

# Two-component dark matter model with degenerate scalars

発表者：犬宮 理恵（お茶の水女子大学）

共同研究者：曹 基哲，出川 智香子（お茶の水女子大学）

## 標準模型の拡張の動機

### 素粒子標準模型 (Standard Model, SM)

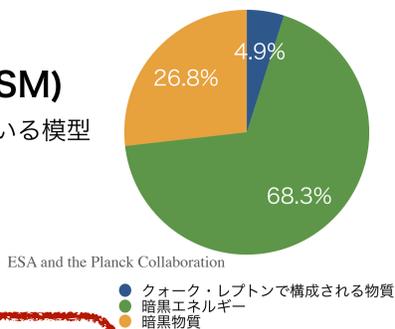
；現時点で素粒子の振る舞いを最も正確に記述している模型

### 暗黒物質 (Dark matter, DM)

；天文学的観測により存在が確かめられているが、  
光学的観測が不可能な物質

- 性質：1. 質量を持つ  
2. 電荷を持たない  
3. 安定である

素粒子標準模型は  
暗黒物質候補粒子を含まない！  
→ 標準模型の拡張



## Complex singlet extension of the SM (CxSM)

；SM + gauge singletな complex scalar field

### Scalar potential

$$V_0 = \frac{m^2}{2} |H|^2 + \frac{\lambda}{4} |H|^4 + \frac{\delta_2}{2} |H|^2 |S|^2 + \frac{b_2}{2} |S|^2 + \frac{d_2}{4} |S|^4 + \left( a_1 S + \frac{b_1}{4} S^2 + \text{c.c.} \right)$$

$$H = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 \\ v+h \end{pmatrix}, \quad S = (v_S + s + i\chi) / \sqrt{2}$$

スカラーポテンシャルがCP不変性を持つときDM粒子として振る舞う

### CP-even 粒子の質量固有状態と質量固有値

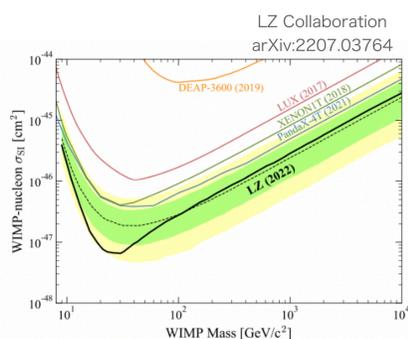
質量固有状態

質量固有値

$$\begin{pmatrix} h \\ s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h_1 \\ h_2 \end{pmatrix}, \quad m_{h_1, h_2}^2 = \frac{1}{2} \left[ \frac{\lambda}{2} v^2 \mp \sqrt{\left( \frac{\lambda}{2} v^2 - \frac{d_2}{2} v_S^2 - \sqrt{2} \frac{a_1}{2v_S} \right)^2 + 4 \left( \frac{\delta_2}{2} v v_S \right)^2} \right]$$

( $h_1$ : 125GeVのSM Higgs粒子)

CP-odd 粒子の質量  $m_\chi^2 = -b_1 - \sqrt{2} \frac{a_1}{v_S}$



### 直接探索実験からの制限

；宇宙からくる暗黒物質が地下実験室で液体キセノンの原子核と衝突する。その際、衝突した原子核が跳ね返ることで発せられる信号を検知する実験

直接探索実験により暗黒物質-核子散乱断面積は厳しい制限を受けるため、暗黒物質を含む模型はこの制限を満たす必要がある

→ 暗黒物質のシグナルが抑制される機構 (CxSMの縮退スカラーシナリオ)

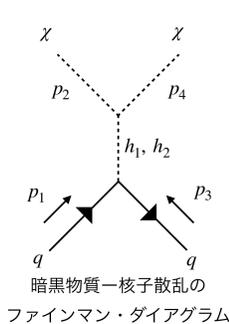
## 縮退スカラーシナリオ in CxSM

質量固有状態  $h_1, h_2$  が媒介するときの暗黒物質と SM quarkの散乱振幅  $i\mathcal{M}_1, i\mathcal{M}_2$

$$i) \quad i\mathcal{M}_1 = -i \frac{m_f m_{h_1}^2 + \frac{\sqrt{2}a_1}{v_S}}{v v_S t - m_{h_1}^2} \sin \alpha \cos \alpha \bar{u}(p_3) u(p_1)$$

$$ii) \quad i\mathcal{M}_2 = +i \frac{m_f m_{h_2}^2 + \frac{\sqrt{2}a_1}{v_S}}{v v_S t - m_{h_2}^2} \sin \alpha \cos \alpha \bar{u}(p_3) u(p_1)$$

→  $i\mathcal{M}_1 + i\mathcal{M}_2 \propto F(m_{h_1}^2 - m_{h_2}^2) \simeq 0 \quad (@m_{h_1} \simeq m_{h_2})$



→ 質量固有状態  $h_1, h_2$  の質量が縮退するとき、  
直接探索実験の強い制限を満たすことが可能

## CxSMの拡張の動機 (DMの残存量)

### 暗黒物質の残存量

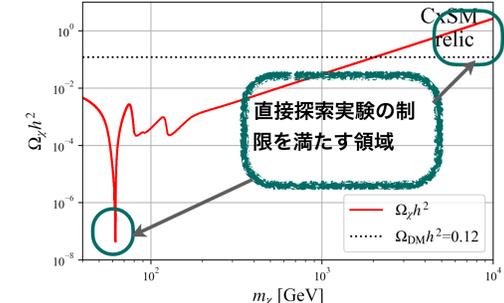
；宇宙マイクロ波背景放射により、  
現在宇宙に存在している  
暗黒物質の残存量が観測されている

→  $\Omega_{DM} h^2 = 0.12 \pm 0.012$

Planck Collaboration, N. Aghanim et al., arXiv:1807.06209[astro-ph.CO]]

### 暗黒物質の残存量 in CxSM

強い電弱一次相転移が生じるベンチマークポイントでの暗黒物質粒子  $\chi$  の残存量  $\Omega_\chi h^2$



暗黒物質候補粒子  $\chi$  だけでは観測値に及ばない

→ 新たな暗黒物質候補粒子を導入した模型を考える動機

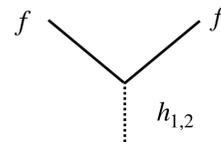
Gi-Chol Cho, Chikako Idegawa, Eibun Senaha, arXiv:2105.11830 [hep-ph]

## CxSM + fermion DM $f$

追加される Lagrangian

$$\mathcal{L}_{\text{yukawa}} = -\lambda_f \bar{f} f S + \text{h.c.} = -\lambda_f \bar{f} f (v_S + s + i\chi) + \text{h.c.}$$

$$\supset -\lambda_f \bar{f} f (h_1 \sin \alpha + h_2 \cos \alpha)$$



## 直接探索実験からの強い制限と縮退スカラーシナリオ in CxSM + fermion DM

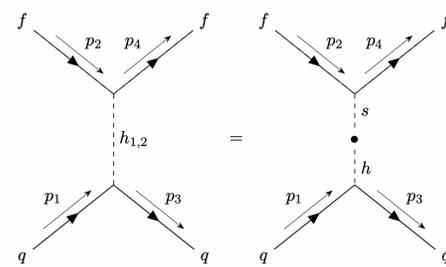
質量固有状態  $h_1, h_2$  が媒介するときの fermion DM と SM quarkの散乱振幅  $i\mathcal{M}_{f1}, i\mathcal{M}_{f2}$

$$i) \quad i\mathcal{M}_{f1} = -i \frac{m_f \lambda_f}{v t - m_{h_1}^2} \sin \alpha \cos \alpha \bar{u}(p_3) u(p_1)$$

$$ii) \quad i\mathcal{M}_{f2} = +i \frac{m_f \lambda_f}{v t - m_{h_2}^2} \sin \alpha \cos \alpha \bar{u}(p_3) u(p_1)$$

→  $i\mathcal{M}_{f1} + i\mathcal{M}_{f2} \propto F(m_{h_1}^2 - m_{h_2}^2)$

$\simeq 0 \quad (@m_{h_1} \simeq m_{h_2})$



→ CxSMと同様に質量固有状態  $h_1, h_2$  の質量が縮退するとき  
直接探索実験の強い制限を満たす

## CxSM + fermion DM $f$ での phenomenology

### DM残存量の観測値を満たすパラメータ ( $m_f, \lambda_f$ )

in CxSM + fermion DM ; scalar DM の質量 ;  $m_\chi = 62.5\text{GeV}$  に固定

→ scalar DM  $\chi$  は scalar  $h_1, h_2$  を媒介とする  
消滅過程の共鳴増強によりほぼ消えてしまう

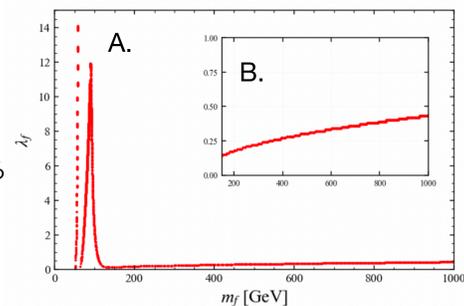
A.  $m_f \leq 130\text{ GeV}$  の場合；

$\lambda_f$  の許される領域が広い

B.  $130\text{ GeV} \leq m_f \leq 1000\text{ GeV}$  の場合；

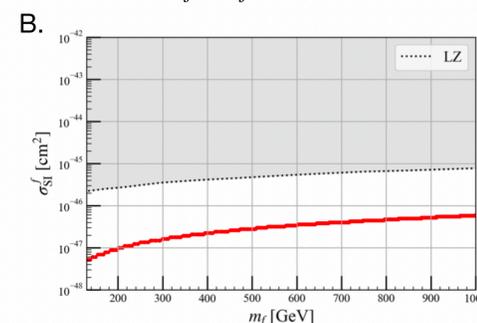
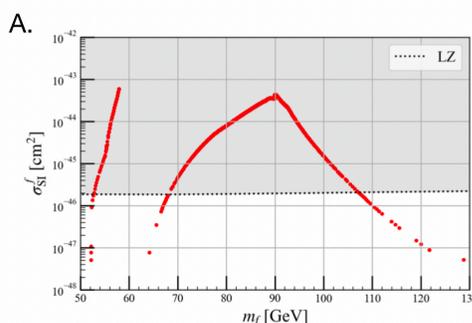
$\lambda_f$  の許される領域；  $\lambda_f \leq 0.5$

→ fermion DM の湯川結合が強すぎるとDMの量が減少しすぎる



### 直接探索実験の制限と

### DM残存量の観測値を満たすパラメータ ( $m_f, \lambda_f$ ) の関係



fermion DM-核子散乱断面積  $\sigma_{SI}^f$ ；

A.  $m_f \leq 130\text{ GeV}$  の場合；

$\lambda_f$  の許される領域が広く fermion DM-核子散乱断面積  $\sigma_{SI}^f$  は  $\lambda_f^2$  に比例しているため、除外される領域が存在する

B.  $130\text{ GeV} \leq m_f \leq 1000\text{ GeV}$  の場合；

$\lambda_f$  の許される領域；  $\lambda_f \leq 0.5$  が小さい → 全ての  $m_f$  領域で許される

$$\sigma_{SI}^f \propto \lambda_f^2 \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha \left( \frac{1}{m_{h_1}^2} - \frac{1}{m_{h_2}^2} \right)^2 = \frac{\lambda_f^2 \delta_2^2 v^2 v_S^2}{4m_{h_1}^4 m_{h_2}^4}$$

## まとめ

- Scalar DM  $\chi$  の足りない残存量を補うために fermion DM  $f$  を導入した。
- 新たに導入した fermion DM は vector-like と仮定している。
- 暗黒物質の残存量の観測値を満たす fermion DM の質量  $m_f$  と新しい yukawa coupling  $\lambda_f$  のパラメータ空間を確認した。
- さらに、残存量の観測値を満たすパラメータ ( $m_f, \lambda_f$ ) の値が直接探索実験の制限を満たす条件を求めた。