

Z_3 対称性で安定化する 擬南部ゴールドストーンボソン暗黒物質

津村浩二 (九州大)

2025年9月1-5日, 素粒子物理学の進展2025 @ 基研

A model of pseudo-Nambu-Goldstone dark matter with two complex scalars

T. Abe, Y. Hamada, K. Tsumura

[JHEP 05 \(2024\) 076](#) [arXiv:2401.02397 \[hep-ph\]](#)

Pseudo-Nambu-Goldstone-boson Dark Matter from Three Complex Scalars

R. Sheikh, T. Toma, K. Tsumura

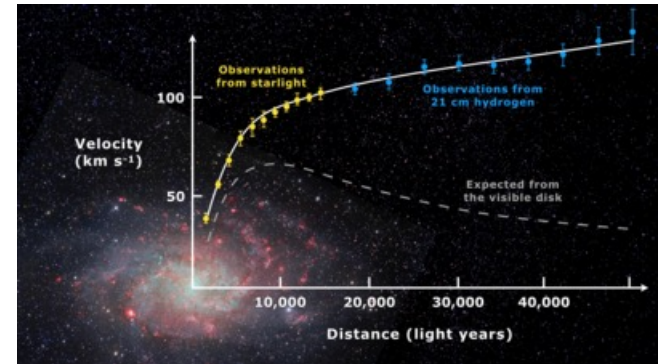
[JHEP 08 \(2025\) 018](#), [arXiv:2504.19886 \[hep-ph\]](#)

目次

- pNGB 暗黒物質とは
- 入れ替え対称性と pNGB 暗黒物質
- Z_3 対称性と pNGB 暗黒物質
- まとめ

暗黒物質はある

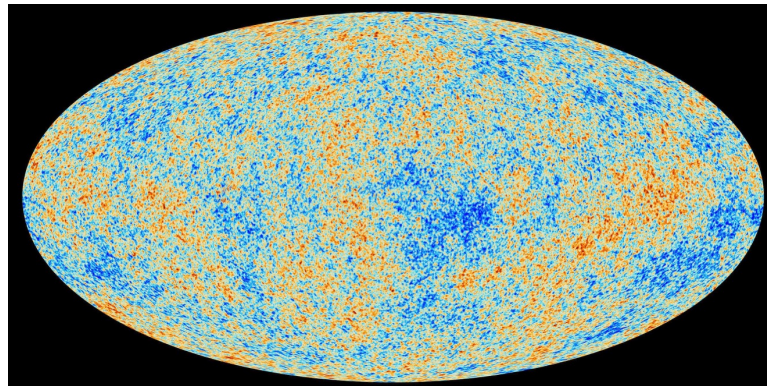
- 銀河の回転曲線
- 銀河の速度分散
- クラスタ銀河の重力レンズ効果
- バリオン音響振動
- 宇宙マイクロ波背景放射
- タイプIa型超新星による距離の測定
- Lyman-Alpha Forest
- 宇宙の構造形成



https://en.wikipedia.org/wiki/Galaxy_rotation_curve



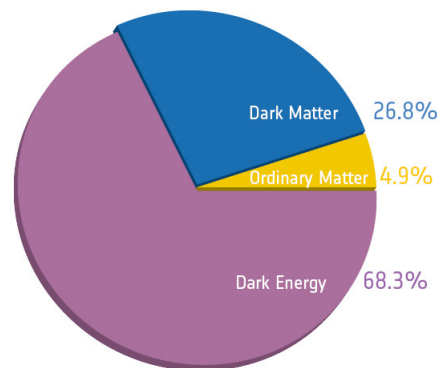
https://en.wikipedia.org/wiki/Dark_matter



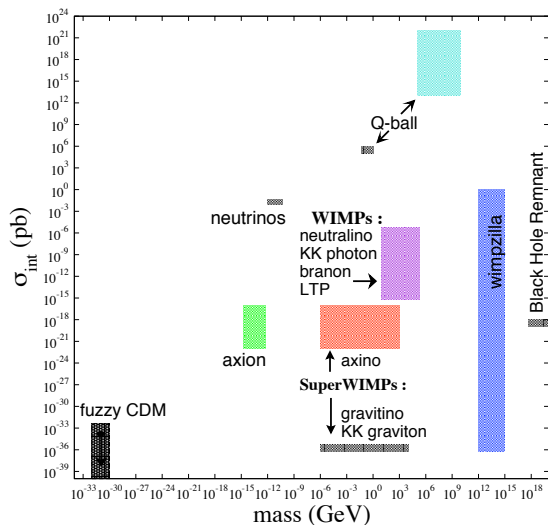
Planck

暗黒物質の性質

- 安定 (宇宙年齢より長寿命)
- 電氣的に中性
- 宇宙のエネルギー密度の27%
- 非相対論的 (冷たい)



Some Dark Matter Candidate Particles



暗黒物質の候補

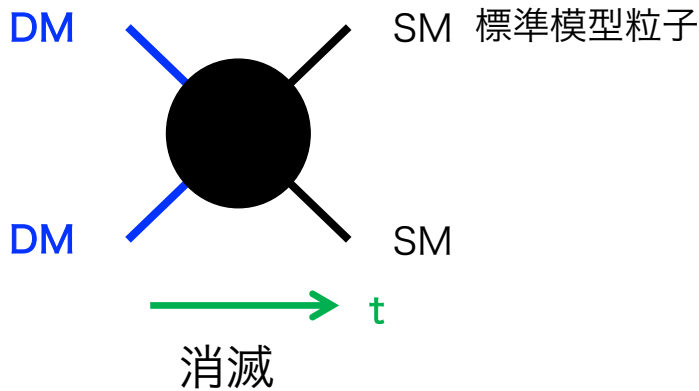
- ✓ 原始ブラックホール
- ~~✗ ニュートリノ (熱い)~~
- ✓ **WIMP [Weakly Interacting Massive Particle]**
- ✓ SIMP
- ✓ アクシオン, アクシオンクラスター
- ✓ ソリトン (電弱スキルミオン, Q-ball, B-ball, ...)
- ✓ 超質量残骸 (WIMPzilla, ...)
- ✓ ...

WIMP暗黒物質

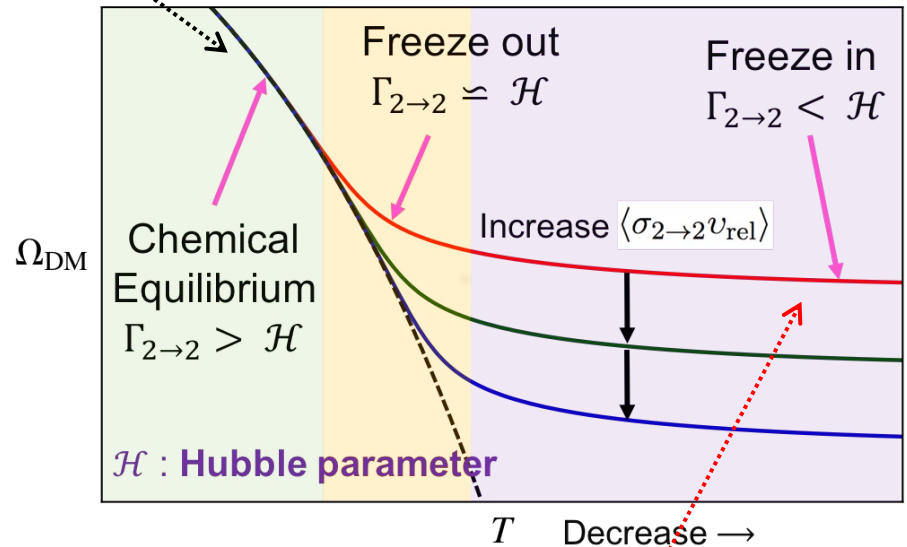
- 化学平衡中に**熱的**に生成される

$$\dot{n} + 3Hn = -(n^2 - n_{\text{eq}}^2)\langle\sigma_{2\rightarrow 2}v_{\text{rel}}\rangle$$

- 残存量の**凍結**



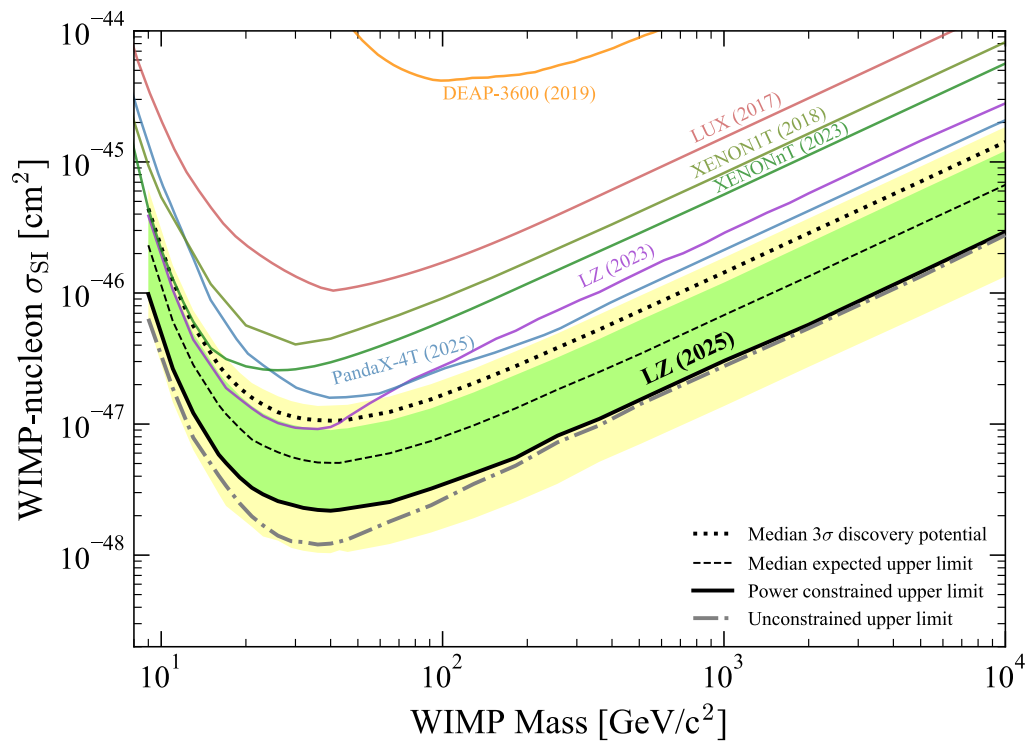
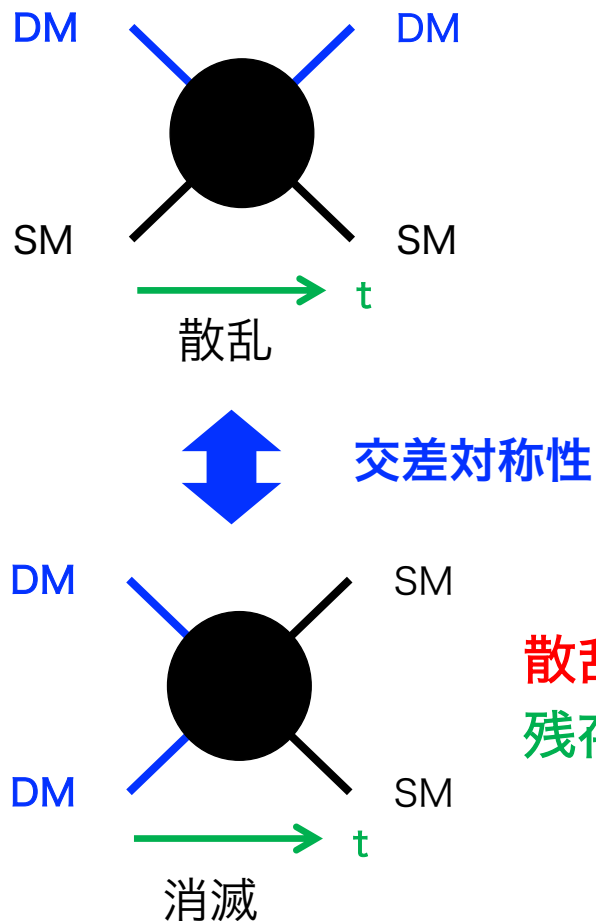
$$\Gamma_{2\rightarrow 2} = n_{\text{DM}}\langle\sigma_{2\rightarrow 2}v_{\text{rel}}\rangle$$



$$\sigma_{2\rightarrow 2} \equiv \frac{\alpha_{2\rightarrow 2}^2}{M_{\text{DM}}^2} \quad \Rightarrow \quad \Omega_{\text{DM}}h^2 \simeq 0.12 \times \frac{3 \times 10^{-26} \text{ cm}^3/\text{s}}{\langle\sigma_{2\rightarrow 2}v_{\text{rel}}\rangle}$$

暗黒物質探索

● 直接検出



散乱断面積の制限が次第に強くなっている一方で、
残存量を凍結させるための断面積は決まっている!!

pNGB暗黒物質

GLT模型

部分群

- $U(1)_S$ 対称性: $H \rightarrow H, S \rightarrow e^{i\theta_S} S$

$$Z_2 : H \rightarrow H, S \rightarrow -S$$

$$\mathcal{V}(H, S) = -\frac{\mu_H^2}{2}|H|^2 + \frac{\lambda_H}{2}|H|^4 - \frac{\mu_S^2}{2}|S|^2 + \frac{\lambda_S}{2}|S|^4 + \lambda_{HS}|H|^2|S|^2$$

$$-\frac{m^2}{4}(S^2 + (S^*)^2) \quad U(1)_S \text{のソフトな破れ}$$

- 暗黒荷電共役対称性 $(C)_S : H \rightarrow H, S \rightarrow S^*$

- 自発的対称性の破れ $\langle H \rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ v \end{pmatrix}, \langle S \rangle = \frac{v_S}{\sqrt{2}}$

→ pNGB (phase of S) $m^2=0$ 極限でNGB (技巧的に自然)

擬南部ゴールドストーンボソン

- 対称性の破れのまとめ

$$U(1)_S^{\text{global}} \times (C)_S \xrightarrow[\text{(p)NGB}]{\text{soft}} \mathbb{Z}_2 \times (C)_S \xrightarrow{\text{SSB}} (C)_S \quad \text{pNGBを安定化}$$

pNGB暗黒物質での直接検出の抑制

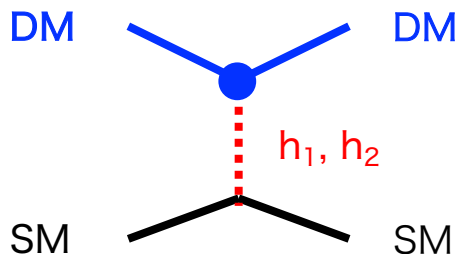
- スカラー混合 $H = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{v+h}{\sqrt{2}} \end{pmatrix}$, $S = \frac{v_s + s + i a}{\sqrt{2}}$, C_S 奇 (暗黒物質の候補)
 $a \rightarrow -a$

$$\begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h \\ s \end{bmatrix}$$

C_S 偶

- 散乱振幅の低エネルギー極限

$$\mathcal{L}_{\text{Yukawa}} = -\frac{m_f}{v} \bar{f} f (v + h) = -\frac{m_f}{v} \bar{f} f (v + h_1 \cos \theta + h_2 \sin \theta).$$



$$\begin{aligned} \mathcal{A}_{dd} &\propto \sin \theta \cos \theta \left(\frac{m_1^2}{t - m_1^2} - \frac{m_2^2}{t - m_2^2} \right) \\ &\simeq \sin \theta \cos \theta \frac{m_2^2 - m_1^2}{m_1^2 m_2^2} t + \mathcal{O}(t^2) \simeq 0 \end{aligned}$$

2つのファインマン図の間でキャンセルする

GLT模型

C. Gross, O. Lebedev, T. Toma, PRL (2017)

部分群

$$Z_2 : H \rightarrow H, S \rightarrow -S$$

- $U(1)_S$ 対称性 : $H \rightarrow H, S \rightarrow e^{i\theta_S} S$

$$\mathcal{V}(H, S) = -\frac{\mu_H^2}{2}|H|^2 + \frac{\lambda_H}{2}|H|^4 - \frac{\mu_S^2}{2}|S|^2 + \frac{\lambda_S}{2}|S|^4 + \lambda_{HS}|H|^2|S|^2$$

$$-\frac{m^2}{4}(S^2 + (S^*)^2) \quad U(1)_S \text{のソフトな破れ}$$

- 暗黒荷電共役対称性 $(C)_S : H \rightarrow H, S \rightarrow S^*$
- 自発的対称性の破れ $\langle H \rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ v \end{pmatrix}, \langle S \rangle = \frac{v_S}{\sqrt{2}}$

→ pNGB (phase of S) $m^2=0$ 極限でNGB

擬南部ゴールドストーンボソン

- 対称性の破れのまとめ

$$U(1)_S^{\text{global}} \times (C)_S \xrightarrow[\text{(p)NGB}]{\text{soft}} \mathbb{Z}_2 \times (C)_S \xrightarrow{\text{SSB}} (C)_S \quad \text{NGBを安定化}$$

GLT模型の問題点 : Z_2 の自発的破れ → DW問題

偶発的対称性のソフトな破れ

偶発的対称性

- 2個のスカラー場からなる $U(1)_1 \times U(1)_2$ 理論

$$\mathcal{V}(S_1, S_2) = \mathcal{V}_1(|S_1|^2) + \mathcal{V}_2(|S_2|^2) + \lambda_{12}|S_1|^2|S_2|^2$$

$$U(1)_1 : S_1 \rightarrow e^{i\theta_1} S_1$$

$$U(1)_2 : S_2 \rightarrow e^{i\theta_2} S_2$$

SSB ↓ $\langle S_1 \rangle = \frac{v_1}{\sqrt{2}}$

SSB ↓ $\langle S_2 \rangle = \frac{v_2}{\sqrt{2}}$

a_1

a_2

NGB x 2

偶発的対称性のソフトな破れ

- $U(1)_1 \times U(1)_2$ をソフトに破る理論 : $U(1)_1 \times U(1)_2 \rightarrow U(1)_S$

$$\mathcal{V}(S_1, S_2) = \mathcal{V}_1(|S_1|^2) + \mathcal{V}_2(|S_2|^2) - \frac{m^2}{2} S_2^* S_1 + \text{H.c.}$$

$$U(1)_1 : S_1 \rightarrow e^{i\theta_1} S_1 \qquad U(1)_2 : S_2 \rightarrow e^{i\theta_2} S_2$$

SSB ↓ $\langle S_1 \rangle = \frac{v_1}{\sqrt{2}}$

SSB ↓ $\langle S_2 \rangle = \frac{v_2}{\sqrt{2}}$

a_1

a_2

NGB x 1 + pNGB x 1

$m^2=0$ 極限でNGB

線形結合の取り直し

$$\begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} G \\ a \end{bmatrix}$$

$U(1)_S$ をゲージ化するとゲージ場に吸収される

暗黒物質の候補

$$\begin{cases} S_1 \rightarrow e^{i\theta(x)} S_1 \\ S_2 \rightarrow e^{i\theta(x)} S_2 \end{cases}$$

入れ替え対称性とpNGB暗黒物質

$$U(1)_D \times "S_1 \leftrightarrow S_2"$$

入れ替え対称模型

A model of pseudo-Nambu-Goldstone dark matter with two complex scalars
 T. Abe, Y. Hamada, K. Tsumura
[JHEP 05 \(2024\) 076 arXiv:2401.02397 \[hep-ph\]](https://arxiv.org/abs/2401.02397)

- $U(1)_D$ で同じ変換をする **複素スカラーを2個**

$$\mathcal{V}(S_1, S_2) = \mathcal{V}_1(|S_1|^2) + \mathcal{V}_2(|S_2|^2) + \lambda_{12}|S_1|^2|S_2|^2 - \frac{m^2}{2} S_2^* S_1 + \text{H.c.}$$

$$U(1)_1 \times U(1)_2 \rightarrow U(1)_D : \begin{cases} S_1 \rightarrow e^{i\theta(x)} S_1 \\ S_2 \rightarrow e^{i\theta(x)} S_2 \end{cases}$$

$$\text{ソフトに破った対称性 } U(1)_A : \begin{cases} S_1 \rightarrow e^{+i\theta_A} S_1 \\ S_2 \rightarrow e^{-i\theta_A} S_2 \end{cases}$$

- **入れ替え対称性** ($S_1 \leftrightarrow S_2$) を課す

$$\mathcal{V}(S_1, S_2) = -\frac{\mu_S^2}{2} (|S_1|^2 + |S_2|^2) + \frac{\lambda_S}{2} (|S_1|^4 + |S_2|^4) + \lambda_{S12}|S_1|^2|S_2|^2 - \frac{m^2}{2} S_2^* S_1 + \text{H.c.}$$

- **自発的対称性の破れ (停留条件)** $\langle S_1 \rangle = \frac{v_1}{\sqrt{2}}, \langle S_2 \rangle = \frac{v_2}{\sqrt{2}}$

$$\begin{cases} \frac{\partial \langle \mathcal{V} \rangle}{\partial v_1} = \frac{v_1}{2} \left[-\mu_S^2 - m^2 \frac{v_2}{v_1} + \lambda_S v_1^2 + \lambda_{S12} v_2^2 \right] = 0 \\ \frac{\partial \langle \mathcal{V} \rangle}{\partial v_2} = \frac{v_2}{2} \left[-\mu_S^2 - m^2 \frac{v_1}{v_2} + \lambda_S v_2^2 + \lambda_{S12} v_1^2 \right] = 0 \end{cases}$$

⇒ **真空の構造**

$$\begin{cases} v_1 = v_2 = 0 & \text{自明な解} \\ v_1 = v_2 = \frac{v_S}{\sqrt{2}} \neq 0 & \text{非自明な解} \end{cases}$$

残存対称性による粒子場の分類

● 場の再定義

$$\text{SSB } \langle S_+ \rangle = \frac{v_S}{\sqrt{2}}, \quad \langle S_- \rangle = 0$$

$$\begin{cases} S_+ = \frac{S_1 + S_2}{\sqrt{2}} \rightarrow +S_+ & \text{入れ替え偶 (変換しない)} \\ S_- = \frac{S_1 - S_2}{\sqrt{2}} \rightarrow -S_- & \text{入れ替え奇} \end{cases}$$

⇒ **入れ替え対称性は破れない!** $\langle S_- \rangle = \langle -S_- \rangle = 0$

● ポテンシャル

$$(C)_S : \begin{cases} S_+ \rightarrow S_+^* \\ S_- \rightarrow S_-^* \end{cases}$$

$$\begin{aligned} \mathcal{V}(S_1, S_2) = & -\frac{\mu_S^2}{2} (|S_+|^2 + |S_-|^2) + \frac{\lambda_S}{2} (|S_+|^2 + |S_-|^2)^2 \\ & - \frac{\lambda_S - \lambda_{S12}}{4} \left\{ |S_+|^4 + |S_-|^4 - [(S_+^*)^2 S_-^2 + (S_-^*)^2 S_+^2] \right\} - \frac{m^2}{2} (|S_+|^2 - |S_-|^2) \end{aligned}$$

⇒ (C)_S対称性も破れない $\langle S_+ \rangle = \langle S_+^* \rangle$

● 粒子場の分類

ゲージ場に吸収 [CP-奇]

$$S_+ = \frac{v_S + s_+ + iG_+}{\sqrt{2}}, \quad S_- = \frac{s_- + ia_-}{\sqrt{2}}$$

軽いほうが安定化

pNGB暗黒物質での直接検出の抑制

● スカラー混合 $H = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{v+h}{\sqrt{2}} \end{pmatrix}$, $S_+ = \frac{v_s + s_+ + iG_+}{\sqrt{2}}$, $S_- = \frac{s_- + ia_-}{\sqrt{2}}$

$$\begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h \\ s \end{bmatrix}$$

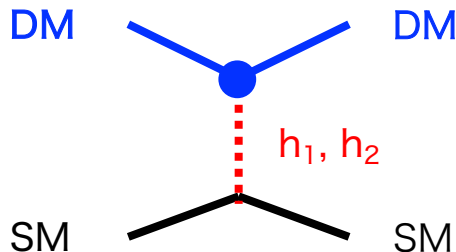
安定なpNGB暗黒物質

仮定: $m_{s_-} > m_{a_-}$

Sは真空期待値を持たないのにpNGBの性質を持つ

● 散乱振幅の低エネルギー極限

$$\mathcal{L}_{\text{Yukawa}} = -\frac{m_f}{v} \bar{f} f (v + h) = -\frac{m_f}{v} \bar{f} f (v + h_1 \cos \theta + h_2 \sin \theta).$$



$$\begin{aligned} \mathcal{A}_{dd} &\propto \sin \theta \cos \theta \left(\frac{m_1^2}{t - m_1^2} - \frac{m_2^2}{t - m_2^2} \right) \\ &\simeq \sin \theta \cos \theta \frac{m_2^2 - m_1^2}{m_1^2 m_2^2} t + \mathcal{O}(t^2) \simeq 0 \end{aligned}$$

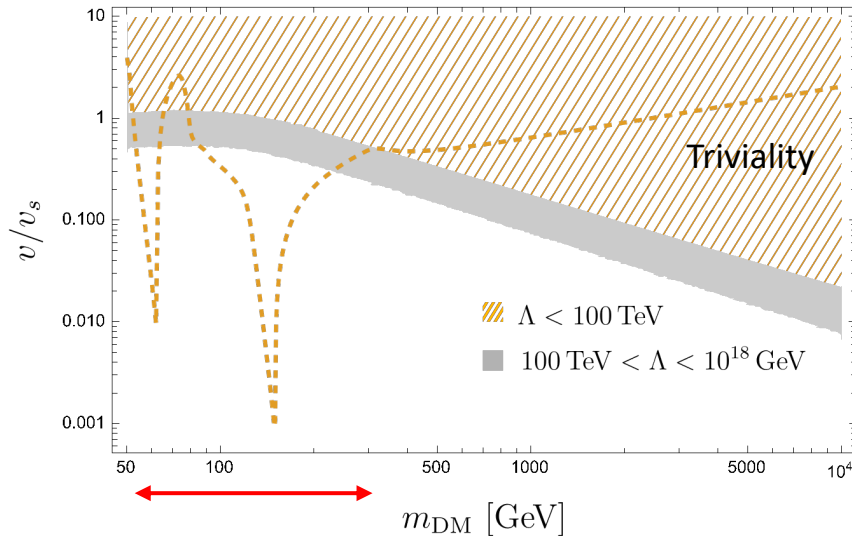
2つのファインマン図の間でキャンセルする

模型の予言

- 軽い Z_D によって新たなパラメタ領域が許容される

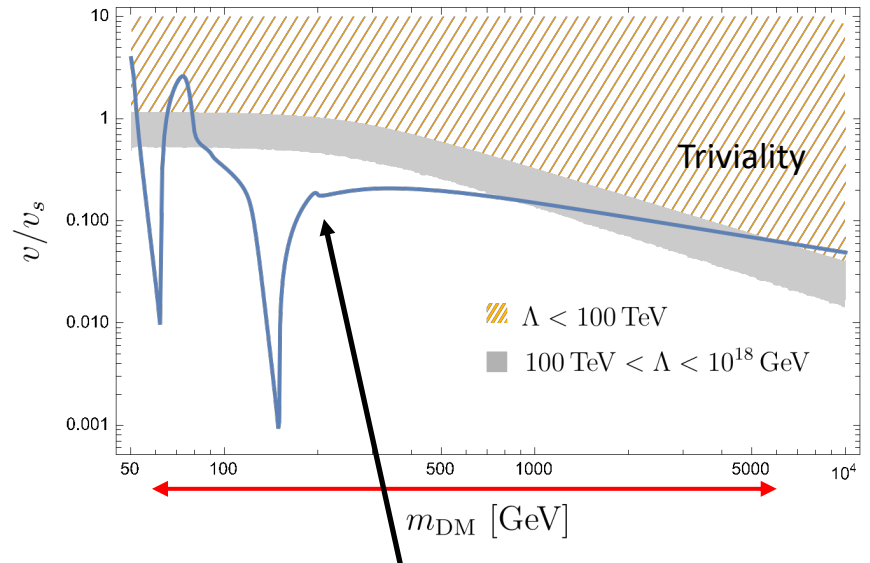
GLT模型や過去の模型 (重い Z_D)

$m_{h'} = 300 \text{ GeV}$, $m_{s_-} = 1.5 m_{\text{DM}}$, $m_{Z_D} = 3 m_{\text{DM}}$

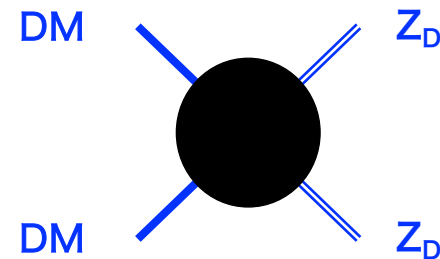


軽い Z_D が存在する場合

$m_{h'} = 300 \text{ GeV}$, $m_{s_-} = 1.5 m_{\text{DM}}$, $m_{Z_D} = 200 \text{ GeV}$



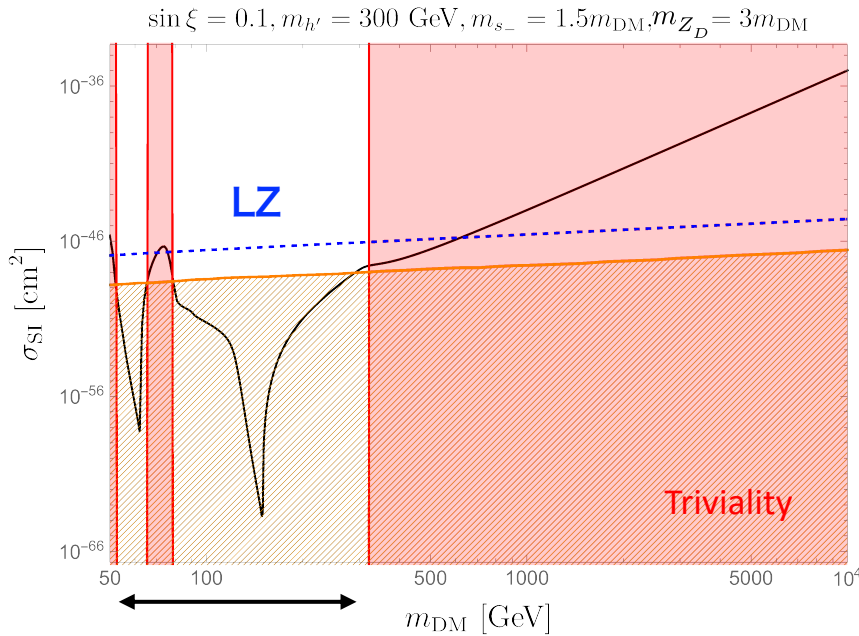
許容される暗黒物質質量 (for $\Lambda = 100 \text{ TeV}$)



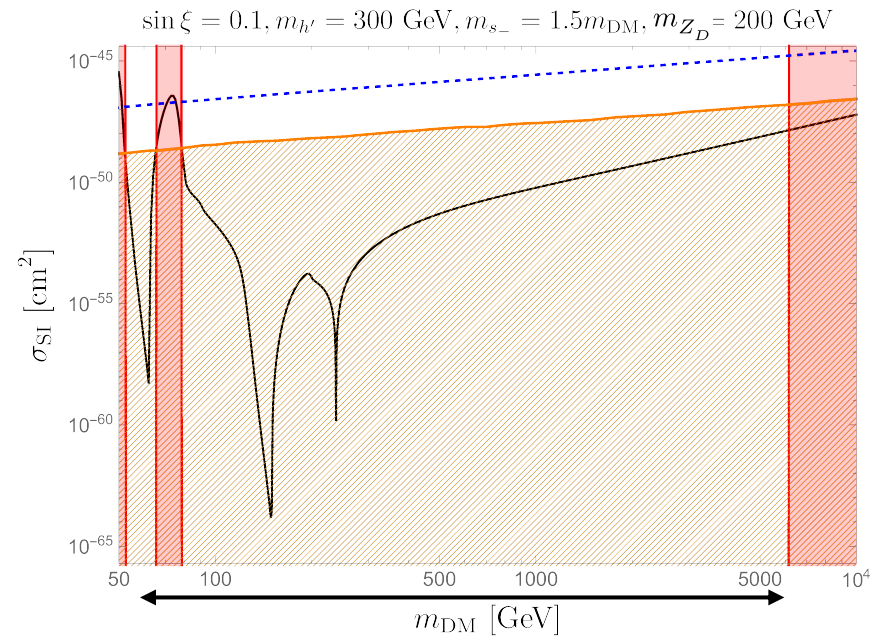
模型の予言

- 信号は背景事象（ニュートリノフォグ）に埋もれる

オリジナル模型や過去の模型的



軽い Z_D が存在する場合

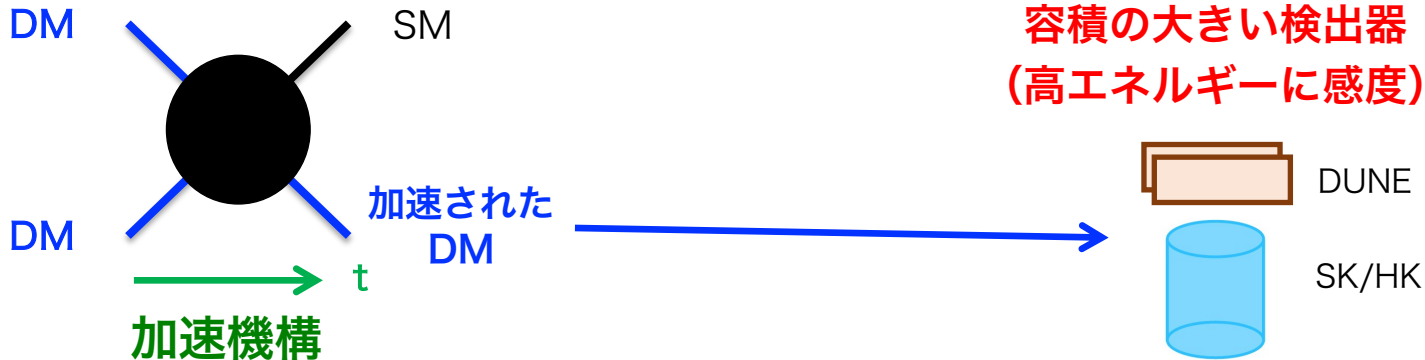


許容される暗黒物質質量 (for $\Lambda = 100\text{TeV}$)

Z_3 対称性とpNGB暗黒物質

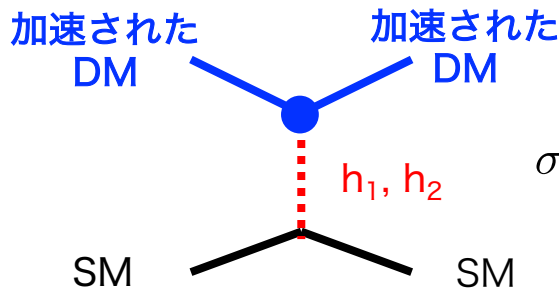
加速された暗黒物質信号

- 現在の宇宙における暗黒物質の**半対消滅**



$$v_{\text{DM}} \sim 10^{-3} \rightarrow \sim O(1) \quad v_{\text{DM}} = \sqrt{1 - \frac{m_{\text{DM}}^2}{E_{\text{DM}}^2}} \leq 3/5, \quad E_{\text{DM}} = \frac{5}{4} m_{\text{DM}} \left(1 - \frac{m_{Z'}^2}{5m_{\text{DM}}^2}\right)$$

- 散乱断面積



$$\sigma_{\text{el}} \approx \frac{f_N^2 \sin^2 2\theta m_N^4}{24\pi v^2 v_s^2 s^3} \frac{(m_1^2 - m_2^2)^2}{m_1^4 m_2^4} (s - m_{\text{DM}}^2 - m_N^2)^4 v_{\text{DM}}^4$$

断面積の増大 $O(10^{12})$

3 スカラーモデル

- $U(1)_D$ で同じ変換をする **複素スカラーを3個**

$$\begin{cases} S_1 \rightarrow e^{i\theta(x)} S_1 \\ S_2 \rightarrow e^{i\theta(x)} S_2 \\ S_3 \rightarrow e^{i\theta(x)} S_3 \end{cases}$$

- **入れ替え対称性** ($S_1 \leftrightarrow S_2, S_2 \leftrightarrow S_3, S_3 \leftrightarrow S_1$) を課す

$$\begin{aligned} \mathcal{V}(S_1, S_2, S_3) = & -\mu_S^2 \left(|S_1|^2 + |S_2|^2 + |S_3|^2 \right) + \frac{\lambda_S}{2} \left(|S_1|^4 + |S_2|^4 + |S_3|^4 \right) \\ & + \lambda'_S \left(|S_1|^2 |S_2|^2 + |S_2|^2 |S_3|^2 + |S_3|^2 |S_1|^2 \right) \\ & - \frac{m^2}{3} \left(S_1^* S_2 + S_2^* S_3 + S_3^* S_1 + \text{H.c.} \right) \quad \text{ソフトな破れ} \\ & \dots\dots\dots \\ & U(1)_1 \times U(1)_2 \times U(1)_3 \xrightarrow{\text{soft}} U(1)_D \end{aligned}$$

真空構造の解析

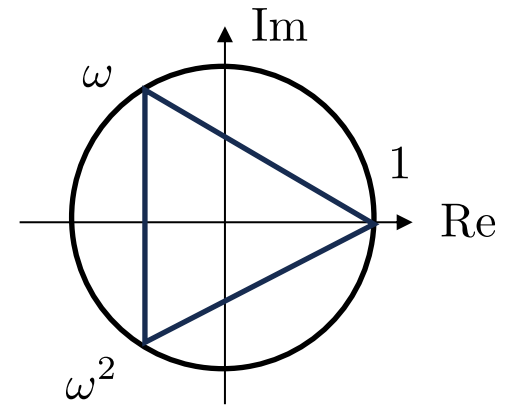
- 自発的対称性の破れ (停留条件) $\langle S_1 \rangle = \frac{v_1}{\sqrt{2}}, \langle S_2 \rangle = \frac{v_2}{\sqrt{2}}, \langle S_3 \rangle = \frac{v_3}{\sqrt{2}}$

$$\begin{cases} \frac{\partial \langle \mathcal{V} \rangle}{\partial v_1} = \frac{v_1}{2} \left[-\mu_S^2 - m^2 \frac{v_2+v_3}{v_1} + \lambda_S v_1^2 + \lambda'_S (v_2^2 + v_3^2) \right] = 0 \\ \frac{\partial \langle \mathcal{V} \rangle}{\partial v_2} = \frac{v_2}{2} \left[-\mu_S^2 - m^2 \frac{v_3+v_1}{v_2} + \lambda_S v_2^2 + \lambda'_S (v_3^2 + v_1^2) \right] = 0 \\ \frac{\partial \langle \mathcal{V} \rangle}{\partial v_3} = \frac{v_3}{2} \left[-\mu_S^2 - m^2 \frac{v_1+v_2}{v_3} + \lambda_S v_3^2 + \lambda'_S (v_1^2 + v_2^2) \right] = 0 \end{cases}$$

⇒ 真空の構造

$$\begin{cases} v_1 = v_2 = v_3 = 0 & \text{自明な解} \\ v_1 \neq 0, v_2 = 0, v_3 = -v_1 & \text{非自明な解①} \\ v_1 = v_2 = v_3 = \frac{v_S}{\sqrt{3}} \neq 0 & \text{非自明な解② (} \rightarrow \text{残存} Z_3 \text{対称性)} \end{cases}$$

対称性の特定



$$1 + \omega + \omega^2 = 0$$

$\Sigma_{2,3}$ は真空期待値を持たない

- 離散フーリエ変換 $\omega = e^{2\pi i/3} (\omega^3 = 1)$

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \Sigma_1 \\ \Sigma_2 \\ \Sigma_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} \omega & \frac{1}{\sqrt{3}} \omega^2 \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} \omega^2 & \frac{1}{\sqrt{3}} \omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix}$$

- ポテンシャル

$$V(\Sigma) = \frac{\lambda_S}{6} \left\{ \underbrace{\left(\Sigma^\dagger \Sigma - \frac{v_s^2}{2} \right)^2}_{+m^2(\Sigma^\dagger T_0 \Sigma)} + 2 \underbrace{|\Sigma^\dagger T_1 \Sigma|^2}_{\text{SU(3)不変}} \right\} + \frac{\lambda'_S}{3} \left\{ \underbrace{\left(\Sigma^\dagger \Sigma - \frac{v_s^2}{2} \right)^2}_{\text{SU(3)不変}} - \underbrace{|\Sigma^\dagger T_1 \Sigma|^2}_{\text{シフト不変}} \right\}$$

$$\Sigma \rightarrow e^{i\theta_a \lambda_a} \Sigma \quad \Sigma \rightarrow T_1 \Sigma$$

$$T_0 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad T_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad T_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \omega & 0 \\ 0 & 0 & \omega^2 \end{bmatrix}$$

$$\begin{cases} \Sigma_1 \rightarrow \Sigma_3 \\ \Sigma_2 \rightarrow \Sigma_1 \\ \Sigma_3 \rightarrow \Sigma_2 \end{cases}$$

Z₃対称性

$$\Sigma \rightarrow T_3 \Sigma \quad \begin{cases} \Sigma_1 \rightarrow \Sigma_1 \\ \Sigma_2 \rightarrow \omega \Sigma_2 \\ \Sigma_3 \rightarrow \omega^2 \Sigma_3 \end{cases}$$

$$T_1 T_3 = \omega^3 T_3 T_1 \quad (\text{破れない})$$

$$T_0 T_3 = T_3 T_0 \quad (\text{ソフト項があっても破れない})$$

Z₃対称性

- (自発的対称性の破れの) **残存Z₃対称性**

$$\begin{cases} \Sigma_1 \rightarrow \Sigma_1 \\ \Sigma_2 \rightarrow \omega \Sigma_2 \\ \Sigma_3 \rightarrow \omega^2 \Sigma_3 \end{cases}$$

$$\langle \Sigma_1 \rangle = \frac{v_S}{\sqrt{2}}, \quad \langle \Sigma_2 \rangle = \langle \Sigma_3 \rangle = 0$$

$$T_3 \langle \Sigma \rangle = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \omega & 0 \\ 0 & 0 & \omega^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{v_S}{\sqrt{2}} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{v_S}{\sqrt{2}} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \langle \Sigma \rangle$$

- 質量固有状態

$$\begin{pmatrix} \Sigma_\omega \\ a_\omega \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Sigma_2 \\ \Sigma_3^* \end{pmatrix} \quad \begin{cases} \Sigma_\omega \rightarrow \omega \Sigma_\omega \\ a_\omega \rightarrow \omega a_\omega \end{cases}$$

Z₃対称性で安定なpNGB暗黒物質

- Z₃対称性に固有の相互作用

$$\mathcal{V}(a_\omega, \Sigma_\omega) \ni = +\frac{\lambda_S - \lambda'_S}{3} v_s \left\{ \Sigma_\omega^3 + \Sigma_\omega^{*3} - (\Sigma_\omega a_\omega^2 + \Sigma_\omega^* a_\omega^{*2}) \right\}$$

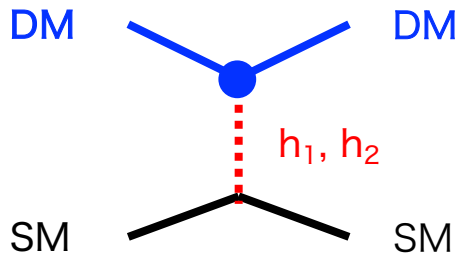
pNGB暗黒物質での直接検出の抑制

- スカラー混合 $H = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{v+h}{\sqrt{2}} \end{pmatrix}$, $\Sigma_1 = \frac{v_s + s_+ + iG_+}{\sqrt{2}}$, Σ_ω , a_ω
- 安定なpNGB暗黒物質

$$\begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h \\ s \end{bmatrix}$$

- 散乱振幅の低エネルギー極限

$$\mathcal{L}_{\text{Yukawa}} = -\frac{m_f}{v} \bar{f} f (v + h) = -\frac{m_f}{v} \bar{f} f (v + h_1 \cos \theta + h_2 \sin \theta).$$



$$\begin{aligned} \mathcal{A}_{dd} &\propto \sin \theta \cos \theta \left(\frac{m_1^2}{t - m_1^2} - \frac{m_2^2}{t - m_2^2} \right) \\ &\simeq \sin \theta \cos \theta \frac{m_2^2 - m_1^2}{m_1^2 m_2^2} t + \mathcal{O}(t^2) \simeq 0 \end{aligned}$$

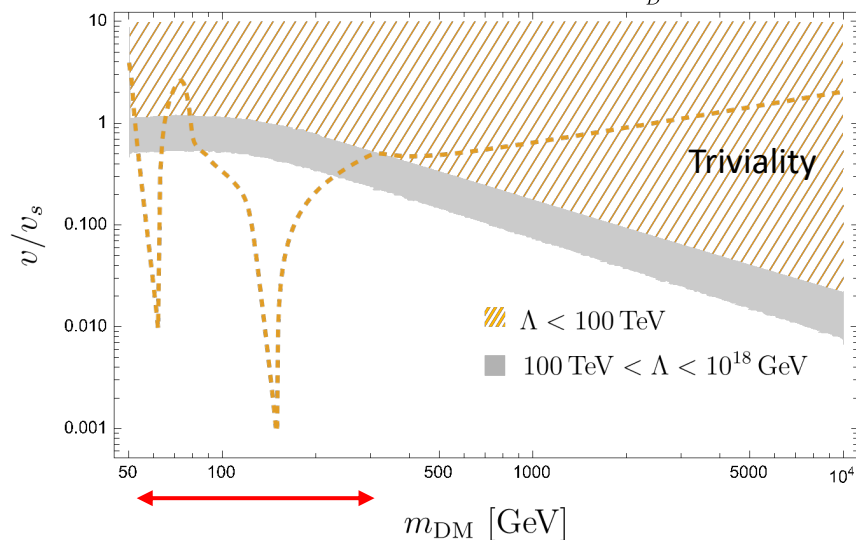
2つのファインマン図の間でキャンセルする

Z₃模型の予言

- 半対消滅によって新たなパラメタ領域が許容される

GLT模型や過去の模型 (重いZ_D)

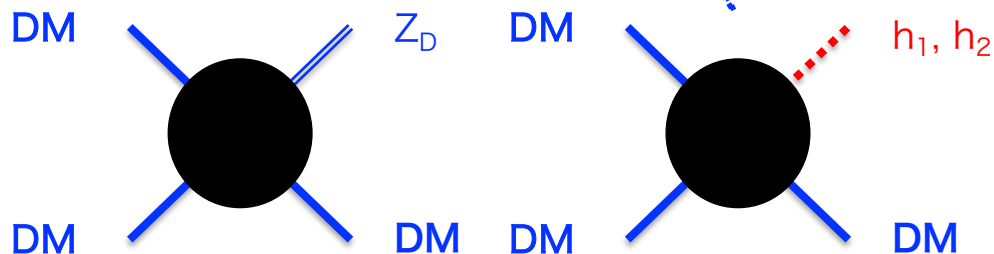
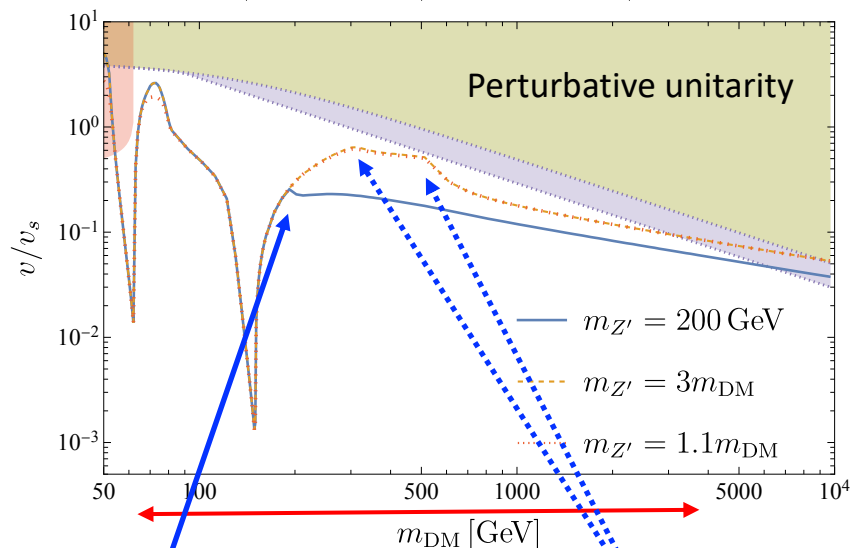
$$m_{h'} = 300 \text{ GeV}, m_{s_{\pm}} = 1.5 m_{\text{DM}}, m_{Z_D} = 3 m_{\text{DM}}$$



許容される暗黒物質質量

半消滅型の寄与が大きくなる

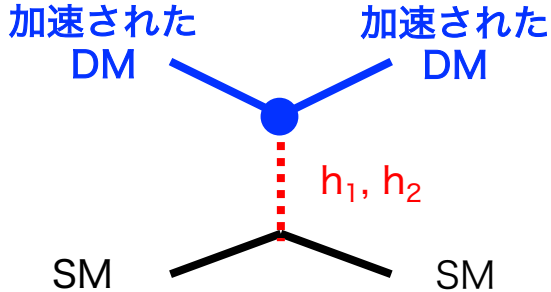
$$\sin \theta = 0.1, \sin \epsilon = 10^{-4}, m_2 = 300 \text{ GeV}, m_{\Sigma} = 1.5 m_{\text{DM}}$$



加速したpNGB暗黒物質

● 散乱断面積

断面積の増大 $O(10^{12})$

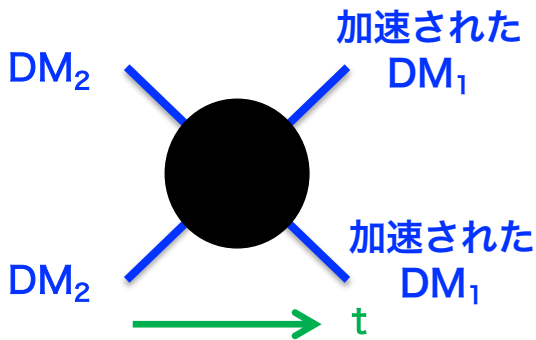


$$\sigma_{el} \approx \frac{f_N^2 \sin^2 2\theta m_N^4}{24\pi v^2 v_s^2 s^3} \frac{(m_1^2 - m_2^2)^2}{m_1^4 m_2^4} (s - m_{DM}^2 - m_N^2) v_{DM}^4$$

$$\sim \gamma_{DM}^4 \left(\frac{f_N^2}{m_{DM}^2} \right) \left(\frac{m_N^4}{m_h^4} \right) \left(\frac{m_N^4}{v^2 v_s^2} \right) v_{DM}^4 \sim 10^{-54} \text{ cm}^2$$

$\sim 10^{-42} \text{ cm}^2$ $\sim 10^{-12}$ さらなる抑制効果

加速機構次第でローレンツ因子でさらなる増幅が可能



$$\gamma_{DM} = \begin{cases} E_{DM}/m_{DM} \leq 5/4 & Z_3\text{pNGB模型} \\ m_{DM2}/m_{DM1} & \text{展望：多成分pNGB模型？} \end{cases}$$

検証可能なpNGB暗黒物質模型

まとめ

pNGB暗黒物質の検証に向けて

● pNGBは魅力的な暗黒物質候補

- ゲージ対称性に埋め込むとDW問題を回避できる
- 偶発的対称性のソフトな破れで質量を導入できる
- 以上は、暗黒物質の安定性を保ったまま実現できる
- 直接検出では**背景事象に埋もれて検証できない**

A model of pseudo-Nambu-Goldstone dark matter with two complex scalars

T. Abe, Y. Hamada, K. Tsumura

[JHEP 05 \(2024\) 076](#), [arXiv:2401.02397 \[hep-ph\]](#)

● 加速されたpNGB暗黒物質は観測できる可能性がある

- Z_3 対称性を保つpNGB模型で**加速機構を確認した**

Pseudo-Nambu-Goldstone-boson Dark Matter from Three Complex Scalars

R. Sheikh, T. Toma, K. Tsumura

[JHEP 08 \(2025\) 018](#), [arXiv:2504.19886 \[hep-ph\]](#)