NTMF036

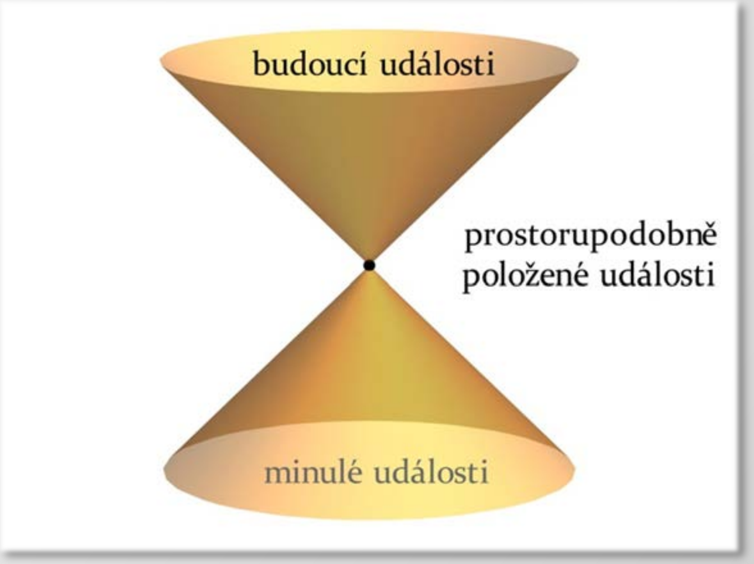
INTERPRETACE KVANTOVÉ MECHANIKY

Lokalizace kolapsu v prostoročase

Pavel Krtouš

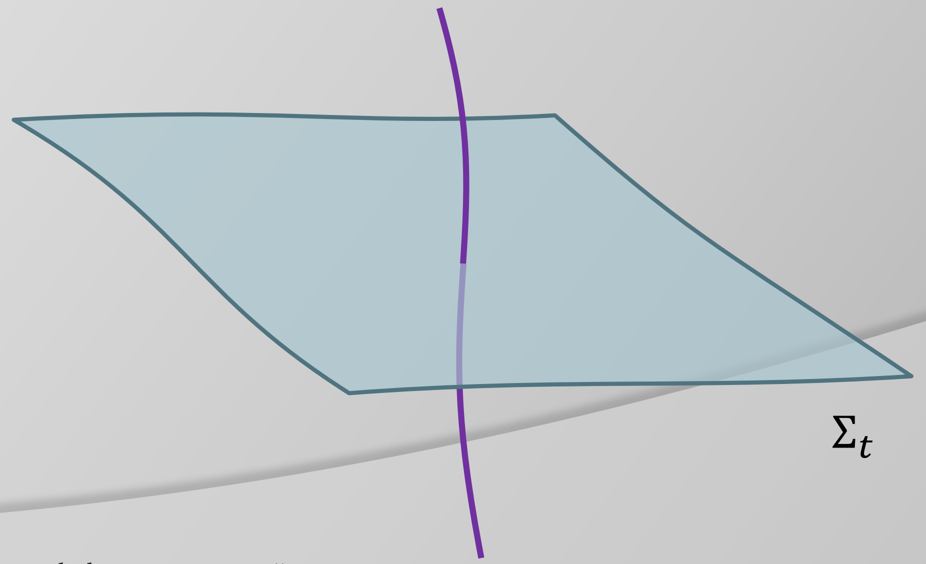
Relativistická kauzalita

- maximální rychlost šíření signálu (interakce)
- lokální kauzální struktura daná světelným kuželem
- neexistence kanonické současnosti
- neexistence kanonického časového parametru



Souřadnicová současnost

- okamžik současnosti = Cauchyho nadplocha
  - třídimenzionální nadplocha v prostoročase
  - prostorupodobná
  - obsahující všechny počáteční podmínky pro vývoj
  - lze zvolit sekvenci nadploch číslovaných souřadnicovým časem t



Volný vývoj – proces I

- Schrödingerův obraz
  - pozorovatelné konstantní
  - mění se stav systému

$$|\mathrm{st}\ t_0\rangle = \hat{U}_S(t|t_0)|\mathrm{st}\ t_0\rangle$$

- Heisenbergův obraz
  - stav konstantní
  - mění se pozorovatelné

$$\hat{A}(t) = \hat{U}_H(t|t_0)\hat{A}(t_0)\hat{U}_H(t|t_0)^\dagger$$

  - $\hat{A}(t)$ a $\hat{A}(t_0)$ je *stejná* pozorovatelná v různých časech

Posun v prostoročase – symetrie

- volba difeomorfismu umožňuje definovat *formální stejnost* pozorovatelných v různých oblastech

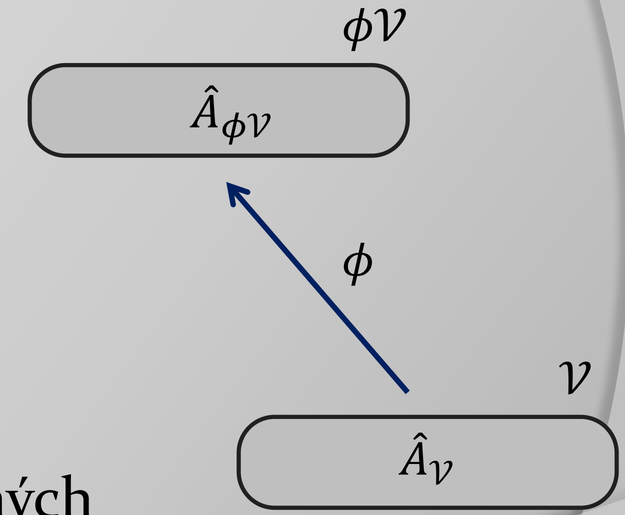
  ϕ difeomorfismus – formální přenos v prostoročase

  $\hat{A}_{\mathcal{V}}$ pozorovatelná definovaná v oblasti $\mathcal{V}$

  $\hat{A}_{\phi\mathcal{V}}$ ***stejná*** pozorovatelná definovaná v oblasti $\phi\mathcal{V}$

  $$\hat{A}_{\phi\mathcal{V}} = \hat{U}_{\phi}\hat{A}_{\mathcal{V}}\hat{U}_{\phi}^{\dagger}$$

  nezajišťuje zcela stejné vlastnosti přenesené pozorovatelné závislé na volbě difeomorfismu



- isomorfismus umožňuje definovat *stejnost* pozorovatelných závisejících na geometrických vlastnostech

  ϕ symetrie prostoročasu (isometrie)

Lokalizace teorie

- existuje lokalizovaná základní pozorovatelné
  - $\hat{\Phi}(x)$ pro každý bod x v prostoročase
  - každá pozorovatelná lze vyjádřit pomocí $\hat{\Phi}$
- prostoročasový vývoj základní pozorovatelné
  - např. polní rovnice zajišťující kauzalitu vývoje

$$[\Box + m^2]\hat{\Phi} = 0 \qquad \text{volný vývoj}$$

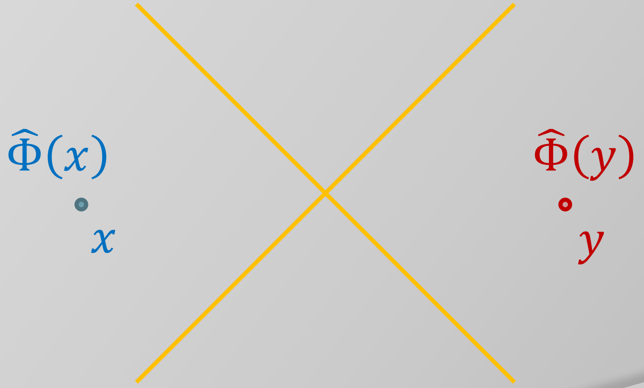
$$\Box\hat{\Phi} + m^2\hat{\Phi} + \lambda\hat{\Phi}^3 = J\,\mathbb{1} \qquad \text{vývoj s interakcí}$$

  - existují-li bohaté symetrie ⇒ určují vývoj

Lokalita (kauzalita) teorie

- prostorupodobně lokalizované základní pozorovatelné lze měřit zároveň

$$x \bowtie y \quad \Rightarrow \quad \left[\hat{\Phi}(x), \hat{\Phi}(y)\right] = 0$$



Lokalita (kauzalita) teorie

- prostorupodobně lokalizovatelné pozorovatelné lze měřit zároveň

$$\mathcal{U} \bowtie \mathcal{V} \quad \Rightarrow \quad [\hat{A}_{\mathcal{U}}, \hat{B}_{\mathcal{V}}] = 0$$

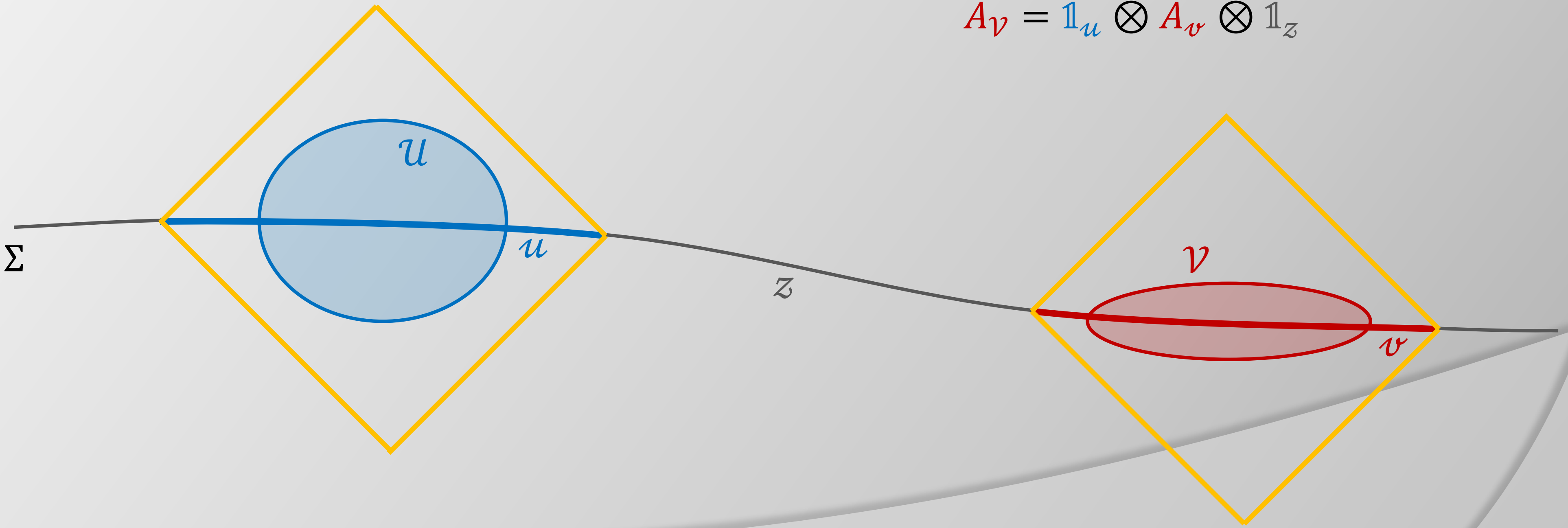
  - $\hat{A}_{\mathcal{U}}$ vybudované pouze z $\hat{\Phi}(x)$ s $x \in \mathcal{U}$
  - $\hat{B}_{\mathcal{V}}$ vybudované pouze z $\hat{\Phi}(x)$ s $x \in \mathcal{V}$

Separovatelnost

- nezávislá počáteční data v jeden okamžik (na Cauchyho nadploše) definují oddělitelné podsystémy

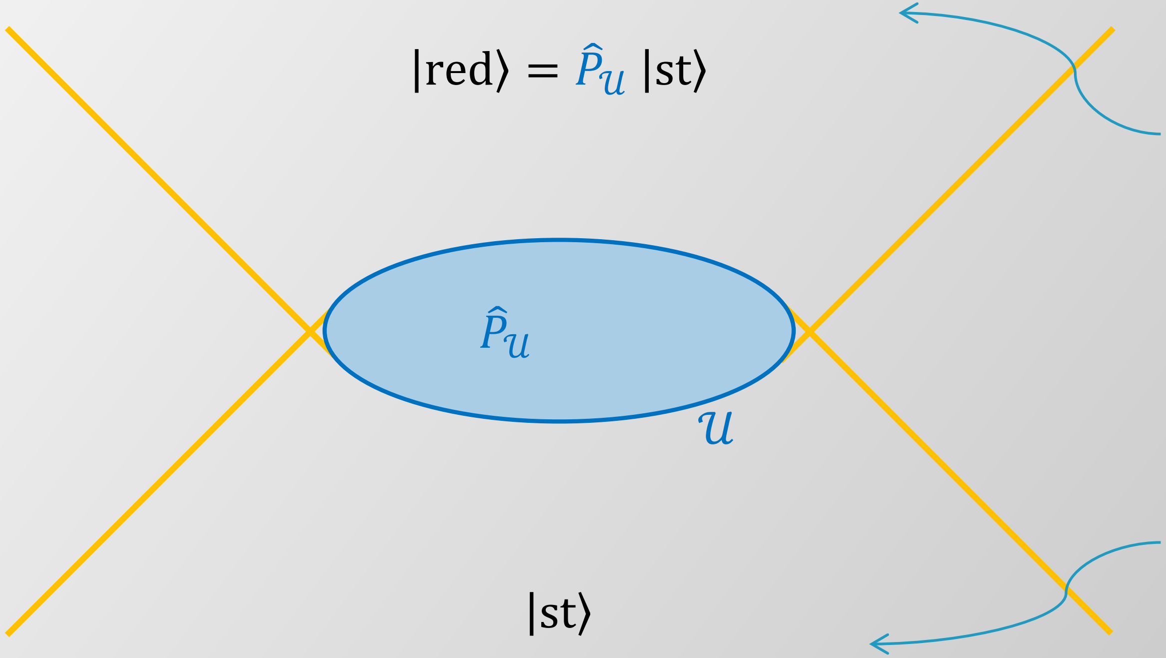
$$\Sigma = \mathcal{u} \cup \mathcal{v} \cup \mathcal{z} \qquad \mathcal{H} = \mathcal{H}_{\mathcal{u}} \otimes \mathcal{H}_{\mathcal{v}} \otimes \mathcal{H}_{\mathcal{z}}$$

$$\hat{A}_{\mathcal{U}} = \hat{A}_{\mathcal{u}} \otimes \hat{\mathbb{1}}_{\mathcal{v}} \otimes \hat{\mathbb{1}}_{\mathcal{z}}$$
$$\hat{A}_{\mathcal{V}} = \hat{\mathbb{1}}_{\mathcal{u}} \otimes \hat{A}_{\mathcal{v}} \otimes \hat{\mathbb{1}}_{\mathcal{z}}$$



Lokalizace kolapsu

- měření pozorovatelné v $\mathcal{U}$
  - $\hat{P}_{\mathcal{U}}$ – projektor odpovídající výsledku



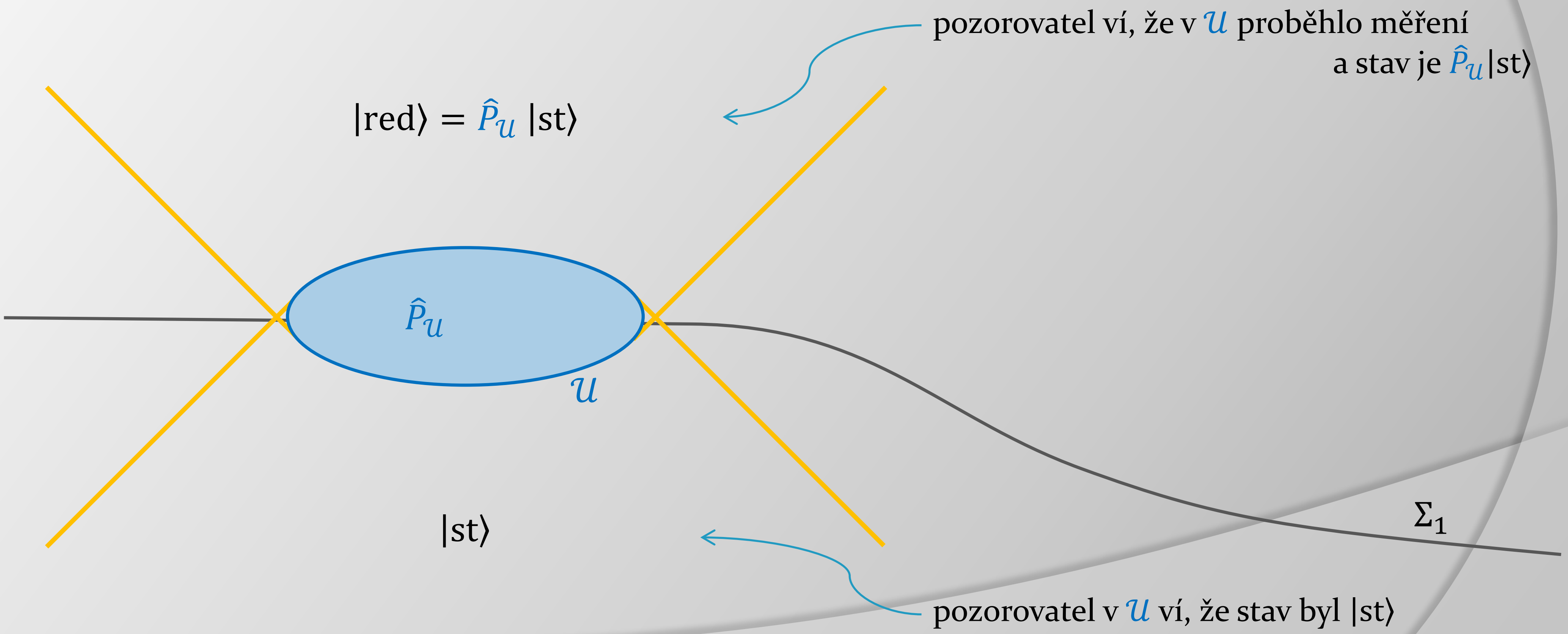
pozorovatel ví, že v $\mathcal{U}$ proběhlo měření a stav je $\hat{P}_{\mathcal{U}}|\mathrm{st}\rangle$

kde je hranice kolapsu ???

pozorovatel v $\mathcal{U}$ ví, že stav byl $|\mathrm{st}\rangle$

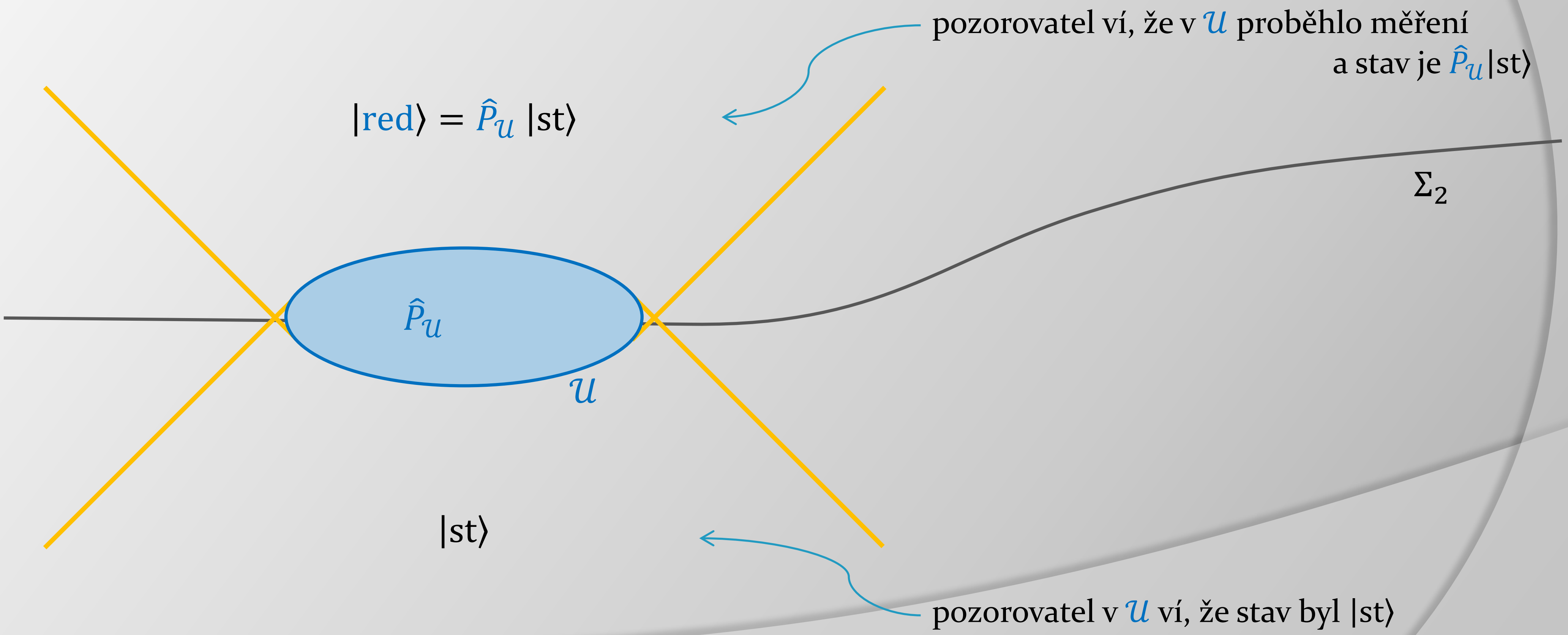
Lokalizace kolapsu

- kolaps stavu na nadploše Σ_1



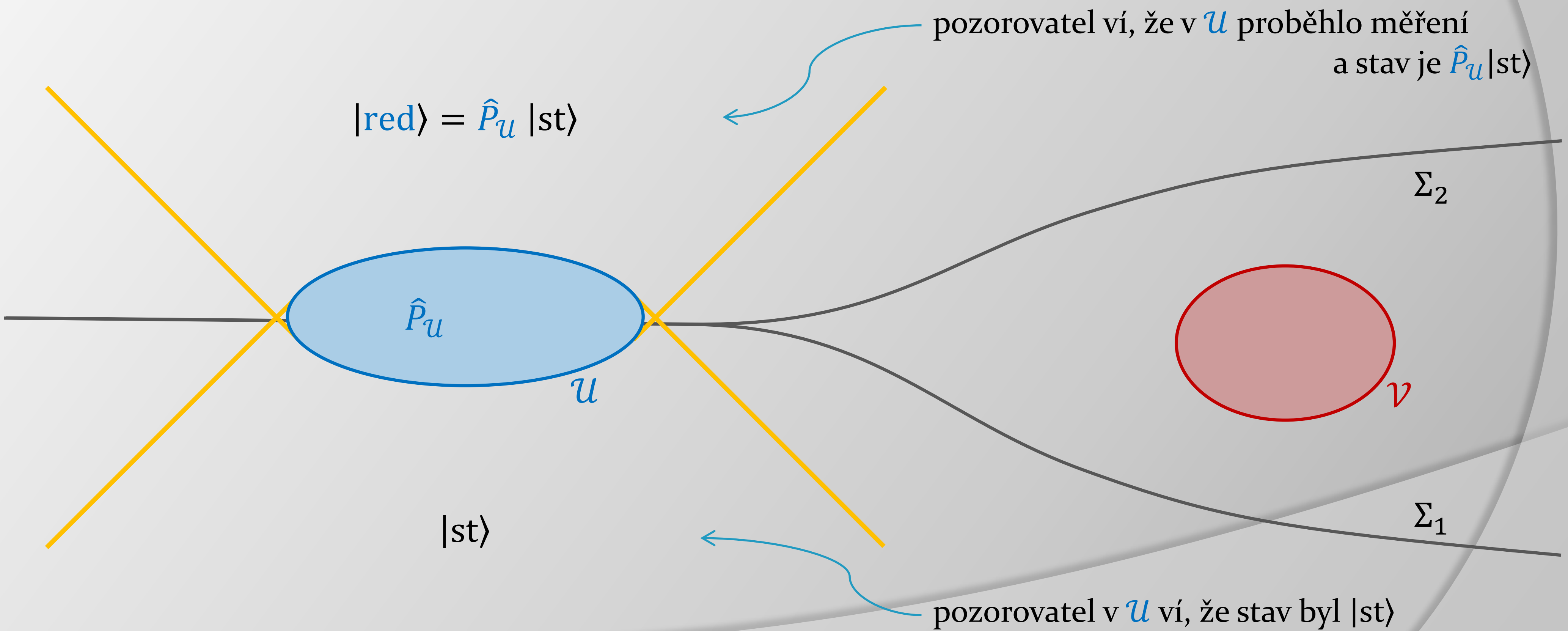
Lokalizace kolapsu

- kolaps stavu na nadploše Σ_2



Lokalizace kolapsu

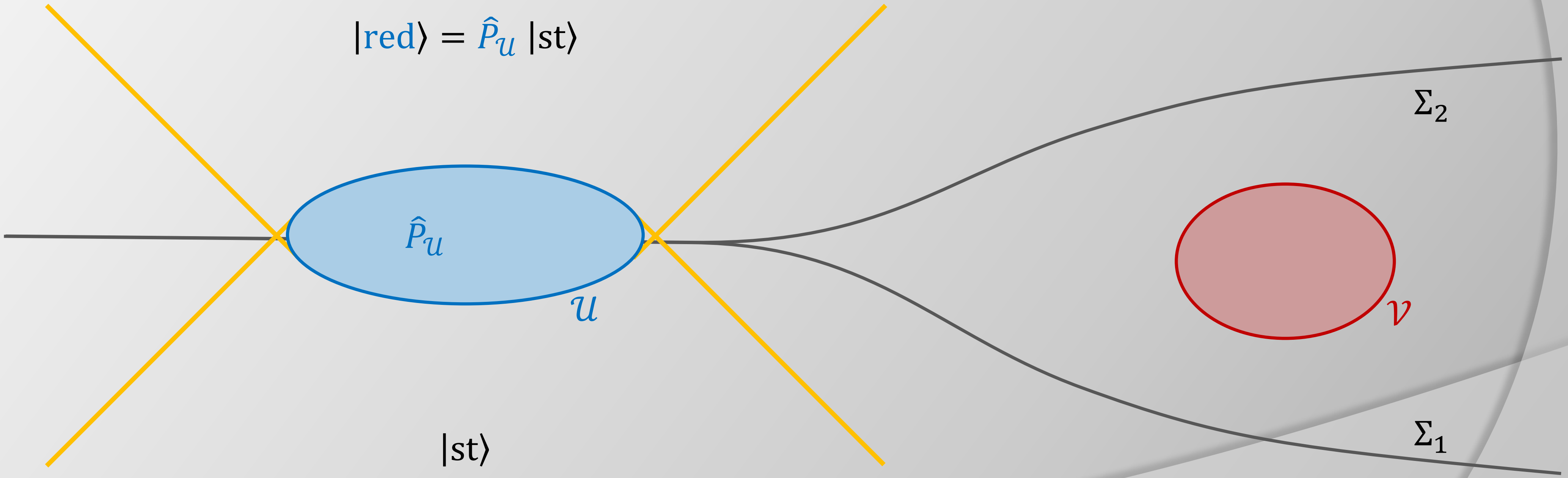
- pozorovatel ve $\mathcal{V}$ může být jak před kolapsem, tak po kolapsu !!???



Lokalizace kolapsu

- pozorovatel ve $\mathcal{V}$ nepozná, zda došlo ke kolapsu!

$$\hat{D}_{\mathcal{V}} = \left\{ \begin{array}{ll} \Sigma_2: & \hat{D}_{\mathrm{st}}\Big|_{\mathcal{V}} \\ \Sigma_1: & \hat{D}_{\mathrm{red}}\Big|_{\mathcal{V}} \end{array} \right\} = \text{stejné !!!}$$

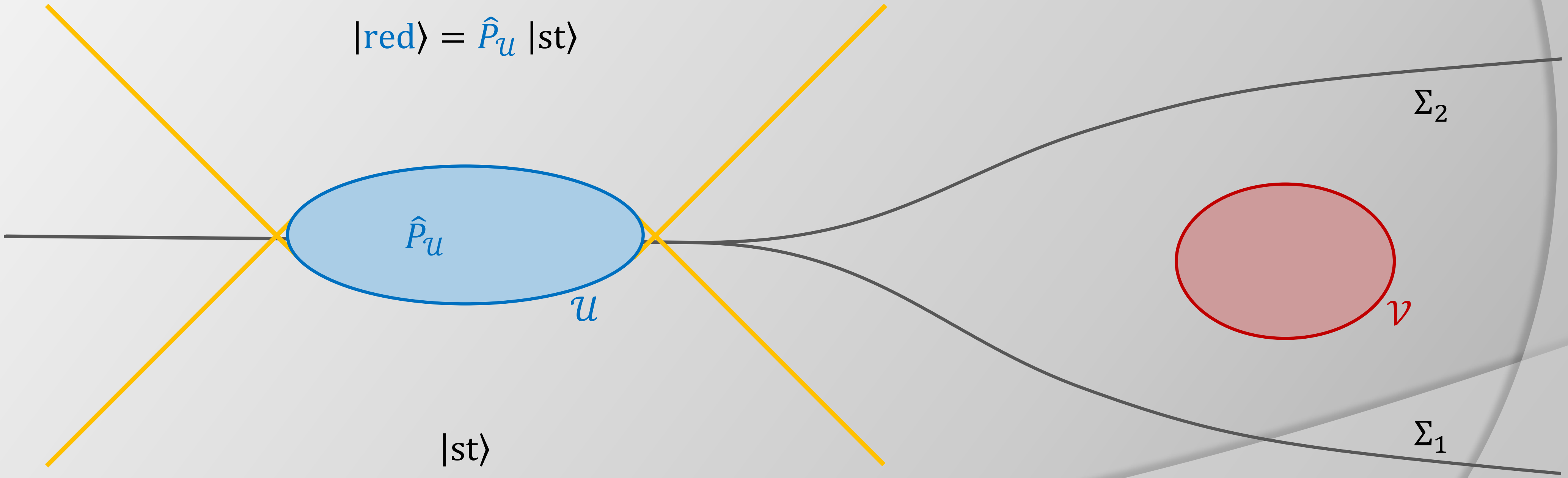


Lokalizace kolapsu

$\hat{P}_{\mathcal{U}} = \hat{P}_{\mathcal{u}} \otimes \hat{\mathbb{1}}_{\mathcal{v}} \otimes \hat{\mathbb{1}}_{z} \quad \Rightarrow \quad \hat{D}_{\text{st}}|_{\mathcal{v}} = \hat{D}_{\text{red}}|_{\mathcal{v}}$

- pozorovatel ve $\mathcal{V}$ nepozná, zda došlo ke kolapsu!

$$\hat{D}_{\mathcal{v}} = \left\{ \begin{array}{ll} \Sigma_2: & \hat{D}_{\text{st}}\Big|_{\mathcal{v}} \\ \Sigma_1: & \hat{D}_{\text{red}}\Big|_{\mathcal{v}} \end{array} \right\} = \text{stejné !!!}$$

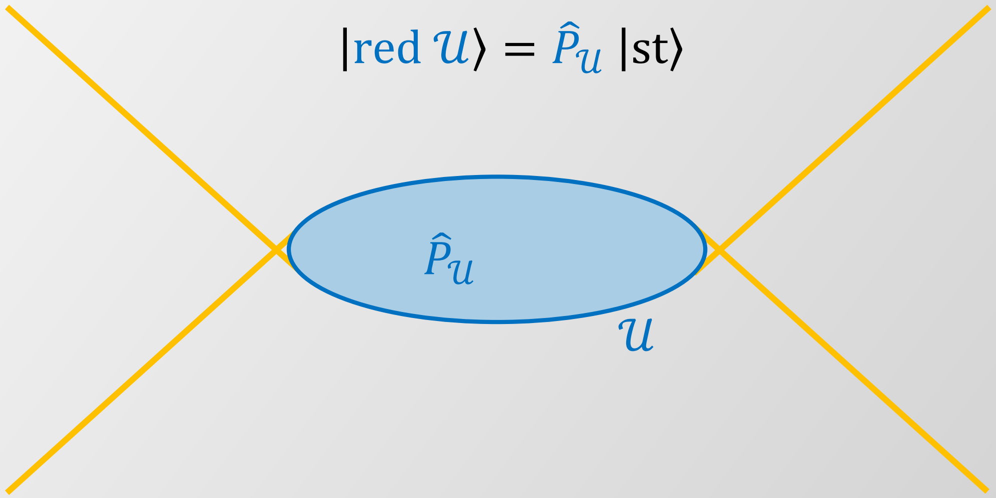


Dvě nezávislá měření

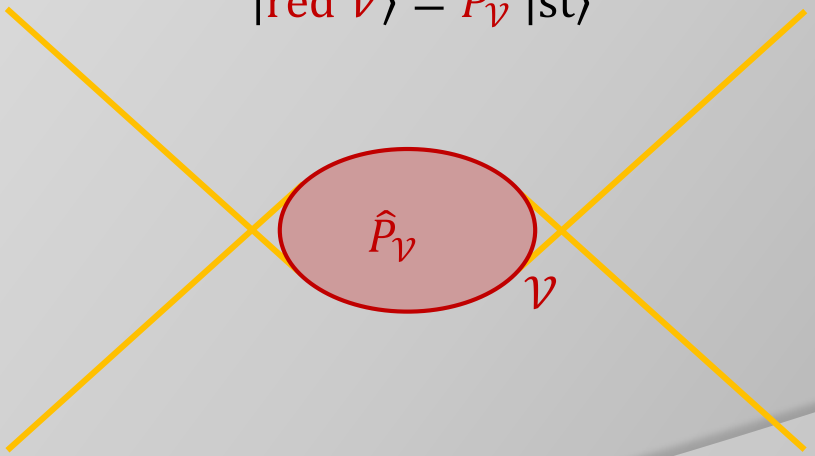
- $\hat{P}_{\mathcal{U}}$ – projektor odpovídající výsledku měření v $\mathcal{U}$
- $\hat{P}_{\mathcal{V}}$ – projektor odpovídající výsledku měření v $\mathcal{V}$

$[\hat{P}_{\mathcal{U}}, \hat{P}_{\mathcal{V}}] = 0$ lze měřit ‚současně‘

$|\mathrm{red}\ \mathcal{U}\rangle = \hat{P}_{\mathcal{U}}\,|\mathrm{st}\rangle$



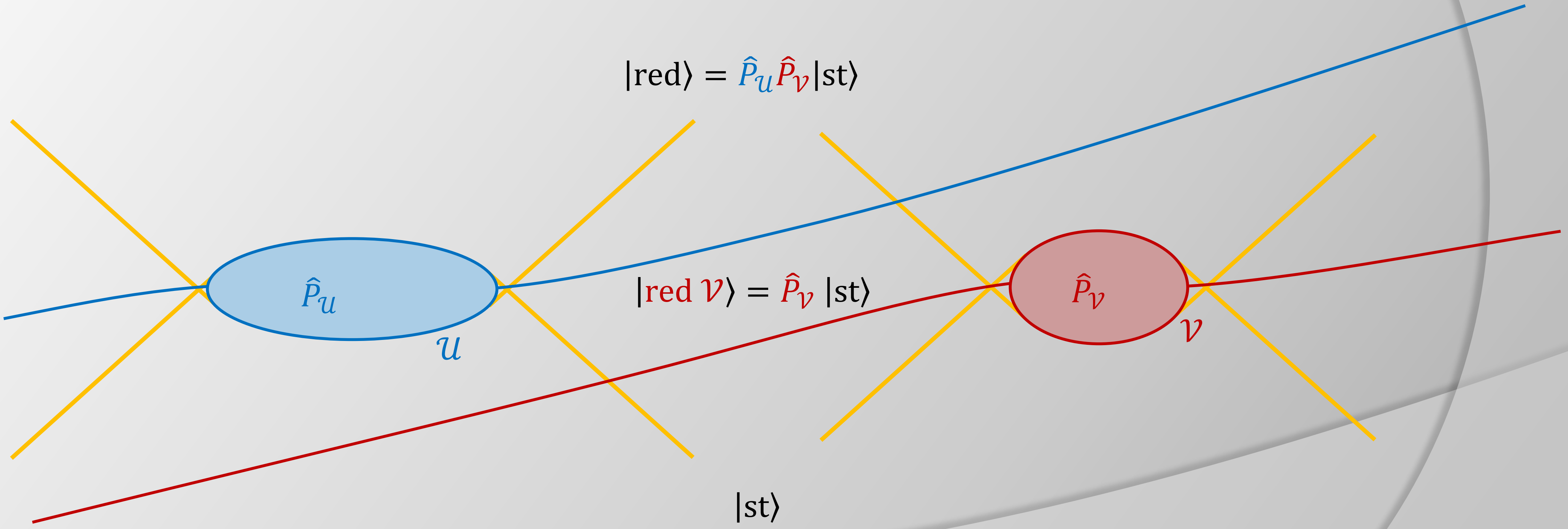
$|\mathrm{red}\ \mathcal{V}\rangle = \hat{P}_{\mathcal{V}}\,|\mathrm{st}\rangle$



$|\mathrm{st}\rangle$

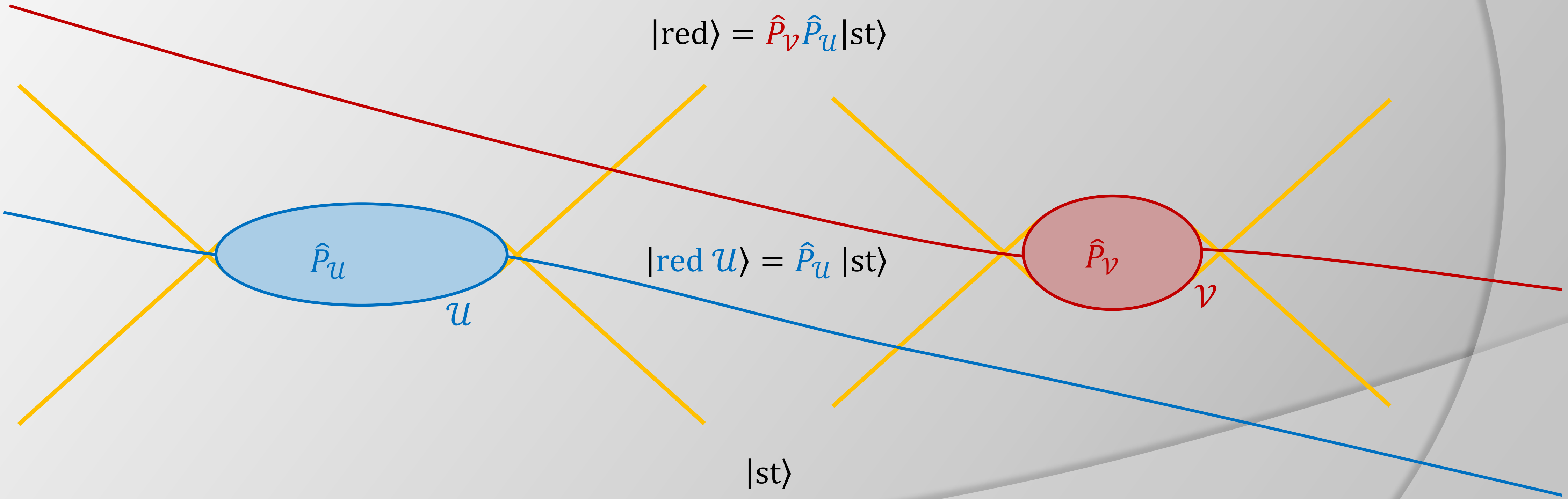
Dvě nezávislá měření

- kolaps lze volit různými způsoby



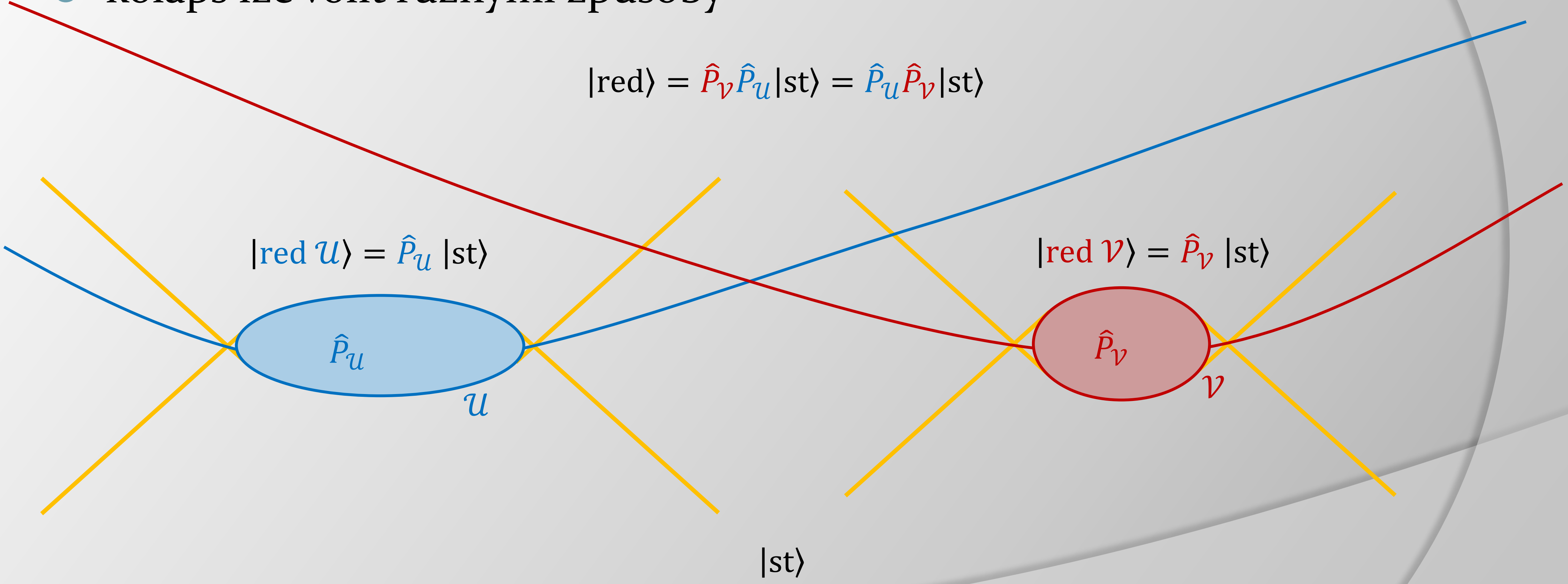
Dvě nezávislá měření

- kolaps lze volit různými způsoby



Dvě nezávislá měření

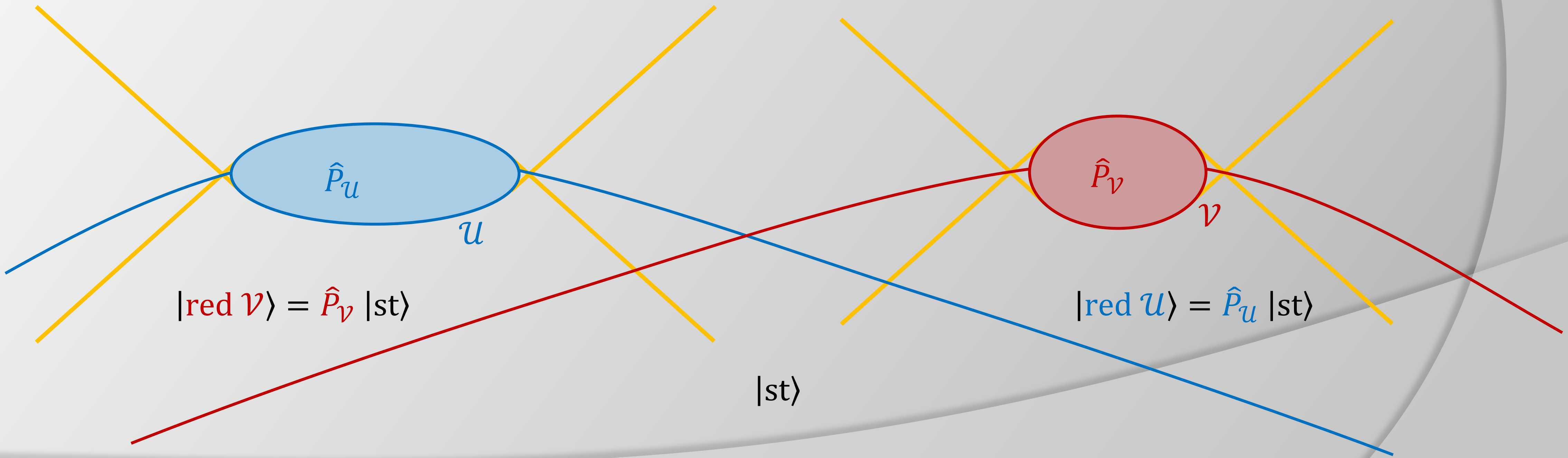
- kolaps lze volit různými způsoby



Dvě nezávislá měření

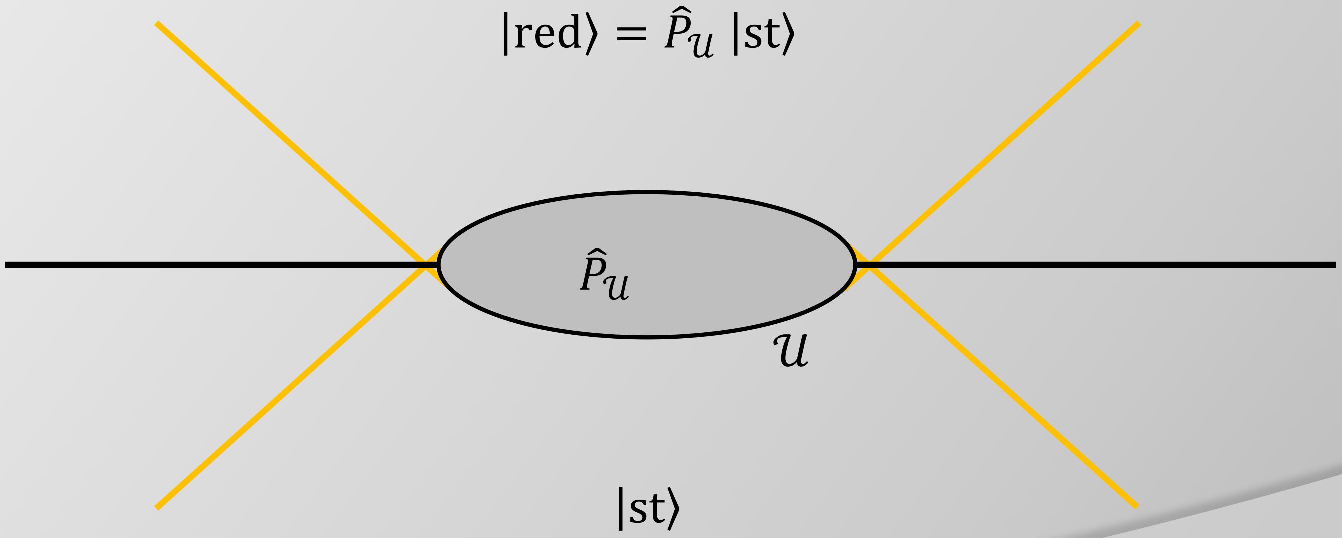
- kolaps lze volit různými způsoby

$$|\mathrm{red}\rangle = \hat{P}_{\mathcal{V}}\hat{P}_{\mathcal{U}}|\mathrm{st}\rangle = \hat{P}_{\mathcal{U}}\hat{P}_{\mathcal{V}}|\mathrm{st}\rangle$$



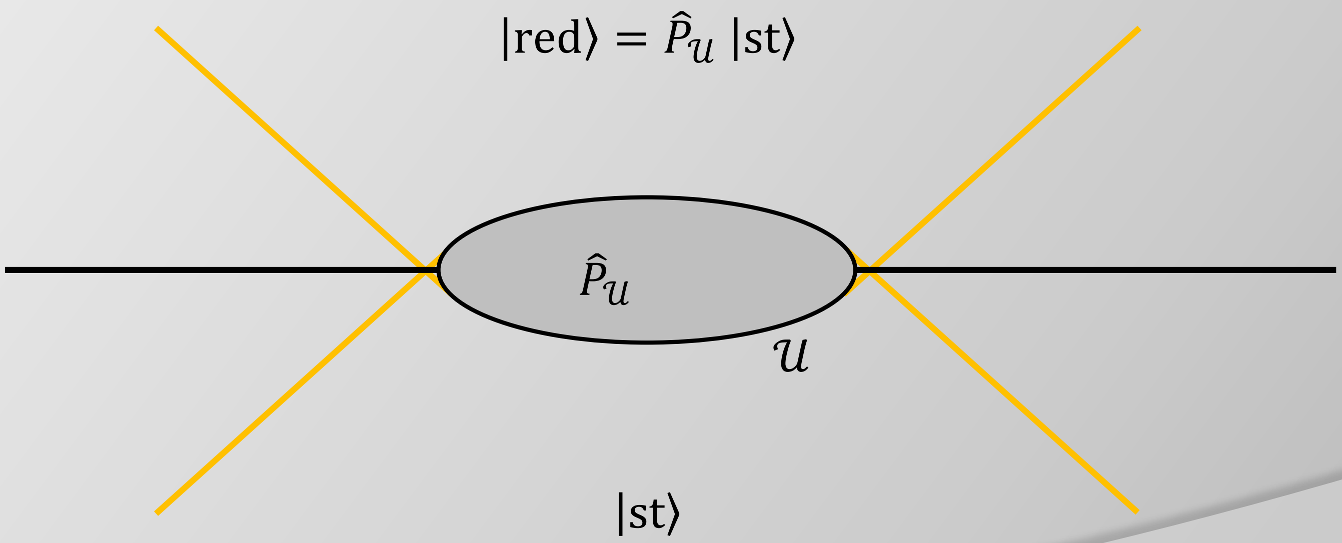
Speciální volby

- okamžité šíření



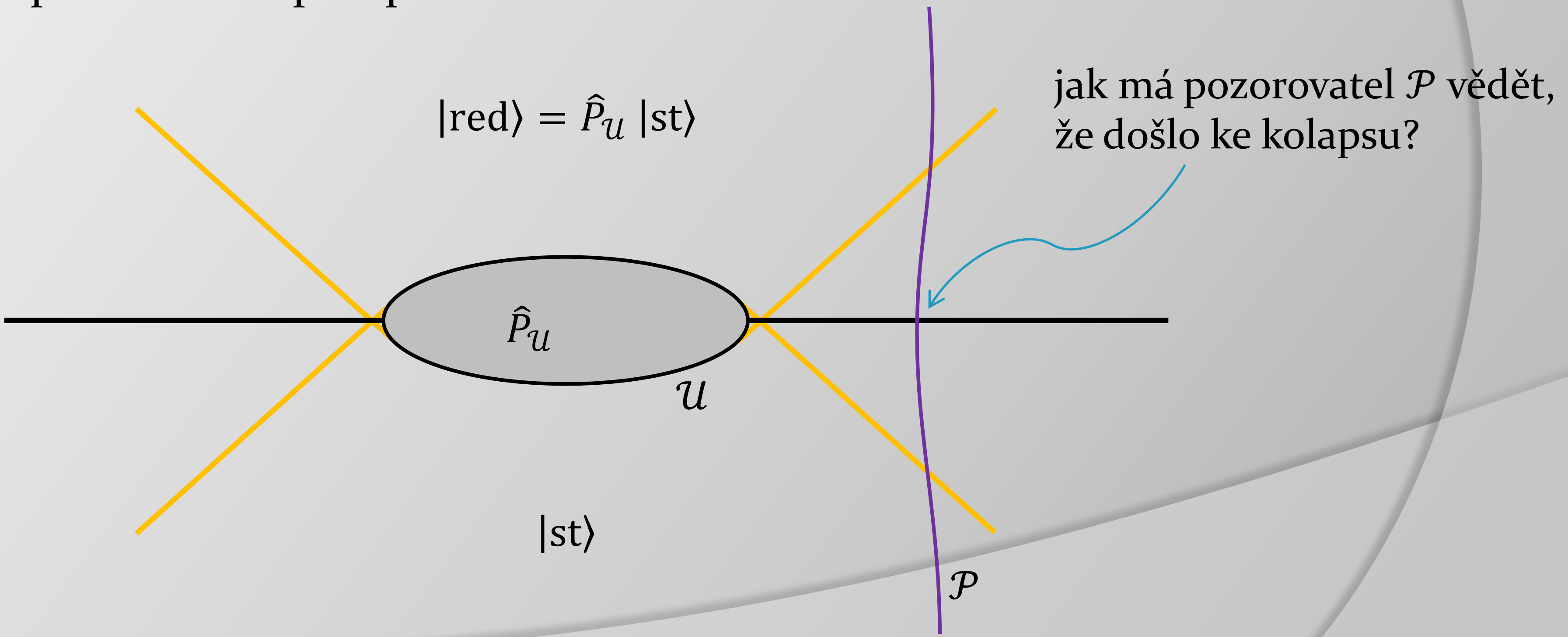
Speciální volby

- okamžité šíření kolapsu
  - současnost není kanonická – jaká soustava?



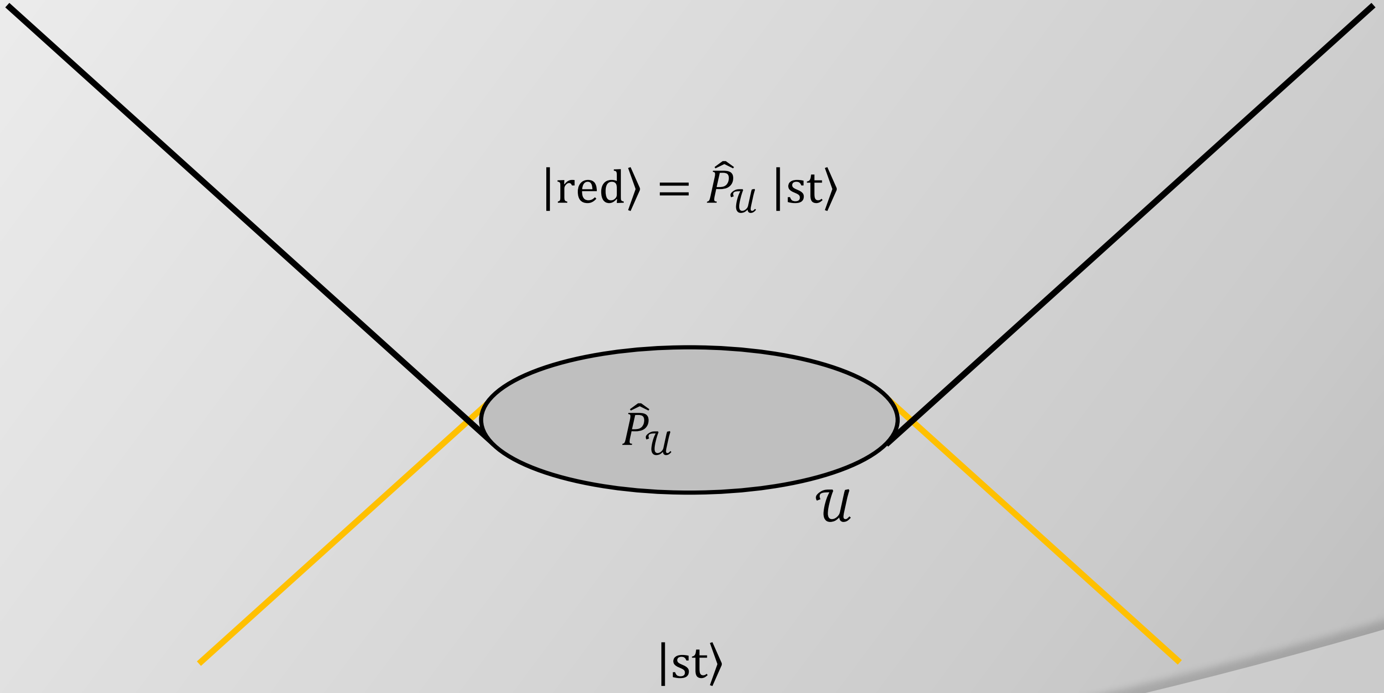
Speciální volby

- okamžité šíření kolapsu
  - současnost není kanonická – jaká soustava?
  - nepoužitelné pro kauzální předpovědi



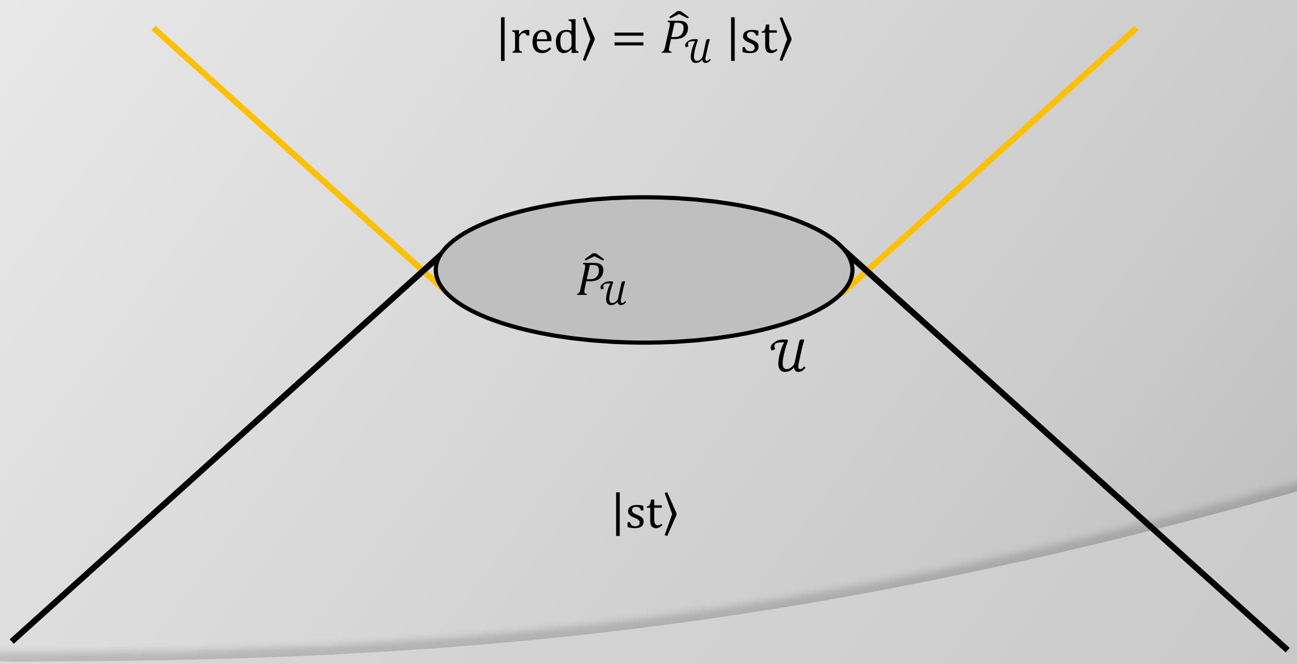
Speciální volby

- retardované šíření kolapsu (šíření po budoucím světelném kuželu)



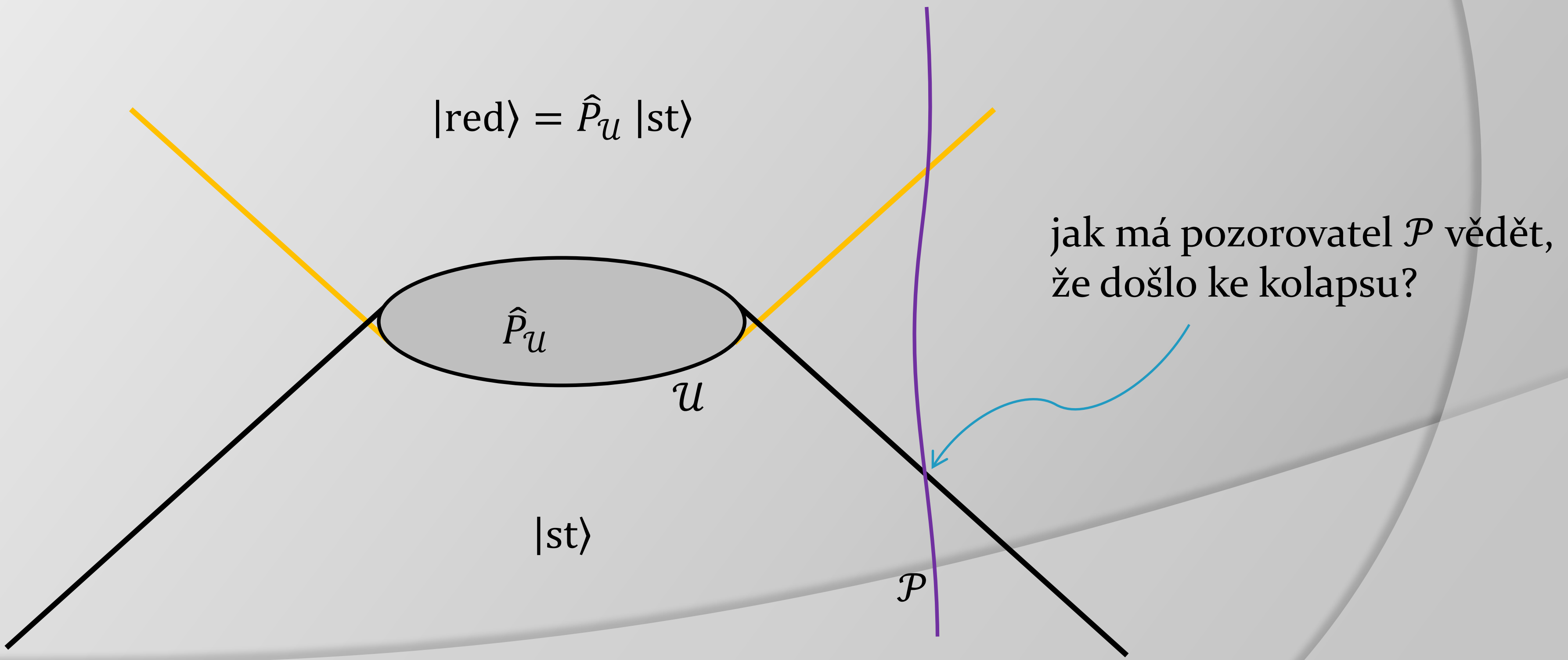
Speciální volby

- advancované šíření kolapsu (šíření do minulosti)



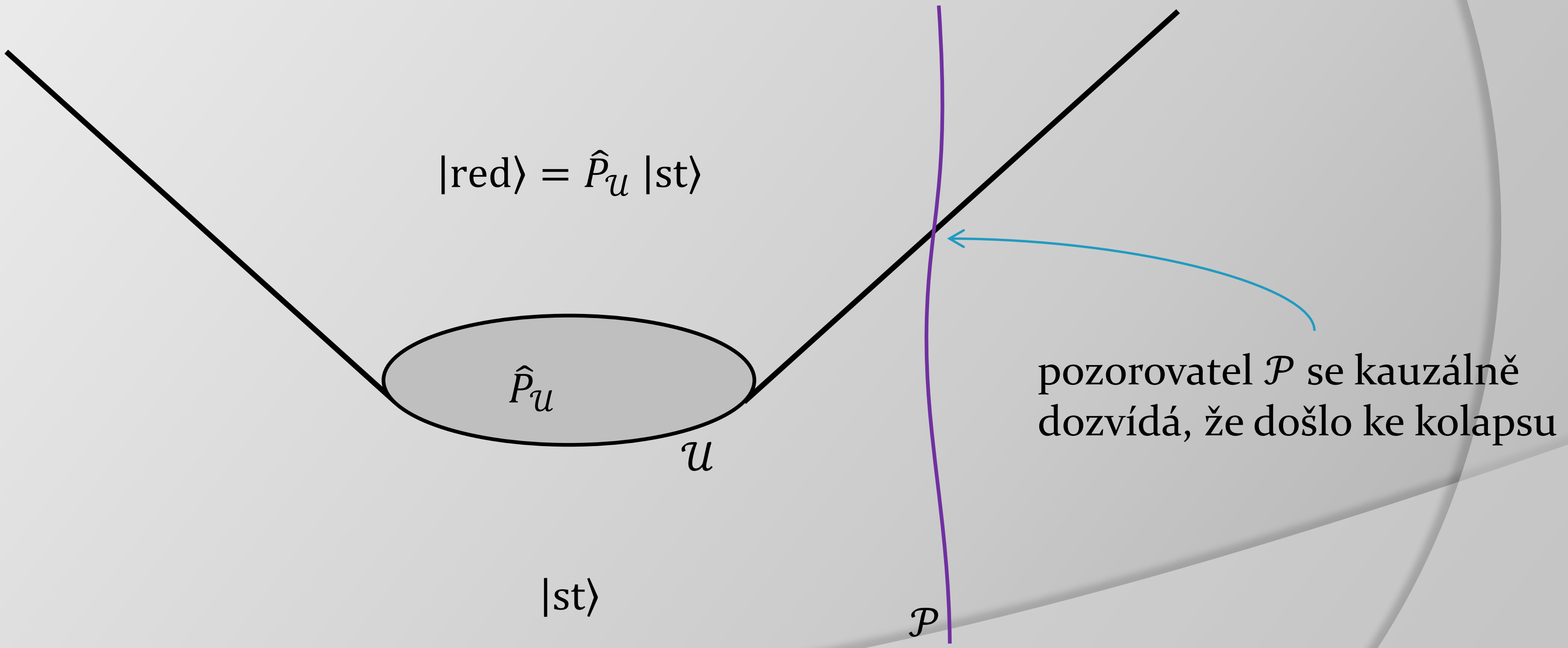
Speciální volby

- advancované šíření kolapsu (šíření do minulosti)
    - nepoužitelné pro kauzální předpovědi



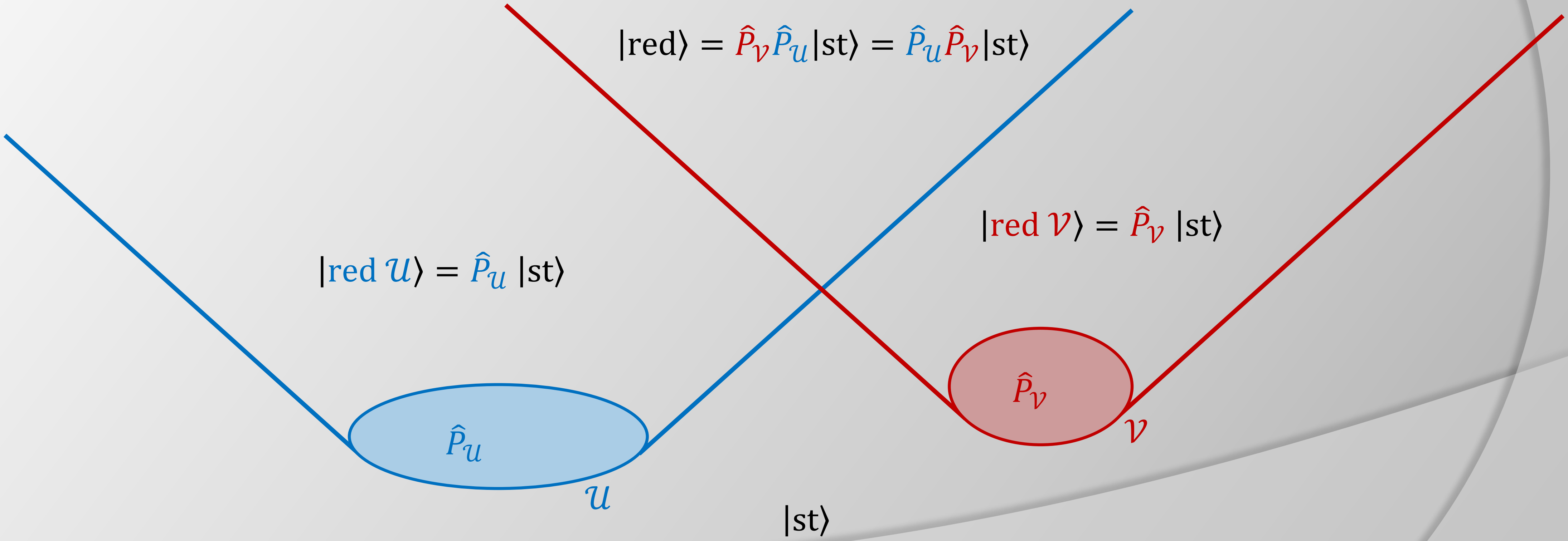
Kauzální šíření kolapsu

- retardované šíření (šíření po budoucím světelném kuželu)
  - umožňuje kauzální identifikaci kolapsu



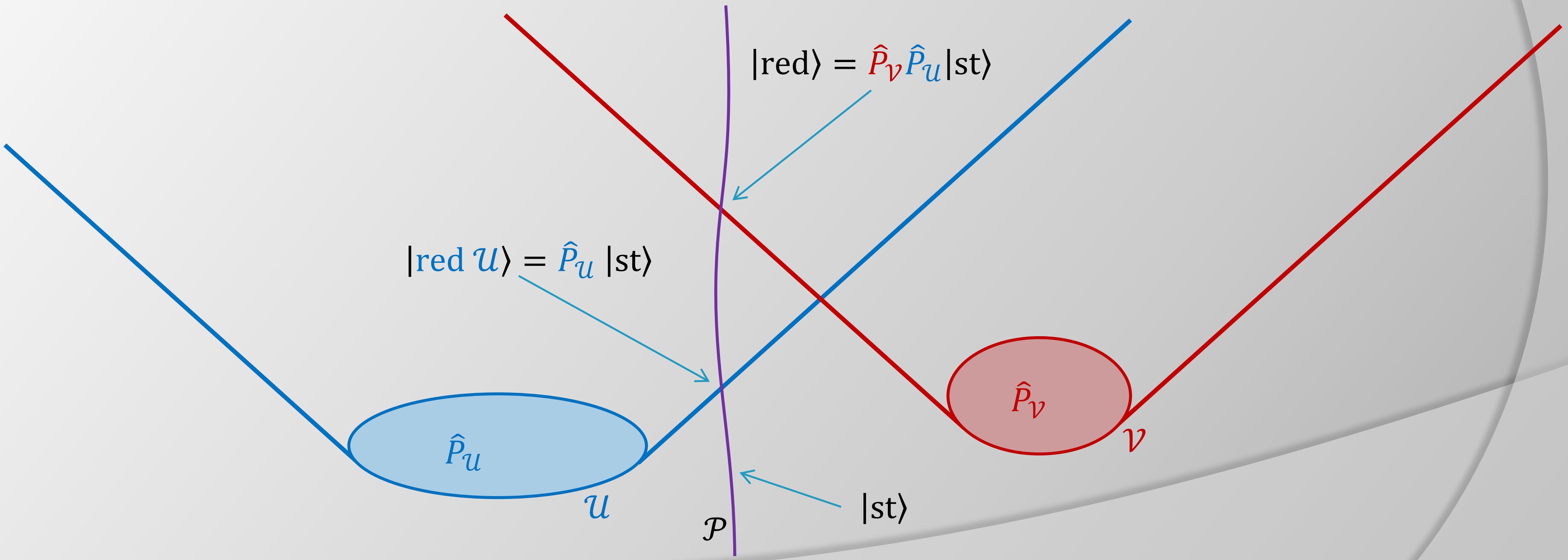
Kauzální šíření kolapsu

- dvě nezávislá měření $\left[\hat{P}_{\mathcal{U}}, \hat{P}_{\mathcal{V}}\right] = 0$
  - různí pozorovatelé mohou vnímat kolaps v různém pořadí



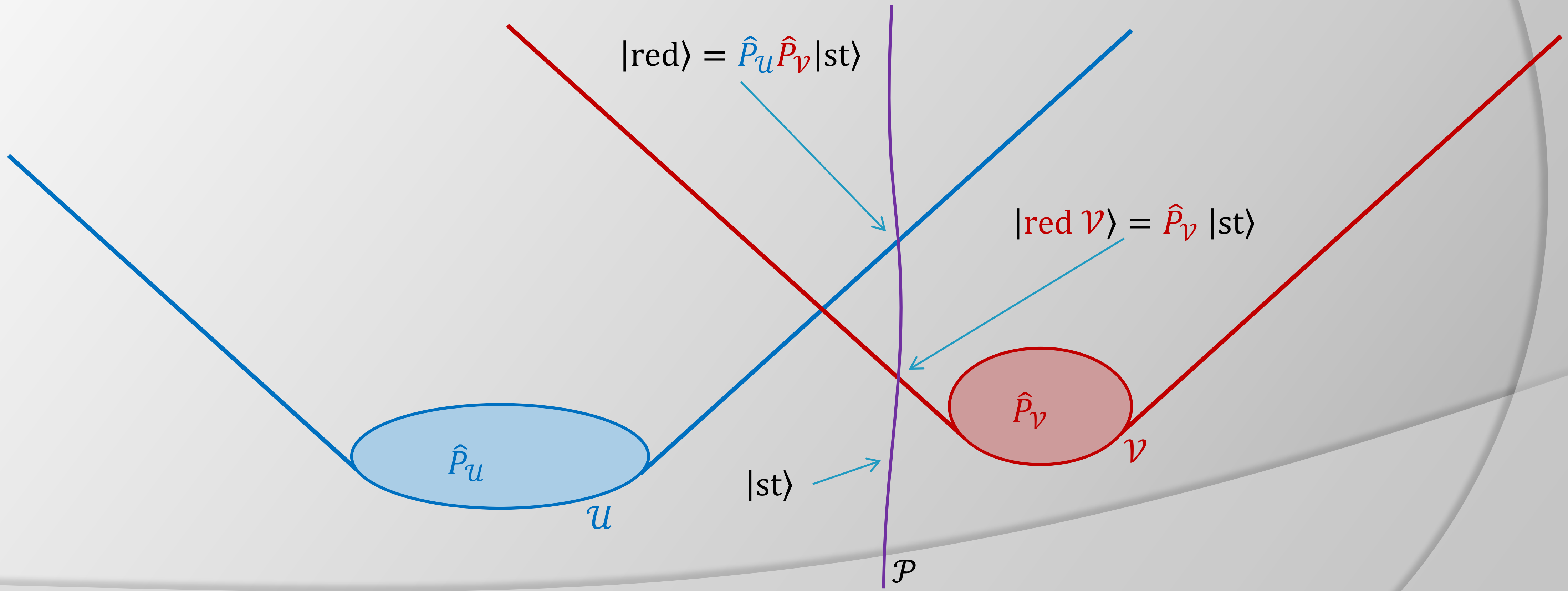
Kauzální šíření kolapsu

- dvě nezávislá měření $\left[\hat{P}_{\mathcal{U}}, \hat{P}_{\mathcal{V}}\right] = 0$
  - různí pozorovatelé mohou vnímat kolaps v různém pořadí



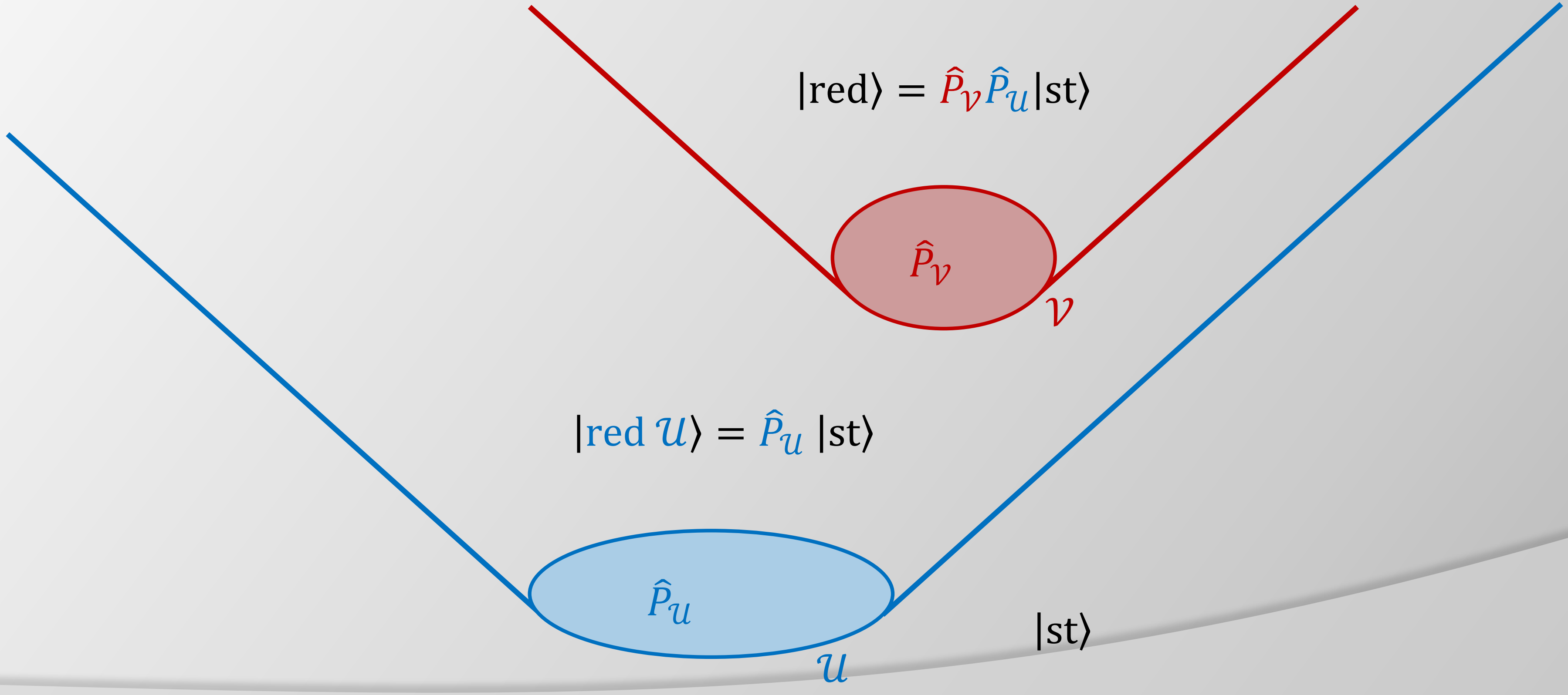
Kauzální šíření kolapsu

- dvě nezávislá měření $\qquad [\hat{P}_{\mathcal{U}}, \hat{P}_{\mathcal{V}}] = 0$
  - různí pozorovatelé mohou vnímat kolaps v různém pořadí



Kauzální šíření kolapsu

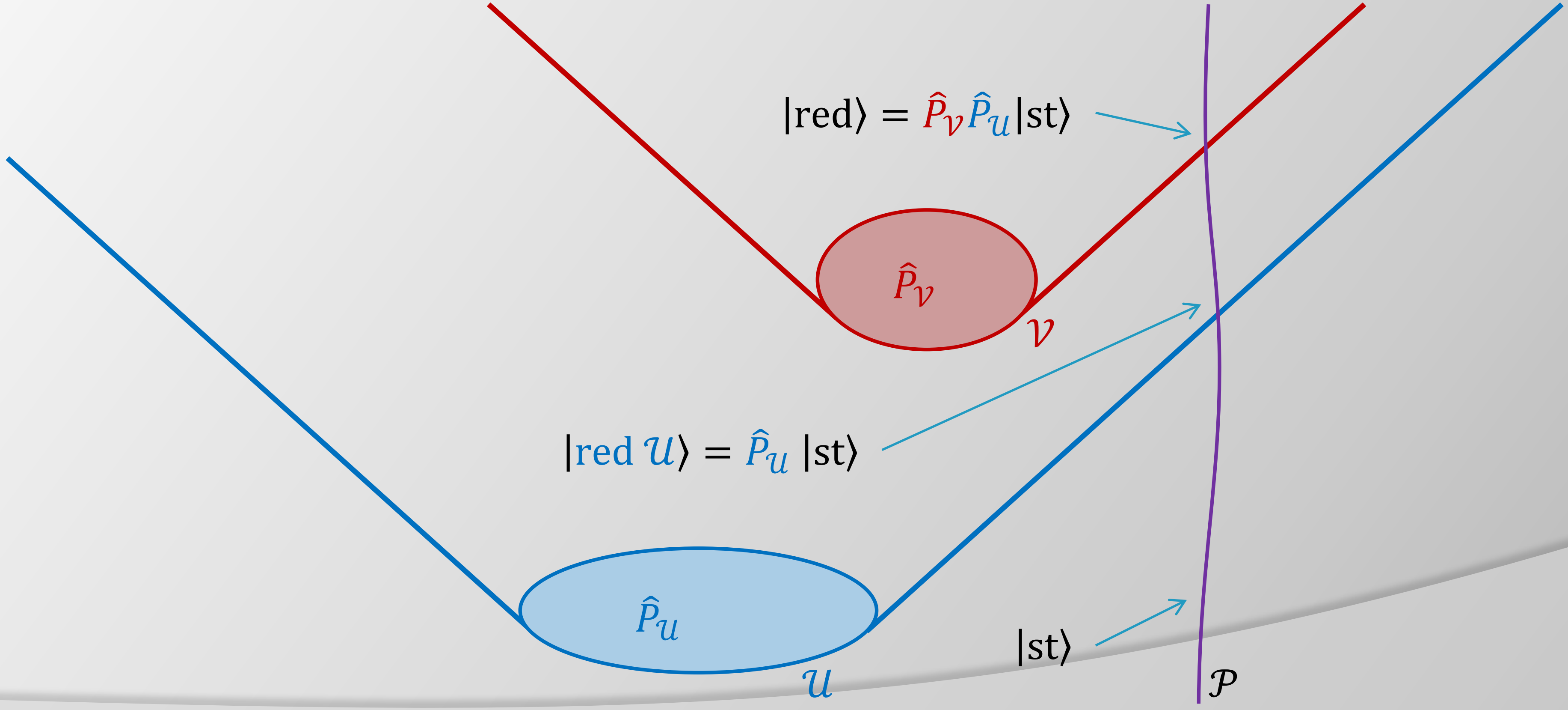
- dvě závislá (následná) měření $\left[\hat{P}_{\mathcal{U}}, \hat{P}_{\mathcal{V}}\right] \neq 0$



Kauzální šíření kolapsu

- dvě závislá (následná) měření $\quad [\hat{P}_{\mathcal{U}}, \hat{P}_{\mathcal{V}}] \neq 0$

  pro všechny pozorovatele stejné pořadí kolapsů



EPR konfigurace

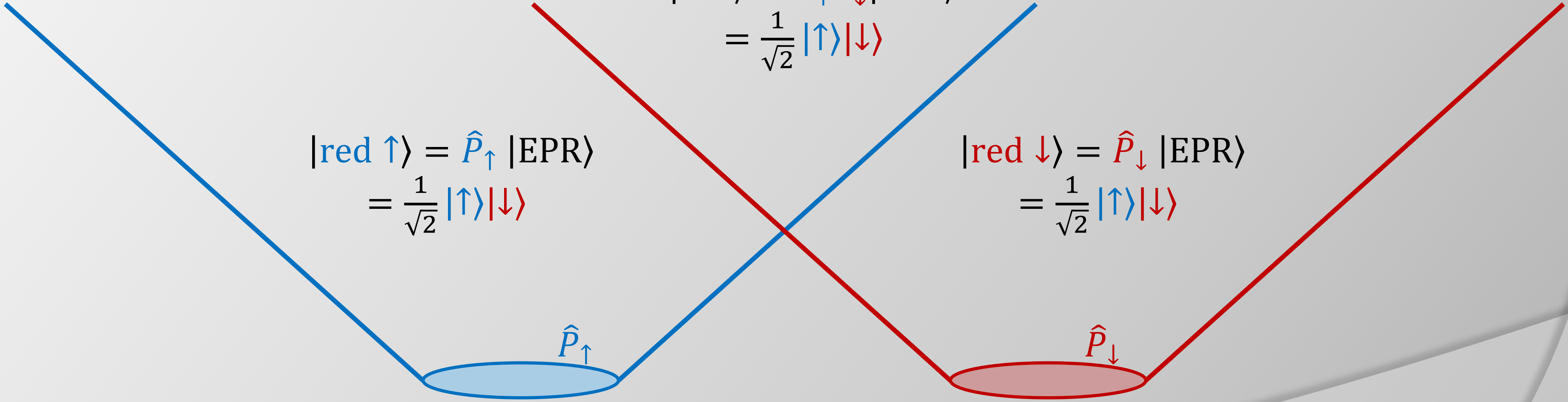
měření nalevo ↕ s výsledkem ↑ měření napravo ↕ s výsledkem ↓

$$\left[\hat{P}_{\uparrow}, \hat{P}_{\downarrow}\right] = 0$$

$$|\mathrm{red}\rangle = \hat{P}_{\uparrow}\hat{P}_{\downarrow}|\mathrm{EPR}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}|\uparrow\rangle|\downarrow\rangle$$

$$|\mathrm{red}\uparrow\rangle = \hat{P}_{\uparrow}\,|\mathrm{EPR}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}|\uparrow\rangle|\downarrow\rangle$$

$$|\mathrm{red}\downarrow\rangle = \hat{P}_{\downarrow}\,|\mathrm{EPR}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}|\uparrow\rangle|\downarrow\rangle$$



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

EPR konfigurace

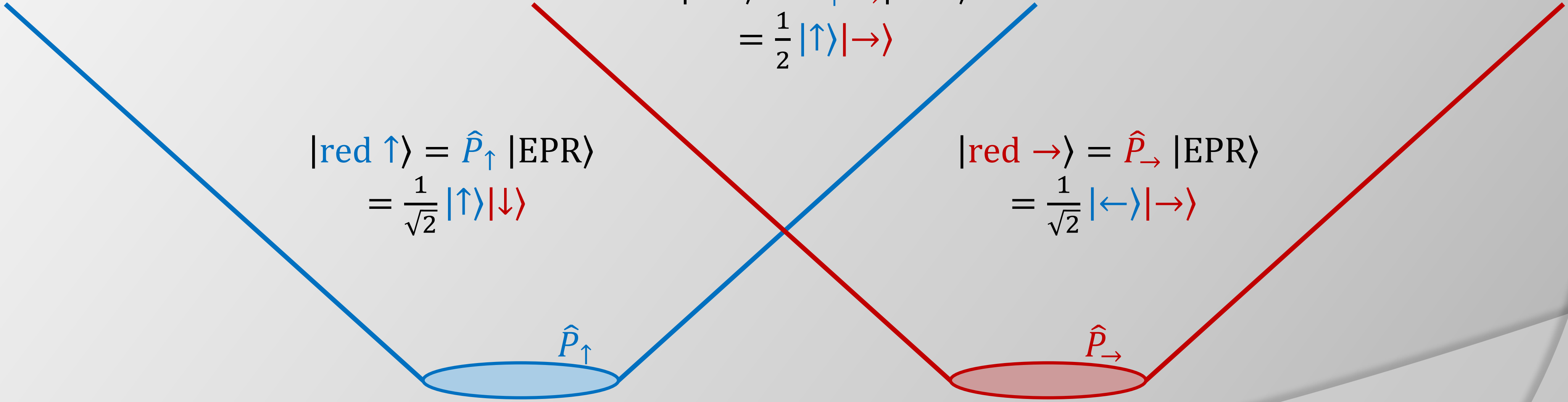
měření nalevo ↕ s výsledkem ↑ měření napravo ↔ s výsledkem →

$$\left[\hat{P}_\uparrow, \hat{P}_\rightarrow\right] = 0$$

$$|\mathrm{red}\rangle = \hat{P}_\uparrow \hat{P}_\rightarrow |\mathrm{EPR}\rangle = \frac{1}{2}|\uparrow\rangle|\rightarrow\rangle$$

$$|\mathrm{red}\uparrow\rangle = \hat{P}_\uparrow |\mathrm{EPR}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}|\uparrow\rangle|\downarrow\rangle$$

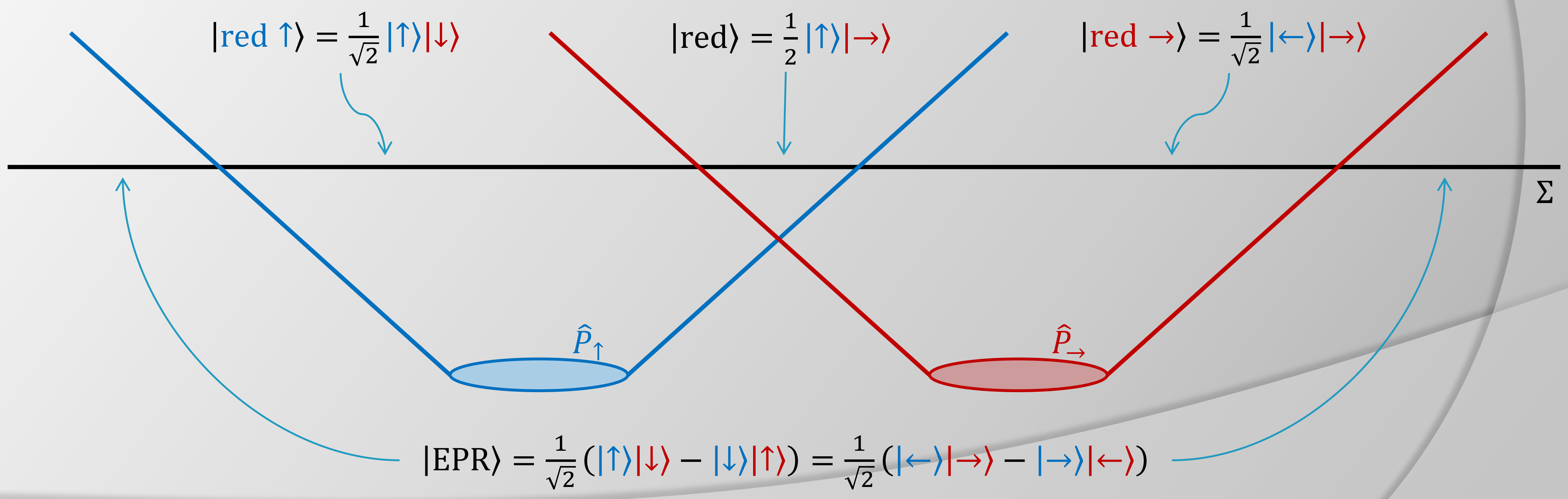
$$|\mathrm{red}\rightarrow\rangle = \hat{P}_\rightarrow |\mathrm{EPR}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}|\leftarrow\rangle|\rightarrow\rangle$$



$$|\mathrm{EPR}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(|\uparrow\rangle|\downarrow\rangle - |\downarrow\rangle|\uparrow\rangle\right) = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(|\leftarrow\rangle|\rightarrow\rangle - |\rightarrow\rangle|\leftarrow\rangle\right)$$

Realita stavu?

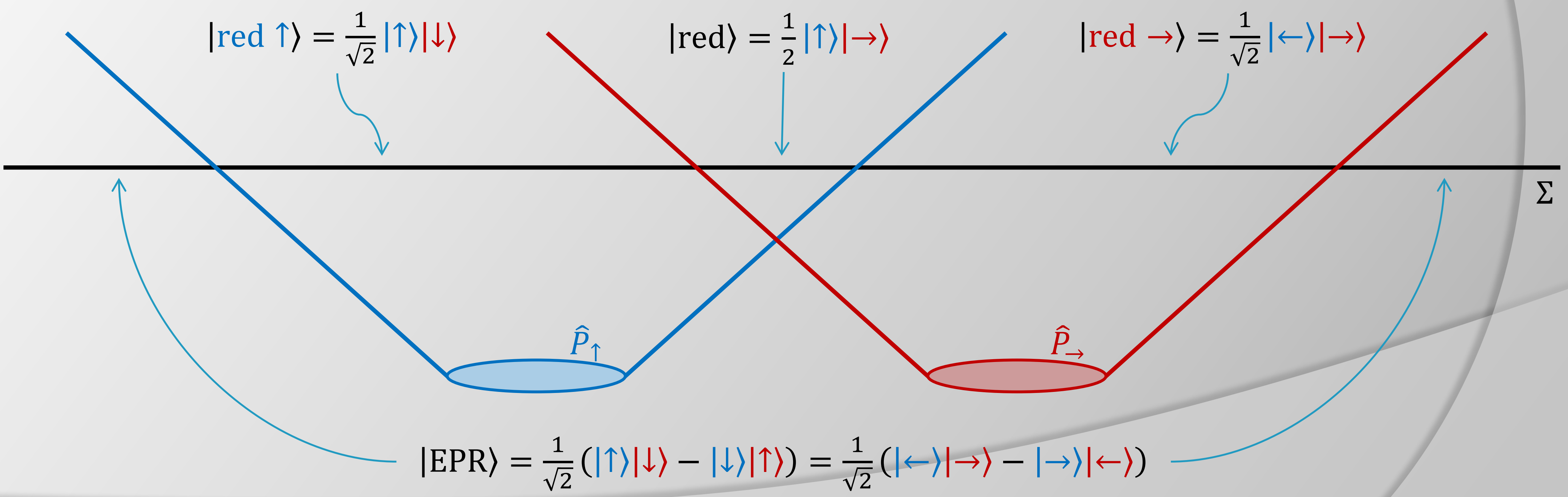
V jakém stavu je celý systém v okamžik Σ?



Realita stavu?

V jakém stavu je celý systém v okamžik Σ?

V různých částech Σ v různém stavu?

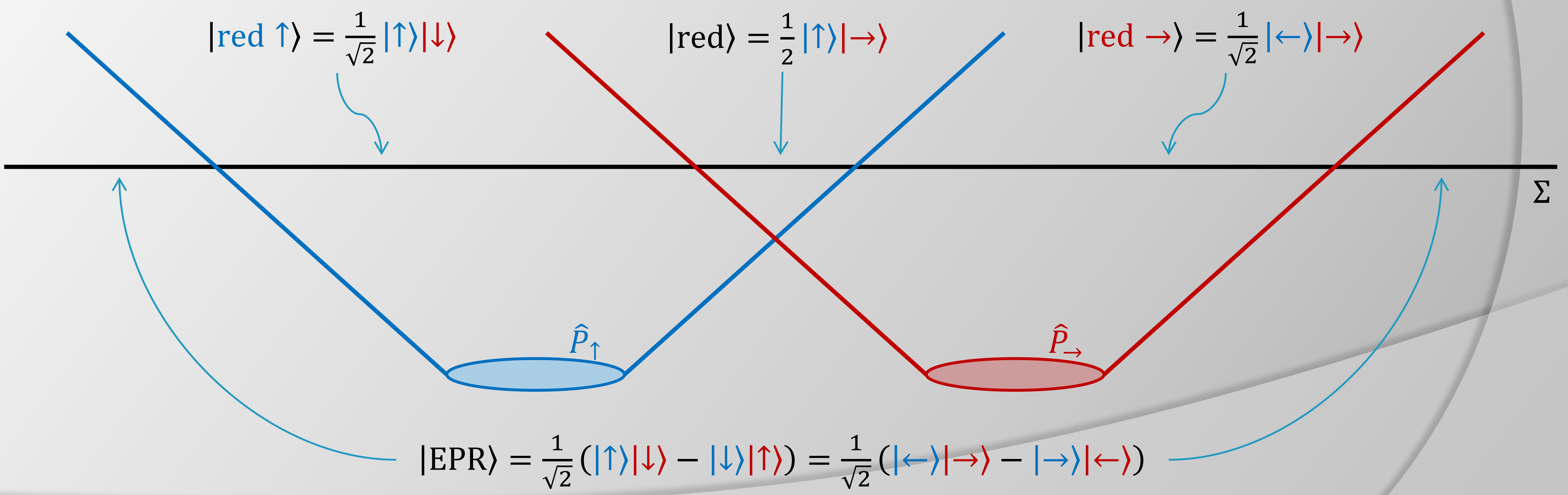


Realita stavu?

V jakém stavu je celý systém v okamžik Σ?

V různých částech Σ v různém stavu?

NE!

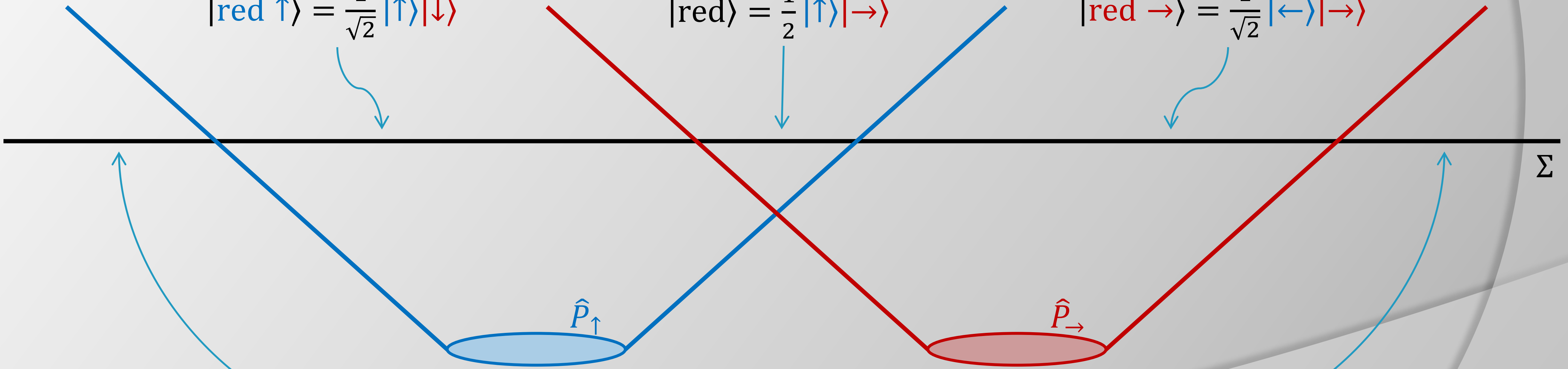


Realita stavu?

V jakém stavu je celý systém v okamžik Σ?

všechny 4 stavy se týkají stavu celého systému
ne pouze oblasti, ve které je identifikujeme

$$|\text{red}\uparrow\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}|\uparrow\rangle|\downarrow\rangle \qquad |\text{red}\rangle = \frac{1}{2}|\uparrow\rangle|\rightarrow\rangle \qquad |\text{red}\rightarrow\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}|\leftarrow\rangle|\rightarrow\rangle$$

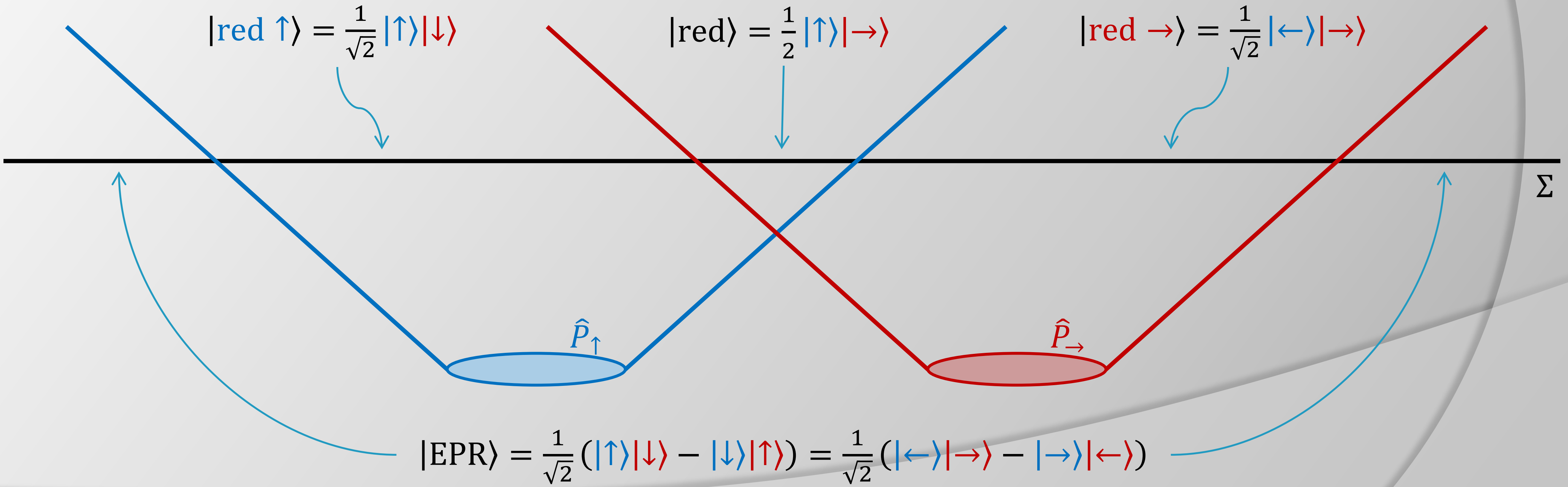


$$|\text{EPR}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(|\uparrow\rangle|\downarrow\rangle - |\downarrow\rangle|\uparrow\rangle\right) = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(|\leftarrow\rangle|\rightarrow\rangle - |\rightarrow\rangle|\leftarrow\rangle\right)$$

Realita stavu?

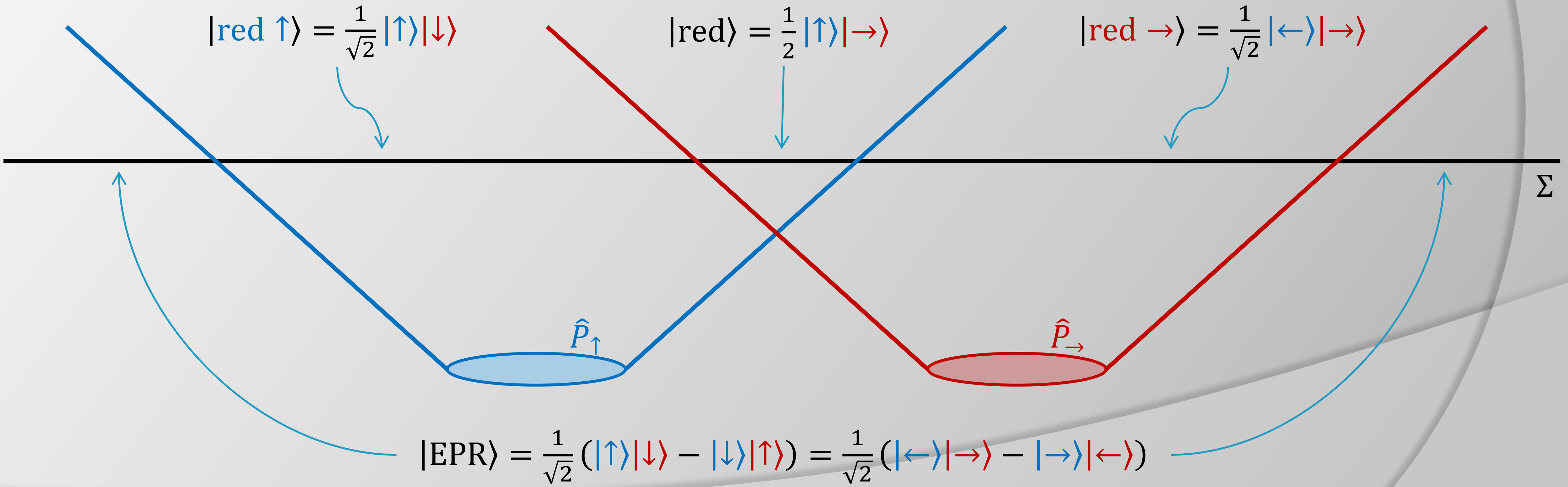
V jakém stavu je celý systém v okamžik Σ?

S nadplochou Σ nelze identifikovat jeden stav!



Realita stavu?

‚*kvantový stav*‘ nemůže reprezentovat ‚*stav přírody*‘



Problém lokálního realismu

- kolaps nemůže být chápán jako reálný lokální a kauzální proces
  - reálný = skutečná změna stavu přírody
  - kauzální = šíří se po budoucích světelných kuželech – lze
  - lokální = mění pouze lokální kvantity – nelze
- kolaps lze chápat jako kauzální lokální změnu naší znalosti přírody
  - kauzální = kolaps se uplatňuje, jsme-li kauzálně spojeni s měřením
  - lokální = kolaps nám říká, jaký stav v které oblasti prostoročasu používat
  - nelokalita = stav popisuje znalost celého systému, ne pouze lokální části

Morální ponaučení

Hřebíčky do rakve lokálního realismu

- existence více nezávislých pozorovatelů
- nemožnost rozložit systém na lokální části
- systém nelze lokálně modelovat

- kolaps stavu nemůže být chápán jako reálný lokální a kauzální proces

- kvantový stav nereprezentuje stav přírody

Jásot instrumentalismu

- popis závisí na pozorovateli
- možnost používat efektivní popis části
- systém lze lokálně predikovat

- kolaps stavu lze chápat jako kauzální lokální změnu naší znalosti přírody

- kvantový stav reprezentuje znalost přírody