回転する高密度クォーク物質の異方的光学応答 [Phys. Rev. Lett. 109, 062501] [arxiv:1203.5059]

広野雄士[東大/理研]

共同研究者: 新田宗土[慶応大]

- ▶ カラー・フレーバー・ロック(CFL)相
 - ▶ 超伝導 & 超流動

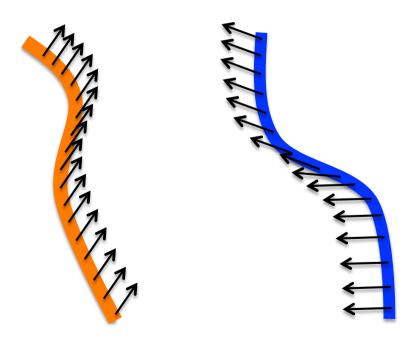
カラーの磁束 & 量子化された循環

[Balachandran, Digal and Matsuura (2006)]

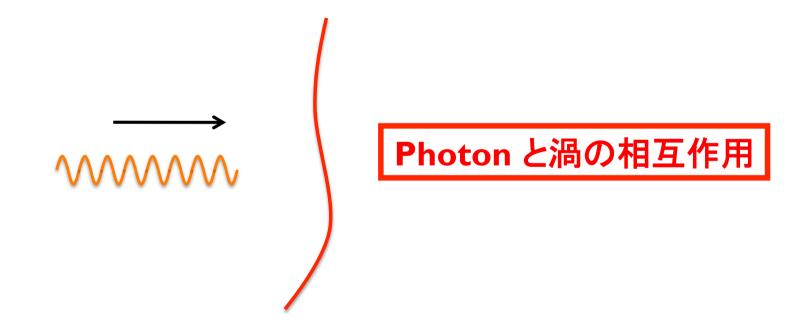
▶ 渦の存在が、残っている 対称性Hをさらに破る

渦上に局在した 南部・ゴールドストーンモード "Orientational zero mode"

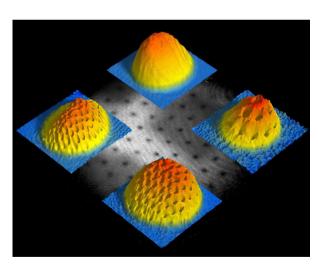
[Eto, Nakano and Nitta (2009)]



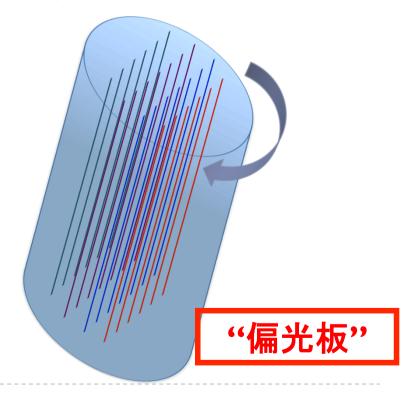
- Key Point
 - ▶ 渦上に局在した自由度 (orientational zero mode) が U(I)の電荷を持つ



- ▶ 現象論的帰結
 - ▶ 磁場との相互作用
 - ▶ 渦格子の電磁的性質
 - ▶ カラー超伝導体の回転 → 渦格子の形成



[http://cua.mit.edu/ketterle_group/Nice_pics.htm]



Outline

- Introduction
 - ▶ カラー超伝導の量子渦とは?
 - orientational zero mode
- ト 電磁場と orientational zero mode の有効理論
- ▶ 渦による光の散乱
- 渦格子の光学的性質
- ▶ まとめ

▶ 秩序変数 – ダイクォーク凝縮

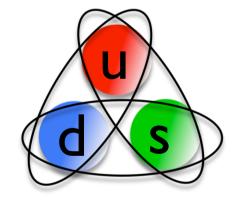
$$\Phi_{ai}=\epsilon_{abc}\epsilon_{ijk}\langle q_{bj}C\gamma_5q_{ck}\rangle \qquad {a,b,c:\text{ color index}\atop i,j,k:\text{ flavor index}}$$
 Color $\bar{3}$ rep., Flavor $\bar{3}$ rep., $J^P=0^+$

$$SU(3)_{\rm c} \times SU(3)_{\rm L} \times SU(3)_{\rm R} \times U(1)_{\rm B}$$



CFL相: $\Phi_{ai} = \Delta \delta_{ai}$

$$SU(3)_{c+F} \times (\mathbb{Z}_3)_{F+B}$$



$$\pi_1(G/H) \simeq \mathbb{Z}$$

Orientational zero mode

▶ 渦内ではCFL相の対称性がさらに破れる

$$SU(3)_{c+F} \longrightarrow [U(1) \times SU(2)]_{c+F}$$

$$\Phi_0(x) = |\Delta| \begin{pmatrix} f(r)e^{i\theta} & 0 & 0 \\ 0 & g(r) & 0 \\ 0 & 0 & g(r) \end{pmatrix} \qquad \frac{SU(3)}{U(1) \times SU(2)} \simeq \mathbb{C}P^2$$

ト 渦上の低エネルギー有効理論 \longrightarrow $\mathbb{C}P^2$ model [Eto, Nakano and Nitta (2009)]

$$\phi$$
:複素3次元ベクトル $\phi^\dagger \phi = 1$

$$S_{\mathbb{C}P^2} = C \int dx_0 dx_3 \sum_{\mu=0,3} K_{\mu} \left[\partial^{\mu} \phi^{\dagger} \partial_{\mu} \phi + (\phi^{\dagger} \partial^{\mu} \phi)(\phi^{\dagger} \partial_{\mu} \phi) \right]$$

電磁場の効果

 $ightharpoonup \mathbb{C}P^2$ の場 ϕ は、フレーバー変換の下で

$$\phi \to U\phi \qquad U \in SU(3)_{\rm F}$$

- $ightharpoonup U(1)_{\rm EM}$ 群はフレーバー変換の部分群
 - ▶ 生成子

$$T_8 = \frac{1}{\sqrt{6}} \text{diag}(-2, 1, 1) \in SU(3)_{\text{F}}$$

低エネルギー有効理論

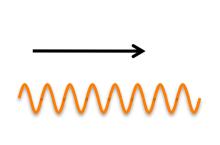
ullet $U(1)_{
m EM}$ を考慮した場合の有効作用

$$S = -\frac{1}{4} \int F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} d^4x + \int \mathcal{L}_{g\mathbb{C}P^2} dz dt$$

$$\mathcal{L}_{g\mathbb{C}P^{2}} = C \sum_{\alpha=0,3} K_{\alpha} \left[\mathcal{D}^{\alpha} \phi^{\dagger} \mathcal{D}_{\alpha} \phi + (\phi^{\dagger} \mathcal{D}^{\alpha} \phi) (\phi^{\dagger} \mathcal{D}_{\alpha} \phi) \right]$$
$$\mathcal{D}_{\alpha} \phi = \left(\partial_{\alpha} - ie\sqrt{6} A_{\alpha} T_{8} \right) \phi$$

- ▶ グルーオンと光子の混合は無視
- ▶ "superconducting string" に似ている [Witten (1985)]

渦による光子の散乱



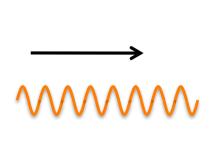
▶ 仮定

- ▶ z 方向の系の対称性
- 入射光子は直線偏光で、電場の振動方向が渦と同じ方向

運動方程式

$$(\partial_t^2 - \partial_x^2 - \partial_y^2) A_z(t, x, y) = 12CK_z e^2 f(\phi) A_z(t, x, y) \ \delta(x_\perp)$$
$$f(\phi) \equiv \phi^{\dagger}(T^8)^2 \phi + (\phi^{\dagger} T^8 \phi)^2$$
$$A_t = A_x = A_y = 0$$

渦による光子の散乱



▶ 単位長さあたりの断面積

$$\frac{d\sigma}{dz} = 288\pi \left\{ CK_z \alpha \eta f(\phi) \right\}^2 \lambda$$

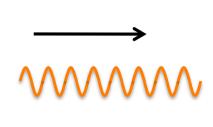
$$f(\phi) \equiv \phi^{\dagger} (T^8)^2 \phi + (\phi^{\dagger} T^8 \phi)^2$$

 η : cut off dependent factor ($\sim O(1)$)

 λ :入射光子の波長

▶ 電場の振動方向が渦と垂直 → 散乱しない

渦による光子の散乱

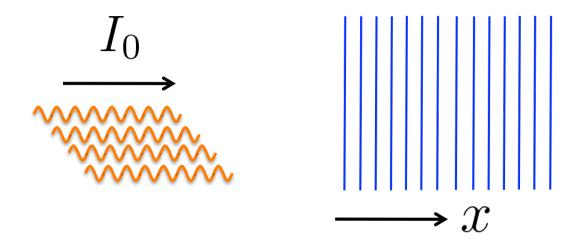


- ▶ Strange quark 質量の効果
 - $ightharpoonup \mathbb{C}P^2$ 空間にポテンシャルを誘導 [Eto, Nitta and Yamamoto (2009)]
 - ▶ 最小エネルギー解

$$\phi = \phi_0 \equiv (0, 1, 0)^T$$

$$f(\phi_0) = 1/3$$

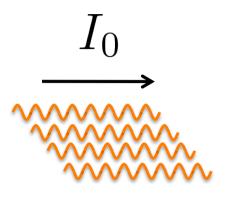
渦格子のマクロな電磁的性質

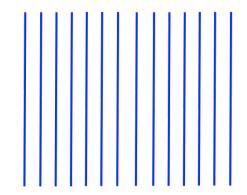


- m + 光が dx 進んだときに散乱される割合 $rac{d\sigma}{dz} n_v dx \equiv rac{dx}{L}$
- ▶ 光強度の満たす方程式

$$\frac{I(x+dx)}{I(x)} = 1 - \frac{dx}{L} \longrightarrow \frac{I(x)'}{I(x)} = -\frac{1}{L}$$

渦格子のマクロな電磁的性質





$$I(x) = I_0 e^{-x/L}$$

 $oldsymbol{\mathcal{X}}$:渦格子表面からの距離

$$L \equiv n_v / \frac{d\sigma}{dz}$$

 n_v :単位面積あたりの渦数

渦格子のマクロな電磁的性質

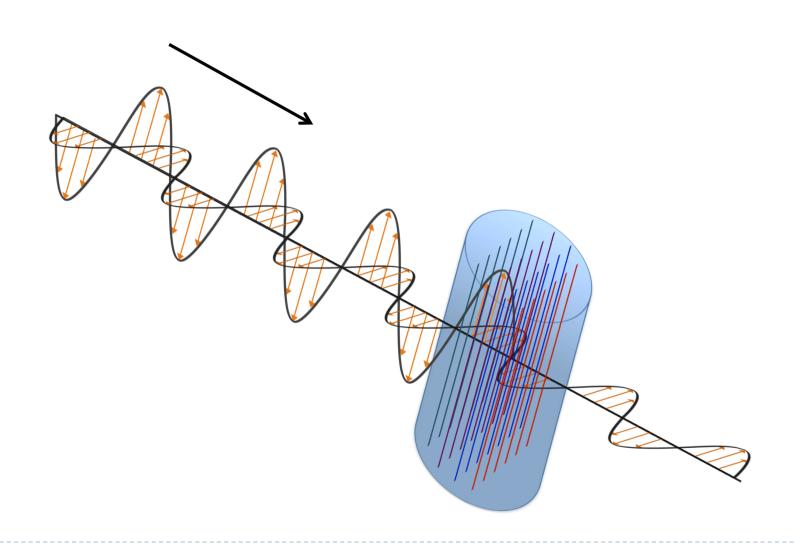
ト パラメータ: $\mu=900~{
m MeV}$, $\Delta=100~{
m MeV}$

$$L \simeq \frac{1.2 \times 10^{-11} \text{ m}^2}{\lambda}$$

▶ 渦格子のサイズが~Ikmとして、その中で減衰するよう な光の波長の条件は、

$$\lambda \ge 1.2 \times 10^{-14} \text{ m}$$

"偏光板"としての渦格子



まとめ

- ▶ CFL相の非可換量子渦の上に局在したorientational zero modeがU(I)の電荷を持つ
- ▶ 電磁場と orientational zero modeの有効理論を考え、電磁波と渦の散乱断面積を求めた。渦格子に入射した光の減衰長を求めた
- ある波長よりも長い波長を持つ光に対し、 渦格子は「偏光板」として振る舞う
- ▶ 応用: CFL物質のprobe
 - ▶ 磁場との相互作用による帰結