

edice **aliter**

Carlo
Rovelli



HELGOLAND

**O vzniku a smyslu
kvantové teorie**

Carlo Rovelli
HELGOLAND
O vzniku a smyslu
kvantové teorie

Copyright © Adelphi Edizioni SPA, Milano, 2020

Translation © Jiří Podolský, 2023

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 anglické předlohy *Helgoland* přeložil Jiří Podolský.

Odpovědný redaktor Jan Kárník.

Redakce Alžběta Knappová.

Sazba, obálka a konverze

do elektronické podoby Michal Puhač.

Vydalo v roce 2023 nakladatelství Dokořán, s. r. o.,
Holečkova 9, Praha 5, dokoran@dokoran.cz, www.dokoran.cz,
jako svou 1244. publikaci (421. elektronická).

ISBN 978-80-7675-157-6

edice **aliter** — svazek **84**

Carlo
Rovelli

HELGOLAND

**O vzniku a smyslu
kvantové teorie**

Dokořán a Argo 2023

OBSAH

Pohled do propasti	9
--------------------	---

ČÁST PRVNÍ

I. Pohled do podivně nádherného nitra	15
Absurdní idea mladého Heisenberga: Pozorovatelné	16
Zavádějící ψ Erwina Schrödingera: Pravděpodobnost	28
Zrnitost světa: Kvanta	36

ČÁST DRUHÁ

II. Kuriózní bestiář extrémních myšlenek	45
Superpozice	46
Vezme-li se ψ vážně: Mnoho světů, skryté proměnné a fyzikální kolaps	56
Přijetí nedeterminovanosti	65
III. Je možné, aby něco bylo reálné ve vztahu k vám, ale nebylo to reálné pro mě?	69
Byly doby, kdy se svět zdál jednoduchý	70
Relace	72
Jemný a subtilní svět kvant	78
IV. Síť relací, jež splétají realitu	85
Provázání	86
Tanec tří, jež splétá relace světa	92
Informace	95

ČÁST TŘETÍ

V. Jednoznačný popis objektu zahrnuje i objekty, jimž se vyjevuje	107
Alexandr Bogdanov a Vladimir Lenin	108
Naturalismus bez substance: Kontextualita	120
Bez základu? Nágárdžuna	125
VI. „Pro přírodu je to už vyřešený problém“	137
Prostá hmota?	138
Co je „význam“?	143
Svět viděný zevnitř	153
VII. Je to však opravdu možné?	163
PODĚKOVÁNÍ	172
POZNÁMKY	173
REJSTŘÍK	187

Pro Teda Newmana,
díky němuž jsem poznal,
že nerozumím kvantové teorii

Pohled do propasti

Sedíme s Časlavem na písku jenom pár kroků od břehu. Už celé hodiny vášnivě debatujeme. Během odpolední přestávky na konferenci jsme se vydali na hongkongský ostrov Lamma. Časlav je přední světový odborník na kvantovou teorii. Na konferenci prezentoval svou analýzu složitého myšlenkového experimentu. Už cestou sem, vedoucí pobřežní džunglí, jsme probrali všemožné aspekty tohoto pokusu a pokračovali v tom i tady na mořském břehu. Nakonec jsme se víceméně shodli. Teď už dlouho mlčíme a sledujeme moře. „Je to vážně neuvěřitelné,“ řekne tiše Časlav. „Můžeme tomu věřit? Jako kdyby realita... neexistovala...“

Tak jsme na tom nyní s kvanty. Po celém století nebyválních triumfů, poté co nás obdařila úžasným darem moderních technologií a stala se základem fyziky 20. století, nás tato teorie, která patří mezi nejimpozantnější úspěchy v dějinách vědy, naplňuje nejen údivem, ale také zmatky a nedůvěrou.

Byly časy, kdy se gramatika světa zdála být jasná a jednoduchá: v základech všemožných forem reality se nacházely jen malé částice hmoty a pár fyzikálních sil. Lidstvo se už mohlo domnívat, že odhalením iluze *máji* pohlédlo na samé základy reálného světa. Dlouho to ale nevydrželo. Spousta faktů neseděla. Až jednou v létě roku 1925 strávil třiatvacetiletý Němec několik dní ve znepokojivé samotě na větrem ošlehaném ostrově v Severním moři: na Helgolandu. Anglicky se jmenuje též Heligoland – Svatý ostrov. Právě na

tomto ostrůvku objevil myšlenku, která umožnila poskládat dohromady všechna prapodivná fakta a postupně vybudovat matematickou strukturu kvantové mechaniky, „kvantové teorie“. Jde možná o nejúchvatnější revoluci v dějinách vědy. Onen mladý muž se jmenoval Werner Heisenberg a příběh vyprávěný v této knize začíná u něj.

Kvantová teorie objasnila základy chemie, fungování atomů, pevných látek a plazmatu, barvu oblohy, dynamiku hvězd, původ galaxií... a tisíce dalších aspektů světa kolem nás. Stala se východiskem našich nejnovějších technologií, od počítačů po jaderné elektrárny. Inženýři, astrofyzikové, kosmologové, chemici i biologové ji každý den rutinně používají. Její základní pojmy se vykládají už na středních školách. Je to teorie, která měla zatím vždycky pravdu. Je doslova živoucím srdcem moderní vědy. A přesto pro nás i nadále zůstává hluboce tajemnou a rafinovaně znepokojivou.

Kvantová teorie zničila obraz reality coby souboru částic, které se pohybují po určených trajektoriích. Neprozradila nám ale, jak bychom na svět měli správně nahlížet jinak. Její matematický aparát nepopisuje realitu. Vzdálené objekty se zdají být magicky propojené. Hmota je nahrazena přízračnými vlnami pravděpodobnosti.

Každý, kdo si kdy položil otázku, co nám to kvantová teorie vlastně říká o skutečném světě, nevyhnutelně zůstal zmaten. Sám Einstein, který ve své genialitě předvídal myšlenky, jež pak přivedly Heisenberga na správnou cestu, tuto teorii nikdy nepřijal za svou. Jeden z největších teoretických fyziků druhé poloviny 20. století Richard Feynman napsal, že kvantové teorii nikdo opravdu nerozumí.

Ale právě o to ve vědě jde. Je to neustálé hledání nových způsobů konceptualizace světa. A někdy jsou naprosto radikální. Věda se vyvíjí neustálým zpochybňováním

stávajících pojmů a pravidel. Je to vizionářská síla prodchnutá odbojným a kritickým duchem, schopná modifikovat svá vlastní koncepční východiska, schopná od začátku stále znovu a znovu přestavovat celý náš svět.

Přestože nás podivnosti kvantové teorie matou a zneklidňují, odhalují nám současně i zcela nové perspektivy, z jejichž pohledu můžeme nahlížet realitu. Skutečnost, která je mnohem delikátnější než příliš zjednodušený materialismus částic pohybujících se v prázdném prostoru. Realitu utkanou z *relací* spíše nežli z objektů.

Tato pozoruhodná teorie přichází s novými způsoby uvažování, kterými bychom měli znovu promyslet ty největší otázky, strukturou reality počínaje a podstatou našeho vnímání světa konče, od metafyziky až po lidské vědomí. V dnešní době je právě to obsahem živých debat jak mezi vědci, tak mezi filozofy. O tom všem budu hovořit na stránkách této knihy.

Na ostrově Helgoland – tvrdém, holém, bičovaném prudkými severními větry – nám Werner Heisenberg podhalil závoj poznání. Spatřili jsme propast. Příběh vyprávěný v této knize začíná na onom ostrově, na kterém Heisenberg počal zárodek své klíčové myšlenky, a postupně se rozrůstá k dalším a dalším zásadním otázkám, které před námi objev kvantové povahy reality otevřel.

ħħ

Tuto knihu jsem psal především pro ty, kdo kvantovou fyziku neznají, ale rádi by pochopili (nakolik je to pro kohokoli z nás vůbec možné), co je zač a co z ní vyplývá. Pokusil jsem se být co nejstručnější a vynechal všechny detaily, které nejsou nezbytné pro pochopení jádra problému. Při popisu teorie, jež leží přímo v epicentru vědecké nesrozumitelnosti, jsem se

snažil být co nejjasnější. Možná ale namísto objasnění toho, jak chápat kvantovou mechaniku, zde spíše jen vysvětluji, proč je tak obtížné jí porozumět.

Psal jsem ji ale i s myšlenkami na své kolegy vědce a filozofy, kteří jsou kvantovou teorií zmatení tím více, čím hlouběji se do ní snaží proniknout. Je to pokračování našich rozhovorů ohledně skutečného významu této udivující fyzikální teorie. Kniha obsahuje poznámky, jež jsou určeny těm, kdo kvantovou mechaniku už znají. V nich lze najít upřesnění myšlenek, které se snažím v hlavním textu sdělovat nejčitelnější možnou formou.

Cílem mého vlastního výzkumu v teoretické fyzice je porozumět kvantové povaze prostoru a času, dát do souladu kvantovou teorii s Einsteinovými objevy. Kvůli tomu jsem musel o kvantech neustále přemýšlet. Tato kniha prezentuje, k čemu jsem zatím dospěl. Neignoruje alternativní názory na danou věc, ale je nepokrytě zaujatá: soustředí se na onu perspektivu, kterou osobně pokládám za nejefektivnější a která nám, dle mého soudu, otevírá tu nejzajímavější cestu vpřed: na „relační“ interpretaci kvantové teorie.

Než začneme, je na místě ještě jedno varování. Propast dosud nepoznaného má svou magnetickou přitažlivost a způsobuje závrať. Vzít kvantovou mechaniku opravdu vážně a uvědomit si její důsledky je téměř psychedelický zážitek: vyžaduje po nás, tím či oním způsobem, zřeknout se toho, co jsme dlouho uctívali jako nedotknutelné a pevné východisko našeho chápání světa. Žádá po nás, abychom přijali, že realita může být diametrálně jiná, než jakou jsme si ji dosud představovali: abychom pohlédli do propasti beze strachu, že utoneme v nepochopitelnou.

Lisabon, Marseille, Verona, London (Ontario), 2019–2020

Část první

I. Pohled do podivně nádherného nitra

*Kterak mladý německý fyzik dospěl k myšlence,
jež byla opravdu velmi podivná,
ale pozoruhodně dobře popsala svět –
a jaké obrovské zmatení z toho vzešlo.*

Absurdní idea mladého Heisenberga: Pozorovatelné

Bylo kolem třetí hodiny ranní, když jsem měl před sebou konečně výsledky svých výpočtů. Prožíval jsem hluboký šok. Byl jsem tak vyveden z míry, že jsem nemohl jít spát. Vyšel jsem z domu a začal se pomalu procházet tmou. Vylezl jsem na skalisko nad mořem na konci ostrova a čekal tam, než vyjde slunce...¹

Často jsem přemítal nad tím, jaké myšlenky a pocity asi musel prožívat mladý Heisenberg, když se vyšplhal na útes tyčící se nad mořem na téměř pustém, větry ošlehaném ostrově Helgoland v Severním moři, hleděl do bezbřehého prostoru plného vln a čekal na východ slunce, poté co jako první člověk v dějinách lidstva spatřil jedno z nejzávratnějších tajemství přírody. Bylo mu dvacet tři let.

Hledal tam úlevu od alergie, která ho sužovala. Helgoland – v překladu Svatý ostrov – nemá skoro žádné stromy a je tam jen velmi málo pylu. („Helgoland, kde roste jeden jediný strom,“ píše Joyce v *Odysseovi*.) Možná ho přilákaly také legendy o strašlivém pirátu Störtebekerovi skrývajícím se na tomto ostrově, které jako malý chlapec miloval. Hlavním důvodem ale bylo, že se chtěl pohroužit do hlubokého problému, jímž byl posedlý, a řešit palčivou otázku, kterou mu položil Niels Bohr. Spal jenom málo a většinu času trávil zcela osamocen. Pokoušel se spočítat cosi, co by odůvodnilo Bohrem stanovená, nepochopitelná atomová pravidla. Často

dělal pauzy a vydával se na útesy kolem ostrova anebo se učil nazpaměť básně z Goetheho *Západovýchodního divánu*, sbírky, ve které se největší německý básník vyznává ze své lásky k islámu.

Niels Bohr byl už tehdy slovatný vědec. Napsal jednoduché, ale podivné vzorce, které předpověděly vlastnosti chemických prvků ještě předtím, než se je podařilo experimentálně změřit. Předvídaly například frekvence světla vyzařované různými prvky – jejich konkrétní barvy. Byl to fantastický úspěch. Bohrovy vzorce ale nebyly kompletní. Nedokázaly spočítat třeba intenzitu vyzařovaného světla.

Především v sobě ale jeho vzorce skrývaly něco zcela absurdního. Bez hlubšího zdůvodnění totiž předpokládaly, že elektrony v atomech obíhají jenom po zcela *přesných* orbitálních drahách, v určitých naprosto *přesných* vzdálenostech od jádra, s *přesnými* hodnotami energie – než se rozhodnou magicky „přeskočit“ z jedné orbity na druhou. Bohr postuloval první kvantové skoky. Ale proč jenom konkrétní orbity? A proč ony nemístné „přeskoky“ z jedné dráhy na druhou? Jaké síly by mohly způsobovat tak bizarní chování?

Atom je základní stavební kámen všeho kolem nás. Ale jak funguje? Jak se v něm pohybují elektrony? Více než deset let si vědci na počátku 20. století kladli tyto otázky, ale neúspěšně.

Podobně jako velký renesanční mistr ve své umělecké dílně shromáždil také Bohr kolem sebe v Kodani ty nejlepší mladé fyziky, jaké mohl najít, aby spolu bádali nad mystériem atomů. Mezi nimi byl i brilantní Wolfgang Pauli – Heisenbergův nesmírně inteligentní a velice arogantní přítel a bývalý spolužák. Pauli doporučil Heisenberga velkému Bohrovi s tvrzením, že k dosažení významného pokroku je právě on zcela nezbytný. Bohr dal na Pauliho radu a na podzim

roku 1924 Heisenberg opustil Göttingen, kde působil jako asistent fyzika Maxe Borna, a přijel do Kodaně. Tam strávil několik měsíců diskusemi s Bohrem před tabulemi plnými vzorců. Mladý učen a jeho mistr strávili mnoho času také společnými dlouhými procházkami v horách. I tam hovořili o záhadách atomů, o fyzice a o filozofii.²

Heisenberg se do těžkého problému plně pohroužil. Stal se jím posedlý. Stejně jako ostatní zkoušel všechno možné. Nic nefungovalo. Vypadalo to, že neexistuje žádná smysluplná síla, která by dokázala udržet elektrony na Bohrových prazvlášt-
ných orbitách či vysvětlila jejich podivné přeskoky. Přesto však právě tyto orbity a tyto přeskoky dávaly zcela správné předpovědi atomových jevů. Panoval tedy opravdový zmatek.

Zoufalství bývá matkou extrémních řešení. Na onom ostrově v Severním moři, v naprostém osamění, se Heisenberg odhodlal vyzkoušet zcela radikální myšlenku.

Koneckonců to byly právě naprosto radikální myšlenky, jimiž dvacet let předtím Einstein ohromil svět. Einsteinův radikalismus zafungoval. Pauli i Heisenberg byli jeho fyzikou okouzleni, Einstein byl pro ně doslova legendou. Co když nadešel čas, říkali si, aby byl podniknut nějaký další riskantní a radikální krok vedoucí k vysvětlení elektronů v atomech? Třeba právě ten dokáže vyvést fyziky ze slepé uličky. Mohli by snad takový krok učinit oni sami? Když je vám něco málo přes dvacet, můžete snít o čemkoli.

Einstein ukázal, že i ty nejtrádanější názory mohou být někdy chybné. Co se nám dosud jevilo jako zcela zřejmé, se může ukázat nesprávné. Oproštění se od předpokladů, které se dlouho zdály evidentní, může vést k hlubšímu poznání. Einstein nás naučil, že bychom měli důvěřovat tomu, co opravdu je, tomu, co pozorujeme, nikoli našim pouhým domněnkám.

Pauli si s Heisenbergem tyto myšlenky stále opakovali. Oba mladí muži se hluboce napili z onoho poháru s „otráveným medem“. Navázali na zásadní diskusi o vztahu reality a zkušenosti, která se počátkem století odehrávala na poli rakouské a německé filozofie. Ernst Mach, který svými názory rozhodujícím způsobem ovlivnil Einsteina, trval na tom, že naše poznání musí být založeno výhradně na pozorováních, že musí být osvobozeno od všech implicitních „metafyzických“ předpokladů. To vše se nyní poskládalo v mysli mladého Heisenberga, když se v létě roku 1925 ocitl sám na Helgolandu, jako chemické složky mohutné třaskaviny.

A dostal tam klíčový nápad. Revoluční ideu, na kterou může přijít pouze ničím nespoutaný mladý duch. Jeho radikální myšlenka promění celou fyziku – a spolu s ní pak veškerou vědu i naši koncepci světa. Myšlenka, kterou lidstvo – podle mého názoru – ještě plně nevstřebalo.

ħħ

Heisenbergův radikální krok byl odvážný, a přitom docela prostý. Nikomu se nedařilo najít novou sílu schopnou objasnit bizarní chování elektronů? Dobrá, přestaňme po ní tedy pátrat. Místo toho použijme sílu, kterou už známe: elektrickou přitažlivost mezi jádrem atomu a elektronem. Nejsme schopni najít nový pohybový zákon schopný spočítat Bohrovy diskrétní orbity a „přeskoky“ mezi nimi? Dobrá, zůstaňme tedy u pohybových zákonů klasické mechaniky, které už známe, aniž bychom je nějak měnili.

Namísto toho změňme způsob, jakým o elektronu uvažujeme. Vzdejme se představy, že dokážeme popsat jeho pohyb. Soustředme se *pouze na popis toho, co dokážeme pozorovat*: a to je světlo, které elektron v atomu vyzářuje. Založme vše

na fyzikálních veličinách, jež jsou *pozorovatelné*. To je jádro nové myšlenky.

Heisenberg se tedy pokouší znovu od samého začátku spočítat chování elektronu pomocí pozorovatelných veličin, v daném případě frekvence světla, které je jím vyzářováno.

Pozorujeme totiž jevy způsobené tím, že elektron *přeskakuje* z jedné Bohrovy atomární orbity na druhou. Orbit je mnoho, a proto Heisenberg nahrazuje příslušnou fyzikální proměnnou (číslo) celou *tabulkou čísel* (takzvanou maticí), kde v příslušném řádku je výchozí orbita, zatímco v příslušném sloupci výsledná orbita po přeskoku elektronu. Každá položka se tedy nachází v konkrétním řádku a sloupci tabulky: popisuje přeskok z jedné konkrétní orbity na druhou. Heisenberg tráví svůj čas na ostrově tím, že se pokouší pomocí těchto tabulek spočítat něco, co by oprávnilo Bohrova prazvláštní pravidla. Moc nespí. Ale chování elektronu v atomu nedokáže matematicky spočítat – je to příliš složité. Zkusí tedy jednodušší systém. Zvolí oscilující kyvadlo a studuje Bohrova pravidla v tomto zjednodušeném případě.

Dne 7. června se mu cosi začíná zjevovat:

Když začaly první členy vycházet správně [dávaly Bohrova pravidla], rozrušilo mě to tak moc, že jsem začal dělat jednu matematickou chybu za druhou. Kvůli tomu to bylo až kolem třetí hodiny ranní, kdy jsem měl před sebou konečně výsledky svých výpočtů. Všechny členy zcela souhlasily.

Náhle jsem ztratil všechny pochyby o vnitřní konzistenci nové „kvantové mechaniky“, kterou můj výpočet popisoval.

Nejdříve mě to hodně polekalo. Měl jsem pocit, že jsem pronikl pod povrch věcí a začal nahlížet do podivně nádherného nitra. Zatočila se mi hlava z představy, že teď budu muset