

暗黒物質探査という名の素粒子物理学発展戦略

松本 重貴 (Kavli IPMU)

Kavli IPMU Thermal Dark Matter Project

これまで、標準模型を超える新物理構築に向け、**電弱対称性の破れの起源**とそれに付随する「**自然さの問題**」が、**主な指導原理**として用いられてきた。現在は、**暗黒物質の性質解明**が、**新たな指導原理**として台頭しつつある。この変遷や、**新たな指導原理の基での系統的、包括的な研究戦略(の一つ)**について述べる。

弱荷を持たない熱的暗黒物質の特徴

熱的暗黒物質がフェルミ粒子で弱荷を(殆ど)持たないとき、暗黒物質は標準模型と繰り込み可能な相互作用を持たない。標準模型の対称性と Z_2 対称性の為。

熱的暗黒物質の他に、更なる新粒子(Mediator or 媒介粒子)の存在が予言。

弱荷を持たない熱的暗黒物質の現象論は、媒介粒子の性質に強く依存する。

	$SO(3,1)$	$SU(3)_c$	$SU(2)_L$	$U(1)_Y$	Z_2
暗黒物質	F	1	1	0	<i>odd</i>
媒介粒子	S/V	3	2	$1/6$	<i>odd</i>
	S/V	3	1	$2/3$	<i>odd</i>
	S/V	3	1	$-1/3$	<i>odd</i>
	S/V	1	2	$1/2$	<i>odd</i>
	S/V	1	1	$-1/2$	<i>odd</i>
	F	1	2	$1/2$	<i>odd</i>
	S/V	1	1	0	<i>even</i>

このため多種の“Simplified Model”が理論及び実験の両側面で研究されている。

弱荷を持たない熱的暗黒物質の特徴

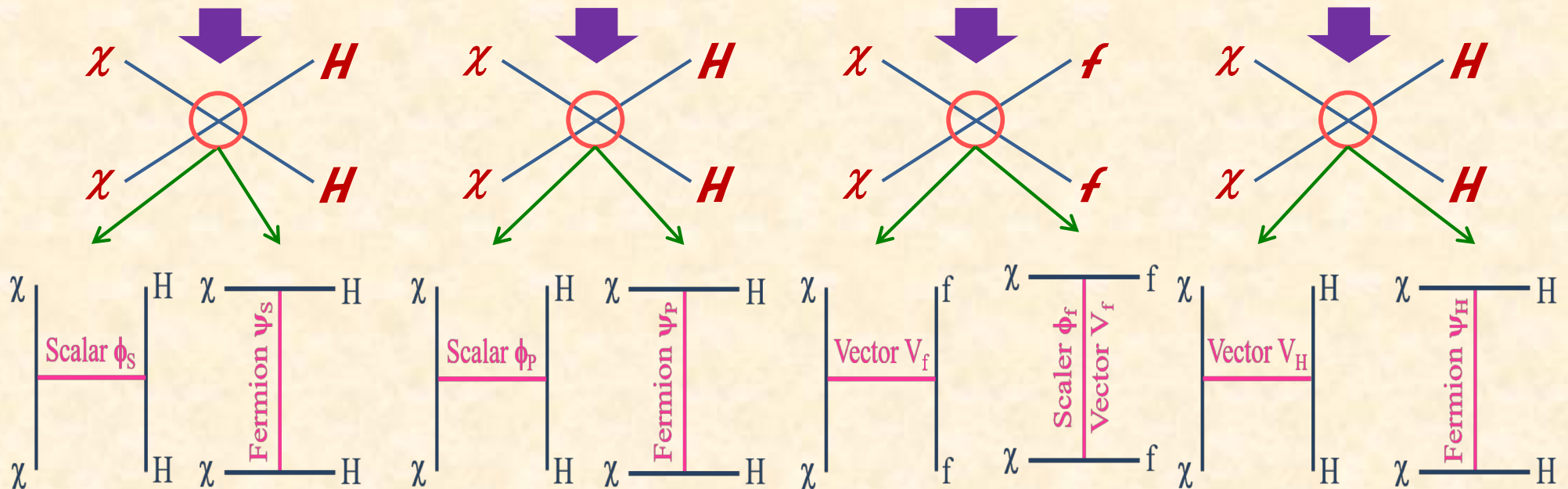
系統的な“弱荷を持たない熱的暗黒物質の研究:

媒介粒子質量 \gg 暗黒物質質量&EWスケール: EFTを用いた解析

媒介粒子質量 $<$ 暗黒物質質量&EWスケール: 各々の場合を解析

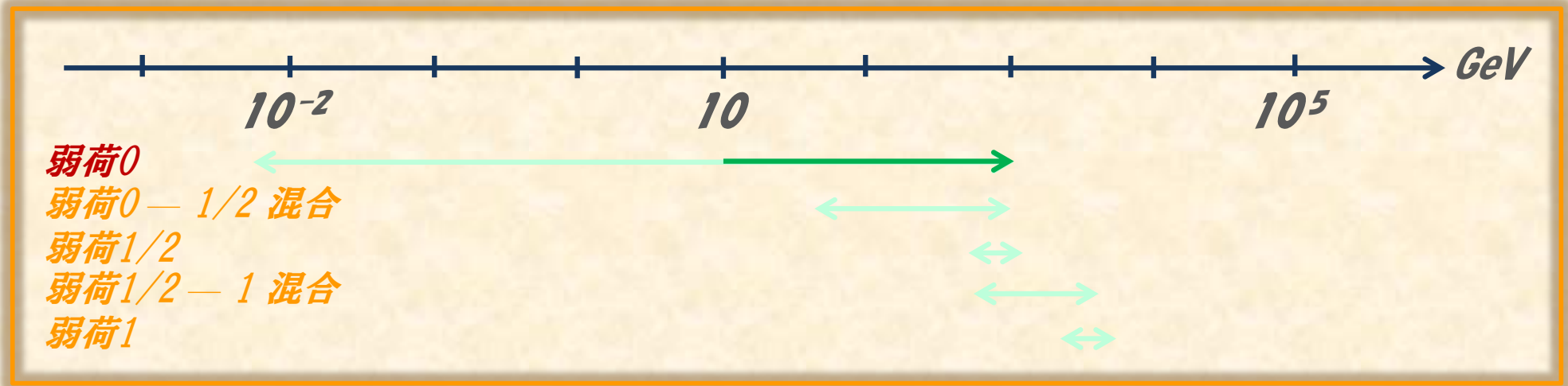
媒介粒子が十分に重い場合、それを積分することで有効理論(EFT)が得られる。

$$\mathcal{L}_{\text{EFT}} \supset \frac{c_S}{2\Lambda_S} (\bar{\chi}\chi)|H|^2 + \frac{c_P}{2\Lambda_P} (\bar{\chi}i\gamma_5\chi)|H|^2 + \sum_f \frac{c_f}{2\Lambda_f^2} (\bar{\chi}\gamma^\mu\gamma_5\chi)(\bar{f}\gamma_\mu f) + \frac{c_H}{2\Lambda_H^2} (\bar{\chi}\gamma^\mu\gamma_5\chi)(H^\dagger i\overleftrightarrow{D}_\mu H)$$



加速器探査のシグナルにはEFTではなく、対応する“Simplified model”を使用。

弱荷を持たない熱的暗黒物質(EWスケール)



○ 暗黒物質としての質量固有状態は、 $|DM\rangle \simeq$ “SM singlet” となる。

$$\mathcal{L}_{\text{EFT}} \supset \frac{c_S}{2\Lambda_S} (\bar{\chi}\chi)|H|^2 + \frac{c_P}{2\Lambda_P} (\bar{\chi}i\gamma_5\chi)|H|^2 + \sum_f \frac{c_f}{2\Lambda_f^2} (\bar{\chi}\gamma^\mu\gamma_5\chi)(\bar{f}\gamma_\mu f) + \frac{c_H}{2\Lambda_H^2} (\bar{\chi}\gamma^\mu\gamma_5\chi)(H^\dagger i\overleftrightarrow{D}_\mu H)$$

新粒子として中性マヨラナ粒子
(暗黒物質)一つに加えて、暗に
 $O(\Lambda)$ の媒介粒子(達)の存在。

新物理パラメータは右記の方針
に従い、 $m_\chi, c_S, c_P, c_f (= c_q,$
 $c_U, c_D, c_L, c_E), c_H, \Lambda$ の計10
パラメータとし、解析を行う。

- ✓ 4Fermi相互作用として、フレーバーに
対しフラインドであることを仮定する。
- ✓ 各相互作用における切断スケール Λ は、
共通な値を持つと仮定して解析を行う。
- ✓ 切断スケール Λ は暗黒物質質量やEW
スケールより十分に大きな領域を解析。

弱荷を持たない熱的暗黒物質 (EWスケール)

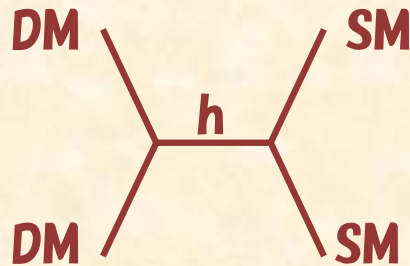
前項の方針に基づき、様々な条件(熱的残存量)や制限(直接探査&加速器探査)を考慮し、全パラメータ空間をスキャンした結果(|結合定数| < 1は過程)

[S. M., S. Mukhopadhyay and Y. L. S. Tsai, JHEP1410]

H-resonance region

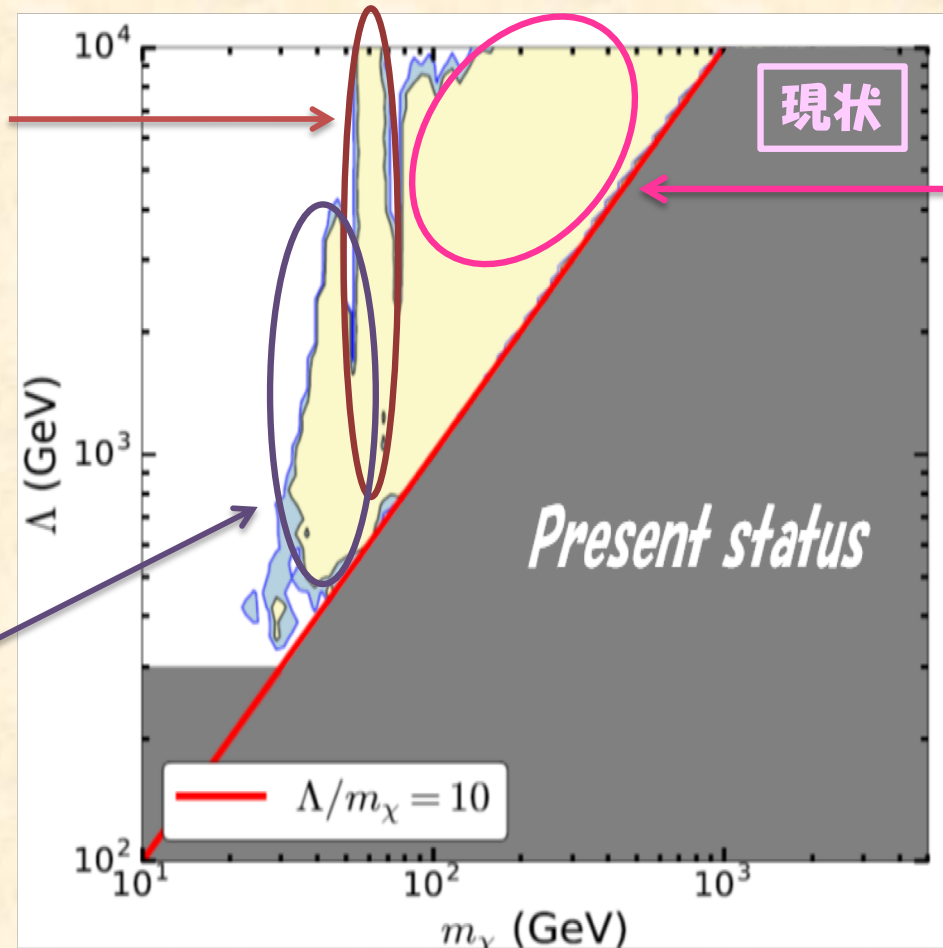
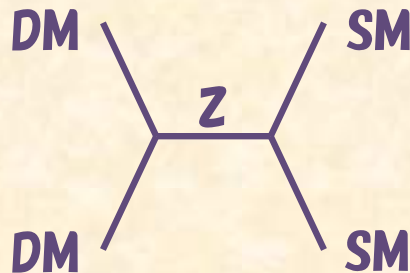
$$\frac{c_S}{2\Lambda} (\bar{\chi}\chi)|H|^2$$

$$\frac{c_P}{2\Lambda} (\bar{\chi}i\gamma_5\chi)|H|^2$$



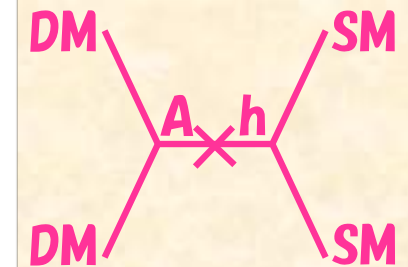
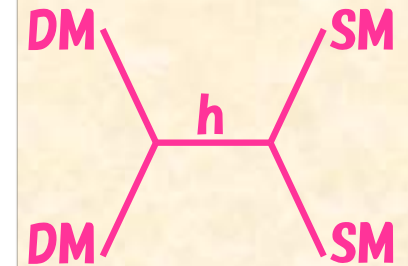
Z-resonance region

$$\frac{c_H}{2\Lambda^2} (\bar{\chi}\gamma^\mu\gamma_5\chi)(H^\dagger i\overleftrightarrow{D}_\mu H)$$



PS-Funnel region

$$\frac{c_P}{2\Lambda} (\bar{\chi}i\gamma_5\chi)|H|^2$$

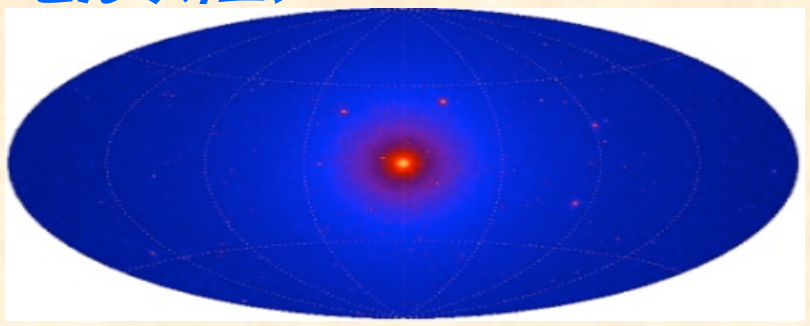


PS-Funnel領域は直接探査@地下実験では難しい!
高エネルギー加速器における擬スカラーr粒子探査。

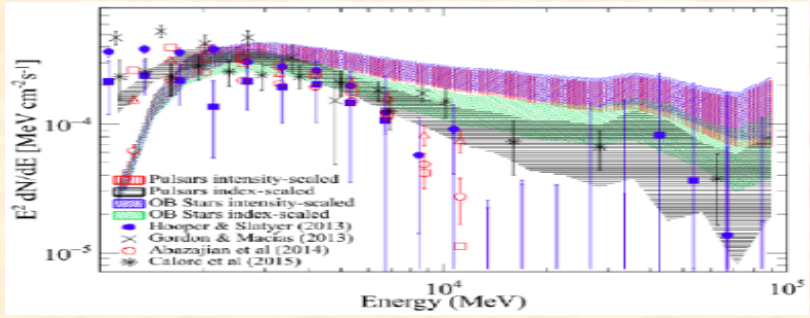
弱荷を持たない熱的暗黒物質 (EWスケール)

更なる動機? 銀河中心からのGeVガンマ線アノマリー [D. Hooper, 2014; Fermi, 2016]

モルフォロジー



スペクトラム

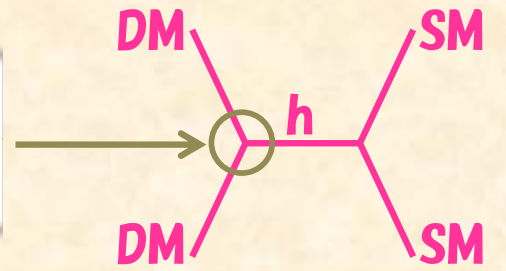


熱的暗黒物質からの候補

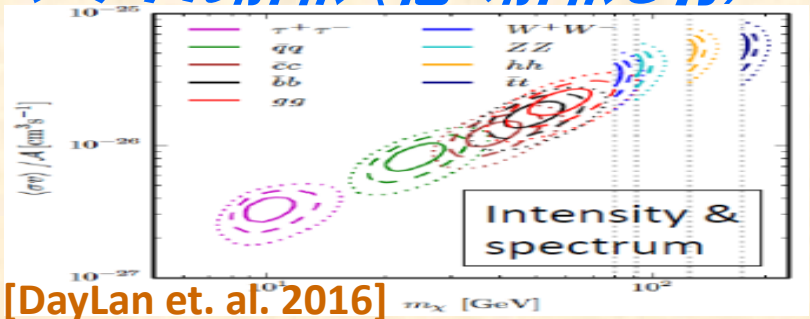
暗黒物質質量: 40–70 GeV
 対消滅断面積: 10^{-36} cm^2
 対消滅素過程: ボトム・クォーク



$$\frac{c_P}{2\Lambda} (\bar{\chi} i \gamma_5 \chi) |H|^2$$



シグナル解釈 (他の解釈も有)

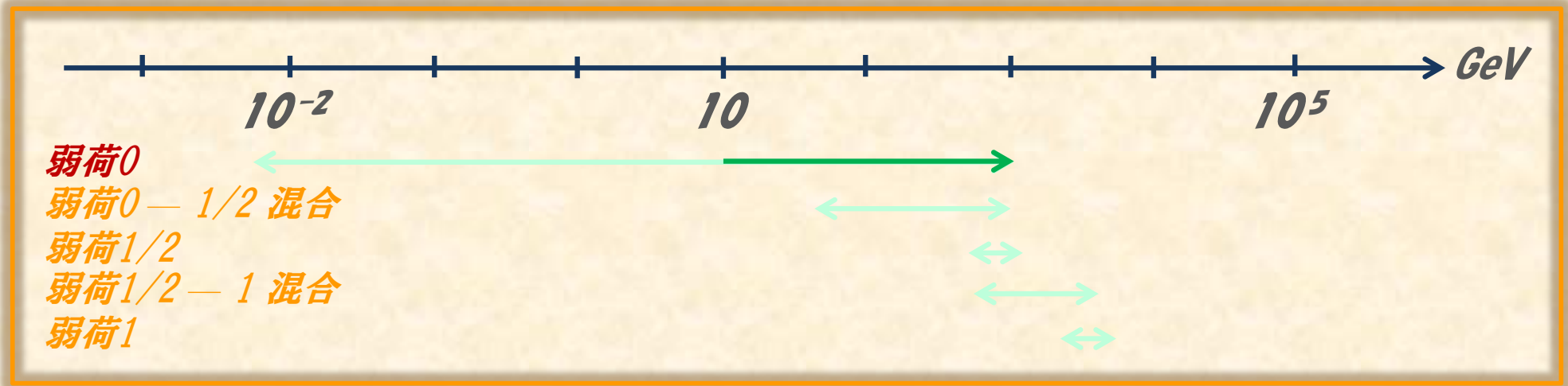


[Daylan et. al. 2016]

EFT内の様々な相互作用の内、上記の擬スカラー相互作用のみがアノマリーを説明可能で、その領域が正しく現在まで生き残っていることは面白い事実。

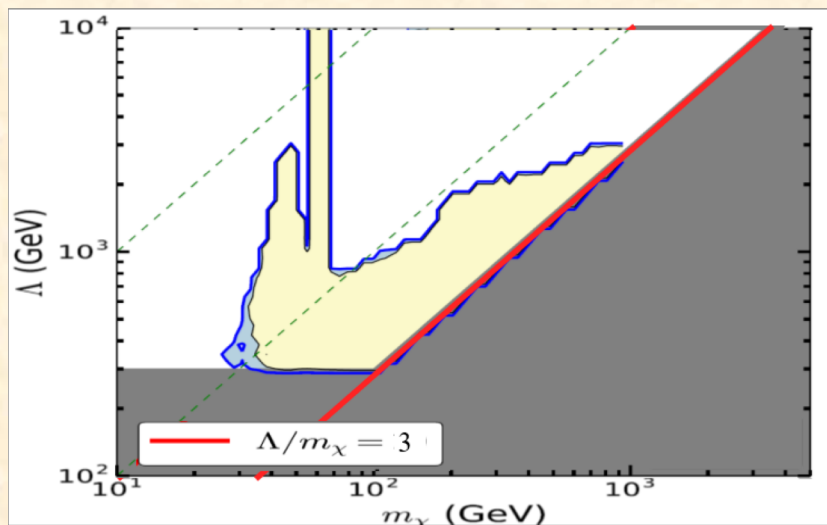
“Higgs invisible 崩壊”の探査が重要!

弱荷を持たない熱的暗黒物質 (EWスケール)



○ 暗黒物質としての質量固有状態は、 $|DM\rangle \simeq$ “SM singlet” となる。

$$\mathcal{L}_{\text{EFT}} \supset \frac{c_S}{2\Lambda_S} (\bar{\chi}\chi)|H|^2 + \frac{c_P}{2\Lambda_P} \text{ (禁止)} |H|^2 + \sum_f \frac{c_f}{2\Lambda_f^2} (\bar{\chi}\gamma^\mu\gamma_5\chi)(\bar{f}\gamma_\mu f) + \frac{c_H}{2\Lambda_H^2} (\bar{\chi}\gamma^\mu\gamma_5\chi)(H^\dagger i\overleftrightarrow{D}_\mu H)$$



- ✓ 擬スカラー相互作用をオフにしてみる。
(DMの相互作用にCP対称性を課す。)
- ✓ Z-及びH-resonance領域のみが残る。
 $\Lambda > 10m_\chi$ から $\Lambda > 3m_\chi$ に条件を緩和。
- ✓ $\Lambda < 10m_\chi$ 領域に新たな領域が存在す。
→ 暗黒物質はどの相互作用で支配？

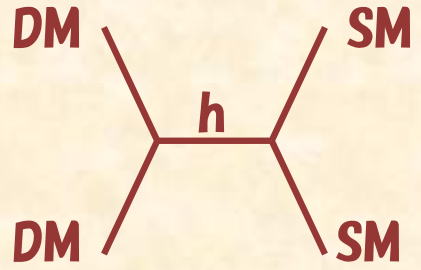
弱荷を持たない熱的暗黒物質(EWスケール)

新しい領域はSMLスポンとの相互作用で支配される“Leptophilic DM”領域！
 そのため、近い将来に直接探査@地下実験が進んでも未検証領域として残る。

[S. M., S. Mukhopadhyay and Y. L. S. Tsai, PRD94, 2016]

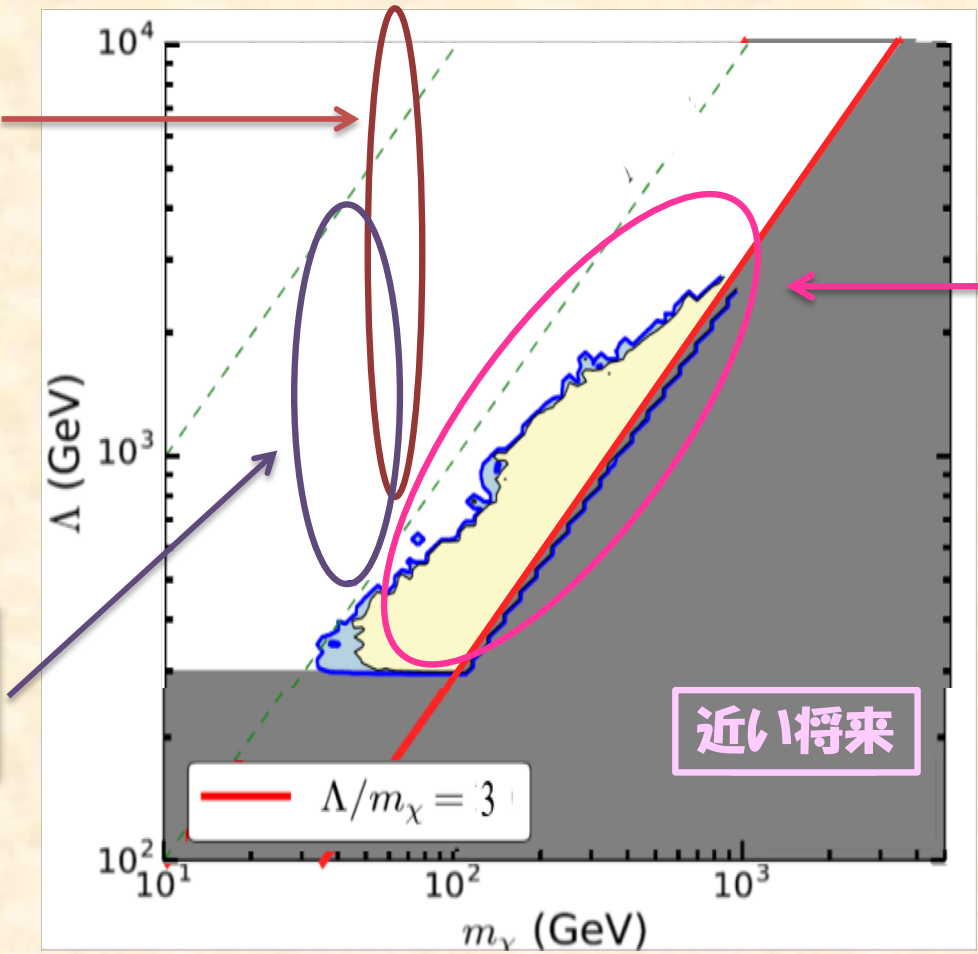
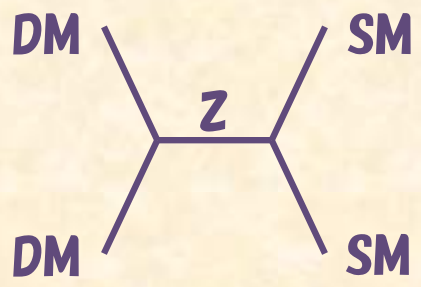
H-resonance region

$$\frac{c_S}{2\Lambda} (\bar{\chi}\chi) |H|^2$$



Z-resonance region

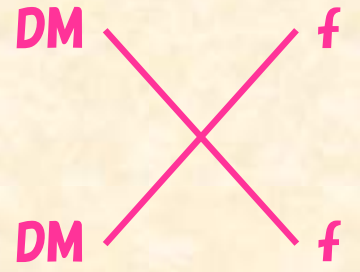
$$\frac{c_H}{2\Lambda^2} (\bar{\chi}\gamma^\mu\gamma_5\chi) (H^\dagger i\overleftrightarrow{D}_\mu H)$$



Leptophilic region

$$\frac{c_f}{2\Lambda_f^2} (\bar{\chi}\gamma^\mu\gamma_5\chi) (\bar{f}\gamma_\mu f)$$

Where, $f = E, L$

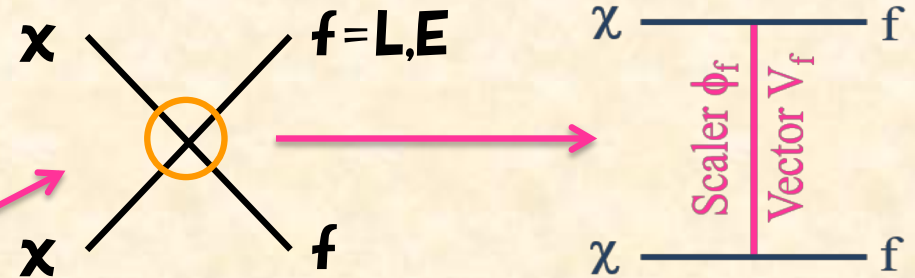
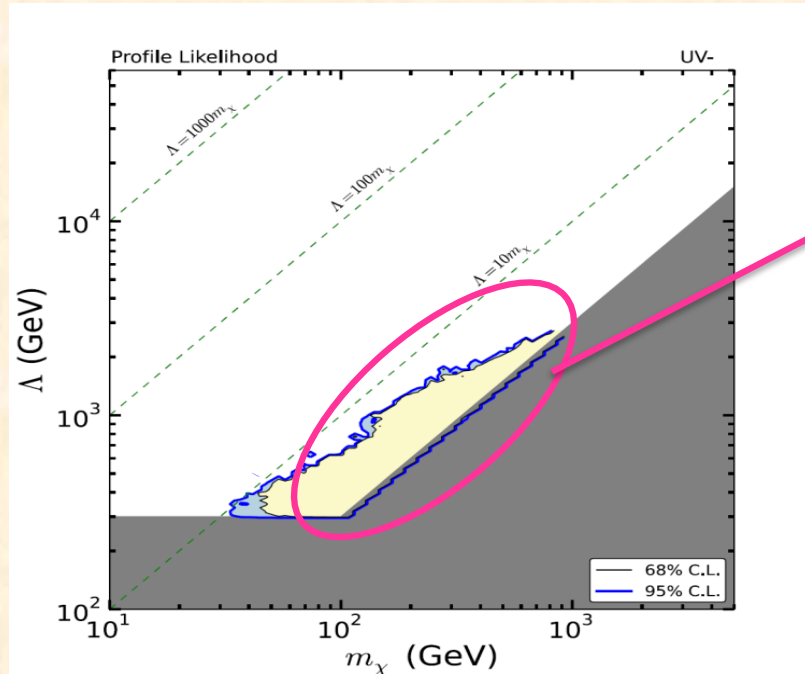


未検証のまま残される“Leptophilic領域”は、もしスポン加速器があれば、モノ・ガンマ過程等を通して検証が可能。

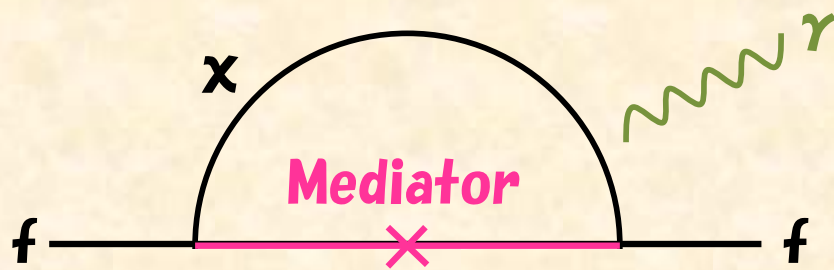
弱荷を持たない熱的暗黒物質 (EWスケール)

更なる動機? μ 粒子の異常磁気モーメント

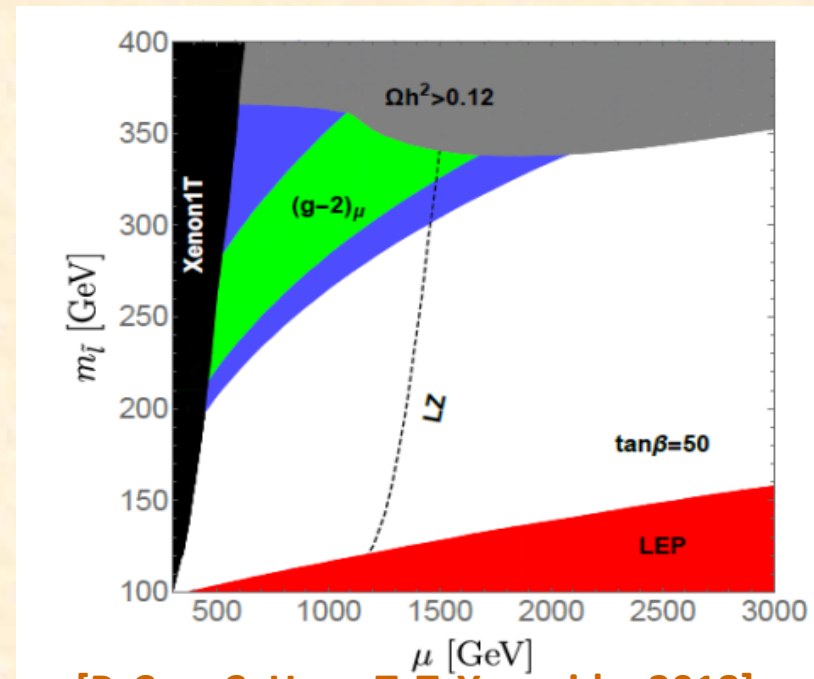
[E821 experiment, BNL, 2016]



レプトン数を持ち熱的暗黒物質と質量が縮退したボソンの媒介粒子の存在!

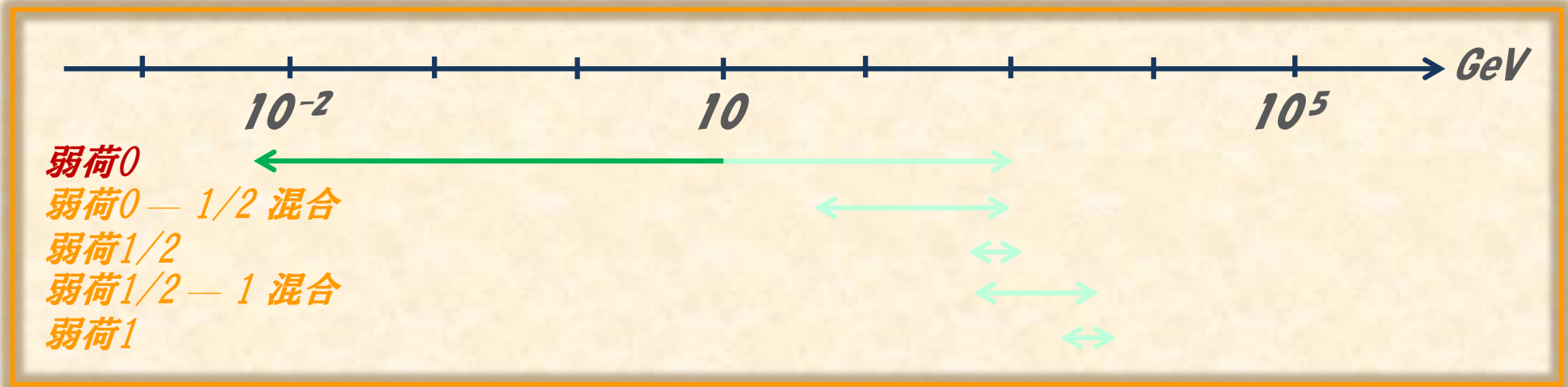


右図の通り、EWスケールの媒介粒子を用いて異常磁気モーメントを説明可能。



[P. Cox, C. Han, T. T. Yanagida. 2018]

弱荷を持たない“軽い”熱的暗黒物質



○ 暗黒物質としての質量固有状態は、 $|DM\rangle \simeq$ “SM singlet” となる。

軽いフェルミオニック熱的暗黒物質を考える。
(暗黒物質は標準模型の量子数を持たず。)

- 熱的残存量の議論(後述)より媒介粒子は暗黒物質と同程度の質量である必要有り。
- これまでの(加速器)実験等の制限により、媒介粒子は標準模型の量子数を持たず。
- 媒介粒子は Z_2 偶なボソニック(スカラー/ベクター)となる。(スライド1を参照。)
- 理論的な構造は右図で示した通りとなる。

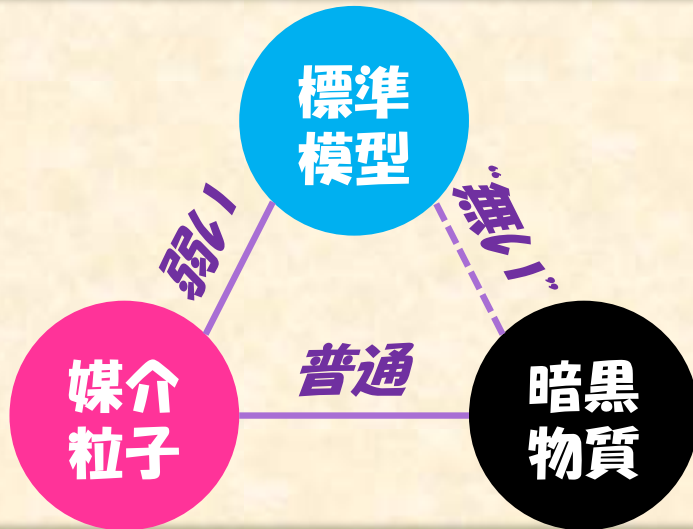


相互作用の強さは“かなり”弱い。
媒介粒子が、これまでの実験等で未だ検出されていないため。

↓
“Hidden sector”モデル構造!

弱荷を持たない「軽い」熱的暗黒物質の特徴

熱平衡(運動学的平衡)について



熱的残存量は殆どのパラメータ領域において暗黒物質から媒介粒子への対消滅で決まる。
媒介粒子は最終的に標準模型粒子へ崩壊す。

凍結機構は暗黒物質と標準模型の熱平衡を要求。(通常の場合は自動的に満足される。)

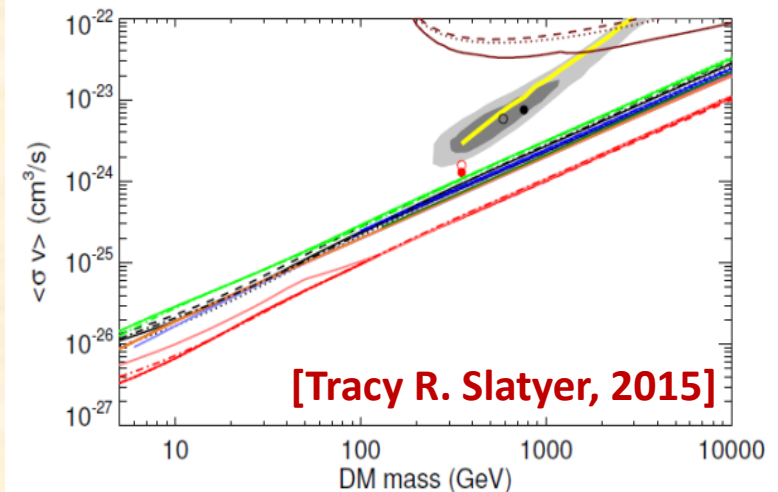
媒介粒子(凍結時存在)を通して条件を満足。
媒介粒子と標準模型の相互作用に下限有り!

ベクター媒介粒子について

熱的暗黒物質はベクター媒介粒子へS-waveで(暗黒物質の速度に依らず)対消滅をする。

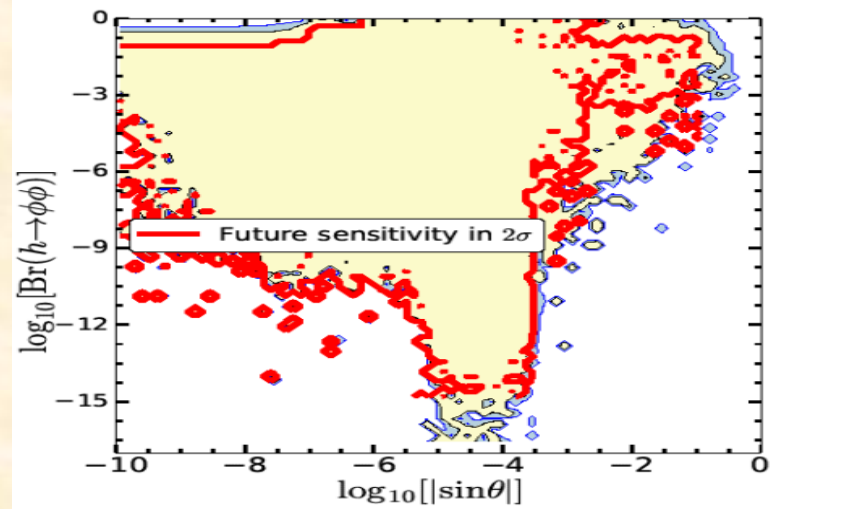
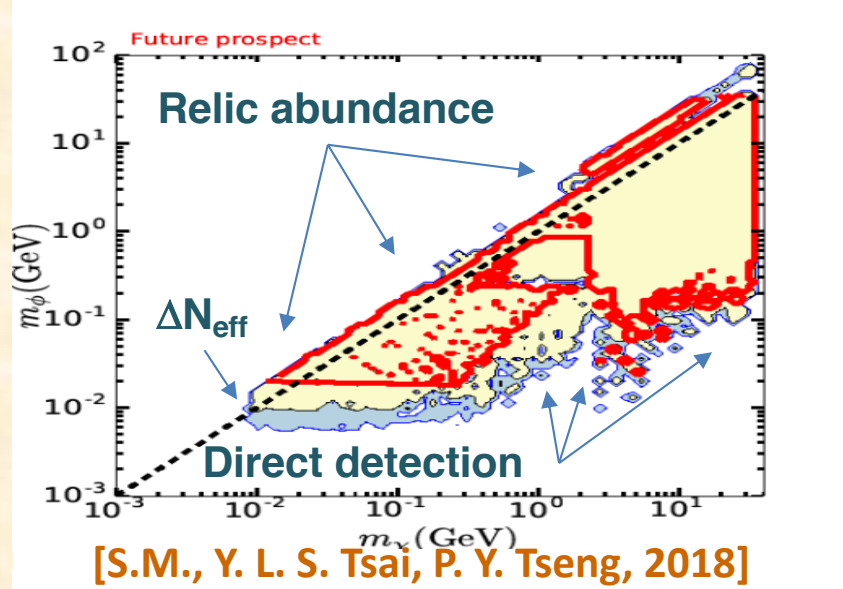
初期宇宙と現在宇宙における対消滅断面積は(殆ど)変わらない為その値は約1pbとなる。

宇宙の再結合時に軽い暗黒物質が対消滅をすると(数密度は質量に逆比例)、再結合過程(背景放射の揺らぎパターン)に影響を与える。



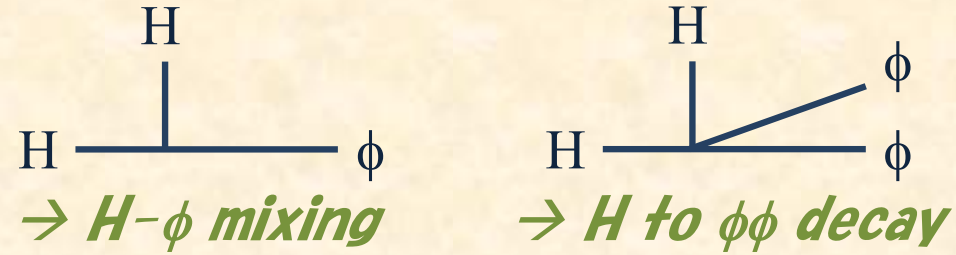
弱荷を持たない「軽い」熱的暗黒物質

$$\mathcal{L} \supset -\frac{c_s}{2} \phi \bar{\chi} \chi - \frac{c}{2} \chi^5 + A_\phi \phi H^\dagger H + \frac{\lambda_\phi}{2} \phi^2 H^\dagger H + \mu_1^3 \phi + \frac{\mu_\phi^2}{2} \phi^2 + \frac{\mu_3}{3!} \phi^3 + \frac{\lambda_4}{4!} \phi^4$$



暗黒物質はその相互作用がCPを破らないとき、S-waveで対消滅しない(角運動量&CP保存)。

熱平衡の議論において、媒介粒子はSM粒子達と、以下の二つの相互作用を通して達成する。



暗黒物質自身の探査は、近年議論が盛り上がっている、低質量(低レコイル)直接探査の依存。

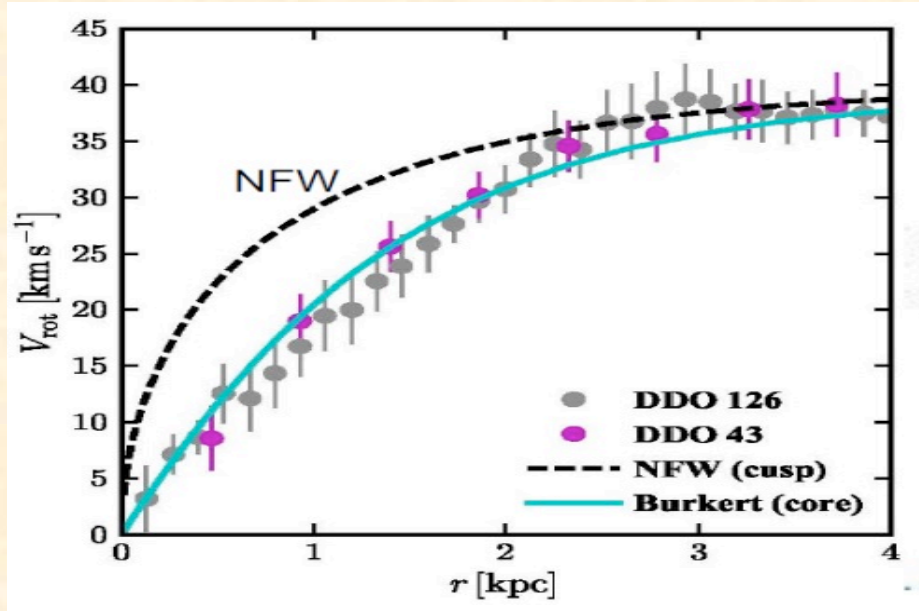
媒介粒子探査は、ヒッグスとの混合がある程度大きい場合は高輝度(メソン生成)実験が有効。

ヒッグスとの混合が非常に抑制されるとき、媒介粒子探査はヒッグスの希少崩壊探査が有効。

弱荷を持たない「軽い」熱的暗黒物質

更なる動機? “Cuspy halo problem”

[Moore, Ben, et al. Nature 370, 1994]



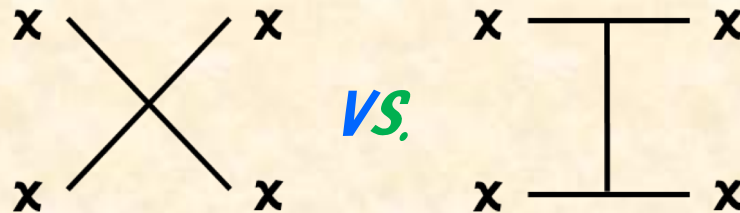
種々の銀河中心における暗黒物質分布に関するCDM理論と観測の不一致。



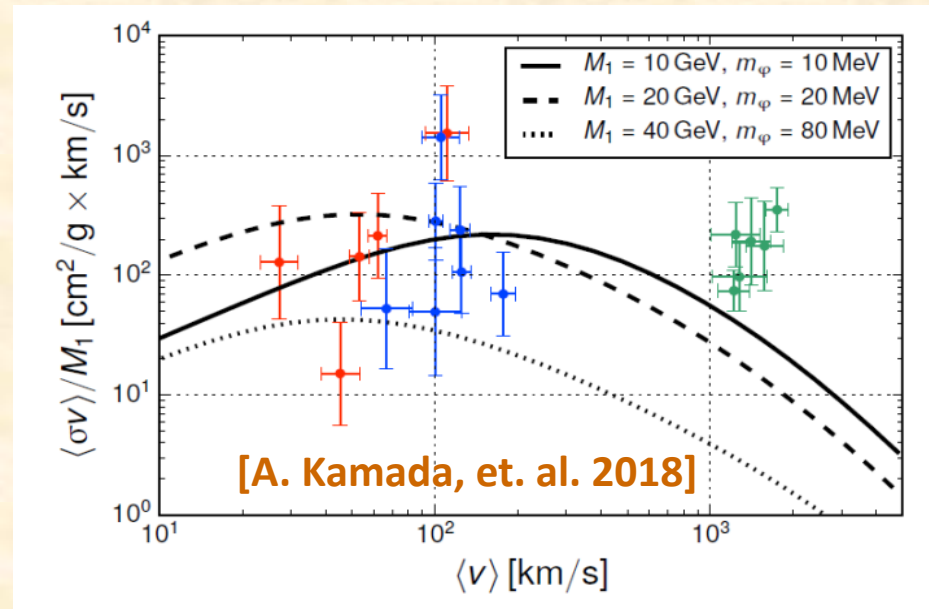
提案された様々な解決方法の一つは暗黒物質が大きな自己散乱の可能性。

銀河中心では暗黒物質密度密度が高く、従って自己散乱が活発となり、平衡状態に達することで芯をもつ分布となる。

しかしながら、要求される自己散乱断面積は、暗黒物質の速度ごとに異なる。



軽いフェルミオン的な熱的暗黒物質は、軽い媒介粒子を必然的に伴うため、この条件を非常に自然な形で満たす。



[A. Kamada, et. al. 2018]

まとめ3

今回は弱荷を(殆ど)持たない熱的暗黒物質について議論した。このケースでは、標準模型粒子との繰り込み可能な相互作用を持つため、必ず媒介粒子が存在し、その性質に依り多様な可能性を持つため、未検証の領域が多く残っている。



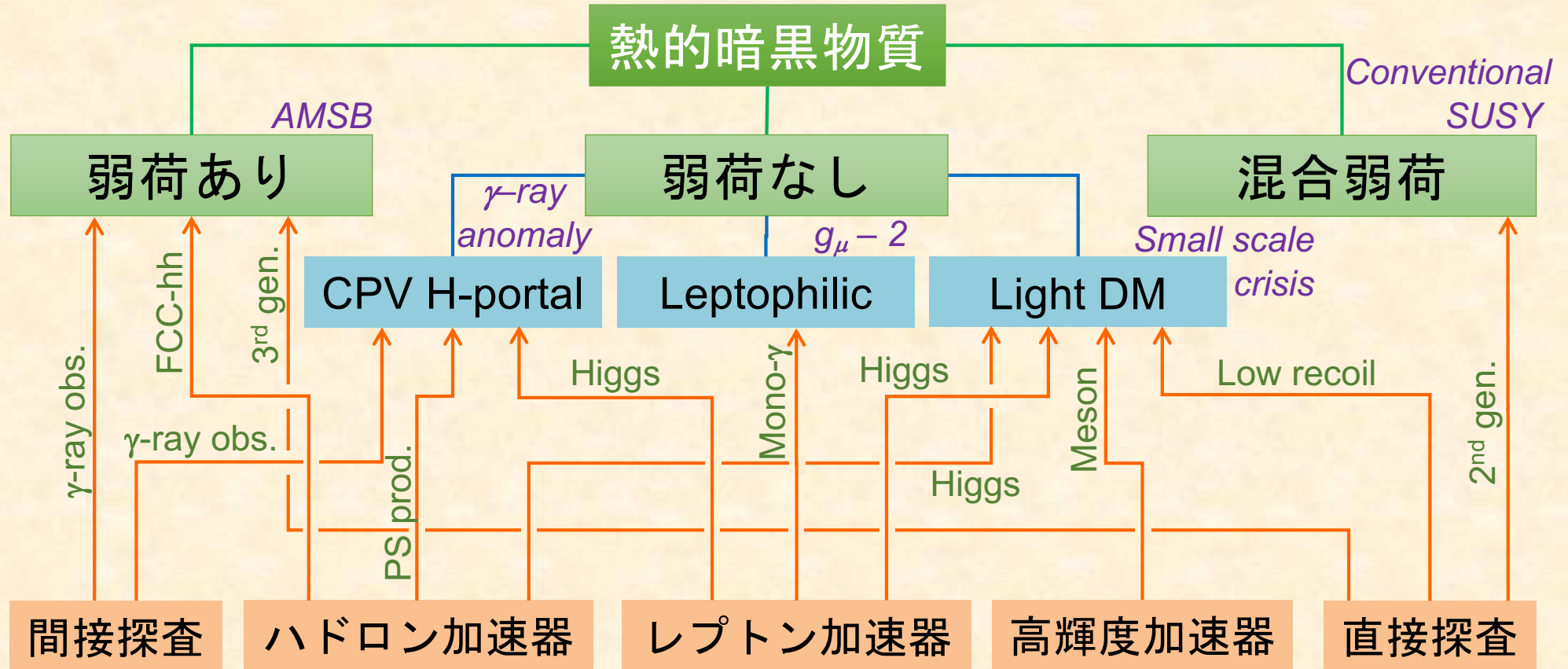
媒介粒子が暗黒物質や電弱スケールに対し十分に重いとき、未探査領域の多くはCPを破るヒッグス・ポータル領域である。本領域は直接探査@地下実験では探査が難しく、高感度の間接探査@宇宙観測や、ポータル相互作用の元となる擬スカラー媒介粒子の、高エネルギー加速器における探査が必須となる。

同じく、媒介粒子は十分に重いCPを破らない相互作用に注目すると、未探査領域として“Leptophilic”領域がある。本領域の探査には、レプトン加速器における単光子過程の探査や、媒介粒子(例えば、レプトン数及び電荷を持つボソニック媒介粒子)の高エネルギー、高輝度探査加速器における探査が重要となる。

質量が1 GeV以下となる、軽い熱的暗黒物質領域、も未検証領域の一つである。この領域では、必然的に、標準模型の量子数を持たない軽いボソニックな媒介粒子の存在を予言し、この媒介粒子探査として、高輝度加速器実験と高エネルギー加速器実験におけるヒッグスの精密探査が相補的に重要な役割を果たす。

全体のまとめ

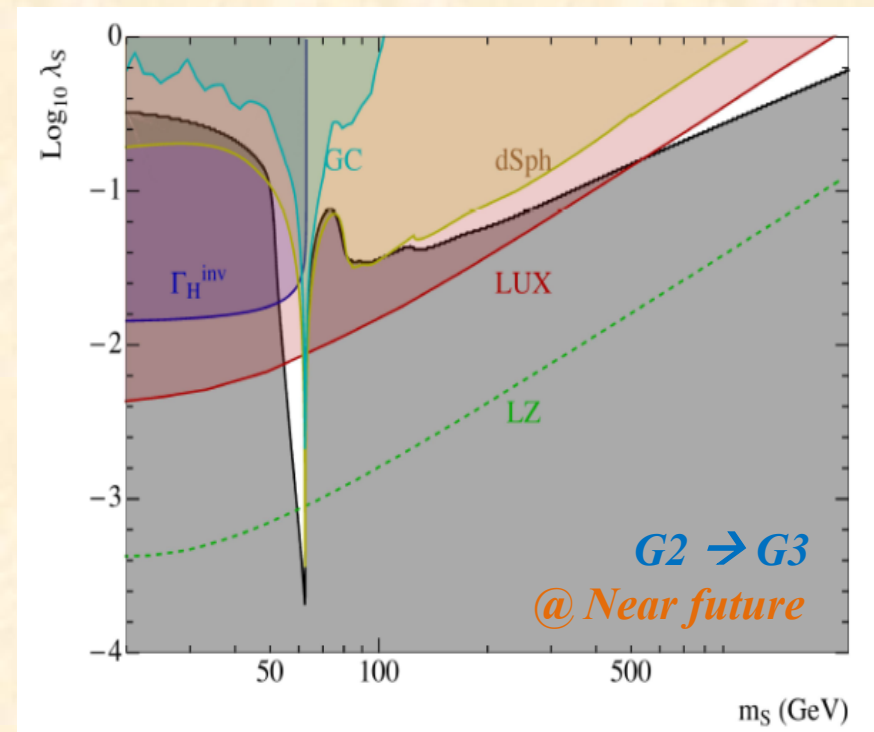
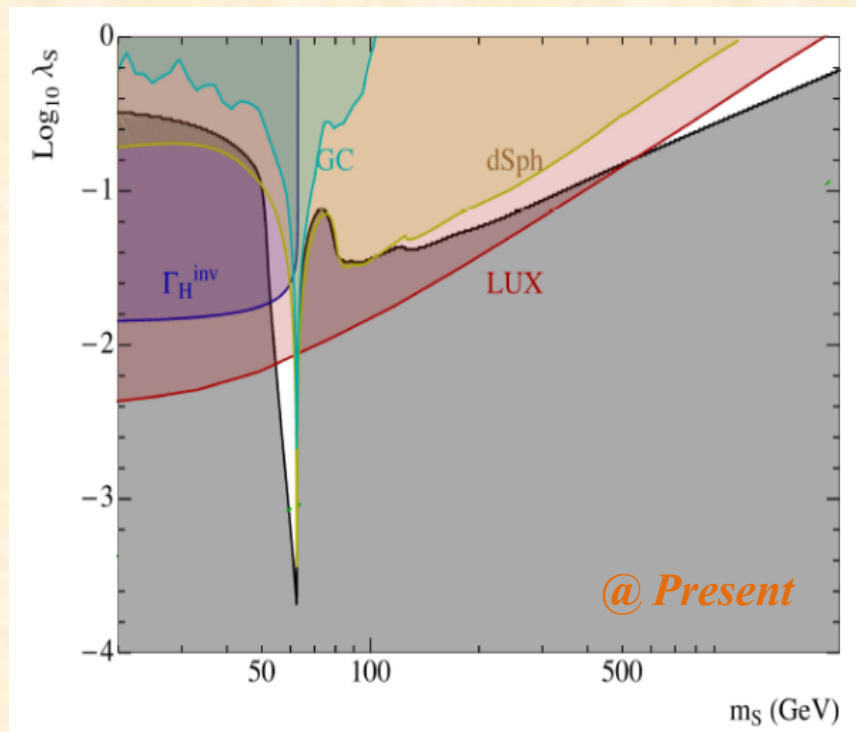
高エネルギー物理学分野における指導原理の一つとして、**熱的暗黒物質の系統的かつ包括的な研究**について紹介した。暗黒物質をその**量子数の基づき分類し**、**各々の場合において有効作用を構築することで**、**戦略的な探査が可能となる**。



暗黒物質の他に必ず新粒子も予言される為、高エネルギー実験は絶対に必要!
有効理論をミニマリティを超え構築したり、フレーバー依存性を取り入れパラメータ空間を拡張することにより、更なる魅力的な熱的暗黒物質を議論が可能。

BU1: Singlet Scalar Thermal Dark Matter

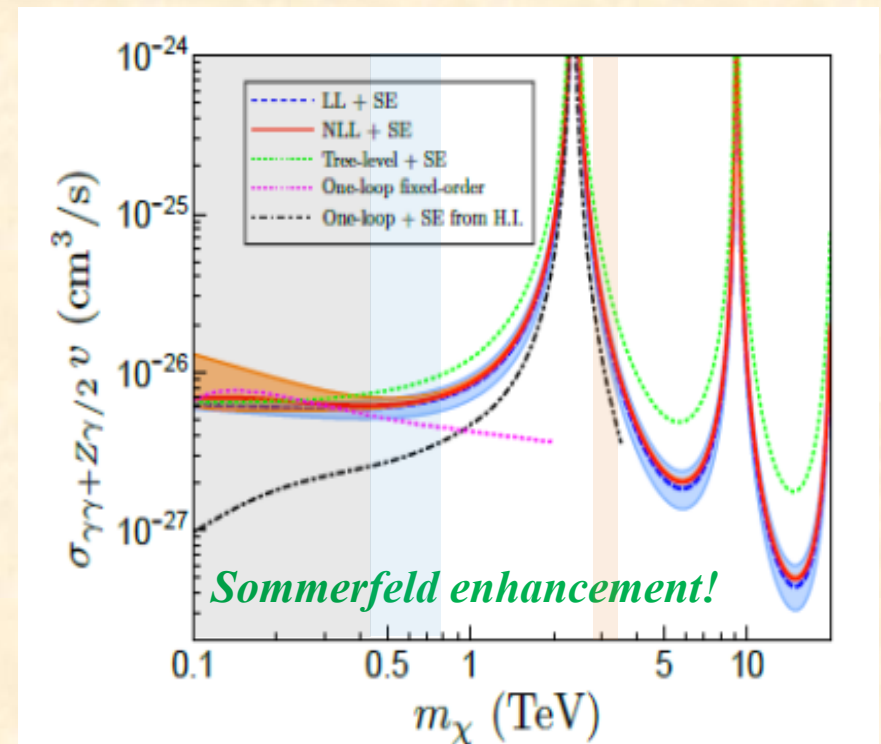
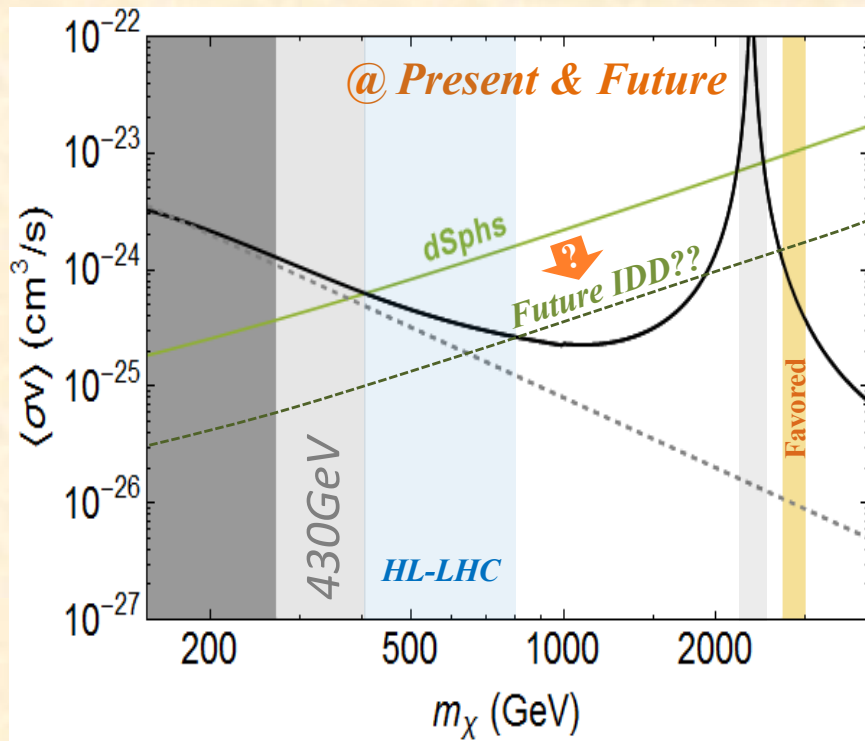
$$\mathcal{L}_{\text{SHP}} = \mathcal{L}_{\text{SM}} + \frac{1}{2} \partial_\mu S \partial^\mu S - \frac{1}{2} m_0^2 S^2 - \frac{1}{2} \lambda_S |H|^2 S^2 - \frac{1}{4!} \lambda_4 S^4$$



[J. A. Casas, et. al, 2017]

BU2: Triplet Fermion Thermal Dark Matter

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{\text{SM}} + \frac{1}{2} \bar{T} (\not{D} - M_T) T$$



Non-perturbative Sommerfeld Effect (SE)

SE + Perturbative one-loop correction

SE + Perturbative Sudakov logarithms (LL & NLL)

[M. Bauer, T. Cohen, Ri. Hill, M. Solon, 2014; G. Ovanesyan, T. Slatyer, I. Stewart, 2014]

SE + NL + NLL + Inclusive effects

[M. Baumgart, I. Rothstein, V. Vaidya, 2015; G. Ovanesyan, N. Rodd, T. Slatyer, I. Stewart, 2016]

[J. Hisano, S.M., M. Nojiri, 2004]

[A. Hryczuk, R. Iengo, 2013]