

NTMF036

INTERPRETACE KVANTOVÉ MECHANIKY

Shrnutí 10. přednášky

Pavel Krtouš

Řetězec systém – pozorovatel

⊙ ,svět‘ skládající se z částí:

- zkoumaný systém s systém, který nás zajímá
- měřící přístroj a systém, na kterém odečítáme měření
- makroskopické okolí σ nekontrolovaná část systému, kam uniká informace způsobuje dekoherenci
- pozorovatel p vědomí pozorovatele

⊙ stav systému nekolabuje – žádný proces II

⊙ proces ,uvědomění si výsledku‘ je zahrnut do kvantového popisu

Pozorovatel

- ◎ samotné vědomí pozorovatele zahrnuto do popisu
 - jistě lze zahrnout popis paměti
 - můžeme se pokusit zahrnout i *„uvědomění si“*
 - pouze fenomenologický popis, neaspirujeme na realistický popis vědomí
- ◎ kvantové stavy *„jasného stavu vědomí“*
 - stavy popisující, že si pozorovatel uvědomuje jistou sekvenci údajů
 - číslované výčtem těchto dat
$$|p \leftarrow s_1 \uparrow s_2 \Rightarrow s_3 \downarrow \rangle$$
 - tvoří ortonormální bázi – odpovídá pozorovatelné *„vědomí“*, *„uvědomění si“*

Řetězec systém – pozorovatel

⊙ ‚svět‘ skládající se z částí:

- zkoumaný systém s
- měřící přístroj a
- pozorovatel p

⊙ korelace systém – přístroj – pozorovatel

$$\left(\sum_n \alpha_n |s:n\rangle \right) |a:-\rangle |p\neq a:n\rangle \rightarrow |\text{svět}\rangle = \sum_n \alpha_n |s:n\rangle |a:n\rangle |p\neq a:n\rangle$$

⊙ žádný kolaps stavu – celý systém zůstává v superpozici |svět⟩

Interpretace korelovaného stavu

- ⊙ po měření (korelace procesem I) se svět nachází ve stavu:

$$|\text{svět}\rangle = \sum_n \alpha_n |s:n\rangle |a:n\rangle |p \neq a:n\rangle$$

- ⊙ co znamená superpozice „jasných stavů vědomí“ pozorovatele?
- ⊙ **interpretujeme jako superpozici nezávislých větví,
v každé z nich si pozorovatel uvědomuje něco jiného**

Relativní stavy

- ⊙ ortonormální báze $|p:n\rangle$ v naší části systému
- ⊙ jednoznačnost rozkladu stavu celého systému vůči této bázi

$$|st\rangle = \sum_n |\ell:st/n\rangle |p:n\rangle$$

- ⊙ relativní stav ke stavu $|p:n\rangle$

$$|\ell:st/n\rangle$$

- obecně nenormovaný stav
- pro různé n není nutně různé či ortogonální
- dán tzv. částečným skalárním součinem $|\ell:st/n\rangle = \langle p:n|st\rangle$
- pro obecný korelovaný stav $|\ell:st/n\rangle = \sum_m \alpha_{m,n} |\ell:m\rangle$

Větvení vzhledem k pozorovateli

- ◉ stav se rozštěpuje na větve definované vzhledem k pozorovateli

$$|\text{svět}\rangle = \sum_{\psi} |\text{svět}/\psi\rangle |p \neq \psi\rangle$$

- ◉ v každé větvi si odpovídá stav vědomí a zbytek systému
- ◉ relativní stav odpovídá redukovanému stavu,
pokud by došlo ke kolapsu do této větve
 $|\text{svět}/\psi\rangle = \hat{P}_{\psi} |\text{svět}\rangle$
- ◉ ke kolapsu nedochází – všechny větve v superpozici
- ◉ vnímání pouze relativního stavu v každé větvi nahrazuje kolaps

Realita větví

- ⊙ stav světa rozštěpený vzhledem k pozorovateli:

$$|\text{svět}\rangle = \sum_{\psi} |\text{svět}/\psi\rangle |p \neq \psi\rangle$$

- ⊙ realistická verze (Everett):

- stav přírody je realizován univerzálním kvantovým stavem $|\text{svět}\rangle$
- realismus teorie z *„boží perspektivy“*
- všechny větve jsou reálné a existující najednou

- ⊙ instrumentalistická verze (pro ty, co jim je realita šuma fuk):

- stav $|\text{svět}\rangle$ je katalog všech alternativ možných výsledků
- není potřeba požadovat realitu stavu
- jednotlivé větve jsou stránky v katalogu popisující jednotlivé výsledky

Poččet větvi

- ⊙ stav světa rozštěpený vzhledem k pozorovateli:

$$|\text{svět}\rangle = \sum_{\psi} |\text{svět}/\psi\rangle |p \neq \psi\rangle$$

- ⊙ k rozvětvení dochází při každé interakci vědomí se zbytkem světa
- ⊙ štěpení vůči každému pozorovateli
- ⊙ typicky nespočetné množství větví narůstající každým okamžikem

Velikost větve

- ⊙ stav světa rozštěpený vzhledem k pozorovateli:

$$|\text{svět}\rangle = \sum_{\psi} |\text{svět}/\psi\rangle |p \neq \psi\rangle$$

- ⊙ větvi přiřadíme velikost,
která charakterizuje jak typicky se takové větvi uvědomujeme

$$\mathfrak{M}(\psi) = \langle \text{svět}/\psi | \text{svět}/\psi \rangle$$

- kvadrát normy větve
- aditivní na superpozici větví
- za jistých předpokladů lze ukázat kanoničnost (dlouhá verze Everettova článku)

Kvantitativní předpovědi

- ⊙ stav světa rozštěpený vzhledem k pozorovateli:

$$|\text{svět}\rangle = \sum_{\psi} |\text{svět}/\psi\rangle |p \neq \psi\rangle$$

- ⊙ ve většině větví platí předpovědi kvantové mechaniky
- ⊙ míru \mathfrak{M} lze chápat jako *pravděpodobnost*,
že se pozorovatel uvědomuje v dané větvi

Dva pozorovatelé

- ⊙ systém = kočka
 - stavy $|\uparrow\rangle$ (živá) a $|\downarrow\rangle$ (mrtvá)
 - počáteční stav (po hodině v izolované místnosti s pekelným přístrojem)

$$\frac{1}{\sqrt{2}} (|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle)$$

- ⊙ pozorovatel \mathcal{W} – vně místnosti
 - stavy $|\leftarrow \dots\rangle$
- ⊙ pozorovatelka \mathcal{P} – uvnitř místnosti
 - stavy $|\leftarrow \dots\rangle$
- ⊙ počáteční stav \mathcal{W} a \mathcal{P}

$$|\leftarrow \rangle |\leftarrow \rangle$$

Dva pozorovatelé

- pozorovatelka \mathcal{P} změří kočku

$$\frac{1}{\sqrt{2}} |* \rangle |* \rangle (| \blackcat \rangle + | \skull \rangle)$$

↓

\mathcal{W} :

$$\frac{1}{\sqrt{2}} |* \rangle (|* \blackcat \rangle | \blackcat \rangle + |* \skull \rangle | \skull \rangle)$$

=

\mathcal{P} :

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\sqrt{2}} |* \rangle |* \blackcat \rangle | \blackcat \rangle \\ & + \frac{1}{\sqrt{2}} |* \rangle |* \skull \rangle | \skull \rangle \end{aligned}$$

- různé rozvětvení pro oba pozorovatele

Dva pozorovatelé

- komunikace $\mathcal{P} \rightarrow \mathcal{W}$

$$\frac{1}{\sqrt{2}} |* \rangle |* \rangle |* \rangle |* \rangle$$

$$+ \frac{1}{\sqrt{2}} |* \rangle |* \rangle |* \rangle |* \rangle$$

↓

\mathcal{W}, \mathcal{P} :

$$\frac{1}{\sqrt{2}} |* \rangle |* \rangle |* \rangle |* \rangle$$

$$+ \frac{1}{\sqrt{2}} |* \rangle |* \rangle |* \rangle |* \rangle$$

- stejné rozvětvení pro oba pozorovatele

$|* \rangle |* \rangle \leftrightarrow \mathcal{P}$ viděl, že kočka je živá
 $|* \rangle |* \rangle \leftrightarrow \mathcal{W}$ viděl, že kočka je živá
 $|* \rangle |* \rangle \leftrightarrow \mathcal{W}$ ví, že \mathcal{P} tvrdí, že kočka je živá

Tunelování mezi světy

⊙ dva pozorovatelé

- pozorovatel \mathcal{W} – stavy $|* \dots\rangle$
- pozorovatelka \mathcal{P} – stavy $|* \dots\rangle$
- počáteční stav \mathcal{W} a \mathcal{P} – vícesvětová korelace

$$\frac{1}{\sqrt{2}} |* \text{☺} \rangle |* \text{☺} \rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} |* \text{☹} \rangle |* \text{☹} \rangle$$

Tunelování mezi světy

⊙ dva pozorovatelé

- pozorovatel \mathcal{W} – stavy $|* \dots\rangle$
- pozorovatelka \mathcal{P} – stavy $|* \dots\rangle$
- počáteční stav \mathcal{W} a \mathcal{P} – vícesvětová korelace

$$\frac{1}{\sqrt{2}} |* \text{☺}\rangle |* \text{☺}\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} |* \text{☹}\rangle |* \text{☹}\rangle$$

⊙ \mathcal{W} bude měřit komplementární pozorovatelnou k „ \mathcal{P} -uvědomění si“

- jiná báze než báze „jasných stavů vědomí“ $|* \dots\rangle$
- například měření stavů

$$|+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|* \text{☺}\rangle + |* \text{☹}\rangle)$$

$$|* \text{☺}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|+\rangle + |-\rangle)$$

$$|-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|* \text{☺}\rangle - |* \text{☹}\rangle)$$

$$|* \text{☹}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|+\rangle - |-\rangle)$$

Tunelování mezi světy

- ◉ \mathcal{W} měří $|+\rangle$, $|-\rangle$

$$\frac{1}{\sqrt{2}} |* \text{ ☺ } \rangle |* \text{ ☹ } \rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} |* \text{ ☹ } \rangle |* \text{ ☹ } \rangle$$

↓

$$\mathcal{W}: \begin{aligned} & \frac{1}{2} |* \text{ ☺ } + \rangle |+\rangle \\ & + \frac{1}{2} |* \text{ ☺ } - \rangle |-\rangle \\ & + \frac{1}{2} |* \text{ ☹ } + \rangle |+\rangle \\ & - \frac{1}{2} |* \text{ ☹ } - \rangle |-\rangle \end{aligned}$$

$$\mathcal{P}: \begin{aligned} & \frac{1}{2\sqrt{2}} |* \text{ ☹ } \rangle (|* \text{ ☺ } + \rangle + |* \text{ ☺ } - \rangle + |* \text{ ☹ } + \rangle - |* \text{ ☹ } - \rangle) \\ & + \frac{1}{2\sqrt{2}} |* \text{ ☹ } \rangle (|* \text{ ☺ } + \rangle - |* \text{ ☺ } - \rangle + |* \text{ ☹ } + \rangle + |* \text{ ☹ } - \rangle) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} |+\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}} (|* \text{ ☺ } \rangle + |* \text{ ☹ } \rangle) \\ |-\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}} (|* \text{ ☺ } \rangle - |* \text{ ☹ } \rangle) \\ |* \text{ ☺ } \rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}} (|+\rangle + |-\rangle) \\ |* \text{ ☹ } \rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}} (|+\rangle - |-\rangle) \end{aligned}$$

\mathcal{W} a \mathcal{P} mají různá rozštěpení na větve

Tunelování mezi světy

- komunikace $\mathcal{W} \leftrightarrow \mathcal{P}$
výsledný stav:

\mathcal{W}, \mathcal{P} :

$$\frac{1}{2\sqrt{2}} \begin{bmatrix} |* \mathcal{G} + \mathcal{G}\rangle |* \mathcal{G} \mathcal{G} + \rangle \\ + |* \mathcal{G} + \mathcal{P}\rangle |* \mathcal{P} \mathcal{G} + \rangle \\ + |* \mathcal{G} - \mathcal{G}\rangle |* \mathcal{G} \mathcal{G} - \rangle \\ - |* \mathcal{G} - \mathcal{P}\rangle |* \mathcal{P} \mathcal{G} - \rangle \\ + |* \mathcal{P} + \mathcal{G}\rangle |* \mathcal{G} \mathcal{P} + \rangle \\ + |* \mathcal{P} + \mathcal{P}\rangle |* \mathcal{P} \mathcal{P} + \rangle \\ - |* \mathcal{P} - \mathcal{G}\rangle |* \mathcal{G} \mathcal{P} - \rangle \\ + |* \mathcal{P} - \mathcal{P}\rangle |* \mathcal{P} \mathcal{P} - \rangle \end{bmatrix}$$

$|* \mathcal{G} - \mathcal{G}\rangle \leftrightarrow \mathcal{W}$ si pamatuje \mathcal{G}
 \mathcal{W} naměřil $|-\rangle$
 \mathcal{W} ví, že \mathcal{P} si pamatuje \mathcal{G}

$|* \mathcal{G} \mathcal{P} + \rangle \leftrightarrow \mathcal{P}$ si pamatuje \mathcal{G}
 \mathcal{P} ví, že \mathcal{W} si pamatuje \mathcal{P}
 \mathcal{P} ví, že \mathcal{W} naměřil $|+\rangle$

- $\mathcal{G} \mathcal{G}$
 \leftrightarrow tunelování $\mathcal{P} \mathcal{G}$
- $\mathcal{G} \mathcal{G}$
 \leftrightarrow tunelování $\mathcal{P} \mathcal{G}$
- $\mathcal{G} \mathcal{P}$
 \leftrightarrow tunelování $\mathcal{G} \mathcal{P}$
- $\mathcal{P} \mathcal{P}$
 \leftrightarrow tunelování $\mathcal{G} \mathcal{P}$

došlo k mixování původních a výsledných větví obou pozorovatelů

Stabilita makroskopických větví

- ⊙ měření stavů $|+\rangle$ a $|-\rangle$
 - je možné pouze pro malé systémy
 - pro makroskopické systémy (pozorovatelka \mathcal{P}) typická interakce neměří $|+\rangle$ a $|-\rangle$
 - dekoherence – únik informace do dalších částí systému znemožňuje měřit $|+\rangle$ a $|-\rangle$
- ⊙ tunelování není prakticky možné

$$\begin{aligned}
 & -\frac{1}{\sqrt{2}}s |\ast \uparrow \nearrow\rangle |\uparrow\rangle |\nearrow\rangle |\ast \nearrow \uparrow\rangle \\
 & +\frac{1}{\sqrt{2}}c |\ast \uparrow \swarrow\rangle |\uparrow\rangle |\swarrow\rangle |\ast \swarrow \uparrow\rangle \\
 & -\frac{1}{\sqrt{2}}c |\ast \downarrow \nearrow\rangle |\downarrow\rangle |\nearrow\rangle |\ast \nearrow \downarrow\rangle \\
 & +\frac{1}{\sqrt{2}}s |\ast \downarrow \swarrow\rangle |\downarrow\rangle |\swarrow\rangle |\ast \swarrow \downarrow\rangle
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \frac{1}{\sqrt{2}} |\ast \uparrow\rangle |\uparrow\rangle (s|\nearrow\rangle |\ast \nearrow\rangle + c|\swarrow\rangle |\ast \swarrow\rangle) \\
 & +\frac{1}{\sqrt{2}} |\ast \downarrow\rangle |\downarrow\rangle (-c|\nearrow\rangle |\ast \nearrow\rangle + s|\swarrow\rangle |\ast \swarrow\rangle)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \frac{1}{\sqrt{2}} |\ast \uparrow\rangle |\uparrow\rangle |\downarrow\rangle |\ast \rangle \\
 & -\frac{1}{\sqrt{2}} |\ast \downarrow\rangle |\downarrow\rangle |\uparrow\rangle |\ast \rangle
 \end{aligned}$$

$$|\ast \rangle |EPR\rangle |\ast \rangle$$

\mathcal{L} měří $\uparrow\downarrow$

$|\ast \uparrow \nearrow\rangle \leftrightarrow \mathcal{L}$ naměřil \uparrow a dozvěděl se, že \mathcal{P} naměřil \nearrow
 $|\ast \nearrow \downarrow\rangle \leftrightarrow \mathcal{P}$ naměřil \nearrow a dozvěděl se, že \mathcal{L} naměřil \downarrow

komunikace \mathcal{L} a \mathcal{P}

$$\begin{aligned}
 & \frac{1}{\sqrt{2}} (s|\ast \uparrow\rangle |\uparrow\rangle - c|\ast \downarrow\rangle |\downarrow\rangle) |\nearrow\rangle |\ast \nearrow\rangle \\
 & +\frac{1}{\sqrt{2}} (c|\ast \uparrow\rangle |\uparrow\rangle + s|\ast \downarrow\rangle |\downarrow\rangle) |\swarrow\rangle |\ast \swarrow\rangle
 \end{aligned}$$

\mathcal{P} měří $\nearrow\swarrow$

$$\begin{aligned}
 & -\frac{1}{\sqrt{2}} |\ast \rangle |\swarrow\rangle |\nearrow\rangle |\ast \nearrow\rangle \\
 & +\frac{1}{\sqrt{2}} |\ast \rangle |\nearrow\rangle |\swarrow\rangle |\ast \swarrow\rangle
 \end{aligned}$$

příprava $|EPR\rangle$

$$\begin{aligned}
 s &= \sin \frac{\theta}{2} \\
 c &= \cos \frac{\theta}{2}
 \end{aligned}$$

Mnohosvětová interpretace

- ⊙ kvantová mechanika bez kolapsu
- ⊙ vývoj celého světa deterministický, unitární
- ⊙ stav celého světa lze chápat jako odraz reality
- ⊙ pozorovatelé zahrnutí do popisu
- ⊙ náš obraz světa pouze z hlediska pozorovatele
- ⊙ pozorovatel určuje rozštěpení na větve (světy)
- ⊙ větve jsou určeny *jasnými stavy vědomí* vnímanými pozorovatelem
- ⊙ velikost větví určuje pravděpodobnostní rozložení vnímaných výsledků