že je u cíle. Konečně měl obecný zákon pro gravitaci, jenž obecnému principu relativity vyhovoval. V měřítkách sluneční soustavy dával s vysokou

přesností totéž, co Newtonova gravitační teorie, což bylo nutnou podmínkou vzhledem ke skvělé zkušenosti, kterou s newtonovskou gravitací astronomové měli. Navíc teorie až neuvěřitelně přesně předpovídala Le Verrierův posun perihelia Merkura. Také předpovídala ohyb světelných paprsků v blízkosti těžkých objektů. Ohyb však měl být dvakrát větší, než vyplývalo ze vzorce, ke kterému došel ve svých pražských úvahách.

Einsteinova úplná obecná teorie relativity nabízela zcela nový způsob chápání fyziky, který nahrazoval newtonovský pohled, jenž vládl po staletí. Podle Einsteinovy teorie byla gravitace určena sadou rovnic, jimž se říká *Einsteinovy rovnice pro gravitační pole*. Idea, která za nimi stála – propojit Gaussovu a Riemannovu geometrii s gravitací – byla velice krásná, fyzikové rádi užívají slova „elegantní“, výsledné rovnice byly ovšem ve skutečnosti značně komplikované. Bylo to deset složitě spolu svázaných nelineárních rovnic pro deset veličin, které určují geometrii prostoročasu. Nejde je proto řešit jednu po druhé pro jednotlivé veličiny, musí se řešit všechny současně. Po matematické stránce je to obecně krajně obtížná záležitost. Přesto ale tyto rovnice mnoho slibovaly – v principu měly popsat řadu procesů přírodního světa kolem nás. Mezi jejich řešeními jsou ta, jež popisují pád jablka ze stromu i pohyb planet ve sluneční soustavě. Vyřešením Einsteinových rovnic bychom se měli dozvědět mnoho o tajemstvích vesmíru.

Nové rovnice pro gravitační pole Einstein představil Pruské akademii věd v krátkém třístránkovém článku s datem 25. listopadu 1915. Jeho gravitační zákon byl zásadně odlišný od předchozích formulací. Došel k závěru, že to, co vnímáme jako pohyb pod vlivem gravitace, není v zásadě nic jiného, než pohyb v zakřivené geometrii prostoročasu, přičemž zakřivení této geometrie je vyvoláno hmotnými objekty. Einstein tak dospěl k opravdu obecné teorii relativity.

Einstein však nebyl sám. Hilbert se probíral svými poznámkami z Einsteinových přednášek v Göttingen a aniž to Einstein věděl, pokusil se sám najít správné gravitační rovnice. Zcela

nezávisle došel ke stejnému gravitačnímu zákonu jako Einstein. Dvacátého listopadu, pět dní před Einsteinovým vystoupením před Pruskou akademií věd, předložil své vlastní výsledky Královské společnosti věd v Göttingen. Vypadalo to, že Hilbert Einsteina předstihl.

V týdnech po ohlášení těchto výsledků byly vztahy mezi Hilbertem a Einsteinem trochu napjaté. Hilbert napsal Einsteinovi, že si nic nepamatuje z přednášky, ve které Einstein hovořil o svých pokusech nalézt správné gravitační rovnice, a kolem Vánoc se Einstein upokojil, že nešlo o podraz. Jak vyjádřil ve svém dopise, „mezi námi zavládl trochu nedobrá vůně“, ale „naše přátelství pokládám za nezkalené“. Zůstali opravdu přáteli a kolegy, protože Hilbert neuplatňoval na Einsteinovo *magnum opus* žádný nárok a o rovnicích, na které přišel on i Einstein, hovořil do konce života jako o „Einsteinových rovnicích“.

Einstein byl tak na konci cesty k nalezení nové teorie gravitace. Postupně při hledání svých rovnic podlehl síle matematiky. Od té doby se už nenechával vodit jen myšlenkovými experimenty, nýbrž i matematickou elegancí. Matematická krása jeho konečné teorie ho omračovala. Gravitační rovnice označil za „nejcennější objev svého života“.

K EDDINGTONOVI SE DOSTÁVALY některé separáty Einsteinových prací z Prahy, Curychu a konečně z Berlína přes jeho přítele holandského astronoma Willema de Sittera. Práce ho velmi zaujaly, propadl úplně novému pohledu na gravitaci formulovanému v obtížném jazyce. I když byl především astronomem, jehož hlavním cílem bylo pozorovat vesmír a interpretovat pozorování, přijal výzvu a nastudoval matematický jazyk Riemannovy geometrie, ve kterém Einstein svou novou teorii formuloval. A tento zájem se mu vyplatil, jmenovitě když Einstein jasně specifikoval předpověď ohybu světelných paprsků, jež se měla stát testem jeho teorie. Úplné zatmění Slunce mělo nastat 29. května 1919 a bylo přirozené, aby se vedoucím pozorovacího týmu, který měl ověřit Einsteinovu předpověď, stal právě Eddington.

Byl zde jen jeden problém, zato veliký: Evropa byla ve válce. Eddington byl pacifista a Einstein byl podle názoru Eddingtonových kolegů ve spolku s nepřitelem. V roce 1918 dosáhla válka svého vrcholu a obava, aby německá armáda nezvítězila, vedla k dalším odvodům. Eddington byl povolán do armády.

Když se stal nadšeným advokátem Einsteinových myšlenek, sklízel za to antipatii svých kolegů. Jeden z nich prohlásil ve snaze odmítnout vše německé: „Snažili jsme se věřit, že přehnané a falešné požadavky dnešních Němců jsou důsledkem nějaké momentální nemoci, která propukla v nedávné době. Ale případy jako je tento naznačují, že se možná jedná o něco hlubšího.“ Eddington sice měl pro vedení expedice na zatmění podporu královského astronoma Franka Dysona, jenže jen o vlásek unikl uvěznění, protože odmítal bojovat. Britská vláda ustavila v Cambridgi tribunál, který měl zkoumat Eddingtonův postoj. S pokračujícím jednáním zaujímal tribunál k Eddingtonovi stále nepřátelštější stanovisko a vypadalo to, že výjimka pro něj bude zamítnuta. Pak ale vstoupil do hry Frank Dyson, který prohlásil, že Eddington je klíčovou osobou pro zdar expedice: „Za daných podmínek bude zatmění sledovat jen málo vědců a profesor Eddington je výjimečně kompetentní osoba pro tato pozorování, takže doufám, že tribunál mu dovolí je uskutečnit.“ Zatmění tribunál zaujalo a Eddington dostal znovu výjimku z branné služby z důvodu „národního zájmu“. Tak jej Einstein zachránil před frontou.

UŽ JSME UVEDLI, že Einsteinova teorie předpovídala, že světlo ze vzdálených hvězd se bude ohýbat při průchodu kolem hodně hmotného tělesa, jakým je například Slunce. Eddington navrhl experiment, při kterém se vzdálená hvězdokupa, tzv. Hyady, měla fotografovat ve dvou různých dobách v roce. Nejdříve se tak měla určit poloha hvězd v hvězdokupě za jasné noci, když na ně nic nerušilo pohled – na dráze mezi nimi a Zemí nebylo žádné těleso, jež by mohlo šíření světla ovlivňovat. Pak se mělo měření provést znovu v době úplného zatmění, tedy v době,

kdy se paprsky od těchto hvězd pohybovaly v blízkosti Slunce a téměř všechno světlo od samotného Slunce bylo blokováno Měsícem. Dne 29. května 1919 měly Hyady ležet právě za Sluncem a podmínky tak byly ideální. Srovnání obojího měření – jednou se Sluncem u dráhy paprsků, jednou bez něj – mělo ukázat, zda došlo k nějakému ohybu. A bude-li ohyb činit 1,7 úhlové vteřiny, bude to v souladu s Einsteinovou předpovědí. Úkol byl jasný a zdánlivě jednoduchý.

Jednoduché to však vůbec nebylo. Těch několik míst na Zemi, kde se dalo úplné zatmění pozorovat, bylo od Evropy hodně vzdálených. Astronomové se museli vydat se svými přístroji na dlouhou cestu světem, který se vzpamatovával z ničivé války. Eddington s kolegou z cambridgeské observatoře Edwardem Cottinghamem se rozhodli pro ostrůvek Príncipe. Astronomové Andrew Crommelin a Charles Davidson byli vysláni jako záložní tým do vesnice Sobral na severovýchodě Brazílie v chudé a prašné oblasti blízko rovníku.

Príncipe (Princův ostrov) je malý ostrov v Guinejském zálivu. Tehdy to byla portugalská kolonie, známá produkcí kaka. Svěží zelený ostrov s horkým a vlhkým podnebím, který občas zasahují tropické bouře, má několik velkých plantáží, *roças*, na nichž několik portugalských majitelů využívalo k obdělávání půdy původní obyvatelé. Po několik desetiletí tyto plantáže zásobovaly kakaovými boby společnost Catbury. Počátkem dvacátého století bylo kakaové plantážnictví nařčeno z využívání otročké práce a majitelé přišli o své kontrakty, což ekonomiku na Príncipe zničilo. V době Eddingtonova příjezdu ostrov upadal v zapomnění.

Eddington instaloval svůj dalekohled na vzdáleném konci Roça Sundy. Čekání na zatmění si krátil každodenními tenisovými zápasy na jediném kurtu na ostrově a modlil se, aby bouře nebo mraky nezhatily jeho poslání. Cottingham se staral o teleoskop a doufal, že horko nezdeformuje obrázky.

Ráno v den zatmění hustě přšelo a nebe bylo dokonale neprůhledné, hodinu před vrcholem zatmění se však začalo vyjasňovat. Eddington a Cottingham zachytili první pohledy na Slunce ještě

v době, kdy zatmění už nastávalo a byla zakrytá část slunečního disku. Ve čtvrt na tři bylo nebe jasné a Eddington s Cottinghamem mohli začít fotografovat. Udělali celkem 16 snímků na fotografické desky, jež zachycovaly zatmělé Slunce, za nímž na pozadí bylo vidět hvězdy příslušející k hvězdokupě Hyady. Ke konci zatmění už bylo nebe bez mráčku. Eddington telegrafoval Frankovi Dysonovi: „Mraky se trhají. Nadějně.“

Přes zamračený začátek bylo pozorování na Príncipe zachráněno. V Sobralu na brazilském severovýchodě byl dokonale jasný horký den a zatmění se dalo výborně sledovat od samého počátku. Crommelin a Davidson, obklopeni místními obyvateli, kteří nadšeně pozorovali úkaz, nafotografovali celkem 19 desek, jež doplnily 16 snímků Eddingtona a Cottinghama. I oni plni nadšení telegrafovali: „Zatmění skvělé.“ V tu chvíli ještě nevěděli, že dobré pozorovací podmínky s jasným nebem nebyly jejich experimentu příznivé. Panující vedro pokroutilo přístroj natolik, že se snímky na fotografických deskách staly bezcennými. Pozorování ze Sobralu nakonec přispěla k celkovému výsledku jen daty pořízenými menším záložním teleskopem.

Astronomové se nemohli vrátit domů narychlo a tak se začalo s analýzou fotografických desek až pozdě v červenci. Z šestnácti desek, které Eddington nafotografoval, jen pouhé dvě zachycovaly dost hvězd, aby se ohyb dal dostatečně dobře měřit. Získaná hodnota ohybu byla 1,61 úhlových vteřin s chybou 0,3 vteřiny. To bylo v souladu s Einsteinovou předpovědí 1,7 vteřiny. Analýza desek ze Sobralu byla alarmující. Naměřená hodnota byla 0,93 úhlové vteřiny, což se výrazně lišilo od relativistické předpovědi a bylo velmi blízko předpovědi newtonovské, jenže šlo o desky, které byly deformované teplem. Když se však prozkoumala sobralská záložní pozorování malým teleskopem, vyšla naopak hodnota 1,98 s chybou 0,12 úhlové vteřiny, což bylo zase blízko Einsteinově předpovědi.

DNE 6. LISTOPADU badatelé předložili své výsledky na společném zasedání Královské společnosti a Královské astronomické společnosti. V sérii přednášek, jimž předsedal Frank Dyson, byla měření z expedice za zatměním předložena váženým členům společnosti. Řečníci se shodli na tom, že když se vezmou v úvahu problémy, kterým čelila sobralská expedice, měření působivě potvrzují Einsteinovu předpověď.

Prezident Královské společnosti J. J. Thomson tato měření označil za „nejdůležitější výsledek z oblasti gravitace od Newtonových dob“. A dodal: „Jestliže uznáme, že Einsteinova argumentace je správná – a jeho teorie přežila přísné testy v souvislosti s posunem perihelia Merkura a měření při nedávném zatmění – pak tento výsledek patří k největším úspěchům lidského myšlení.“

Den po zasedání v Burlingtonském paláci se Thomsonova slova objevila v londýnských *Times*. Hned za titulky oslavujícími výročí příměří a památku padlých stálo: „Revoluce ve vědě – Nová teorie vesmíru – Newtonovy myšlenky překonány“ a články popisovaly výsledky expedice za zatměním. Novinky a názory týkající se Einsteinovy nové teorie a Eddingtonovy expedice se šířily anglicky mluvícím světem jako požár. Desátého listopadu dostihly Ameriku, kde *New York Times* přinesly své vlastní senzační titulky jako „Všechna světla na nebi šejdrem“, „Einsteinova teorie triumfuje“, „Hvězdy nejsou tam, kde se zdály být nebo kde byly vypočteny, nikdo se ale nemusí bát“.

Eddingtonova hra se vyplatila. Tím, že novou obecnou teorii relativity pochopil a provedl její test, se stal prorokem nové fyziky. Od tohoto okamžiku se Eddington stal jedním z mála učenců, na které se všichni odvolávali při diskusích o nové teorii gravitace a jeho názor byl vyhledáván jako vodítko k interpretaci a vývoji Einsteinovy teorie.

A z Einsteina udělala Eddingtonova působivá mise superhvězdu. Eddingtonovy výsledky změnily Einsteinův život a jeho obecné teorii relativity přinesly – přinejmenším na chvíli – takovou popularitu, jakou nezažila žádná jiná vědecká teorie. Einstein

po dvou stovkách let nerušené vlády sesadil z trůnu Newtona. Jeho teorie byla sice neprůhledná a zakuklená do matematického jazyka, kterému rozumělo jen pár lidí, skvěle však prošla Eddingtonovým testem. Navíc Einstein už nebyl nepřítel. Válka skončila, a i když vleklé nepřátelství k německým vědcům přetrvávalo, Einsteinovi bylo odpuštěno. Teď už se obecně vědělo, že *Manifest devadesáti tří* nepodepsal, i to, že vlastně ani nebyl Němec, nýbrž švýcarský Žid. Jak napsal v článku v *Times* krátce po Eddingtonově historickém oznámení před Královskou astronomickou společností: „V Německu jsem označován za německého učence a v Anglii jsem švýcarský Žid. Když bude potřeba ze mne udělat černou ovci, budu pro Němce švýcarský Žid a pro Angličany německý vědec.“

Z neznámého patentového úředníka se sklonem k drzosti, jehož obdivovalo jen pár specialistů z jeho oboru, se Einstein stal kulturní ikonou, kterou zvali k přednáškám do Ameriky, Japonska a všude v Evropě. A jeho obecná teorie relativity, která měla své kořeny v myšlenkových experimentech, jež prováděl ve své bernské kanceláři, byla teď formulována jako nový a zcela rozdílný způsob jak dělat fyziku. Matematika v teorii relativity zaujala pevnou a důležitou pozici a teorie byla formulována sadou složitých, ale krásných rovnic, které byly zralé k vypuštění do světa. Nyní bylo i na jiných, aby rozpoznali, co vše je v nich vlastně obsaženo.

Jmenný rejstřík

- Ashtekar, Abhay 227, 229
Baad, Walter 204
Babson, Roger 126–129
Bahnon, Agnew 129n
Bardeen, James 157
Bekenstein, Jacob 170–172, 175,
219, 233, 244–248
Běliniskij, Vladimir 148
Bellová, Jocelyn 14, 151–153
Bergmann, Peter 142, 223
Berija, Lavrentij 92, 239
Bethe, Hans 83
Blumenthal, George 212
Bohr, Niels 82n, 93, 121, 144
Boltzmann, Ludwig 18
Bondi, Hermann 106–113, 116,
118n, 135, 141n, 179
Born, Max 78, 89, 111,
Brans, Carl 238n
Bronštejn, Matvej 92, 167
Burbidge, Geoffrey a Margaret 119
Butterfield, Herbert 112
Candelas, Philip 168, 174, 225, 230
Carter, Brandon 157, 169, 258
Coleman, Sidney 227
Cottingham, Edward 42, 260
Davidson, Charles 42n
Davis, Marc 205, 209, 212
de Sitter, Willem 40, 48n, 51, 54–57,
59, 61n, 108n
de Vaucouleurs, Gérard 204n
Dekel, Avishai 212
DeWitt, Bryce 125, 128–131, 157,
160, 166–168, 174, 190, 223,
227–230, 249
Dicke Robert 132, 200n, 205–207,
213–216, 227, 238, 257n, 262
Dickens, Charles 24
Dirac, Paul 11, 35, 141, 160–167,
175, 198, 219, 223, 238n, 244,
248
Drever, Ronald 193
Duff, Michael 168n, 230
Dyson, Frank 41, 43n
Dyson, Freeman 101, 196, 259
Eddington, Sir Arthur 9–11, 34–45,
48, 52–64, 67, 69–71, 73, 75–77,
81n, 84n, 99, 195–108, 110, 132,
135, 146, 148, 157, 160, 179,
211, 238, 253, 259–263
Efstathiou, George 210, 212, 235,
249
Ehrenfest, Paul 49
Einstein, Albert *passim*
Einstein, Eduard 31
Einstein, Hans Albert 27

- Einsteinová, Maja 86
 Ellis, George 151, 259
 Erhard, Werner 221
 Feynman, Richard 83, 122, 130–132, 163n, 167, 179, 221, 226
 Field, George 183
 Flerov, Georgij 144
 Fock, Vladimir 91n
 Fowler, Ralph 35, 74–76
 Fowler, William 119, 134n, 162
 Frenk, Carlos 209, 212
 Friedan, Daniel 226
 Friedmann, Alexander 46, 49–56, 58, 61n, 64n, 67, 84, 87, 91, 98–100, 108–112, 116, 132, 201
 Galilei, Galileo 17
 Gallagher, Jay 209
 Gamow George 149, 202n
 Garwin, Richard 185
 Gauss, Carl Friedrich 31n, 39
 Gell-Mann, Murray 225
 Giaccone, Riccardo 156
 Glashow, Sheldon 165, 226
 Gödel, Kurt 86, 95–100, 120
 Gold, Thomas 106–119, 131, 135, 138, 141
 Gott, J. Richard 199, 213
 Green, Michael 231
 Grossman, Marcel 19, 31–33, 38
 Guth, Alan 206
 Chalatnikov, Isaak 145–148
 Chandrasekhar, Subrahmanyan 73n, 84, 119, 237
 Israel, Werner 169, 205
 Jacobson, Theodor 227n
 Jansky, Karl 113n
 Jordan, Pascual 239
 Kaluza, Theodor 93n
 Kerr, Roy 142, 146, 148, 154, 157n, 172
 Klein, Oscar 93n
 Koperník, Mikuláš 46
 Krasnov, Kirill 232
 Kurčatov, Jakov 239
 Landau, Lev Davidovič 79n, 92, 124, 144n, 153, 162, 202, 239
 Le Verrier, Urbain 23–25, 39, 243n
 Lemaître, Georges 46, 53–65, 67, 79, 84, 87, 91, 98–100, 105, 108–110, 112, 116, 132, 149, 202, 206, 211
 Lenard, Philipp 72, 88n
 Lifšic, Jevgenij 92, 145n, 148, 202
 Lovell, Bernard 113, 115, 133
 Löwenthalová, Elsa 34
 Lundmark, Knud 57, 59–61
 Lynden-Bell, Donald 155n
 Maximov, Alexander 91n
 Marićová, Mileva 19
 Maxwell, James Clerk 17, 21n, 71, 93, 131n, 165, 177
 Milgrom, Mordehai 244n
 Mills, Bernard 117
 Milne, Arthur 111
 Minkowski, Hermann 37
 Misner, Charles 123, 147, 190, 223, 253
 Nernst, Walther 33
 Newman, Ezra 158
 Newton, Isaac 9, 15, 17, 20–25, 33, 38n, 44n, 68, 71, 73, 126, 136, 161, 219, 222, 237, 244n
 Novikov, Igor 155–159, 214, 217, 252n, 255
 Oppenheimer, J. Robert 66–68, 77–86, 95, 100–104, 111, 120–124, 132, 136n, 142, 145n, 153, 255
 Ostriker, Jeremiah 194, 208n, 212
 Pauli, Wolfgang 11, 78, 101, 106, 160, 162, 167n
 Pawsey, Joseph 113, 115

- Peebles, Philip James 199–218, 243, 246n
 Penrose, Roger 140–156, 159, 161, 169, 172, 182, 228, 253, 256, 259
 Penzias, Arno 149–151, 201, 203n
 Perlmutter, Saul 215n
 Perrine, Charles 36
 Planck, Max 33
 Pretorius, Frans 190n, 194–196
 Primack, Joel 212
 Reber, Grote 114n, 133
 Rees, Martin 35, 148n, 151, 156, 158n, 166, 183, 198, 252n
 Riemann, Bernhard 32, 38–40, 93n
 Riess, Adam 216
 Robertson, Howard 100
 Rosen, Nathan 179
 Rovelli, Carlo 228n, 232
 Rubinová, Vera 208, 45
 Ruffini, Remo 157
 Russell, Bertrand 35, 97, 185
 Rutherford, Ernest 35
 Ryle, Martin 112–119, 133, 137, 142, 148, 151–153
 Sagan, Carl 10
 Sacharov, Andrej 239–242, 248
 Sachs, Rainer 203
 Salam, Abdus 165, 167n, 226
 Salpeter, Edwin 155
 Sciama Denis 141–143, 147–151, 155n, 161, 166–169, 174, 183
 Seaborg, Glenn 83
 Serber, Robert 80
 Schild, Alfred 135n, 142n, 249
 Schmidt, Brian 216
 Schmidt, Maarten 133–136, 255
 Schrödinger, Erwin 11, 72–74, 94, 121, 140n, 223
 Schutz, Bernard 184, 196
 Schwartz, John 225, 231
 Schwarzschild, Karl 67–71, 77, 81–84, 87, 95, 100, 124, 132, 137, 140, 142n, 146, 148, 154n, 157n, 170, 252, 254n
 Schwinger, Julian 163n, 166
 Silbestein, Ludwik 9n
 Silk, Joseph 203, 207, 213n
 Slee, Bruce 117
 Slipher, Vesto 56–61, 71, 98
 Smarr, Larry 190n
 Smolin, Lee 227–232
 Smoot, George 213n
 Snyder, Hartland 66–68, 81n, 84, 95, 101, 121, 124, 137, 142, 145n, 255
 Sommerfeld, Arnold 74
 Stalin, Josef 14, 80, 90, 92, 144n, 167, 239
 Stark, Johannes 20, 89
 Starobinskij, Alexej 172
 Steinhardt, Paul 212
 Stern, Otto 29
 Sunjajev, Rašid 214
 Taylor, Joseph jr. 153, 185n, 188n
 Teller, Edward 83, 122
 Thomson, J. J. 35, 44
 Thorne, Kip 123, 140, 157–159, 193–195, 197, 253,
 Tomonaga, Sin-Itro 163n
 Townes, Charles 187
 Turner, Herbert 36
 Turner, Michael 199, 213
 Tyson, Tony 194
 Vafa, Cumrun 232
 Volkoff, George 80
 Von Neumann, John 37, 83, 86, 97
 Weber, Joseph 177–188, 192, 196n
 Weinberg, Steven 165, 167, 226, 242, 253–255

- Weis, Reiner 193, 197
Weyl, Hermann 11, 37, 55, 58n,
86, 100, 238
Wheeler, Jon Archibald 82n, 102,
120–125, 129–133, 137–142,
144n, 147n, 151, 153, 155, 157–
160, 167, 170, 174n, 180, 190,
200, 223, 227–230, 234, 241,
244, 253, 255
White, Simon 210, 212
Whitehead, John 35
Wilson, Robert 149–151, 201, 203n
Witten, Edward 225n, 233, 242, 259
Wittgenstein, Ludwig 97
Woit, Peter 230
Wolfe, Arthur 203
Yu, Jer 203n, 207
Zeldovič, Jakov 144n, 153–159,
172, 203, 206n, 211, 213n, 217n,
239–241, 251, 253, 255
Zermelo, Ernst 37
Zwicky, Fritz 204, 208

Edice Spektrum, svazek 1.

Pedro G. Ferreira

Nádherná teorie

Sto let
obecné teorie relativity

Z anglického originálu, vydaného nakladatelstvím
Houghton Mifflin Harcourt Publishing Company
v New Yorku a Bostonu roku 2014, přeložil Jiří Langer
Obálku a grafickou úpravu navrhl Vladimír Verner
Redakčně zpracoval Vladimír Roskovec
Vydalo nakladatelství Vyšehrad, spol. s r.o.,
roku 2015 jako svou 1401. publikaci
Odpovědný redaktor Martin Žemla
Vydání první. AA 16,1. Stran 312
Vytiskla Těšínská tiskárna, a. s.
Doporučená cena 348 Kč

Nakladatelství Vyšehrad, spol. s r.o.,
Praha 3, Víta Nejedlého 15
e-mail: info@ivysehrad.cz
www.ivysehrad.cz

ISBN 978-80-7429-532-4