超流動性をともなうヒッグス相と閉じ込め相は区別可能か？

日高 義将
（京大基研）

近藤暖(東大), 早田智也(慶応)

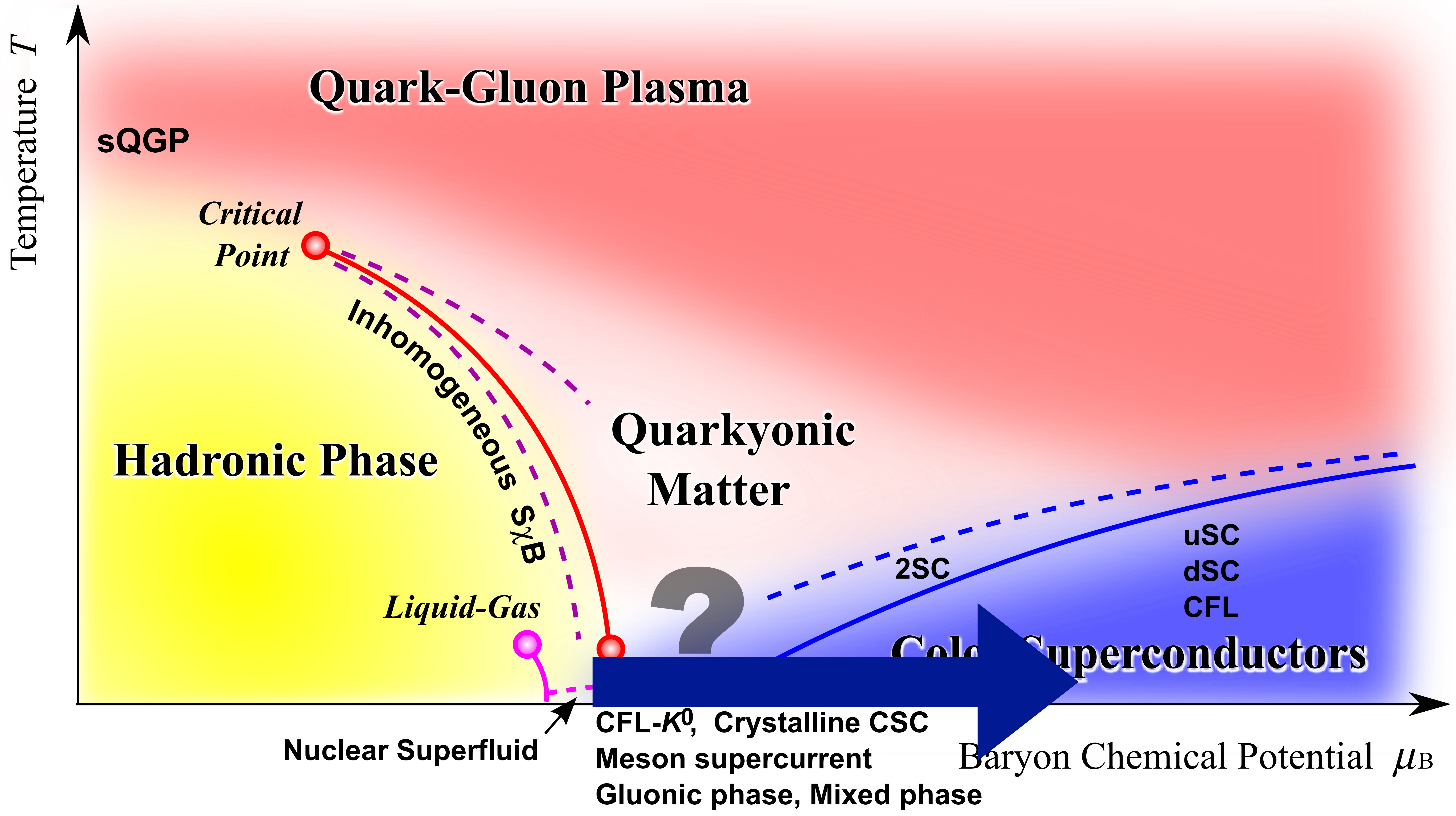
arXiv: 2409.xxxxx

目次

- 動機
- これまでの理解
- トポロジカル欠陥上の相転移の可能性
- まとめと展望

動機:QCD相図を理解したい

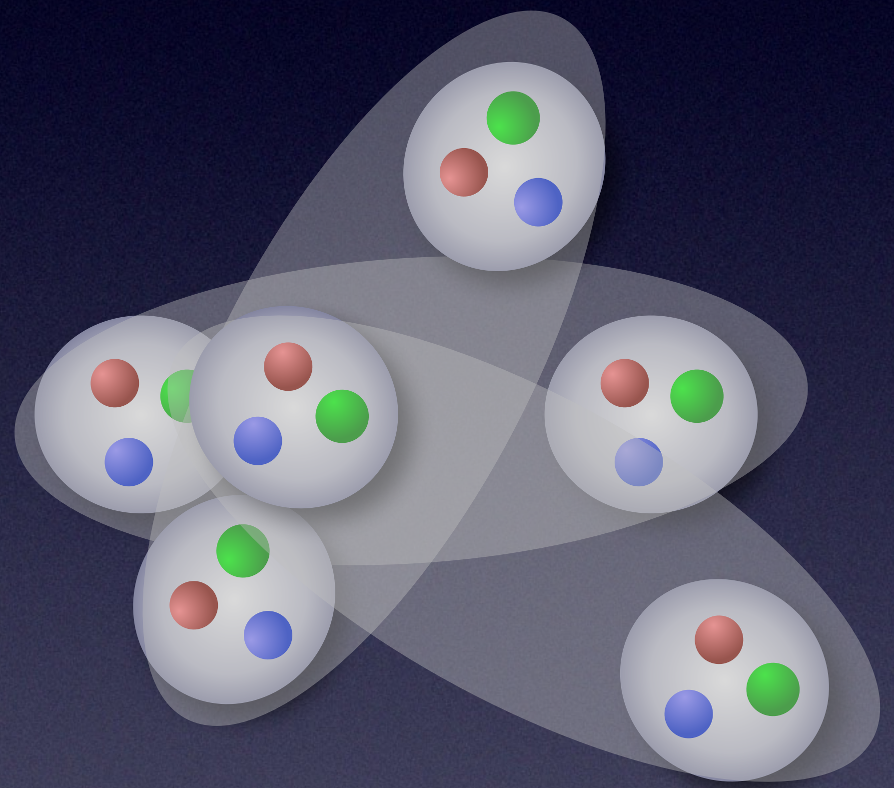
Fukushima, Hatsuda, Rept. Prog. Phys. 74 (2011) 014001



どういうことがわかっているか?

For 3-flavor QCD : $G = SU(3)_L \times SU(3)_R \times U(1)_B$

•超流動相(dilute phase)

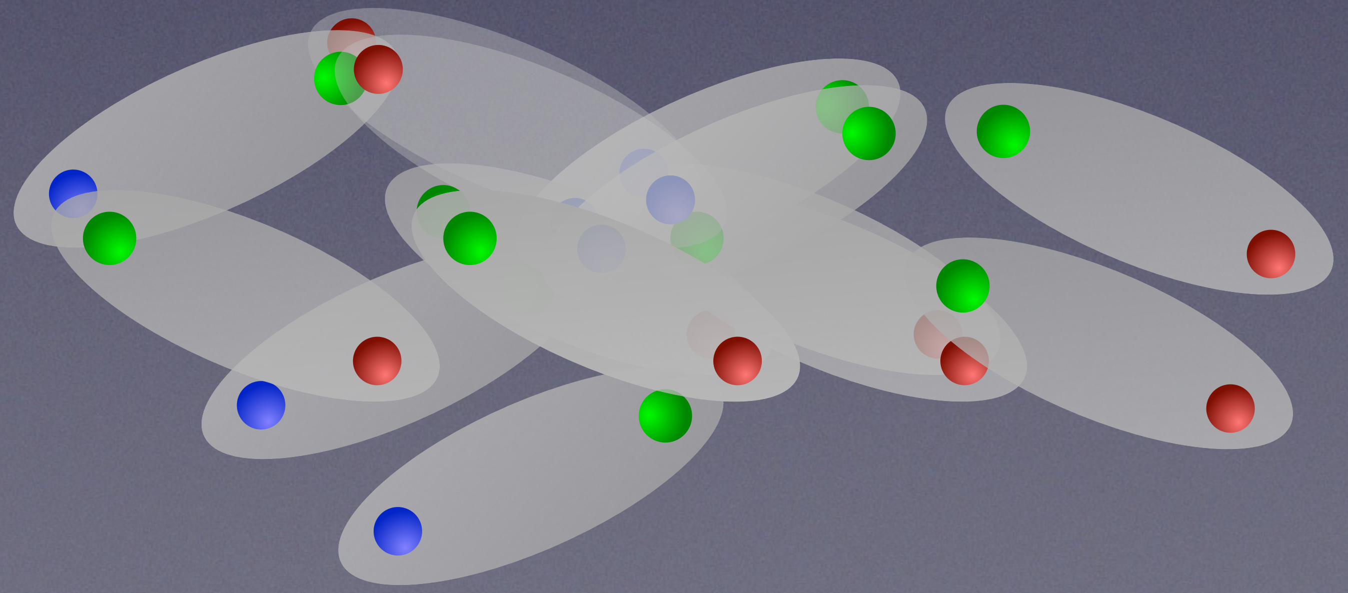


バリオン対凝縮

$$\Delta = \langle \Lambda\Lambda \rangle \neq 0 \qquad \Lambda \sim uds$$

$$SU(3)_L \times SU(3)_R \times U(1)_B \to SU(3)_V$$

•カラー超伝導相(dense phase)



"クォーク対凝縮"

$$(\Phi_L)^i_a = \epsilon^{ijk}\epsilon_{abc}\langle (q_L)^b_j (Cq_L)^c_k \rangle = -\epsilon^{ijk}\epsilon_{abc}\langle (q_R)^b_j (Cq_R)^c_k \rangle$$

$$SU(3)_L \times SU(3)_R \times U(1)_B \to SU(3)_V$$

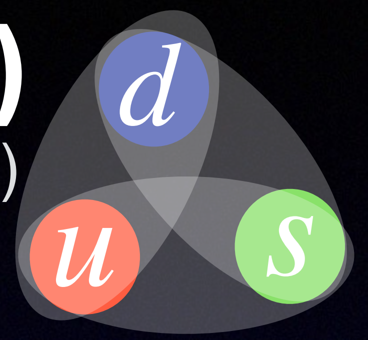
クォークハドロン連続性

Hatsuda, Tachibana, Yamamoto, Baym ('06)

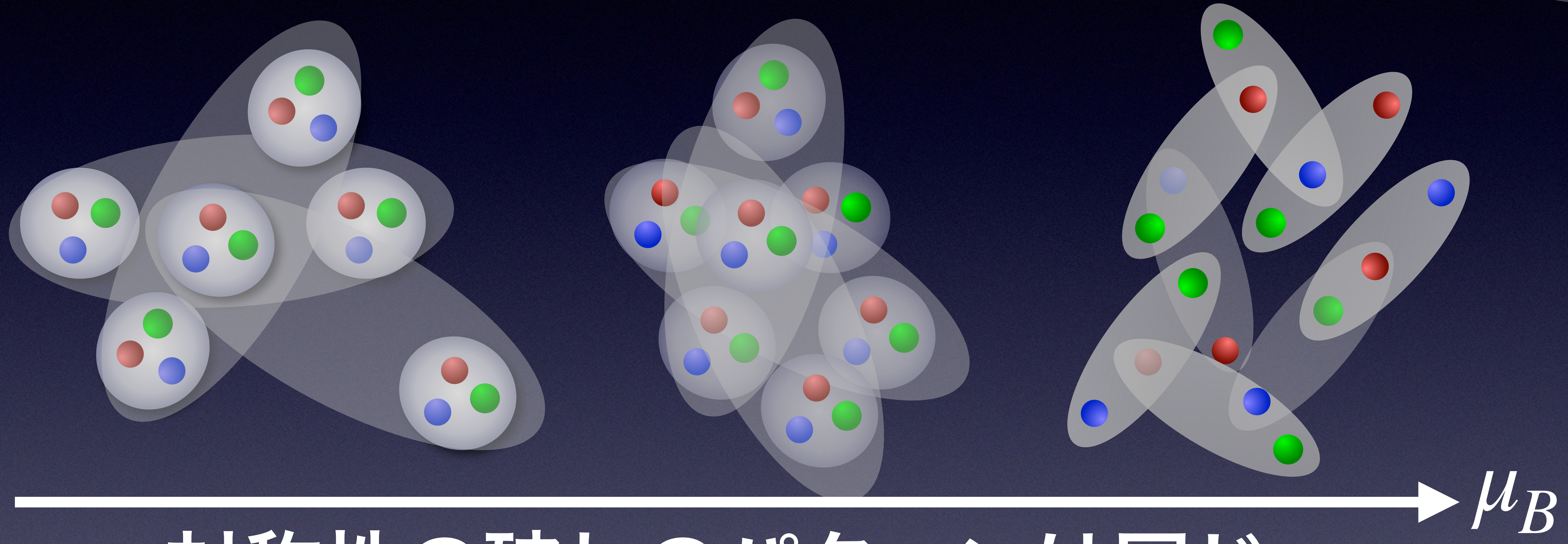
ハドロン超流動相

Tamagaki ('70), Hoffberg et al ('70)

カラー超伝導相(CFL相)



Alford, Rajagopal, Wilczek ('99)



対称性の破れのパターンは同じ

⇒クォークハドロン連続性

励起状態

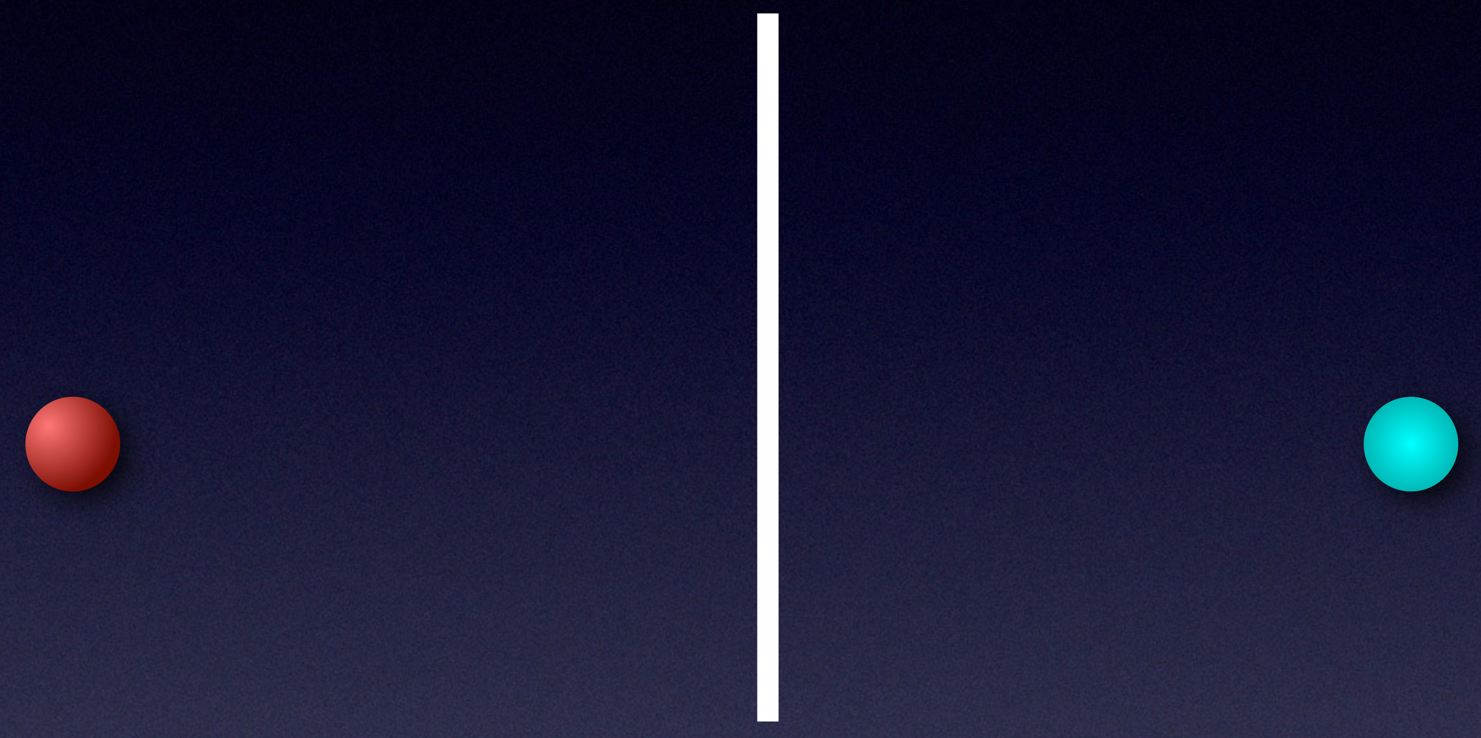
バリオン ⇒ クォーク

ベクトルメソン ⇒ グルーオン

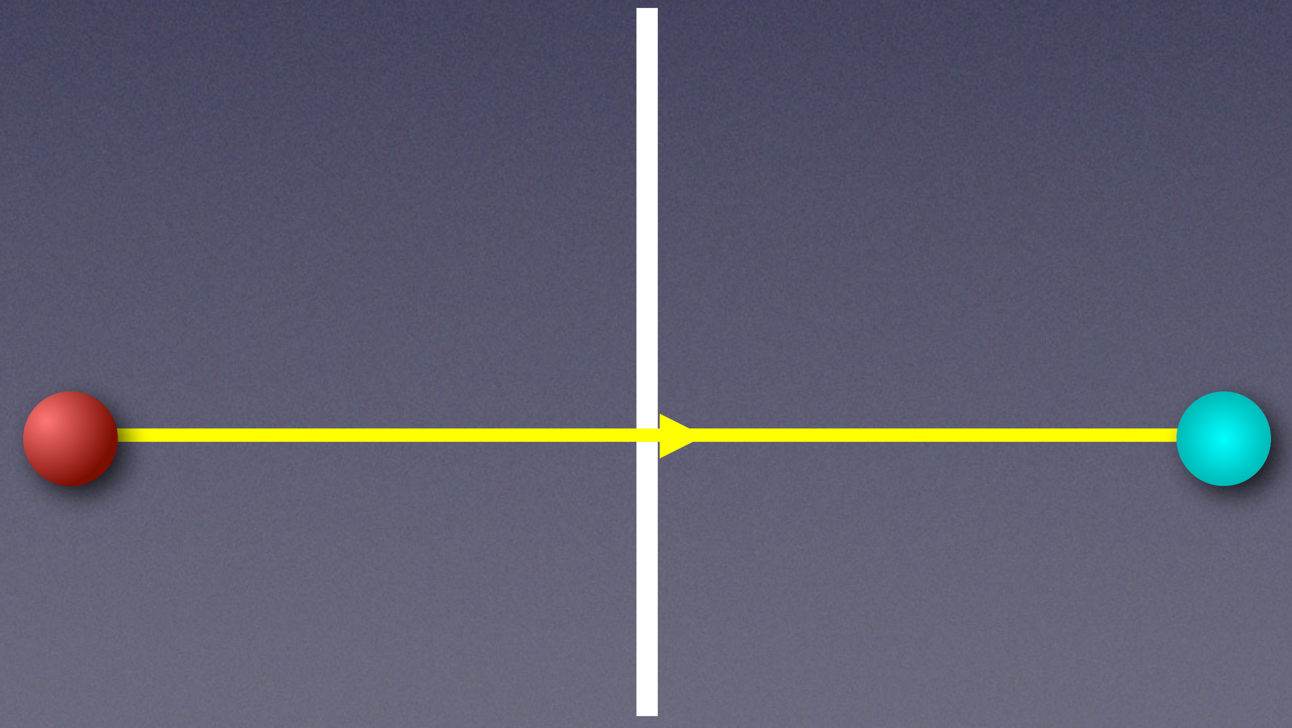
非閉じ込め相は定義可能

離れたテスト電荷ペアをおいて間を貫く電束を測る

電束を測る

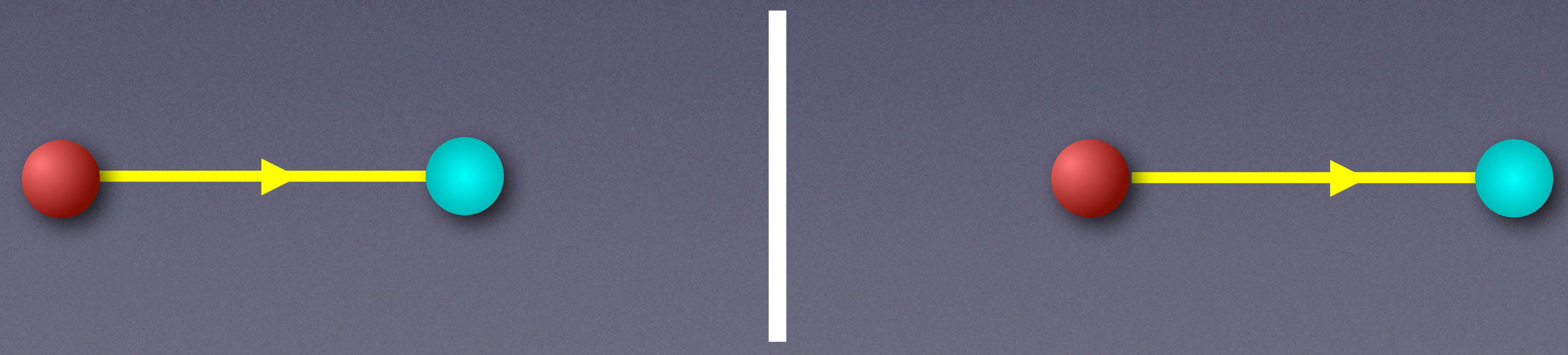


電束が存在: 非閉じ込め



遮蔽され電束がない:

非閉じ込め相ではない



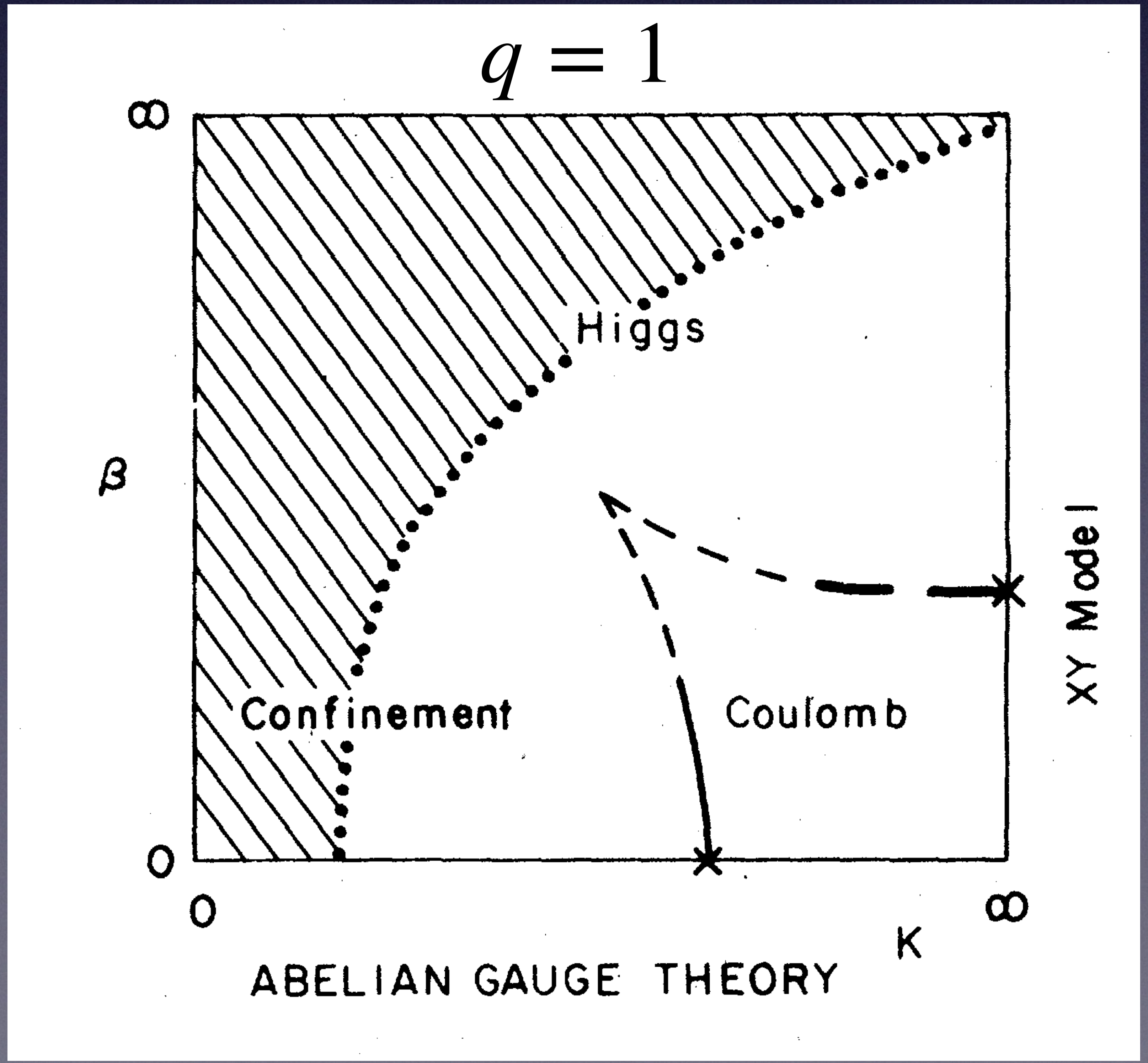
閉じ込めor Higgsの可能性

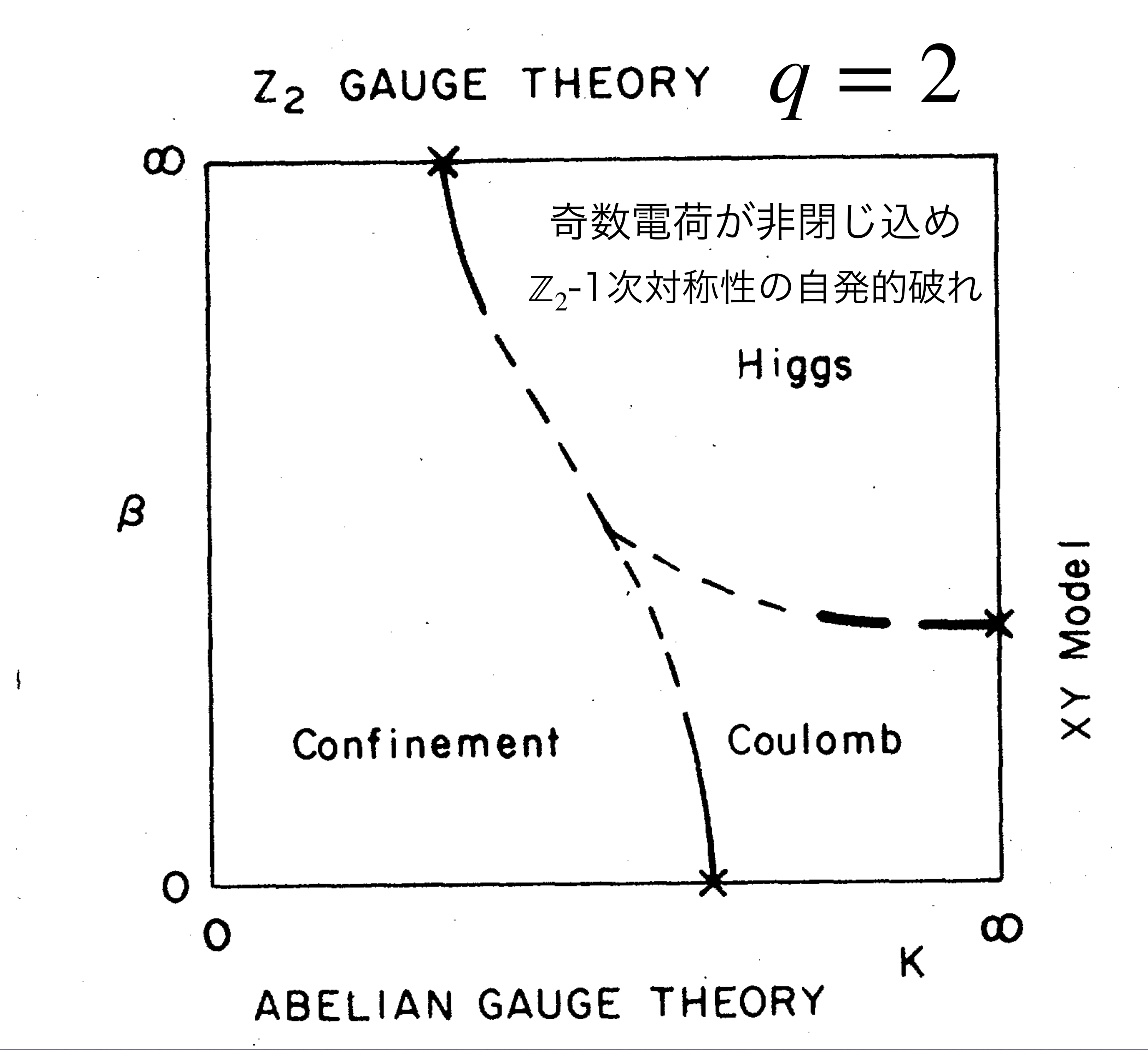
閉じ込め相とHiggs相は？

物理状態は定性的に異なるが相としては区別できない

例: Fradkin-Schenker Phys. Rev. D 19, 3682 ('79)

$$S = -K \sum_{x,\mu<\nu} \cos\left(F_{\mu\nu}(x)\right) - \beta \sum_{x,\mu} \cos\left(\Delta_\mu \varphi(x) - q A_\mu(x)\right)$$





一般に相が相転移で区別されるには,

- 理論に対称性があり
  自発的に破れている/破れていない
- 理論の対称性に保護されたトポロジカル相
- (高次)対称性が創発し自発的に破れている

物性物理の進展: トポロジカル相の理解の進展
場の量子論の進展: 一般化された対称性の発見

Gaiotto, Kapustin, Seiberg, Willet ('15)

⬇

場の量子論の対称性

= トポロジカルな広がった物体のなす代数(群とは限らない)

非自明なギャップのある量子相

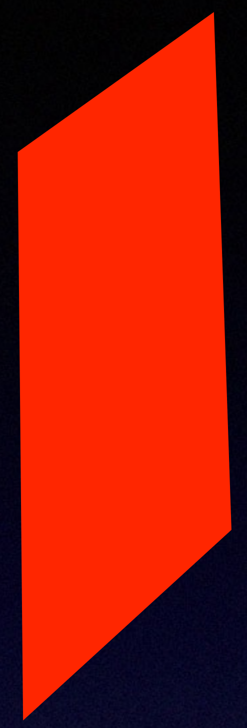
〜"自発的"に破れた(創発した)一般化対称性

＋境界がある時の量子異常(対称性に保護されたトポロジカル相)

低エネルギー有効理論: トポロジカルな場の理論

通常の対称性の例: $U(1)$対称性

$.\psi$



$U = e^{iQ\theta}$

$Q = \int dV j^0$

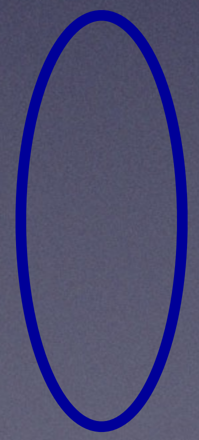
荷電物体
0次元的(場)

対称性演算子:時空の中の3次元物体
時間によらない(粒子数保存則) = トポロジカル

一般化対称性の例: $U(1)$ 1次対称性

$H = e^{i\int_C \tilde{A}_\mu dx^\mu}$

荷電物体
1次元的('t Hooft line)



$U_B = e^{i\theta Q_B}$

$Q_B = \frac{1}{2}\int d\boldsymbol{S}\cdot\boldsymbol{B}$

対称性演算子:時空中の2次元物体
時間によらない(磁束の保存則) = トポロジカル

現代的視点では,

超伝導相を$U(1)$ゲージ対称性の自発的破れとは見ない

超伝導相=磁束保存の対称性が破れてない相

クーロン相=磁束保存の対称性が自発的に破れた相

⇒光子は南部ゴールドストンボソン

クーパーペアが凝縮した超伝導相は

超伝導渦の磁束が $\dfrac{2\pi}{q} = \dfrac{2\pi}{-2} = -\pi$ に量子化されている

⇒トポロジカル秩序を持つ相(創発した$\mathbb{Z}_2$ 1次対称性が自発的に破れた相)

QCD相図を再検証

閉じ込め相 vs カラー超伝導(Higgs)相

問:　仮想実験: 回転する中性子星

CFL相の安定な渦は1/3の$U(1)_B$の巻き付き数

Balachandran, Digal, Matsuura ('06)

CFL相の渦には磁束が刺さっている
トポロジカル相では？

Cherman, Sen, Yaffe ('19)

創発した対称性が自発的破れていないので
トポロジカル相ではない

Hirono, Tanizaki ('19)

カラー超伝導の渦には磁束が刺さっている
ハドロン相には刺さっていないはず

⇒相が区別できるはず

Cherman, Jacobson, Sen, Yaffe ('20)

ハドロン相にも磁束が刺さっていてもいいし,
途中で消えていっても良い

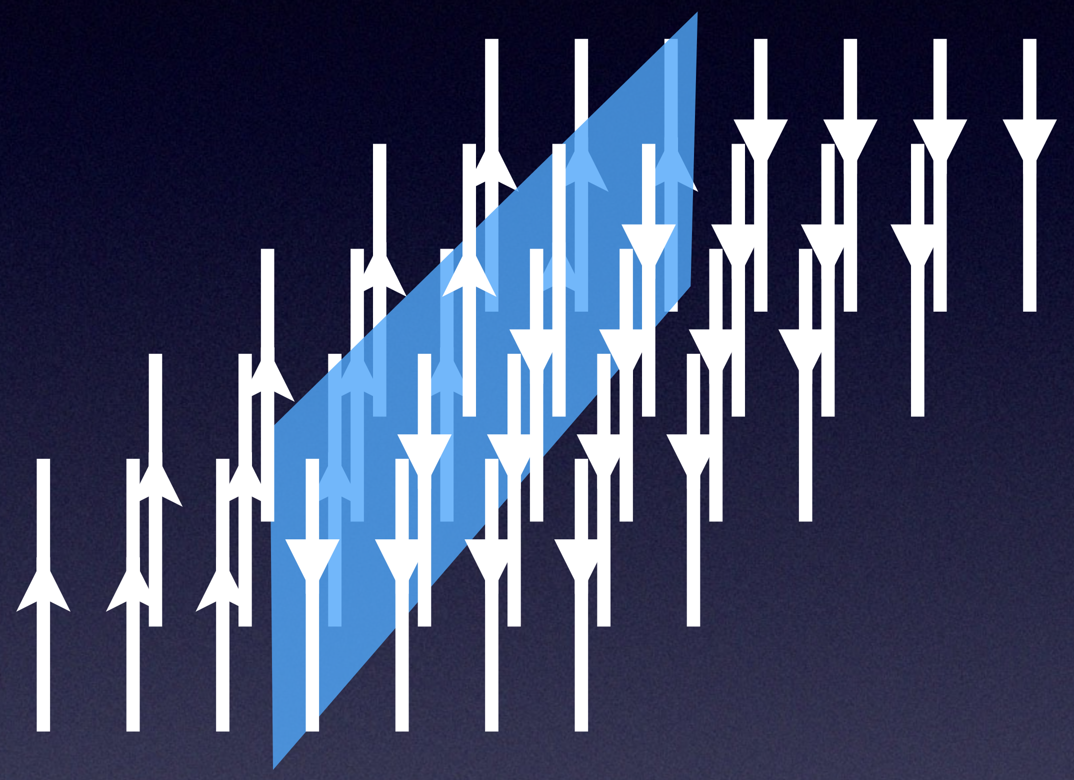
Hayashi ('23)

目次

- 動機
- これまでの理解
- トポロジカル欠陥上の相転移の可能性
- まとめと展望

バルクは連続的につながるが
位相欠陥上に相転移が起きる可能性はないか？

ドメインウォール



量子渦

答えはYes

位相欠陥上の有効理論は低次元系の場の理論で相転移を起こす可能性

超流動性をともなう場合は量子渦が相転移を起こす可能性がる

具体例: $U(1)_{\text{gauge}} \times U(1)_{\text{global}}$ 格子模型

cf. Motrunich, Senthil ('05)

$$S = -K \sum_{x,\mu<\nu} \cos\left(F_{\mu\nu}(x)\right) - \beta \sum_{x,\mu} \sum_{a=1,2} \cos\left(\Delta_\mu \varphi_a(x) + A_\mu(x)\right)$$

場の強さ　スカラー場 (位相の自由度)　ゲージ場

$\Delta_\mu \varphi_a(x) = \varphi_a(x+\hat{\mu}) - \varphi_a(x)$

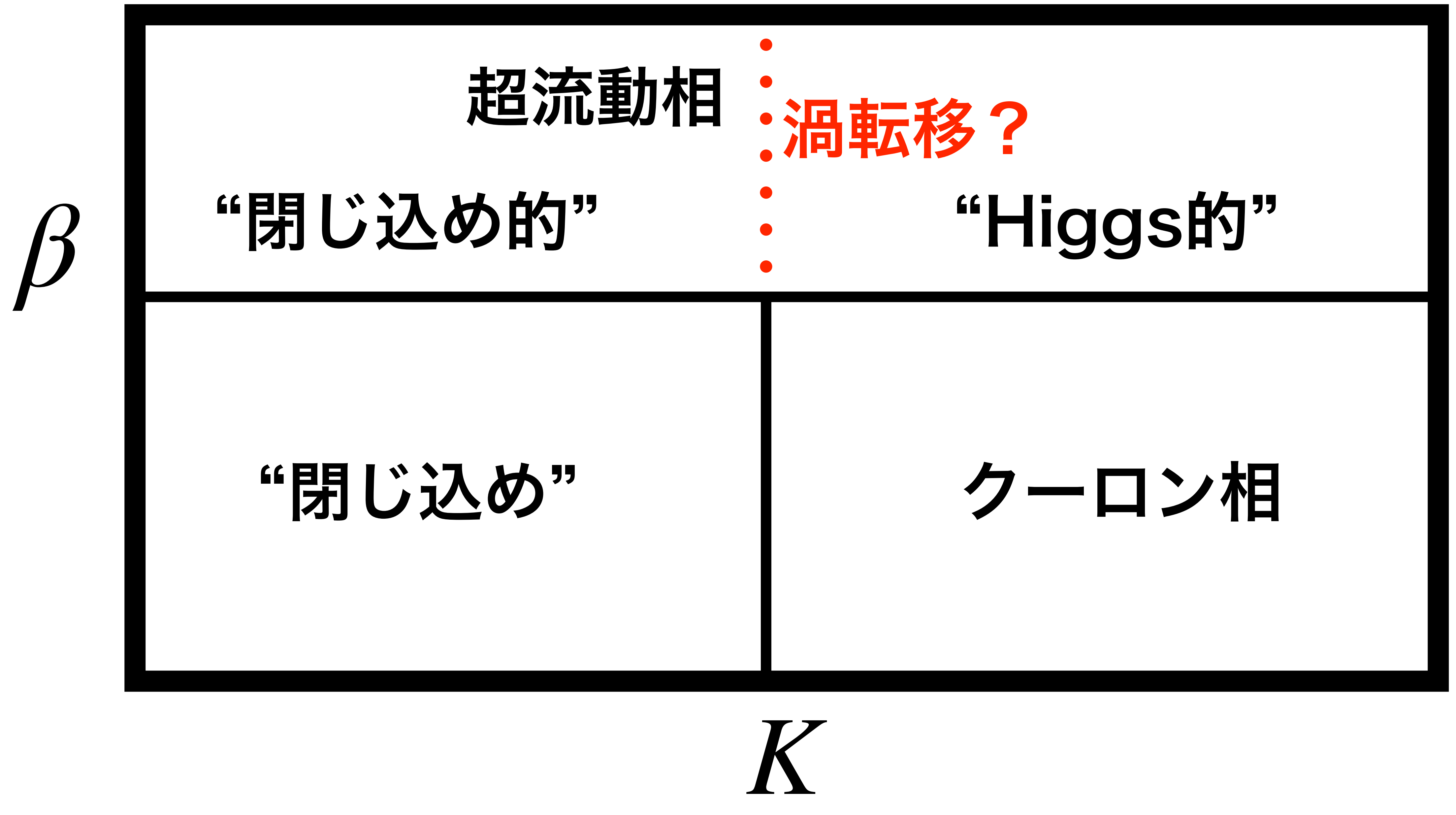
対称性

$$U(1)_{\text{gauge}} : \begin{array}{l} \varphi_1 \to \varphi_1 - \lambda \\ \varphi_2 \to \varphi_2 - \lambda \\ A_\mu \to A_\mu + \Delta_\mu \lambda \end{array}$$

$$U(1)_{\text{global}} : \begin{array}{l} \varphi_1 \to \varphi_1 + \theta \\ \varphi_2 \to \varphi_2 - \theta \end{array}$$

$$\mathbb{Z}_{2F} : \begin{array}{l} \varphi_1 \to \varphi_2 \\ \varphi_2 \to \varphi_1 \end{array}$$

相図



具体例: $\mathrm{U}(1)_{\mathrm{gauge}} \times \mathrm{U}(1)_{\mathrm{global}}$ 格子模型

強結合$K \ll 1$(閉じ込め的)

ゲージ場を積分した有効作用

$$S_{\mathrm{eff}} = -\sum_{x,\mu} \ln I_0 \left[2\beta \cos\left(\frac{\Delta_\mu \varphi_1(x) - \Delta_\mu \varphi_2(x)}{2} \right) \right]$$

$I_0(z)$:変形Bessel関数

実質的自由度は$\varphi_1 - \varphi_2$の一つ

渦は１種類で１重項

弱結合$K \gg 1$(Higgs的)

$$S = -K \sum_{x,\mu<\nu} \cos\left(F_{\mu\nu}(x)\right)$$

$$-\beta \sum_{x,\mu} \sum_{a=1,2} \cos\left(\Delta_\mu \varphi_a(x) + A_\mu(x)\right)$$

区別可能なφ_1とφ_2が存在

$\mathbb{Z}_{2F}$が自発的に破れている

具体的な判定法

離散的対称性が破れた場合:境界条件を対称性で

ひねるとドメインウォールができる

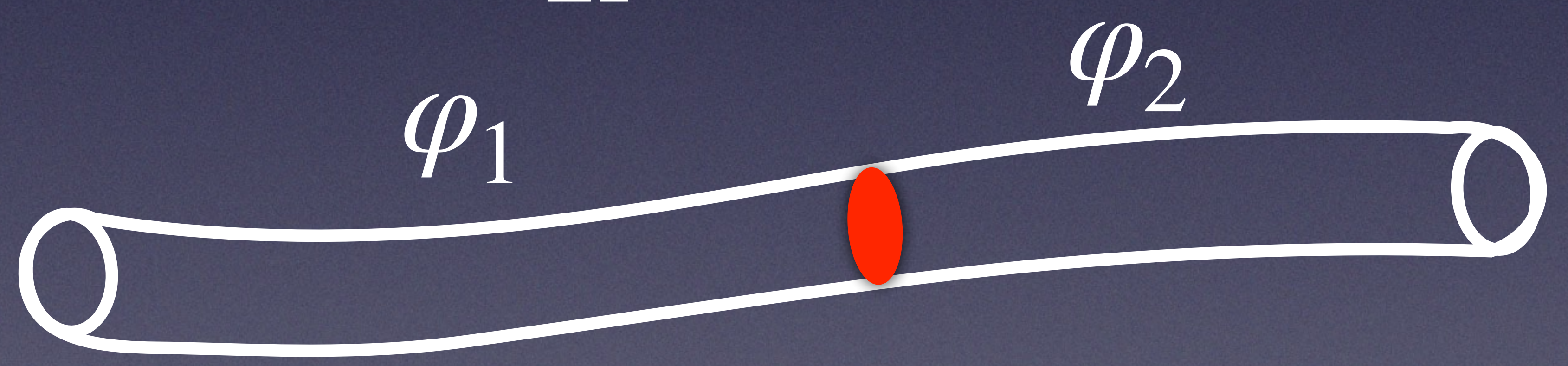
例: Ising模型

強磁性相($\mathbb{Z}_2$が破れた相)

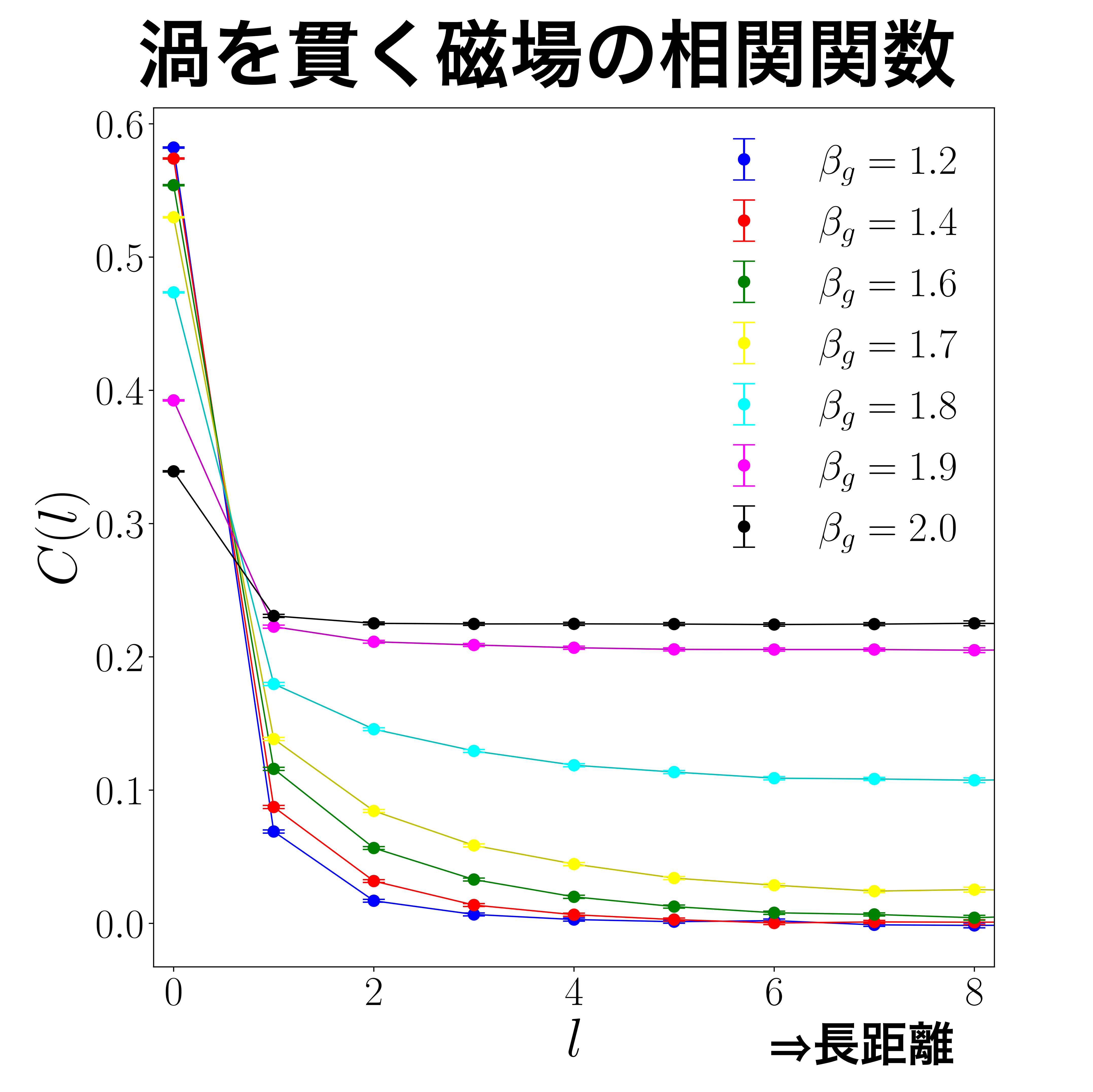
$\uparrow\uparrow\uparrow\uparrow\uparrow\uparrow|\downarrow\downarrow\downarrow\downarrow\downarrow\downarrow$

$\mathrm{U}(1)_{\mathrm{gauge}} \times \mathrm{U}(1)_{\mathrm{global}}$模型

弱結合($\mathbb{Z}_{2F}$が破れた相)



数値計算結果



渦

弱結合(β_gが大)で

長距離の相関関数が有限

対称性が自発的に破れている

➡ 渦上に相転移

まとめ

超流動性をともなうヒッグス相と

閉じ込め相は区別可能か？

⇒Yes, 渦上の相転移によって区別できる場合がある

より一般には様々な位相欠陥の相転移がありうる

余次元 1: ドメインウォール上の相転移

余次元 2: 渦の相転移

余次元 3: 準位交差

ドメインウォールのジャンクション上の相転移も考えられる