

O interpretacích kvantové teorie

Miloslav Dušek

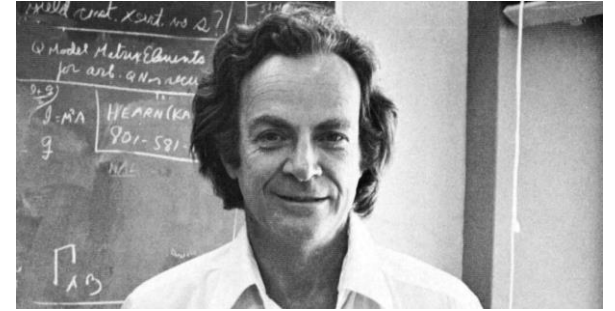
Přírodovědecká fakulta Univerzity Palackého v Olomouci

Motto:

„Jedna věc je mít rovnici, druhá věc je ji vyřešit a ještě něco jiného je výsledek interpretovat.“

John Archibald Wheeler

Kvantová teorie



„Byly časy, kdy noviny psaly, že pouze dvanáct lidí rozumí teorii relativity. Nevěřím, že tomu tak kdy bylo. Možná bylo období, kdy jí rozuměl pouze jeden člověk, protože byl tím jediným, kdo ji měl v hlavě dřív, než napsal svůj článek. Ale potom si lidé článek přečetli a mnoho z nich teorii relativity tak či onak porozumělo, rozhodně jich bylo víc než dvanáct. Naproti tomu si myslím, že mohu bezpečně prohlásit, že není nikdo, kdo by rozuměl kvantové mechanice.“

Richard P. Feynman

Kvantová teorie

Funguje, ale musíme se smířit s tím, že má mnohé podivné a neintuitivní vlastnosti:

- Částice se může nacházet ve stavu, který je superpozicí dvou stavů, jež odpovídají např. dvěma různým polohám.
To neznamená, že částice je s určitou pravděpodobností na nějakém místě a my pouze nevíme na kterém. Dokud neprovedeme měření, nemá smysl mluvit o poloze částice. Superpozice souvisejí s interferencí.
- V kvantové fyzice také existují korelace mezi vzdálenými částicemi, které jsou silnější než korelace známé z klasické fyziky.
Výraz „silnější“ má přesný matematický význam – jde o porušení tzv. Bellových nerovností. Tyto korelace vyplývají z existence kvantově provázaných stavů (tvořených kvantovou superpozicí vícečásticových stavů).

Kvantová teorie

- Některé veličiny nelze přesně měřit.
Při opakovaných měřeních na přesných replikách systému dostáváme různé výsledky.
Zdá se, že existuje náhodnost, kterou nelze odstranit, která není dána pouze neznalostí některých parametrů.
- Na rozdíl od klasické fyziky může měření podstatným způsobem změnit stav systému.
Pozorování systém ovlivní.
Pozorovatel už není „nadčlověkem“, jenž může fyzikální systém pozorovat bez jakékoli intervence.

Měření

- V klasické fyzice je stav systému určen hodnotami několika veličin.
 - Měřením zjišťujeme hodnoty těchto veličin (které jsou dané).
 - Vliv měření na měřený systém lze učinit, alespoň teoreticky, libovolně malý.
-
- V kvantové fyzice *nejsou* měřené hodnoty přímými charakteristikami systému. Jsou (do určité míry) spoluurčovány měřicím přístrojem.
 - Výsledky mohou záviset na kontextu měření a také na pořadí měření.

Měření – redukce stavu

- Výsledek měření je vyjádřen pouze jednou naměřenou hodnotou příslušné veličiny, zatímco stav před měřením může být superpozicí stavů odpovídajících několika různým hodnotám této veličiny.
- Kvantová mechanika neumí předpovědět konkrétní výsledek měření, *určuje pouze pravděpodobnosti* jednotlivých možných výsledků.
- Stav kvantového systému se po měření změní tak, aby odpovídal změřené hodnotě – dochází k tzv. *kolapsu vlnové funkce* neboli *redukci stavu*.

Měření – redukce stavu

Abychom popsali svět „jak ho známe“, potřebujeme dva odlišné typy evoluce:

- Reverzibilní, deterministický.
Když systém „nepozorujeme,“ vyvíjí se podle Schrödingerovy rovnice.
(Unitární evoluce zachovávající lineární superpozice.)
- Ireverzibilní, náhodný.
Provedeme-li měření dojde ke skokové změně stavu. Výsledkem je obecně náhodný stav (i když s naměřenou hodnotou jednoznačně souvisí).

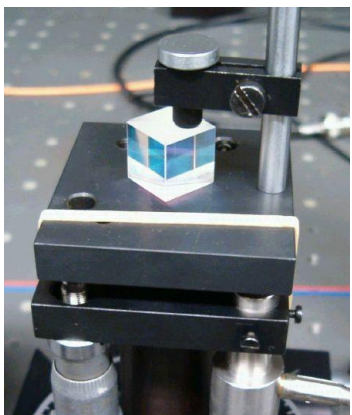
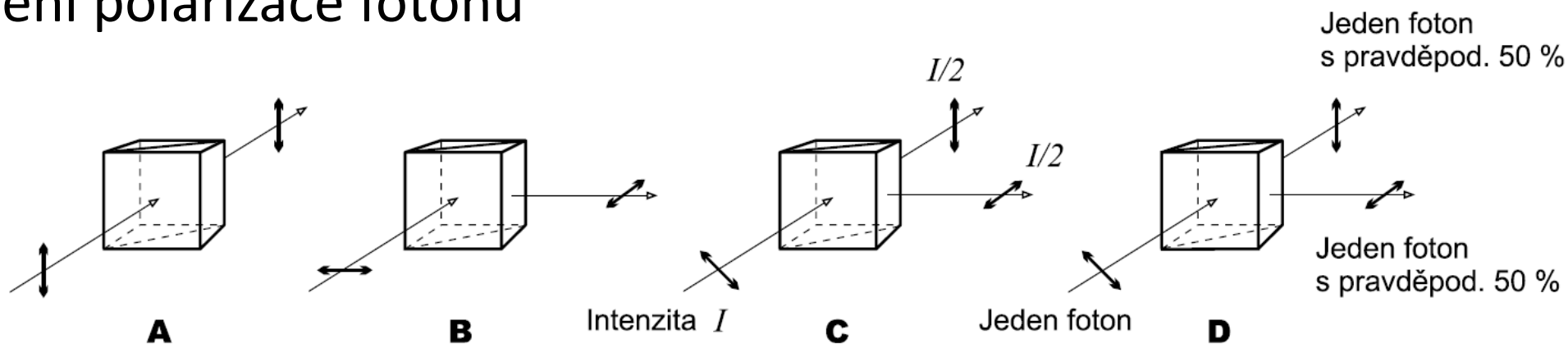
Měření – příklad

Měření energie elektronu v atomu

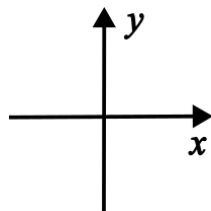
- Předpokládejme, že elektron je v superpozici dvou stavů $\alpha|E_1\rangle + \beta|E_2\rangle$ odpovídajících dvěma různým energiím E_1 a E_2 .
- Výsledkem měření energie může být pouze hodnota E_1 nebo E_2 s pravděpodobnostmi úměrnou $|\alpha|^2$ resp. $|\beta|^2$.
- Stav se po měření změní na $|E_1\rangle$ resp. $|E_2\rangle$ (druhé stejné měření totiž musí dát stejný výsledek, i v kvantové mechanice platí zákon zachování energie).

Měření – příklad

Měření polarizace fotonu



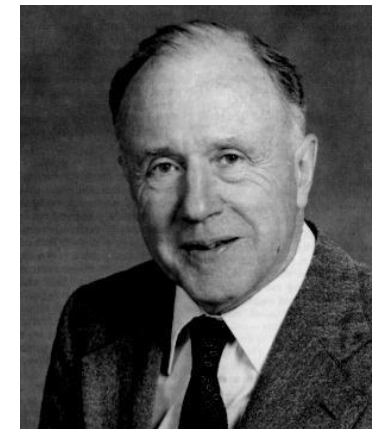
$$\alpha |x, \text{vpřed}\rangle + \beta |y, \text{vpřed}\rangle \xrightarrow{\text{polariz. dělič}} \alpha |x, \text{vpravo}\rangle + \beta |y, \text{vpřed}\rangle$$



Měření – redukce stavu

- Měření je z mikroskopického hlediska děj velmi komplikovaný.
- Redukce stavu je jen užitečnou idealizací tohoto složitého procesu.
- Při interakci kvantového objektu s měřicím přístrojem vstupuje do hry obrovské množství elementů a zahrnutí pozorovatele již ani nelze seriózně domyslet.
- Všechny částice měřicího přístroje se ale řídí kvantovými evolučními rovnicemi, které jsou lineární (zachovávají stavy superpozice), a nemohou tedy být za kolaps odpovědné.
- I když kvantový systém rozšíříme o kus měřicího aparátu, který také popíšeme kvantově, vždy budeme nakonec potřebovat klasický měřicí přístroj, který „způsobí“ kolaps vlnové funkce celého rozšířeného systému.

Měření – redukce stavu



„Žádný elementární jev není jevem, dokud není registrovaným (pozorovaným) jevem ..., dokud není doveden do konce nevratným aktem zesílení, jakým je zčernání zrna bromidu stříbra ve fotografické emulzi nebo spuštění impulsu fotodetektoru.“

John Archibald Wheeler

Skryté parametry

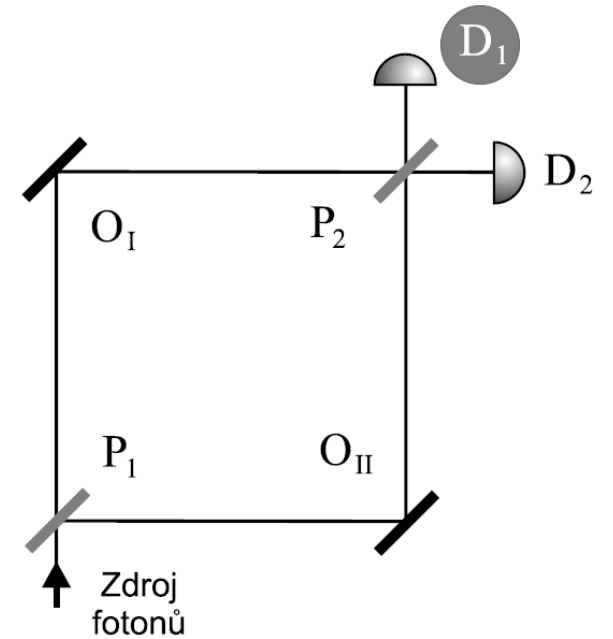
- Kvantová mechanika dává jen pravděpodobnostní předpovědi.
- Znamená to, že je *neúplná* ?
- Existují nějaké „*skryté*“ *parametry*, které umožňují předpovědět *konkrétní* výsledky měření, ale při náhodném rozdělení jejich hodnot dají stejné pravděpodobnostní předpovědi jako kvantová mechanika?
- David Bohm (vycházel z myšlenky Louise de Broglieho) – teorie pilotní vlny (nelokální)
- A. Einstein, B. Podolsky, N. Rosen – EPR paradox (lokální realismus)

Skryté parametry – lokální realismus

- *Lokalita* – to, co se děje s jedním systémem, nemůže okamžitě ovlivnit stav ani výsledky měření na druhém, vzdáleném systému.
- *Realita* – každý, i potenciální výsledek měření je určen elementem reality, tedy něčím skutečným, co existuje již před měřením.
- Lokální realismus $\Rightarrow$ Bellovy nerovnosti (John Bell)
Kvantová teorie Bellovy nerovnosti obecně *porušuje*.
Porušení je experimentálně potvrzeno!
- **Není možné vytvořit *lokální* teorii se skrytými parametry, která by dávala stejné předpovědi jako kvantová teorie.**

Dekoherence

- Víme, že když do interferometru umístíme detektor, jenž nám řekne, kterým ramenem foton šel, interference zmizí a fotony budou náhodně dopadat na oba detektory D_1 a D_2 .
- Interferenčnímu chování lze ale zamezit i bez skutečného kolapsu kvantového stavu, pouhou interakcí sledovaného objektu s nějakým jiným kvantovým objektem.
- Podívejme se, co se stane, když k registraci dráhy nepoužijeme makroskopický detektor, nýbrž nějaký kvantový objekt umístěný v jednom z ramen interferometru a reagující na přítomnost fotonu změnou svého kvantového stavu, $|0\rangle \rightarrow |1\rangle$.



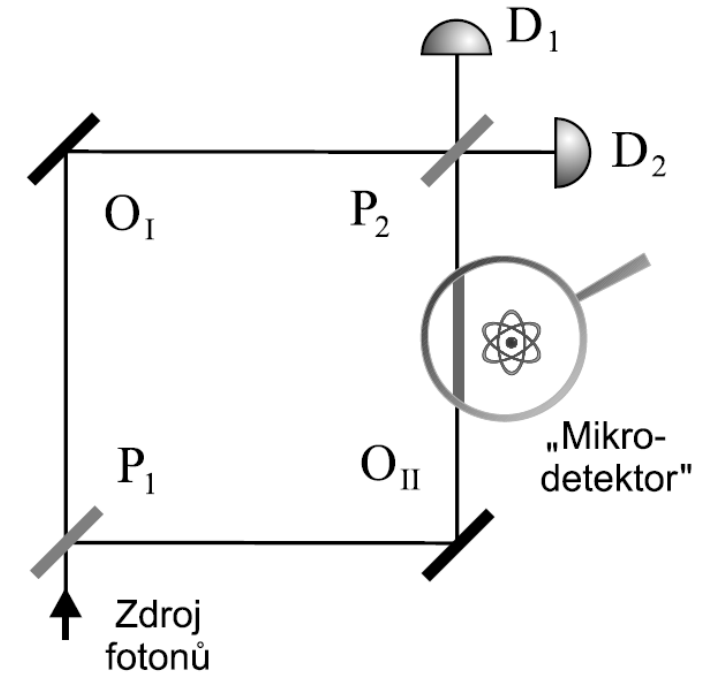
Dekoherence

$$\begin{aligned}
 & \xrightarrow{\text{atom}} \frac{1}{\sqrt{2}} (i|h\rangle|0\rangle - |d\rangle|0\rangle) \\
 & \xrightarrow{P_2} \frac{1}{\sqrt{2}} (i|h\rangle|0\rangle - |d\rangle|1\rangle) \\
 & \xrightarrow{P_2} \frac{1}{2} (-|D_1\rangle|0\rangle - |D_1\rangle|1\rangle + i|D_2\rangle|0\rangle - i|D_2\rangle|1\rangle) \equiv |\psi\rangle
 \end{aligned}$$

$$\text{Tr}_{\text{atom}} \left[\frac{1}{2} (i|h\rangle|0\rangle - |d\rangle|1\rangle) (i\langle h|\langle 0| - \langle d|\langle 1|) \right] = \frac{1}{2} (|h\rangle\langle h| + |d\rangle\langle d|)$$

$$\text{Tr}_{\text{atom}} |\psi\rangle\langle\psi| = \frac{1}{2} (|D_1\rangle\langle D_1| + |D_2\rangle\langle D_2|)$$

To nejsou čisté stavy ale statistické směsi (smíšené stavy).
Nediagonální členy matice hustoty, zodpovědné za interference, vymizí.



Dekoherence

- Žádný reálný kvantový systém nelze dokonale odizolovat od okolního prostředí.
- Stavy prostředí se provazují se stavy systému, podobně jako se stavy mikrodetektoru sdružují se stavy fotonu v celkové superpozici.
- Prostor monitoruje kvantový systém, zaznamenává v sobě informaci o něm a může tak zamezit jeho interferenčnímu chování.
- Popsaný jev je označován jako *dekoherence*.
- Protože prostředí je obvykle značně velká a složitá kvantová soustava, je technicky téměř nemožné dostat z něj informaci o systému zpět.

Dekoherence

- Místo kvantové superpozice (čistý stav) je náš systém po interakci s prostředím popsán statistickou směsí (smíšený stav). Entropie stavu systému se zvyšuje.
- Systém se pak chová jako klasický statistický soubor.
Dekoherence tedy naznačuje příčinu, proč v makrosvětě běžně nevidíme kvantové superpozice a interferenci.
- (Dekoherence inspirovala formulaci kvantové teorie pomocí *konzistentních kvantových historií*.)

Dekoherence a měření

- Při měření se ukazatel přístroje prováže se stavem měřeného systému.
Ale která báze je preferovaná?

$$\frac{1}{\sqrt{2}} (|\uparrow\rangle |\oplus\rangle + |\downarrow\rangle |\ominus\rangle) = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\leftarrow\rangle |L\rangle + |\rightarrow\rangle |R\rangle),$$

$$|\leftarrow\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle), |\rightarrow\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\uparrow\rangle - |\downarrow\rangle), |L\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\oplus\rangle + |\ominus\rangle), |R\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\oplus\rangle - |\ominus\rangle)$$

- Ukazatel měřicího přístroj neinteraguje jen s měřeným systémem,
ale také s *prostředím*.

Pozorovatel bere v potaz pouze ukazatel přístroje, nikoli stav prostředí.

Dekoherence a měření

- Interakce mezi přístrojem a prostředím vybírá bázi, v níž nedochází ke vzniku superpozic pro *systém a ukazatel přístroje*.

Po vystředování přes prostředí dostáváme statistickou směs.

Matice hustoty popisující systém a ukazatel přístroje je v této bázi diagonální:

$$|\alpha|^2 |\uparrow\rangle |\oplus\rangle \langle \oplus| \langle \uparrow| + |\beta|^2 |\downarrow\rangle |\ominus\rangle \langle \ominus| \langle \downarrow|$$

- Tuto bázi tvoří vlastní vektory nějaké pozorovatelné, která *komutuje s interakčním hamiltoniánem* ukazatel-prostředí.
- V uvedené bázi není stav ukazatele ovlivněn interakcí s prostředím. Systém a ukazatel přístroje si zachovávají dokonalou korelaci pouze v této bázi.

Interpretace fyzikální teorie – měření

- Interpretace fyzikální teorie = přiřazení fyzikálního významu jejím formálním strukturám.
- V případě kvantové teorie je slovo *interpretace* třeba chápat širším smyslu.
- V kvantové fyzice jde především o interpretaci procesu *měření*.

Interpretace fyzikální teorie – měření

- Výsledkem experimentu mohou být pouze určitá fakta (např. signál z detektoru), o kterých musíme být schopni mluvit běžným jazykem. A samotný experiment musíme být také schopni popsat běžným jazykem.
- Kvantová teorie však pracuje s abstraktními objekty, které mohou obsahovat v superpozici více možností odpovídajících různým takovým faktům.
- Interpretace se tedy musí vypořádat s existencí *neurčité* hranice oddělující studovaný kvantový systém a nás pozorovatele, včetně našich měřicích přístrojů.

Interpretace fyzikální teorie – stavový vektor

- Důležitá je také otázka, co vlastně představuje stavový vektor (nebo vlnová funkce).
- Protože můžeme pozorovat kvantovou interferenci, musí být na vlnové funkci něco „reálného“ (co by jinak interferovalo?).
- Vlnová funkce ale není přímo měřitelná a podléhá skokovým změnám, jež jsou důsledkem postulátu o kolapsu vlnové funkce při měření.
- Je také zřejmé, že pozorovatel nemůže napsat vlnovou funkci sebe sama.

Interpretace fyzikální teorie – stavový vektor

- Je tedy *stav* pouze souhrnem *znalostí* užitečných pro naši schopnost předpovídat pravděpodobnosti výsledků měření?
(Určeným tím, jak byl systém připraven.)
- N. Bohr:
„*Není žádný kvantový svět, je pouze abstraktní kvantový fyzikální popis.*“

„*Je nesprávné se domnívat, že úkolem fyziky je zjistit, jaká příroda je. Fyzika se zabývá tím, co dokážeme o přírodě říci.*“

Kodaňská interpretace kvantové mechaniky

- Na přelomu 20. a 30. let 20. století byl postupně vytvořen ucelený a promyšlený systém názorů, dnes označovaný jako kodaňská interpretace kvantové teorie.
- Jejím duchovním otcem byl Niels Bohr, k její konečné podobě však přispělo i mnoho jiných fyziků té doby: Werner Heisenberg, Wolfgang Pauli, Max Born a další.



Kodaňská interpretace kvantové mechaniky

- Kodaňská interpretace rozlišuje mezi kvantovým systémem a klasickým (makroskopickým) měřicím přístrojem, i když hranice mezi nimi může být pohyblivá.
- Kolaps vlnové funkce je nutným formálním prvkem sjednocujícím tyto dva vzájemně neslučitelné způsoby popisu.
- *Celistvost kvantového jevu*: Kvantový systém a měřicí přístroj tvoří z hlediska teorie nedělitelný celek. Určité „vlastnosti“ lze systému připisovat jen v kontextu určitého experimentálního uspořádání.
- Nemůžeme mluvit o vlastnostech kvantového systému „an sich“.

Kodaňská interpretace kvantové mechaniky

- Kvantový stav není, na rozdíl od stavu v klasické fyzice, výčtem hodnot určitých měřitelných veličin.
- *Stavový vektor určuje potenciální možnosti, měření vybírá jednu z nich.*
- *Princip komplementarity:* Kvantovému systému nelze připsat všechny klasické vlastnosti najednou – některé se vzájemně „doplňují“, ale zároveň *vylučují*, nelze je společně (přesně) změřit v jednom experimentálním uspořádání.
- Matematickým důsledkem toho je Heisenbergův princip neurčitosti.
- Součástí kodaňské interpretace je také pravděpodobnostní interpretace vlnové funkce (Bornovo pravidlo).

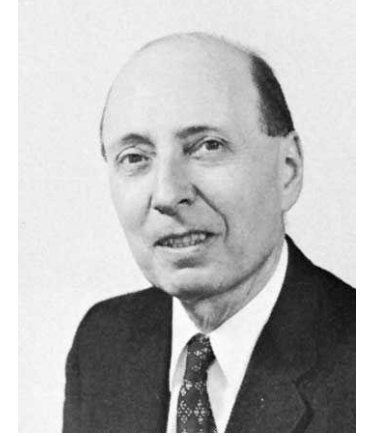
Kodaňská interpretace kvantové mechaniky

- Mimochodem, Bohr věřil, že *komplementarita* je důležitá pro celé lidské poznání. Známé jsou jeho aforismy:
 - „Opakem hluboké pravdy je opět hluboká pravda.“
 - „Pravda a srozumitelnost jsou komplementární.“
- Bohr byl možná ovlivněn Sørenem Kierkegaardem (dánský filosof, 1813-1855).

Kodaňská interpretace kvantové mechaniky

- Kodaňská interpretace nám říká, jak kvantovou teorii používat, aby nedocházelo k rozporům na praktické úrovni. Zaručuje, že kvantová teorie vede k tvrzením obvyčejného jazyka a logiky, jakkoli esoterický je předpis generující tato tvrzení.
- Realita v kodaňské interpretaci sestává z výsledků měření.
- *Teorie funguje, neptejte se proč a používejte ji.*
(„Shut up and calculate.“)

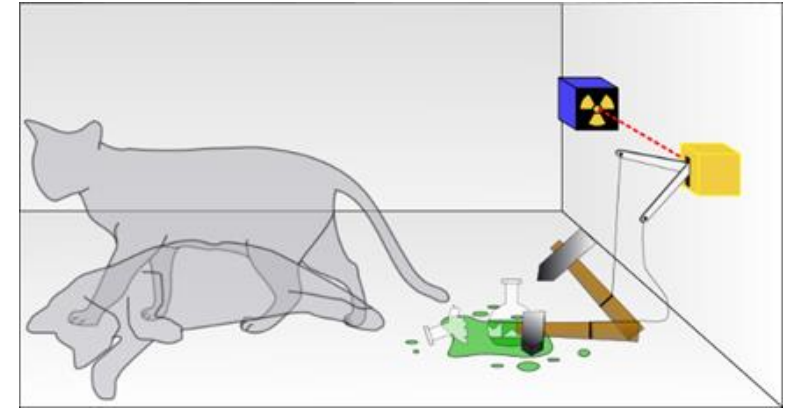
Co způsobuje kolaps?



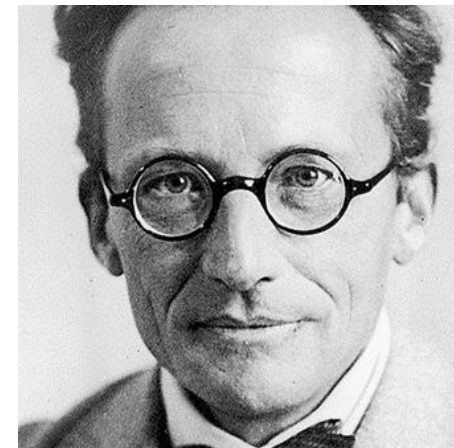
- Kodaňská interpretace nedává odpovědi na mnohé otázky, z nichž některé sama nastoluje:
- Kde končí použitelnost kvantové teorie?
- Co způsobuje kolaps vlnové funkce a co přesně redukce stavového vektoru znamená?
- Podle Johna von Neumana a Eugena Wignera by mezní oblastí, na níž již nelze použít obyčejnou lineární kvantovou mechaniku, mohl být lidský mozek nebo dokonce vědomí pozorovatele.
- Ke kolapsu vlnové funkce by tedy docházelo až při zpracování informace pozorovatelem.

Schrödingerova kočka

- Nejasnosti kolem kolapsu vlnové funkce ilustruje jeden notoricky známý myšlenkový experiment.
- Kočka je zavřena v krabici s ampulkou jedu. V krabici je také radioaktivní atom a mechanismus zkonstruovaný tak, že rozpad jádra atomu způsobí rozbití ampulky s jedem a posléze tedy také usmrcení kočky.
- Atomové jádro, kterému je kvantový popis vlastní, se bude obecně nacházet v superpozici stavů *celé jádro* a *rozpadlé jádro*.
- Vzhledem k uspořádání experimentu je ale stav jádra provázán se stavem kočky. Společně s jádrem (a dalšími vlastnostmi v krabici) by se tedy i kočka měla nacházet v superpozici stavů *živá* a *mrtvá*.



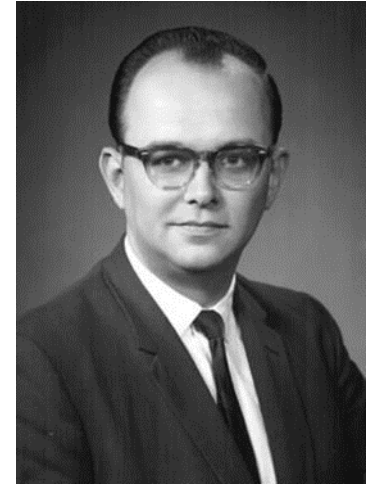
Schrödingerova kočka



$$|\Psi_{\text{Sch}}\rangle = \alpha |\text{celé}\rangle_j |\text{živá}\rangle_k + \beta |\text{rozpadlé}\rangle_j |\text{mrtvá}\rangle_k$$

- Otevřeme-li krabici a podíváme-li se dovnitř, provedeme tak vlastně měření. To převede kočku z jejího neurčitého stavu do jednoho z „klasických“ stavů *živá* či *mrtvá*.
- Zabilo kočku až měření, nebo kočka zemřela dávno před tím, než informace o tom dosáhla našeho vědomí?
- Lze na kočku použít kvantovou mechaniku?
- Pokud by redukci stavu způsobovalo vědomí pozorovatele, nemohli bychom kočku samotnou považovat za tvora obdařeného vědomím?

Everettova interpretace (žádný kolaps)



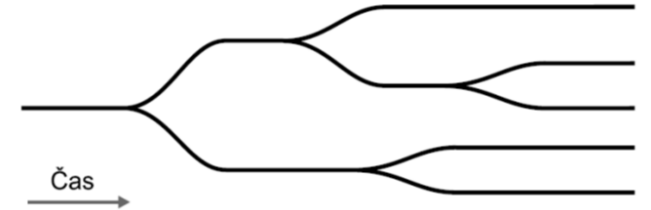
- Podle některých názorů je hranice mezi kvantovým a klasickým světem do značné míry umělá a k žádnému *kolapsu* ve skutečnosti nedochází.
- Interpretace, kterou navrhl v r. 1957 Hugh Everett, se obejde bez předpokladu o kolapsu vlnové funkce.
- Motivací pro její vznik byly částečně i úvahy o kvantovém stavu celého vesmíru. Snaha použít kvantovou teorii na celý vesmír nutně naráží na otázku hranice mezi kvantovým a klasickým a na otázku po úloze pozorovatele. V jistém smyslu není nic makroscopičtějšího než celý vesmír a neexistuje žádný pozorovatel vně.

Everettova interpretace (žádný kolaps)

- Everett považuje za hlavní vlastnost zakládající roli pozorovatele v kvantové teorii *paměť*. Stav paměťového média se záznamy výsledků minulých měření je třeba zahrnout do celkového stavu soustavy.
- Celá soustava, sestávající z kvantového systému a pozorovatele s pamětí, se vyvíjí podle Schrödingerovy rovnice, bez kolapsů vlnové funkce.
- Mějme např. atom připravený ve vzbuzeném stavu (e), přecházející do základního stavu (g) za současného vyzáření fotonu. Sledováním, zda byl či nebyl vyzářen foton, lze monitorovat stav atomu.
Zapisujeme-li výsledky těchto měření do nějakého paměťového elementu, musíme v celkovém stavu soustavy kromě atomu a záření navíc počítat i s tímto paměťovým elementem. Stavy paměti odpovídající jednotlivým možným záznamům (např. „*eeeegg*“, „*eggggg*“ atd.) jsou přítomny v celkové superpozici soustavy složené ze všech v procesu zúčastněných prvků.

Everettova interpretace (žádný kolaps)

- Dva různé (ortogonální) kvantové stavy paměti (mysli) pozorovatele určují jakoby dvě jeho různá „já“, která o sobě vzájemně nevědí. Při každém měření (interakci) dochází k větvení „já“ pozorovatele.
- To, čeho je ve standardní kvantové teorii dosaženo postulátem o kolapsu vlnové funkce je u Everetta důsledkem ztotožnění pozorovatele s paměťovým záznamem a jeho „zahnáním dovnitř superpozic.“



Everettova interpretace (žádný kolaps)

- Příklad: měření průmětu spinu částice se spinem 1/2.

$$\left(\alpha \left| \uparrow \right\rangle + \beta \left| \downarrow \right\rangle \right) \left| m_0 \right\rangle \left| J\acute{a}_0 \right\rangle \xrightarrow{\text{měření}} \alpha \left| \uparrow \right\rangle \left| m_{\uparrow} \right\rangle \left| J\acute{a}_{\uparrow} \right\rangle + \beta \left| \downarrow \right\rangle \left| m_{\downarrow} \right\rangle \left| J\acute{a}_{\downarrow} \right\rangle$$

- Pokud by měřicí přístroj sledovalo více pozorovatelů, např. *Já* a *Ty*, pak by výsledná superpozice měla tvar:

$$\alpha \left| \uparrow \right\rangle \left| m_{\uparrow} \right\rangle \left| J\acute{a}_{\uparrow} \right\rangle \left| T y_{\uparrow} \right\rangle + \beta \left| \downarrow \right\rangle \left| m_{\downarrow} \right\rangle \left| J\acute{a}_{\downarrow} \right\rangle \left| T y_{\downarrow} \right\rangle$$

Everettova interpretace (žádný kolaps)

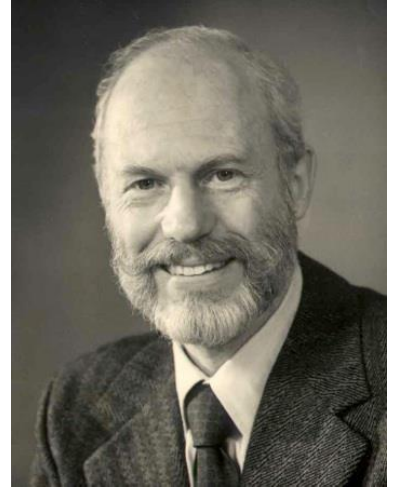
- V Everettově interpretaci by se mohl smysluplně uplatnit vliv *dekoherence*.
- Může vyřešit nejednoznačnost preferované báze (započtením interakce s prostředím)
- Součástí celého kvantového systému musí být i pozorovatelovy paměťové záznamy.
- Smysl ovšem mají jen takové stavy paměti, které jsou dostatečně odolné vůči dekoherenci způsobované interakcí s prostředím. Tj. takové, které zůstávají korelované s měřeným systémem.

Everettova interpretace (žádný kolaps)

- Everettova interpretace reflektuje skutečnost, že pozorovatele nemůžeme postavit zcela mimo systém.
- Její výhodou je, že nepotřebuje postulát o redukci stavu při kvantovém měření a že nezavádí hranici mezi kvantovým a klasickým světem. Ale...
- Proč by kvadráty modulů koeficientů v superpozici $[|\alpha|^2, |\beta|^2]$ měly představovat pravděpodobnosti?
- **A čeho by to měly být pravděpodobnosti?**

Mnohasvětová interpretace

- Bryce S. DeWitt se pokusil Everettův pohled „objektivizovat“ tak, že interpretoval různé větve vyplývající ze superpozic relativních stavů pozorovatele jako *alternativní světy*.
- V jednom takovém světě je Schrödingerova kočka po nahlédnutí do krabice živá, v jiném mrtvá.

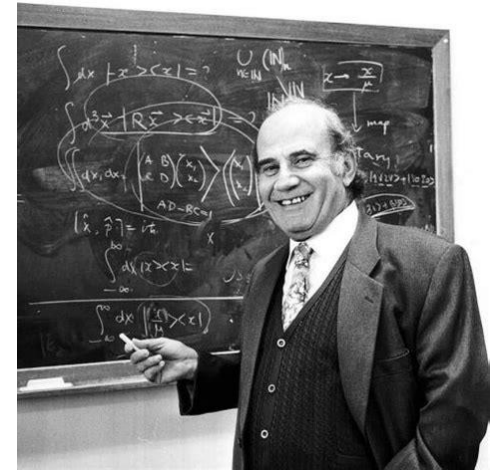


Spontánní kolaps (kolaps je reálný)

- Jiní fyzikové jsou ale toho názoru, že kolaps vlnové funkce odráží skutečné chování fyzikálních systémů. Tedy že kolaps je objektivním jevem, k němuž v přírodě skutečně dochází (bez ohledu na pozorování).
- Jeho plné pochopení ale asi bude možné až v rámci pokročilejší teorie, než je současná kvantová mechanika.
- Objevily se různé návrhy, jak modifikovat kvantovou teorii, aby obsahovala spontánní proces kolapsu vlnové funkce.
- Jsou založené vesměs na dodatečných stochastických nelineárních procesech doplňujících lineární kvantovou evoluci.

Spontánní kolaps (kolaps je reálný)

- Za zmínku stojí model pocházející od GianCarla Ghirardiho, Alberta Riminiho a Tullia Webera.
- Kolaps vlnové funkce je zde reprezentován náhodným procesem, závislejícím určitým způsobem na velikosti kvantového systému.
- Základním předpokladem je, že existuje jistá malá pravděpodobnost, že vlnová funkce bude náhle vynásobena úzkou Gaussovou funkcí.
- Vlnová funkce se tak rázem stane velmi lokalizovanou, v následujících okamžicích se však opět „rozplývá“ podle standardní Schrödingerovy rovnice.
- Hustota pravděpodobnosti, že maximum Gaussovy funkce „padne“ do určitého bodu v prostoru, je přibližně určena kvadrátem modulu vlnové funkce před spontánní lokalizací (to zaručuje kompatibilitu s pravděpodobností interpretací vlnové funkce).



Spontánní kolaps (kolaps je reálný)

- Odhadovaná šířka Gaussovy funkce je **10^{-7} m**.
- Pro jednu částici nastane kolaps v průměru za **10^8 roků**.
- Pravděpodobnost, že dojde za 1 s ke kolapsu vlnové funkce částice, je pak zhruba **10^{-15}** .
- Jednotlivé mikročástice se tedy, ponechány samy sobě, chovají poměrně velmi přesně podle standardní Schrödingerovy rovnice (v souladu s experimentální zkušeností).

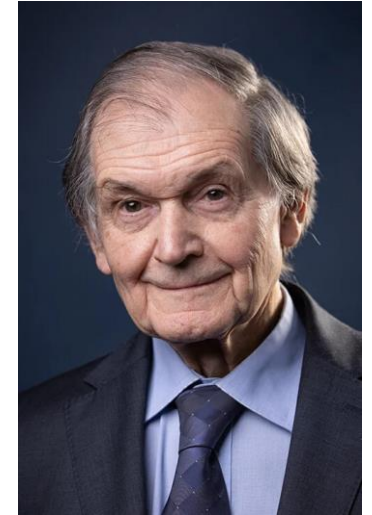
Spontánní kolaps (kolaps je reálný)

- Máme-li ale nějaký makroskopický objekt, který obsahuje velké množství částic, pak pravděpodobnost, že dojde za jednotku času ke kolapsu vlnové funkce aspoň jedné z těchto částic, je nepoměrně větší než pravděpodobnost kolapsu vlnové funkce jedné určité částice.
- Protože stavy částic v makroskopickém objektu jsou vysoce provázané, ovlivní redukce stavu každé jednotlivé částice výrazně také celkový stav objektu.
- Střední doba, za niž dojde ke kolapsu vlnové funkce celého objektu, se dramaticky zkrátí.
- Např. pro objekt o hmotnosti 1 kg, který obsahuje kolem 10^{25} částic, by ke kolapsu docházelo v průměru přibližně každých **10^{-10} s**.

Spontánní kolaps (kolaps je reálný)

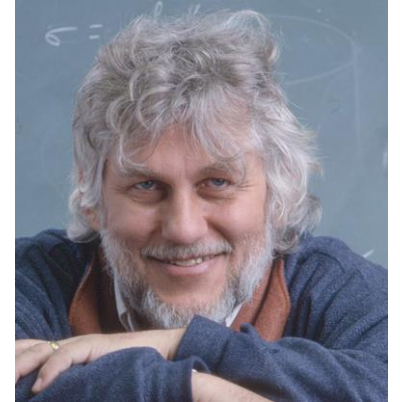
- Popsaná idea je jistě zajímavá, je to však hypotéza *ad hoc*.
- Nenabízí žádný fyzikální mechanismus vysvětlující kolaps, neříká, *proč* ke kolapsu dochází.
- Nevíme, co určuje šířku Gaussovy funkce a střední počet kolapsů vlnové funkce jedné částice za jednotku času (tyto parametry musejí být nafitovány tak, aby odpovídaly pozorování).
- Spontánní lokalizace vede k malému porušení zákona zachování energie.

Spontánní kolaps (kolaps je reálný)



- Jaký fyzikální mechanismus by mohl být za proces redukce stavu odpovědný? Jak by měla vypadat pokročilejší teorie?
- Někteří fyzikové si myslí, že touto teorií by mohla být kvantová teorie gravitace.
- Roger Penrose např. navrhl, že příčinou spontánního kolapsu by mohl být rozdíl mezi geometriemi časoprostorů jednotlivých členů superpozice.
- Zvětšuje-li se difference mezi rozložením hmoty ve stavech v superpozici, zvětšuje se i rozdíl mezi časoprostorovými geometriemi odpovídajícími jednotlivým alternativám. Je možné, že když je tento rozdíl v určitém smyslu dost velký, stává se superpozice nestabilní a posléze se rozpadá do jedné z alternativ.

Unruhův jev (William G. Unruh)



- Představme si pozorovatele pohybujícího se volným prostorem *rovnoměrně zrychleným pohybem*.

Z pohledu zrychlujícího se pozorovatele bude *vakuum* inerciálního pozorovatele vypadat jako *stav obsahující částice* v tepelné rovnováze. (Souvislost s Hawkingovým zářením.)

- Vakuum (inerciální soustava) $\rightarrow$ Tepelné záření (zrychlující soustava)

[čistý stav]

[smíšený stav]

$$T = \frac{\hbar a}{2\pi c k_B}$$

- V Rindlerově časoprostoru vzniká zdánlivý horizont. Existují tedy dvě oblasti, které spolu nemohou komunikovat.
- Celkový stav zůstává *čistý*, ale po zprůměrování přes nedostupnou oblast (výpočet dílčí matice hustoty pomocí částečné stopy) dostaneme v naší oblasti stav *smíšený*.

Relační interpretace

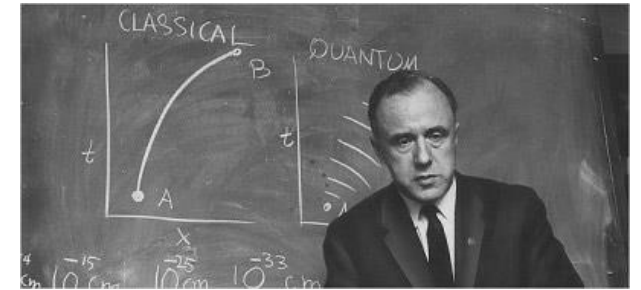


- „Kvantová teorie popisuje, jak se jedna část přírody jeví kterékoli jiné části přírody.“ Carlo Rovelli
- Důležité jsou vzájemné interakce. Objekty jsou určeny tím, jak interagují. Existují skrze interakce.
- Vlastnosti existují jen ve vztahu k něčemu jinému.
- Když se Schrödingerovou kočkou neinteraguji, tak pro mě není ani živá ani mrtvá.
- Interpretační potíže v kvantové mechanice způsobuje představa, že pojem stavu systému a hodnoty fyzikálních veličin jsou nezávislé na pozorovateli.

Relační interpretace

- Analogie se speciální teorií relativity.
(Různí pozorovatelé situaci popisují různě, teorie je přesto konzistentní.
Einstein znovu odvodil Lorentzovu transformaci z jednoduchých postulátů a dal jí tím rozumnou interpretaci).
- Relační interpretace je spíše program než hotový koncept.
- Rovelli upozorňuje na text buddhistického mnicha ze 2. století našeho letopočtu, Nágárdžuna, podle kterého nic nemůže existovat samo o sobě, nezávisle na něčem jiném. Každá perspektiva existuje jen ve vzájemném vztahu s něčím jiným.

Wheelerova hra



- Představte si, že jste na večírku na chvíli posláni za dveře, a když se vrátíte, máte uhodnout určité slovo. Můžete klást libovolné otázky, na které lze odpovídat pouze „ano“ nebo „ne“ .
- Začnete pokládat otázky. Čekání na odpovědi se postupně protahuje.
- Nakonec se zeptáte: je to „mrak“? Odpověď zní „ano“ a všichni se smějí.
- Vysvětlují, že se dopředu nedohodli na žádném konkrétním slovu.
- Každý mohl na jakoukoliv vaši otázku odpovědět „ano“ i „ne“, jak se mu chtělo. Vždy ale musel mít na mysli nějaké slovo slučitelné nejen se svou odpovědí, ale i se všemi odpověďmi na vaše předchozí otázky.
- Srovnajme teď hru v jejích dvou podobách s fyzikou ve svých dvou formulacích: *klasické a kvantové*.

Wheelerova hra

1. Mysleli jste, že slovo už existuje „někde mimo všech“. Podobně si dříve fyzikové mysleli, že poloha a hybnost existují „někde mimo“, nezávisle na pozorování.
2. Informace o slově přicházela na svět krok za krokem skrze otázky, které jste kladli.
I informace o elektronu přichází na svět, krok za krokem, skrze experimenty, které se pozorovatel rozhodne provést.
3. Kdybyste se byli rozhodli pro jiné otázky, došli byste k jinému slovu.
Experimentátor by si také vytvořil jinou představu, co se s elektronem odehrávalo, kdyby měřil jiné veličiny nebo i stejné veličiny v jiném pořadí.

Wheelerova hra

4. Moc, kterou jste prokázali při uvedení slova „mrak“ na svět, byla jen částečná. Hlavní část výběru spočívala v ano-ne odpovědích vašich kolegů v místnosti.
Podobně, experimentátor má prostřednictvím výběru experimentů zásadní vliv na to, co se s elektronem stane, ale ví, že je mnoho nejistoty v tom, co každé z jeho měření odhalí.
5. Ve hře existovalo pravidlo, podle něhož každý účastník musel volit své ano nebo ne ve shodě s nějakým slovem.
Pozorování ve fyzice jsou také vždy konzistentní. Jeden člověk musí být schopen sdělit druhému srozumitelnou řečí svá zjištění a ten druhý je musí být schopen verifikovat.

Literatura

- M. Dušek: *Koncepční otázky kvantové teorie*, UP Olomouc, 2002.
- C. Rovelli: *Helgoland. O vzniku a smyslu kvantové teorie*. Argo a Dokořán, Praha 2023.
- J. A. Wheeler, W. H. Zurek (eds.): *Quantum Theory and Measurement*, Princeton Univ. Press, Princeton, 1983.
- G. Auletta: *Foundations and Interpretation of Quantum Mechanics*, World Scientific, Singapore, 2000.
- D. Home: *Conceptual Foundations of Quantum Physics*, Plenum, New York, 1997.
- J. Bub: *Interpreting the Quantum World*, Cambridge Univ. Press, Cambridge, 1997.
- J Bell: *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics*, Cambridge Univ. Press, Cambridge, 1987.
- P. A. Schlipp (ed.): *Albert Einstein, Philosopher–Scientist*, Evanston, 1949.
- R. Penrose: *Shadows of the Mind*, Oxford Univ. Press, Oxford.
- L. C. B. Crispino, A. Higuchi, G. E. A. Matsas, *The Unruh effect and its applications*, Rev. Mod. Phys. **80**, 787 (2008).
- N. Bohr, *The Quantum Postulate and the Recent Development of Atomic Theory*, Nature **121**, 580 (1928).
- E. Schrödinger, *Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik*, Naturwissenschaften **23**, 807, 823, 844 (1935).
- H. Everett, “*Relative State*” *Formulation of Quantum Mechanics*, Reviews of Modern Physics **29**, 454 (1957).
- G. C. Ghirardi, A. Rimini, T. Weber, *Unified dynamics for microscopic and macroscopic systems*, Phys. Rev. D **34**, 470 (1986).

Děkuji za pozornost

„Setkat se s kvantovým světem je cítit se jako cestovatel z daleké země, který poprvé v životě vidí automobil. Ta věc má zjevně dávat nějaký užitek, a to podstatný, jenže jaký? Člověk může otevřít dveře, stáhnout a vytáhnout okénko, zapnout a vypnout světla a snad i protočit startér, to všechno bez znalosti hlavního smyslu. Svět kvant je ten automobil.“

John Archibald Wheeler

„Skutečnost, že dosud žádná interpretace nepřesvědčila většinu fyziků, podle mého názoru naznačuje, že problém interpretace kvantové mechaniky ještě nebyl zcela vyřešen.“

Carlo Rovelli