

フレーバー対称性と多成分暗黒物質

大川翔平

高エネルギー加速器研究機構 (KEK)

理論センター



(11.2023 -)

Based on collaboration with

Federico Mescia (INFN LNF), Keyun Wu (ICCUB, Barcelona), arXiv: 240x.xxxxx

30/04/2024 セミナー@東京理科大学

目次

■ 導入

- ▶ 素粒子の標準模型
 - ▶ 粒子のフレーバーとその破れ
 - ▶ Minimal Flavor Violation (MFV) 仮説
- ▶ 暗黒物質

■ MFV仮説に基づく暗黒物質模型

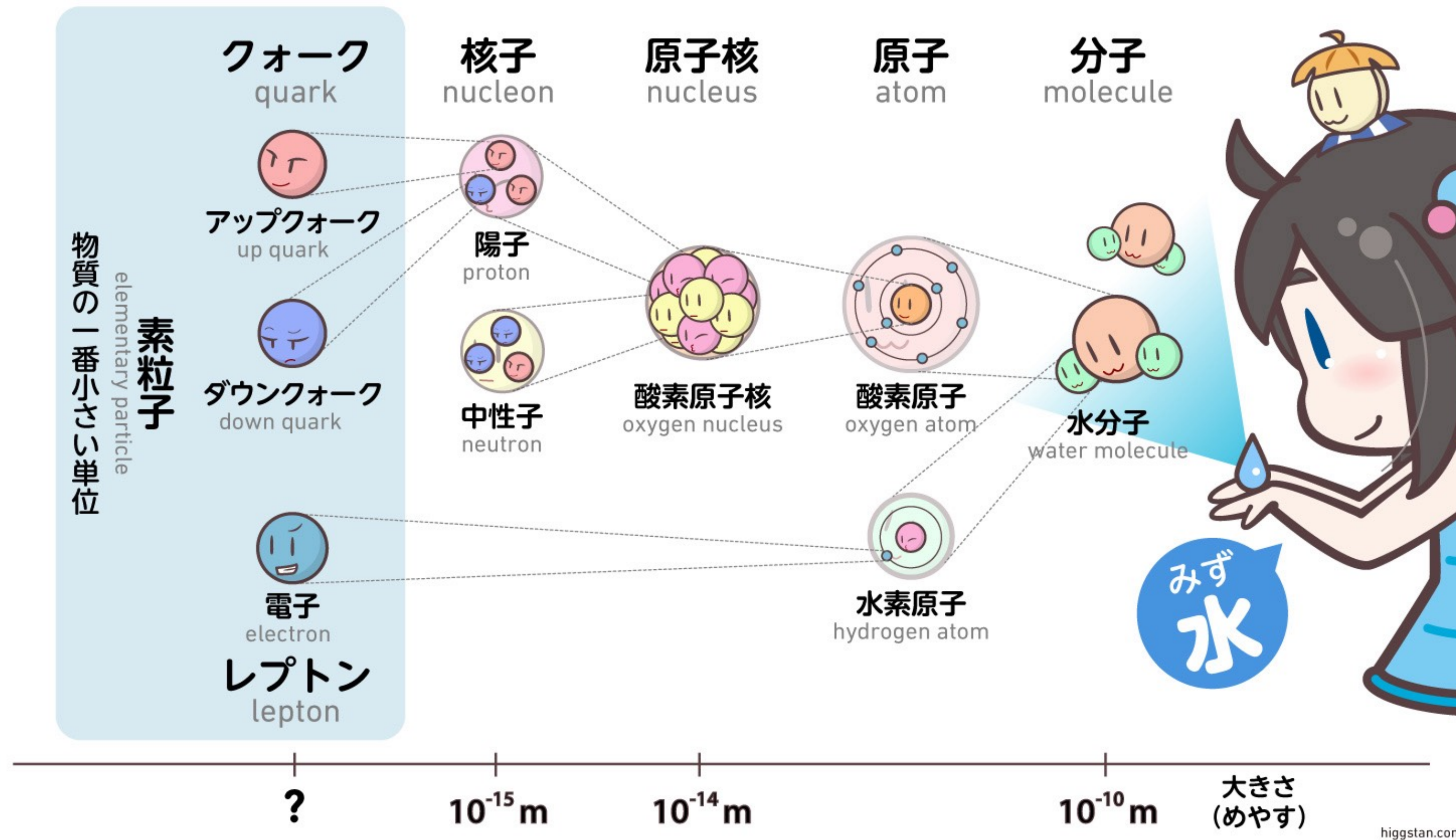
- ▶ 1 成分模型 [Batell, Pradler, Spannowsky, JHEP 08 (2011) 038]
- ▶ 多成分模型 [Mescia, SO, Wu, 240x.xxxxx]

導入

素粒子とは

小さい

大きい



素粒子物理＝素粒子とその相互作用を調べる学問

素粒子の標準模型

物質を構成

力を媒介

物質粒子 matter (fermions)				ゲージ粒子 gauge bosons		
クォーク quarks	第1世代	第2世代	第3世代	電磁気力 electromagnetic	 光子 (フォトン)	
	 アップ クォーク	 チャーム クォーク	 トップ クォーク		強い力 strong	 グルーオン
	 ダウン クォーク	 ストレンジ クォーク	 ボトム クォーク			 ウィークボソン
	レプトン leptons	 電子	 ミュー粒子	 タウ粒子	弱い力 weak	ヒッグス粒子 Higgs bosons
		 電子 ニュートリノ	 ミュー ニュートリノ	 タウ ニュートリノ		 ヒッグス粒子

素粒子に
質量を与える

物質粒子の世代とフレーバー

	電荷 Charge	スピン Spin	世代 Generation		
			I	II	III
クォーク Quarks	+2/3	1/2			
			up	charm	top
	-1/3	1/2			
			down	strange	bottom
	-1	1/2			
			electron	muon	tau
レプトン Leptons	0	1/2			
			electron neutrino	muon neutrino	tau neutrino

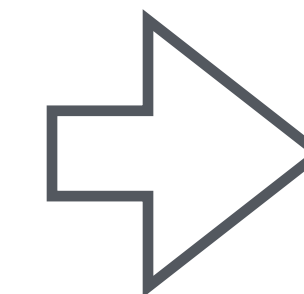
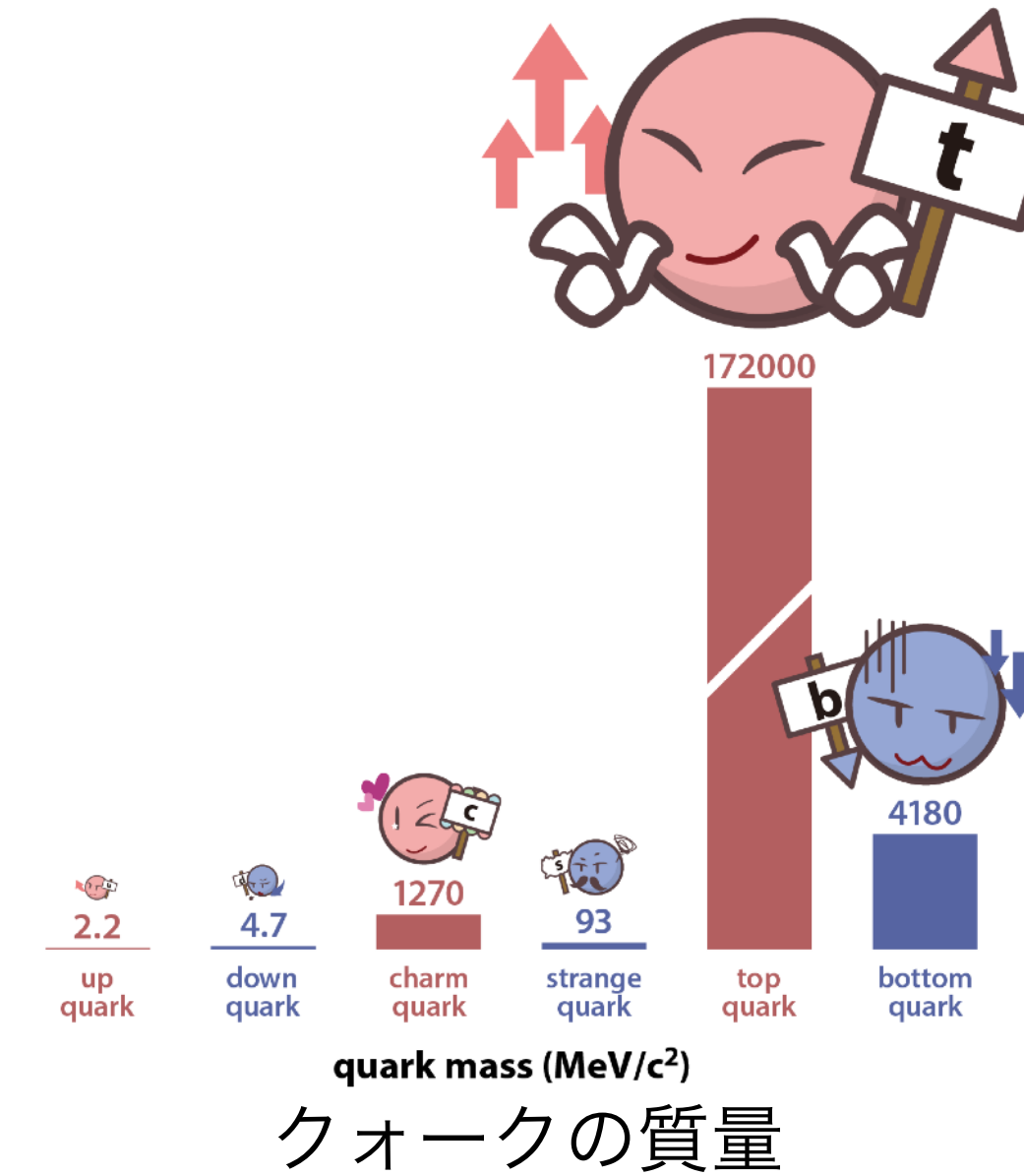
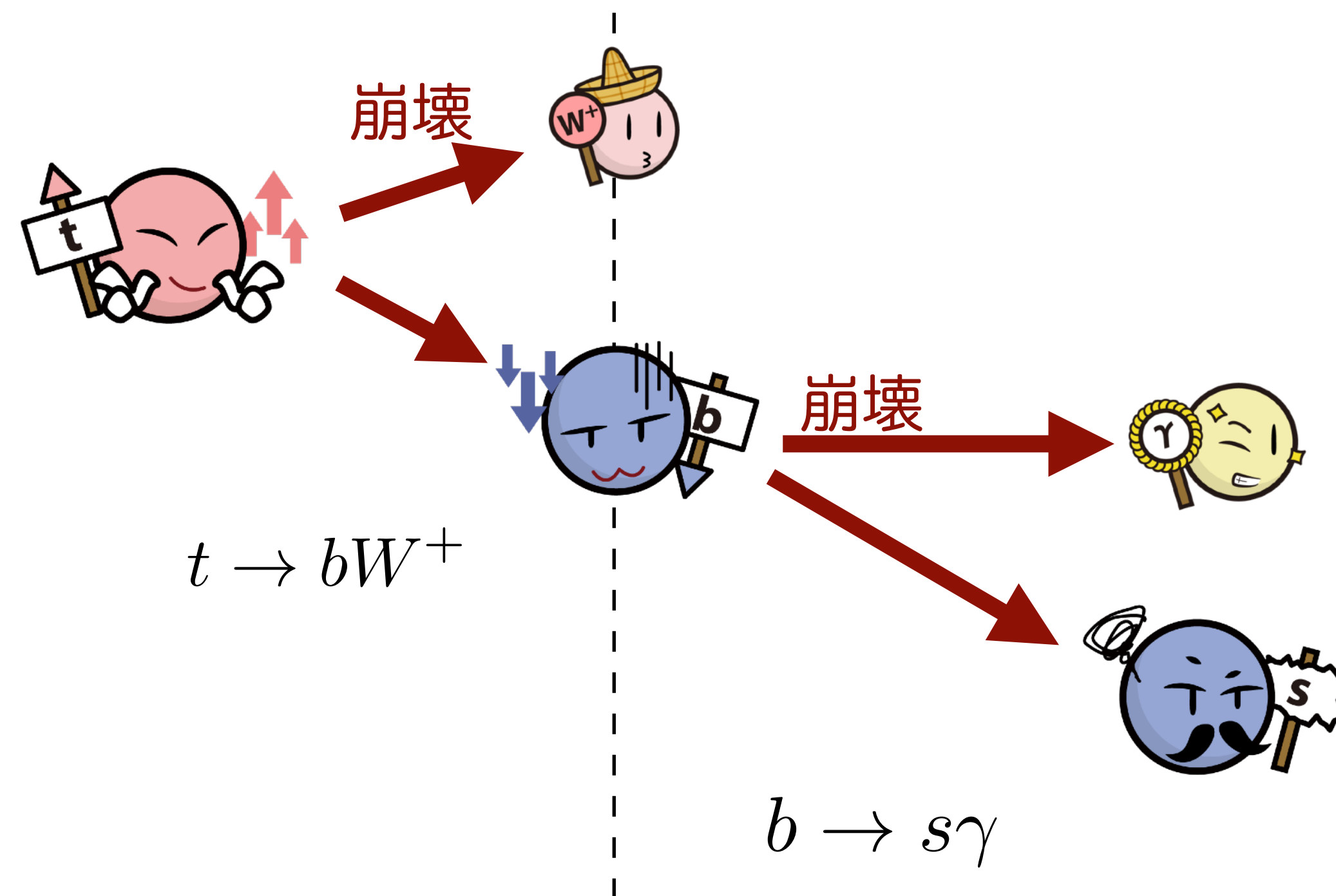
- ▶ 性質が同じ粒子の繰り返りで構成される
→ 「世代」構造
- ▶ 粒子の世代や種類の違いを「フレーバー」とも呼ぶ

物質粒子のクォークとレプトンはそれぞれ
「3世代6フレーバー」から成る

物質粒子の世代とフレーバー

フレーバーの異なる物質粒子は質量で区別される

- ▶ フレーバーを変える様々な過程が起こる



これまで観測された全ての過程は標準模型の予言と無矛盾

標準模型のフレーバー構造

▶ 標準模型のフレーバー対称性

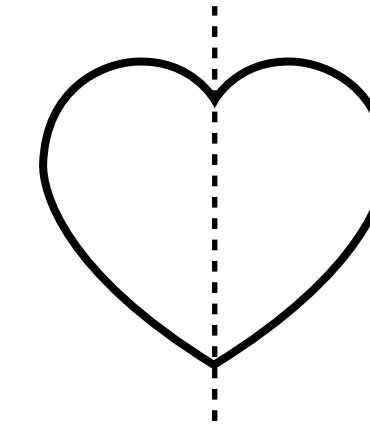
$$\mathcal{G}_F = \mathrm{SU}(3)_{q_L} \times \mathrm{SU}(3)_{u_R} \times \mathrm{SU}(3)_{d_R} \times \mathrm{SU}(3)_{\ell_L} \times \mathrm{SU}(3)_{e_R}$$

フレーバーの異なる粒子の‘回転’

$$\begin{pmatrix} u_R \\ c_R \\ t_R \end{pmatrix} \rightarrow U_R \begin{pmatrix} u_R \\ c_R \\ t_R \end{pmatrix}$$

3×3ユニタリ行列

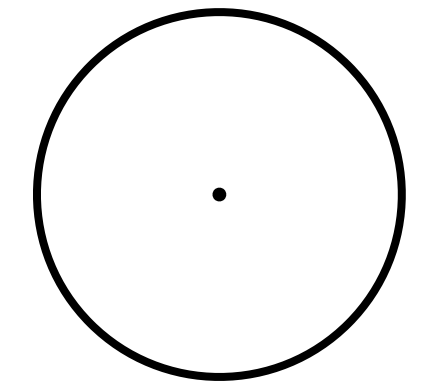
線対称



折り返しても不変

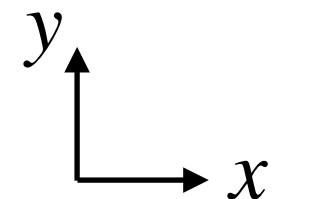
$$x \rightarrow -x$$

点対称



中心点周りで
回転しても不変

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$$



▶ 湯川結合で破れている

$$\mathcal{L} \supset (\bar{q}_L^1 \quad \bar{q}_L^2 \quad \bar{q}_L^3) Y_u \begin{pmatrix} u_R \\ c_R \\ t_R \end{pmatrix} \tilde{H} \xrightarrow{\mathcal{G}_F} (\bar{q}_L^1 \quad \bar{q}_L^2 \quad \bar{q}_L^3) \underbrace{V_L^\dagger Y_u U_R}_{\neq Y_u} \begin{pmatrix} u_R \\ c_R \\ t_R \end{pmatrix} \tilde{H}$$

➡ フレーバーを変える過程は湯川結合でコントロールされる

新物理模型とフレーバー対称性

一般に、標準模型を超える新物理では、**湯川結合以外にフレーバーを変える相互作用**がある

▶ フレーバー対称性を適当に破ると観測と矛盾しがち。なので工夫する。

■ **Minimal Flavor Violation (MFV) 仮説** : Chivukula, Georgi (1987); Hall, Randall (1990); D'Ambrosio et al. (2002)

▶ 湯川結合に**非自明な変換則**を持たせる

$$Y_u \xrightarrow{\mathcal{G}_F} V_L Y_u U_R^\dagger \quad \Rightarrow \quad \mathcal{L} \supset \tilde{H} \begin{pmatrix} \bar{q}_L^1 & \bar{q}_L^2 & \bar{q}_L^3 \end{pmatrix} Y_u \begin{pmatrix} u_R \\ c_R \\ t_R \end{pmatrix} \quad \text{は見かけ上、フレーバー対称}$$

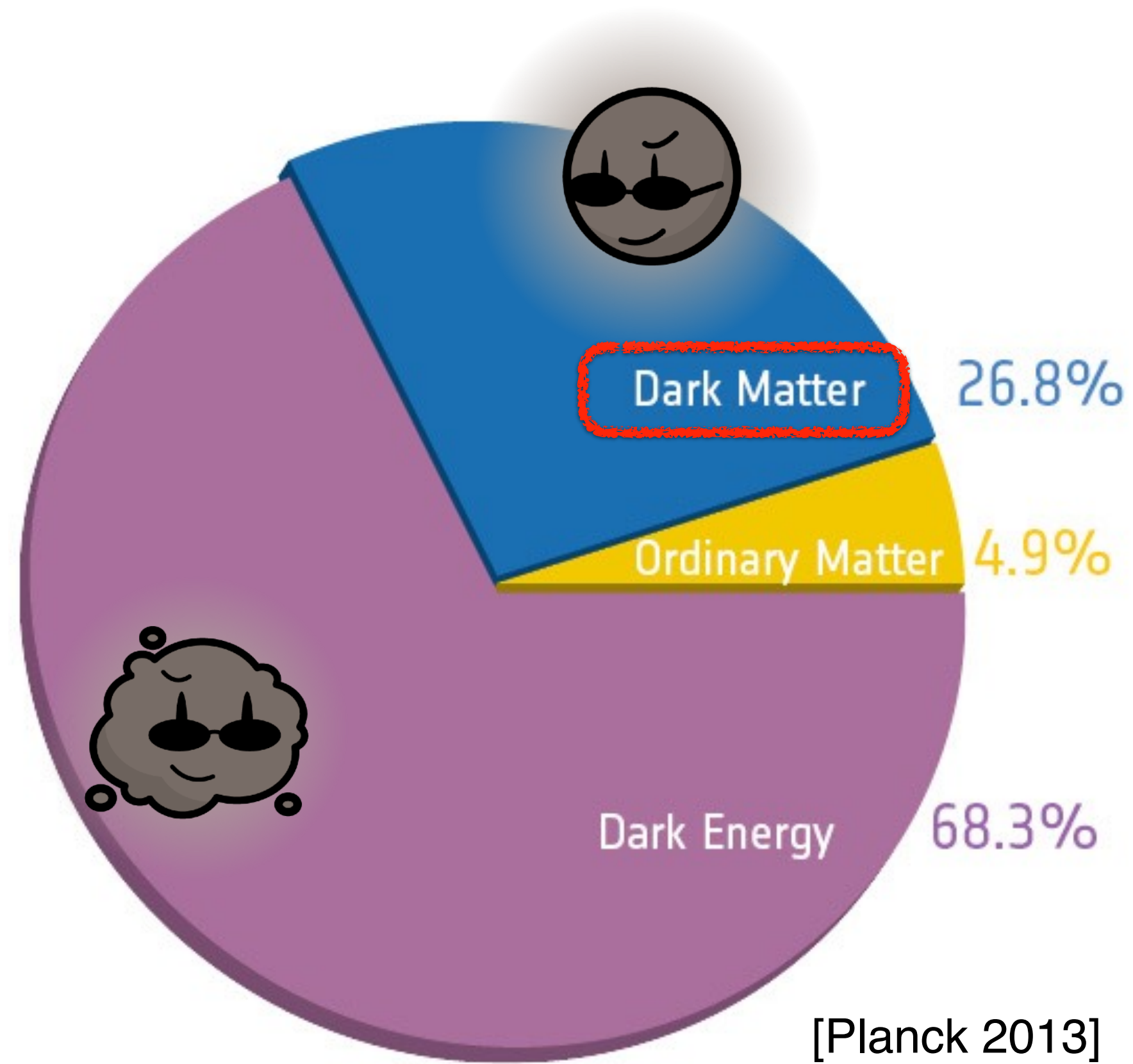
▶ 全ての相互作用は、その変換則のもとで不変になることを要請

$$\mathcal{L}_{\text{NP}} = g_{ij} V_\mu \bar{q}_{Li} \gamma^\mu q_{Lj} \quad \Rightarrow \quad \mathcal{L}_{\text{NP}} = (\delta_{ij} + (Y_u Y_u^\dagger)_{ij} + \dots) V_\mu \bar{q}_{Li} \gamma^\mu q_{Lj}$$

一般にはフレーバー対称性を破る
(V_μ : 新しいベクトル粒子)

単位行列と湯川結合だけで書けるものとする

暗黒物質



通常の物質：水素、ヘリウム、...

- ▶ 宇宙の組成の**約95%は謎**
- ▶ 宇宙の組成の**約4分の1は暗黒物質**
- ▶ 宇宙の構造（銀河など）を形成するのに不可欠

物質粒子 matter (fermions)						ゲージ粒子 gauge bosons	
第1世代		第2世代		第3世代		電磁気力 electromagnetic	強い力 strong
クォーク quarks							
アップ クォーク		チャーム クォーク		トップ クォーク		光子 (フォトン)	グルーオン
ダウン クォーク		ストレンジ クォーク		ボトム クォーク			
レプトン leptons						弱い力 weak	ウィークボソン
電子		ミュー粒子		タウ粒子			
電子 ニュートリノ		ミュー ニュートリノ		タウ ニュートリノ		ヒッグス粒子 Higgs bosons	ヒッグス粒子

宇宙のエネルギー密度の割合

暗黒物質の証拠：銀河の回転曲線

銀河は回転している

- ▶ 遠心力と重力のつりあい（球対称）

$$\underbrace{m \frac{v(r)^2}{r}}_{\text{遠心力}} = \underbrace{m \frac{G M(r)}{r^2}}_{\text{重力}} \quad (M(r) : \text{半径 } r \text{ 内の総質量})$$

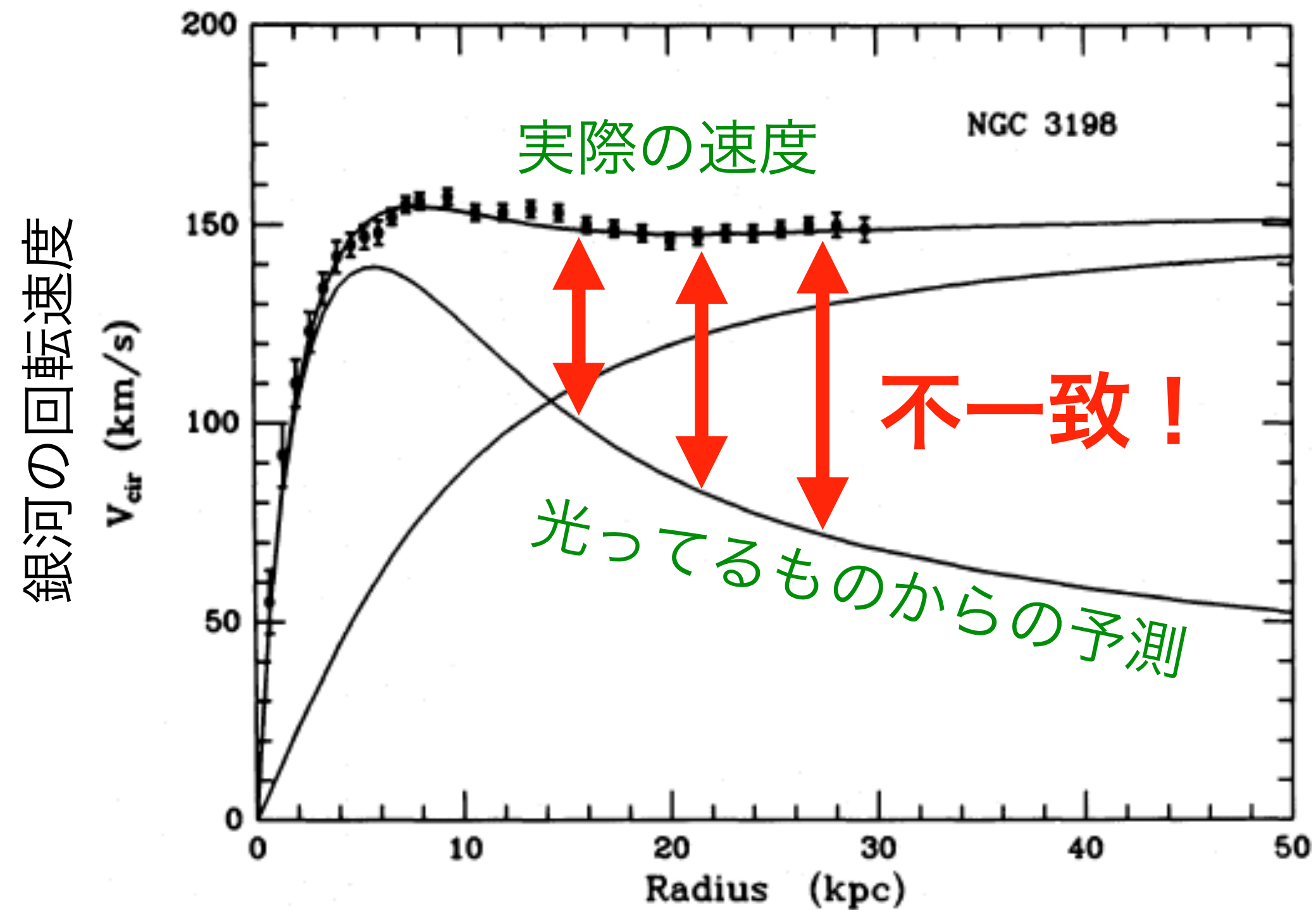


NGC1300 [Wikipedia - Galaxy]

- ▶ $M(r)$ は質量分布 $\rho(r)$ が分かれば計算できる： $M(r) = \int_0^r 4\pi x^2 dx \rho(x)$

→ 銀河の中の星の**回転速度**と**質量分布**を比較できる

暗黒物質の証拠：銀河の回転曲線



[van Albada et al, 1985]



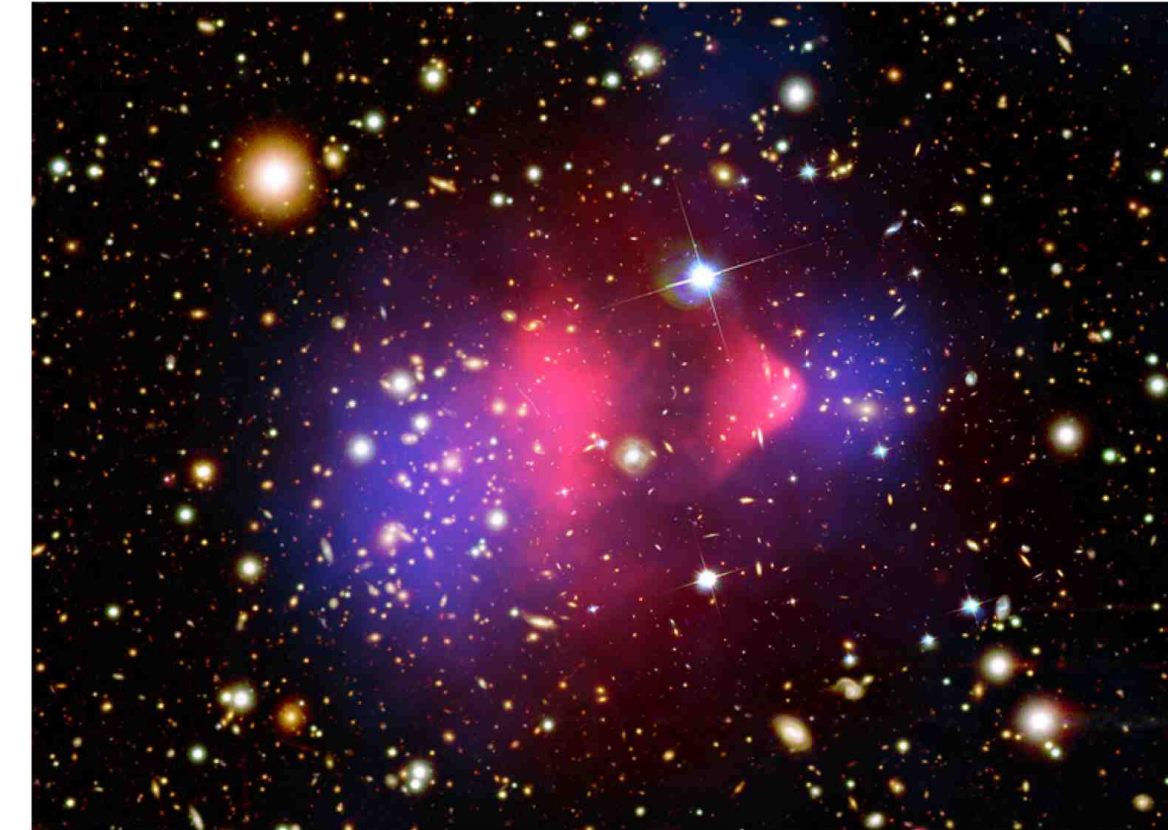
NGC1300 [Wikipedia - Galaxy]

- ▶ 通常物質：光ってるものが質量の大部分を占める（恒星など）
- ▶ 光っているもの以外に重力相互作用するものがある → **暗黒物質**

暗黒物質の証拠；その他

光ってないだけで通常物質じゃないの？

- ▶ 弾丸銀河団：2つの銀河団の衝突直後の様子
 - ▶ 質量分布とX線の像がずれている
 - ▶ 通常物質をすり抜ける、摩擦がない何かがある



- ▶ 宇宙マイクロ波背景放射 (CMB)
 - ▶ 天球上の全方向からほぼ等方的に飛んでくる電磁波
 - ▶ 光とほとんど相互作用しないが重力ポテンシャルを作る何かが必要

暗黒物質の性質

知っていること

- ▶ 残存量
- ▶ 電荷を持たない
- ▶ 安定（宇宙年齢より長寿命）
- ▶ 運動する速度が遅い（質量を持つ）

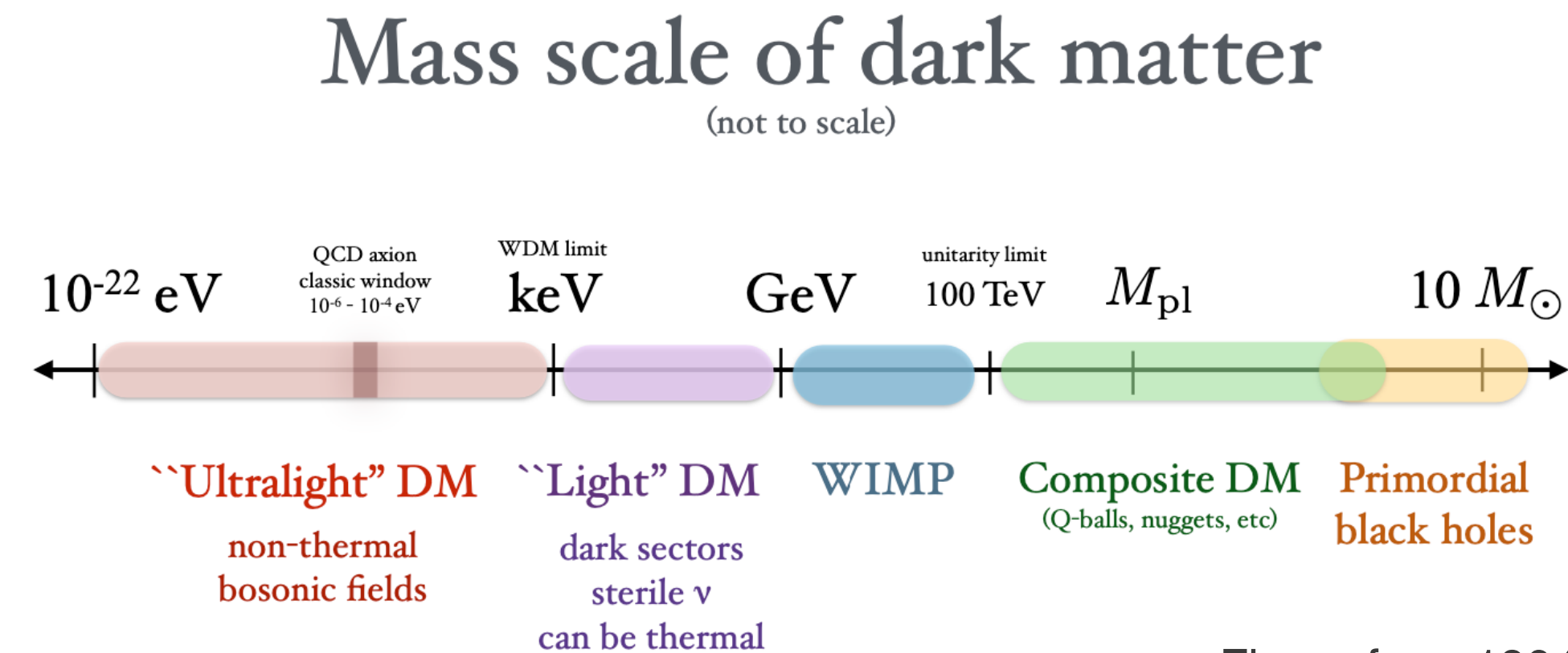


Figure from 1904.07915

知らないこと＝上記以外のほぼ全て

- ▶ 素粒子かどうかさえ不明
- ▶ 電荷を持ってなくて、安定で質量があればなんでも良い

候補が多すぎる。。。-> 何か**原理**が必要

この講演(後半)のポイント

Minimal Flavor Violation ってフレーバー物理以外で役に立たないのか？

▶ MFVを原理とした時に、暗黒物質に関して何ができるか

1. 安定性が保証される
2. 多成分になることがある

前半のまとめ

- 素粒子のクォーク・レプトンにはフレーバー（種類）がある
 - ▶ フレーバーを変える過程の観測は、標準模型を支持
 - ▶ 新物理のモデルでは **Minimal Flavor Violation (MFV)** をしばしば仮定
- **暗黒物質**は素粒子論の問題の一つ
 - ▶ 電荷を持ってなくて、安定で質量があればなんでも良い
 - ▶ その他の性質は不明
- 後半の講演：MFVは暗黒物質の理解に役立つか？



MFV仮説と暗黒物質

Dark Matter from Minimal Flavor Violation

Batell, Pradler, Spannowsky (2011)

MFVは暗黒物質の安定性を保証する

- ▶ QCDカラーを持たないが、フレーバーを持つ新しい場を考える

$$\chi \sim \underbrace{(n_{q_L}, m_{q_L})}_{\text{SU}(3)_{q_L}} \times \underbrace{(n_{u_R}, m_{u_R})}_{\text{SU}(3)_{u_R}} \times \underbrace{(n_{d_R}, m_{d_R})}_{\text{SU}(3)_{d_R}}$$

Dynkin Coefficients
(対称群の表現を指定する数)

例. (n,m)=(1,0): 3表現
(1,1): 8表現

- ▶ 崩壊演算子は一般に以下のように書ける

$$\mathcal{O}_{\text{decay}} = \chi \underbrace{q_L \dots \bar{q}_L}_{A \bar{A}} \dots \underbrace{u_R \dots \bar{u}_R}_{B \bar{B}} \dots \underbrace{d_R \dots \bar{d}_R}_{C \bar{C}} \dots$$

$$\times \underbrace{Y_u \dots Y_u^\dagger}_{D \bar{D}} \dots \underbrace{Y_d \dots Y_d^\dagger}_{E \bar{E}} \dots \mathcal{O}_{\text{weak}}$$

電弱対称性とローレンツ対称性
を保つための演算子

Dark Matter from Minimal Flavor Violation

Batell, Pradler, Spannowsky (2011)

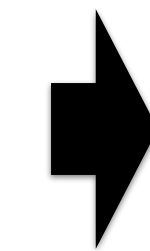
- ▶ 崩壊演算子を書けるなら、QCD&フレーバー不変性から次の式が成り立つ

$$\text{SU}(3)_c : (A + B + C - \bar{A} - \bar{B} - \bar{C}) \bmod 3 = 0,$$

$$\text{SU}(3)_{q_L} : (n_{q_L} - m_{q_L} + A - \bar{A} + D - \bar{D} + E - \bar{E}) \bmod 3 = 0,$$

$$\text{SU}(3)_{u_R} : (n_{u_R} - m_{u_R} + B - \bar{B} - D + \bar{D}) \bmod 3 = 0,$$

$$\text{SU}(3)_{d_R} : (n_{d_R} - m_{d_R} + C - \bar{C} - E + \bar{E}) \bmod 3 = 0,$$



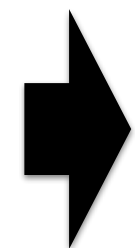
χ が崩壊する条件

$$(n_\chi - m_\chi) \bmod 3 = 0$$

$$n_\chi = n_{q_L} + n_{u_R} + n_{d_R}$$

$$m_\chi = m_{q_L} + m_{u_R} + m_{d_R}$$

- ▶ χ が安定 $\rightarrow$ 崩壊演算子を書けてはいけない



$$(n_\chi - m_\chi) \bmod 3 \neq 0$$

χ の安定性条件

フレーバー暗黒物質

どんなフレーバー表現が条件を満たす？

(n, m)	$SU(3)_Q \times SU(3)_{u_R} \times SU(3)_{d_R}$	Stable?
(0,0)	(1, 1, 1)	
(1,0)	(3 , 1, 1), (1, 3 , 1), (1, 1, 3)	Yes
(0,1)	($\bar{\mathbf{3}}$, 1, 1), (1, $\bar{\mathbf{3}}$, 1), (1, 1, $\bar{\mathbf{3}}$)	Yes
(2,0)	(6 , 1, 1), (1, 6 , 1), (1, 1, 6) (3 , 3 , 1), (3 , 1, 3), (1, 3 , 3)	Yes
(0,2)	($\bar{\mathbf{6}}$, 1, 1), (1, $\bar{\mathbf{6}}$, 1), (1, 1, $\bar{\mathbf{6}}$) ($\bar{\mathbf{3}}$, $\bar{\mathbf{3}}$, 1), ($\bar{\mathbf{3}}$, 1, $\bar{\mathbf{3}}$), (1, $\bar{\mathbf{3}}$, $\bar{\mathbf{3}}$)	Yes
(1,1)	(8 , 1, 1), (1, 8 , 1), (1, 1, 8) (3 , $\bar{\mathbf{3}}$, 1), (3 , 1, $\bar{\mathbf{3}}$), (1, 3 , $\bar{\mathbf{3}}$) ($\bar{\mathbf{3}}$, 3 , 1), ($\bar{\mathbf{3}}$, 1, 3), (1, $\bar{\mathbf{3}}$, 3)	

- ▶ **スピンと電弱ゲージ群の表現は何でも良い**
(電荷を持たない限り)
- ▶ 条件を満たす表現は無限にある
- ▶ 一番軽い粒子の安定性だけが保証される
-> 重い粒子は崩壊する (後述)

ベンチマーク模型

ゲージ 1 重項スカラー $S \sim (\mathbf{1}, \mathbf{3}, \mathbf{1})$ ($\mathrm{SU}(3)_{q_L} \times \mathrm{SU}(3)_{u_R} \times \mathrm{SU}(3)_{d_R}$ のもとでの変換性)

■ MFVで許される相互作用

▶ スカラーポテンシャル

$$\begin{aligned} V(H, S) = & m_S^2 S_i^* \left(a_0 \delta_{ij} + \epsilon a_1 (Y_u^\dagger Y_u)_{ij} + \dots \right) S_j && \text{質量項} \\ & + \lambda S_i^* \left(b_0 \delta_{ij} + \epsilon b_1 (Y_u^\dagger Y_u)_{ij} + \dots \right) S_j (H^\dagger H) && \text{ヒッグス場との相互作用} \\ & + \left(\lambda_0 \delta_{ij} \delta_{kl} + \epsilon \lambda_1 \delta_{ij} (Y_u^\dagger Y_u)_{kl} + \dots \right) S_i^* S_j S_k^* S_l && \text{自己相互作用} \end{aligned}$$

ベンチマーク模型

ゲージ 1 重項スカラー $S \sim (\mathbf{1}, \mathbf{3}, \mathbf{1})$ ($\mathrm{SU}(3)_{q_L} \times \mathrm{SU}(3)_{u_R} \times \mathrm{SU}(3)_{d_R}$ のもとでの変換性)

■ MFVで許される相互作用

▶ スカラーポテンシャル

$$\begin{aligned} V(H, S) = & m_S^2 S_i^* \left(a_0 \delta_{ij} + \epsilon a_1 (Y_u^\dagger Y_u)_{ij} + \dots \right) S_j && \text{質量項} \\ & + \lambda S_i^* \left(b_0 \delta_{ij} + \epsilon b_1 (Y_u^\dagger Y_u)_{ij} + \dots \right) S_j (H^\dagger H) && \text{ヒッグス場との相互作用} \\ & + \left(\lambda_0 \delta_{ij} \delta_{kl} + \epsilon \lambda_1 \delta_{ij} (Y_u^\dagger Y_u)_{kl} + \dots \right) S_i^* S_j S_k^* S_l && \text{自己相互作用} \end{aligned}$$



$$V(H, S) \supset \left\{ a_0 m_S^2 + b_0 \frac{\lambda v^2}{2} + \epsilon \left(a_1 m_S^2 + b_1 \frac{\lambda v^2}{2} \right) (y_u^i)^2 \right\} S_i^* S_i$$

ϵ までで止めると

$$+ \frac{\lambda}{2} (b_0 + \epsilon b_1 (y_u^i)^2) (2vh + h^2) S_i^* S_i$$

+ 自己相互作用

ベンチマーク模型

ゲージ 1 重項スカラー $S \sim (\mathbf{1}, \mathbf{3}, \mathbf{1})$ ($\mathrm{SU}(3)_{q_L} \times \mathrm{SU}(3)_{u_R} \times \mathrm{SU}(3)_{d_R}$ のもとでの変換性)

■ MFVで許される相互作用

▶ スカラーポテンシャル

$$\begin{aligned} V(H, S) = & m_S^2 S_i^* \left(a_0 \delta_{ij} + \epsilon a_1 (Y_u^\dagger Y_u)_{ij} + \dots \right) S_j && \text{質量項} \\ & + \lambda S_i^* \left(b_0 \delta_{ij} + \epsilon b_1 (Y_u^\dagger Y_u)_{ij} + \dots \right) S_j (H^\dagger H) && \text{ヒッグス場との相互作用} \\ & + \left(\lambda_0 \delta_{ij} \delta_{kl} + \epsilon \lambda_1 \delta_{ij} (Y_u^\dagger Y_u)_{kl} + \dots \right) S_i^* S_j S_k^* S_l && \text{自己相互作用} \end{aligned}$$



$$V(H, S) \supset \left\{ \underbrace{a_0 m_S^2 + b_0 \frac{\lambda v^2}{2}}_{\text{flavor independent}} + \epsilon \underbrace{\left(a_1 m_S^2 + b_1 \frac{\lambda v^2}{2} \right) (y_u^i)^2}_{\text{flavor dependent}} \right\} S_i^* S_i$$

ϵ までで止めると

flavor independent

flavor dependent

ベンチマーク模型

ゲージ 1 重項スカラー $S \sim (\mathbf{1}, \mathbf{3}, \mathbf{1})$ ($\mathrm{SU}(3)_{q_L} \times \mathrm{SU}(3)_{u_R} \times \mathrm{SU}(3)_{d_R}$ のもとでの変換性)

■ MFVで許される相互作用

▶ スカラーポテンシャル

$$\begin{aligned} V(H, S) = & m_S^2 S_i^* \left(a_0 \delta_{ij} + \epsilon a_1 (Y_u^\dagger Y_u)_{ij} + \dots \right) S_j && \text{質量項} \\ & + \lambda S_i^* \left(b_0 \delta_{ij} + \epsilon b_1 (Y_u^\dagger Y_u)_{ij} + \dots \right) S_j (H^\dagger H) && \text{ヒッグス場との相互作用} \\ & + \left(\lambda_0 \delta_{ij} \delta_{kl} + \epsilon \lambda_1 \delta_{ij} (Y_u^\dagger Y_u)_{kl} + \dots \right) S_i^* S_j S_k^* S_l && \text{自己相互作用} \end{aligned}$$



$$V(H, S) \supset \left\{ \underbrace{a_0 m_S^2 + b_0 \frac{\lambda v^2}{2}}_{\text{flavor independent}} + \epsilon \underbrace{\left(a_1 m_S^2 + b_1 \frac{\lambda v^2}{2} \right) (y_u^i)^2}_{\text{flavor dependent}} \right\} S_i^* S_i$$

ϵ までで止めると

$$= \left\{ m_0^2 + \epsilon m_1^2 (y_u^i)^2 \right\} S_i^* S_i =: M_i^2 S_i^* S_i$$

ベンチマーク模型

ゲージ 1 重項スカラー $S \sim (\mathbf{1}, \mathbf{3}, \mathbf{1})$ ($\text{SU}(3)_{q_L} \times \text{SU}(3)_{u_R} \times \text{SU}(3)_{d_R}$ のもとでの変換性)

■ MFVで許される相互作用

▶ スカラーポテンシャル

$$\begin{aligned} V(H, S) = & m_S^2 S_i^* \left(a_0 \delta_{ij} + \epsilon a_1 (Y_u^\dagger Y_u)_{ij} + \dots \right) S_j && \text{質量項} \\ & + \lambda S_i^* \left(b_0 \delta_{ij} + \epsilon b_1 (Y_u^\dagger Y_u)_{ij} + \dots \right) S_j (H^\dagger H) && \text{ヒッグス場との相互作用} \\ & + \left(\lambda_0 \delta_{ij} \delta_{kl} + \epsilon \lambda_1 \delta_{ij} (Y_u^\dagger Y_u)_{kl} + \dots \right) S_i^* S_j S_k^* S_l && \text{自己相互作用} \end{aligned}$$

εまでで止めると

$$\begin{aligned} \Rightarrow V(H, S) \supset & \left\{ \underbrace{a_0 m_S^2 + b_0 \frac{\lambda v^2}{2}}_{\text{flavor independent}} + \epsilon \underbrace{\left(a_1 m_S^2 + b_1 \frac{\lambda v^2}{2} \right) (y_u^i)^2}_{\text{flavor dependent}} \right\} S_i^* S_i \Rightarrow \frac{M_3^2 - M_1^2}{M_2^2 - M_1^2} = \frac{y_t^2 - y_u^2}{y_c^2 - y_u^2} \simeq \frac{y_t^2}{y_c^2} \\ & = \{ m_0^2 + \epsilon m_1^2 (y_u^i)^2 \} S_i^* S_i =: M_i^2 S_i^* S_i \end{aligned}$$

質量差の比が预言される！

ベンチマーク模型

- ▶ 高次元演算子を書いても良い

例. 次元 6 演算子

$$\mathcal{L}_{d=6} = \frac{1}{\Lambda^2} \left(\sum_I c_{ijkl}^I \mathcal{O}_{ijkl}^I + c_{ij}^g \mathcal{O}_{ij}^g + c_{ij}^\gamma \mathcal{O}_{ij}^\gamma \right)$$

$$\mathcal{O}_{ijkl}^1 = (\bar{q}_{Li} \gamma^\mu q_{Lj}) (S_k^* i \overleftrightarrow{\partial}_\mu S_l),$$

$$\mathcal{O}_{ijkl}^3 = (\bar{d}_{Ri} \gamma^\mu d_{Rj}) (S_k^* i \overleftrightarrow{\partial}_\mu S_l),$$

$$\mathcal{O}_{ijkl}^5 = (\bar{q}_{Li} H d_{Rj}) (S_k^* S_l),$$

$$\mathcal{O}_{ij}^\gamma = (S_i^* S_j) F_{\mu\nu} F^{\mu\nu}.$$

$$\mathcal{O}_{ijkl}^2 = (\bar{u}_{Ri} \gamma^\mu u_{Rj}) (S_k^* i \overleftrightarrow{\partial}_\mu S_l),$$

$$\mathcal{O}_{ijkl}^4 = \left(\bar{q}_{Li} \tilde{H} u_{Rj} \right) (S_k^* S_l),$$

$$\mathcal{O}_{ij}^g = (S_i^* S_j) G_{\mu\nu} G^{\mu\nu},$$

ベンチマーク模型

- ▶ 高次元演算子を書いても良い

例. 次元 6 演算子

$$\mathcal{L}_{d=6} = \frac{1}{\Lambda^2} \left(\sum_I c_{ijkl}^I \mathcal{O}_{ijkl}^I + c_{ij}^g \mathcal{O}_{ij}^g + c_{ij}^\gamma \mathcal{O}_{ij}^\gamma \right)$$

$$\begin{aligned} \mathcal{O}_{ijkl}^1 &= (\bar{q}_{Li} \gamma^\mu q_{Lj}) (S_k^* i \overleftrightarrow{\partial}_\mu S_l), & \mathcal{O}_{ijkl}^2 &= (\bar{u}_{Ri} \gamma^\mu u_{Rj}) (S_k^* i \overleftrightarrow{\partial}_\mu S_l), \\ \mathcal{O}_{ijkl}^3 &= (\bar{d}_{Ri} \gamma^\mu d_{Rj}) (S_k^* i \overleftrightarrow{\partial}_\mu S_l), & \mathcal{O}_{ijkl}^4 &= (\bar{q}_{Li} \tilde{H} u_{Rj}) (S_k^* S_l), \\ \mathcal{O}_{ijkl}^5 &= (\bar{q}_{Li} H d_{Rj}) (S_k^* S_l), & \mathcal{O}_{ij}^g &= (S_i^* S_j) G_{\mu\nu} G^{\mu\nu}, \\ \mathcal{O}_{ij}^\gamma &= (S_i^* S_j) F_{\mu\nu} F^{\mu\nu}. \end{aligned}$$

複雑なフレーバー構造に見えるが、

MFVと唱えると、係数は以下のように決まる

$$\begin{aligned} c_{ijkl}^4 &= c_1^4 (Y_u)_{ij} \delta_{kl} + c_2^4 (Y_u)_{il} \delta_{kj} \\ &+ \epsilon \left[c_3^4 (Y_u Y_u^\dagger Y_u)_{ij} \delta_{kl} + c_4^4 (Y_u Y_u^\dagger Y_u)_{il} \delta_{kj} + c_5^4 (Y_u)_{ij} (Y_u^\dagger Y_u)_{kl} + c_6^4 (Y_u)_{il} (Y_u^\dagger Y_u)_{jl} \right] \\ &+ \dots, \end{aligned}$$

ベンチマーク模型

- ▶ 高次元演算子を書いても良い

例. 次元 6 演算子

$$\mathcal{L}_{d=6} = \frac{1}{\Lambda^2} \left(\sum_I c_{ijkl}^I \mathcal{O}_{ijkl}^I + c_{ij}^g \mathcal{O}_{ij}^g + c_{ij}^\gamma \mathcal{O}_{ij}^\gamma \right)$$

重い粒子の崩壊を引き起こす

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{d=6} &\sim \frac{c_2^4}{\Lambda^2} \left(\bar{q}_{Li} (Y_u)_{ij} S_j \right) \tilde{H} (S_k^* \delta_{kl} u_{Rl}) + \text{h.c.} \\ &\sim \frac{c_2^4}{\Lambda^2} \bar{u}_i (m_u^i P_R + m_u^j P_L) u_j (S_j^* S_i) \end{aligned}$$

$$\mathcal{O}_{ijkl}^1 = (\bar{q}_{Li} \gamma^\mu q_{Lj}) (S_k^* i \overleftrightarrow{\partial}_\mu S_l),$$

$$\mathcal{O}_{ijkl}^3 = (\bar{d}_{Ri} \gamma^\mu d_{Rj}) (S_k^* i \overleftrightarrow{\partial}_\mu S_l),$$

$$\mathcal{O}_{ijkl}^5 = (\bar{q}_{Li} H d_{Rj}) (S_k^* S_l),$$

$$\mathcal{O}_{ij}^\gamma = (S_i^* S_j) F_{\mu\nu} F^{\mu\nu}.$$

$$\mathcal{O}_{ijkl}^2 = (\bar{u}_{Ri} \gamma^\mu u_{Rj}) (S_k^* i \overleftrightarrow{\partial}_\mu S_l),$$

$$\mathcal{O}_{ijkl}^4 = \left(\bar{q}_{Li} \tilde{H} u_{Rj} \right) (S_k^* S_l),$$

$$\mathcal{O}_{ij}^g = (S_i^* S_j) G_{\mu\nu} G^{\mu\nu},$$



$$S_3 \rightarrow S_1 t \bar{u}, S_2 t \bar{c} \quad \text{フレーバーが保存}$$

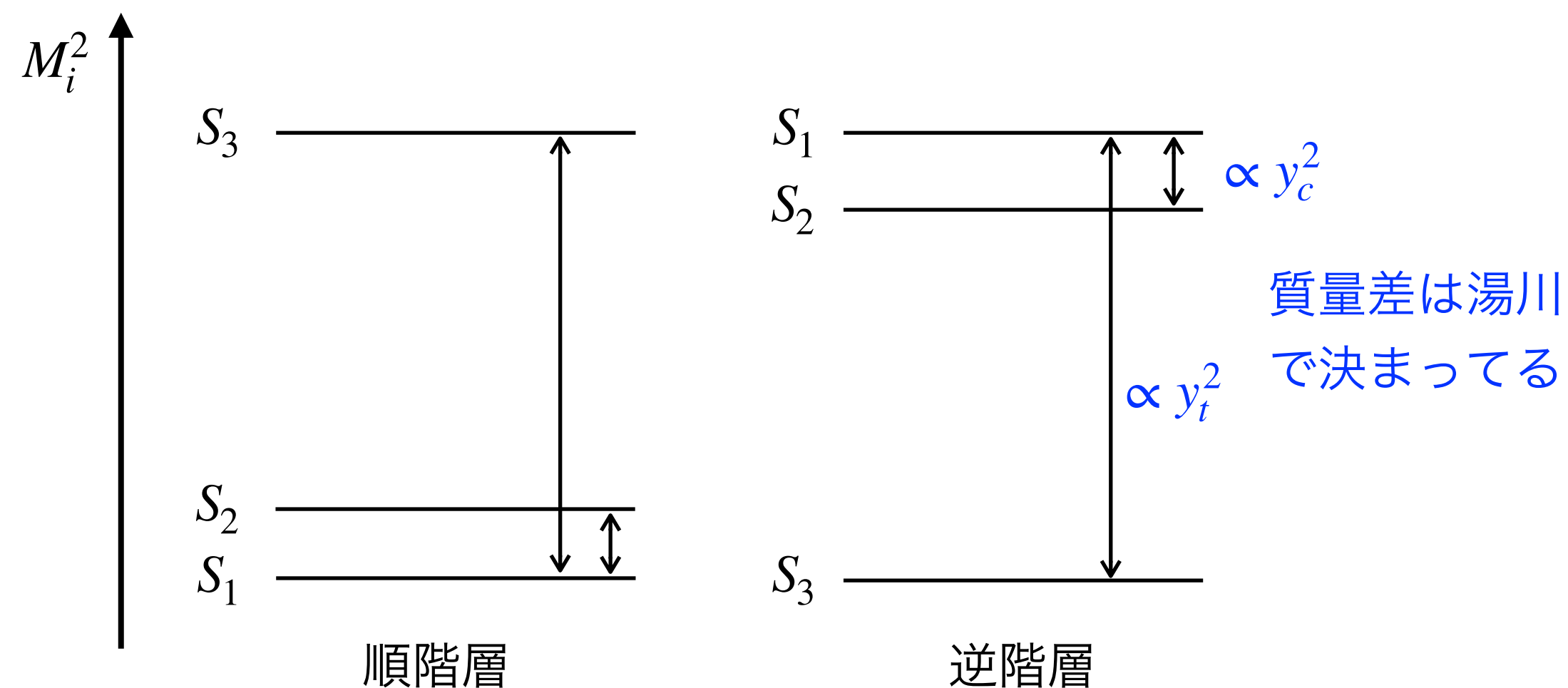
多成分フレーバー暗黒物質

一番軽いフレーバー粒子の安定性が保証されている

▶ 重いやつは全部不安定、一成分だけが暗黒物質 Batell, Pradler, Spannowsky (2011)

▶ 重い粒子も長寿命になるかも？ Mescia, SO, Wu, in preparation

質量スペクトル



▶ 質量差が小さいと多体崩壊になって長寿命になりがち

▶ 質量差が小さくなりそうな理由

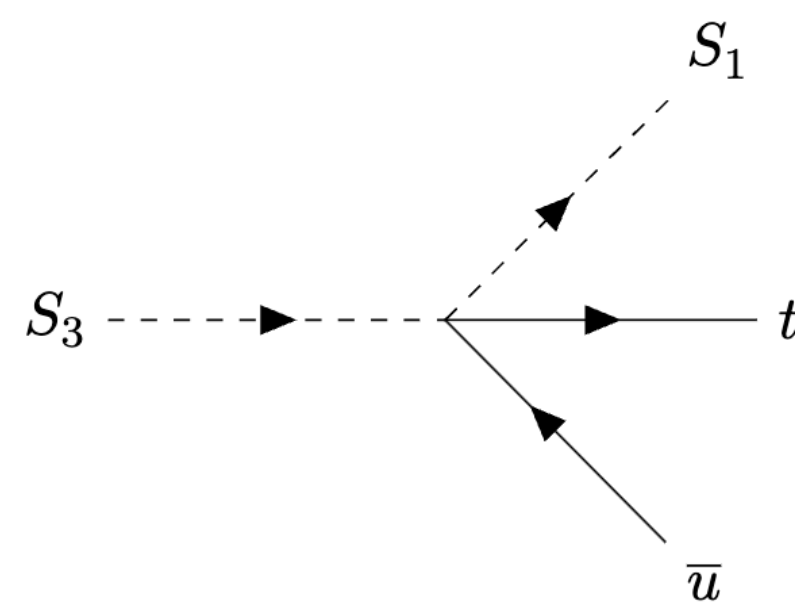
- $y_c \ll 1$

- $\epsilon \ll 1$

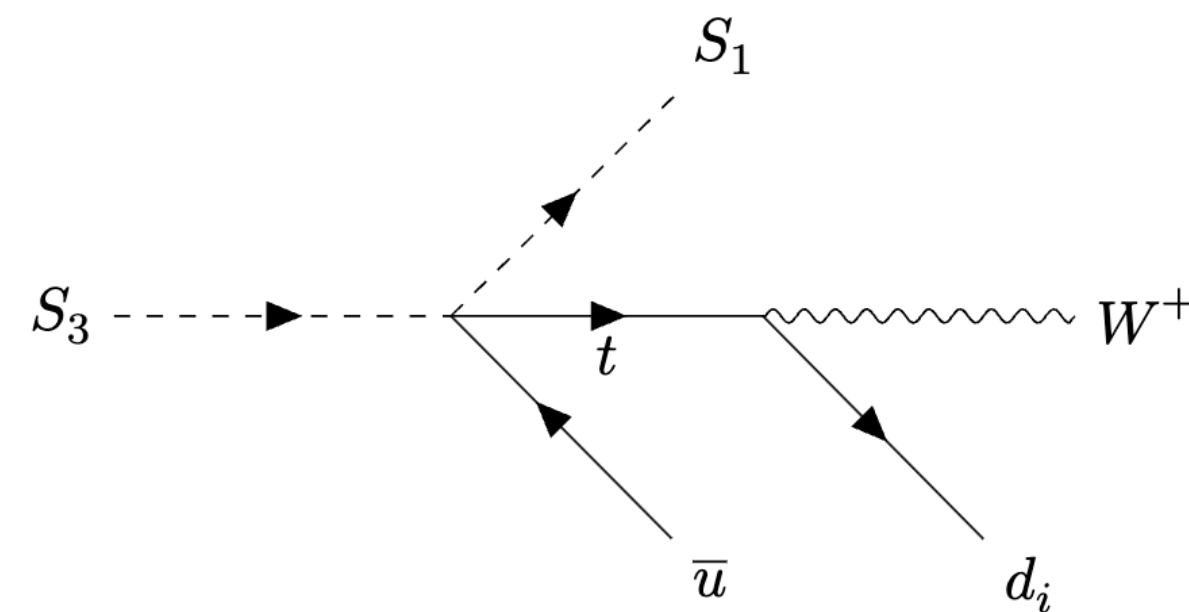
$$M_j^2 - M_i^2 = \epsilon m^2 \{ (y_u^j)^2 - (y_u^i)^2 \}$$

重い粒子の崩壊

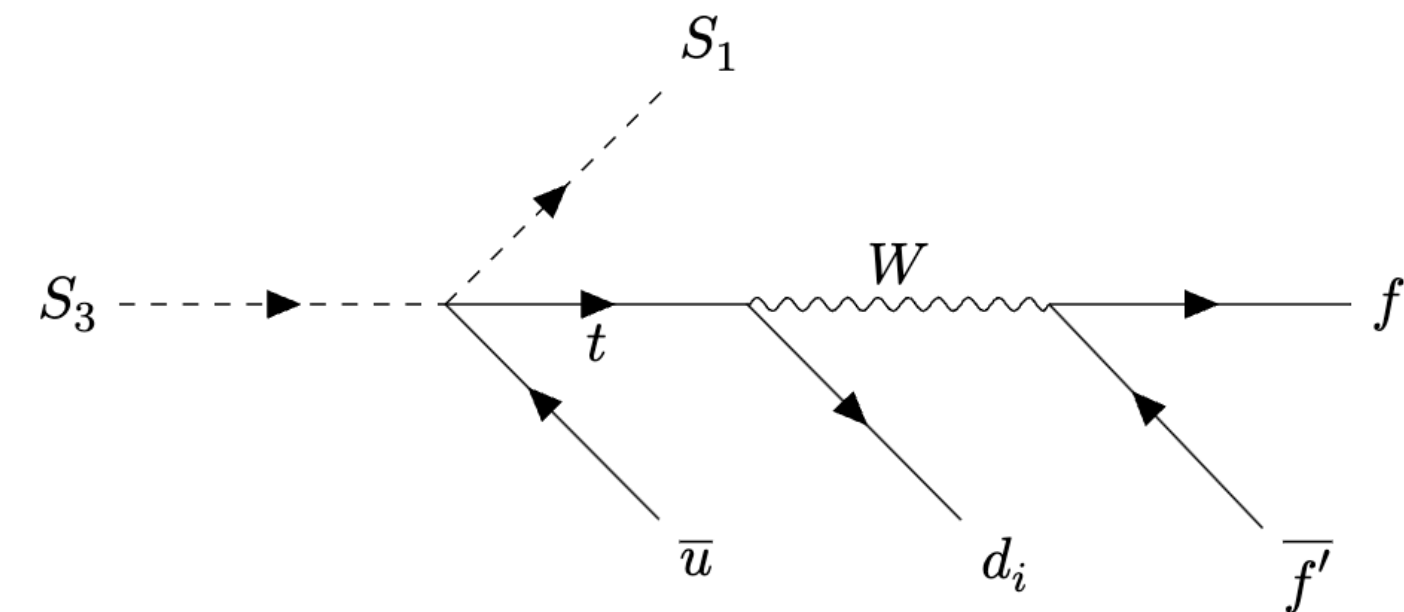
崩壊過程は質量差に依存する ($\Delta M = M_3 - M_1$) $\mathcal{L}_{d=6} \sim \frac{c_2^4}{\Lambda^2} \bar{u}_i (m_u^i P_R + m_u^j P_L) u_j (S_j^* S_i)$



$$\Delta M \gtrsim m_t$$



$$m_t \gtrsim \Delta M \gtrsim m_W + m_d^i$$



$$m_W + m_d^i \gtrsim \Delta M \gtrsim m_u + m_d^i + m_f + m_{f'}$$

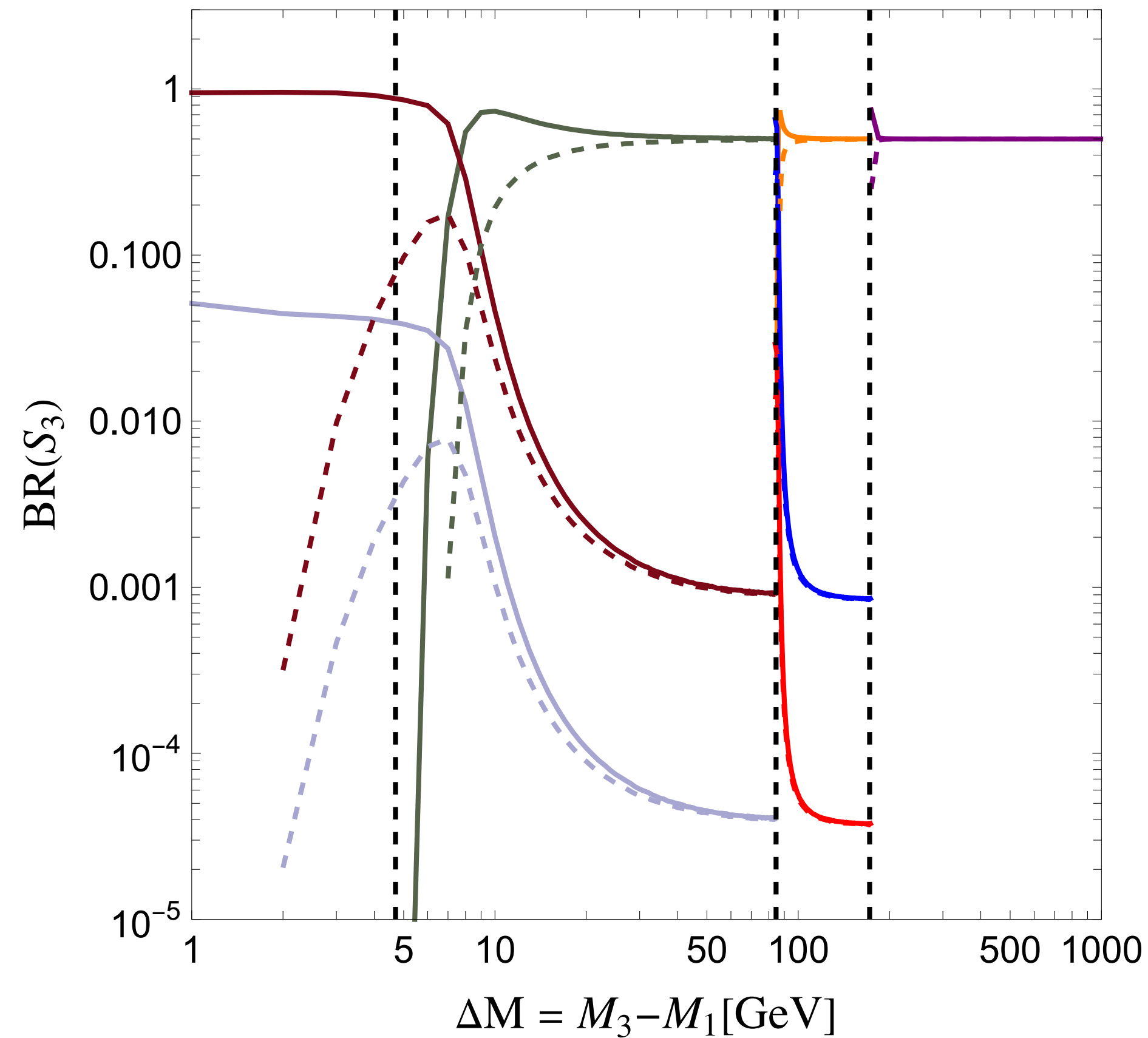
崩壊幅 $\Gamma \sim \frac{m_t^2 (\Delta M)^5}{480 \pi^3 \Lambda^4 M_3^2} \sim \frac{(\Delta M)^{11} |V_{ti}|^2}{41472 \pi^5 \Lambda^4 M_3^2 m_t^2 v^2} \sim \frac{(\Delta M)^{13} |V_{ti}|^2}{11612160 \pi^7 \Lambda^4 M_3^2 m_t^2 v^4}$

ΔM が小さいか、相互作用 $\sim 1/\Lambda$ が小さいと寿命が長くなる

重い粒子の崩壊

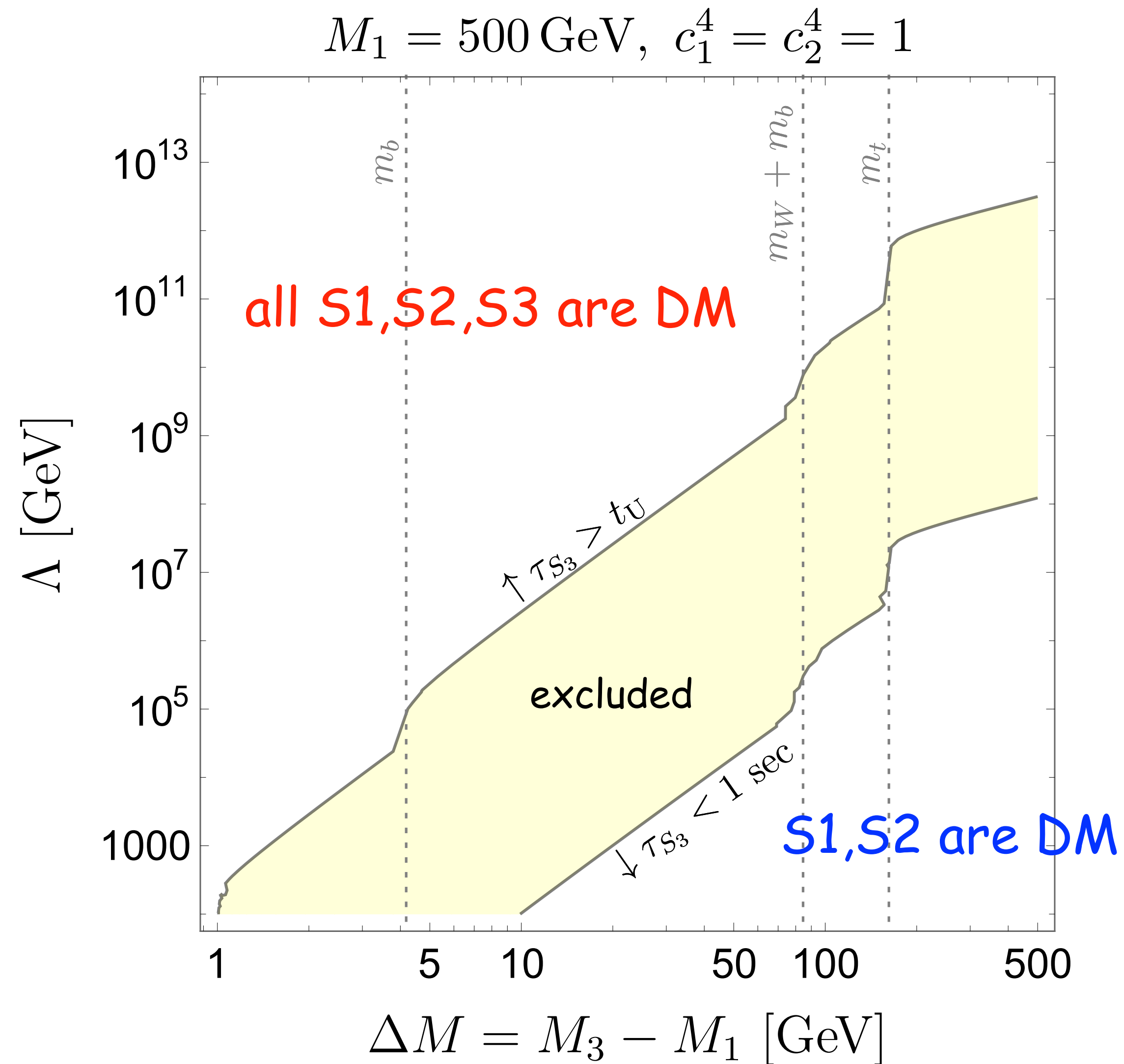
崩壊過程は質量差に依存する ($\Delta M = M_3 - M_1$)

$$\frac{\Gamma(S_3 \rightarrow S_1 b \bar{u} W)}{\Gamma(S_3 \rightarrow S_1 d_i \bar{u} W)} \simeq \frac{\Gamma(S_3 \rightarrow S_1 b \bar{u} f \bar{f}')}{\Gamma(S_3 \rightarrow S_1 d_i \bar{u} f \bar{f}')} \simeq \left| \frac{V_{tb}}{V_{ti}} \right|^2$$



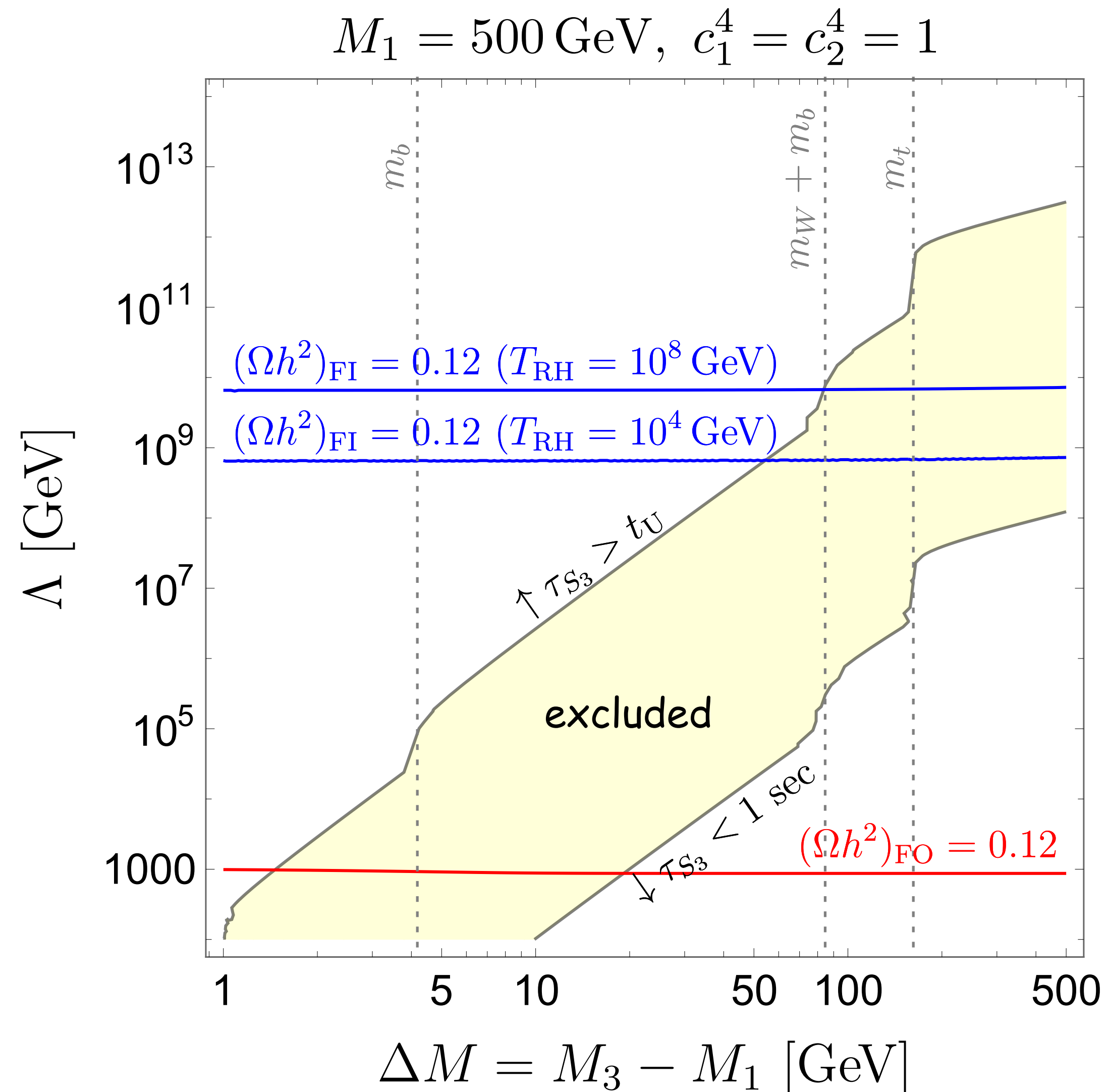
- | | |
|---|--|
| — $BR(S_3 \rightarrow S_1 b \bar{u} W^+)$ | — $BR(S_3 \rightarrow S_1 b \bar{u} f \bar{f}')$ |
| — $BR(S_3 \rightarrow S_1 s \bar{u} W^+)$ | — $BR(S_3 \rightarrow S_1 s \bar{u} f \bar{f}')$ |
| — $BR(S_3 \rightarrow S_1 d \bar{u} W^+)$ | — $BR(S_3 \rightarrow S_1 d \bar{u} f \bar{f}')$ |
| - - $BR(S_3 \rightarrow S_2 b \bar{c} W^+)$ | - - $BR(S_3 \rightarrow S_2 b \bar{c} f \bar{f}')$ |
| - - $BR(S_3 \rightarrow S_2 s \bar{c} W^+)$ | - - $BR(S_3 \rightarrow S_2 s \bar{c} f \bar{f}')$ |
| - - $BR(S_3 \rightarrow S_2 d \bar{c} W^+)$ | - - $BR(S_3 \rightarrow S_2 b \bar{c} f \bar{f}')$ |
| — $BR(S_3 \rightarrow S_1 t \bar{u})$ | |
| - - $BR(S_3 \rightarrow S_2 t \bar{c})$ | |

多成分暗黒物質のパラメータ領域



- ▶ 宇宙年齢より長寿命であれば、暗黒物質になれる
- ▶ 短寿命の場合は、宇宙で元素合成が始まる前に崩壊すべき（寿命 $< 1\text{s}$ ）
- ▶ 質量差 (ΔM) と相互作用の強さ (Λ) によって2成分にも3成分にもなる

多成分暗黒物質のパラメータ領域



- ▶ 宇宙年齢より長寿命であれば、暗黒物質になれる
- ▶ 短寿命の場合は、宇宙で元素合成が始まる前に崩壊すべき (寿命 $< 1\text{s}$)
- ▶ 質量差 (ΔM) と相互作用の強さ (Λ) によって2成分にも3成分にもなる
- ▶ 同じ相互作用でDM生成もできる
 - Freeze-out (FO)
 - Freeze-in (FI) w/ instantaneous reheating

多成分暗黒物質の検証

一成分だと出ない信号が出ると面白い

■ 加速器

- $pp \rightarrow S_3 S_3^\dagger \rightarrow S_1 S_2^\dagger t \bar{t} c \bar{u}$; missing がフレーバー持ってるのが見える？

■ 直接検出

- 非弾性散乱; $S_1 N \rightarrow S_2 N$ or $S_2 N \rightarrow S_1 N$

■ 間接検出

- 銀河の中での崩壊 $S_3 \rightarrow S_1 d \bar{u} f \bar{f}'$; 放出される光やニュートリノを検出
- 宇宙論への影響 (CMB, 21cm, Ly- α ...)

他にも色々ありそう

その他の展開

- ▶ 他のスピンや電弱ゲージ群の表現ではどう変わる？
- ▶ レプトンフレイバー？
- ▶ ε で展開できると仮定; linearly realized MFV $\rightarrow$ non-linear MFV ? Kagan, Perez, Volansky, Zupan (2009)
- ▶ UV理論との相性; GUTできる？
- ▶ ...

まとめ

■ **Minimal Flavor Violation** は新物理の模型構築で仮定するフレーバー構造

- ▶ フレーバーを変える過程の観測結果と整合しやすくなる
- ▶ フレーバーを持つ新粒子が安定になることがある -> **暗黒物質**の候補
- ▶ フレーバー暗黒物質は**多成分**になることもある

■ 近いうちにこういうタイトルの論文が出るので、読んでもらえると嬉しいです！

Multi-Component Dark Matter from Minimal Flavor Violation

Federico Mescia^{(a,b)*}, Shohei Okawa^{(a,c)†}, Keyun Wu^{(a)‡}