

**ALBERT
EINSTEIN
SMYSL
RELATIVITY**

VYŠEHRA D

Tato kniha vydaná původně roku 1922 podává text *Stafford Little Lectures*, které dr. Einstein přednesl roku 1921 na Princetonské univerzitě. Pro třetí vydání dr. Einstein připojil dodatek diskutující jisté pokroky v teorii relativity od roku 1921. Pro čtvrté vydání dr. Einstein připojil Dodatek II o své zobecněné teorii gravitace. V pátém vydání byl revidován důkaz z Dodatku II. Toto vydání je identické s pátým vydáním v Princeton University Press.

Text prvního vydání přeložil do angličtiny Erwin Plimpton Adams, první dodatek přeložil Ernst G. Strauss a druhý dodatek přeložila Sonja Bargmannová.

Albert Einstein

The Meaning of Relativity: Including the Relativistic Theory
of the Non-Symmetric Field (fifth edition)

All rights reserved. No part of this book may be reproduced
or transmitted in any form or by any means,
electronic or mechanical, including photocopying, recording
or by any information storage and retrieval system,
without permission in writing from the Publisher.

Copyright © 1922, 1945, 1950, 1953 by Princeton University Press

Copyright © 1956 by the Estate of Albert Einstein

Copyright renewed 1984 by the Hebrew University of Jerusalem

Introduction © 2005 by Brian Greene

Translation © Jan Novotný, 2016

Epilogue © Jan Novotný, 2016

ISBN 978-80-7429-537-9

ÚVOD

[*Brian Greene*]

Během jediného desetiletí Albert Einstein objevil speciální a poté obecnou teorii relativity a převrátil tím pojmy prostoru a času, kterých se lidé drželi po tisíce let. Přesto se mnozí z nás, přinejmenším intuitivně, stále přiklání k těmto vyvráceným pojmům. Prostor si představujeme jako netečné jeviště, na němž se odehrávají vesmírné události. O čase si představujeme, že je zaznamenáván univerzálními hodinami, které tikají stejně zde jako na Marsu či v galaxii Andromedy a kdekoliv jinde, bez ohledu na rozličná prostředí a fyzikální souvislosti. Pro většinu z nás neměnná věčnost prostoru a času patří mezi nejzákladnější vlastnosti reality. Držet se však takovýcho představ znamená držet se predeinsteinovského pohledu, který je nejen teoreticky neudržitelný, ale jak ukázaly četné experimenty, také prokazatelně mylný.

Pro profesionálního fyzika je snadné přivyknout relativitě. Ačkoliv relativistické rovnice byly nejprve udivujícími výroky vyjádřenými v jazyce matematiky, fyzikové dnes vpisují relativitu přímo do matematické mluvnice základní fyziky. V tomto rámci náležitě formulované matematické rovnice automaticky plně odpovídají relativitě, a kdo si tedy dobře osvojí několik matematických pravidel, je schopen bez překážek se orientovat v Einsteinových objevech. Ale přestože je relativita matematicky systemizována, drtivá většina fyziků by stále přiznala, že jim „nepřešla do krve“. I já si uvědomuji, jak snadné je upadnout do navyklého newtonovského myšlení, v němž jsou prostor a čas nesprávně nazírány jako vzájemně oddělené, nezávislé a neměnné. Ale zároveň jsem schopen zakoušet nezmenšující se obdiv, který pociťuji pokaždé, když si dostatečně povšimnu detailů skrytých v matematice přizpůsobené relativistické úspornosti a stanu tak tváří v tvář pravému *smyslu* relativity. Prostor a čas tvoří podloží reality. Důsledkem zemětřesení, které na této půdě vyvolala teorie relativity, není nic menšího než zdokonalení našeho základního chápání reality.

Co tedy relativita říká?

V roce 1905 Einstein publikoval v německém časopise *Annalen der Physik* pod skromným titulem „K elektrodynamice pohybujících se těles“ to, čemu dnes říkáme speciální teorie relativity. Článek vyrůstá z intelektuálního zápasu, který sváděl od svých šestnácti let s matematickým popisem pohybu světla, jak jej objevil v šedesátých letech 19. století James Clerk Maxwell. Stručně řečeno, v rozporu s tím, co bychom očekávali na základě Newtonových rovnic (a zdravého rozumu), Maxwellovy rovnice (jsou-li správně vyloženy) ukazují, že ať se paprsku světla ženete vstříc, nebo před ním prcháte, jeho rychlost vzhledem k vám bude stále stejná, jako kdybyste stáli – ani o kousíček větší či menší. Tato těžko zpochybnitelná konstantnost rychlosti světla vzrušovala na konci devatenáctého a na počátku dvacátého století ty nejpronikavější vědecké duchy, protože sice vycházela z rovnic a byla potvrzována stále přesnějšími měřeními, ale přesto se zdálo, že to nedává smysl. Jak by se světlo nemělo vůči nám pohybovat rychleji, když mu běžíme vstříc a světelný paprsek nás potkává? Jak by se světlo vůči nám nemělo pohybovat pomaleji, když před ním utíkáme? V této záležitosti Einstein všechno změnil. Rychlost je podílem prošlé vzdálenosti a doby, po kterou se daná vzdálenost prochází, a je tak intimně vázaná k pojmům prostoru a času. A jak hlásal Einstein, prostor a čas *nejsou* – v kontrastu k Newtonovu intuitivně rozumnému popisu – fixní a neměnné. Jsou naopak fluidní a tvárné. Prostor a čas se proměňují, aby udržely jako fixní a věčné něco jiného než sebe samy – rychlost světla, která nezávisí na tom, jak se pohybuje zdroj světla nebo jeho pozorovatel.

Fakticky to znamená, že když měříte délku objektu – ať je to auto, letadlo či cokoliv jiného – za pohybu, výsledek, který dostanete, je menší než v případě, že se objekt nepohybuje. A pozorujete-li pohybující se hodiny, zjistíte, že tikají v pomalejším tempu než stejné hodiny v klidu. Prostě řečeno, pro pohybující se objekt se prostorové vzdálenosti zkracují a čas se zpomaluje. Tyto podivuhodné vlastnosti prostoru a času zůstávaly do roku 1905 zcela skryty, protože byť jsou jejich projevy reálné, zůstávají nepatrné, dokud se uvažované rychlosti neblíží rychlosti světla. Bylo třeba génia, jakým byl Einstein, aby nahlédl za každodenní zkušenost a odhalil skutečnou povahu prostoru a času.

Objev obecné relativity vyrůstá ze speciální relativity, ale Einsteinovi trvalo dalších deset let, než jej dovršil. Hlavním popudem byl pro něho opět nápadný konflikt, na který narazil, když důkladně zkoumal některé z Newtonových dřívějších závěrů. V tomto případě byla v ohnisku jeho zájmu

gravitační síla, zvláště pak otázka, jak rychle se vliv gravitace šíří. Podle speciální teorie relativity se nic – žádný objekt, žádný signál, žádná informace – nemůže pohybovat z jednoho místa ve vesmíru na jiné místo větší rychlostí, než je rychlost světla. Ale jak si uvědomil Einstein, podle Newtonova zákona všeobecné gravitace masivní těleso, jako je Slunce, působí gravitační přitažlivostí na jiná tělesa, jako jsou planety, a to okamžitě. Podle Newtona platí, že kdyby Slunce nějak změnilo svou hmotnost nebo polohu, mohli bychom o změně okamžitě vědět, protože by se okamžitě změnilo gravitační působení Slunce na Zemi. A tato bezprostřední změna by přišla mnohem dříve, než dovoluje omezení dané nepřekročitelností rychlosti světla. Einsteinova motivace pro hledání nové teorie gravitace tedy nepovstala z konfliktu mezi Newtonovými rovnicemi a experimentálními daty, ale z konfliktu mezi Newtonovým popisem gravitace a Einsteinovou speciální teorií relativity. Pro teoretika, jakým byl Einstein, může být teoretická nekonzistence neméně významná nežli nesoulad vyvozený z experimentu a pozorování.

Řešení tohoto konfliktu nepřišlo hned. Roku 1912, asi po pěti letech přemýšlení, Einstein napsal svému příteli Arnoldu Sommerfeldovi, že „ve srovnání s pochopením gravitace byla speciální teorie relativity jen dětská hra“. Nicméně Einstein se do toho rozhodně pustil. Jeho cílem bylo pochopit mechanismus, jímž gravitace působí – především jak to 150 milionů kilometrů vzdálené Slunce *dělá*, aby ovlivnilo pohyb Země. Slunce se Země nikdy nedotýká, jak tedy síla, kterou nazýváme gravitací, komunikuje přes tak obrovské vzdálenosti v téměř prázdném prostoru? To je záhada, které si byl dobře vědom i Newton, když ve svých *Principiích* poznamenal, že není schopen stanovit způsob, jímž je gravitační působení přenášeno, a tudíž mu nezbyvá než ponechat problém „na uvážení čtenářů“. Mnozí čtenáři tuto výzvu bezpochyby jen četli a četli, ale Einstein k tomu přistoupil jinak. Rozhodl se přijmout tuto dvě stě let starou výzvu v naději, že když pochopí, jak gravitace skutečně pracuje, bude moci rozřešit konflikt mezi Newtonovým popisem gravitace a omezením rychlosti, jež klade speciální teorie relativity.

Einsteinovy naděje se ukázaly být dobře podloženy. Roku 1915 přišel s obecnou teorií relativity, v níž určil pravou povahu prostoročasu jako prostředí, které přenáší gravitační sílu. Einstein se domníval, že jako těžký kámen ležící na trampolíně způsobuje, že blána se zakřiví – a ovlivňuje tím pohyb kuliček valících se po povrchu blány –, tak i velká astronomická

tělesa jako Slunce, Země či neutronová hvězda vloženy do prostoročasu způsobují, že *vesmír* se zakřivuje – a takto ovlivňují pohyby dalších těles ve své blízkosti. Když Země obíhá kolem Slunce, pak se podle obecné teorie relativity valí údolím v deformovaném prostoročasovém podkladu, který vytvořila přítomnost Slunce.

To je ohromující závěr. Ve speciální teorii relativity Einstein ukázal, že kosmické lešení nemůže být demontováno do podoby tuhé, univerzálně určené mříže v prostoru a v čase. Nyní v obecné teorii relativity pravil, že stavba kosmického lešení *reaguje* na přítomnost hmoty či energie a naopak stavba prostoročasu ovlivňuje pohyb objektů. Podle Einsteina se prostor a čas podílejí na vývoji vesmíru.

Závěr, který tak dramaticky změnil předcházející koncepce, si žádá dramatickou experimentální podporu. Prostřednictvím své matematické formulace, za kterou velmi vděčí prozíravým geometrickým myšlenkám Bernharda Riemanna z devatenáctého století, dává obecná teorie relativity přesné předpovědi, jak se objekty pohybují pod vlivem gravitační síly (tj. jak zakřivení prostoročasu ovlivňuje pohyb objektů). Porovnáme-li tyto předpovědi s předpověďmi Newtonovy teorie gravitace na základě experimentů a pozorování, Einsteinovy předpovědi se vždy ukáží přinejmenším o trochu přesnější, čímž se opravňuje nárok obecné teorie relativity na nástupnictví po Newtonově teorii. Prvořadě důležité pak je, že když Einstein vypočítal rychlost, již se deformace a zakřivení šíří prostorem – v jeho nové formulaci tedy rychlost gravitace –, byl výsledek neobyčejně potěšující. Na rozdíl od Newtonovy teorie, v níž se předpokládá, že gravitace se šíří okamžitě do jakékoliv vzdálenosti, v obecné teorii relativity se pohybuje právě *rychlostí světla* v plném souladu se základním požadavkem speciální teorie relativity, aby světlo nemohlo být ničím předstiženo.

Einstein publikoval obecnou teorii relativity roku 1916, což byl patrně pro naše pochopení prostoru a času ten vůbec nejdůležitější rok. V rámci obecné teorie relativity je speciální teorie nazírána jako zvláštní případ – uvažujeme v ní prostor a čas v nepřítomnosti podkládajícího rozložení hmoty a energie, jde tedy o prostor a čas v nepřítomnosti gravitace. Připojení gravitace, které Einstein objevil, vdechlo prostoročasu celou jeho neočekávanou tekutost a pružnost.

* * *

Během století od objevu relativity byl Einsteinův průlomový krok lépe pochopen a jeho důsledky pro poznání vesmíru byly plněji rozpoznány. Zde je pět vrcholů.

Za prvé se mnoho odehrálo na poli experimentů. Počáteční experimentální testy relativity byly poněkud nepřímé. Potvrzení obecnou teorií relativity předvídaného ohybu světla hvězd procházejícího v blízkosti Slunce, podané dvěma skupinami astronomů během zatmění slunce roku 1919, je právem považováno za pozorování, jež přesvědčilo svět o správnosti Einsteinovy nové teorie. Avšak bizarní předpovědi teorie relativity, že pohyb a gravitace mohou ovlivnit tempo běhu času, dlouho vzdorovaly přímému potvrzení. Pozorovaná skutečnost, že miony, částice s krátkou dobou života, které vznikají v horních vrstvách atmosféry srážkami s kosmickým zářením, jsou schopny přežít dlouhou cestu k zemskému povrchu (když se miony pohybují rychle, jejich vnitřní hodiny se vůči našim hodinám zpožďují, a proto takové miony žijí déle než jejich nehybné exempláře, což jim dovoluje cestu k povrchu Země dokončit), je krokem k přímějšímu potvrzení, ale kontrast mezi miliontinou sekundy života mionu a časovými intervaly, které zakoušíme v každodenním životě, může toto potvrzení stále činit odtaziťým a ryze teoretickým. Experiment, který v roce 1971 provedli Joseph Hafele a Richard Keating, znamenal velký krok k překlenutí této mezery. Položili hodiny (ovšem atomové) na sedadlo v letadle společnosti Pan American a soustavně monitorovali jejich údaje během obletu kolem zeměkoule. Protože letadlo se pohybovalo a vzhledem k rostoucí vzdálenosti od středu Země se dostávalo do poněkud slabšího gravitačního pole, údaje hodin na palubě se měly lišit od hodin umístěných na zemském povrchu o několik miliardtin sekundy. A právě to experimentátoři zjistili a poskytli tak přímé potvrzení relativistického závěru, že běh času – skutečného času měřeného hodinami – je ovlivněn pohybem a gravitací.

Za druhé se také stále provádějí nové experimenty testující některé subtilnější důsledky relativity. Gravity Probe B, družice létající stovky kilometrů nad zemským povrchem, se snažila získat první přímé potvrzení relativistické předpovědi, že masivní těleso nejenom deformuje stavbu prostoročasu, ale pokud rotuje, vytváří v něm cosi jako vír. Po zaměření těch nejpreciznějších gyroskopů, jaké kdy byly vyrobeny, na zvolenou vzdálenou hvězdu, experimentátoři doufali, že se jim podaří potvrdit relativistickou předpověď, podle níž strhávání prostoročasu zemskou rotací stočí během roku osy palubních gyroskopů o stotisícinu stupně. Změření

tak nepatrného úhlu otočení je těžký úkol, ale po asi čtyřiceti letech vývoje experimentátoři věří, že to se svou technikou dokáží. Další nesnadný, ale nesmírně vzrušující experiment je hledání gravitačních vln. Obecná teorie relativity říká, že když se masivní objekt pohybuje, může způsobit rozvlnění prostoru, asi jako se rozvlní hladina rybníka, když do něho hodíme kamínek. Když taková vlna rozvlněného prostoru dorazí k Zemi, všechny hmotné objekty se budou při průchodu vlny deformující prostor natahovat v proměnlivém směru. Potíž se zachycením těchto gravitačních vln spočívá v tom, že když jsou vytvářeny běžnými jevy (rozbití šálku, srážka aut, odpálení výbušniny atd.), jsou příliš nepatrné, než aby mohly být postřehnuty, zatímco když je produkují katastrofické astrofyzikální události (přeměna hvězdy v supernovu, srážka černých děr atd.), jsou sice velké, ale na své dlouhé cestě k Zemi rychle slábnou. Vědci užívají obecné teorie relativity k výpočtu, že gravitační vlny vytvořené nejintenzivnějšími astrofyzikálními událostmi v typicky astronomických vzdálenostech by mohly změnit metrové tyče o miliontinu miliardtiny centimetru, což je mimořádně obtížné detekovat. Přesto jsou dnes ve Spojených státech v provozu dva detektory gravitačních vln (a ve světě je plánováno nebo pracuje mnoho dalších), které by aspoň v principu byly schopny změřit tak nepatrnou deformaci hmoty. Tento experiment je mimořádně důležitý hlavně proto, že úspěšná detekce gravitační vlny by znamenala více než jen potvrzení další předpovědi obecné relativity. Vzhledem k podstatné slabosti gravitační síly mohou gravitační vlny pronikat oblastmi, které jsou neprůhledné pro viditelné světlo a obecněji pro elektromagnetické záření. Proto by detekce gravitačních vln mohla velmi dobře otevřít novou oblast astronomie, v níž by se vesmír studoval pomocí gravitačního – a nikoliv elektromagnetického – záření. Někteří fyzikové dokonce doufají, že gravitační vlny mohou jednou posloužit k průhledu k samotnému velkému třesku.

Třetí výdobytek se opírá o práci Karla Schwarzschilda, německého fyzika, který krátce po Einsteinově publikaci obecné teorie relativity představil řešení Einsteinových rovnic s pozoruhodnými důsledky. Schwarzschild zjistil, že když se do dostatečně malého objemu napěchuje dostatečné množství hmoty (když se např. celá Země stlačí do balonu o průměru jeden centimetr), bude výsledné zdeformování prostoročasu tak silné, že nic – dokonce ani světlo – nebude schopno odolat výslednému mocnému gravitačnímu přitahování. Einsteina toto řešení překvapilo a domníval se, že extrémní podmínky předvídané Schwarzschildem nebudou v reálném

světě nikdy splněny. Dnes však pozorování užívající mocných pozemských i kosmických dalekohledů odhalují oblasti prostoupené intenzivními gravitačními poli, kde po spirálách dovnitř padající hmota vyzařuje a vydává spektrum rentgenového záření, které přesně odpovídá tomu, co se očekává od hmoty těsně před přechodem přes hranici některé ze Schwarzschildových „temných hvězd“ (později jim vynikající fyzik John Wheeler dal název „černé díry“). Tyto údaje téměř nedovolují pochybovat o tom, že černé díry jsou reálné, a snad dokonce všudypřítomné. Astronomové se dnes domnívají, že mnohé galaxie mají ve svých centrech gigantické černé díry. Pozorování například svědčí o tom, že v jádře naší vlastní galaxie Mléčné dráhy je černá díra o hmotnosti více než *třímilionkrát* větší, než jakou má Slunce. Důležitým problémem, který odolává řešení už více než dvacet pět let, je určení, co se děje v hlubokém nitru černé díry. Obecná teorie relativity jako by napovídala, že uprostřed černé díry končí čas, ale nikdo dosud nestanovil, co to skutečně znamená anebo zda by tento závěr mohly potvrdit úvahy založené na kvantové mechanice. Kdybychom si poradili s tímto problémem, byl by to hluboký průhled do základní povahy prostoru a času.

Za čtvrté je gravitace dominantní, když uvažujeme o velkých aglomeracích hmoty, jakými jsou hvězdy a galaxie. Největší možnou arénou pro uplatnění obecné teorie relativity je největší aglomerace, o jaké lze uvažovat: celek samotného vesmíru. Studium počátku a vývoje vesmíru se nazývá kosmologie a nepřekvapuje, že na tomto poli znamenala obecná teorie relativity revoluci. Před rokem 1916 nebyla nouze o kosmologie navrhované různými světovými teology a přírodními filosofy. S objevem obecné teorie relativity však kosmologie vstoupila do říše přísné vědy. Během pouhých několika roků se Einstein přesvědčil, že kosmologie založená na obecné relativitě je velice neočekávaná. Stavba prostoru založená na obecné teorii relativity nemůže být statická: vesmír se může rozpínat anebo smršťovat, ale nemůže zůstat nehybný. Dokonce i tak samorostlý myslitel, jakým byl Einstein, považoval tento závěr za příliš bizarní, než aby byl ochoten jej přijmout. Vesmír v největším měřítku „samozřejmě“ měl být fixní a neměnný. Aby se vyhnul problematickému důsledku obecné relativity, Einstein roku 1917 pozměnil své rovnice zavedením tzv. kosmologické konstanty – energie rovnoměrně rozložené v prostoru, která mohla působit odpuzování a tak nastolit rovnováhu s gravitační přitažlivostí a umožnit statický vesmír. Někteří z Einsteinových současníků – zejména belgický kněz Georges

Lemaitre a ruský matematik a meteorolog Alexandr Friedmann – si nebyli tak jisti, že vesmír se opravdu nemění, a tak ve dvacátých letech vytvořili řadu možných kosmologií vycházejících z rovnic obecné relativity, a to jak s kosmologickou konstantou, tak i bez ní. Všechny tyto kosmologie byly k dispozici v roce pro kosmologii přelomovém – 1929. V tomto roce Edwin Hubble, který užíval 100palcového dalekohledu observatoře na Mount Wilson, došel k závěru, že daleké galaxie se od nás vzdalují rychlostí úměrnou jejich vzdálenosti, což je v naprostém souladu s obecně relativistickými kosmologiemi, jak je matematicky vypracovali Lemaitre a Friedmann. Prostor se s časem nadouvá. Kdyby se Einstein odhodlal přijmout tento závěr své vlastní teorie relativity, mohl *předpovědět* rozpínání vesmíru o dvanáct let dříve, než bylo pozorováno. Dnes je kosmologie stále jednou z neaktivnějších oblastí teoretických a pozorovatelských výzkumů, jemněji propracované verze Lemaitrova a Friedmannova díla se rozvíjejí po celém světě a všechno je to založeno na rovnicích obecné teorie relativity. Takové výzkumy vedly k závěru, který mnozí fyzici považují za nejvýznamnější překvapení poslední dekády. A to je pátý vrchol.

Díky Hubbleovým pozorováním a mnoha navazujícím výzkumům, které potvrdily jeho závěry, se společenství fyziků přesvědčilo, že vesmír se rozpíná. Ale protože gravitace je přitažlivá síla – síla, která stahuje věci k sobě –, téměř každý byl také přesvědčen, že gravitační přitažlivost má za následek zpomalování expanze v čase. Zajímavým problémem pro výzkum pak bylo, jak určit rychlost zpomalování expanze, což by nám mělo dát informaci o tom, kolik hmoty vesmír obsahuje (více hmoty znamená větší gravitační přitažlivost, a tedy větší tempo zpomalování). Uprostřed devadesátých let se dva týmy snažily taková měření provést: Saul Perlmutter a jeho spolupracovníci v rámci projektu *Supernova Cosmology* a Brian Schmidt se svými kolegy v rámci programu *High-Z Supernova Search*. Koncem devadesátých let obě skupiny došly ke stejnému ohromujícímu závěru: rozpínání prostoru se nezpomaluje. Namísto toho jejich pozorování vzdálených supernov ukázala, že v posledních sedmi miliardách let se rozpínání prostoru *zrychlovalo*. Jak je to možné? To je otázka, s níž badatelé stále zápasí, ale favorizované vysvětlení se jakoby kruhem vrací zpět do roku 1917. Má-li vesmír kosmologickou konstantu právě té správné hodnoty, pak v něm až do doby před asi sedmi miliardami let nad odpuzováním převládala mocnější běžná přitažlivost hmoty. S tím, jak se vesmír rozpínal a hmota se v něm stále více rozplývala do prostoru,

gravitační přitažlivost se stále zmenšovala a u časového ukazatele sedm miliard se odpudivé působení kosmologické konstanty stalo dominantním. Od tohoto mezníku se tempo rozpínání prostoru zvyšuje – expanze prostoru se zrychluje, jak o tom svědčí současná pozorování.

Krátce řečeno, Einsteinův „omyl“ z roku 1917, zavedení odpudivé kosmologické konstanty, může být ve skutečnosti správný krok. Je-li tomu tak, Einstein sice určil špatnou hodnotu kosmologické konstanty (protože jí chtěl přesně vyrovnat gravitační přitažlivost, dokud nezesílí), ale samotná koncepce se osvědčila. V této chvíli zkoumání tempa zrychlování expanze prostoru vede badatele k závěru, že kosmologická konstanta odpovídá za zhruba 70 procent energie celého vesmíru – a tedy *většina* balíčku energie vesmíru může být docela dobře vyplněna touto mysteriózní neviditelnou entitou. Mnozí badatelé souhlasí, že plné porozumění povaze této neviditelné energie je jedním z nejdůležitějších problémů fyziky a kosmologie.

* * *

Poté, co Einstein uspěl se speciální teorií relativity ve spojení prostoru a času do sjednoceného celku, a poté, co uspěl s obecnou teorií relativity ve zjištění, že gravitační síla není nic jiného než deformování a zakřivení prostoročasu, zamyslel se nad tím, zda není možné jít dál a svést druhou tehdy známou sílu – elektromagnetickou – do geometrického rámce, který rozvíjel. Einstein si představoval jedinou teorii, snad vyjádřenou jediným principem či rovnicí, která by dokázala popsat všechny síly přírody. V posledních třiceti letech svého života hledal Einstein tuto tzv. jednotnou teorii s neúnavnou vášní, a ačkoli dokonce přicházely zprávy, že uspěl (jedna z nich se objevila na titulní stránce *New York Times*), pokaždé po přezkoumání výsledků došel k závěru, že cíle ještě nedosáhl. Přesto tyto neúspěchy neoslabovaly jeho víru ve sjednocení. Dokonce roku 1955, když se blížil k smrti v princetonské nemocnici, požádal o zápisník, do kterého chtěl zapsat rovnice v zoufalé naději, že by mu mohla v posledních chvílích života jednotná teorie vytanout na mysli. Nestalo se tak.

Mnoho let po Einsteinově smrti to vypadalo, že sen o jednotné teorii zemřel s ním. Ale koncem šedesátých a začátkem sedmdesátých let se to změnilo. Spojeným úsilím Sheldona Glashowa, Stevena Weinberga a Abduse Salama se slabá jaderná síla (o níž Einstein sotva co věděl, ale dnes ji pokládáme za původce radioaktivity) spojila s elektromagnetickou

silou v elektroslabou sílu – teorie pak byla experimentálně potvrzena na konci sedmdesátých let. Roku 1974 Glashow spolu se svým kolegou Howardem Georgim učinil první krok k rozvinutí „teorie velkého sjednocení“, v níž měly srůstat elektroslabá síla a silná jaderná síla (síla, o níž dnes víme, že drží pohromadě atomová jádra) do jediné matematické struktury. Ačkoliv jejich speciální model byl později experimentálně vyvrácen, mnozí fyzikové věří, že je jen otázka času, kdy bude nějaká verze velkého sjednocení potvrzena. Ale i přes tyto konkrétní kroky vstříc Einsteinovu snu o sjednocení je jedna síla, která tvrdošíjně stojí stranou. Všechny snahy vtělit do jednotné teorie sílu Einsteinovu srdci nejbližší, gravitaci, se ukázaly být teoreticky nekonzistentní.

Problém je, že kvantová mechanika, která je základem našeho popisu povahy tří negravitačních sil, se dostává do zásadních rozporů s Einsteinovým popisem gravitace. Důvod tkví, stručně řečeno, v tom, že einsteinovský obraz prostoru jako hladce zakřiveného geometrického útvaru radikálně odporuje ústřední myšlence kvantové teorie: principu neurčitosti. Roku 1927 Werner Heisenberg objevil, že kvantová mechanika vede k nevyhnutelné neurčitosti, která omezuje možnost přesného stanovení rozličných komplementárních fyzikálních veličin (jakými jsou třeba poloha částice a její rychlost). Tato neurčitost má za následek to, čemu fyzikové říkají „kvantové fluktuace“: částice, zhruba řečeno, se takto nevyhnutelně zmítají a jejich polohy i rychlosti fluktuují v rozmezí povoleném kvantovou neurčitostí. Tyto částicové fluktuace byly hodně studovány experimentálně a Heisenbergův princip neurčitosti byl potvrzen s vysokou přesností. Potíž však nastává, když se princip neurčitosti neaplikuje na obyčejné částice, ale na gravitační sílu. Protože gravitace v Einsteinově popisu není nic jiného než zakřivení prostoročasu, kvantové fluktuace gravitační síly nejsou nic jiného než fluktuace samotné konstrukce prostoročasu. Když fyzikové studovali tuto inkarnaci kvantové neurčitosti matematicky, zjistili, že na malých vzdálenostech a v malém časovém měřítku se kvantové gravitační fluktuace stávají tak velkými, že prostoročas přestane připomínat hladce zakřivenou geometrii, na níž Einstein založil obecnou teorii relativity. Namísto toho bude prostoročas připomínat zpěněný vařící kotel, v němž se prostor divoce zmítá způsobem, který Einsteinovy rovnice nezvládají.

Badatelé se po mnoho let snažili překonat tento nesoulad mezi obecnou teorií relativity a kvantovou mechanikou, ale teprve v sedmdesátých

a ještě výrazněji v osmdesátých letech byla teoreticky nalezena schůdná cesta, která by mohla vést k cíli. Superstrunová teorie napověděla, že tradiční koncepce, podle níž jsou fundamentálními částicemi přírody body zanedbatelně malé rozlohy, je nesprávná. Namísto toho teorie předpokládá, že nejzákladnější entity, z nichž se vytváří hmota, jsou nepatrná jednorozměrná vlákna energie, která by po dostatečném zvětšení vypadala jako malé kmitající struny. „Dostatečným“ se tu míní násobitel mnohemiliardkrát větší, než jakého je možno dosáhnout i našimi nejdůmyslnějšími přístroji, a tím superstrunová teorie vysvětluje, proč si fyzikové dlouho mysleli, že elementární částice musí být body.

Nemusí být patrné, že nám tento přechod od bodových částic ke strunám, které jsou tak malé, že vypadají jako body, příliš pomůže. Ale je tomu tak.

Superstrunová teorie úspěšně sblížuje obecnou relativitu a kvantovou mechaniku. Úplné vysvětlení, jak to dělá, je složité, zde nám však pro pochopení postačí hrubý nástin. Zavedeme-li struny jako základní ingredience, superstrunová teorie vychází ze staré myšlenky o bodových částicích a roztahuje ji – rozpíná ji – do nové myšlenky nepatrných vláken. Toto roztažení bodů ve vlákna vede také k tomu, že mikroskopická struktura prostoru se roztahuje ve srovnání s tím, jak byla nazírána (a jak byla matematicky modelována ve výpočtech) před superstrunovou teorií. Když struny roztahují prostor na mikroskopické úrovni, divoká zmítání, která byla zdrojem teoretického konfliktu mezi kvantovou mechanikou a obecnou teorií relativity, jsou rozepjata a tím rozředěna. A jak potvrzují detailní výpočty, toto rozředění divokých prostoročasových fluktuací je právě postačující k tomu, aby kvantová mechanika a obecná teorie relativity mohly srůst v matematicky konzistentní kvantovou teorii gravitace.

Superstrunová teorie však nejen spojuje obecnou relativitu s kvantovou mechanikou, ale má také prostředky k tomu, aby zahrnula – na stejném základě – elektromagnetickou, slabou i silnou sílu. V superstrunové teorii je každá z těchto sil prostě sdružena s jiným vzorem kmitání na struně. A tak jako je kytarový akord složen ze čtyř různých tónů, jsou čtyři síly přírody spojeny v hudbě superstrunové teorie. A co víc, totéž platí pro veškerou hmotu. Elektron, kvarky, neutrino a všechny další částice jsou v superstrunové teorii také popsány jako struny s rozličnými vzory kmitání. Takže všechna hmota a všechny síly jsou shrnuty do jedné přihrádky kmitajících strun – a jsou tedy právě tak sjednoceny, jak to má v jednotné teorii být.

Konečně si superstrunová teorie žádá, aby stavba vesmíru měla více než tři prostorové rozměry. To mohlo znít podivně a překvapivě, když to bylo vysloveno poprvé, ale je to myšlenka, která předchází supestrunové teorii a jednu dobu se jí věnoval i Einstein. Již roku 1919 německý matematik Theodor Kaluza zjistil, že když doplní čtvrtý rozměr prostoru a přeformuluje obecnou teorii relativity do tohoto rozšířeného prostředí, výsledný soubor rovnic zahrne rovnice původní Einsteinovy formulace a – neuvěřitelně – také rovnice Maxwellovy elektrodynamiky. Čtvrtý rozměr prostoru je tedy schopen rovnice gravitace a elektromagnetismu spojit. Po chvíli váhání se Einstein stal nadšeným stoupencem tohoto přístupu k sjednocení dvou sil, ale po letech výzkumu (s důležitými příspěvky Oskara Kleina) se tento tzv. Kaluzův-Kleinův přístup k unifikaci ukázal neschopným vyrovnat se s některými detaily (do tohoto rámce se například nedařilo vtělit elektron se známými hodnotami hmotnosti a náboje). Naopak v superstrunové teorii se Kaluzova-Kleinova myšlenka extrarozměrů *vynořuje* ze samotné teorie a problémy, které sužovaly stoupence původního Kaluzova-Kleinova přístupu, nevznikají. Navíc geometrie extrarozměrů – o nichž se obvykle předpokládá, že jsou v prostorovém ohledu velmi malé, abychom vysvětlili, proč je nepozorujeme – má vliv na to, jak struny kmitají (asi jako geometrie lesního rohu ovlivňuje vzory kmitání vzduchu, který prochází jeho vnitřkem, geometrie extrarozměrů ovlivňuje vzory kmitání strun), a tedy i na pozorovanou fyziku. To znamená, že geometrie prostoročasu může být spojena nejen s gravitační silou, jak to zjistil Einstein, ale skrze extrarozměry může geometrie postoročasu také určovat hmotnosti a náboje elementárních částic (tyto vlastnosti částic jsou určeny vzory kmitání strun, které jsou zase ovlivněny geometrií extrarozměrů). Zkrátka superstrunová teorie napovídá, že geometrie by mohla vysvětlit, proč je vesmír takový, jaký je.

Myslím, že kdyby byl Einstein naživu, našel by v superstrunové teorii mnoho přesvědčivého a vzrušujícího. Superstrunová teorie posunuje vpřed jeho hledání sjednocení. Vyplývá to z Einsteinovy filosofie, ztělesněné v obecné teorii relativity, která se při popisu vesmíru silně opírá o geometrické myšlenky. A superstrunová teorie ukazuje, jak se může obecná relativita stát slučitelnou s kvantovou mechanikou. Přesto by Einstein bezpochyby pohlížel na superstrunovou teorii také se značnou skepsí. Krátce po svém zveřejnění mohly být speciální i obecná teorie relativity podrobeny přísnému testování, a tak i když vedou k šokujícím důsledkům,

nezbývalo než brát je vážně, protože experimenty ukázaly, že fungují. Naopak superstrunová teorie dosud nenašla experimentální oporu. Učinit dvě experimentálně potvrzené teorie – obecnou teorii relativity a kvantovou teorii – slučitelnými znamená důležitý krok. Ale nikdo nebude přesvědčen, že superstrunová teorie je správná, že je to ta jednotná teorie, kterou Einstein hledal, ale nikdy nenašel, dokud nebude ona sama experimentálně potvrzena. Při rostoucích možnostech urychlovačů po celém světě a stále důmyslnějších dalekohledů sbírajících data s bezprecedentní přesností by se toto potvrzení mohlo zdařit ještě v tomto století. Pak budou Einsteinovy teorie relativity chápány jako část mnohem velkolepější teoretické syntézy. Nestane-li se to, fyzikové celého světa nepochybně přenesou hledání sjednocení na další cesty (některé jiné přístupy, jako smyčková kvantová gravitace, byly již značně rozvinuty a energicky se na nich pracuje). Einstein zapálil pochoděň jednotné teorie. Fyzikové, kteří jdou a půjdou v jeho stopách, učiní všechno pro to, aby nepřestala hořet.

POZNÁMKA K ŠESTÉMU VYDÁNÍ

Pro toto vydání jsem kompletně zrevidoval „Zobecnění teorie gravitace“ a dal jsem mu název „Relativistická teorie nesymetrického pole“. Vedl mě k tomu úspěch, jehož jsem dosáhl – částečně ve spolupráci se svou asistentkou B. Kaufmanovou – při zjednodušení odvození i tvaru rovnic pole. Celá teorie se tak stala průhlednější, aniž se změnil její obsah.

Prosinec 1954

A. E.

PROSTOR A ČAS

V PŘEDRELATIVISTICKÉ FYZICE

Teorie relativity je nejtěsněji spojena s teorií prostoru a času. Začnu proto stručným přezkoumáním našich představ o prostoru a čase, ačkoliv si uvědomuji, že tím otevírám kontroverzní záležitost. Úkolem veškeré vědy, ať už jde o přírodní vědy nebo o psychologii, je uspořádat naše prožitky a dát jim podobu logického systému. Jak jsou naše vžité představy o prostoru a čase spojeny s povahou našich prožitků?

Osobní prožitky se nám skládají do řady událostí a v této řadě se nám jednotlivé události, jak si na ně pamatujeme, jeví uspořádané podle kritéria „dříve“ a „později“, za něž už v analýze pokročit nedovedeme. Pro jednotlivce tedy existuje „Ich-čas“, subjektivní čas. Ten sám o sobě není měřitelný, mohu ovšem přiřadit událostem čísla tak, aby s pozdější událostí bylo spojeno větší číslo než s událostí dřívejší; povaha tohoto spojení může však být zcela libovolná. Toto spojení mohu uskutečnit pomocí hodin, když srovnávám pořadí událostí vytvářených hodinami s pořadím dané řady událostí. Hodinami může být jakýkoliv objekt, který poskytuje řadu událostí, jež lze odpočítávat, a má další vlastnosti, o nichž promluvíím později.

Pomocí jazyka si mohou rozličné osoby své prožitky do jisté míry porovnat. Pak se ukazuje, že určité smyslové vjemy rozličných osob si navzájem odpovídají, zatímco pro jiné smyslové vjemy žádnou takovou korespondenci stanovit nemůžeme.

Zvykáme si tak považovat za reálné ty smyslové vjemy, které jsou společné různým jednotlivcům a které jsou tedy do značné míry neosobní. Přírodní vědy a speciálně ta nejfundamentálnější z nich, fyzika, se zabývají takovými smyslovými vjemy. Představa fyzikálních těles, zejména tuhých těles, je relativně stálým komplexem takových smyslových vjemů. I hodiny jsou těleso či systém v témže smyslu, mají však tu přídavnou vlastnost, že řady událostí, které se na nich odpočítávají, jsou tvořeny elementy, které mohou být vesměs považovány za sobě rovné.

Jediné ospravedlnění pro naše pojmy a soustavy pojmů je v tom, že slouží k vyjádření komplexu našich zkušeností, mimo to žádné oprávnění nemají. Jsem přesvědčen, že filosofové měli neblahý vliv na pokrok vědeckého myšlení, když odstranili jisté fundamentální pojmy z oblasti empirismu, kde jsme je měli pod kontrolou, do nedosažitelných výšin *a priori*. Neboť i když by to mohlo vypadat, že vesmír idejí nelze logickou cestou vyvodit ze zkušenosti, nýbrž je v jistém smyslu výtvořem lidského ducha, bez něhož není žádná věda možná, přesto je právě tak málo nezávislý na povaze naší zkušenosti jako šaty na tvarech lidského těla. To zvláště platí pro naše pojmy času a prostoru, které fyzikové fakticky museli snést z Olympu *a priori*, aby je zpracovali a učinili použitelnými.

Přejděme nyní k našim pojmům a úsudkům o prostoru. I zde je podstatné věnovat bedlivou pozornost vztahům zkušenosti k našim pojmům. Myslím, že Poincaré to jasně rozpoznal ve své knize *La Science et l'Hypothèse*. Mezi všemi změnami, které můžeme vnímat na tuhém tělese, se mimořádnou jednoduchostí vyznačují ty, jichž můžeme vratně dosáhnout, když tělesy podle své vůle pohybujeme; Poincaré to nazval změnami polohy. Pomocí prostých změn polohy můžeme uvést tělesa do stavu, v němž se vzájemně dotýkají. Věty o shodnosti, podstatné pro geometrii, vyjadřují zákony, které platí pro takové změny polohy. Pro pojem prostoru se jeví jako podstatné toto: Můžeme vytvořit nová tělesa, když připojíme tělesa B , C , ... k tělesu A ; řekneme, že tím těleso A *prodlužujeme*. Můžeme prodloužit těleso A tak, že se dotýká libovolného jiného tělesa X . Soubor všech prodloužení tělesa A můžeme označit jako „prostor tělesa A “. Pak platí, že všechna tělesa jsou v „prostoru (libovolně zvoleného) tělesa A “. V tomto smyslu nemůžeme mluvit o abstraktním prostoru, ale pouze o „prostoru příslušném tělesu A “. Zemská kůra hraje v každodenním životě při posuzování relativních poloh těles natolik dominantní roli, že to vedlo k abstraktnímu pojetí prostoru, které je nepochybně neobhajitelné. Abychom se zbavili tohoto fatálního omylu, budeme mluvit pouze o „vztažných tělesech“ či o „vztažném prostoru“. Jak uvidíme později, upřesnění těchto pojmů učinila nezbytným až obecná teorie relativity.

Nebudu zacházet do detailů, co se týče vlastností vztažného prostoru, které vedly k tomu, že chápeme body jako elementy prostoru a prostor jako kontinuum. Nebudu se také pokoušet dále rozebírat vlastnosti prostoru, které ospravedlňují pojem spojitých řad bodů, čili křivek. Známe-li tyto pojmy a jejich vztahy k tuhým tělesům naší zkušenosti, je snadné říci, co

miníme třírozměrností prostoru; ke každému bodu lze přiřadit tři čísla (souřadnice) x_1, x_2, x_3 tak, že přiřazení je vzájemně jednoznačné a x_1, x_2, x_3 se spojitě mění, když bod prochází spojitou řadu bodů (křivku).

V předrelativistické fyzice se předpokládalo, že zákony konfigurace ideálních tuhých těles jsou slučitelné s eukleidovskou geometrií. Co tím míníme, lze vyložit následovně: Dva body vyznačené v tuhém tělese tvoří *interval*. Takový interval ve stavu klidu může být orientován vzhledem k našemu vztažnému prostoru mnoha způsoby. Jestliže nyní body tohoto prostoru mohou být vztaženy k souřadnicím x_1, x_2, x_3 tak, že rozdíly souřadnic $\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta x_3$ na dvou koncích intervalu dávají stejný součet kvadrátů

$$s^2 = \Delta x_1^2 + \Delta x_2^2 + \Delta x_3^2 \quad (1)$$

pro každou orientaci intervalu, pak vztažný prostor nazveme eukleidovským a souřadnice nazveme kartézskými¹. Stačí ovšem učinit tento předpoklad pro limitní případ nekonečně malého intervalu. V tomto předpokladu je zahrnuto i něco poněkud méně speciálního, co však nemůžeme pominout, protože je to zásadně důležité. Za prvé se předpokládá, že můžeme ideální tuhá tělesa přemísťovat libovolným způsobem. Za druhé se předpokládá, že chování ideálních tuhých těles při změnách orientace je nezávislé na látce, z níž jsou tělesa vytvořena, a na změnách poloh těles, takže mohlo-li být jednou dosaženo splnutí dvou intervalů, může se toho znovu dosáhnout kdykoliv a kdekoliv. Oba tyto předpoklady, které jsou zásadně důležité pro geometrii a speciálně pro fyzikální měření, přirozeně vyplývají ze zkušenosti; v obecné teorii relativity stačí předpokládat jejich platnost pouze pro vztažná tělesa a prostory, které jsou ve srovnání s astronomickými rozměry nekonečně malé.

Veličinu s nazveme délkou intervalu. Aby mohla být jednoznačně určena, je nutné libovolně stanovit délku určitého intervalu; například ji můžeme položit rovnou 1 (jednotka délky). Pak mohou být stanoveny délky všech ostatních intervalů. Zvolíme-li x_v jako lineárně závislé na parametru λ

$$x_v = a_v + \lambda b_v$$

obdržíme křivku, která má všechny vlastnosti přímek eukleidovské geometrie. Zejména z toho snadno vyplývá, že uložíme-li n krát za sebou

¹ Tento vztah musí platit pro libovolnou volbu počátku a směru (poměry $\Delta x_1 : \Delta x_2 : \Delta x_3$) intervalu.

interval s podél přímky, dostaneme interval n -s. Délka je tudíž výsledkem měření provedeného podél přímky užitím jednotkové měřicí tyče. Její pojem je stejně nezávislý na souřadnicové soustavě jako pojem přímky, jak to vyplyne z dalšího.

Přejdeme nyní k soustavě myšlenek, které hrají ve speciální i v obecné teorii relativity analogickou roli. Klademe otázku: jsou kromě kartézských souřadnic, kterých jsme použili, ještě jiné ekvivalentní souřadnice? Interval má fyzikální význam, který je nezávislý na volbě souřadnic; a tak je tomu i se sférickou plochou, kterou obdržíme jako soubor všech konců stejně dlouhých intervalů, jež vedeme z libovolného bodu naší vztažné soustavy. Jsou-li x_v právě tak jako x'_v (v probíhá hodnoty od 1 do 3) kartézské souřadnice našeho vztažného prostoru, pak sférická plocha bude v našich dvou soustavách souřadnic vyjádřena rovnicemi

$$\sum \Delta x_v^2 = \text{const.} \quad (2)$$

$$\sum \Delta x_v'^2 = \text{const.} \quad (2a)$$

Jak musíme vyjádřit x'_v pomocí x_v , aby rovnice (2) a (2a) byly vzájemně ekvivalentní? Považujeme-li x'_v za funkce x_v , můžeme podle Taylorovy věty pro malé hodnoty Δx_v psát

$$\Delta x'_v = \sum_{\alpha} \frac{\partial x'_v}{\partial x_{\alpha}} \Delta x_{\alpha} + \frac{1}{2} \sum_{\alpha, \beta} \frac{\partial^2 x'_v}{\partial x_{\alpha} \partial x_{\beta}} \Delta x_{\alpha} \Delta x_{\beta} \dots$$

Dosadíme-li tento vztah do (2a) a porovnáme s (1), vidíme, že x'_v musí být lineární funkcí x_v . Jestliže tedy klademe

$$x'_v = a_v + \sum_{\alpha} b_{v\alpha} x_{\alpha} \quad (3)$$

nebo

$$\Delta x'_v = \sum_{\alpha} b_{v\alpha} \Delta x_{\alpha} \quad (3a)$$

pak ekvivalence rovnic (2) a (2a) bude vyjádřena podmínkou

$$\sum \Delta x_v'^2 = \lambda \sum \Delta x_v^2 \quad (\lambda \text{ nezávisí na } \Delta x_v) \quad (2b)$$

Z toho plyne, že λ musí být konstanta. Položíme-li $\lambda = 1$, (2b) a (3a) ustávají podmínky

$$\sum_v b_{va} b_{v\beta} = \delta_{a\beta} \quad (4)$$

kde $\delta_{a\beta} = 1$ nebo $\delta_{a\beta} = 0$, podle toho, je-li $\alpha = \beta$ nebo $\alpha \neq \beta$. Podmínky (4) se nazývají relacemi ortogonalit a transformace (3), (4) lineárními ortogonálními transformacemi. Požadujeme-li, aby bylo $s^2 = \sum \Delta x_v^2$ v každé souřadnicové soustavě, a používáme-li vždy téže jednotky měření, musí být λ rovno 1. Tudíž lineární ortogonální transformace jsou jediné transformace, jejichž pomocí lze přejít od jedné kartézské soustavy souřadnic v našem vztažném prostoru k druhé. Vidíme, že provedením těchto transformací rovnice přímky přejdou v rovnice přímky. Když převrátíme rovnice (3a) tak, že vynásobíme obě strany veličinami $b_{v\beta}$ a sečteme přes všechna v , dostáváme

$$\sum b_{v\beta} \Delta x'_v = \sum_{v\alpha} b_{va} b_{v\beta} \Delta x_\alpha = \sum_\beta \delta_{a\beta} \Delta x_\alpha = \Delta x_\beta \quad (5)$$

Tytéž koeficienty b určují také inverzní substituci Δx_v . Z geometrického hlediska jsou b_{va} kosiny úhlů mezi osami x'_v a x_v .

Předchozí můžeme shrnout tak, že v eukleidovské geometrii jsou (v daném vztažném prostoru) preferované soustavy souřadnic, kartézské soustavy, které přecházejí jedna v druhou lineárními ortogonálními transformacemi. Vzdálenost s mezi dvěma body našeho vztažného prostoru, měřená měřicí tyčí, je v takovýchto souřadnicích vyjádřena mimořádně jednoduchým způsobem. Celá geometrie může být vybudována na tomto pojmu vzdálenosti. Při tomto přístupu se geometrie vztahuje k reálným věcem (tuhým tělesům) a její teoremy jsou výroky o chování těchto věcí, jejichž pravdivost či nepravdivost lze dokázat.

Je běžným zvykem studovat geometrii bez ohledu na jakýkoliv vztah mezi jejími pojmy a zkušeností. Má to své výhody oddělit, co je čistě logické a nezávislé na zkušenosti, která je ze své podstaty neúplná. To vyhovuje čistému matematikovi. Je uspokojen, může-li vyvodit své teoremy z axiomů korektně, to jest bez vad v logice. Otázka, zda je eukleidovská geometrie pravdivá či nikoli, ho nezajímá. Pro naše účely je však potřebné spojit fundamentální pojmy geometrie s přírodními objekty; bez takového spojení je geometrie pro fyzika bezcenná. Fyzika zajímá otázka, zda jsou

teorémy geometrie pravdivé či nikoliv. Že z tohoto hlediska eukleidovská geometrie znamená něco víc než pouhá vyvození logicky získaná z definic, je možno vidět z následující prosté úvahy:

Mezi n body prostoru je $n(n-1)/2$ vzdáleností $s_{\mu\nu}$; tyto vzdálenosti jsou s $3n$ souřadnicemi vázány vztahy

$$s_{\nu\mu}^2 = (x_{1(\mu)} - x_{1(\nu)})^2 + (x_{2(\mu)} - x_{2(\nu)})^2 + \dots$$

Z těchto $n(n-1)/2$ rovnic můžeme vyloučit $3n$ souřadnic a po tomto vyloučení zůstane pro $s_{\mu\nu}$ nejméně $\frac{n(n-1)}{2} - 3n$ rovnic². Protože $s_{\mu\nu}$ jsou měřitelné veličiny a podle definice jsou vzájemně nezávislé, tyto vztahy mezi $s_{\mu\nu}$ nejsou *a priori* nutné.

Z předešlého je zřejmé, že transformační rovnice (3), (4) mají v eukleidovské geometrii fundamentální význam, když určují přechody od jedné kartézské soustavy k druhé. Kartézské soustavy souřadnic se vyznačují tím, že je v nich měřitelná vzdálenost mezi dvěma body s vyjádřena rovnicí

$$s^2 = \sum \Delta x_v^2$$

Jsou-li $K_{(x_v)}$ a $K'_{(x'_v)}$ dvě kartézské soustavy souřadnic, je

$$\sum \Delta x_v^2 = \sum \Delta x_v'^2$$

Pravá strana vztahu se identicky rovná levé straně v důsledku rovnic pro lineární ortogonální transformace a rozdíl mezi nimi je jen v tom, že x_v je zaměněno za x'_v . To vyjadřuje výrok, že $\sum \Delta x_v^2$ je invariantem vzhledem k lineárním ortogonálním transformacím. Je zřejmé, že v eukleidovské geometrii mají objektivní význam nezávislý na speciální volbě kartézských souřadnic ty a jenom ty veličiny, které mohou být vyjádřeny jako invarianty vzhledem k lineárním ortogonálním transformacím. Proto je teorie invariantů, která se zabývá jejich tvarem, pro analytickou geometrii tak důležitá.

² Ve skutečnosti je rovnic $n(n-1)/2 - 3n + 6$.

Jako druhý příklad geometrického invariantu uvažujme objem. Je vyjádřen jako

$$V = \iiint dx_1 dx_2 dx_3$$

Pomocí Jacobiho věty můžeme psát

$$\iiint dx'_1 dx'_2 dx'_3 = \iiint \frac{\partial (x'_1, x'_2, x'_3)}{\partial (x_1, x_2, x_3)} dx_1 dx_2 dx_3$$

kde integrand v posledním integrálu je funkcionální determinant x'_v vzhledem k x_v a podle (3) se rovná determinantu $|b_{\mu\nu}|$ transformačních koeficientů $b_{\nu\alpha}$. Utvoříme-li determinant veličin $\delta_{\mu\alpha}$ z rovnice (4), obdržíme pomocí věty o násobení determinantů

$$1 = |\delta_{\alpha\beta}| = \left| \sum_v b_{\nu\alpha} b_{\nu\beta} \right| = |b_{\mu\nu}|^2; \quad |b_{\mu\nu}| = \pm 1 \quad (6)$$

Jestliže se omezíme na transformace, které mají determinant +1 (a pouze tyto dostaneme spojitými změnami souřadnicových soustav), pak V je invariant.³

Invarianty však nejsou jedinými prostředky, jak vyjádřit nezávislost na speciální volbě kartézských souřadnic. Dalšími prostředky vyjádření jsou vektory a tenzory. Vyjádřeme fakt, že bod s pohyblivými souřadnicemi x_v leží na přímce. Máme

$$x_v - A_v = \lambda B_v \quad (v \text{ od } 1 \text{ do } 3)$$

Bez omezení obecnosti můžeme klást

$$\sum B_v^2 = 1$$

Vynásobíme-li rovnice veličinami $b_{\rho\nu}$ (srovnej (3a) a (5)) a sečteme přes všechna ν , dostáváme

$$x'_\beta - A'_\beta = \lambda B'_\beta$$

³ Jsou tedy dva druhy kartézských soustav, které označujeme jako „pravotočivé“ a „levotočivé“ soustavy. Rozdíl mezi nimi je znám každému fyzikovi a inženýrovi. Je zajímavé poznamenat, že tyto dva druhy soustav nemohou být definovány geometricky každý sám o sobě, ale pouze na základě kontrastu mezi nimi.

kde jsme zapsali

$$B'_\beta = \sum_v b_{\beta v} B_v; \quad A'_\beta = \sum_v b_{\beta v} A_v$$

To jsou rovnice přímek vzhledem k jiné kartézské soustavě souřadnic K' . Mají stejný tvar jako rovnice v původní soustavě souřadnic. Je tedy zřejmé, že přímky mají význam nezávislý na soustavě souřadnic. Formálně je to dáno faktem, že veličiny $(x_v - A_v) - \lambda B_v$ se transformují jako komponenty intervalu Δx_v . Soubor tří veličin, definovaný v každé kartézské soustavě souřadnic, které se transformují jako komponenty intervalu, se nazývá vektor. Jestliže jsou tři komponenty vektoru nulové v jedné kartézské soustavě souřadnic, jsou nulové ve všech soustavách, protože transformační rovnice jsou homogenní. Můžeme tedy pochopit význam pojmu vektoru bez odvolání na geometrickou reprezentaci. Uvedené chování rovnic přímky můžeme vyjádřit slovy, že rovnice přímky je kovariantní vzhledem k lineárním ortogonálním transformacím.

Nyní stručně ukážeme, že existují geometrické entity, které vedou k pojmu tenzoru. Necht' je P_0 střed plochy druhého řádu, P jiný bod na této ploše a ξ_v projekce intervalu P_0P na souřadnicové osy. Pak rovnice plochy je

$$\sum a_{\mu\nu} \xi_\mu \xi_\nu = 1$$

V tomto a v dalších analogických případech budeme vynechávat znak sumace a rozumět, že sumace se provádí přes ty indexy, které se ve výrazu objevují dvakrát. Zapišeme tedy rovnici plochy jako

$$a_{\mu\nu} \xi_\mu \xi_\nu = 1$$

Veličiny $a_{\mu\nu}$ při dané poloze středu určují úplně plochu ve zvolené soustavě kartézských souřadnic. Ze známých transformačních zákonů pro ξ_v (3a) pro lineární ortogonální transformace snadno najdeme transformační zákon⁴ pro $a_{\mu\nu}$

$$a'_{\sigma\tau} = b_{\sigma\mu} b_{\tau\nu} a_{\mu\nu}$$

⁴ Rovnice $a'_{\sigma\tau} \xi'_\sigma \xi'_\tau = 1$ může být pomocí vztahu (5) snadno nahrazena rovnicí $a'_{\sigma\tau} b_{\sigma\mu} b_{\tau\nu} \xi_\mu \xi_\nu = 1$, z čehož výsledek okamžitě vyplývá.

Tato transformace je homogenní a prvního řádu pro $a_{\mu\nu}$. Takto transformované veličiny $a_{\mu\nu}$ se nazývají komponentami tenzoru druhého řádu (kvůli zdvojenému indexu). Jsou-li všechny komponenty $a_{\mu\nu}$ tenzoru v nějaké kartézské soustavě souřadnic nulové, pak jsou nulové v každé kartézské soustavě. Příslušný tenzor (a) udává tvar a polohu plochy druhého řádu.

Tenzory vyššího řádu (s vyšším počtem indexů) mohou být definovány analogicky. Je možné a vhodné považovat vektory za tenzory řádu 1 a invarianty (skaláry) za tenzory řádu nula. S ohledem na to lze problém teorie invariantů formulovat takto: podle jakých zákonů lze utvořit z daných tenzorů nové tenzory? Uvedeme teď tyto zákony, abychom jich mohli později použít. Budeme se nejprve zabývat jen vlastnostmi tenzorů vzhledem k transformacím od jedné kartézské soustavy k druhé v témže vztažném prostoru, přičemž transformace jsou lineární a ortogonální. Protože zákony jsou zcela nezávislé na počtu rozměrů prostoru, necháme nejprve číslo n neurčeno.

Definice Je-li objekt definován vzhledem ke každé soustavě kartézských souřadnic v n -rozměrném vztažném prostoru pomocí n^α čísel $A_{\mu\nu\rho}\dots$ (α je počet indexů), pak tato čísla jsou komponentami tenzoru řádu α , když platí transformační zákon

$$A'_{\mu'\nu'\rho'\dots} = b_{\mu'\mu} b_{\nu'\nu} b_{\rho'\rho} \dots A_{\mu\nu\rho}\dots \quad (7)$$

Poznámka Z této definice vyplývá, že

$$A_{\mu\nu\rho}\dots B_\mu C_\nu D_\rho \dots \quad (8)$$

je invariant, pokud (B) , (C) , (D) ... jsou vektory. Naopak můžeme usoudit na tenzorovou povahu (A) , víme-li, že výraz (8) dává invariant pro libovolnou volbu vektorů (B) , (C) , atd.

Sčítání a odčítání Sčítáním a odčítáním příslušných komponent tenzorů téhož řádu vzniká tenzor stejného řádu

$$A_{\mu\nu\rho}\dots \pm B_{\mu\nu\rho}\dots = C_{\mu\nu\rho}\dots \quad (9)$$

Důkaz plyne okamžitě z výše uvedené definice tenzoru.

Násobení Z tenzoru řádu α a z tenzoru řádu β můžeme obdržet tenzor řádu $\alpha + \beta$, vynásobíme-li všechny komponenty prvního tenzoru všemi komponentami druhého tenzoru

$$T_{\mu\nu\rho\ldots\alpha\beta\gamma\ldots} = A_{\mu\nu\rho\ldots} B_{\alpha\beta\gamma\ldots} \quad (10)$$

Úžení Tenzor řádu $\alpha - 2$ lze obdržet z tenzoru řádu α , když dva určité indexy označíme stejně a pak přes tento jediný index sečteme

$$T_{\rho\ldots} = A_{\mu\mu\rho\ldots} \left(= \sum_{\mu} A_{\mu\mu\rho\ldots} \right) \quad (11)$$

Důkaz je

$$A'_{\mu\mu\rho\ldots} = b_{\mu\alpha} b_{\mu\beta} b_{\rho\gamma} \ldots A_{\alpha\beta\gamma\ldots} = \delta_{\alpha\beta} b_{\rho\gamma} \ldots A_{\alpha\beta\gamma\ldots} = b_{\rho\gamma} \ldots A_{\alpha\alpha\gamma\ldots}$$

Kromě těchto elementárních operací lze vytvořit nové tenzory také derivováním („Erweiterung“)

$$T_{\mu\nu\rho\ldots\alpha} = \frac{\partial A_{\mu\nu\rho\ldots}}{\partial x_{\alpha}} \quad (12)$$

Podle těchto operačních pravidel lze z jedněch tenzorů tvořit nové tenzory vůči lineárním ortogonálním transformacím.

Symetrické vlastnosti tenzorů Tenzory se nazývají symetrické (nebo antisymetrické) vzhledem ke dvojici svých indexů μ a ν , jestliže komponenty, které se dostanou výměnou těchto indexů, jsou si rovny (nebo změni znaménko).

$$\text{Podmínka pro symetrii: } A_{\mu\nu\rho} = A_{\nu\mu\rho}$$

$$\text{Podmínka pro antisymetrii: } A_{\mu\nu\rho} = -A_{\nu\mu\rho}$$

Teorém Symetrická či antisymetrická povaha tenzorů je nezávislá na volbě souřadnic a v tom spočívá její důležitost. Důkaz vyplývá z definičních rovnic pro tenzory.

Speciální tenzory

I. Veličiny $\delta_{\mu\rho}$ definované rovnicí (4) jsou komponentami tenzoru (fundamentální tenzor).

Důkaz: Jestliže na pravé straně transformační rovnice $A'_{\mu\nu} = b_{\mu\alpha} b_{\nu\beta} A_{\alpha\beta}$ nahradíme $A_{\alpha\beta}$ veličinami $\delta_{\alpha\beta}$ (které se rovnají 1 nebo 0 podle toho, je-li $\alpha = \beta$ nebo $\alpha \neq \beta$), dostáváme

$$A'_{\mu\nu} = b_{\mu\alpha} b_{\nu\alpha} = \delta_{\mu\nu}$$

Ospravedlnění poslední rovnosti se stane zřejmým, užijeme-li (4) v inverzní substituci (5).

II. Existuje tenzor ($\delta_{\mu\nu\rho} \dots$) antisymetrický vzhledem ke každé dvojici indexů, jehož řád je roven počtu rozměrů prostoru n a jehož komponenty se rovnají +1 nebo -1 podle toho, zda $\mu\nu\rho \dots$ tvoří sudou či lichou permutaci čísel 1 2 3 ...

Důkaz se provádí pomocí výše dokázaného teorému, podle něhož $|b_{\rho\sigma}| = 1$.

Těchto několik jednoduchých vět tvoří aparát teorie invariantů pro vybudování rovnic předrelativistické fyziky i speciální teorie relativity.

Viděli jsme, že chceme-li specifikovat prostorové vztahy v předrelativistické fyzice, potřebujeme vztažné těleso či vztažný prostor a navíc kartézskou soustavu souřadnic. Můžeme oba tyto pojmy nechat splynout v jediný, když si představíme kartézskou soustavu souřadnic jako kubickou mříž tvořenou tyčemi jednotkové délky. Souřadnice mřížových bodů soustavy jsou celá čísla. Z fundamentálního vztahu

$$s^2 = \Delta x_1^2 + \Delta x_2^2 + \Delta x_3^2 \quad (13)$$

vyplývá, že všechny prvky takové prostorové mříže mají jednotkovou délku. Abychom stanovili časové vztahy, je třeba připojit standardní hodiny, které umístíme třeba v počátku naší kartézské soustavy souřadnic či vztažné soustavy. Jestliže někde nastane nějaká událost, můžeme jí připsat tři souřadnice x_ν a čas t , jakmile jsme stanovili čas na hodinách v počátku, který je současný s událostí.

Připisujeme tedy (hypoteticky) objektivní význam výroku o současnosti vzdálených událostí, zatímco dosud jsme se zabývali pouze současností dvou prožitků jedince. Takto specifikovaný čas je ve všech událostech nezávislý na poloze souřadnicové soustavy v našem vztažném prostoru a je tedy invariantní vzhledem k transformaci (3).

Postuluje se, že soustava rovnic vyjadřující zákony předrelativistické fyziky je kovariantní vzhledem k transformaci (3), stejně jako vztahy eukleidovské geometrie. Takto je vyjádřena homogenita a izotropie prostoru.⁵ Posoudíme nyní z tohoto hlediska některé důležitější rovnice fyziky.

Pohybové rovnice hmotné částice jsou

$$m \frac{d^2 x_v}{dt^2} = X_v \quad (14)$$

(dx_v) je vektor; dt a tedy i $1/dt$ je invariant; tedy (dx_v / dt) je vektor; obdobně lze dokázat, že $(d^2 x_v / dt^2)$ je vektor. Obecně operace derivování podle času tenzorový charakter nemění. Protože m je invariant (tenzor řádu 0), je $(m d^2 x_v / dt^2)$ vektor čili tenzor řádu 1 (podle věty o násobení tenzorů). Má-li síla (X_v) vektorovou povahu, platí to i pro rozdíl $(m d^2 x_v / dt^2 - X_v)$.

Tyto pohybové rovnice tedy platí v každé kartézské soustavě souřadnic ve vztažném prostoru. V případě, že síly jsou konzervativní, můžeme snadno rozpoznat vektorovou povahu (X_v) . Pak totiž existuje potenciální energie Φ , která závisí pouze na vzájemných vzdálenostech částic, a je to tedy invariant. Vektorová povaha síly $X_v = -\partial\Phi / \partial x_v$ je tedy důsledkem našeho obecného teorému o derivaci tenzoru řádu 0.

Násobíme-li rychlostí, tenzorem řádu 1, obdržíme tenzorovou rovnici

$$\left(m \frac{d^2 x_v}{dt^2} - X_v \right) \frac{dx_v}{dt} = 0$$

Zúžením a násobením skalárem dt dostaneme rovnici pro kinetickou energii

$$d \left(\frac{mq^2}{2} \right) = X_v dx_v$$

⁵ I v případě, že by v prostoru existoval preferovaný směr, bylo by možné zákony fyziky vyjádřit tak, aby byly kovariantní vzhledem k transformaci (3); ale toto vyjádření by bylo pro tento případ nevhodné. Kdyby v prostoru existoval preferovaný směr, popis přírodních jevů by se zjednodušil určitou orientací soustavy souřadnic vzhledem k tomuto směru. Pokud naopak není žádný jednoznačně určený směr v prostoru, není logické formulovat přírodní zákony tak, aby zakrývaly ekvivalenci souřadnicových soustav, které jsou různě orientovány. S tímto pohledem se znovu setkáme ve speciální i v obecné teorii relativity.

Značí-li ζ_v rozdíl souřadnic hmotné částice a bodu fixovaného v prostoru, má ζ_v povahu vektoru. Máme zřejmě $d^2x_v/dt^2 = d^2\zeta_v/dt^2$, takže pohybové rovnice částice mohou být psány jako

$$m \frac{d^2\zeta_v}{dt^2} - X_v = 0$$

Vynásobením této rovnice ζ_μ získáme tenzorovou rovnici

$$\left(m \frac{d^2\zeta_v}{dt^2} - X_v \right) \zeta_\mu = 0$$

Zúžíme-li tenzor na levé straně a zprůměrujeme v čase, dostaneme větu o virialu, kterou se však nebudeme dále zabývat. Výměnou indexů a následným odečtením dojdeme po jednoduché úpravě k větě o momentech

$$\left[m \left(\zeta_\mu \frac{d\zeta_v}{dt} - \zeta_v \frac{d\zeta_\mu}{dt} \right) \right] = \zeta_\mu X_v - \zeta_v X_\mu \quad (15)$$

Odtud je zřejmé, že moment vektoru není vektor, ale tenzor. V důsledku jeho antisymetrické povahy nemá tato soustava rovnic devět, ale jen tři nezávislé rovnice. Tato možnost nahrazení antisymetrických tenzorů druhého řádu v třírozměrném prostoru vektory se opírá o vytvoření vektoru

$$A_\mu = \frac{1}{2} A_{\sigma\tau} \delta_{\sigma\tau\mu}$$

Znásobíme-li antisymetrický tenzor řádu 2 speciálním antisymetrickým tenzorem δ , jak byl zaveden výše, a dvakrát zúžíme, bude výsledkem vektor, jehož komponenty jsou numericky rovny komponentám tenzoru. Jde o tak zvané axiální vektory, které se při přechodu od pravotočivé soustavy k levotočivé transformují odlišně než Δx_v . Brát tenzor druhého řádu jako vektor v třírozměrném prostoru přispívá k názornosti, ale nevyjadřuje pravou povahu odpovídající veličiny tak dobře, jako když ji chápeme jako tenzor.

Dále budeme uvažovat o pohybových rovnicích spojitého prostředí. Nechť ρ je hustota, u_v komponenty rychlosti jakožto funkce souřadnic a času, X_v objemové síly na jednotku hmotnosti a $p_{v\sigma}$ plošná napětí kolmá

k σ -osám ve směru rostoucího x_v . Pak pohybové rovnice jsou dány Newtonovými zákony

$$\rho \frac{du_v}{dt} = - \frac{\partial p_{v\sigma}}{\partial x_\sigma} + \rho X_v$$

v nichž du_v/dt je zrychlení částice, která má v čase t souřadnice x_v . Vyjádříme-li toto zrychlení pomocí parciálních derivací, dostaneme po vydělení veličinou ρ

$$\frac{\partial u_v}{dt} + \frac{\partial u_v}{\partial x_\sigma} u_\sigma = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p_{v\sigma}}{\partial x_\sigma} + X_v \quad (16)$$

Musíme ukázat, že tato rovnice platí nezávisle na speciální volbě kartézské soustavy souřadnic. (u_v) je vektor a tudíž $\partial u_v / \partial t$ je také vektor. $\partial u_v / \partial x_\sigma$ je tenzor řádu 2, $u_\tau \partial u_v / \partial x_\sigma$ je tenzor řádu 3. Druhý člen na levé straně je výsledkem zúžení v indexech σ, τ . Vektorová povaha druhého členu na pravé straně je zřejmá. Aby také první člen na pravé straně mohl být vektor, je třeba, aby $p_{v\sigma}$ byl tenzor. Pak derivováním a úžením dostáváme veličinu $\partial p_{v\sigma} / \partial x_\sigma$, která je tudíž vektorem a je jím tedy i po vynásobení skalárem $1/\rho$. Že $p_{v\sigma}$ je tenzor a tudíž se transformuje podle rovnice

$$p'_{\mu\nu} = b_{\mu\alpha} b_{\nu\beta} p_{\alpha\beta}$$

se v mechanice dokazuje integrováním této rovnice přes nekonečně malý čtyřstěn. Také se tam dokazuje použitím věty o momentech na nekonečně malý rovnoběžník, že $p_{v\sigma} = p_{\sigma v}$ a tenzor napětí je tedy symetrickým tenzorem. Z řečeného plyne, že podle shora uvedených pravidel je rovnice kovariantní vzhledem k ortogonálním transformacím v prostoru (transformace rotace) a pravidla, podle nichž se veličiny v rovnici musí transformovat, aby rovnice byla kovariantní, se rovněž ožřejmují.

Kovariance rovnice kontinuity

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_v)}{\partial x_v} = 0 \quad (17)$$

si již nevyžaduje žádnou speciální diskusi.

Budeme také testovat kovarianci rovnic, které vyjadřují závislost komponent napětí na vlastnostech látky, a sestavíme tyto rovnice pro případ

stlačitelné vazké tekutiny pomocí podmínek kovariance. Zanedbáme-li vazkost, bude tlak p skalár a bude záviset pouze na hustotě a teplotě tekutiny. Příspěvek k tenzoru napětí je pak zřejmý

$$p\delta_{\mu\nu}$$

kde $\delta_{\mu\nu}$ je speciální symetrický tenzor. Tento člen bude také vystupovat v případě vazké tekutiny. Ale v tomto případě tu budou i tlakové členy, které závisí na prostorových derivacích u_ν . Budeme předpokládat, že tato závislost je lineární. Protože tyto členy musí být symetrickými tenzory, jediné, které se tu mohou objevit, budou

$$\alpha \left(\frac{\partial u_\mu}{\partial x_\nu} + \frac{\partial u_\nu}{\partial x_\mu} \right) + \beta \delta_{\mu\nu} \frac{\partial u_\alpha}{\partial x_\alpha}$$

(neboť $\partial u_\alpha / \partial x_\alpha$ je skalár). Z fyzikálních důvodů (žádný smyk) se předpokládá, že při symetrickém rozšíření do všech směrů, tj. když

$$\frac{\partial u_1}{\partial x_1} = \frac{\partial u_2}{\partial x_2} = \frac{\partial u_3}{\partial x_3}; \quad \frac{\partial u_1}{\partial x_2} \text{ atd.} = 0$$

nepůsobí žádné síly tření, z čehož plyne, že $\beta = -2/3 \alpha$. Je-li pouze $\partial u_1 / \partial x_3$ různé od nuly, položíme $p_{31} = -\eta \partial u_1 / \partial x_3$, čímž je určeno α . Pak obdržíme pro úplný tenzor napětí

$$p_{\mu\nu} = p\delta_{\mu\nu} - \eta \left[\left(\frac{\partial u_\mu}{\partial x_\nu} + \frac{\partial u_\nu}{\partial x_\mu} \right) - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_1} + \frac{\partial u_2}{\partial x_2} + \frac{\partial u_3}{\partial x_3} \right) \delta_{\mu\nu} \right] \quad (18)$$

Heuristická hodnota teorie invariantů, která je založena na izotropii prostoru (ekvivalence všech směrů), se z tohoto příkladu stává zřejmou.

Proberme nakonec Maxwellovy rovnice ve formě, v níž tvoří základ Lorentzovy elektronové teorie.

$$\left. \begin{aligned}
 \frac{\partial h_3}{\partial x_2} - \frac{\partial h_2}{\partial x_3} &= \frac{1}{c} \frac{\partial e_1}{\partial t} + \frac{1}{c} i_1 \\
 \frac{\partial h_1}{\partial x_3} - \frac{\partial h_3}{\partial x_1} &= \frac{1}{c} \frac{\partial e_2}{\partial t} + \frac{1}{c} i_2 \\
 \frac{\partial h_2}{\partial x_1} - \frac{\partial h_1}{\partial x_2} &= \frac{1}{c} \frac{\partial e_3}{\partial t} + \frac{1}{c} i_3 \\
 \cdot & \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \\
 \frac{\partial e_1}{\partial x_1} + \frac{\partial e_2}{\partial x_2} + \frac{\partial e_3}{\partial x_3} &= \rho
 \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

$$\left. \begin{aligned}
 \frac{\partial e_3}{\partial x_2} - \frac{\partial e_2}{\partial x_3} &= -\frac{1}{c} \frac{\partial h_1}{\partial t} \\
 \frac{\partial e_1}{\partial x_3} - \frac{\partial e_3}{\partial x_1} &= -\frac{1}{c} \frac{\partial h_2}{\partial t} \\
 \frac{\partial e_2}{\partial x_1} - \frac{\partial e_1}{\partial x_2} &= -\frac{1}{c} \frac{\partial h_3}{\partial t} \\
 \cdot & \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \\
 \frac{\partial h_1}{\partial x_1} + \frac{\partial h_2}{\partial x_2} + \frac{\partial h_3}{\partial x_3} &= 0
 \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

Zde $\mathbf{i}$ je vektor, protože hustota proudu je definována jako hustota elektriny násobená vektorem její rychlosti. Podle prvních tří rovnic je zřejmé, že také $\mathbf{e}$ lze považovat za vektor. Pak $\mathbf{h}$ nemůže být považováno za vektor.⁶

⁶ Tyto úvahy umožní čtenáři seznámit se s tenzorovými operacemi a vyhnout se přitom speciálním nesnázím čtyřrozměrného přístupu; odpovídající úvahy ve speciální teorii relativity (Minkowského interpretace pole) mu pak budou působit méně potíží.

Rovnice však mohou být snadno interpretovány, pokud je $\mathbf{h}$ považováno za antisymetrický tenzor druhého řádu. Pak můžeme psát h_{23} , h_{31} , h_{12} namísto h_1 , h_2 , h_3 . Povšimneme-li si antisymetrie $h_{\mu\nu}$, můžeme první tři rovnice (19) a (20) zapsat ve tvaru

$$\frac{\partial h_{\mu\nu}}{\partial x_\nu} = \frac{1}{c} \frac{\partial e_\mu}{\partial t} + \frac{1}{c} i_\mu \quad (19a)$$

$$\frac{\partial e_\mu}{\partial x_\nu} - \frac{\partial e_\nu}{\partial x_\mu} = + \frac{1}{c} \frac{\partial h_{\mu\nu}}{\partial t} \quad (20a)$$

Na rozdíl od $\mathbf{e}$ je $\mathbf{h}$ veličina, která má stejný typ symetrie jako úhlová rychlost. Divergenční rovnice nabývají tvaru

$$\frac{\partial e_\nu}{\partial x_\nu} = \rho \quad (19b)$$

$$\frac{\partial h_{\mu\nu}}{\partial x_\rho} + \frac{\partial h_{\nu\rho}}{\partial x_\mu} + \frac{\partial h_{\rho\mu}}{\partial x_\nu} = 0 \quad (20b)$$

Poslední rovnice je antisymetrická tenzorová rovnice třetího řádu (antisymetrie levé strany vzhledem ke každému páru indexů může být snadno dokázána, povšimneme-li si antisymetrie $h_{\mu\nu}$).

Tento způsob označení je přirozenější než obvykle užívaný, protože na rozdíl od něj je použitelný beze změny znaménka v kartézských levo-otočivých soustavách stejně dobře jako v pravotočivých.

DOSLOV

[Jan Novotný]

Albert Einstein se poprvé výrazně zapsal do mého života v roce 1962, kdy se mi ještě jako studentovi dostal do rukou v předchozím roce vydaný soubor jeho esejů, přednášek a úvah *Jak vidím svět*. Einstein tu nepíše jen o fyzice, ale i o svých filosofických názorech, o společenských a politických problémech, o náboženství a o etice. Promýšlení knihy bylo jedním z nejmocnějších impulzů, který mě uvedl na životní dráhu teoretického fyzika. Teprve mnohem později jsem zjistil, že kniha byla oproti originálu ochuzena o některé texty a i ty převzaté byly někdy podrobeny cenzuře.

Čtenářům lze doporučit – jako svědectví o době – porovnání s úplným českým vydáním z roku 1993 a případně též s prvním českým vydáním z roku 1934 pod názvem *Můj světový názor*.

Aby druhý díl souboru nazvaný *Z mých pozdějších let* nepotkal podobný osud, zamýšlel kolektiv brněnských fyziků pod vedením profesora Martina Černohorského vydat jeho překlad v nezávislé strojopisné edici Prameny. To se do Listopadu 1989 nestihlo a dílo vyšlo knižně v roce 1995.

Od prvního českého vydání 1945 je u nás oblíbená kniha *Fyzika jako dobrodružství poznání*, kterou Einstein napsal společně se svým žákem Leopoldem Infeldem a z jeho iniciativy. V USA vyšla roku 1938 pod názvem *The Evolution of Physics. The Growths of Ideas from Early Concepts to Relativity and Quants*.

Einstein však již předtím věnoval nezanedbatelnou část úsilí tomu, aby myšlenky svých teorií přiblížil širšímu okruhu zájemců. Roku 1917 vychází kniha *Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie (Gemeinverständlich)*. Pro její české vydání roku 1923 napsal Einstein předmluvu, v níž připomněl své krátké, ale plodné pražské působení. Poslední české vydání z roku 2005 se jmenuje *Teorie relativity* a obsahuje kromě několika nově přeložených dodatků také obsáhlou informativní stat' o Einsteinovi s přehledem literatury, jež o něm vyšla v češtině.

Sto let po dosažení největšího Einsteinova vědeckého úspěchu – formulaci gravitačních rovnic obecné teorie relativity, označovaných jeho jménem – dostává český čtenář do rukou další výklad Einsteinových teorií a myšlenek „z první ruky“. Knihu *The Meaning of Relativity* vydala roku 1921 univerzita v Princetonu. Je založena na čtyřech přednáškách, které na ní měl Einstein v květnu téhož roku v rámci *Stafford Little Lectures* (Henry Stafford Little byl americký právník a mecenáš). Einstein pozdější vydání doplnil závažnými přídavky – v roce 1945 to byl dodatek *O „kosmologickém problému“* a v roce 1953 *Zobecnění teorie gravitace*. Tento dodatek však Einstein ještě přepracoval a zařadil jej do definitivního vydání v roce 1955 pod názvem *Relativistická teorie nesymetrického pole*. Touto prací se Einsteinovo dílo uzavřelo.

Z popsané historie je zřejmé, že Einstein považoval *Meaning* za kano-nický výklad nejpodstatnější části svého díla. (Připomeňme ovšem, že je i autorem závažných příspěvků ke kvantové teorii, termodynamice, statistické fyzice a k filosofickým problémům přírodních věd.)

O překladu Einsteinova díla jsem uvažoval spolu se svým učitelem profesorem Janem Horským již před půl stoletím. Snahy najít nakladatele však narážely na obavy, jejichž podstatu později vyjádřil Stephen Hawking slovy, že každý vzorec snižuje počet zakoupených výtisků o polovinu. Jsem proto vděčen profesorovi Janu Fischerovi, který mě k návratu k dávnému záměru povzbudil, a nakladatelství Vyšehrad, které se ujalo jeho realizace. Věřím, že se najdou čtenáři, kteří vědí, že plné prožití dobrodružství poznání, jak je přináší Einsteinovo dílo, by bez vyspělejší matematiky nebylo úplné.

V dalším nabízím čtenáři krátkou předběžnou procházku Einsteinovou knihou, v níž připomenu její osnovu a další vývoj poznání, jak k němu došlo během šedesáti let od konce Einsteinova života.

První Einsteinova přednáška začíná hutným filosoficky laděným úvodem o vztahu smyslových vjemů, vědecké teorie a reality. Poté Einstein shrnuje hlavní výsledky, k nimž dospěla předrelativistická fyzika zejména se zřetelem k prostoru a času. Čtenář, který jistě právem pokládá Einsteina za revolucionáře, ho zde pozná i jako konzervativce, který si váží dědictví minulosti, dobře je zná a hodlá jeho nejsilnější stránky podržet. Klíčovým

slovem pro něho není „relativita“, ale „invariance“, neměnnost fyzikálních zákonů při změnách způsobu popisu. Nalézání invariantních veličin a rovnic dává klíč k stanovení zákonů, které jsou ve shodě s pozorovanou realitou. Tímto vůdčím principem se Einstein řídil v celém svém díle.

Druhá přednáška je věnována speciální teorii relativity. Einstein tu seznamuje posluchače či čtenáře s výchozími principy, z nichž jeden – princip relativity – je převzat z dřívější fyziky, zatímco druhý – princip stálé rychlosti světla – je nový. Z těchto principů dospívá k Lorentzově transformaci. Teorie relativity je pak vlastně teorií jejích invariantů a tedy invariantů čtyřrozměrného nezakřiveného prostoročasu Minkowského. Seznamujeme se s univerzálními relativistickými jevy – kontrakcí délek a dilatací času – a se základními pohybovými rovnicemi, rovnicemi polí a zákony zachování. Stojí za povšimnutí, že zde nenajdeme proslulý vztah $E = mc^2$, ale jen $E_0 = mc^2$. Souvisí to s tím, že Einstein nepovažuje za nutné zavádět jinou hmotnost než klidovou, kterou pak označuje jako m . Současné moderně pojaté učebnice se většinou vracejí k tomuto jeho pojetí.

I dnes může Einsteinův výklad sloužit jako ucelený a srozumitelný úvod do speciální teorie relativity. Při čtení je dobré si připomenout, že v době, kdy to Einstein psal, byly experimentální podklady pro jeho teorii mnohem chudší a méně přesvědčivé než dnes. Einstein nepřehlíží námitku, že při budování teorie relativity jednostranně vsadil na Maxwellovou a Lorentzovu teorii elektromagnetického pole, hájí však svou volbu a spoléhá se na ni.

Dnes můžeme říci, že další vývoj fyziky mu dal za pravdu. Nejsilnější doklady pro platnost speciální teorie relativity přišly ze světa atomů a elementárních částic, z jejich spekter, dob života, precesních jevů u rotujících mikroobjektů, zákonů zachování platných při srážkách. Dosud nepřekonaným a experimentálně mimořádně úspěšným vrcholem fyziky je standardní model elementárních částic, založený na syntéze kvantové fyziky a speciální teorie relativity. Proti takovéto syntéze nejsou námitky ze strany experimentální fyziky, za nedostatek je ovšem možno pokládat velký počet empirických parametrů, jejichž souvislost není vysvětlena. Přetrvává také určité napětí mezi relativistickou a kvantovou fyzikou při snahách o jejich interpretaci a filosofické podložení.

Výklad obecné teorie relativity rozdělil Einstein do dvou přednášek. V první nejprve vysvětluje, proč speciální teorie relativity nestačí k vyřešení problému gravitace. Podobně jako se speciální relativita opírala o princip konstantní rychlosti světla, musí se obecná relativita opřít o princip rovnosti tíhové a setrvačné hmotnosti. Tento princip je v pozadí pozorování, že tělesa padají v gravitačním poli se stejným zrychlením. A toto pozorování napovídá, že stejně se pohybující tělesa poukazují na zakřivenou geometrii prostoročasu, v němž se pohybují. Prosté úvahy o geometrii na rotujícím disku vedou k vytvoření mostu od speciální k obecné relativitě: „Budeme věrni principu relativity v jeho nejširším smyslu, dáme-li zákonům takový tvar, aby platily v každé čtyřrozměrné soustavě souřadnic, tj. jestliže rovnice vyjadřující tyto zákony budou kovariantní vzhledem k libovolným transformacím.“

Velká část přednášky je pak věnována vybudování matematického aparátu, kterým je diferenciální geometrie zakřivených prostorů, a jeho fyzikální interpretaci. Zásadním výsledkem přednášky je myšlenka, kterou Einstein navazuje na představy Ernsta Macha o původu setrvačnosti: působí-li prostoročas na pohyb hmoty, měla by i pohybující se hmota ovlivňovat metriku prostoročasu. Vynořuje se základní problém: hledat rovnice, které spojují hmotnou výplň prostoročasu s jeho geometrií. V přednášce je tak shrnuto a rozvedeno to, co Einstein považoval za nejšťastnější myšlenku svého života. Věřím, že čtenář ani dnes nebude číst jeho na pohled střízlivý výklad bez vzrušení.

Další přednáška je věnována nalezení toho, čemu dnes říkáme Einsteinovy rovnice. Einstein ukazuje, jak k těmto rovnicím dospět na základě požadavku kovariance matematických konstrukcí. Poté se věnuje důsledkům svých rovnic se zřetelem na možnosti jejich experimentálního ověření. Při čtení těchto pasáží si čtenář znalý dalšího vývoje nejlépe uvědomí Einsteinovu předvídavost. V době, z níž pochází přednáška, existovalo jen několik málo dokladů pro správnost Einsteinových rovnic, třebaže to byly doklady působivé (anomální posun perihelia Merkura, odchylka paprsků hvězd pozorovaná při zatmění Slunce). Einstein nepochyboval, že uhodl tajemství kosmického řádu a že další doklady přijdou. A to se stalo. Mössbauerův jev umožnil spolehlivě potvrdit posun spekter v gravitačním poli, relativistické jevy se potvrdily u dalších planet, umělých satelitů, těsných dvojhvězd.

Ke klasickým testům přibýly radarové experimenty a sledování precese setrvačníků. Speciální i obecná teorie relativity nám pomáhají při přesné orientaci na povrchu Země (systém GPS).

Zdá se pravděpodobné, že ve velkém rozsahu vzdáleností a časových intervalech obecná teorie relativity již zůstane tím nejlepším, co máme k dispozici. Chybí nám ještě přímé ověření existence gravitačních vln, o nichž zatím jsou jen nepřímé doklady ze sbližování těsných dvojhvězd ztrácejících energii jejich vyzařováním. I v této oblasti byl Einstein průkopníkem, stejně jako v předpovědi existence gravitačních čoček. Dnes by jistě mohl věnovat speciální dodatek aplikacím obecné teorie relativity v astrofyzice: kvasary, pulzary, černé díry...

Tato přednáška obsahuje i několik odkazů na problémy, které zůstávají dosud otevřeny. Einstein se v ní například zabývá „machovskými efekty“, které vyvolávají pohybující se hmoty tím, že „strhávají“ inerciální soustavy ve svém okolí. Dnes je téměř jisté, že tyto efekty existují. Je ovšem stále diskutována otázka, zda to přesně odpovídá Machově myšlence, podle níž je prostor a čas hmotami nejen ovlivňován, ale dokonce tvořen.

Z přednášky dále prosvítá, jak Einsteina znepokojuje „problém hmoty“. Tenzor energie-hybnosti na pravé straně jeho rovnic se mu zdá být jen provizorním způsobem, jak hmotu matematicky popsat. V textu se vyskytuje několik termínů, jejichž překlad do češtiny může být problematický. Pro „ponderable matter“ je patrně příznačné, že můžeme sledovat přemísťování jejích elementů z místa na místo, jde tedy o „látku“. Takto chápáná látka však pro Einsteina představuje pouze dílčí formu výplně prostoru a času, která je obecně nositelem energie a hybnosti a zdrojem gravitačního působení a je v jeho knize označována jako „matter“. To nejlépe odpovídá slovu „hmota“ – hmotou je pak nejen látka, ale i elektromagnetické pole a třeba i něco dalšího. Konečně užívá Einstein slova „mass“ většinou tam, kde se jedná o měřitelnou veličinu. Tomu odpovídá v české terminologii slovo „hmotnost“. Einstein však není ve své terminologii zcela důsledný a proto ani já se vždy nedržím výše popsané volby překladu a někdy jej přizpůsobuji kontextu. Jak je patrné z posledního dodatku ke knize, Einsteinovou snahou bylo dospět k teorii, v níž by „hmotná“ výplň vesmíru nevystupovala jako samostatná substance a byla plně vyvoditelná z geometrie.

První dodatek k Einsteinovým přednáškám je věnován převážně kosmologii. Čtenář by však neměl přehlédnout úvodní pasáž, v níž se projevuje uspokojení nad vyřešením „problému pohybu“ – že bodové částice rysují v prostoročase nejprímější, tzv. geodetické čáry, není nezávislý princip, ale důsledek Einsteinových rovnic. O tento výsledek se výrazně zasloužil sám Einstein a spatřoval v něm patrně nadějný krok k jednotě fyziky.

Co se týče kosmologie, Einstein zde velmi uceleně a srozumitelně vykládá Friedmannovy kosmologické modely. (První Friedmannův kosmologický článek z roku 1922 Einstein zprvu zavrhl, svůj omyl však brzy uznal a opravil.) Na tomto místě je vhodné se zmínit o podivuhodné historii kosmologického členu v Einsteinových rovnicích. Einstein roku 1917 přidal tento člen – neporušující zákony zachování energie a hybnosti – aby umožnil statické (na čase nezávislé) řešení svých rovnic pro homogenní a izotropní vesmír. Je široce známý, ale písemně nedoložený jeho výrok, že pokládá zavedení kosmologického členu za největší omyl svého života. V našem dodatku má tento výrok mírnější podobu – kdyby již v roce 1917 mohl znát Hubbleova pozorování potvrzující rozpínání vesmíru, nikdy by kosmologický člen nezavedl. V dodatku věnuje Einstein speciální pozornost modelu s nulovou prostorovou křivostí, kterého si Friedmann explicitně nepovšiml. Tento model se někdy v literatuře nazývá Einsteinův-de Sitterův, což může neinformovaného čtenáře poplést: za Einsteinův je označován původní statický vesmír z roku 1917 a de Sitterův je stacionární (rozpínající se, ale časově neměnný) vesmír s kosmologickým členem, avšak bez hmoty, z téhož roku.

Dlouho se zdálo, že Einsteinův-de Sitterův vesmír má k realitě nejblíže. Poslední roky druhého tisíciletí však přinesly velké překvapení: pozorování supernov ukázalo, že daleké vesmírné objekty se od nás vzdalují zrychleně, což odpovídá Einsteinovým rovnicím s kosmologickým členem. Není vyloučeno, že kosmologický člen nebyl Einsteinovým největším omylem, ale jedním z jeho největších objevů. Zatímco Einstein přidával tento člen na levou stranu svých rovnic, dnes je obvykle překládán na pravou stranu a interpretován jako vyjádření temné (nebo možná lépe: skryté) energie, která by mohla být energií vakua jako základního stavu hmoty. Kosmologická i astrofyzikální data kromě této záhadné substance naznačují ještě existenci temné (či skryté) hmoty, která se skládá z částic jiného druhu, než jaké známe z pozemských pozorování. Hmota, kterou známe a která svítí

ve hvězdách anebo se staví do cesty jejich svitu, tvoří, jak to zatím vypadá, jen několik procent celkové energie vesmíru. Velkou podporu, ale také nové otázky skýtá kosmologii zkoumání detailů reliktního záření, které je umožněno pokrokem pozorovací techniky. Ve spolupráci s fyzikou elementárních částic vytváří relativistická kosmologie dějiny vesmíru sahající zpět až téměř k hypotetickému počátku a odvažující se i prognóz budoucnosti. Zdá se ovšem, že kosmologická pozorování značně předběhla pozemskou fyziku a způsobila tak problém, s nímž si fyzikové zatím nevědí rady.

Poznamenejme ještě, že podle současných pozorovacích dat realitě stále nejlépe odpovídá model s nulovou prostorovou křivostí (ale s nenulovým kosmologickým členem). Tento model – rovněž nazývaný standardním – je podobným vrcholem kosmologie, jakým je standardní model elementárních částic na poli mikrofyziky. Proč příroda dává přednost právě modelu s nulovou prostorovou křivostí, vysvětluje se dnes obvykle předpokladem o inflační fázi rozpínání v raném období vývoje vesmíru.

Bylo by jistě krásné, kdyby se pokrokem fyziky oba vrcholy slily v jeden. K tomu by bylo třeba mnohem hlubší syntézy teorie gravitace a kvantové fyziky, než jaké bylo zatím dosaženo. Nepochybné je, že kosmologie, právě tak jako astrofyzika, se staly mocnými, ale i poněkud problematickými spojenci obecné teorie relativity.

Konečně ještě několik slov k druhému dodatku. Čtenář si nemůže nepovšimnout, že se od zbytku díla podstatně liší. Má spíše povahu čistě odborné práce než sice náročného, ale přece jen ke čtenáři se vstřícně obracejícího výkladu. Fyzikální motivy, které hrály hlavní roli v přednáškách i v kosmologickém dodatku, ustupují do pozadí. Einstein buduje čistě geometrickou teorii, v níž jedinými proměnnými jsou komponenty metriky g_{ik} a složky afinní konexe Γ_{kl}^i , oba soubory veličin však na rozdíl od situace v obecné teorii relativity postrádají symetrii, čímž se jejich počet množí. Pro odvození vztahů, které tyto veličiny svazují, Einstein používá variačního principu (rovnice pole plynou z požadavku minimálnosti jisté matematicky co nejjednodušší veličiny) a dospívá tak k souboru rovnic, které (po řadě předchozích pokusů, jež ho nakonec neuspokojily) považuje za vyjádření logicky nejprostší relativistické teorie pole. Spíše jen mimochodem se zmiňuje o tom, že tyto rovnice by měly vyjadřovat souvislost gravitačního a elektromagnetického pole, mimo něž by už žádná jiná fyzikální realita

neexistovala. Nesporným, ale jen dílčím úspěchem je, že se mu daří formulovat (s využitím tzv. lambda transformace) zákon zachování elektrického náboje a také zákony zachování energie a hybnosti.

Toto Einsteinovo poslední dílo, v němž mu pomáhala mnohem mladší kolegyně Bruria Kaufmanová, nevzbudilo nikdy širší zájem fyzikální komunity. Připomínalo jí jakýsi monumentální, ale nepohnutelný bludný balvan. Nicméně pozorný čtenář je přijme jako svědectví o závěru velkého celoživotního zápasu, který snad nevyzněl docela do prázdna – dnešní fyzikové se vracejí k Einsteinovým myšlenkám o sjednocení fyziky, pro něž je asi třeba nějak nasměrovat obecnou teorii relativity a standardní model mikrofyziky ke společnému úběžníku.

REJSTŘÍK VĚCNÝ

- aberrace 40
- bod
 - jako element prostoru 32
 - jako událost 42
- čas
 - absolutní 39, 63
 - fyzikální význam 40–41
 - invariantní 31
 - pojem 21
 - souřadnice odlišná
 - od prostorové 43
 - subjektivní 21
- částice
 - hmotné 32–33
 - nabité 58
- čtyřvektor 49, 56
 - hybnosti a energie 54
- délka 23–24
 - absolutní 39
 - kontrakce, Lorentzova 47
- derivování tenzorů 30
 - kovariantní 75–77
- elektron 55
- ekvivalence
 - hmotnosti a energie 55
 - inerciálních soustav 63
 - setrvačnosti a gravitace 64–65
 - vztažných prostorů 38
- energie
 - a setrvačnost 57
 - kinetická 32, 55
 - klidová 55
 - potenciální 32
- experimenty
 - Eötvösovy 64
 - s paprsky beta 55
- Galileovské oblasti 68
- geodetické čáry 80–81, 105, 112
- geometrie
 - a fyzika 25
 - a zkušenost 25
 - eukleidovská 25–26, 32, 43, 47, 90–91
- hmota 83–84
- hmotnost 55
 - gravitační 64
 - setrvačná 64
- hodiny 21, 90–91
 - a délka v prostoročase 56
 - dilatace 47
 - nastavení 40
 - nezávislost údajů na historii 68
 - standardní 31
- hraniční podmínky 100, 103, 148–149

- Hubbleovo rozpínání 112, 113, 119, 120
- hustota
 - energie 61
 - Levi-Civitova 144
 - proudu 36
 - spojitého prostředí 33
- hvězdokupy 122
- hvězdy
 - dvojhvězdy 40
 - trpasličí 105
- hybnost 54–55
- Christoffelovy symboly 74
- identity
 - Bianchiho 127–128, 140, 143, 146
 - relativistické teorie pole 142–144
- interval
 - v prostoročase 69
 - v tělese 23
- invariance
 - intervalu 43–44, 68–69
 - transpoziční 135–136
 - vzdálenosti 39
- invarianty
 - aparát teorie 31
 - definice 26–27
 - heuristická cena 35
 - prostoročasný interval 68–69
- jev
 - Comptonův 120
 - Dopplerův 120
- komplex počítků 21
- konstanta
 - kosmologická 106, 119
 - Newtonova gravitační 85
- kontinuum
 - čtyřrozměrné 42, 47
 - vyšší dimenze 148
- kovariance
 - vůči Galileově transformaci 39
 - vůči Lorentzově transformaci 50
 - vůči obecným transformacím 69
- křivka, definice 22–23
- kvantové jevy a realita 149
- látka 59–60
- Lorentzova kontrakce 47, 66
- Maxwellova napětí 57
- mechanika
 - Galileova 63
 - klasická 55, 64
 - Newtonova 42, 63
- metrika riemannovská 129
- měřicí tyče 24, 47, 88, 90–91
- náboj 58
 - a transpoziční invariance 136
- odchylka světelných paprsků 92
- objem 27
 - invariantní 72
- plochy 28, 67–68, 96
- pole
 - Coriolisovo 97, 99
 - elektromagnetické 50–52
 - gravitační 68–69
 - gravitační, centrálně symetrické 92–94
 - infinitesimálního přenosu 130–132
 - jako základní pojem 129
 - nesymetrické 132

přenosu 130–132
 posun perihelia Merkura 92–95
 posun spektrálních čar 91, 105
 kosmologický 107
 potenciál
 gravitační 83, 105
 retardovaný 87–88
 vektorový čtyřrozměrný 95
 prach 59, 101, 106, 111, 118
 pseudotenzor 132, 136–137
 princip
 ekvivalence 64–65, 81
 ekvivalence hmotnosti a energie 60
 gravitace a setrvačnosti 63, 81
 konstantní rychlosti světla 40–41
 speciální relativity 39–40
 prostor
 absolutní 63
 homogenita a izotropie 32
 Minkowského 106
 pojem 22
 prázdný 106
 třírozměrnost 23
 v předrelativistické fyzice 31
 vztažný 22, 39
 prostoročas 42
 absolutní 63
 přenos, paralelní 73–75
 přímka 25, 80–81
 pseudotenzor 136–137
 relace ortogonality 25
 rotace (kosmických těles) 99
 rovnice
 absolutně kompatibilní soustava 124
 Eulerovy 61–62
 gravitační 85, 106, 126, 128
 hydrodynamické 59–60
 kontinuity 34, 61
 kovariantní 34–35
 Maxwellovy 36, 49–52, 58, 95, 96, 125, 128
 Maxwellovy-Lorentzovy 39–40
 Newtonovy 39, 81–83
 nesymetrické teorie pole 141, 146
 pohybové, částice 32–33
 pohybové, spojitého prostředí 33–34
 Poissonova 83–84
 skalární vlnová 123–125
 rychlost 34
 čtyřrozměrná 54
 fyzikální význam 40
 skládání 47
 světla ve vakuu 40, 91, 92
 síla
 Biotova-Savartova 51–52
 Coriolisova 66, 99
 definice 32
 konzervativní 32
 Lorentzova 51–52
 odstředivá 66, 99
 ponderomotorická 52
 soustavy rovnic 123, 145–147
 singularity 58, 117–118, 121, 149
 siriův průvodce 105
 skaláry 29
 současnost 31

- souřadnice
 - imaginární 48
 - jako mříž 31
 - kartézské 23–26,
 - křivočaré 67
- soustavy
 - inerciální 38, 128–130
 - kartézské 25, 31
 - neinerciální 65
 - orientace 32
 - pravotočivé a levotočivé 27, 33
 - v kosmologii 108–110
- světelný kužel 48
- tekutina stlačitelná vazká 35
- tělesa
 - prodlužování 22
 - přemísťování 23
 - tuhá 21–23
 - v předrelativistické fyzice 23
- tenzor
 - energie elektromagnetického pole 56–58, 83
 - energie hmoty 51–60, 84
 - energie látky 83
 - fundamentální 31, 71–72
 - Kroneckerův 134
 - křivosti, zúžený (tenzor Ricciho) 80, 134
 - napětí 35
 - Riemannův 77–80, 84, 97
- tenzory
 - definice 28–29
 - derivování 30
 - komponenty 29
 - kovariantní a kontravariantní 69–70
- násobení 30
- sčítání a odčítání 29
- symetrické a antisymetrické 30
- úžení 30
- ve čtyřrozměrném prostoru 49
- teorie
 - Faradayova a Maxwellova 129
 - Lorentzova elektronová 36
 - Maxwellova 83, 95–96, 102
 - Newtonova 83, 86, 89, 107
 - vlnová 120
- teorie relativity obecná, ověření
 - červený posuv spekter 91, 105
 - kosmologická data 113
 - odchylka světla v okolí Slunce 91–92
 - pohyb Merkuru 92–95
- teorie relativity speciální, ověření
 - optické jevy 40
 - pokus Michelsonův-Morleyův 40
 - radioaktivní rozpad 55
- tlak 35, 102–103
- transformace
 - eukleidovské geometrie 26
 - Galileova 39
 - komponent elektromagnetického pole 51
 - lambda 134–135
 - lineární ortogonální 25–26
 - Lorentzovy 42–48, 50
- události 42
- pořadí 21
- úkol vědy 21
- variační princip 140–141
- věta
 - Jacobiho 27, 72

- o momentech 34
- Stokesova 78
- Taylorova 24, 124–125
- vektory
 - axiální 33
 - definice 27–28
 - kovariantní a kontravariantní 69–70
 - moment 33
- vesmír
 - doba života 121
 - eukleidovský případ 116
 - hmotnost 103
 - konečný či nekonečný 103, 105
 - kvazieukleidovský 103
 - metrika 111
 - počátek 120–121
 - prostorová křivost 121
 - prostorová izotropie 107–108, 119
 - průměrná hustota 113
 - rozpínání 107, 112–113, 117, 121
 - s nulovou křivostí (Einsteinův-de Sitterův) 113–114
 - stáří 114, 120, 122
- vjemy 21
- vzdálenost 25
- zákon setrvačnosti 105
- zákony
 - konfigurace tuhých těles 23
 - Newtonovy 34, 105
- zákony zachování energie a hybnosti
 - diferenciální 58, 84
 - integrální 53, 58–59, 84
 - v relativistické teorii pole 147–148
- zatmění Slunce 1919, expedice 92
- zrychlení 34, 64

REJSTŘÍK JMENNÝ

de Sitter, Willem 40
Eötvös, Loránd 64
Fizeau, Hippolite 40
Friedmann, Alexandr Alexandrovič 107, 119
Galilei, Galileo 105
Gauss, Johann Carl Friedrich 67, 69, 129
Hubble, Edward Powell 107, 112, 113, 119, 120
Christoffel, Elwin Bruno 74
Kaluza, Theodor 96
Leverrier, Urbain Jean Joseph 95
Levi-Civita, Tulio 69, 73, 129, 144
Lorentz, Hendrik Antoon 41, 55, 118
Mach, Ernst 63, 97, 99, 103, 129
Maxwell, James Clerk 41
McVittie, George Cunliffe 113
Michelson, Albert Abraham 40
Minkowski, Hermann 36, 42, 48
Morley, Edward Williams 40
Newton, Isaac 63, 129
Poincaré, Jules Henri 22, 102
Ricci, Gregorio 69
Riemann, Georg Friedrich Bernhard 69, 129
Schwarzschild, Karl 92, 94
Thirring, Hans 99
Weyl, Hermann 73, 75, 92, 96

OBSAH

Úvod (<i>Brian Greene</i>)	7
Poznámka k šestému vydání	20
PROSTOR A ČAS V PŘEDRELATIVISTICKÉ FYZICE	21
SPECIÁLNÍ TEORIE RELATIVITY	38
Fenomenologická reprezentace tenzoru energie hmoty	59
OBEČNÁ TEORIE RELATIVITY	63
OBEČNÁ TEORIE RELATIVITY (pokračování)	81
DODATEK I: O „kosmologickém problému“	105
Čtyřrozměrný prostor izotropní vzhledem ke třem rozměrům	107
Volba souřadnic	108
Rovnice pole	111
Speciální případ nulové prostorové křivosti ($z = 0$)	113
Řešení rovnic v případě nenulové prostorové křivosti	114
Rozšíření předchozích úvah zobecněním rovnice pro látku	118
„Částicový plyn“ podle speciální relativity	118
Shrnutí a další poznámky	119
DODATEK II: Relativistická teorie nesymetrického pole	123
O „kompatibilitě“ a „síle“ soustav rovnic pole	123
Relativistická teorie pole	128
Obecné poznámky	148
Doslov (<i>Jan Novotný</i>)	151
Rejstřík věcný	159
Rejstřík jmenný	164

ALBERT EINSTEIN

SMYSL RELATIVITY

Z anglického originálu, *The Meaning of Relativity: Including the Relativistic Theory of the Non-Symmetric Field* (fifth edition), vydaného roku 2014 nakladatelstvím Princeton University Press, přeložil a doslovem opatřil Jan Novotný
Obálku a grafickou úpravu navrhl Vladimír Verner
Redakčně zpracoval Vladimír Roskovec
Vydalo nakladatelství Vyšehrad, spol. s r. o., roku 2016 jako svou 1429. publikaci
Odpovědný redaktor Martin Žemla
Vydání první. AA 5,94. Stran 168
Vytiskly Tiskárny Havlíčkův Brod, a. s.
Doporučená cena 268 Kč

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

ISBN 978-80-7429-537-9