

文献紹介

Nouman Butt et al.
<https://arxiv.org/abs/2409.02062>

Symmetric Mass Generation with four SU(2) doublet fermions

「SU(2)ゲージ理論での対称性を破らない質量生成」

富谷昭夫 (専任講師)



ジャーナルクラブ(文献紹介)とは?

担当者が最新研究の、もしくは重要論文を読んできて、みんなの前で発表

- <https://akio-tomiya.github.io/twcujournalclub/>
- 隔週の火曜日(5/20, 6/3, 6/17...) の昼休み
- 12:30 - 13:10
- 途中質問OKだが、時間が限られているので加減すること(30分しかない)
 - とはいえ、学生はバンバン質問してほしい
- 紹介する論文は(なるべく)他人の論文。
 - 自分の幅を広げる。他人の知見を得る。
 - スライドでもホワイトボードでも。

もくじ

学生向け



質量? 対称性?

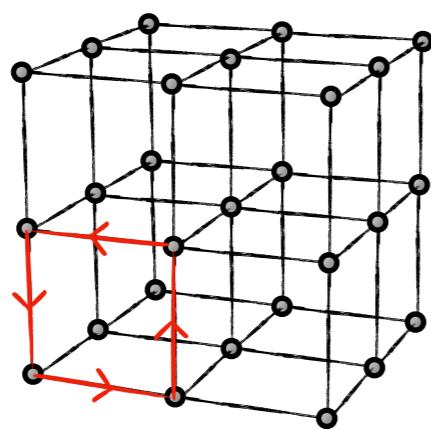
10 pages



対称的質量生成

3 pages

専門家向け



計算手法
まとめ

5 pages

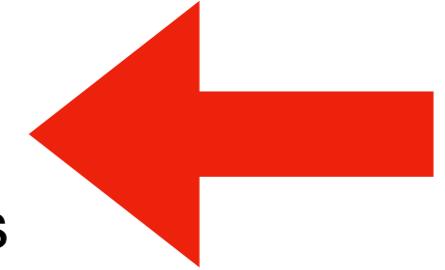
もくじ

学生向け

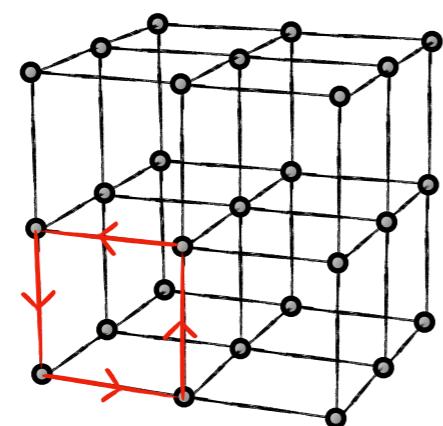


質量? 対称性?

10 pages



専門家向け



対称的質量生成

3 pages

計算手法
まとめ

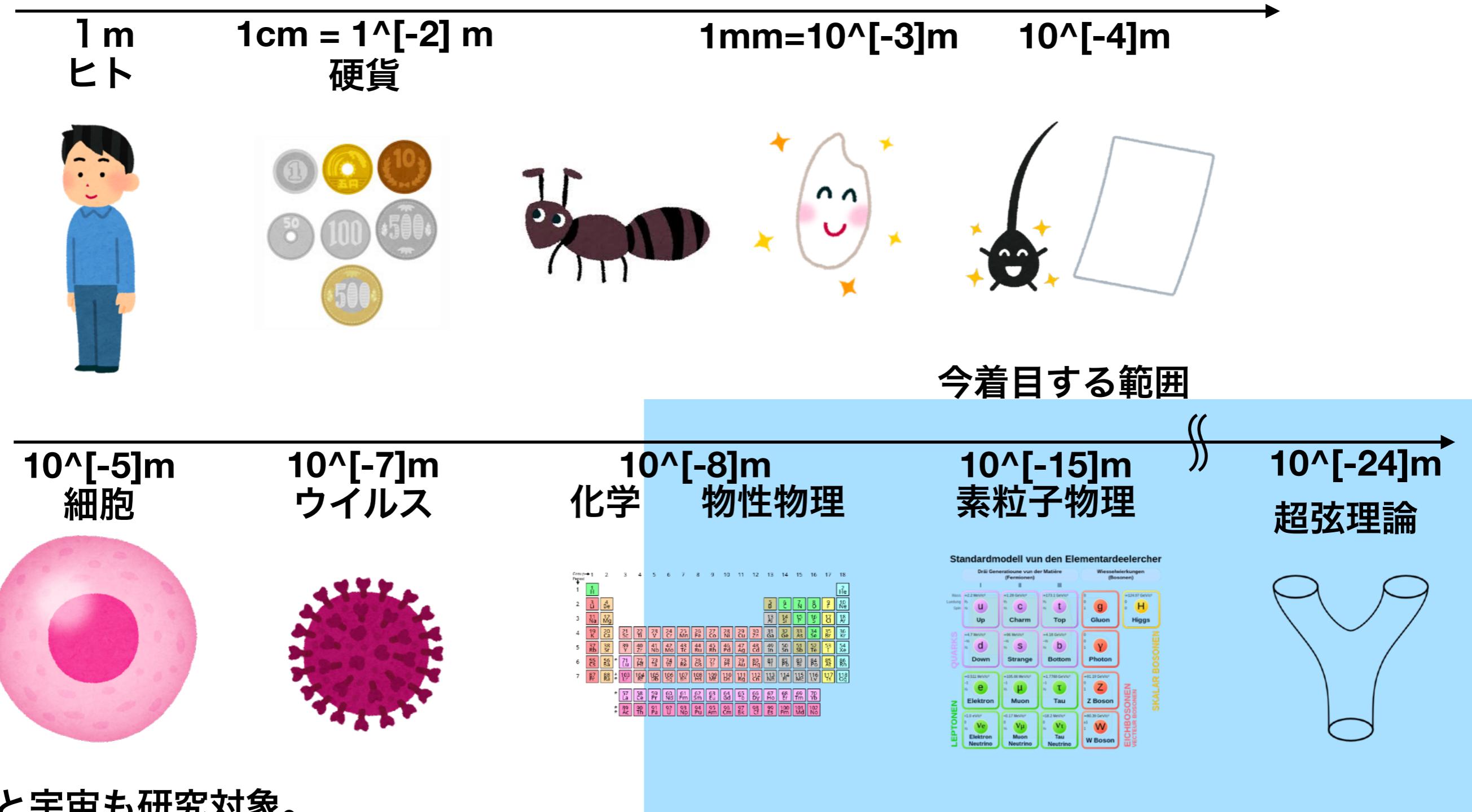
5 pages

理論物理学

物理学の大きさによる分類

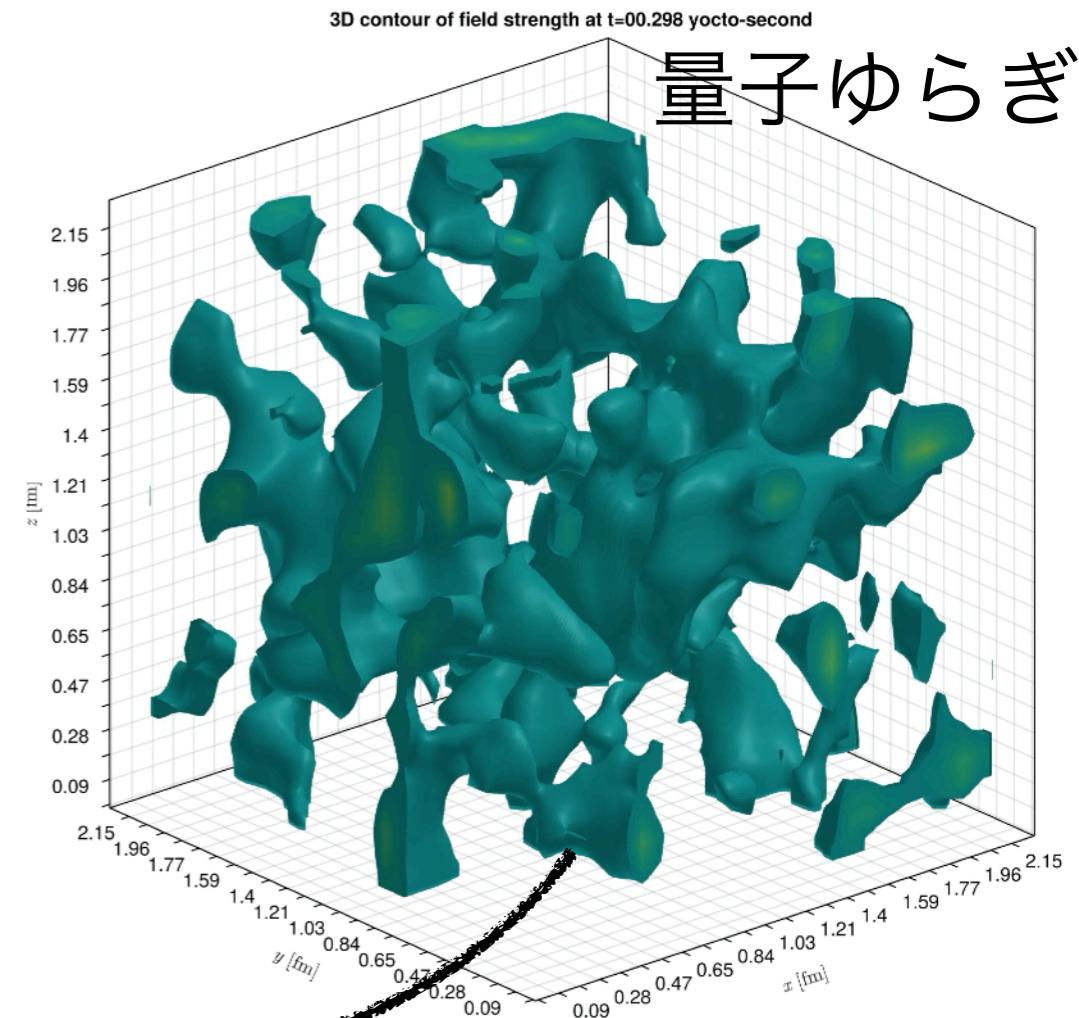
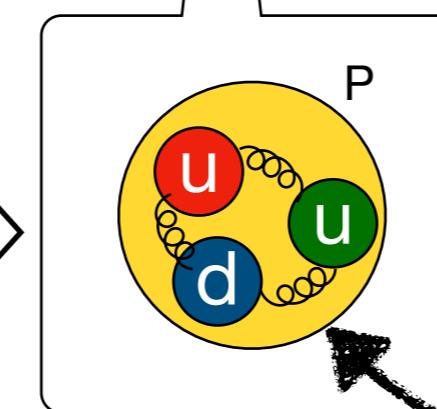
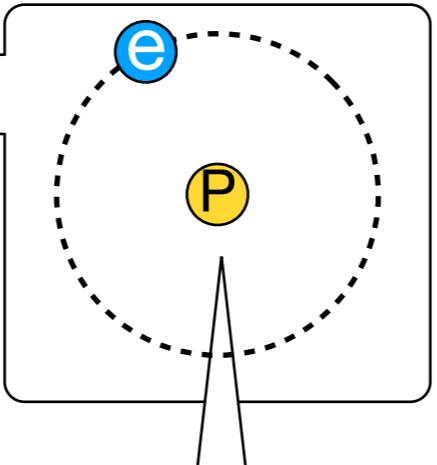
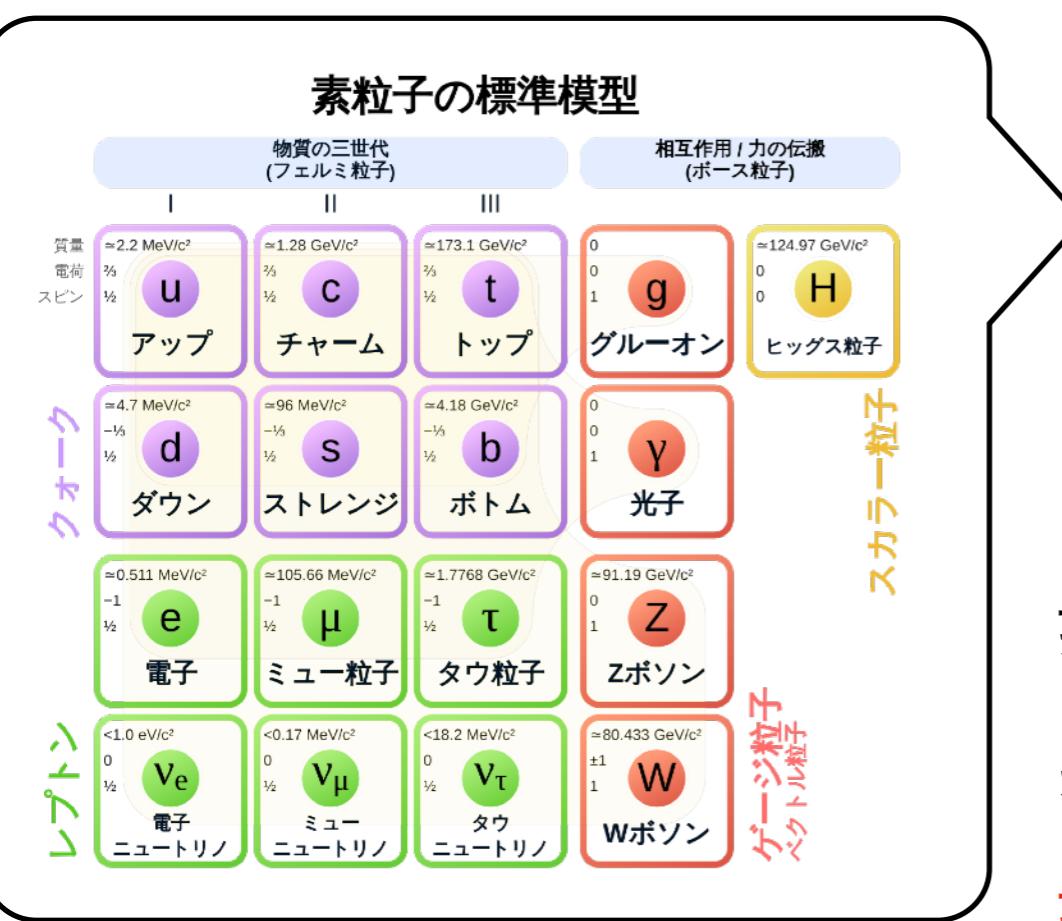
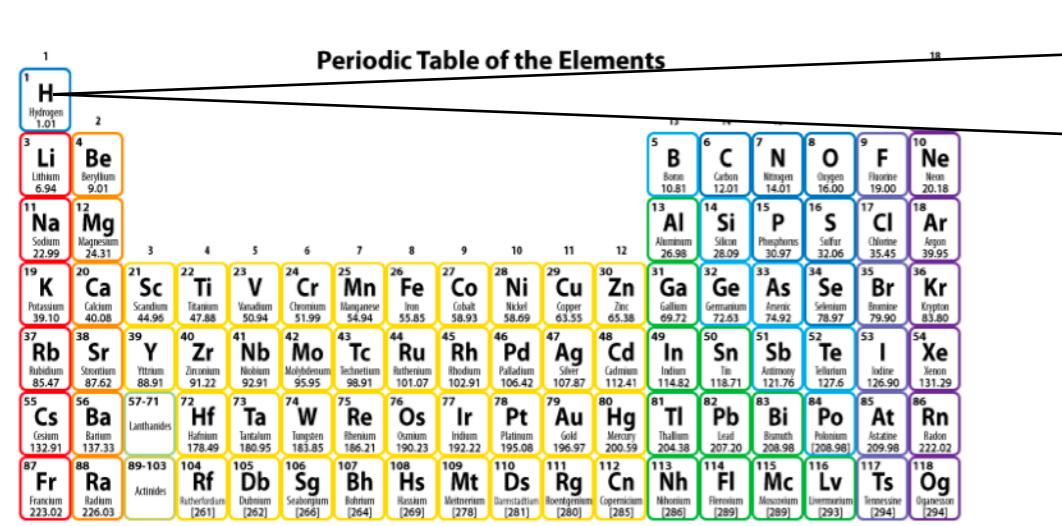
Akio Tomiya

ざっくりとしたスケール



素粒子標準模型とは

根源的な「周期表」と「計算ルール(量子論)」



素粒子レベルの「周期表」17種しかない
身の回りのモノ(人の体、空気、地球、壁)
素粒子17種の組み合わせ！

理論物理学

素粒子における質量 (伝統的な話)

Akio Tomiya

身の回りの質量(例えば体重や地球の重さ) = 素粒子の反応として創発している

素粒子の標準模型



素粒子論によると...
もし、ヒッグス場Hがなければ
←全ての粒子の質量が0になる。

何が悪い? 質量ゼロだと...

- > 電子の質量0
- > 原子の半径は $1/m$ に比例
- > 原子が存在できない。
- > 我々も存在できない。

ヒッグス場の特定の形が原子の安定には必要!

質量とは？

従来: 対称性を破らないと質量は与えられない

ミクロなモノ → 量子論で計算 → 期待値しかわからぬ → 確率が大切

標準模型のラグランジアン L : 素粒子実験の確率分布 (の親玉)

$$\begin{aligned}
 \mathcal{L}_{\text{SM}} = & -\frac{1}{4} \text{tr} G_{\mu\nu} G^{\mu\nu} - \frac{1}{4} \text{tr} W_{\mu\nu} W^{\mu\nu} - \frac{1}{4} B_{\mu\nu} B^{\mu\nu} \\
 & + \bar{Q} i\gamma^\mu D_\mu Q + \bar{L} i\gamma^\mu D_\mu L \\
 & + \bar{u}_R i\gamma^\mu D_\mu u_R + \bar{d}_R i\gamma^\mu D_\mu d_R + \bar{e}_R i\gamma^\mu D_\mu e_R \\
 & + (D^\mu \Phi)^\dagger (D_\mu \Phi) - \lambda \left(\Phi^\dagger \Phi - \frac{1}{2} v^2 \right)^2 \\
 & + \left\{ Y_u \bar{Q} \tilde{\Phi} u_R + Y_d \bar{Q} \Phi d_R + Y_e \bar{L} \Phi e_R + \text{H. c.} \right\}
 \end{aligned}$$

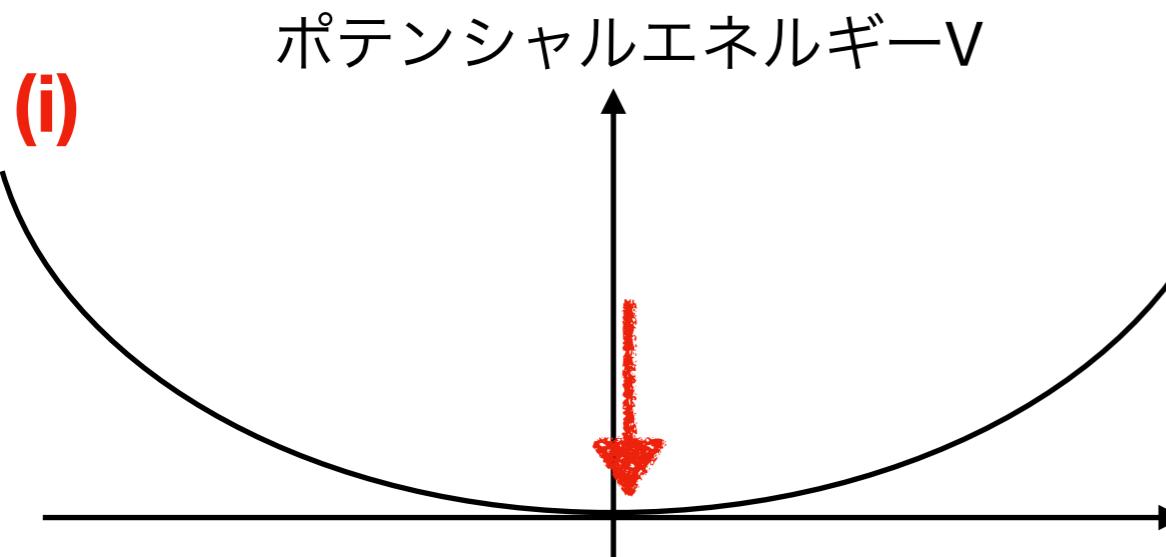
さっきの $H = \text{ヒッグス場 } \Phi \text{ の } 4 \text{ 次関数}$

簡単な模型で見てみる

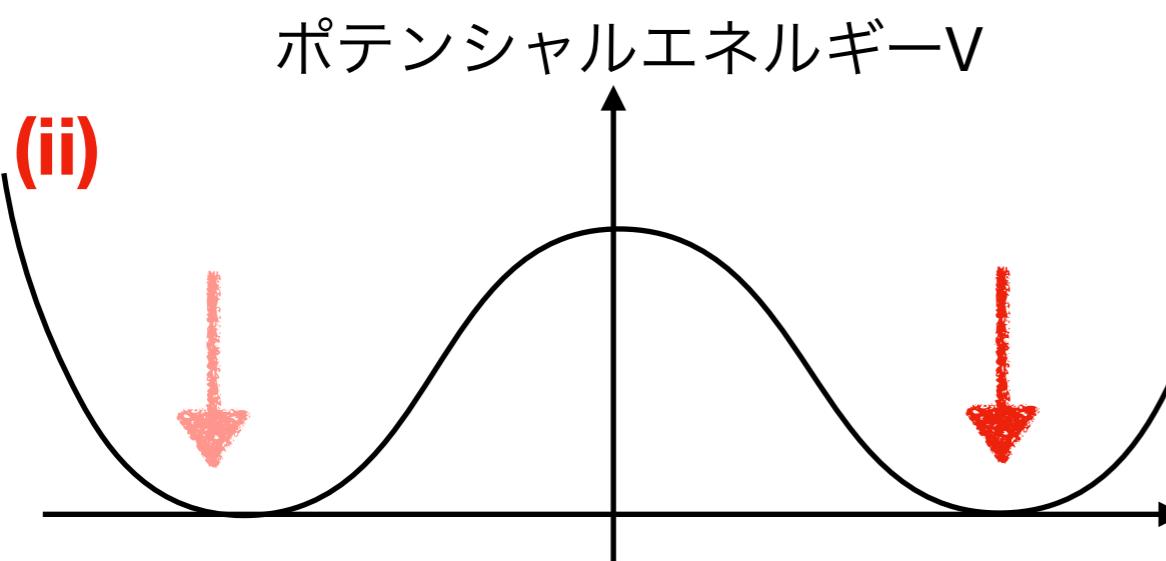
質量とは？

Akio Tomiya

重要な仮定: V が最小となる x を1つ選んで、その周りを考える



(i) $V = 0$ となる x は $x=0$ 。これが基底状態。左右対称のまま

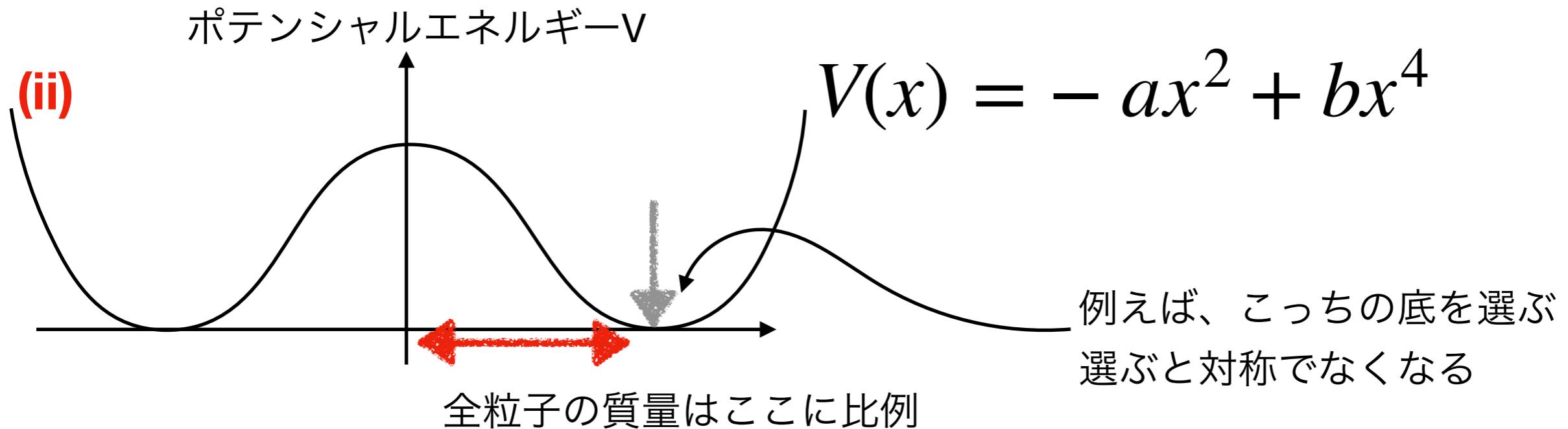


(ii) $V = 0$ となる x は $x \neq 0$ 。これが基底状態。1つ選ぶと左右対称ではない！

宇宙は(何らかの理由で)、(i)から(ii)に変化したと考えられている。

質量とは？

重要な仮定: V が最小となる x を1つ選んで、その周りを考える



このように質量を与える機構を「自発的対称性のやぶれ」という。

知られていた質量生成機構はこれ。

4次の係数は結合定数と呼ばれる。典型的にbが大きいと質量生成等。

1961年(南部さんとヨナラシニオさん)以来のパラダイムだった...

質量とは?

Akio Tomiya

対称性、期待値、量子異常、自発的対称性の破れ

Q. 対称性とは? A. 変換で不变なこと。

$$f_1(x) = x$$

$x \rightarrow -x$ で変わる(対称でない)

$$f_2(x) = x^2$$

$x \rightarrow -x$ で変わらない(対称である)

量子論的期待値

$$\langle O \rangle = \int D\phi e^{-S[\phi]} O[\phi]$$

ラグランジアン L から作れる作用

対称性の2つのレベル。対称性変換の下で...

古典論的対称性: S や L が不变なこと

量子論的対称性: 量子論的期待値も不变なこと

S は対称なのに量子論のレベルで壊れる対称性を「量子異常」という

もくじ

学生向け



質量? 対称性?

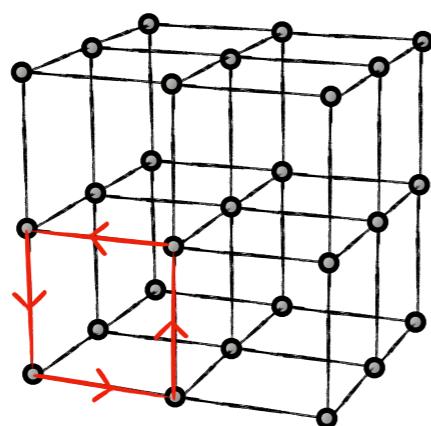
10 pages



対称的質量生成

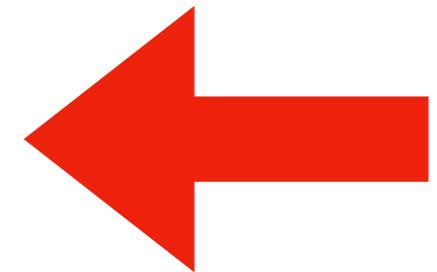
3 pages

専門家向け



計算手法
まとめ

5 pages



対称的質量生成

対称性の縛りが強すぎると保ったまま質量を得る

量子論的期待値

$$\langle O \rangle = \int D\phi e^{-S[\phi]} O[\phi]$$

ラグランジアン L から作れる作用

対称性の2つのレベル。対称性変換の下で…

古典論的対称性: S や L が不变なこと

量子論的対称性: 量子論的期待値も不变なこと

L も量子論的期待値でも対称性があるとする。

そして、結合定数(e.g. 4次の係数)をどんどん大きくする。

対称性の縛りが強いが、質量も生成されそうになる。実際、そうなる。

このような「対称性を保ったまま質量を得る」例が見つかった。

= 「対称性を破らない質量生成」 (Symmetric mass generation)

対称的質量生成

対称性の縛りが強すぎると保ったまま質量を得る

Akio Tomiya

Juven Wang, Yi-Zhuang You Symmetry 2022, 14, 1475

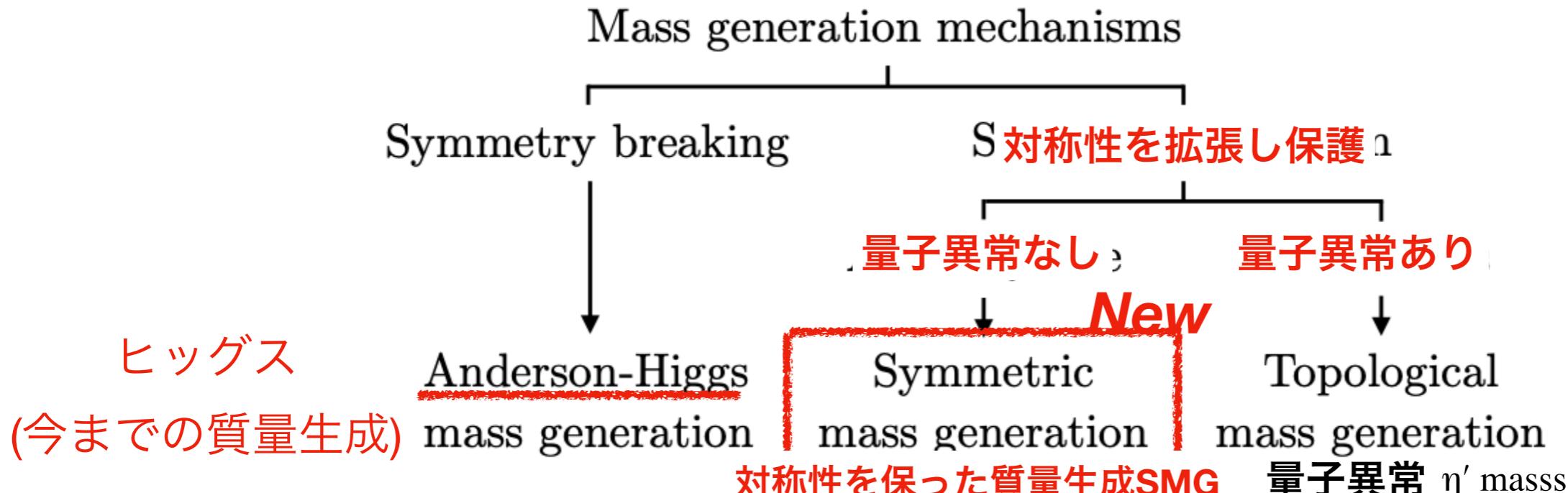


FIG. 4. Classification of mass generation mechanisms.

All gapped but

	明示的な質量	対称性守る?	量子異常なし	鍵
Bilinear mass	Yes	No	-	Gapped/Broken
SSB/Higgs mechanism	No	No	-	(wolud-be-) NG boson
SMG	No	Yes	Yes	Featureless 痕跡なし

最近(2017～)提唱された概念、具体例は次ページ

対称的質量生成

先行研究: 2d での(人工的な)例は知られていた

Akio Tomiya

See ref in
arXiv: 2204.14271

1次元(空間1つ+時間0)のおもちゃ模型。

8種の中性フェルミ粒子(マヨラナ) = Fidkowski-Kitaev 模型

parity・時間反転対称な系 (質量項作れない)

このときには、対称性を壊さずに質量生成

$$H_{\text{FK}} = - \sum_{a < b < c < d} V_{abcd} \chi_a \chi_b \chi_c \chi_d$$

ハミルトニアン固有値がgapped

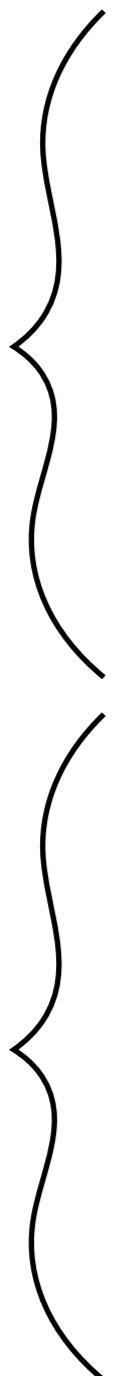
実は、昔から2次元(空間1つ+時間1つ)のおもちゃ模型では
対称性を破らない相転移機構(コスタリツ・サウレス)
1+1 だと 3-4-5-0 模型もある。

4次元時空(時間1+空間3), ゲージ系では知られてなかった。

強結合は手計算が難しいので数値計算！

もくじ

学生向け



質量? 対称性?

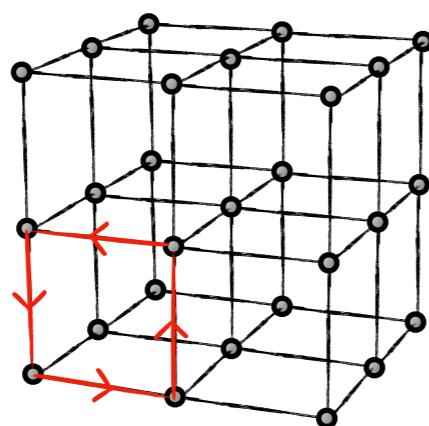
10 pages



対称的質量生成

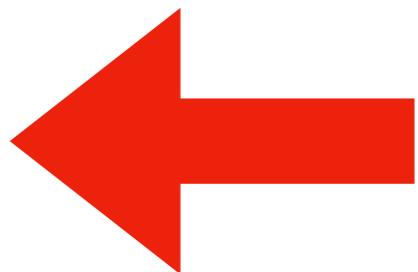
3 pages

専門家向け



計算手法
まとめ

5 pages

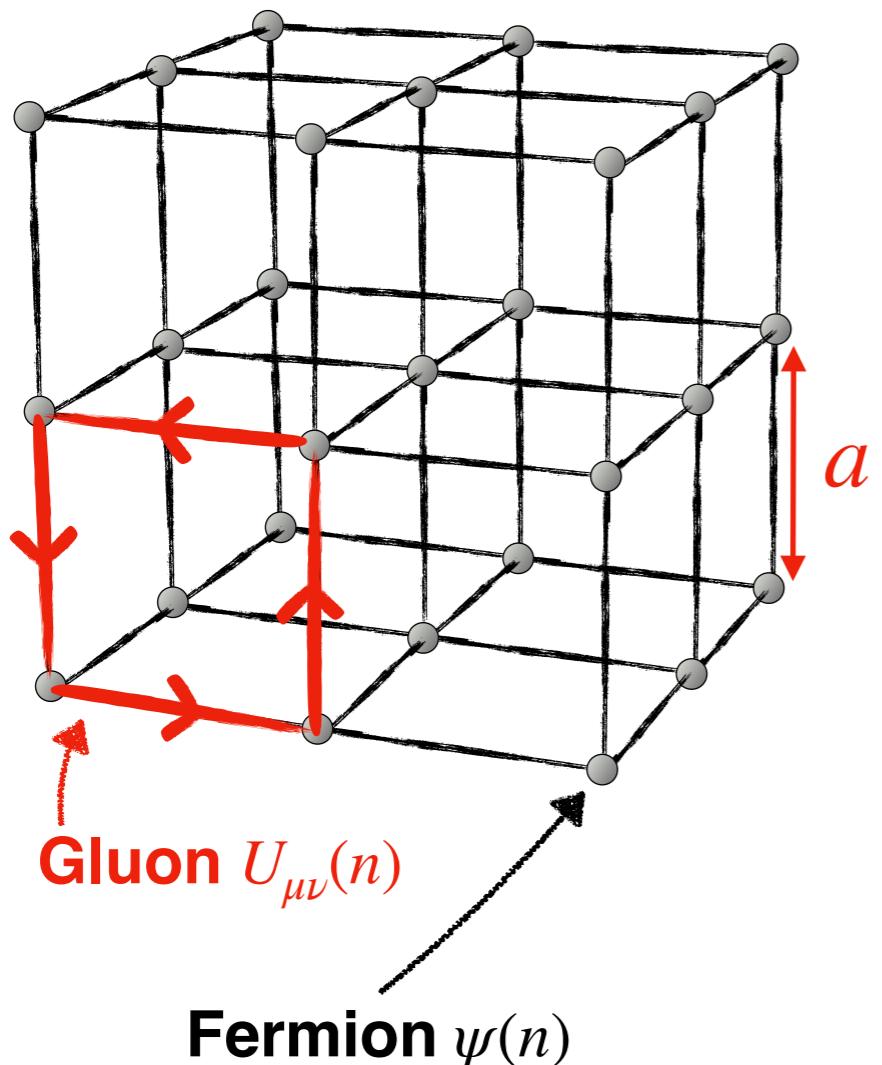


計算手法まとめ

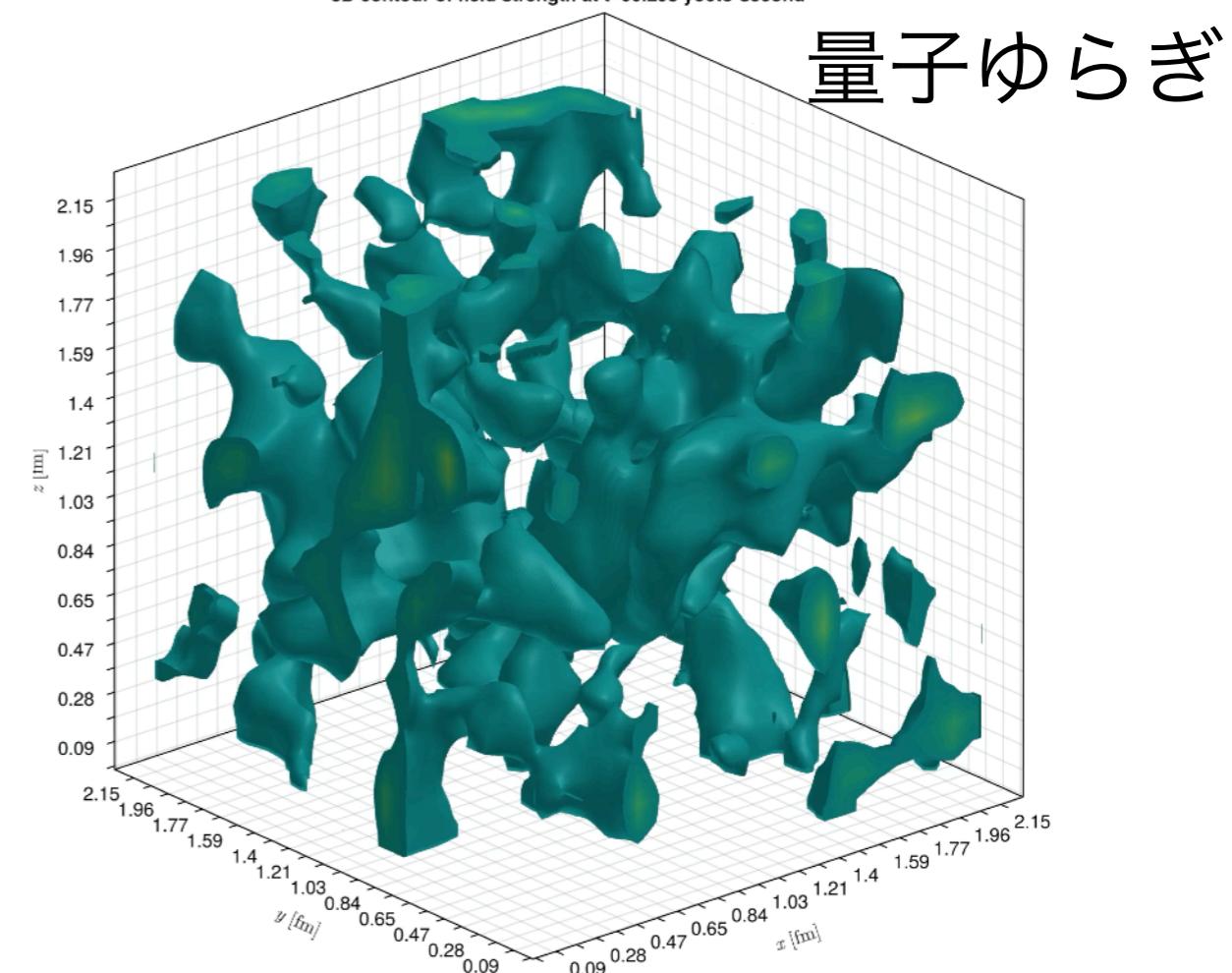
離散化した時空だと数値計算できる

Akio Tomiya

4 dimensional lattice



3D contour of field strength at t=0.298 yocto-second



あり得る場の配位をすべて平均する

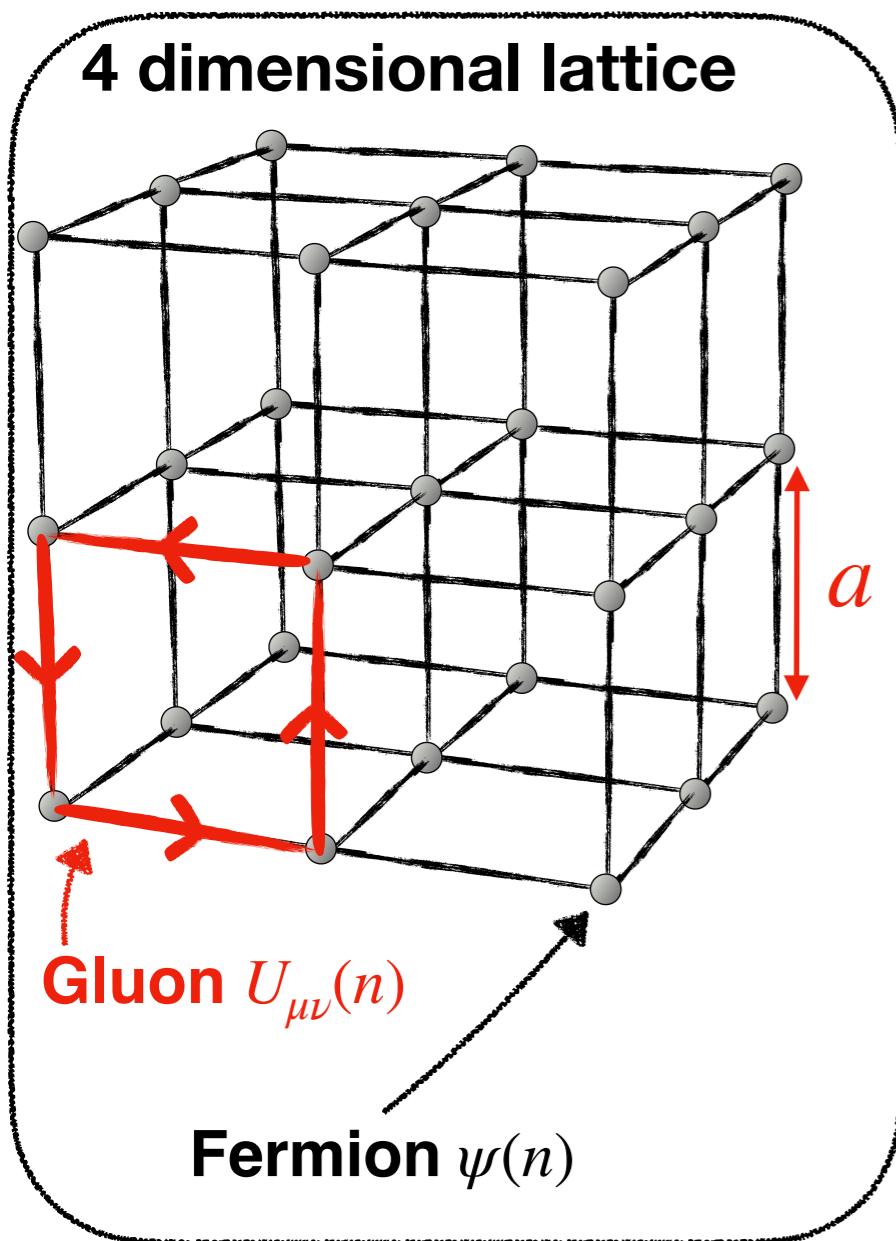
-> 量子論的な厳密な期待値

計算手法まとめ

Akio Tomiya

Lattice gauge theory = YM on a discretized spacetime

$$\langle O \rangle \equiv \frac{1}{Z} \int DU e^{-S[U]} O[U] \quad DU \equiv \prod_{n \in \text{lat}} \prod_{\mu=1}^4 dU_{\mu}(n) \quad \text{Haar measure for SU(3)}$$



As same as the definition of differentiation,
a lattice spacing a [fm] is needed to define the theory

Lattice action

$$S[U, \psi, \bar{\psi}] = a^4 \sum_n \left[-g^{-2} \text{Re} \operatorname{tr} U_{\mu\nu} + \bar{\psi} (\not{D} + m) \psi \right]$$
$$U_{\mu\nu} \sim e^{ia^2 g F_{\mu\nu}}$$

Continuum action

$$a \rightarrow 0 \quad S = \int d^4x \left[+\frac{1}{2} \operatorname{tr} F_{\mu\nu} F_{\mu\nu} + \bar{\psi} (\not{\partial} - ig \not{A} + m) \psi \right]$$

Taylor exp.

Independent of the coupling g
Good for strong gauge dynamics

計算手法まとめ

Setup

Akio Tomiya

Nouman Butt et al.
<https://arxiv.org/abs/2409.02062>

Symmetric Mass Generation with four SU(2) doublet fermions

SU(2) improved gauge action (Wilson plaquette + negative adjoint plaquette)

$N_f = 4$ Staggered fermions with HYP smearing, Pauli-Villars improvement (to remove UV artifacts), massless

$V = L^3 \times 2L$, $L = 16, 24, 32, 36$. Anti-periodic BC for all directions
4 dimensional lattice gauge theory

Known: small g (large $\beta = 1/g^2$, weak), conformal

Conformal scaling of mass $\propto 1/L$

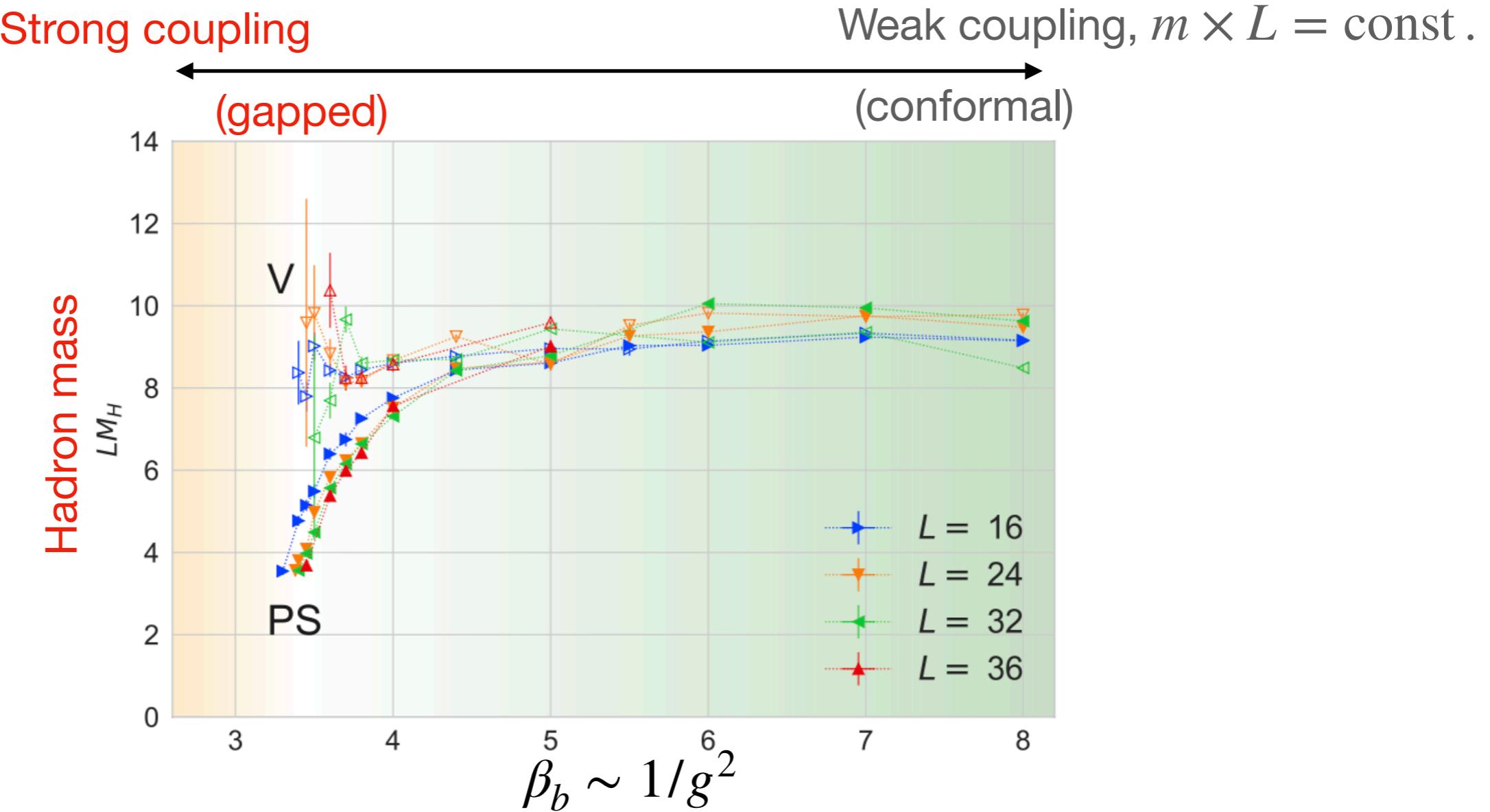
How about strong coupling?

計算手法まとめ

Akio Tomiya

Result

Nouman Butt et al.
<https://arxiv.org/abs/2409.02062>



- Other observables are also consistent with the gapped spectrum in the strong coupling regime.

SMG in 4d has been observed

- 今まで: 質量の起源は「対称性の破れ」
 - 素粒子標準模型の質量も対称性の破れから。
- 2次元時空の模型では「対称性を保った質量生成」があった
- 今回始めて、4次元時空での「対称性を保った質量生成」の例
 - 今回は、SU(2), Nf=4。実はSU(3) Nf=8の例も (arXiv:2412.10322)。
 - 予想として、SU(4) Nf=12、という可能性。

次回

- 6/3、昼休み
- 飯田さん

