

Unification for Darkly Charged Dark Matter

($U(1)'$ + ディラック粒子のUV理論について)

山田將樹

東北大学

共同研究者: 鎌田歩樹, 柳田勉

Phys. Rev. D 102 (2020) 1, 015012 [hep-ph/1908.00207]

モデルの概要

暗黒物質

$SO(10)'$

$16'$

↓ SSB by $45'_H$

$SU(5)' \times U(1)'$

↓ Confinement
in $SU(5)'$

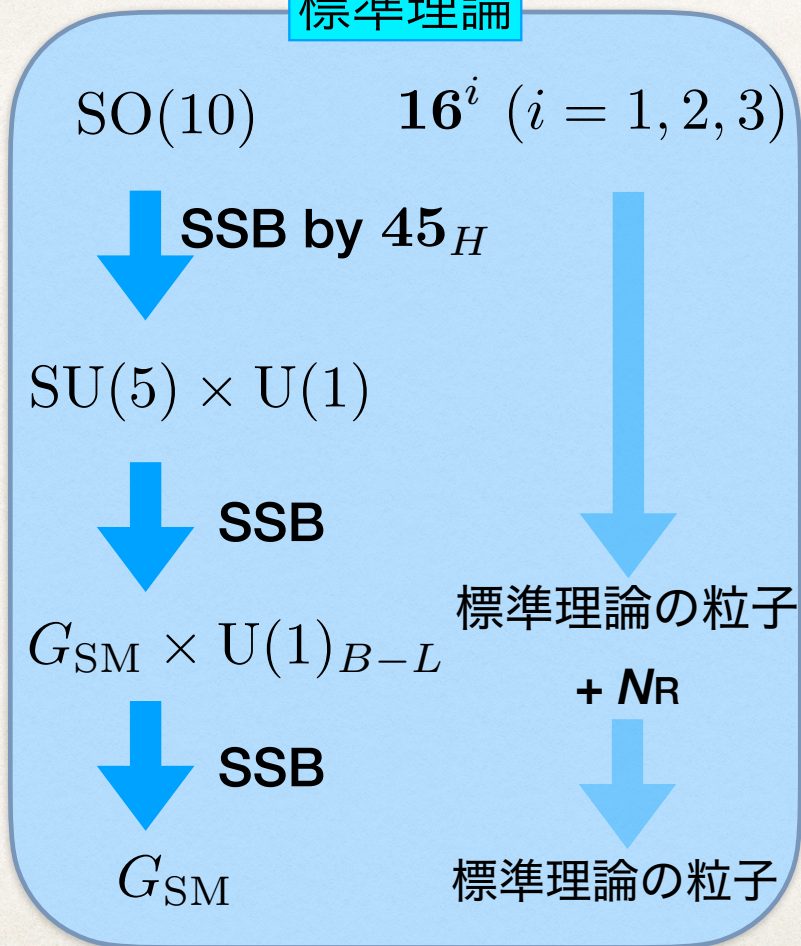
$U(1)' + \text{ディラック粒子}$

$$\mathcal{L}_d = \bar{\eta}' (i\gamma^\mu D_\mu - m_{\eta'}) \eta'$$

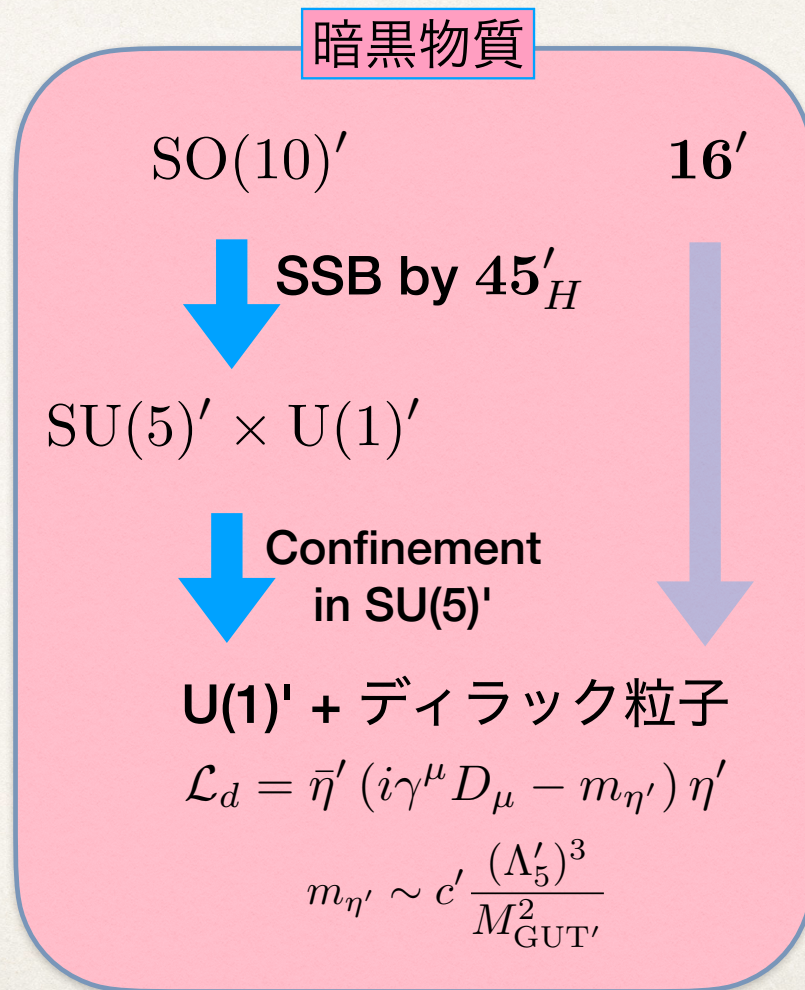
$$m_{\eta'} \sim c' \frac{(\Lambda'_5)^3}{M_{\text{GUT}' }^2}$$

モデルの概要

標準理論



暗黒物質

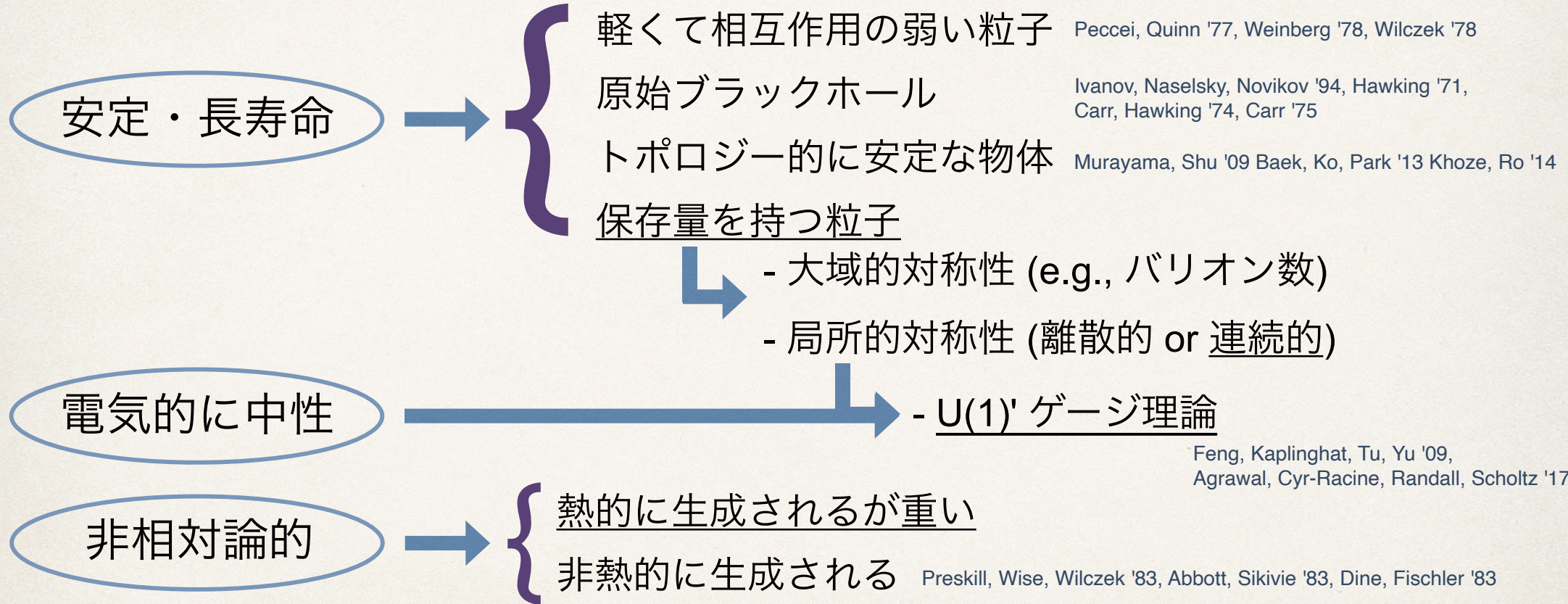


目次

- $U(1)'$ + ディラック粒子 とそのUV理論を考えるモチベーション
- $SO(10)$ ゲージ理論のモデル
 - ゲージ相互作用定数とディラック粒子の質量の予言
 - Kinetic mixing と暗黒輻射
- まとめ

U(1)' + ディラック粒子 を考えるモチベーション

暗黒物質は3つの特に重要な性質を持つ



U(1)' ゲージ相互作用を持つ重いDirac粒子はシンプルな暗黒物質の候補である。

U(1)' + ディラック粒子 を考えるモチベーション

U(1)' ゲージ相互作用を持つ重いDirac粒子はシンプルな暗黒物質の候補である。

$$\mathcal{L}_d = \bar{\eta}' (i\gamma^\mu D_\mu - m_{\eta'}) \eta'$$

- 熱的残存量:

$$\Omega_\eta h^2 \simeq 0.13 \left(\frac{m_\eta}{1 \text{ TeV}} \right)^2 \left(\frac{q^2 \alpha'}{0.025} \right)^{-2}$$

- 自己相互作用断面積:

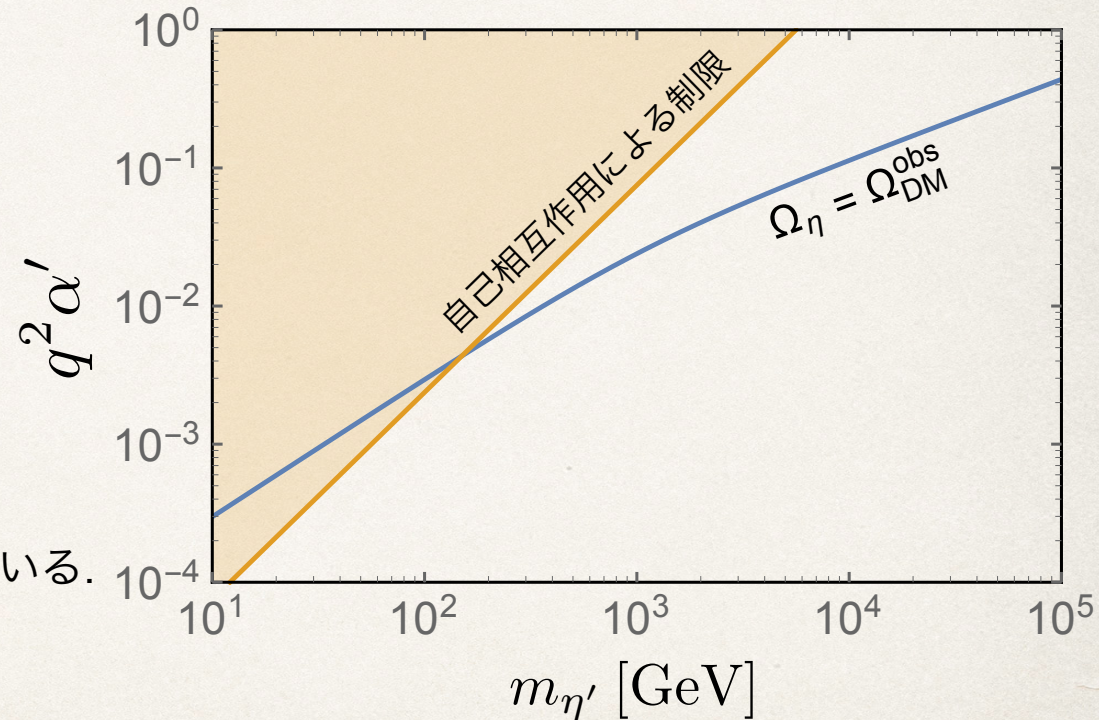
$$\frac{\sigma_T}{m_\eta} \simeq 0.2 \text{ cm}^2/\text{g} \left(\frac{q^2 \alpha'}{0.025} \right)^2 \left(\frac{m_\eta}{1 \text{ TeV}} \right)^{-3} \left(\frac{v}{300 \text{ km/s}} \right)^{-4}$$

NGC720銀河の質量分布から強い制限が与えられている。

J.L.Feng, M.Kaplinghat, H.Tu, H.B.Yu, '09

P.Agrawal, F.Y.Cyr-Racine, L.Randall, J.Scholtz '16

D.A.Buote, T.E.Jeltema, C.R.Canizares, G.P.Garmire, '02



A. Kamada, M.Y., T. T. Yanagida, '19

U(1)' + ディラック粒子 を考えるモチベーション

暗黒物質は3つの特に重要な性質を持つ

安定・長寿命

軽くて相互作用の弱い粒子
原始ブラックホール
トポロジ的に安定な物体
保存量を持つ粒子

Peccei, Quinn '77, Weinberg '78, Wilczek '78

Ivanov, Naselsky, Novikov '94, Hawking '71,
Carr, Hawking '74, Carr '75

Murayama, Shu '09 Baek, Ko, Park '13 Khoze, Ro '14

↳
- 大域的対称性 (e.g., バリオン数)
- 局所的対称性 (離散的 or 連続的)

電氣的に中性

- U(1)' ゲージ理論

非相対論的

熱的に生成されるが重い

非熱的に生成される Preskill, Wise, Wilczek '83, Abbott, Sikivie '83, Dine, Fischler '83

U(1)' ゲージ相互作用を持つ重いDirac粒子はシンプルな暗黒物質の候補である。

$$\Omega_{\text{DM}} h^2 \simeq 0.12$$

$$\alpha' \gtrsim 10^{-2}, \quad m_{\text{DM}} \gtrsim 100 \text{ GeV}$$

Feng, Kaplinghat, Tu, Yu '09,
Agrawal, Cyr-Racine, Randall, Scholtz '17

U(1)' + ディラック粒子 を考えるモチベーション

暗黒物質は3つの特性を兼ね備えている

安定・長

なぜその質量は“小さい”のか？

U(1)' ゲージ対称性はどこからきたのか？

Ro '14

- 大域的対称性 (e.g., バリオン数)
- 局所的対称性 (離散的 or 連続的)

電氣的に中性

- U(1)' ゲージ理論

非相対論的

熱的に生成されるが重い

非熱的に生成される Preskill, Wise, Wilczek '83, Abbott, Sikivie '83, Dine, Fischler '83

U(1)' ゲージ相互作用を持つ重いDirac粒子はシンプルな暗黒物質の候補である。

$$\Omega_{\text{DM}} h^2 \simeq 0.12$$

$$\alpha' \gtrsim 10^{-2}, \quad m_{\text{DM}} \gtrsim 100 \text{ GeV}$$

Feng, Kaplinghat, Tu, Yu '09,
Agrawal, Cyr-Racine, Randall, Scholtz '17

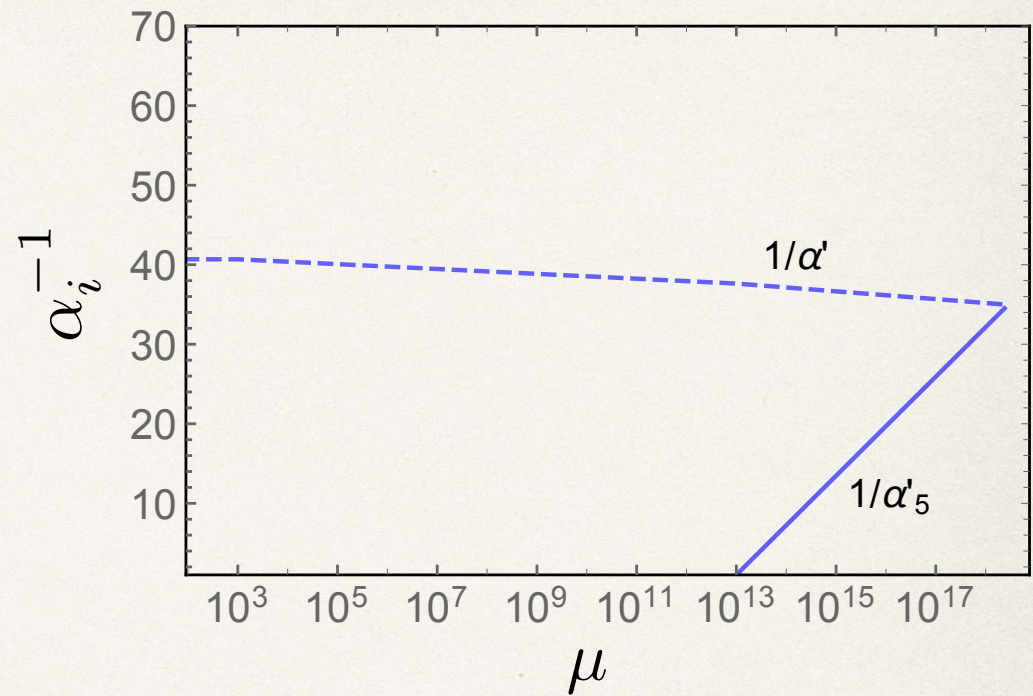
SO(10) ゲージ理論のモデル

	Ψ'	
SO(10)'	16	+ ヒッグス場

↓ 自発的対称性の破れ @ $E \sim 10^{16-18}$ GeV

	ψ'	χ'	N'
SU(5)'	$\bar{\mathbf{5}}$	10	1
U(1)'	$-3q/5$	$q/5$	q

$q = -\sqrt{10}/4$



SO(10) ゲージ理論のモデル

	Ψ'	
SO(10)'	16	+ ヒッグス場

↓ 自発的対称性の破れ @ $E \sim 10^{16-18}$ GeV

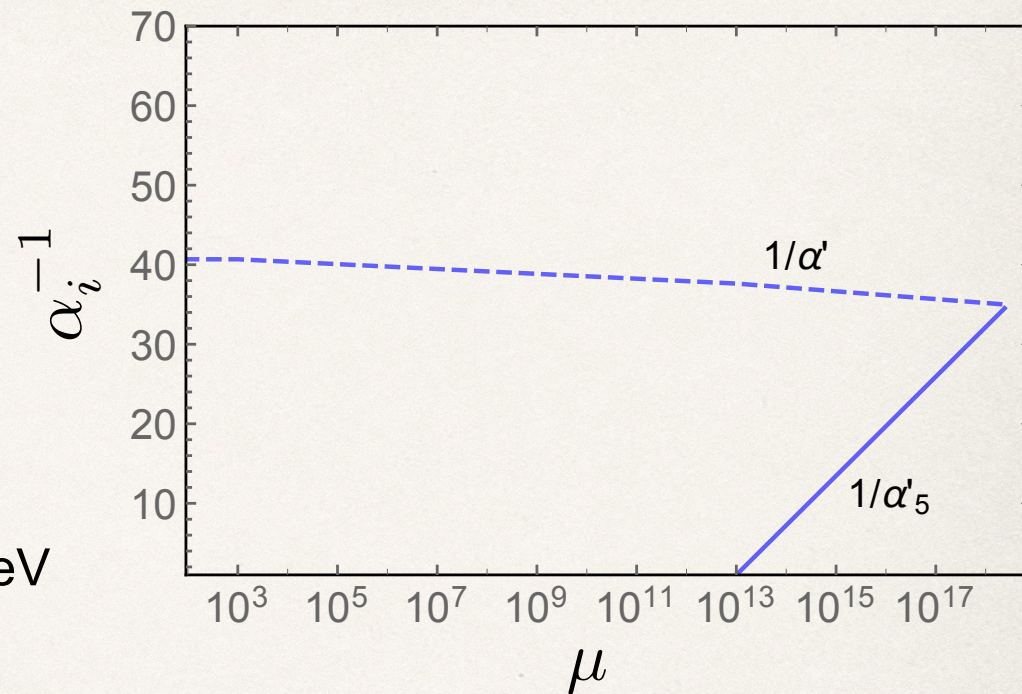
	ψ'	χ'	N'	
SU(5)'	$\bar{\mathbf{5}}$	10	1	
U(1)'	$-3q/5$	$q/5$	q	$q = -\sqrt{10}/4$

↓ SU(5)' 理論の閉じ込め @ $E \sim 10^{12-13}$ GeV

一つのsingletだけが低エネルギーに残る.

$$\eta' \equiv c_1 \psi' \psi' \chi' + c_2 \psi' \chi'^{\dagger} \chi'^{\dagger} + c_3 \chi'^{\dagger} \chi'^{\dagger} \chi'^{\dagger} \chi'^{\dagger} \chi'^{\dagger}$$

	η'	N'
U(1)'	$-q$	q



S. Dimopoulos, S. Raby, L. Susskind, '80
N. Arkani-Hamed, Y. Grossman, '99

A. Kamada, M. Y., T. T. Yanagida, '19

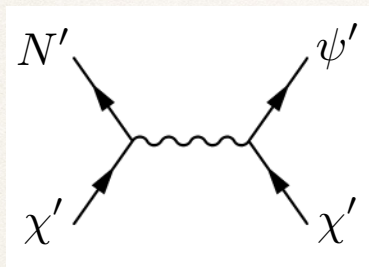
SO(10) ゲージ理論のモデル: ディラック質量項

	η'	N'	
$U(1)'$	$-q$	q	$q = -\sqrt{10}/4$

S.Dimopoulos, S.Raby, L.Susskind, '80
 N.Arkani-Hamed, Y.Grossman, '99
 A. Kamada, M.Y., T. T. Yanagida, '19

$$\eta' \equiv c_1 \psi' \psi' \chi' + c_2 \psi' \chi'^{\dagger} \chi'^{\dagger} + c_3 \chi'^{\dagger} \chi'^{\dagger} \chi'^{\dagger} \chi'^{\dagger} \chi'$$

- SO(10)' ゲージ場を積分すると6次元の相互作用項が得られる.



$$\frac{c}{M_{\text{GUT}' }^2} \chi'^{\dagger} \chi'^{\dagger} \psi' N' + \text{h.c.}$$

$$m_{\eta'} \eta' N' + \text{h.c.}$$

- これは低エネルギーでは η' と N' をまとめる
 ディラック質量項になる.

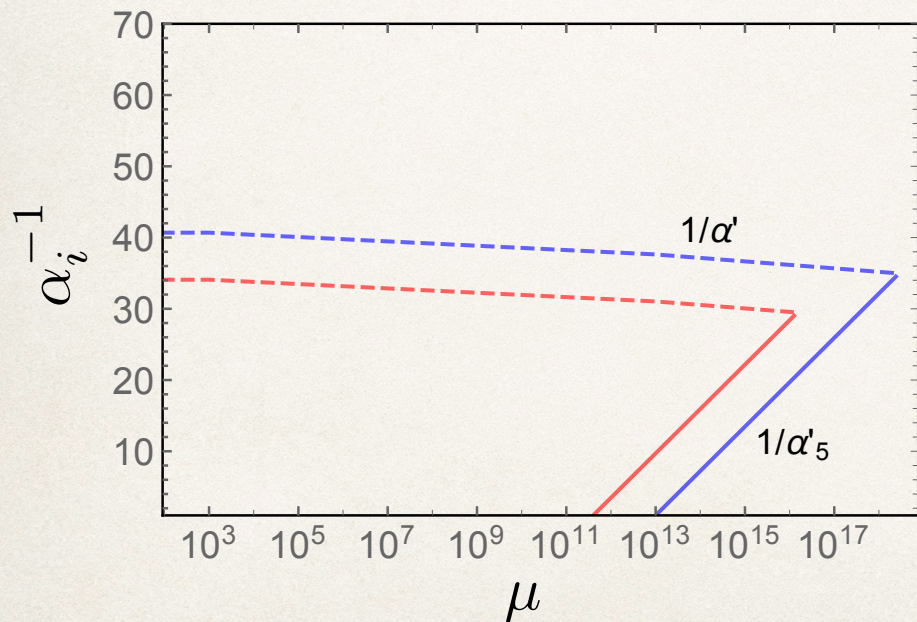
$$m_{\eta'} \sim c' \frac{(\Lambda'_5)^3}{M_{\text{GUT}' }^2}$$

$$\sim 1 \text{ TeV} \left(\frac{\Lambda'_5}{10^{13} \text{ GeV}} \right)^3 \left(\frac{M_{\text{GUT}'}}{10^{18} \text{ GeV}} \right)^{-2}$$

SO(10) ゲージ理論のモデル: ゲージ相互作用定数とディラック質量

UV理論での二つのパラメータを決めると低エネルギーでの二つのパラメーターが決まる

- SO(10)' のSSBスケール $E_{\text{GUT}'}$,
 - SO(10)' ゲージ相互作用定数
- ↔
- U(1)' ゲージ相互作用定数 α'
 - ディラック質量 $m_{\eta'}$



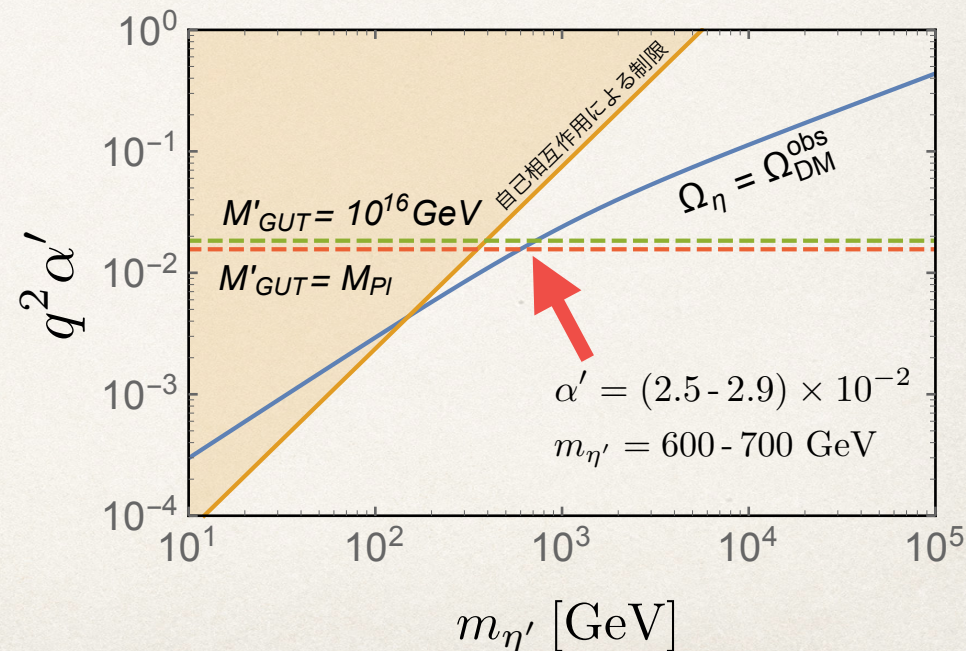
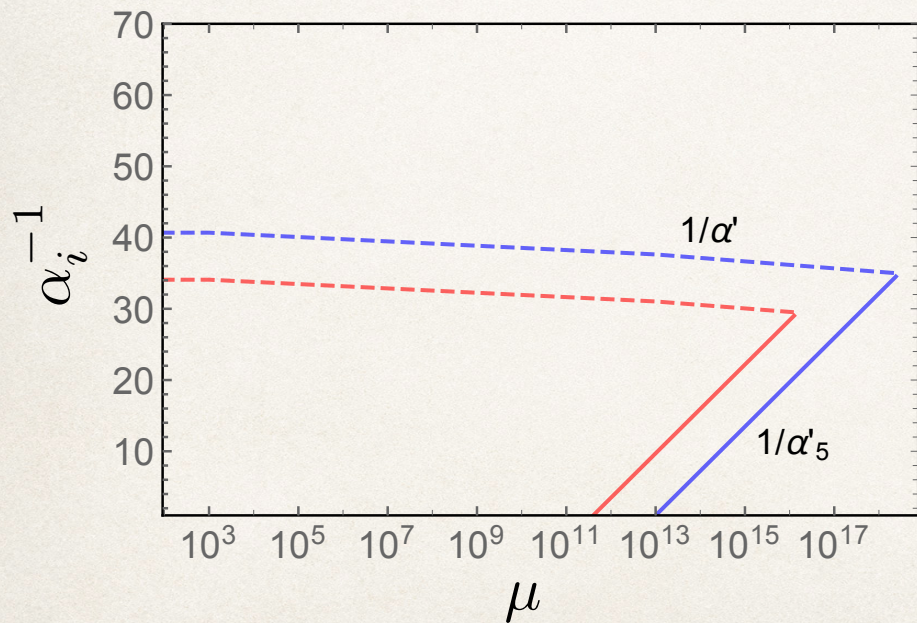
$$m_{\eta'} \sim c' \frac{(\Lambda'_5)^3}{M_{\text{GUT}' }^2}$$
$$\sim 1 \text{ TeV} \left(\frac{\Lambda'_5}{10^{13} \text{ GeV}} \right)^3 \left(\frac{M_{\text{GUT}'}}{10^{18} \text{ GeV}} \right)^{-2}$$

SO(10) ゲージ理論のモデル: ゲージ相互作用定数とディラック質量

UV理論での二つのパラメータを決めると低エネルギーでの二つのパラメータが決まる。

さらに, 暗黒物質の存在量を説明するための条件から, 一つパラメータを消去することができる。

- SO(10)' のSSBスケール E_{GUT}' ,
 - SO(10)' ゲージ相互作用定数
- ↔
- U(1)' ゲージ相互作用定数 α'
 - ディラック質量 $m_{\eta'}$

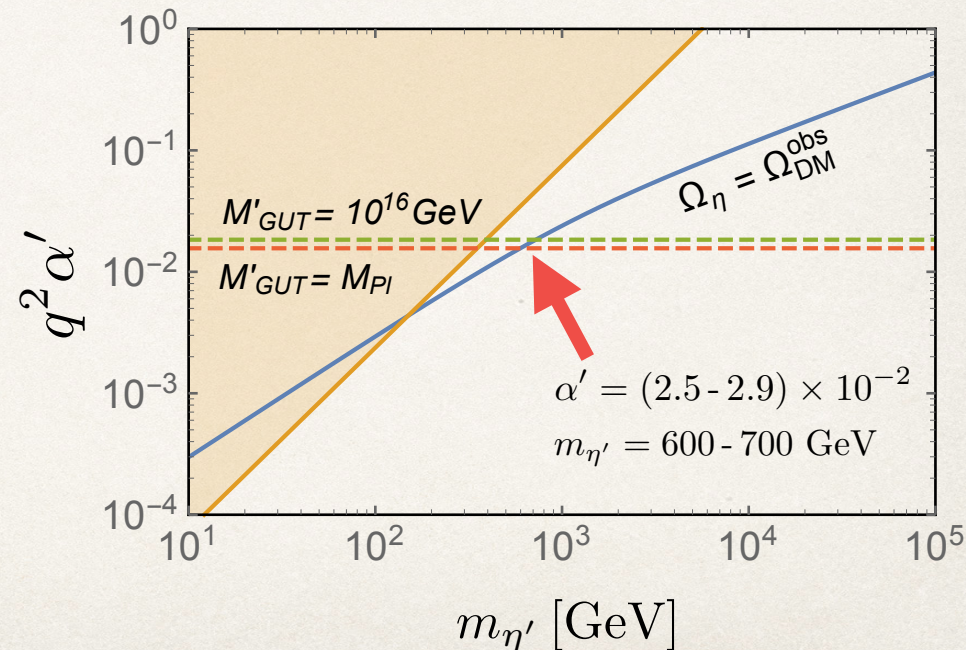
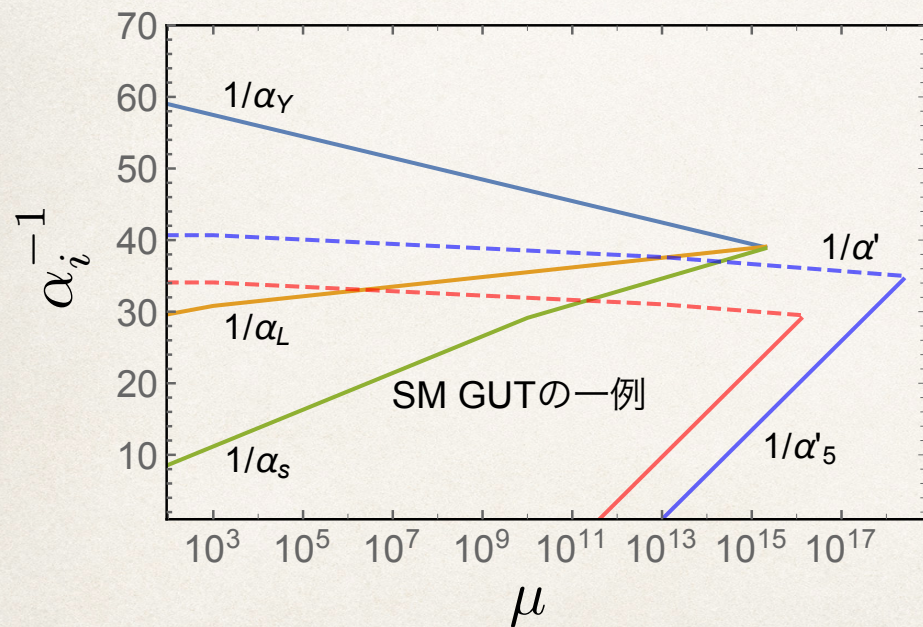


SO(10) ゲージ理論のモデル: ゲージ相互作用定数とディラック質量

UV理論での二つのパラメータを決めると低エネルギーでの二つのパラメータが決まる。

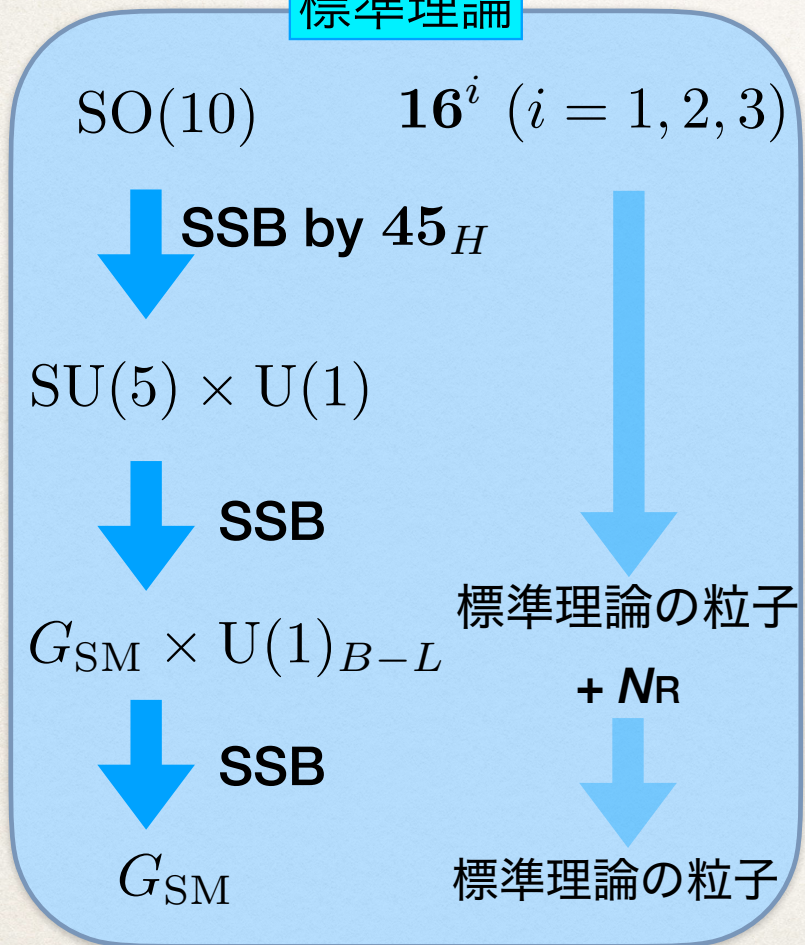
さらに, 暗黒物質の存在量を説明するための条件から, 一つパラメータを消去することができる。

SO(10)' ゲージ相互作用定数の大きさは標準理論のゲージ相互作用定数と同じオーダー。

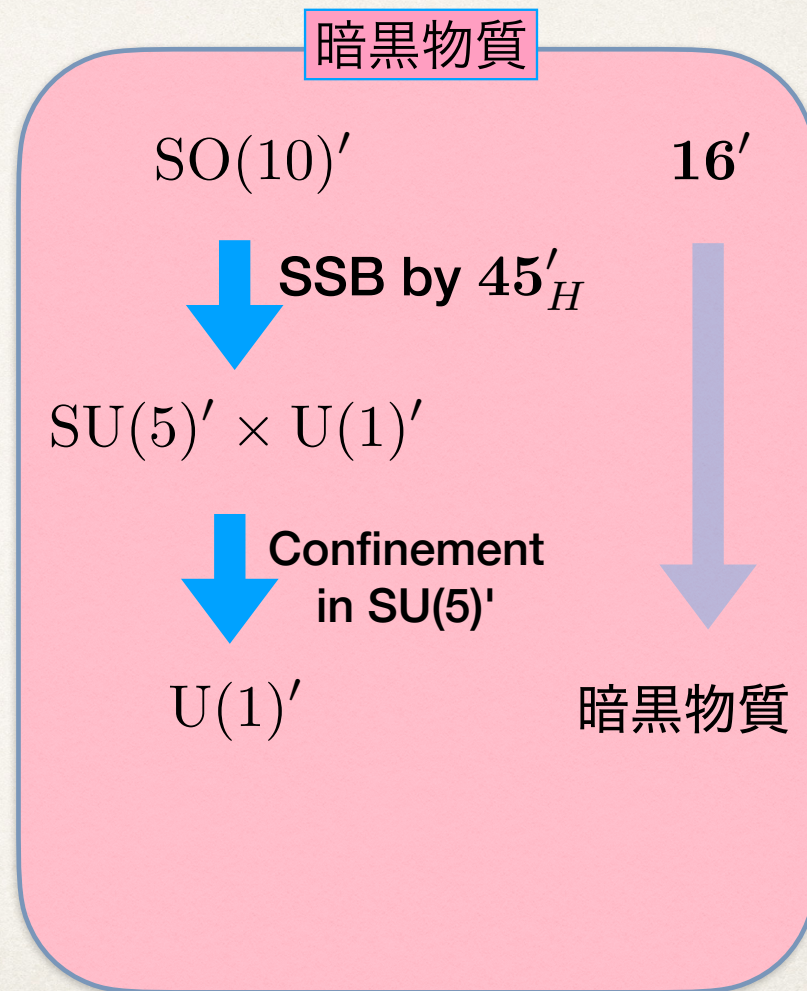


SO(10) GUT と似ていることから、標準理論もSO(10) GUTになっていたのではないかな？

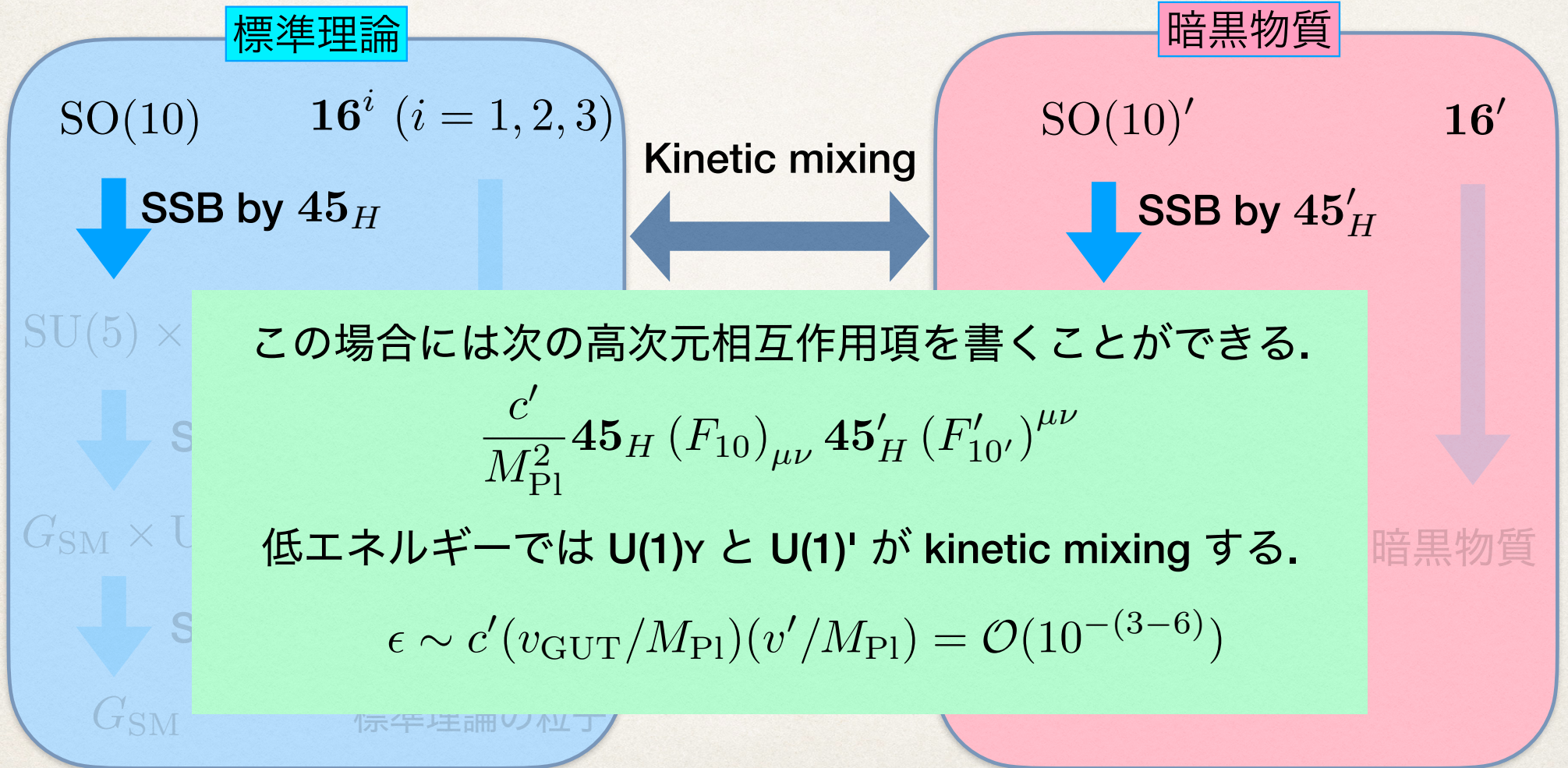
標準理論



暗黒物質



SO(10) GUT と似ていることから、標準理論もSO(10) GUTになっていたのではないか？



SO(10) ゲージ理論のモデル: kinetic mixing

U(1)'ゲージ相互作用定数とディラック質量の予言

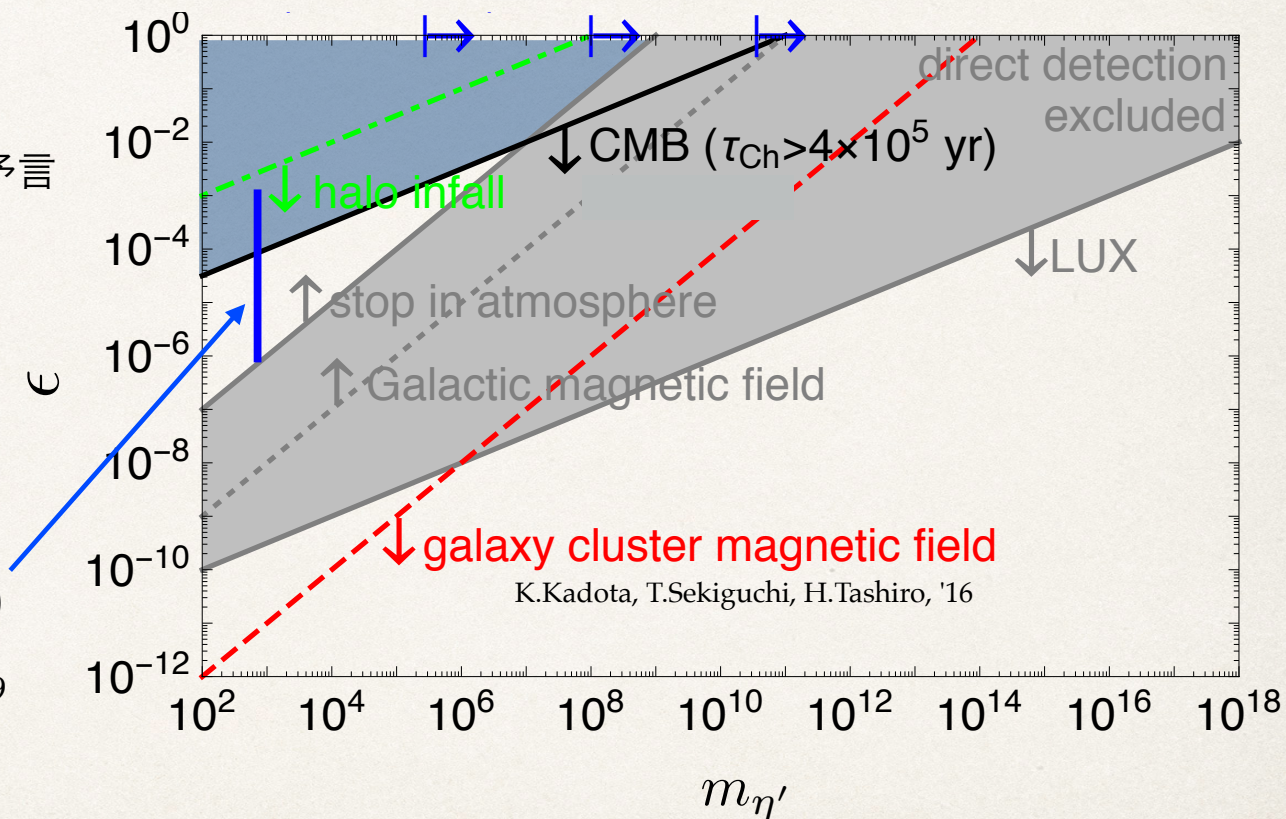
$$\alpha' = (2.5 - 2.9) \times 10^{-2}$$

$$m_{\eta'} = 600 - 700 \text{ GeV}$$

U(1)_Y と U(1)' の kinetic mixing:

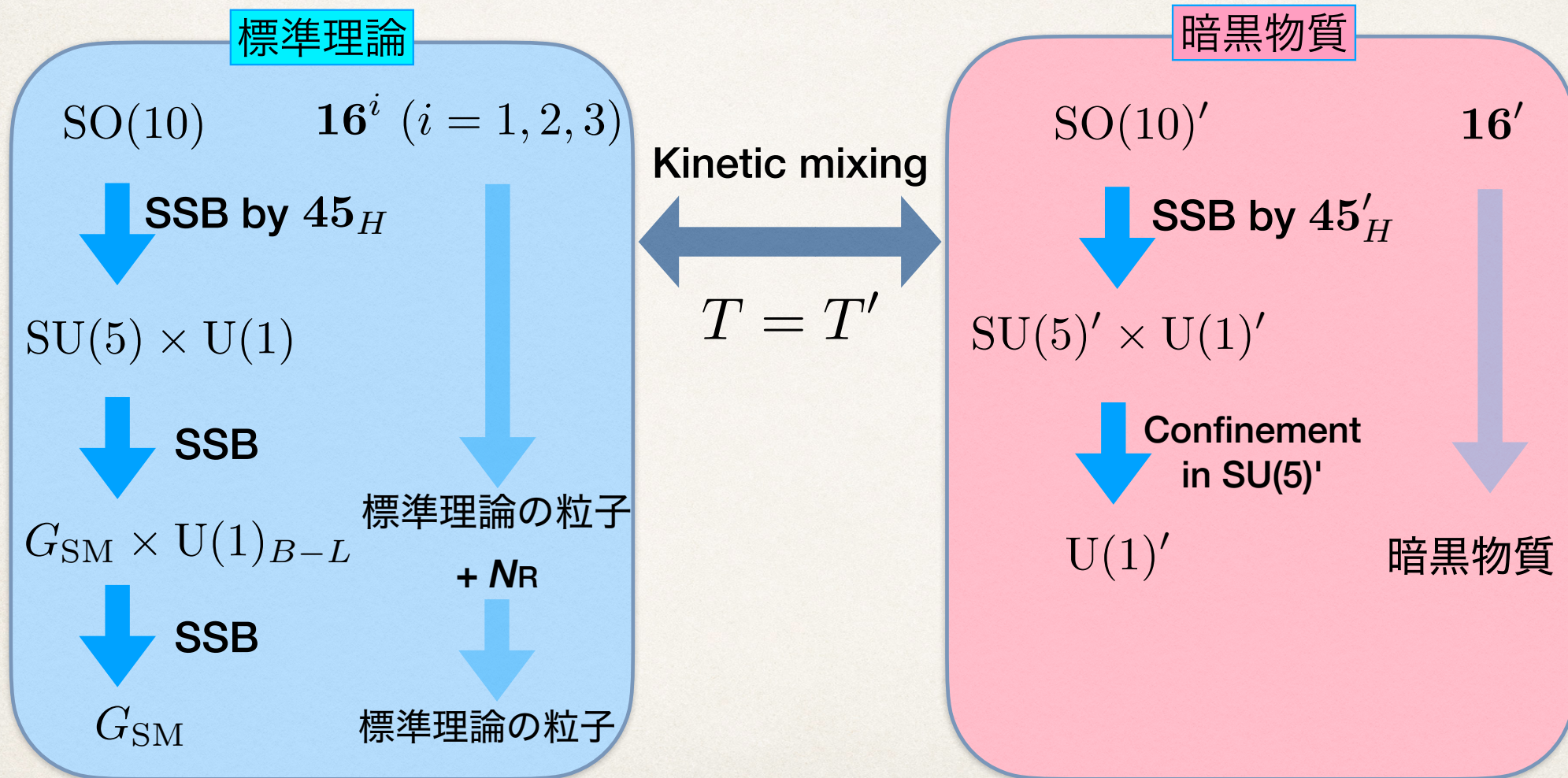
$$\epsilon \sim c'(v_{\text{GUT}}/M_{\text{Pl}})(v'/M_{\text{Pl}}) = \mathcal{O}(10^{-(3-6)})$$

A. Kamada, M.Y., T. T. Yanagida, '19

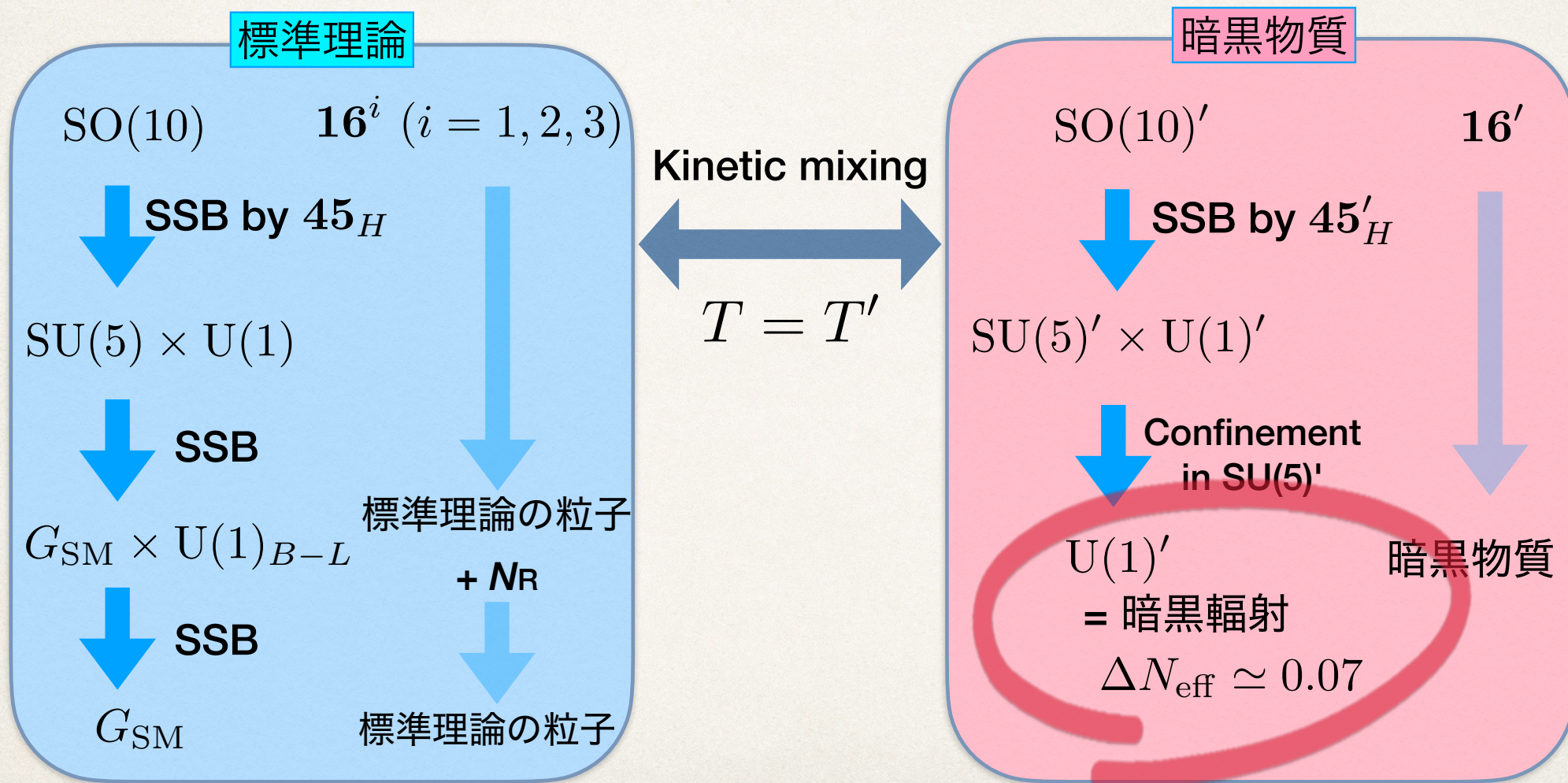


A. Kamada, K. Kohri, T. Takahashi,
N. Yoshida, '16

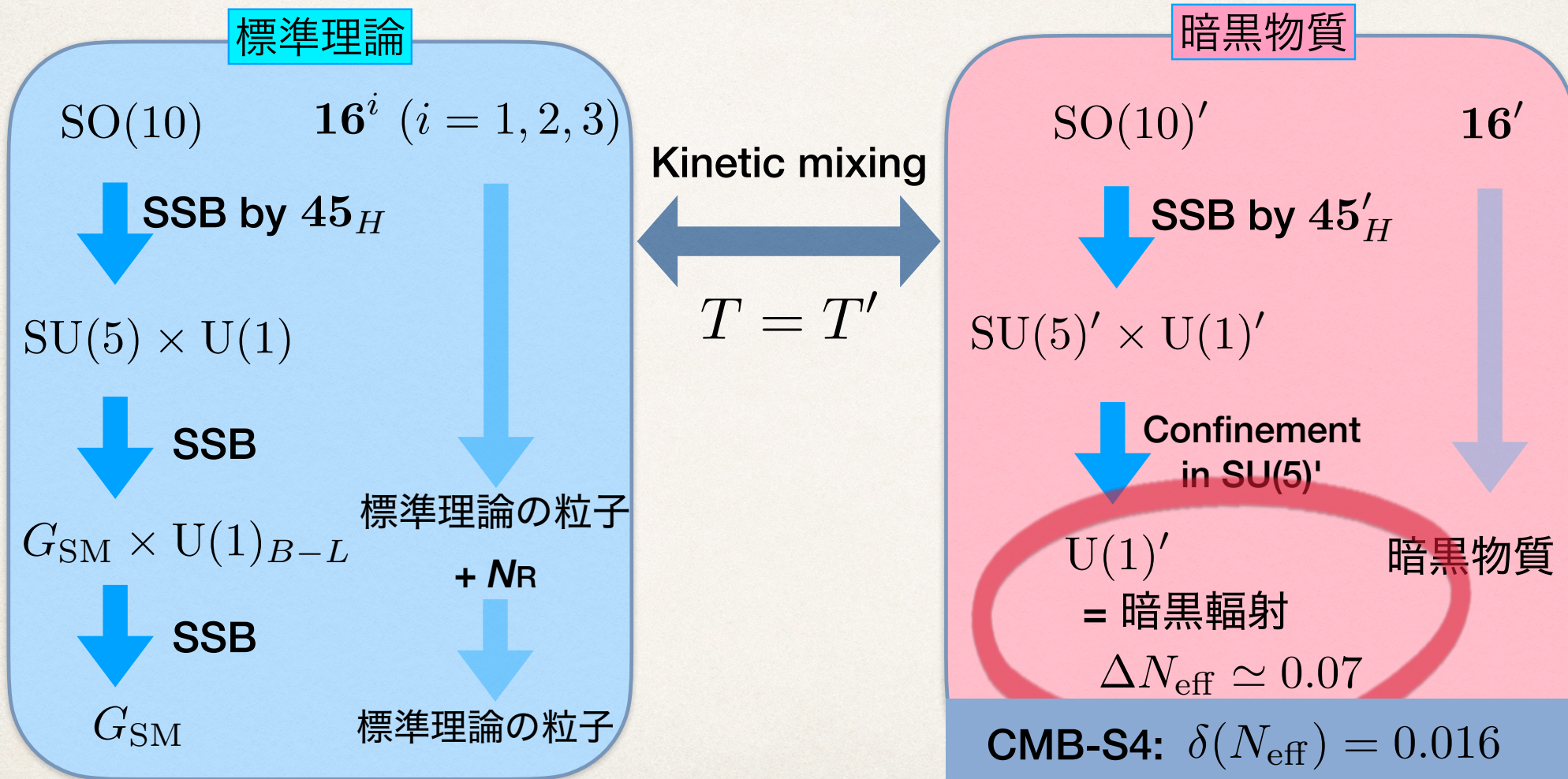
SO(10) ゲージ理論のモデル: kinetic mixing



SO(10) ゲージ理論のモデル: kinetic mixingと暗黒輻射



SO(10) ゲージ理論のモデル: kinetic mixingと暗黒輻射



CMB-S4: $\delta(N_{eff}) = 0.016$

	Ψ'	
$\text{SO}(10)'$	16	+ ヒッグス場



Darkly charged dark matter

with $\alpha' = (2.5 - 2.9) \times 10^{-2}$

$m_{\eta'} = 600 - 700 \text{ GeV}$

$\Delta N_{\text{eff}} \simeq 0.07$