
格子QCDシミュレーションによる クォーク閉じ込め機構の研究

関戸 暢

Kanazawa-univ & RIKEN

共同研究者

石黒克也、鈴木恒雄、中村宜文、森祥寛

Kanazawa-univ & RIKEN
















目次

1. 素粒子論について

2. クォーク閉じ込め問題

3. 格子ゲージ理論

イントロダクション

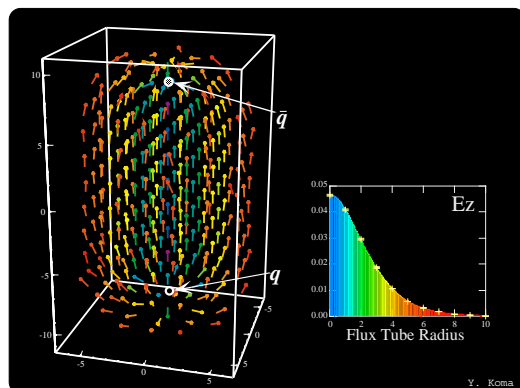
| | 一世代 | 二世代 | 三世代 |
|------|---|---|---|
| クォーク |    |    |    |
| レプトン |   |   |   |

4. デュアルミスナー描像

5. ゲージ依存問題

6. 現在の研究と展望

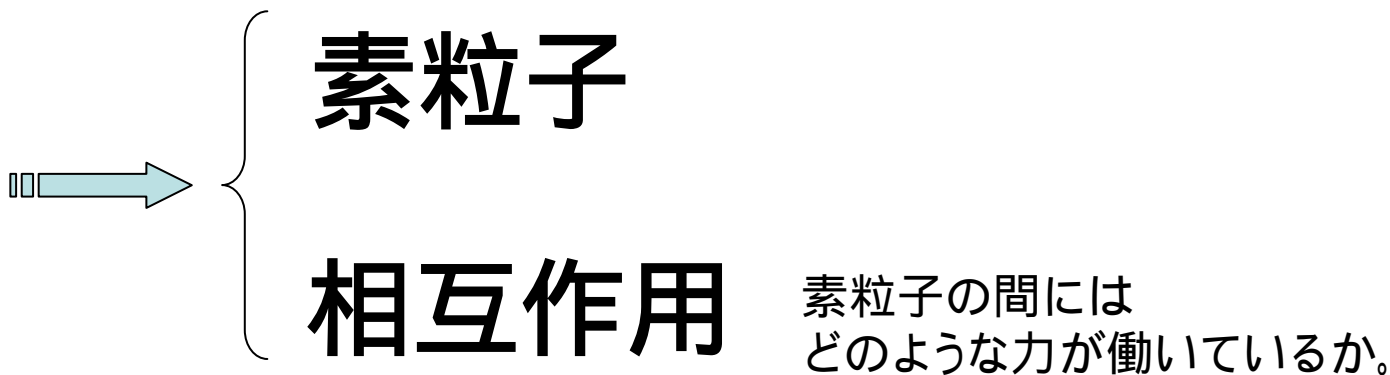
閉じ込め問題



1. 素粒子論について

素朴かつ難解な疑問

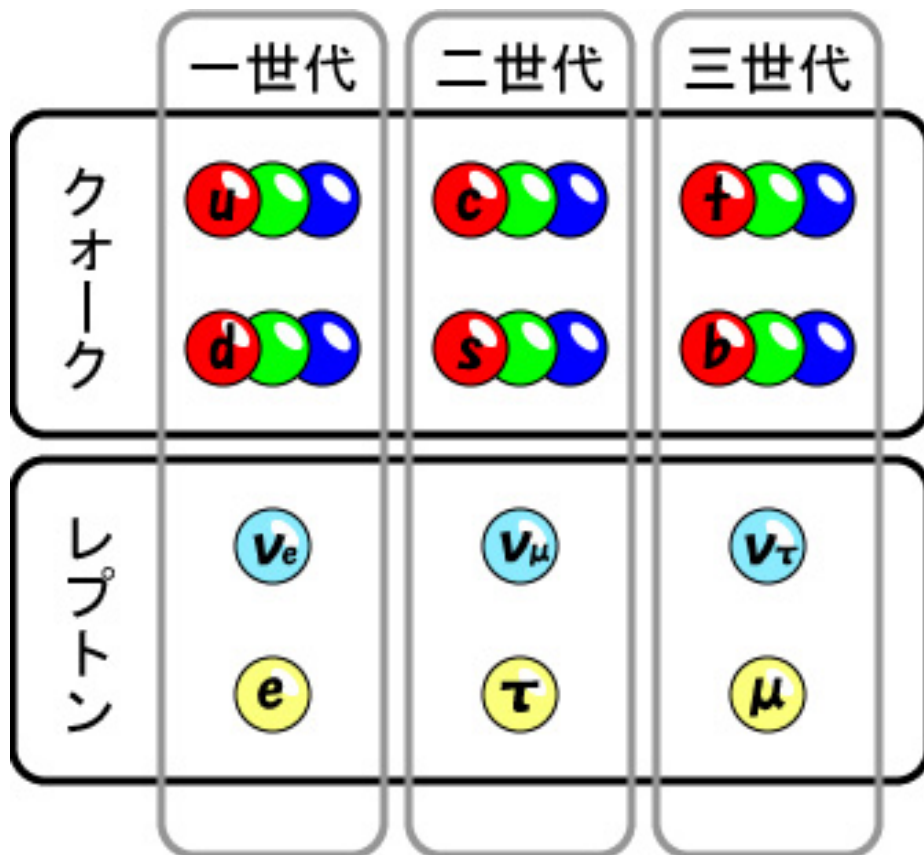
物質は何からできているか？素の粒子は何か？



標準模型

1. 素粒子論について

標準模型 — 物質粒子の種類 —



- ★ 横の並びは電荷が同じ。
- ★ 同じセットが3世代ある。
- ★ ヒッグスは発見されていない。

1. 素粒子論について

標準模型

相互作用の種類

電磁相互作用

荷電粒子が受ける相互作用

電荷

$$\frac{2}{3}$$













$$-\frac{1}{3}$$

$$0$$

$$-1$$

媒介粒子

γ : 光子

| | 一世代 | 二世代 | 三世代 |
|------|---|---|---|
| クォーク |  |  |  |
| |  |  |  |
| レプトン |  |  |  |
| |  |  |  |

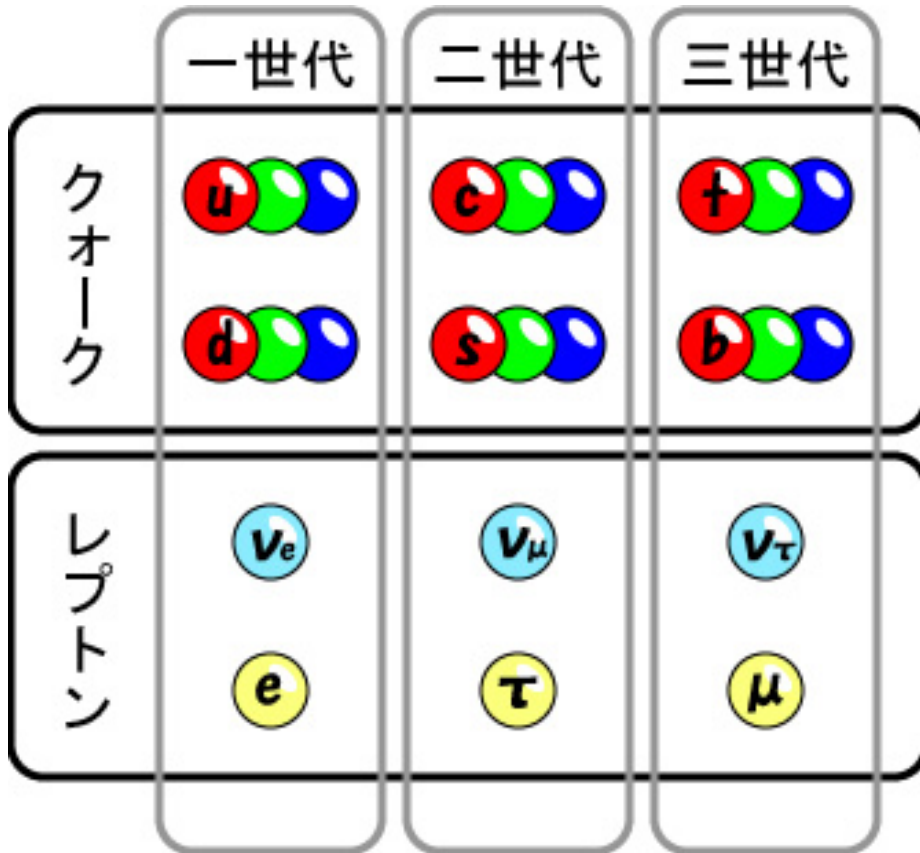
1. 素粒子論について

標準模型

相互作用の種類

弱い相互作用

クォーク、レプトン等
が受ける相互作用



媒介粒子
 W^\pm, Z
: Wボゾン, Zボゾン

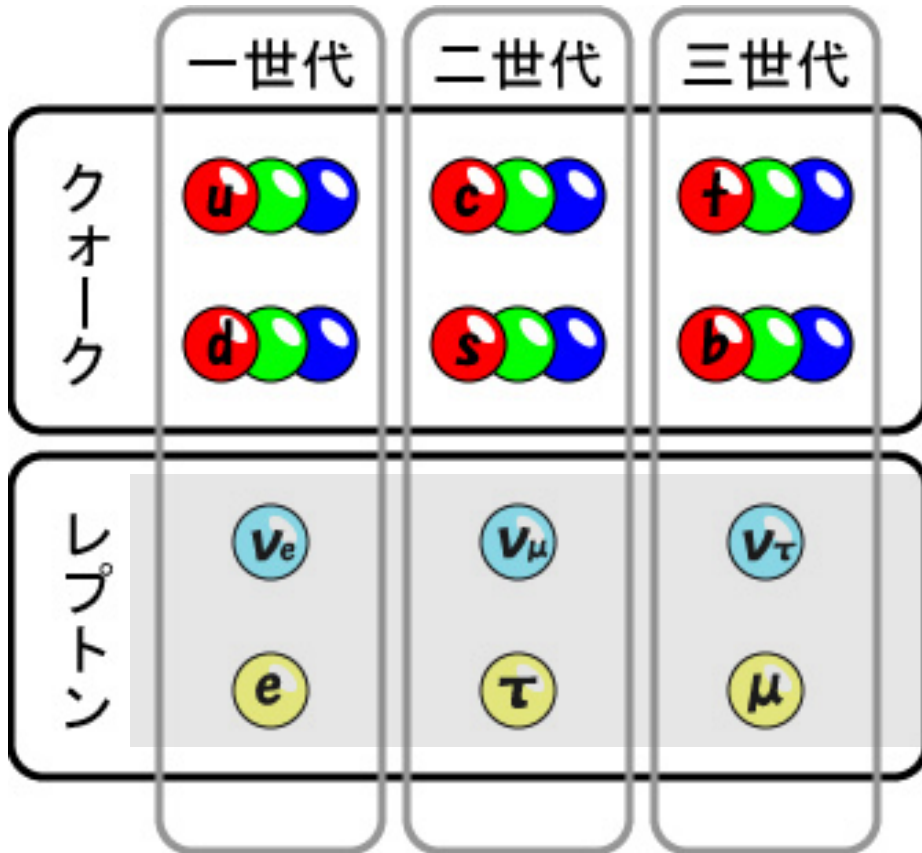
例) 中性子のベータ崩壊等

1. 素粒子論について

標準模型 — 相互作用の種類 —

強い相互作用

カラーの自由度を持った粒子
が受ける相互作用



媒介粒子

g : グルーオン

この研究で注目する力

1. 素粒子論について

量子電磁力学

QED

量子色力学

QCD

電磁相互作用

強い相互作用

結合定数 $\mathcal{O}(10^{-2})$

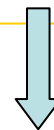
摂動計算可能

結合定数 $\mathcal{O}(1)$

摂動計算不適當

アーベリアン

ノンアーベリアン

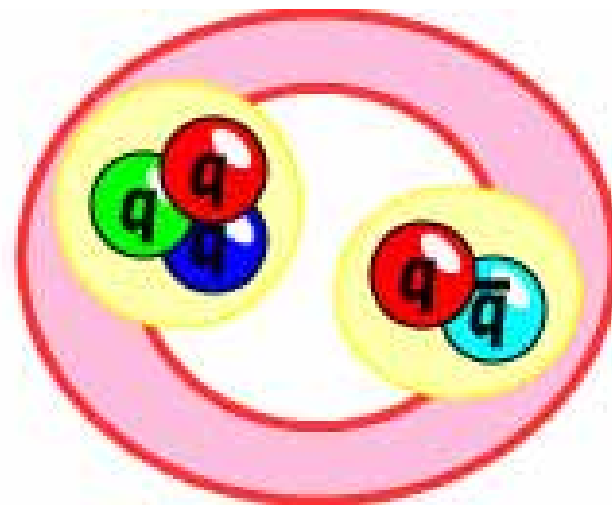
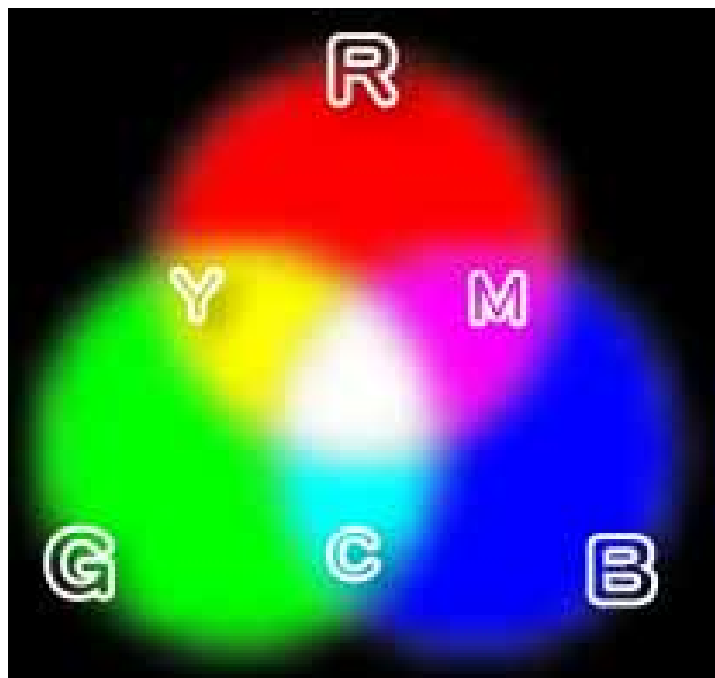


クォークの閉じ込め

2. クォーク閉じ込め問題

クォークの閉じ込めとは

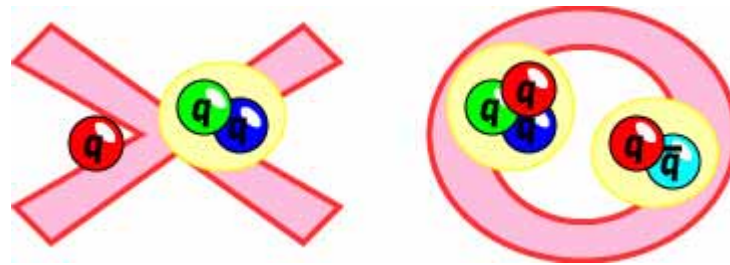
クォークは**単体では観測されず**、
常に**カラー不変**な状態でのみ観測可能。



2. クォーク閉じ込め問題

クォークの閉じ込めとは

クォークは**単体では観測されず**、
常に**カラー不変**な状態でのみ観測可能。



クォークを単体で取り出すことが難しい

クォーク間ポテンシャルは**クォーク間距離に比例**する。

$$V(r) \sim \sigma r$$

リニアポテンシャル

← ストリングテンション



Millennium Problems

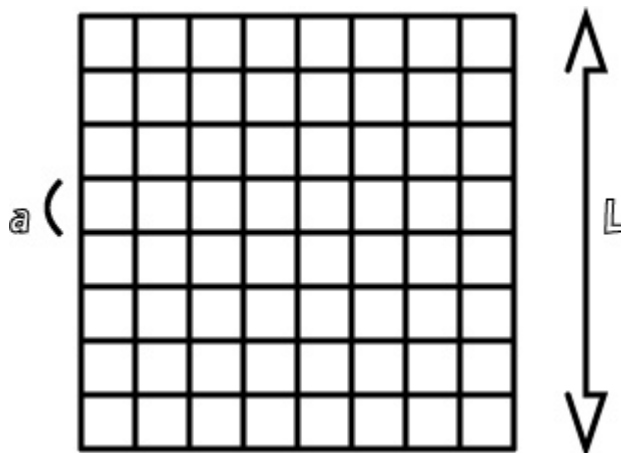
懸賞金

100万ドル

- 1 P NP予想
(P versus NP)
- 2 ホッジ予想
(The Hodge Conjecture)
- 3 ポアンカレ予想
(The Poincaré Conjecture)
- 4 リーマン仮説
(The Riemann Hypothesis)
- 5 ヤン-ミルズ方程式と質量ギャップ問題
(Yang-Mills Existence and Mass Gap)
- 6 ナビエ-ストークス方程式の解の存在と滑らかさ
(Navier-Stokes Existence and Smoothness)
- 7 BSD予想
(The Birch and Swinnerton-Dyer Conjecture)

格子ゲージ理論

- ★ 量子場の理論の**非摂動的取り扱い**の一つ。
- ★ 無限次元重積分を有限自由度の積分へ置き換えることで、**発散のない正則化**となっている。
- ★ モンテカルロ法による**コンピューターシミュレーションが可能**。**連続極限**をとることで厳密な場の理論の定式化となっている。



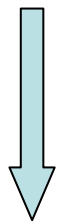
格子ゲージ理論

議論可能な興味深い計算(の一部)

- ★ ハドロンの質量、散乱、崩壊現象などが定量的に計算可能である。
- ★ 有限温度系での相転移の研究が可能である。
例えばクォークグルーオンプラズマ相への相転移の転移温度や状態方程式など。
- ★ ハドロン行列要素の計算が可能である。
現象論へインプットパラメータを与える事になる。
- ★ クォーク閉じ込め問題。

4. デュアルマイスナー効果

クォークの閉じ込め



有力なモデル

(‘tHooft & Mandelstam, '75)



デュアルマイスナー効果

超伝導現象のマイスナー効果の類推

カラー電荷 (クォーク)
カラー電場
カラー磁荷 (モノポール)

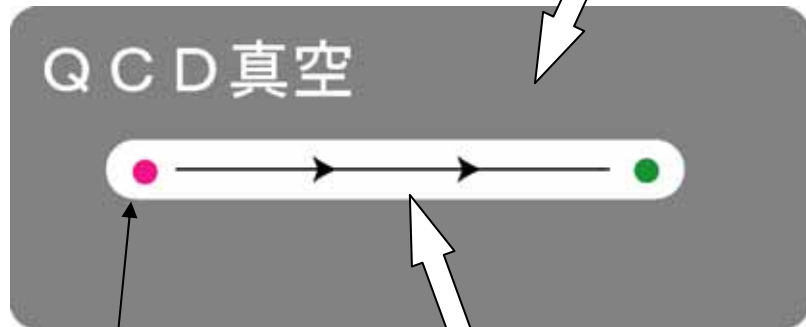
双対

単磁荷 (?)
磁場
電荷 (電子)

4. デュアルマイスナー効果

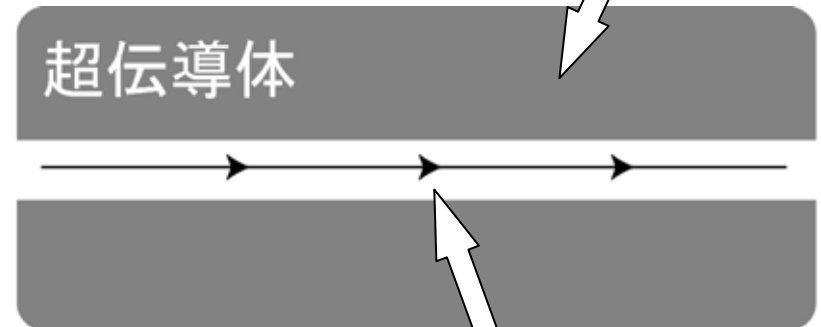
QCD

カラー磁荷を持つ
モノポールの凝縮



超伝導

クーパー対の凝縮

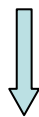


$$V(r) \sim \sigma r$$

ストリングテンション

4. デュアルマイスナー効果

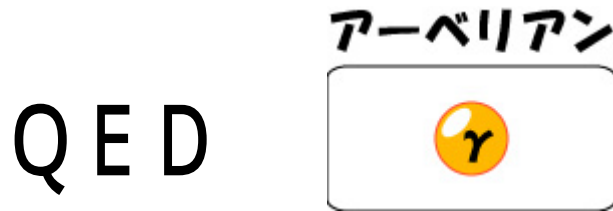
QCDのラグランジアンにはモノポールはあらわには存在しない。
隠された自由度になっている？



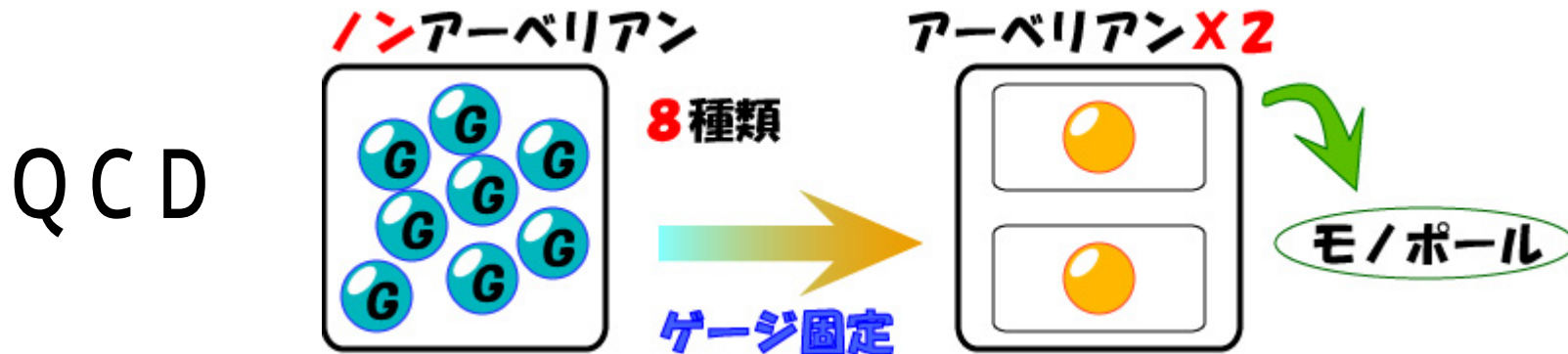
アーベリアン射影 ('tHooft,'81)

4. デュアルマイスナー効果

アーベリアン射影 ('tHooft,'81)



アーベリアン理論は媒介粒子が
一種類しかない。



ノンアーベリアン理論では相互作用の媒介粒子が複数存在し互いに
相互作用する。この自由度を固定して独立な自由度だけを取り出す。

→ **アーベリアン射影**

4. デュアルマイスナー効果

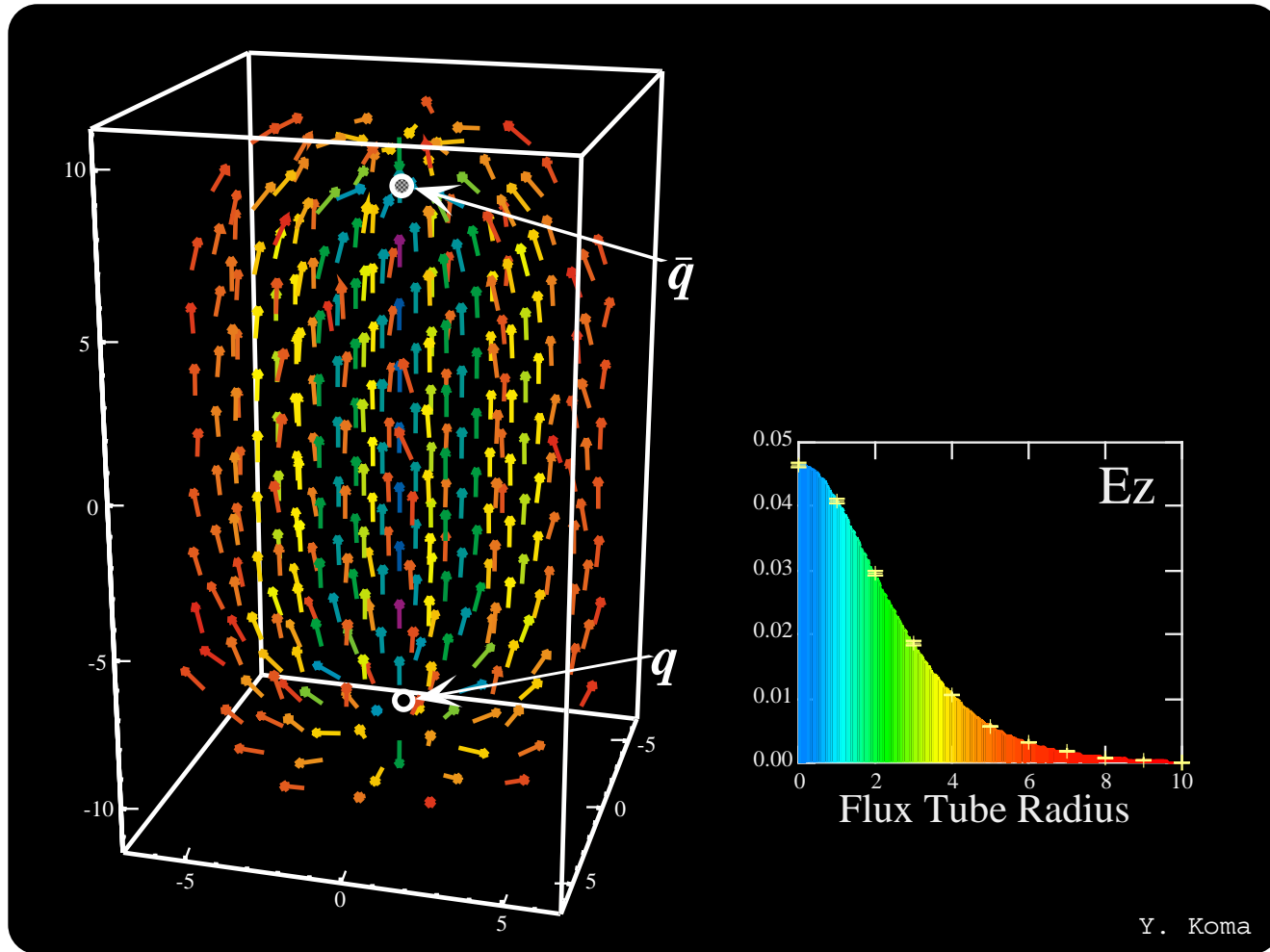
アーベリアン射影 ('tHooft, '81)

このアーベリアン射影から導かれたモノポールは格子シミュレーションで詳しく調べられており、特定のゲージ固定(MAゲージ固定)では予想された結果が得られることが分かった。

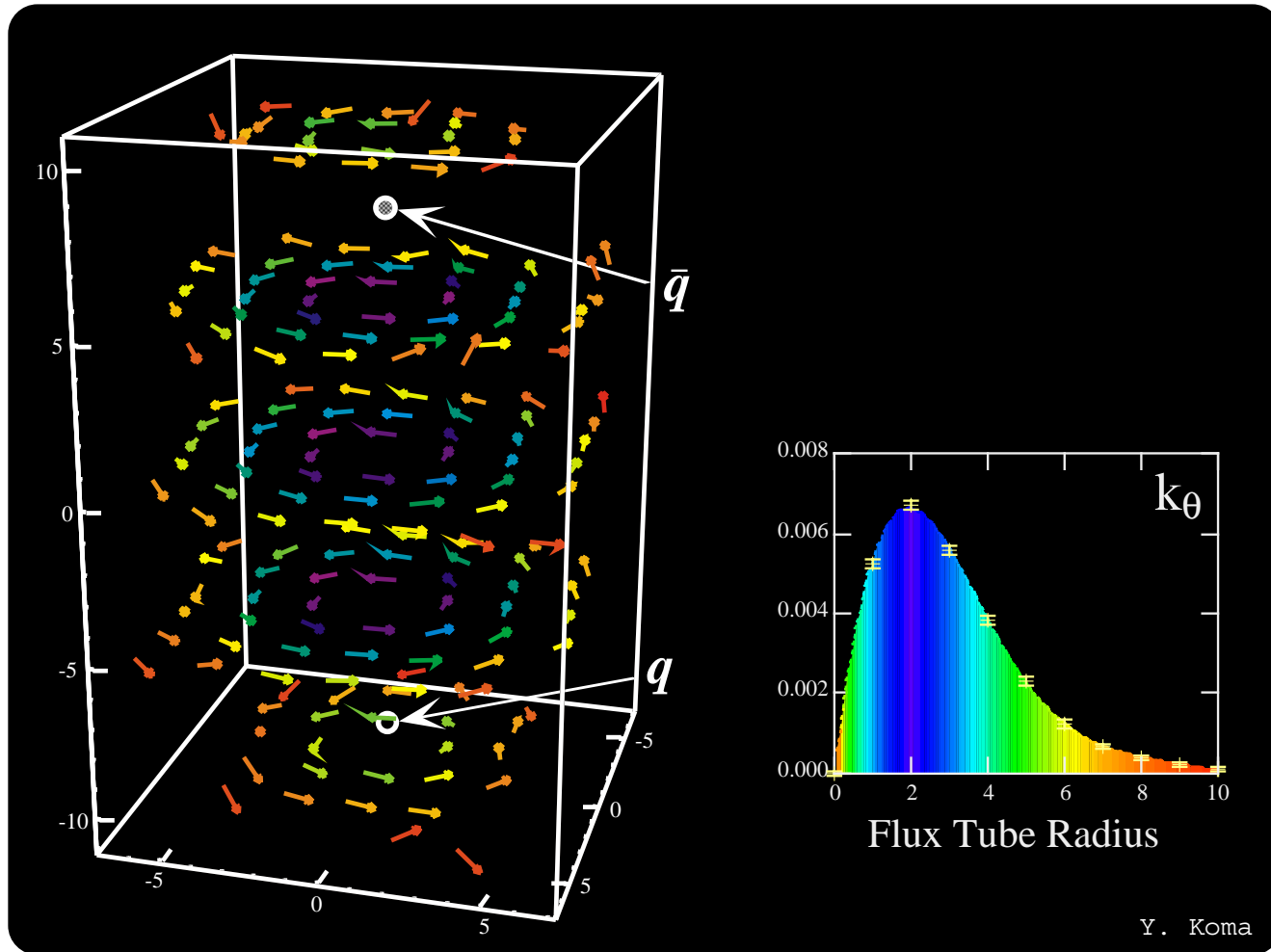
格子結果として

- MA ゲージ固定でのアーベリアンドミナンス
(Suzuki & Yotsuyanagi, '90)
- MA ゲージ固定でのモノポールドミナンス
(Hioki et al, '91)
- MA ゲージ固定でのデュアルマイスナー描像
(Y.Koma, et al, '03 . G.Bali, '98)

クォーク反クォーク対をソースとしたときの**カラー電場**の様子。

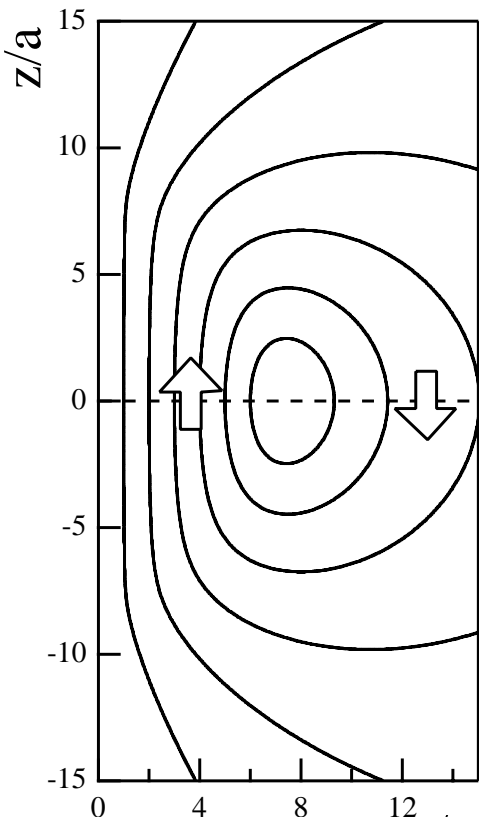


クォーク反クォーク対をソースとしたときの**モノポール**の様子。

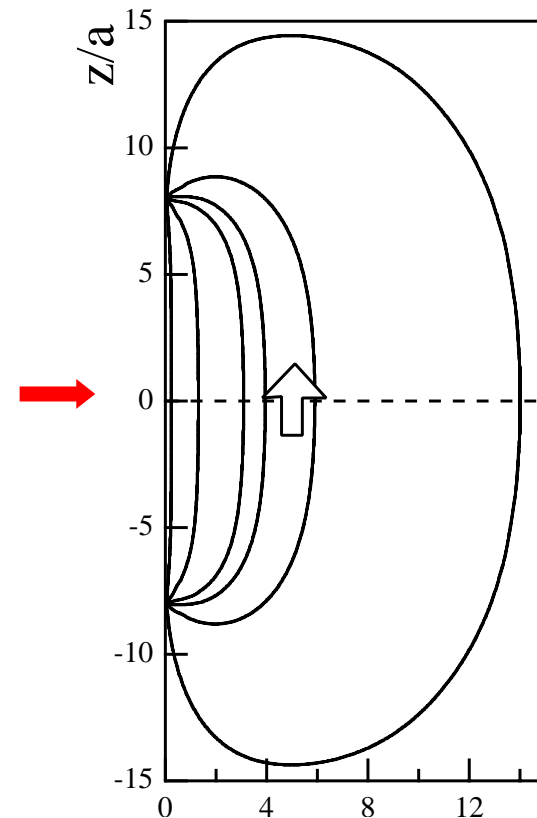
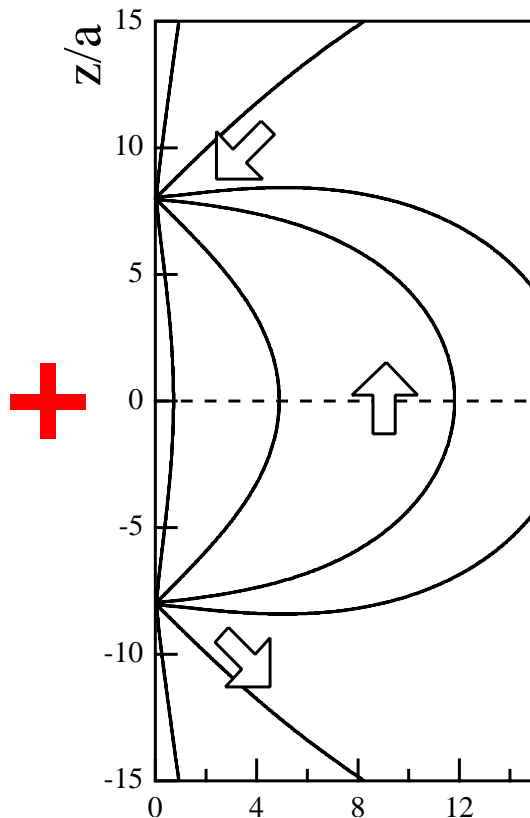


4. デュアルマイスナー効果

モノポール



クーロン



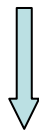
★ クォーク反クォークの周りにソレノイダルカレントとして磁流が回っていると、クーロン電場の外側を打ち消し内側を強化する電場を発生させる。

(注 上の図はDGLの解をもとに書かれている。)

5. ゲージ依存問題

アーベリアン射影はゲージ固定によって
アーベリアンの自由度を抜き出すため、**ゲージ固定の任意性**が生じる。
これまでの格子シミュレーションでは**MAゲージ固定**とその周辺のゲージ固定でしか
デュアルミスナー効果を示せていなかった。

ゲージ依存問題



2つのアプローチ

(理研SX7を用いた研究)

- ★ ゲージ不変なモノポールの定式化。
- ★ MAゲージ固定以外の性質の悪いゲージ固定での再検証。

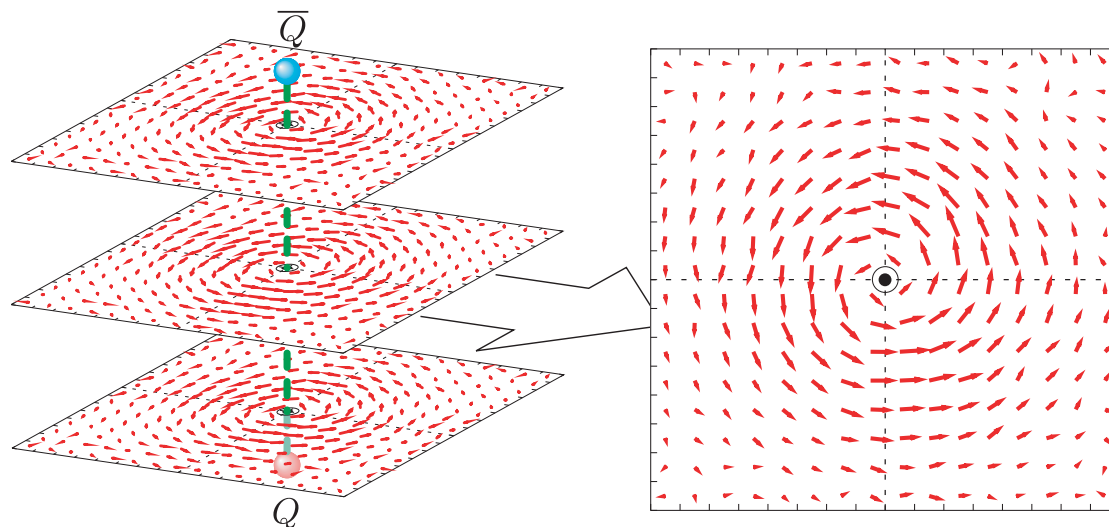
6. 現在の研究と展望

ランダウゲージ固定での結果

T.Suzuki, et al , Phys.Rev.Lett 94.132001(2005)

ランダウゲージ固定では、格子上のDGTモノポールはなくなってしまう。


変位磁流がモノポールかわりに
デュアルマイスナー効果を導くソレノイダルカレントとして働く。



6. 現在の研究と展望

F12ゲージ固定での結果

ユニタリゲージと呼ばれる単純なゲージ固定の一つである。
ユニタリゲージについては、
これまでのシミュレーションでは閉じ込めを示す結果は得られていない。



ユニタリゲージ固定により導かれたアーベリアン成分は
小さな値を持ちフラクチュエーションの影響が大きく見えにくい。
これまでは十分な統計を得られていなかった。



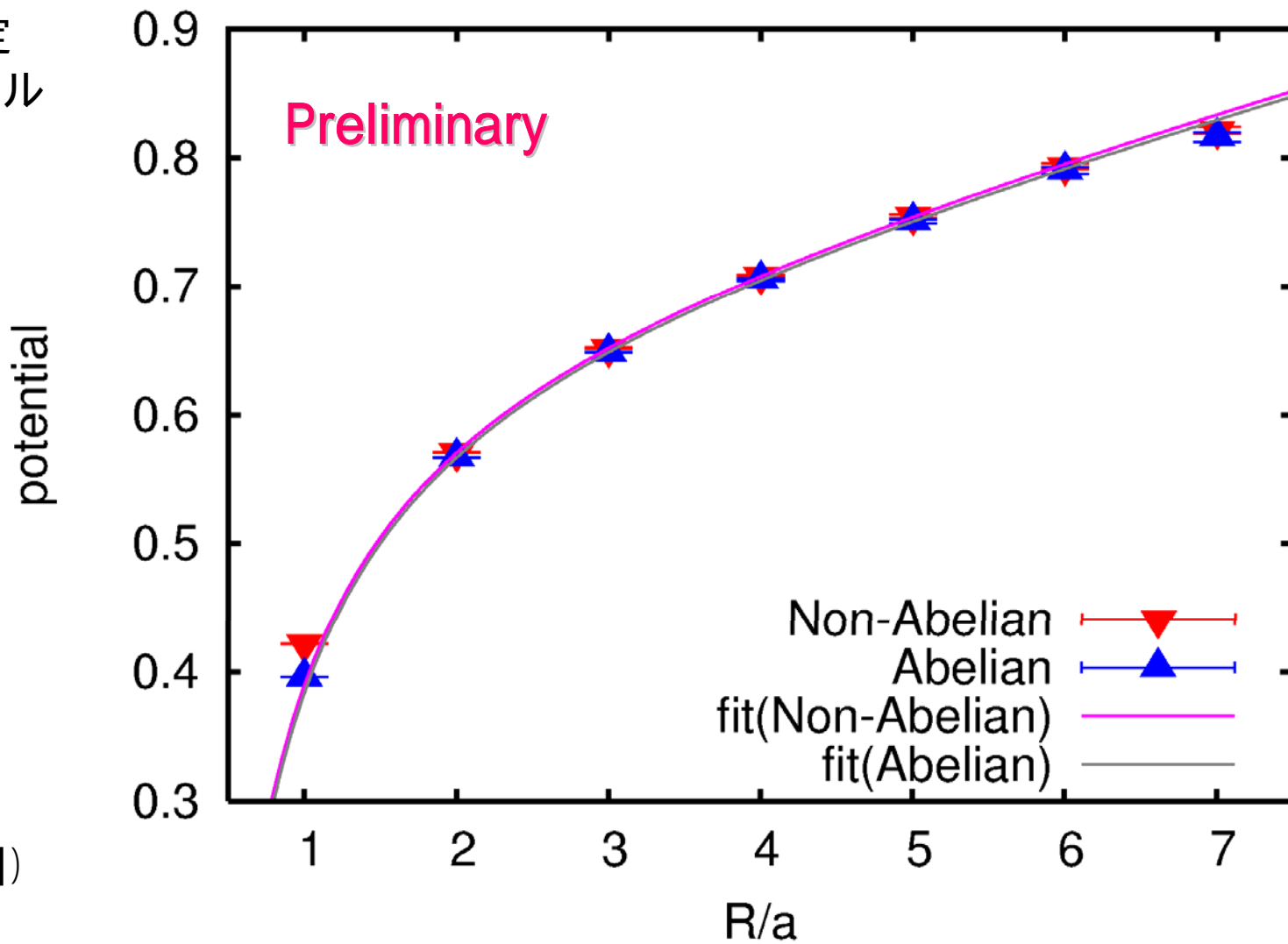
マルチレベル法というノイズリダクションが最近開発された。

Lischer and Weisz , JHEP 09.010(2001),JHEP 07.049(2002)

6. 現在の研究と展望

F12ゲージ固定
でのポテンシャル

16^4
= 2.5
($a \sim 0.08[\text{fm}]$)



6. 現在の研究と展望

F12ゲージ固定での結果

ノンアーベリアンのストリングテンションと
アーベリアンのストリングテンションがエラーの範囲で一致する。

MAゲージ固定でしか得られていなかった結果を導く。
これはアーベリアン射影でのデュアルマイスナー効果が
ゲージに依らない描像であることを示唆する結果である。

まとめ

クォーク閉じ込め問題

素粒子物理学の中でも**重要で難解な問題**の一つ。

格子ゲージ理論

QCDを**非摂動的**に扱うための手段。
計算機シミュレーションが可能。

デュアルミスナー効果

閉じ込めは**超伝導の類推**として説明できるのではないか。

ゲージ依存問題

格子シミュレーションでは**特定のゲージ固定**でしか
デュアルミスナー効果を示せなかった。

理研SX7を用いた研究成果として

MAゲージ固定とはまったく性質の異なる
ランダウゲージ、F12(ユニタリ)ゲージでデュアルミスナー効果を示した。

今後の展望

ゲージ依存問題

- ★ その他のMAと異なるゲージ固定での検証
- ★ ゲージ不変なモノポール

QCD全体

- ★ フルQCDでのモノポールの振る舞い。
 - ★ 有限温度系での相転移近傍でのモノポールの振る舞い。
-