素粒子物理 Overview

信州大学理学部
川村嘉春
@ ILC 夏の合宿 2017
2017年7月21日

限定された Overview

「時間」「能力」という制約
と「重要性」という観点から

標準模型を超える物理

Beyond the SM (BSM)

に関する概観

3つのキーワード

「超対称性」

「力の大統一」

「余剰次元」

自分自身の研究
人生に照らし合
わせた懐古的な
内容を含む。

3つのキーワード

「Sfermion mass」

「Triplet-doublet splitting」

「Orbifold」

ついでに，近年，私の頭の中に芽生えている思い

Beyond the SM

↓

Behind the SM

【話の内容】

1．　最初の衝撃

（超弦理論）

2．　夢の始まり

（超対称性，力の大統一）

3．　新たな挑戦

（余剰次元）

4．　深まる謎

（有効理論，Behind the SM）

１．最初の衝撃
（超弦理論）

１９８５年 大学院（修士課程）入学

衝撃的な論文との出会い

•Vacuum Configurations for Superstrings
P. Candelas (Texas U. & Santa Barbara, KITP), Gary T. Horowitz (UC, Santa Barbara), Andrew Strominger (Princeton, Inst. Advanced Study), Edward Witten (Princeton U.). Mar 1985. 29 pp.
Published in **Nucl.Phys. B258 (1985) 46-74**
NSF-ITP-84-170
DOI: 10.1016/0550-3213(85)90602-9 References | BibTeX | LaTeX(US) | LaTeX(EU) | Harvmac | EndNote
レコードの詳細 - Cited by 2601 records 1000+

Nuclear Physics B258 (1985) 46–74
© North-Holland Publishing Company

VACUUM CONFIGURATIONS FOR SUPERSTRINGS

P. CANDELAS

Center for Theoretical Physics, University of Texas, Austin, Texas 78712
and Institute for Theoretical Physics, Santa Barbara, California 93106, USA

Gary T. HOROWITZ

Physics Department, University of California, Santa Barbara, California 93106, USA

Andrew STROMINGER

The Institute for Advanced Study, Princeton, New Jersey 08540, USA

Edward WITTEN

Joseph Henry Laboratories, Princeton University, Princeton, NJ 08544, USA

Received 2 January 1985

We study candidate vacuum configurations in ten-dimensional O(32) and $E_8 \times E_8$ supergravity and superstring theory that have unbroken $N = 1$ supersymmetry in four dimensions. This condition permits only a few possibilities, all of which have vanishing cosmological constant. In the $E_8 \times E_8$ case, one of these possibilities leads to a model that in four dimensions has an E_6 gauge group with four standard generations of fermions.

背景の紹介

M.B. Green and J.H. Schwarz, “Anomaly cancellations in supersymmetric D=10 gauge theory and superstring theory”, *Phys. Lett* **149B**, (1984), 117 .

Volume 149B, number 1,2,3 PHYSICS LETTERS 13 December 1984

ANOMALY CANCELLATIONS IN SUPERSYMMETRIC D = 10 GAUGE THEORY AND SUPERSTRING THEORY ☆

Michael B. GREEN
Queen Mary College, University of London, London E1 4NS, UK and California Institute of Technology, Pasadena, CA 91125, USA

and

John H. SCHWARZ
California Institute of Technology, Pasadena, CA 91125, USA

Received 10 September 1984

Supersymmetric ten-dimensional Yang–Mills theory coupled to $N = 1$, $D = 10$ supergravity has gauge and gravitational anomalies that can be partially cancelled by the addition of suitable local interactions The remaining pieces of all the anomalies cancel if the gauge group is SO(32) or $E_8 \times E_8$. These cancellations are automatically incorporated in the type I superstring theory based on SO(32). A superstring theory for $E_8 \times E_8$ has not yet been constructed.

➔ 第１次ストリング革命の到来

Supersymmetric ten-dimensional Yang–Mills theory coupled to $N = 1$, $D = 10$ supergravity has gauge and gravitational anomalies that can be partially cancelled by the addition of suitable local interactions The remaining pieces of all the anomalies cancel if the gauge group is SO(32) or $E_8 \times E_8$. These cancellations are automatically incorporated in the type I superstring theory based on SO(32). A superstring theory for $E_8 \times E_8$ has not yet been constructed.

M.B. Green and J.H. Schwarz (1984年9月)

ほどなく, ゲージ群$E_8 \times E_8$に基づく超弦理論が構成された！

VOLUME 54, NUMBER 6 PHYSICAL REVIEW LETTERS 11 FEBRUARY 1985

Heterotic String

David J. Gross, Jeffrey A. Harvey, Emil Martinec, and Ryan Rohm
Joseph Henry Laboratories, Princeton University, Princeton, New Jersey 08544
(Received 21 November 1984)

A new type of superstring theory is constructed as a chiral combination of the closed $D = 26$ bosonic and $D = 10$ fermionic strings. The theory is supersymmetric, Lorentz invariant, and free of tachyons. Consistency requires the gauge group to be $\mathrm{Spin}(32)/Z_2$ or $E_8 \times E_8$.

PACS numbers: 11.30.Pb, 11.30.Ly, 12.10.En

Recent interest in superstring unified field theories has been sparked by the discovery of Green and Schwarz[1] that nonorientable (type I) open and closed superstrings[2] with $N = 1$ supersymmetry are finite and free of anomalies if the gauge group is SO(32). Previously the only consistent anomaly-free[3] superstring

In this Letter we shall outline the construction of a new kind of closed-string theory, whose low-energy limit is $D = 10$, $N = 1$ supergravity coupled to supersymmetric Yang-Mills theory with gauge group $\mathrm{Spin}(32)/Z_2$ or $E_8 \times E_8$. This theory is constructed as a hybrid of the $D = 10$ fermionic string and the $D = 26$

A superstring theory for $E_8 \times E_8$ has not yet been constructed.

M.B. Green and J.H. Schwarz (1984年9月)

ほどなく, ゲージ群$E_8 \times E_8$に基づく超弦理論が構成された！

VOLUME 54, NUMBER 6 PHYSICAL REVIEW LETTERS 11 FEBRUARY 1985

Heterotic String

David J. Gross, Jeffrey A. Harvey, Emil Martinec, and Ryan Rohm
Joseph Henry Laboratories, Princeton University, Princeton, New Jersey 08544
(Received 21 November 1984)

➔ 1984年11月！

A new type of superstring theory is constructed as a chiral combination of the closed $D=26$ bosonic and $D=10$ fermionic strings. The theory is supersymmetric, Lorentz invariant, and free of tachyons. Consistency requires the gauge group to be $\mathrm{Spin}(32)/Z_2$ or $E_8 \times E_8$.

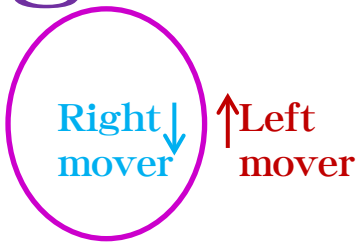
PACS numbers: 11.30.Pb, 11.30.Ly, 12.10.En

Recent interest in superstring unified field theories has been sparked by the discovery of Green and Schwarz[1] that nonorientable (type I) open and closed superstrings[2] with $N=1$ supersymmetry are finite and free of anomalies if the gauge group is SO(32). Previously the only consistent, anomaly-free[3] superstring

In this Letter we shall outline the construction of a new kind of closed-string theory, whose low-energy limit is $D=10$, $N=1$ supergravity coupled to supersymmetric Yang-Mills theory with gauge group $\mathrm{Spin}(32)/Z_2$ *or* $E_8 \times E_8$. This theory is constructed as a hybrid of the $D=10$ fermionic string and the $D=26$

ゲージ群$E_8 \times E_8$に基づく超弦理論
＝ Heterotic string theory

閉弦(Closed string)



Left mover : Bosonic string

$$X_{\mathrm{L}}^{\mu}(\tau+\sigma) \qquad (\mu = 0,1,\cdots,9)$$

$$X_{\mathrm{L}}^{J}(\tau+\sigma) \qquad (J = 10,\cdots,17,18,\cdots,25)$$

$E_8 \times E_8$

$(D = 26)$

Right mover : Superstring

$$\begin{cases} X_{\mathrm{R}}^{\mu}(\tau-\sigma) & (\mu = 0,1,\cdots,9) \\ \psi_{\mathrm{R}}^{\mu}(\tau-\sigma) & \end{cases}$$

$(D = 10)$

ゲージ群$E_8 \times E_8$に基づく超弦理論
＝ Heterotic string theory

↓ 場の理論の極限

「10次元 超重力理論
＋ $E_8 \times E_8$ 超ヤン・ミルズ理論」

↓ N＝1超対称性,
6次元コンパクト化

6次元余剰空間＝カラビ・ヤウ多様体,
E_6大統一理論, 世代数＝オイラー数/2

当時、原論文やレビューをもとにしてストリング理論を勉強していたが，全く流れについていけなかった☹☹

ちなみに，1987年出版

Nuclear Physics B261 (1985) 678-686
© North-Holland Publishing Company

STRINGS ON ORBIFOLDS*

L DIXON[1], J A HARVEY, C VAFA and E WITTEN

Joseph Henry Laboratories, Princeton University, Princeton, NJ 08540, USA

Received 26 June 1985

String propagation on the quotient of a flat torus by a discrete group is considered We obtain an exactly soluble and more or less realistic method of string compactification

The most thoroughly understood example of superstring compactification is compactification on a flat torus [1]. This example is exactly soluble and obeys all of the equations of string theory. It is also clearly a significant example since it is one way to understand the construction of the heterotic string theory [2]. For compactification of physical dimensions from ten to four, the flat torus is not suitable since it leads in many ways to unappealing phenomenology. More realistic compactification schemes involve non-trivial supersymmetric non-linear sigma models, and the realistic ones seem to be rather complicated mathematically. The purpose of this paper is to describe a scheme of compactification of extra physical dimensions which is almost as simple as standard toroidal compactification and far more realistic.

The main phenomenological question involves the realization of spacetime and gauge symmetry breaking. In the string theory a way to achieve symmetry breaking is to twist the boundary conditions in such a way that there is no net charge

ゲージ群$E_8 \times E_8$に基づく超弦理論
＝ Heterotic string theory

↓ N=1超対称性,
6次元コンパクト化

「4次元 Heterotic string models」

6次元 orbifold（軌道体）,
E_6ゲージ対称性など, Twisted
sectorからの粒子の生成など

L. Dixon, J. Harvey, C. Vafa and E. Witten, “Strings and orbifolds”, *Nucl. Phys.* **B261**, 678-686, (1985) , “Strings and orbifolds II”, *Nucl. Phys.* **B274**, 285-314, (1986) .

➔ キーワードの1つ

Orbifold（軌道体）

＝ 多様体/離散群

with 固定点

なぜ, Orbifold か?

T^6を離散群で割らない場合,

N=4超対称性（?）,

非カイラルフェルミオン（?）

➔ キーワードの1つ

Orbifold（軌道体）

＝ 多様体/離散群

with 固定点

なぜ, Orbifold か?

T^6を離散群で割ることにより,

N＝1超対称性に制限,

カイラルフェルミオンの導出

なんだか、おもしろそう。なにか、やれそう。☺☺☺

我々が導いたこと

$E_8 \times E_8$ heterotic string theory

$\Rightarrow$ Classification of various 4-dim. string models

Y. Katsuki, Y.K., T. Kobayashi and N. Ohtsubo, "Z_7 Orbifold Models", *Phys. Lett.* B 212, (1988) 339-342.

⋮

Y. Katsuki, Y.K., T. Kobayashi, N. Ohtsubo, Y. Ono and K. Tanioka, "Z_N Orbifold Models", *Nucl. Phys.* B 341, (1990) 611-640.

なんだか、おもしろそう。なにか、やれそう。☺☺☺

我々が導いたこと

$E_8 \times E_8$ heterotic string theory

$\Rightarrow$ Classification of various 4-dim. string models

多種多様な4次元弦模型

様々なゲージ群,
様々な物質粒子

TABLE 2
Gauge groups in Z_N orbifold models

Number	Gauge group	Z_3	Z_4	Z_6	Z_7	Z_8	Z_{12}
0	E_8	*	*	*	*	*	*
1	$E_7 \times SU_2$		1 (1)	1 (1)		1 (1)	1 (1)
2	$E_7 \times U_1$	1 (1)	1 (1)	2 (1)	3	3 (1)	5 (2)
3	$E_6 \times SU_3$	1 (1)		1 (1)			1 (1)
4	$E_6 \times SU_2 \times U_1$		1 (1)	1	3	3 (1)	4 (1)
5	$E_6 \times U_1^2$			1 (1)	1	2	7 (1)
6	SO_{16}		1 (1)	1 (1)		1 (1)	1 (1)
7	$SO_{14} \times U_1$	1 (1)	1 (1)	2 (1)	3	3 (1)	5 (2)
8	$SO_{12} \times SU_2 \times U_1$		1 (1)	2 (1)		3 (1)	5 (2)
9	$SO_{12} \times U_1^2$			1	3	3 (1)	10 (1)
10	$SO_{10} \times SU_4$		1 (1)			1 (1)	1 (1)
11	$SO_{10} \times SU_3 \times U_1$			1	3	2	3
12	$SO_{10} \times SU_2^2 \times U_1$			1 (1)		1 (1)	2 (1)
13	$SO_{10} \times SU_2 \times U_1^2$			1 (1)	3	4	17 (3)
14	$SO_{10} \times U_1^3$					1 (1)	9
15	$SO_8 \times SU_4 \times U_1$			1 (1)		1 (1)	2 (1)
16	$SO_8 \times SU_3 \times U_1^2$				1 (1)	1 (1)	5
17	$SO_8 \times SU_2^2 \times U_1^2$					1 (1)	4 (1)
18	$SO_8 \times SU_2 \times U_1^3$						5 (1)
19	$SO_8 \times U_1^4$						1 (1)
20	SU_9	1 (1)		1 (1)			1 (1)
21	$SU_8 \times SU_2$		1 (1)			1 (1)	1 (1)
22	$SU_8 \times U_1$		1 (1)	2 (1)	3	4 (1)	6 (2)
23	$SU_7 \times SU_2 \times U_1$			1	3	2	3
24	$SU_7 \times U_1^2$			2 (1)	3	5	19 (1)
25	$SU_6 \times SU_3 \times SU_2$			1 (1)			1 (1)
26	$SU_6 \times SU_3 \times U_1$			1 (1)			4 (2)
27	$SU_6 \times SU_2^2 \times U_1$			1 (1)		2	3 (1)
28	$SU_6 \times SU_2 \times U_1^2$				3	5 (1)	18 (1)
29	$SU_6 \times U_1^3$					1 (1)	16 (1)
30	$SU_5 \times SU_4 \times U_1$			1 (1)	3	2	3 (1)
31	$SU_5 \times SU_3 \times SU_2 \times U_1$				3	2	2

第1次ストリング革命

1984年、グリーンとジョン・シュワルツによって、10次元の超重力理論および超弦理論でアノマリーのない理論が存在することが示されると、超弦理論は脚光を浴びるようになった。特に$E_8 \times E_8$のゲージ場を含むヘテロティック超弦理論において、理論の定義される10次元のうち余分な6次元をカラビ-ヤウ多様体でコンパクト化した理論は、低エネルギーでN=1の超対称性を持つ理論が導かれ、重力を含む統一理論の候補として盛んに研究された。

しかし、余分な6次元がコンパクト化されるメカニズムが不明であること、コンパクト化として可能な多様体の種類が無数にあり、その中から1つを選び出すことが摂動論の範囲では不可能であることなどの困難が存在した。

wikipedia より

多くの研究者が期待していたこと

多種多様な4次元弦模型

➔非摂動効果により，我々の世界を記述する4次元弦模型が選び出されるだろう。

今にして思えば,

多種多様な4次元弦模型

→ストリング・ランドスケープ(?)

↓

マルチバース(?),

エターナル・インフレーション(?)

人間原理,

宇宙定数問題

Universeの場合，

我々の世界が生まれる確率

$$\frac{1}{(4\text{次元})\ \text{弦模型の数}}$$

→非常に小さい?

Multiverseの場合，

我々の世界のような世界の存在数

$$\frac{\text{生まれる宇宙の数}}{(4\text{次元})\ \text{弦模型の数}}$$

→非常に多い！

これくらいの発想はできたかも(?)

２．夢の始まり

（超対称性，大統一理論）

１990年 信州大に拾ってもらう。

第2の衝撃　LEPの成果

・Ｚボソンの崩壊幅の精密測定

➔ ニュートリノは3種類

・ゲージ結合定数の精密測定

➔ ゲージ結合定数の統一

LEPII計画

世界最高エネルギーのe^+e^-衝突装置による素粒子の研究

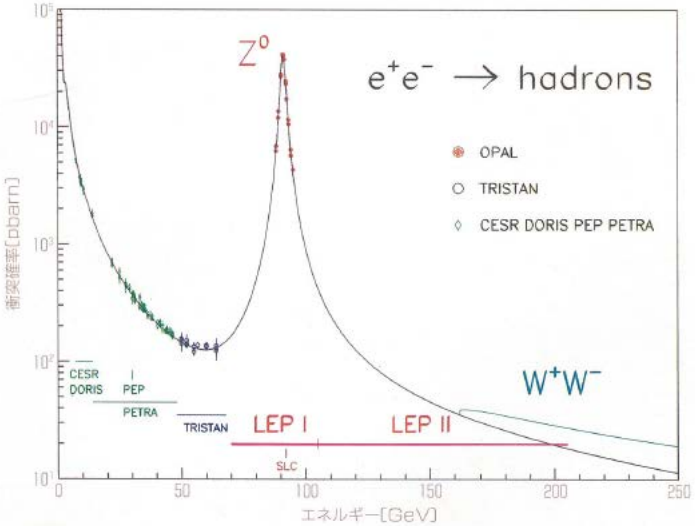
1991年6月

東京大学理学部附属素粒子物理国際センター

LEPII計画

世界最高エネルギーのe^+e^-衝突装置による素粒子の研究

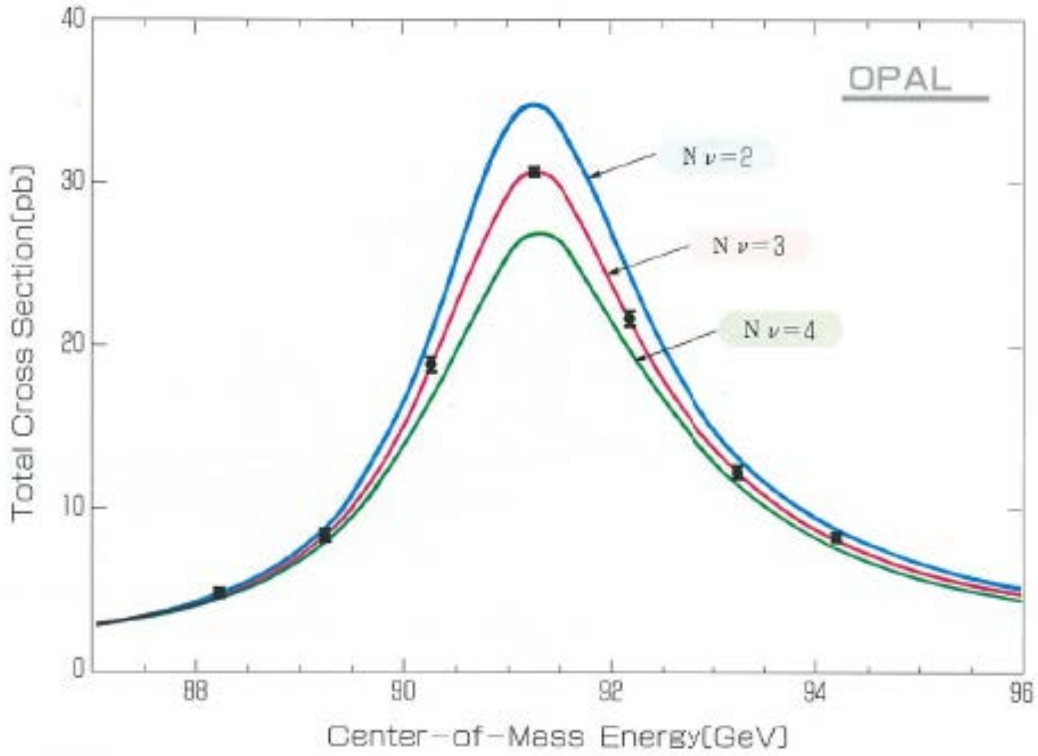
1991年6月



東京大学理学部附属素粒子物理国際センター

・Ｚボソンの崩壊幅の精密測定

■図25　Z⁰粒子の生成断面積

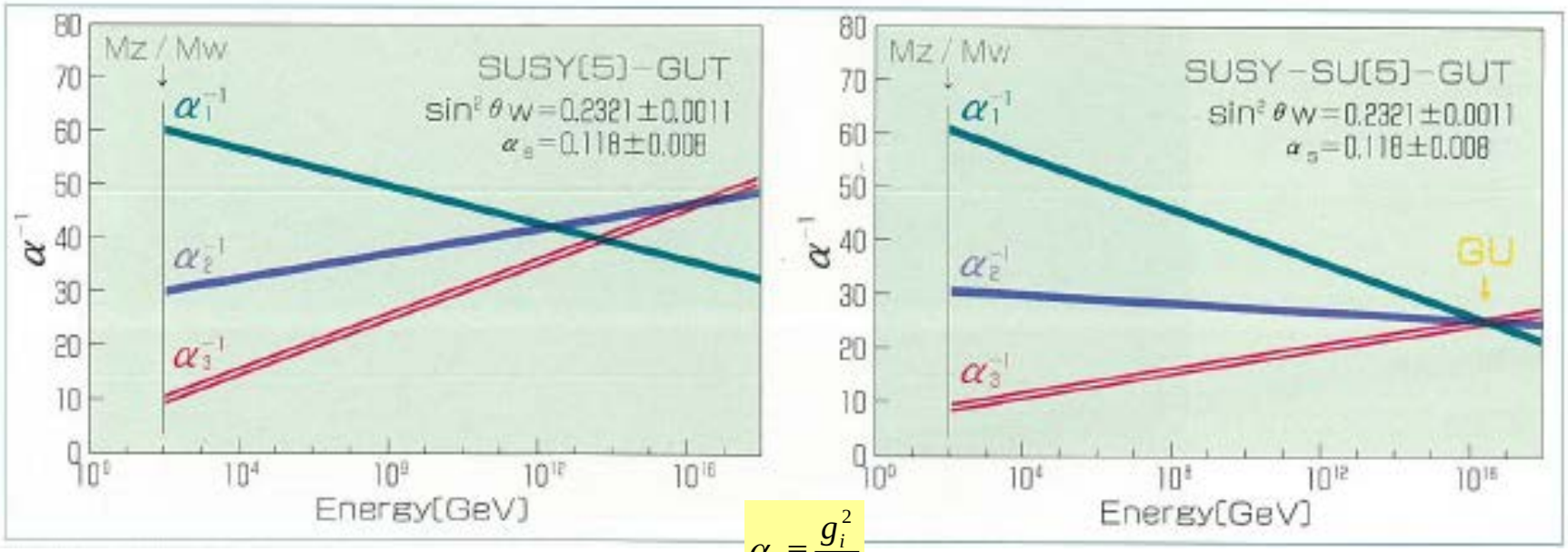


➔ ニュートリノは3種類

➔ 物質粒子の世代数は3

・ゲージ結合定数の精密測定

■図28　大統一理論の予言



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

➔ ゲージ結合定数の統一

【ゲージ結合定数の統一】

複数の興味深いことを示唆する。

☆10^{16}GeVあたりで3つのゲージ相互作用が統一される。

$$SU(3)\times SU(2)\times U(1)\subset G_{\mathrm{U}}$$

➔ 力の大統一

☆10^{3}GeVあたりにスーパーパートナーが存在する。 ➔ 超対称性

☆10^{3}GeVあたりから10^{16}GeVあたりまで大砂漠の可能性がある。

➔13桁も上の物理を知るチャンス!

10^3GeVあたりからの物理として，
超対称性標準模型が有望！

10^{16}GeVあたりの物理として，
超対称性大統一理論が有望！

N. Sakai, “Naturalness in Supersymmetric GUTS”, *Z. Phys.* C**11**, 153-157（1981）.
S. Dimopoulos & H. Georgi, “Softly broken Supersymmety and SU(5)”, *Nucl. Phys.* B**193**, 150-162（1981）.

超対称性により，ゲージ階層性の問題の一部（量子補正の下での安定性の問題）が解消される。

【2次発散の問題】

$C_h \Lambda^2 >> m_h^2$ ならば，微調整が必要で不自然？

$$\delta m_h^2 = \boxed{C_h \Lambda^2} + C_h' m_h^2 \ln \Lambda^2 / m_h^2$$

$$+ \boxed{\sum_k C_{hk}'' M_k^2 \ln \Lambda^2 / M_k^2} + \cdots$$

標準模型を超える重い粒子の寄与

$C_{hk}'' M_k^2 >> m_h^2$ ならば，微調整が必要で不自然？

【ゲージ階層性の問題】

超対称性の導入

$C_h\Lambda^2 >> m_h^2$ ならば，微調整が必要で不自然？

$$\delta m_h^2 = \boxed{C_h\Lambda^2} + C_h' m_h^2 \ln \Lambda^2 / m_h^2$$

$$+ \boxed{\sum_k C_{hk}'' M_k^2 \ln \Lambda^2 / M_k^2} + \cdots$$

標準模型を超える重い粒子の寄与

$C_{hk}'' M_k^2 >> m_h^2$ ならば，微調整が必要で不自然？

$$\sum_k C_{hk}\left(m_{Bk}^2 - m_{Fk}^2\right)\ln \Lambda^2 / m_k^2 = O\left(m_{\text{soft}\,\cancel{\text{SUSY}}}^2 / 100 \right)$$

超対称性だけでは, 解消されない「ゲージ階層性の問題」の残り

“Triplet-doublet splitting problem”

ゲージ階層性を実現するために, Tree levelにおいてパラメータ間で微調整が必要で不自然である。

(SUSY GUTs に内在する大問題)

超対称性だけでは，解消されない「ゲージ階層性の問題」の残り

“Triplet-doublet splitting problem”

➔ キーワードの1つ

$$H = \begin{pmatrix} H_C \\ H_W \end{pmatrix}$$

陽子の安定性

↓

10^{16}GeV

Color triplet Higgs H_C ➔ GUT scale

Weak doublet Higgs H_W ➔ Weak scale

10^{2}GeV

「10^{16}GeVあたりの物理として，
超対称性大統一理論が有望!」

だと思われていたけれども，
世の中の風潮は，

注：正確には「重力スケール」あるいは「換算プランクスケール」とよばれるスケールをエネルギーを単位として用いる。

テラスケールの物理 → プランクスケールの物理 2.4×10^{18}GeV

超対称性 → 超重力理論 (SUGRA)

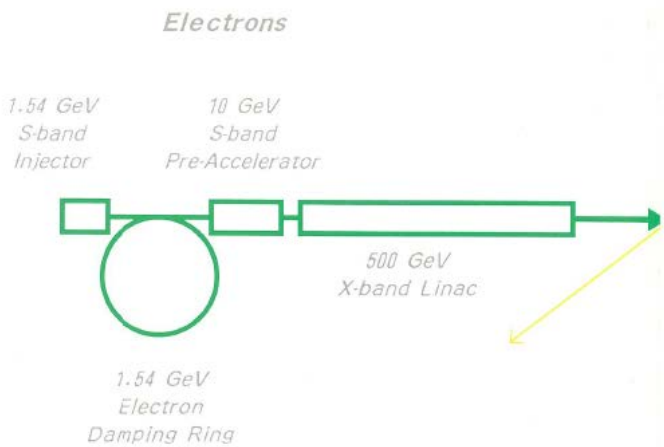
の方が主流だったように感じた。

【JLC（ILCの前身）の宣伝】

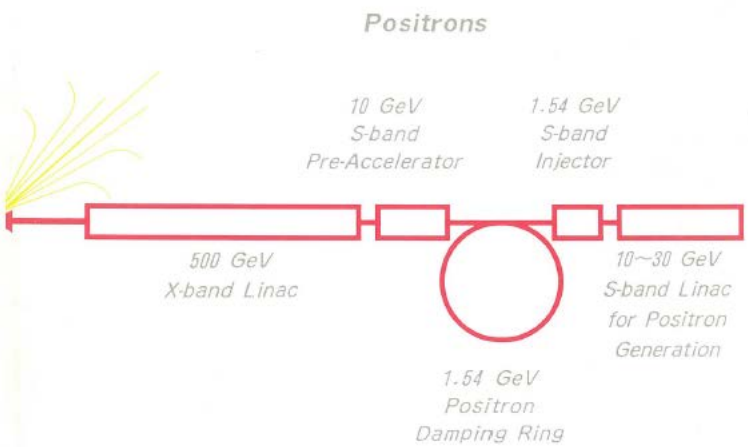
SUSYを通して，プランクスケールの物理がわかる!!

よって，解析の主流はプランクスケールで共通のsoft SUSY breaking parameter に基づくもの

The minimal SUGRA が後ろ盾



JLC(Japan Linear Collider)の物理



1990

JLC ワーキンググループ

【戦略に関する発想】

スーパーパートナーが見つかったとする。

スーパーパートナーの質量など

↔

繰り込み群

Soft SUSY breaking parameters @ $M_{\text{プランクスケール}}$

↑

近未来の実験

↕

プランクスケールの物理

$2.4\times10^{18}\,\mathrm{GeV}$

「10^{16}GeVあたりの物理として，
超対称性大統一理論が有望!」

↓

「プランクスケール（約10^{18}GeV）
じゃなくて，まずはGUT scale
（約10^{16}GeV）の物理がわかるのでは?」

たかが2桁，されど2桁。

たかが2桁, されど2桁。

量的：結構, パラメータが走る。

➔ 共通の値からずれる。

質的：パラメータはゲージ対称性を反映するはず。

【戦略に関する発想】

スーパーパートナーが見つかったとする。

スーパーパートナーの質量など

↔

繰り込み群

Soft SUSY breaking parameters @ M_U 大統一スケール

↑

近未来の実験

↕

大統一スケールの物理

2.1×10^{16} GeV

☆ ゲージーノの統合に伴う質量の一致

$$\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3\Big|_{M_U} = \alpha_U$$

$$\alpha_a = \frac{g_a^2}{4\pi}$$

$$(a = 1,2,3)$$

$$M_1 = M_2 = M_3\Big|_{M_U} = M_{1/2}$$

$$\mu \frac{d}{d\mu}\left(\frac{M_a}{\alpha_a}\right) = 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{M_a}{\alpha_a} = 一定$$

1 loop level

$$\frac{M_1}{\alpha_1} = \frac{M_2}{\alpha_2} = \frac{M_3}{\alpha_3}\Bigg|_{\mu \le M_U} = \frac{M_{1/2}}{\alpha_U} = 一定$$

☆ ゲージーノの統合に伴う質量の一致

$$\frac{M_1}{\alpha_1} = \frac{M_2}{\alpha_2} = \frac{M_3}{\alpha_3}\bigg|_{\mu \le M_U} = \frac{M_{1/2}}{\alpha_U} = \text{一定}$$

1 loop level

- 大統一群によらない。 $G_{SM}(\subset SU(5)) \subset G_U$
- 対称性の破れの形態によらない。
- 物質粒子の内容によらない。

➔ きれいな証拠。

$$\alpha_1 : \alpha_2 : \alpha_3\big|_{M_Z} \cong 1:2:6 \Rightarrow M_1 : M_2 : M_3\big|_{O(1)\mathrm{TeV}} \approx 1:2:6$$

我々がさらに導いたこと

キーワードの1つ

☆ スカラー粒子の統合に伴う sfermion mass の間に成立する関係式の導出

特徴：ゲージ対称性を反映し，ゲージ対称性の破れの形態に依存する。

Y.K., H. Murayama and M. Yamaguchi, "Probing the symmetry-breaking pattern using sfermion masses", *Phys. Lett.* B **324**, (1994) 52-58.

Y.K., H. Murayama and M. Yamaguchi, "Low-energy effective Lagrangian in unified theories with nonuniversal supersymmetry-breaking terms", *Phys. Rev.* D **51**, (1995) 1337-1352.

川村　村山　山口

敬称略ですみません。

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

$$\bar{5} = (d_R)^c : \left(\bar{3}, 1, \frac{1}{3}\right) + l_{1L} : \left(1, 2, -\frac{1}{2}\right)$$

$$10 = q_{1L} : \left(3, 2, \frac{1}{6}\right) + (u_R)^c : \left(\bar{3}, 1, -\frac{2}{3}\right) + (e_R)^c : (1, 1, 1)$$

$$1 = (\nu_{eR})^c : (1, 1, 0)$$

$$m^2_{\tilde{d}^*_R} = m^2_{\tilde{l}_{1L}} \Big|_{M_U} = m^2_{\bar{5}_1}$$

$$m^2_{\tilde{q}_{1L}} = m^2_{\tilde{u}^*_R} = m^2_{\tilde{e}^*_R} \Big|_{M_U} = m^2_{10_1}$$

第2, 第3世代も同様。

$$SO(10) \supset SU(5) \times U(1)_x$$

$$\boxed{16 = \overline{5} + 10 + 1}$$

$$\left(d^c, l_1\right)\left(q_1, u^c, e^c\right)\nu_e^c$$

世代内での物質場の完全な統一！

$$m^2_{\tilde{d}^*_R} = m^2_{\tilde{l}_{1L}} = m^2_{\tilde{q}_{1L}} = m^2_{\tilde{u}^*_R} = m^2_{\tilde{e}^*_R}\Big|_{M_U} = m^2_{16_1}$$

が期待されるが，実際は対称性の破れの効果により有意なずれが生じる可能性がある。

具体的には，D項からの寄与が存在する可能性がある。

$$\frac{1}{2}\sum_{\alpha}\left(g_{\alpha}D^{\alpha}\right)^{2}=\frac{1}{2}\sum_{\alpha}g_{\alpha}^{2}\left(\sum_{H}\Phi_{H}^{\dagger}T^{\alpha}\Phi_{H}+\sum_{k}\phi_{k}^{\dagger}T^{\alpha}\phi_{k}\right)^{2}$$

$$=\sum_{\alpha}g_{\alpha}^{2}\left\langle\sum_{H}\Phi_{H}^{\dagger}T^{\alpha}\Phi_{H}\right\rangle\sum_{k}\phi_{k}^{\dagger}T^{\alpha}\phi_{k}+\cdots$$

$$T^{a}\phi_{k}=q_{k}^{a}\phi_{k}$$

$$T^{a}\Phi_{H}=q_{H}^{a}\Phi_{H}$$

$$=\sum_{k}m_{\mathrm{D}k}^{2}\left|\phi_{k}\right|^{2}+\cdots$$

未知量として扱う。

$$m_{\mathrm{D}k}^{2}=\sum_{a}g_{a}^{2}q_{k}^{a}\left\langle\sum_{H}q_{H}^{a}\left|\Phi_{H}\right|^{2}\right\rangle=\sum_{a}g_{a}^{2}q_{k}^{a}\underline{\left\langle D^{a}\right\rangle}$$

壊れたU(1)チャージに依存する。

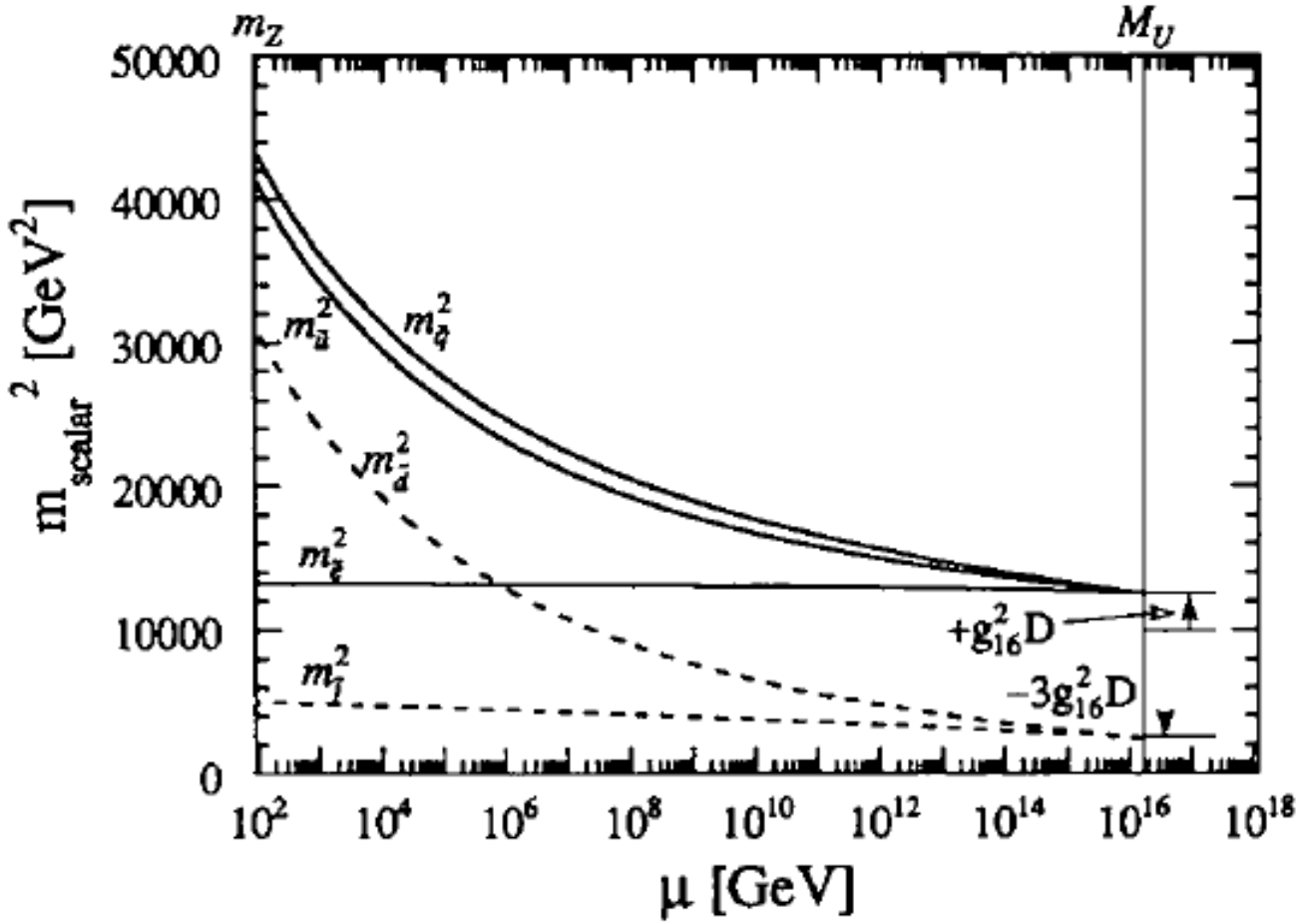


Fig. 1. A typical evolution of the scalar masses under the "direct" breaking of $SO(10) \rightarrow G_{SM}$. S in Eq. (12) is taken to be zero.

$$m^2_{\tilde{q}_{1L}} = m^2_{\tilde{u}^*_R} = m^2_{\tilde{e}^*_R}\,|_{M_U} = m^2_{16_1} + g^2_{16}D$$

$$m^2_{\tilde{d}^*_R} = m^2_{\tilde{l}_{1L}}\,|_{M_U} = m^2_{16_1} - 3g^2_{16}D$$

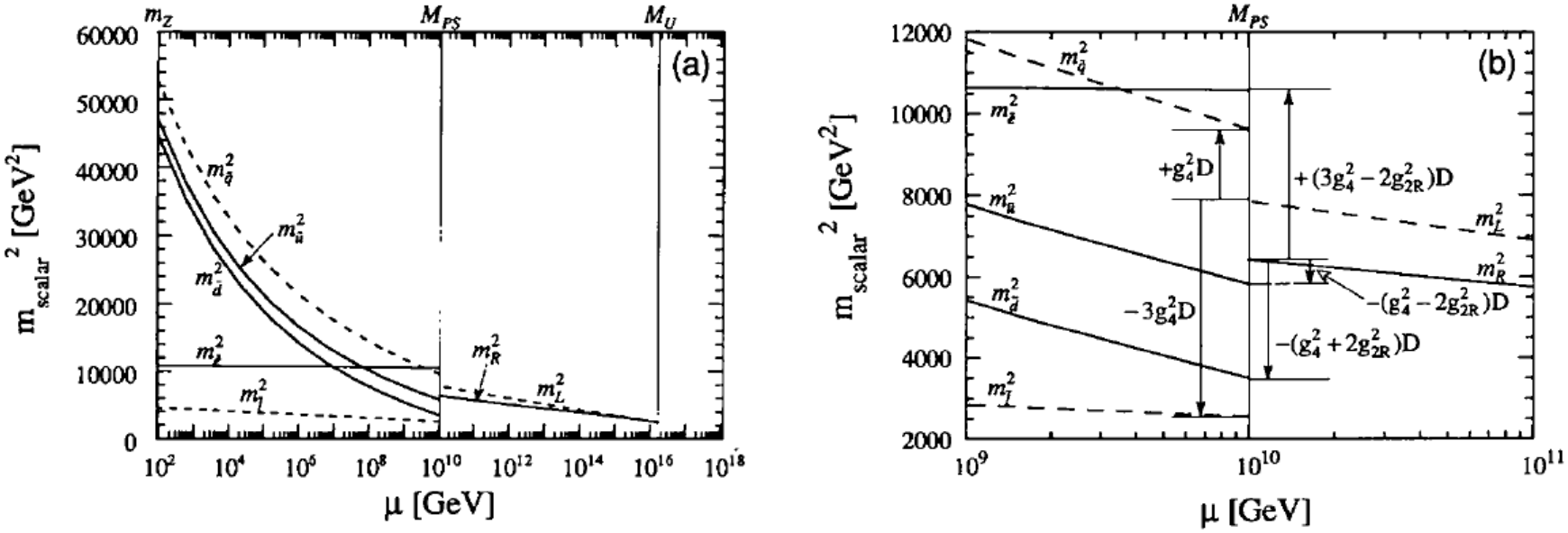


Fig. 2. A typical evolution of the scalar masses under the chain breaking $SO(10) \to SU(4)_{PS} \times SU(2)_L \times SU(2)_R \to G_{SM}$. The D-term contributions to the scalar masses are depicted in Fig. 2b so that the relations (30) and (31) are visible. S in Eq. (12) is taken to be zero.

$$m^2_{\tilde{q}_{1L}}\,|_{M_{\rm PS}} = m^2_{L1} + g_4^2 D$$

$$m^2_{\tilde{l}_{1L}}\,|_{M_{\rm PS}} = m^2_{L1} - 3g_4^2 D$$

$$m^2_{\tilde{u}^*_R}\,|_{M_{\rm PS}} = m^2_{R1} - (g_4^2 - 2g_{2R}^2) D$$

$$m^2_{\tilde{d}^*_R}\,|_{M_{\rm PS}} = m^2_{R1} - (g_4^2 + 2g_{2R}^2) D$$

$$m^2_{\tilde{e}^*_R}\,|_{M_{\rm PS}} = m^2_{R1} + (3g_4^2 - 2g_{2R}^2) D$$

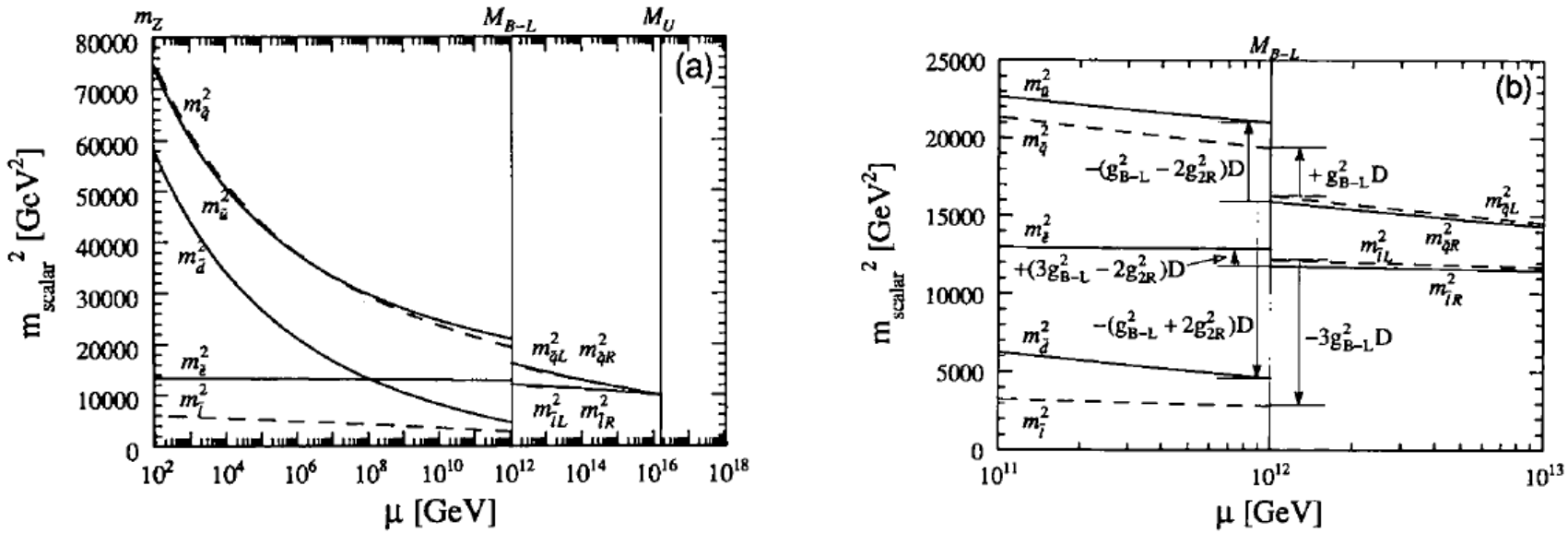


Fig. 3. A typical evolution of the scalar masses under the chain breaking $SO(10) \to SU(3)_C \times SU(2)_L \times SU(2)_R \times U(1)_{B-L} \to G_{SM}$. The D-term contributions to the scalar masses are depicted in Fig. 3b. S in Eq. (12) is taken to be zero.

$$m^2_{\tilde{q}_{1L}}\,|_{M_{SB}} = m^2_{qL1} + g^2_{B-L}D$$

$$m^2_{\tilde{l}_{1L}}\,|_{M_{SB}} = m^2_{lL1} - 3g^2_{B-L}D$$

$$m^2_{\tilde{u}^*_R}\,|_{M_{SB}} = m^2_{qR1} - (g^2_{B-L} - 2g^2_{2R})D$$

$$m^2_{\tilde{d}^*_R}\,|_{M_{SB}} = m^2_{qR1} - (g^2_{B-L} + 2g^2_{2R})D$$

$$m^2_{\tilde{e}^*_R}\,|_{M_{SB}} = m^2_{lR1} + (3g^2_{B-L} - 2g^2_{2R})D$$

☆ スカラー粒子の統合に伴う sfermion mass の間に成立する関係式

ゲージーノの質量とは相補的な特徴

・大統一群による。

・対称性の破れの形態による。

➔大統一群やゲージ対称性の破れ方を特定できる!

➔SUSY E_6 GUTの検証に使える!

スカラー粒子の質量を用いたSUSY E_6 GUTの検証

Y.K. and M. Tanaka, "Scalar Mass Spectrum as a Probe of E_6 Gauge Symmetry Breaking", *Prog. Theor. Phys.* 91, (1994) 949-957.

$$E_6 \supset SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y \times \underline{U(1)_\xi \times U(1)_\varsigma}$$

➔ 余分なゲージ対称性を含む。

- 対称性の破れの形態による。
- 様々な粒子の指定（出所）による。
- 粒子混合の効果やそれが世代ごとに異なる可能性もある。

K. Inoue, K. Kojima and K. Yoshioka, "Probing flavor structure in unified theory with scalar spectroscopy", *JHEP* 07, (2007) 027.

近未来に，スーパーパートナーが見つかれば，JLC（ILCの前身）で超対称性大統一理論が検証されるだろう。

３．新たな挑戦
（余剰次元）

第3の衝撃　衝撃は５年おきにやってくる説？（ほぼ）

「Dブレーン」（＝ソリトン解）
by J. Polchinski（1995年）

「M理論」の提唱
by E. Witten（1995年）

➔ 第2次ストリング革命の到来

第2次ストリング革命

1995年、ポルチンスキーによりDブレーンが超弦理論のソリトン解であることが示され、また、ウィッテンによりこれまで知られていた5つの超弦理論を統一する11次元のM理論が提唱されると、超弦理論は再び脚光を浴びることとなった。この2つは、それまでに予想されていた種々の双対性(S双対性、T双対性)と組み合わせることで、これまで摂動論の範囲でしか定義されていなかった超弦理論の非摂動的な性質の理解を深めることとなった。また、Dブレーンの低エネルギーでの性質は超対称ゲージ理論で記述されるため、ゲージ理論を用いて超弦理論の性質を調べること、逆に、Dブレーンの適当な配位を考えることでゲージ理論の非摂動的な性質を調べることが可能となり、精力的に研究された。

このDブレーンは、ブラックホールのエントロピーの表式を統計力学的に導出する際にも用いられ、超弦理論が重力の量子論であることの傍証となった。また、マルダセナによるAdS/CFT対応は、まったく別の理論である超対称ゲージ理論と超重力理論が、ある極限のもとで等価となることを予想し、超弦理論や重力理論、ゲージ理論に対して新しい知見を与えることとなった。

wikipedia より

「Dpブレーン」

＝「開弦(open string)の端点が存在するp次元の膜」

D はディリクレ(Dirichlet)境界条件にちなむ。

$$X^a(\sigma,\tau)\Big|_{\sigma=0} = X^a(\sigma,\tau)\Big|_{\sigma=\pi} = \text{定数}$$

a : braneに直交する成分

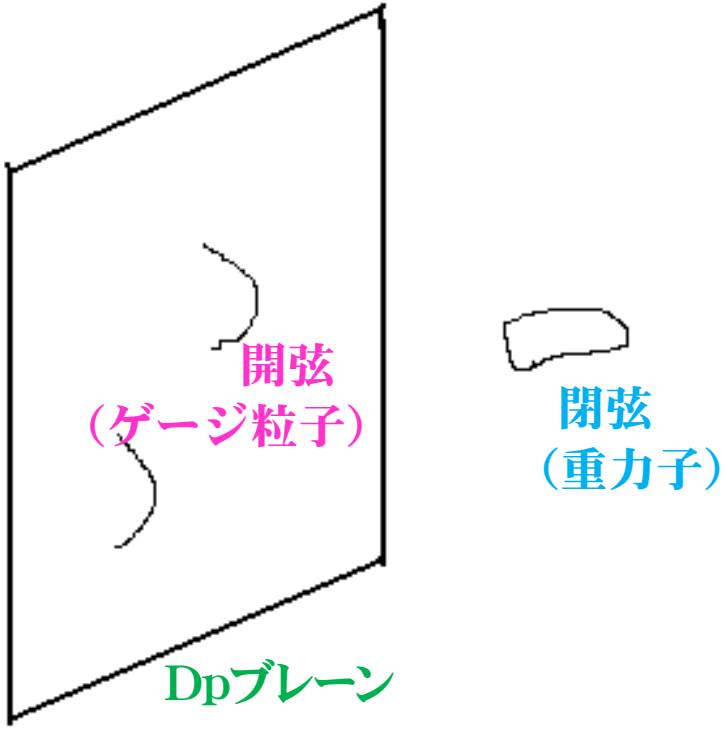
ブレーン(brane)は膜(Membrane)をもとにした造語　cf. 脳はbrain

「Dpブレーン」
＝「開弦(open string)の端点が存在するp次元の膜」

Open string（➔ゲージ粒子等）はDpブレーン内に束縛されている！

閉弦(closed string)(➔重力子等)はブレーンの外(バルク)にも移動できる！

「Dpブレーン」
＝「開弦(open string)の端点が存在するp次元の膜」



Dpブレーン
＝ソリトン解
➔非摂動効果

「M理論」

11次元超重力理論を有効理論とする超弦理論の母なる理論で，完全な定式化には至っていない。

「M」が意味するものも謎のまま

Membrane？　Matrix？

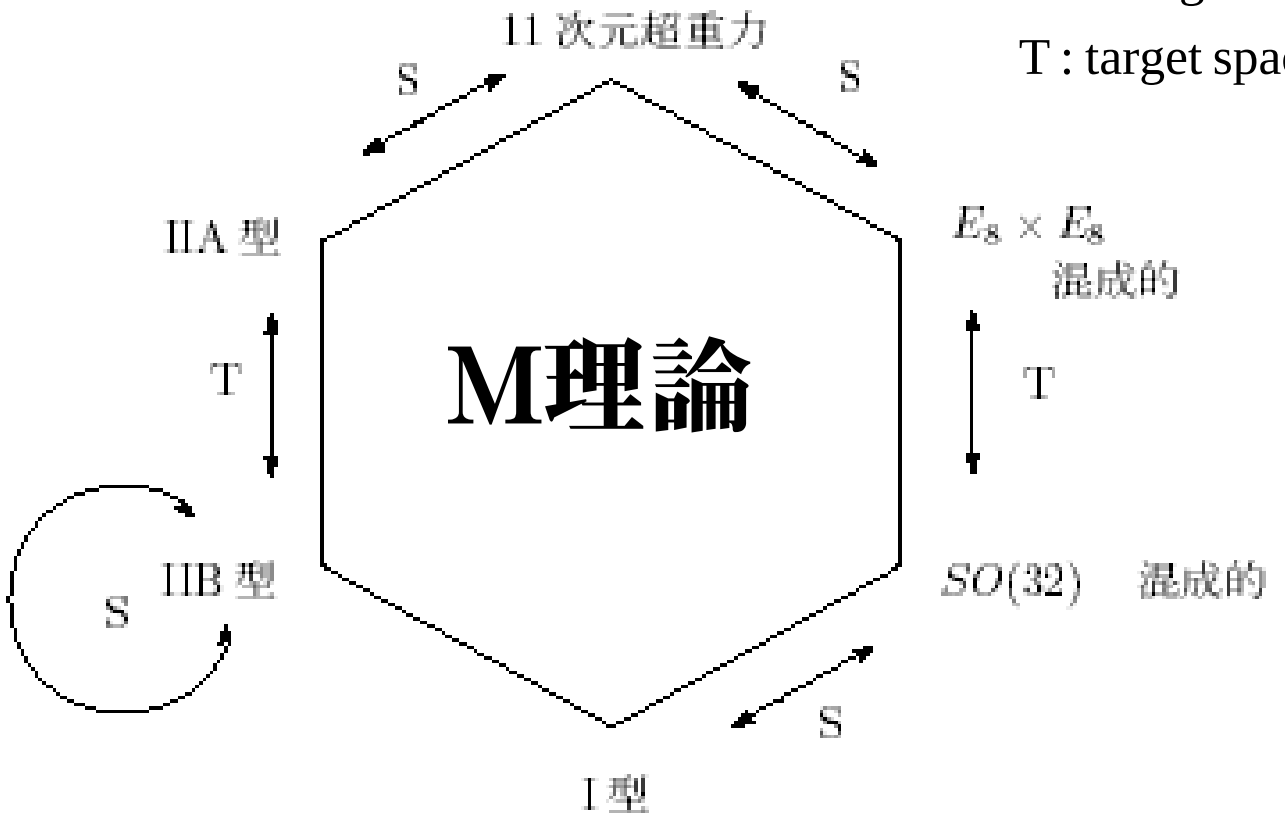
Mystery？　Magic？

Mother？

「M理論」は母なる理論(?)

S : strong - weak duality

T : target space duality



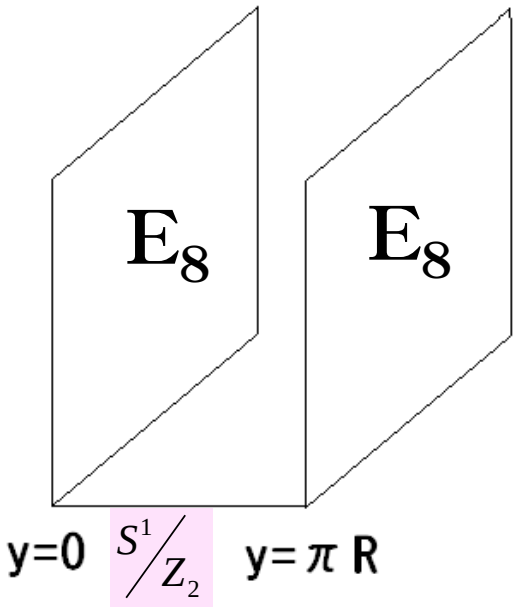
「双対性」を介して異なる(と思われていた)理論が結びついた！

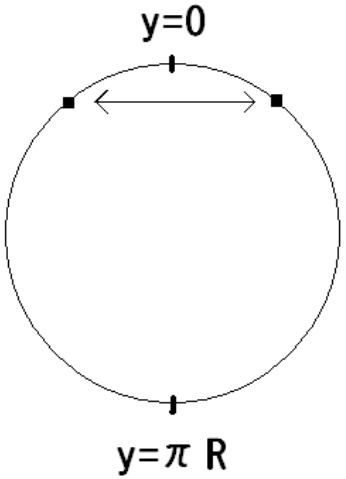
P. Horava and E. Witten, "Eleven-dimensional supergravity on a manifold with boundary", *Nucl. Phys.* **B475**, 94-114, (1996).

Strongly coupled $E_8 \times E_8$ Heterotic string theory

= M theory on $M^{10} \times \left(S^1 / Z_2 \right)$

線分が長い





$y \sim -y$

長さπ Rの線分

➔ 5次元時空 $M^4 \times \left(S^1 / Z_2 \right)$ に基づく場の理論?

「Dブレーン」&「M理論」がもたらしたこと

- 双対性の存在と重要性
- 非摂動効果の導入

そこから学んだことは?

多くの研究者が期待していたことが必ずしも起こりそうにないこと(?)

第１次ストリング革命の際に多くの研究者が期待していたこと

多種多様な4次元弦模型

➔非摂動効果により，
我々の世界を記述する
４次元弦模型が選び出
されるだろう。

第１次ストリング革命の際に多くの研究者が抱いた期待の消失(?)

多種多様な4次元弦模型

➔非摂動効果により,
我々の世界を記述する
4次元弦模型が選び出
されることはないだろう。

超弦理論・M理論が真の理論ならば，その理論から導かれる無矛盾な弦模型はすべて実現する可能性を秘めている(?)

↓ 自然の成り行き(?)

ストリング・ランドスケープ

「Dブレーン」&「M理論」がもたらしたこと

ブレーン・ワールド(brane world)

「我々の4次元時空は高次元時空に埋め込まれた膜のような世界(ブレインワールド)である。」

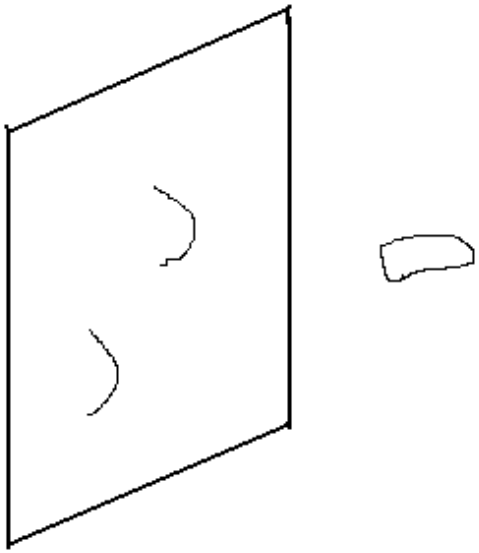
「Dブレーン」&「M理論」がもたらしたこと

ブレーン・ワールド(brane world)

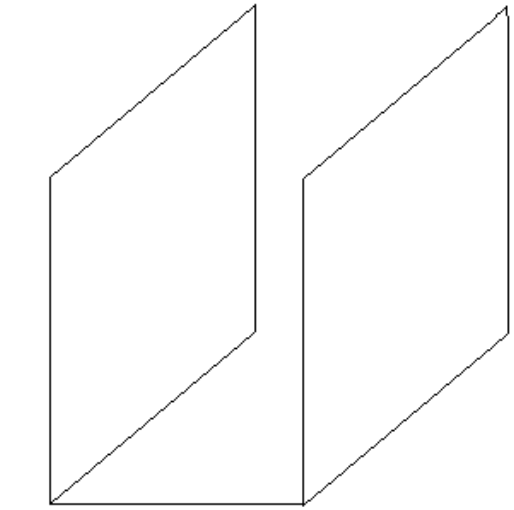
余剰次元(バルク)方向には,特定の粒子しか移動できない。もしも,標準模型の粒子がバルクに移動できないならば,これらの粒子を用いて余剰次元を直接観測できない。

ブレーン・ワールドの候補

Dpブレーン



Orbifoldの固定点上の時空



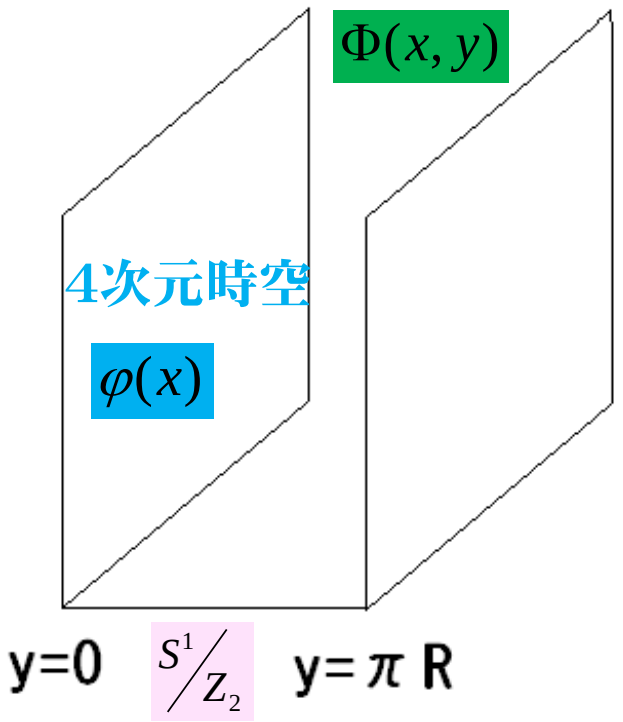
$y_{fp} = 0,\ \ \pi R$：固定点

$$(\because)\quad 0 \to 0, \qquad \pi R \to -\pi R \sim -\pi R + 2\pi R = \pi R$$

S^1/Z_2 に注目しよう！

$x^\mu (= x) \quad x^5 = y$

$(\mu = 0,1,2,3)$



$\Phi(x,y)$

バルク場

$\varphi(x)$

ブレイン場

5次元時空上の有効理論 ← M theory on $M^{10} \times \left(S^1/Z_2 \right)$

6次元コンパクト化

新たな挑戦

Orbifold（軌道体）

学生時代の遺産

Triplet-doublet splitting problem

SUSY GUTの大問題

Brane world

Triplet-doublet splitting problem

「カイラルフェルミオンの問題」の解消がヒントになる！

⇩

「余剰次元が単純な多様体(例：T^d)の場合，カイラルフェルミオンが導出されない。」

➔ キーワードの1つ

Orbifold（軌道体）

＝ 多様体/離散群

with 固定点

なぜ, Orbifold か?

T^d を離散群で割ることにより,

N＝1超対称性に制限,

カイラルフェルミオンの導出

S^1の場合，

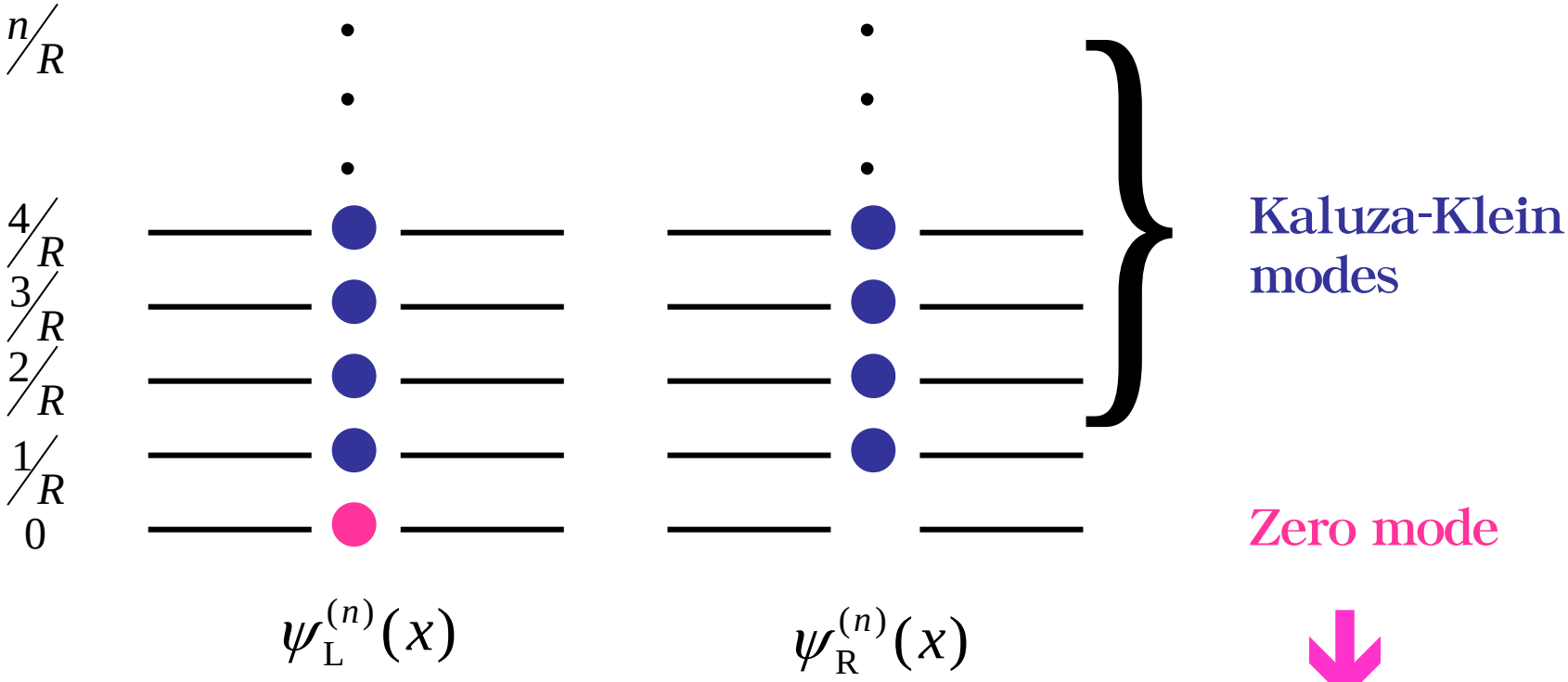
$$\psi(x,y)=\begin{pmatrix}\psi_{\mathrm{L}}(x,y)\\ \psi_{\mathrm{R}}(x,y)\end{pmatrix} \quad \Rightarrow \quad \begin{matrix}\psi_{\mathrm{L}}^{(n)}(x)\\ \psi_{\mathrm{R}}^{(n)}(x)\end{matrix}$$

$n=$ 整数

S^1/Z_2の場合，

$$\psi_{\mathrm{L}}(x,y)=\sum_{n=0}\psi_{\mathrm{L}}^{(n)}(x)\cos(ny/R)$$

$$\psi_{\mathrm{R}}(x,y)=\sum_{n=1}\psi_{\mathrm{R}}^{(n)}(x)\sin(ny/R)$$



カイラルフェルミオン！

S^1の場合,

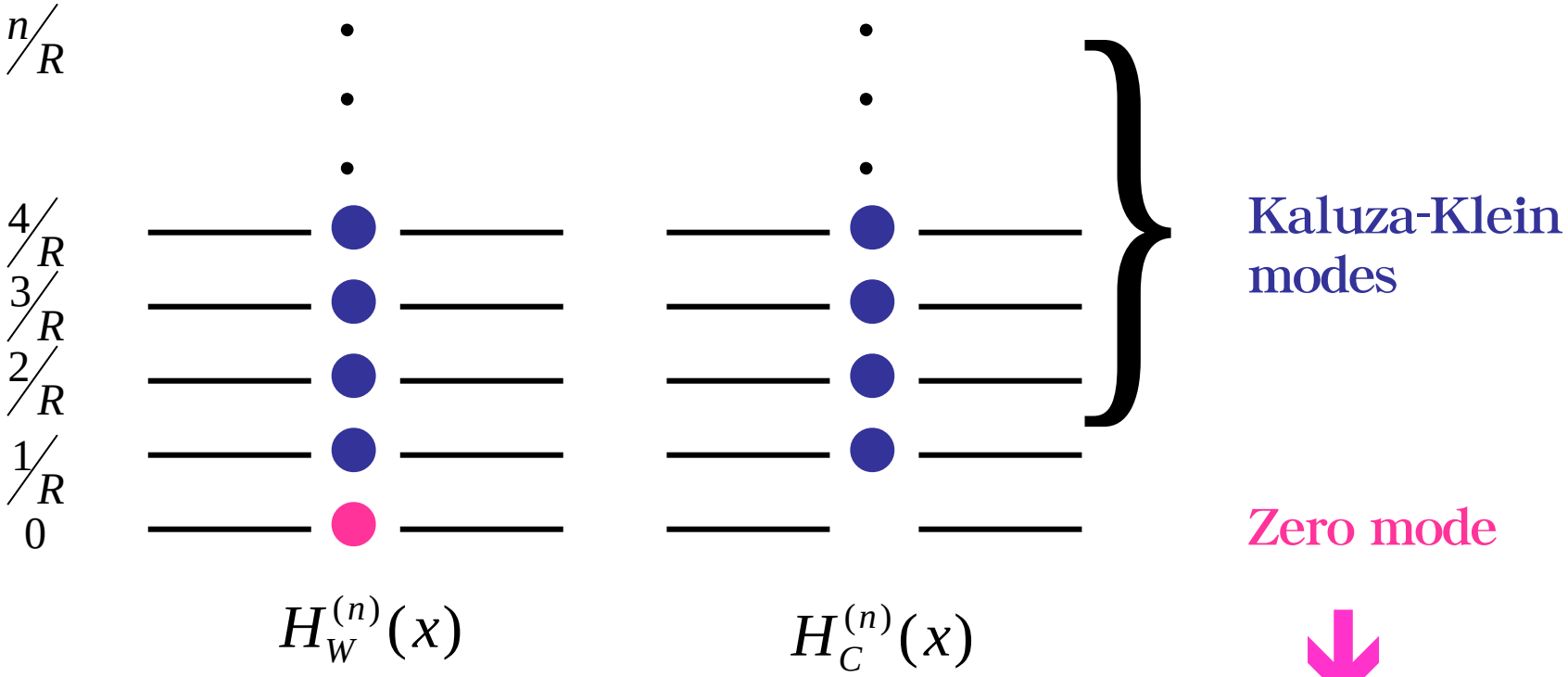
$$H(x,y)=\begin{pmatrix} H_C(x,y) \\ H_W(x,y) \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{matrix} H_C^{(n)}(x) \\ H_W^{(n)}(x) \end{matrix}$$

$n=$ 整数

S^1/Z_2の場合,

$$H_W(x,y)=\sum_{n=0} H_W^{(n)}(x)\cos(ny/R)$$

$$H_C(x,y)=\sum_{n=1} H_C^{(n)}(x)\sin(ny/R)$$



Weak doublet Higgs !

余剰次元に関して異なる境界条件を多重項内の場に課すことによる対称性の破れ（Orbifold breaking）の機構をゲージ対称性に適用！

$$H_W(x^\mu,-y) = H_W(x^\mu, y),$$
$$H_C(x^\mu,-y) = -H_C(x^\mu, y)$$

$$\Rightarrow$$

$$H_W(x,y) = \sum_{n=0} H_W^{(n)}(x)\cos(ny/R)$$
$$H_C(x,y) = \sum_{n=1} H_C^{(n)}(x)\sin(ny/R)$$

ミレニアムの頃

Y.K., "Triplet-Doulet Splitting, Proton Stability and an Extra Dimensions, *Prog. Theor. Phys.* **105,** (2001) 999-1006.

4次元ミンコフスキー空間×($S^1/Z_2^{(2)}$) 上のSU(5) 超対称性大統一理論

↓ 余剰次元に関する場の境界条件を巧妙に設定

☆ SU(5)の破れによる相互作用(強い力, 電磁力, 弱い力)の導出

☆ 微調整なしでのヒッグス粒子の導出

→ Orbifold GUTs ブーム

Orbifold GUTs の検証

（例）SU(5) 超対称性大統一理論 on 4次元ミンコフスキー空間×(S^1/Z_2)

Sfermion mass の間に成立する関係式

$$m^2_{\tilde{u}^*_R} = m^2_{\tilde{e}^*_R}\Big|_{M_U}$$

$$(\because)\ \ 10 \Rightarrow u_R^{c(++)} + e_R^{c(++)} + \underline{q_L^{(+-)}}$$

ゼロモード
なし

cf.　通常の超対称性大統一理論

$$m^2_{\tilde{u}^*_R} = m^2_{\tilde{e}^*_R} = m^2_{\tilde{q}_{1L}}\Big|_{M_U}$$

近未来に，スーパーパートナーが見つかれば，LHCやILCでOrbifold GUTsも検証されるだろう。

ところで

ほぼ

「衝撃は5年おきにやってくる説？」

はどうなったのか？

1985年　カラビ・ヤウ コンパクト化

1990~1年　ゲージ結合定数の一致

1995年　Dブレーン, M理論

2001年~　Orbifold GUT に対する

反響により, 感受性ゼロ状態

【衝撃を含む私的な年表】

1985年 カラビ・ヤウ コンパクト化

1990~1年 ゲージ結合定数の一致

1995年 Dブレーン, M理論

2001年~ Orbifold GUT に対する反響により, 感受性ゼロ状態

2006年 「例題形式で学ぶ現代素粒子物理学」を上梓, 研究生活の再出発

何をテーマにするか?

テーマ：世代の起源

衝撃とキーワードに基づく研究（?）

$$SU(N) \to SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y \times \cdots,$$

Orbifold breaking

$$[N,k] = {}_N C_k \to 3 \times \begin{pmatrix} (\bar{3},1)_2 + (1,2)_{-3} \\ + (3,2)_1 + (\bar{3},1)_{-4} + (1,1)_6 \end{pmatrix} ?$$

5次元時空 $M^4 \times S^1/Z_2$

Y.K., T. Kinami and K. Oda, "Orbifold family unification", *Phys. Rev.* D**76**, (2007) 035001.

6次元時空 $M^4 \times T^2/Z_N$

Y. Goto, Y.K. and T. Miura, "Orbifold family unification on six dimensions", *Phys. Rev.* D**88**, (2013) 055016.

$$SU(N) \to SU(3)_C \times SU(2)_L \times SU(p_3) \cdots \times SU(p_n) \times U(1)^r$$

Total numbers of models with $n_{d^c} = n_l = n_{u^c} = n_{e^c} = n_q = 3$

	T^2/Z_2	T^2/Z_3	T^2/Z_4	T^2/Z_6
$SU(8)$	-	-	-	-
$SU(9)$	[9,3]:32	-	[9,3]:8	[9,3]:8 [9,4]:32
$SU(10)$	-	-	-	[10,3]:80 [10,4]:108
$SU(11)$	[11,3]:80 [11,4]:80	[11,4]:80	[11,3]:20 [11,4]:20	[11,3]:84 [11,4]:144 [11,5]:156
$SU(12)$	[12,3]:120	[12,3]:80	[12,4]:88 [12,6]:240	[12,3]:392 [12,4]:120 [12,5]:72 [12,6]:552
$SU(13)$	[13,3]:144	-	[13,4]:40	[13,3]:712 [13,4]:88 [13,5]:140 [13,6]:200

continued

構築できるが，実在性は?

【衝撃に関する私的な年表】

1985年 カラビ・ヤウ コンパクト化

1990~1年 ゲージ結合定数の一致

1995年 Dブレーン, M理論

2001年~ Orbifold GUT に対する
反響により, 感受性ゼロ状態

2012~13年 Higgs粒子の発見,
Beyond the SMの未発見

➔ New Physics は何処に?
謎は深まるばかり！

４．深まる謎

（有効理論，Behind the SM）

ヒッグス粒子が見つかった!

2013年度ノーベル物理学賞

François Englert, Peter Higgs

アングレール　　ヒッグス

CERN提供

【現状】

スーパーパートナーが未発見@ LHC

Kaluza-Klein粒子も未発見 @ LHC

陽子崩壊が観測されていない @ 神岡

➔ 標準模型を超える物理の兆候がない。

超対称性，余剰次元，力の大統一!?

疑いのまなざし

【現状】

スーパーパートナーが未発見@ LHC

Kaluza-Klein粒子も未発見 @ LHC

陽子崩壊が観測されていない @ 神岡

➔ 標準模型を超える物理の兆候がない。

➔ ヒッグス粒子の質量に関する量子補正の問題の再検討が迫られる!?

【2次発散の問題】

$C_h \Lambda^2 >> m_h^2$ ならば，微調整が必要で不自然？

$$\delta m_h^2 = \boxed{C_h \Lambda^2} + C_h' m_h^2 \ln \Lambda^2 / m_h^2$$

$$+ \boxed{\sum_k C_{hk}'' M_k^2 \ln \Lambda^2 / M_k^2} + \cdots$$

標準模型を超える重い粒子の寄与

$C_{hk}'' M_k^2 >> m_h^2$ ならば，微調整が必要で不自然？

【ゲージ階層性の問題】

発散を繰り込めば問題ないじゃん。

$$m_h^2 + \delta m_h^2 \Rightarrow m_{h\,\mathrm{R}}^2$$

それはそうだが，これでおしまい。☹

「不自然さ」に伴う違和感を追究することにより，New Physicsに到達するチャンスが生まれるかもしれない。☺☺

近年, 取り組んでいること

微調整問題の背後に潜む物理法則の解明

【キーワード】

有効理論

Behind the Standard Model

【基本的な考え方・予想】

有効理論は手を加えて，
本物になるかも。

標準模型の背後に厳密な
対称性が潜んでいるかも。

2次発散を巡って

$C_h\Lambda^2 >> m_h^2$ ならば, 微調整が必要で不自然?

$$\delta m_h^2 = \boxed{C_h\Lambda^2} + C_h' m_h^2 \ln \Lambda^2 / m_h^2 + \cdots$$

２次発散の問題は標準模型の背後に潜む対称性で解消できるかも。

Y.K., "Naturalness, conformal symmetry and duality", *Prog. Theor. Exp. Phys.* **11**, 113B04, (2013), arXiv:1308.5069 [hep-ph] .

２次発散の存在が有効理論に手を加える必要性を訴えているのでは?

【期待】

・基礎理論の特質を考慮すれば，量子補正に関する計算法が決まる。

・2次発散も排除される。

量子補正に現れる紫外発散（の一部）は，基礎理論の特質を正しく考慮していないことに伴う「みかけのもの」では?

基礎理論では，理論の成否に係わる特質が存在する。

$$\delta m_h^2 = C_h' m_h^2 \ln \Lambda^2 / m_h^2 + \cdots$$

一方，（低エネルギー）有効理論では，その特質は隠れていて，理論の成否には係わらない。

$$\delta m_h^2 = \cancel{C_h \Lambda^2} + C_h' m_h^2 \ln \Lambda^2 / m_h^2 + \cdots$$

← 特質（の名残り）を要請する。

（例）（世界線上の）双対性

(a) 基本的なスケール Λ を有する基礎理論が存在する。

(b) 基礎理論には双対性が存在する。

Ex. 物理@$E(\geq \Lambda)$ ~ 物理@$E(\leq \Lambda)$

(b1) 物理は双対性変換の下で不変。

(b2) 物理はどちらかの領域で記述すれば十分である。

(c) 低エネルギー有効理論にも，Λ に依存する物理量に対して，「双対性の名残り」が存在する。

（例）（世界線上の）双対性

粒子が飛ぶ時間（固有時）
に関する双対性

{固有時が大，低エネルギー}と
{固有時が小，高エネルギー}が
双対変換で結びつくとする。

→ 正則化
2次発散の排除

今後の展望と目標

A. 最良のシナリオ

B. 一発逆転型シナリオ

C. 最悪にみえるシナリオ

A. 最良のシナリオ

もう少しエネルギーを上げると，
理論の予想通りに新粒子が
ばかすか見つかる。

↓

実験家も理論家もHappy！

B. 一発逆転型シナリオ

標準模型を超えて，スーパーパートナーや複合粒子ではない新粒子がそれなりに見つかる。

↓

あわよくば，New Physics の間接的検証！

（例）

Y.K., “Terascale remnants of unification and supersymmetry at the Planck scale”, *Prog. Theor. Exp. Phys.* **8**, 081B01, (2013) arXiv:1304.7885 [hep-ph]

テラスケールあたりにスーパーパートナーではない新粒子

➔ 力の大統一，超対称性，余剰次元

@ プランクスケール

2.4×10^{18} GeV

複数同時発見ありかも（?）

プランクスケールにおいて，
余剰次元（例：オービフォールド）の効果により，力の大統一を実現するゲージ対称性および（スーパーストリングの要である）超対称性が壊れるという予想のもとで，

テラスケールにおける新粒子の一例

$[(3,2,1/6),\ (\bar{3},2,-1/6)]$ ディラックフェルミオン1個
＋複素スカラー2個

$[(\bar{3},1,1/3),\ (3,1,-1/3)]$ ディラックフェルミオン3個

$[(1,2,-1/2),\ (1,2,1/2)]$ ディラックフェルミオン1個

ディラックフェルミオン1個を複素
スカラー4個に変えることは可能。

C. 最悪にみえるシナリオ

いくらエネルギーを上げても，新粒子が見つからない，標準模型からのずれさえも現れない。 (New Physics のスケールに制限が付くだけ ?)

↓

これも立派な成果！

本当に最悪なのは尻切れトンボ状態。

C. 最悪にみえるシナリオ

いくらエネルギーを上げても，新粒子が見つからない，標準模型からのずれさえも現れない。

↓

なぜ，そうなのかの追究に活路があるのでは(?)

C. 最悪にみえるシナリオ

いくらエネルギーを上げても，新粒子が見つからない，標準模型からのずれさえも現れない。

↓

標準模型の背後に不思議な対称性（？）

Y.K., “Finiteness, duality and fermionic symmetry”, *Int. J. Mod. Phys.* A30, (2015) 1550109.

なぜ，超対称性，力の大統一，余剰次元が観測されないのか？

自然界は「ひねり」を好む(?)

➔ ひねりがまだ足りない。

(例)単純な点粒子➔スピン

自然界は「必然性」を好む(?)

➔ 必然性を見逃している。

(例)弱い力の理論➔電弱理論

異なる2つのアプローチ

- 衝撃やキーワードに身をまかせて，

  「ひねり」の導入

  「必然性」の追求

- 衝撃やキーワードの呪縛からの解放

  発想力不足の解消

  未知の概念の発掘

ご清聴ありがとうございました。

1985年 カラビ・ヤウ コンパクト化

1990~1年 ゲージ結合定数の一致

1995年 Dブレーン, M理論

2001年~ Orbifold GUT に対する
反響により, 感受性ゼロ状態

2012~13年 Higgs粒子の発見,
Beyond the SMの未発見

2017年 この合宿で衝撃やアイデアが
うまれないかなと期待しております。