

Stringy Origin of Minimal Flavor Violation

Hajime Otsuka (KEK)

Reference :

T. Kobayashi and Hajime Otsuka, arXiv: 2108.02700

研究背景

- Flavor/CP対称性とその破れの起源？
- Standard Model Effective Field Theory (SMEFT)

— 新物理の兆候を探る重要なBottom-up approach

$$\mathcal{L}_{\text{SMEFT}} = \mathcal{L}_{\text{SM}} + \frac{c^{(5)}}{\Lambda_{\text{NP}}} \mathcal{O}_5 + \frac{c^{(6)}}{\Lambda_{\text{NP}}} \mathcal{O}_6 + \dots$$

非くり込み項

— Lorentz, SM global/gauge対称性で制限

— 2499個の次元6の演算子 (Flavor/CPの破れに重要):

e.g., $\Delta F = 1$ semi-leptonic operators: $(\bar{L}\gamma^\mu L)(\bar{Q}\gamma_\mu Q), \dots$

研究背景

- SMのFlavor対称性 ($\bar{\psi} i \gamma^\mu D_\mu \psi$)

— $G_F = SU(3)_{Q_L} \times SU(3)_{u_R} \times SU(3)_{d_R} \times SU(3)_{L_L} \times SU(3)_{e_R}$

Quarks/Leptonsの湯川結合の存在で破れる: $\bar{Q}_L Y_U^{ij} u_R^j \bar{H}, \dots$

- Minimal Flavor Violation (MFV) hypothesis : *D' Ambrosio-Giudice-Isidori-Strumia, hep-ph/0207036*

i) 湯川結合 = Flavor対称性の下で非自明な表現 (spurions)

E.g., $Q_L: (3, 1, 1, 1, 1)$ $Y_U: (3, \bar{3}, 1, 1, 1)$
 $u_R: (1, 3, 1, 1, 1)$

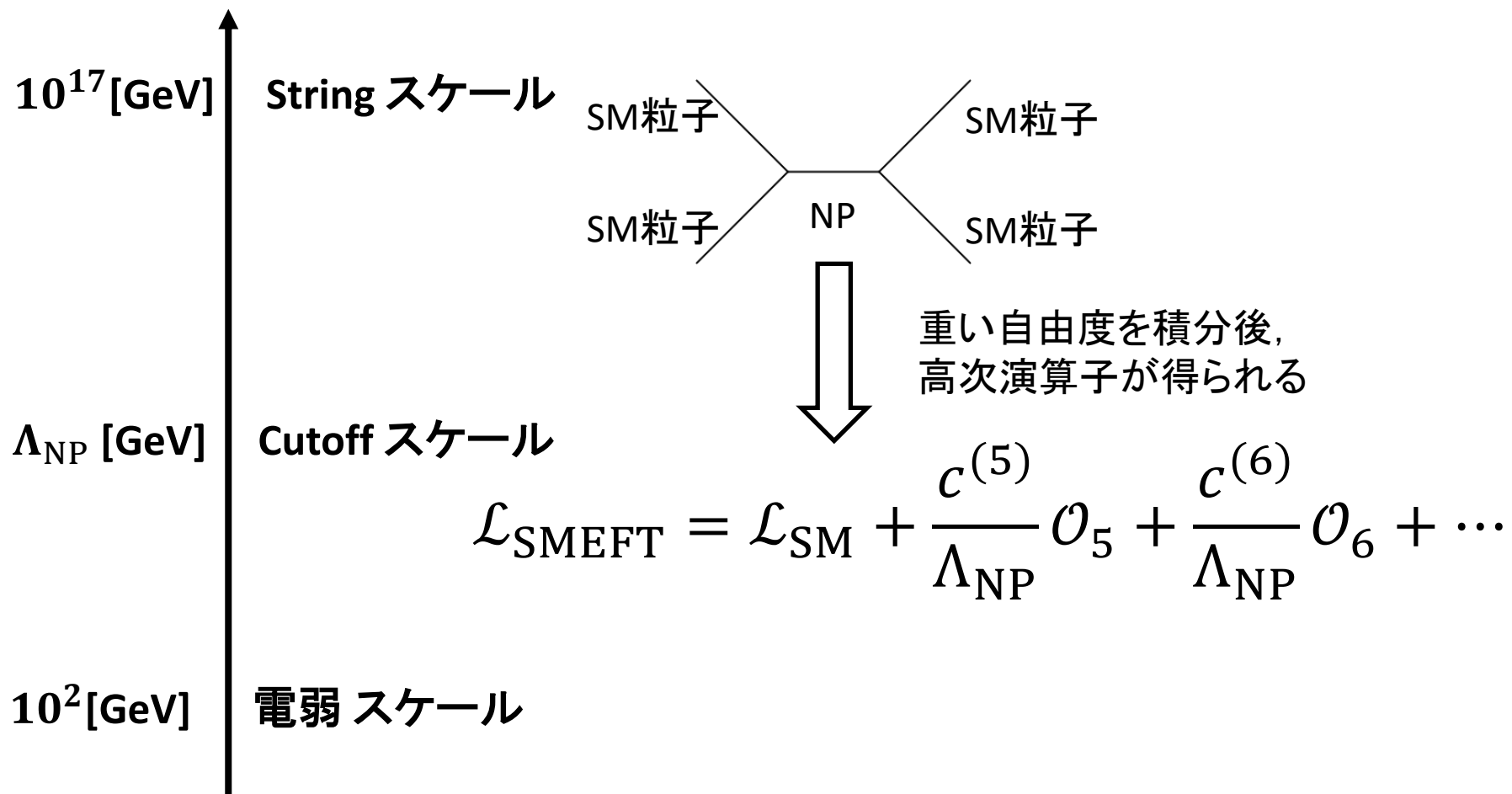
ii) 全ての高次演算子は湯川結合により決定

E.g., $\bar{Q}_L Y_U Y_U^\dagger Q_L$ $Y_U Y_U^\dagger: (8, 1, 1, 1, 1)$

#次元6の演算子: $2499 - > 111$

研究動機

UV物理(弦理論)でのMinimal Flavor Violation (MFV) hypothesis ?

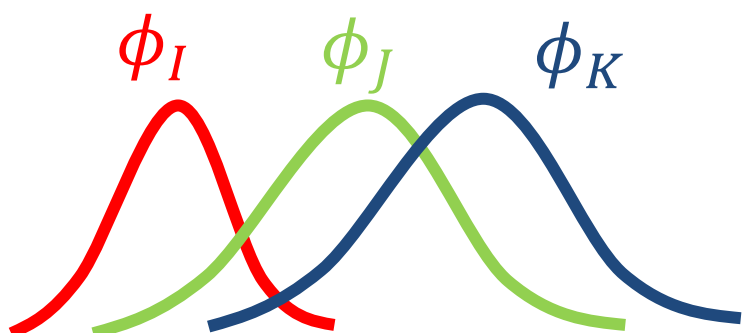


弦理論(高次元理論)に基づく4次元湯川結合

- 4次元湯川結合
= 3個のゼロモード波動関数の重なり積分

$$Y_{IJK} = \int \phi_I \phi_J \phi_K$$

余剰次元空間



湯川結合のもつ重要な性質:

- モジュライ依存 τ (余剰次元空間の変形自由度)
 - $Y(\tau)$ は余剰次元空間の幾何学的対称性の下で非自明に変換 (spurions)
 - Quarks/Leptonsのフレーバー構造

Short Summary

- 4次元 n -点結合
= n 個のゼロモード波動関数の重なり積分

$$Y_{IJ\dots L} = \int \text{余剰次元空間} \phi_I \phi_J \dots \phi_L$$

- 様々な弦理論のEFTsでは,

$$n\text{-点結合} = (\text{湯川結合})^{n-2}$$

$$\text{e.g., 4点} = (\text{湯川結合})^2$$

- 高次演算子に伴うFlavor/CP破れは湯川結合で決定
- 湯川結合は幾何学的対称性の下で非自明に変換 (spurions)

弦理論のEFTsにおけるMFV hypothesis!

6次元 Calabi-Yau (CY) threefolds

- 弦理論の真空解
- $Sp(2h + 2, \mathbb{Z})$ symplectic modular symmetry

h = モジュライ場の数

*A. Strominger ('90),
P. Candelas, X. de la Ossa ('91)*

$$Y_{IJ\dots L} = \int_{\text{6D CY}} \phi_I \phi_J \dots \phi_L$$

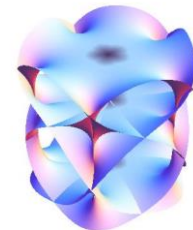
n -点結合のフレーバー対称性
 $\sim$ CYのsymplectic modular symmetry ?

4D SUSY E_6 GUT from Heterotic string on 6D CY

Candelas-Horowitz-Strominger-Witten ('85)

- 4D ゲージ対称性 :

$$E_6 \times E_8^{(\text{hidden})}$$



- 物質場 ($E_6 : 27$ or $\overline{27}$) $\approx$ モジュライ

$$27^i \approx \text{Kähler モジュライ } T^i$$

(余剰次元空間の体積を決定)

- 湯川結合 (27^3)

$$W = F_{ijk} 27^i 27^j 27^k$$

$$F_{ijk} = \partial_{T^i} \partial_{T^j} \partial_{T^k} F \quad (F(T) : \text{prepotential})$$

— 湯川結合は modular symmetry の下でテンソル表現

Symplectic modular symmetry in CY moduli space
 ~ フレーバー対称性

▪ Symplectic 変換 :

モジュライ: $T^i \rightarrow \widetilde{T}^i = (\tilde{X}^0)^{-1} \frac{\partial \tilde{X}^i}{\partial X^j} T^j$

物質場: $27^i \rightarrow \widetilde{27}^i = (\tilde{X}^0)^{1/3} \frac{\partial \tilde{X}^i}{\partial X^j} 27^j$

湯川結合: $F_{ijk} \rightarrow \tilde{F}_{ijk} = \frac{\partial X^l}{\partial \tilde{X}^i} \frac{\partial X^m}{\partial \tilde{X}^j} \frac{\partial X^n}{\partial \tilde{X}^k} F_{lmn}$

(X^0, X^i) : projective coordinates
with the gauge $X^0 = 1$
($i = 1, 2, \dots, h$)

— $Sp(2h + 2, \mathbb{Z})$ の非自明な表現

— フレーバー対称性: $G_{\text{flavor}} \subset Sp(2h + 2, \mathbb{Z})$

Ishiguro-Kobayashi-Otsuka, 2107.00487

— CP対称性 ($27 \rightarrow \overline{27}$): $Sp(2h + 2, \mathbb{Z}) \rtimes CP \simeq GSp(2h + 2, \mathbb{Z})$

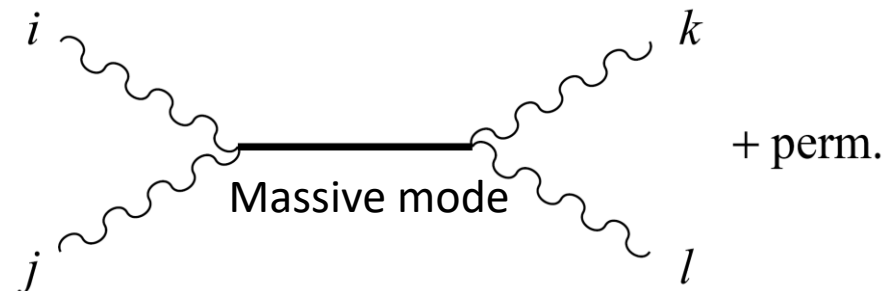
Ishiguro-Kobayashi-Otsuka, 2010.10782

n -点結合in SUSY E_6 GUT

Bershadsky-Cecotti-Ooguri-Vafa ('93)

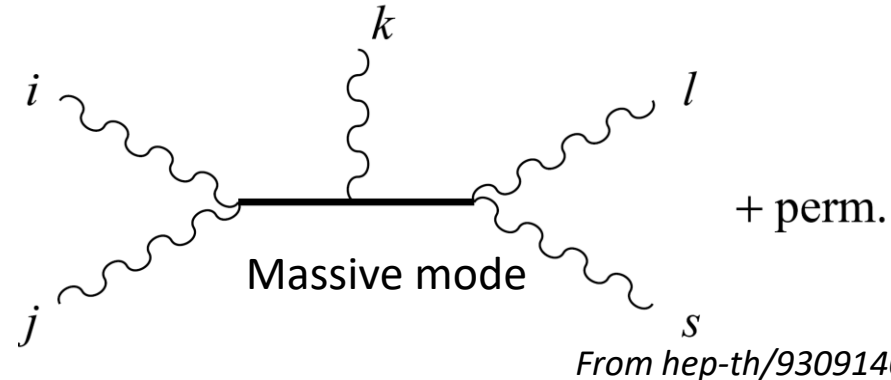
Dimension-5

$$\frac{F_{ijkl}}{\Lambda} 27_i 27_j 27_k 27_l$$



Dimension-6

$$\frac{F_{ijkl s}}{\Lambda^2} 27_i 27_j 27_k 27_l 27_s$$



n -点結合 : $F_{ij\dots n} = \partial_i \partial_j \dots \partial_n F$

F : prepotential

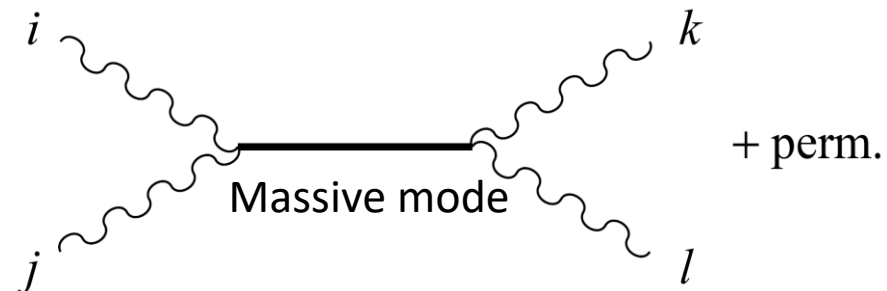
— $Sp(2h + 2, \mathbb{Z})$ の非自明な表現

n -点結合in SUSY E_6 GUT

Bershadsky-Cecotti-Ooguri-Vafa ('93)

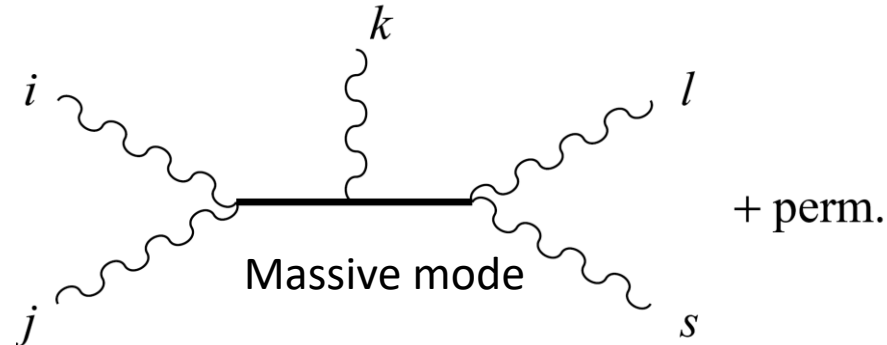
▪ Dimension-5

$$\frac{F_{ijkl}}{\Lambda} 27_i 27_j 27_k 27_l$$



▪ Dimension-6

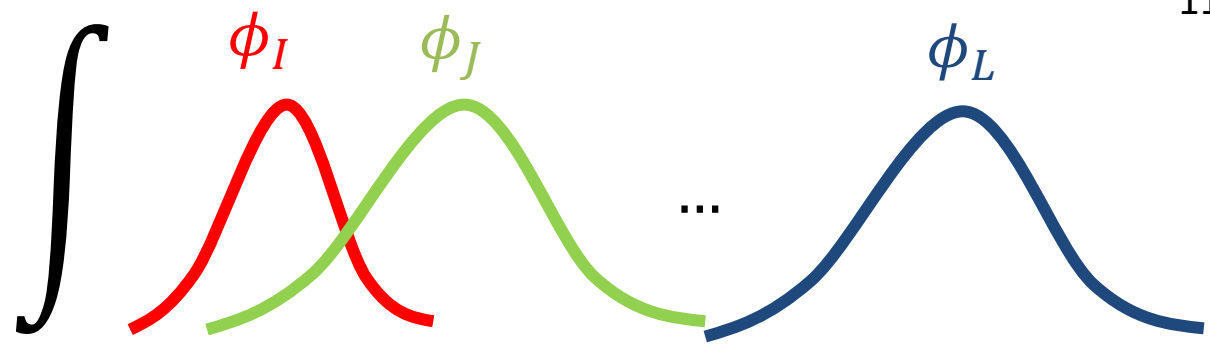
$$\frac{F_{ijkl s}}{\Lambda^2} 27_i 27_j 27_k 27_l 27_s$$



From hep-th/9309140

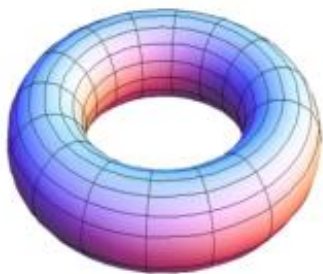
- Prepotential : $F = F_{\text{cubic polynomial}} + F_{\text{instanton}}$

E.g., $F_{ijkl} = \partial_i \partial_j \partial_k \partial_l F_{\text{instanton}}$ は, $\exp(2\pi i \tau)$ の関数 (τ =モジュライ)
 -> Flavorの破れは $\text{Im} \tau \gg 1$ で抑えられる

$$Y_{IJ\dots L} = \int_{\text{余剰次元空間}} \phi_I \phi_J \dots \phi_L$$


(*) n -点結合 = (湯川結合) $^{n-2}$ の実現例:

・ トーラス:



(i) Type IIA intersecting D6-brane models: Cvetič-Papadimitriou ('03),...

(ii) Type IIB D7-brane models:

Cremades-Ibanez-Marchesano ('04), Abe-Choi-Kobayashi-Ohki ('09),...

— 物質場と n -点結合は,

$SL(2, \mathbb{Z})$ (の部分群の) 非自明な表現

Kobayashi-Nagamoto-Takada-Tamba-Tatsuishi ('18),...

・ 他の曲がった時空:

Honda-Kobayashi-Otsuka, 1812.03357

$$(*) \text{ } n\text{-点結合} = (\text{湯川結合})^{n-2}$$

- $\Delta F = 2$ 演算子 :
$$\frac{c_{\bar{i}j\bar{k}l}}{\Lambda^2} (\bar{Q}_i \gamma_\mu P_{L,R} Q_j) (\bar{Q}_k \gamma^\mu P_{L,R} Q_l)$$
- $\Delta F = 1$ semileptonic 演算子 :
$$\frac{d_{\bar{i}j\bar{k}l}}{\Lambda^2} (\bar{Q}_i \gamma_\mu P_{L,R} Q_j) (\bar{L}_k \gamma^\mu P_{L,R} L_l)$$

高次演算子の係数はモジュライ依存の湯川結合で決定 :

$$\sum_m y_{ijm} y_{mkl}$$

ϕ_m : heavy superpartners or stringy modes

- 弦理論のEFTsにおける典型的な湯川結合 : Rank 1 (leading order)
 - U(2) flavor symmetryに対応
 - 最近のB-anomaliesに有用

Barbieri-Isidori-JonesPerez-Lodone-Straub ('11),...

$$(*) \text{ } n\text{-点結合} = (\text{湯川結合})^{n-2}$$

- 湯川結合及び高次演算子のCPの破れは
(共通の) string axions vevで決定される
- String EFTs は, MFV hypothesisを「コンパクト化スケール Λ 」で満たす
- $E < \Lambda$ 以下の物理では,

(i) 特定のmodesがmassive

-> ϕ_{massive} をintegrate out後, $(*)$ を満たす高次演算子が生成

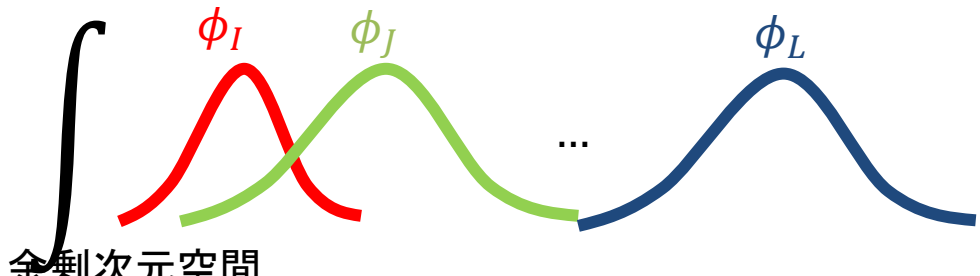
(ii) 特定のmodesが期待値を持つ

— E.g., $y_{ijkl}\langle\phi_i\rangle\phi_j\phi_k\phi_l$

新しい結合 $y_{ijkl}\langle\phi_i\rangle$: spurion as a function of $\langle\phi_i\rangle$ and moduli

Conclusion

- (広いクラスの)弦理論のEFTsは, MFV hypothesisを満たす

$$Y_{IJ\dots L} = \int_{\text{余剰次元空間}} \phi_I \phi_J \dots \phi_L$$


The diagram illustrates the integration of fields ϕ_I , ϕ_J , and ϕ_L over extra dimensions. The curves are colored red, green, and blue respectively, and are labeled with their corresponding field symbols. The integration is performed over the extra-dimensional space, as indicated by the text '余剰次元空間' (Extra-dimensional space) below the integral sign.

— n -点結合 = (湯川結合) $^{n-2}$
(2D CFTのOPEに由来)

1. 湯川結合は幾何学的対称性の下で非自明に変換 (spurions)
2. 高次演算子に伴うFlavor/CP破れは湯川結合で決定

- MFV機構は,
コンパクト化スケール以下の低エネルギー有効理論で機能

Appendix

- S_4 フレーバー対称性

$$W = 27^1 27^2 27^3$$

$$F_{123} = 1, \text{ otherwise } 0$$

- Invariant under two generators

$$P : 1 \rightarrow 3, 2 \rightarrow 1, 3 \rightarrow 2$$

$$Q : 1 \rightarrow -1, 2 \rightarrow -3, 3 \rightarrow 2$$

- S_4 triplet : $\{27^1, 27^2, 27^3\}$

- $S_4 \subset Sp(2 \times 3 + 2, \mathbb{Z}) = \boxed{Sp(8, \mathbb{Z})}$

- 特定の6D Calabi-YausとToroidal orbifoldで実現