

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 slovutný 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 báдали 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 Borny, a přijel do Kodaně. Tam strávil několik měsíců diskusemi s Bohrem před tabulemi plnými vzorců. Mladý učeň 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 prazvláštních 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 nejtradovanější názory mohou být někdy chybné. Co se nám dosud jevílo 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 vyzařuje. Založme vše



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

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

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 přeskočení 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 oprávnělo 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

prozkoumat všechno bohatství matematických struktur, jež přede mne příroda tak velkoryse předestřela.

Výrazy, z nichž se tají dech: „pod povrchem věcí“, „podivně nádherné nitro“. Heisenbergova slova plně souzní s těmi, jež napsal Galileo, když poprvé spatřil matematický řád ve svých měřeních pádu těles po nakloněné rovině. Byl to úplně první matematický zákon popisující pohyb objektů na Zemi, jaký lidstvo odhalilo. Nic se nemůže vyrovnat pocitům, když za zmatkem pozorovaných jevů spatříme prostý matematický zákon.

hñ

Dva dny poté, 9. června, Heisenberg opouští Helgoland a vrací se na univerzitu v Göttingenu. Svému příteli Paulimu posílá kopii svých výsledků s komentářem: „Vše je pro mě stále ještě velmi vágní a nejasné, ale zdá se, že elektrony se už nepohybují po orbitách.“

Devátého července posílá kopii své práce profesoru Maxi Bornovi, jemuž dělal asistenta, s následující poznámkou: „Napsal jsem bláznivý článek a nemám odvahu ho kamkoli odeslat k publikaci.“ Žádá Borna, aby si ho přečetl a poradil mu.

Max Born 25. července odesílá Heisenbergovu práci do vědeckého časopisu *Zeitschrift für Physik*.³

Born rozpoznal důležitost kroku, který jeho mladý asistent učinil. Potřebuje ho ale více objasnit. Přizve k tomu svého studenta Pascuala Jordana, aby se spolu pokusili vnést řád do Heisenbergových bizarních výsledků.⁴ Heisenberg sám se pokouší zapojit Pauliho, ale nepřesvědčí ho: tomu se vše zdá být jen matematickou hrou, příliš abstraktní

a nesrozumitelnou. Proto na samém začátku pracují na teorii pouze tři lidé: Heisenberg, Born a Jordan.

Pracují horečně a během pouhých pár měsíců se jim podaří najít a vybudovat celou formální strukturu nové mechaniky. Je velmi jednoduchá: působící síly jsou stejné jako v klasické mechanice, rovnice jsou stejné jako v klasické mechanice (až na jednu, * o které se podrobněji zmíním později). Avšak proměnné byly nahrazeny tabulkami čísel neboli „maticemi“.

\hbar

Proč tabulky čísel? Elektron v atomu pozorujeme tehdy, když vyzáří světlo neboli když podle Bohrovy hypotézy přeskočí z jedné orbity na druhou. Konkrétní přeskok se týká dvou orbit: jedné, kterou elektron opouští, a druhé, na kterou přeskakuje. Každé takové pozorování tedy může být zapsáno jako položka v tabulce, kde opouštěná orbita určuje řádek, zatímco výsledná orbita určuje příslušný sloupec.

Heisenbergovou klíčovou myšlenkou bylo zapsat současně *všechny* veličiny popisující chování elektronu – jeho polohu, rychlost, energii a podobně – nikoli pomocí pouhých čísel, ale pomocí *tabulek* čísel.

Místo toho, abychom měli jedinou polohu x elektronu, máme nyní celou tabulku X všech možných poloh elektronu pro všechny možné přeskoky. Hlavní ideou je i nadále používat *stejně* rovnice, jenom v nich obvyklé fyzikální veličiny (polohu, rychlost, energii a frekvenci orbity a tak dále) nahradíme odpovídajícími tabulkami. Například intenzitu a frekvenci světla emitovaného při přeskoku odečteme jako

* $XP - PX = i\hbar$.

příslušnou položku tabulky v daném řádku a sloupci. Tabulka odpovídající energii má čísla jenom na diagonále, a právě tato čísla udávají energii Bohrových orbit.

Je to jasné? Vůbec ne.

		Výsledná orbita				
		<i>Orbita 1</i>	<i>Orbita 2</i>	<i>Orbita 3</i>	<i>Orbita 4</i>	...
Výchozí orbita	<i>Orbita 1</i>	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	...
	<i>Orbita 2</i>	X_{21}	X_{22}	X_{23}	X_{24}	...
	<i>Orbita 3</i>	X_{31}	X_{32}	X_{33}	X_{34}	...
	<i>Orbita 4</i>	X_{41}	X_{42}	X_{43}	X_{44}	...

Heisenbergova matice: tabulka čísel „reprezentující“ polohu elektronu v atomu. Například číslo X_{23} se týká přeskočení ze druhé na třetí orbitu.

A přesto nám tento absurdní manévř, jímž je nahrazení čísel tabulkami, umožnil spočítat chování mikroskopických systémů a přesně předpovědět, co změříme v našich experimentech.

K velkému údivu tří göttingenských mušketýrů dostal Born ještě před koncem roku poštou krátkou esej od mladého Angličana, v níž byla zkonstruována teorie v podstatě stejná jako ta jejich, a to pomocí matematického jazyka, který byl ještě abstraktnější nežli göttingenské matice.⁵ Jejím autorem byl Paul Dirac. V červnu měl Heisenberg přednášku v Anglii, v jejímž závěru se zmínil o své myšlence kvantových přeskoků. Dirac seděl mezi posluchači, ale byl unavený a ničemu neporozuměl. Později mu jeho profesor věnoval Heisenbergův první článek (dostal ho poštou a přišel mu nesrozumitelný). Dirac si ho přečetl a dospěl k závěru, že je to postavené na hlavu, a tak ho odložil. Po pár týdnech si ale během procházky po venkovské krajině

uvědomil, že Heisenbergovy tabulky mu připomínají cosi, co studoval v jednom z univerzitních kurzů. Nevzpomínal si však přesně, o co šlo, a tak musel počkat do pondělí, než se otevře knihovna a on si osvěží paměť v příslušné knize...⁶ Následně, když to zkrátíme, zcela nezávisle sestrojil stejnou kompletní teorii jako tři mudrci z Göttingenu.

Zbývalo tedy už jen aplikovat novou teorii na chování elektronu v atomu a zjistit, jestli vše opravdu správně funguje. Lze takto skutečně spočítat všechny Bohrovy orbity?

Tyto výpočty se ukázaly být velmi složité a trojici vědců se nedařilo je dokončit. Požádali tedy o pomoc Pauliho, nejbrilantnějšího a současně nejarogantnějšího ze všech. „Ano, to jsou opravdu hodně složité výpočty,“ zavtipkuje, „... pro vás.“⁷ A s akrobatickou bravurou je sám dokončí během pár týdnů.⁸

Výsledek je fantastický. Hodnoty energií spočítané pomocí matic Heisenberga, Borna a Jordana přesně odpovídají těm, které vytušil Bohr. Bohrova podivná atomová pravidla plynou z nového schématu. Ale to není všechno. Teorie umožňuje spočítat také intenzitu emitovaného světla, kterou Bohr neuměl stanovit. I tyto výsledky naprosto perfektně souhlasí s laboratorními experimenty!

Je to dokonalý triumf.

Einstein v dopise Bornově ženě Heidi píše: „Heisenbergovy a Bornovy myšlenky budí obrovské očekávání a zajímají každého, kdo má být jen sebemenší zájem o teorii.“⁹ A v dopise svému dávnému příteli Michele Bessovi píše: „Nejzajímavější teoretické úvahy poslední doby jsou Heisenbergovy–Bornovy–Jordanovy kvantové stavy: jejich výpočty jsou čiré čarodějnictví.“¹⁰

Bohr, mistr oboru, bude po létech vzpomínat: „V té době jsme měli jenom vágní naději, že [se nám podaří dospět k] re-

formulaci teorie, v níž bude každé neoprávněné použití klasických představ postupně eliminováno. Zastrášení náročností tohoto programu jsme pak všichni pocítovali veliký obdiv vůči Heisenbergovi, který to v pouhých třidvaceti letech dokázal jedním rázem.⁴¹

Až na Bornu, jemuž bylo přes čtyřicet, byli Heisenberg, Jordan, Dirac i Pauli všichni dvacátníci. V Göttingenu proto jejich fyziku nazvali *Knabenphysik* neboli „fyzika chlapců“.

$\hbar\hbar$

O šestnáct let později se Evropa zmítala v agónii další světové války. Heisenberg byl už v té době slavný vědec. Hitler ho pověřil úkolem, aby využil své znalosti atomu pro konstrukci bomby, která vyhraje válku. Heisenberg odjel vlakem do Kodaně. V Dánsku okupovaném německou armádou navštívil svého bývalého učitele. Starý mistr a mladý muž spolu rozmlouvali a pak se rozešli, aniž by si navzájem porozuměli. Heisenberg později říkal, že vyhledal Bohra, aby s ním diskutoval o morálních problémech spojených s tak strašnou zbraní. Ne každý mu to věřil. Krátce nato byl Bohr na vlastní žádost unesen britským komandem z Dánska. Nejprve do Anglie, kde ho osobně přijal Churchill. Pak odjel do Spojených států, kde se jeho znalosti spojily s prací o generaci mladších fyziků, kteří se naučili používat novou kvantovou teorii k manipulaci s atomy a jejich jádry. Hirošima a Nagasaki byly vymazány z povrchu světa. Ve zlomku vteřiny vyhaslo na dvě stě tisíc lidských bytostí – mužů, žen i dětí. Dnes žijeme ve světě, kdy na naše města míří desetitisíce jaderných hlavic. Tento arzenál bohatě stačí na zničení života na naší planetě – stačí, aby se někdo zbláznil, nebo udělal chybu.

Každý z nás tedy může na vlastní kůži pocítit devastující moc oné „fyziky chlapců“.

ħħ

Naštěstí je toho mnohem víc než jenom zbraně. Kvantová teorie byla aplikována na atomy, atomová jádra, elementární částice, na fyzikální podstatu chemických vazeb, fyziku pevných materiálů, tekutin i plynů, na polovodiče, lasery, fyziku hvězd jako naše Slunce, neutronové hvězdy, velmi raný vesmír, fyziku vzniku galaxií... a tak dále a tak dále. Tento výčet by mohl pokračovat několik dalších stránek. Kvantová teorie nám umožnila pochopit rozsáhlé oblasti přírody, od přesné podoby periodické soustavy prvků až po medicínské aplikace zachraňující miliony životů. Předpověděla nové a předtím netušené jevy: kvantové korelace na kilometrové vzdálenosti, kvantové počítače, teleportaci... všechny tyto předpovědi se ukázaly být správné.

Výpočetní schéma Heisenberga, Borna, Jordana a Diraca, podivná idea „omezení se jen na to, co je pozorovatelné“ a nahrazení fyzikálních proměnných maticemi,¹² dosud nikdy neselhala. Je to jediná fundamentální teorie světa, která byla zatím vždy úspěšně potvrzena – a jejíž meze platnosti stále ještě neznáme.

ħħ

Ale proč vlastně nedokážeme popsat, kde elektron je a co dělá, když ho *nepozorujeme*?

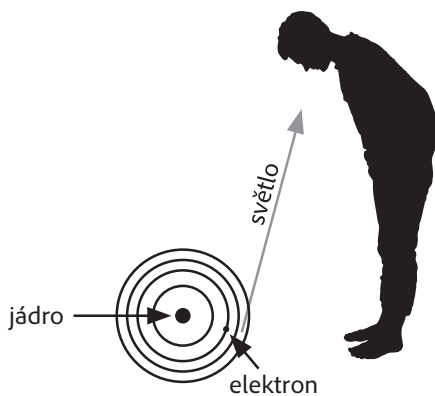
Proč musíme mluvit jenom o „pozorovatelných“ veličinách? Proč sice dokážeme popsat jeho efekty, když přeskakuje z jedné orbity na druhou, ale přesto neumíme říct,

kde se v daný okamžik nachází? Co znamená, že čísla byla nahrazena *tabulkami* čísel?

Co znamená výrok „Vše je pro mě stále ještě velmi vágní a nejasné, ale zdá se, že elektrony se už nepohybují po orbitách“? Přítel Pauli se o Heisenbergovi vyjádřil takto: „Jeho způsob uvažování byl hrozný, opíral se výhradně o intuici; nevěnoval žádnou pozornost jasnému rozpracování fundamentálních předpokladů ani jejich vztahu ke stávajícím teoriím...“

První věta fascinujícího článku Wernera Heisenberga, kterým všechno začalo, článku počatém na ostrově v Severním moři, zní: „Cílem této práce je položit základy teorie kvantové mechaniky založené výhradně na vztazích mezi veličinami, které jsou v principu pozorovatelné.“

Pozorovatelné? Jak může přírodu zajímat, jestli někdo něco pozoruje, nebo ne?



Kvantová teorie nám neříká, jak se elektron během přeskočení pohybuje. Říká nám pouze to, co vidíme, když přeskočí. Proč?