

Důsledky kvantové mechaniky na vztah popisu a reality

[Pavel Krtouš](#)

[podzim 1992](#)

+ několik mých poznámek k tomu

Pavel.Krtous@mff.cuni.cz

V diskusi o povaze reality se lze jen těžko vyhnout zmínce o kvantové mechanice. A to hned ze dvou důvodů. Jedná se o jedinečný příklad popisu, který je v příkrém rozporu s naším přirozeným světem, a, což je myslím důležitější, interpretace kvantové mechaniky, které se poslední dobou rozvíjejí, ukazují na potřebu jiného pojetí našeho vztahu s realitou.

Čím že je to tedy ta kvantová mechanika tak zvláštní? Nejprve v čem spočívá ta odlišnost tohoto popisu od přirozeného vidění světa. Součástí našeho přirozeného světa je představa lokalizovatelnosti částic. Částice jsou objekty lokalizované v malém prostoru, dostatečně stabilní (nerozpadávající se), objekty, které se projevují v kusech (v kvantech). U těchto objektů jsme běžně zvyklí, že se pohybují po lokalizované dráze v prostoru. Tj. když se kdykoli podíváme, kde částice je, tak ji někde nalezneme. A nejen to. I v okamžicích, kdy se nedíváme, tak předpokládáme, že se někde nachází. Z čehož lze dostat neprázdné předpovědi. Např. jestliže z proudu částic projde jednou dírou určitá část, druhou dírou jiná část, tak pokud necháme částice procházet oběma dírami (paralelně umístěnými), tak i v případě, kdy se nedíváme kterou dírou která částice letí, můžeme předpokládáme, že některou z nich letí. A celkové množství prošlých částic bude dáno složením příspěvků od obou děr.

Tato představa však přestává platit v kvantové mechanice. Základní odlišnost systémů, v kterých se projevují kvantové vlastnosti, je v tom, že je nelze tak snadno kontrolovat jako objekty našeho běžného světa. Chceme-li např. elektron "uvidět", musíme sestavit poměrně složitou aparaturu. Provedeme-li s kvantově chovajícími-se částicemi obdobný pokus s dírami, dostaneme odlišný výsledek. Nejdříve však co považujeme za kvantovou částici. Opět pokud

možno co nejlokalizovanější objekt. Nyní však tuto lokalizovanost budeme požadovat jen v okamžicích, kdy se na částici díváme. Ukazuje se, že více není možné. Tj. za částici považujeme to, co na fotografické desce vytvoří puntík, co způsobí jedno tiknutí částicového detektoru, co změní energii elektrody o kvantum energie při emisi, prostě co se při pozorování chová jako kus. Právě tyto vlastnosti mají částice jako elektron, foton, atd.. Přirozený svět nám nyní říká, že tyto objekty by měli mít stejnou povahu i když se na ně nedíváme. V případě pokusu s dírami tento předpoklad je v rozporu s experimentem - množství prošlých elektronů skrz dvě díry, v případě že nepozorujeme který kterou dírou prošel, není dáno složením příspěvků od každé díry. Předpoklad, že každý z elektronů letěl jednou z obou děr, tedy vede k chybě.

To je sice už odlišnost od běžné zkušenosti v přirozeném světě, ale konec konců proč by se malé částice nemohli chovat trochu jinak než velké. Uvedený výsledek lze vyložit tak, že po vyslání elektronu se elektron rozplyne v jakousi vlnu, která se prošíří oběma dírami a složí se opět až v okamžik, kdy elektron měříme. Naměřený efekt opravdu takového rysy má. Jenže toto také není udržitelné. Totiž v případě, že zjišťujeme, kudy elektron letí (kontrolujeme obě díry), začne se elektron chovat opět jako částice a výsledný efekt za oběma dírami je dán složením příspěvků od obou děr. Tato námitka lze ještě vysvětlovat jakousi zlomyslností elektronu. Tj. předpokládat, že má v pravidlech pro své chování předpis: "Pokud jsi měřen, chovej se jako částice a jdi některou z drah, pokud nejsi měřen, chovej se jako vlna a šíř se všemi možnostmi současně!". Jenže ani tato představa, ještě částečně odpovídající přirozenému chápání, nefunguje. My totiž můžeme rozhodnout o tom, zda budeme měřit kudy elektron letí, až po té, co už elektron musel proletět dírami, tj. po té, co si musel vybrat své chování. A představa, že si elektron vybírá své chování - vlnové nebo částicové - až dodatečně se zpětnou platností, je už značně nepřirozená.

Takovéto zkušenosti s mikrosystémy vedly nakonec k pojetí, že to, jak se nám realita jeví, jak se jednotlivé objekty chovají, vyvíjí, závisí na tom jak je měříme, jak se na realitu díváme. Všeobecně přijaté porozumění kvantové mechaniky mikrosystémů je takové, že např. náš elektron je popsán jakýmsi (stavovým) vektorem, který se až do okamžiku měření vyvíjí podle určité rovnice a v okamžiku měření se změní podle toho co měříme a co naměříme. A my máme pouze omezenou škálu experimentů. Tj. můžeme se buď zeptat kam elektron dopadne, pokud se chová vlnově (tj. když neměříme, kterou dírou prošel), nebo kam dopadne, pokud se chová částicově (tj. když měříme, kterou dírou prošel). A podle naší otázky dostaneme

odpověď z jedné nebo druhé sady odpovědí. Nelze se však zeptat na obojí najednou. Po takovémto měření se pak elektron vyskytuje ve stavu, který odpovídá tomu, co jsme naměřili. Tj. naší otázkou jsme ovlivnili vývoj systému, což je další charakteristický rys kvantové mechaniky - neeliminovatelnost vlivu měření.

Poučením z tohoto je, že se nemůžeme stavět do pozice nezávislých pozorovatelů reality, pozorovatelů v pozadí, kteří jen sledují, co se v okolí děje. Ne, my svým pozorováním realitu ovlivňujeme. A to, jak se nám jeví a jak se mění, závisí na tom, jak se na ni díváme. To, zda lze chování elektronu interpretovat částicově nebo vlnově se rozhodne podle toho, jakou mu položíme otázku. A rozhodne se to až v okamžiku, kdy mu tu otázku položíme. Bez položení této otázky nemá smysl (a vede to k chybným závěrům) jeho chování interpretovat tak nebo tak.

Na druhou stranu ani tento pohled ještě neničí zcela pojetí reality jako našeho určitého protějšku, jako systému, který se vyvíjí před našima očima. Sice v závislosti na tom, jak se na něj díváme, ale pořád lze udržet představu, že se nachází v nějakém (i když zobecněném) stavu, což je v popisu vyjádřeno oním stavovým vektorem. Ukazuje se však, že i toto pojetí není asi správné. A to v okamžiku, kdy se kvantová mechanika chce použít na popis i pozorovatele samotného. O popsatečnosti pozorovatele budeme v dalším ještě mluvit, zde budeme zatím předpokládat, že alespoň do určité míry je sám člověk zahrnutelný do popisu reality. Minimálně všechny fyziologické procesy, které jsou zřejmě v korespondenci s naší pamětí, myšlenkami a pocity.

Je celkem přirozený předpoklad, že pokud je kvantová mechanika úspěšná v mikrosvětě, tak by měla být použitelná i na systémy skládající se z mikrosystémů, tj. na makrosvět a tedy i na pozorovatele samotné. A právě v tento okamžik nastávají velké interpretační potíže, jelikož ve standardní kvantové mechanice byl vždy zapotřebí vnější pozorovatel, který rozhodoval kdy a co se bude měřit, což, jak jsme viděli, zásadně měnilo vývoj systému. Nyní však chceme i tohoto pozorovatele zahrnout do popisovaného systému. A navíc pozorovatelů může být víc. Nebudu zde rozebírat všechny možnosti, jak se tento problém řeší. Zmíním se o jedné, která je pro nás v této souvislosti zajímavá a která myslím nejvíc ovlivňuje další vývoj. Jedná se o everettovskou interpretaci kvantové mechaniky.

Nejdříve uvedeme situaci, na které bude vidět problematičnost popisu makroskopického pozorovatele. Je jím známá kočka pana Schrödingera, resp. tuto situaci později přeformulujeme v paradox Wignerova přítele. Představme si, do zcela izolované místnosti

umístíme kočku a zařízení, které v průběhu jedné hodiny buď kočku zabije nebo ne. Jelikož místnost je zcela izolovaná, tak pozorovatel vně nemůže měřit, který ze dvou stavů nastal a tudíž, stejně jako v případě, kdy neměřil kterou dírou elektron letí, nesmí předpokládat, že jedna z možností nastala, tj. že kočka je buď živá nebo mrtvá. To by mohlo vést k chybným předpovědím. V jakém je ale kočka stavu. Čistě technicky, v řeči stavových vektorů, je v superpozici stavu živá kočka a stavu mrtvá kočka. Co to ale znamená? A co teprve znamená, když do místnosti umístíme jiného pozorovatele? (Jedna technická poznámka: izolovanost místnosti je technicky nejslabší místo pokusu - realisticky nelze vytvořit makroskopickou zcela izolovanou místnost. To však nic nemění na principiální přípustnosti našeho myšlenkového experimentu. Jedná se o stejnou situaci jako otázka determinismu klasické fyziky. Principiálně je vývoj podle newtonovských pohybových rovnic samozřejmě jasně determinován počátečními podmínkami, na čemž nic nemění fakt, že nejsme v realistické situaci tuto predikci z technických příčin provést.)

Everettovská interpretace vylučuje z popisu zcela jakéhokoli vnějšího pozorovatele. Všichni pozorovatelé musí být zahrnuti do kvantového popisu. Místo vnějšího pozorovatele a zkoumaného systému nyní máme velký kvantově popsáný systém skládající se z podsystemů pozorovatele (či pozorovatelů), měřících aparatur (ukazuje se, že pro naše potřeby mezičlánky měřících aparatur není podstatný a proto ho budeme v dalším vynechávat) a zkoumaného systému. Absencí vnějšího pozorovatele se ztrácí proces měření jako proces jiné povahy než normální vývoj. Na jeho místo nastupuje dodatečná specifická interakce mezi pozorovatelem a zkoumaným systémem v okamžicích měření, která koreluje stav pozorovatele a zkoumaného podsystemu. K upřesnění tohoto je potřeba více specifikovat stavy pozorovatele.

Základní stavy pozorovatele budou stavy, které bych nazval stavy vědomí nebo možná paměti. Jediné, co o nich řekneme bude, že je budeme popisovat (číslovat) pomocí jednotlivých počítků, které pozorovatel cítí, podle záznamů v jeho paměti. Tj. např. pozorovatel (označme ho F) uvnitř místnosti buď vidí živou kočku nebo mrtvou kočku a tomu odpovídají dva stavy jeho vědomí - označme je

$$|F: \textit{živá kočka} \rangle \text{ a } |F: \textit{mrtvá kočka} \rangle ,$$

před tímto pozorováním je pozorovatel F ve stavu

$$|F: \rangle .$$

Stavy kočky nazvu

$$|K: \textit{živá} \rangle , \quad |K: \textit{mrtvá} \rangle .$$

Stavy pozorovatele vně místnosti (nazvěme ho W) označíme obdobným způsobem. Proces měření kočky pozorovatelem je pak popsán takovou interakcí, která zkoreluje pozorovatelovu znalost kočky s jejím stavem. Tj.

$$\begin{aligned} |F: \rangle |K: \textit{živá} \rangle &\rightarrow |F: \textit{živá kočka} \rangle |K: \textit{živá} \rangle + a \\ |F: \rangle |K: \textit{mrtvá} \rangle &\rightarrow |F: \textit{mrtvá kočka} \rangle |K: \textit{mrtvá} \rangle + b \end{aligned}$$

Zde jsme zadali vývoj zadáním vývoje báze, vývoj pro jiný počáteční stav je dán pomocí principu superpozice (zde bohužel předpokládám jistou obeznámenost s kvantovou mechanikou).

Jak v této řeči popsat náš experiment? Nejdříve bez pozorovatele v místnosti. Označíme-li pozorovatele vně místnosti W a použijeme-li pro něj obdobný popis, budeme moci napsat počáteční stav jako

$$|W: \rangle |K: \textit{živá} \rangle ,$$

ten se v průběhu hodiny, po dobu které běží experiment, změní na stav

$$|W: \rangle (a |K: \textit{živá} \rangle + b |K: \textit{mrtvá} \rangle) ,$$

kde koeficienty a , b v superpozici jsou dány konstrukcí zařízení v místnosti. Právě v tento okamžik pozorovatel vně nemůže tvrdit, že kočka je živá nebo mrtvá. Neprovedl měření a tak může jen předpokládat, že kočka je v superponovaném stavu. Jakou interpretaci má superpozice živé a mrtvé kočky? Rozhodně nezvyklost takového stavu neznamená jeho nemožnost. Vzhledem k tomu, že kočka v tomto stavu je za zdí, za kterou se pozorovatel nepodíval, tak ani nemůže vidět nějaké podivnosti. Ve chvíli, kdy se rozhodne zjistit, jak superpozice živé a mrtvé kočky vypadá a podívá se do místnosti, tak provedl měření a celý systém se vyvine do stavu, který obdržíme aplikací pravidel pro měření uvedených výše:

$$a |W: \textit{živá kočka} \rangle |K: \textit{živá} \rangle + b |W: \textit{mrtvá kočka} \rangle |K: \textit{mrtvá} \rangle .$$

Tento stav je superposicí stavu, v kterém pozorovatel vidí živou kočku a kočka je živá, a stavu, v kterém pozorovatel vidí mrtvou kočku a kočka je mrtvá. Co je to však superpozice dvou různých stavů pozorovatelova vědomí? **Everettovská interpretace** ji interpretuje jako "rozštěpení" světa do dvou větví, v jedné z nichž pozorovatel vidí jedno a v druhé něco jiného. Tyto dvě větve existují zároveň, ale v normálním vývoji jsou už dále nezávislé.

Ještě připomeňme, proč nemohl pozorovatel předpokládat toto štěpení před svým pozorováním. V principu lze sestavit zařízení, které je schopno měřit superpozici živé a mrtvé kočky. Tj. pozorovatel vně před tím, než se do místnosti podívá, může provést jiné měření a

výsledek tohoto měření by byl v rozporu s předpokladem, že k rozštěpení na dvě větve již došlo. Toto odpovídá možnosti měřit vlnovou povahu elektronu.

Štěpení na několik větví lišících se tím, co pozorovatel naměřil, je první změna v chápání reality v této interpretaci. Čemu v našem popisu nyní odpovídá realita? Stavovému vektoru celého velkého systému (tj. superpozici dvou stavů pozorovatelova vědomí)? Ale to pak neodpovídá představě, že realita koresponduje s našimi počítky. Jasně definované počítky (výsledky měření) má pozorovatel vždy jen v každé konkrétní větvi everettovského štěpení. Potom by ve větvi, v které pozorovatel např. uviděl živou kočku realita měla odpovídat stavu zbytku systému v této větvi, tj. stavu $|K: \text{živá}\rangle$, tj. živé kočky. Takovéto pojetí reality se zdá přijatelné. Potíž je, že těchto větví je víc. Znamená to, že realita se při každém našem pozorování štěpí? Tato interpretace, zdá se, to implikuje.

Toto však není konec potíží. Zásadní potíže nastanou, umístíme-li druhého pozorovatele do místnosti. Počáteční stav celého systému bude

$$|W: \rangle |F: \rangle |K: \text{živá}\rangle .$$

Po hodině, během které proběhl experiment, bude stav následovný (zde předpokládám, že pozorovatel uvnitř neustále sleduje kočku)

$$\begin{aligned} & |W: \rangle (a |F: \text{živá kočka}\rangle |K: \text{živá}\rangle + b |F: \text{mrtvá kočka}\rangle |K: \text{mrtvá}\rangle) = \\ & = a |F: \text{živá kočka}\rangle |W: \rangle |K: \text{živá}\rangle + b |F: \text{mrtvá kočka}\rangle |W: \rangle |K: \text{mrtvá}\rangle . \end{aligned}$$

Zde jsme čili : já Krtouš a Everett jsem stav napsali dvěma způsoby - vzhledem štěpení vůči každému z obou pozorovatelů. A v tom je kámen úrazu. Toto štěpení není shodné. V uvedené interpretaci to ale znamená, že různí pozorovatelé mají proti sobě různou realitu. Pozorovatel vně své okolí popisuje stavem já například, jakožto „různej pozorovatel od Krtouše a Evetetta“ mám stejnou realitu, stejnou myšlenku, stejné pojetí QM, stejnou úvahu, ale v jiné logicko-vizuální verzi → http://www.hypothesis-of-universe.com/docs/g/g_073.doc

$$(a |F: \text{živá kočka}\rangle |K: \text{živá}\rangle + b |F: \text{mrtvá kočka}\rangle |K: \text{mrtvá}\rangle) ,$$

tj. za zdí má pozorovatele a kočku v superponovaném stavu. Vůči pozorovateli uvnitř proběhlo štěpení a v případě, že vnímá např. živou kočku, popisuje své okolí stavem

$$a |W: \rangle |K: \text{živá}\rangle .$$

V opačném případě popisuje okolí stavem

$$b |W: \rangle |K: \text{mrtvá}\rangle .$$

V obou větvích to odpovídá kočce ve stavu korelovaném s jeho měřením a pozorovateli za zdí, který ještě neprovedl měření.

Pokud by tedy měla mít realita strukturu odpovídající našemu modelu, + modelu „horkého bramboru“ tak by zřejmě musela být pro každého pozorovatele různá. Model horkého bramboru, jinak řečeno můj „princip střídání symetrií s asymetriemi“ jde ovšem zcela dál : je pojetím posloupnosti geneze vývoje vesmíru od stavů méně složitých ke stavům velmi složitým, při „zachování“ nelinearity v makrokosmu a linearity v mikrokosmu. Což neodpovídá našemu záměru chápat realitu jako něco na nás relativně nezávislého. Druhá možnost je považovat za strukturu reality strukturu stavového vektoru celého systému dohromady. Jenže tato struktura pak neodpovídá pojetí, že naše počítky jsou výsledkem našeho vnímání reality. V této velké realitě jsou totiž zahrnuty všechny možné větve, tj. všechny možnosti toho, co můžeme pozorovat. Pro mě je ale aktuální vždy jen jedna alternativa výsledku mého pozorování. To, co já vnímám jako realitu by pak mělo být v korespondenci s touto alternativou. V každém případě vede snaha přenést strukturu kvantového popisu na realitu ke značným obtížím. Je samozřejmě možné je podstoupit a snažit se pojetí reality s takto zvláštní strukturou udržet, mě se však zdá přirozenější jiná alternativa.

Nejdřív však ještě poznámka k našemu experimentu s chudinkou kočkou. Jak jsem uvedl, dostatečná izolovanost místnosti je podstatě nemožná, což se v našem popisu projeví tím, že i vnější pozorovatel se zkoreluje se stavem kočky. Po té (nebo po úmyslném nakouknutí vnějšího pozorovatele do místnosti) stav systému bude

$$\begin{aligned} a & |W: \text{živá kočka} \rangle |F: \text{živá kočka} \rangle |K: \text{živá} \rangle + \\ b & |W: \text{mrtvá kočka} \rangle |F: \text{mrtvá kočka} \rangle |K: \text{mrtvá} \rangle \end{aligned}$$

což je sice stav rozštěpený vůči oběma pozorovatelům, ale toto štěpení je vůči oběma stejné a každá z větví je přirozeně korelovaná - oba pozorovatelé vidí totéž a kočka je v odpovídajícím stavu.

Nyní zpět k problému vztahu tohoto popisu k realitě. Asi největší překážka k přijetí everettovské interpretace v širší fyzikální veřejnosti, přestože to dlouhou dobu byla zřejmě jediná logicky konzistentní teorie nepotřebující nekvantového pozorovatele (ať už se jedná o klasický svět Kodaňské interpretace či "vědomí" Wignera a von Neumana), byl předpoklad paralelní existence několika větví s různými stavy pozorovatelova vědomí. A hlavně to, že tyto větve jsou všechny na stejné úrovni, žádná z nich není nijak privilegovaná. To by ale mělo znamenat, že moje konkrétní větev, daná mými konkrétními počítky, není nijak význačná a

existuje spousta jiných větví, v kterých mám počítky jiné. A dokonce ke každé kombinaci počítků existuje nějaká větev. Tato představa je značně nepřirozená a rozmělnuje náš pocit naší existence v nějakou existenci všech eventualit. Je to alternativa silně fatalistická - vše, co může nastat, v některé větvi nastane. Proto tato interpretace byla filosoficky neúnosná. Na druhou stranu je matematicky tak elegantní a řeší tolik technických problémů (hlavně v teorii měření a v popisu uzavřených systémů, což je třeba příklad kvantové kosmologie), že se na základě formalismu everettovské interpretace vyvinula interpretace nová, někdy nazývaná posteverettovská.

Základní myšlenka této interpretace je z našeho hlediska velmi zajímavá. Používaný popis (něco jako stavový vektor) se nepovažuje za kopii nějaké struktury reality. Jediné co se o popisu tvrdí je, že nám říká jaké otázky můžeme realitě klást a jaké odpovědi na ně budeme dostávat (samozřejmě v rámci přesnosti konkrétního požitého modelu). Popis dává jen jakýsi katalog možností, na které se můžeme ptát (tj. katalog počítků, které můžeme vnímat) a vztahy mezi těmito počítky, konkrétně podmíněné pravděpodobnosti zvolené sekvence počítků. Popis mi řekne, na co se lze zeptat a případně odpověď na tuto otázku. Povolí mi tedy např. posloupnosti počítků

1. (elektron vyslán ze zdroje; rozhodnutí nekontrolovat kudy elektron poletí; pozorování, že elektron dopadl na místo x)
2. (elektron vyslán ze zdroje; rozhodnutí kontrolovat kudy elektron poletí; elektron letí dírou 1; pozorování, že elektron dopadl na místo x)
3. (elektron vyslán ze zdroje; rozhodnutí kontrolovat kudy elektron poletí; letí dírou 2; pozorování, že elektron dopadl na místo x)
4. (elektron vyslán ze zdroje; rozhodnutí kontrolovat kudy elektron poletí; pozorování, že elektron dopadl na místo x)

a dá mi příslušné pravděpodobnosti těchto posloupností (kde pravděpodobnost posloupnosti 4 bude součet pravděpodobností 2 a 3 a bude různá od pravděpodobnosti 1). Nepovolí mi však ptát se ještě na posloupnosti

5. (elektron vyslán ze zdroje; rozhodnutí nekontrolovat kudy elektron poletí; elektron letí dírou 1; pozorování, že elektron dopadl na místo x)
6. (elektron vyslán ze zdroje; rozhodnutí nekontrolovat kudy elektron poletí; elektron letí dírou 2; pozorování, že elektron dopadl na místo x).

Otázka po pravděpodobnosti těchto posloupností nebude mít smysl, popis o ní řekne, že je nepřijatelná. Charakteristika tohoto popisu tedy je, že nepřisuzuje realitě, kterou chce

modelovat, nějakou strukturu. Říká jen, co můžeme při kontaktu s realitou vnímat a s jakou pravděpodobností daný počitek nastane.

V tomto popisu již možnost různých vjemů reality různými pozorovateli není tak patologická, jak tomu bylo v případě Schrödingerovy kočky v everettovské interpretaci. Prostě model povolí otázku na různé počitky obou pozorovatelů a dá těmto otázkám nějaké pravděpodobnostní předpovědi. To však nic neříká o různosti reality pro oba pozorovatele.

Idea tohoto popisu víc odpovídá následujícímu vztahu reality a popisu - neodhalujeme vnitřní strukturu reality nýbrž používáme popis jako nástroj umožňující nám utřídovat a predikovat naše vjemy reality. Naopak snaha přisoudit realitě strukturu indukovanou konkrétně kvantovým popisem vede k značným potížím a nutnosti nepříjemně upravovat naši představu o realitě.

© 2003-09-30; Pavel Krtouš <Pavel.Krtous@mff.cuni.cz>

JN, 14.08.2016