

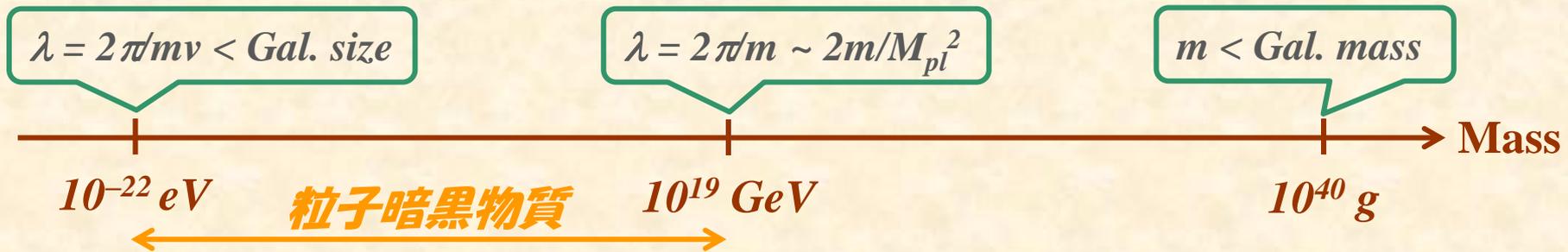
# 面白くて大事な熱的暗黒物質候補たち

**松本 重貴 (Kavli IPMU)**

*Kavli IPMU Thermal Dark Matter Project*

暗黒物質の正体を探るうえで重要となる質問の一つは、**現在までの様々な観測において示唆されている暗黒物質質量(平均質量密度)、これがどの様に決定されたのか?**である。様々な機構を考えることが可能だが、特に強い動機を持つ**熱的暗黒物質**に焦点を当て、その中でも更に動機を持つ**熱的暗黒物質**について紹介する。

# 暗黒物質について分かっていること



- ✓ 宇宙年齢に比べ十分に安定な物質。
- ✓ 観測に無矛盾なほど電氣的に中性。
- ✓ 現在の宇宙で非相対論的に運動。
- ✓ 現在の暗黒物質量は  $\Omega h^2 = 0.1$ 。



**熱的暗黒物質**とは、凍結機構により現在の暗黒物質量が決定される暗黒物質。

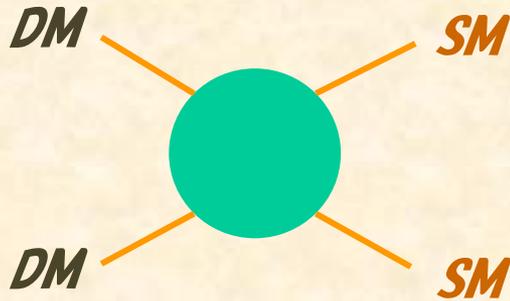
**凍結機構**とは、熱化学平衡にあった系で、ある時期に平衡を保つ反応率が宇宙の膨張率を下回ることにより脱平衡が起こり、その残存量が決まるとする機構。

**凍結機構**は宇宙論で大きな成功を収めている機構(ビッグバン元素合成&宇宙の晴れ上がり)のため、**熱的暗黒物質**は重要な暗黒物質候補と考えられている。

# 凍結機構について

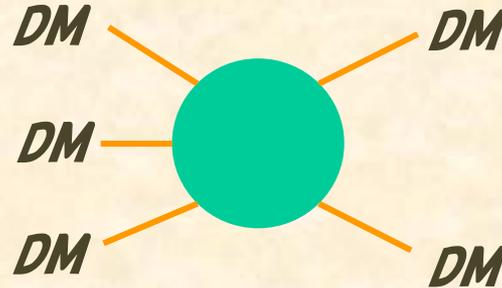
熱的暗黒物質を考えるにあたり重要な質問は、暗黒物質が関わるどの素過程が凍結することにより、現在の宇宙における暗黒物質質量が決まったのか？である。

*WIMP-like case:*



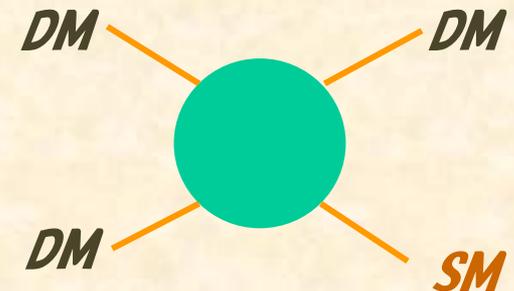
暗黒物質対からSM粒子への対消滅(生成)過程。  
暗黒物質はRパリティの等 $Z_2$ 対称性により安定。

*SIMP-like case:*



暗黒物質間の非弾性散乱( $2 \leftrightarrow 3$ ,  $2 \leftrightarrow 4$ )過程。  
他の熱的暗黒物質に比べ軽い暗黒物質を预言。

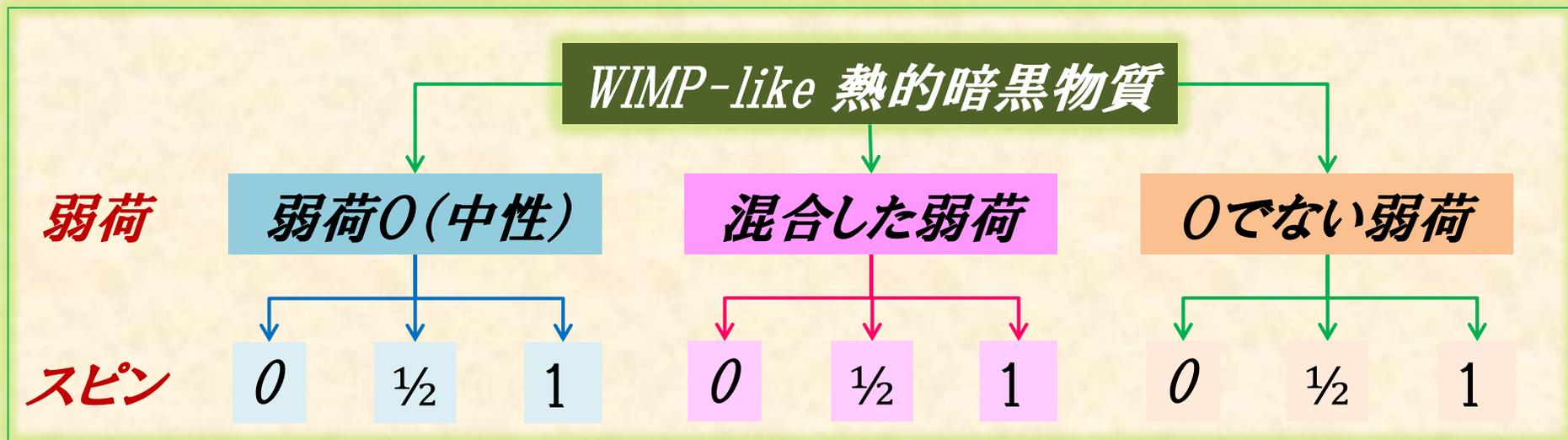
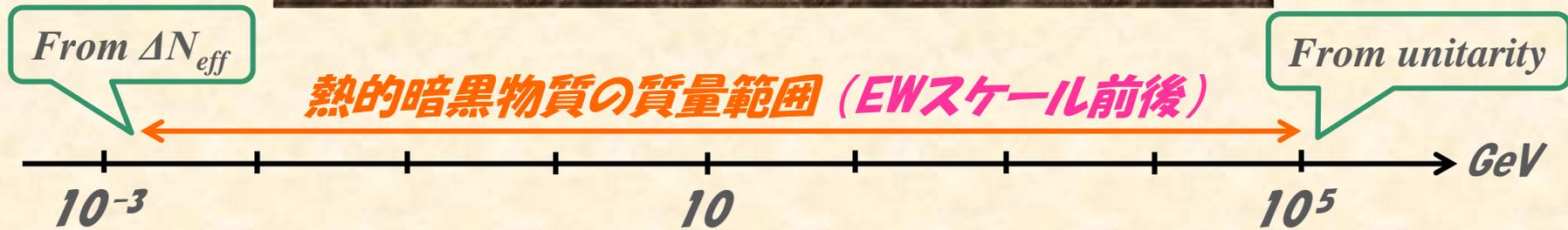
*Semi-Ann. case:*



始状態と終状態に異数の暗黒物質を含む過程。  
暗黒物質は $Z_2$ と異なる対称性( $Z_3$ )により安定。

“WIMP-like case”は探査が進んでおり、それらの結果がネガティブのため、その可能性が殆どなくなったという意見を聞くこともあるが、それは完全な誤解！  
未探査領域がまだまだ存在し、かつ更なる動機を持つ領域も報告されている！

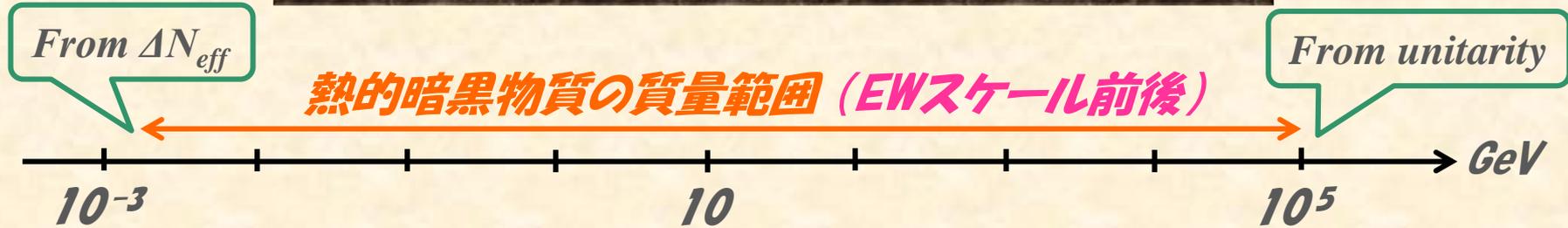
# WIMP-like 熱的暗黒物質について



## 熱的暗黒物質に関する系統的な探査

1. 各量子数を持つ熱的暗黒物質に対し、繰り込み可能な最小モデルを構築。
2. 最小モデルの予言する相互作用に基づき熱的残存量を計算し範囲を確定。
3. これまでの暗黒物質探査からの制限等を反映し探査すべき領域を明示。
4. 探査領域内で更なる動機(BSMモデル等)を持つ部分領域も探査し明示。

# WIMP-like 熱的暗黒物質について



PHYSICAL REVIEW D 82, 055026 (2010)

## Can WIMP dark matter overcome the nightmare scenario?

Shinya Kanemura,<sup>1,\*</sup> Shigeki Matsumoto,<sup>2,†</sup> Takehiro Nabeshima,<sup>1,‡</sup> and Nobuchika Okada<sup>2,§</sup>

<sup>1</sup>Department of Physics, University of Toyama, Toyama 930-8555, Japan

<sup>2</sup>Department of Physics and Astronomy, University of Alabama, Tuscaloosa, Alabama 35487, USA

(Received 6 June 2010; published 29 September 2010)

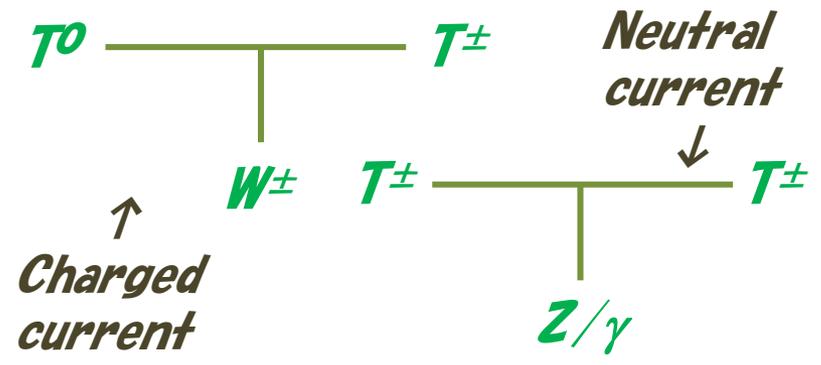
### 熱的暗黒物質に関する系統的な探査

1. 各量子数を持つ熱的暗黒物質に対し、繰り込み可能な最小モデルを構築。
2. 最小モデルの予言する相互作用に基づき熱的残存量を計算し範囲を確定。
3. これまでの暗黒物質探査からの制限等を反映し探査すべき領域を明示。
4. 探査領域内で更なる動機(BSMモデル等)を持つ部分領域も探査し明示。

# 弱荷を持つ熱的暗黒物質 ( $I_w = 1$ を例に)

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

- ✓  $T = (T^+, T^0, T^-)$  で  $T^0$  が暗黒物質。
- ✓ 予言される  $T^0$  の質量は 3 TeV 程度。  
[J. Hisano, S. M. et. al, PLB646, 2007]
- ✓  $T^\pm$  と  $T^0$  の質量差は 160 MeV 程度。  
[M. Ibe, S. M., R. Sato, PLB721, 2013]



## 更なる動機について

- ✓ 最もシンプルな SUSY 模型 (AMSB) にて予言。
- ✓ 反陽子フラックスの "Anomaly" を説明可能？

[L. Randall, et. al; G. Giudice, et. al, 1998]  
[M. Ibe, S. M., S. Shirai, T. Yanagida, 2015]

## 本熱的暗黒物質のテストについて



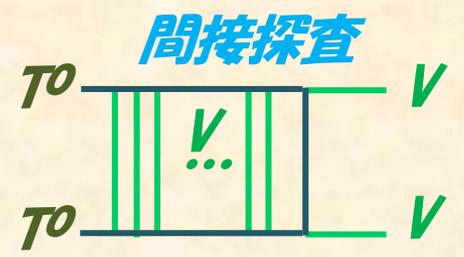
[Hisano, S.M., Nojiri, Saito, 2005]

第3世代検出器が必要。



[Asai, Moroi, Yanagida, 2008]

LLP 探査 @ Fcc-hh。



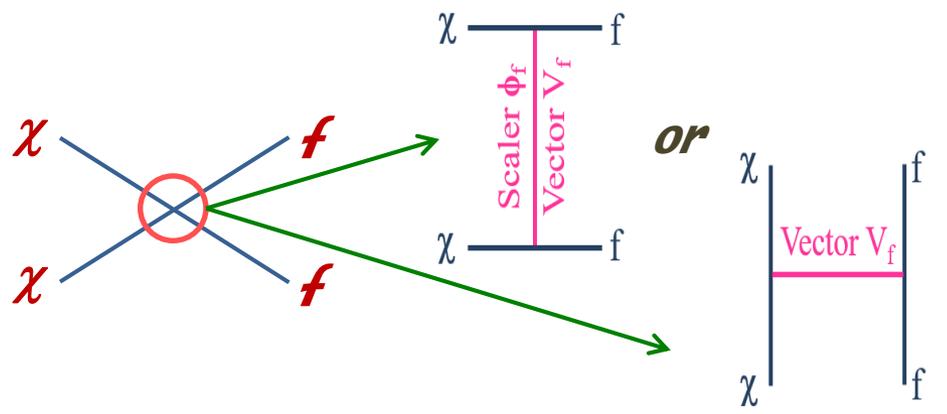
[Hisano, S.M., Nojiri, 2004]

CTA & FPS での探査。

# 親レプトン(Leptophilic)熱的暗黒物質

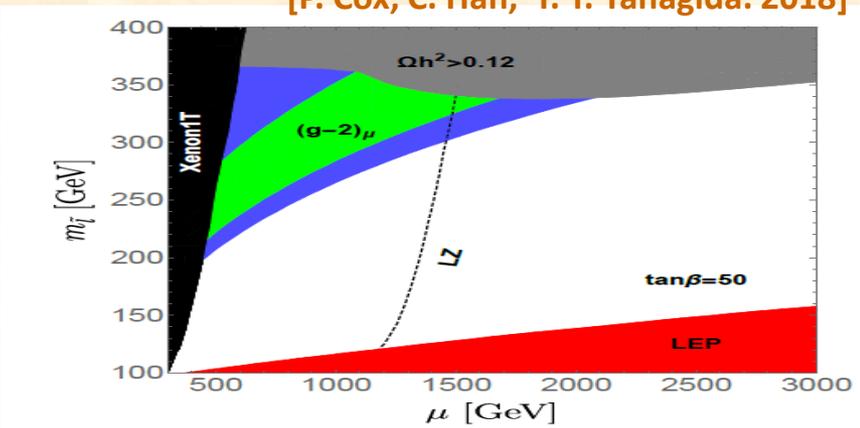
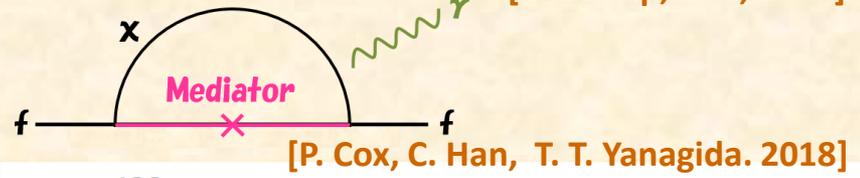
$$\mathcal{L}_{\text{EFT}} \supset \sum_f \frac{c_f}{2\Lambda_f^2} (\bar{\chi} \gamma^\mu \gamma_5 \chi) (\bar{f} \gamma_\mu f)$$

- ✓ “f”はleft- or right-handed lepton。
  - ✓ 暗黒物質の他に媒介粒子の存在。
  - ✓ 暗黒物質質量は $O(10-10^3)\text{GeV}$ 。
- [S. M., Satya, Sming, PRD94, 2016]



## 更なる動機について

- ✓  $\mu$  粒子の異常磁気モーメント測定。
- [E821 exp, BNL, 2016]

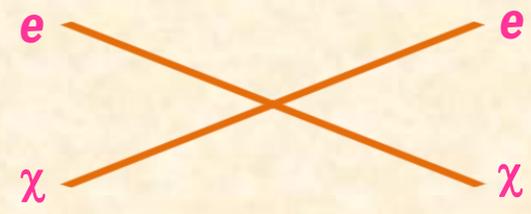


## 本熱的暗黒物質のテストについて

加速器探査 ... レプトン加速器が有効。



直接探査 ... 電子との散乱(EW質量)。

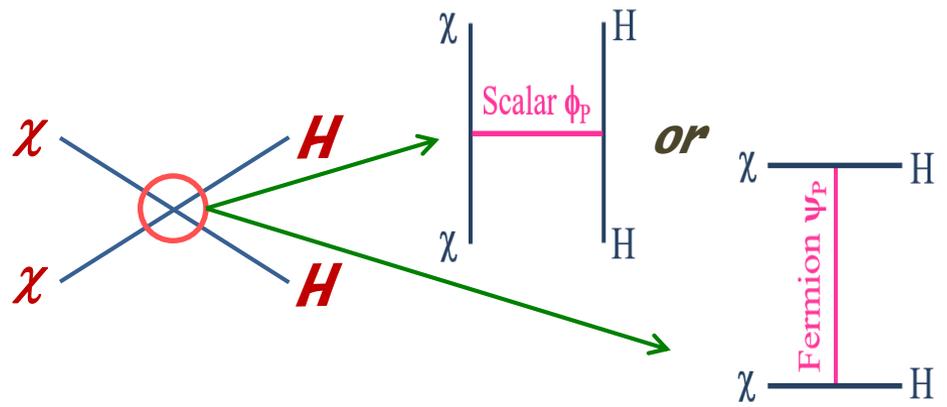


間接探査 ... 対消滅断面積が抑制。

# CPV ヒッグスポータル熱的暗黒物質

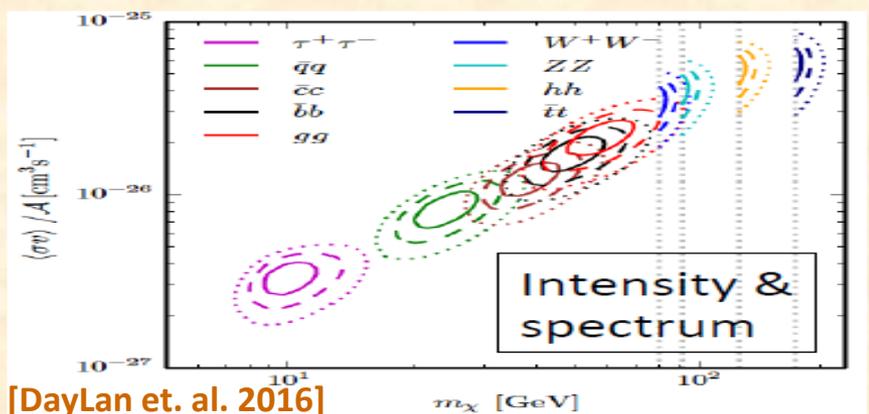
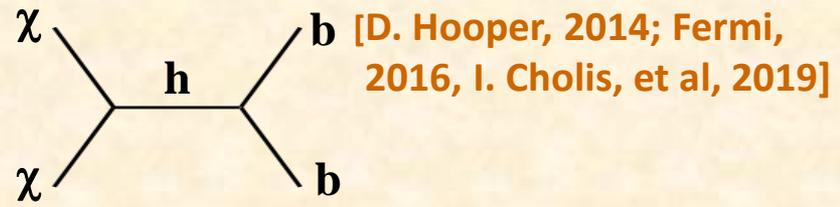
$$\mathcal{L}_{\text{EFT}} \supset \frac{c_P}{2\Lambda_P} (\bar{\chi} i \gamma_5 \chi) |H|^2$$

- ✓ S波の対消滅をする熱的暗黒物質。
  - ✓ 暗黒物質の他に媒介粒子の存在。
  - ✓ 暗黒物質質量は $O(10-10^3)\text{GeV}$ 。
- [S. M., Satya, Sming, JHEP1410, 2014]



## 更なる動機について

### ✓ $\gamma$ 線、反陽子フラックス "Anomaly"



## 本熱的暗黒物質のテストについて

**加速器探査** ... Invisible Higgs decay.  
 ... Mediator production.



**直接探査** ... ループ誘導過程での散乱。



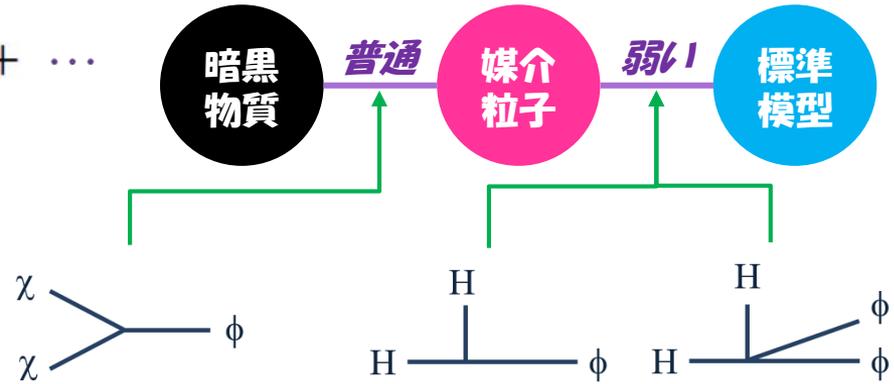
[K. Ghorbani, P. H. Ghorbani, 2019]

**間接探査** ... 伝統的な  $\gamma$ 線による探査。

# 軽い熱的暗黒物質

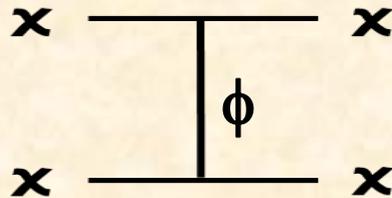
$$\mathcal{L} \supset -\frac{c_s}{2} \phi \bar{\chi} \chi + A_\phi \phi H^\dagger H + \frac{\lambda_\phi}{2} \phi^2 H^\dagger H + \dots$$

- ✓  $\exists$  軽い媒介粒子 (Singlet & Boson)。
- ✓ 暗黒物質の質量は約 10 MeV 以上。  
[S.M., Y. L. S. Tsai, P. Y. Tseng, JHEP2019]
- ✓ 暗黒物質は媒介粒子を通じて標準模型粒子と相互作用をする (右図)。

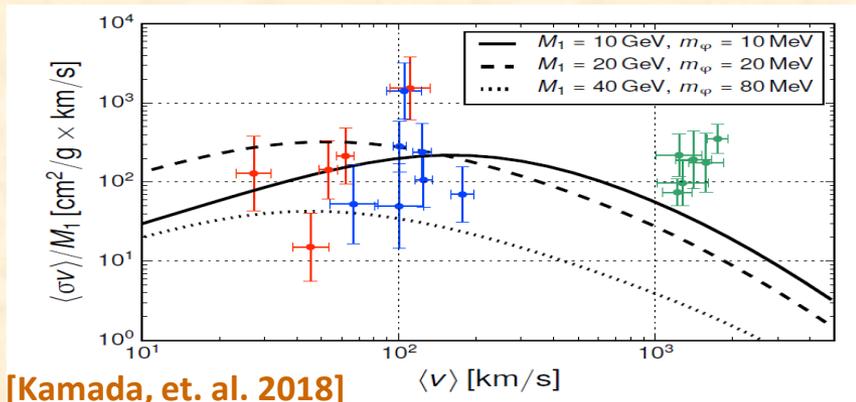


## 更なる動機について

- ✓ 銀河の "Core-Cusp problem".



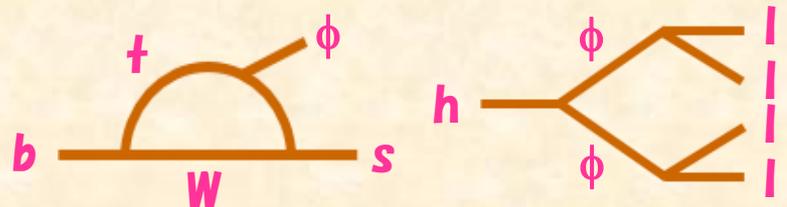
[Moore, Ben, et al. Nature 370, 1994]



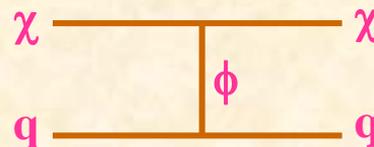
[Kamada, et. al. 2018]

## 本熱的暗黒物質のテストについて

- 加速器探査 ... Meson decay exp.
- ... Exotic Higgs decay.



- 直接探査 ... Sub-GeV 暗黒物質探査.



[A. Kamada, A. Kojima, S.M., K. Yanagi, Y. L. S. Tsai, 2019 (exp)]

- 間接探査 ... 対消滅断面積が抑制.

# まとめ

様々な暗黒物質候補内で良い動機を持つ熱的暗黒物質について、その中でも更に動機を持つ熱的暗黒物質候補を紹介し、その検証可能性も含め議論した。

ミニマリティーに基づいた系統的な熱的暗黒物質の研究において得られた候補:

熱的暗黒物質候補	更なる動機	検証方法
弱荷を持つ熱的暗黒物質	AMSB / Anti- $p$	直接(大型) / 間接 / 加速器
親レプトン熱的暗黒物質	Muon $g-2$	直接(電子) / 加速器(レプトン)
CPV H-Portal暗黒物質	GeV $\gamma$ / Anti- $p$	直接(大型?) / 加速器
軽い熱的暗黒物質	Core / Cusp	直接(軽い) / 加速器(高輝度)

ミニマリティーを課さない" WIMP-like" な暗黒物質や、他の凍結機構で残存量が決まる暗黒物質を考えることで、他にも魅力的な熱的暗黒物質も存在する。