

# 軽いスカラー WIMP暗黒物質とその検証

大阪大学素粒子論研究室

原 智也

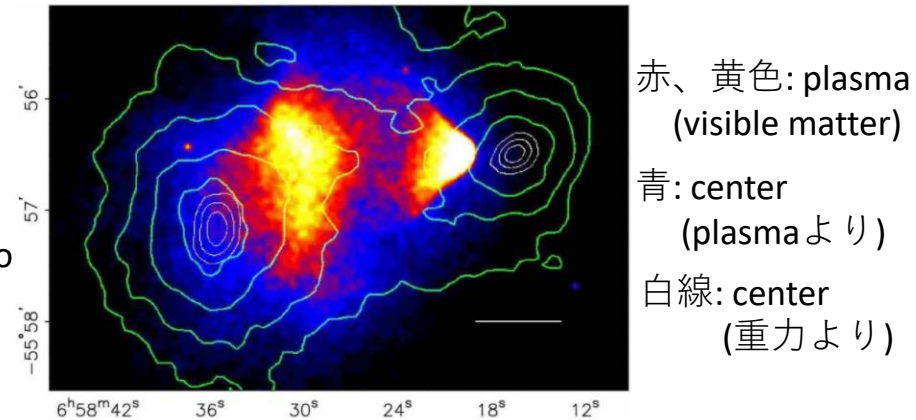
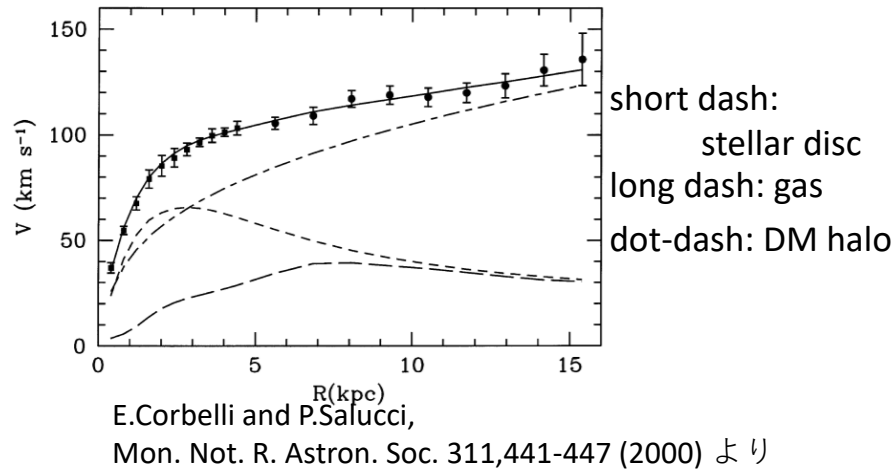
共同研究者

同研究室 兼村晋哉 片寄泰佑

arXiv:2109.03553[hep-ph]

# WIMP暗黒物質

- 多くの宇宙観測実験が暗黒物質の存在を示唆  
銀河の回転曲線、弾丸銀河団、CMBの観測など



## \* DMの条件

1. チャージを持たない
2. 安定 (or 寿命  $\geq$  宇宙年齢)
3. 質量を持つ
4. 残存量を説明する など

BSMが必要

WIMPは候補の一つ

# WIMP暗黒物質

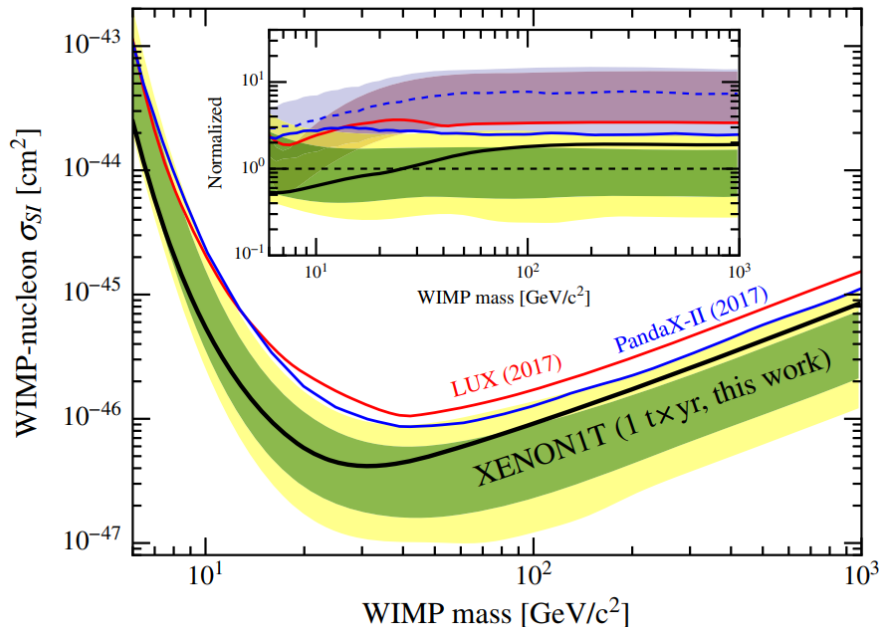
- WIMPは暗黒物質のwell-motivatedな候補

WIMP:

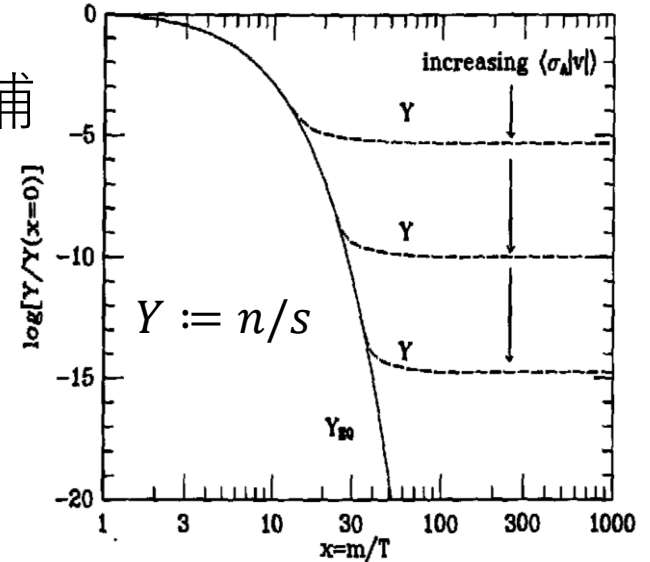
Weakly Interacting Massive Particle

熱的な生成過程で検証可能性が十分ある

- 直接探査実験による制限



XENON Collaboration, Phys. Rev. Lett. 121, 11302 (2018)



Kolb and Turner "The Early Universe" より

WIMP miracle で

注目されている10 GeV以上の  
質量に厳しい制限



軽いWIMPに注目

# 軽い暗黒物質への注目

- 直接探査実験からの制限を満足
- **core-cusp problem**を解決の可能性  
DM halo の構造に関する問題  
自己相互作用に関する予言

$$\frac{\sigma}{m} \gtrsim 1 \text{ [cm}^2\text{/g]} \sim 5 \times 10^{-6} \text{ [MeV}^{-3}\text{]}$$

$\sigma$ : DM DM  $\rightarrow$  DM DMの散乱断面積     $m$ : DMの質量

R. Dave, D. N. Spergel, P. J. Steinhardt, and B. D. Wandelt, *Astrophys. J.* 547, 574 (2001)

- 加速器実験での検証可能性  
Belle II, HL-LHC, SHiP, ILC, etc.

単純なモデルで10 GeVより軽いスカラーWIMPは実現可能か？

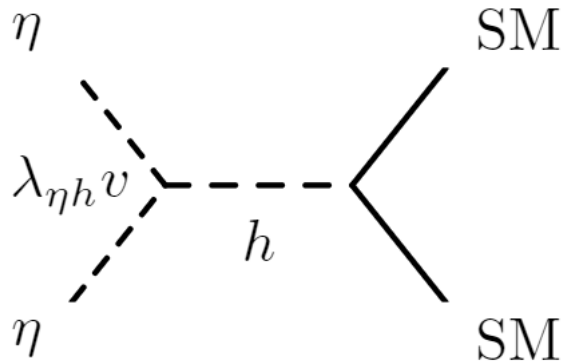
# 最もシンプルなモデルの困難

## SM + singlet scalar DM $\eta$ (with $\mathbb{Z}_2: \eta \rightarrow -\eta$ )

V. Silveira and A. Zee, *Phys. Lett. B* 161 (1985) 136-140

G. Arcadi, A. Djouadi and M. Raidal, *Phys.Rept.* 842 (2020) 1-180

- 残存量決定の過程



$\lambda_{\eta h}$  が小さいと  
残存量が多くなりすぎる

$$10 \text{ MeV} < m_{\eta} < 10 \text{ GeV}$$

$$\lambda_{\eta h} > 0.1$$

- 加速器からの制限

$$BR(h \rightarrow inv) \lesssim 0.13$$

ATLAS Collaboration, *Phys. Rev. Lett.* 122 (2019) 231801

$$\Gamma(h \rightarrow \eta \eta) \sim \frac{\lambda_{\eta h}^2 v^2}{32 \pi m_h} \lesssim 1 \text{ MeV}$$

$$\lambda_{\eta h} \lesssim 0.01$$



模型の拡張が必要になる

# Model

SM + 二個のシングレットスカラー  $\eta, S$  (with  $\mathbb{Z}_2: \eta \rightarrow -\eta$ )

- Higgs と  $S$  の混合

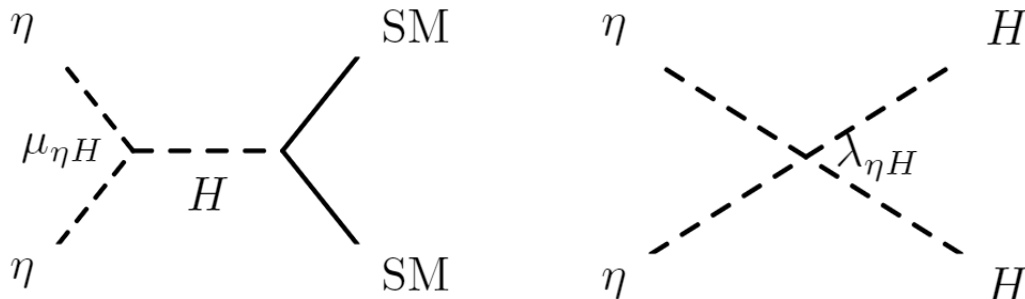
$$\begin{pmatrix} H \\ h \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S \\ h' \end{pmatrix} \quad \text{SMのHiggs 場 } \Phi = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{h'+v}{\sqrt{2}} \end{pmatrix}$$

$h$  : SM ライクな 125 GeV higgs     $H$  : 軽い媒介粒子



( $H$  と SM 粒子との結合)  
 $= (h' \text{ と SM 粒子の結合}) \times (-\sin \theta)$

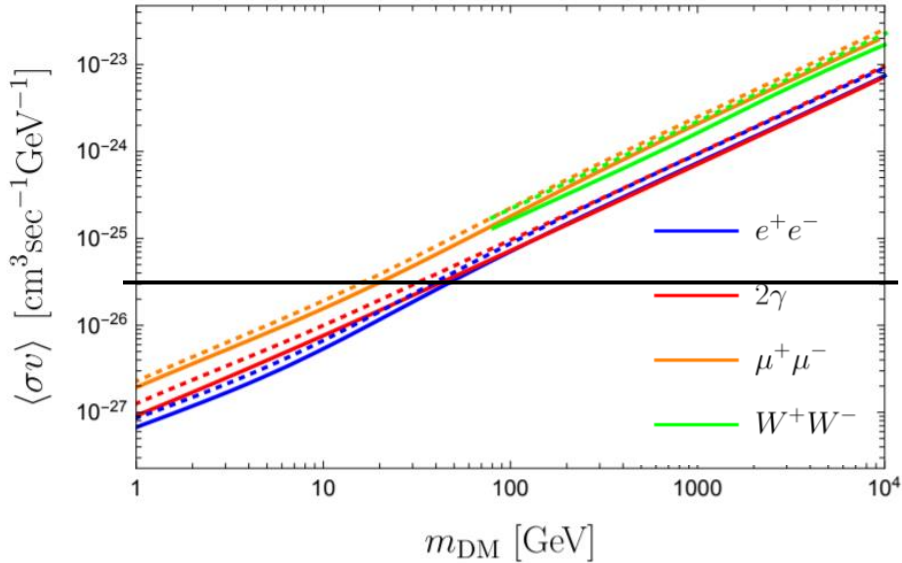
- 残存量決定の過程



Higgs invisible decay  
 とは独立にとれる

# シナリオ

- CMBからの制限



M. Kawasaki, H. Nakatsuka, K. Nakayama and T. Sekiguchi,  
ArXiv:2105.08334 [Astro-ph.CO]

- 二つの可能性

- 共鳴シナリオ
- 閾値シナリオ

$$m_H \simeq 2m_\eta \quad (m_H > 2m_\eta)$$

$$m_H \simeq m_\eta \quad (m_H > m_\eta)$$

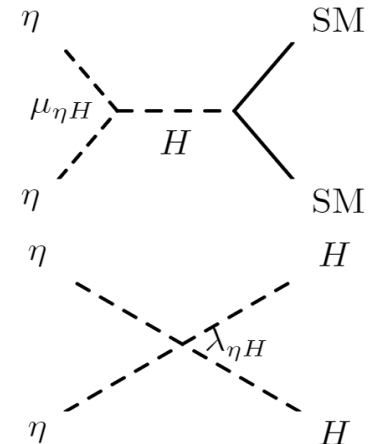
$\langle \sigma_{ann} v \rangle_{T_f}$  と  $\langle \sigma_{ann} v \rangle_{T_r}$   
に差が必要

( $T_f$ : freeze-out 温度)

( $T_r$ : 再結合の温度)

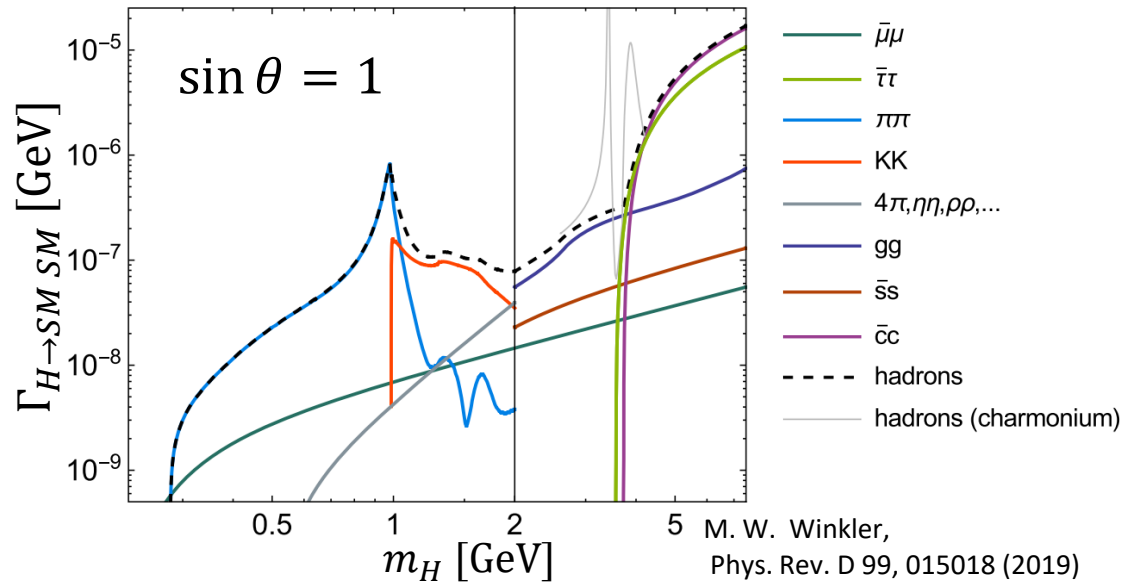
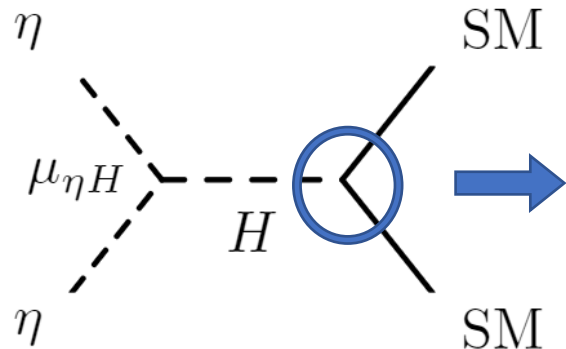


共鳴と閾値に注目



# 共鳴シナリオでの主な制限

## 残存量からの制限



残存量が多くなりすぎない ( $\Omega h^2 \leq 0.12$  Planck Collaboration, Astron. Astrophys. 641, A6 (2020) )

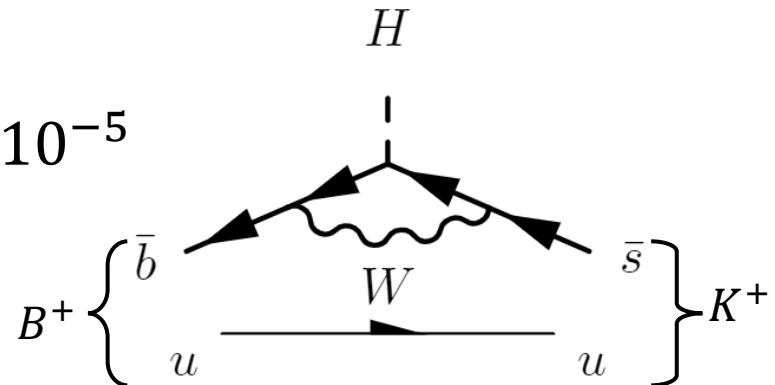
▶ 混合角  $\sin^2 \theta$  に下限が付く

## $B^+$ の崩壊 (BaBar)

$$BR(B^+ \rightarrow K^+ H \rightarrow K^+ \eta \eta) < 1.6 \times 10^{-5}$$

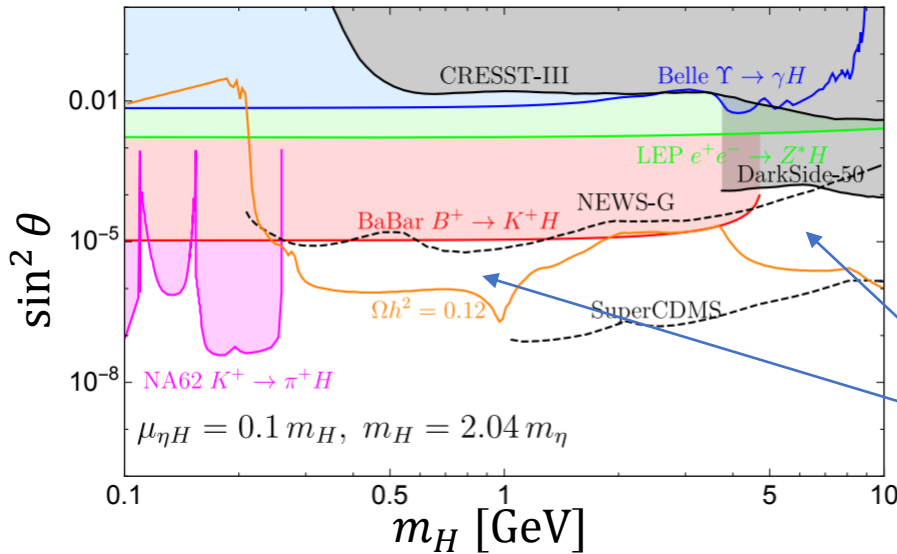
BaBar collaboration,  
Phys. Rev. D87 (2013) 11, 112005

▶ 混合角  $\sin^2 \theta$  に上限が付く





# 共鳴シナリオ



オレンジの実線：残存量からの下限  
 赤の領域：BaBar かの制限  
 点線：将来実験

現在の実験で許される領域

- $0.3 \text{ GeV} < m_H < 2 \text{ GeV}$  と  $4 \text{ GeV} < m_H$  に実験を満足する領域が存在

## 将来実験

- 直接探査実験 (黒い点線)  
NEWS-G や SuperCDNS

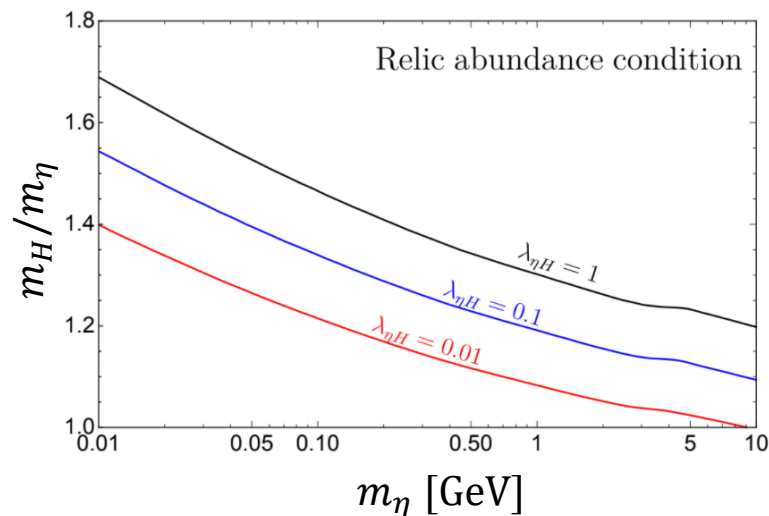
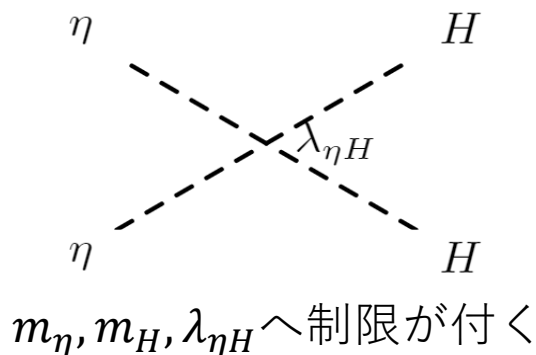
- 加速器実験 Belle II  
 $m_H < m_B - m_K$        $\sin^2 \theta \lesssim 10^{-6}$

Belle-II Collaboration, PTEP 2019(2019) 12, 123C01

A. Filimonova, R. Schafer, S. Westhoff, Phys. Rev. D 101, 095006 (2020)

# 閾値シナリオでの主な制限

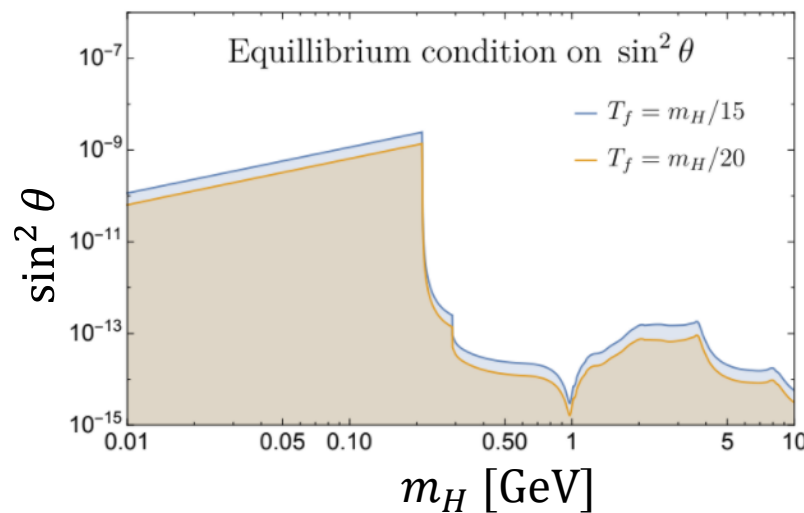
- 残存量からの制限



- $H$ のSMとの平衡条件

Freeze-outの計算上、  
 $\eta$ とSM粒子が $H$ を通して  
 熱平衡であることが必要

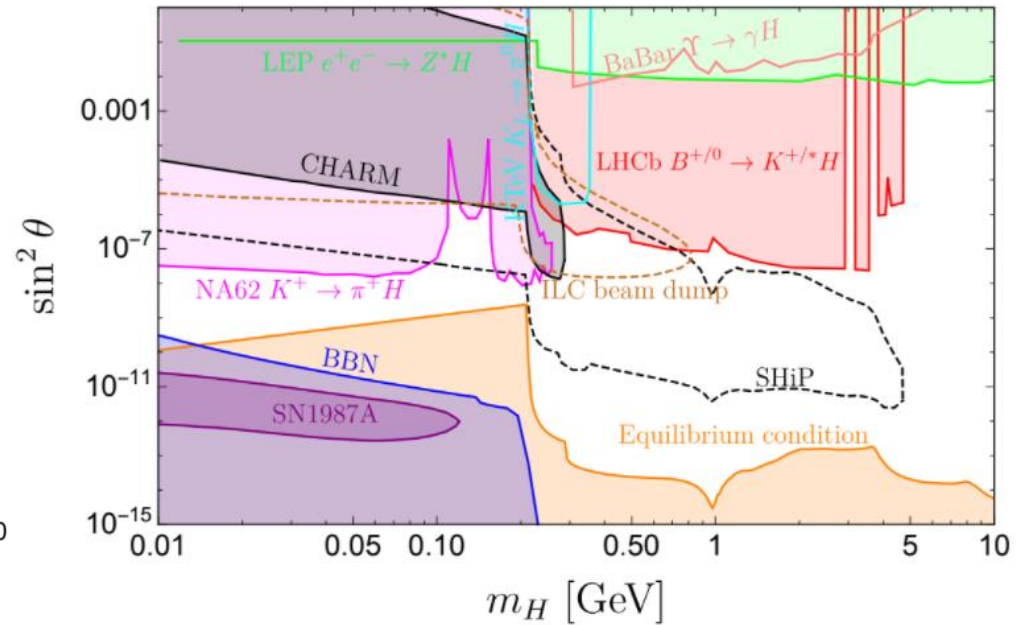
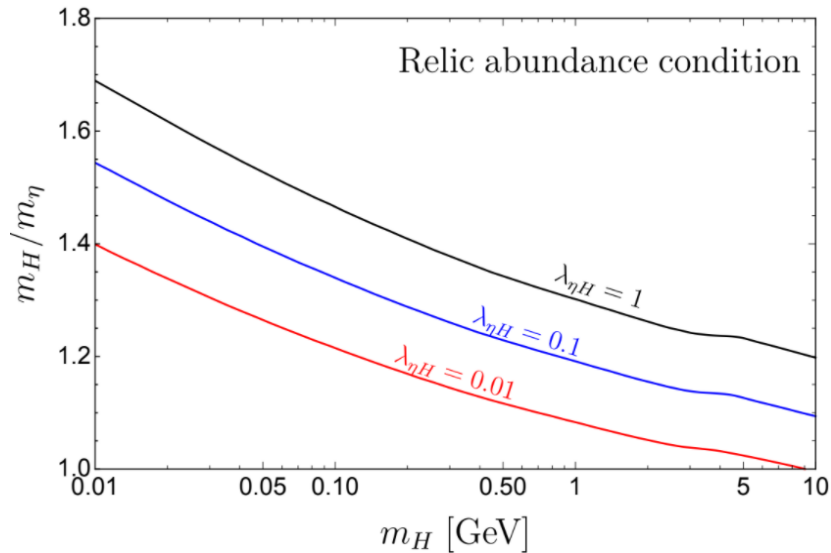
$$\Gamma(H \rightarrow SMs) > H(T_f)$$



- $B^+$ の崩壊 (LHCb)

$$BR(B^+ \rightarrow K^+ \mu^- \mu^+) < 2 \times 10^{-10} - 10^{-7} \quad (m_H \text{に依存})$$

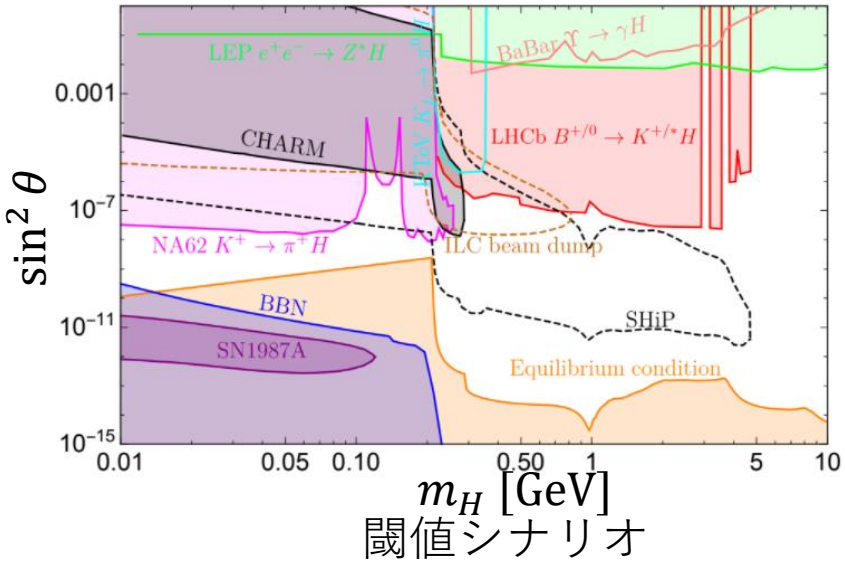
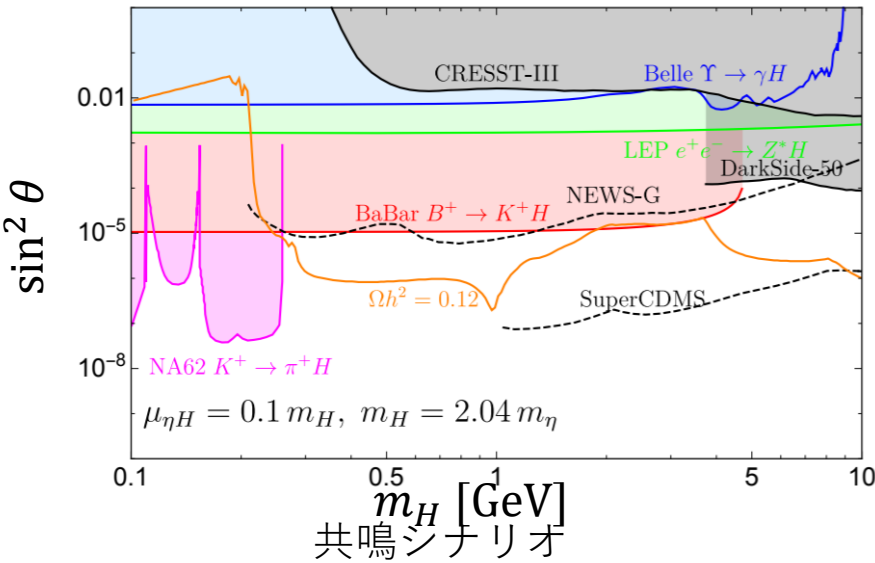
# 閾値シナリオ



- $m_H$ の広い範囲で現在の実験と無矛盾なパラメータが存在する
- 将来実験
  - ビームダンプ実験
    - SHiP 実験 (黒い点線) S. Alekhin *et al.* Rept. Prog. Phys. 79 (2016) 12, 124201  
M. W. Winkler, Phys. Rev. D 99, 015018 (2019)
    - ILC 実験 (オレンジの点線) Y. Sakaki and D. Ueda, Phys. Rev. D 103, 035024 (2021)

# まとめ

- 二つのスカラーを加えるモデルで10 MeV から 10 GeVのスカラー暗黒物質を調べた。
- CMBの制限から共鳴と閾値を用いたシナリオに注目した。



## 研究成果

どちらのシナリオも制限を満たす領域が存在し、多くの部分が将来実験により検証可能である。