

フレーバー構造で探る 暗黒物質

宮尾 光

Kagoshima Workshop on Particles, Fields and Strings
20th February 2023

Based on:

[1] C.Miyao, 修士論文.

[2] K. Asai, C. Miyao, S. Okawa, K. Tsumura, Phys. Rev. D **106**, 035017(2022).

目次

- 導入
- 暗黒物質と解決すべき課題
- 我々のモデルとその解析
- 結論と展望

SMは究極の理論？

 SMを超える現象が明らかに…

例えば,

- ニュートリノ振動.
- 暗黒物質 (Dark Matter, DM).
- ミューオン $g-2$ の理論値と実験値のずれの観測.
[3] Muon $g-2$ Collaboration, Phys. Rev. Lett.126, 141802 (2021).

等々…



SMを超える理論 (Beyond Standard Model, BSM)が必要.

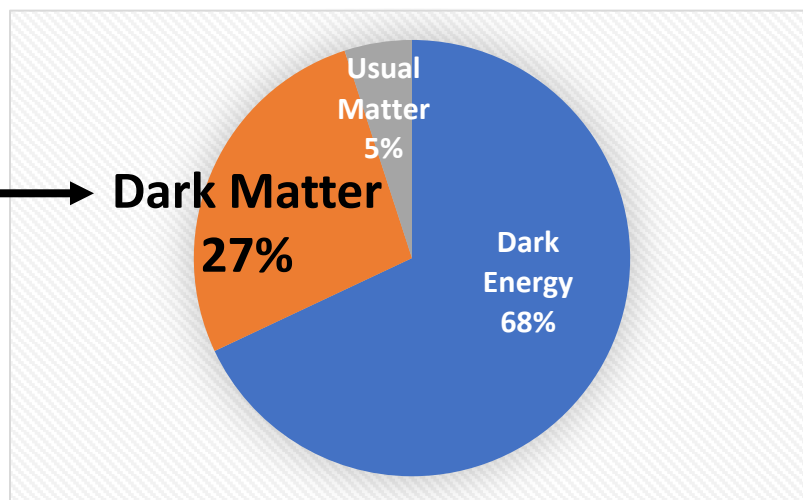
→ **我々はDMに注目.**

DMについて

- 宇宙のエネルギー密度の約27%.
- 様々な証拠がある.
銀河の回転速度, 重力レンズ効果, ...

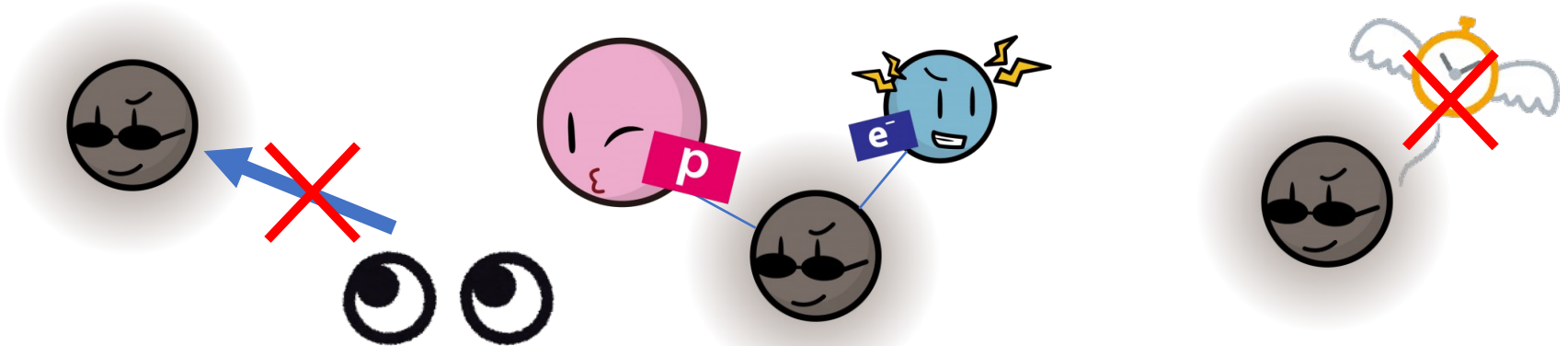
- 正体不明 .

秋本さんの
DMイメージ図



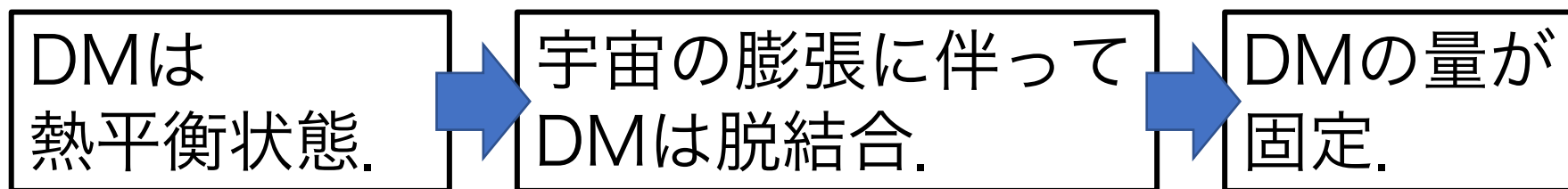
DMの性質

- 電磁相互作用しない.
- 他の物質との相互作用は弱い.
- 安定か宇宙年齢より長い寿命をもつ.



DMの残存量

- DMは熱的に生成されたと仮定.



- 熱的に生成されたDM残存量の理論値.

$$\Omega h^2 \sim \frac{10^{-28}}{\langle \sigma v \rangle_{\text{ann}}}$$

- 宇宙マイクロ波背景放射(CMB)の観測によりDM残存量の観測値は決定.

$$\Omega h_{\text{obs}}^2 \simeq 0.12$$

DMの検出方法

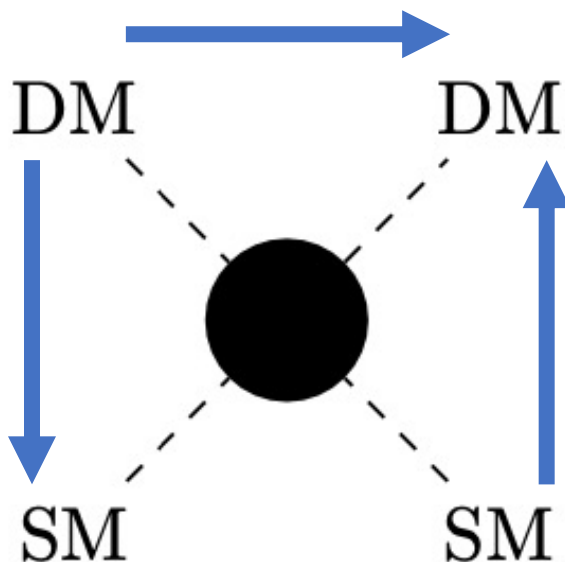
直接検出 (Direct Detection, DD)

DMによって散乱されるSMを観測する.

間接検出

(Indirect Detection, ID)

DMの対消滅によって生成されるSMを観測する.



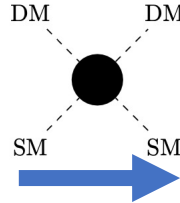
加速器検出

(Collider Search, CS)

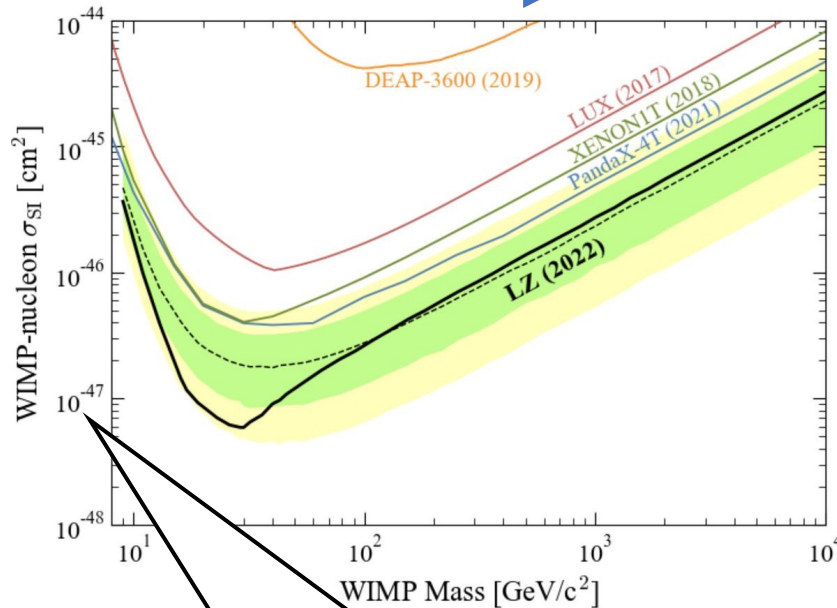
SM同士を衝突させたときの運動量の欠損を観測する.

最新の実験結果と課題

DDの結果



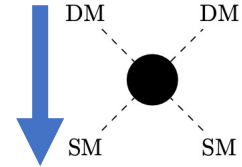
[4] LZ Collaboration, J. Aalbers et al., arXiv: 2207.03764 (hep-ex) (2022) より引用.



$$\sigma_{\text{sct}} \sim 10^{-47} \text{ cm}^2$$



DMの残存量



DM残存量の観測値 :

$$\Omega h^2_{\text{obs}} \simeq 0.12$$

DM残存量の理論値 :

$$\Omega h^2 \sim \frac{10^{-28}}{\langle \sigma v \rangle_{\text{ann}}}$$

$$\langle \sigma v \rangle_{\text{ann}} \sim 10^{-26} \text{ cm}^3/\text{s}$$

これらを整合させるアイデアが必要.

先行研究の模型

[5] I. Golon, A. Kawa and P. Tenedo, JHEP03, 064 (2017).

- フレーバーを破る有効理論.

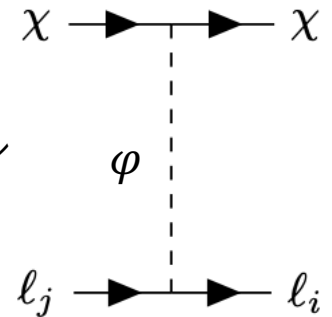
$$\mathcal{L}_{\varphi\chi} \propto \frac{1}{2} y_S \varphi \bar{\chi} \chi + \frac{i}{2} y_P \varphi \bar{\chi} \gamma^5 \chi$$

χ : DM

l_i : 荷電レプトン

φ : 媒介粒子

$$\mathcal{L}_{\varphi SM} = g_{ij} \varphi \bar{l}_i P_L l_j + g_{ji}^* \varphi^* \bar{l}_j P_R l_i$$



- DMは φ を介してフレーバーの異なる荷電レプトンのただ1つの組(例えば μ と τ) と結合.
- クォークと相互作用しないから直接検出が抑制.
- 消滅断面積は値をもつことができる.

だがしかし,

相互作用の起源が不明で予言能力もない.

我々のDM模型

[2]Phys. Rev. D **106**, 035017(2022)

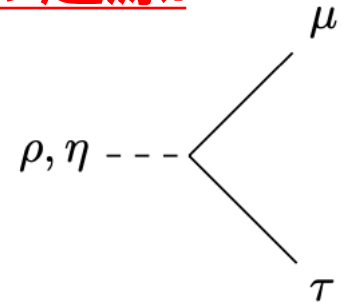
- SM + 媒介粒子 : $\Phi = \left(\begin{array}{c} \phi^+ \\ \frac{\rho+i\eta}{\sqrt{2}} \end{array} \right)$ + 複素スカラーDM: Σ .

particle	(L_e, L_μ, L_τ)	(e_R, μ_R, τ_R)	H	Φ	Σ
SM	$(1, 2)_{-1/2}$	$(1, 1)_{-1}$	$(1, 2)_{1/2}$	$(1, 2)_{1/2}$	$(1, 1)_0$
Z_4	$(1, i, -i)$	$(1, i, -i)$	1	-1	i

SM量子数のnotation: $(SU(3)_C, SU(2)_L)_{U(1)_Y}$

- Z_4 レプトンフレーバー対称性. = 相互作用の起源.

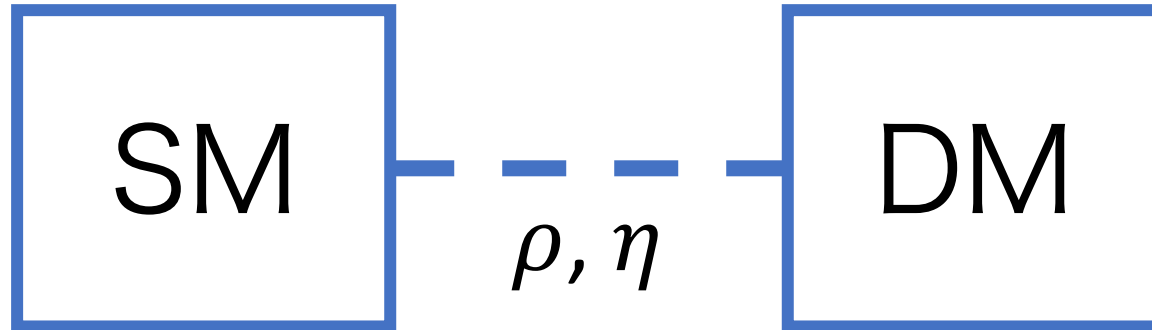
$$-\mathcal{L}_{Yukawa} = \bar{l}_R \begin{pmatrix} y_e H^\dagger & & \\ & y_\mu H^\dagger & y_{\mu\tau} \Phi^\dagger \\ & y_{\tau\mu} \Phi^\dagger & y_\tau H^\dagger \end{pmatrix} L + \text{H. c.}$$



- フレーバー非対角な相互作用.
- くりこみ可能な模型. → 高い予言能力をもつ.

我々の模型のDM

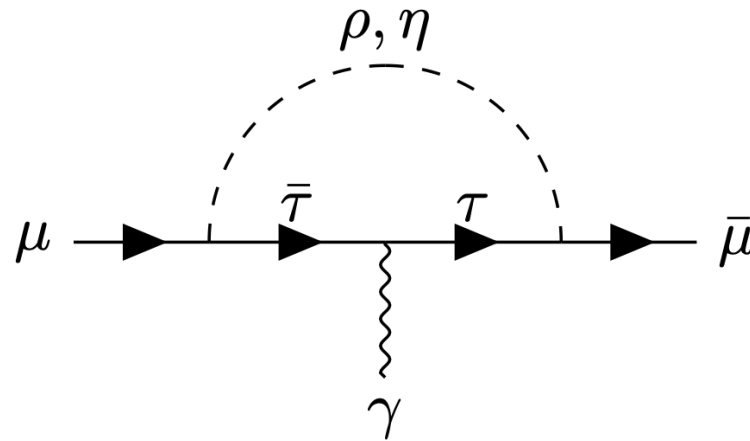
[2]Phys. Rev. D **106**, 035017(2022)



- フレーバー対称性により安定性を保証.
- DMは ρ と η を介してのみSMと相互作用する.
- Z_4 により相互作用するフェルミオンは μ と τ のみ.
→ ツリーレベルで**DM-核子散乱の抑制**.
(DMはeやクォークと直接相互作用しない.)

媒介粒子とミュオンg-2

[6] Y, Abe, T. Toma and K. Tsumura, JHEP 06, 142 (2019).

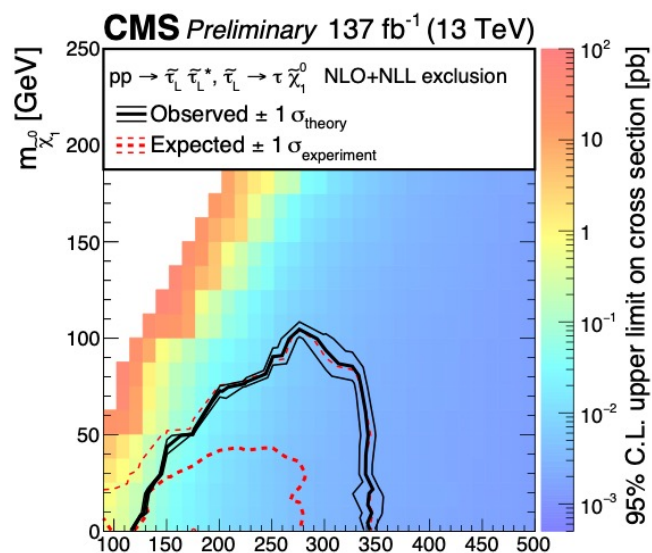


- ミュオンg-2は理論値と実験値に乖離がある.
- ρ, η はミュオンg-2の補正に効く.
- 媒介粒子に対する制限を設定.

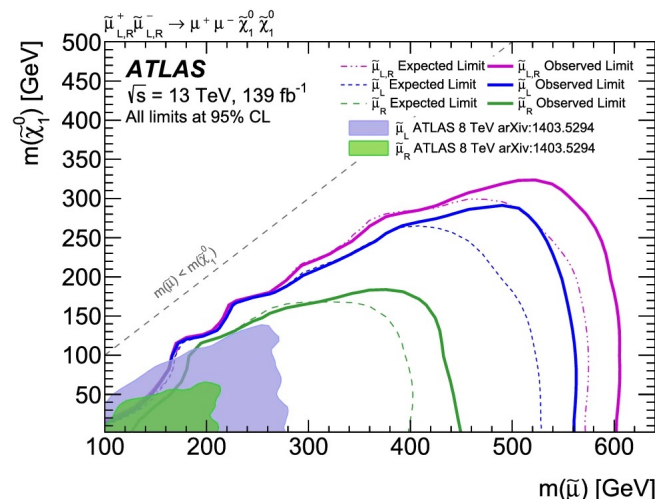
加速器からの媒介粒子への制限

- ϕ^\pm は $\phi^\pm \rightarrow \nu_\tau \tau^\pm, \nu_\mu \mu^\pm$ という崩壊をする。
→ スレプトン探索の制限を利用できる。

$m_\phi = 100, 700 \text{ GeV}$ の2つを考えることにする。

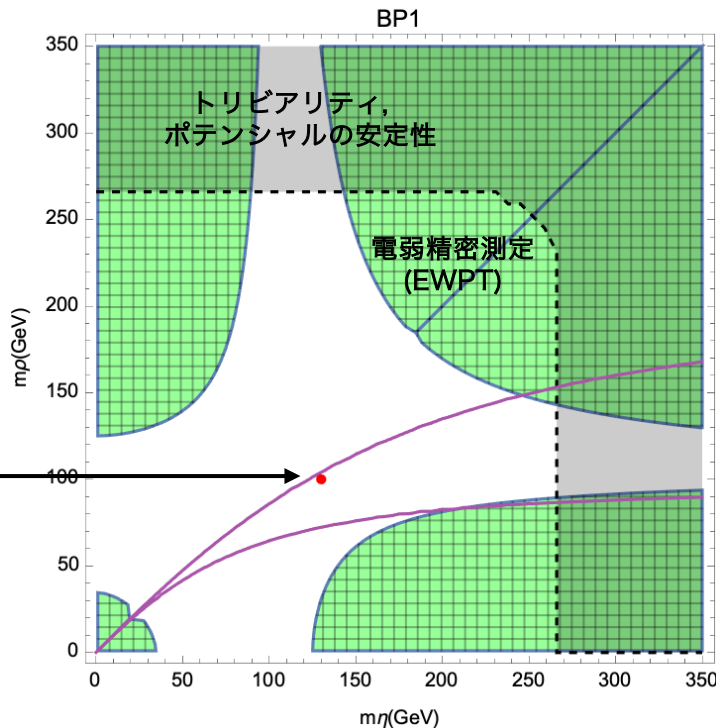


Cited from [7] CMS Collaboration, m_τ [GeV]
 Report No. CMS-SUS-21-001, CERN-EP-2022-032 (2022).



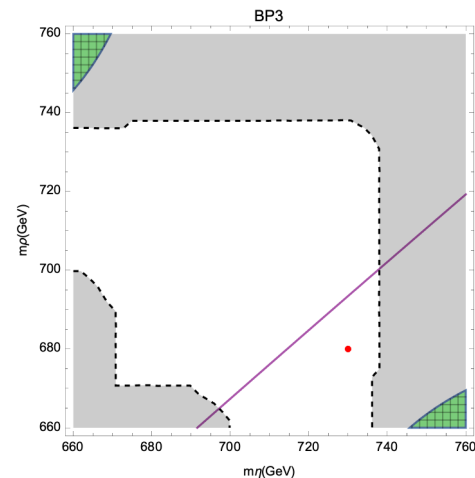
Cited from [8] ATLAS Collaboration, Eur. Phys. J. C 80, 123 (2020).

ベンチマークポイント (BP)



[1]修士論文(2023)より引用

$$\text{BP3} : (m_\phi, m_\rho, m_\eta, y_{\mu\tau}, y_{\tau\mu}) \\ = (700 \text{ GeV}, 680 \text{ GeV}, 730 \text{ GeV}, 0.7, 0.7)$$



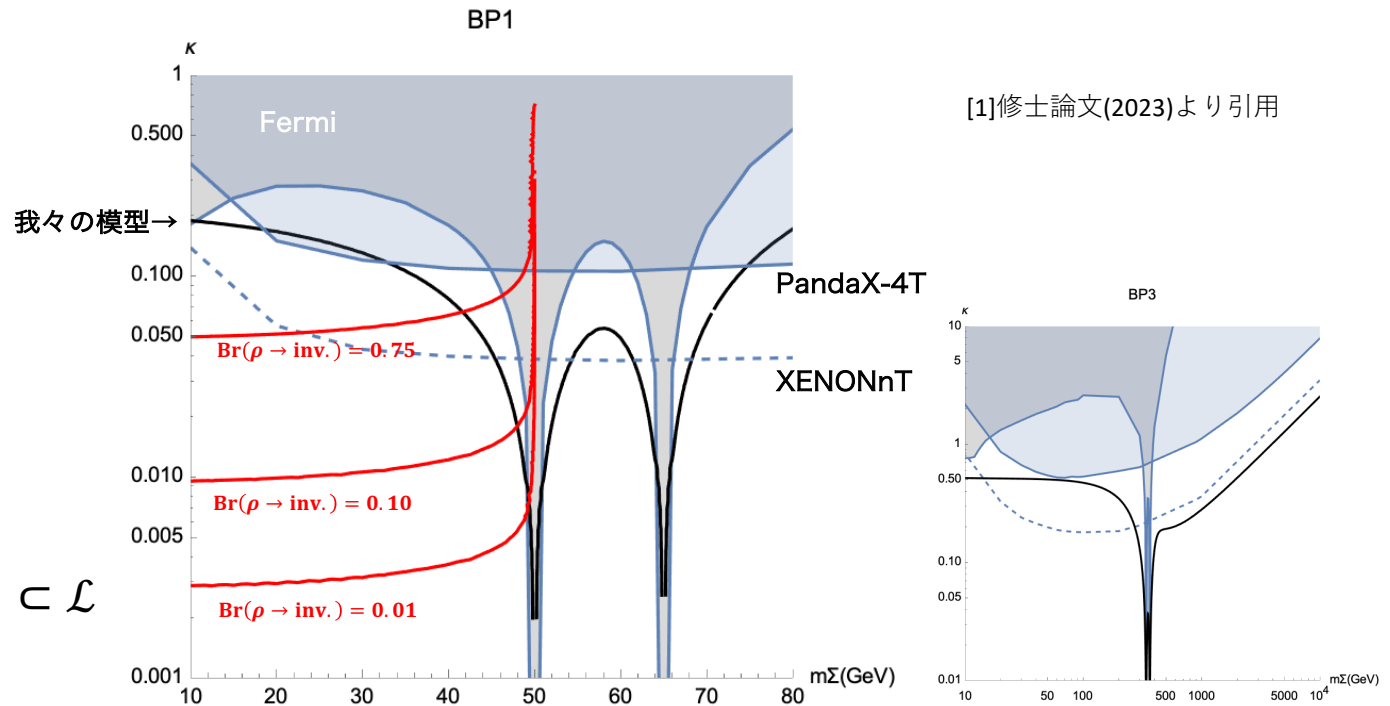
$$\text{BP1} : (m_\phi, m_\rho, m_\eta, y_{\mu\tau}, y_{\tau\mu}) = (100 \text{ GeV}, 100 \text{ GeV}, 130 \text{ GeV}, 0.07, 0.07)$$

- 紫の線で挟まれた領域の媒介粒子はミュオン $g-2$ の乖離を 2σ 以内に補正可能.



ミュオン $g-2$ を補正できる媒介粒子をBPとして選ぶ。

(くりこみ可能な)模型の予言



κ : 4点結合定数
 $\kappa[(H^\dagger\Phi)\Sigma^2 + \text{H.c.}] \subset \mathcal{L}$

- 黒い線が我々の模型のDM.
- 青と灰色の領域は実験によって排除.
- XENONnT実験によってループレベルで検証可能.

結論

- 暗黒物質の直接検出は、ツリーレベルで μ と τ としか相互作用しないというフレーバー構造によって抑制する.
- 我々のモデルはDMとミューオン $g-2$ を同時に説明できる.
- 我々のくりこみ可能なモデルは、将来実験によってループレベルで検証できる可能性がある.

展望

- μ と τ の組以外のフレーバー構造をもつモデルの探索.
- フレーバー構造を生かした新たな検出方法の提案.

参考文献

- [1] C. Miyso, 修士論文(2023).
- [2] K. Asai, C. Miyao, S. Okawa, K. Tsumura, Phys. Rev. D **106**, 035017(2022).
- [3] Muon g-2 Collaboration, Phys. Rev. Lett.126, 141802 (2021).
- [4] LZ Collaboration, J. Aalbers et al., arXiv: 2207.03764 [hep-ex] (2022).
- [5] I. Golon, A. Kawa and P. Tenedo, JHEP03, 064 (2017).
- [6] Y, Abe, T. Toma and K. Tsumura, JHEP 06, 142 (2019).
- [7] CMS Collaboration, Report No. CMS-SUS-21-001, CERN-EP-2022-032 (2022).
- [8] ATLAS Collaboration, [Eur. Phys. J. C 80, 123 \(2020\)](#).