

Jak se smiřuje nesmiřitelné: 100 let kvantové mechaniky

Tomáš Mančal

Vědecký příběh kvantové teorie, která letos slaví 100 let od své moderní formulace, je plný koperníkovských obrátů a smiřování nesmiřitelného. Historie kvantové teorie ukazuje, jak se střety neslučitelných idejí staly ve 20. století zdrojem zásadního vědeckého pokroku. Proces budování a přijetí kvantové teorie dobře ilustruje komplikovaný charakter vzniku lidského poznání, které se nemůže opřít o žádné předem dané jistoty ani žádnou prověřenou metodu. Jedinou jistotou tak zůstává orientace sub specie aeternitatis, k pravdě, jež překonává všechno časné a lidské.

Prožíváme dnes dobu široké ztráty důvěry ve vědu a vědění vůbec. Není to však poprvé v dějinách, kdy ztrácíme sdílený orientační rámec. Takovou ztrátou byl i úpadek důvěry v organizované křesťanství v minulých dvou stoletích, za kterým lze s jistým zjednodušením vidět zklamaná očekávání neomylného vševysvětlujícího rámce, který mělo náboženství poskytovat. Křesťanství takovou pozici, kterou od něj často stále očekávají jeho odpůrci i zastánci, evidentně nemohlo udržet. Neomylný světonázor totiž nikdy neměl být na programu. Věda může dnes stát na stejném rozcestníku. Zklamaná očekávání, která si do ní mnozí promítali, hrozí zbořit autoritu těžce vydaného poznání v medicíně, biologii a výzkumu naší planety. Dovolím si tvrdit, že žádný z těchto výzkumů nikdy neprobíhal po cestě jistot vyznačených vědeckou metodou nebo neotřesitelnou logikou, nebyl vykonán neomylnými génii a také nebyl prost osobních preferencí včetně těch ideologických. Nic z toho ale neubírá na váze vědeckému poznání, protože jeho výsledky nelze servírovat odděleně od zásadní přísady všeho vědeckého snažení – na prosté oddanosti pravdě, i té ještě nenalezené, nebo spíše právě jí. S touto ingrediencí – na straně příjemců i servírujících – představuje věda to nejlepší, co pro orientaci ve světě máme. Bez ní je jakákoliv argumentace vědeckými výsledky nebo proti nim pouhá hra se slovy, která se snadno zvrhne v sofismus.

Historie kvantové teorie může poskytnout model pro pochopení toho, jak věda překračuje sebe samu, bourá se a znovu buduje na nových, méně jistých, a přesto pravdivějších základech. Příběh kvantové teorie, který zde v hrubých obrysech nastíníme, napovídá, že mnohem víc než vědecká metoda nebo génius jednotlivců ukazuje cestu samotné přesvědčení, že pravda existuje nezávisle na našich preferencích a lidských autoritách.

Planckova kvantová hypotéza

V prosinci roku 1900 představil Max Planck svoji kvantovou hypotézu. Planck byl nucen postulovat existenci nejmenšího množství energie, které může nést světlo o dané frekvenci, tzv. *kvanta*, aby vysvětlil rozdělení energie v záření horkých těles, např. Slunce. Jeho *kvantová hypotéza* spolu s Bohrovým modelem atomu dala vzniknout tzv. *staré kvantové mechanice*, která byla směsicí dobře prověřené klasické fyziky a *ad hoc* výjimek, tzv. kvantovacích podmínek. Fyzikové tušili, že jedinou cestou vpřed bude nalezení nějaké obecnější teorie mikrosvěta překračující klasickou fyziku.

Heisenbergův magický krok

Během první čtvrtiny 20. století připravila stará kvantová mechanika půdu pro zrození moderní kvantové teorie, které si letos připomínáme. V červenci 1925 zahájil moderní kvantovou revoluci tehdy 22letý Werner Heisenberg. Ten si uvědomil, že v mikrosvětě nikdy nepozorujeme elementární částice přímo. Vždy k nim přistupujeme přes odvozené pozorovatelné veličiny. Představoval si, že místo drah elektronů obíhajících kolem jádra atomu je tedy třeba pracovat s jakýmsi seznamem frekvencí a amplitud odpovídajícího emitovaného záření. Pro svoje seznamy, tzv. *matice*, vymyslel kombinační pravidla[1] splňující tzv. *princip korespondence* s klasickou fyzikou vyvinutý předtím Nielsem Bohrem. Takto vznikla první ucelená moderní kvantová mechanika, která odmítla dráhy částic podobné planetárním orbitám a nahradila je maticemi pozorovatelných veličin. Přestože zachovávala zřetelnou formální kontinuitu s klasickou fyzikou, ukazovala také, že se pojmosloví a představy klasické

mechaniky směrem do mikrosvěta kompletně rozpadají. Náš svět jako by se směrem dolů rozpouštěl ve zdánlivém chaosu. Když v lednu 1926 Wolfgang Pauli vyřešil pomocí maticové mechaniky problém spektra atomu vodíku, zdálo se, že 25 let očekávané zobecnění klasické fyziky je tady.

De Broglieho vlnová hypotéza

Heisenbergova maticová mechanika věrně reprodukovala experimentální výsledky, vyzývala však k jakémusi opuštění fyzikálního náhledu, protože v mikrosvětě jaksí „není co vidět“. Cestu k názornějšímu pochopení mikrosvěta otevřel již v roce 1924 Louis de Broglie, když ve své disertační práci předložil odvážné sjednocení popisu mikrosvěta.

Je-li možné považovat světlo za proud částic, jak ukázal v roce 1905 Albert Einstein, proč by tedy dosud známé částice nemohly být naopak vlnami? Takový návrh vysvětloval zvláštní chování elektronu, když se ho elektrické síly snaží poutat do malého prostoru kolem atomového jádra. Elektron v atomu by měl podle klasické fyziky ztratit veškerou energii vyzařováním a měl by se zhroutit na jádro. S ubývajícím energií elektronu by ovšem podle de Broglieho musela růst jeho vlnová délka, až by se jako vlnový objekt do malého prostoru kolem jádra prostě nevešel. Jedinou cestou k lokalizaci elektronu u jádra je tedy zkracování vlnové délky, čímž ale naopak jeho energie roste. Vyrovnání těchto dvou protichůdných tendencí vede nakonec ke stabilitě atomu.

Schrödingerova vlnová mechanika

Rakouský fyzik Erwin Schrödinger se pokusil spojit tuto vlnovou hypotézu s klasickou fyzikou. Konflikt mezi částicovými a vlnovými teoriemi světla totiž nebyl úplně nový. Autorita Isaaca Newtona a zdánlivá absence interference světla nadlouho vychýlily spor směrem k částicovému pojetí. Trvalo až do roku 1801, než Thomas Young experimentálně prokázal existenci efektů přímo odporujících částicové představě světla. Je-li ovšem světlo vlnového charakteru, musí se naopak vysvětlit jevy, které ukazují na jeho částicovou povahu. To lze, pokud ve vlnových rovnicích světla předpokládáme velmi krátké vlnové délky. Schrödingerovi, který stál doposud stranou vývoje kvantové mechaniky, stačilo v podstatě „jen“ proces odvození paprskové optiky z Maxwellovy vlnové teorie světla obrátit a nalézt k mechanice nadřazenou vlnovou teorii.

Výsledky byly ohromující. Myšlenka, že elektron se jako vlna musí ustálit v okolí jádra, umožnila Schrödingerovi nalézt

spektrum atomu vodíku – jeho článek byl publikován jen o pár dní později než článek Wolfganga Pauliho. Navíc Schrödingerova teorie automaticky vedla na kvantovací podmínky a Schrödinger tak vlastně vysvětlil starou kvantovou mechaniku na základě de Broglieho hypotézy. Zcela odlišnou cestou vytvořil kvantovou

teorii podávající ve všech známých případech shodné výsledky s o půl roku starší teorií Wernera Heisenberga.

Tomáš Mančal

Z formálního hlediska je kvantová teorie vlnovou teorií, když ale dojde na problém měření, situace se výrazně komplikuje. Postupně se ukázalo, že náhoda je integrální součástí většiny měření v kvantovém světě.

Sjednocení v moderní kvantové mechanice

Obě kvantové mechaniky se zdály odkrývat překvapivě neintuitivní charakter obyvatel mikrosvěta. Co do matematické formy však podoba obou teorií snad nemohla být odlišnější. Přesto se podařilo Schrödingerovi brzy ukázat, že obě

tak odlišné teorie jsou naopak matematicky ekvivalentní. To umožnilo jejich sjednocení a vedlo nakonec k přijetí Schrödingerovy formulace. Heisenbergova myšlenka pracovat pouze s pozorovatelnými veličinami se potichu vytratila a stěžejní místo zaujal v kvantové teorii v zásadě nepozorovatelný objekt, tzv. *vlnová funkce*. Heisenberg měl nicméně pravdu, že klasické pojmy jako dráha nedávají v mikrosvětě dobrý smysl a vlnová funkce se ukázala poskytovat pouze pravděpodobnostní informaci o možných výsledcích měření. Rozpad klasického pojmosloví a intuice v mikrosvětě se odvrátil nepodařilo.

Podivné chování mikrosvěta tak postavilo velký otazník za předpoklad, že fundamentální zákony platné v mikrosvětě přímo zakládají zákony makrosvěta. Na kolbiště vědeckých idejí musel vstoupit hráč nikdy předtím v takovém měřítku nepoznaný, a sice *interpretace* překonávající rozporná chování mikrosvěta a makrosvěta. K praktickému ovládnutí kvantové mechaniky nestačí naučit se její matematický aparát, ale je nutné umět ho také správně interpretovat. A jak se ukázalo, interpretace vedoucí ke stejným experimentálním výsledkům není jen jedna. Místo jednoznačné matematiky jako jistého vodítka rozumu náhle fundamentální teorie světa musela odkazovat na silně filosoficky zabarvené interpretace.

Kodaňská interpretace kvantové mechaniky

Z formálního hlediska je kvantová teorie vlnovou teorií, když ale dojde na problém měření, situace se výrazně komplikuje. Postupně se ukázalo, že náhoda je integrální součástí většiny měření v kvantovém světě. Měření je proces, který nelze popsat pohybovými rovnicemi kvantové mechaniky,[2] ale představuje v časovém vývoji kvantového systému skok. Teorie dovede →

→ předpovědět pouze průměrný výsledek mnoha opakovaných měření na stejném stavu. Byl to Niels Bohr, kdo vypracoval ucelenou interpretaci toho, co se při měření děje. Diskontinuitu při měření postavil na úroveň fundamentálního fyzikálního procesu. Měření podle něj vede ke kolapsu vlnové funkce. To, který z možných výsledků měření se realizuje, je fundamentálně náhoda a svět se nějakým způsobem zásadně dělí na kvantový a klasický. Této interpretaci se dnes říká Kodaňská, protože vznikla v Bohrově Ústavu teoretické fyziky v Kodani, která byla tehdy Mekkou kvantové fyziky. Kodaňská interpretace je s trochou opatrnosti dodnes velmi spolehlivým návodem, jak interpretovat experimenty. Značná část těch, kdo stáli u zrodu kvantové mechaniky i následujících generací fyziků, ji ale nikdy nepovažovala za plně uspokojivou.

Souboj titánů

Nejvíce se proti Bohrově interpretaci angažoval Einstein. Zcela zásadní konfrontace proběhla v roce 1935, kdy Einstein spolu s Borisem Podolským a Nathanem Rosenem poukázali na rozporný důsledek Kodaňské interpretace pro systémy částic vykazující tzv. *kvantově mechanické provázání*. V moderní verzi jejich argumentu jde o to, zda kolaps vlnové funkce okamžitě ovlivňuje měření, která jsou uskutečněna tak daleko od sebe, že mezi nim jinak nemůže nastat žádný přenos informace. Podle Kodaňské interpretace tomu tak je. Einstein to nazýval „strašidelným působením na dálku“ a jeho námitka měla znamenat konec snění o úplnosti kvantové teorie. Přesto Bohr neustoupil. Einsteinův argument obrátil v otázku, jak chápat realitu. Pokud se realita vynořuje až měřením, byl Einsteinův argument pouze chybným očekáváním reality skryté za kvantovou mechanikou. Podle Bohra ale žádná taková realita neexistuje.

Bellovy nerovnosti

Řešení zdánlivě metafyzického sporu Einsteina s Bohrem našťásti zůstalo uvnitř hájemství fyziky. V roce 1964 zkonstruoval John S. Bell matematickou nerovnost, kterou nutně splňují všechny tzv. lokální fyzikální teorie, tedy takové, kde si informace o výsledku experimentu nesou k měřicímu aparátu samy částice. Kvantová teorie tuto nerovnost porušuje. Bell stál ve zmíněném sporu na straně Einsteina a jeho nerovnost umožňovala navrhnout experiment, který by rozhodl, zda je svět lokální, nebo ne (jak předpovídá kvantová mechanika). Experimentu se jako první zhostil John F. Clauser v roce 1972. A výsledek? Svět se chová podle předpovědi kvantové mechaniky!

Einstein se mýlil, Bohr měl pravdu. Kvantová teorie plně obstála i v sérii dalších podobných experimentů, které následovaly a vynesly v roce 2022 Nobelovu cenu Johnu F. Clauserovi, Alanu Aspectovi a Antonu Zeilingerovi.[3]

Sto let poté

Po sto letech od jejího vzniku nelze přehlédnout, že kvantová mechanika funguje. Dává schopnost předvídat a ovládat mikrosvět a vyznačuje omezení, kterým jsme tam vystaveni. Umožnila nám otevřít Pandořinu skříňku atomové energie a pomáhá nám pochopit principy života a vývoj vesmíru. Na druhou stranu nám ale neukazuje jednoznačně, co si máme o mikrosvětě myslet. Různé interpretace kvantové mechaniky se ve svých kvantitativních předpovědích neliší, mohou však nabývat značně odlišných filosofických forem. Někdy lze tyto filosofie přetvořit do experimentů, jako v případě sporu Einsteina s Bohrem, a některé výroky současných interpretací experimentální ověření možná čeká. Je ovšem obtížné si představit, že budeme nakonec schopni veškerou metafyziku interpretací přetvořit ve fyziku. Je dost dobře možné, že čelíme principiální hranici poznání, a to ve smyslu toho, jak jsme byli stvořeni. Byla nám dána schopnost překvapivě dobře chápat svět kolem sebe, ale poznali jsme také, že nejsme kvantoví; že žijeme ve světě, který se vynořuje z mikrosvěta, který je nám fundamentálně cizí. Není jisté, odkud by měla pocházet garance toho, že by nám naše principiální mentální ustrojení mělo umožnit tento vztah beze zbytku uchopit.

tořit do experimentů, jako v případě sporu Einsteina s Bohrem, a některé výroky současných interpretací experimentální ověření možná čeká. Je ovšem obtížné si představit, že budeme nakonec schopni veškerou metafyziku interpretací přetvořit ve fyziku. Je dost dobře možné, že čelíme principiální hranici poznání, a to ve smyslu toho, jak jsme byli stvořeni. Byla nám dána schopnost překvapivě dobře chápat svět kolem sebe, ale poznali jsme také, že nejsme kvantoví; že žijeme ve světě, který se vynořuje z mikrosvěta, který je nám fundamentálně cizí. Není jisté, odkud by měla pocházet garance toho, že by nám naše principiální mentální ustrojení mělo umožnit tento vztah beze zbytku uchopit.

Záchranné lano

Kvantová teorie by mohla dobře představovat model našeho vztahu ke světu a k poznání vůbec. Můžeme se ptát, co nás uschopňuje překonávat propast rozdílu mezi naší bezprostřední zkušeností a nějakou vyšší úrovní poznání. Je to snad vědecká metoda? Jsou to matematické jistoty? Máme se spolehnout na genialitu jednotlivců, na svobodu bádát v kterémkoliv směru, nebo na konečnou autoritu experimentu? Dovolím si tvrdit, že všechny tyto jistě užitečné aspekty vědy jsou ve své podstatě druhotné. To, co umožnilo vědě dosáhnout ohromujícího úspěchu při vysvětlování přírody, je fakt, že se neopírá o nic z tohoto světa. Orientaci vědcům neposkytuje něco, co už je. V zásadě věda vůbec neví dopředu, co je obsahem ani formou pravdy, ke které se upíná, a každý nový pokus překročit současné poznání je potenciálním krokem ke kompletní redefinici

toho, co za pravdu považujeme. Ani věda nemá pevný bod ve vesmíru, o který by se mohla opřít. Opírá se jediné o zásadní upřímnost těch, kdo pravdu hledají. Kdo hledá pravdu, musí nejvíce ze všeho zůstat upřímný sám k sobě. Musí do hloubky pochopit argumenty svých oponentů. Hledá se totiž pravda, kterou nelze prosadit nějakou mocí, a přesto je nakonec tak neuvěřitelně mocná. Pokud se hledání upře na nějakou jednotlivost, zdánlivý fundament našeho nazírání na svět, vždy kvůli tomuto zahledění ztratíme cestu k tomu, co hledáme.

K poznání našeho místa ve světě nemáme žádný jednoduchý návod. Je samozřejmě vždy možné se spokojit s autoritou a s tradicí. Kdybychom to však dělali v posledních třech stoletích, vypadal by náš svět radikálně jinak. Sto let po formulaci kvantové teorie je věda znovu odsouvána na druhou kolej, kdykoliv se to mocným hodí. Možná že ne kvantová teorie, alespoň ne teď, ale věda ano. Technologie, ze kterých se vytratila jakákoli pravdivost těch, kteří svou prací základy techniky umožnili, rozkládají naši společnost. Právě v tuto chvíli je třeba si uvědomit, co vždy bylo a je základní složkou úspěšného řešení jakéhokoliv problému. Je to pravdivé zhodnocení situace a přijetí všech jejích často protichůdných výchozích aspektů. Hledání řešení vyžaduje schopnost překládat mezi zdánlivě nepodobnými jazyky, hledat smíření zdánlivě protichůdných výroků a usilovat o zahrnující pochopení. Každá fyzika představuje jednoduchý problém ve srovnání s otázkou smíření vědy a víry, s problémy mezináboženského dialogu, soužití mezi národy nebo otázkami sociální spravedlnosti. V mnohých těchto oblastech nacházíme zjevné paradoxy, jejichž řešení nelze hledat v jednoduché logice. Pokusy o taková jednoduchá řešení nemohou skončit jinak než budováním ideologických paláců, jejichž konzistenci

nelze udržet jinak než násilím: zprvu intelektuálním, často nakonec i fyzickým. Historie kvantové teorie je pouze model, není to návod, ale ukazuje, co je důležité. K našim problémům mohou existovat zdánlivě odlišná řešení, mohou existovat řešení naprosto odlišně filosoficky (a ideologicky) motivovaná. Můžeme mít pravidla, kterým nerozumíme, a která přesto fungují. Někdy jsou paradoxy řešitelné, jindy ne, některé nebudou nikdy rozřešeny. Ne každý protimluv lze povýšit na tajemství, ale žádný dopředu připravený systém a návod nám nedovolí ve všech případech pravdivě rozhodnout. Jedinou kotvou zůstává orientace na pravdu, která přesahuje, která neslouží, ale které sloužíme. A protože nikdo se nemůže dobrat této pravdy sám, musíme také často vložit svoji důvěru do svých oponentů a jejich argumentů. Musíme vyžadovat a kultivovat svět, ve kterém je můj oponent důvěryhodný, kde hledání pravdy není cynická hra, kde se nelze

Tomáš Mančal

Jedinou kotvou zůstává orientace na pravdu, která přesahuje, která neslouží, ale které sloužíme. A protože nikdo se nemůže dobrat této pravdy sám, musíme také často vložit svoji důvěru do svých oponentů a jejich argumentů.

z orientace na pravdu vyloučit poukazem na pravidla. Ani v době umělé inteligence nelze zodpovědnost za takový svět naložit na nikoho jiného než na člověka. To, že se dokážeme orientovat na pravdu v jejím neuchopitelném, nikdy neuzařveném smyslu, ve smyslu *sub specie aeternitatis*, je nakonec naše jediné skutečné ukotvení v tomto světě, jediné skutečné záchranné lano, hozené vposledku z vnějšku našeho světa.

Doc. Tomáš Mančal je teoretický fyzik, působí na Matematicko-fyzikální fakultě UK.

LITERATURA A POZNÁMKY:

- [1] T. Mančal: Heisenbergův magický krok. Československý časopis pro fyziku 71 (2021), s. 344n.
- [2] Zde poněkud zjednodušíme; i v problému měření bylo dosaženo výrazného pokroku a je stále předmětem aktivního výzkumu.
- [3] T. Mančal: Alberte, nezlob se – Nobelova cena za fyziku 2022. *Vesmír* 102 (2023), s. 498n.



Centrum dalšího vzdělávání

Jabok – Vyšší odborná škola sociálně pedagogická a teologická

Kvalifikační kurzy:

ASISTENT PEDAGOGA • PEDAGOG VOLNÉHO ČASU

Kurzy dalšího vzdělávání pro:

Sociální pracovníky • Pedagogy • Osobní rozvoj



Další informace:

www.jabok.cz/kurzy

| +420 603 330 793

| cdv@jabok.cz