



7 KRÁTKÝCH
PŘEDNÁŠEK
Z FYZIKY

CARLO ROVELLI

CARLO ROVELLI
SEDM KRÁTKÝCH PŘEDNÁŠEK Z FYZIKY

DOKOŘÁN

CARLO ROVELLI

SEDM KRÁTKÝCH PŘEDNÁŠEK Z FYZIKY

© 2014 Adelphi Edizioni S.p.A. Milano

Translation © Jiří Podolský, Tereza Lišková, 2016

Všechna práva vyhrazena. Žádná část této publikace nesmí být rozmnožována a rozšiřována jakýmkoli způsobem bez předchozího písemného svolení nakladatele.

Druhé vydání v českém jazyce (první elektronické).

Z italského originálu *Sette brevi lezioni di fisica* přeložili Jiří Podolský a Tereza Lišková.

Odpovědný redaktor Zdeněk Kárník.

Obálka, grafická úprava, sazba a konverze do elektronické verze Michal Puhač.

V roce 2017 vydalo nakladatelství Dokořán, s. r. o.,

Holečkova 9, 150 00 Praha 5,

dokoran@dokoran.cz, www.dokoran.cz,

jako svou 892. publikaci (262. elektronická).

ISBN 978-80-7363-831-3

OBSAH

Úvod	7
Přednáška 1. Nejkrásnější z teorií	11
Přednáška 2. Kvanta	23
Přednáška 3. Architektura kosmu	33
Přednáška 4. Částice	43
Přednáška 5. Zrnka prostoru	51
Přednáška 6. Pravděpodobnost, čas a teplo černých děr	63
Přednáška 7. My sami	77
Rejstřík	93

ÚVOD

Tyto přednášky byly napsány pro ty, kdo o moderní přírodovědě vědí jenom velmi málo anebo vůbec nic. Dohromady poskytují rychlý přehled nejvíce fascinujících aspektů oné velké revoluce, jež se ve fyzice odehrála v průběhu 20. století, a otázek i záhad, které se tím otevřely. Protože věda nás nejenom učí, jak lépe porozumět světu, ale též odhaluje, jak rozlehlá je oblast toho, čemu zatím nerozumíme. První přednáška je věnována obecné teorii relativity Alberta Einsteina, „nejkrásnější z teorií“. Druhá pak kvantové mechanice, v níž se skrývají nejzáhadnější aspekty moderní fyziky. Třetí přednáška je zasvěcena kosmu: architektuře vesmíru, jež obýváme, čtvrtá jeho elementárním částicím. Pátá se zabývá kvantovou gravitací, stále ještě probíhajícími pokusy provést syntézu největších objevů dvacátého století. Šestá přednáška se týká pravděpodobnosti a tepla černých děr. Závěrečná část knihy se vrací zpět k nám samým a klade otázku, jak je možné rozmýšlet o naší

vlastní existenci ve světle podivuhodného světa, jak ho popisuje dnešní fyzika. Zde uvedené přednášky jsou rozšířením série článků, které jsem publikoval v nedělní příloze *Sole 24 Ore*. Rád bych poděkoval především Armandu Massarentimu, jehož zásluhou se kulturní stránky nedělních novin otevřely vědě. Díky tomu bylo možné osvětlit roli této nedílné a životně důležité součásti naší kultury.

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

Einsteinova rovnice určující gravitační pole v obecné teorii relativity (1915), včetně kosmologické konstanty (1917)

NEJKRÁSNEJŠÍ Z TEORIÍ

Jako mladík prožil Albert Einstein rok bezúčelným poflakováním. Když „nemarníte“ čas, nikam se nedostanete: bohužel na to rodiče teenagerů často zapomínají. Pobýval v Pavii. Připojil se tam ke své rodině, poté co zanechal studií v Německu, neboť nedokázal vystát přehnanou přísnost panující na střední škole, na kterou chodil. Byl počátek století a v Itálii také počátek průmyslové revoluce. Jeho otec, inženýr, instaloval první elektrárny v Pádské nížině. Albert četl Kanta a příležitostně navštěvoval přednášky na Univerzitě v Pavii: jen tak pro potěšení, aniž by byl oficiálně zapsán anebo se musel trápit zkouškami. Tak se rodí opravdoví vědci.

Poté nastoupil na polytechniku v Curychu a pohroužil se do studia fyziky. O pár let později v roce 1905 odesílá do *Annalen der Physik*, nejprestižněj-

šího vědeckého časopisu své doby, tři články. Každý z nich je hoden Nobelovy ceny. První ukazuje, že atomy opravdu existují. Druhý klade základy kvantové mechaniky, kterou popíšu v příští přednášce. Třetí článek předkládá jeho první teorii relativity (známou dnes pod názvem „speciální relativita“). Teorii, jež objasňuje, že čas neplyne pro každého stejným tempem: dvě dvojčata zjistí, že jsou různě stará, pokud jedno z nich cestovalo vysokou rychlostí.

Einstein se přes noc stává slavným vědcem a z různých univerzit dostává nabídky místa. Cosi ho ale zneklidňuje: i přes nadšené přijetí nejde jeho teorie relativity dohromady s tím, co víme o gravitaci, konkrétně s tím, jak padají věci. Uvědomil si to, když sepisoval článek shrnující jeho teorii, a začal dumat nad tím, jak změnit zákon „všeobecné gravitace“ zformulovaný samotným otcem fyziky Isaacem Newtonem tak, aby byl uveden do souladu s novým konceptem relativity. Noří se do tohoto problému. Uplyne však deset let, než ho vyřeší. Deset let horečnatého studia, pokusů a omylů, zmatků, chybných článků, brilantních myšlenek, špatně uchopených idejí.

V listopadu 1915 konečně odevzdává do tisku článek představující kompletní řešení: novou teorii gravitace, kterou nazve „obecná teorie relativity“. Jeho

mistrovské dílo. Podle velkého ruského fyzika Lva Landaua „nejkrásnější z teorií“.

Existují vrcholná mistrovská díla, jež nás hluboce oslovují: Mozartovo *Requiem*; Homérova *Odyssea*; Sixtinská kaple; *Král Lear*. Abychom plně docenili jejich genialitu, potřebujeme mnoho let studia, ale odměnou je nám čirá krása – a nejen to: před našima očima se tak otevírají zcela nové perspektivy, jimiž lze nahlížet svět. Einsteinův drahokam, obecná teorie relativity, je mistrovským dílem tohoto druhu.

Vzpomínám si, jaké vzrušení jsem pocítoval, když jsem poprvé začal něco z ní chápat. Bylo to v létě. Byl jsem na pláži v kalábrijském Condofuri, ponořen do slunečního jasu helénského Středozeří, v posledním ročníku svých univerzitních studií. Prázdniny, během nichž je člověk osvobozen od školních povinností, jsou pro studium ideální. Učil jsem se z knihy, jejíž okraje byly okousané od myši, protože jsem ji v noci používal k ucpání děr vyhlodaných těmito nešťastnými tvory v poněkud zchátralém hipísáckém domku v umbrijských kopcích, který jsem využíval jako útočiště před nudou univerzitních přednášek v Bologni. Tu a tam jsem odtrhl oči od knihy a pohlédl na třpytivé moře: zdálo se mi, jako bych opravdu viděl zakřivení prostoru a času, tak jak si to představoval Einstein.

Bylo to jako zázrak: jako by mi nějaký přítel šeptal do ucha mimořádnou skrytou pravdu: závoj halící realitu náhle padl a odkryl mi jednodušší a hlubší řád věcí. Už od doby, kdy jsme objevili, že Země je kulatá a točí se jako nějaký šílený vlček, jsme tušili, že realita není taková, jak se nám jeví: kdykoli zahlédneme nějaký její nový aspekt, jde o hluboký emocionální zážitek. Nyní tedy padl další závoj.

Mezi mnoha kroky na cestě vpřed za naším poznáním světa, které v dějinách následovaly jeden za druhým, se však tomu Einsteinovu nic nevyrovná. Proč?

Především proto, že porozumíte-li tomu, jak Einsteinova teorie funguje, pochopíte i její dechberoucí jednoduchost. Tuto myšlenku se pokusím objasnit.

Newton se snažil najít příčinu, proč věci na Zemi padají směrem dolů a proč planety obíhají kolem Slunce. Představoval si, že existuje nějaká *síla*, jež navzájem přitahuje všechna hmotná tělesa. Nazval ji *gravitační silou*. Jak konkrétně by tato síla mohla působit mezi vzdálenými tělesy, aniž by se mezi nimi nacházelo cokoli jiného, nebylo známo – a velký otec moderní vědy byl dost opatrný na to, aby se pouštěl do spekulativních hypotéz. Newton si též představoval, že tělesa se pohybují prostorem, přičemž prostor pro něj byl cosi jako velká prázdná schránka, obrov-

ská krabice obklopující celý vesmír, nezměrně velká struktura, skrze kterou se všechny objekty pohybují kupředu, dokud síla nezakříví jejich trajektorie. Newton nedokázal říci, z čeho je tato jím vymyšlená schránka světa složena, tedy z čeho je „prostor“ vyroben. Avšak několik let předtím, než se narodil Einstein, přidali dva britští fyzikové Michael Faraday a James Clerk Maxwell do chladného Newtonova světa klíčovou ingredienci: elektromagnetické pole. Toto pole je reálnou rozptýlenou entitou, jež přenáší rádiové vlny, vyplňuje veškerý prostor, může vibrovat a oscilovat podobně jako vodní hladina a „přenášet“ elektrickou sílu. Einsteina už od raného dětství fascinovalo toto elektromagnetické pole, jež otáčelo rotory elektráren, které stavěl jeho otec. A záhy si uvědomil, že také gravitace, stejně jako elektřina, musí být zprostředkována polem: že musí existovat *gravitační pole*, které se v něčem podobá *elektrickému poli*. Soustředil své úsilí na to, aby pochopil, jak toto gravitační pole funguje a jak by se dalo popsat rovnicemi.

A právě v tomto okamžiku ho napadla neobyčejná myšlenka. V pravém slova smyslu to byl geniální nápad: gravitační pole není rozptýleno v prostoru; gravitační pole je prostor sám. Toto je základní myšlenka obecné teorie relativity. Newtonův *prostor*,

kterým se pohybují věci, a *gravitační pole* jsou jedno a totéž.

Byl to okamžik opravdového osvětlení. Vpravdě historické zjednodušení světa: od této chvíle už prostor nebyl čímsi, co je zcela odlišné od hmoty, ale stal se jednou z „materiálních“ složek světa. Entitou, která se vlní, prohýbá, zakřivuje, krotí. Nejsme uzavřeni do neviditelné a rigidní infrastruktury: jsme vnořeni do gigantické flexibilní šnečí ulity. Slunce ohýbá prostor kolem sebe a Země okolo něj obíhá nikoli proto, že by na ni působila tajemná síla, ale protože se žene přímo vpřed prostorem, jenž je prohnutý, podobně jako se skleněná kulička valí v trychtýři. Uprostřed trychtýře také nevznikají žádné tajuplné síly, za pád kuličky může zakřivený charakter jeho stěn. Planety obíhají kolem Slunce a věci padají na zem, protože prostor je zdeformovaný.

Jak můžeme toto zakřivení prostoru popsat? Největší matematik 19. století Carl Friedrich Gauss, zvaný též „kníže matematiků“, napsal matematické vzorce popisující dvourozměrné zakřivené povrchy, například tvar kopcovité krajiny. Pak požádal jednoho svého nadaného studenta, aby jeho teorii zobecnil do tří a více dimenzí. Onen student, Bernhard Riemann, sepsal impozantní disertační práci, jež se

zprvu zdála velmi neužitečná. Výsledkem Riemannovy disertace bylo, že vlastnosti zakřiveného prostoru vystihuje speciální matematický objekt, který dnes nazýváme *Riemannova křivost* a označujeme ho symbolem R_{abcd} . Einstein pak našel rovnici, která říká, že R_{abcd} je ekvivalentní energii přítomné hmoty. To znamená, že prostor se zakřivuje tam, kde je hmota. Toť vše. Rovnice se dá napsat na půlce řádku a není k tomu potřeba nic dalšího. Einsteinova vize, že prostor je zakřiven, se stala rovnicí.

V této rovnici se ovšem skrývá celý pestrý vesmír kypící svým vlastním životem. Zázračná bohatost teorie tak otevřela sérii fantasmagorických předpovědí, jež vypadaly jako delirické blouznění šílence, nicméně všechny se nakonec ukázaly být správné.

Začalo to tím, že rovnice popsala, jak se zakřivuje prostor v okolí hvězdy. Důsledkem tohoto zakřivení je nejen to, že planety kolem hvězdy obíhají, ale i to, že světlo se nešíří přímočaře, že se jeho paprsky ohýbají. Einstein předpověděl, že také naše Slunce způsobuje ohyb světelných paprsků. V roce 1919 byl tento ohyb opravdu změřen a předpověď potvrzena. Nezakřivuje se však pouze prostor, ale také čas. Einstein předpověděl, že čas plyne rychleji nahoře než dole u země. I to bylo změřeno a rovněž potvrzeno. Potká-li člověk,

který prožil svůj život dole u moře, své dvojče, které žilo vysoko v horách, zjistí, že jeho sourozenec je o trochu starší nežli on sám. A to je jenom začátek.

Když velká hvězda spálí veškeré své zásoby paliva (vodíku), vyhasne. Její zbytky už nadále nejsou udržovány v rovnováze tepelnou energií jaderného hoření a hvězda se vlastní vahou zhroutí do stadia, ve kterém je prostor zakřiven tak moc, že doslova vytvoří díru. To je ona slavná *černá díra*. Když jsem ještě studoval na univerzitě, byly černé díry pokládány za stěží uvěřitelnou předpověď ezoterické teorie. Dnes jich po celém nebi pozorujeme stovky a astronomové je podrobně studují.

Ale to stále ještě není všechno. Celý prostor může expandovat anebo se naopak smršťovat. Einsteinova rovnice navíc říká, že kosmický prostor nemůže zůstat v klidu, že expandovat *musí*. Kolem roku 1930 byla tato expanze vesmíru opravdu napozorována. Tatáž rovnice předpovídá, že expanze kosmu by měla být způsobena explozí velmi raného, extrémně malého a žhavého vesmíru: dnes to nazýváme *velký třesk*. Ani v tomto případě tomu zprvu nikdo nevěřil. Důkazy se však postupně hromadily, až nakonec bylo objeveno *reliktní mikrovlnné záření* kosmického pozadí – rozptýlená záře celé oblohy, jež je zbytkovým dosvitem

tepla vytvořeného počáteční explozí vesmíru. Předpověď plynoucí z Einsteinovy rovnice se i v tomto ohledu potvrdila. A nejen to: teorie tvrdí, že prostor se může chovat podobně jako povrch mořské hladiny. Efekty těchto „gravitačních vln“ již pozorujeme v dvojhvězdných systémech na obloze a jejich chování s neuvěřitelnou přesností souhlasí s předpovědí Einsteinovy teorie. A tak dále.

Stručně řečeno: teorie popisuje pestrý a úžasný svět, ve kterém celý vesmír exploduje, prostor se hroutí do bezedných černých děr, čas ochabuje svůj běh a v blízkosti povrchu planety se zpomaluje, a bezbřehý mezihvězdný prostor se vlní a kolébá jako hladina moře... A tohle všechno, co se mi postupně vyjevilo z oné knihy okousané od myši, nebyla žádná báčorka vyprávěná bláznem na pokraji šílenství ani halucinace způsobená spalujícím kalábrijským sluncem a oslepujícím Středozezemním mořem. Byla to skutečnost.

Lépe řečeno byl to letmý pohled na opravdovou realitu, jen o trochu odhalenější, než jak ji obvykle matně vidíme v našem banálním každodenním životě. Na realitu, jež se zdá být stvořena ze stejné substance jako naše sny, která je nicméně mnohem reálnější nežli naše zastřené obvyklé snění.

Tohle všechno je důsledkem výchozí Einsteinovy intuice: že prostor a gravitační pole jsou jedno a totéž. A jedné prosté rovnice. Nemohu odolat, abych ji zde nenapsal, přestože sami ji téměř jistě nebudete umět rozluštit. Ale i tak snad někdo ocení její nádhernou jednoduchost:

$$R_{ab} - \frac{1}{2} R g_{ab} = T_{ab}.$$

Toť vše.

Samozřejmě abyste zvládli techniku nezbytnou k přečtení této rovnice a dokázali ji použít, museli byste nastudovat a vstřebat Riemannův matematický aparát. Vyžaduje to jisté odhodlání a úsilí. Avšak méně nežli je třeba k pochopení jemné krásy Beethovenova pozdního smyčcového kvartetu. V obojím případě je nám odměnou čirá krása a nové oči, jimiž můžeme hledět na svět kolem nás.