

ヒッグス発見の向こうに

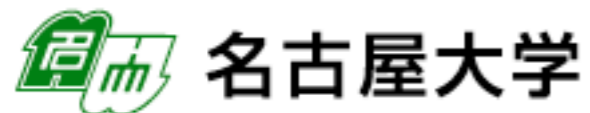
- 大規模数値計算で探る新法則 -

青木保道

名古屋大学 素粒子宇宙起源研究機構 (KMI)

ノーベル賞緊急講演会 「ヒッグス粒子の正体に迫る!」

2013年10月17日



素粒子: この世界を作っているパーツ

素粒子: この世界を作っているパーツ

- 最後のピース埋まったことによる標準模型の完成

素粒子: この世界を作っているパーツ

- 最後のピース埋まったことによる標準模型の完成
- それを超える新法則の必要性
 - 標準模型で説明できていないこと
 - 物質優勢宇宙
 - 暗黒物質の存在
 - 宇宙の加速膨張
 - 素粒子の質量の階層性

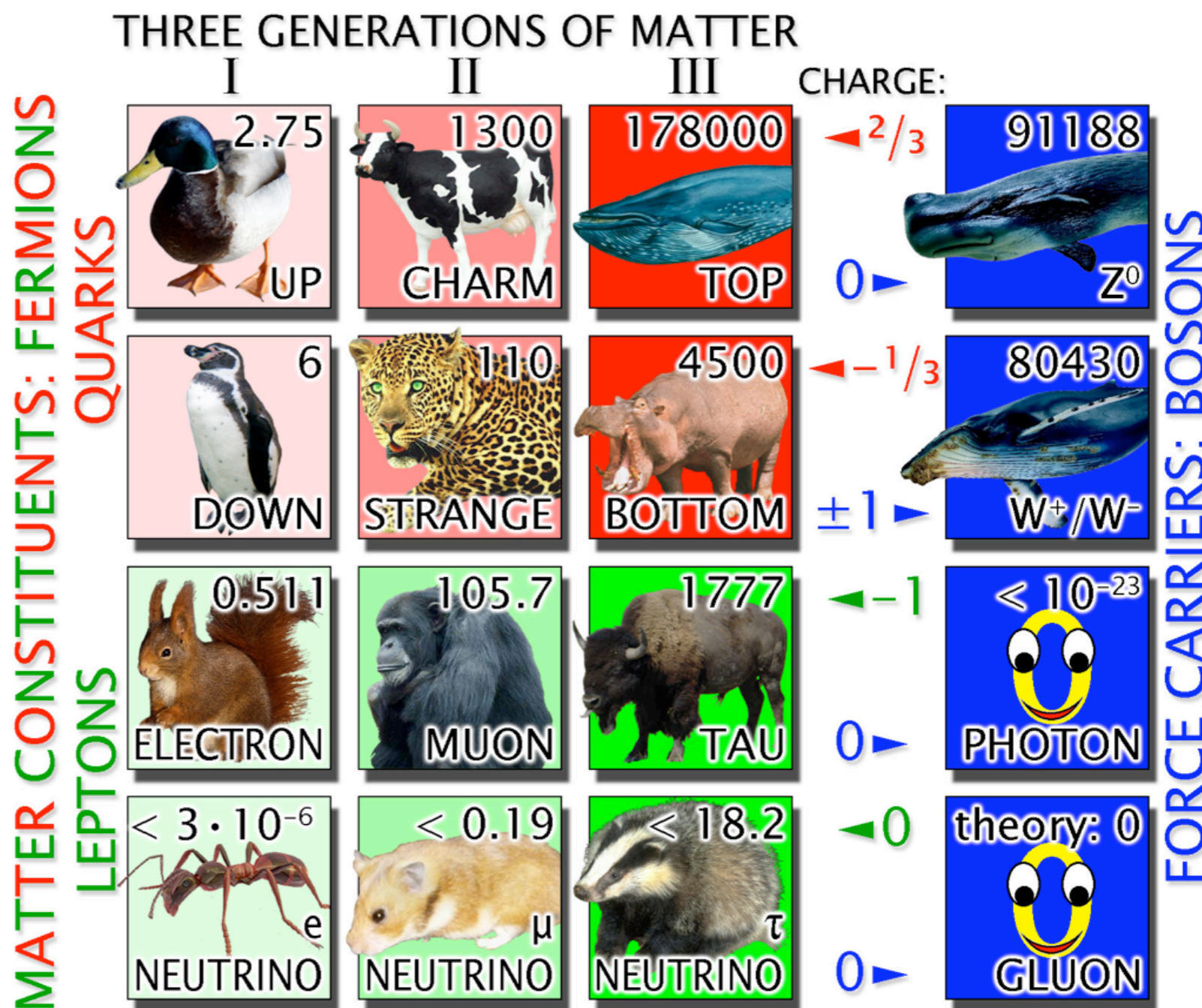
素粒子: この世界を作っているパーツ

- 最後のピース埋まったこ
- それを超える新法則の必
 - 標準模型で説明できな
 - 物質優勢宇宙
 - 暗黒物質の存在
 - 宇宙の加速膨張
 - 素粒子の質量の階



素粒子: この世界を作っているパーツ

- 最後のピース埋まったこと
- それを超える新法則の必要性
- 標準模型で説明できて
 - 物質優勢宇宙
 - 暗黒物質の存在
 - 宇宙の加速膨張
 - 素粒子の質量の階層



ALL MASSES IN MEV;
ANIMAL MASSES
SCALE WITH
PARTICLE MASSES

The Standard Model
fundamental particle zoo

素粒子: この世界を作っているパーツ

- 最後のピース埋まったことによる標準模型の完成
- それを超える新法則の必要性
 - 標準模型で説明できていないこと
 - 物質優勢宇宙
 - 暗黒物質の存在
 - 宇宙の加速膨張
 - 素粒子の質量の階層性

素粒子: この世界を作っているパーツ

- 最後のピース埋まったことによる標準模型の完成
- それを超える新法則の必要性
 - 標準模型で説明できていないこと
 - 物質優勢宇宙
 - 暗黒物質の存在
 - 宇宙の加速膨張
 - 素粒子の質量の階層性
- どんなモデルがあるか: いろいろなアイデア

ヒッグスの不思議

ヒッグスの不思議

- 役割
 - 素粒子に質量を与える
 - 真空が粘性(一時停止命令)：自発的対称性の破れによる

ヒッグスの不思議

- 役割
 - 素粒子に質量を与える
 - 真空が粘性(一時停止命令)：自発的対称性の破れによる
- 不思議:
 - なんでワインボトル(メキシカンハット)?
 - 微調整問題
 - フェルミオンとの相互作用がゲージではない

ヒッグスの不思議

- 役割
 - 素粒子に質量を与える
 - 真空が粘性(一時停止命令)：自発的対称性の破れによる
- 不思議:
 - なんでワインボトル(メキシカンハット)?
 - 微調整問題
 - フェルミオンとの相互作用がゲージではない
- 今もなお標準模型の中で最もミステリアスな部分

標準模型を超える物理法則：一候補

標準模型を超える物理法則：一候補

- 複合ヒッグス模型

標準模型を超える物理法則：一候補

- 複合ヒッグス模型
 - 素粒子ではなく、新しい素粒子とその反粒子の複合体

標準模型を超える物理法則：一候補

- 複合ヒッグス模型
 - 素粒子ではなく、新しい素粒子とその反粒子の複合体
 - “ヒッグスの不思議”の答えを与え得る

標準模型を超える物理法則：一候補

- 複合ヒッグス模型
 - 素粒子ではなく、新しい素粒子とその反粒子の複合体
 - “ヒッグスの不思議”の答えを与え得る
 - 標準模型で説明できていない事を説明できる可能性が拓ける

標準模型を超える物理法則：一候補

- 複合ヒッグス模型
 - 素粒子ではなく、新しい素粒子とその反粒子の複合体
 - “ヒッグスの不思議”の答えを与え得る
 - 標準模型で説明できていない事を説明できる可能性が拓ける
 - 新法則として魅力ある理論

標準模型を超える物理法則：一候補

- 複合ヒッグス模型
 - 素粒子ではなく、新しい素粒子とその反粒子の複合体
 - “ヒッグスの不思議”の答えを与え得る
 - 標準模型で説明できていない事を説明できる可能性が拓ける
 - 新法則として魅力ある理論
 - 一方、標準模型で説明出来ていた数多くの実験事象を説明出来るか？

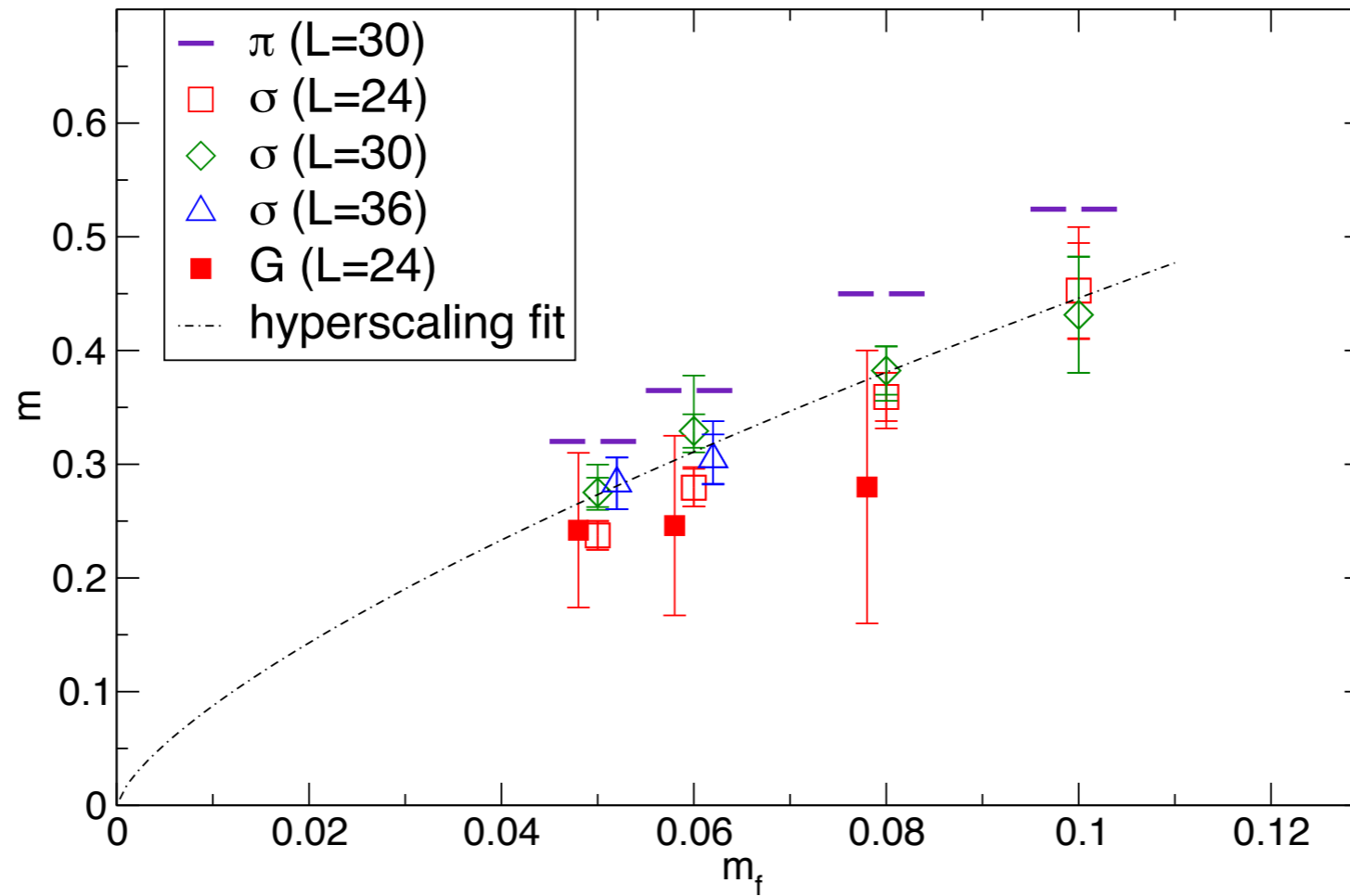
標準模型を超える物理法則：一候補

- 複合ヒッグス模型
 - 素粒子ではなく、新しい素粒子とその反粒子の複合体
 - “ヒッグスの不思議”の答えを与え得る
 - 標準模型で説明できていない事を説明できる可能性が拓ける
 - 新法則として魅力ある理論
 - 一方、標準模型で説明出来ていた数多くの実験事象を説明出来るか？
 - 実験と合わない結果を導かないか？

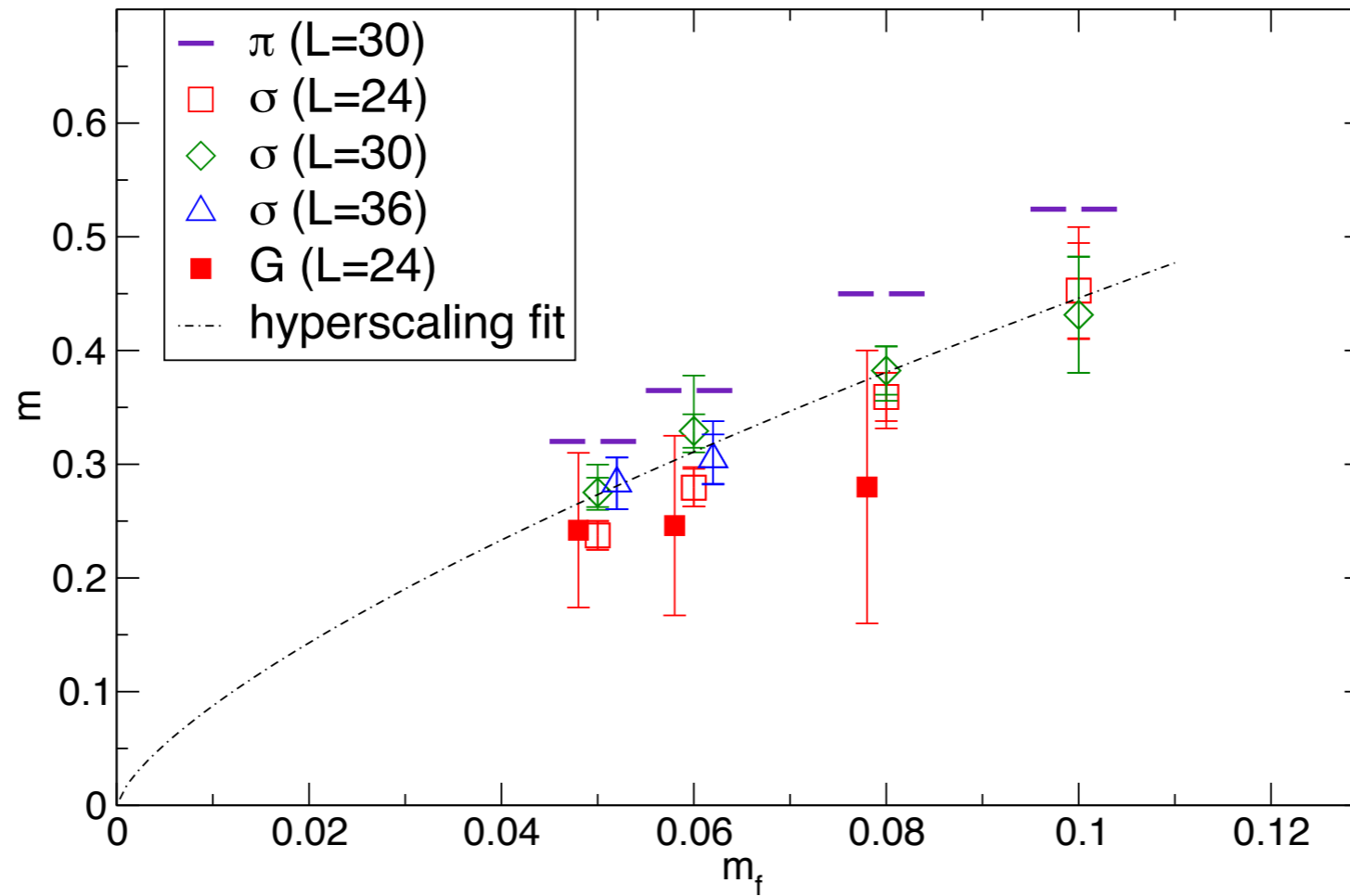
標準模型を超える物理法則：一候補

- 複合ヒッグス模型
 - 素粒子ではなく、新しい素粒子とその反粒子の複合体
 - “ヒッグスの不思議”の答えを与え得る
 - 標準模型で説明できていない事を説明できる可能性が拓ける
 - 新法則として魅力ある理論
 - 一方、標準模型で説明出来ていた数多くの実験事象を説明出来るか？
 - 実験と合わない結果を導かないか？
- その複雑な相互作用のため、最近まで満足のいく解析ができなかった

複合ヒッグスモデルの最新の研究成果

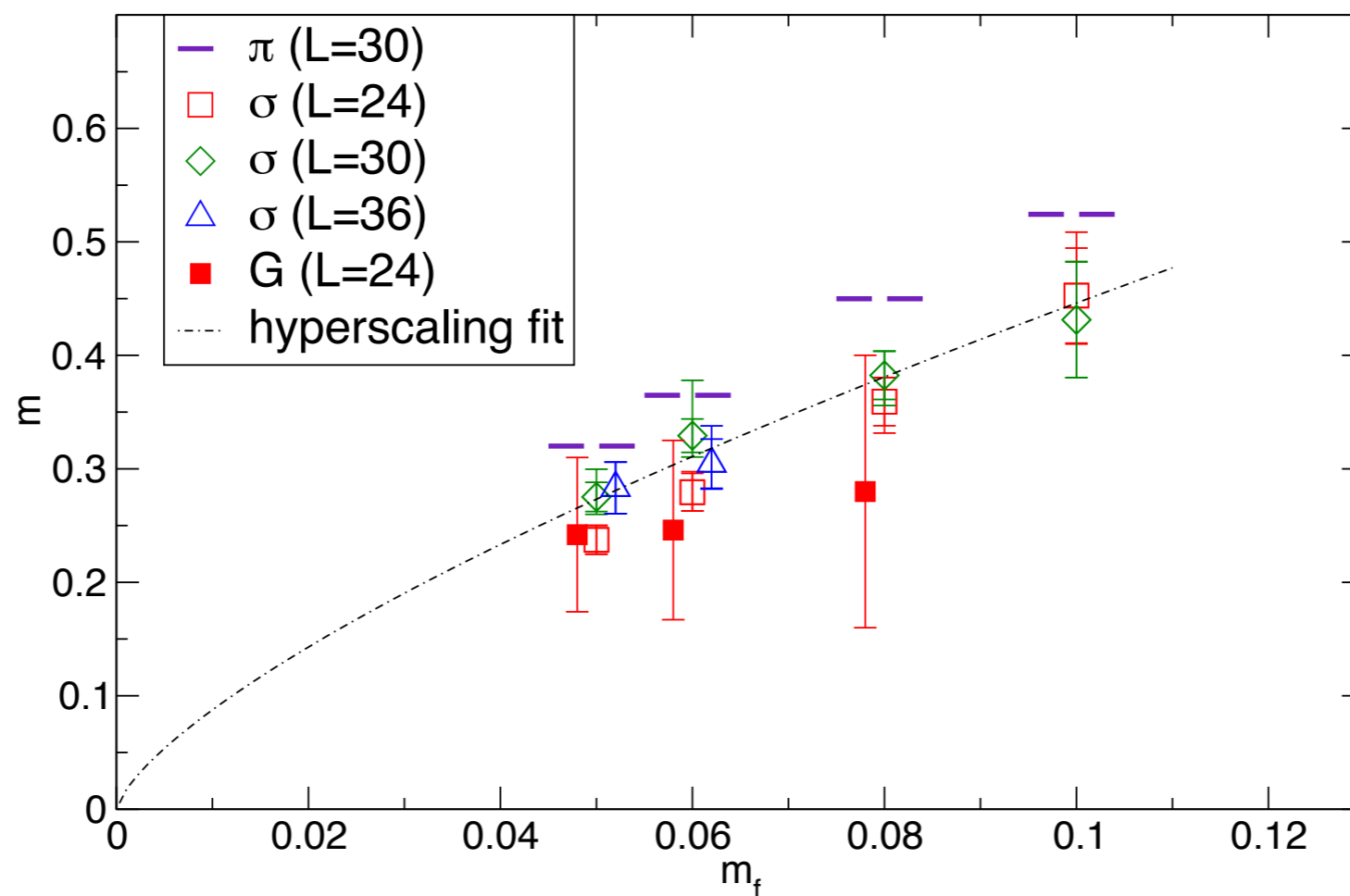


複合ヒッグス模型の最新の研究成果



- これはすごい！

複合ヒッグス模型の最新の研究成果



- これはすごい！
- 何となくでも、分かってもらえたら、このレクチャーは大成功！

標準模型に登場する素粒子



標準模型に登場する素粒子

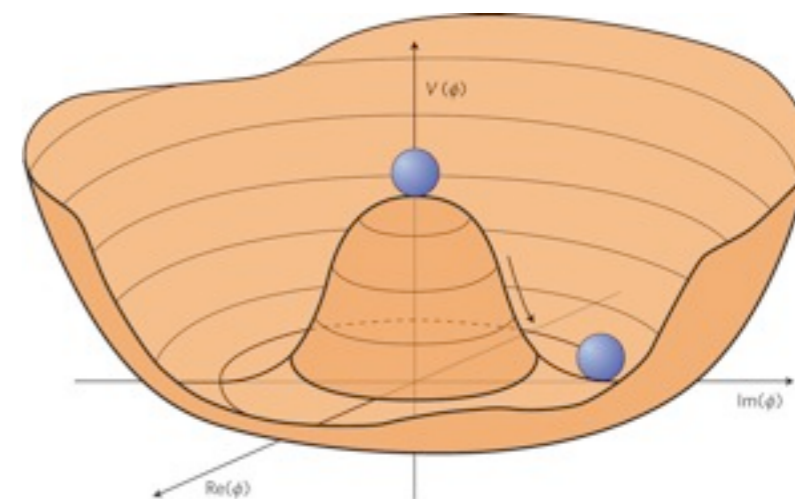


標準模型に登場する素粒子



QCD 標準模型中の強い相互作用の理論

- Quantum Chromo Dynamics
- カイラル対称性: 右巻きと左巻きのクォークの交換で理論が変わらない
- 自発的に破れている
- 真空中でカイラル凝縮: クォークと反クォークのペア: “同じ方向”を向いている
- ゼロ質量の粒子の存在: 南部-ゴールドストーン粒子: パイオン (π)
- π : 複合粒子: $(u\bar{d})$, $(d\bar{u})$, $(u\bar{u}-d\bar{d})$ 粒子反粒子 ペア
- 核力を説明する粒子



QCD 標準模型中の強い相互作用の理論

- Quantum Chromo Dynamics
- カイラル対称性: 右巻きと左巻きのクォークの交換で理論が変わらない
- 自発的に破れている
- 真空中でカイラル凝縮: クォークと反クォークの
- ゼロ質量の粒子の存在: 南部-ゴールドストーン
- π : 複合粒子: $(u\bar{d})$, $(d\bar{u})$, $(u\bar{u}-d\bar{d})$ 粒子反粒子
- 核力を説明する粒子



The Nobel Prize in Physics 2008

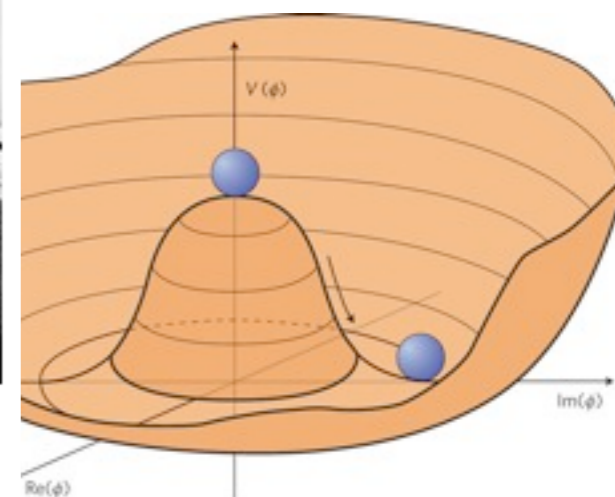
Yoichiro Nambu, Makoto Kobayashi, Toshihide Maskawa

The Nobel Prize in Physics 2008



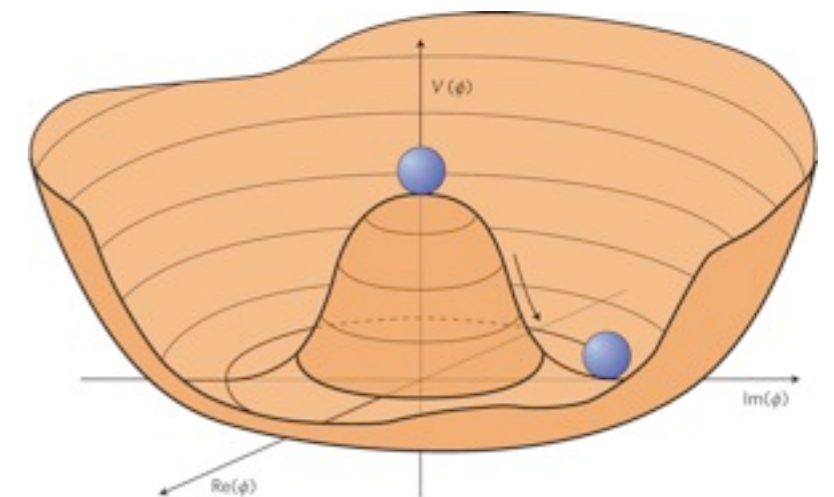
Photo: University of Chicago

Yoichiro Nambu



QCD 標準模型中の強い相互作用の理論

- Quantum Chromo Dynamics
- カイラル対称性: 右巻きと左巻きのクォークの交換で理論が変わらない
- 自発的に破れている
- 真空中でカイラル凝縮: クォークと反クォークのペア: “同じ方向”を向いている
- ゼロ質量の粒子の存在: 南部-ゴールドストーン粒子: パイオン (π)
- π : 複合粒子: $(u\bar{d})$, $(d\bar{u})$, $(u\bar{u}-d\bar{d})$ 粒子反粒子 ペア
- 核力を説明する粒子



QCD 標準模型中の強い相互作用の理論

- Quantum Chromo Dynamics
- カイラル対称性: 右巻きと左巻きのクォークの交換で理論が変わらない
- 自発的に破れている
- 真空中でカイラル凝縮: クォークと反クォークの
- ゼロ質量の粒子の存在: 南部-ゴールドストーン*
- π : 複合粒子: $(u\bar{d})$, $(d\bar{u})$, $(u\bar{u}-d\bar{d})$ 粒子反粒子
- 核力を説明する粒子



The Nobel Prize in Physics 1949
Hideki Yukawa

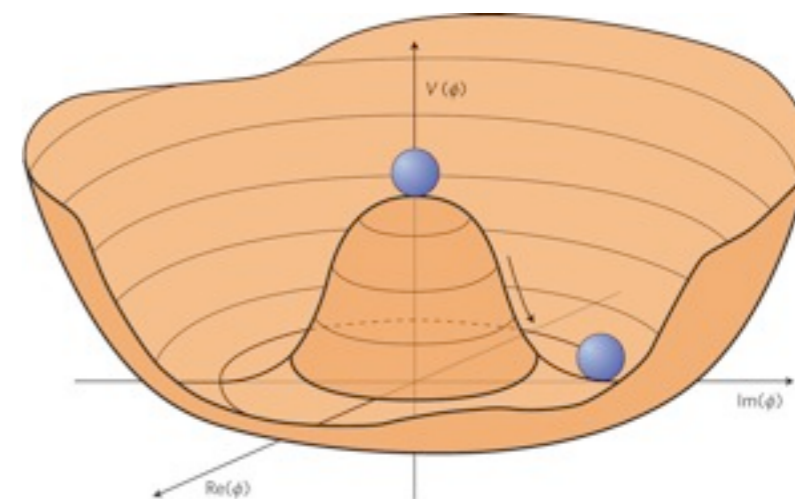
The Nobel Prize in Physics 1949



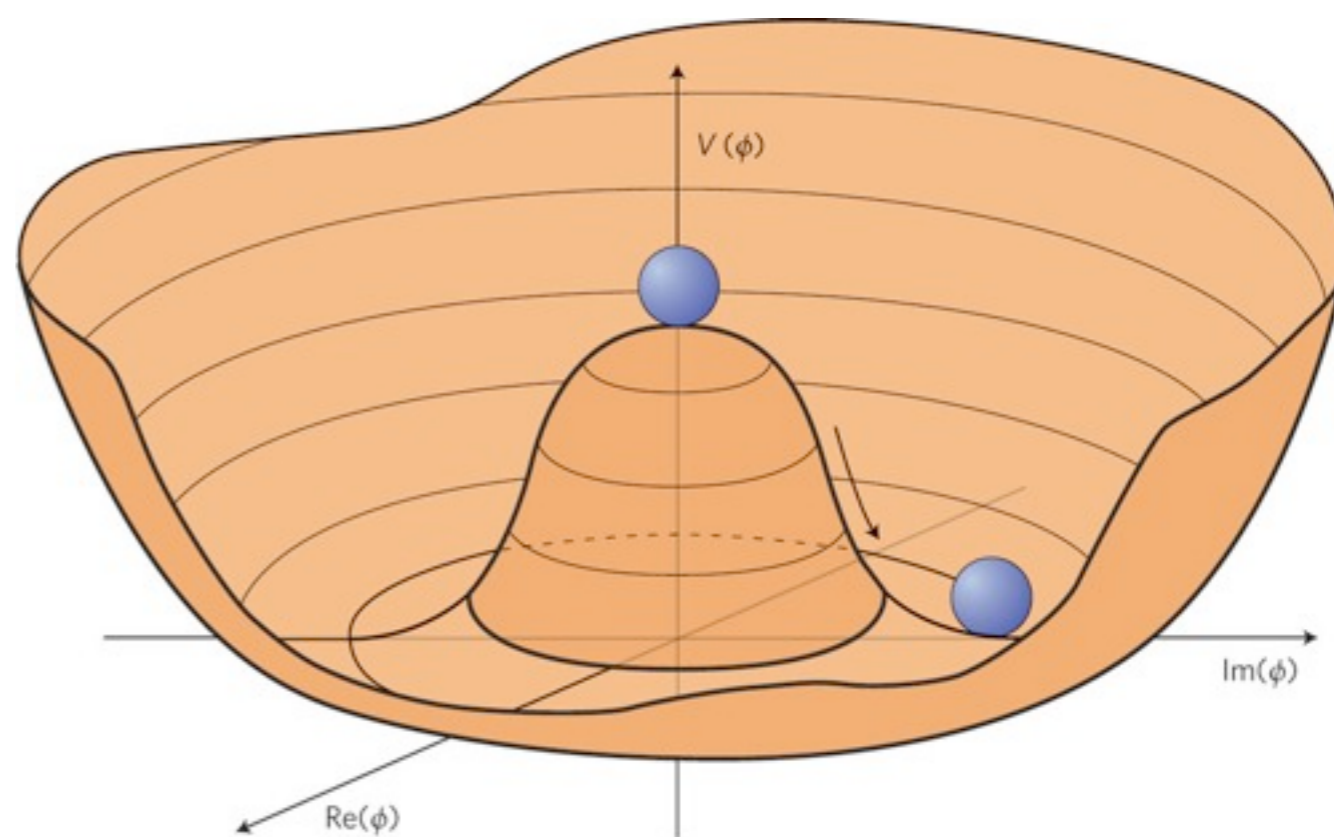
Hideki Yukawa

QCD 標準模型中の強い相互作用の理論

- Quantum Chromo Dynamics
- カイラル対称性: 右巻きと左巻きのクォークの交換で理論が変わらない
- 自発的に破れている
- 真空中でカイラル凝縮: クォークと反クォークのペア: “同じ方向”を向いている
- ゼロ質量の粒子の存在: 南部-ゴールドストーン粒子: パイオン (π)
- π : 複合粒子: $(u\bar{d})$, $(d\bar{u})$, $(u\bar{u}-d\bar{d})$ 粒子反粒子 ペア
- 核力を説明する粒子

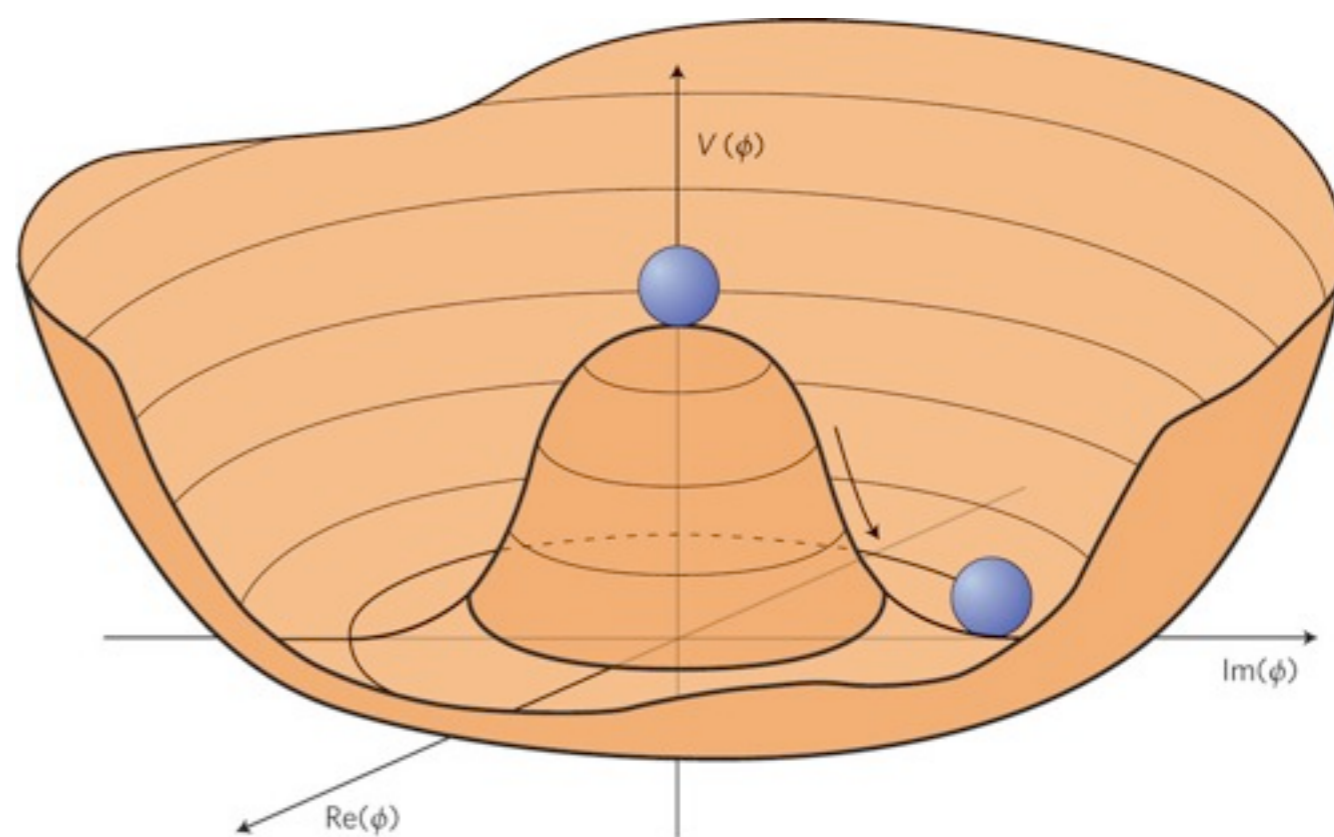


QCDにおける π と σ (シグマ)



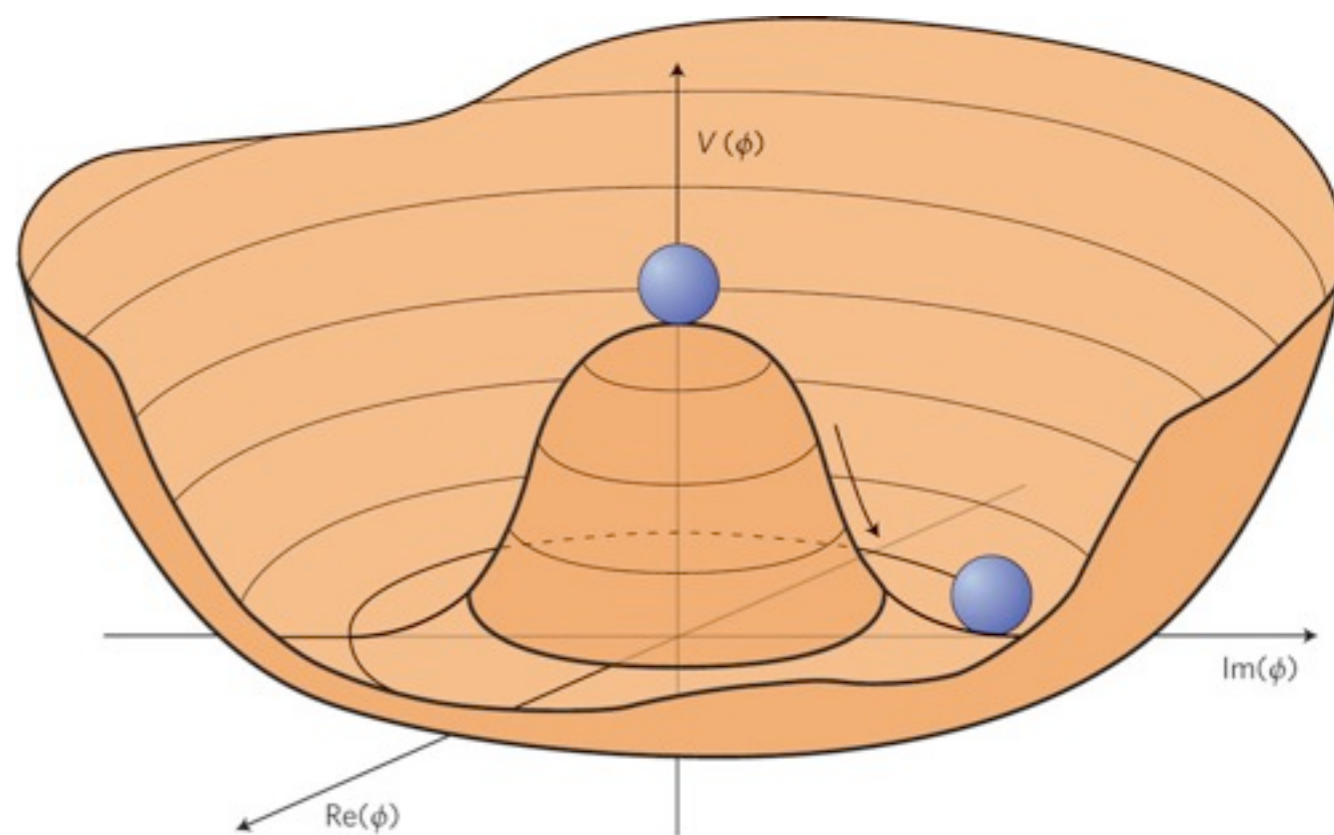
QCDにおける π と σ (シグマ)

- 谷に添って動くモード: π ゼロ質量複合粒子 ($u\bar{d}$), ($d\bar{u}$), ($u\bar{u}-d\bar{d}$)



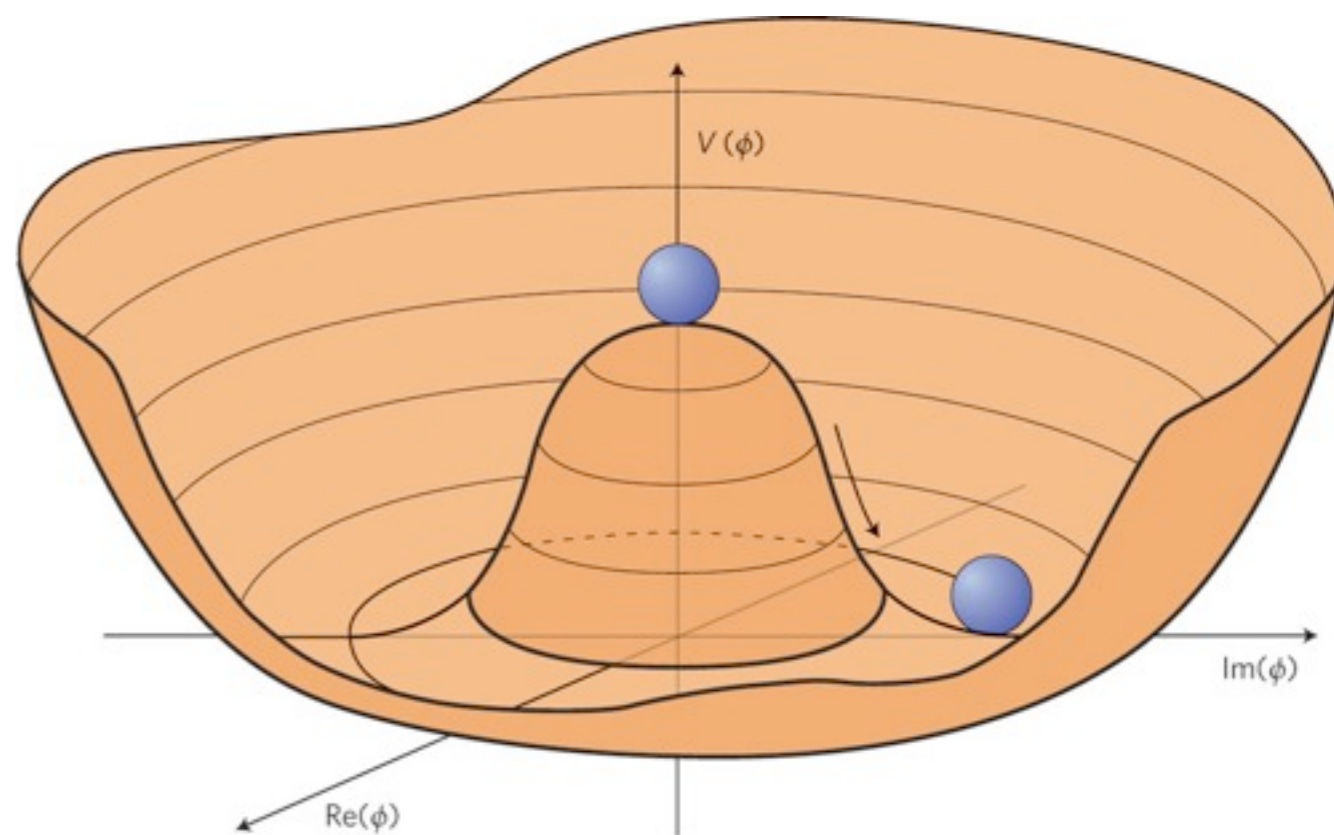
QCDにおける π と σ (シグマ)

- 谷に添って動くモード: π ゼロ質量複合粒子 ($u\bar{d}$), ($d\bar{u}$), ($u\bar{u}-d\bar{d}$)
- 等高線と垂直に動くモード: σ ミステリアスな複合粒子 ($u\bar{u}+d\bar{d}$)



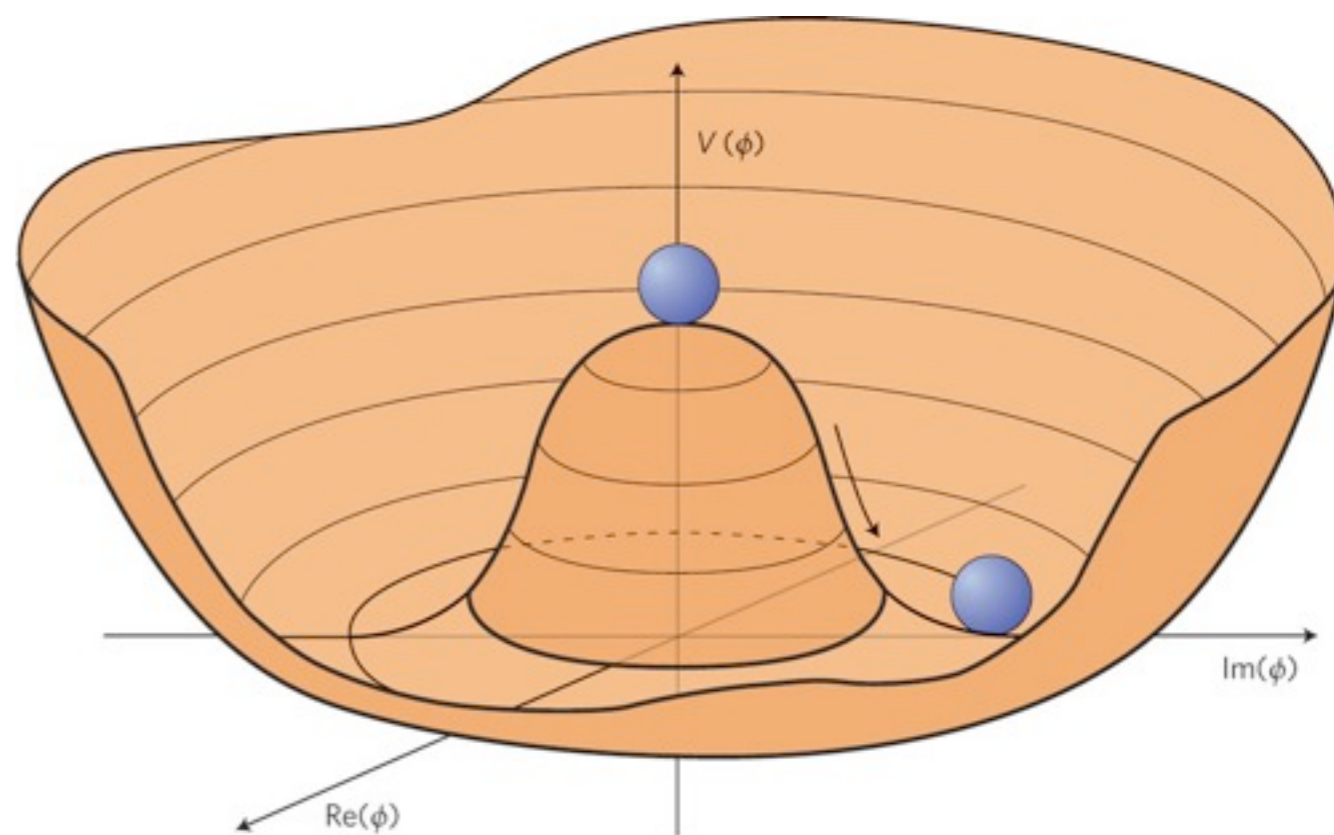
QCDにおける π と σ (シグマ)

- 谷に添って動くモード: π ゼロ質量複合粒子 ($u\bar{d}$), ($d\bar{u}$), ($u\bar{u}-d\bar{d}$)
- 等高線と垂直に動くモード: σ ミステリアスな複合粒子 ($u\bar{u}+d\bar{d}$)
- 実世界では:



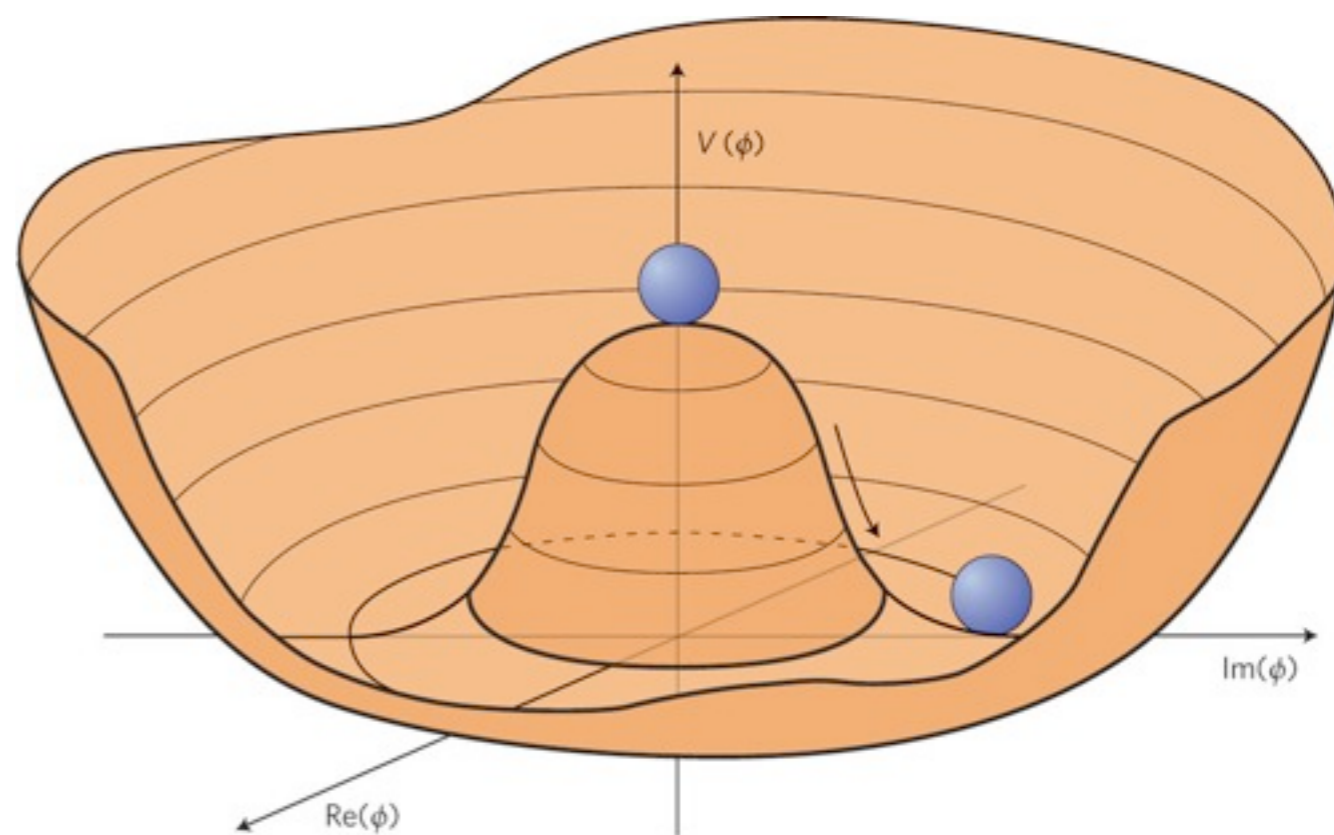
QCDにおける π と σ (シグマ)

- 谷に添って動くモード: π ゼロ質量複合粒子 ($u\bar{d}$), ($d\bar{u}$), ($u\bar{u}-d\bar{d}$)
- 等高線と垂直に動くモード: σ ミステリアスな複合粒子 ($u\bar{u}+d\bar{d}$)
- 実世界では:
 - $m_\pi = 135 \text{ MeV}$



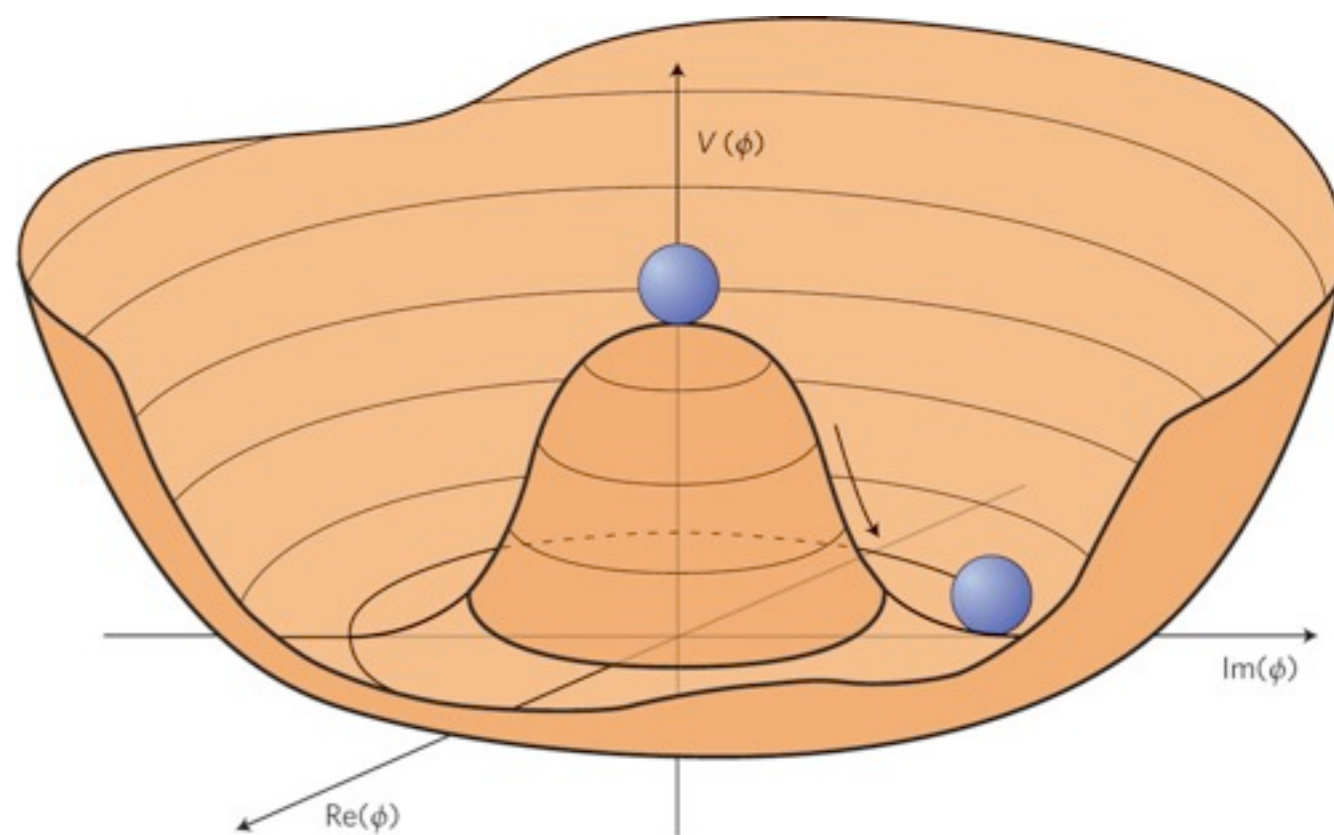
QCDにおける π と σ (シグマ)

- 谷に添って動くモード: π ゼロ質量複合粒子 ($u\bar{d}$), ($d\bar{u}$), ($u\bar{u}-d\bar{d}$)
- 等高線と垂直に動くモード: σ ミステリアスな複合粒子 ($u\bar{u}+d\bar{d}$)
- 実世界では:
 - $m_\pi = 135 \text{ MeV}$
 - $m_\sigma = 400 \sim 550 \text{ MeV}$



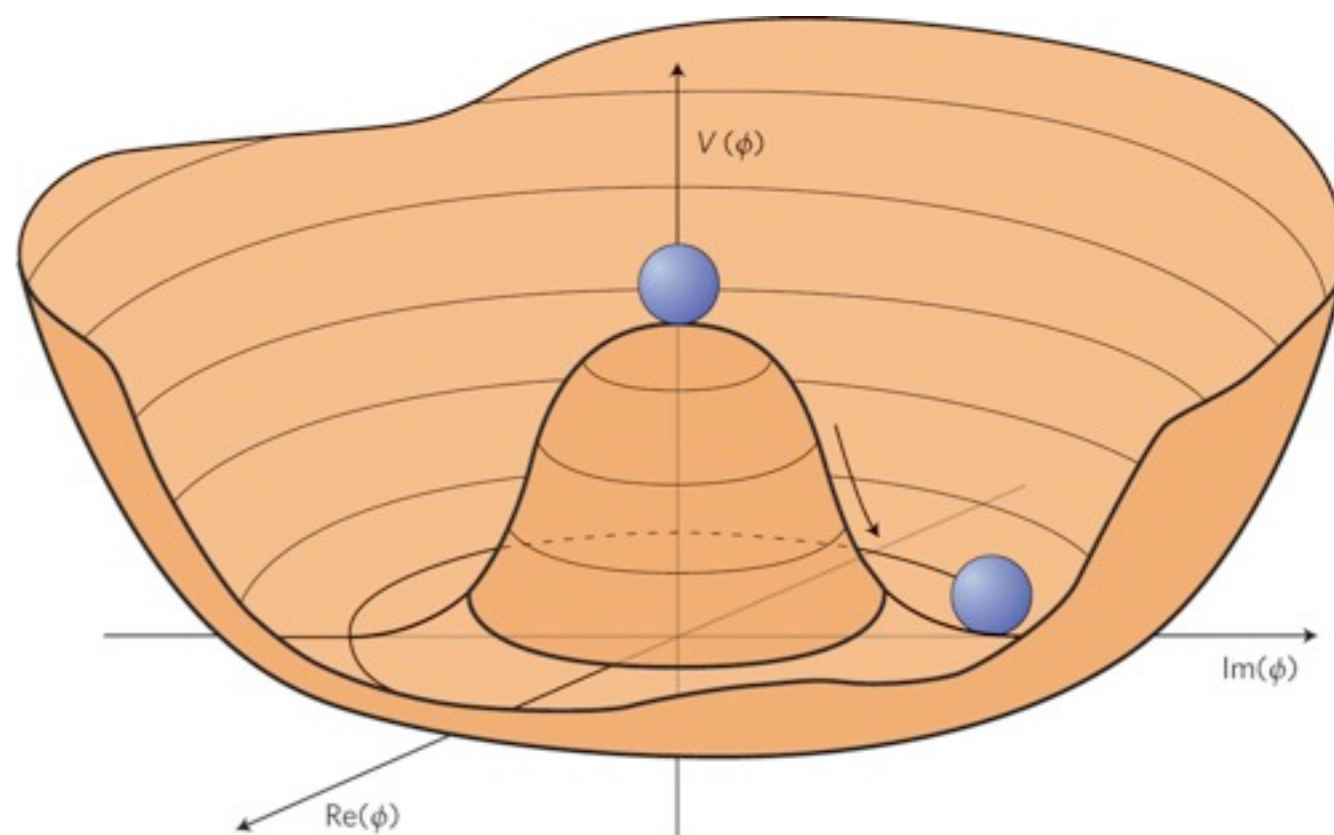
QCDにおける π と σ (シグマ)

- 谷に添って動くモード: π ゼロ質量複合粒子 ($u\bar{d}$), ($d\bar{u}$), ($u\bar{u}-d\bar{d}$)
- 等高線と垂直に動くモード: σ ミステリアスな複合粒子 ($u\bar{u}+d\bar{d}$)
- 実世界では:
 - $m_\pi = 135 \text{ MeV}$
 - $m_\sigma = 400 \sim 550 \text{ MeV}$
- QCDのスケール: π 崩壊定数



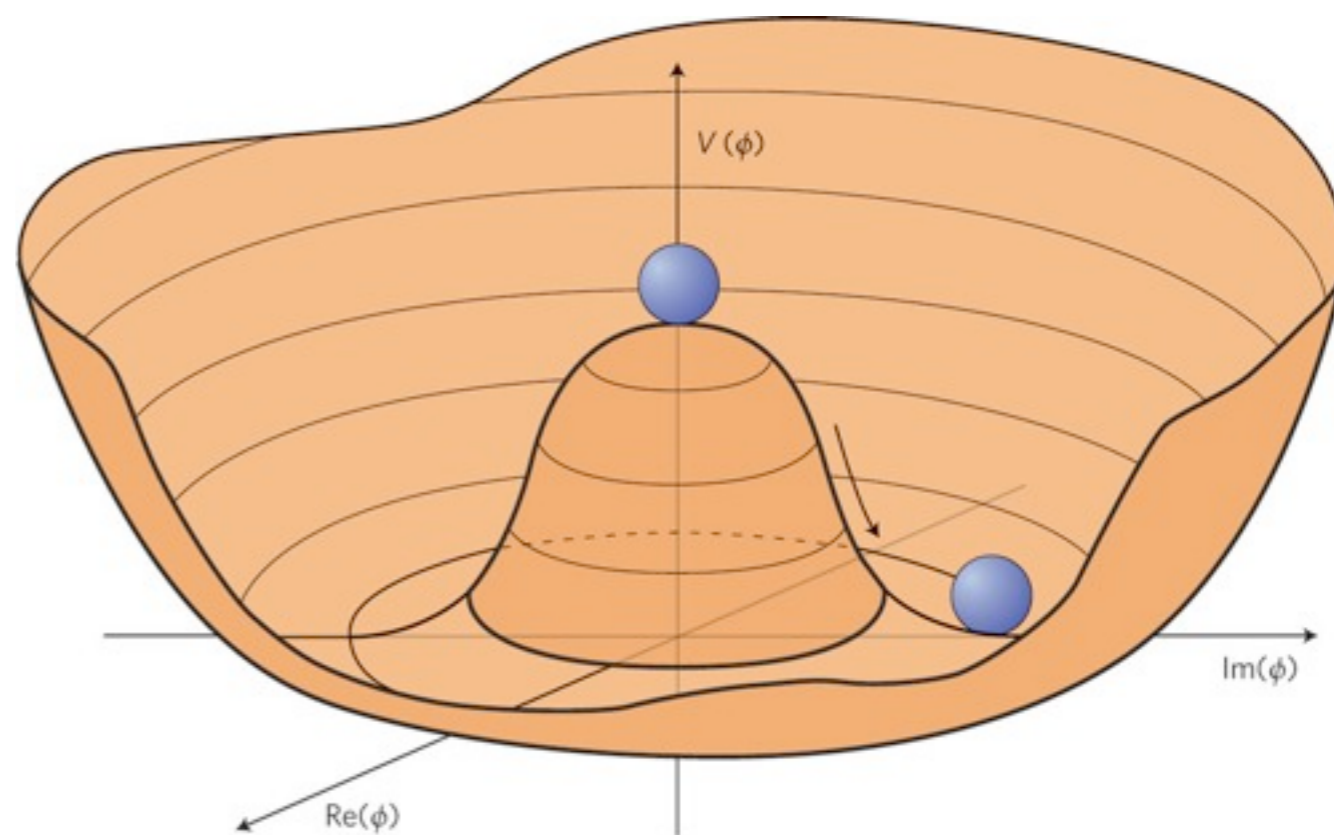
QCDにおける π と σ (シグマ)

- 谷に添って動くモード: π ゼロ質量複合粒子 (ud), (du), ($uu-dd$)
- 等高線と垂直に動くモード: σ ミステリアスな複合粒子 ($uu+dd$)
- 実世界では:
 - $m_\pi = 135 \text{ MeV}$
 - $m_\sigma = 400 \sim 550 \text{ MeV}$
- QCDのスケール: π 崩壊定数
 - $f_\pi = 93 \text{ MeV}$ インプット



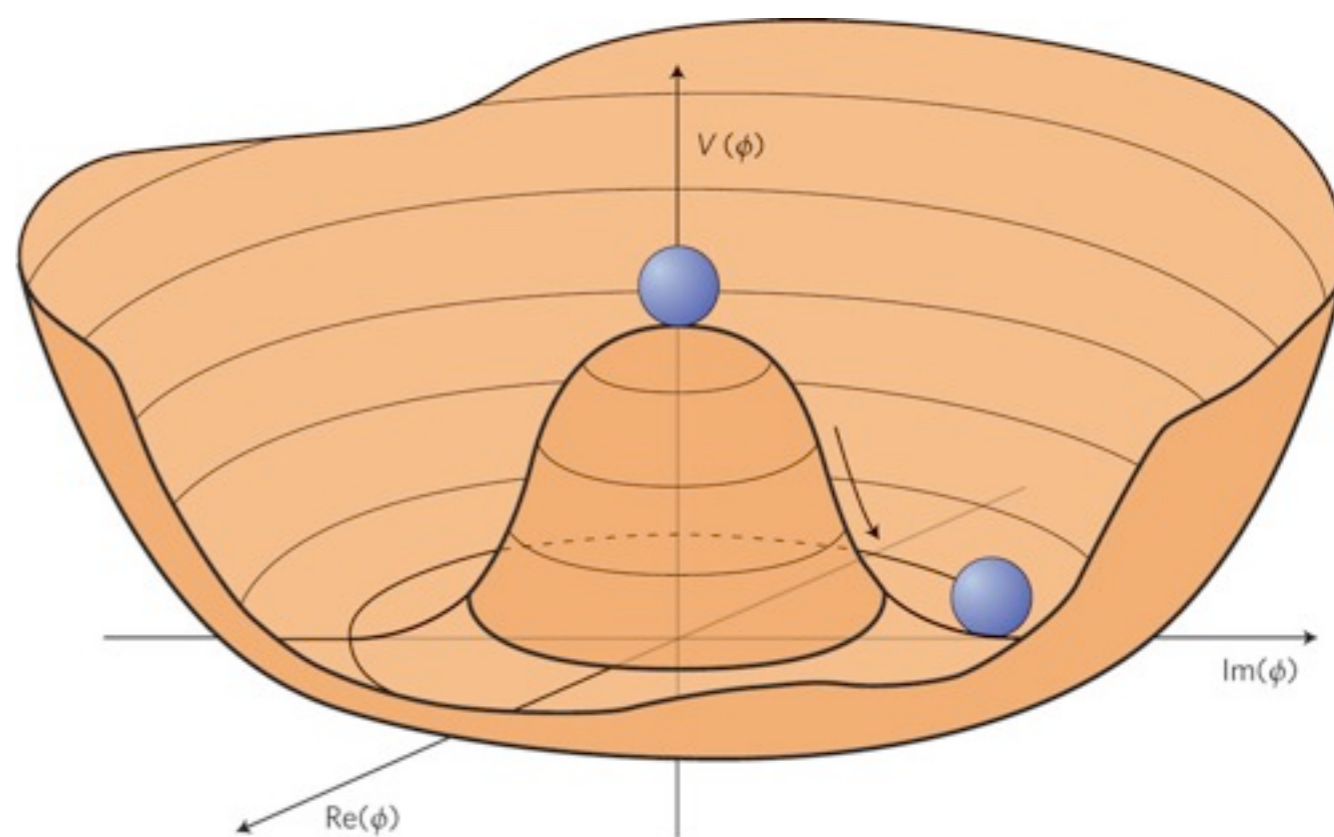
QCDにおける π と σ (シグマ)

- 谷に添って動くモード: π ゼロ質量複合粒子 ($u\bar{d}$), ($d\bar{u}$), ($u\bar{u}-d\bar{d}$)
- 等高線と垂直に動くモード: σ ミステリアスな複合粒子 ($u\bar{u}+d\bar{d}$)
- 実世界では:
 - $m_\pi = 135 \text{ MeV}$
 - $m_\sigma = 400 \sim 550 \text{ MeV}$
- QCDのスケール: π 崩壊定数
 - $f_\pi = 93 \text{ MeV}$ インプット
 - $m_\sigma/f_\pi \sim 5$

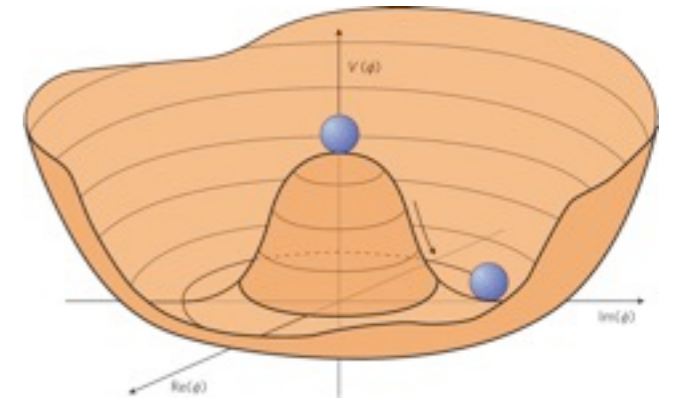


QCDにおける π と σ (シグマ)

- 谷に添って動くモード: π ゼロ質量複合粒子 (ud), (du), ($uu-dd$)
- 等高線と垂直に動くモード: σ ミステリアスな複合粒子 ($uu+dd$)
- 実世界では:
 - $m_\pi = 135 \text{ MeV}$
 - $m_\sigma = 400 \sim 550 \text{ MeV}$
- QCDのスケール: π 崩壊定数
 - $f_\pi = 93 \text{ MeV}$ インプット
 - $m_\sigma/f_\pi \sim 5$
- 他の複合粒子(陽子,中性子...)の質量はクォーク質量を決めれば全て決まる

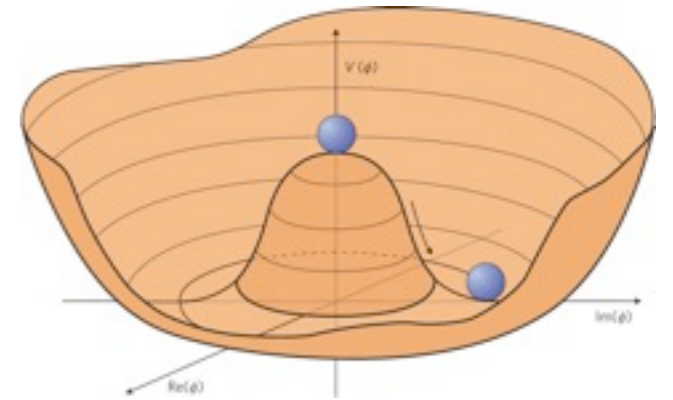


対称性の破れによる質量獲得



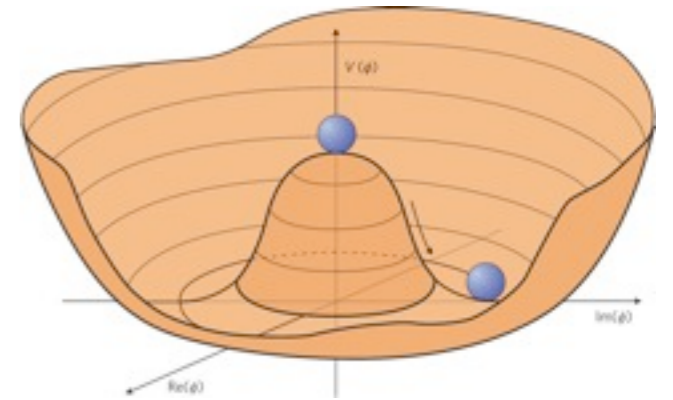
対称性の破れによる質量獲得

- 例え: 対称性が破れた状態: 水 (液体)



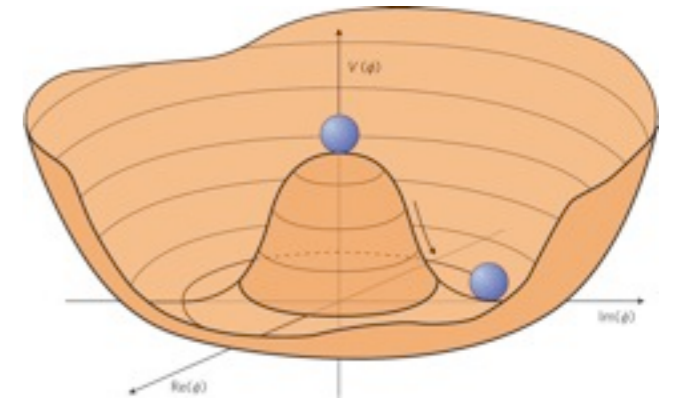
対称性の破れによる質量獲得

- 例え: 対称性が破れた状態: 水 (液体)
- 対称性が破れていない状態: 水蒸気 (気体)



対称性の破れによる質量獲得

- 例え: 対称性が破れた状態: 水 (液体)
- 対称性が破れていない状態: 水蒸気 (気体)
- 質量: 進みにくさの指標: 水がまとわりつき進みにくくなる



QCDによる質量獲得

QCDによる質量獲得

- 陽子: udu 中性子: udd 質量は約 $1 \text{ GeV} = 1000 \text{ MeV}$

QCDによる質量獲得

- 陽子: udu 中性子: udd 質量は約 $1 \text{ GeV} = 1000 \text{ MeV}$
 - 3つのクォークの質量の和は高々 0.01 GeV 程度

QCDによる質量獲得

- 陽子: udu 中性子: udd 質量は約 $1 \text{ GeV} = 1000 \text{ MeV}$
 - 3つのクォークの質量の和は高々 0.01 GeV 程度
 - 99%はQCDのカイラル対称性の破れ?

QCDによる質量獲得

- 陽子: udu 中性子: udd 質量は約 $1 \text{ GeV} = 1000 \text{ MeV}$
 - 3つのクォークの質量の和は高々 0.01 GeV 程度
 - 99%はQCDのカイラル対称性の破れ?
 - 理論計算による実証

QCDによる質量獲得

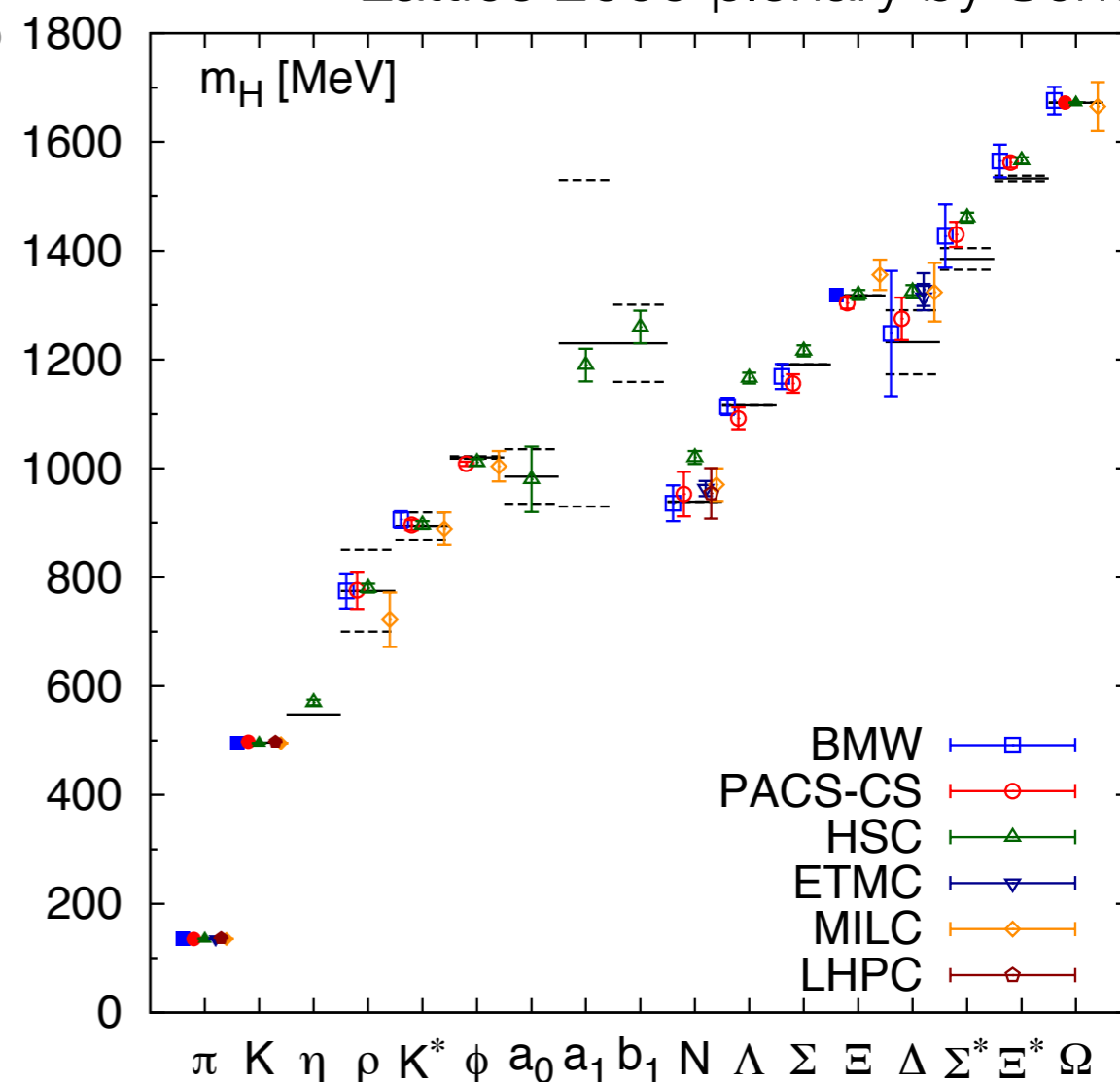
• 陽子: udu 中性子: udd 質量は約 $1 \text{ GeV} = 1000 \text{ MeV}$

• 3つのクォークの質量の和は高々 0.01 GeV 程度

• 99%はQCDのカイラル対称性の破れ?

• 理論計算による実証

Lattice 2009 plenary by Scholz



QCDによる質量獲得

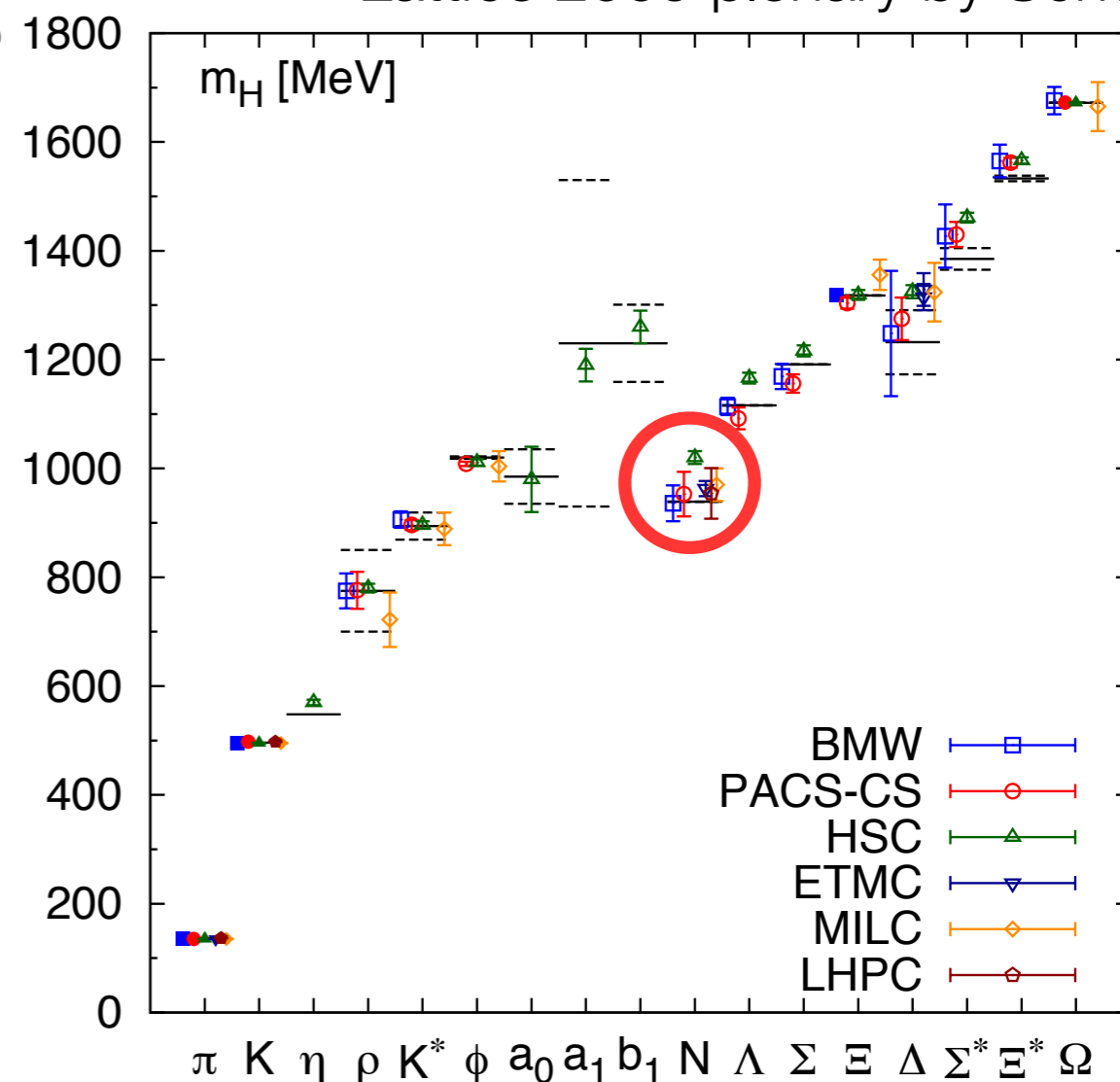
• 陽子: udu 中性子: udd 質量は約 $1 \text{ GeV} = 1000 \text{ MeV}$

• 3つのクォークの質量の和は高々 0.01 GeV 程度

• 99%はQCDのカイラル対称性の破れ?

• 理論計算による実証

Lattice 2009 plenary by Scholz



QCDによる質量獲得

• 陽子: udu 中性子: udd 質量は約 $1 \text{ GeV} = 1000 \text{ MeV}$

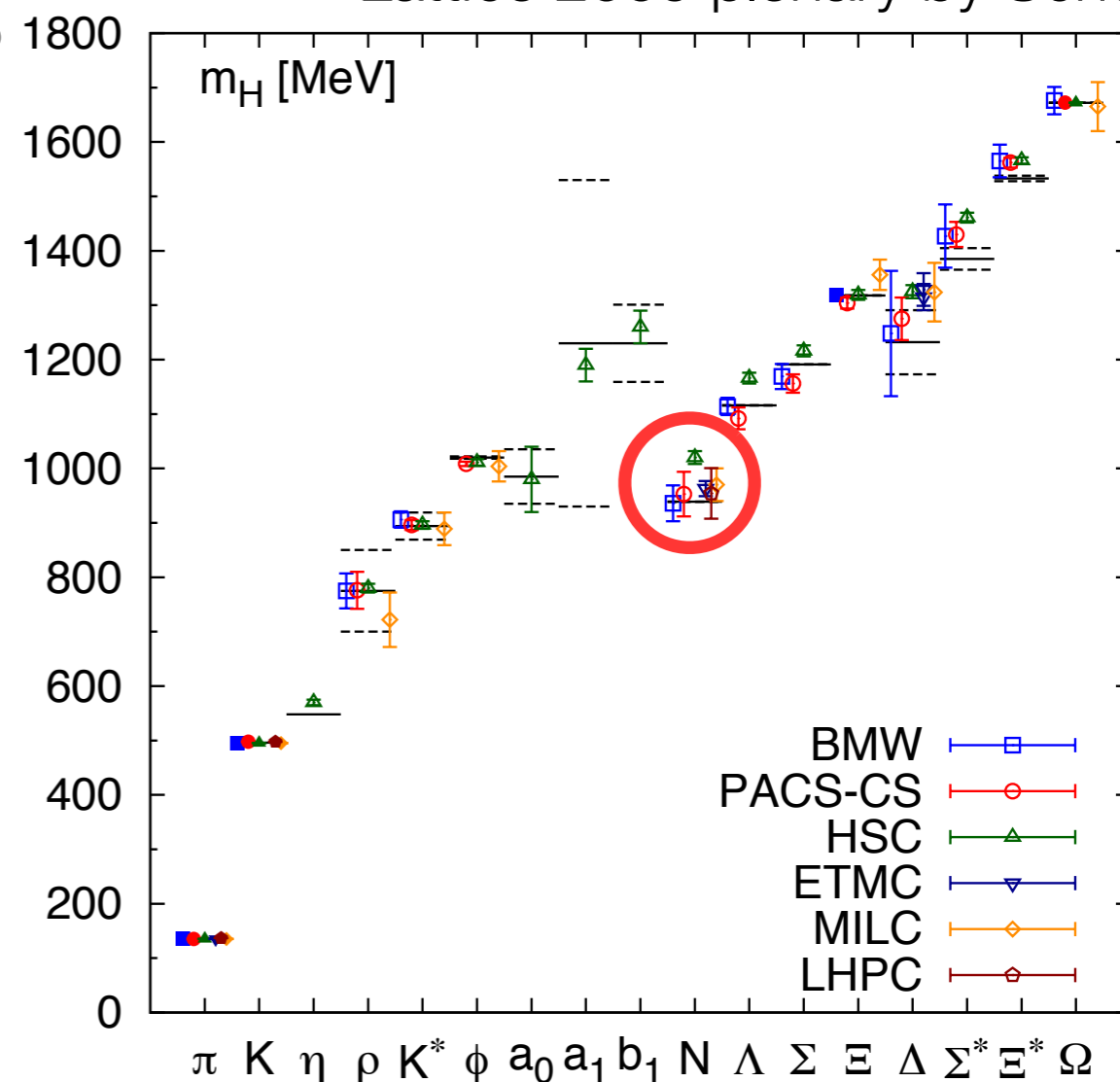
• 3つのクォークの質量の和は高々 0.01 GeV 程度

• 99%はQCDのカイラル対称性の破れ?

• 理論計算による実証

• π だけは軽い

Lattice 2009 plenary by Scholz



QCDによる質量獲得

• 陽子: udu 中性子: udd 質量は約 $1 \text{ GeV} = 1000 \text{ MeV}$

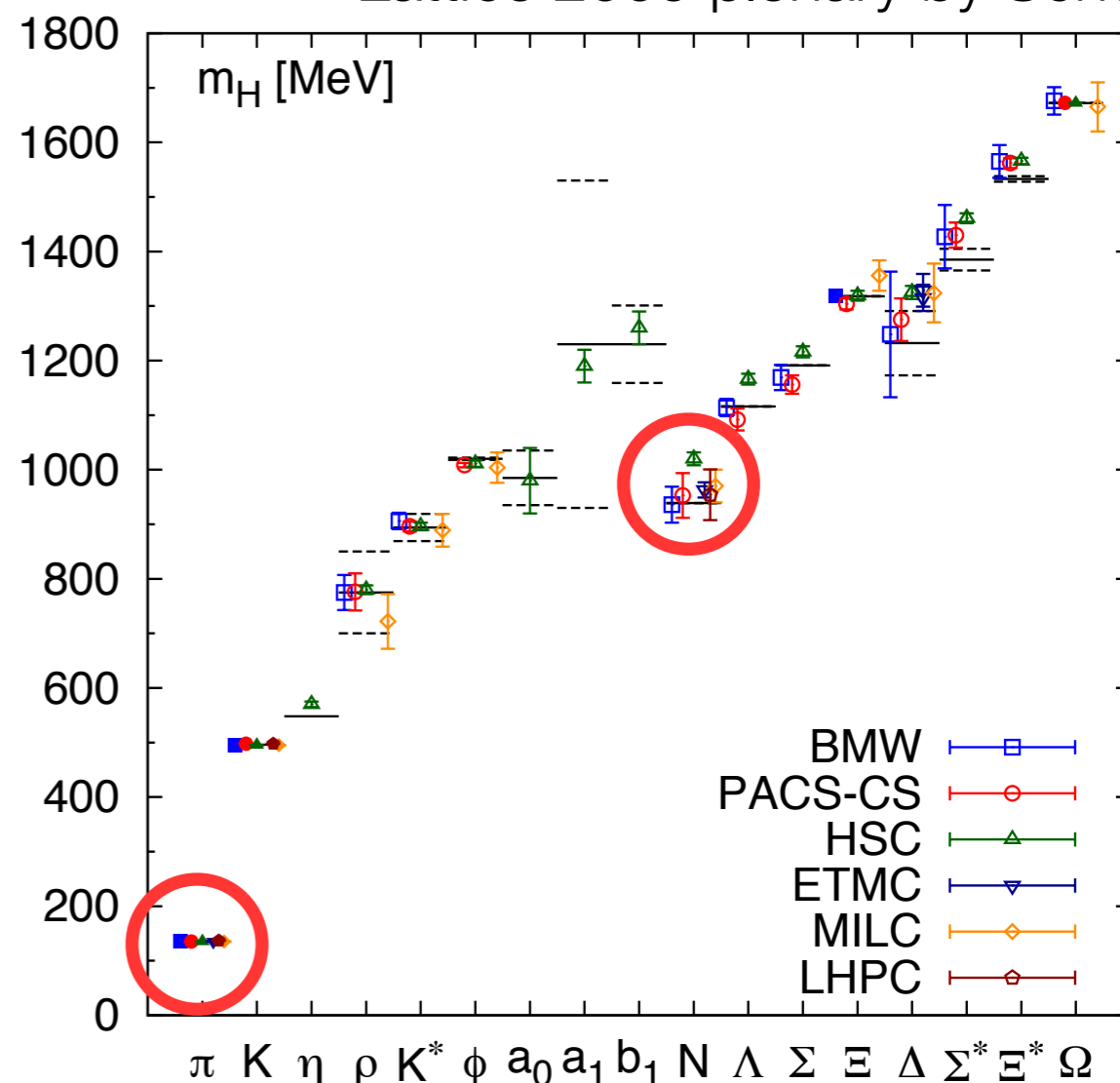
• 3つのクォークの質量の和は高々 0.01 GeV 程度

• 99%はQCDのカイラル対称性の破れ?

• 理論計算による実証

• π だけは軽い

Lattice 2009 plenary by Scholz



QCDによる質量獲得

• 陽子: udu 中性子: udd 質量は約 $1 \text{ GeV} = 1000 \text{ MeV}$

• 3つのクォークの質量の和は高々 0.01 GeV 程度

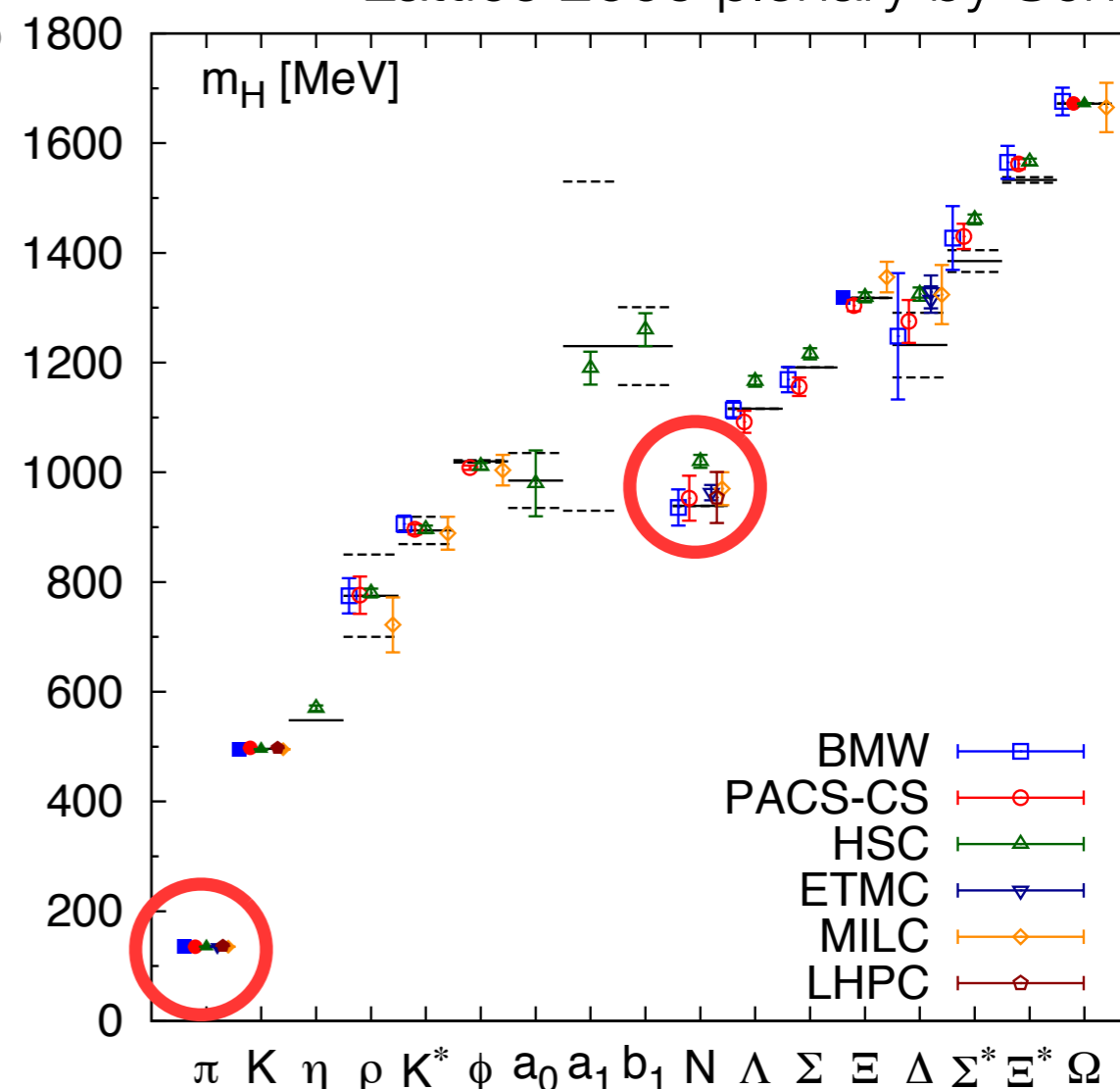
• 99%はQCDのカイラル対称性の破れ?

• 理論計算による実証

• π だけは軽い

• QCDの複合粒子で最も軽い

Lattice 2009 plenary by Scholz



QCDによる質量獲得

- 陽子: udu 中性子: udd 質量は約 $1 \text{ GeV} = 1000 \text{ MeV}$

- 3つのクォークの質量の和は高々 0.01 GeV 程度

- 99%はQCDのカイラル対称性の破れ?

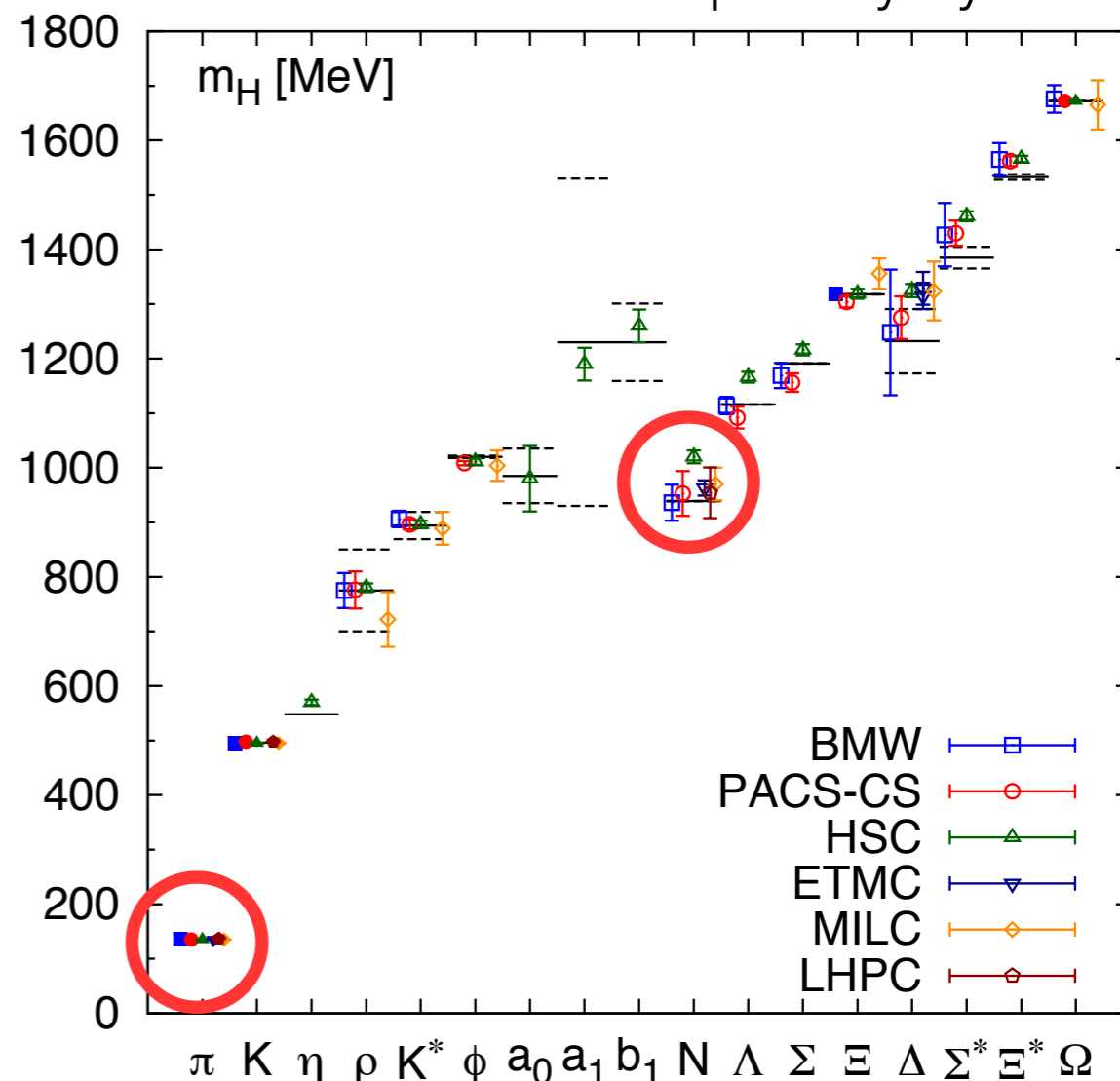
- 理論計算による実証

- π だけは軽い

- QCDの複合粒子で最も軽い

- 格子ゲージ理論+スーパーコンピュータ

Lattice 2009 plenary by Scholz



QCDによる質量獲得

- 陽子: udu 中性子: udd 質量は約 $1 \text{ GeV} = 1000 \text{ MeV}$

- 3つのクォークの質量の和は高々 0.01 GeV 程度

- 99%はQCDのカイラル対称性の破れ?

- 理論計算による実証

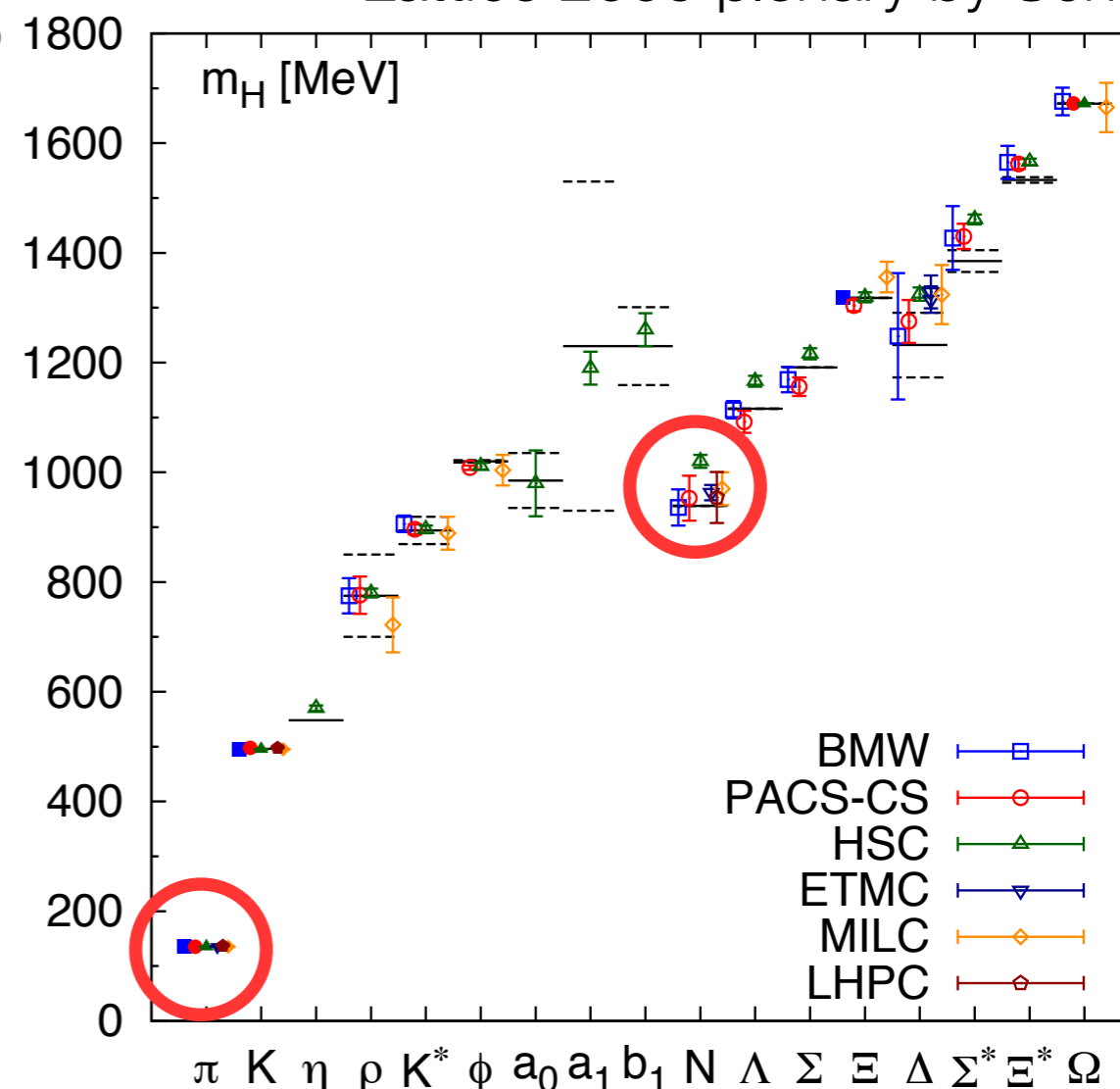
- π だけは軽い

- QCDの複合粒子で最も軽い

- 格子ゲージ理論+スーパーコンピュータ

- QCDの研究で大成功をおさめている

Lattice 2009 plenary by Scholz



QCDによる質量獲得

- 陽子: udu 中性子: udd 質量は約 $1 \text{ GeV} = 1000 \text{ MeV}$

- 3つのクォークの質量の和は高々 0.01 GeV 程度

- 99%はQCDのカイラル対称性の破れ?

- 理論計算による実証

- π だけは軽い

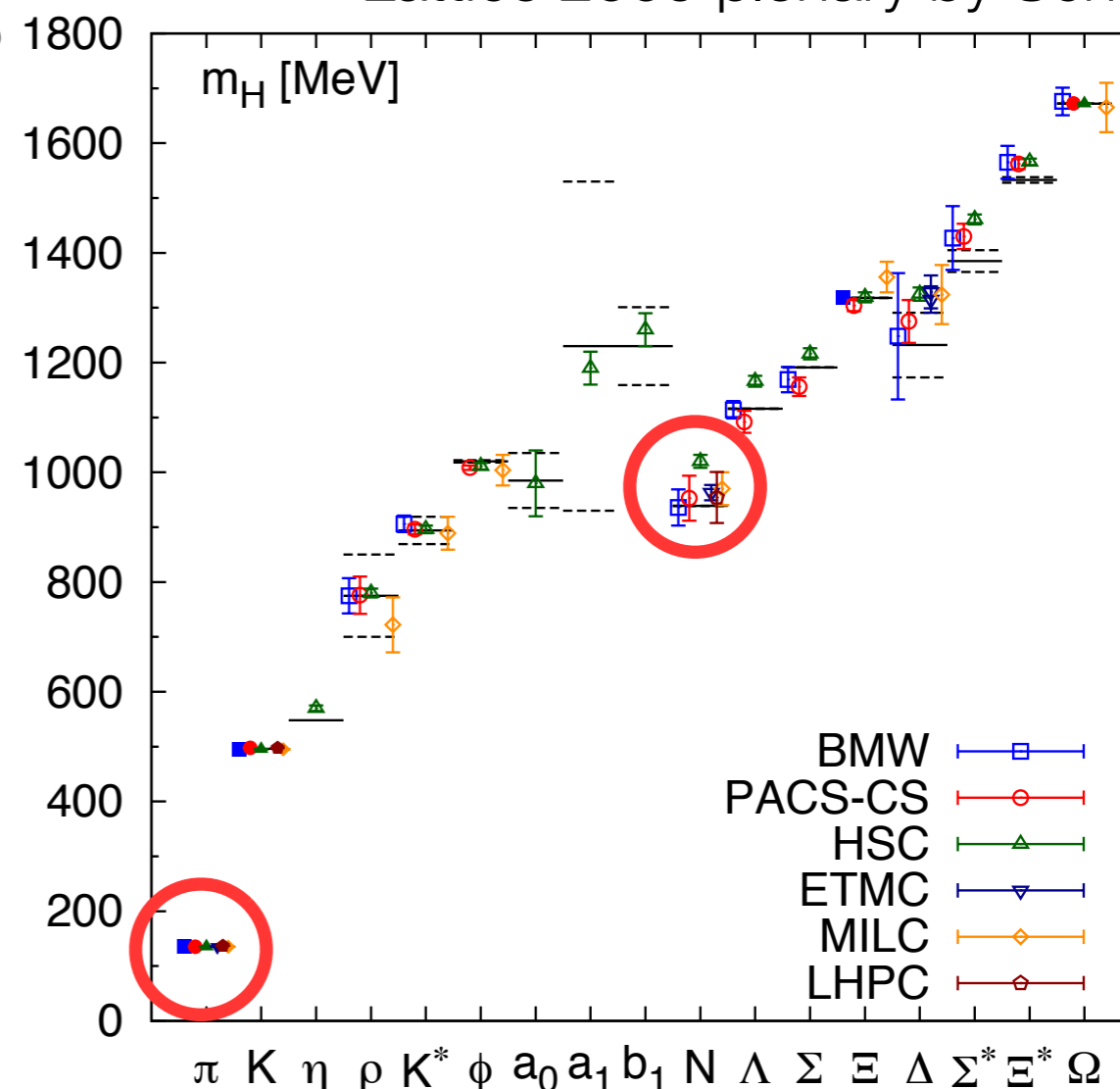
- QCDの複合粒子で最も軽い

- 格子ゲージ理論+スーパーコンピュータ

- QCDの研究で大成功をおさめている

- 3つのパラメタで全て説明できている

Lattice 2009 plenary by Scholz



質量獲得？

質量獲得？

- ヒッグス粒子も質量獲得のメカニズムを担っていたのでは？

質量獲得？

- ヒッグス粒子も質量獲得のメカニズムを担っていたのでは？
 - その通り！

質量獲得？

- ヒッグス粒子も質量獲得のメカニズムを担っていたのでは？
 - その通り！
 - 素粒子ヒッグスを複合粒子で置き換えても同じ効果が期待できる

質量獲得？

- ヒッグス粒子も質量獲得のメカニズムを担っていたのでは？
 - その通り！
 - 素粒子ヒッグスを複合粒子で置き換えても同じ効果が期待できる
- しかし、素粒子ヒッグスを含めた標準模型は数多くの実験結果を説明できた置き換えても大丈夫なの？

質量獲得？

- ヒッグス粒子も質量獲得のメカニズムを担っていたのでは？
 - その通り！
 - 素粒子ヒッグスを複合粒子で置き換えても同じ効果が期待できる
- しかし、素粒子ヒッグスを含めた標準模型は数多くの実験結果を説明できた置き換えても大丈夫なの？
 - 条件がある (置き換えても実験結果との矛盾が起こらないように)

質量獲得？

- ヒッグス粒子も質量獲得のメカニズムを担っていたのでは？
 - その通り！
 - 素粒子ヒッグスを複合粒子で置き換えても同じ効果が期待できる
- しかし、素粒子ヒッグスを含めた標準模型は数多くの実験結果を説明できた置き換えても大丈夫なの？
 - 条件がある (置き換えても実験結果との矛盾が起こらないように)
 - 相互作用の強さ / 質量異常次元 / ヒッグス質量...

複合ヒッグスモデルへの条件

複合ヒッグスモデルへの条件

- 相互作用の強さ

複合ヒッグスモデルへの条件

- 相互作用の強さ
- 質量異常次元が大きい $\gamma \sim 1$

複合ヒッグスモデルへの条件

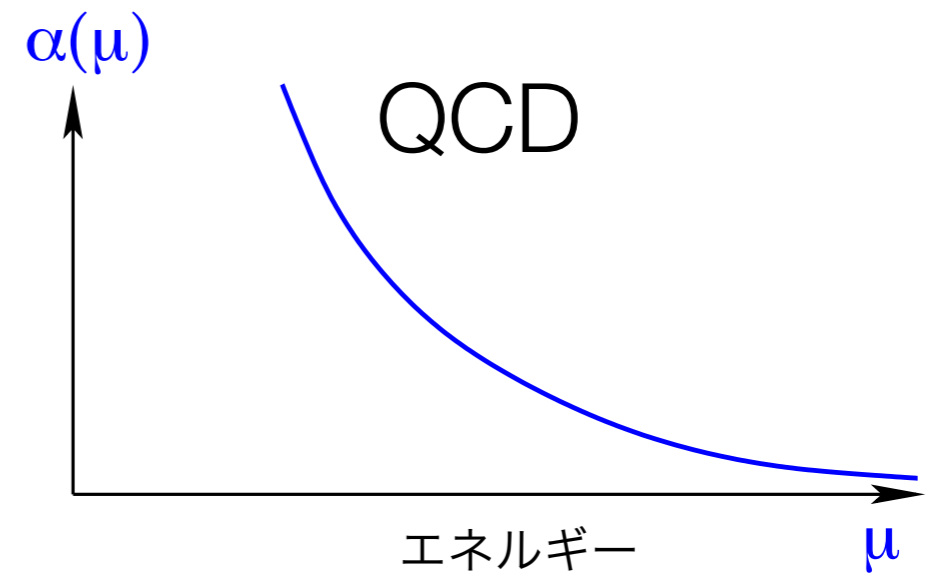
- 相互作用の強さ
- 質量異常次元が大きい $\gamma \sim 1$
 - ウォーキングテクニカラー(WTC)

複合ヒッグスモデルへの条件

- 相互作用の強さ
- 質量異常次元が大きい $\gamma \sim 1$
 - ウォーキングテクニカラー(WTC)
 - [Yamawaki-Bando-Matsumoto]

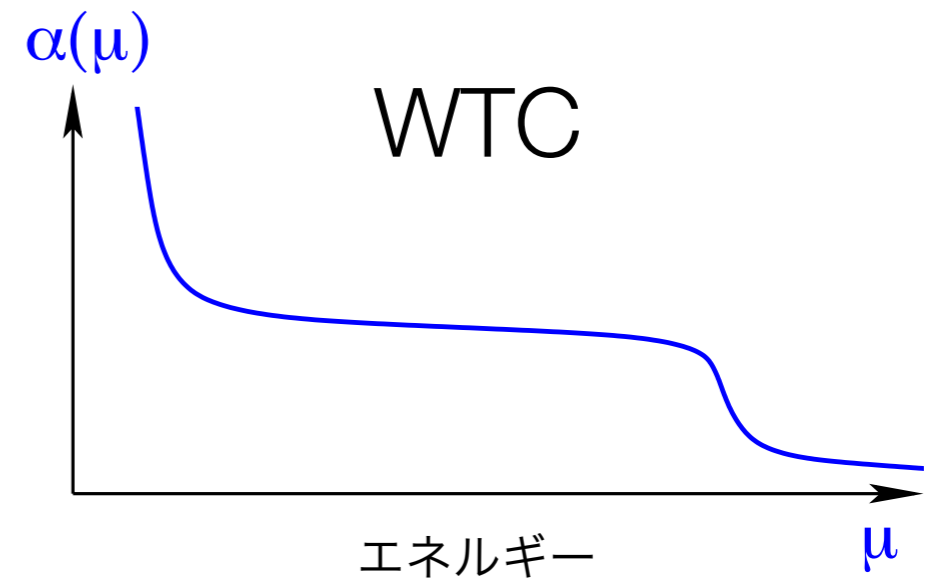
複合ヒッグス模型への条件

- 相互作用の強さ
- 質量異常次元が大きい $\gamma \sim 1$
 - ウォーキングテクニカラー(WTC)
 - [Yamawaki-Bando-Matsumoto]



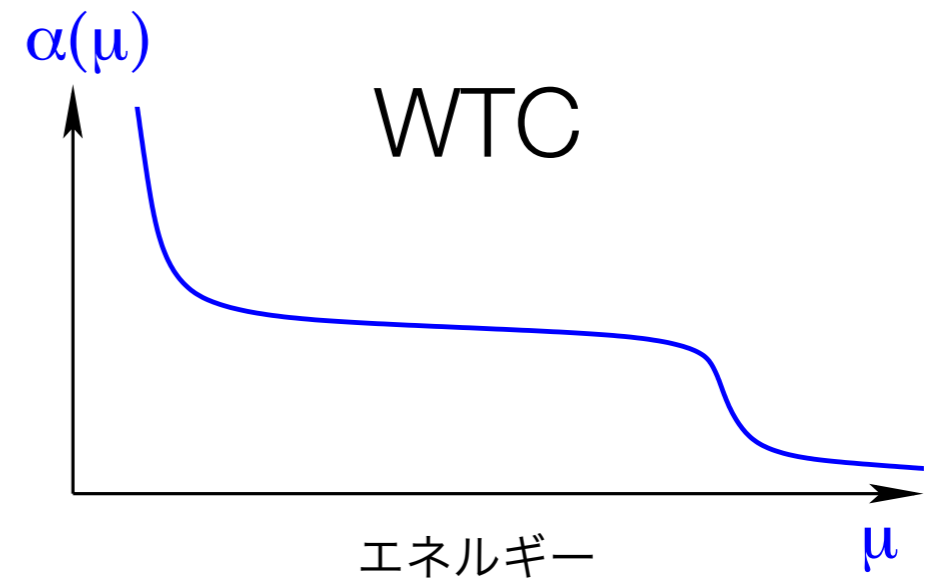
複合ヒッグス模型への条件

- 相互作用の強さ
- 質量異常次元が大きい $\gamma \sim 1$
 - ウォーキングテクニカラー(WTC)
 - [Yamawaki-Bando-Matsumoto]



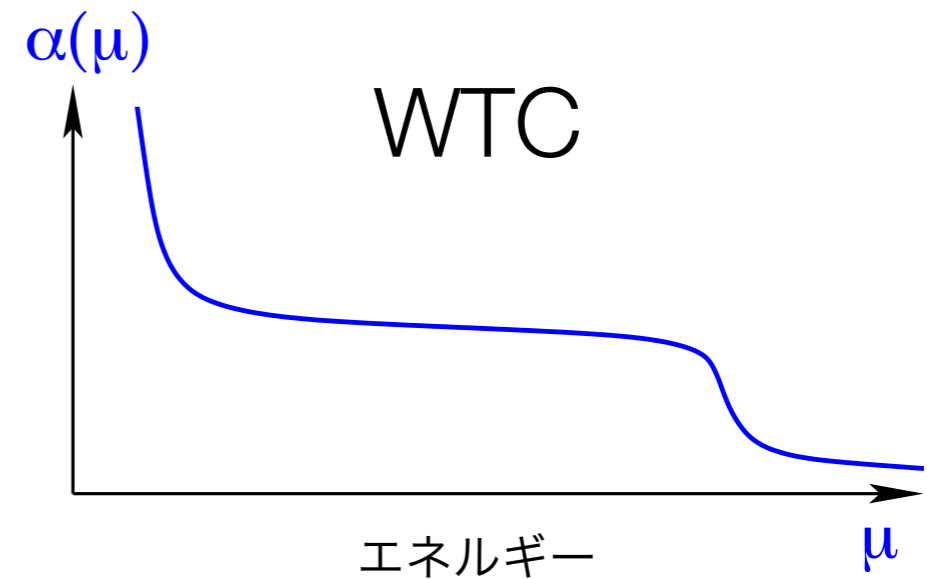
複合ヒッグス模型への条件

- 相互作用の強さ
- 質量異常次元が大きい $\gamma \sim 1$
 - ウォーキングテクニカラー(WTC)
 - [Yamawaki-Bando-Matsumoto]
 - 詳細は割愛、しかし、候補となる理論が見つかった [LatKMI 2013]



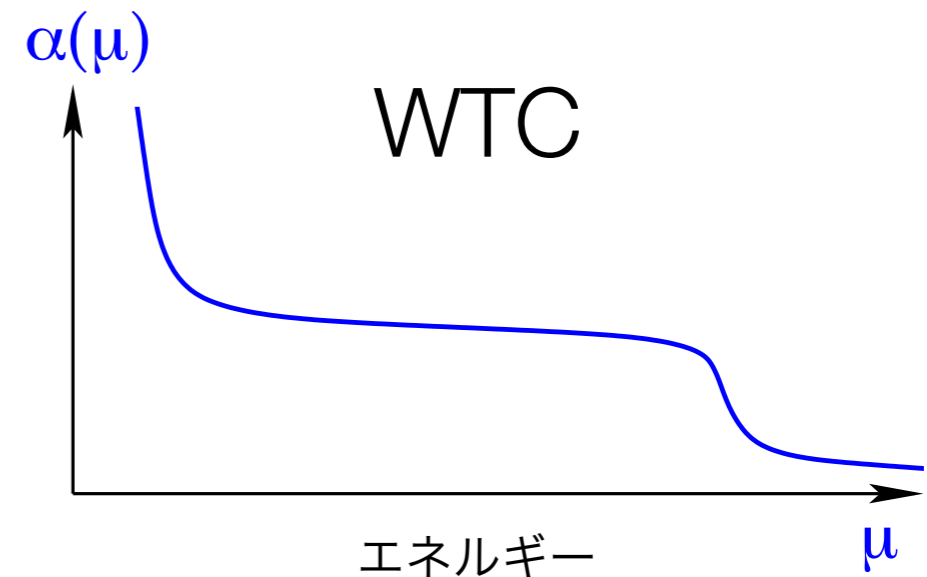
複合ヒッグス模型への条件

- 相互作用の強さ
- 質量異常次元が大きい $\gamma \sim 1$
 - ウォーキングテクニカラー(WTC)
 - [Yamawaki-Bando-Matsumoto]
 - 詳細は割愛、しかし、候補となる理論が見つかった [LatKMI 2013]
 - 8個のゼロ質量新クォークと新グルーオンからなるQCD的理論



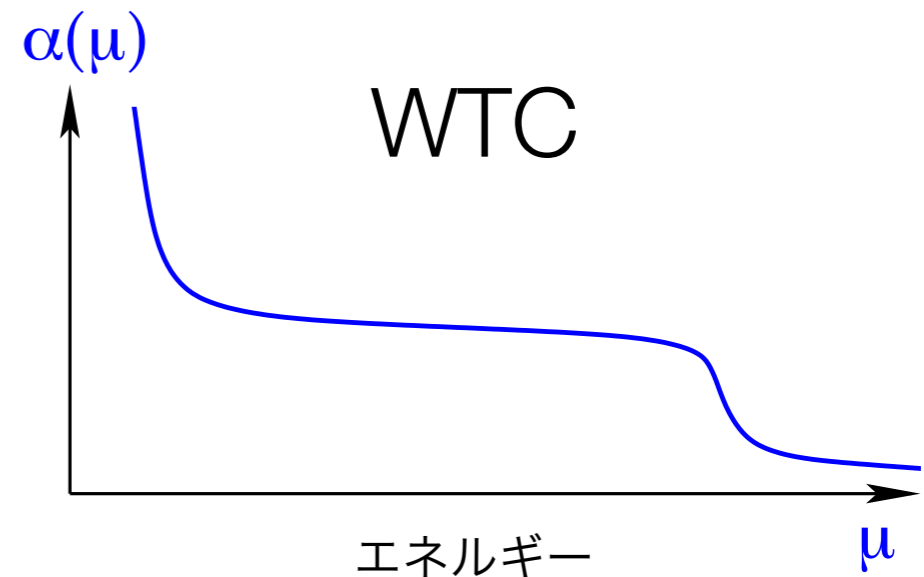
複合ヒッグスモデルへの条件

- 相互作用の強さ
- 質量異常次元が大きい $\gamma \sim 1$
 - ウォーキングテクニカラー(WTC)
 - [Yamawaki-Bando-Matsumoto]
 - 詳細は割愛、しかし、候補となる理論が見つかった [LatKMI 2013]
 - 8個のゼロ質量新クォークと新グルーオンからなるQCD的理論
- ヒッグス: QCD の σ に相当する



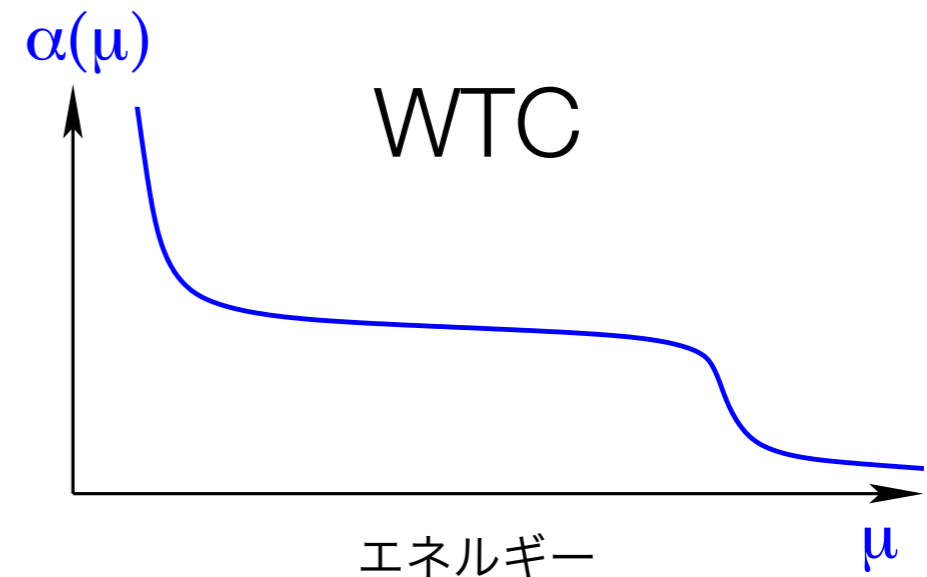
複合ヒッグスモデルへの条件

- 相互作用の強さ
- 質量異常次元が大きい $\gamma \sim 1$
 - ウォーキングテクニカラー(WTC)
 - [Yamawaki-Bando-Matsumoto]
 - 詳細は割愛、しかし、候補となる理論が見つかった [LatKMI 2013]
 - 8個のゼロ質量新クォークと新グルーオンからなるQCD的理論
- ヒッグス: QCD の σ に相当する
 - 実験で求まっている: 125 GeV \Rightarrow これを再現できるか



複合ヒッグスモデルへの条件

- 相互作用の強さ
- 質量異常次元が大きい $\gamma \sim 1$
 - ウォーキングテクニカラー(WTC)
 - [Yamawaki-Bando-Matsumoto]
 - 詳細は割愛、しかし、候補となる理論が見つかった [LatKMI 2013]
 - 8個のゼロ質量新クォークと新グルーオンからなるQCD的理論
- ヒッグス: QCD の σ に相当する
 - 実験で求まっている: 125 GeV \Rightarrow これを再現できるか
- ...



複合ヒッグス模型(WTC)とヒッグス質量 m_σ

複合ヒッグス模型(WTC)とヒッグス質量 m_σ

- 単純な予想: QCDと同じ。ただし、インプットは $f_\pi=120\sim 250$ GeV。

複合ヒッグス模型(WTC)とヒッグス質量 m_σ

- 単純な予想: QCDと同じ。ただし、インプットは $f_\pi=120\sim 250$ GeV。
- QCDを思い出してみよう: $m_\sigma/f_\pi\sim 5 \rightarrow m_\sigma=600\sim 1300$ GeV $\Leftrightarrow 125$ GeV(実験)

複合ヒッグス模型(WTC)とヒッグス質量 m_σ

- 単純な予想: QCDと同じ。ただし、インプットは $f_\pi=120\sim 250$ GeV。
- QCDを思い出してみよう: $m_\sigma/f_\pi\sim 5 \rightarrow m_\sigma=600\sim 1300$ GeV $\Leftrightarrow 125$ GeV(実験)
 - 全くダメだ!

複合ヒッグス模型(WTC)とヒッグス質量 m_σ

- 単純な予想: QCDと同じ。ただし、インプットは $f_\pi=120\sim 250$ GeV。
- QCDを思い出してみよう: $m_\sigma/f_\pi\sim 5 \rightarrow m_\sigma=600\sim 1300$ GeV $\Leftrightarrow 125$ GeV(実験)
 - 全くダメだ!
- QCDと類似だが相互作用の強さに特徴があった。その影響？

複合ヒッグス模型(WTC)とヒッグス質量 m_σ

- 単純な予想: QCDと同じ。ただし、インプットは $f_\pi=120\sim 250$ GeV。
- QCDを思い出してみよう: $m_\sigma/f_\pi\sim 5 \rightarrow m_\sigma=600\sim 1300$ GeV $\Leftrightarrow 125$ GeV(実験)
 - 全くダメだ!
- QCDと類似だが相互作用の強さに特徴があった。その影響?
 - 理論的予想: 軽くなりうる! [Yamawaki-Bando-Matsumoto]

複合ヒッグス模型(WTC)とヒッグス質量 m_σ

- 単純な予想: QCDと同じ。ただし、インプットは $f_\pi=120\sim 250$ GeV。
- QCDを思い出してみよう: $m_\sigma/f_\pi\sim 5 \rightarrow m_\sigma=600\sim 1300$ GeV $\Leftrightarrow 125$ GeV(実験)
 - 全くダメだ!
- QCDと類似だが相互作用の強さに特徴があった。その影響?
 - 理論的予想: 軽くなりうる! [Yamawaki-Bando-Matsumoto]
 - (スケール普遍性の自発的破れに伴う南部-ゴールドストーンボゾン)

複合ヒッグス模型(WTC)とヒッグス質量 m_σ

- 単純な予想: QCDと同じ。ただし、インプットは $f_\pi=120\sim 250$ GeV。
- QCDを思い出してみよう: $m_\sigma/f_\pi\sim 5 \rightarrow m_\sigma=600\sim 1300$ GeV $\Leftrightarrow 125$ GeV(実験)
 - 全くダメだ!
- QCDと類似だが相互作用の強さに特徴があった。その影響?
 - 理論的予想: 軽くなりうる! [Yamawaki-Bando-Matsumoto]
 - (スケール普遍性の自発的破れに伴う南部-ゴールドストーンボゾン)
- 検証には:

複合ヒッグス模型(WTC)とヒッグス質量 m_σ

- 単純な予想: QCDと同じ。ただし、インプットは $f_\pi=120\sim 250$ GeV。
- QCDを思い出してみよう: $m_\sigma/f_\pi\sim 5 \rightarrow m_\sigma=600\sim 1300$ GeV $\Leftrightarrow 125$ GeV(実験)
 - 全くダメだ!
- QCDと類似だが相互作用の強さに特徴があった。その影響?
 - 理論的予想: 軽くなりうる! [Yamawaki-Bando-Matsumoto]
 - (スケール普遍性の自発的破れに伴う南部-ゴールドストーンボゾン)
- 検証には:
 - QCDと同様、格子ゲージ理論+スーパーコンピュータが必要

KMI スーパーコンピュータ



KMI スーパーコンピュータ



KMI スーパーコンピュータ



- 通常ノード

- 148 ノード
- 2x Xenon 3.3 GHz
- 24 TFlops (ピーク)



KMI スーパーコンピュータ



- 通常ノード

- 148 ノード
- 2x Xenon 3.3 GHz
- 24 TFlops (ピーク)

- GPU搭載ノード

- 23 ノード
- 3x Tesla M2050
- 39 TFlops (peak)



KMI スーパーコンピュータ



- 通常ノード

- 148 ノード
- 2x Xenon 3.3 GHz
- 24 TFlops (ピーク)

- GPU搭載ノード

- 23 ノード
- 3x Tesla M2050
- 39 TFlops (peak)

- 中部地域最速クラス (2011)



φ 運用開始式

2011年3月2日



φ φιλοσοφία
φ φυσικός
φ : CP phase

— Τ. ΦΚΑΩΑ

2011.03.02

理論解析: モンテカルロ法と格子ゲージ理論

理論解析: モンテカルロ法と格子ゲージ理論

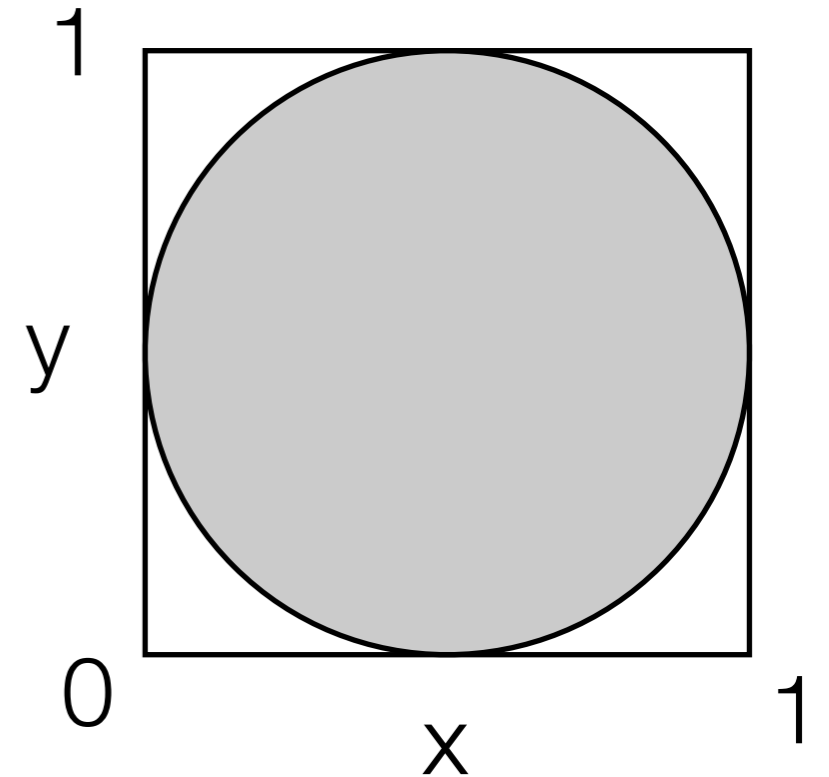
- 簡単な例: 円周率 π をモンテカルロ法で求める

理論解析: モンテカルロ法と格子ゲージ理論

- 簡単な例: 円周率 π をモンテカルロ法で求める
 - 一様乱数 (x, y) $0 < x, y < 1$ を大量に生成

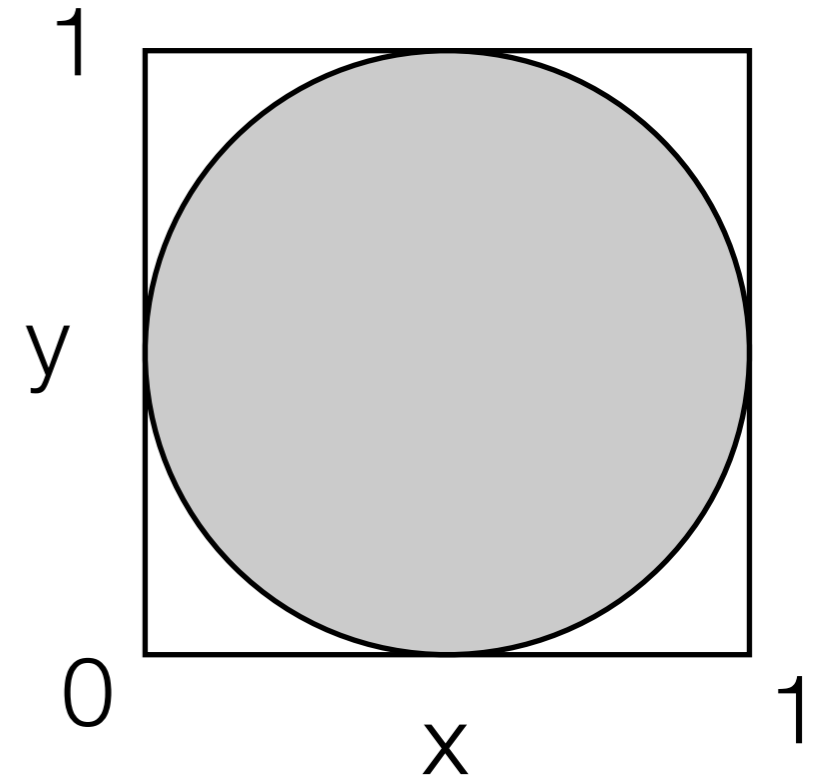
理論解析: モンテカルロ法と格子ゲージ理論

- 簡単な例: 円周率 π をモンテカルロ法で求める
 - 一様乱数 (x, y) $0 < x, y < 1$ を大量に生成



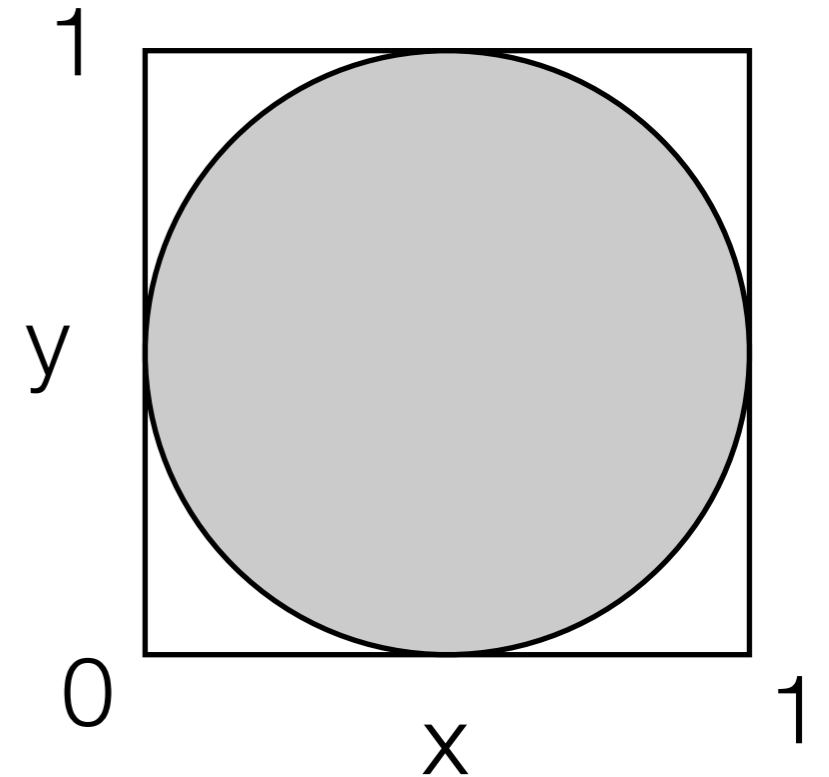
理論解析: モンテカルロ法と格子ゲージ理論

- 簡単な例: 円周率 π をモンテカルロ法で求める
 - 一様乱数 (x, y) $0 < x, y < 1$ を大量に生成
 - 円の中に入る確率は面積の比



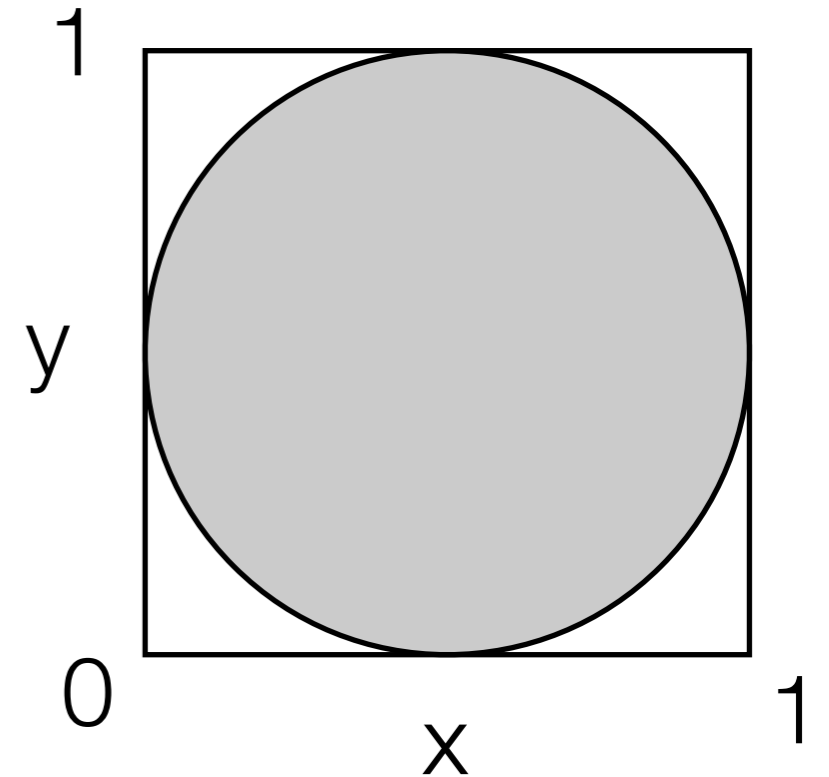
理論解析: モンテカルロ法と格子ゲージ理論

- 簡単な例: 円周率 π をモンテカルロ法で求める
 - 一様乱数 (x, y) $0 < x, y < 1$ を大量に生成
 - 円の中に入る確率は面積の比
 - 円の面積 / 正方形の面積 = $\pi / 4$



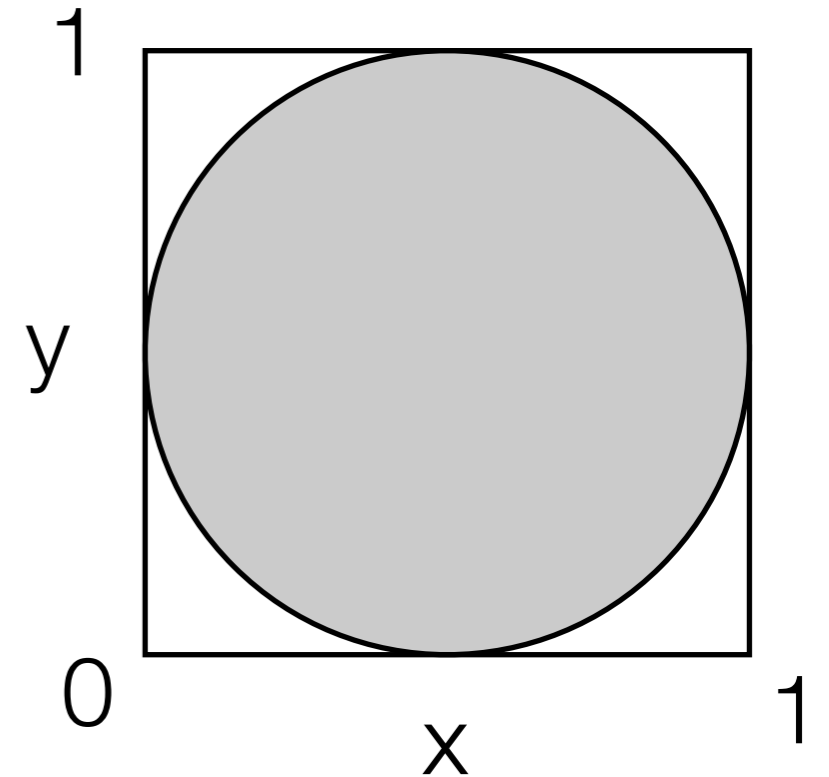
理論解析: モンテカルロ法と格子ゲージ理論

- 簡単な例: 円周率 π をモンテカルロ法で求める
 - 一様乱数 (x, y) $0 < x, y < 1$ を大量に生成
 - 円の中に入る確率は面積の比
 - 円の面積 / 正方形の面積 = $\pi / 4$
- 面積 ← モンテカルロ法による数値積分



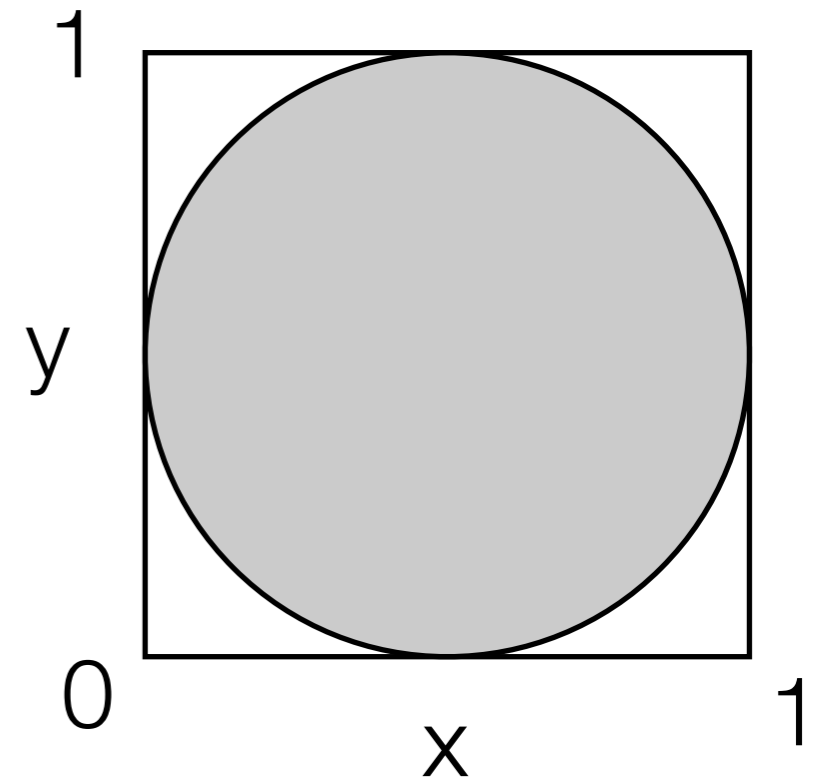
理論解析: モンテカルロ法と格子ゲージ理論

- 簡単な例: 円周率 π をモンテカルロ法で求める
 - 一様乱数 (x, y) $0 < x, y < 1$ を大量に生成
 - 円の中に入る確率は面積の比
 - 円の面積 / 正方形の面積 = $\pi / 4$
- 面積 ← モンテカルロ法による数値積分
- 基礎理論: 格子場のラグランジアンを経路積分



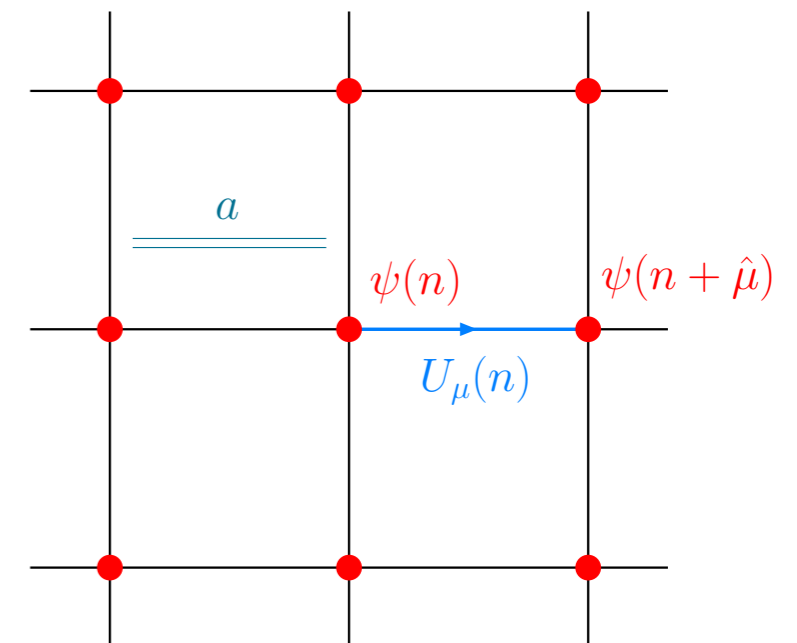
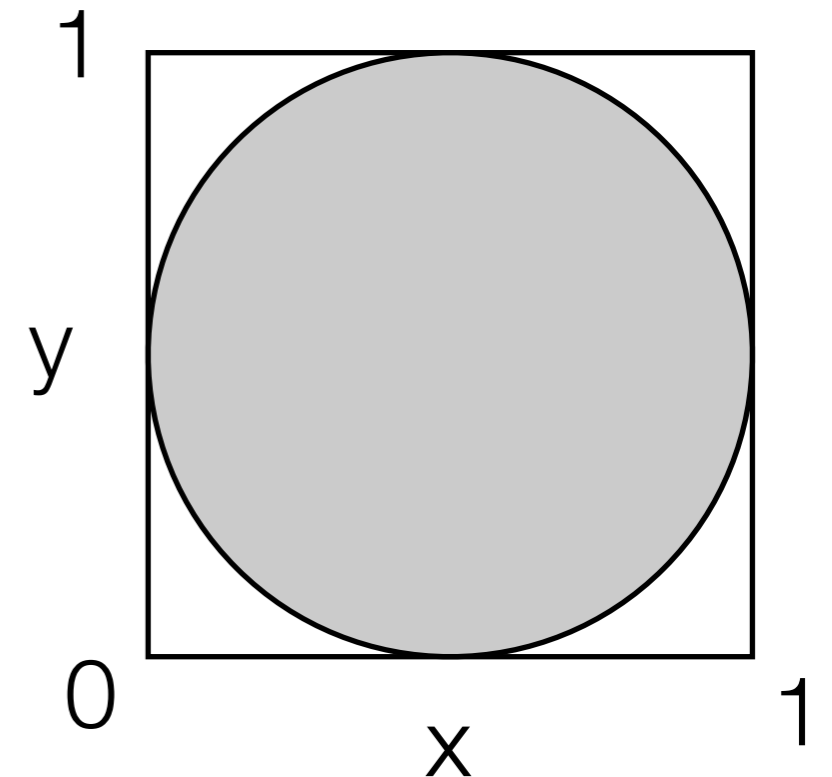
理論解析: モンテカルロ法と格子ゲージ理論

- 簡単な例: 円周率 π をモンテカルロ法で求める
 - 一様乱数 (x, y) $0 < x, y < 1$ を大量に生成
 - 円の中に入る確率は面積の比
 - 円の面積 / 正方形の面積 = $\pi / 4$
- 面積 ← モンテカルロ法による数値積分
- 基礎理論: 格子場のラグランジアンを経路積分
 - 4次元時空の各点で場の変数の積分を行う



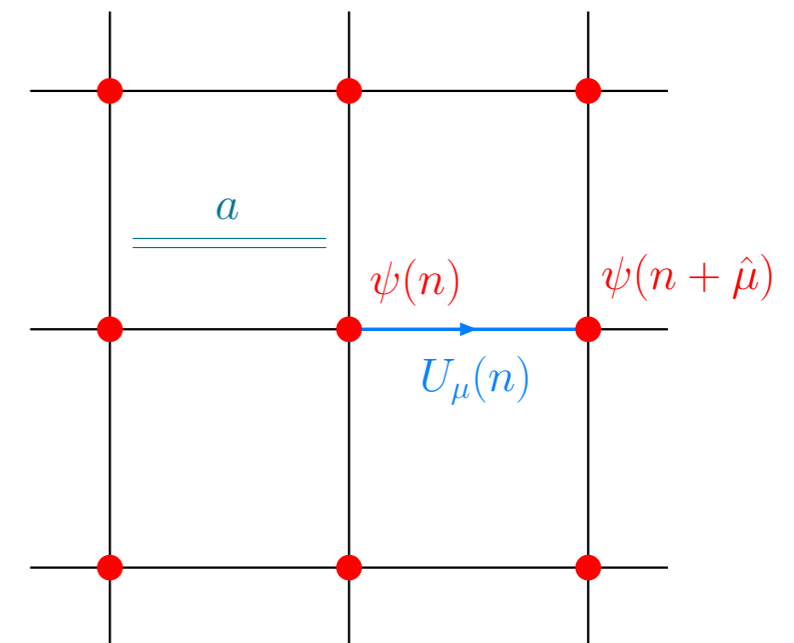
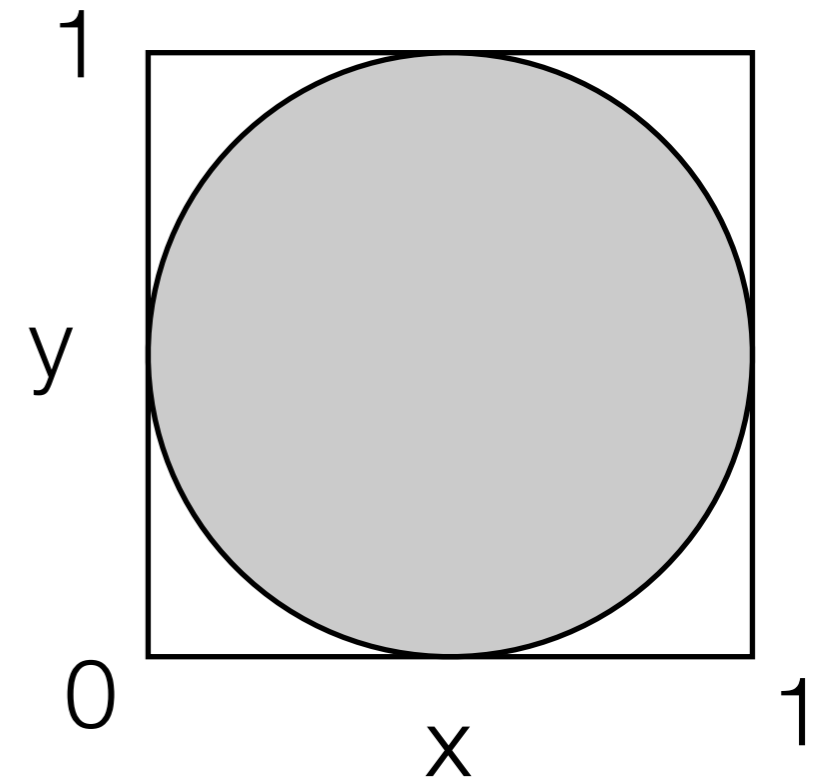
理論解析: モンテカルロ法と格子ゲージ理論

- 簡単な例: 円周率 π をモンテカルロ法で求める
 - 一様乱数 (x, y) $0 < x, y < 1$ を大量に生成
 - 円の中に入る確率は面積の比
 - 円の面積 / 正方形の面積 = $\pi / 4$
- 面積 ← モンテカルロ法による数値積分
- 基礎理論: 格子場のラグランジアンを経路積分
 - 4次元時空の各点で場の変数の積分を行う

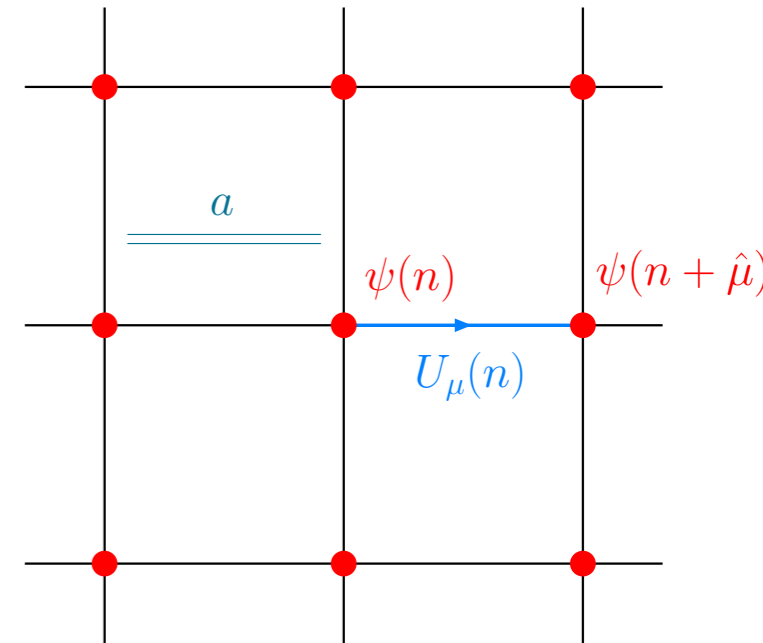


理論解析: モンテカルロ法と格子ゲージ理論

- 簡単な例: 円周率 π をモンテカルロ法で求める
 - 一様乱数 (x, y) $0 < x, y < 1$ を大量に生成
 - 円の中に入る確率は面積の比
 - 円の面積 / 正方形の面積 = $\pi / 4$
- 面積 ← モンテカルロ法による数値積分
- 基礎理論: 格子場のラグランジアンを経路積分
 - 4次元時空の各点で場の変数の積分を行う
 - 点の数と評価する関数の複雑さ → 膨大な計算

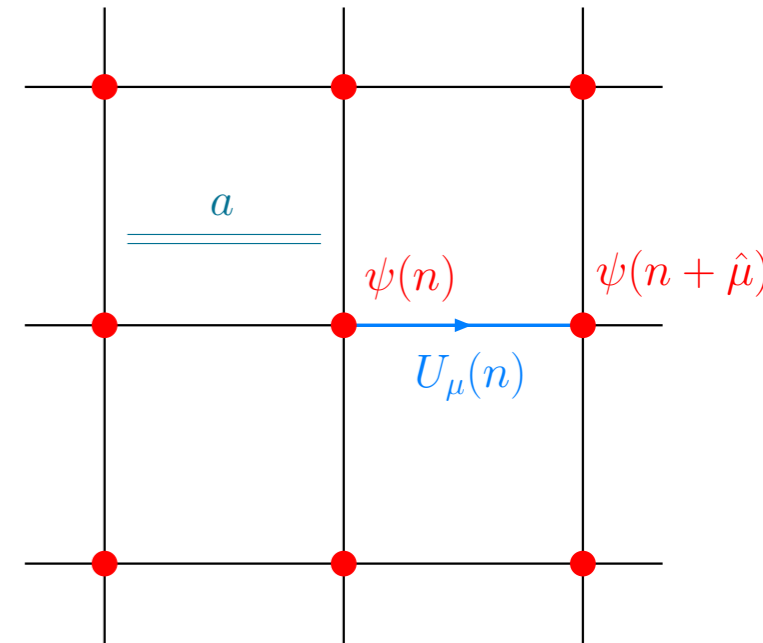


困難：体積、点の数は多い方がいい



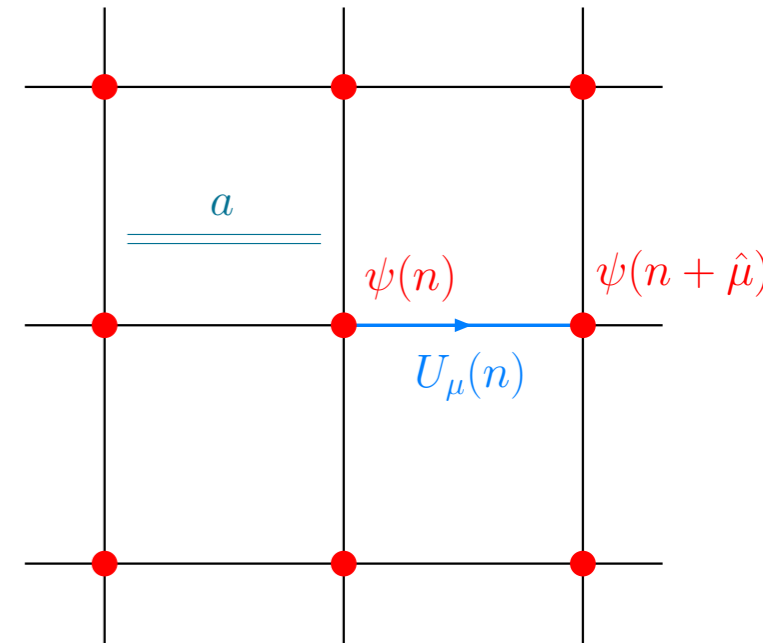
困難：体積、点の数は多い方がいい

- 理想的には



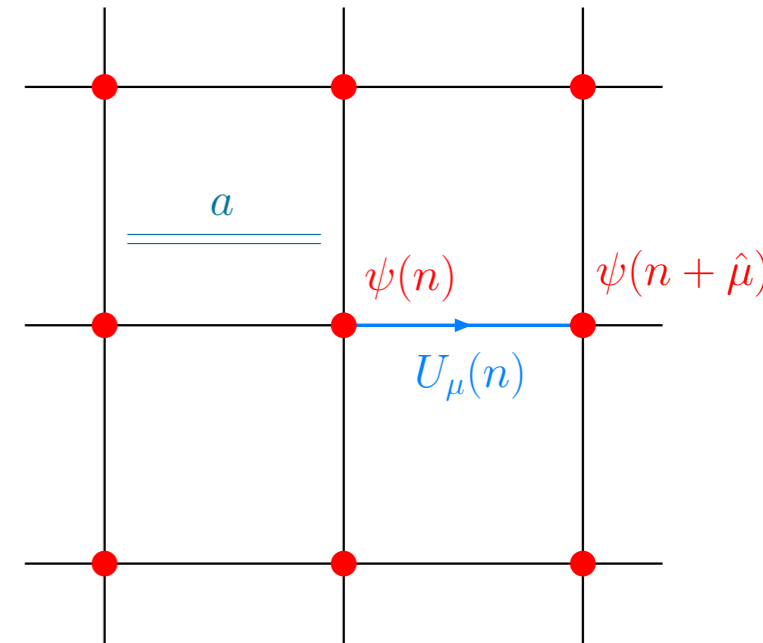
困難：体積、点の数は多い方がいい

- 理想的には
 - 格子の体積(格子点数) \rightarrow 無限大



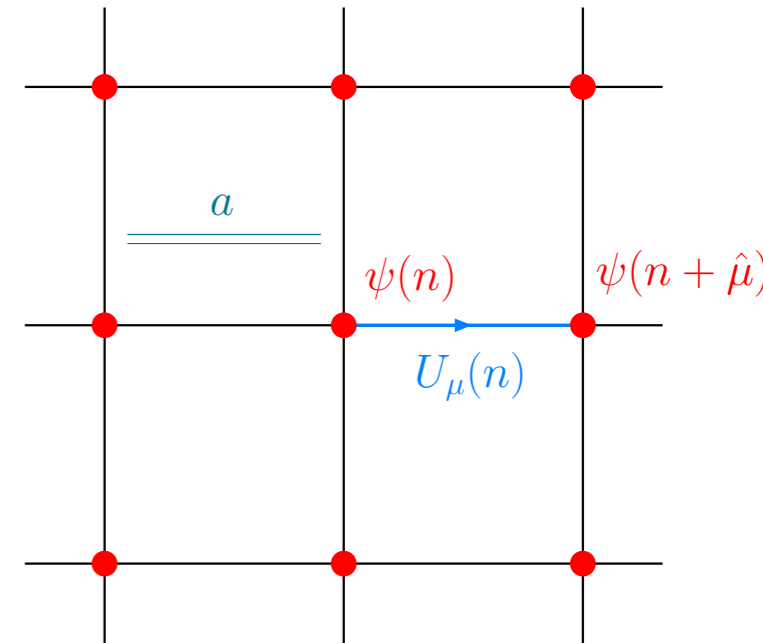
困難：体積、点の数は多い方がいい

- 理想的には
 - 格子の体積(格子点数) \rightarrow 無限大
 - 格子間隔 $a \rightarrow 0$



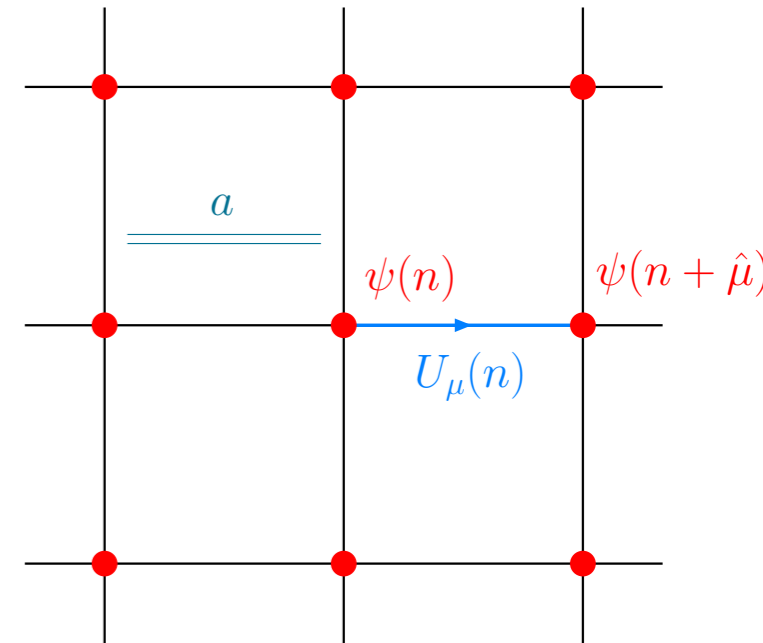
困難：体積、点の数は多い方がいい

- 理想的には
 - 格子の体積(格子点数) \rightarrow 無限大
 - 格子間隔 $a \rightarrow 0$
 - とたんに世界最速スーパーコンピュータでも扱えなくなる



困難：体積、点の数は多い方がいい

- 理想的には
 - 格子の体積(格子点数) \rightarrow 無限大
 - 格子間隔 $a \rightarrow 0$
 - とたんに世界最速スーパーコンピュータでも扱えなくなる
- 工夫



困難：体積、点の数は多い方がいい

- 理想的には

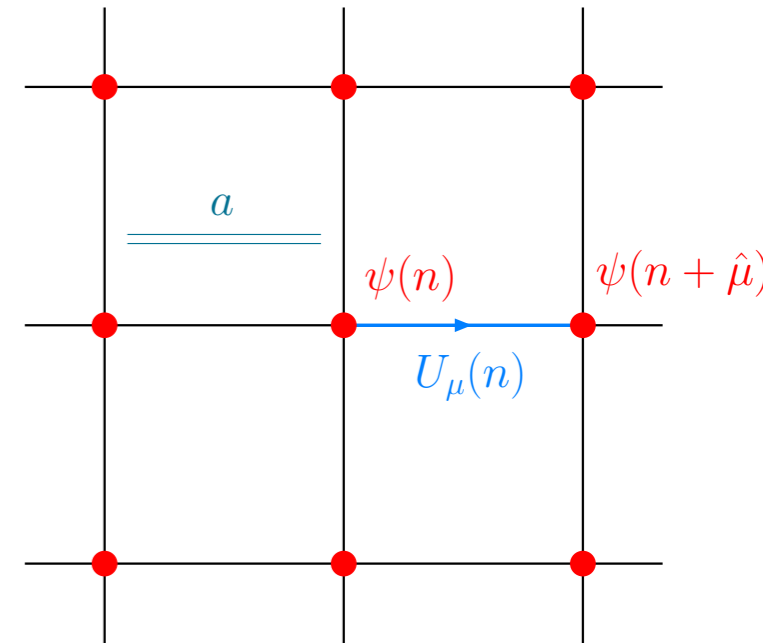
- 格子の体積(格子点数) \rightarrow 無限大

- 格子間隔 $a \rightarrow 0$

- とたんに世界最速スーパーコンピュータでも扱えなくなる

- 工夫

- 高度に改良されたスタッガードフェルミオン法(HISQ)の応用



困難：体積、点の数は多い方がいい

- 理想的には

- 格子の体積(格子点数) \rightarrow 無限大

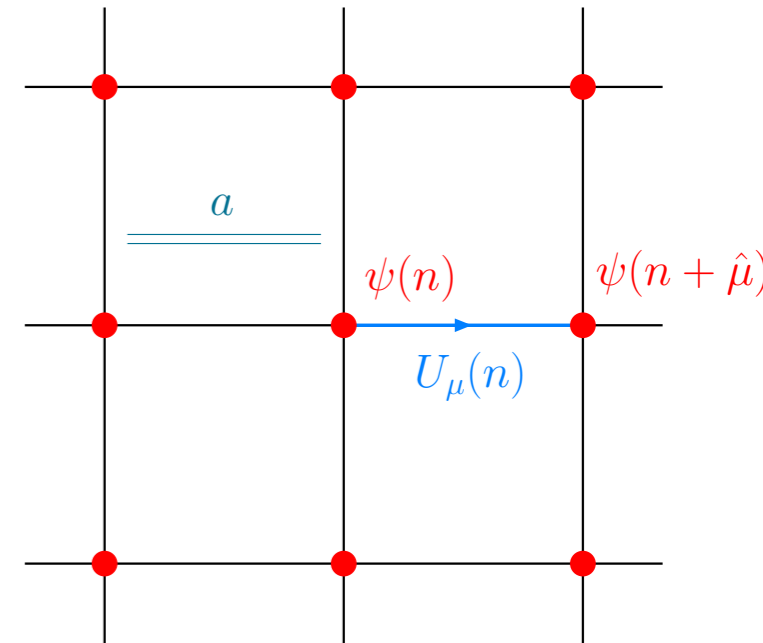
- 格子間隔 $a \rightarrow 0$

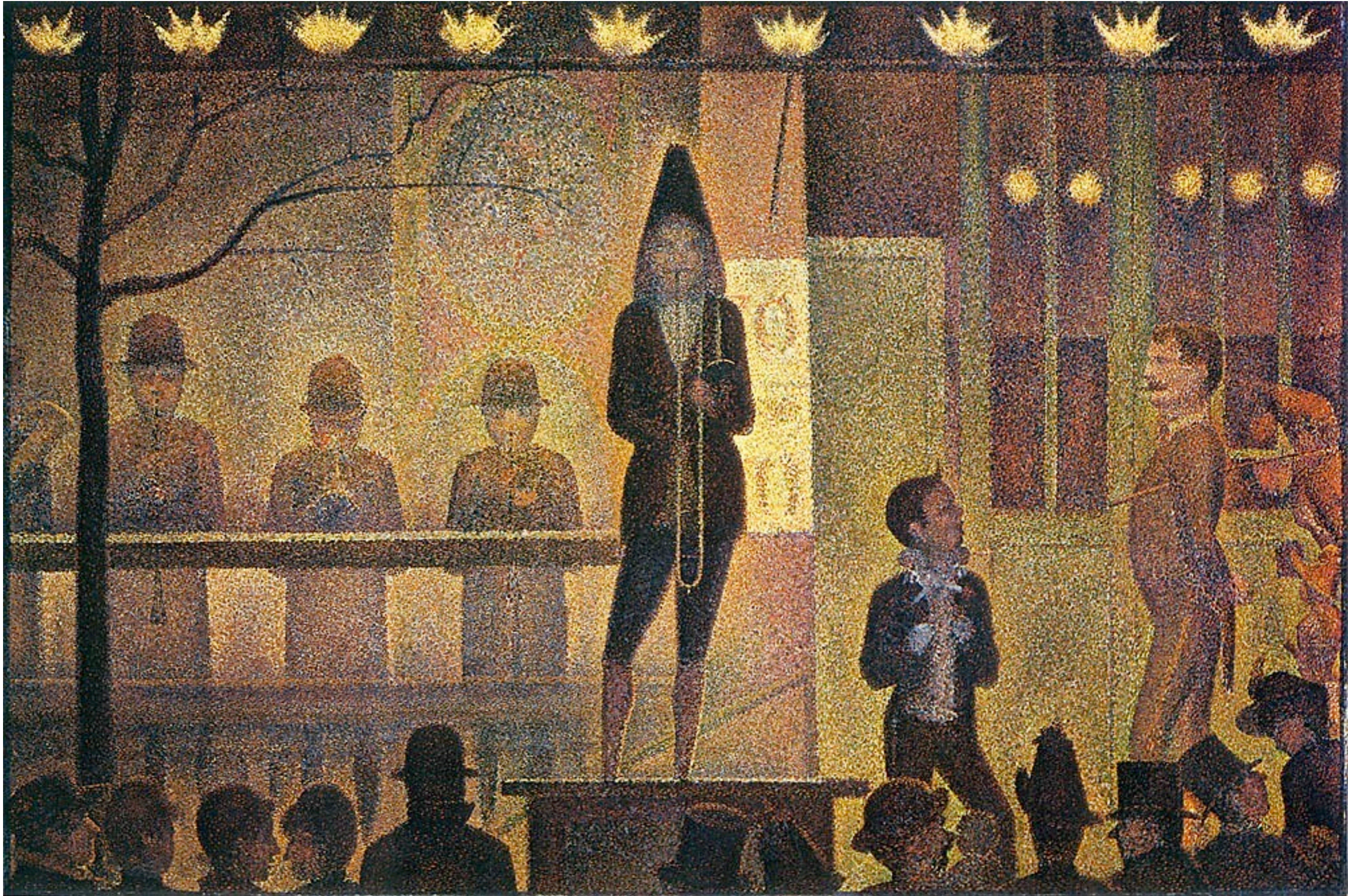
- とたんに世界最速スーパーコンピュータでも扱えなくなる

- 工夫

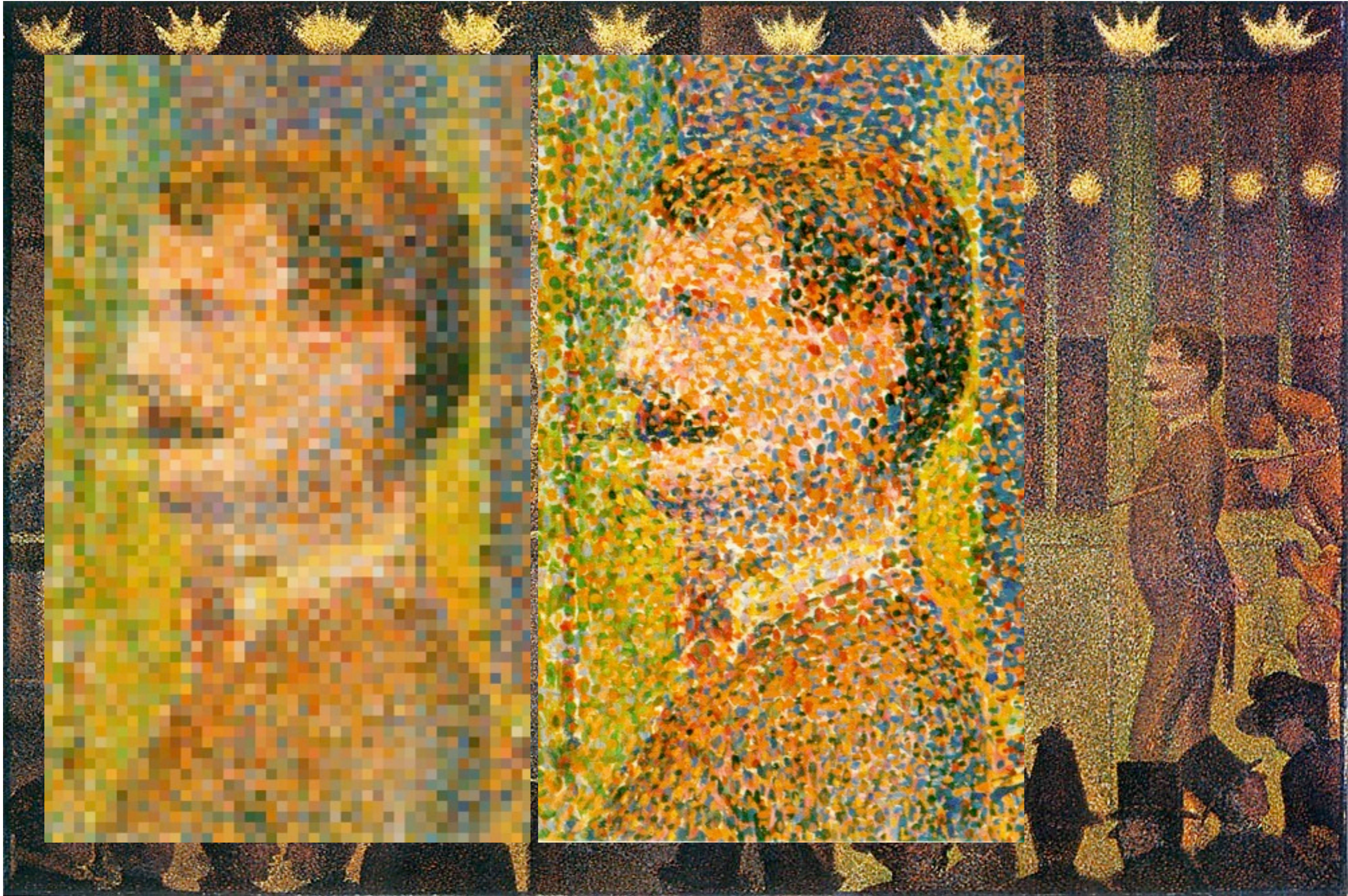
- 高度に改良されたスタッガードフェルミオン法(HISQ)の応用

- 格子間隔 a が比較的大きくても 連続極限 $a \rightarrow 0$ のエッセンスをとらえる









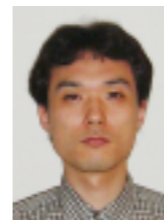
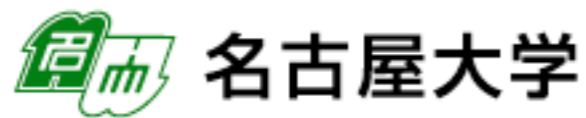


LatKMI collaboration

YA, T.Aoyama, M.Kurachi, T.Maskawa, K.Nagai, H.Ohki,



K.Yamawaki, T.Yamazaki



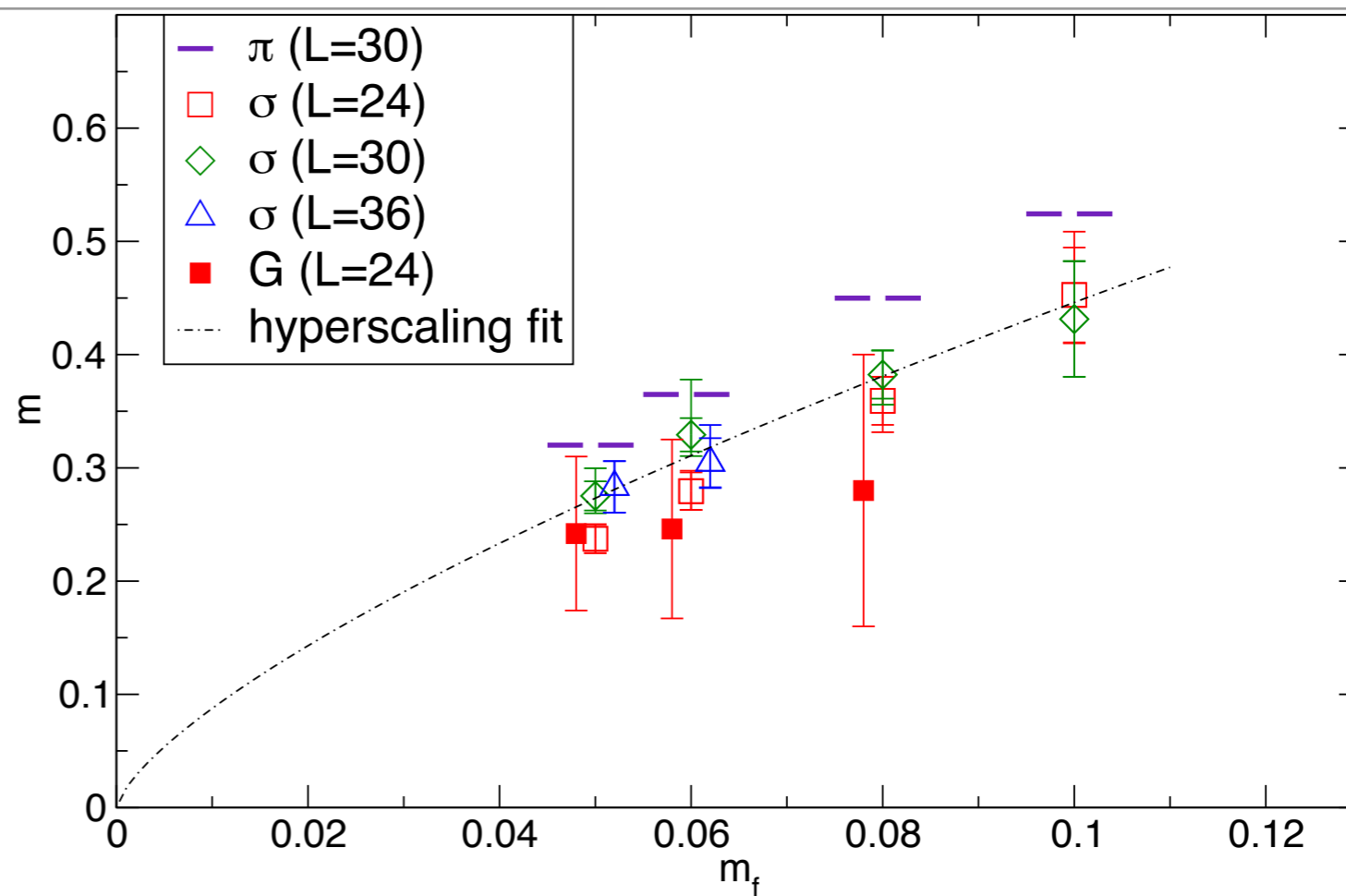
E. Rinaldi



A. Shibata

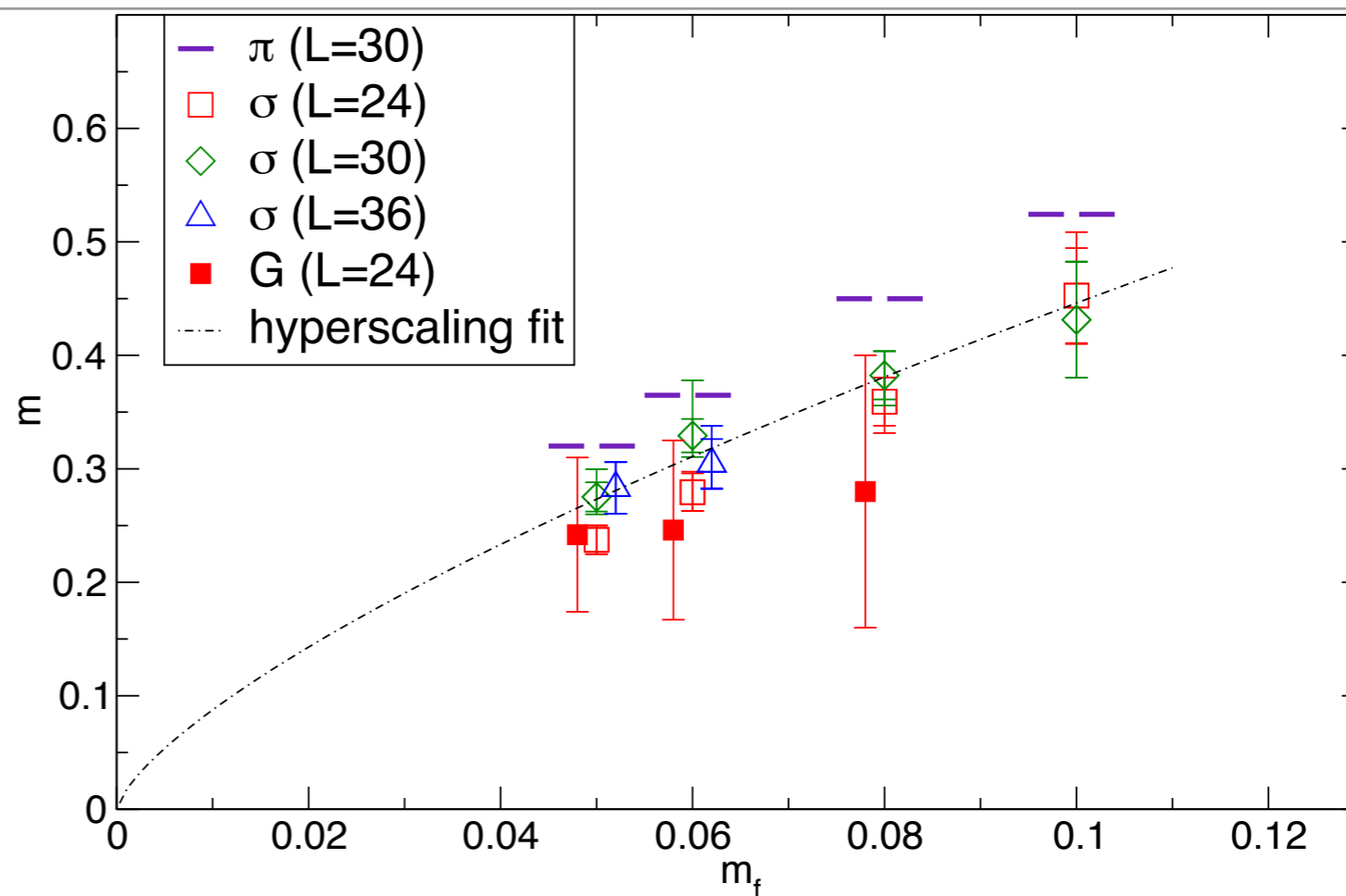


複合ヒッグス模型の最新の研究成果



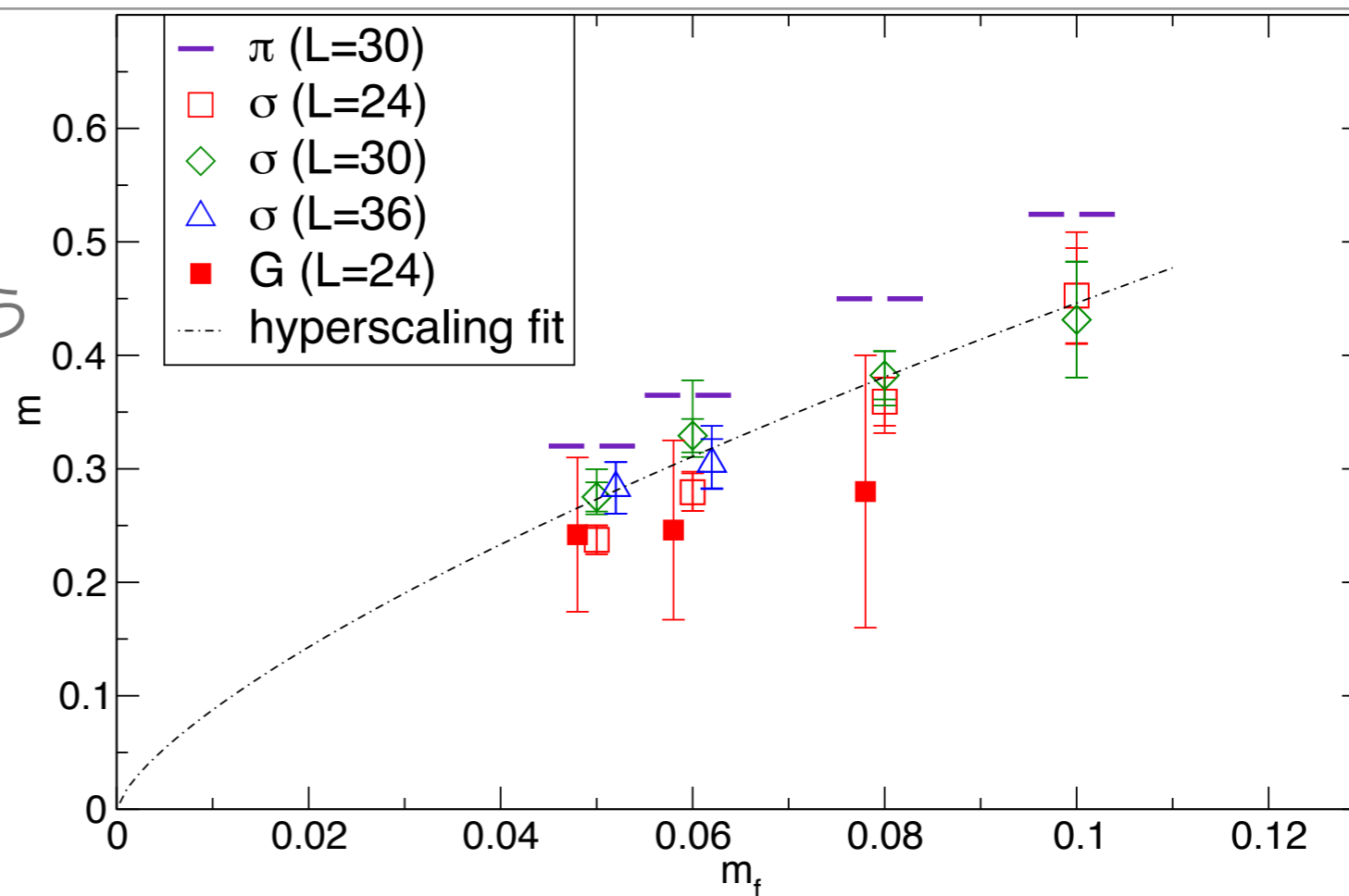
複合ヒッグス模型の最新の研究成果

- σ : 難問として知られている



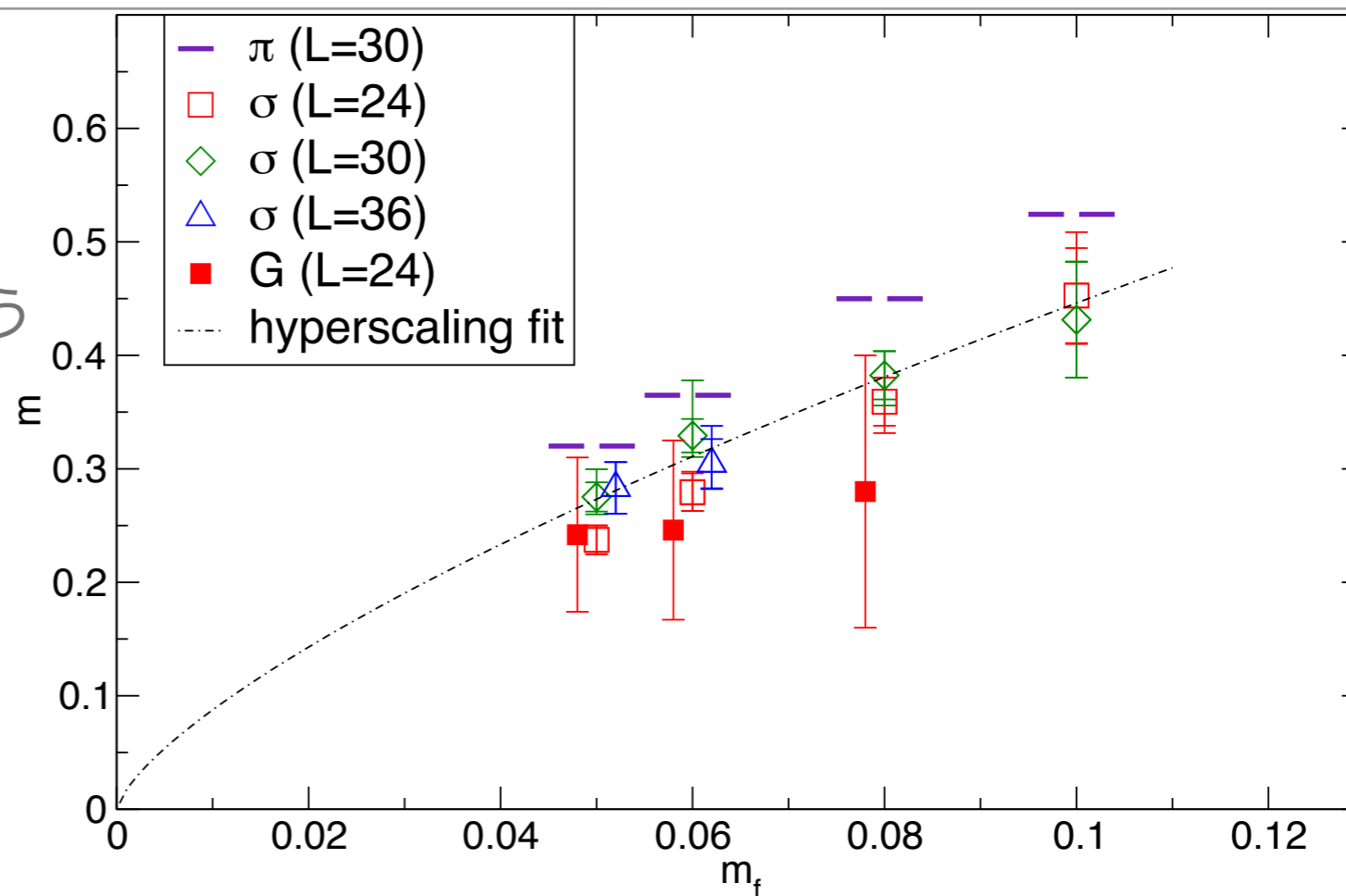
複合ヒッグス模型の最新の研究成果

- σ : 難問として知られている
- 1万個ほどの真空(積分点)を使う



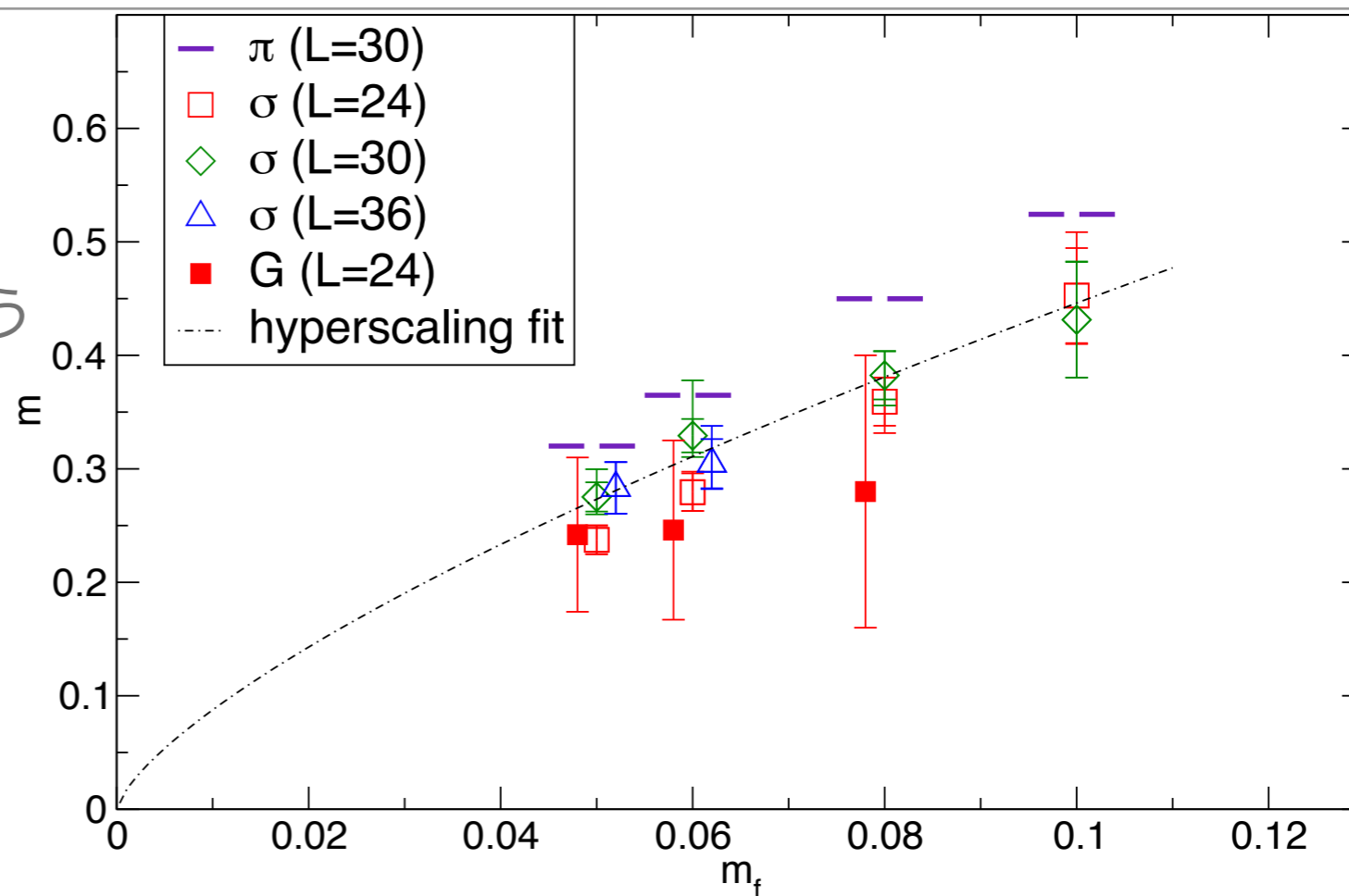
複合ヒッグス模型の最新の研究成果

- σ : 難問として知られている
- 1万個ほどの真空(積分点)を使う
- ある程度のシグナルが出た!



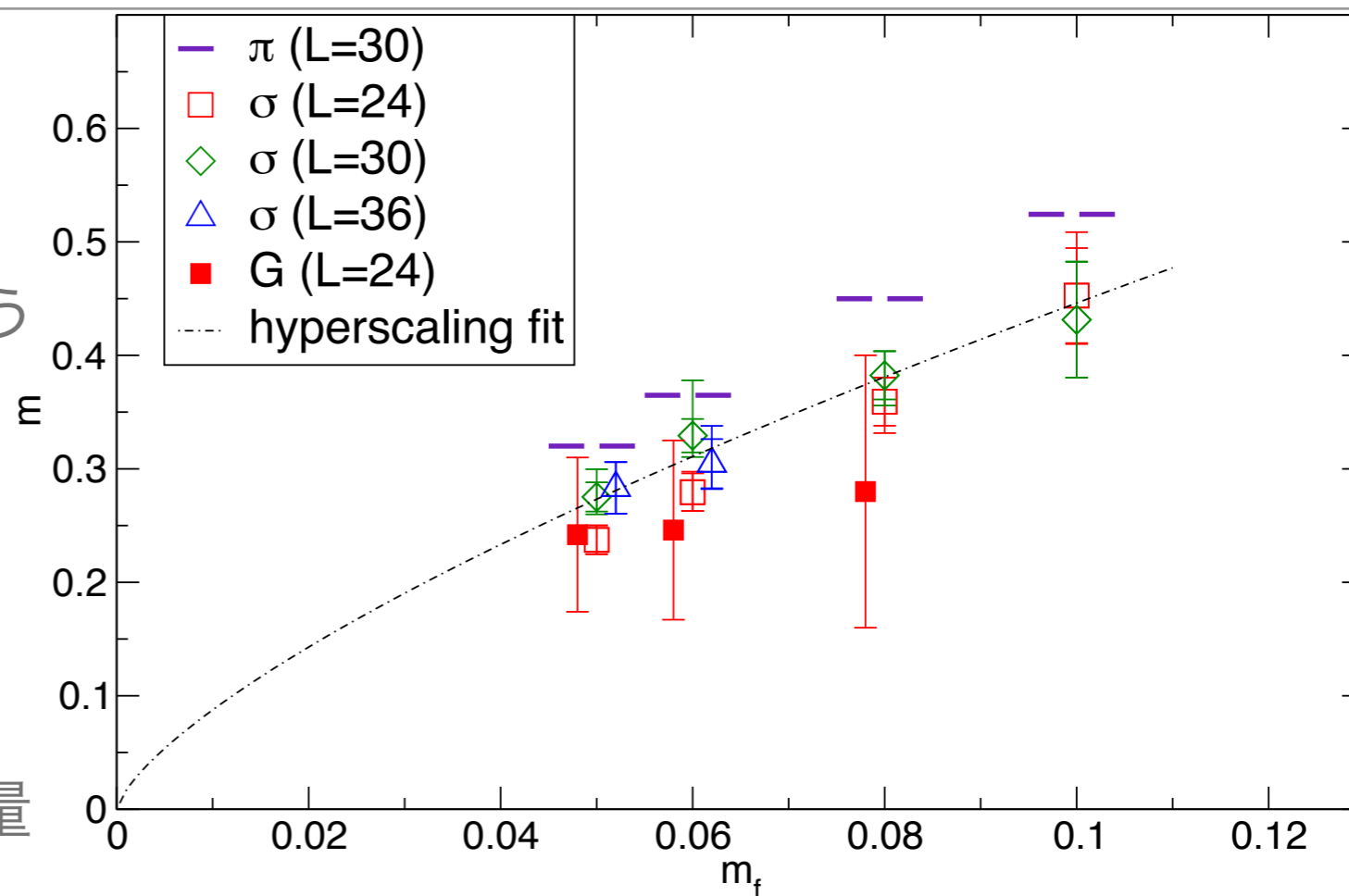
複合ヒッグス模型の最新の研究成果

- σ : 難問として知られている
- 1万個ほどの真空(積分点)を使う
- ある程度のシグナルが出た!
- 新クォークは1 2個



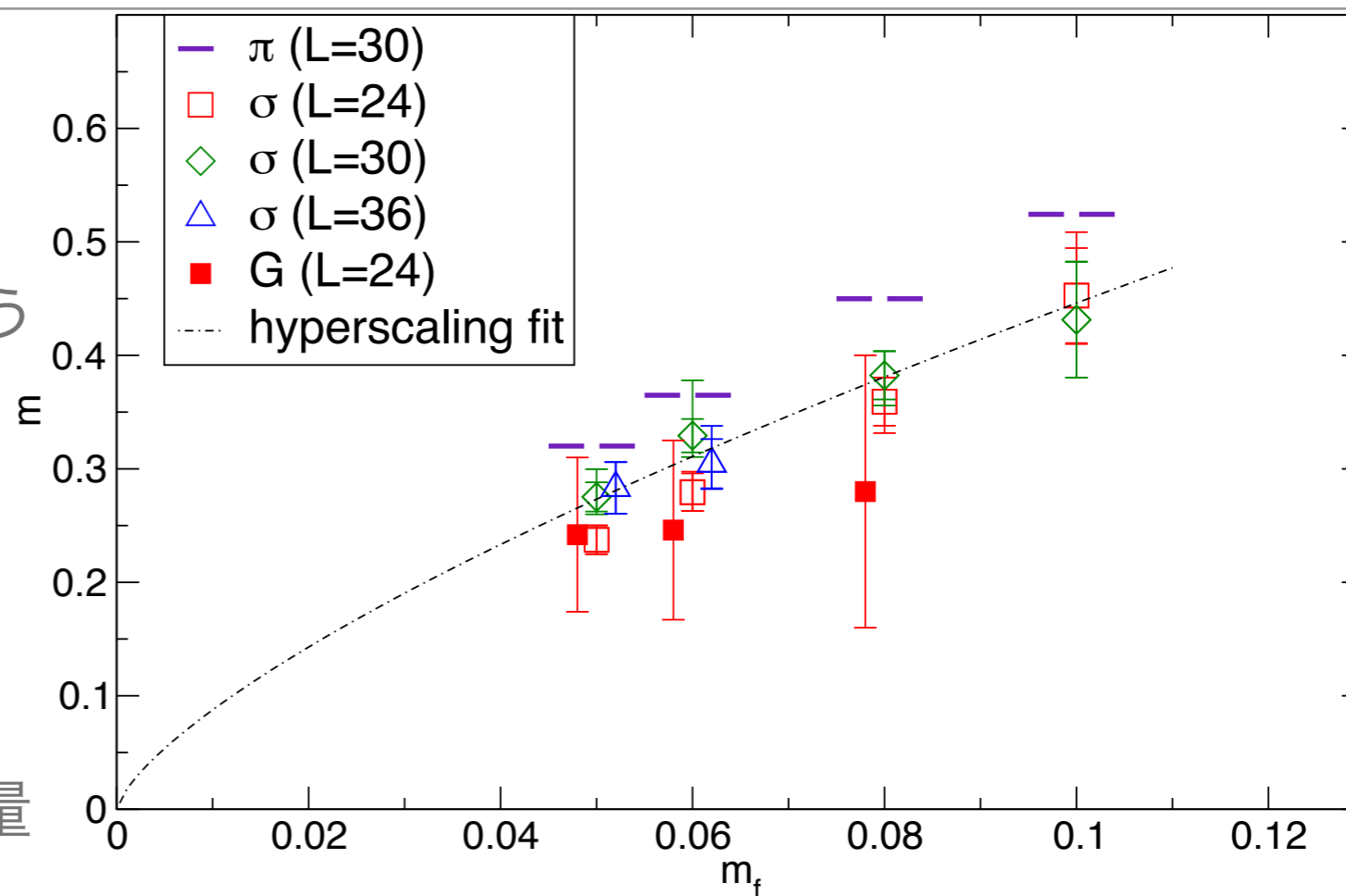
複合ヒッグス模型の最新の研究成果

- σ : 難問として知られている
- 1万個ほどの真空(積分点)を使う
- ある程度のシグナルが出た!
- 新クォークは1 2個
- 横軸はインプットクォーク質量



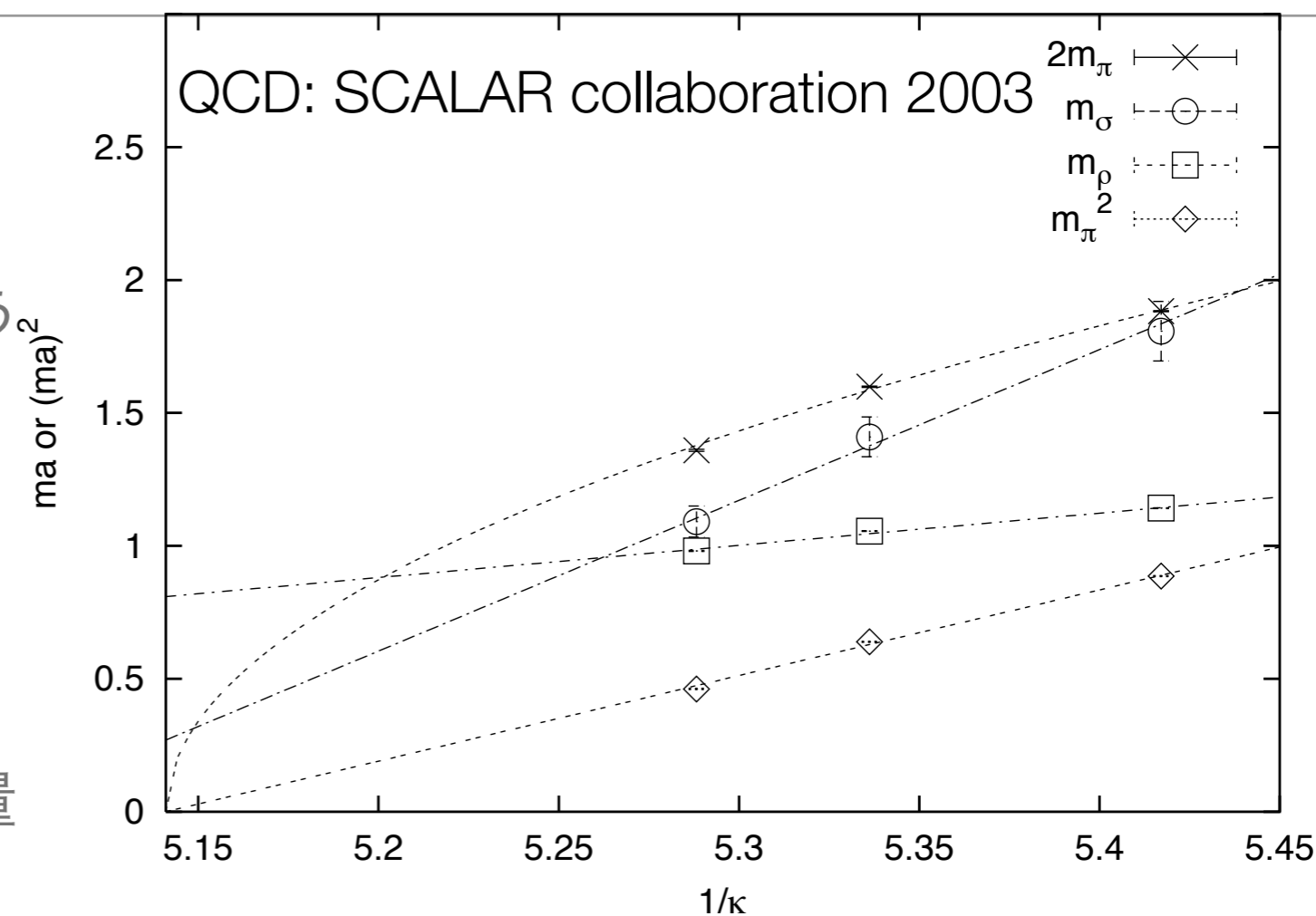
複合ヒッグス模型の最新の研究成果

- σ : 難問として知られている
- 1万個ほどの真空(積分点)を使う
- ある程度のシグナルが出た!
- 新クォークは1 2個
- 横軸はインプットクォーク質量
- QCD(軽いクォーク 2 個)では π が最も軽かった



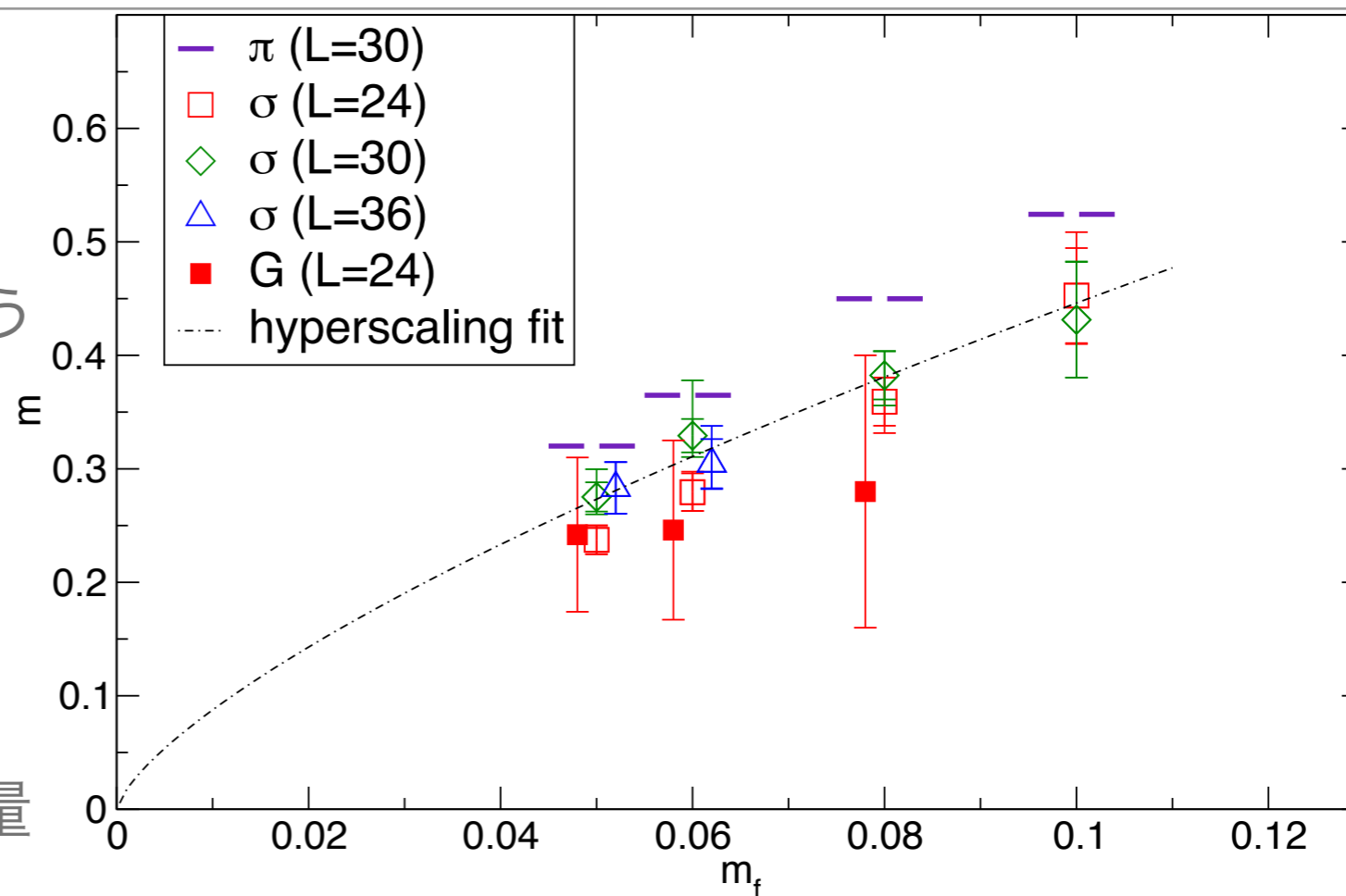
複合ヒッグス模型の最新の研究成果

- σ : 難問として知られている
- 1万個ほどの真空(積分点)を使う
- ある程度のシグナルが出た!
- 新クォークは1 2個
- 横軸はインプットクォーク質量
- QCD(軽いクォーク 2 個)では π が最も軽かった



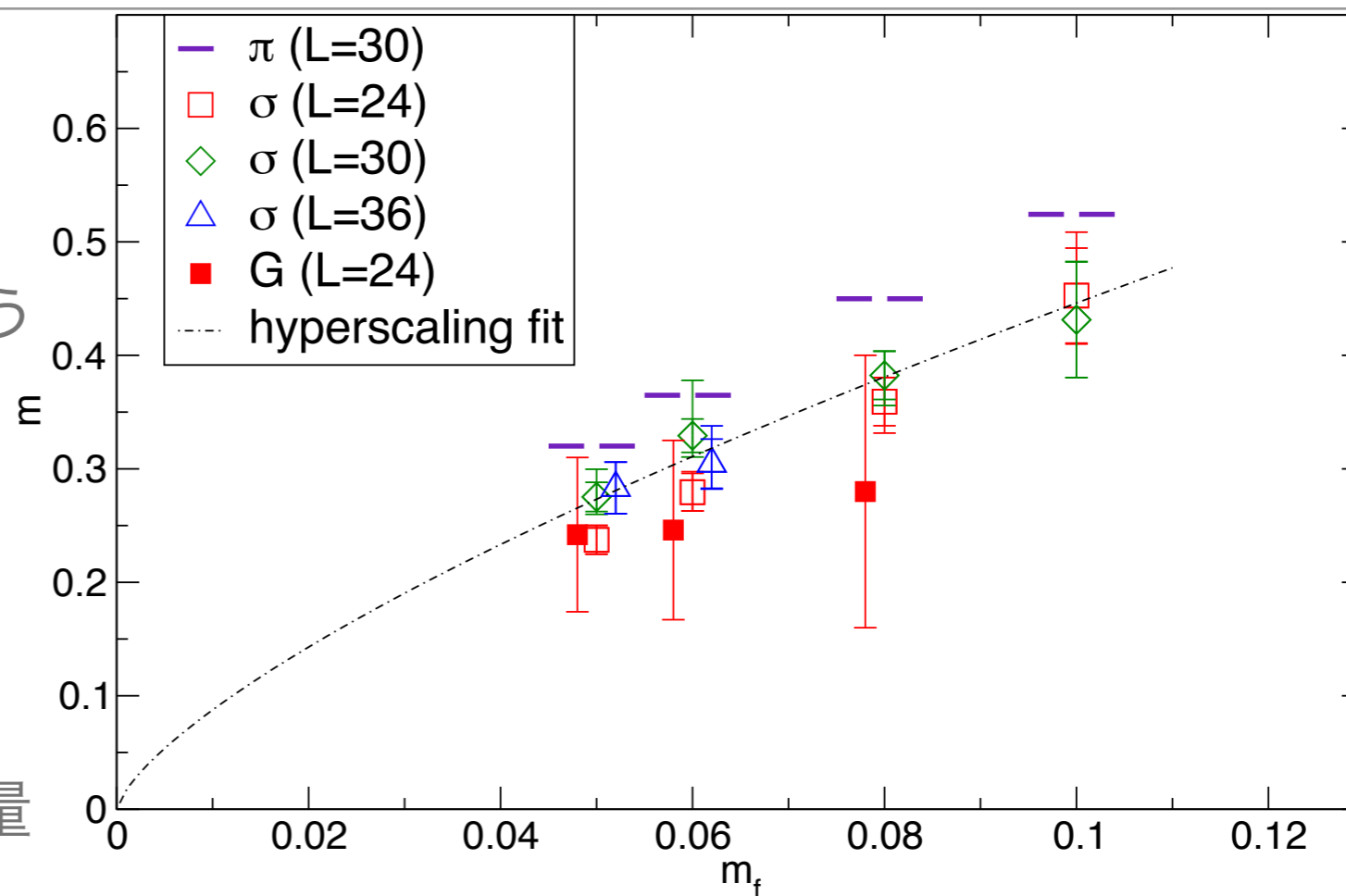
複合ヒッグス模型の最新の研究成果

- σ : 難問として知られている
- 1万個ほどの真空(積分点)を使う
- ある程度のシグナルが出た!
- 新クォークは1 2個
- 横軸はインプットクォーク質量
- QCD(軽いクォーク 2 個)では π が最も軽かった



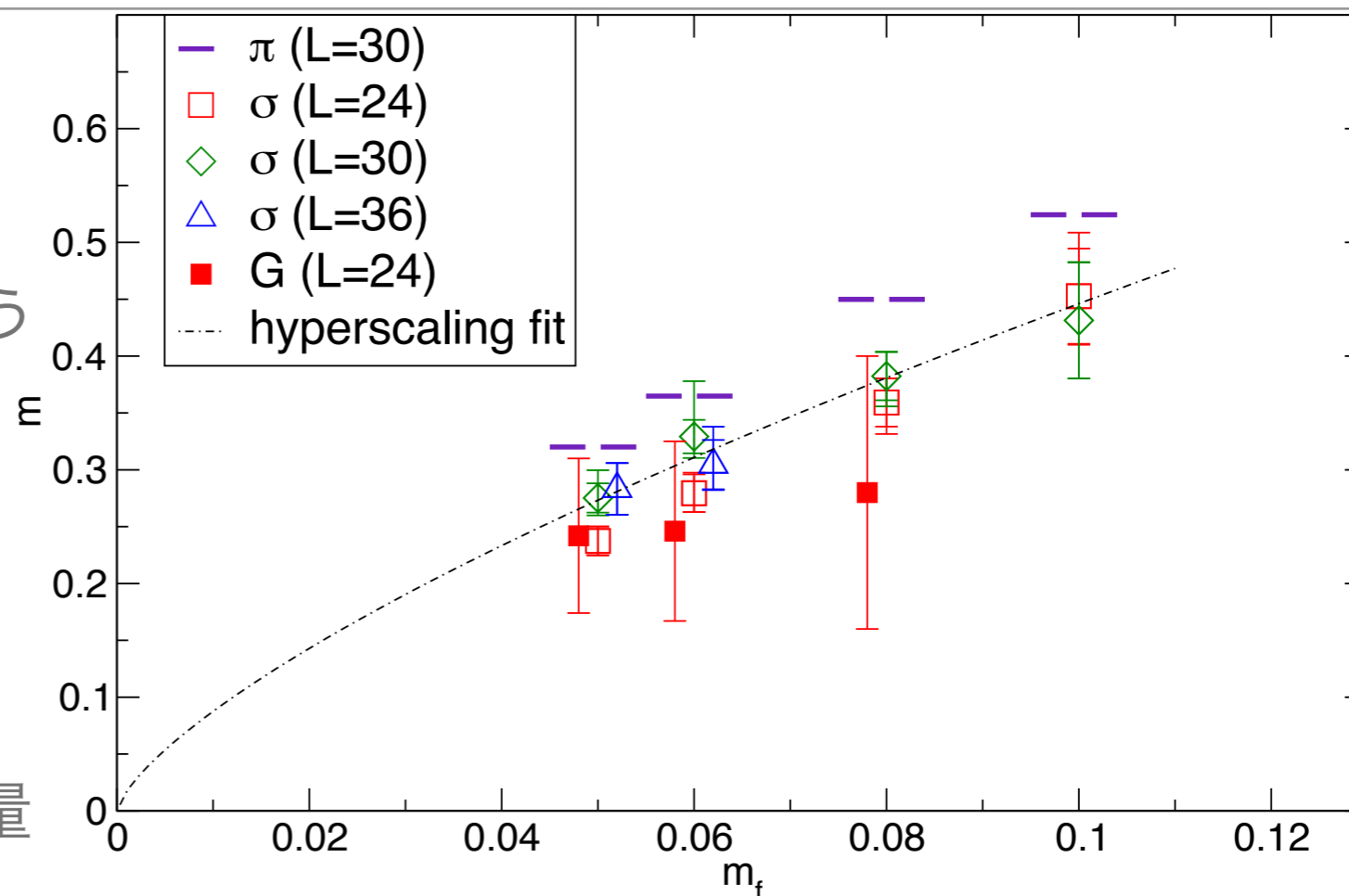
複合ヒッグス模型の最新の研究成果

- σ : 難問として知られている
- 1万個ほどの真空(積分点)を使う
- ある程度のシグナルが出た!
- 新クォークは12個
- 横軸はインプットクォーク質量
- QCD(軽いクォーク2個)では π が最も軽かった
- 12個では σ が最も軽い



複合ヒッグス模型の最新の研究成果

- σ : 難問として知られている
- 1万個ほどの真空(積分点)を使う
- ある程度のシグナルが出た!
- 新クォークは12個
- 横軸はインプットクォーク質量



- QCD(軽いクォーク2個)では π が最も軽かった
- 12個では σ が最も軽い
- Physical Review Letter 誌に掲載決定 [LatKMI collaboration]

ヒッグス 複合粒子か

物質「最小単位」揺らぐ

名大など 計算実験で推定

質量の起源とされ「神の粒子」ともいわれるヒッグス粒子が、複数の粒子で構成される「複合粒子」である可能性があることを、名古屋大を中心とするグループがコンピュータを使った計算実験で突き止めた。英エディンバラ大のヒッグスセンターで二十四日から開かれる研究会で発表する。

成果を発表するの 宙起源研究機構の益川は、ノーベル物理学賞 敏英特別教授、山脇幸一特任教授をはじめ、青木保道准教授ら計十人の研究者で構成するグループ。



ヒッグス粒子は、それ以上は分割できない「素粒子」と考えるのが世界の主流。複合粒子だった場合、クォークやレプトン、ゲージクなど、現在は素粒子と

「ヒッグス粒子」 英エディンバラ大のピーター・ヒッグス名誉教授らが1964年、理論的に提唱した粒子。あらゆるところにあるが自に見えず、通常は感知することができない。宇宙が始まった大爆発(ビッグバン)の100億分の1秒後に生まれ、海のように空間を満たしたとされる。宇宙誕生直後は素粒子に質量がなく、光速で飛び回っていた。しかし、ヒッグスの海にまどわりつかれて動きにへんげ(質量)が生まれたと考えられている。



発行所 中日新聞社
名古屋市中区三の丸一丁目6番1号
〒460-8511 電話 052(201)8811

すべての人を笑顔にしたい
ShinSei

株式会社 真誠
TEL 0568-23-3311

スマホで便利
中日新聞 プラス
chuplus.jp

中日新聞プラス

検索

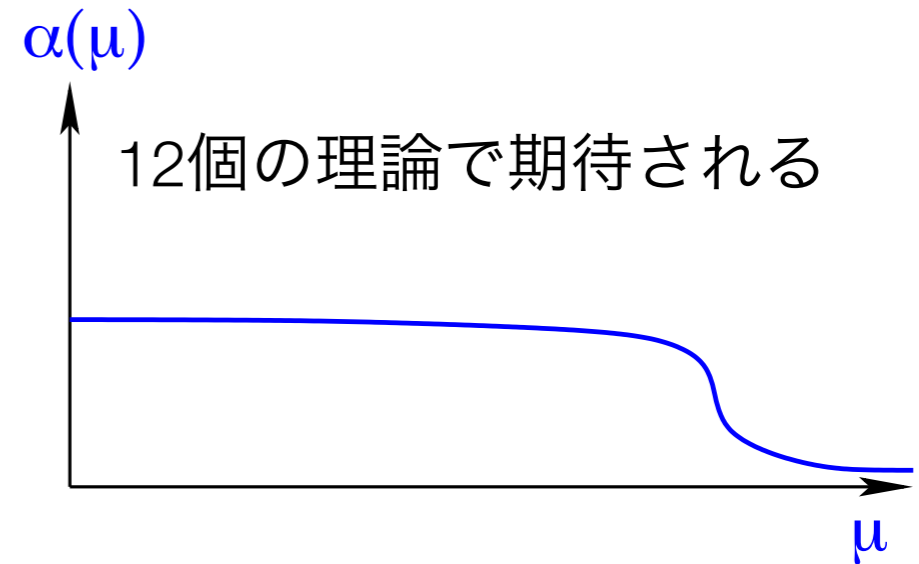
新法則の候補理論(8個の新クォーク)ではどうか

新法則の候補理論(8個の新クォーク)ではどうか

- 12個の理論と8個の理論の類似点

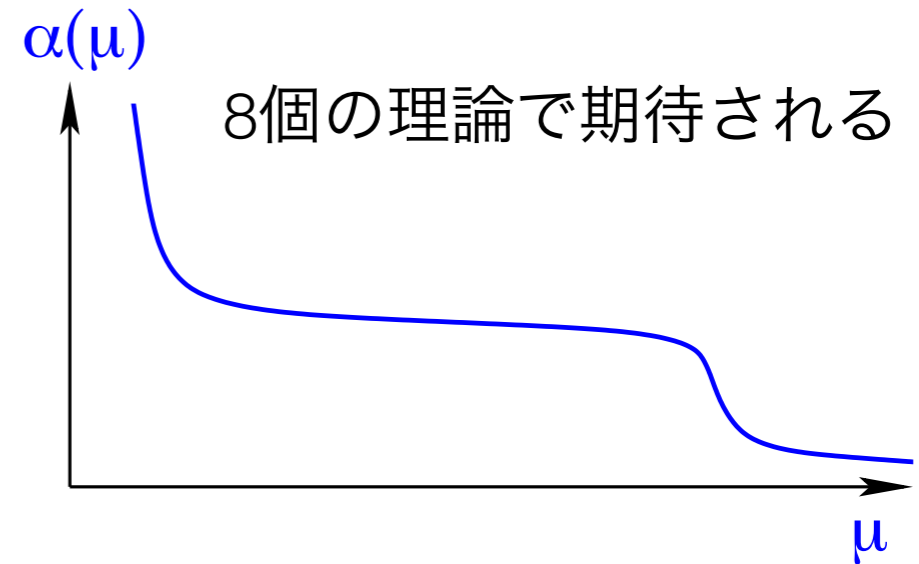
新法則の候補理論(8個の新クオーク)ではどうか

- 12個の理論と8個の理論の類似点



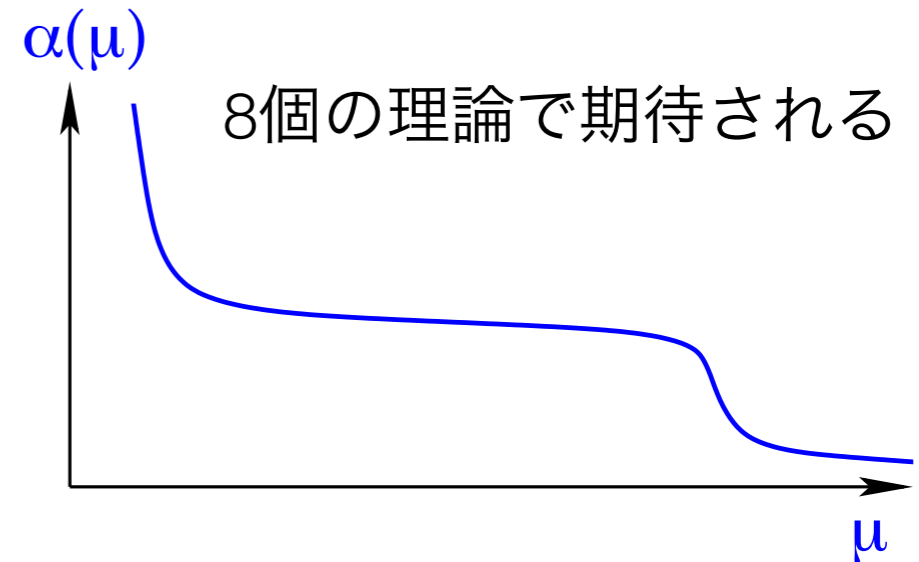
新法則の候補理論(8個の新クオーク)ではどうか

- 12個の理論と8個の理論の類似点



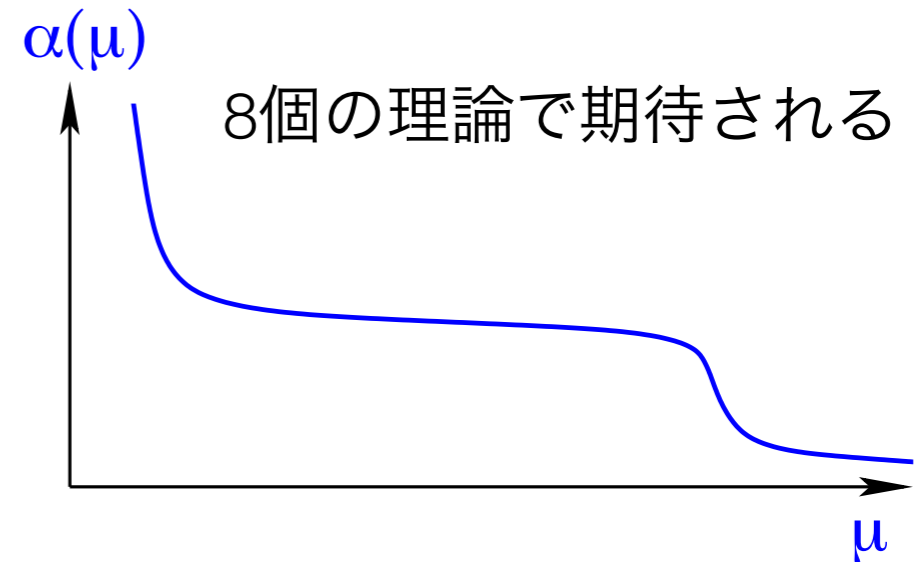
新法則の候補理論(8個の新クォーク)ではどうか

- 12個の理論と8個の理論の類似点
 - ある領域でスケール普遍



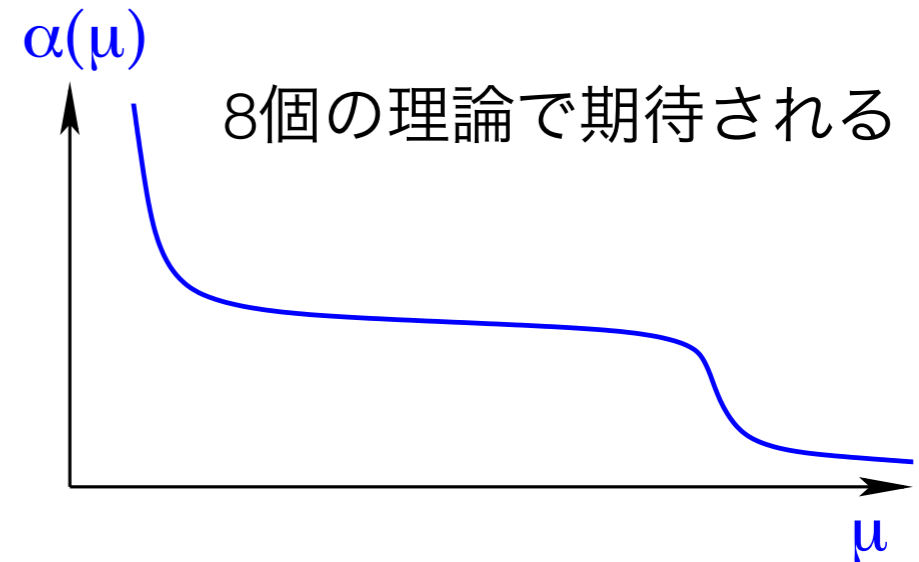
新法則の候補理論(8個の新クォーク)ではどうか

- 12個の理論と8個の理論の類似点
 - ある領域でスケール普遍
 - σ が軽いと予想した根拠



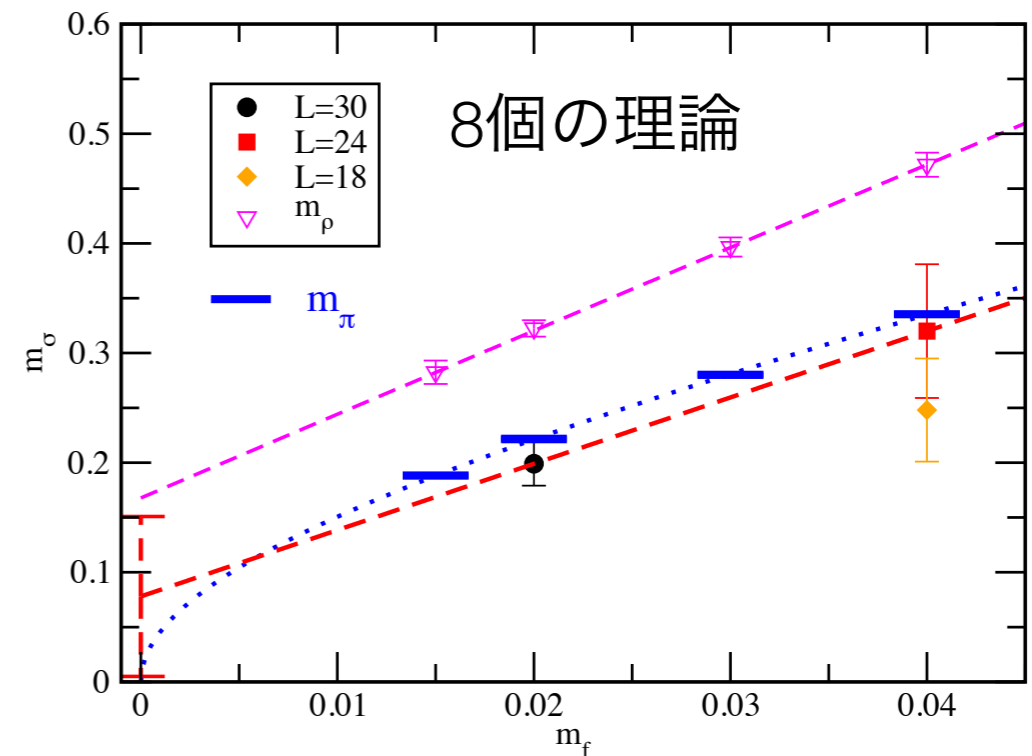
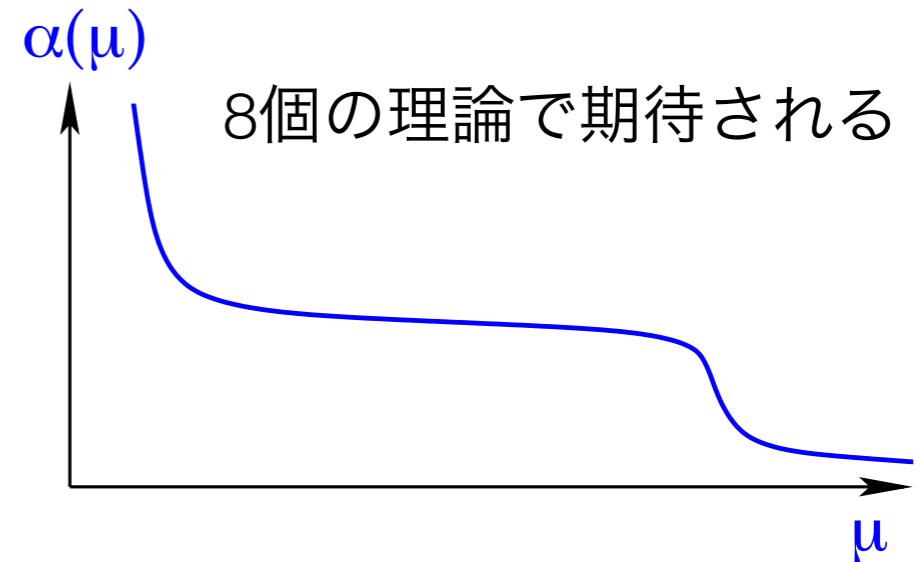
新法則の候補理論(8個の新クォーク)ではどうか

- 12個の理論と8個の理論の類似点
 - ある領域でスケール普遍
 - σ が軽いと予想した根拠
- 8個の理論の計算：途中経過



新法則の候補理論(8個の新クォーク)ではどうか

- 12個の理論と8個の理論の類似点
 - ある領域でスケール普遍
 - σ が軽いと予想した根拠
- 8個の理論の計算：途中経過



LatKMI PoS2013

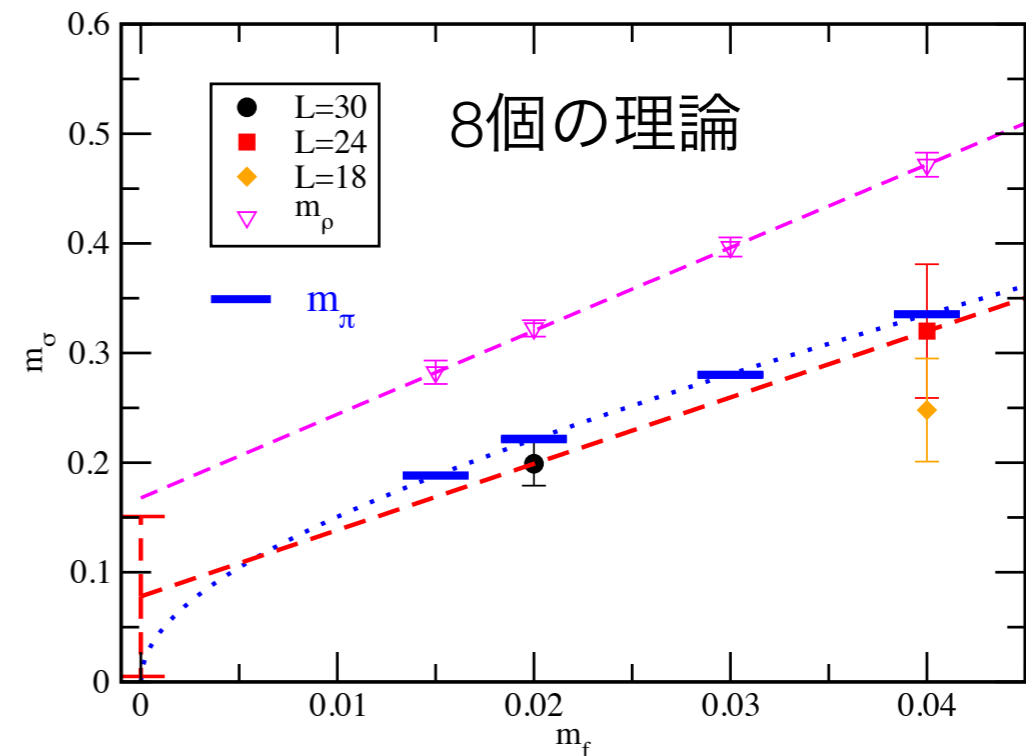
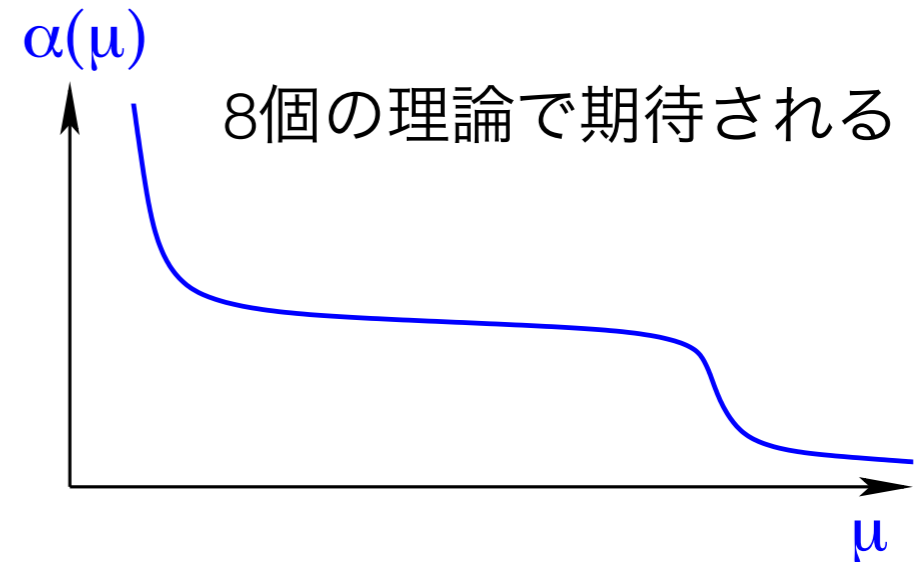
新法則の候補理論(8個の新クォーク)ではどうか

- 12個の理論と8個の理論の類似点

- ある領域でスケール普遍
- σ が軽いと予想した根拠

- 8個の理論の計算：途中経過

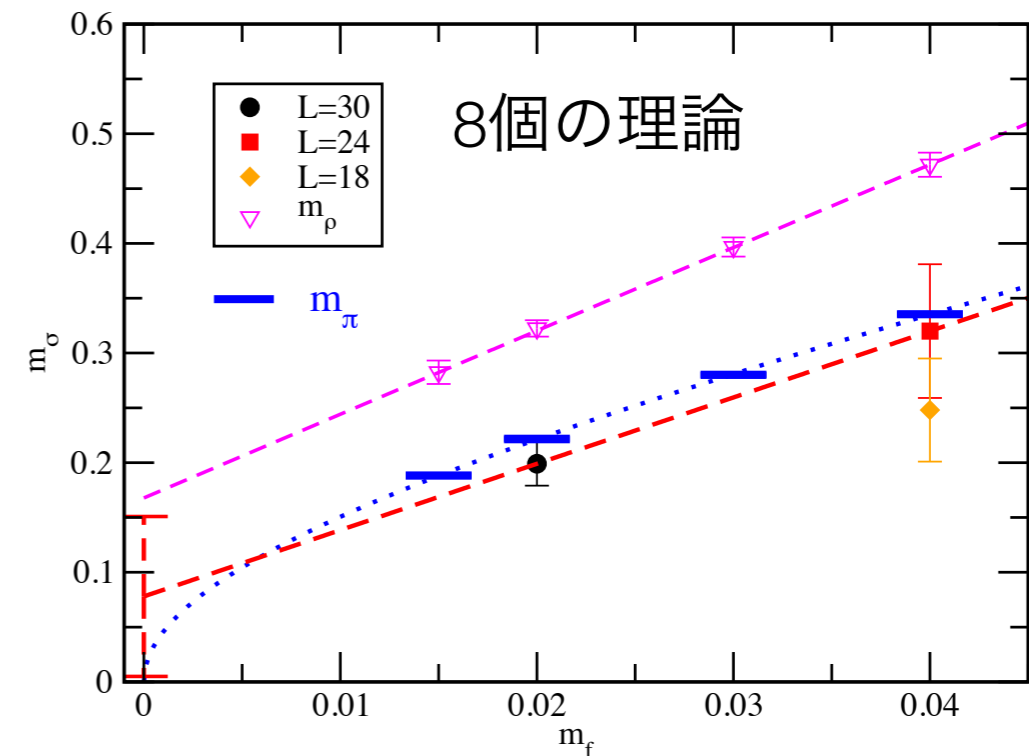
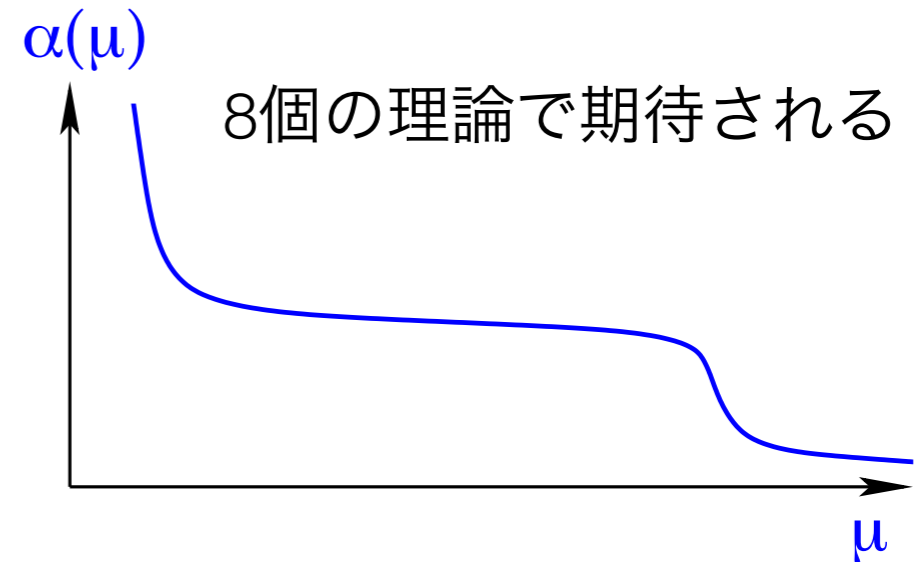
- π と同程度に軽い



LatKMI PoS2013

新法則の候補理論(8個の新クォーク)ではどうか

- 12個の理論と8個の理論の類似点
 - ある領域でスケール普遍
 - σ が軽いと予想した根拠
- 8個の理論の計算：途中経過
 - π と同程度に軽い
 - $m_f \rightarrow 0$ が知りたいもの



LatKMI PoS2013

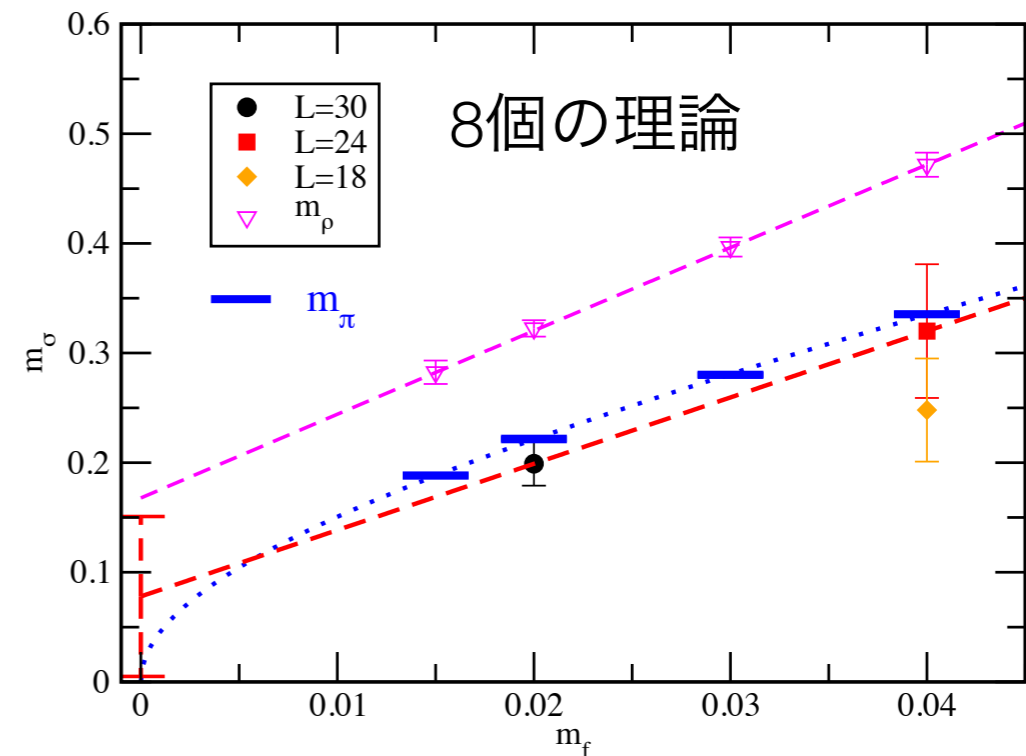
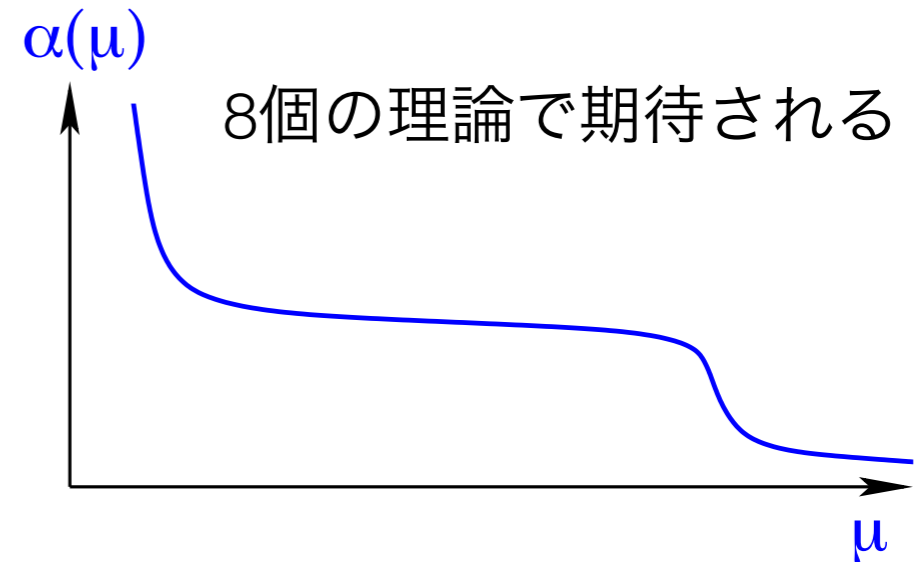
新法則の候補理論(8個の新クォーク)ではどうか

- 12個の理論と8個の理論の類似点

- ある領域でスケール普遍
- σ が軽いと予想した根拠

- 8個の理論の計算：途中経過

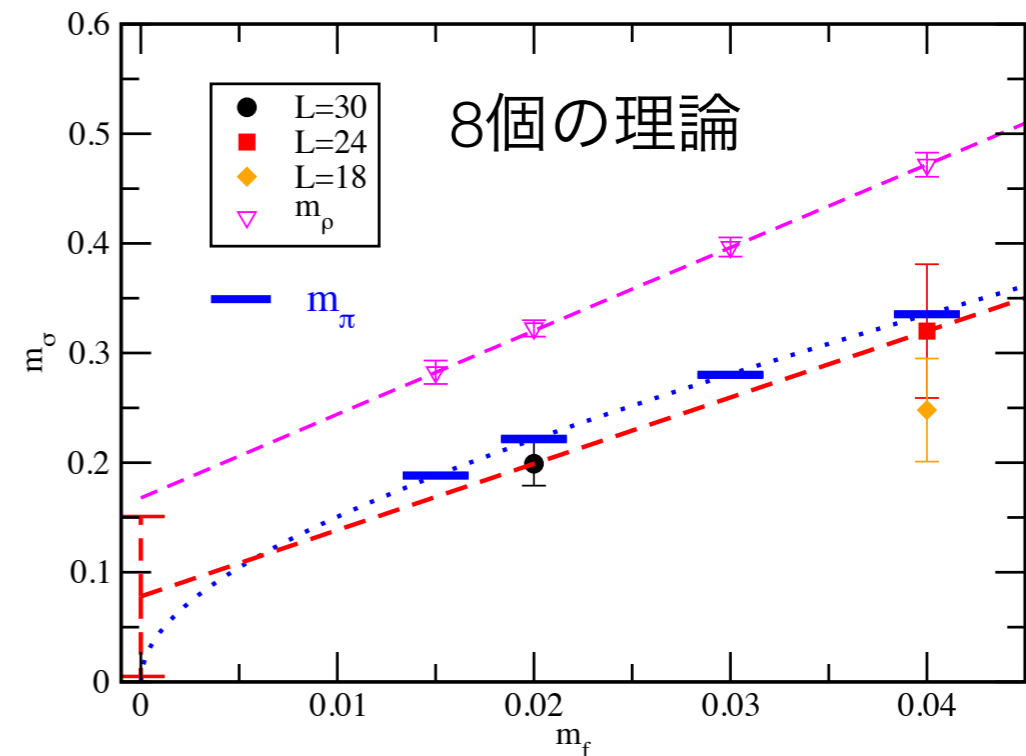
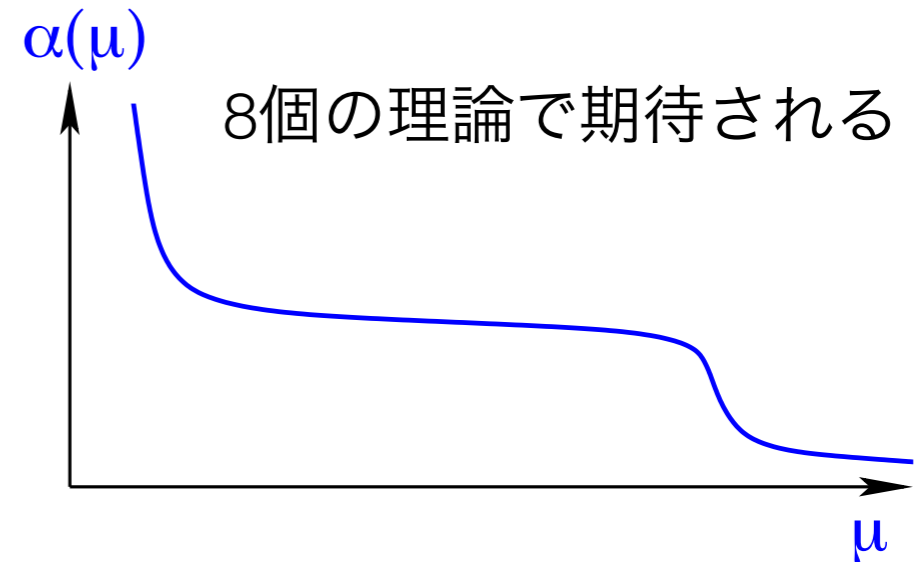
- π と同程度に軽い
- $m_f \rightarrow 0$ が知りたいもの
- $m_\sigma/f_\pi = 4 \pm 4$



LatKMI PoS2013

新法則の候補理論(8個の新クォーク)ではどうか

- 12個の理論と8個の理論の類似点
 - ある領域でスケール普遍
 - σ が軽いと予想した根拠
- 8個の理論の計算：途中経過
 - π と同程度に軽い
 - $m_f \rightarrow 0$ が知りたいもの
 - $m_\sigma/f_\pi = 4 \pm 4$
 - 1ファミリーモデル: $m_\sigma = 0 \sim 500$ GeV

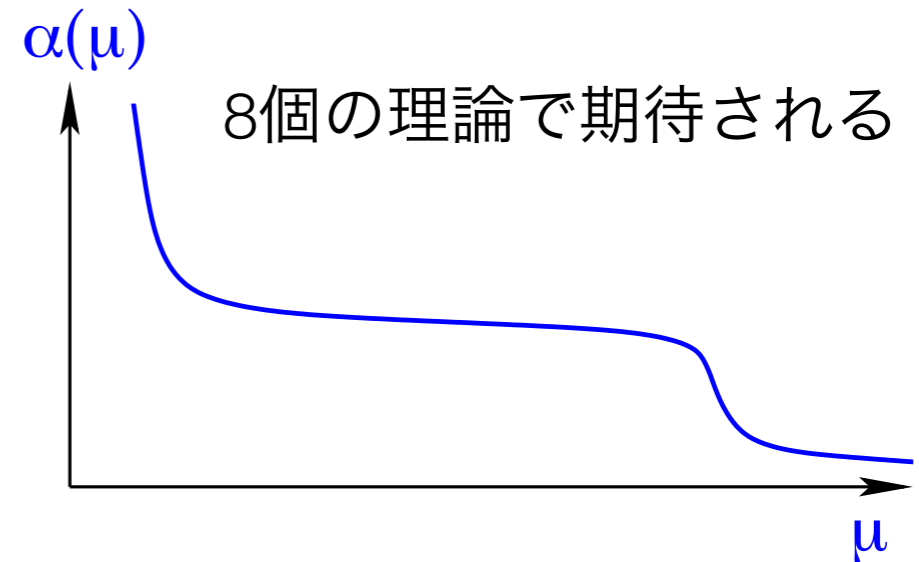


LatKMI PoS2013

新法則の候補理論(8個の新クォーク)ではどうか

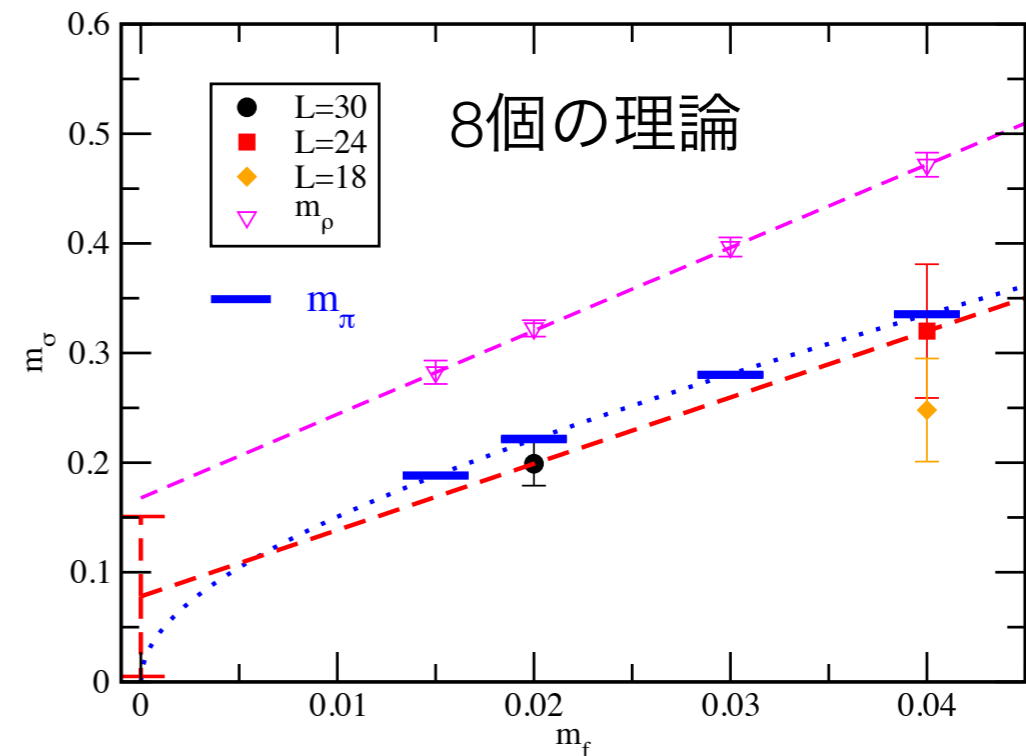
- 12個の理論と8個の理論の類似点

- ある領域でスケール普遍
- σ が軽いと予想した根拠



- 8個の理論の計算：途中経過

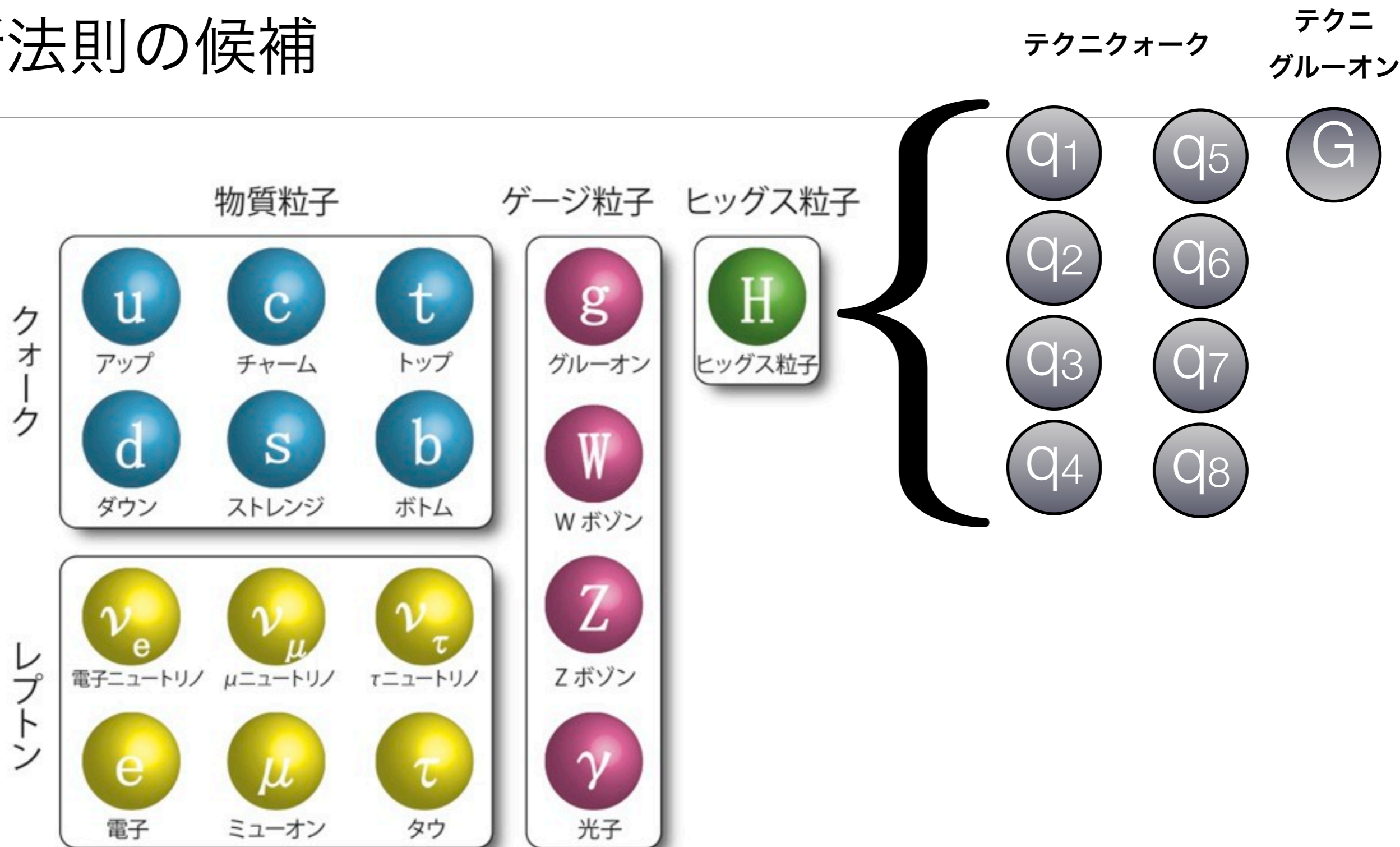
- π と同程度に軽い
- $m_f \rightarrow 0$ が知りたいもの
- $m_\sigma/f_\pi = 4 \pm 4$
- 1ファミリーモデル: $m_\sigma = 0 \sim 500$ GeV
- 誤差が大きい、更なる努力必要！



新法則の候補



新法則の候補



新法則の候補



新法則の候補



- 複合粒子の質量を预言する事が可能

➡ 実験と比較 → 今後の課題

まとめと展望

まとめと展望

- 標準模型を超える新法則候補: 複合ヒッグスモデルの可能性を探っている

まとめと展望

- 標準模型を超える新法則候補: 複合ヒッグスモデルの可能性を探っている
- 具体的候補が一つ見つかった: 8個の新クォークと新グルーオンからなるQCD

まとめと展望

- 標準模型を超える新法則候補: 複合ヒッグスモデルの可能性を探っている
- 具体的候補が一つ見つかった: 8個の新クォークと新グルーオンからなるQCD
- 特にヒッグス質量が説明できるかについての研究を紹介した
 - ヒッグスが軽くなるメカニズムがある事を確認！
 - 誤差がまだ大きく、今後に期待。更なる努力が必要。
他の複合粒子とともに継続して行く。

まとめと展望

- 標準模型を超える新法則候補: 複合ヒッグスモデルの可能性を探っている
- 具体的候補が一つ見つかった: 8個の新クォークと新グルーオンからなるQCD
- 特にヒッグス質量が説明できるかについての研究を紹介した
 - ヒッグスが軽くなるメカニズムがある事を確認！
 - 誤差がまだ大きく、今後に期待。更なる努力が必要。
他の複合粒子とともに継続して行く。
- ヒッグス粒子が実際に見つかった事により、更なる実験の進展の期待

まとめと展望

- 標準模型を超える新法則候補: 複合ヒッグスモデルの可能性を探っている
- 具体的候補が一つ見つかった: 8個の新クォークと新グルーオンからなるQCD
- 特にヒッグス質量が説明できるかについての研究を紹介した
 - ヒッグスが軽くなるメカニズムがある事を確認！
 - 誤差がまだ大きく、今後に期待。更なる努力が必要。
他の複合粒子とともに継続して行く。
- ヒッグス粒子が実際に見つかった事により、更なる実験の進展の期待
- 理論研究もこれからが本番

まとめと展望

まとめと展望

- 複合ヒッグスで説明できる可能性のある問題:
 - 物質優勢宇宙
 - 暗黒物質
 - ...

まとめと展望

- 複合ヒッグスで説明できる可能性のある問題:
 - 物質優勢宇宙
 - 暗黒物質
 - ...
- 面白い問題が数多く残っている

まとめと展望

- 複合ヒッグスで説明できる可能性のある問題:
 - 物質優勢宇宙
 - 暗黒物質
 - ...
- 面白い問題が数多く残っている
- KMI では今後も精力的に新法則の探求を行って行きます

ご清聴ありがとうございました