

Kvantové zpracování informace s fotonovými páry

Karel Lemr

Společná laboratoř optiky UP Olomouc a FzÚ AVČR

web: <http://jointlab.upol.cz/lemr>

email: lemr@jointlab.upol.cz



- 1 Kvantové zpracování informace
- 2 Základní principy kvantové fyziky
- 3 Zdroje fotonových párů
- 4 Kvantové zpracování informace s fotony
- 5 Příklady kvantového zpracování informace

Obsah

- 1 Kvantové zpracování informace
- 2 Základní principy kvantové fyziky
- 3 Zdroje fotonových párů
- 4 Kvantové zpracování informace s fotony
- 5 Příklady kvantového zpracování informace

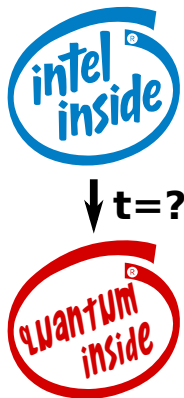
Zpracování informace

- **Zpracováním informace** rozumíme jakoukoliv pozorovatelnou změnu informace.
- Příklad: provedení výpočtu výsledné ceny
- Důležitá role v moderní společnosti (internet, předpověď počasí, numerické simulace)
- Snaha o efektivnější zpracování informace
- Jedna z cest: kvantové zpracování informace



Klasické × kvantové zpracování informace

- Matematicko-fyzikální popis:
 - *Klasické*: klasická fyzika
 - *Kvantové*: kvantová fyzika
- Nositel informace:
 - *Klasické*: makroskopická veličina (např. napětí)
 - *Kvantové*: kvantový stav (např. foton)
- Jednotka informace:
 - *Klasické*: bit (0, nebo 1)
 - *Kvantové*: qbit (libovolná kombinace 0 a 1)
- Výhody:
 - *Klasické*: dnes technologicky dostupné
 - *Kvantové*: efektivnější algoritmy, vyšší bezpečnost přenosu dat

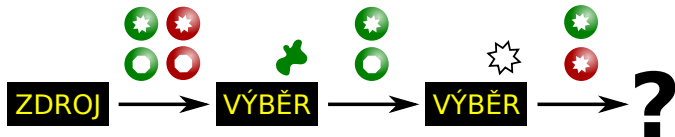


Obsah

- 1 Kvantové zpracování informace
- 2 Základní principy kvantové fyziky**
- 3 Zdroje fotonových párů
- 4 Kvantové zpracování informace s fotony
- 5 Příklady kvantového zpracování informace

Kvantová fyzika

- **Kvantová fyzika** je v současnosti nejpřesnější fyzikální model.
- Vznik na počátku 20. století
- Pozorovány jevy, které klasická fyzika nedokáže popsat:
Stern-Gerlachův experiment



(toto je velice zjednodušená představa S-G experimentu)

- Dosud nepozorován jev, který kvantová fyzika nedokáže popsat
- **Kvantová optika** je aplikace zákonů kvantové fyziky pro světlo.

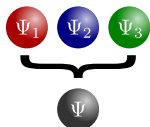
Kvantový stav, princip superpozice

- **Stav** popisuje aktuální vlastnosti zkoumaného objektu.

$$|\Psi\rangle_{\text{kulička}} = |\text{kulatá, zelená, } v = 5 \text{ cm/s}\rangle$$

- **Princip superpozice:** je-li přípustný stav $|\Psi_A\rangle$ i stav $|\Psi_B\rangle$, pak je přípustným stavem i jakákoliv jejich lineární kombinace.

$$|\Psi\rangle_{\text{kulička}} = \alpha|\text{červená}\rangle + \beta|\text{modrá}\rangle + \gamma|\text{zelená}\rangle; \alpha, \beta, \gamma \in \mathbb{C}$$



- **Operátor** popisuje děj nebo změnu stavu zkoumaného objektu.

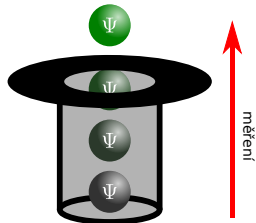
$$\hat{p} \dots \text{operátor hybnosti, } \hat{p}|v = 0\rangle = |v = 5 \text{ cm/s}\rangle$$

Měření v kvantové fyzice

- **Měření** popisujeme také pomocí operátoru a výsledek pomocí **vlastní hodnoty**. Stav objektu se změní na **vlastní stav**.

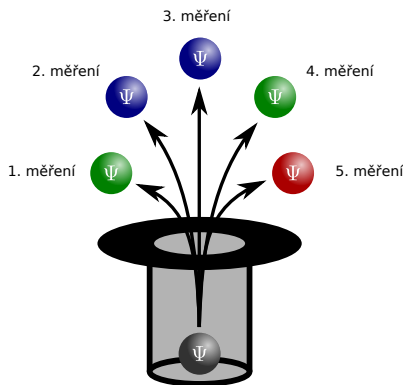
$$\hat{B} \dots \text{operátor měření barvy, } \hat{B}|\Psi\rangle_{\text{kulička}} = \underbrace{\text{zelená}}_{\text{vl. hodnota}} \underbrace{|\text{zelená}\rangle}_{\text{vl. stav}}$$

- **Princip nahodilosti:** není dopředu možné uhádnout výsledek měření, protože tento je nahodilý. Výsledek se určí až v okamžiku měření.



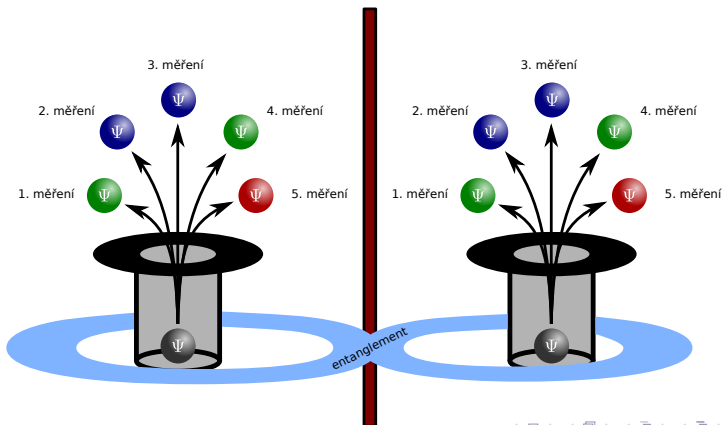
Měření v kvantové fyzice

- Dokážeme pouze určit pravděpodobnosti jednotlivých výsledků.
- Při měření zanikne superpozice (tzv. kolaps) a stav se změní (vyprojektuje) podle výsledku měření.
- Některá měření jsou závislá na předchozích měřeních.
- Neznámý kvantový stav není možné zcela přesně kopírovat.



Kvantová provázanost

- Dva nebo více objektů mohou být spolu **kvantově provázané** (entanglované).
- Měření na jednom ovlivní výsledek měření na druhém.

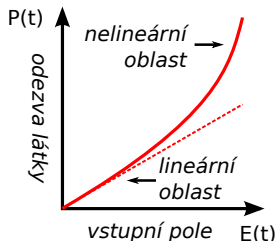


Obsah

- 1 Kvantové zpracování informace
- 2 Základní principy kvantové fyziky
- 3 Zdroje fotonových párů**
- 4 Kvantové zpracování informace s fotony
- 5 Příklady kvantového zpracování informace

Spontánní parametrická frekvenční sestupná konverze

- **SPDC** je nejčastěji využívaným procesem pro generaci fotonových párů.
- Existují i další zdroje jednotlivých fotonů (kvantové tečky, atenuace klasického svazku).
- SPDC využívá nelineární odezvu látky na vstupní elmag. pole.



Nelineární rozvoj látkové odezvy:

$$P(t) = \underbrace{\kappa_1 E(t)}_{\text{lin. člen}} + \underbrace{\kappa_2 E(t)^2}_{\text{kvadr. člen}} + \underbrace{\kappa_3 E(t)^3}_{\text{kub. člen}} + \dots$$

SPDC pro generaci fotonových párů

- Využijeme **kvadratický** nelineární člen.
- Odezva na jeden foton čerpacího svazku (ω_P) je pár fotonů (ω_S a ω_J).

Pro kvantové zpracování informace:

$$\omega_S = \omega_J = \omega_P/2 \dots \text{nerozlišitelné}$$

- Proces probíhá v látce, která vykazuje nelinearitu - nelineární krystal.
- $\kappa_1 \gg \kappa_2$ - z mnoha čerpacích fotonů se pouze hrstka rozpadne na fotonový pár.
- Proces je spontánní, tedy nahodilý.

Experimentální uspořádání pro SPDC

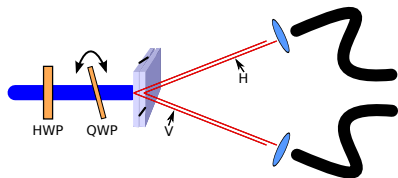
- Laserový svazek prochází nelineárním krystalem.
- Generované páry fotonů se zachycují do optického vlákna.
- Podle geometrie dělíme proces na **kolineární** a **nekolineární**.



- Podle výstupního stavu fotonů dělíme proces na
 - typ I: fotony mají stejnou polarizaci (např. $|HH\rangle$)
 - typ II: fotony mají kolmé polarizace (např. $|HV\rangle$)

Generace entanglovaných párů

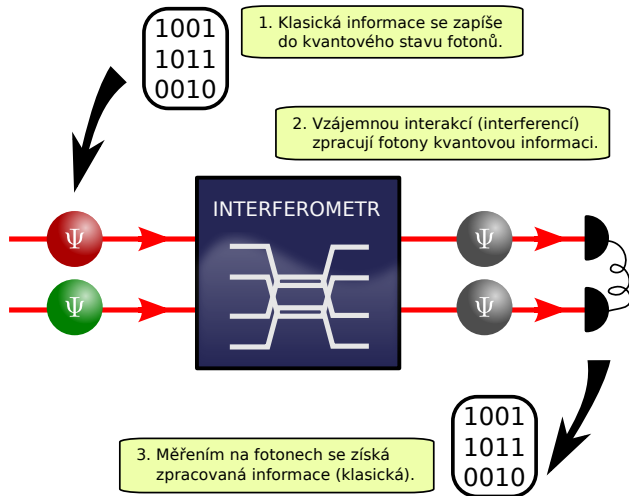
- Existuje více způsobů, u nás využíváme tzv. **Kwiatův krystal**.
- Jedná se o dva krystaly pro nekolineární typ I přiložené za sebe vzájemně kolmo.
- V prvním krystalu vznikne $|HH\rangle$, ve druhé $|VV\rangle$.
- Díky nerozlišitelnosti původu fotonů (první nebo druhý krystal) vznikne superpozice $|HH\rangle + |VV\rangle$... entanglovaný stav.
- Nastavení fázových destiček (HWP a QWP) umožňuje generovat jakýkoliv stav typu $|\Psi\rangle = \alpha|HH\rangle + \beta|VV\rangle$; $\alpha, \beta \in \mathbb{C}$



Obsah

- 1 Kvantové zpracování informace
- 2 Základní principy kvantové fyziky
- 3 Zdroje fotonových párů
- 4 Kvantové zpracování informace s fotony**
- 5 Příklady kvantového zpracování informace

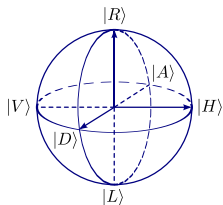
Tři fáze zpracování informace



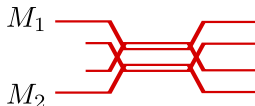
Zápis informace do kvantového stavu fotonu

- Převod klasické informace (bit) na stav fotonů (qbit)

- Polarizační qbit ($H \rightarrow 0, V \rightarrow 1$)



- Prostorový qbit ($M_1 \rightarrow 0, M_2 \rightarrow 1$)



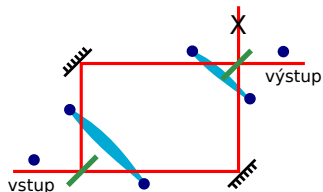
- Kombinace obojího

- Hovoříme někdy o polarizačním nebo prostorovém kódování.

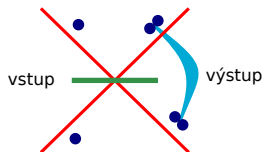
Interakce mezi fotony

- Fotony spolu interagují prostřednictvím **interference**.

- **Jednofotonová interference**
vznikne superpozice a jedna cesta interferuje s druhou

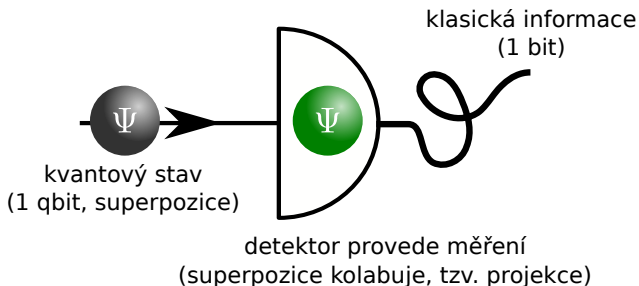


- **Dvoufotonová interference**
fotony interferují spolu a vyberou si vždy společnou cestu (shluknou se)



Detekce kvantového stavu fotonu

- Použijí se **jednofotonové detektory**.
- Kvantová informace se měřením převede na klasickou.
- 1 qbit nese ∞ klasické informace, lze však extrahovat pouze 1 bit.

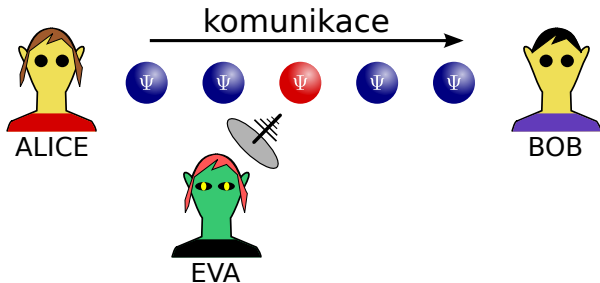


Obsah

- 1 Kvantové zpracování informace
- 2 Základní principy kvantové fyziky
- 3 Zdroje fotonových párů
- 4 Kvantové zpracování informace s fotony
- 5 Příklady kvantového zpracování informace**

Kvantová kryptografie

- Zajišťuje bezpečný přenos informace pomocí šifrování.
- Klasické šifrování lze prolomit (otázka síly a času).
- Kvantová kryptografie využívá nemožnosti kopírovat neznámý kvantový stav a faktu, že měření změní kvantový stav (odhalí odposlech).



Kvantové hradlo C-NOT

- Kvantová verze klasického hradla C-NOT.
- Bohatší vlastnosti (více zábavy oproti klasickému C-NOT).

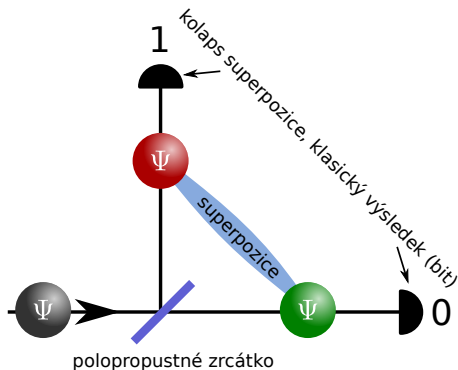
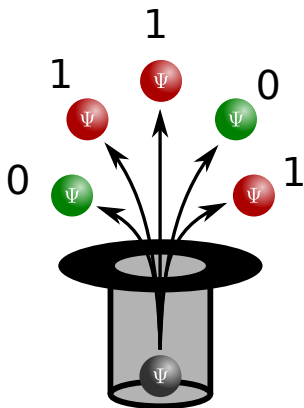
nahraditelné klasickým C-NOT

	$C \backslash S$	$ 0\rangle$	$ 1\rangle$	$\alpha 0\rangle + \beta 1\rangle$
	$ 0\rangle$	$ 0\rangle$	$ 1\rangle$	$\alpha 0\rangle + \beta 1\rangle$
	$ 1\rangle$	$ 1\rangle$	$ 0\rangle$	$\beta 0\rangle + \alpha 1\rangle$
$\alpha 0\rangle + \beta 1\rangle$		$\alpha 0\rangle + \beta 1\rangle$	$\beta 0\rangle + \alpha 1\rangle$	$ \Psi_{\text{ENT}}\rangle$

čistě kvantový C-NOT

Generátor náhodných čísel

- Využívá nahodilosti výsledku kvantového měření.
- Klasické algoritmy jsou pouze pseudonáhodné.



Závěr

Děkuji za pozornost.

Investice do rozvoje vzdělávání.

Reg. č. CZ.1.07/2.3.00/09.0042, CZ.1.07/2.2.00/07.0018 a
CZ.1.07/2.4.00/17.014

Tato prezentace je spolufinancována evropským sociálním fondem a
státním rozpočtem České republiky.

