

# 弦から現象論

—LHC/Planck後の超弦による素粒子論とは—

素粒子原子核研究所 理論センター

溝口 俊弥

素粒子現象論研究会 大阪市立大学 2020/11/27

# 弦から現象論：弦理論のどこが素粒子論なのか

- 多くの大学、研究所には素粒子現象論をやっている人たちと「フォーマル」な理論を研究している人たちが共存している
- 「フォーマル」な理論を研究している人たちがやっていることは、素粒子現象論をやっている人たちがやっていることと非常に異なっている
  - 考えている時空の次元が4次元でなかったりする
  - 超対称性が非常に多い場合がしばしば考えたりする
  - 理論自体の整合性、あるいはある状況設定のもとでの理論の豊かな数理的構造の自体が追求する研究対象となっていることがしばしばある
  - 実験／観測と比較検証したりすることができないように見える

# 超弦から素粒子論：その2つの側面

超弦が**そもそも「弦」**である  
ということに基づく側面

- 重力子モード
- D-ブレーン
- 開閉双対性
- 振幅の有限性

➡ 量子重力、AdS  
/CFT対応

QCD、物性など  
非カイラルな理論



超弦が**「超」弦**である  
ということに基づく側面

- 奇跡的に満たされた  
整合性とそれに  
付随する例外群と  
の関連性、有限性

➡ 例外群ゲージ対  
称性、世代構造

GUT、標準模型など  
カイラル理論

# LHC/Planck後の弦からの現象論

- 超弦が「超」弦であるという「第2の側面」ことに基づいてGUTや標準模型を導出しようという試みは30年以上前からなされてきた
- D-ブレーンの「発見」以後、比較的新しい「第1の側面」に基づく研究が盛んになり、LHC前の低エネルギー超対称性思想のもとで、超弦の第2の側面は忘れられ、あるいは意識的に無視された

この講演では、LHCやPlanckの実験観測の結果を得た今、

超弦が標準模型を超えた素粒子論のために

これから何が必要かということについてお話ししたい



特集／時空

## 超弦と時空

ポルチンスキーの教科書が書かれた後になって  
わかった、素粒子の謎を解明する超弦の幾何学

溝口 俊 弥

### 1. はじめに

しばしば混同されることですが、超弦 (superstring)

2. 陽子がなかなか崩壊しなくても大統一理論が  
あるに違いないと考えられるわけ

# 内容

1. イントロダクション
2. 弦理論も昔は素粒子論だった： LHCが走る前までの弦からの素粒子論
3. 実験で超対称性が見つからなくても超弦理論を研究するわけ：超対称性と例外群
4. 例外群を実現する 2 つの弦理論：ヘテロティック弦とF理論
5. 超弦でカイラルマターはどうであるか、3世代を説明できるか
6. LHC/Planck後の素粒子論としての超弦理論とは

2. 弦理論も昔は素粒子論だった：  
LHCが走る前までの弦からの素粒子論

# 弦理論も昔は素粒子論だった

- QCDが出る前の超昔：デュアルレゾナンスモデル
- そこまで遡らなくても、GSOプロジェクト、Green-Schwarzメカニズムの発見を経てE8xE8ヘテロティック弦がはじめて構成された80年代、オービフォールドその他のコンパクト化による大統一理論や標準模型の導出が精力的に試みられた
  - それらの研究は確かに「素粒子論」を意識していた
  - そのころは弦理論といえは E8xE8 ヘテロティック弦だったらしい

# 弦理論も昔は素粒子論だった

- しかし、当時の技術では（今でもできないが）ヘテロティック弦のコンパクト化から標準模型や大統一理論をアドホックでないやり方で導くことはできなかった
  - E8を（カラビヤウがSU(3)ホロノミーのため）E6に破ることはできたが、それより小さなSO(10)、SU(5)にするためには手でウィルソンラインを入れるしかなかった
  - 逆に、そのようなコンパクト化のパラメータの調節により、非常に多くの可能な標準模型ライクな真空解（今でいうランドスケープ）が得られることが判明した
  - 「それは摂動論だからだ、非摂動効果を考慮すれば一意にきまるだろう」という漠然とした希望があった

# 90年代前半：非摂動論的解析の進展

- ヘテロティック弦を研究していた多くの人々はそれをやめ、場の理論や弦理論の非摂動論効果の取り入れに関心が移っていった
- ヘテロティック弦が素粒子の標準模型と関係するという事実は依然としてあったが、今と比べてみればわかっていないことが多すぎた
- その頃から「フォーマルな理論」を研究をする人たちと素粒子現象論をする人たちとの乖離が始まっていった
- ヒッグズもまだ見つからないのにどうせ検証できない、という切迫感が確かに欠如していた
- その一方で「フォーマル」な理論研究ではさまざまな進展があった（これらは今後利用できる可能性あり）
  - Old 行列模型のダブルスケーリング極限による 2次元重力
  - ミラー対称性
  - Seiberg-Witten による 4次元 $N=2$ 超対称ゲージ理論の厳密解とその背後の可解性 など

# D-ブレーイン：その素晴らしさと誤解

- そんな中、90年代後半になってD-ブレーインが「発見」された
- D-ブレーインは、（弦の教科書で最初習う2次元「世界面」理論の量子化で定義される）弦から見てソリトンのな「非摂動的」なオブジェクトだったため、これを使ってモデルを構成すれば超弦理論の「真の真空」がユニークに決まるに違いない、という（今となっては誤った）考え方が爆発的に広まった
- D-ブレーインモデルによる標準模型実現の困難がすぐに判明したにも関わらず、D-ブレーインをもたないヘテロティック弦は「摂動的な理論」と（誤って！）宣伝され、ときにはまるで劣った理論であるかのように言われることもあった



# D-ブレーン：その素晴らしさと誤解

- D-ブレーンという広がった基本的オブジェクトが超弦理論に存在する、との認識に至ったことは確かに大きな出来事だった
  - それぞれのラモンラモン場に荷電した様々な次元のブレーンの存在の認識は、異なる弦の双対性の理解やM理論の概念の発展に繋がった
  - 開弦と閉弦の両方からの計算の比較によって得られる開閉双対性に根ざしたAdS/CFT 対応、あるいはホログラフィという考え方は、QCD、物性理論、ブラックホールの物理、情報理論などの広範囲な研究に応用されている

☆しかし、これらの性質は「超弦が（そもそも）弦である」ということに基づいた非カイラルな性質（開閉双対性、重力を含む、など）であって、弦が「超」弦になるにあたってクリアした奇跡的整合性（GSO射影、Green-Schwarz機構など）とは無関係

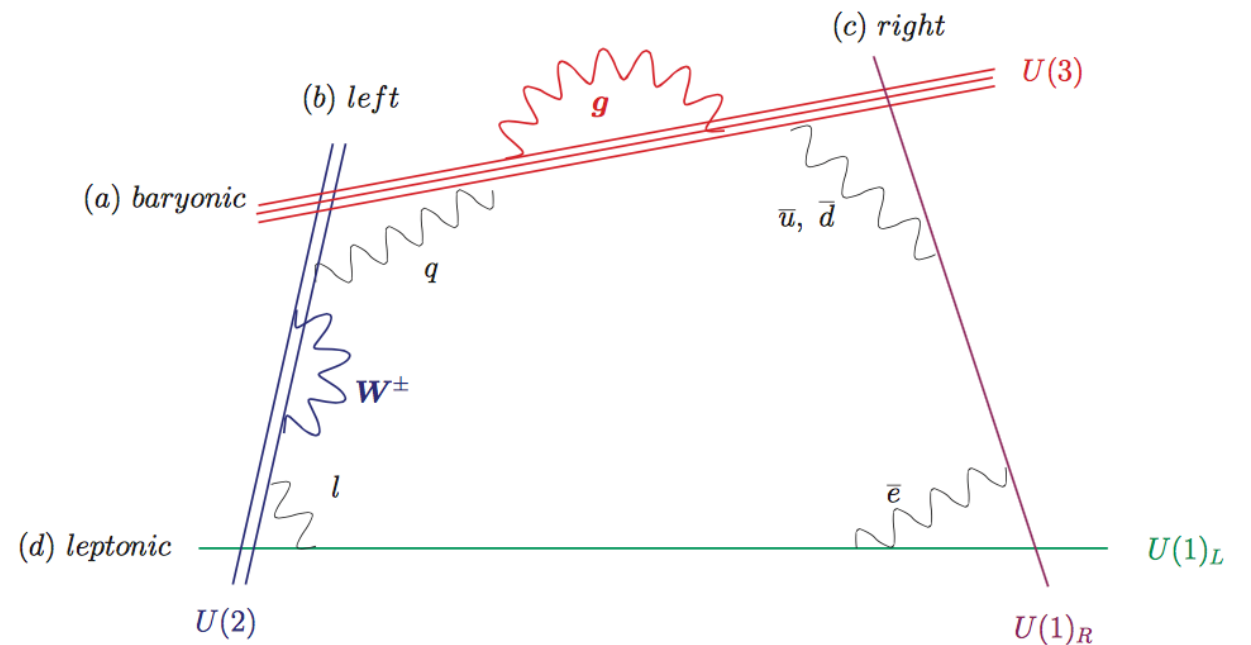
# D-ブレーン：その素晴らしさと誤解

- それまで非可換ゲージ対称性をもてないと思われていたタイプIIA弦、タイプIIB弦でも、重なったD-ブレーン上にそれを実現できる、という事実は、その後の模型構築のバリエーションを大きく広げた
- ヘテロティック弦のように難しいことを勉強しなくても、3枚、2枚、1枚の重なりによってお手軽に標準模型ライクな模型が構成できるD-ブレーン模型はたちまち人口に膾炙した

しかし

# D-ブレイン模型の困難

- クォークの分数ハイパーチャージを説明できない
- ゲージ統一しない (たまたまそうなった、偶然と考える)
- スピナー表現が実現できない
- アップタイプ湯川を (摂動論的に) 生成できない



Blumenhagen, Körs, D. Lüst, Ott,  
Nucl. Phys. B616 (2001) 3–33,  
arXiv:hep-th/0107138.

Lüst 0904.4601

# ヘテロティック弦もD-ブレーンから見れば非摂動論的オブジェクト

- E8のような例外群ゲージ対称性はD-ブレーン系では実現できない
- D-ブレーン系を非摂動論的に拡張したF理論、あるいは内部空間の特異点からの非摂動効果を考慮して初めて実現できる
  - S1/Z2 上のM理論 (Horava-Witten) もD-ブレーン系に対して非摂動論的

☆ 弦理論における「非摂動論的」という概念はQCDにおける「摂動論か、非摂動論か」という一次元的な概念とは全く異なる

- 弦理論には、QCDのように「これを思い切り詳しく調べればいい」というようなラグランジアンは存在しない
- 弦理論では「非摂動論的定式化」をしたからといって、すべての非摂動論的効果を取り入れられるわけではない (決してできないものがある)
- 逆に、いわゆる「非摂動論的定式化」によらずとも非摂動論的効果を評価する手法がいくつもある

# LHCと超対称性

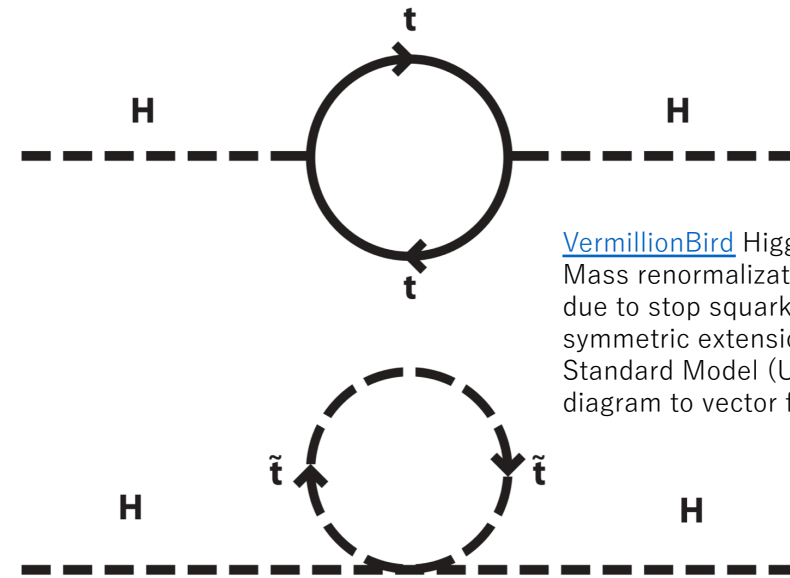


<http://www.weeklypique.com/2015/10/02/cerns-higgs-boson-the-god-particle/#more-108>

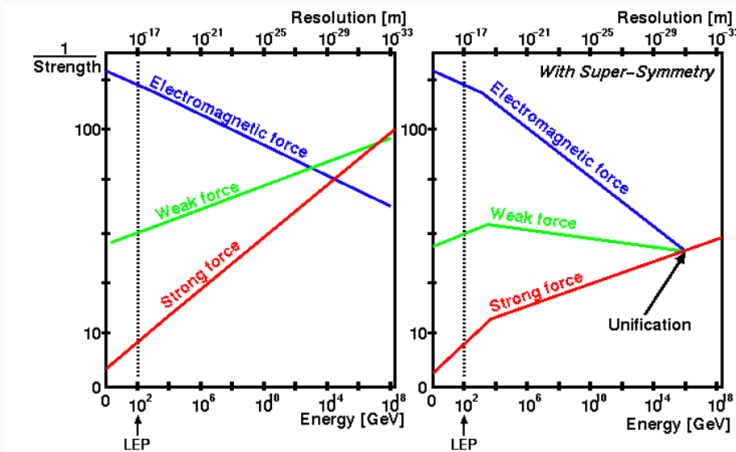
LHC実験の結果は、それまでの超対称性に対する考え方を大きく変化させた

# LHC以前の低エネルギー超対称性思想

- 超対称性は紫外発散を弱めるので、階層性問題を解決することが期待されていた
- 90年代始めに3つの力のくりこみ群による大統一が超対称性の導入により改善することが判明し、標準模型拡張の一つの指導原理となった



[VermillionBird](#) Higgs Quadratic Mass renormalization Corrections due to stop squarks in a supersymmetric extension to the Standard Model (Update previous diagram to vector format)

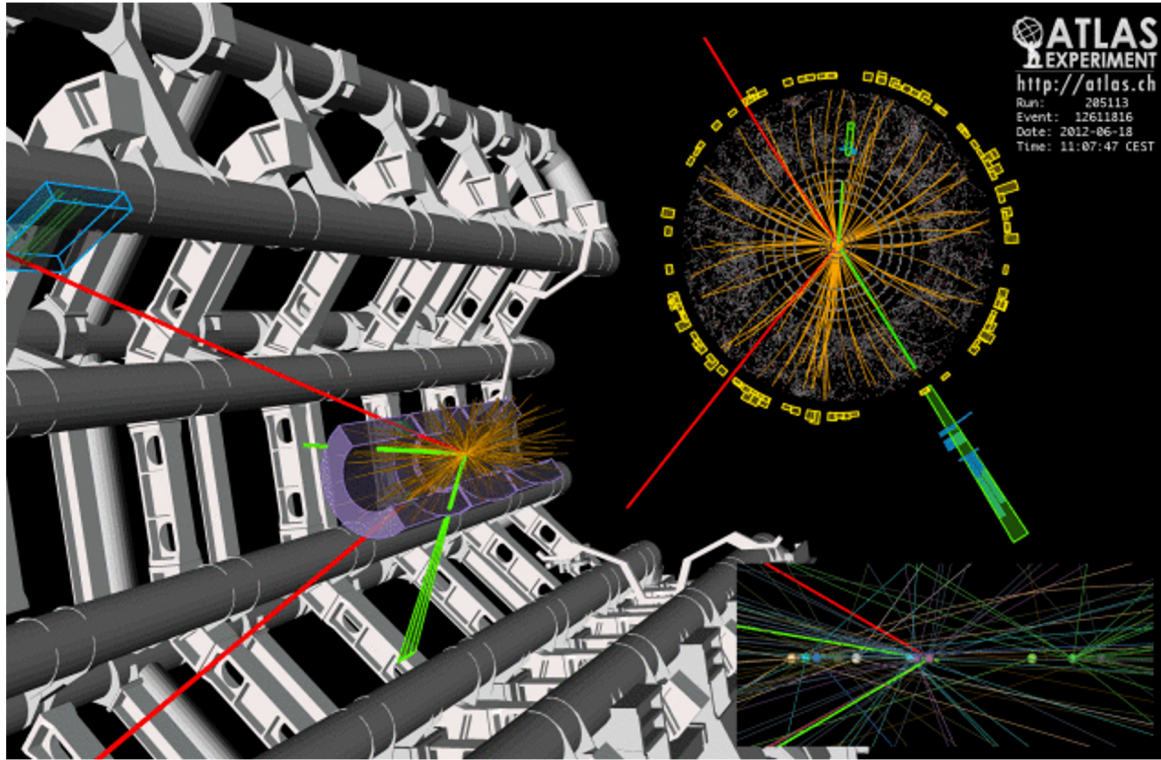


When you view the coupling constants as a function of energy on a log-log scale, they appear to nearly miss one another, at left. If you add in the supersymmetric particles as predicted, the constants meet (or come much closer to meeting) at  $\sim 10^{15}$  GeV, or the traditional grand unification scale. [ ] CERN (EUROPEAN ORGANIZATION FOR NUCLEAR RESEARCH), 2001

# LHC以前の低エネルギー 超対称性思想

- 階層性問題の解決を一つの動機としていたこともあり、LHC以前は、超対称性の破れのスケールは電弱スケールとあまり変わらないことが期待されていた
- 超対称性は、枝線レベルでZボゾン質量を当時まだ見つからなかったヒッグズ粒子の質量の上限として与え、ループ補正があっても、超対称性のスケールは電弱スケールとかけ離れていないであろうからそれほど大きいはずはない、というのが当時の一般的な考え方だった





ところが、見つかったヒッグズは 125GeV と超対称性が「自然」であるためには重すぎ、またTeVスケールに超対称粒子を始めとする新物理も見つからなかった

Event display of a  $H \rightarrow 2e2\mu$  candidate event  
CERN ホームページより

[http://www.ansa.it/webimages/foto\\_large/2012/7/4/cc772d7af0fe09198a5d46c71620602b.jpg](http://www.ansa.it/webimages/foto_large/2012/7/4/cc772d7af0fe09198a5d46c71620602b.jpg)

# 超弦理論

- 超弦理論は超対称性をもった弦理論
- それがはじめて統合的に構成された30年以上前から素粒子のすべての相互作用を統一する究極理論として期待されてきた

しかし、低エネルギー超対称性がなかったことが判明した現在、  
「超」弦理論を考える意味があるのか？



答えは **YES!** その理由は...

3. 実験で超対称性が見つからなくても超弦理論を研究するわけ：超対称性と例外群

# 実験で超対称性が見つからなくても超弦理論を研究するわけ

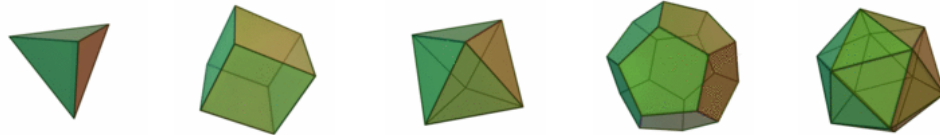
- 標準模型や大統一理論の背後には **例外群** の構造がある
- 弦理論は超対称化されると **例外群** の構造をもつようになる

# 有限性のあるところ例外群あり

この世に有限個しか存在しないもので、それが例外群に関して  
いるものはたくさんある

例

- 正多面体：



Wikipedia 正多面体 by [Peter Steinberg](#)

























- パンルベ方程式 1変数2階の微分方程式で、初期条件によっ  
て動く特異点が極しかないもの： Painleve I, II, III, IV, V, VI

その他にも「ADE分類」に従うたくさんの例がある

# 素粒子も「有限」

- クォーク・レプトンも3世代しかない
- 標準模型のゲージ対称性  $SU(3) \times SU(2) \times U(1)_Y$  もランクが4しかない

これらの背後にも例外群がある  
と考えることができる

	1 <sup>st</sup> generation	2 <sup>nd</sup> generation	3 <sup>rd</sup> generation	Gauge quantum number		
				SU(3)	SU(2)	U(1) <sub>Y</sub>
Quark	   	   	   	3	2	1/6
				3	1	-2/3
				3	1	1/3
	Lepton	 	 	 	1	2
				1	1	0
				1	1	1

# 標準模型は「特別な」三世代模型

標準模型は単なるカイラルマターのセット3つの繰り返しではない

- ハイパーチャージ 一世代がSU(5)の10, 5\*にちょうどなるようにアサイン ←アノマリー無関係
- 一世代は5と5\*でなく10と5\*でアノマリー相殺 ← $V_R$ も含めてSO(10)のスピナー表現にまとまる
- 各世代ごとにアノマリーは相殺 ←三世代であることの理論的整合性からの拘束/必然性なし
- 三世代間の大きな階層性 トップはアップの10万倍



# クォーク・レプトンのハイパーチャージ $U(1)_Y$ はなぜあのような値なのか？

答え


標準模型の背後に  $SU(5)$  があって、 $U(1)_Y$  はその中の  $SU(3) \times SU(2)$  と直交する  $U(1)$  だから

- 実際、例えば左手クォーク (右図右上ブロック) には  $Y$  が  $-\frac{1}{3} + \frac{1}{2} = +\frac{1}{6}$  がかかる形で作用する  $\rightarrow$  正しいハイパーチャージ

$SU(5)$  は  $U(1)$  チャージの量子化だけでなくその値そのものをぴったり説明する！

$$M_{10} = \begin{pmatrix} \begin{matrix} 0 & (u_R^3)^c & -(u_R^2)^c \\ -(u_R^3)^c & 0 & (u_R^1)^c \\ (u_R^2)^c & -(u_R^1)^c & 0 \end{matrix} & \begin{matrix} u_L^1 & d_L^1 \\ u_L^2 & d_L^2 \\ u_L^3 & d_L^3 \end{matrix} \\ -(\text{upper-right})^T & \begin{matrix} 0 & (e_R)^c \\ -(e_R)^c & 0 \end{matrix} \end{pmatrix}$$

$$Y = \begin{pmatrix} -\frac{1}{3} & & & & \\ & -\frac{1}{3} & & & \\ & & -\frac{1}{3} & & \\ & & & \frac{1}{2} & \\ & & & & \frac{1}{2} \end{pmatrix}$$



$$YM_{10}Y = \begin{pmatrix} (-\frac{1}{3} - \frac{1}{3}) \times \square & (-\frac{1}{3} + \frac{1}{2}) \times \square \\ (\frac{1}{2} - \frac{1}{3}) \times \square & (\frac{1}{2} + \frac{1}{2}) \times \square \end{pmatrix}$$

# クォーク・レプトンなぜ SU(5) の $3 \times (\mathbf{10} \oplus \bar{\mathbf{5}} \oplus \mathbf{1})$ なのか？

SU(5)のそのような多重項にまと  
まったからといってアノマリーが  
相殺するわけではない  
( $\mathbf{10} \oplus \bar{\mathbf{5}} \oplus \mathbf{1}$  全部あって相殺)

答え

SU(5)の背後にSO(10)があるから  
 $\mathbf{10} \oplus \bar{\mathbf{5}} \oplus \mathbf{1}$ はSO(10)のスピンナー  
表現  $\mathbf{16}$  にまとまる

$$M_{\mathbf{10}} = \left( \begin{array}{ccc|cc} \hline 0 & (u_R^3)^c & -(u_R^2)^c & u_L^1 & d_L^1 \\ -(u_R^3)^c & 0 & (u_R^1)^c & u_L^2 & d_L^2 \\ (u_R^2)^c & -(u_R^1)^c & 0 & u_L^3 & d_L^3 \\ \hline \end{array} \right)$$

$$\left( \begin{array}{cc} \hline & \\ -(\text{upper-right})^T & \begin{array}{cc} 0 & (e_R)^c \\ -(e_R)^c & 0 \end{array} \\ \hline \end{array} \right)$$

$$M_{\bar{\mathbf{5}}} = ((d_R^1)^c (d_R^2)^c (d_R^3)^c \nu_{eL} e_L)$$

$$M_{\mathbf{1}} = (\nu_{eR})^c$$

$$\mathbf{16} = \mathbf{10} \oplus \bar{\mathbf{5}} \oplus \mathbf{1}$$

$$SU(5) \rightarrow SO(10) \rightarrow E_6 \rightarrow E_7$$

SO(10) の 16 は例外群  $E_6$  のSO(10)分解に現れる

$$78 = 45 \oplus 16 \oplus \overline{16} \oplus 1$$

標準模型の背後には例外群がある

- 実は  $E_7$  を  $SU(5)$  で分解すると ちょうど3つの  $10 \oplus \overline{5} \oplus 1$  と  
1つの  $5$  が現れる 九後, 柳田(1984) 佐藤, 柳田(1997)

「世代統一」

# 弦は超対称化すると例外群と関係してくる

超弦は例外群といろいろな仕方で関係する

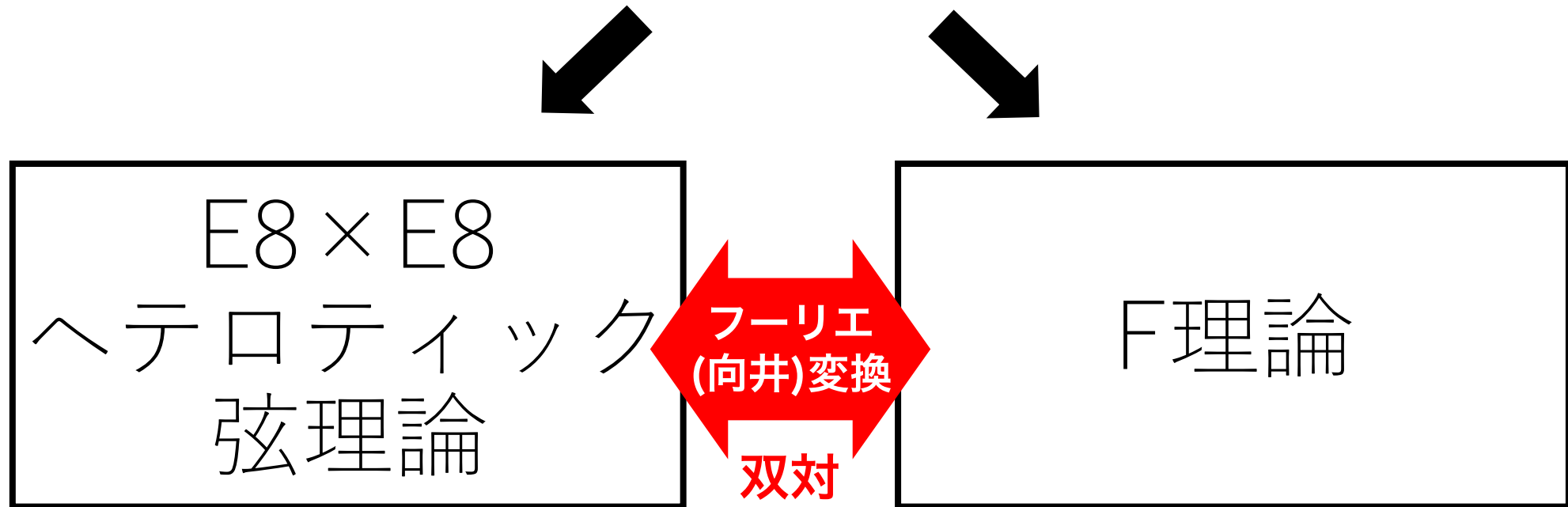
1. ヘテロティック弦およびF理論の  $E_8 \times E_8$  ゲージ対称性
2. タイプII弦 (AもBも) を10次元からD次元にリダクションした理論の  $E_{11-D}$  グローバル対称性 (U-duality)
3. 超対称性を半分だけ保つ多様体である「K3曲面」の2次のコホモロジー格子  $E_8 \oplus E_8 \oplus ((2\text{次元ローレンツ格子}) \times 2)$

...

1と3は大統一理論と密接に関係する

4.例外群を実現する2つの弦  
理論：ヘテロティック弦と  
F理論

# 例外群を実現する2つの弦理論

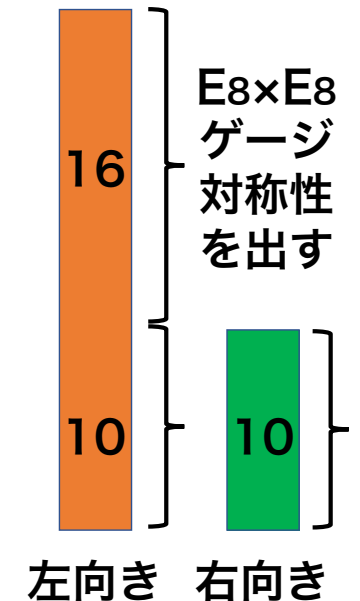
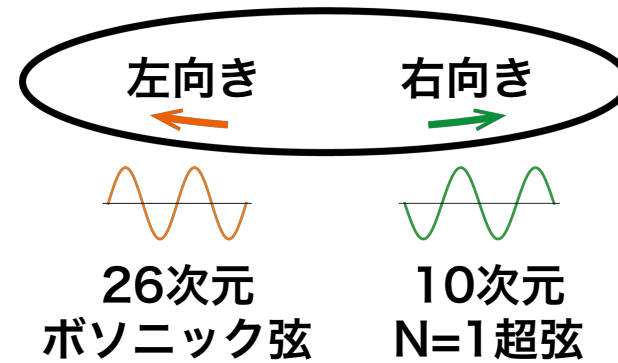


R. Friedman, J. Morgan and E. Witten  
Commun. Math. Phys. 187 (1997) 679

厳密にはF理論はヘテロティック理論と  
双対でない理論もモジュライ空間に含む

# E8 × E8 ヘテロティック弦理論 Gross, Harvey, Martinec, Rohm (1985)

- 閉弦の左右独立な進行波のうち、左向きを26次元ボゾニック弦、右向きを10次元超弦にとり接合したもの
- 左向き16次元部分からE8 × E8 ゲージ対称性が生ずる
- Green-Schwarz機構によって量子異常が奇跡的に相殺する
- カイラル物質は内部空間のDiracゼロモードから生成





# F理論に関する数々の誤った俗説

次のことはすべて間違いです！

×F理論には12次元ラグランジアンがある

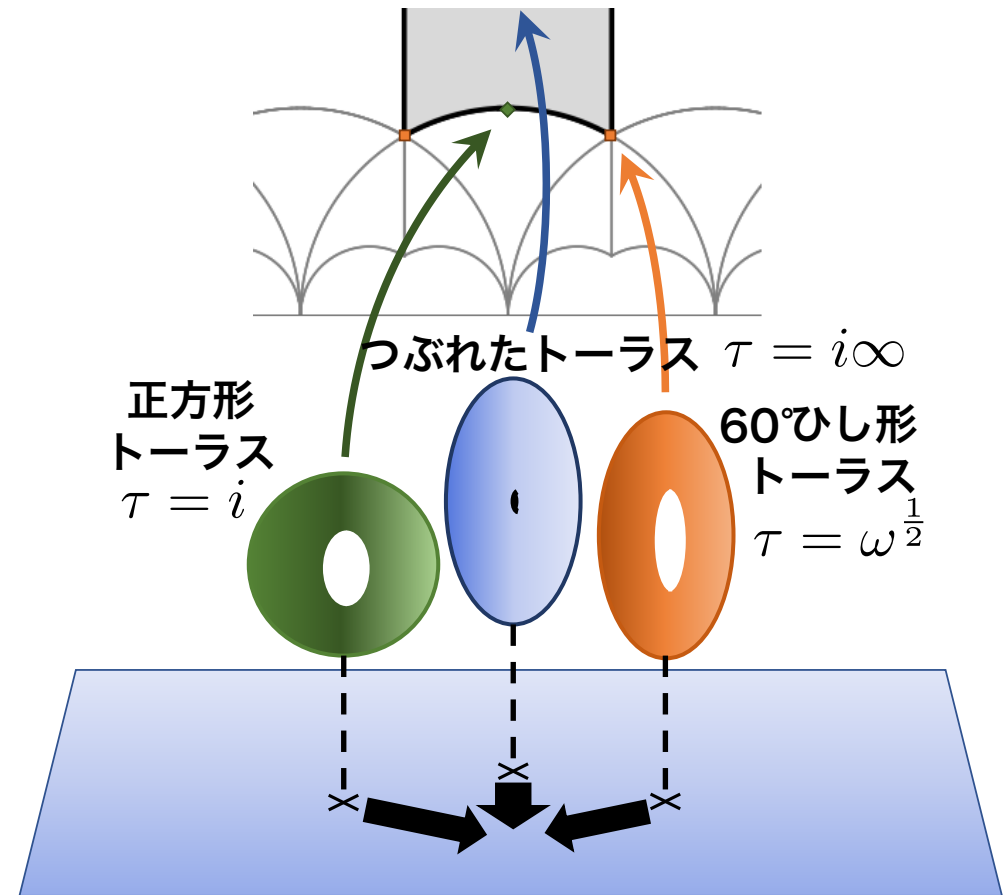
×F理論は時間が2次元の10+2次元理論である

×F理論はM理論がマザーでF理論がファーザーだから（そこはあってるかも）M理論みたいな理論

×F理論ではタイプIIBのスカラー場をトーラスに置き換えたから例外群とかストリングジャンクションとか変なことが起きる

# F理論 Vafa(1996)

- タイプIIB弦の複素スカラー場  $\tau$  が内部空間の場所ごとに異なる値、特にその値が  $i$  (虚数単位) や  $\omega^{1/2}$  (1の6乗根) になるような点が集まると、そこにD-ブレーンばかりでなく  $SL(2, Z)$  変換をうけたもの (( $p, q$ )-ブレーン) が一緒に重なることになり、例外ゲージ対称性が理論に生ずる
- このような非摂動的なタイプIIB弦はF理論と呼ばれる

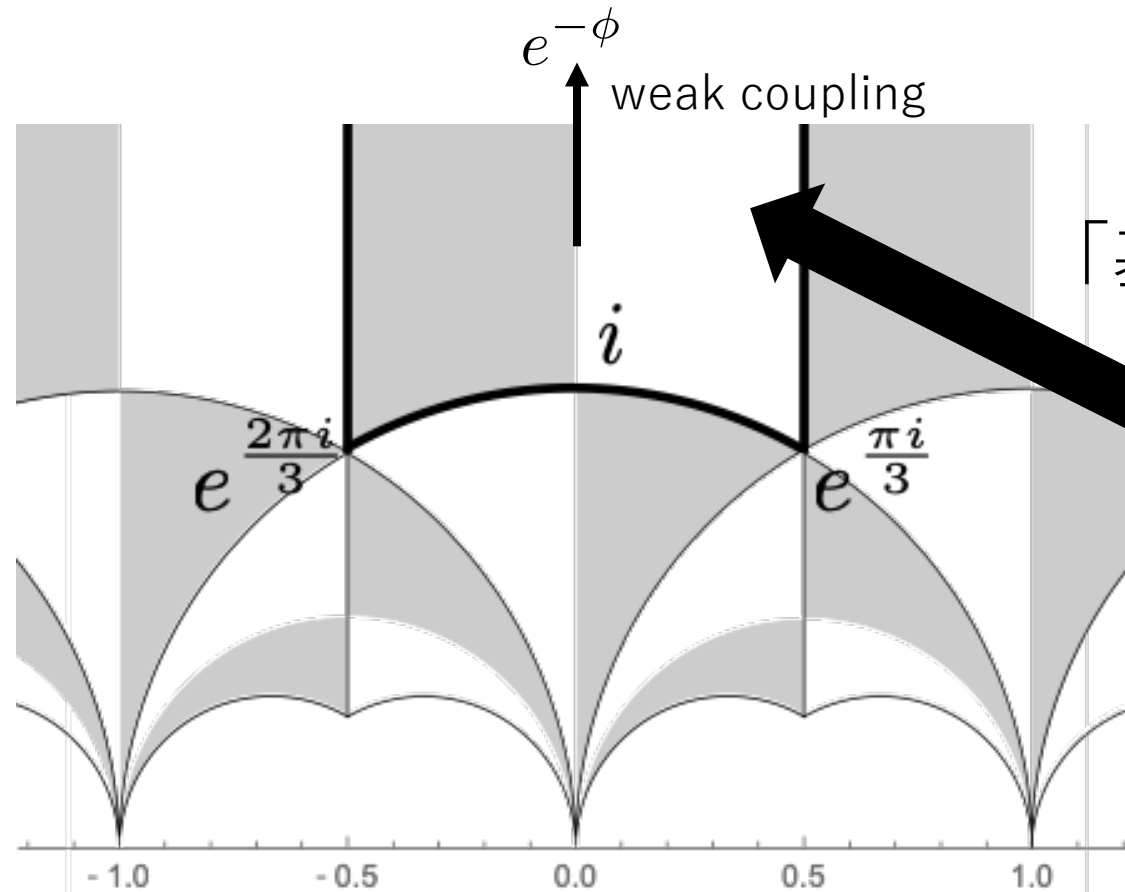


# F理論と普通のタイプIIB弦の違い

タイプIIB弦の複素スカラー  $\tau = C + ie^{-\phi}$

$C$ : “アクシオン”

$e^{-\phi} = 1/g$ : 結合定数 (ディラトン)

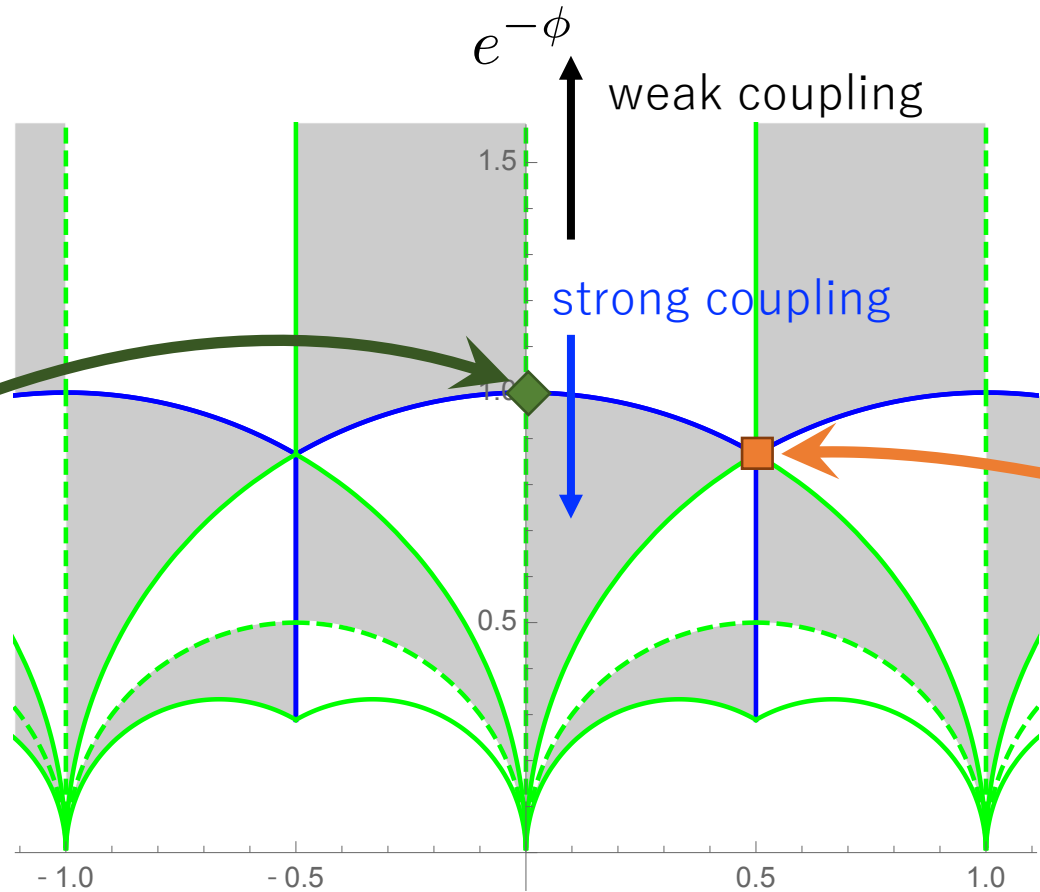
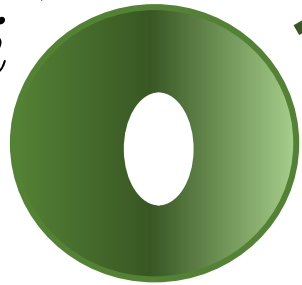


「基本領域」 $SL(2, Z)$   
変換でここにも  
もってくるこ  
とができる

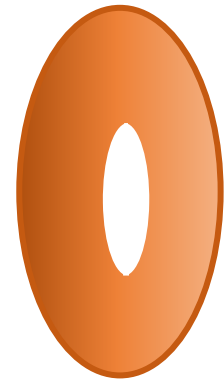
# F理論と普通のタイプIIB弦の違い

青い線を越えると  
強結合になる(S-dual)

正方形  
トーラス  
 $\tau = i$



60°ひし形  
トーラス  
 $\tau = \omega^{\frac{1}{2}}$

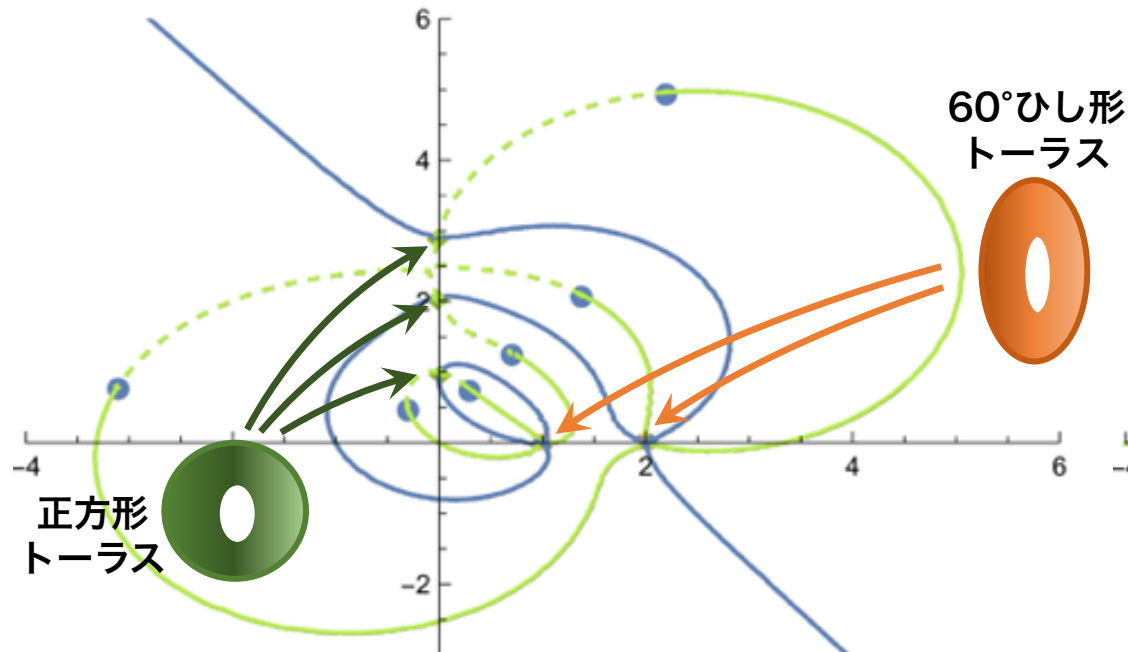


# F理論と普通のタイプIIB弦の違い

Fukuchi,Kan,SM,Tashiro(18)  
 Fukuchi,Kan,Kuramochi,  
 SM,Tashiro(19)

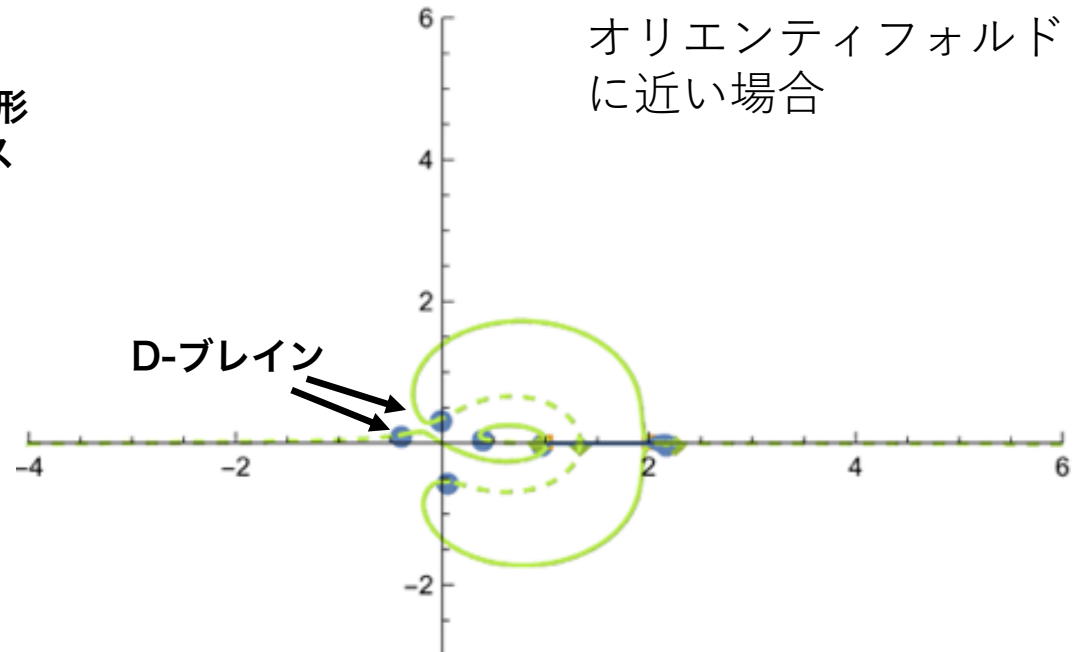
Dessin d'enfant (「子供の絵」)

## F理論



- 結合定数が場所ごとに変わる
- 強／弱結合領域が隣接共存する
- モノドロミーをもつ

## 普通のタイプIIB弦

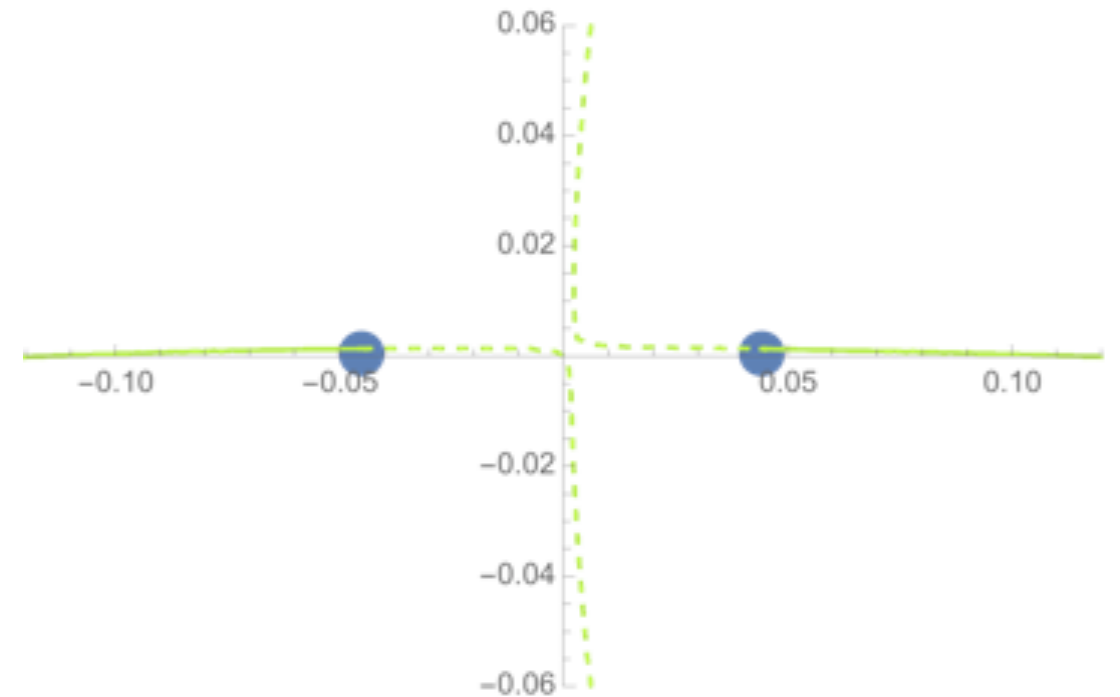
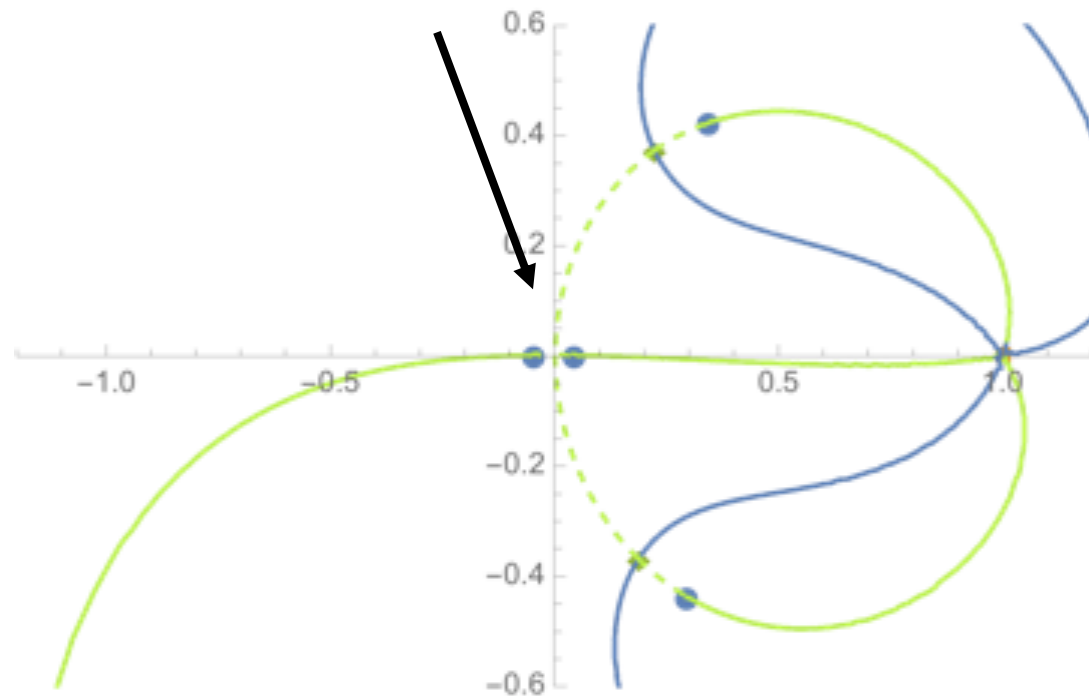


- 結合定数は一定
- 青い線が収縮→弱結合領域のみ
- モノドロミーをもたず一価

60° ひし形トーラスや正方形トーラスになる点が集まるとどうなるか

普通のD-ブレインが  
2枚集まった場合

拡大図

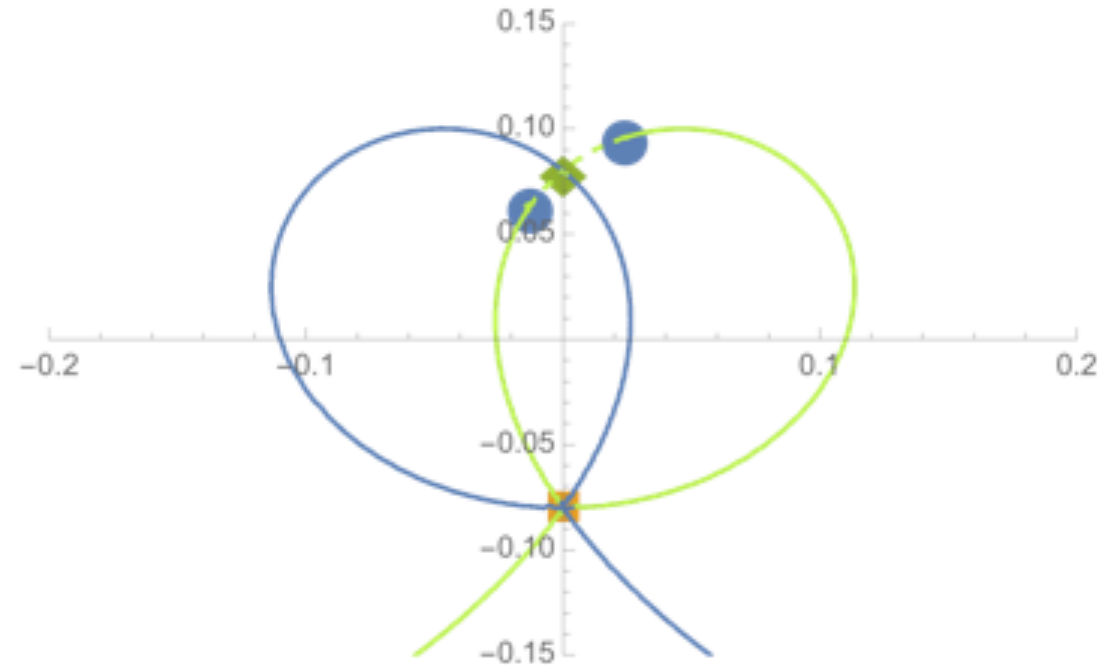
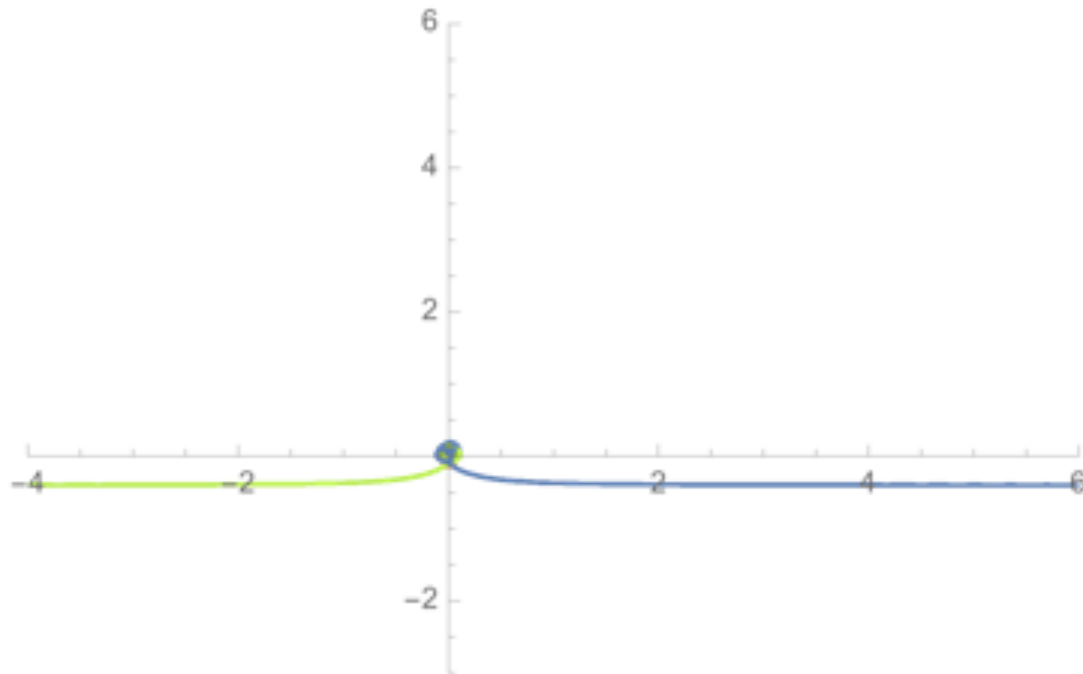


- 緑線と緑点線が2本ずつでる
- 青線は出ない

60° ひし形トーラスや正方形トーラスになる点が集まるとどうなるか

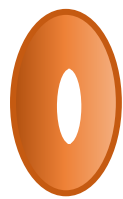
60° ひし形トーラスと正方形トーラスになる点が1つずつ集まった例

拡大図



- 「D-ブレイン」も自動的に2個集まって来る
- 遠方から見ると青線と緑線が出て、普通のD-ブレインとは別のブレインに見える (この場合はD-ブレインと(1,1)-ブレイン)

# 小平分類



60°ひし形  
トーラスに  
なる点の個数



正方形トー  
ラスになる  
点の個数

D-ブレイン  
の個数

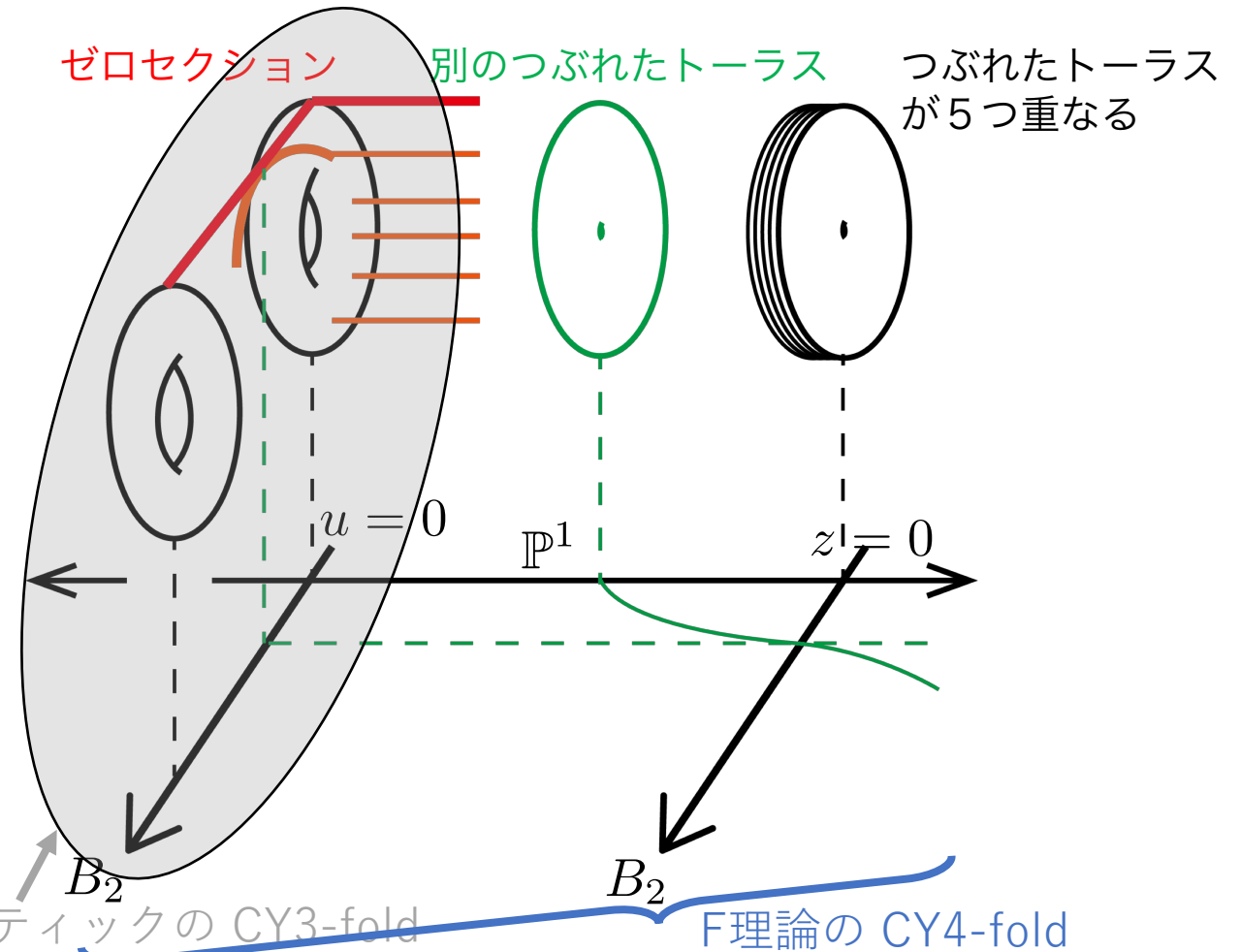
Fiber type	$\text{ord}(f)$	$\text{ord}(g)$	$\text{ord}(\Delta)$	Singularity type
$I_n$	0	0	$n$	$A_{n-1}$
$II$	$\geq 1$	1	2	$A_0$
$III$	1	$\geq 2$	3	$A_1$
$IV$	$\geq 2$	2	4	$A_2$
$I_n^*$	$\geq 2$	3	$6 + n$	$D_{n+4}$
$I_n^*$	2	$\geq 3$	$6 + n$	$D_{n+4}$
$II^*$	$\geq 4$	5	10	$E_8$
$III^*$	3	$\geq 5$	9	$E_7$
$IV^*$	$\geq 3$	4	8	$E_6$

集まる60°ひし形トーラスになる点の個数、正方形トーラスになる点の個数、D-ブレインの個数によって特異点が分類される ➡ 例外群



# E8 × E8へテロティック弦とF理論は双対

- F理論のカラビヤウ4-フォルドは、ヘテロティック弦のカラビヤウ3-フォルドを、その上のインスタントンの情報（運動量空間）を使ってP1方向に引き伸ばして実空間（座標空間）で表したもの（もとの3-フォルドと「スペクトラルカバー」の「ペンシル」）
- “フーリエ-向井変換”（スペクトラルカバー上の直線束からヘテロティック弦のベクター束を構成）



F理論の描像ではブレインがちゃんとあるのでどこからカイラルマターが出ているのか具体的に見ることができる

5. 超弦でカイラルマターはど  
うであるか 3世代を説明でき  
るか

# 超弦でカイラルマターはどうであるか

超弦理論において、カイラルマターの存在を大きく分けて次の2つのやり方で議論することができる

1. 高次元ディラック方程式の内部空間部分のカイラルゼロモードの存在
2. ブレインの交差において、それぞれのブレインに端を持ち交差付近に局在する開弦や「ストリングジャンクション」、あるいはその特異点をブローアップしたときの「例外曲線」の存在

# 1 の例：ヘテロティック弦のカイラルマター

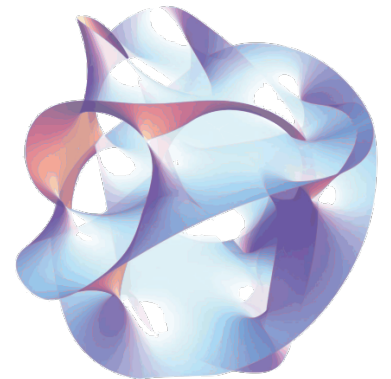
- 10次元 = 4次元時空 × 6次元コンパクト空間の形 と仮定
- 6次元部分のディラック演算子が質量項に見える
- 6次元部分ディラック演算子のゼロモードが4次元の質量のないフェルミオンに対応し、そのカイラリティの差が世代数になる (ディラック演算子の指数(index))

$$D = D^{(4)} + D^{(6)}$$

10次元ディラック演算子
4次元ディラック演算子
6次元ディラック演算子

← 質量項に見える

この中の  
 $D^{(6)}\psi = 0$   
 の解で



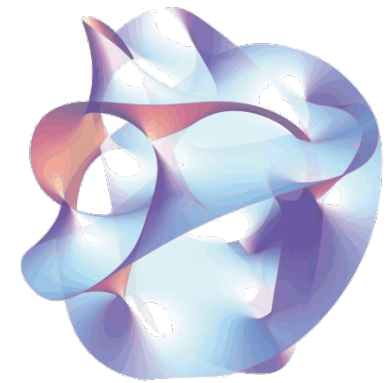
$$\begin{aligned}
 & (\Gamma^{(6)}\psi = +\psi \text{ となる } \psi \text{ の数}) \\
 & - (\Gamma^{(6)}\psi = -\psi \text{ となる } \psi \text{ の数}) \\
 & = \text{「世代数」}
 \end{aligned}$$

# 内部ディラック方程式のゼロモードとしてのカイラルマター

- その他にも、D-ブレーンや local F-GUT で “exceptional brane” と称するブレーン上の高次元 SYM でも、ブレーンが巻いた内部空間部分のディラックゼロモードを数える

- ディラック方程式のゼロモードの正味のカイラリティは「指数定理(index theorem)」で計算できる

この中の  
 $\mathcal{D}^{(6)}\psi = 0$   
の解で

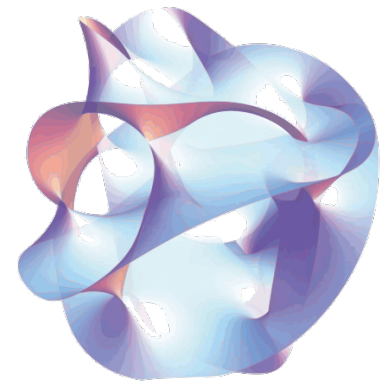


$$\begin{aligned} & (\Gamma^{(6)}\psi = +\psi \text{ となる } \psi \text{ の数}) \\ & - (\Gamma^{(6)}\psi = -\psi \text{ となる } \psi \text{ の数}) \\ & = \text{「世代数」} \end{aligned}$$

# 内部ディラック方程式のゼロモードとしてのカイラルマター

- 指数定理は内部空間の曲率や、内部ゲージ場の曲率（「フラックス」）の関数を積分してゼロモードの正味のカイラリティを計算する公式
- 言い換えれば、フラックスを変えれば世代数はどんな値にも変わる
  - 世代数が3になるようなフラックスの入れ方が特別なわけではない
  - 世代が全体で3になるような入れ方が特別多いわけでもない

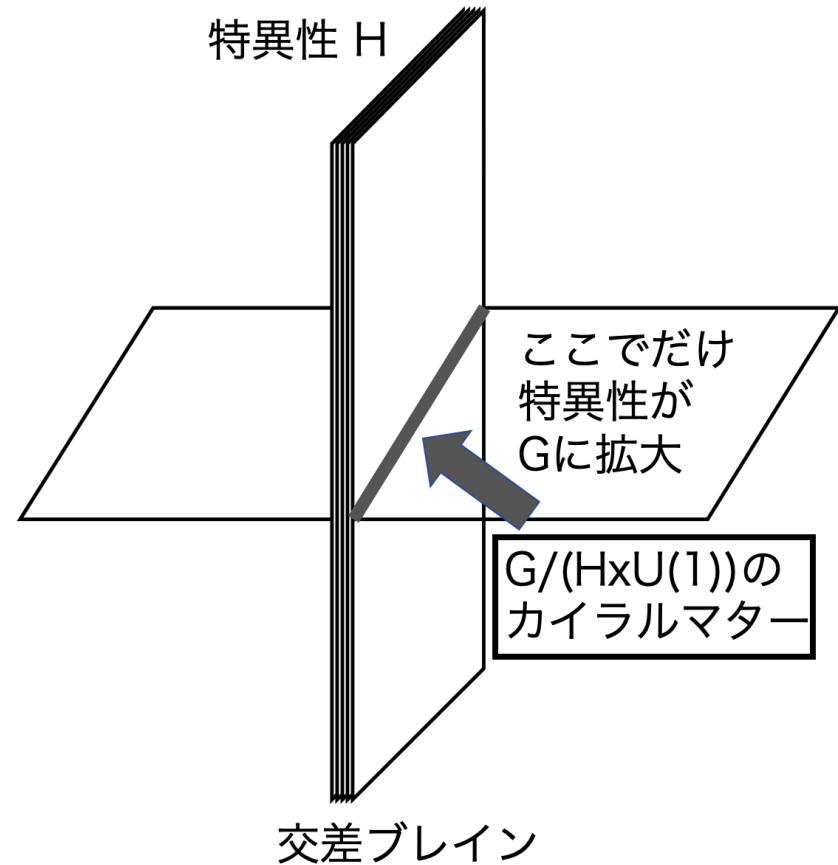
この中の  
 $D^{(6)}\psi = 0$   
の解で



( $\Gamma^{(6)}\psi = +\psi$ となる  $\psi$  の数)  
-( $\Gamma^{(6)}\psi = -\psi$ となる  $\psi$  の数)  
= 「世代数」

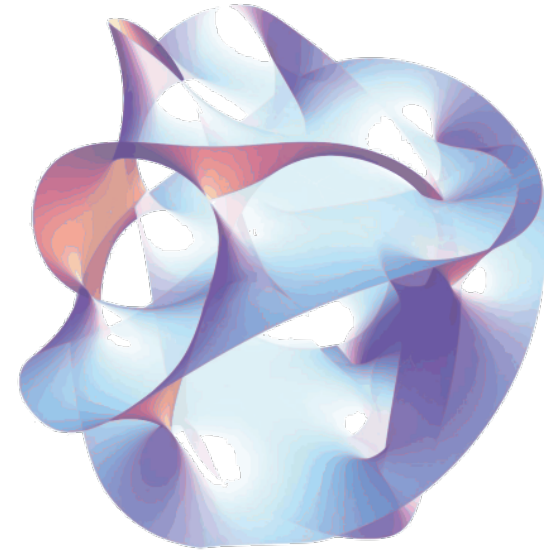
## 2 の例：F理論のカイラルマター

- 重なったブレインに別の1枚のブレインが交差すると、特異性が、ある群 $H$ だったものがランクが高い別の群 $G$ に拡大する
- そこに  $G/(H \times U(1))$  の表現の物質場が生じる
  - D-ブレインの場合には実際に量子化して確かめられる
  - F理論のブレインの場合にはアノマリー相殺によって間接的に示せる



## 2 の例：F 理論のカイラルマター

- この場合世代数はブレインが交差する数と内部のフラックスによる
  - 生成するマターの種類は局所的にはきまっているが、全体としてちょうど「3回交差」するようなブレインの配置が特別なわけではない
  - また全体でちょうど3世代になるようなフラックスの入れ方が特別なわけではない



このような今までの考え方では素粒子がなぜ3世代なのかを説明できない



## 6. LHC/Planck後の素粒子論としての超弦理論とは

# LHC/Planckが示唆するもの

- 重いヒッグズ
- TeVスケールでの新物理なし
- 標準模型のくりこみ群安定性
- インフレーションのスケールは（典型的には）GUTスケール

➡ それまで考えられていなかった、超弦理論が記述するような非常に高いエネルギースケールの物理が、我々の実験観測にかかる物理現象と直接関係している可能性

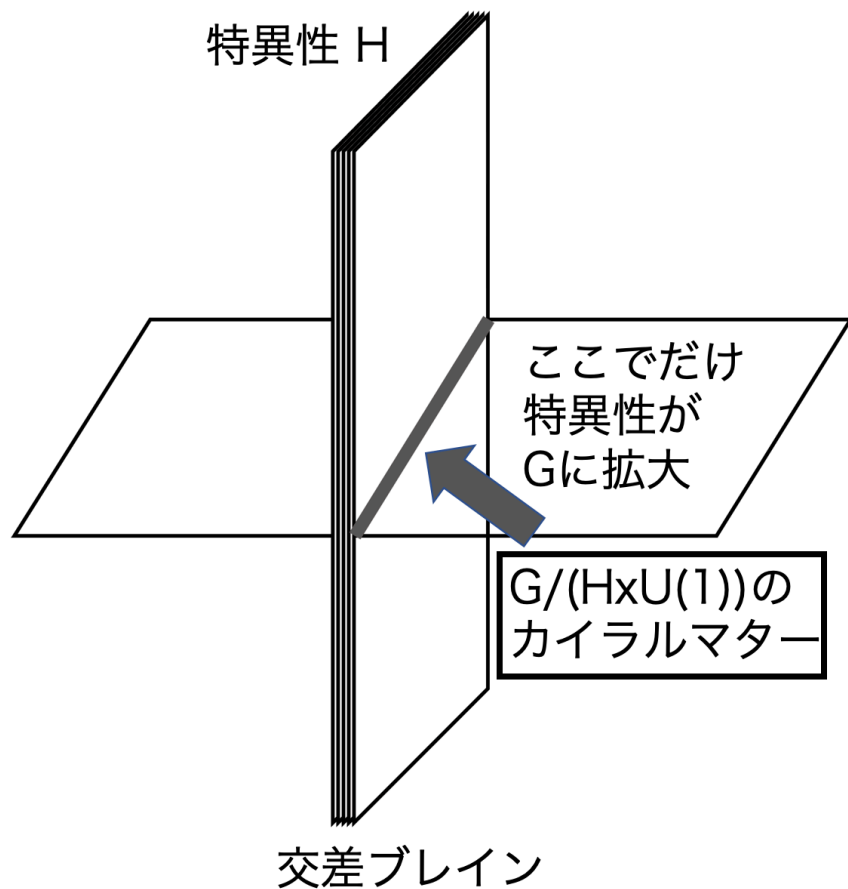
# 今後期待していること

- J-PARC/T2Kはニュートリノがnormalかinvertedかを決定？
- ILCが実現すればヒッグズセクターの詳細？
- ハイパーKでは陽子崩壊が見つかってしまうかも？
- LiteBIRDで原始重力波？

# LHC/Planck後の素粒子論としての 超弦理論

- 低エネルギーSUSY思想の破綻 終焉 → 重力を脱結合しない、重力をも包摂したコンパクト化・大域模型
- 加速膨張と小さな暗黒エネルギー → 宇宙の歴史と相即不離の弦による素粒子論 ヘテロティック弦とF理論の「協奏」
- ランドスケープとスワンブランド
  - cf. Itoyama, Taylor(1987)  
Itoyama, Nakajima(2020)
  - むやみに探すのではなく標準模型の特徴をよく考えた理論の成り立ちの探求 消去法では問題は解けない
  - これまでの研究を例えて言えば、星砂がどこから来たのかを探求するのに、その特徴をよく調べないで、こうすればできる、こうしてもできるなどのように研究をすることに似ている
  - いつまでも静的／定常的な直積時空の仮定でいいのか 非平衡系としての扱いを取り入れる必要

# 3世代の説明のアイデア：内部空間全体でなく局所的になら普遍的な構造がある



特異性の拡大

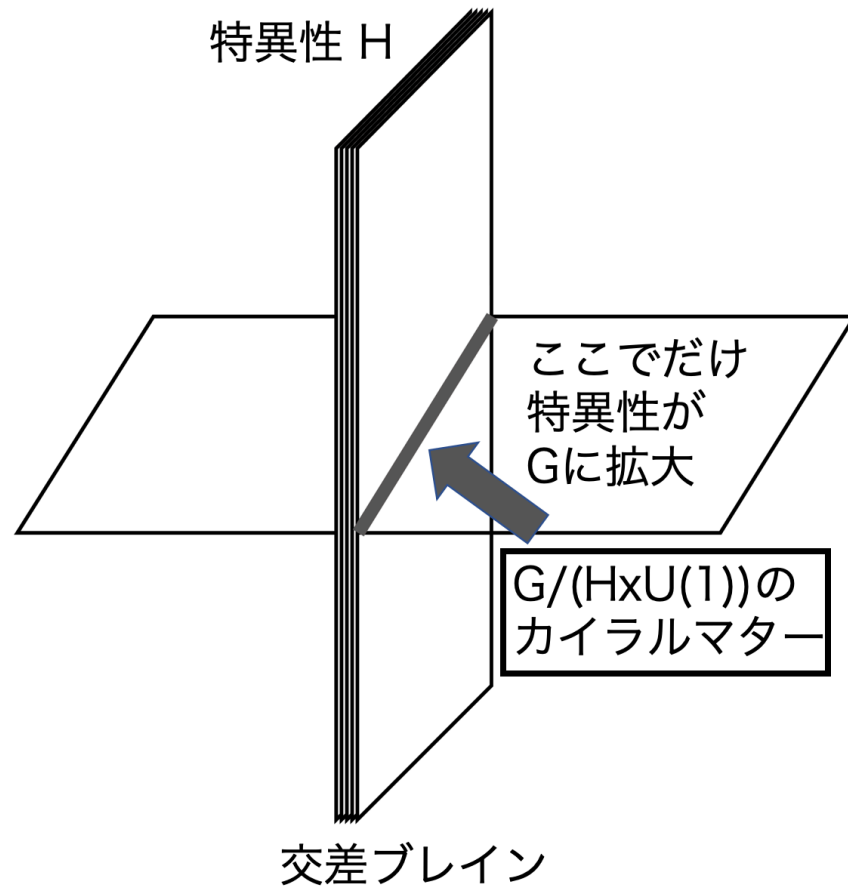
||

「期待値が場所に依存するヒッグズ場」による、自発的に破れた対称性の局所的回復

に見える

☆ このような考え方はヒッグズ発見前夜の2008〜ごろ（重力を切った）「ヒッグズ束」「ローカルF-GUT」などとして大流行した

# F理論のブレインの交差特異点



## 通常の場合

例えば

$$G = SO(10), \quad H = SU(5)$$

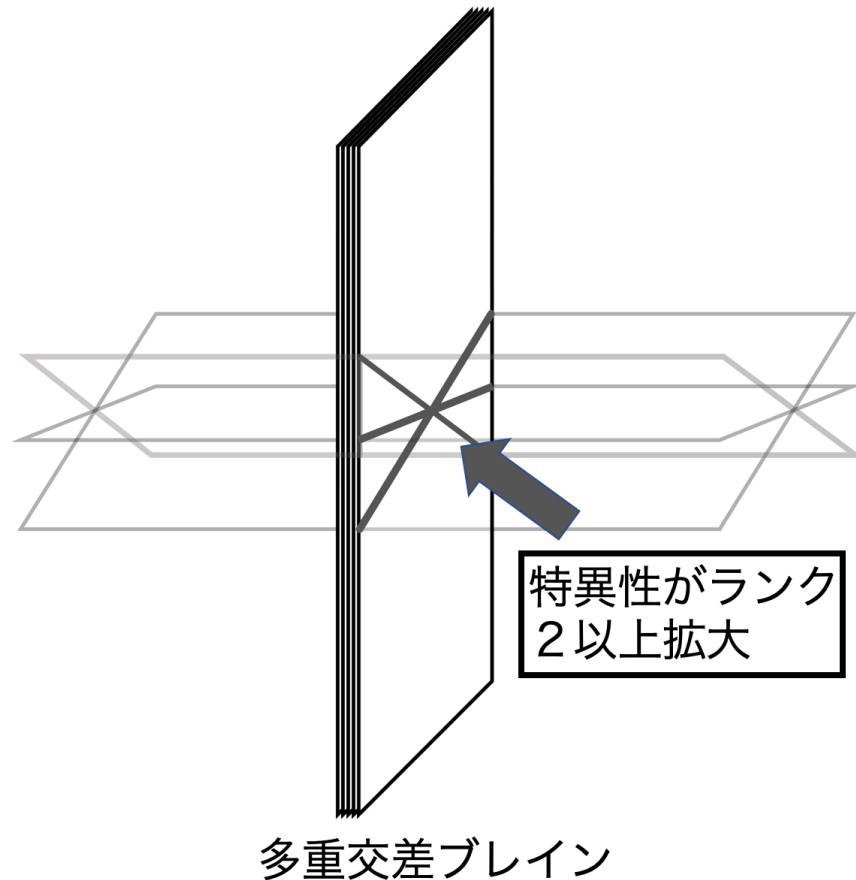
のとき

$$\frac{SO(10)}{(SU(5) \times U(1))} = \mathbf{10}$$

のmatterがでる(6次元)

☆ 4次元ではさらにフラックスを入れてカイラルになる

# F理論の多重特異点による「世代統一」



多重交差の場合

$$SU(5) \rightarrow E_7$$

のとき

$$E_7$$

$$\frac{E_7}{(SU(5) \times U(1)^3)}$$

$$= 3 \times (\mathbf{10} \oplus \bar{\mathbf{5}} \oplus \mathbf{1}) \oplus \mathbf{5}$$

3世代クォーク・レプトン      ヒッグズ

(丸後柳田模型)が内部空間の1点から局所的に実現する可能性

SM(2014)

☆ 4次元でフラックスを入れた場合

# 余次元 3、高階ランク拡大の特異点の構造はまだよくわかっていない

- $SU(5) \rightarrow E7$  への拡大の各段階の中に、“magic square” に現れるリー代数間のランク拡大がいくつも含まれる [Kuramochi, SM, Tani\(2020\)](#)
- そのときには交差するブレインの近づき方によって特異点の構造が変わり、6次元（余次元 2）では half-hypermultiplet になる場合がある
- ブローアップによって生じた「例外曲線」の交差図形が奇妙な非ディンキン図形になる場合がある [Kan, SM, Tani\(2019\)](#)

☆いずれにしても、他の場所から生ずるマターをどうするのかを考える必要がある



# 超弦による模型構築の変遷

- ヘテロティック弦が初めて構成された頃(1986~)

超弦 (ヘテロティック弦)

コンパクト化  
大統一理論

- 膨張宇宙の認識なし
- 定常コンパクト化

素粒子理論

宇宙論とは無関連に発展

- LHC前(1998~2012)

超弦 (タイプII弦、F理論)

D-ブレーン模型  
局所F-GUT模型

- 重力を脱結合
- 低エネルギー超対称性を期待

素粒子理論

LHCで否定された

別個に考察

超弦理論 (タイプII弦)

有効超重力による  
ドジッター/イン  
フレーション

- 標準模型は二の次
- 本当に実現?

宇宙論

- LHC後

ダークマター? ニュートリ  
ノ? ヒッグズセクター? 3  
世代の起源? 陽子崩壊? ...

素粒子理論

- 低エネルギー超対称性の否定  
→ 重力を包摂したコンパクト化・大域模型
- 加速膨張と小さな暗黒エネルギー  
→ 宇宙の歴史と相即不離の弦による素粒子論

小さな宇宙項? イ  
ンフレーション? ...

宇宙論