

LABAI ŠALTOS DUJOS, LĒTA ŠVIESA IR RYDBERGO ATOMAI

Julius Ruseckas

Rugsėjo 12, 2018

Vilniaus universiteto Teorinės fizikos ir astronomijos institutas

1. Labai šaltų atomų dujų sąveika su elektromagnetiniais laukais

Optinės gardelės

2. Lėtos šviesos sklidimas per šaltų atomų dujas

3. Rydbergo atomų panaudojimas

4. Išvados

LABAI ŠALTŲ ATOMŲ DUJŲ SĄVEIKA SU ELEKTROMAGNETINIAIS LAUKAIS

KAM REIKIA ŠALTŲ ATOMŲ DUJŲ?

- Kvantinių sistemų simuliacija klasikiniais kompiuteriais reikalauja eksponentiškai ilgo laiko
- Hipotetinis kvantinis kompiuteris tokio trūkumo neturi
- Universalus kvantinis kompiuteris vis dar nesukurtas
- Yra galimi kvantiniai simulatoriai konkrečiom kvantinėm sistemom
- Geras kandidatas yra labai šaltos atomų dujos

Šaltų atomų dujų privalumai

- Lengvai keičiami sistemos parametrai, kuriuos kietojo kūno fizikoje ne visada galima pakeisti.
 - atomų kiekis
 - išorinio (gaudyklės) potencialo forma
 - atomų tarpusavio sąveikos stiprumas

KIEK ŠALTI TURI BŪTI ATOMAI?

Tikslas:

Norime, kad pasireikštų kvantiniai efektai.

De Broglie bangos ilgis dėl šiluminio judėjimo

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{3mk_B T}}$$

Norime, kad jis būtų sulyginamas su atstumais tarp atomų.

Imant atomų tankį 10^{18} m^{-3} ir ^{87}Rb atomus, gauname

$T \sim 100 \text{ nK}$.

- **1975:** Pirmą kartą pasiūlytas lazerinio šaldymo metodas.
- **1995:** Sukurti pirmieji atomų Bose-Einstein'o kondensatai (BEC).
- **1997:** Fizikos Nobelio premija už atomų šaldymą
- **1999:** Sukurtos išsigimusios atomų Fermi dujos.
- **2001:** Fizikos Nobelio premija už BEC

Problema

Atomai yra elektriškai neutralios dalelės. Nėra tiesioginės analogijos su elektronų kristaluose magnetinėmis savybėmis

Sprendimas: galima sukurti efektyvųjį magnetinį lauką.

EFEKTYVIOJO MAGNETINIO LAUKO ŠALTIEMS ATOMAMS SUKŪRIMO BŪDAI

- **Mechaninis sukimas** — įprastas metodas.
 - Pastovus efektyvusis magnetinis laukas $B_{\text{eff}} \sim \Omega$
 - Gaudyklės dažnis $\omega_{\text{eff}} = \omega - \Omega$
 - Efektyvusis magnetinis laukas veikia visus atomus vienodai
- **Optinės gardelės** turinčios atomų šuolių tarp mazgų asimetriją
- **Naudojant šviesos pluoštus** su santykinu orbitiniu judesio kiekio momentu elektromagnetiškai sukkelto praskaidrėjimo (EIT) konfigūracijoje.

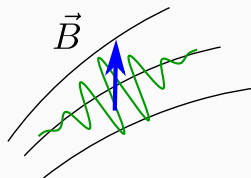
Hamiltonianas

$$H = \frac{\hbar^2}{2m} \mathbf{k}^2 + H_{\text{int}}(\mathbf{r})$$

Čia $\mathbf{k} = -i\nabla$

Schrödinger'io lygtis

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi = H\Psi$$



ADIABATINĒ APROKSIMACIJA

$H_{\text{int}}(\mathbf{r})$ turi tikrines būsenas $\chi_q(\mathbf{r})$

Adiabatīnē aproksimācija: $\Psi(\mathbf{r}) = \psi(\mathbf{r})\chi_1(\mathbf{r})$

Efektīvās hamiltoniānas

$$H_{\text{eff}} = \frac{\hbar^2}{2m}(\mathbf{k} - \mathcal{A})^2 + \varepsilon_1 + \mathcal{V}$$

kur

$$\mathcal{A} = i\chi_1^\dagger \nabla \chi_1$$

yra Mead-Berry sietis bei

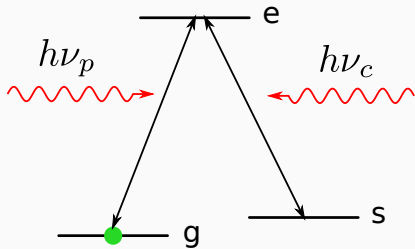
$$\mathcal{V} = -\frac{\hbar^2}{2m} \sum_{n \neq 1} \chi_1^\dagger \nabla \chi_n \cdot \chi_n^\dagger \nabla \chi_1$$

yra Born-Huang potencialas.

- Vektorinis potencialas \mathcal{A} pasirodo todėl, kad tikriniai vektoriai priklauso nuo atomo padėties erdvėje
- \mathcal{A} turi geometrinę prigimtį
- Berry sietis \mathcal{A} yra susieta su kreivumu Θ as

$$\Theta_{jl} = \nabla_j \mathcal{A}_l - \nabla_l \mathcal{A}_j$$

- Dirbtinis magnetinis laukas



Zonduojantis (probe) pluoštas:

$$\Omega_p = \mu_{13} E_p$$

Kontrolinis (control) pluoštas:

$$\Omega_c = \mu_{23} E_c$$

Tamsi būseną

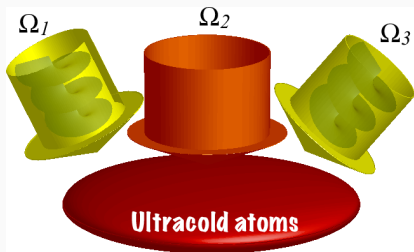
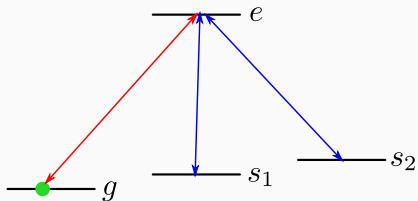
$$|D\rangle \sim \Omega_c |g\rangle - \Omega_p |s\rangle$$

Destruktyvi
interferencija, išnyksta
sugertis — EIT

G. Juzeliūnas, P. Öhberg,

J. Ruseckas, A. Klein, Phys. Rev. A
71, 053614 (2005).

TRIPODO KONFIGŪRACIJA

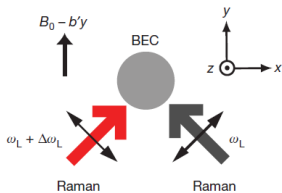


- Dvi išsigimusios tamsios būsenos
- Neabeliniai kalibruotiniai potencialai

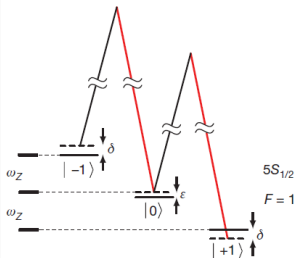
J. Ruseckas, G. Juzeliūnas, P. Öhberg, and M. Fleischhauer, Phys. Rev. Lett. **95**, 010404 (2005).

EKSPERIMENTINĖ REALIZACIJA

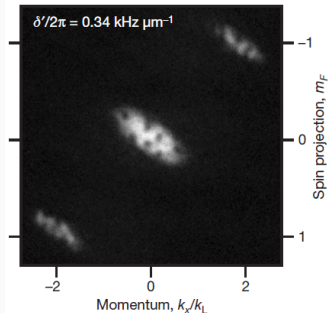
a Geometry



b Level diagram



Dressed state, $\hbar\Omega_R = 8.20E_L$



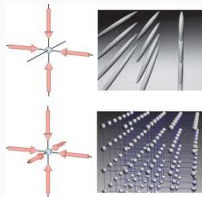
Y.-J. Lin, R. L. Compton,
K. Jiménez-García, J. V. Porto and
I. B. Spielman, *Nature*, **462**, 628 (2009).

OPTINĒS GARDELĒS

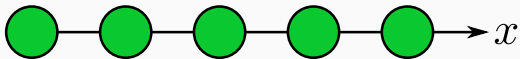
- Keli priešpriešais sklindantys šviesos pluoštai toli nuo rezonanso su atominiais šuoliais
- Atomai yra sugaunami interferencinio vaizdo intensyvumo minimumuose arba maksimumuose
- Optinės gardelės gali priklausyti nuo atomo būsenos, atomai esantys skirtingose vidinėse būsenose sugaunami skirtingose gardelės vietose
- Optinės gardelės gali būti:

- 2D

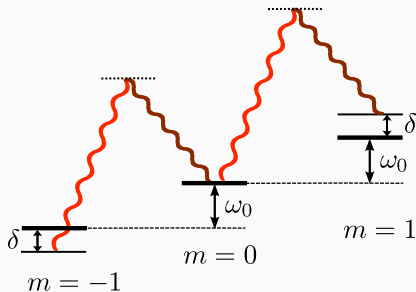
- 3D



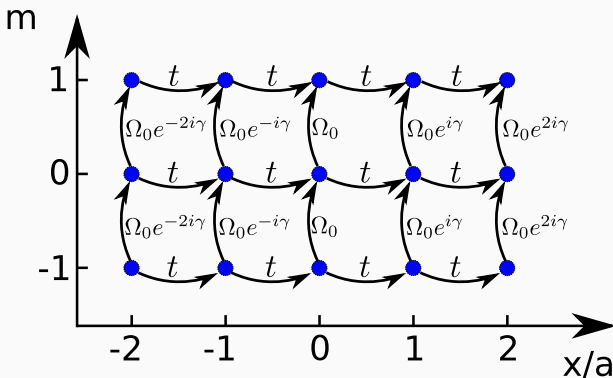
- 1D atomų grandinė **realioje erdvėje**



- Raman'o šuoliai tarp magnetinių polygmenių m – **papildomas matmuo**

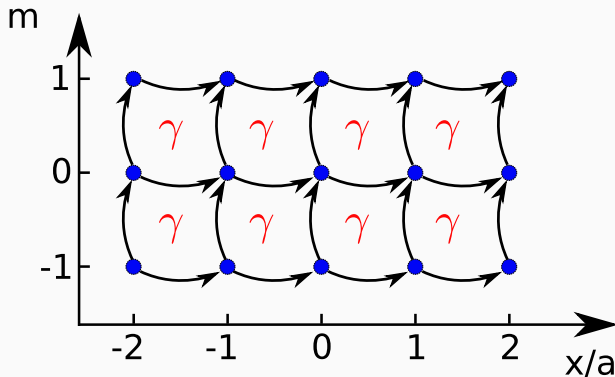


- Tuneliavimas realioje erdvėje ir Raman'o šuoliai sukuria 2D gardeleį išplėstoje erdvėje



DIRBTINIS MAGNETINIS LAUKAS IŠPLĖSTOJE ERDVĖJE

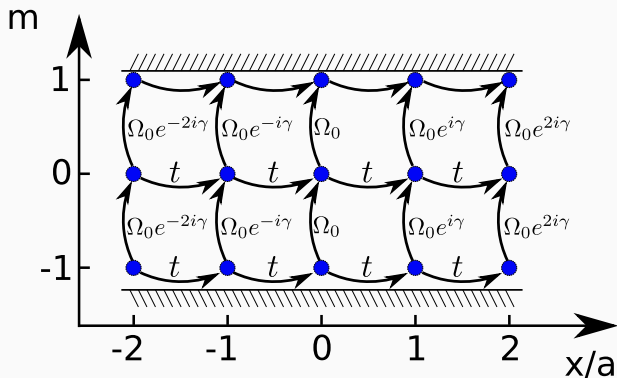
- Realių ir papildomų matmenų kombinacija leidžia sukurti **vienalytį** magneinio lauko srautą $\gamma = ka$ išplėstoje erdvėje



A. Celi, P. Massignan, J. Ruseckas, N. Goldman, I. B. Spielman, G. Juzeliūnas, M. Lewenstein, Phys. Rev. Lett. **112**, 043001 (2014).

OPTINĒS GARDELĒS PAPILDOMUOSE MATMENYSE

- Staigūs kraštai papildomame matmenyje
- Laidžios kraštinės būsenos



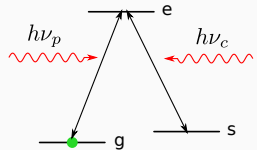
LĒTOS ŠVIESOS SKLIDIMAS PER ŠALTŪ ATOMŪ DUJAS

TRIJŲ LYGMENŲ Λ SISTEMA

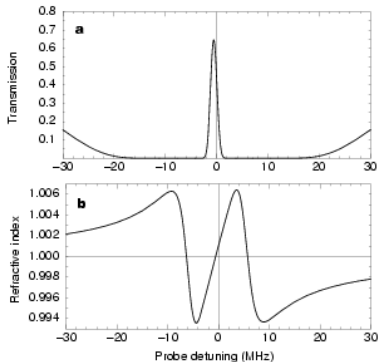
- Šuolių $g \rightarrow e$ ir $s \rightarrow e$ destruktvyi interferencija
- Sugerties išnykimas
- Elektromagnetiškai sukeltas praskaidrėjimas
- Tamsi būsena

$$|D\rangle \sim \Omega_c|g\rangle - \Omega_p|s\rangle$$

- Labai lengvai suardoma
- Labai siauras skaidrumo langas







- Labai siauras skaidrumo langas $\Delta\omega \sim 1$ MHz
- Medžiaga su didele dispersija
- Mažas grupinis greitis - lėta šviesa

LĒTOS ŠVIESOS IŠSAUGOJIMAS IR ATGAMINIMAS

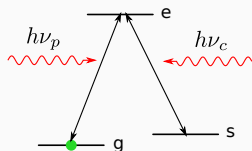


LĒTOS ŠVIESOS IŠSAUGOJIMAS IR ATGAMINIMAS

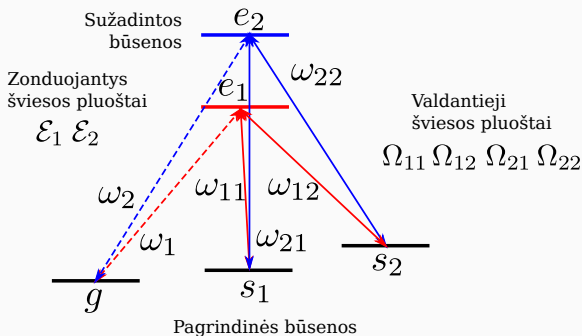
- Tamsi būsena

$$|D\rangle \sim |g\rangle - \frac{\Omega_p}{\Omega_c}|s\rangle$$

- Informacija apie sklindančią šviesą yra elektroniniame sužadinyje
- Išjungus valdantį lazerį, informacija elektroniniame sužadinyje išlieka
- Vėl įjungus valdantį lazerį, zondojuojantis šviesos pluoštas atsigamina

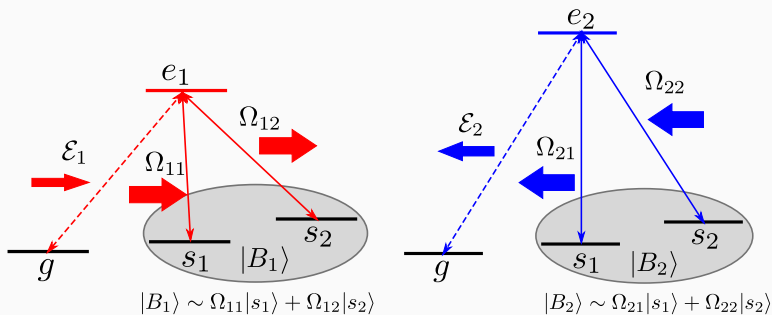


DVIGUBO TRIPODO SCHEMA

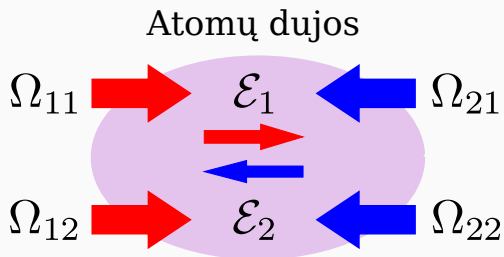


J. Ruseckas, V. Kudriašov, G. Juzeliūnas, R. G. Unanyan, J. Otterbach, M. Fleischhauer, Phys. Rev. A **83**, 063811 (2011)

DVIGUBO TRIPODO SCHEMA

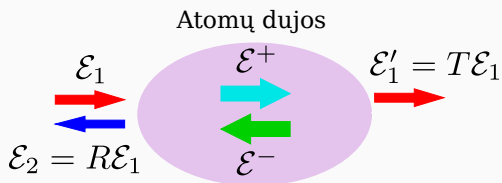


Dvi sukabintos posistemės



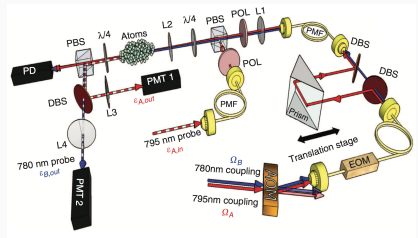
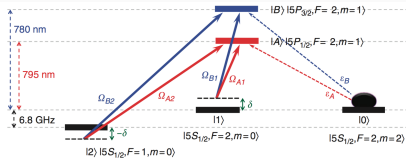
- Laukai \mathcal{E}_1 ir \mathcal{E}_2 yra sukabinti
- Pavieniui jie neturi apibrėžto grupinio greičio
- Tik tam tikros zondojančių laukų kombinacijos sklinda apibrėžtu greičiu

OSCILIACIJOS KAIP TARP NEUTRINŲ RŪŠIŲ



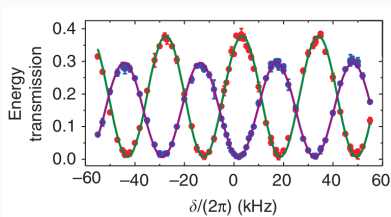
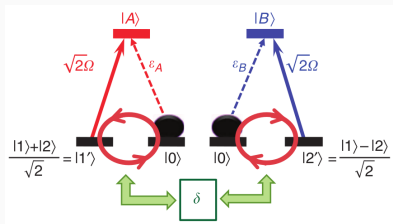
- \mathcal{E}_1 yra atspindimas į \mathcal{E}_2
- Atspindėtų ir praėjusių laukų intensyvumai periodiškai kinta kintant dujų debesėlio ilgiui

M.-J. Lee, J. Ruseckas, *et al*, Nat. Commun. 5, 5542 (2014).



SUKININĖ LĒTA ŠVIESA

Dvifotoninis išderinimas sukelia praėjusių zondojančių laukų intensyvumų **osciliacijas**



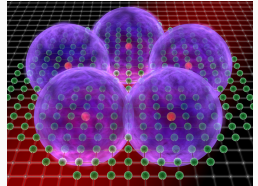
- Išderinimas gali būti sukeltas tarpatominės **sąveikos**
- Pavyzdžiui: sąveika tarp **Rydbergo** atomų
→ suspaustos lėtos šviesos generavimas dėl tarpatominės sąveikos

J. Ruseckas, I. A. Yu, G. Juzeliūnas, Phys. Rev. A **95**, 023807 (2017)

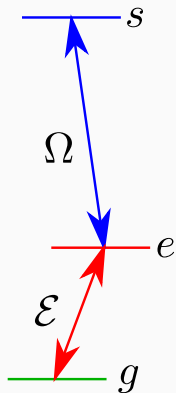
RYDBERGO ATOMŲ PANAUDOJIMAS

SĄVEIKOS TARP RYDBERGO ATOMŲ

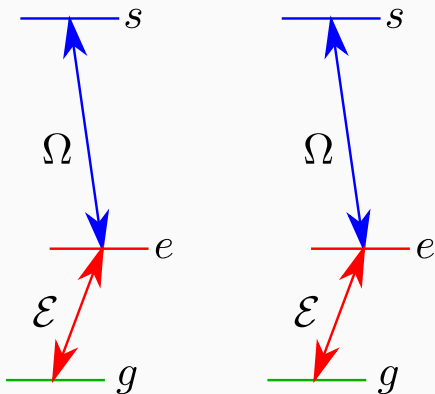
- Šuolio dipolinis momentas tarp gretimų būsenų proporcingas n^2
- **Stiprios** dipolinės sąveikos tarp atomų
- Sąveikos stiprumas staigiai didėja didėjant n ;
- Kai $n \gtrsim 100$, sąveikos stiprumas gali būti sulyginamas su Coulomb'o sąveika tarp jonų
- Gali būti panaudojamos norimoms daugiadalelėms būsenoms sukurti



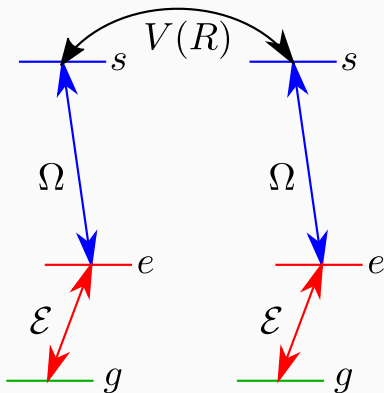
- Jei vienas atomas yra sužadintas į Rydbergo būseną
 - stipri sąveika paslenka aplinkinių atomų rezonansinius dažnius
 - taip **slopinant** jų sužadinimą.
- Rydbergo blokada gali būti taikoma
 - kvantinės informacijos apdorojimui
 - netiesinei kvantinei optikai naudojant Rydbergo EIT



Silpnas zonduojantis laukas \mathcal{E} yra susietas su Rydbergo lygmeniu per stiprų kontrolinį lauką Ω .



Silpnas zonduojantis laukas \mathcal{E} yra susietas su Rydbergo lygmeniu per stiprų kontrolinį lauką Ω .

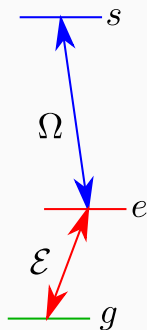


Silpnas zonduojantis laukas \mathcal{E} yra susietas su Rydbergo lygmeniu per stiprų kontrolinį lauką Ω .

- EIT → **atomo ir šviesos** sąveika be sugerties
- Rydbergo būsenos → stiprios tolimos **tarpatominės** sąveikos
- Rezultatas → sąveikos tarp **fotonų**.

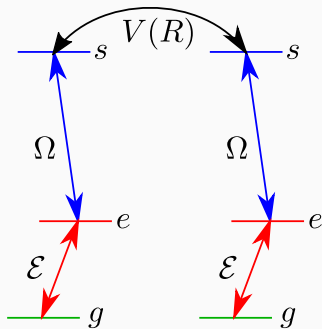
Kai krenta **vienas** zonduojančio lauko fotonas

- kontrolinis laukas sukuria skaidrumą siaurame dažnių ruože
- zonduojančio lauko fotonas yra susiejamas su Rydbergo sužadiniu formuojant kvazidalelę – **Rydbergo poliaritoną**
- Rydbergo poliaritonas sklinda sumažintu greičiu $\ll c$



Kai du zonduojančio lauko fotonai sklinda terpėje su Rydbergo atomais

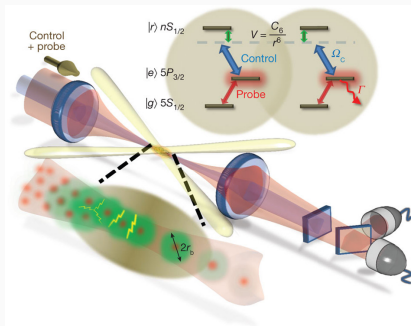
- stiprios sąveikos tarp diviejų gretimų Rydbergo atomų išveda atominį šuolį iš rezonanso
- sunaikinant skaidrumą ir sukeliant sugertį



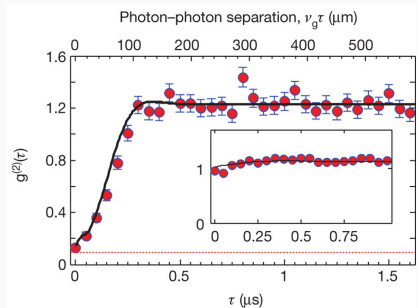
KVANTINĖS NETIESINĖS OPTIKOS EKSPERIMENTAS

A. V. Gorshkov *et al*, Phys. Rev. Lett. **107**, 133602 (2011).

T. Peyronel *et al*, Nature **488**, 57 (2012).



$$46 \leq n \leq 100$$



Tik vienas fotonas sklinda be sugerties Rydbergo blokados srityje. Visi kiti fotonai yra **sugeriami**, sukeliant nuostolius

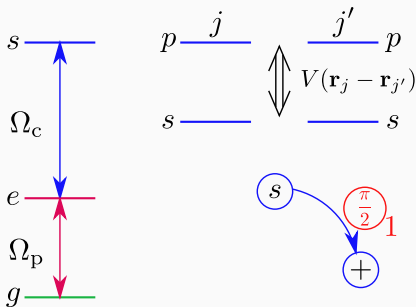
Pasiūlymas

Naudoti sąveiką tarp atomų šviesos išsaugojimo metu.

LĒTOS ŠVIESOS IŠSAUGOJIMAS NAUDOJANT DVI RYDBERGO BŪSENAS

J. Ruseckas, I. A. Yu, G. Juzeliūnas, Phys. Rev. A **95**, 023807 (2017)

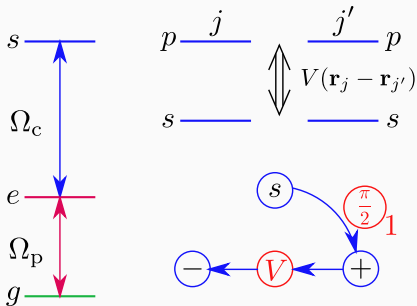
- Kopėčių tipo schema su Rydbergo būsena s
- Išsaugojimo procedūra:
 1. Zonduojantsi laukas yra išsaugojamas koherentiškume tarp pagrindinės būsenos g ir Rydbergo būsenos s
 2. $\pi/2$ impulsas paverčia Rydbergo būseną $|s\rangle$ į Rydbergo s ir p būsenų superpoziciją



$$|+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|s\rangle + |p\rangle)$$

IŠSAUGOTA RYDBERGO LĒTA ŠVIESA

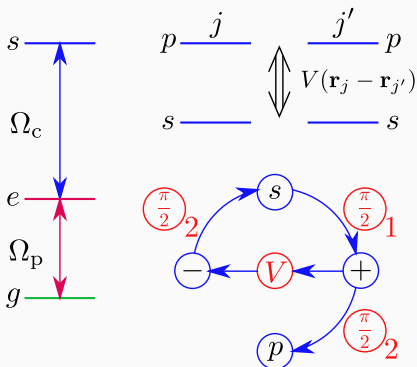
- Rezonansinē dipolinē sąveika V tarp Rydbergo atomu
- Sukeičia s ir p Rydbergo būsenas
- Išsaugojimo metu yra sukuriamos **koreliuotos atomu poros** pradžioje neužpildytoje būsenoje



$$|-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|s\rangle - |p\rangle)$$

IŠSAUGOTA RYDBERGO LĒTA ŠVIESA

- Išsaugojimos pabaigoje antras $\pi/2$ impulsas paverčia būsena $|-\rangle$ į Rydbergo būsena $|s\rangle$ ir būsena $|+\rangle$ į būsena $|p\rangle$.
- Būsenos s sužadinimai yra paverčiami zonduojančio lauko fotonais,
- p būsenos sužadinimai pasilieka atomų terpėje



- Be atomų sąveikos lėta šviesa neatgaminama
- Atgamintas zonduojantis pluoštas yra sudarytas iš koreliuotų fotonų porų

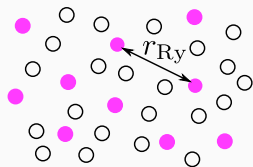
ATGAMINTOS ŠVIESOS ANTROS EILĖS KORELIACINĖ FUNKCIJA

Laikant kad

$$r_c \lesssim r_{Ry},$$

kur

- r_c yra charakteringas sąveikos atstumas, $V(r_c)T = 1$
- r_{Ry} yra vidutinis atstumas tarp Rydbergo atomų



Atgamintos šviesos antros eilės koreliacinė funkcija

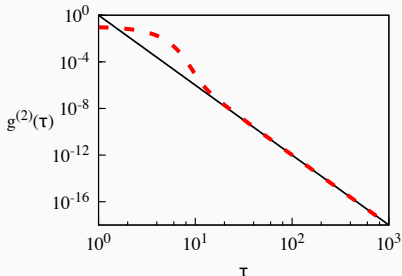
$$g_{\text{out}}^{(2)}(\tau) \sim 1 - \cos[V(v_{g0}\tau)T]$$

Esant mažai išsaugojimo trukmei T

$$g_{\text{out}}^{(2)}(\tau) \sim [V(v_{g0}\tau)T]^2$$

$$g_{\text{out}}^{(2)}(\tau) \sim [V(v_{g0}\tau)T]^2$$

- Leidžia matuoti sąveikos potencialą
- Korekcijos dėl baigtinio EIT pločio
(raudona brūkšniuota kreivė)



IŠVADOS

- Veikiant tinkamai parinktais lazerių pluoštais galima sukurti **dirbtinį magnetinį lauką** šaltų atomų dujoms.
- Penkių lygmenų dvigubo tripodo atomų ir šviesos sąveikos schema leidžia sukurti **sukininę (dvikomponentę)** lėtą šviesa.
- **Sąveiką tarp fotonų** galima sukurti panaudojant toliveikę dipolinę sąveiką tarp Rydbergo atomų.

AČIŪ UŽ DĖMESĮ!