

# Relic Abundance in Secluded Dark Matter Scenario with Massive Mediator

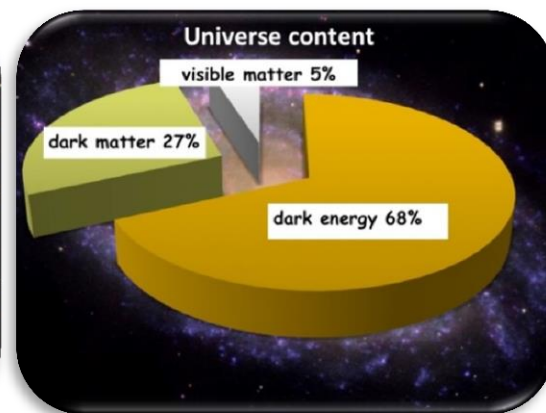
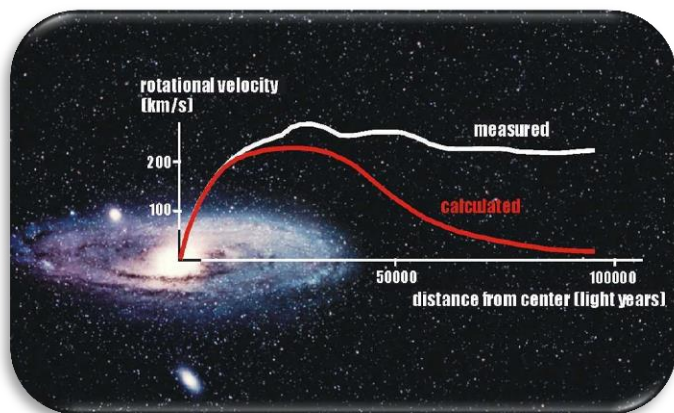
山中 真人 (南部陽一郎物理学研究所, 大阪市立大学)



共同研究者 : 大川 翔平 (ヴィクトリア大)、棚橋 誠治 (名大)

PRD95, 023006 (2017)

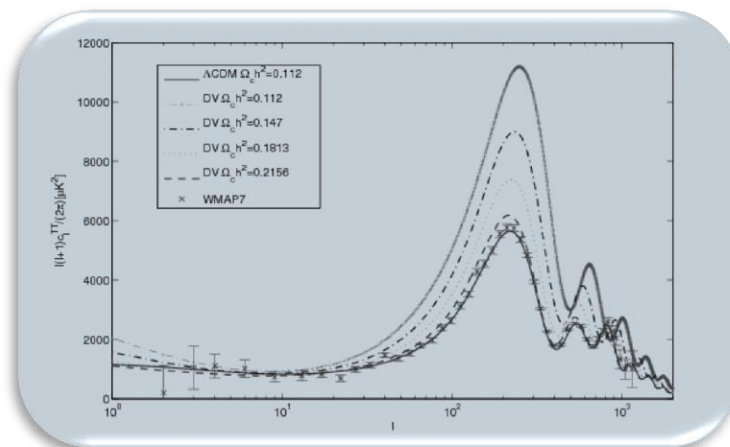
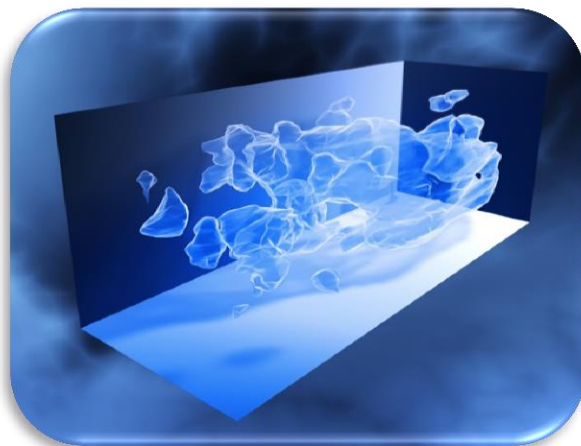
暗黒物質の存在は疑う余地無し。正体は不明。おそらく新粒子



銀河スケール

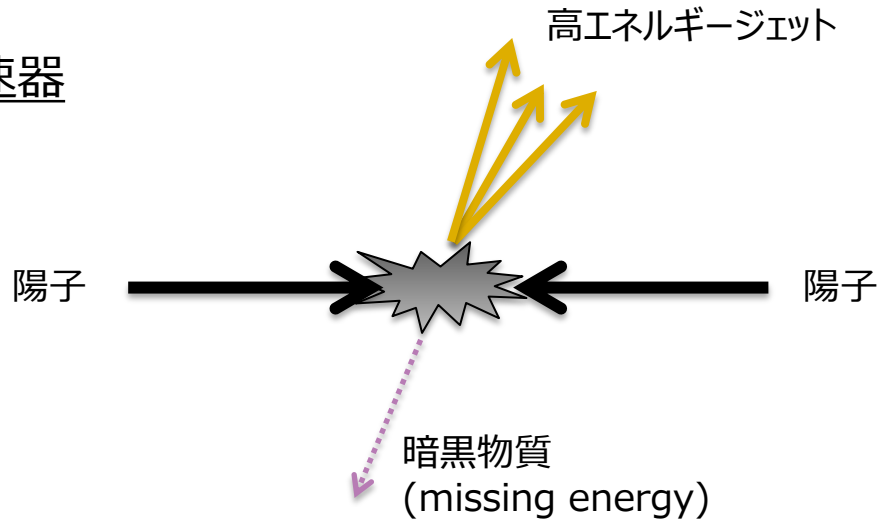
銀河団スケール

宇宙論的スケール



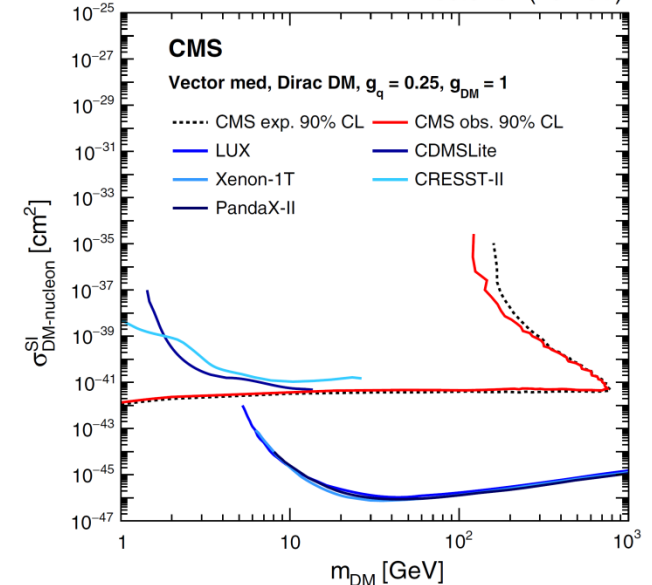
# 実験で探索中。検出無。WIMPは最有力候補から一歩後退

## 加速器

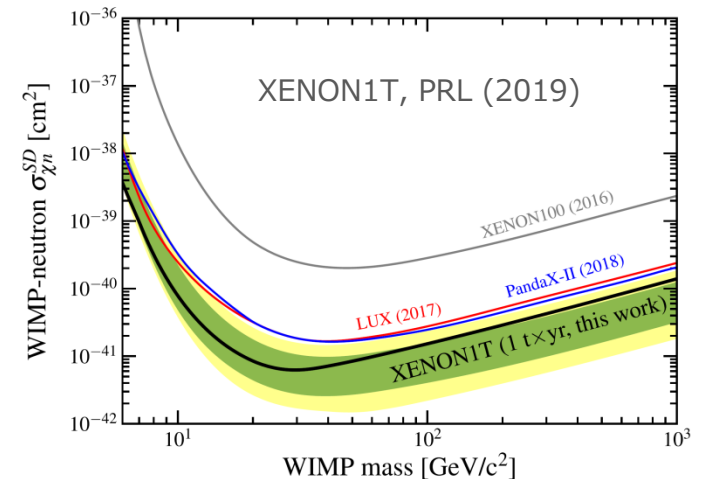
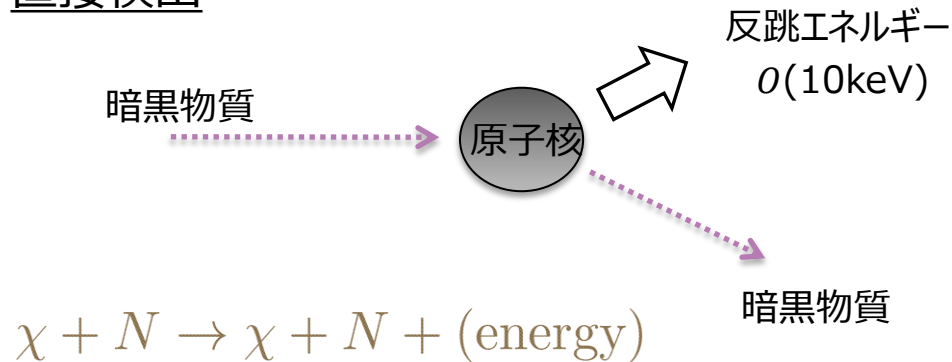


PRD97, 092005 (2018)

35.9 fb<sup>-1</sup> (13 TeV)



## 直接検出



# 暗黒物質と標準模型は相互作用が無い(or 弱い)のでは？

理論的・観測的動機を基に、近年、様々なシナリオ

## ❏ Secluded WIMP dark matter

M. Pospelov, A. Ritz, M. B. Voloshin, PLB (2007)

N. Arkani-Hamed, D. P. Finkbeiner, T. R. Slatyer, N. Weiner, PRD (2009)

## ❏ SIMP dark matter

Y. Hochberg, E. Kuflik, T. Volansky, J. G. Wacker, PRL (2014)

Y. Hochberg, E. Kuflik, H. Murayama, T. Volansky, J. G. Wacker, PRL (2015)

## ❏ Cannibal dark matter

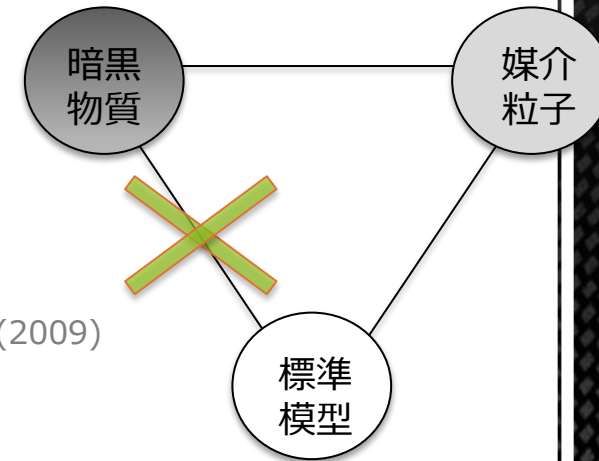
E. D. Carlson, M. E. Machacek, L. J. Hall, APJ (1992)

D. Pappadopulo, J. T. Ruderman, G. Trevisan, PRD (2016)

## ❏ Impeded dark matter

J. Kopp, J. Liu, T. Slatyer, X. Wang, W. Kue, JHEP (2016)

## ❏ etc.



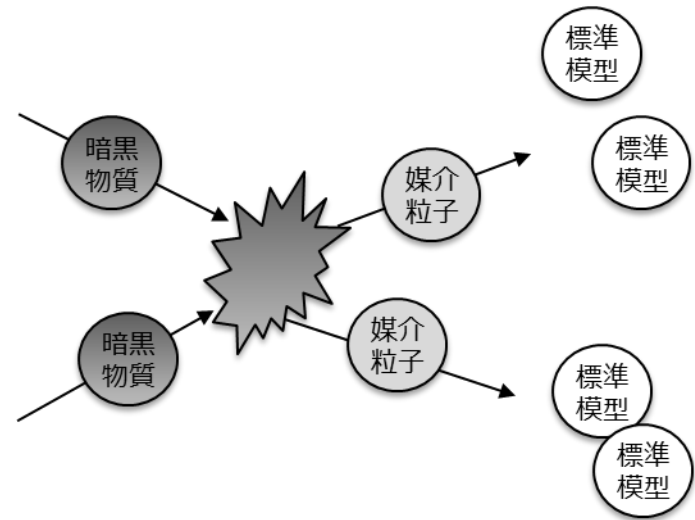
制限の強さゆえ、多くの模型が段々この手のシナリオに漸近中

# 発展版熱的残存シナリオ（例1：Secluded dark matter）

枠組み 標準模型 + 暗黒物質 + 媒介粒子

暗黒物質は媒介粒子にのみ対消滅

媒介粒子はSM粒子へ崩壊



暗黒物質残存量は媒介粒子への対消滅断面積で決まる

観測残存量を与える断面積を得るため、(暗黒物質質量)  $\gg$  (媒介粒子質量)

媒介粒子の質量を調整し、崩壊先を制限することで、様々な宇宙線超過を説明可能

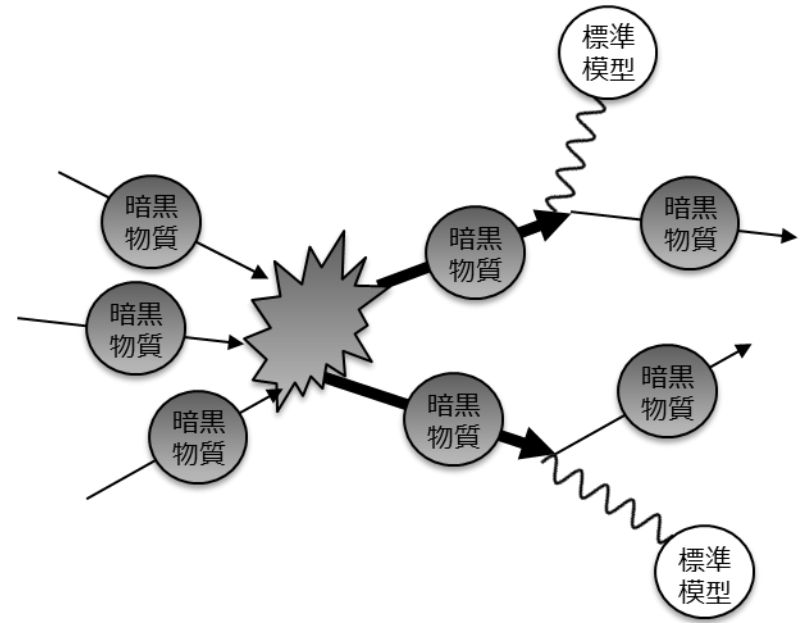
例：媒介粒子質量  $\approx 2m_e$  とすると、511keV  $\gamma$  線超過を説明可能（このシナリオの元々の動機はコレ）

# 発展版熱的残存シナリオ（例2：SIMP dark matter）

枠組み 標準模型 + 暗黒物質 + 媒介粒子

暗黒物質を3体 → 2体の反応で減らす

暗黒物質を冷やすため、SMにエネルギー移行



$$3 \rightarrow 2 \text{ の反応率 } n_{\text{DM}}^2 \langle \sigma v^2 \rangle_{3 \rightarrow 2} \simeq (m_{\text{DM}} T)^3 (e^{-m_{\text{DM}}/T})^2 \cdot (\alpha_{\text{eff}}^3 / m_{\text{DM}}^5)$$

観測残存量を与える断面積を得るため、 $m_{\text{DM}} = O(100 \text{ MeV})$

暗黒物質同士の相互作用が強いため、構造形成に関する問題の解決に有利

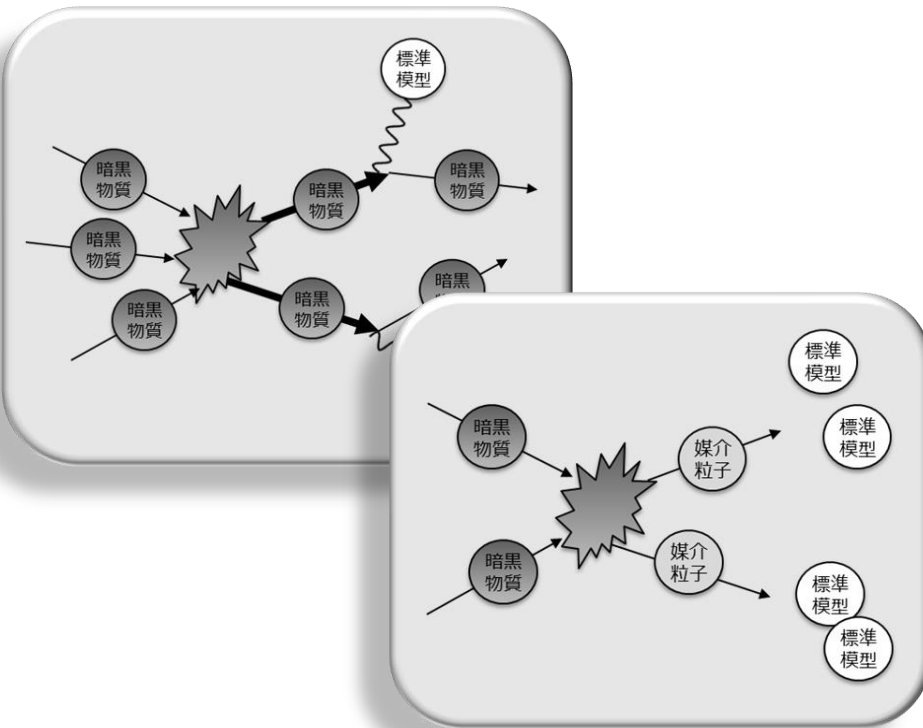
M. Boylan, J. Bullock, M. Kaplinghat, MNRAS (2011)

A. Kamada, M. Kaplinghat, A. Pace, H. Yu, PRL (2017)

# 現実的なモデルの姿、その検証を可能にする精確な残存量計算

残存量観測値と算出値との整合性から来る縛り

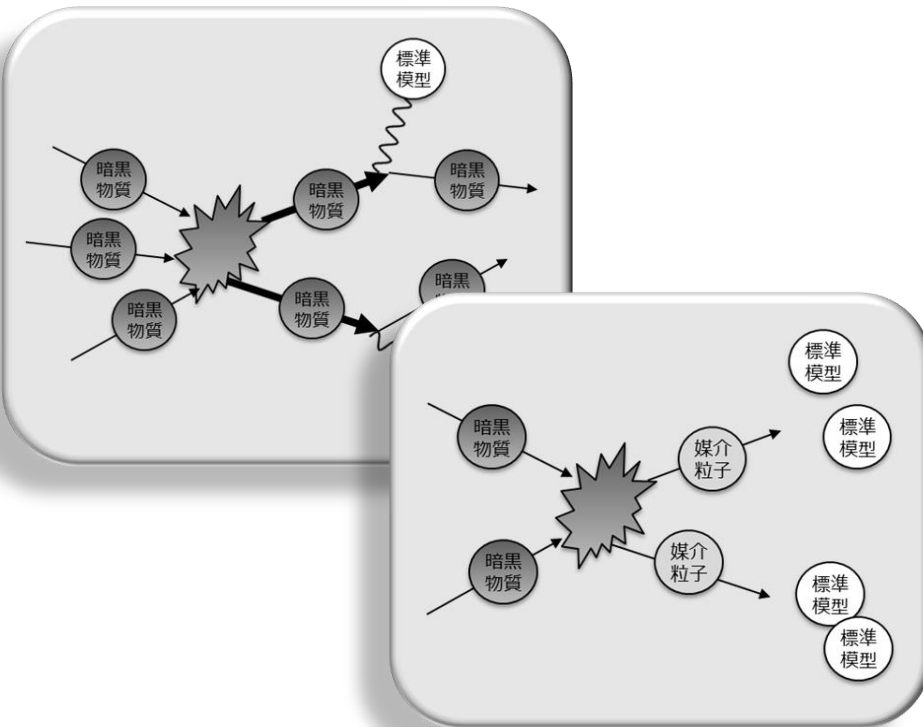
- ・ (暗黒物質質量)  $\gg$  (媒介粒子質量)
- ・  $m_{\text{DM}} = O(100\text{MeV})$
- ・ などなど



# 現実的なモデルの姿、その検証を可能にする精確な残存量計算

残存量観測値と算出値との整合性から来る縛り

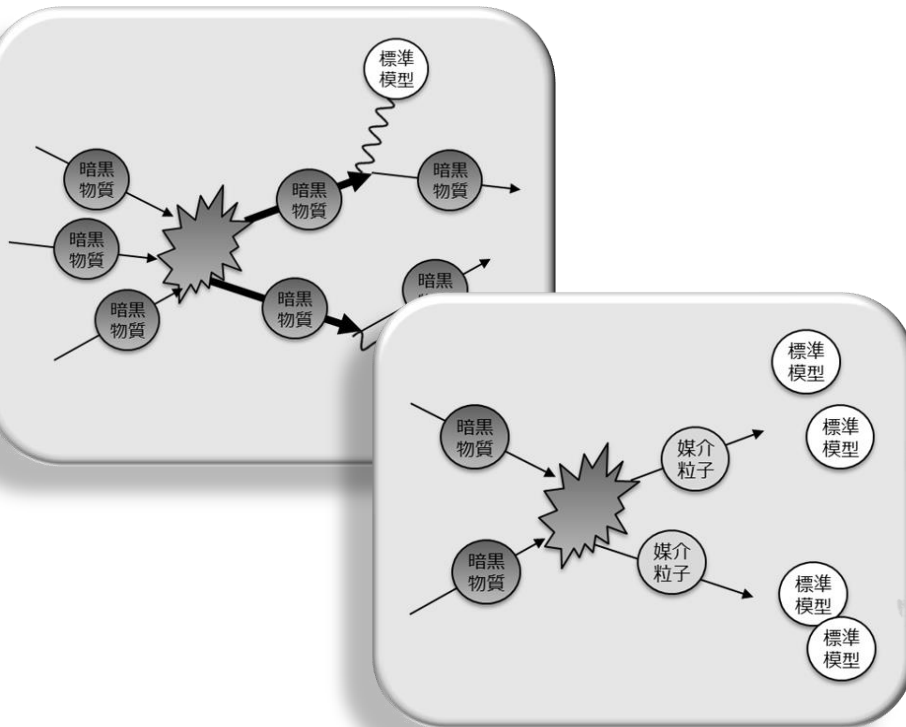
- ・ (暗黒物質質量)  $\gg$  (媒介粒子質量)  $\leftarrow$  1つの枠組みに階層構造が入るのは不自然な気がする。。。
- ・  $m_{\text{DM}} = O(100\text{MeV})$   $\leftarrow$  新物理のスケールは電弱スケールより上では???
- ・ などなど



# 現実的な模型の姿、その検証を可能にする精確な残存量計算

残存量観測値と算出値との整合性から来る縛り

- ・ (暗黒物質質量)  $\gg$  (媒介粒子質量)  $\leftarrow$  1つの枠組みに階層構造が入るのは不自然な気がする。。。
- ・  $m_{\text{DM}} = O(100\text{MeV})$   $\leftarrow$  新物理のスケールは電弱スケールより上では???
- ・ などなど



$O(\text{TeV})$ 以上の暗黒物質と媒介粒子が同程度質量を持つ、SMとSecludedな新物理が多数

Models with new multiplets (2HDM, 3HDM)  
Composite Higgs, dark QCD,  
RH sneutrino-RH neutrino in SUSY, etc

模型の実験検証をまともな精度で行うため、  
パラメーターを精確に弾き出す残存量計算を！

# 目的・成果、目次

目的：媒介粒子の質量・寿命を考慮し、secluded scenario  
における暗黒物質残存量を高精度に定式化・数値計算

成果：残存量計算の新たな機構を考案

## 目次

1. 枠組みと残存量計算定式化
2. 数値解析
3. まとめ

# 枠組みと残存量計算定式化

- ☑ 精確な残存量計算を説明するため、簡単な枠組みを導入
- ☑ ボルツマン方程式（＝暗黒物質の時間発展方程式）
- ☑ 媒介粒子の寿命が残存量をコントロールするパラメーター領域の特定

# 枠組み

標準模型 + 暗黒物質  $\phi_d$  + 媒介粒子  $\phi_m$

暗黒セクター内に質量の階層性はほとんど無し： $m_d \simeq m_m$

暗黒セクターと相互作用するSM粒子：標準模型ヒッグス  $\phi$

ヒッグスでなくても可。  
ヒッグス以外のSM粒子でも、  
今から話す機構は働きます。

$$\begin{aligned}\mathcal{L} = & g_{ddmm} \phi_d \phi_d \phi_m \phi_m \\ & + g_{m\phi^\dagger\phi} m_m \phi_m (\phi^\dagger \phi) \\ & + g_{mm\phi^\dagger\phi} \phi_m \phi_m (\phi^\dagger \phi)\end{aligned}$$

# 枠組み

標準模型 + 暗黒物質  $\phi_d$  + 媒介粒子  $\phi_m$

暗黒セクター内に質量の階層性はほとんど無し :  $m_d \simeq m_m$

暗黒セクターと相互作用するSM粒子 : 標準模型ヒッグス  $\phi$

$$\begin{aligned}\mathcal{L} = & g_{ddmm} \phi_d \phi_d \phi_m \phi_m \\ & + g_{m\phi^\dagger\phi} m_m \phi_m (\phi^\dagger \phi) \\ & + g_{mm\phi^\dagger\phi} \phi_m \phi_m (\phi^\dagger \phi)\end{aligned}$$

枠組みをSecluded scenarioとするため、  
 $\phi_d$  と  $\phi_m$  の相互作用は他に比べ強いと仮定

$$g_{ddmm} \gg g_{m\phi^\dagger\phi}, g_{mm\phi^\dagger\phi}$$

強い相互作用により引き摺られることで、  
 $\phi_m$  の時間発展が  $\phi_d$  に強く影響

互いの時間発展が複雑に絡み合うので  
系全体を記述する発展方程式が必要

# 暗黒物質と媒介粒子の連立時間発展方程式（ボルツマン方程式）

$$\frac{dn_d}{dt} + 3Hn_d = -\langle\sigma v\rangle_{dd\leftrightarrow mm} \left[ n_d^2 - (n_d^{eq})^2 \frac{n_m^2}{(n_m^{eq})^2} \right]$$

$$\begin{aligned} \frac{dn_m}{dt} + 3Hn_m = & -\langle\Gamma\rangle_{m\leftrightarrow\phi^\dagger\phi} [n_m - n_m^{eq}] \\ & - \langle\sigma v\rangle_{mm\leftrightarrow\phi^\dagger\phi} [n_m^2 - (n_m^{eq})^2] \\ & - \langle\sigma v\rangle_{mm\leftrightarrow dd} \left[ n_m^2 - (n_m^{eq})^2 \frac{n_d^2}{(n_d^{eq})^2} \right] \end{aligned}$$

■  $H$  : ハッブルパラメーター

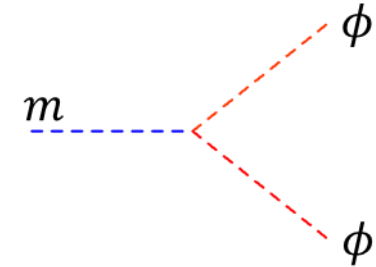
■  $\langle\sigma v\rangle$  : 熱平均断面積

■  $\langle\Gamma\rangle$  : 熱平均崩壊率

# 暗黒物質と媒介粒子の連立時間発展方程式（ボルツマン方程式）

$$\frac{dn_d}{dt} + 3Hn_d = -\langle\sigma v\rangle_{dd\leftrightarrow mm} \left[ n_d^2 - (n_d^{eq})^2 \frac{n_m^2}{(n_m^{eq})^2} \right]$$

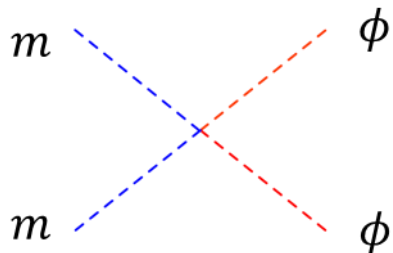
$$\begin{aligned} \frac{dn_m}{dt} + 3Hn_m = & -\langle\Gamma\rangle_{m\leftrightarrow\phi^\dagger\phi} [n_m - n_m^{eq}] \\ & -\langle\sigma v\rangle_{mm\leftrightarrow\phi^\dagger\phi} [n_m^2 - (n_m^{eq})^2] \\ & -\langle\sigma v\rangle_{mm\leftrightarrow dd} \left[ n_m^2 - (n_m^{eq})^2 \frac{n_d^2}{(n_d^{eq})^2} \right] \end{aligned}$$



崩壊により暗黒物質も減少  
 $\therefore \phi_d\phi_d \leftrightarrow \phi_m\phi_m$  が強いため

## 崩壊先・時期が重要

先行研究では考慮されていない



媒介粒子、延いては暗黒物質を熱化

同じ相互作用由来の  $\phi_m\phi \leftrightarrow \phi_m\phi$  により動力的熱化

動力的熱化が失われると  $T_d \neq T_m \neq T_{SM}$ 。時間発展に要修正。現在研究中。

# 暗黒物質と媒介粒子の連立時間発展方程式（ボルツマン方程式）

$$\frac{dn_d}{dt} + 3Hn_d = -\langle\sigma v\rangle_{dd\leftrightarrow mm} \left[ n_d^2 - (n_d^{eq})^2 \frac{n_m^2}{(n_m^{eq})^2} \right]$$

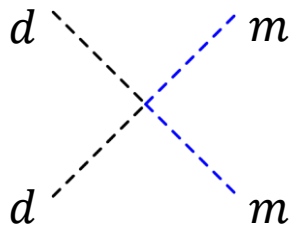
媒介粒子が平衡から外れると  
 $n_m/n_m^{eq} \neq 1$

$$\begin{aligned} \frac{dn_m}{dt} + 3Hn_m = & -\langle\Gamma\rangle_{m\leftrightarrow\phi^\dagger\phi} [n_m - n_m^{eq}] \\ & -\langle\sigma v\rangle_{mm\leftrightarrow\phi^\dagger\phi} [n_m^2 - (n_m^{eq})^2] \\ & -\langle\sigma v\rangle_{mm\leftrightarrow dd} \left[ n_m^2 - (n_m^{eq})^2 \frac{n_d^2}{(n_d^{eq})^2} \right] \end{aligned}$$

$n_m/n_m^{eq} \neq 1$  か否かは暗黒物質の時間発展に大きく影響

**媒介粒子が平衡から外れるか否か？また、その条件は？**

次頁で検討



暗黒物質はこの反応を介してのみ時間発展

この反応が凍結してはじめて残存量が決定される

先行研究ではこの反応と暗黒物質のボルツマン方程式のみで残存量計算

# 媒介粒子の寿命が残存量をコントロールする領域（結論）

## 媒介粒子が平衡系を維持するための条件

次ページで導出、後で数値的にもチェック

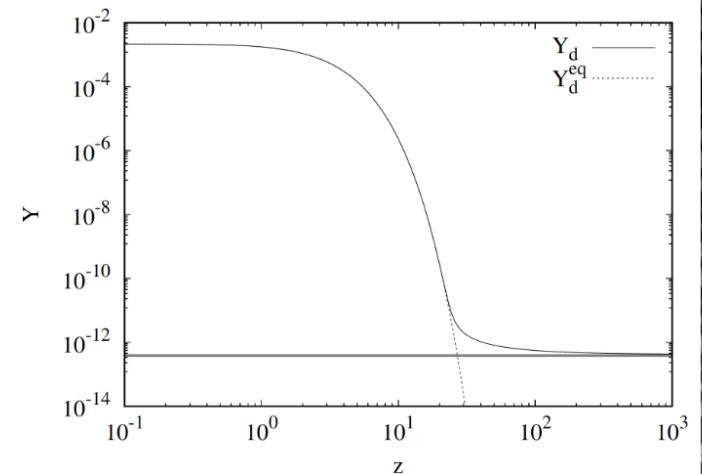
$$\frac{T}{m_m} \frac{\langle \Gamma \rangle_{m \leftrightarrow \phi^\dagger \phi}}{H} \simeq \left( \frac{g_{m\phi^\dagger\phi}}{10^{-7}} \right)^2 \left( \frac{106.75}{g_*} \right)^{1/2} \left( \frac{100 \text{ GeV}}{T} \right) \gg 1$$

$g_{m\phi^\dagger\phi} \gtrsim 10^{-7}$  : 媒介粒子が平衡から外れず

$\phi_m$ と $\phi_d$ が指数関数減少し ( $n_m = n_m^{eq} \sim e^{-m_m/T}$ )、  
 $\phi_d \phi_d \leftrightarrow \phi_m \phi_m$  が凍結した時点で残存量決定

つまり、お馴染みの熱的残存シナリオ

対消滅先がSM粒子から媒介粒子に変わっただけ



# 媒介粒子の寿命が残存量をコントロールする領域（結論）

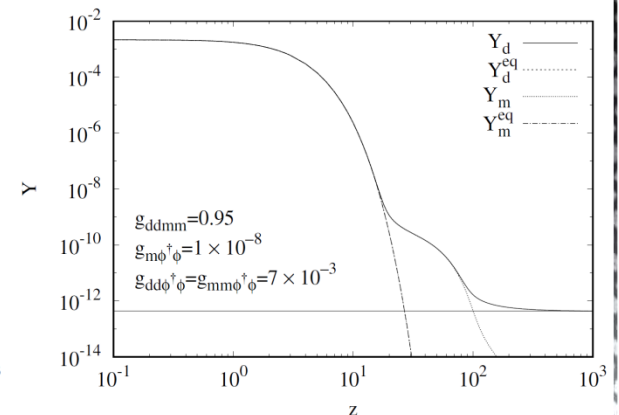
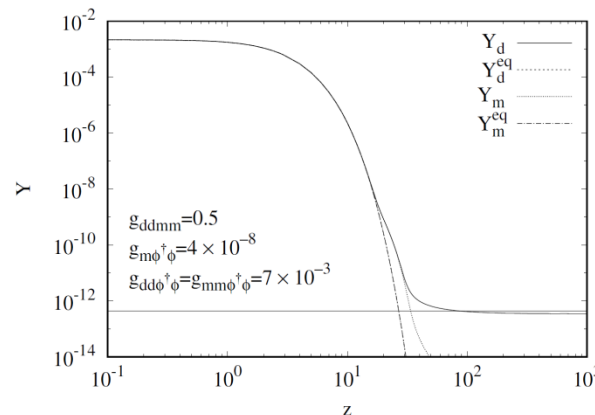
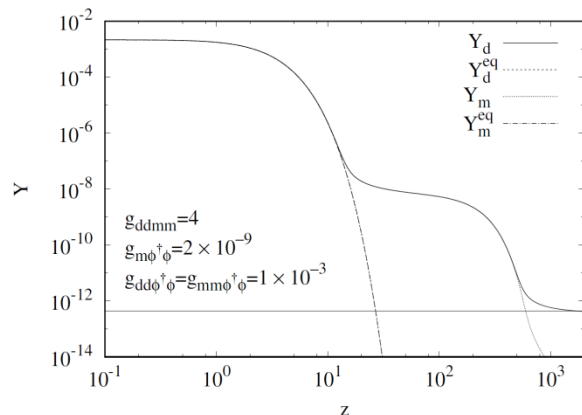
## 媒介粒子が平衡系を維持するための条件

次ページで導出、後で数値的にもチェック

$$\frac{T}{m_m} \frac{\langle \Gamma \rangle_{m \leftrightarrow \phi^\dagger \phi}}{H} \simeq \left( \frac{g_{m\phi^\dagger \phi}}{10^{-7}} \right)^2 \left( \frac{106.75}{g_*} \right)^{1/2} \left( \frac{100 \text{ GeV}}{T} \right) \gg 1$$

$g_{m\phi^\dagger \phi} \lesssim 10^{-7}$  : 媒介粒子が平衡から外れ( $n_m/n_m^{eq} \neq 1$ )、暗黒物質の時間発展に影響

**残存量計算の新たな機構：媒介粒子の寿命に応じ残存量が大きく変動**



# 媒介粒子の寿命が残存量をコントロールする領域（導出）

状況設定  $T < m_m$ では媒介粒子とSM粒子の反応は崩壊・逆崩壊のみ

$$T < m_m \text{で } \phi_m \phi_m \leftrightarrow \phi^\dagger \phi \text{ の反応率は指数的に抑圧: } \langle \sigma v \rangle n_m \propto T^{3/2} m_m^{-1/2} e^{-m_m/T}$$

$X_m = n_m R^3$  ( $R$ : スケールファクター)を導入し、ボルツマン方程式を書き直すと、

$$\frac{dX_m}{dt} = -\frac{1}{2} \langle \Gamma \rangle_{m \leftrightarrow \phi^\dagger \phi} (X_m - X_m^{eq})$$

ある時刻  $t_0$  で  $\phi_m$  が平衡から外れたとすると、 $t_0 + \Delta t$  では  $X_m = X_m^{eq} + C e^{-\langle \Gamma \rangle \Delta t / 2}$

以下の条件式が成り立つ限り、瞬く間に平衡系に戻る

$$\langle \Gamma \rangle_{m \leftrightarrow \phi^\dagger \phi} \Delta t \gg 1$$

# 媒介粒子の寿命が残存量をコントロールする領域（導出）

状況設定  $T < m_m$  では媒介粒子とSM粒子の反応は崩壊・逆崩壊のみ

$T < m_m$  で  $\phi_m \phi_m \leftrightarrow \phi^\dagger \phi$  の反応率は指数的に抑圧： $\langle \sigma v \rangle n_m \propto T^{3/2} m_m^{-1/2} e^{-m_m/T}$

$X_m = n_m R^3$  ( $R$ : スケールファクター)を導入し、ボルツマン方程式を書き直すと、

$$\frac{dX_m}{dt} = -\frac{1}{2} \langle \Gamma \rangle_{m \leftrightarrow \phi^\dagger \phi} (X_m - X_m^{eq})$$

ある時刻  $t_0$  で  $\phi_m$  が平衡から外れたとすると、 $t_0 + \Delta t$  では  $X_m = X_m^{eq} + C e^{-\langle \Gamma \rangle \Delta t / 2}$

以下の条件式が成り立つ限り、瞬く間に平衡系に戻る

$$\langle \Gamma \rangle_{m \leftrightarrow \phi^\dagger \phi} \Delta t \gg 1$$

このステップで用いた仮定： $\Delta t$  間に  $X_m^{eq}$  が一定

$\Delta t$  間に  $\Delta X_m^{eq} / X_m^{eq} \ll 1$  であれば仮定が正当化される


$$\frac{\Delta X_m^{eq}}{X_m^{eq}} \simeq -\frac{m_m}{T} \Delta t H \ll 1$$

# 媒介粒子の寿命が残存量をコントロールする領域（導出）

状況設定  $T < m_m$  では媒介粒子とSM粒子の反応は崩壊・逆崩壊のみ

$T < m_m$  で  $\phi_m \phi_m \leftrightarrow \phi^\dagger \phi$  の反応率は指数的に抑圧： $\langle \sigma v \rangle n_m \propto T^{3/2} m_m^{-1/2} e^{-m_m/T}$

$X_m = n_m R^3$  ( $R$ : スケールファクター)を導入し、ボルツマン方程式を書き直すと、

$$\frac{dX_m}{dt} = -\frac{1}{2} \langle \Gamma \rangle_{m \leftrightarrow \phi^\dagger \phi} (X_m - X_m^{eq})$$

ある時刻  $t_0$  で  $\phi_m$  が平衡から外れたとすると、 $t_0 + \Delta t$  では  $X_m = X_m^{eq} + C e$

以下の条件式が成り立つ限り、瞬く間に平衡系に戻る

$$\langle \Gamma \rangle_{m \leftrightarrow \phi^\dagger \phi} \Delta t \gg 1$$

このステップで用いた仮定： $\Delta t$  間に  $X_m^{eq}$  が一定

$\Delta t$  間に  $\Delta X_m^{eq} / X_m^{eq} \ll 1$  であれば仮定が正当化される

$$\Rightarrow \frac{\Delta X_m^{eq}}{X_m^{eq}} \simeq -\frac{m_m}{T} \Delta t H \ll 1$$

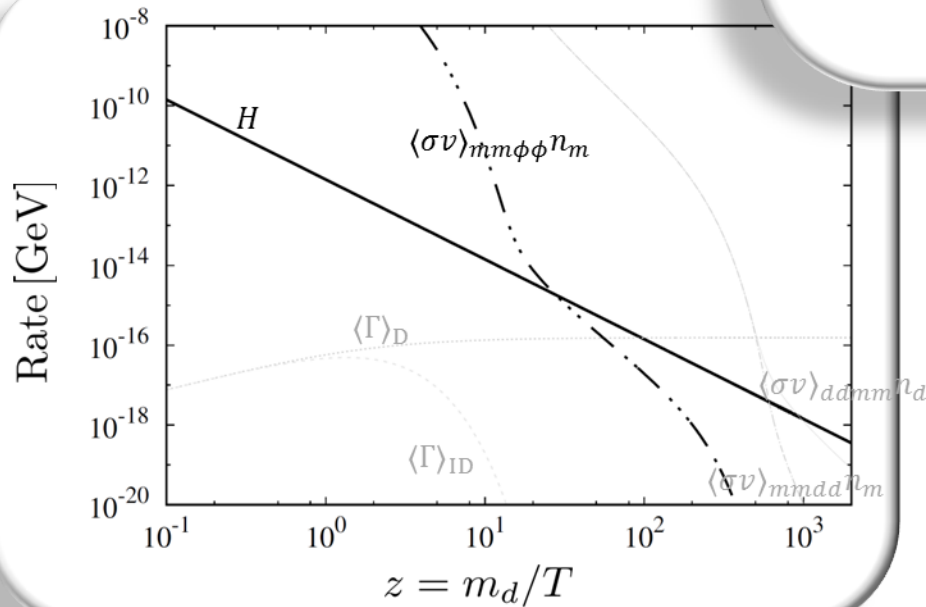
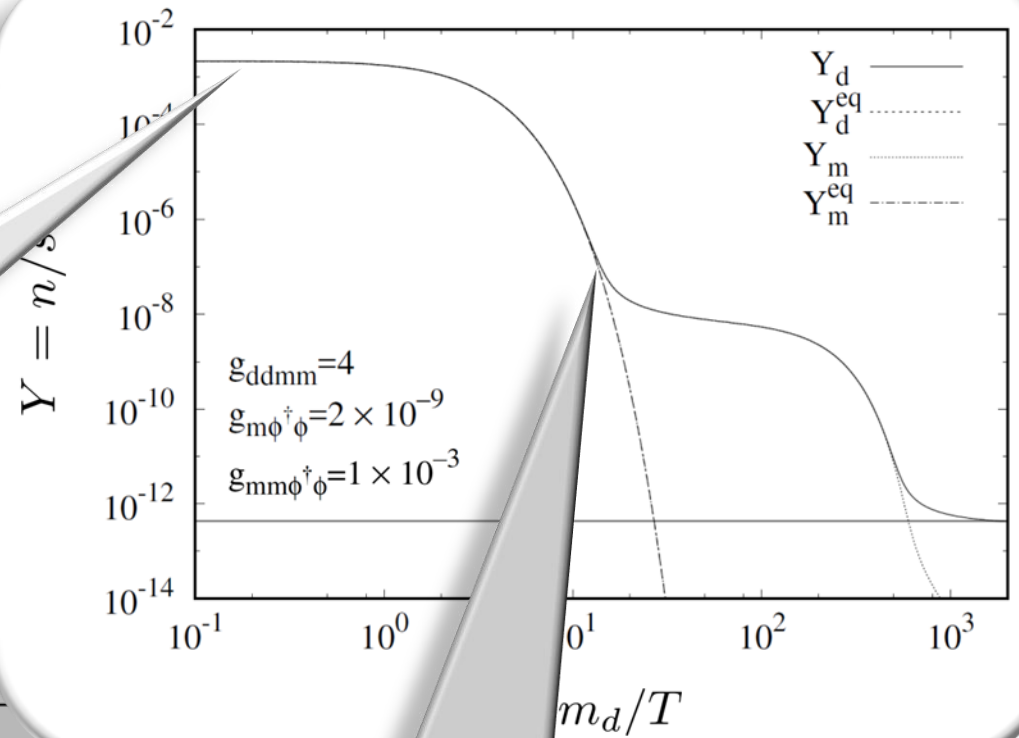
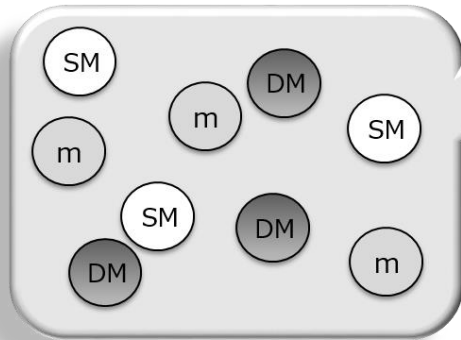
2つの条件式から  $\Delta t$  を消去

**平衡維持の条件式**  $\frac{T}{m_m} \frac{\langle \Gamma \rangle_{m \leftrightarrow \phi^\dagger \phi}}{H} \simeq \left( \frac{g_{m\phi^\dagger\phi}}{10^{-7}} \right)^2 \left( \frac{106.75}{g_*} \right)^{1/2} \left( \frac{100 \text{ GeV}}{T} \right) \gg 1$

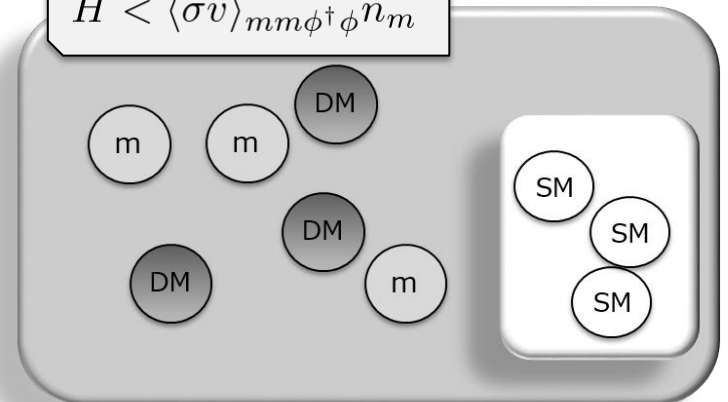
# 数値解析

- ☑ 暗黒物質の時間発展
- ☑ 残存量と媒介粒子寿命の関係

# Evolution : stage 1



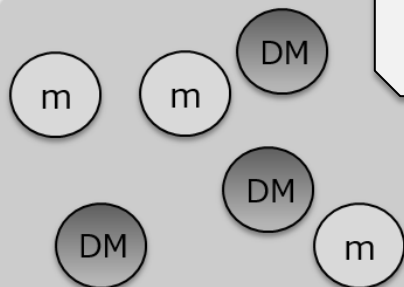
$$H < \langle \sigma v \rangle_{mm\phi^+\phi} n_m$$



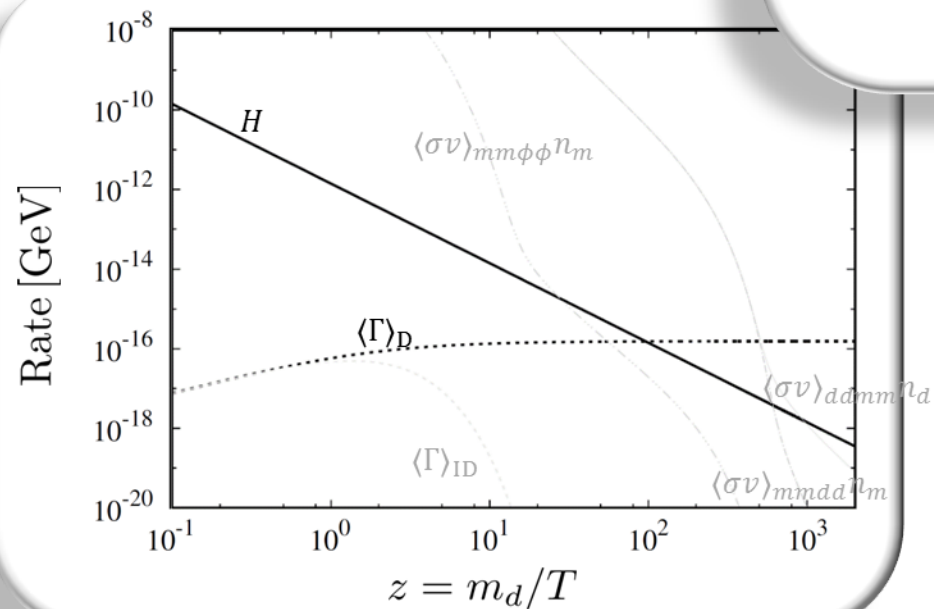
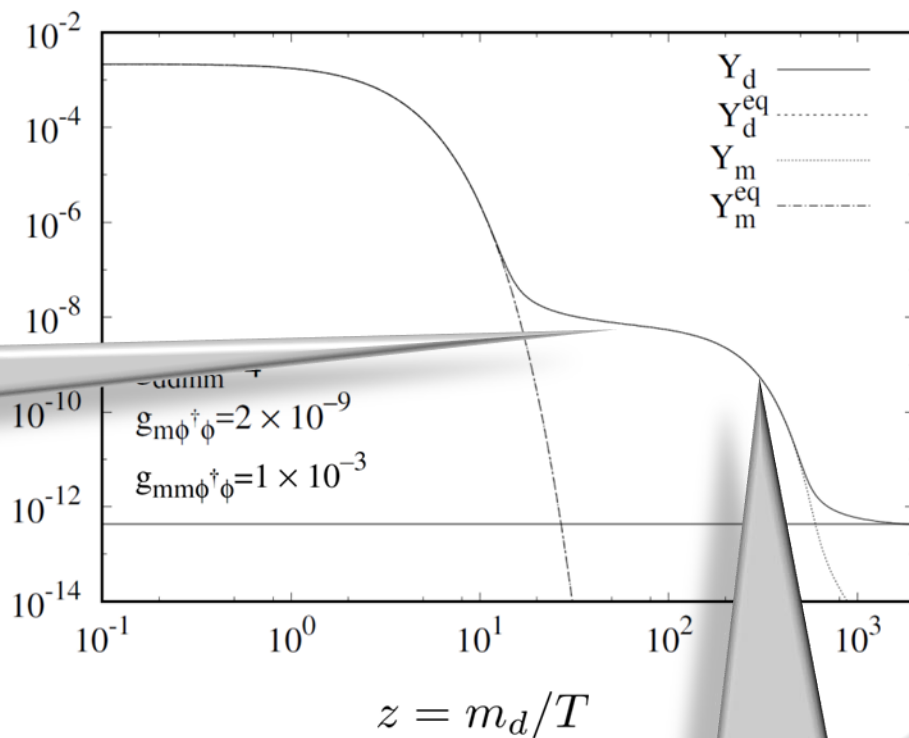
# Evolution : stage 2

$$H > \langle \Gamma \rangle_{m\phi\phi}$$

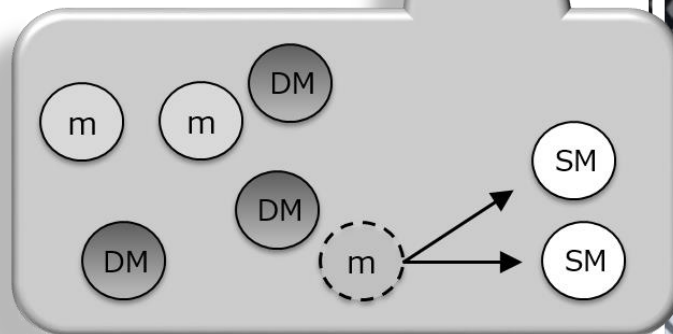
Fake freeze out



$$\Gamma = n/s$$



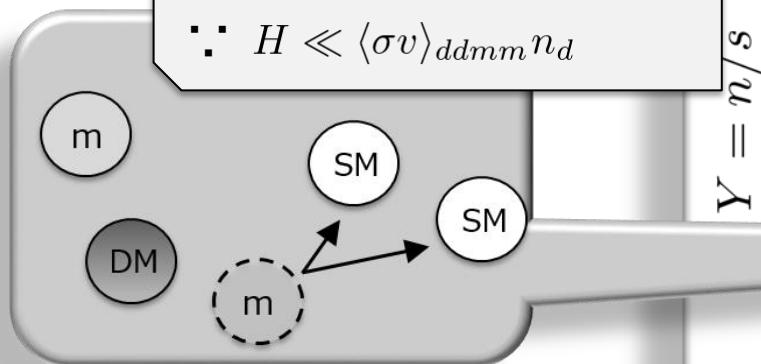
$$H < \langle \Gamma \rangle_{m\phi\phi}$$



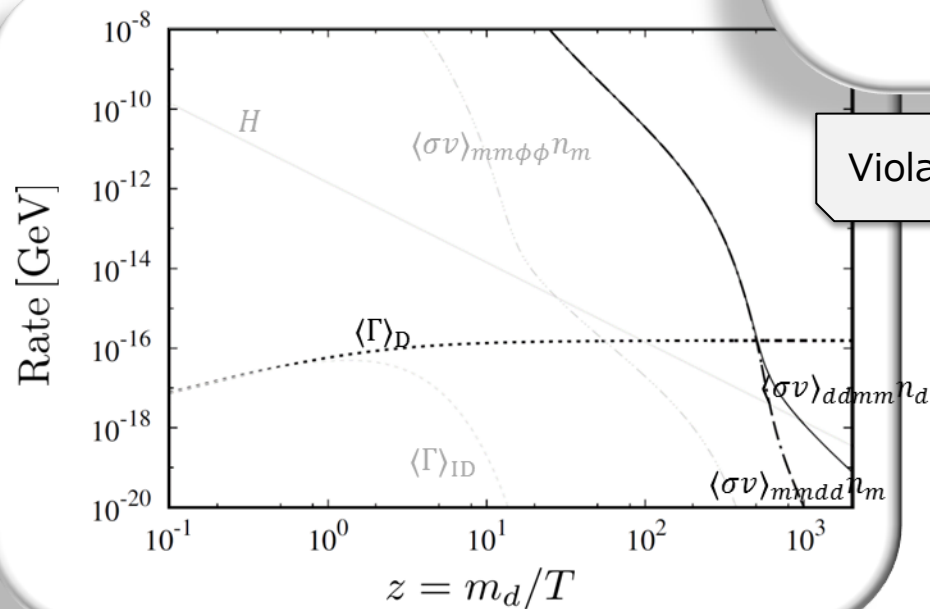
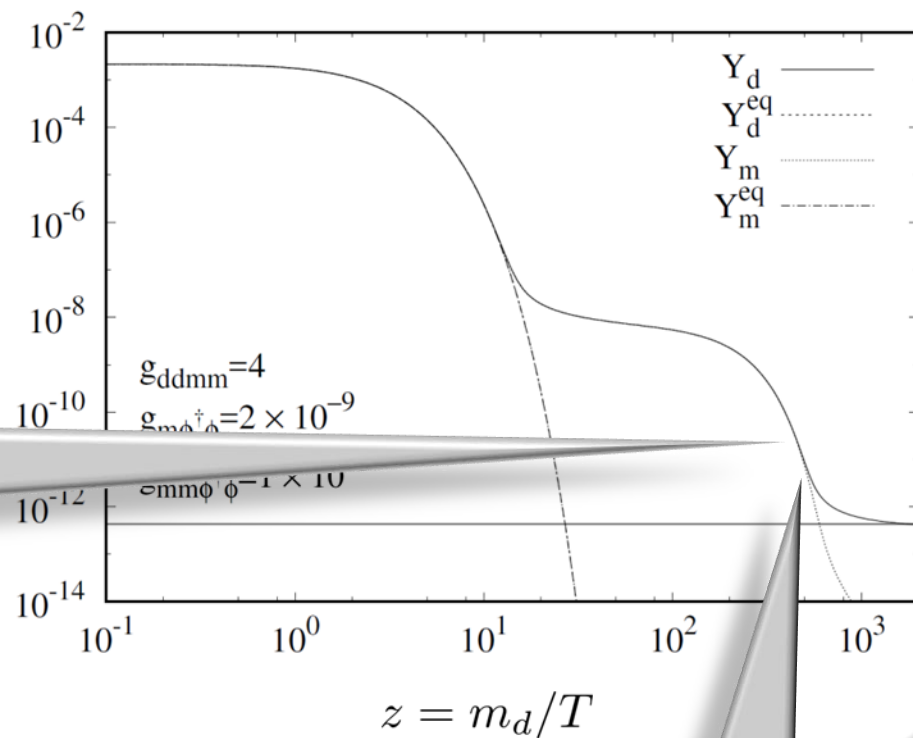
# Evolution : stage 3

$n_d$  traces  $n_m$  and decreases

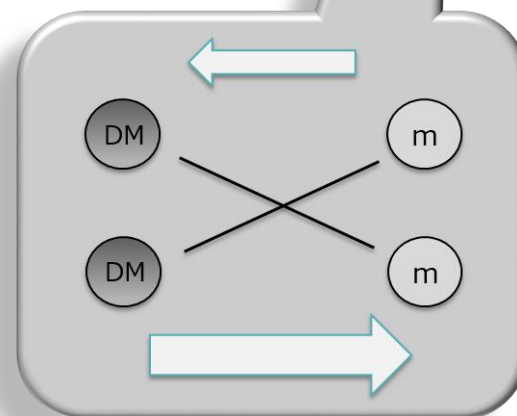
$$\because H \ll \langle \sigma v \rangle_{ddmm} n_d$$



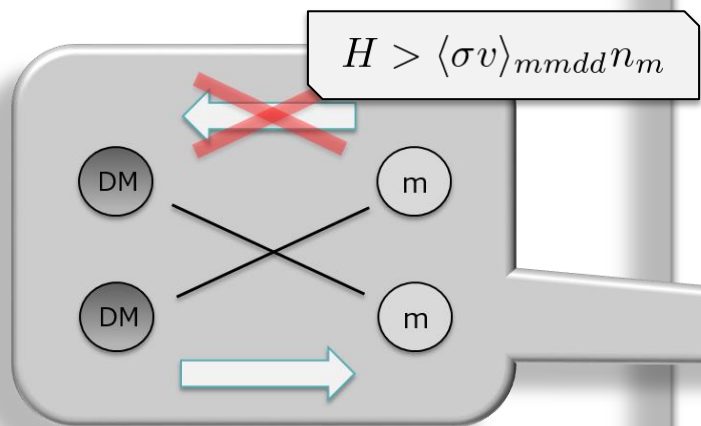
$$Y = n/s$$



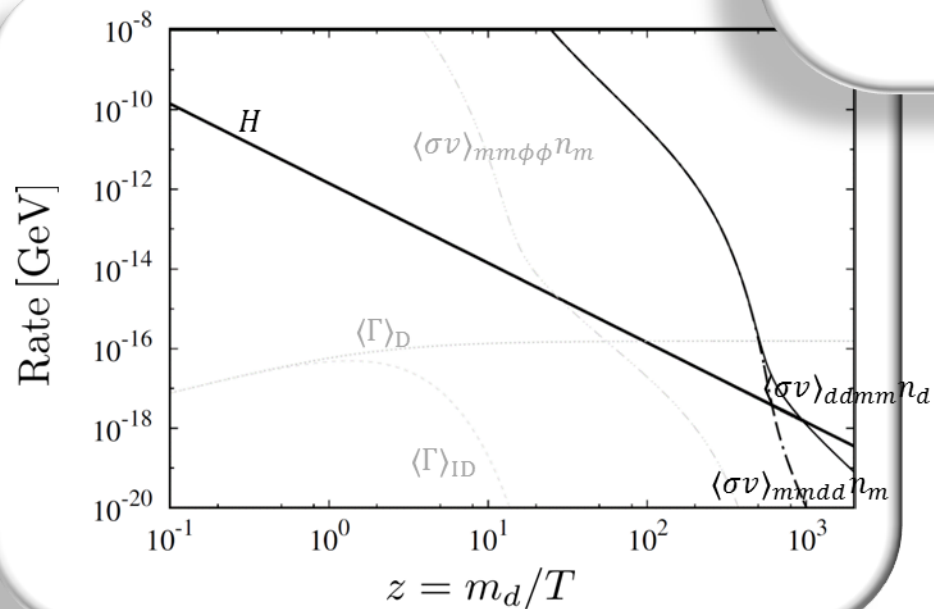
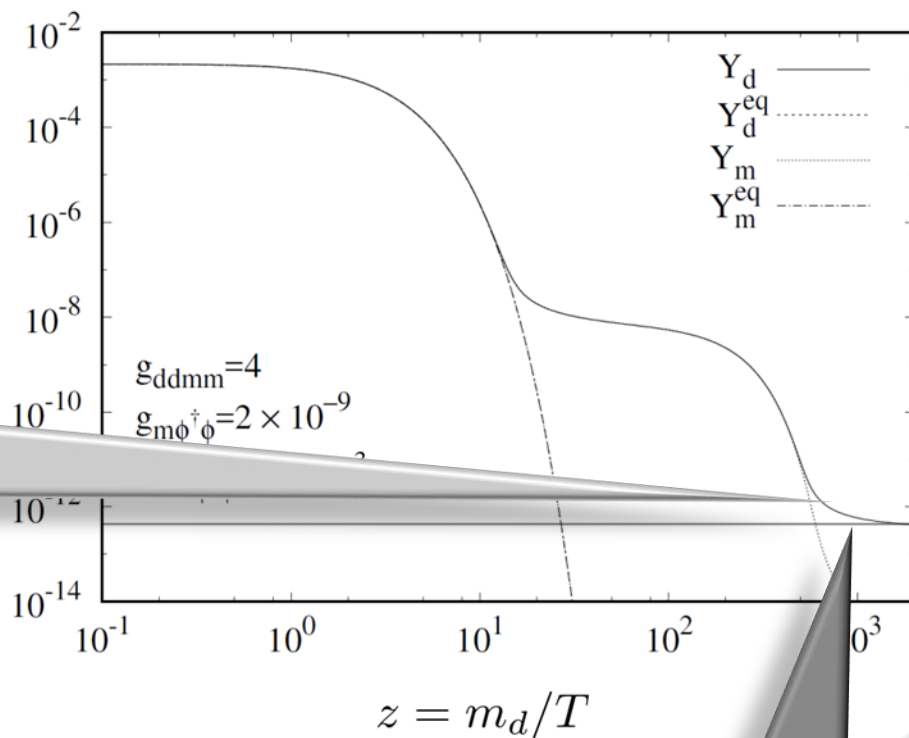
Violation of detailed balance due to  $\langle \Gamma \rangle > \langle \sigma v \rangle_{mmdd} n_m$



# Evolution : stage 4



$$Y = n/s$$



True freeze out



# 残存量に対する寿命依存性、及び、 $Y_m/Y_m^{eq} \neq 1$ の影響

$g_{m\phi\phi} \gtrsim 10^{-7}$ の場合

残存量は媒介粒子の寿命に依存せず

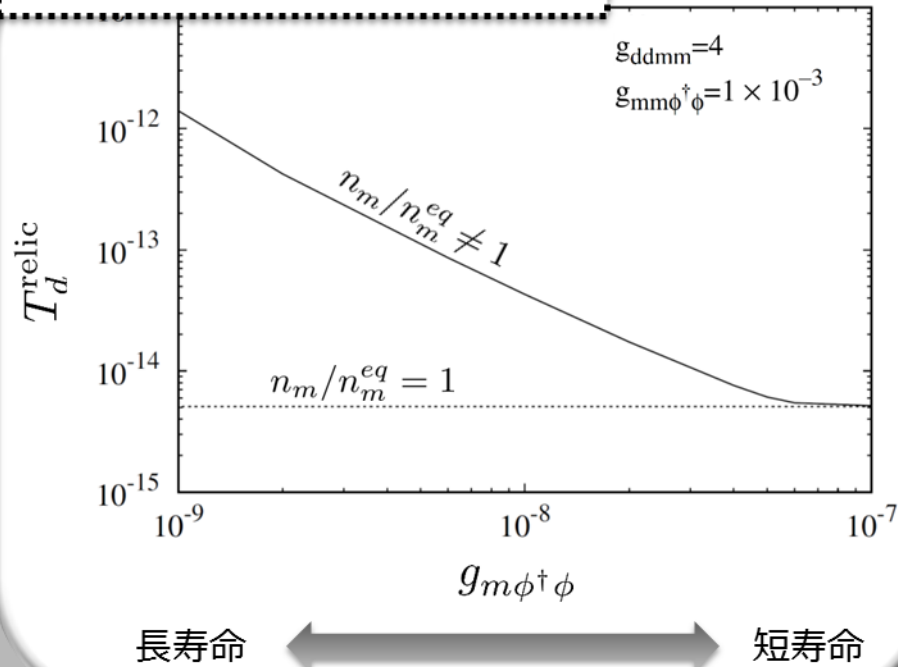
$\phi_m \leftrightarrow \phi\phi$  の詳細釣り合いにより媒介粒子は  
平衡を維持：  $n_m = n_m^{eq}$

暗黒物質は媒介粒子と無関係に時間発展

$$\frac{dn_d}{dt} + 3Hn_d = -\langle\sigma v\rangle_{dd\leftrightarrow mm} \left[ n_d^2 - (n_d^{eq})^2 \frac{n_m^2}{(n_m^{eq})^2} \right]$$

.....  
=1

残存量に対する媒介粒子の寿命依存性



# 残存量に対する寿命依存性、及び、 $Y_m/Y_m^{eq} \neq 1$ の影響

$g_{m\phi\phi} \lesssim 10^{-7}$ の場合

残存量は媒介粒子の寿命に大きく依存

1.  $n_m/n_m^{eq} \neq 1$  により暗黒物質の時間発展にfake freeze-outをもたらす

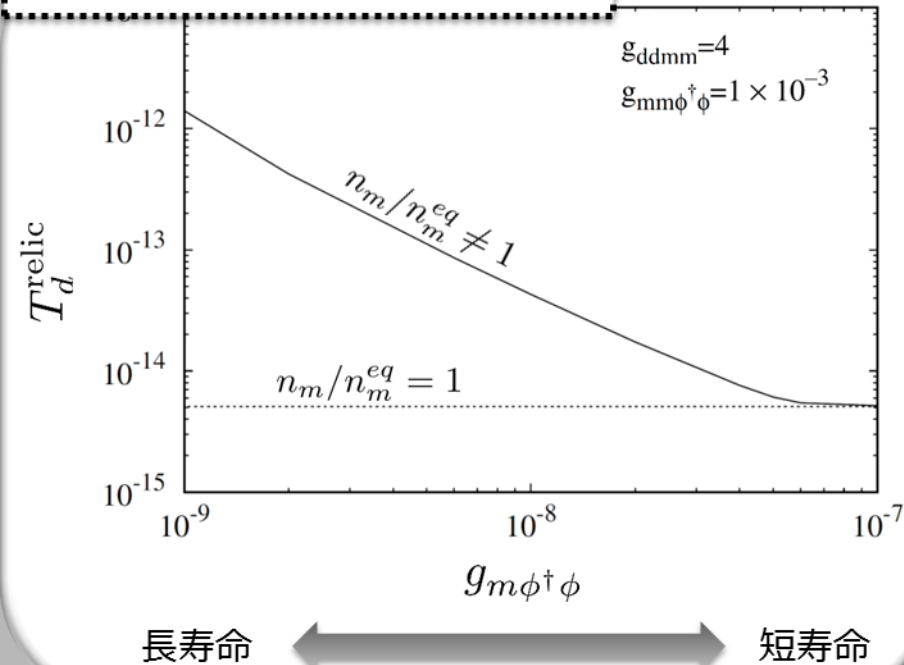
2.  $H < \langle \Gamma \rangle_{m \rightarrow \phi^\dagger \phi}$  となった途端、媒介粒子の数密度は急減少  
逆崩壊が間に合わないため

釣り合っていた反応を急速に一方通行化



暗黒物質数密度の凍結が加速

残存量に対する媒介粒子の寿命依存性



# 縮退した暗黒物質-媒介粒子系における残存量

## 先行研究

- ・ 媒介粒子は暗黒物質密度の凍結後崩壊
- ・ 縮退した系で残存量不整合 (実線)

## 本研究

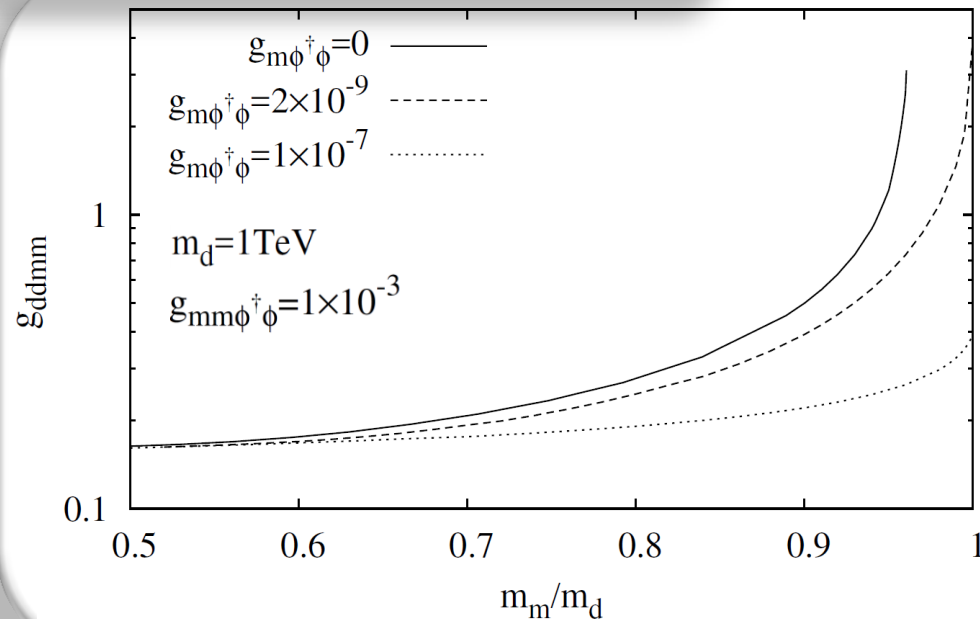
- ・ 媒介粒子の寿命で残存量をコントロール
- ・ 縮退した系でも残存量観測値を再現

観測的制限・要請を満たし、かつ、媒介粒子と統一的枠組みで記述されるTeVスケール模型にとって希望の機構

残存量観測値を示す等高線図

横軸：暗黒物質と媒介粒子の質量比

縦軸：暗黒物質と媒介粒子の結合定数



まとめ

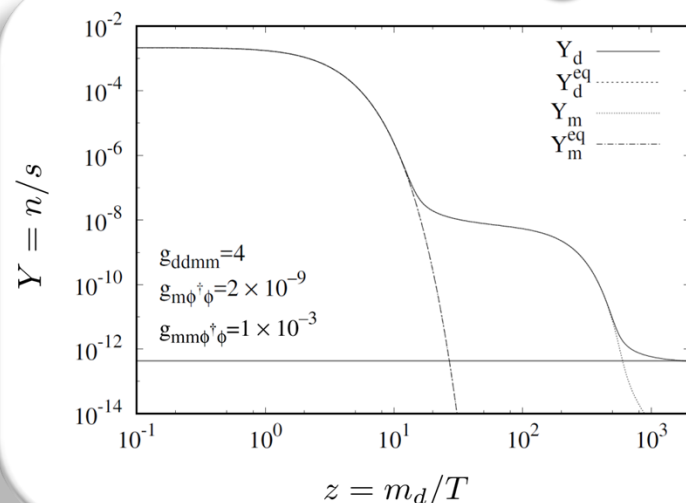
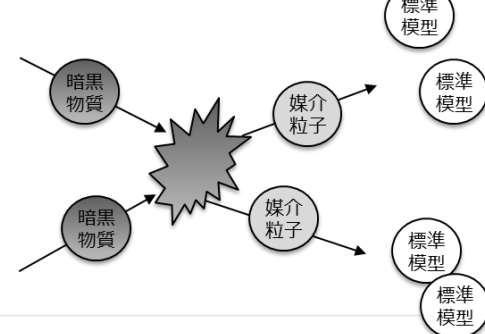
# まとめ

- ☑ 観測事実・実験制限を基に、SMとの繋がりが微弱な暗黒物質シナリオが数々提唱され、盛んに研究されている
- ☑ 素朴に考えれば、新物理のスケールは $O(\text{TeV})$ 以上、かつ、新粒子（＝媒介粒子）は互いに近いスケール

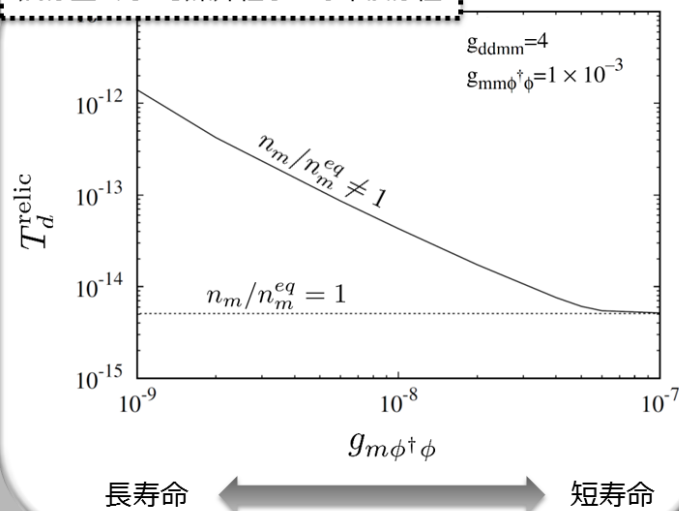
模型の実験検証をまともな精度で行うため、パラメーターを精確に弾き出す残存量計算を！

- ☑ 暗黒物質 $\phi_d$  + 媒介粒子 $\phi_m$ を導入し、媒介粒子の質量・寿命を考慮しながら残存量計算を定式化
- ☑ **残存量計算の新たな機構：媒介粒子がある程度長寿命の場合、崩壊率・崩壊先が残存量に大きく影響**
- ☑ 新粒子同士が縮退した模型でも残存量説明可能に

より詳しい解析や具体的模型は論文にて



残存量に対する媒介粒子の寿命依存性



南部陽一郎物理学研究所

# 素粒子現象論研究会 2019

日程： 11月23日（土）～25日（月）

会場： 大阪市立大学

主題： 場の理論、現象論に関わる物理全般（理論、実験問わず）

非摂動計算による現象論、有限温度の場の理論、模型構築、  
素粒子論的宇宙論、天文学、加速器現象論、フレーバー現象論、などなど

招待講演：理論・実験の専門家を招待

林井 久樹さん（奈良女）

北口 雅暁さん（名大）

清 裕一郎さん（順天堂大）

村瀬 孔大さん（ペンシルバニア大）

尾田 欣也さん（阪大）

関口 豊和さん（KEK）

軽い新粒子の探索実験

中性子精密探査

トップクォークの物理

ニュートリノ天文学

波束効果を含めた場の理論

軽い新粒子の宇宙論

口頭講演枠に余裕あり。ゲストハウス、旅費補助あり。

Thank you very much!

Backup slides

# ダークセクター温度は標準模型セクターと同じ？

