

NTMF036

INTERPRETACE KVANTOVÉ MECHANIKY

Mnohosvětová interpretace

Pavel Krtouš

Relativní stavy

system skládající se ze dvou podsystémů: levý ℓ a pravý p

$$|st\rangle = \sum_{m,n} \alpha_{m,n} |\ell:m\rangle |p:n\rangle \rightarrow ?$$

obecný stav nelze jednoduše rozložit na stavy v podsystémech!

Relativní stavy

- ortonormální báze $|p:n\rangle$ ($n \in \mathcal{J}$) 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 $|\ell:st/n\rangle = \sum_m \alpha_{m,n} |\ell:m\rangle$

Řetězec systém – pozorovatel

⊙ ,svět‘ skládající se z částí:

- zkoumaný systém s
- měřící přístroj a
- makroskopické okolí σ
- pozorovatel p

system, který nás zajímá

system, na kterém odečítáme měření

nekontrolovaná část systému, kam uniká informace
způsobuje dekoherenci

vědomí pozorovatele

Řetězec systém – pozorovatel

⊙ ‚svět‘ skládající se z částí:

- zkoumaný systém s
- měřící přístroj a
- makroskopické okolí σ
- pozorovatel p

system, který nás zajímá

system, na kterém odečítáme měření

nekontrolovaná část systému, kam uniká informace
způsobuje dekoherenci

vědomí pozorovatele

Řetězec systém – pozorovatel

⊙ ,svět‘ skládající se z částí:

- zkoumaný systém s
- měřící přístroj a
- **makroskopické okolí** σ
- pozorovatel p

system, který nás zajímá

system, na kterém odečítáme měření

nekontrolovaná část systému, kam uniká informace
způsobuje dekoherenci

vědomí pozorovatele

Řetězec systém – pozorovatel

⊙ ‚svět‘ skládající se z částí:

- zkoumaný systém s
- měřící přístroj a
- makroskopické okolí σ
- **pozorovatel** p

system, který nás zajímá

system, na kterém odečítáme měření

nekontrolovaná část systému, kam uniká informace
způsobuje dekoherenci

vědomí pozorovatele

Řetězec systém – pozorovatel

⊙ ,svět‘ skládající se z částí:

- zkoumaný systém s
- měřící přístroj a
- makroskopické okolí σ
- pozorovatel p

system, který nás zajímá

system, na kterém odečítáme měření

nekontrolovaná část systému, kam uniká informace způsobuje dekoherenci

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
- měřicí přístroj a
- makroskopické okolí σ
- pozorovatel p

$$|s: st\rangle = \alpha_{\uparrow} |s: \uparrow\rangle + \alpha_{\downarrow} |s: \downarrow\rangle$$

⊙ počáteční stav = nekorelované složení částí

$$|s: st\rangle |a: -\rangle |\sigma: \# \rangle |p: \# \rangle$$

⊙ měření = korelace systému, přístroje, okolí a pozorovatele (proces I)

Řetězec systém – pozorovatel

⊙ ‚svět‘ skládající se z částí:

- zkoumaný systém s
- měřicí přístroj a
- makroskopické okolí σ
- pozorovatel p

$$\begin{array}{l} |s:\uparrow\rangle|a:-\rangle \rightarrow |s:\uparrow\rangle|a:\div\rangle \\ |s:\downarrow\rangle|a:-\rangle \rightarrow |s:\downarrow\rangle|a:\div\rangle \end{array}$$

⊙ korelace systém – přístroj

$$\left(\begin{array}{c} \alpha_{\uparrow}|s:\uparrow\rangle \\ + \\ \alpha_{\downarrow}|s:\downarrow\rangle \end{array} \right) |a:-\rangle |\sigma:\#\rangle |p\leftarrow \rangle \rightarrow \left(\begin{array}{c} \alpha_{\uparrow}|s:\uparrow\rangle |a:\div\rangle \\ + \\ \alpha_{\downarrow}|s:\downarrow\rangle |a:\div\rangle \end{array} \right) |\sigma:\#\rangle |p\leftarrow \rangle$$

Řetězec systém – pozorovatel

⊙ ‚svět‘ skládající se z částí:

- zkoumaný systém s
- měřicí přístroj a
- makroskopické okolí σ
- pozorovatel p

$$|a:\div\rangle|\sigma:\#\rangle \rightarrow |a:\div\rangle|\sigma:\uparrow\rangle$$

$$|a:\div\rangle|\sigma:\#\rangle \rightarrow |a:\div\rangle|\sigma:\downarrow\rangle$$

⊙ korelace přístroj – okolí

$$\left(\begin{array}{c} \alpha_{\uparrow}|s:\uparrow\rangle|a:\div\rangle \\ + \\ \alpha_{\downarrow}|s:\downarrow\rangle|a:\div\rangle \end{array} \right) |\sigma:\#\rangle |p\ast\rangle \rightarrow \left(\begin{array}{c} \alpha_{\uparrow}|s:\uparrow\rangle|a:\div\rangle|\sigma:\uparrow\rangle \\ + \\ \alpha_{\downarrow}|s:\downarrow\rangle|a:\div\rangle|\sigma:\downarrow\rangle \end{array} \right) |p\ast\rangle$$

Řetězec systém – pozorovatel

⊙ ‚svět‘ skládající se z částí:

- zkoumaný systém s
- měřicí přístroj a
- makroskopické okolí σ
- pozorovatel p

$$\begin{aligned} |a:\div\rangle |p\leftarrow\rangle &\rightarrow |a:\div\rangle |p\leftarrow\uparrow\rangle \\ |a:\div\rangle |p\leftarrow\rangle &\rightarrow |a:\div\rangle |p\leftarrow\uparrow\rangle \end{aligned}$$

⊙ korelace přístroj – pozorovatel

$$\begin{aligned} &\left(\begin{array}{c} \alpha_{\uparrow} |s:\uparrow\rangle |a:\div\rangle |\sigma:\uparrow\uparrow\rangle \\ + \\ \alpha_{\downarrow} |s:\downarrow\rangle |a:\div\rangle |\sigma:\downarrow\downarrow\rangle \end{array} \right) |p\leftarrow\rangle \rightarrow \\ &\begin{array}{c} \alpha_{\uparrow} |s:\uparrow\rangle |a:\div\rangle |\sigma:\uparrow\uparrow\rangle |p\leftarrow\uparrow\rangle \\ + \\ \alpha_{\downarrow} |s:\downarrow\rangle |a:\div\rangle |\sigma:\downarrow\downarrow\rangle |p\leftarrow\downarrow\rangle \end{array} \end{aligned}$$

Řetězec systém – pozorovatel

⊙ ‚svět‘ skládající se z částí:

- zkoumaný systém s
- měřící přístroj a
- pozorovatel p

⊙ korelace systém – přístroj – pozorovatel

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

⊙ 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?
 - superpozice odpovídá stavu nějaké komplementární pozorovatelné k *„uvědomění si“*
 - superpozice nemůže být *„jasný stav vědomí“*

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**

Větvení a mnohosvětovost

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

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

- superpozici nezávislých větví,**
v každé z nichž si pozorovatel uvědomuje něco jiného
- nezávislé ‚větve‘ (‚světy‘)
- větve zachycují různé stavy *stejného* systému
- pouze jeden pozorovatel ale více alternativ, co si uvědomuje
- větvení je dáno vzhledem k pozorovateli

Větvení vzhledem k pozorovateli

- ⊙ pouze jeden celkový stav celého světa $|\text{svět}\rangle$
= *„univerzální stav vesmíru“*
- ⊙ pozorovatel definuje bázi *„jasných stavů vědomí“* $|p \neq \dots\rangle$
- ⊙ stav se rozštěpuje na větve definované vzhledem k pozorovateli
= rozštěpení na relativní stavy

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

příklad s přístrojem:

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

Větvení vzhledem k pozorovateli

- stav se rozštěpuje na větve definované vzhledem k pozorovateli

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

příklad s přístrojem:

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

- v každé větvi si odpovídá stav vědomí a zbytek systému
- relativní stav odpovídá redukovanému stavu,
pokud by došlo ke kolapsu do této větve

$$|\text{svět}/\psi\rangle |p \neq \psi\rangle = \hat{P}_{\psi} |\text{svět}\rangle$$

Větvení vzhledem k pozorovateli

- ◉ stav se rozštěpuje na větve definované vzhledem k pozorovateli

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

- ◉ relativní stav odpovídá redukovanému stavu,
pokud by došlo ke kolapsu do této větve

$$|\text{svět}/\psi\rangle |p \leftarrow \psi\rangle = \hat{P}_{\psi} |\text{svět}\rangle$$

- ◉ 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

Kvantitativní předpovědi

- ⊙ stav světa rozštěpený vzhledem k pozorovateli:

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

- ⊙ ve které větvi se typicky uvědomím?
- ⊙ realizují se všechny větve?
- ⊙ s jakou váhou?

Kvantitativní předpovědi

- ⊙ stav světa rozštěpený vzhledem k pozorovateli:

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

- ⊙ ve které větvi se typicky uvědomím?
- ⊙ realizují se všechny větve?
- ⊙ s jakou váhou?
- ⊙ ne se stejnou – některé větve musejí být potlačeny

Kvantitativní předpovědi

- příklad: měření \uparrow na N kopiích spinu připraveného ve stavu $|s:st\rangle = \alpha_{\uparrow} |s:\uparrow\rangle + \alpha_{\downarrow} |s:\downarrow\rangle$

$$|s_1:st\rangle |s_2:st\rangle |s_3:st\rangle \dots |p\leftarrow \rangle$$

↓

$$|\text{svět}\rangle = \left\{ \begin{array}{l} \alpha_{\uparrow}^N |s_1:\uparrow\rangle |s_2:\uparrow\rangle |s_3:\uparrow\rangle \dots |p\leftarrow \uparrow\uparrow\uparrow \dots\rangle \\ + \alpha_{\uparrow}^{N-1} \alpha_{\downarrow} |s_1:\downarrow\rangle |s_2:\uparrow\rangle |s_3:\uparrow\rangle \dots |p\leftarrow \downarrow\uparrow\uparrow \dots\rangle \\ + \alpha_{\uparrow}^{N-1} \alpha_{\downarrow} |s_1:\uparrow\rangle |s_2:\downarrow\rangle |s_3:\uparrow\rangle \dots |p\leftarrow \uparrow\downarrow\uparrow \dots\rangle \\ + \alpha_{\uparrow}^{N-2} \alpha_{\downarrow}^2 |s_1:\downarrow\rangle |s_2:\downarrow\rangle |s_3:\uparrow\rangle \dots |p\leftarrow \downarrow\downarrow\uparrow \dots\rangle \\ \vdots \\ + \alpha_{\downarrow}^N |s_1:\downarrow\rangle |s_2:\downarrow\rangle |s_3:\downarrow\rangle \dots |p\leftarrow \downarrow\downarrow\downarrow \dots\rangle \end{array} \right.$$

- měly by se realizovat pouze větve, ve kterých frekvence výsledků \uparrow a \downarrow odpovídá předpovědím kvantové mechaniky

$$\frac{\#_{\uparrow}}{N} \approx p_{\uparrow} \equiv |\alpha_{\uparrow}|^2$$

$$\frac{\#_{\downarrow}}{N} \approx p_{\downarrow} \equiv |\alpha_{\downarrow}|^2$$

Velikost větve

- ⊙ stav světa rozštěpený vzhledem k pozorovateli:

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

- ⊙ 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**
 - *většina* je určena pomocí míry \mathfrak{M}
 - nutno analyzovat statistiku v systémech složených z mnoha kopií zkoumaného systému

Kvantitativní předpovědi

- příklad: měření \uparrow na N kopiích spinu připraveného ve stavu $|s:st\rangle = \alpha_{\uparrow} |s:\uparrow\rangle + \alpha_{\downarrow} |s:\downarrow\rangle$

$$|s_1:st\rangle|s_2:st\rangle|s_3:st\rangle \dots |p\ast \rangle$$

↓

$$|\text{svět}\rangle = \begin{cases} \alpha_{\uparrow}^N |s_1:\uparrow\rangle|s_2:\uparrow\rangle|s_3:\uparrow\rangle \dots |p\ast \uparrow\uparrow\uparrow \dots\rangle \\ + \alpha_{\uparrow}^{N-1}\alpha_{\downarrow} |s_1:\downarrow\rangle|s_2:\uparrow\rangle|s_3:\uparrow\rangle \dots |p\ast \downarrow\uparrow\uparrow \dots\rangle \\ + \alpha_{\uparrow}^{N-1}\alpha_{\downarrow} |s_1:\uparrow\rangle|s_2:\downarrow\rangle|s_3:\uparrow\rangle \dots |p\ast \uparrow\downarrow\uparrow \dots\rangle \\ + \alpha_{\uparrow}^{N-2}\alpha_{\downarrow}^2 |s_1:\downarrow\rangle|s_2:\downarrow\rangle|s_3:\uparrow\rangle \dots |p\ast \downarrow\downarrow\uparrow \dots\rangle \\ \vdots \\ + \alpha_{\downarrow}^N |s_1:\downarrow\rangle|s_2:\downarrow\rangle|s_3:\downarrow\rangle \dots |p\ast \downarrow\downarrow\downarrow \dots\rangle \end{cases}$$

- pro velká N je velikost větví, ve kterých neplatí předpověď KM pro frekvence, zanedbatelná

$$\mathfrak{M}\left(\text{větvě: } \left| \frac{\#_{\uparrow}}{N} - |\alpha_{\uparrow}|^2 \right| > \delta\right) \leq \frac{1}{\delta N}$$

Kvantitativní předpovědi

- ⊙ stav světa rozštěpený vzhledem k pozorovateli:

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

- ⊙ míru \mathfrak{M} lze chápat jako *pravděpodobnost*,
že se pozorovatel uvědomuje v dané větvi

Jeden pozorovatel, dvě měření

- ⊙ systém a pozorovatel
- ⊙ následné měření komplementárních pozorovatelných \hat{A} a \hat{B}
 - pozorovatelné na systému charakterizované bázemi stavů $|A: \alpha\rangle$ a $|B: \beta\rangle$
 - stavy vědomí pozorovatele $|\ast \dots\rangle$

Jeden pozorovatel, dvě měření

- ⊙ systém a pozorovatel
- ⊙ následné měření komplementárních pozorovatelných \hat{A} a \hat{B}
 - pozorovatelné na systému charakterizované bázemi stavů $|A: \alpha\rangle$ a $|B: \beta\rangle$
 - stavy vědomí pozorovatele $|\not\leftarrow \dots\rangle$
- ⊙ měření pozorovatelné \hat{A}

$$|st\rangle|\not\leftarrow \rangle \rightarrow \sum_{\alpha} \langle A: \alpha | st \rangle |A: \alpha\rangle |\not\leftarrow \alpha \rangle$$

- velikost (pravděpodobnost) větve α :

$$\mathfrak{M}(\alpha) = |\langle A: \alpha | st \rangle|^2$$

předpověď kvantové mechaniky

Jeden pozorovatel, dvě měření

- ⊙ systém a pozorovatel
- ⊙ následné měření komplementárních pozorovatelných \hat{A} a \hat{B}
 - pozorovatelné na systému charakterizované bázemi stavů $|A: \alpha\rangle$ a $|B: \beta\rangle$
 - stavy vědomí pozorovatele $|\not\leftarrow \dots\rangle$

- ⊙ následné měření pozorovatelné \hat{B}

$$\sum_{\alpha} \langle A: \alpha | st \rangle |A: \alpha\rangle |\not\leftarrow \alpha \rangle \rightarrow \sum_{\alpha, \beta} \langle A: \alpha | st \rangle \langle B: \beta | A: \alpha \rangle |B: \beta\rangle |\not\leftarrow \alpha \beta \rangle$$

- velikost (pravděpodobnost) větve (α, β) :

$$\mathfrak{M}(\alpha, \beta) = |\langle A: \alpha | st \rangle|^2 |\langle B: \beta | A: \alpha \rangle|^2$$

předpověď kvantové mechaniky

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

Dva pozorovatelé

- ⊙ zpět před komunikací $\mathcal{P} \rightarrow \mathcal{W}$
- ⊙ \mathcal{W} bude měřit přímo kočku v bázi $|+\rangle, |-\rangle$

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

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

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

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

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

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

↓

$$\mathcal{W}: \frac{1}{2} |\uparrow+\rangle (|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle) |+\rangle$$

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

$$\mathcal{P}: \frac{1}{2} |\uparrow\rangle (|\uparrow+\rangle |+\rangle + |\uparrow-\rangle |-\rangle)$$

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

zcela různá rozštěpení na větve pro oba pozorovatele \mathcal{W} , \mathcal{P}

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

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

⊙ nyní komunikace $\mathcal{P} \rightarrow \mathcal{W}$

$$\mathcal{W}: \frac{1}{2} |\uparrow\rangle (|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle) |+\rangle$$

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

$$\mathcal{P}: \frac{1}{2} |\downarrow\rangle (|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle) |+\rangle$$

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



$$\mathcal{W}: \frac{1}{2} |\uparrow\uparrow\rangle |+\rangle$$

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

$$+ \frac{1}{2} |\uparrow\uparrow\rangle |-\rangle$$

$$- \frac{1}{2} |\uparrow\downarrow\rangle |-\rangle$$

$$\mathcal{P}: \frac{1}{2} |\downarrow\uparrow\rangle |+\rangle$$

$$+ \frac{1}{2} |\downarrow\downarrow\rangle |+\rangle$$

$$- \frac{1}{2} |\downarrow\uparrow\rangle |-\rangle$$

$$- \frac{1}{2} |\downarrow\downarrow\rangle |-\rangle$$

stále různá rozštěpení na větve pro oba pozorovatele \mathcal{W} , \mathcal{P}

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

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

$|* + \uparrow\rangle \leftrightarrow \mathcal{W}$ viděl superponovanou kočku $|+\rangle$
a slyšel, že \mathcal{P} tvrdí, že kočka je živá

⊙ nyní komunikace $\mathcal{P} \rightarrow \mathcal{W}$

$$\mathcal{W}: \frac{1}{2} |* +\rangle (|* \uparrow\rangle + |* \downarrow\rangle) |+\rangle$$

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

$$\mathcal{P}: \frac{1}{2} |* \uparrow\rangle (|* +\rangle |+\rangle + |* -\rangle |-\rangle)$$

$$+ \frac{1}{2} |* \downarrow\rangle (|* +\rangle |+\rangle - |* -\rangle |-\rangle)$$

↓

$$\mathcal{W}: \frac{1}{2} |* + \uparrow\rangle |* \uparrow\rangle |+\rangle$$

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

$$+ \frac{1}{2} |* - \uparrow\rangle |* \uparrow\rangle |-\rangle$$

$$- \frac{1}{2} |* - \downarrow\rangle |* \downarrow\rangle |-\rangle$$

$$\mathcal{P}: \frac{1}{2} |* \uparrow\rangle (|* + \uparrow\rangle |+\rangle + |* - \uparrow\rangle |-\rangle)$$

$$+ \frac{1}{2} |* \downarrow\rangle (|* + \downarrow\rangle |+\rangle - |* - \downarrow\rangle |-\rangle)$$

stále různá rozštěpení na větve pro oba pozorovatele \mathcal{W} , \mathcal{P}

$|* + \text{cat}\rangle \leftrightarrow \mathcal{W}$ viděl superponovanou kočku $|+\rangle$
 a slyšel, že \mathcal{P} tvrdí, že kočka je živá
 $|* \text{skull} -\rangle \leftrightarrow \mathcal{P}$ viděl mrtvou kočku a slyšel,
 že \mathcal{W} tvrdí, že kočka je ve stavu $|-\rangle$

⊙ opačná komunikace $\mathcal{W} \rightarrow \mathcal{P}$

\mathcal{W} :

$$\begin{aligned}
 & \frac{1}{2} |* + \text{cat}\rangle |* \text{cat}\rangle |+\rangle \\
 & + \frac{1}{2} |* + \text{skull}\rangle |* \text{skull}\rangle |+\rangle \\
 & + \frac{1}{2} |* - \text{cat}\rangle |* \text{cat}\rangle |-\rangle \\
 & - \frac{1}{2} |* - \text{skull}\rangle |* \text{skull}\rangle |-\rangle
 \end{aligned}$$

\mathcal{P} :

$$\begin{aligned}
 & \frac{1}{2} |* \text{cat}\rangle (|* + \text{cat}\rangle |+\rangle + |* - \text{cat}\rangle |-\rangle) \\
 & + \frac{1}{2} |* \text{skull}\rangle (|* + \text{skull}\rangle |+\rangle - |* - \text{skull}\rangle |-\rangle)
 \end{aligned}$$



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

$$\begin{aligned}
 & \frac{1}{2} |* + \text{cat}\rangle |* \text{cat} +\rangle |+\rangle \\
 & + \frac{1}{2} |* + \text{skull}\rangle |* \text{skull} +\rangle |+\rangle \\
 & + \frac{1}{2} |* - \text{cat}\rangle |* \text{cat} -\rangle |-\rangle \\
 & - \frac{1}{2} |* - \text{skull}\rangle |* \text{skull} -\rangle |-\rangle
 \end{aligned}$$

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

stejné rozštěpení na větve pro oba pozorovatele \mathcal{W}, \mathcal{P}

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

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

$$\mathcal{W}: \begin{aligned} & \frac{1}{2} |\star \ominus +\rangle |+\rangle \\ & + \frac{1}{2} |\star \ominus -\rangle |-\rangle \\ & + \frac{1}{2} |\star \oplus +\rangle |+\rangle \\ & - \frac{1}{2} |\star \oplus -\rangle |-\rangle \end{aligned}$$

$$\mathcal{W}: \frac{1}{2\sqrt{2}} \begin{bmatrix} |\star \ominus +\rangle |\ominus +\rangle \\ + |\star \ominus +\rangle |\oplus +\rangle \\ + |\star \ominus -\rangle |\ominus +\rangle \\ - |\star \ominus -\rangle |\oplus +\rangle \\ + |\star \oplus +\rangle |\ominus +\rangle \\ + |\star \oplus +\rangle |\oplus +\rangle \\ - |\star \oplus -\rangle |\ominus +\rangle \\ + |\star \oplus -\rangle |\oplus +\rangle \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} |+\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}} (|\star \ominus \rangle + |\star \oplus \rangle) \\ |-\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}} (|\star \ominus \rangle - |\star \oplus \rangle) \end{aligned}$$

$$\mathcal{P}: \begin{aligned} & \frac{1}{2\sqrt{2}} |\star \ominus \rangle (|\star \ominus +\rangle + |\star \ominus -\rangle + |\star \oplus +\rangle - |\star \oplus -\rangle) \\ & + \frac{1}{2\sqrt{2}} |\star \oplus \rangle (|\star \ominus +\rangle - |\star \ominus -\rangle + |\star \oplus +\rangle + |\star \oplus -\rangle) \end{aligned}$$

↓

$$\mathcal{P}: \begin{aligned} & \frac{1}{2\sqrt{2}} |\star \ominus \rangle (|\star \ominus +\rangle + |\star \ominus -\rangle + |\star \oplus +\rangle - |\star \oplus -\rangle) \\ & + \frac{1}{2\sqrt{2}} |\star \oplus \rangle (|\star \ominus +\rangle - |\star \ominus -\rangle + |\star \oplus +\rangle + |\star \oplus -\rangle) \end{aligned}$$

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

Tunelování mezi světy

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

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

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

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

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

- $\textcircled{G} \textcircled{G}$
 \Leftrightarrow tunelování $\textcircled{R} \textcircled{G}$
- $\textcircled{G} \textcircled{G}$
 \Leftrightarrow tunelování $\textcircled{R} \textcircled{G}$
- $\textcircled{G} \textcircled{G}$
 \Leftrightarrow tunelování $\textcircled{G} \textcircled{R}$
- $\textcircled{R} \textcircled{R}$
 \Leftrightarrow tunelování $\textcircled{G} \textcircled{R}$

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

EPR v mnoha světech

- dva korelované spiny v EPR stavu roznesené do dvou oddělených oblastí

$$|\text{EPR}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\uparrow\rangle|\downarrow\rangle - |\downarrow\rangle|\uparrow\rangle) = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\nearrow\rangle|\nwarrow\rangle - |\nwarrow\rangle|\nearrow\rangle)$$

- v každé oblasti jeden pozorovatel s bází „jasných stavů vědomí“

$|\leftarrow \dots\rangle$

$|\rightarrow \dots\rangle$

- pozorovatel \mathcal{L} měří \updownarrow a pozorovatel \mathcal{P} měří \nearrow
- poté se opět sejdou a vymění si výsledky

EPR v prostoročase

- ⊙ systém umístěn do relativistického prostoročasu
- ⊙ Heisenbergův popis vývoje
 - stav se nemění (neprobíhá ani kolaps)
 - mění se pozorovatelné – zvláště při interakcích mezi podsystemy
 - pozorovatelné definují speciální stavy
 - stav světa rozepisujeme v těchto speciálních stavech
 - proměnné pozorovatelné tak mění interpretaci stavu v čase

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

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

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

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

\mathcal{L} měří \updownarrow

$|\ast \uparrow \nearrow\rangle \leftrightarrow \mathcal{L}$ 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}

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

\mathcal{P} měří \nearrow

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

$$\begin{aligned}
|\nearrow\rangle &= c|\uparrow\rangle + s|\downarrow\rangle \\
|\searrow\rangle &= c|\downarrow\rangle - s|\uparrow\rangle \\
|\uparrow\rangle &= c|\nearrow\rangle - s|\searrow\rangle \\
|\downarrow\rangle &= c|\searrow\rangle + s|\nearrow\rangle
\end{aligned}$$

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

příprava $|EPR\rangle$

Měření vůči pozorovateli

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

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

- interpretujeme jako superpozici nezávislých větví,
v každé z nichž si pozorovatel uvědomuje něco jiného
- každá větev má velikost charakterizující jak typicky se v dané větvi pozorovatel uvědomujeme

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

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

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