

Labai šaltų atomų dujos ir elementariųjų dalelių fizika

Julius Ruseckas

Vilniaus universiteto Teorinės fizikos ir astronomijos institutas

Gegužės 16, 2008

- 1 Motyvacija
- 2 Eksperimentų schema
- 3 Efektyvieji potencialai šaltiems atomams
- 4 Analogijos su elementariųjų dalelių fizika
 - Neabeliniai kalibruotiniai potencialai
 - Magnetinis monopolis
 - Ultrareliatyvistiniai Dirac'o fermionai
 - Zitterbewegung
 - Neigiamas atspindys

Kam reikia šaltų atomų dujų?

Atomo fizika \iff Kietojo kūno fizika:

- Išsigimusios Fermi dujos \iff Elektronai kristaluose
- Atomai optinėse gardelėse

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.

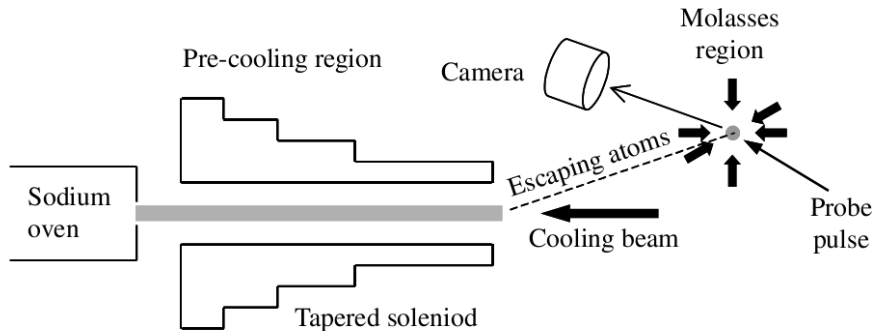
De Brogle bangos ilgis dėl šiluminio judėjimo

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

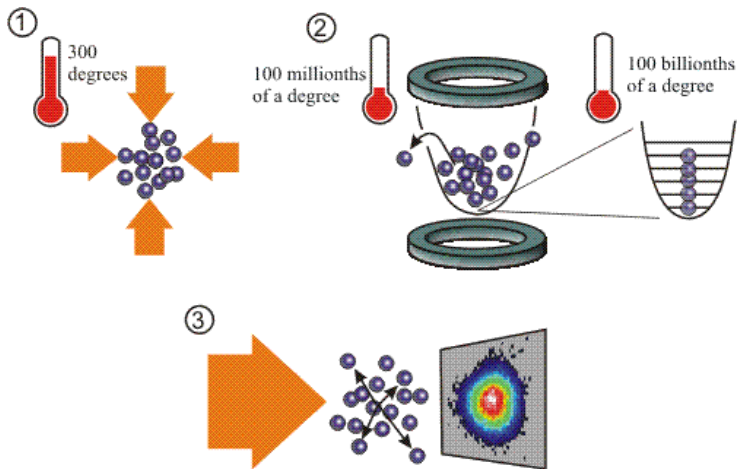
Norime, kad jis būtų sulyginamas su atstumais tarp atomų. Imant atomų tankį 10^{18} m^{-3} ir ^{87}Rb atomus, gauname $T \sim 100 \text{ nK}$.

- **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

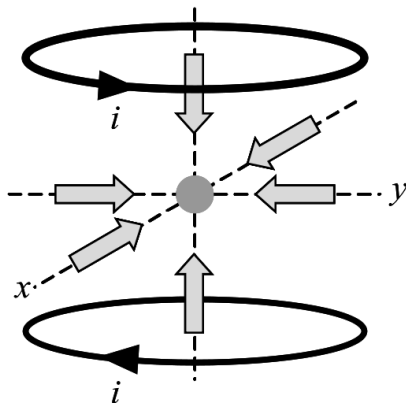
Kaip atrodo eksperimentas?



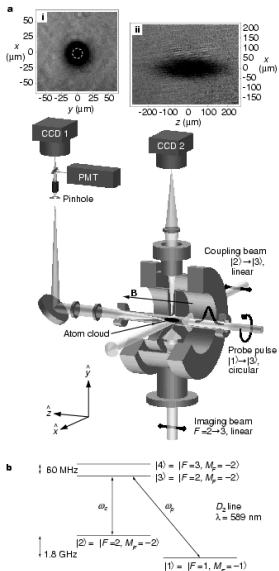
Atomų šaldymas



Magneto-optinė atomų gaudyklė



Magneto-optinė atomų gaudyklė



Problema

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

Sprendimas: galima sukurti efektyvųjį magnetinį lauką.

- Coriolis'o jėga:

$$\mathbf{F}_C = 2m\mathbf{v} \times \boldsymbol{\Omega}$$

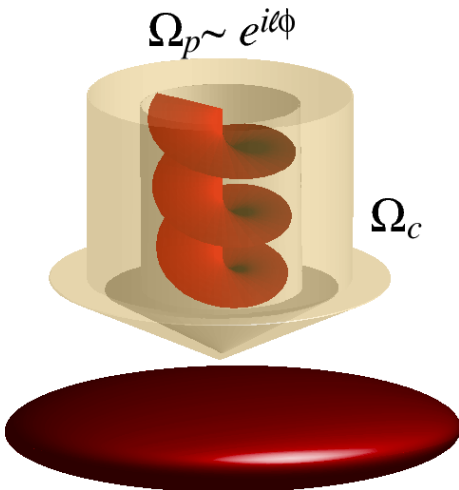
- Lorenz'o jėga:

$$\mathbf{F}_L = q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$$

Sukimasis yra panašus į magnetinį lauką.

Efektinio 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.



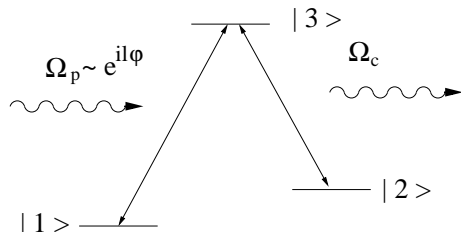
Šviesos sūkurys

Šviesos sūkurys — šviesos pluoštas su faze

$$e^{ikz+il\varphi},$$

kur φ yra azimutinis kampas, l — winding number.

Šviesos sūkuriai turi **orbitinį judesio kiekio momentą** (OAM) išilgai sklidimo krypties $M_z = \hbar l$.



Tamsi būseną

$$|D\rangle \sim \Omega_c|1\rangle - \Omega_p|2\rangle$$

Destruktyvi interferencija,
išnyksta sugertis — **EIT**

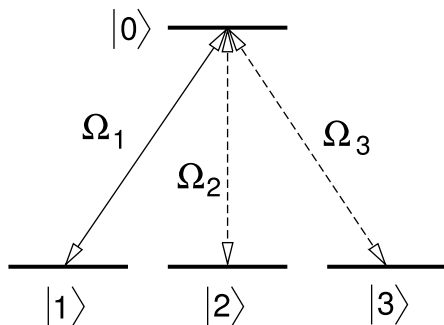
Zonduojantis (probe) pluoštas:

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

Kontrolinis (control) pluoštas:

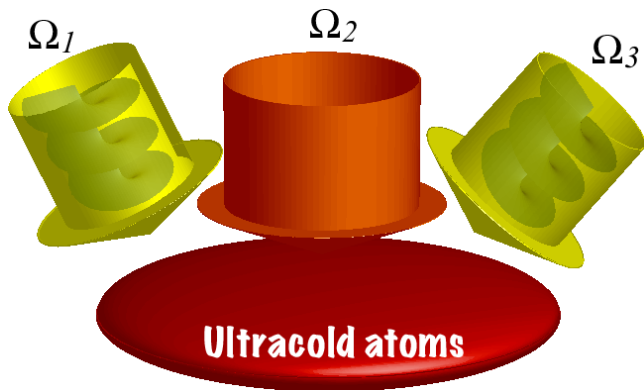
$$\Omega_c = \mu_{23}E_c$$

Tripodo konfigurācija



- **Dvi** išsigimusios tamsios būsenos
- **Neabeliniai** kalibruotiniai potencialai

Tripodo konfigurācija



Šaltų atomų dujos yra ne vien tik kietojo kūno fizikos analogas. Šaltiems atomams veikiamiems šviesos pluoštų gali būti gaunamos lygtys, kurios paprastai pasirodo elementariųjų dalelių fizikoje.

- Neabeliniai kalibruotiniai potencialai
- Magnetinis monopolis
- Ultrareliatyvistiniai Dirac'o fermionai
- Zitterbewegung
- Neigiamas atspindys

Neabeliniai kalibruotiniai potencialai

Schrödingerio lygtis

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi = \left[\frac{1}{2m} (-i\hbar - \mathbf{A})^2 + V \right] \Psi$$

kur vektorinis kalibruotinis potencialas:

$$\mathbf{A}_{11} = \hbar \left(\cos^2 \phi \nabla S_{23} + \sin^2 \phi \nabla S_{13} \right),$$

$$\mathbf{A}_{12} = \hbar \cos \theta \left(\frac{1}{2} \sin(2\phi) \nabla S_{12} - i \nabla \phi \right),$$

$$\mathbf{A}_{22} = \hbar \cos^2 \theta \left(\cos^2 \phi \nabla S_{13} + \sin^2 \phi \nabla S_{23} \right).$$

Čia

$$\Omega_1 = \Omega \sin \theta \cos \phi e^{iS_1}, \quad \Omega_2 = \Omega \sin \theta \sin \phi e^{iS_2}, \quad \Omega_3 = \Omega \cos \theta e^{iS_3}.$$

- Adiabatinis daugelio lygmenų šaltų atomų judėjimas erdvėje kintačiuose lazerių laukuose sukuria efektyvius neabelinius kalibruotinius laukus.
- Šaltų atomų dujose galima modeliuoti dalelių judėjimą neabeliniuose laukuose.

Magnetinis monopolis?

$$\mathbf{A} = -\frac{\hbar l}{2} \frac{1 - \cos \theta}{r \sin \theta} \mathbf{e}_\varphi, \quad \mathbf{B} = -\frac{\hbar l}{2r^2} \mathbf{e}_r, \quad \phi = \frac{\hbar^2}{2M} \frac{l^2 + 1}{4r^2}.$$

- Rabi dažniai turi tenkinti lygybes:

$$|\Omega_\rho|^2 = f(\mathbf{r})(1 - \cos \theta), \quad |\Omega_c|^2 = f(\mathbf{r})(1 + \cos \theta).$$

- Efektyvusis laukas būtinai skirsis nuo monopolio lauko neigiamos (arba teigiamos) z ašies dalies aplinkoje.
- Magnetinio monopolio laukas **negali būti sukurtas visoje erdvėje**.

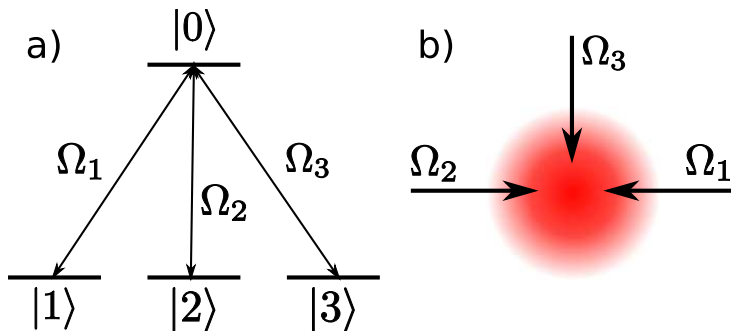
- Lazerių laukai:

$$\Omega_{1,2} = \Omega_0 \frac{\rho}{R} e^{i(kz \mp \varphi)}, \quad \Omega_3 = \Omega_0 \frac{z}{R} e^{ik'x}.$$

- Efektyvusis magnetinis laukas

$$\mathbf{B} = \frac{\hbar}{r^2} \mathbf{e}_r \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} + \dots$$

Ultrareliatyvistiniai Dirac'o fermionai



$$\Omega_1 = \Omega \sin \theta e^{-i\kappa x} / \sqrt{2}, \quad \Omega_2 = \Omega \sin \theta e^{i\kappa x} / \sqrt{2}, \quad \Omega_3 = \Omega \cos \theta e^{-i\kappa y}$$

kur

$$\theta = \theta_0, \quad \cos \theta_0 = \sqrt{2} - 1$$

Ganama lygtis su hamiltonianu

$$H_{\mathbf{k}} = \frac{\hbar^2}{2m} (\mathbf{k} + \kappa' \sigma_{\perp})^2 + V_1$$

kur

$$\kappa' = \kappa \cos \theta_0, \quad \sigma_{\perp} = \mathbf{e}_x \sigma_x + \mathbf{e}_y \sigma_y$$

Mažiems banginiams vektoriams $k \ll \kappa'$, atomų hamiltonianas sutampa su Dirac'o tipo dvikomponentės bemasės dalelės reliatyvistine lygtimi, dar vadinama **Weyl'io lygtimi**

$$H_{\mathbf{k}} = \hbar v_0 \mathbf{k} \cdot \sigma_{\perp} + V_1 + m v_0^2$$

kur greitis $v_0 = \hbar \kappa' / m$ yra šviesos greičio atitikmuo. Šaltiems atomams šis greitis yra 1 cm/s eilės.

Hamiltonianas $H_{\mathbf{k}}$ komutuoja su chirališkumo operatoriumi

$$\sigma_{\mathbf{k}} = \mathbf{k} \cdot \boldsymbol{\sigma}_{\perp} / k$$

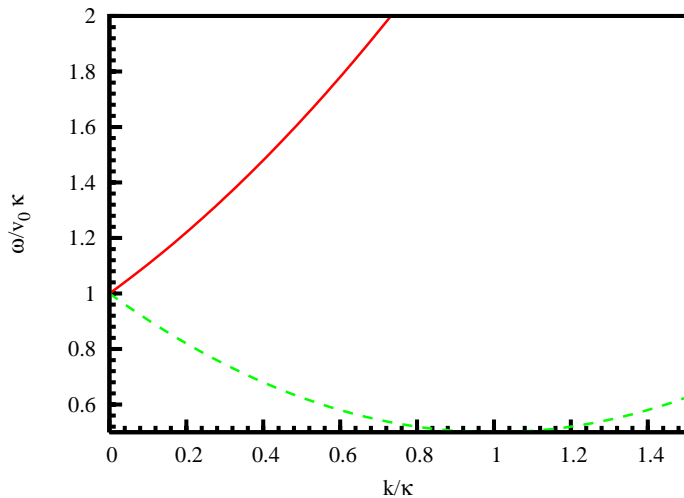
Tikrinės energijos vertės

$$\hbar\omega_{\mathbf{k}}^{\pm} = \hbar v_0(k^2/2\kappa' \pm k) + V_1 + mv_0^2$$

Mažiems banginiams vektoriams

$$\hbar\omega_{\mathbf{k}}^{\pm} = \pm \hbar v_0 k + V_1 + mv_0^2$$

Ultrareliatyvistiniai Dirac'o fermionai



Su papildomu skaliariniu potencialu, hamiltonianas mažiems impulsams

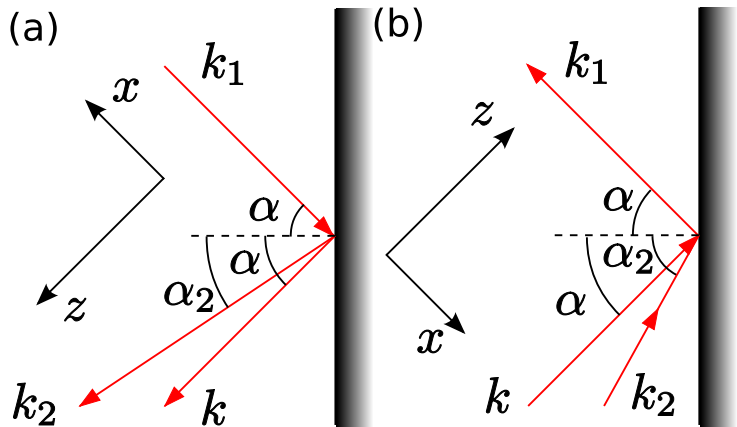
$$H = v_0 \sigma_{\perp} \cdot \mathbf{p} + V \sigma_z$$

Greičio operatorius

$$\mathbf{v} \equiv \dot{\mathbf{r}} = \frac{1}{i\hbar} [\mathbf{r}, H] = v_0 \sigma_{\perp}$$

Tikrinės hamiltoniano būsenos neturi apibrėžto greičio.
Pasekmė: osciliacijos bangu paketo judėjime.

Neigiamas atspindys



Neigiamo atspindžio kampas

$$\alpha_2 = \arcsin \left(\frac{k}{k_2} \sin \alpha \right)$$

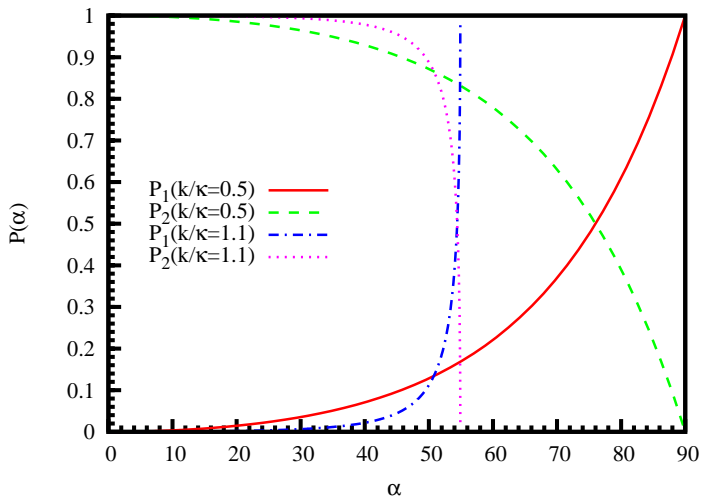
kur $k_2 = 2\kappa - k$. Atspindžio koeficientai

$$r_1 = \frac{e^{j\alpha} - e^{j\alpha_2}}{e^{-j\alpha} + e^{j\alpha_2}}, \quad r_2 = -1 - r_1.$$

Atitinkamos atspindžio tikimybės

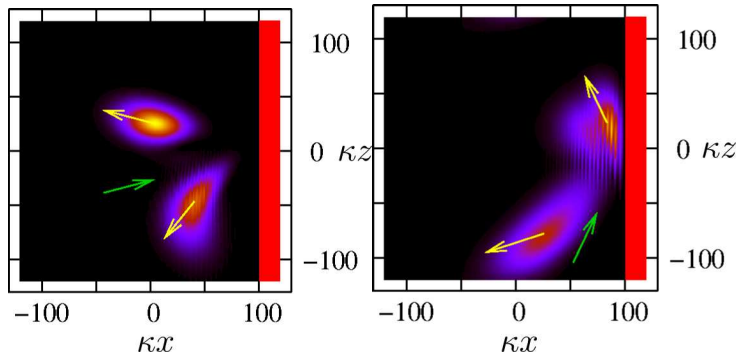
$$P_1 = |r_1|^2, \quad P_2 = \frac{\cos \alpha_2}{\cos \alpha} |r_2|^2$$

Neigiamas atspindys



Atspindžio tikimybės.

Neigiamas atspindys



- Šviesos pluoštai su santykinu orbitiniu judesio kiekio momentu gali sukurti tiek abelinius, tiek neabelinius efektyviusius potencialus šaltų atomų judėjimui.
- Šaltų atomų dujos gali būti naudojamos ne tik kieto kūno fizikos, bet ir elementariųjų dalelių fizikoms kai kurioms situacijoms modeliuoti.

Ačiū už dėmesį!