

# The model with light thermal scalar dark matter

Taisuke Katayose (Osaka university)  
Collaborate with Shinya Kanemura, Tomoya Hara

[based on [arXiv:2109.03553](https://arxiv.org/abs/2109.03553)]

# Contents

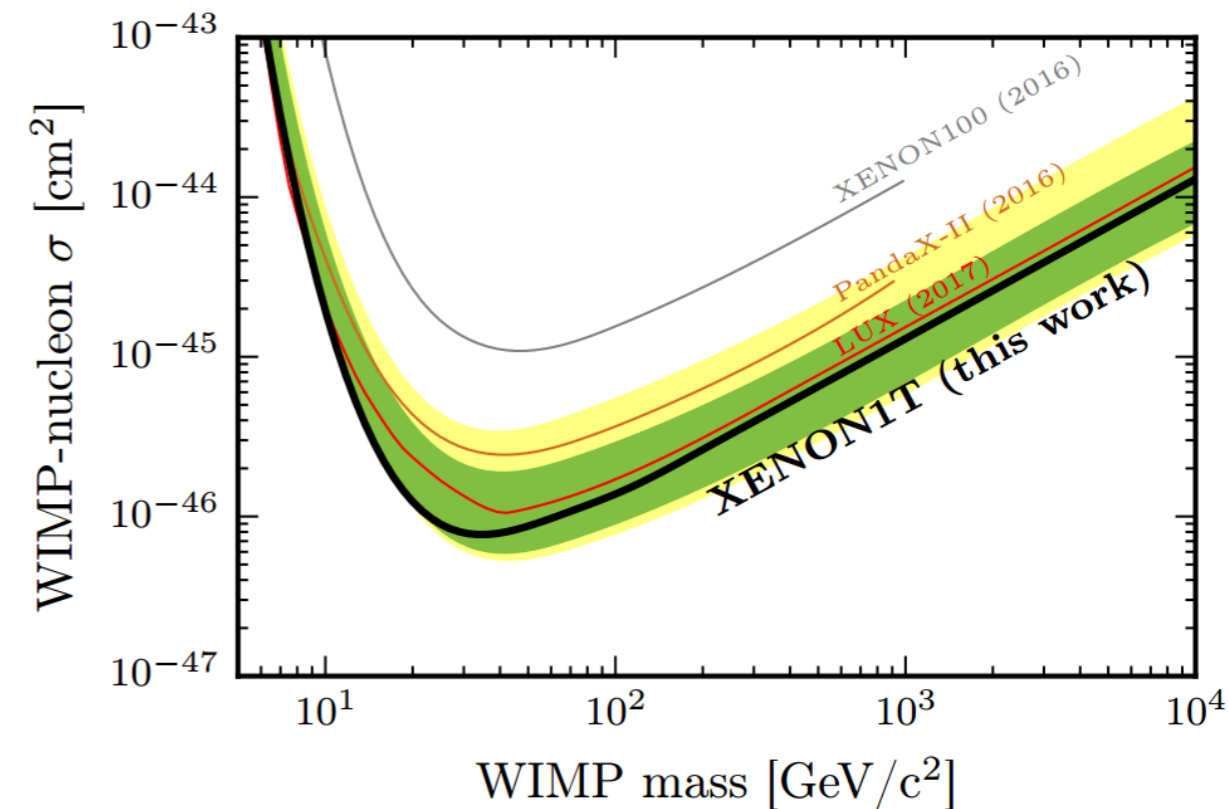
- 軽いthermal dark matter
- 今回のモデルの導入
- 解析 
  - Resonant annihilation region
  - Forbidden annihilation region
- まとめ

# Contents

- 軽いthermal dark matter
- 今回のモデルの導入
- 解析
  - Resonant annihilation region
  - Forbidden annihilation region
- まとめ

# Thermal dark matter (WIMP)

- WIMPはwell-motivatedなDMの候補
- MassはElectroweak scale周辺7桁くらい？
- Electroweak scaleのWIMPは直接探査実験で強力に探査されている
- 見つかっていないということは何らかのメカニズムで制限を逃れている？



(Xenon collaboration 2018)

DMが軽い可能性

# 軽いWIMP

## モチベーション

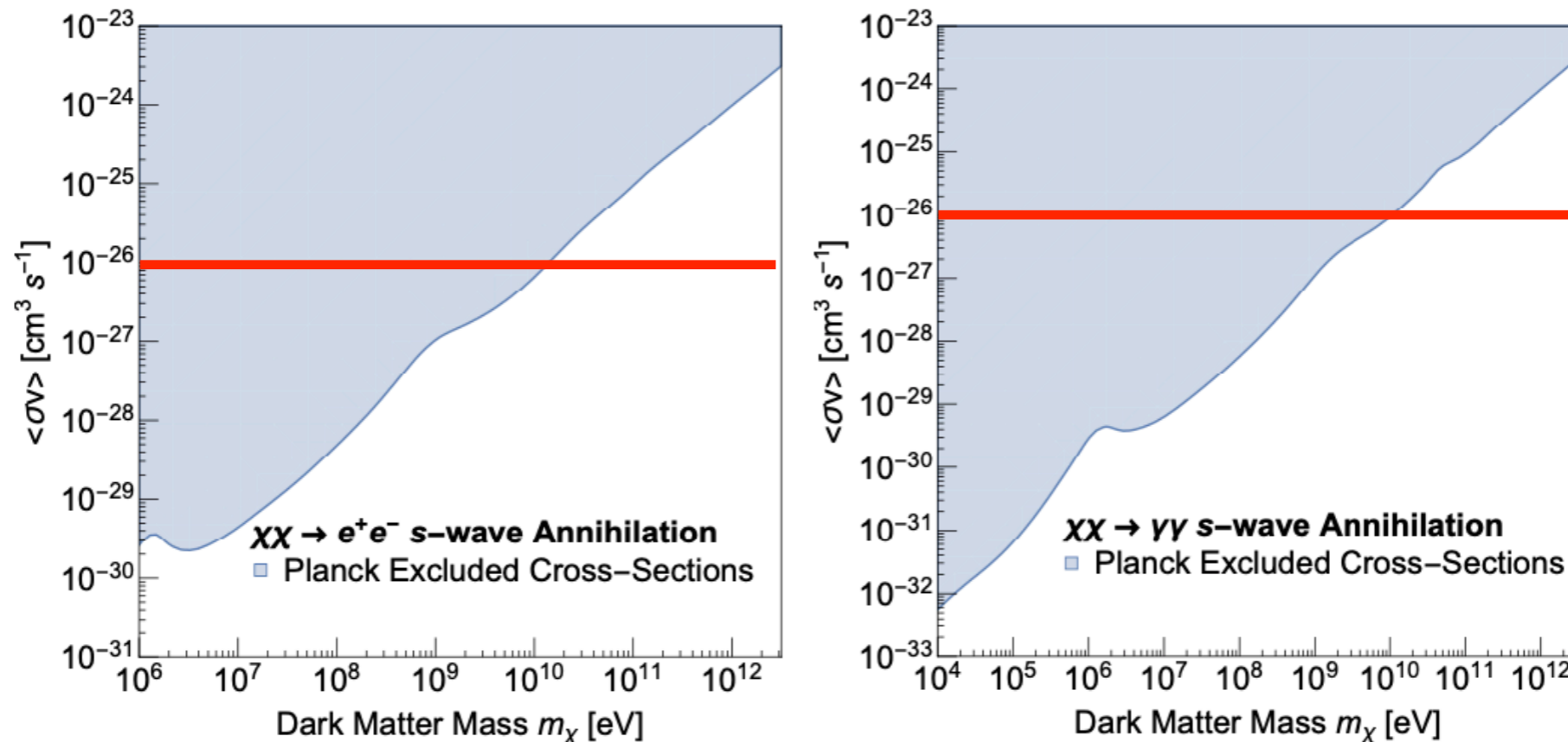
- ・ 宇宙のsmall scale problemを解きうる  
N-body simulationと実際の観測にずれがある  
DMが軽くて、よく散乱するとすれば解決可能  
(M.Kaplinghat, S.Tulin, Hai-Bo Yu 2015)
- ・ エネルギー的には手が届くので、コライダー等で見つ  
けられそう

# 軽いWIMP

- Lee-Weinberg boundというものが知られており、弱い相互作用をするようなWIMPは数GeV以下になれない
- 他の相互作用が必要→Mediatorの導入
- DMがfermionの場合の研究はいろいろある  
(M.J.Dolan, et al. 2015)  
(G.Krnjaic, 2016)  
(S.Matsumoto, et al. 2019)  
(K.Bondarenko, et al. 2020)
- DMがscalarの場合は?→少し厳しいが可能 (本研究)

# CMBからの制限

- Scalar DMはS-waveでannihilationする
- CMBで厳しい制限がついている



(H.Liu, T.R.Slatyer, J.Zavala, 2016)

- Freeze-out時、 $\langle\sigma v\rangle \simeq 10^{-26}$  cm<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>ならabundanceを説明できる

🔍 GeV以下のthermal scalar DMは厳しい？

# Contents

- 軽いthermal dark matter
- 今回のモデルの導入
- 解析
  - Resonant annihilation region
  - Forbidden annihilation region
- まとめ



# 今回のmodel

## 新しい粒子

$\eta$ : Scalar DM (Z2 odd, SM singlet)

S: Real scalar mediator (Z2 even, SM singlet)

- Freeze-out時にS-wave以外の成分がdominantだと、CMBの制限を逃れる

以下の二つの領域は生き残っている！

- Resonant region:  $m_S \simeq 2m_\eta$  かつ  $m_S > 2m_\eta$
- Forbidden region:  $m_S \simeq m_\eta$  かつ  $m_S > m_\eta$

# Mediatorの物理

- Mediatorのpotentialは以下

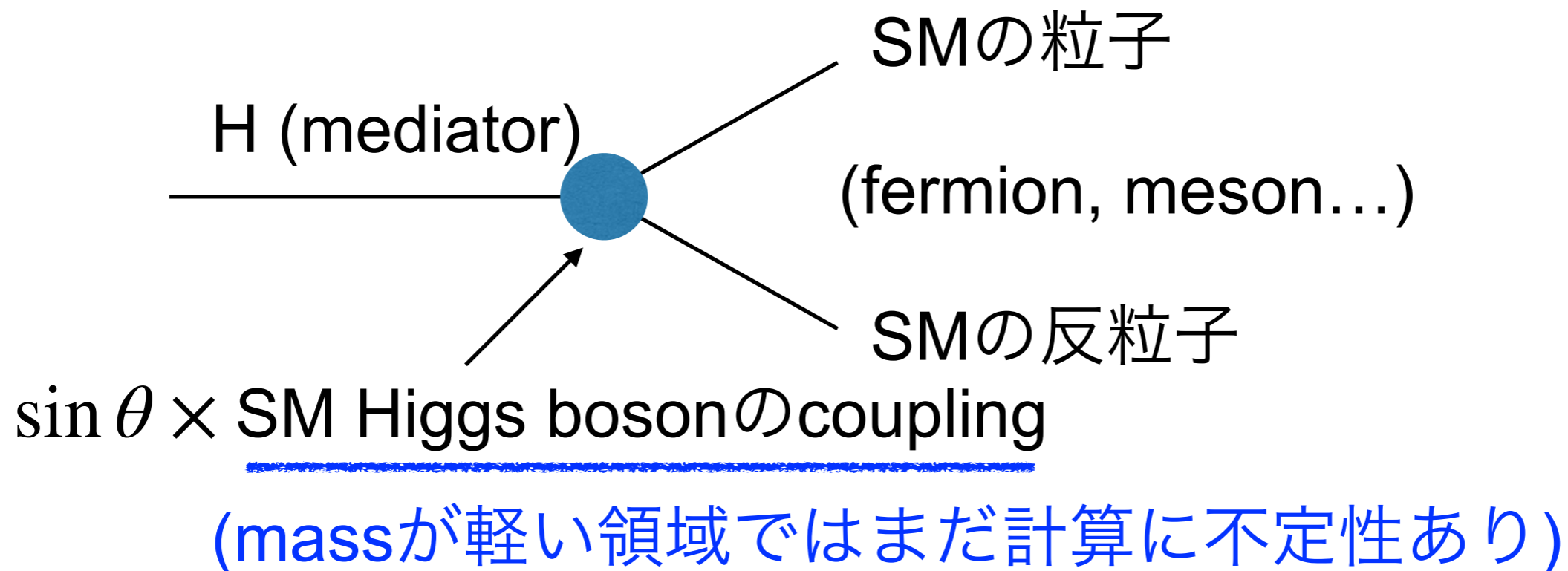
$$V_{\text{med}}(S, \Phi) = \mu_1^3 S + \frac{m_S^2}{2} S^2 + \frac{\mu_3}{3!} S^3 + \frac{\lambda_S}{4!} S^4 \\ - \mu_\Phi^2 |\Phi|^2 + \lambda_\Phi |\Phi|^4 \\ + \mu_{S\Phi} S |\Phi|^2 + \frac{\lambda_{S\Phi}}{2} S^2 |\Phi|^2 .$$

- $\Phi$ はSM Higgs doublet
- Symmetry breakingの後、massの対角化でHiggs bosonとmixingを起こす

$$\begin{array}{l} \text{Mediator (GeV付近)} \\ \text{125GeV Higgs boson} \end{array} \longrightarrow \begin{pmatrix} H \\ h \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S \\ h' \end{pmatrix}$$

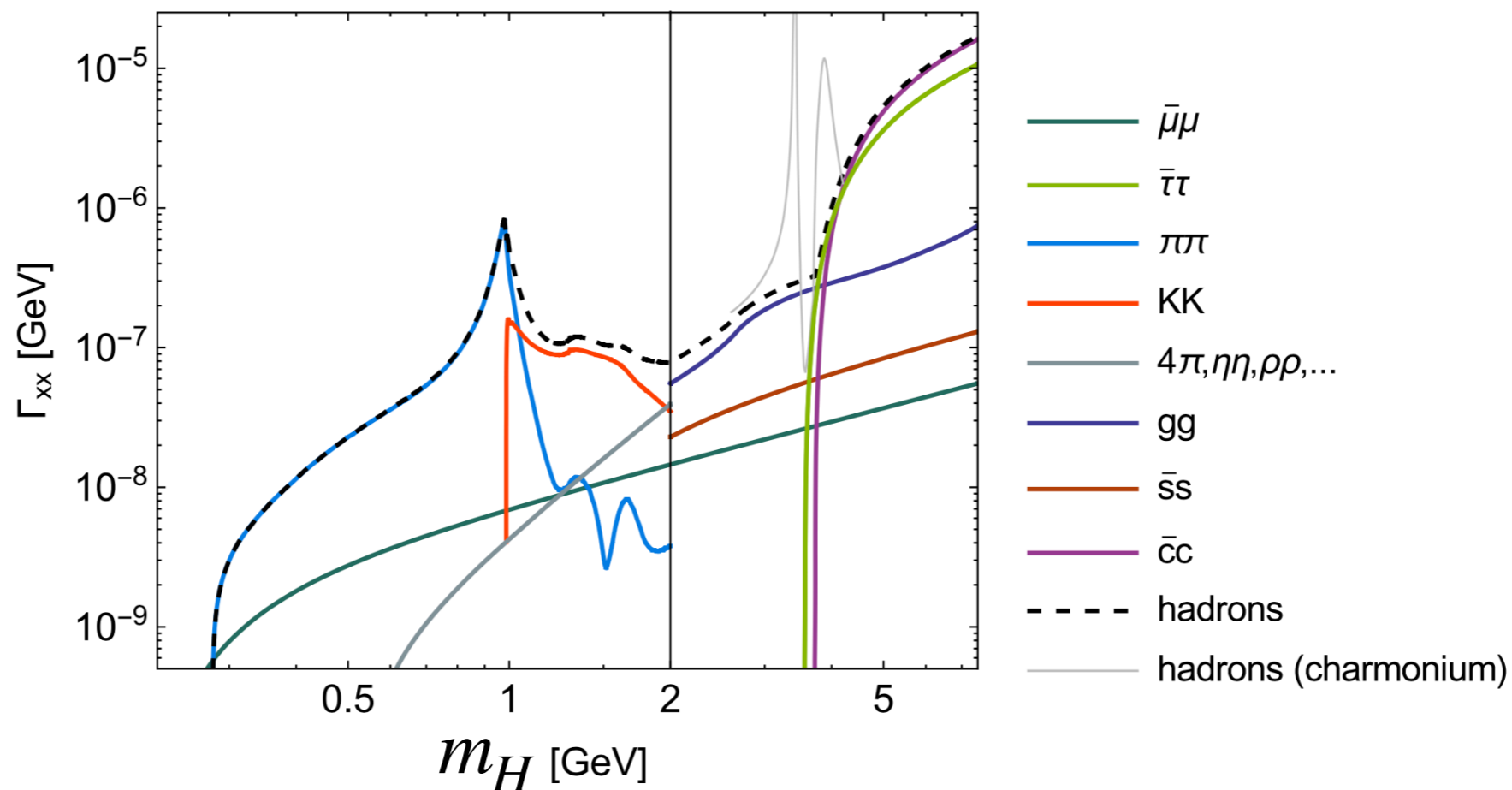
# Mediatorの物理

- Dark sectorとSMの粒子とのinteractionは、基本的にmixingを通じて行われる



# Mediatorのdecay

- Mediator (H) のSMへのdecay (さらに $\sin^2 \theta$ がかかる)



(M.W.Winkler 2019)

- $m_H > 2m_\eta$  ならほとんどDMにdecayする (invisible decay)

# Contents

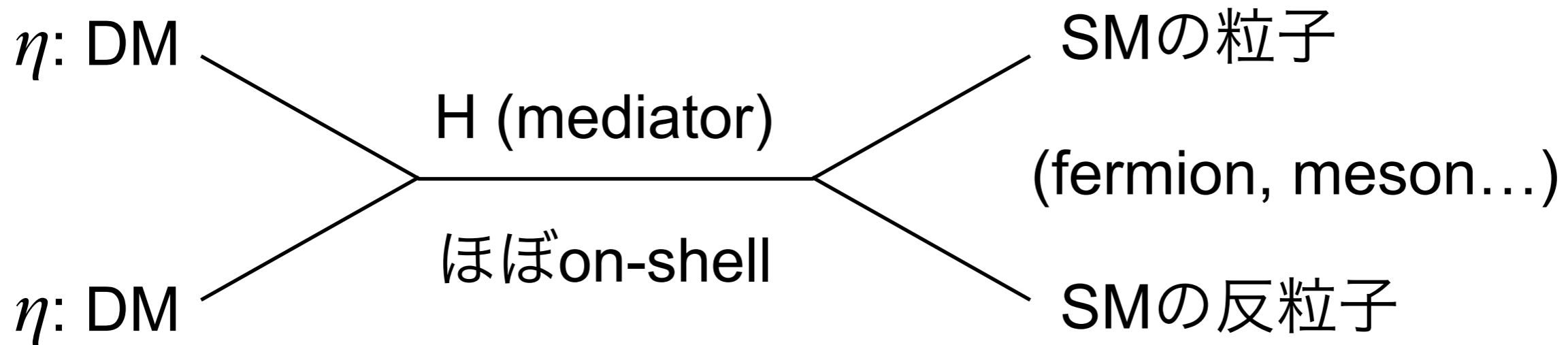
- 軽いthermal dark matter
- 今回のモデルの導入
- 解析
  - Resonant annihilation region
  - Forbidden annihilation region
- まとめ

# Resonant annihilation region

$$(m_H \simeq 2m_\eta \text{ かつ } m_H > 2m_\eta)$$

# DMのannihilation

- Mediatorのresonanceを通じてSMの粒子にannihilateする



- Velocityがあるときはpoleを叩いてcross sectionが大きくなる
- S-wave (velocity 0の時)はpoleを叩かずcross sectionが小さい

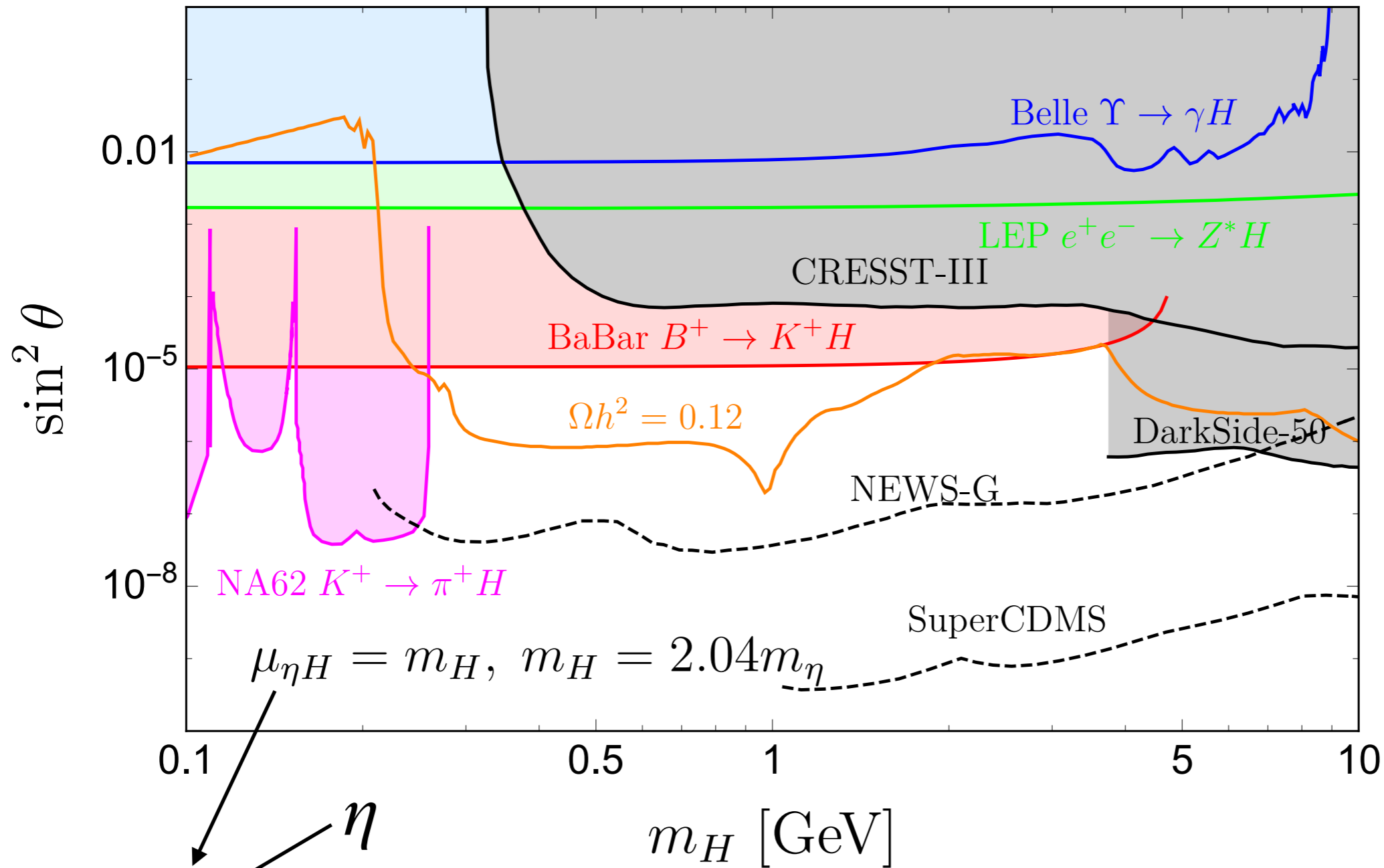
 CMBのconstraint的にもOK

# 実験的な制限

- Resonant regionでは HはほぼDM pairに崩壊 (invisible)
- LEP実験 ( $e^+e^- \rightarrow Z^*H \rightarrow \ell^+\ell^- + inv.$ )
- BaBar実験 ( $B^+ \rightarrow K^+H \rightarrow K^+ + inv.$ )
- NA62実験 ( $K^+ \rightarrow \pi^+H \rightarrow \pi^+ + inv.$ ) etc.
- 基本的にmediatorとSM Higgsとのmixing angle ( $\sin \theta$ )  
に対して制限がつく



# Result



オレンジの線上にあればabundanceを説明できる

# Contents

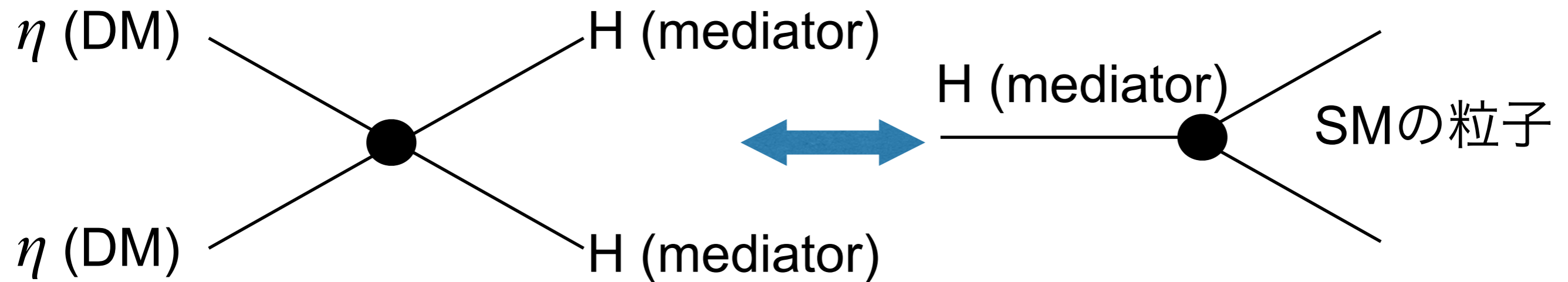
- 軽いthermal dark matter
- 今回のモデルの導入
- 解析
  - Resonant annihilation region
  - Forbidden annihilation region
- まとめ

# Forbidden annihilation region

$$(m_H \simeq m_\eta \text{ かつ } m_H > m_\eta)$$

# DMの物理

- Mediatorにannihilateする→mediatorがSMの粒子に崩壊する

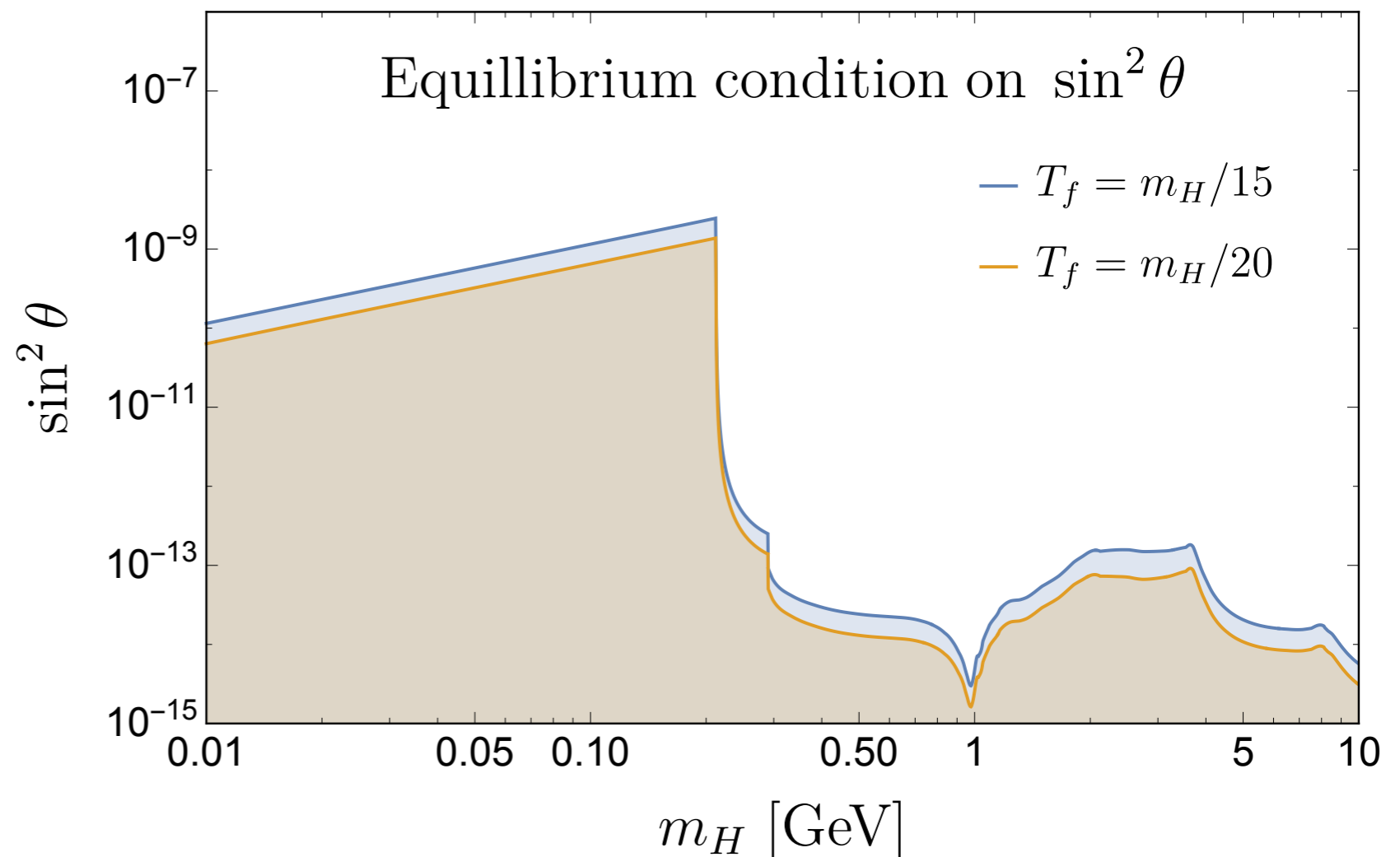


- MediatorがDMより少しだけ重い
- DMの速度がゆっくりだとエネルギー的にmediatorを作れない
  - ↳ CMBのconstraint的にもOK
- DMのannihilationにはmixing angle ( $\sin \theta$ )は無関係

# MediatorとSMとの平衡条件

- DMがmediatorにannihilateした後、mediatorは即座にSMの粒子に崩壊してほしい  
(そうでないと、freeze-outの時に余ったmediatorからDMが作られてしまう)

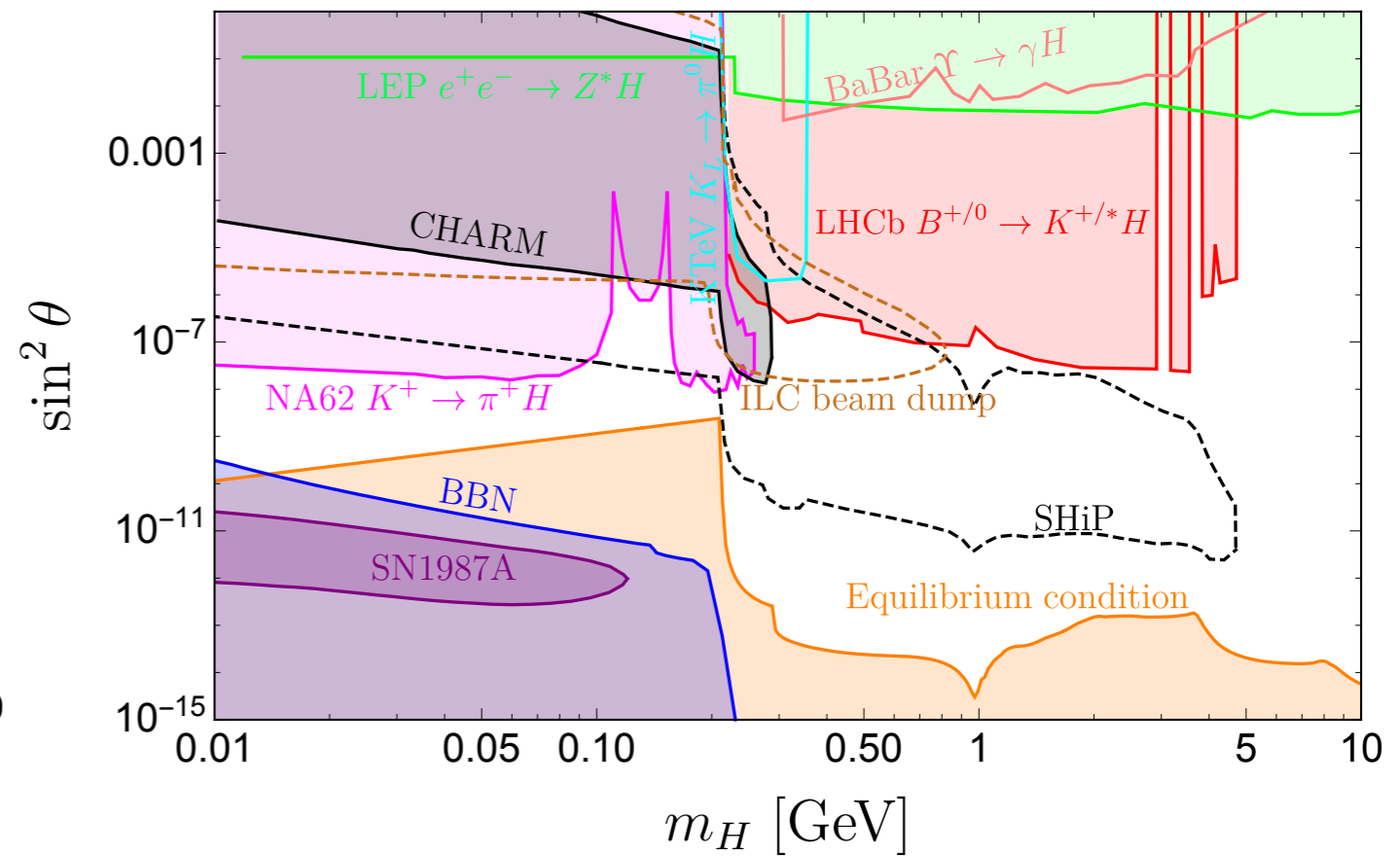
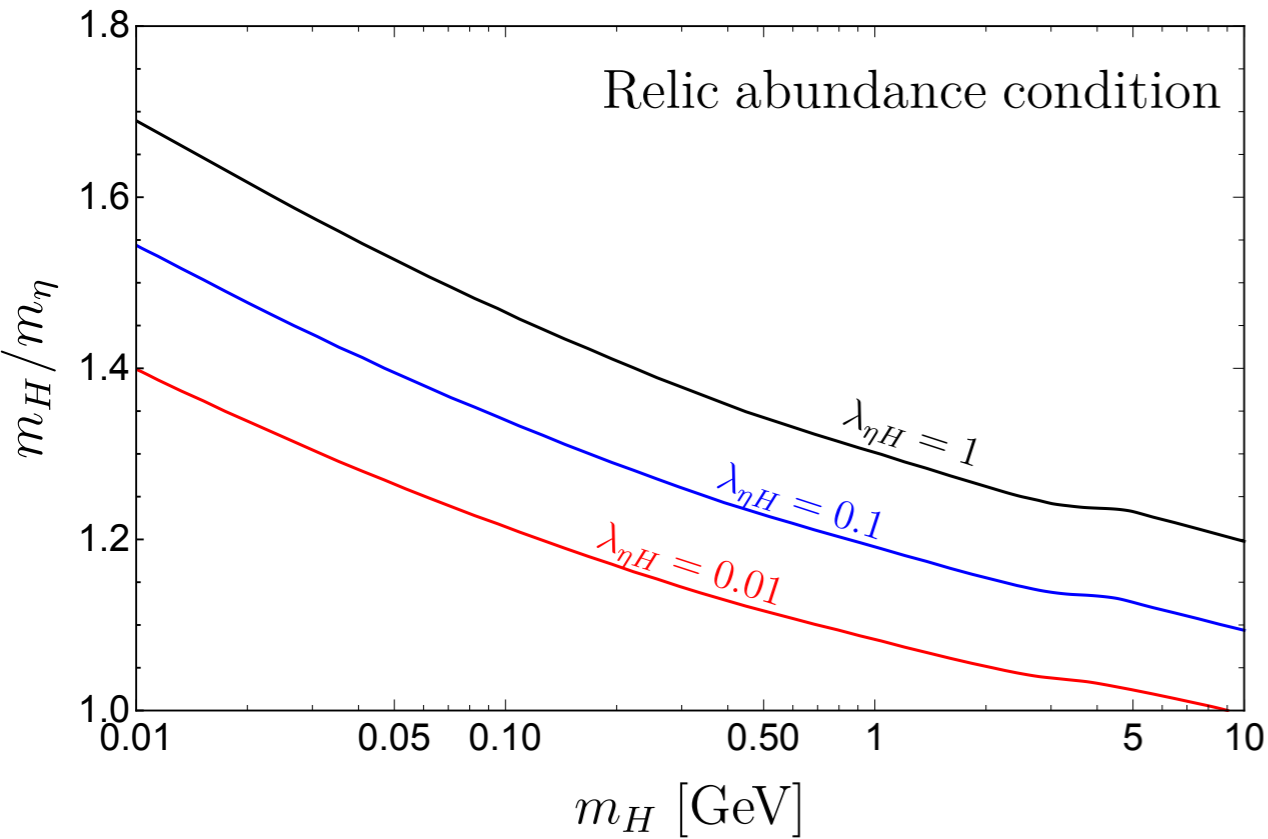
- 小さすぎる $\sin\theta$ に対して制限がつく



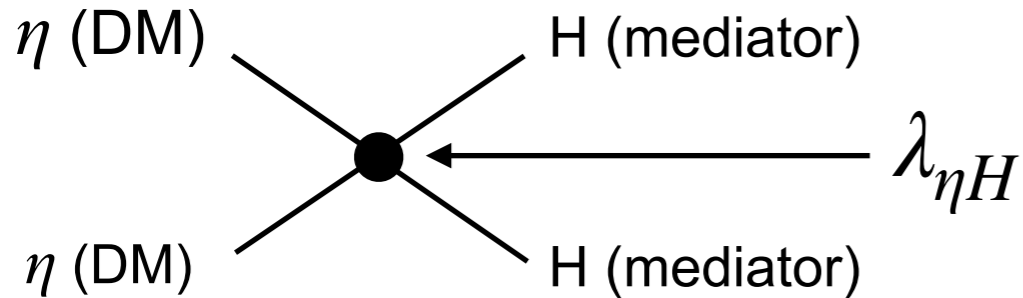
# 実験的な制限

- Forbidden regionではHはSMの粒子に崩壊する (lepton pairやmesonなど)
- LEP実験 ( $e^+e^- \rightarrow Z^*H \rightarrow \ell^+\ell^- + \ell^+\ell^-$ )
- LHCb実験 ( $B^+ \rightarrow K^+H \rightarrow K^+ + \ell^+\ell^-$ )
- NA62実験 ( $K^+ \rightarrow \pi^+H \rightarrow \pi^+ + \ell^+\ell^-$ )
- CHARM実験 (beam dump実験) etc.
- Resonant regionと同様に、mixing angle ( $\sin \theta$ )に対して制限がつく

# Result



- Relic abundanceを説明するパラメータ



- 各種実験や観測からの  $\sin \theta$  への制限
- 点線は将来実験の探査可能範囲

# Contents

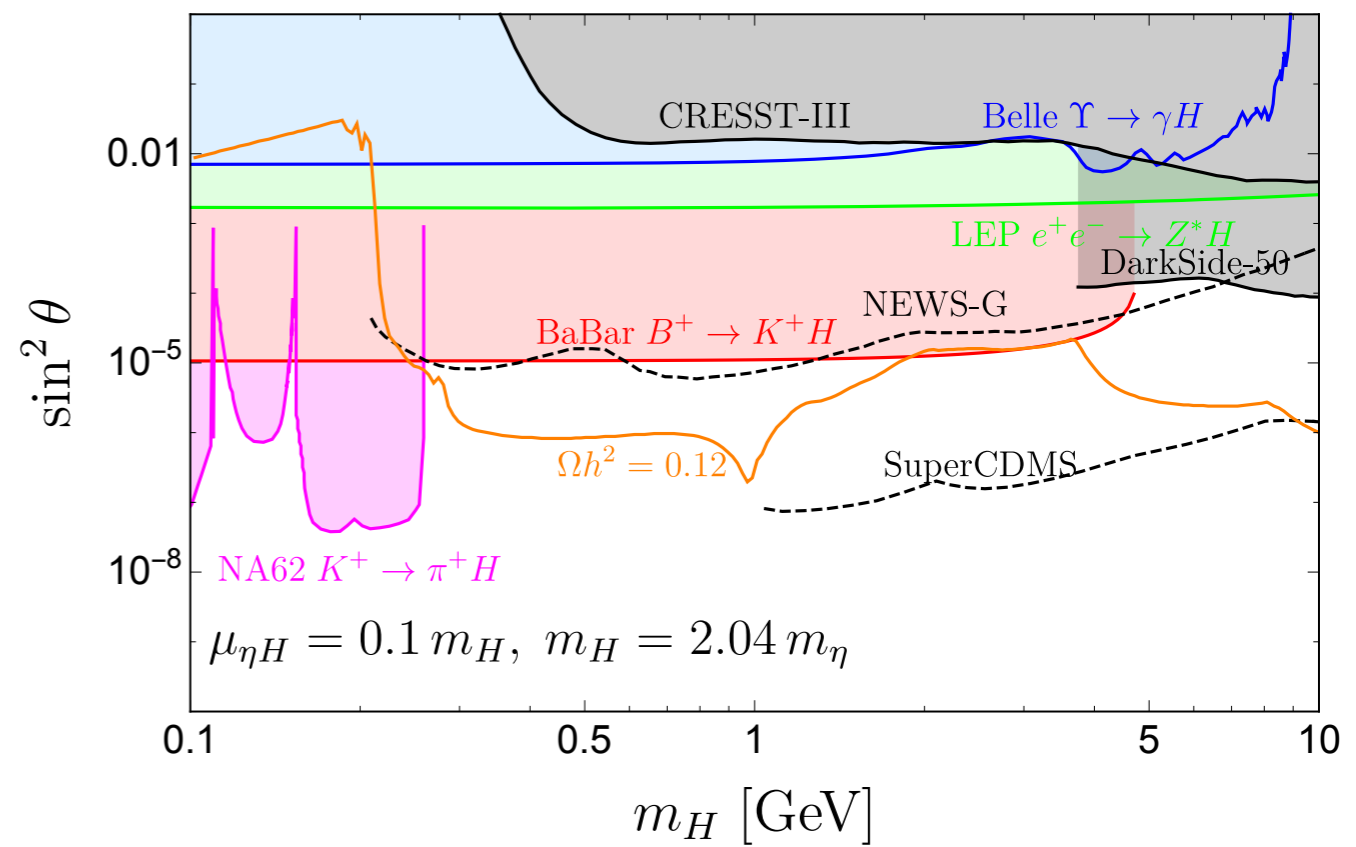
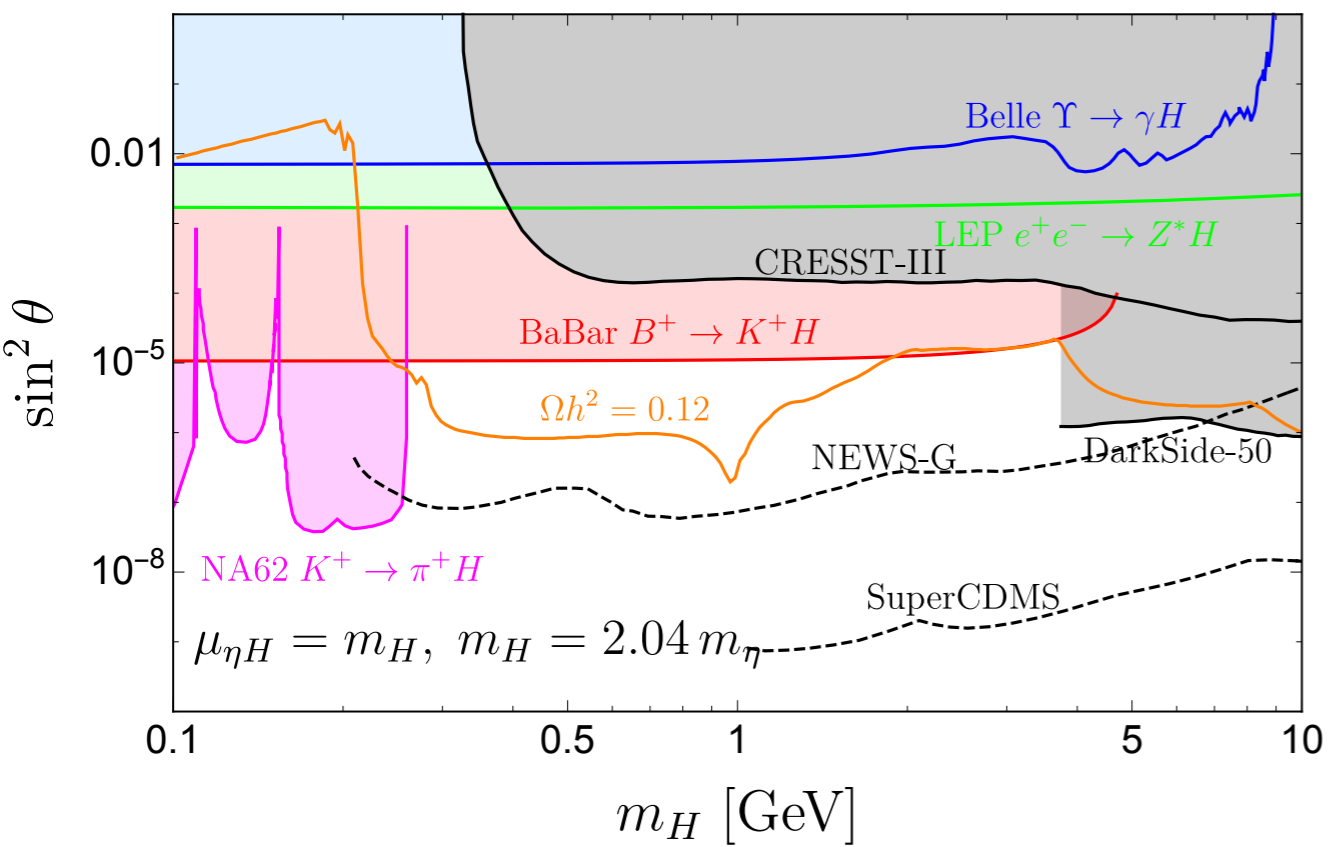
- 軽いthermal dark matter
- 今回のモデルの導入
- 解析
  - Resonant annihilation region
  - Forbidden annihilation region
- まとめ



# まとめ

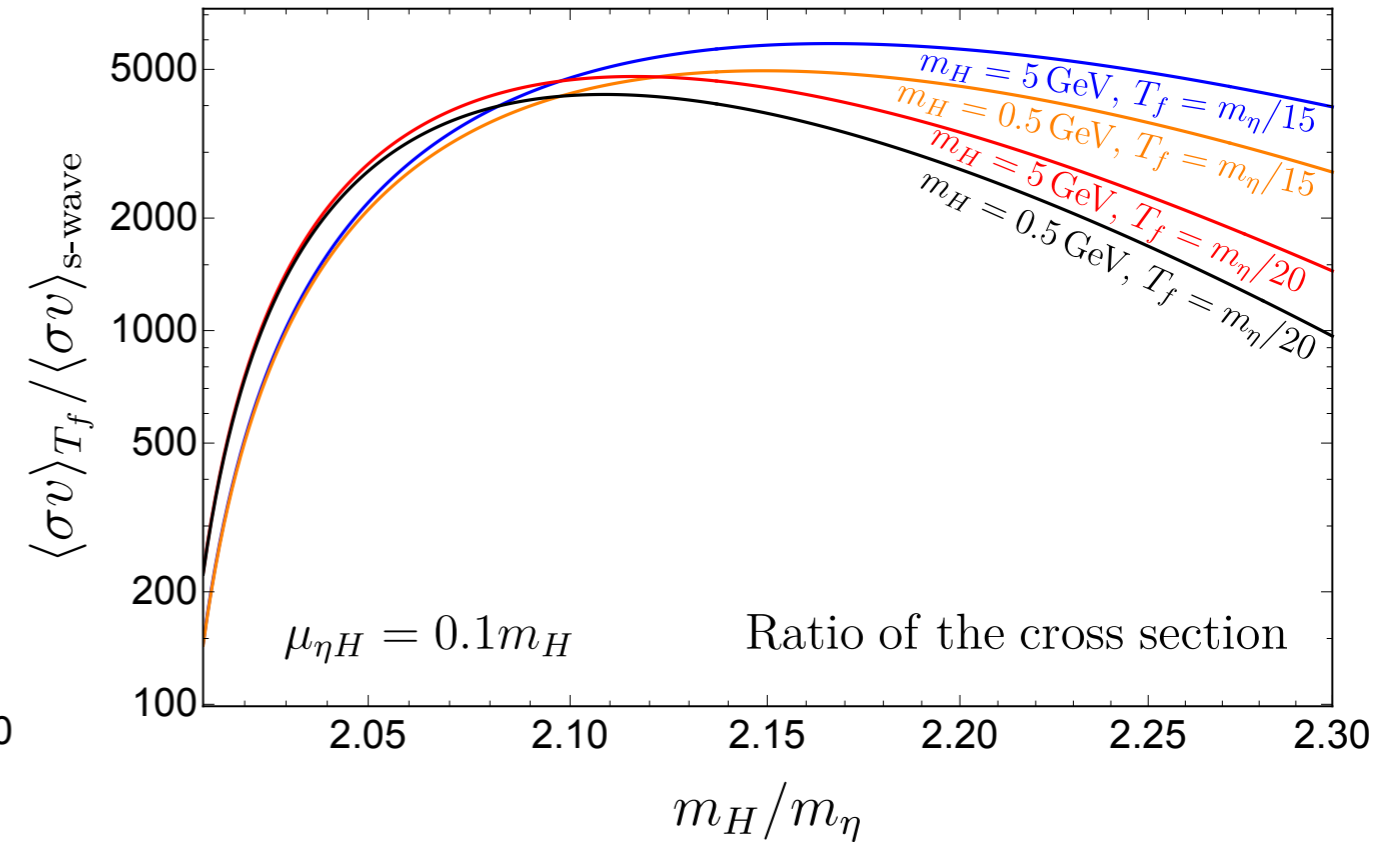
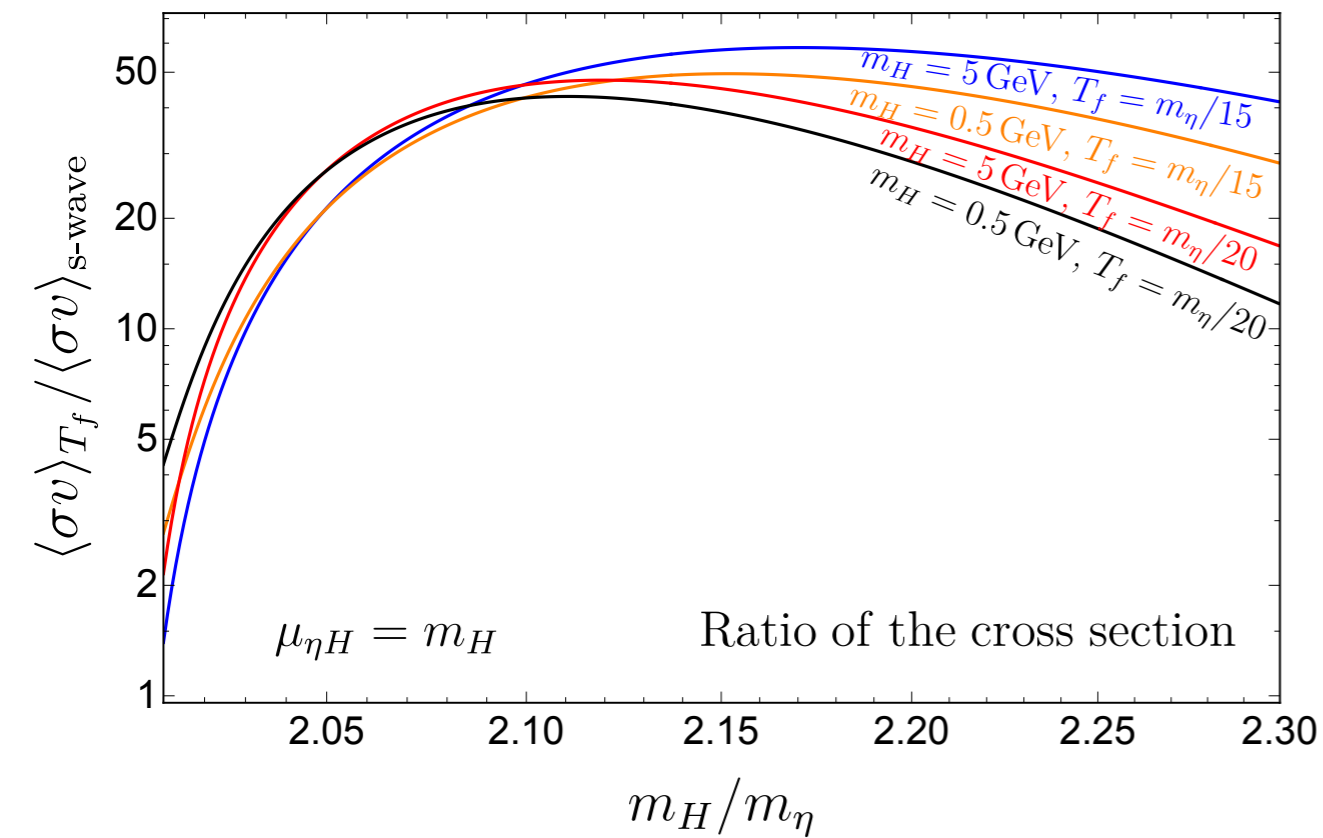
- 軽いscalar WIMPを2 singlet real scalar模型で考えた
- CMBの制限から、許される領域はresonant regionとforbidden regionに限られる
- その両方において、まだ理論的、実験的に生き残っている領域がある
- もし存在すれば、将来的な実験(Belle II, SHiP, NEWS-Gなど)で観測される可能性あり

# Backup



- Couplingを変えたときのresonant regionの制限の変化

# Backup



- Freeze-out時とS-waveのannihilation cross sectionの比