

Kvantni spomin za fotone

seminar v 3. letniku

Simon Mattiazzi
mentor: dr. Peter Jeglič

Fakulteta za matematiko in fiziko, Univerza v Ljubljani

17. 3. 2021

Vsebina

Uvod

- Kvantno računalništvo in kubiti
- Kvantne komunikacije
- Kvantni repetitorji

Kvantni spomin

- Vrste kvantnih spominov
- EIT in počasna svetloba
 - Energijska slika
 - Valovna slika - počasna svetloba
 - Polaritoni temnih stanj

Tehnična izvedba

- Eksperimentalne sheme

Zaključek

Vsebina

Uvod

Kvantno računalništvo in kubiti

Kvantne komunikacije

Kvantni repetitorji

Kvantni spomin

Vrste kvantnih spominov

EIT in počasna svetloba

Energijska slika

Valovna slika - počasna svetloba

Polaritoni temnih stanj

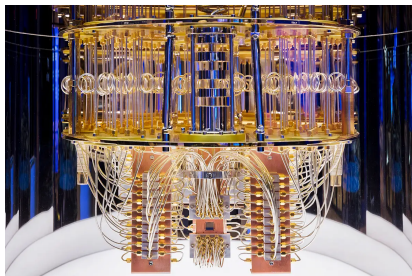
Tehnična izvedba

Eksperimentalne sheme

Zaključek

Kvantno računalništvo in kubiti

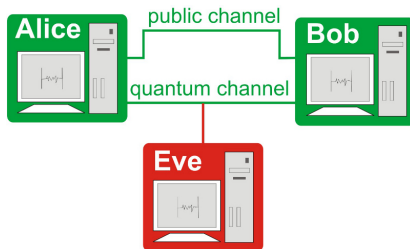
- ▶ klasični računalniki: enice in ničle
- ▶ kvantni računalniki: superpozicija $|\Psi\rangle = \alpha|1\rangle + \beta|0\rangle$
- ▶ uporaba: kriptografija, simulacije kvantnih sistemov, umetna inteligenca ...
- ▶ fotonski kubiti: smer linearne polarizacije



IBM Research kvantni računalnik.

Kvantne komunikacije

- ▶ kvantno šifriranje QKD
- ▶ kolaps valovne funkcije ob vdoru - varnost



Preprosta shema za kvantno šifriranje: rdeč uporabnik je vsiljivec.

Razvoj po svetu

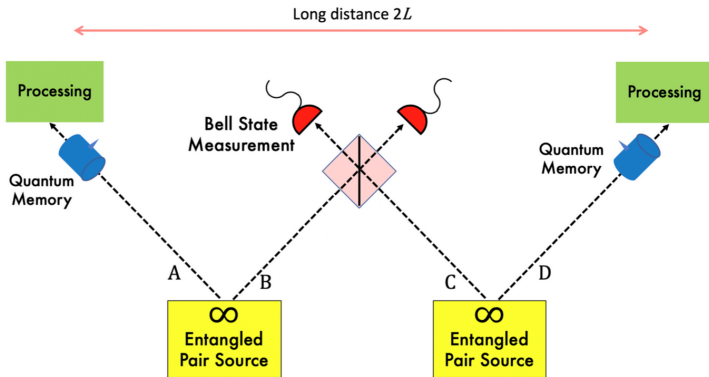
Kitajska, ZDA, Evropa



2000-kilometrsko komunikacijska linija na Kitajskem.

Kvantni repetitorji

- ▶ izgube v optičnih kabljih zaradi absorpcije in dekoherence (približno 100 km maksimalna razdalja)
- ▶ pomanjkljiva rešitev: zaupanja vredna vozlišča (ang. *trusted nodes*)
- ▶ idealna rešitev: kvantni repetitor
- ▶ izmenjava kvantne prepletenosti (ang. *entanglement swapping*)
- ▶ osrednji del: kvantni spomin



Kvantni repetitor, ki deluje na podlagi izmenjave kvantne prepletenosti. Cilj: A in D sta prepletena.

Lastnosti idealnega kvantnega spomina:

- ▶ $> 90\%$ učinkovitost
- ▶ $500\mu s - 500\text{ ms}$ čas shranjevanja
- ▶ več kubitov naenkrat

Vsebina

Uvod

Kvantno računalništvo in kubi

Kvantne komunikacije

Kvantni repetitorji

Kvantni spomin

Vrste kvantnih spominov

EIT in počasna svetloba

Energijska slika

Valovna slika - počasna svetloba

Polaritoni temnih stanj

Tehnična izvedba

Eksperimentalne sheme

Zaključek

Vrste kvantnih spominov

- ▶ Delitev glede na medij shranjevanja:
 - ▶ vroči atomi
 - ▶ hladni atomi
 - ▶ BEC
 - ▶ kristali, dopirani z ioni redkih zemelj
- ▶ Delitev glede na protokol shranjevanja:
 - ▶ optično kontrolirani (EIT, Ramanova shema)
 - ▶ dizajnirana absorpcija (GEM, AFC, CRIB)

EIT - energijska slika

Trinivojski enegijski sistem v lambda konfiguraciji:

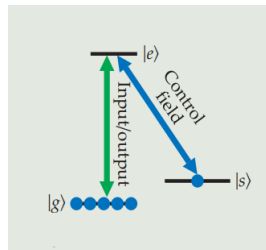
3 stanja:

- ▶ osnovno $|g\rangle$ (ang. *ground*)
- ▶ vzbujeno $|e\rangle$ (ang. *excited*)
- ▶ stanje za shranjevanje $|s\rangle$ (ang. *storage*)

2 laserska žarka:

- ▶ kontrolni (frekvenca $|e\rangle \rightarrow |s\rangle$)
- ▶ signalni (frekvenca $|g\rangle \rightarrow |e\rangle$)

Ob izklopu kontrolnega žarka se signalni foton shrani v stanje $|s\rangle$. Ob ponovnem vklopu se spet izseva.



Energijska konfiguracija lambda ter kontrolni in signalni žarek.

Valovna slika - počasna svetloba

- ▶ Želimo upočasniti svetlobo (prostorsko skrčenje signalnega pulza).
- ▶ Težava: z večanjem lomnega količnika n' se večja tudi absorpcija - zaustavitev svetlobe je omejena.
- ▶ Uporabimo model Lorentzove relaksacije in Kramers-Kronigove relacije za $n = n' + in''$. Realni del susceptibilnosti χ opisuje lomne lastnosti snovi:

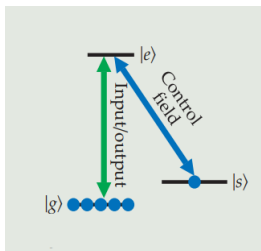
$$n' = 1 + \frac{1}{2} \operatorname{Re} \chi(\omega), \quad (1)$$

- ▶ Imaginarni del χ opisuje absorpcijo v snovi:

$$\Delta E = \epsilon_0 \int \frac{d\omega}{2\pi} \omega \operatorname{Im}(\chi + 1)(\omega) \int_V |\mathbf{E}(\mathbf{r}, \omega)|^2 d^3\mathbf{r} \quad (2)$$

Valovna slika - počasna svetloba

- ▶ Obstaja poseben režim, kjer lahko kljub velikemu n' dosežemo nizko absorpcijo.
- ▶ Prejšnja energijska shema:



Energijska konfiguracija lambda ter kontrolni in signalni žarek

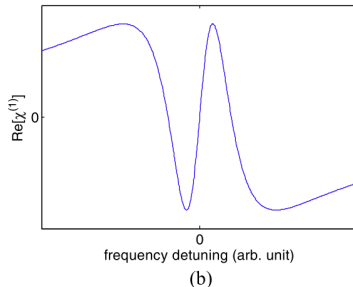
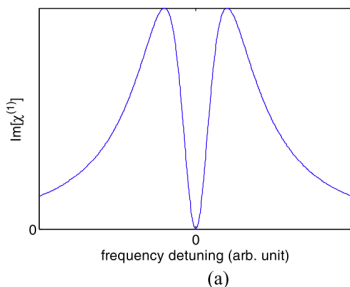
- ▶ Intuitivna razlaga: oba žarka sta prižgana hkrati: noben atom se ne more vzbuditi - transparentnost.

Valovna slika - počasna svetloba

- Kvantitativna razlaga:

$$\chi(\omega) = g^2 N \frac{\gamma_{gs} + i\omega}{(\gamma_{ge} + i\omega)(\gamma_{gs} + i\omega) + |\Omega|^2}, \quad (3)$$

- Grafa $\text{Re}(\chi)$ in $\text{Im}(\chi)$ iz enačbe (3):



Imaginarni del susceptibilnosti karakterizira absorpcijo, realni pa lomne lastnosti.

Valovna slika - počasna svetloba

- ▶ Grupna hitrost:

$$v_g = \frac{c}{n' + \omega \frac{\partial n'}{\partial \omega}} \quad (4)$$

- ▶ Združimo enačbi (5) in odvisnost $\chi(\omega)$:

$$v_g = \frac{c}{1 + g^2 N / |\Omega|^2}, \quad (5)$$

- ▶ Počasna svetloba: eksperimentalno 17 m/s (Hau, 1999)

Polaritoni temnih stanj

- ▶ Kako shraniti kvantno stanje?
- ▶ Zmanjšanje intenzitete kontrolnega žarka na 0:

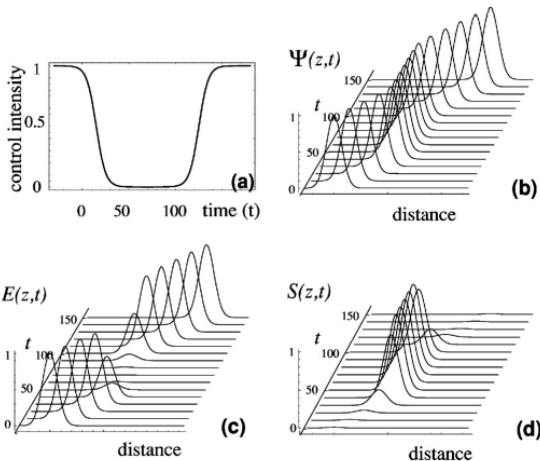
$$v_g = \frac{c}{1 + g^2 N / |\Omega|^2} \longrightarrow 0 \quad (6)$$

- ▶ Polariton temnih stanj (Lukin, Fleischauer): kvazidelec, superpozicija EMV in vzbujenih atomskih stanj:

$$\Psi(z, t) = \cos \theta E(z, t) + \sin \theta S(z, t), \quad (7)$$

$$\cos \theta = \frac{\Omega}{\sqrt{\Omega^2 + g^2 N}}; \quad \sin \theta = \frac{g\sqrt{N}}{\sqrt{\Omega^2 + g^2 N}} \quad (8)$$

Polaritoni temnih stanj



Fotonski in spinski del polaritona temnih stanj ob prehodu EIT medija ob delovanju kontrolnega žarka.

Vsebina

Uvod

- Kvantno računalništvo in kubi
- Kvantne komunikacije
- Kvantni repetitorji

Kvantni spomin

- Vrste kvantnih spominov
- EIT in počasna svetloba
 - Energijska slika
 - Valovna slika - počasna svetloba
 - Polaritoni temnih stanj

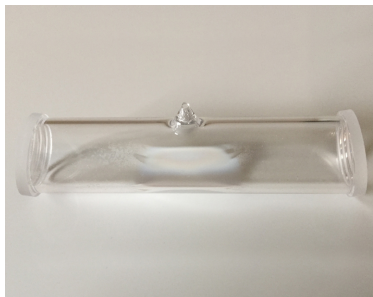
Tehnična izvedba

- Eksperimentalne sheme

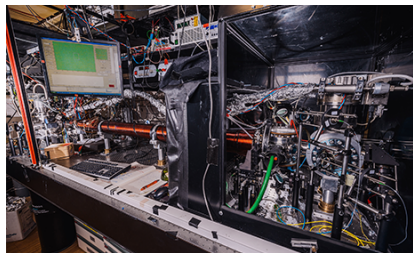
Zaključek

Tehnična izvedba

Osnovna shema: Shranjevanje EIT medija: celica s paro vročih atomov ali hladni atomi v magnetooptični pasti.



Celica s cezijevo paro.



Magnetooptična past in sistem za lasersko hlajenje atomov.

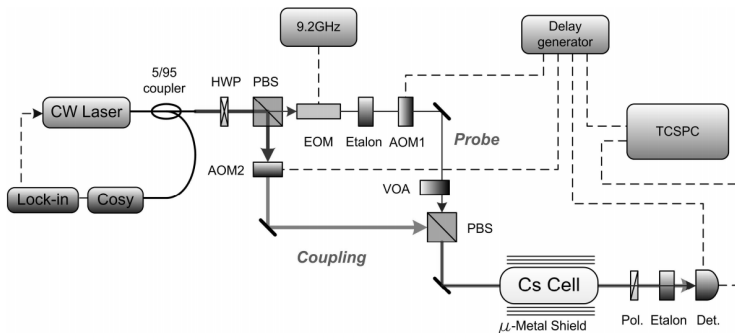
Tehnična izvedba

Ostale komponente:

- ▶ optični kabli,
- ▶ laserji, zaklenjeni na atomske prehode (AOM, brezdopplerska spektroskopija),
- ▶ števec fotonov,
- ▶ kontrolni sistem za prižiganje in ugašanje žarkov,
- ▶ sistemi za filtriranje.

Eksperimentalna shema: vroči atomi

NIST (ZDA):

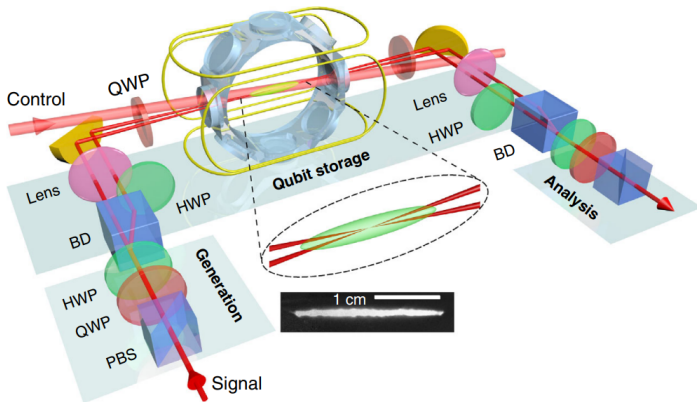


Primer sheme postavitve za EIT kvantni spomin z vročimi atomi.

- 80% učinkovitost, čas hranjenja $10 \mu\text{s}$

Eksperimentalna shema: hladni atomi

Laboratorij Kastler Brossel, univerza Sorbonne (Francija):



Primer sheme postavitve za EIT kvantni spomin s hladnimi atomi.

- ▶ 68% učinkovitost, čas hranjenja $4,5 \mu\text{s}$

Vsebina

Uvod

- Kvantno računalništvo in kubi
- Kvantne komunikacije
- Kvantni repetitorji

Kvantni spomin

- Vrste kvantnih spominov
- EIT in počasna svetloba
 - Energijska slika
 - Valovna slika - počasna svetloba
 - Polaritoni temnih stanj

Tehnična izvedba

- Eksperimentalne sheme

Zaključek

Zaključek

- ▶ Ponovitev:
 - ▶ Kvantni spomin → Kvantni repetitor → Komunikacijska varnost
- ▶ Razvoj v Sloveniji: FMF, IJS (Laboratorij za hladne atome).