

# 時空構造の変革と 標準模型を超える物理 について



Happy 

今年もよろしく お願い申し上げます

信州大学理学部  
川村嘉春  
@大阪大学  
「余剰次元物理」  
2010年1月20日

# 【今日の目標】

時空構造の変革を伴う大統一理論に関する3つの試みの紹介

## 【目次】

1. 導入 (問題意識)
2. 大統一理論 (問題点)
3. 3つの試み
4. 結論 (まとめ, 課題)

# 1. 導入 (問題意識)

# 標準模型の構造は複雑！

(例) クォーク・レプトンの量子数

	$SU(3)_C$	$SU(2)_L(T_L^3)$	$U(1)_Y$	$Q(=T_L^3 + Y)$	
$q_L = \begin{pmatrix} u_L \\ d_L \end{pmatrix}$	3	2	$\begin{pmatrix} 1/2 \\ -1/2 \end{pmatrix}$	$1/6$	$\begin{pmatrix} 2/3 \\ -1/3 \end{pmatrix}$
$(u_R)^c$	$\bar{3}$	1	0	$-2/3$	$-2/3$
$(d_R)^c$	$\bar{3}$	1	0	$1/3$	$1/3$
$l_L = \begin{pmatrix} \nu_{eL} \\ e_L \end{pmatrix}$	1	2	$\begin{pmatrix} 1/2 \\ -1/2 \end{pmatrix}$	$-1/2$	$\begin{pmatrix} 0 \\ -1 \end{pmatrix}$
$(e_R)^c$	1	1	0	1	1
$(\nu_{eR})^c$	1	1	0	0	0

統一的な理解ができるのでは？

電気  
磁気

電磁気力

弱い力

電弱統一  
理論

強い力 量子色力学

大統一  
理論？

標準模型

$$SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$$

【鍵】 物理法則の統一

【課題】 大統一理論の構築

# 2. 大統一理論

## (問題点)

$$SO(10) \supset SU(5) \supset SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$$

【クォーク、レプトン】

$$Y = \sqrt{\frac{5}{3}} T^{24}$$

$$(v_R)^c : (1, 1)_0$$

$$1 = (1, 1)_0$$

$$(d_R)^c : (\bar{3}, 1)_{1/3} \quad l_L : (1, 2)_{-1/2}$$

$$\bar{5} = (\bar{3}, 1)_{1/3} + (1, 2)_{-1/2}$$

$$q_L : (3, 2)_{1/6} \quad (u_R)^c : (\bar{3}, 1)_{-2/3} \quad (e_R)^c : (1, 1)_1 \quad 10 = (3, 2)_{1/6} + (\bar{3}, 1)_{-2/3} + (1, 1)_1$$

$$16 = 1 + \bar{5} + 10$$

世代ごとに統合

【ゲージ粒子】

$$G_\mu^\alpha : (8, 1)_0 \quad W_\mu^a : (1, 3)_0 \quad B_\mu : (1, 1)_0$$

$$24 = (8, 1)_0 + (1, 3)_0 + (1, 1)_0 + (3, 2)_{-5/6} + (\bar{3}, 2)_{5/6}$$

$$X_\mu, Y_\mu$$

【ヒッグス粒子】

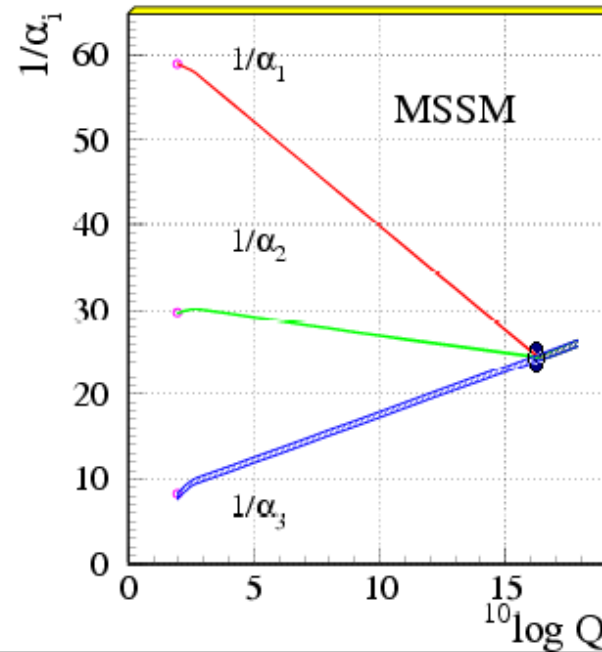
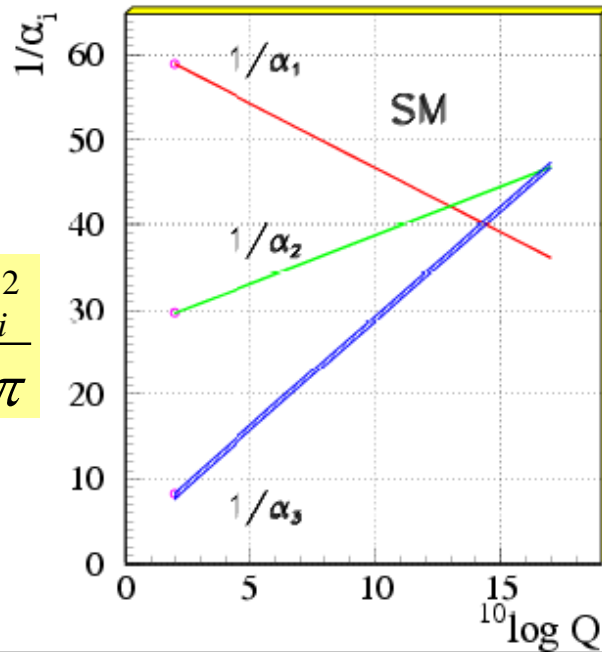
$$h_W : (1, 2)_{1/2} \quad 5 = (1, 2)_{1/2} + (3, 1)_{-1/3}$$

$$h_C$$

カラーを持った  
未知の粒子？

# 大統一理論は単純でエレガント！

$$\alpha_i \equiv \frac{g_i^2}{4\pi}$$



PDGのHPより

# 超対称性(SUSY)とも相性が良い！



# Beyond SUSY SM は超対称性 大統一理論で決まりか？

と言うとそうは問屋が卸さない。

## おもな問題点

☆ 陽子崩壊の問題

☆ 微調整の問題

☆ 世代統合の問題

→三浦君のトーク

# ☆ 陽子崩壊の問題

$$p \left\{ \begin{array}{l} u \\ u \\ d \end{array} \right. \xrightarrow{\text{---} X \text{---}} \left. \begin{array}{l} e^+ \\ \bar{d} \\ d \end{array} \right\} \pi^0 \Rightarrow M_X \geq O(10^{16}) \text{GeV}$$

$$p \left\{ \begin{array}{l} u \\ d \\ u \end{array} \right. \xrightarrow{\text{---} \tilde{d} \text{---}} \left. \begin{array}{l} \bar{\nu}_e \\ \bar{s} \\ u \end{array} \right\} K^+ \Rightarrow M_{h_c} > O(10^{16}) \text{GeV}$$

【ポイント】

$$\tau(p \rightarrow **) \Big|_{\text{th}} \propto \frac{\prod_i [\text{Mass}]_i}{\prod_j [\text{Coupling}]_j} \frac{1}{m_p^5}$$

抑制されるためには

- 質量が大きい。

$$M_X, M_{h_c}, m_{\tilde{d}}, \dots$$

- 相互作用が弱い(禁止されている)。

- 陽子崩壊の抑制から

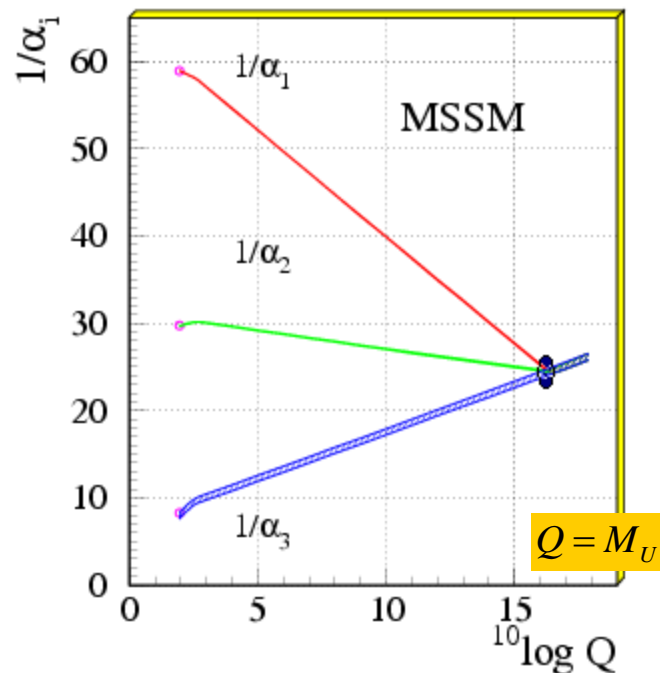
$$M_X = g_U \langle \Sigma \rangle \geq O(10^{16}) \text{ GeV}$$

$$M_{hc} > O(10^{16}) \text{ GeV}$$

- 大統一スケール  
= 破れのスケール

$$M_U \approx \langle \Sigma \rangle$$

- ゲージ結合定数の一致から



$$M_U = 2.1 \times 10^{16} \text{ GeV}$$

微妙？

# ☆ 微調整の問題 (Triplet-doublet splitting)

$$M_{h_C} = 2f_h \langle \Sigma \rangle + \mu_h$$

$$M_{h_W} = -3f_h \langle \Sigma \rangle + \mu_h$$

VS.

$$M_{h_C} > 10^{16} \text{ GeV} \quad \Leftarrow \text{陽子崩壊の抑制}$$

$$M_{h_W} \leq 10^3 \text{ GeV} \quad \Leftarrow \text{電弱対称性の破れ}$$

不自然？

# 模型の変更を試みよう。

## 模型の構成要素

- ゲージ群
- 物質粒子関連
- ヒッグス粒子関連
- 時空構造
- 運動形態
- ???

# Grand Unified Theory(GUT) or Grand Unification(GU)

の問題点を克服するために

- 時空構造の拡張
- 運動形態の変更 に挑戦しよう！

## 3. 3つの試み

☆ Orbifold GUT

☆ Unphysical GU

☆ Misleading GU

# ☆ Orbifold GUT

Y. K., *Prog. Theor. Phys.* **105**,  
(2001) 999 (hep-ph/0012125)

時空 :  $M^4 \times \left( \frac{S^1}{Z_2} \right)$

$$5 = (3, 1)_{-1/3} + (1, 2)_{1/2}$$

$h_C \qquad h_W$

$$h_C(x^\mu, -y) = -h_C(x^\mu, y),$$

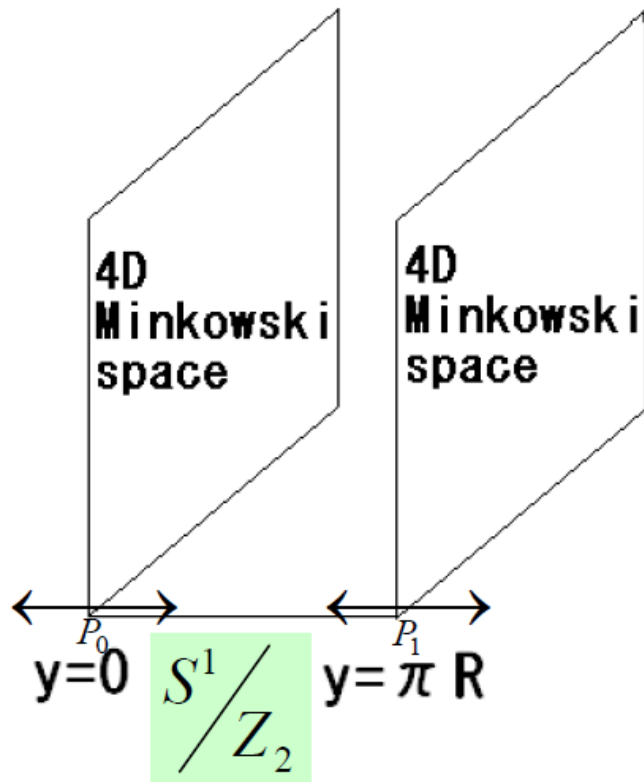
$$h_W(x^\mu, -y) = h_W(x^\mu, y)$$



$$h_C(x^\mu, y) = \sum_n h_{Cn}(x^\mu) \sin(ny/R),$$

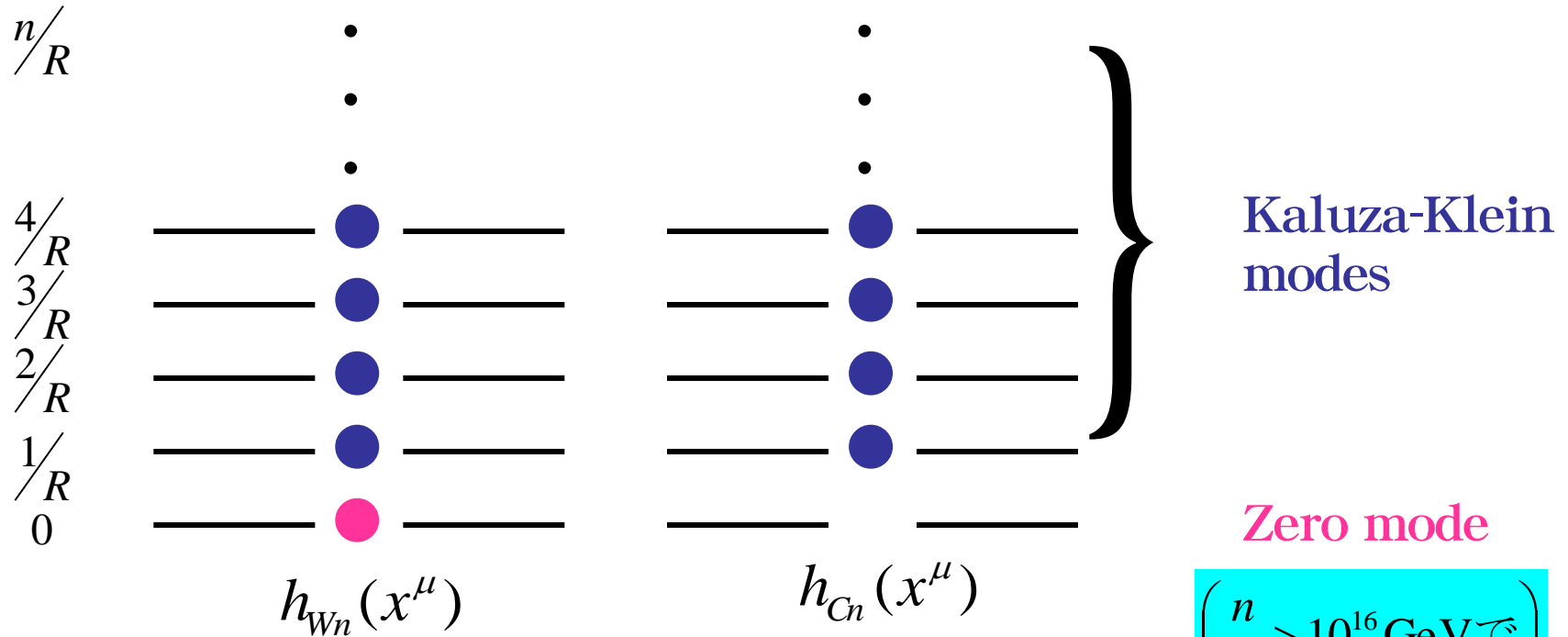
$$h_W(x^\mu, y) = \sum_n h_{Wn}(x^\mu) \cos(ny/R)$$

余剰次元において、多重項  
の中で場の配位が異なる！



$y=0, \pi R$  が固定点

$$h_W(x^\mu, y) = \sum_n h_{Wn}(x^\mu) \cos(ny/R), \quad h_C(x^\mu, y) = \sum_n h_{Cn}(x^\mu) \sin(ny/R)$$



$h_{W0}$  が SM weak Higgs doublet

$X_{\mu n}(x^\mu), Y_{\mu n}(x^\mu)$

$\left( \begin{array}{l} n \\ R > 10^{16} \text{ GeV で} \\ \text{あれば OK!} \end{array} \right)$

$$M_{h_{W0}} = 0, \quad M_{h_{Wn}} = \frac{n}{R}; \quad M_{h_{Cn}} = \frac{n}{R} \quad (n = 1, 2, \dots)$$

不自然ではない。



# ☆ Unphysical GU

Y. K., *Prog. Theor. Phys.* 121 (2009),  
289 (0810.1358, [hep-ph]) ; 121  
(2009), 1049 (0811.4661, [hep-ph])

$X_\mu, Y_\mu, h_C$ たちが陽子崩壊に関与する。

これらの粒子が非物理的であればよいのでは？（←高い局所対称性？）

陽子崩壊過程 + ゴーストの寄与 = 0 ??

$X_\mu, Y_\mu, h_C$ たちは、パンドラの箱に戻ってもらいましょう。

**【復習】** Orbifold GUTにおいて、  
多重項の中で場の配位が異なる。

**【予想】**  $X_\mu, Y_\mu, h_c$ たちは、高い  
対称性により非物理的になる。

**【期待】** 高い対称性の中に大統一の  
対称性が存在し、支配的→ゲージ結  
合定数の統一・一致が起こる。

余剰次元の局所的な領域(我々の4  
次元時空)以外は高いゲージ対称  
性のためにからっぽの世界？！

余剰次元の局所的な領域(我々の4次元時空)以外は高いゲージ対称性のためにからっぽの世界?!

【イメージ】

- 我々の4次元時空  
(超対称性)標準模型

高次元時空  
非物理的な粒子に基づく大統一理論

単なる「我々の4次元世界 +  $\alpha - \alpha$ 」  
で無意味なものではないのか?

## 【イメージ】

$$\int_{B_0} L_{\text{UT}}$$

高次元時空  
“大統一理論”

Topology  
change ?



at  $M_U$

- 我々の4次元時空  
(超対称性)標準模型

$$\int_B L_{\text{UGU}}$$

高次元時空  
非物理的な粒子に基  
づく大統一理論

# 【問題】

と言うより  
イメージに  
近い。

$$\int_B L_{\text{UGU}} = \int_B dL = \int_{\partial B \supset M^4} L$$
$$\Rightarrow \int_{M^4} L_{\text{SM}}$$

**$B$  : 高次元時空 (を求めよ。)**

**$M^4$  : 4次元時空 =  $B$  の境界(の一部)**

**$L_{\text{UGU}}$  : “非物理的大統一理論” のラグ  
ランジアン密度 (を求めよ。)**

**$L_{\text{SM}}$  : 標準模型(or the MSSM)のラグ  
ランジアン密度**

(例)  $(y_1, y_2) \in R^2, y^2 = (y_1)^2 + (y_2)^2$

$$\theta^2 = 0, \bar{\theta}^2 = 0, \int d\theta = 0, \int d\bar{\theta} = 0, \int d\theta d\bar{\theta} \bar{\theta} \theta = -1$$

$$\begin{aligned} L_{\text{UGU}} &= L_{\text{UGU}}(x^\mu, y^2 + \bar{\theta}\theta) \\ &= L_{\text{UGU}}(x^\mu, y^2) + \bar{\theta}\theta \frac{\partial}{\partial y^2} L_{\text{UGU}}(x^\mu, y^2) \end{aligned}$$

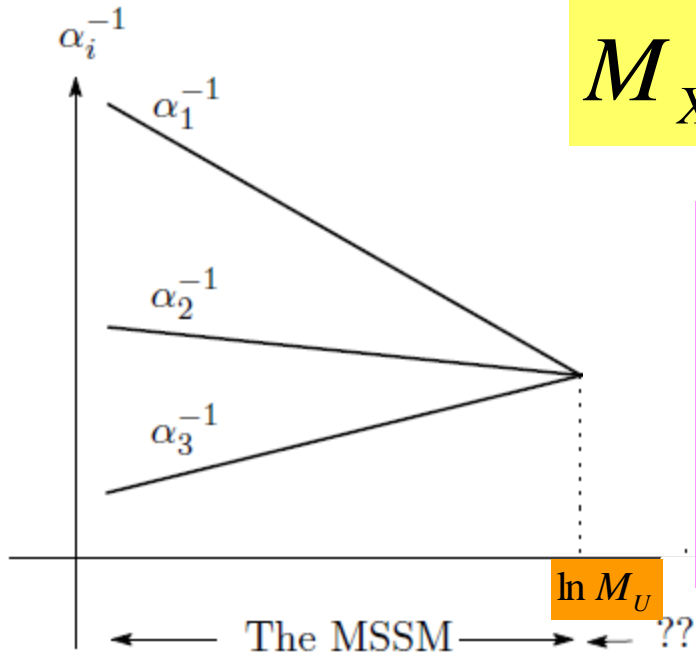
$$\begin{aligned} &\frac{1}{\pi} \int d^4 x \int d^2 y \int d\theta d\bar{\theta} L_{\text{UGU}}(x^\mu, y^2 + \bar{\theta}\theta) \\ &= \frac{-1}{\pi} \int d^4 x \int d^2 y \frac{\partial}{\partial y^2} L_{\text{UGU}}(x^\mu, y^2) = - \int d^4 x \int_0^\infty dy^2 \frac{\partial}{\partial y^2} L_{\text{UGU}}(x^\mu, y^2) \\ &= - \int d^4 x \left[ L_{\text{UGU}}(x^\mu, y^2) \right]_0^\infty = \int d^4 x L_{\text{UGU}}(x^\mu, 0) \stackrel{?}{=} \int d^4 x L_{\text{SM}}(x^\mu) \end{aligned}$$

$$\Phi_{\text{SM}}(x^\mu, 0) \neq 0, \quad \Phi_{\text{extra}}(x^\mu, 0) = 0$$

如何にして？

# ☆ Misleading GU

Y. K., *Prog. Theor. Phys.* 122  
(2009), 831(0906.3773 [hep-ph])



$$M_X \approx M_U = 2.1 \times 10^{16} \text{ GeV} \quad \text{か?}$$

$$\begin{cases} M_X = g_U \langle \Sigma \rangle \geq O(10^{16}) \text{ GeV} \\ M_{hc} = 2 f_h \langle \Sigma \rangle + \mu_h > O(10^{16}) \text{ GeV} \end{cases}$$

← 陽子崩壊の抑制

Fig. 1. Evolution of the three gauge couplings.

$M_X \gg M_U$  ならば、  
陽子崩壊が抑制される !

$M_X \gg M_U$  となるシナリオ

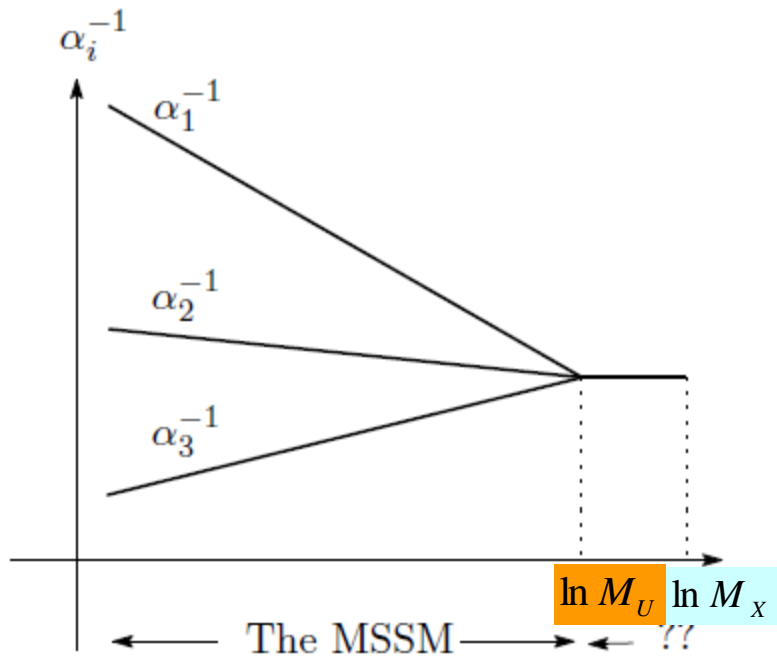


Fig. 1. Evolution of the three gauge couplings.

未知の力学的効果  
により、量子補正  
が一致する？

(例) 量子補正が  
有限の場合

候補：Lifshitz 型理論



# Lifshitz 型理論の例

$$S_L = \int dt d^D x \left( \left( \frac{\partial \phi}{\partial t} \right)^2 - \phi (-\nabla^2)^z \phi \right)$$

$E^2 = (\vec{p}^2)^z$  → 相対論的でない。

$$S_{\text{int}} = \int dt d^D x \sum_{n=1}^N f_n \phi^n$$

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} \leftrightarrow (-\nabla^2)^z \Rightarrow [t] = -z, [\vec{x}] = -1, [\phi] = \frac{D-z}{2}$$

Superficial degree of divergence,  
Power counting に基づいて評価すると、 $z > D$  で有限！

$$S = \int dt d^D x \left( \left( \frac{\partial \phi}{\partial t} \right)^2 - \phi (-\nabla^2)^z \phi \right) + S_{\text{int}}$$

$$- \int dt d^D x \sum_{k=1}^z \zeta_k^{(\phi)} (M_\ell^2)^k \phi (-\nabla^2)^{z-k} \phi$$

自由粒子に対して、 $E^2 = (\vec{p}^2)^z + \sum_{k=1}^z \zeta_k^{(\phi)} (M_\ell^2)^k (\vec{p}^2)^{z-k}$

$\vec{p}^2 \ll M_\ell^2$  のとき、 $E^2 \approx \zeta_{z-1}^{(\phi)} (M_\ell^2)^{z-1} \vec{p}^2 + \zeta_z^{(\phi)} (M_\ell^2)^z$

cf.  $E^2 = \vec{p}^2 c^2 + m^2 c^4$

低エネルギーで、ローレンツ不変性の回復？ 時空構造の転位？？

あらゆる自由な素粒子に関して、

$$E^2 = \vec{p}^2 c^2 + m_\alpha^2 c^4$$

cf.  $\vec{p}^2 \ll M_\ell^2$  のとき、 $E^2 \approx \zeta_{z-1}^{(\phi)} (M_\ell^2)^{z-1} \vec{p}^2 + \zeta_z^{(\phi)} (M_\ell^2)^z$

**なぜ、普遍的？**

① **時空主導 (従来の考え方)**

時空 → 対称性 → 運動形態を規定

② **物体主導 (常軌を逸した考え方)**

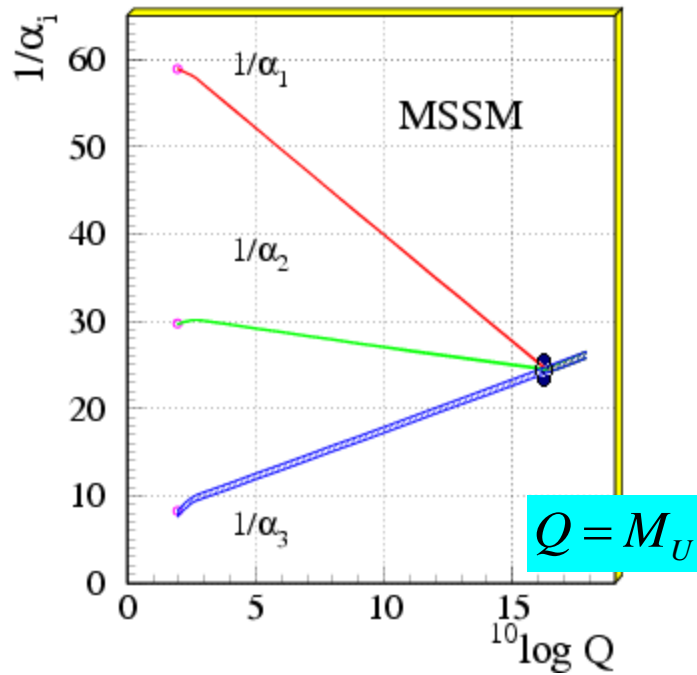
基礎理論 → 物体の運動形態 →

対称性 → 時空

# 4. 結論

(まとめ, 課題)

# 〈まとめ〉

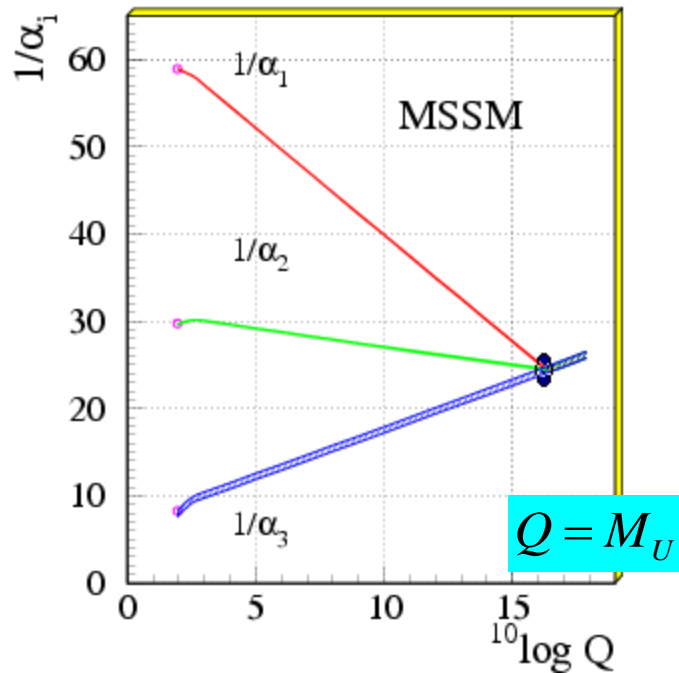


## 陽子崩壊の問題 微調整の問題

$$M_U \text{ VS. } M_X, M_{hc}$$

- 時空構造の拡張
  - 運動形態の変更
- に基づいて挑戦した。

# 陽子崩壊の問題 微調整の問題



$$M_U \text{ VS. } M_X, M_{h_C}$$

## ☆ Orbifold GUT

余剰空間の導入

Orbifold に基づく対称性の破れ

## ☆ Unphysical GU

余剰ゴースト座標？

余計な粒子が非物理的であればよい。

## ☆ Misleading GU

$M^4$  は有効的、後天的？

$M_X \gg M_U$  となるシナリオ

# 〈課題〉

- より現実的なモデルの構築
- 基本的な理論(超弦理論・M or F理論)から導かれるか？
- 理論を検証する手段の探索
- 時空の起源の探究

# 【WC Year の目標】

時空構造の変革を見据えた標準模  
型を超える理論の探究の継続



ご清聴ありがとうございました。