## 暗黑物質理論

Koichi Hamaguchi (University of Tokyo)

ダークマターの懇談会2019

@Waseda Univ., 2019.07.05





- ・「暗黒物質理論」というタイトルで講演してほしい.
- ・数名の理論屋に同じお題で準備してもらう予定.(内容がかぶったらそれはそれで重要であると).
- ・無茶な企画だが、頼む、

DM理論+議論		
座長:山下		
13:10 13:40 30"	暗黒物質理論	白井智(IPMU)
13:40 14:10 30"	暗黒物質理論	濱口幸一(東大)
14:10 14:40 30"	面白くて大事な熱的暗黒物質候補達	松本重貴(IPMU)
14:40 15:10 30"	AXION-DM理論	高橋史宜(東北大)

先日たまたまこの3人が 顔を合わせたがみんな 一 この研究会の話題は 避けていた。

(松本さんはタイトルビミョーに変えたらしい?)

#### このトークの目標

・いくつかのDM候補たちの簡単なレビュー

・中性子星とWIMP DMの研究の紹介

based on K.Yanagi, N.Nagata, KH, 1904.04667, 1905.02991.

#### このトークの目標

・いくつかのDM候補たちの簡単なレビュー

・中性子星とWIMP DMの研究の紹介

based on K.Yanagi, N.Nagata, KH, 1904.04667, 1905.02991.



#### Koichi Hamaguchi

@HamaguchiKoichi

暗黒物質の正体は何だと思いますか? (投票数が100を超えたら明日の研究会のトークで紹介しようと思います。)

- WIMP
- Axion
- O PBH
- それ以外/閲覧用

投票

151票・残り20時間



#### Koichi Hamaguchi

@HamaguchiKoichi

暗黒物質の正体は何だと思いますか? (投票数が100を超えたら明日の研究会のトークで紹介しようと思います。)

- WIMP
- Axion
- PBH
- それ以外/閲覧用

投票

151票・残り20時間





#### Koichi Hamaguchi

@HamaguchiKoichi

暗黒物質の正体は何だと思いますか? (投票数が100を超えたら明日の研究会のトークで紹介しようと思います。)

- WIMP
- Axion
- PBH
- それ以外/閲覧用

投重

151票・残り20時間



暗黒物質の正体は何だと思いますか? (投票数が100を超えたら明日の研究会の トークで紹介しようと思います。)

WIMP 20%

Axion 18%

PBH 6%

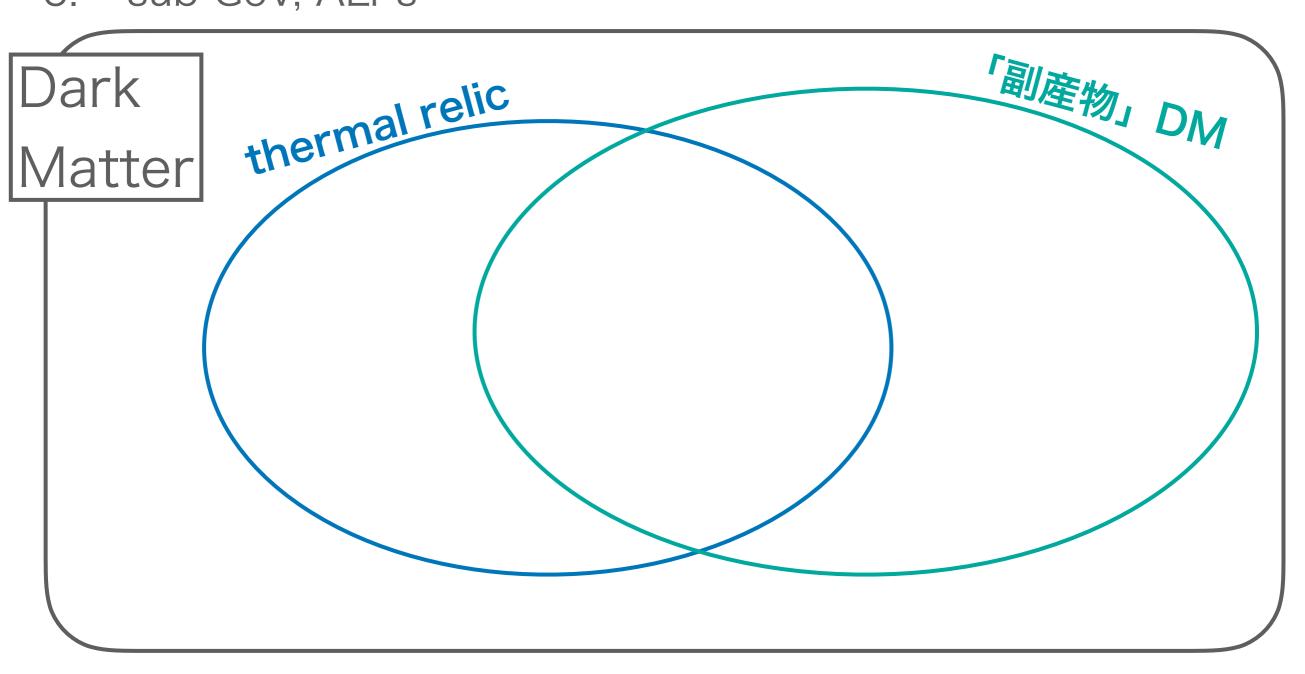
56%

それ以外/閲覧用

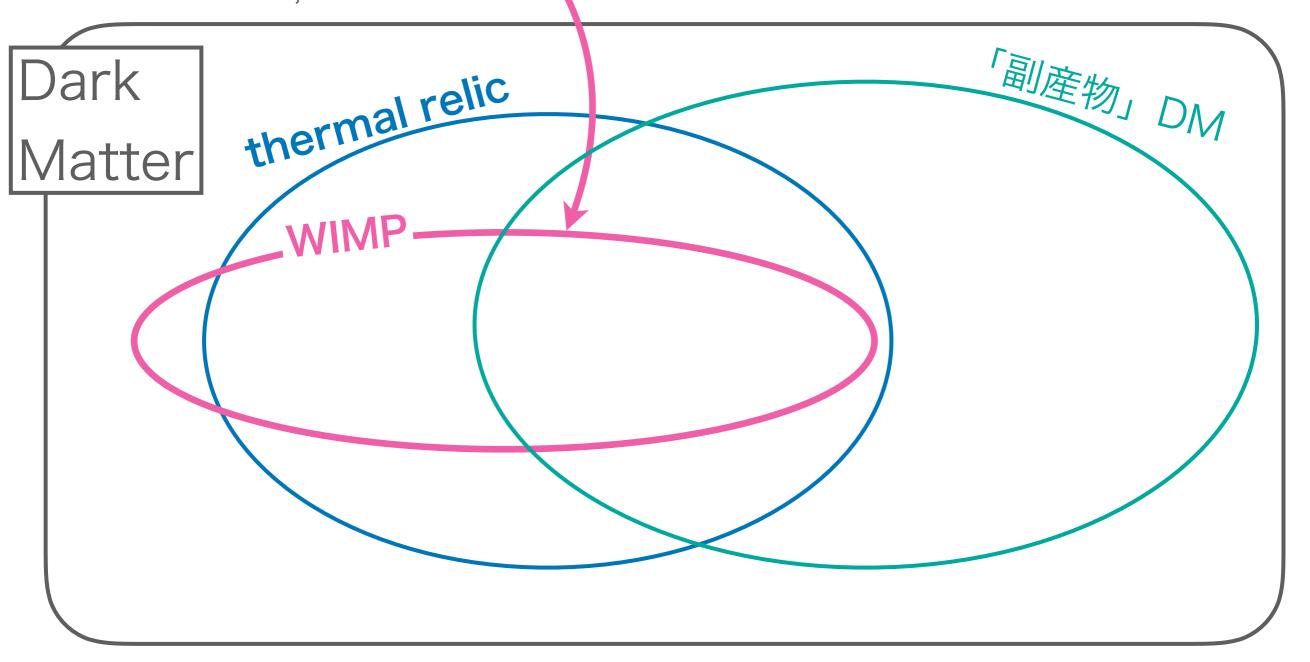
461票·最終結果

- 1. WIMP
- 2. axion
- 3. gravitino/axino
- 4. ADM, PBH
- 5. sub-GeV, ALPs

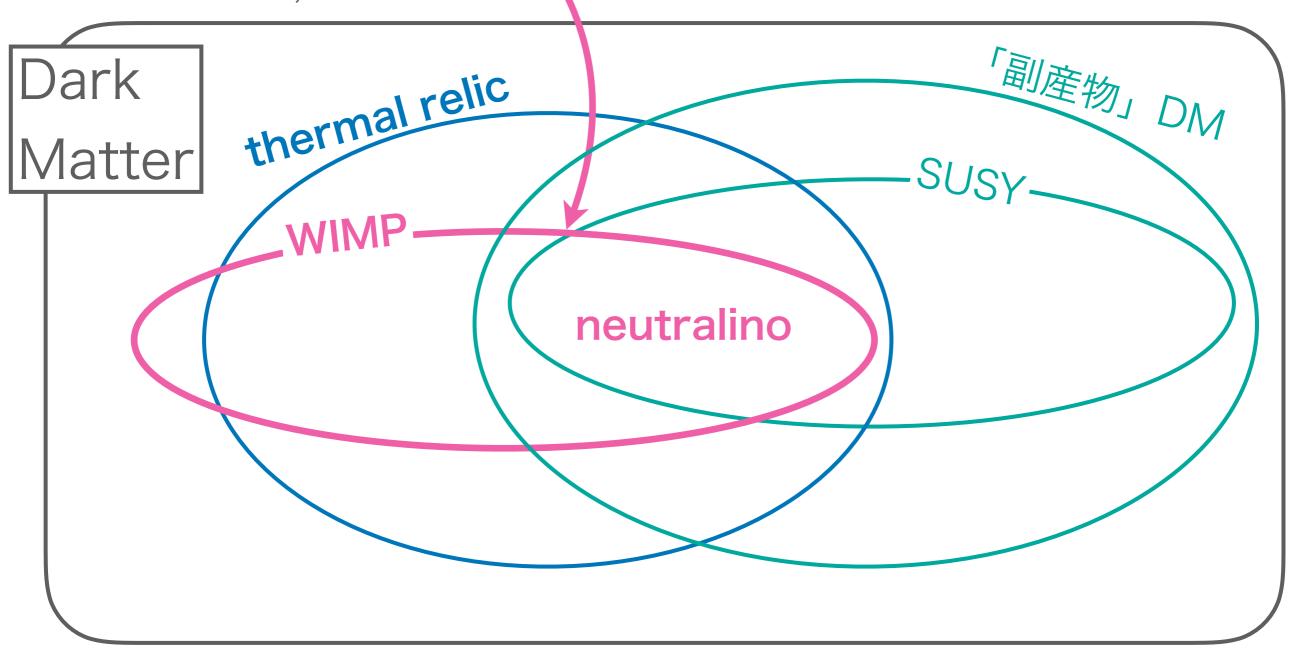
- 1. WIMP
- 2. axion
- 3. gravitino/axino
- 4. ADM, PBH
- 5. sub-GeV, ALPs



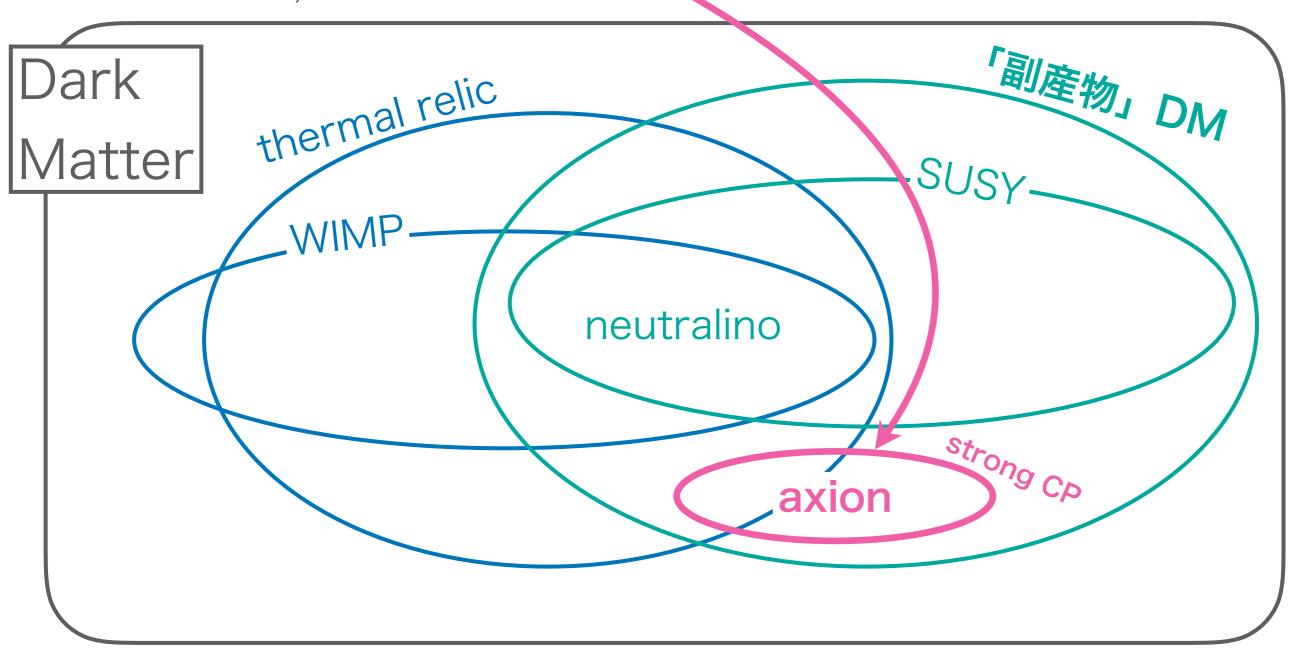
- 1. WIMP.
- 2. axion
- 3. gravitino/axino
- 4. ADM, PBH
- 5. sub-GeV, ALPs



- 1. WIMP~
- 2. axion
- 3. gravitino/axino
- 4. ADM, PBH
- 5. sub-GeV, ALPs

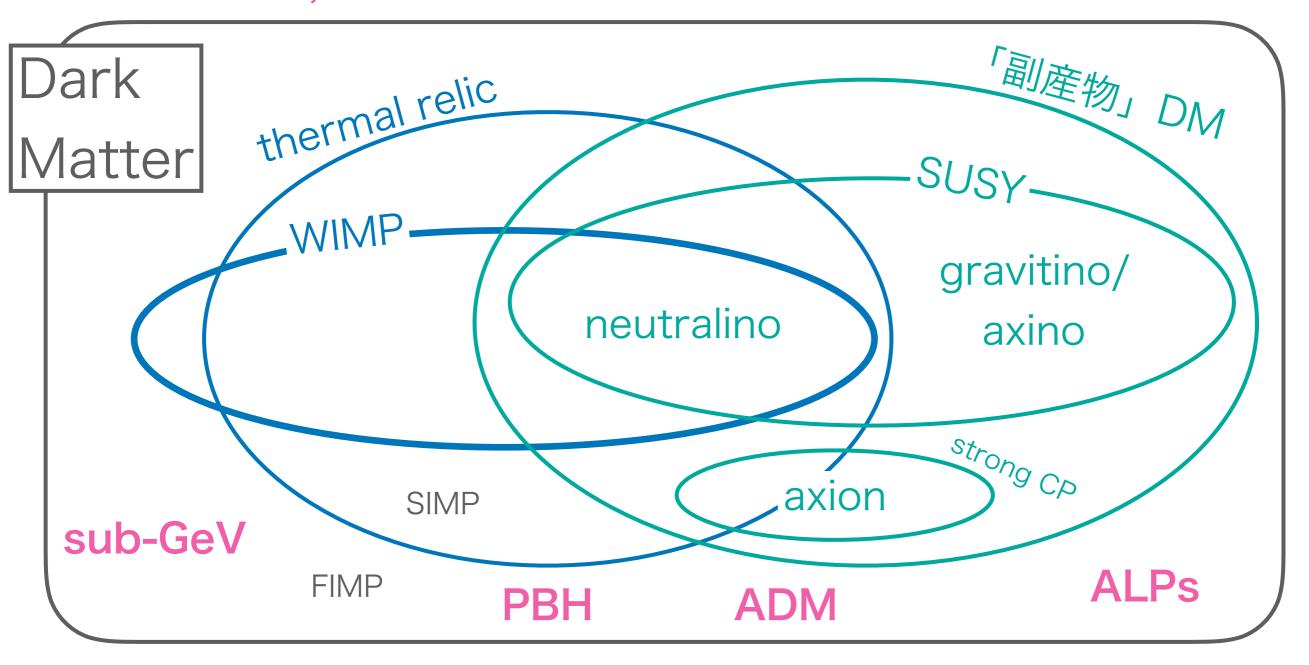


- 1. WIMP
- 2. axion <
- 3. gravitino/axino
- 4. ADM, PBH
- 5. sub-GeV, ALPs

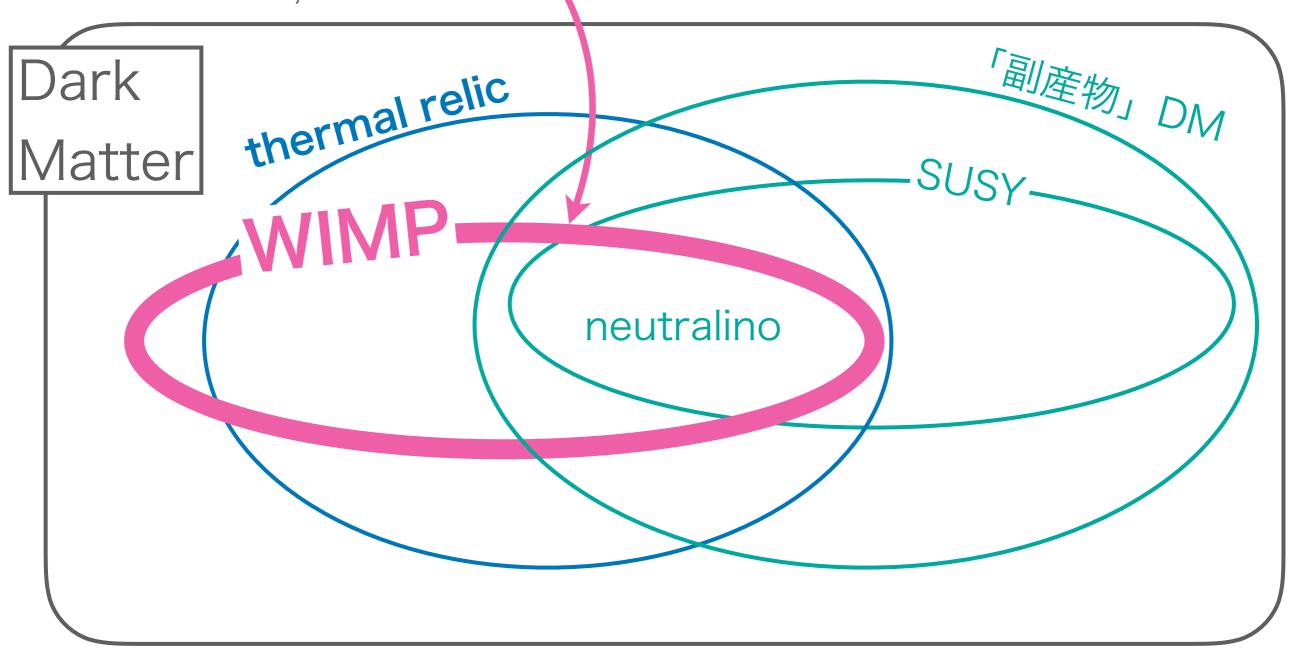


#### 個人的な DM ランキング (2019 ver.) WIMP 2. axion 3. gravitino/axino 4. ADM, PBH 5. sub-GeV, ALPs 「副産物」DM Dark thermal relic SUSY Matter WIMP gravitino/ neutralino axino Strong Cp axion

- 1. WIMP
- 2. axion
- 3. gravitino/axino
- 4. ADM, PBH
- 5. sub-GeV, ALPs



- 1. WIMP.
- 2. axion
- 3. gravitino/axino
- 4. ADM, PBH
- 5. sub-GeV, ALPs



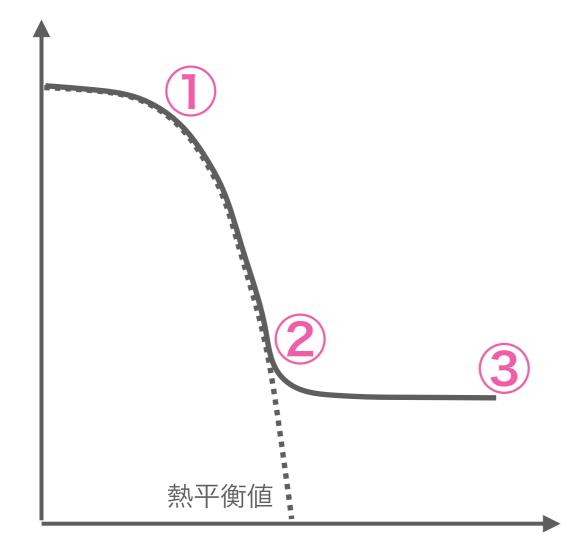
#### 1. WIMP (= Weakly-Interacting Massive Particle)

- ▶電荷ゼロ、カラーもなし。
- ▶安定。
- ▶ だいたい weak scale mass,  $\mathcal{O}(10 \text{ GeV}) \mathcal{O}(1 \text{ TeV})$ .
- ▶ だいたい weak interaction くらいの相互作用。

- 1. WIMP (= Weakly-Interacting Massive Particle)
- ▶ WIMP 最大の魅力 = シンプルな生成機構, thermal relic シナリオ.

**熱平衡から外れる**あとは宇宙膨張に従うだけ

DMの数 (comoving)



$$\Omega_{\rm DM} \sim 0.1 \left( \frac{1 \text{ pb}}{\langle \sigma_{\rm annihilation} v \rangle} \right)$$

weak scale mass, weak scale interaction でちょうど良い。"WIMP miracle"

1. WIMP (= Weakly-Interacting Massive Particle)

▶ WIMP 最大の魅力 = シンプルな生成機構, thermal relic シナリオ.

① 熱かった → ② 冷えた → ③ 今に至る

他の粒子たちと熱平衡

熱平衡から外れる

あとは宇宙膨張に従うだけ

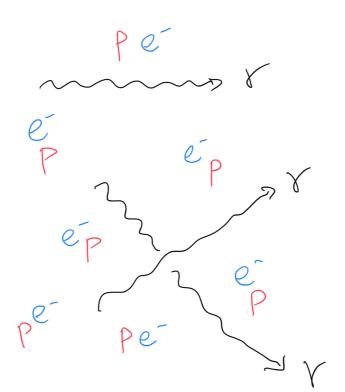
- 1. WIMP (= Weakly-Interacting Massive Particle)
- ▶ WIMP 最大の魅力 = シンプルな生成機構, thermal relic シナリオ.
  - ① 熱かった → ② 冷えた → ③ 今に至る

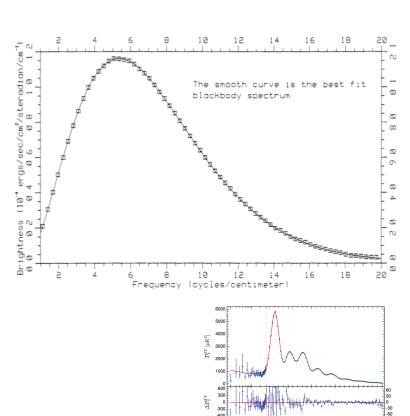
熱平衡から外れる

あとは宇宙膨張に従うだけ

#### 例1:CMB

①  $T > 3000 \text{ K} \rightarrow ② T \sim 3000 \text{ K} \rightarrow ③ 2.7 \text{K CMB}$ 





- 1. WIMP (= Weakly-Interacting Massive Particle)
- ▶ WIMP 最大の魅力 = シンプルな生成機構, thermal relic シナリオ.
  - ① 熱かった → ② 冷えた → ③ 今に至る

熱平衡から外れる

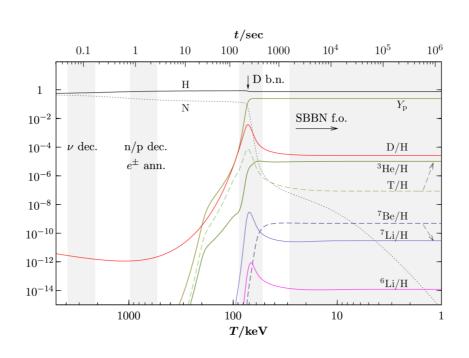
あとは宇宙膨張に従うだけ

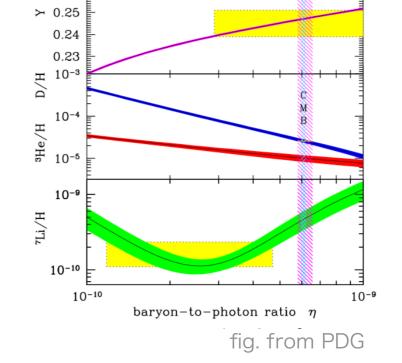
0.27

#### 例2:BBN

①  $T \gg 1 \text{ MeV} \rightarrow ② T \sim 1 \text{ MeV} \rightarrow ③ 現在$ 

 $\begin{array}{cccc}
 & P & n \\
 & P & n & P \\
 & N & P & n \\
 & P & P & n \\
 & + O(10^{10}) \times (e^{\pm}, r, \nu)
\end{array}$ 





baryon density  $\Omega_b h^2$   $10^{-2}$ 

fig. from 1011.1054

- 1. WIMP (= Weakly-Interacting Massive Particle)
- ▶ WIMP 最大の魅力 = シンプルな生成機構, thermal relic シナリオ.
  - ① 熱かった → ② 冷えた → ③ 今に至る

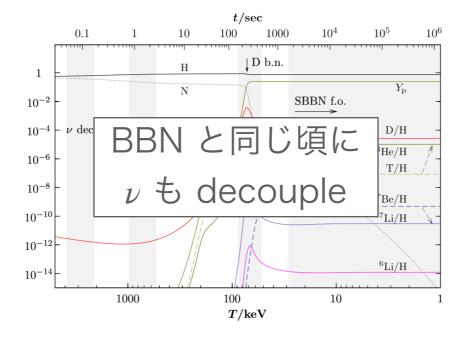
熱平衡から外れる

あとは宇宙膨張に従うだけ

例3:C<sub>ν</sub>B

①  $T \gg 1 \text{ MeV} \rightarrow ② T \sim 1 \text{ MeV} \rightarrow ③ 現在$ 

 $\begin{array}{cccc}
 & P & n & P \\
 & P & n & P \\
 & P & P & n \\
 & P & P & n \\
 & + O(10^{10}) \times (e^{\pm}, Y, U)
\end{array}$ 

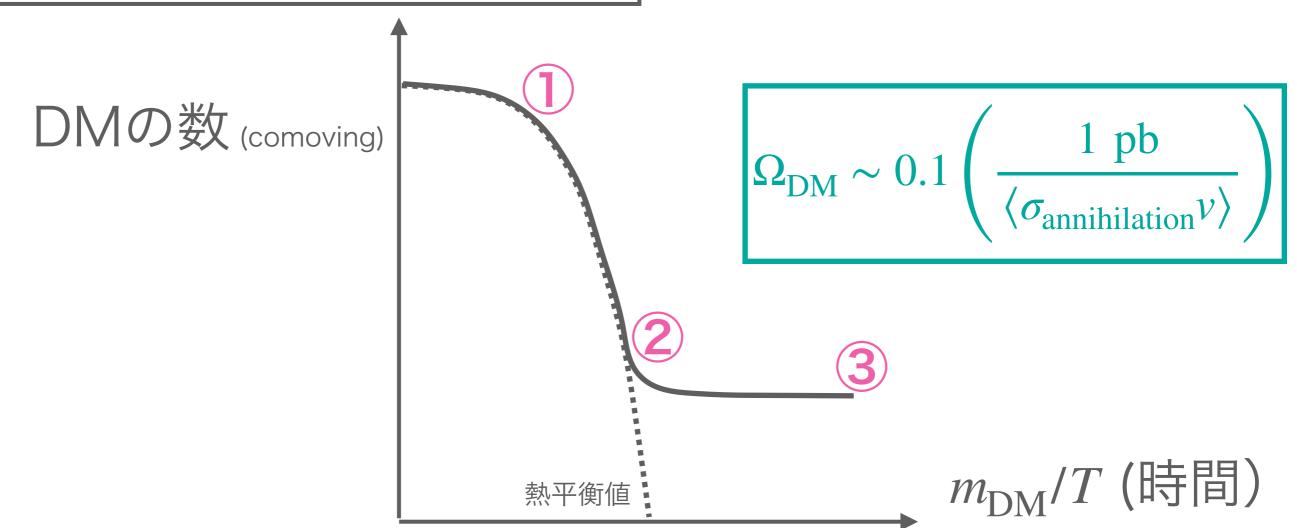


 $1.9 \text{ K } \text{ O } \text{ C}_{\nu}\text{B}$  がいるはず。 いつか観測出来るかも?

- 1. WIMP (= Weakly-Interacting Massive Particle)
- ▶ WIMP 最大の魅力 = シンプルな生成機構, thermal relic シナリオ.
  - <u>熱かった</u> → ② <u>冷えた</u> → ③ <u>今に至る</u>

熱平衡から外れる あとは宇宙膨張に従うだけ

#### 例4になるか?: WIMP DM!!!

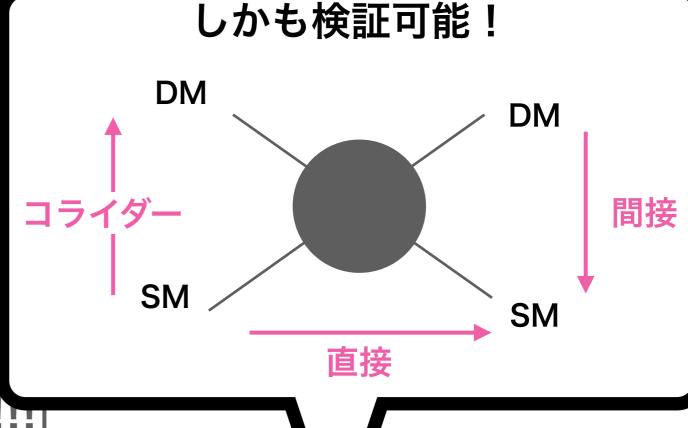




▶ WIMP 最大の魅力 = シンプルな

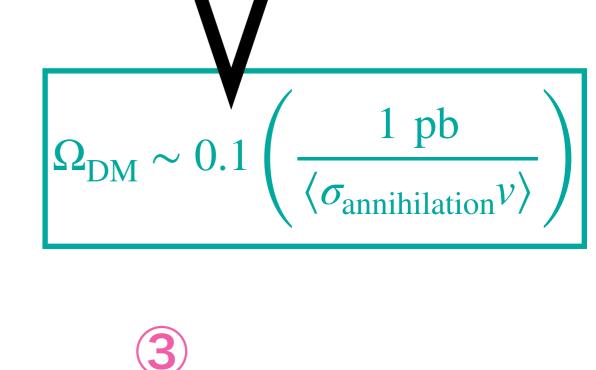
#### ① <u>熱かった</u> → ②

他の粒子たちと熱平衡



### 例4になるか?: WIMP DM

DMの数 (comoving)

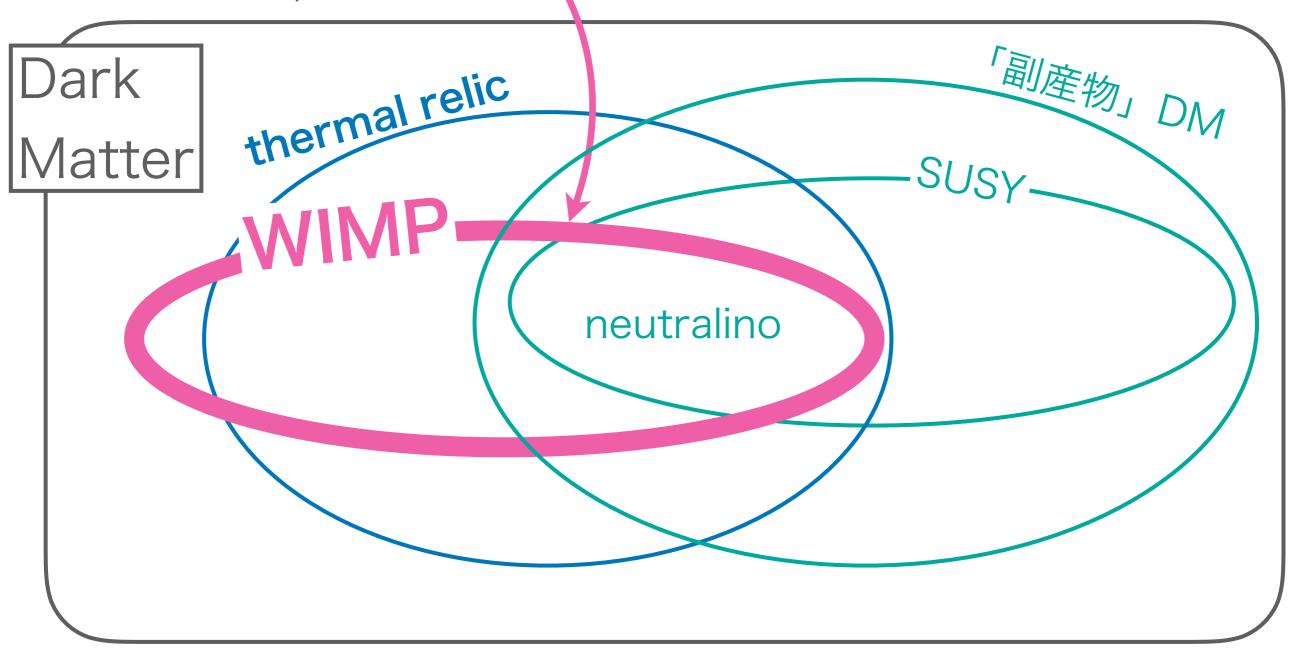


熱平衡値

 $m_{\rm DM}/T$  (時間)

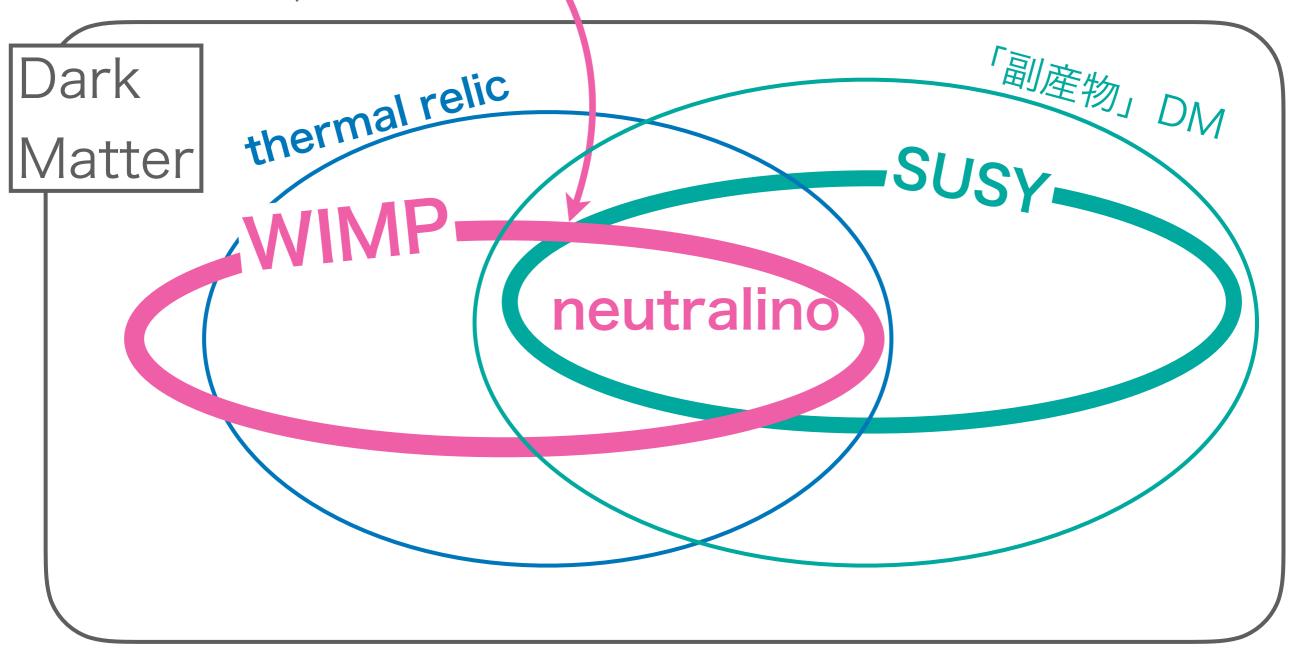


- 2. axion
- 3. gravitino/axino
- 4. ADM, PBH
- 5. sub-GeV, ALPs



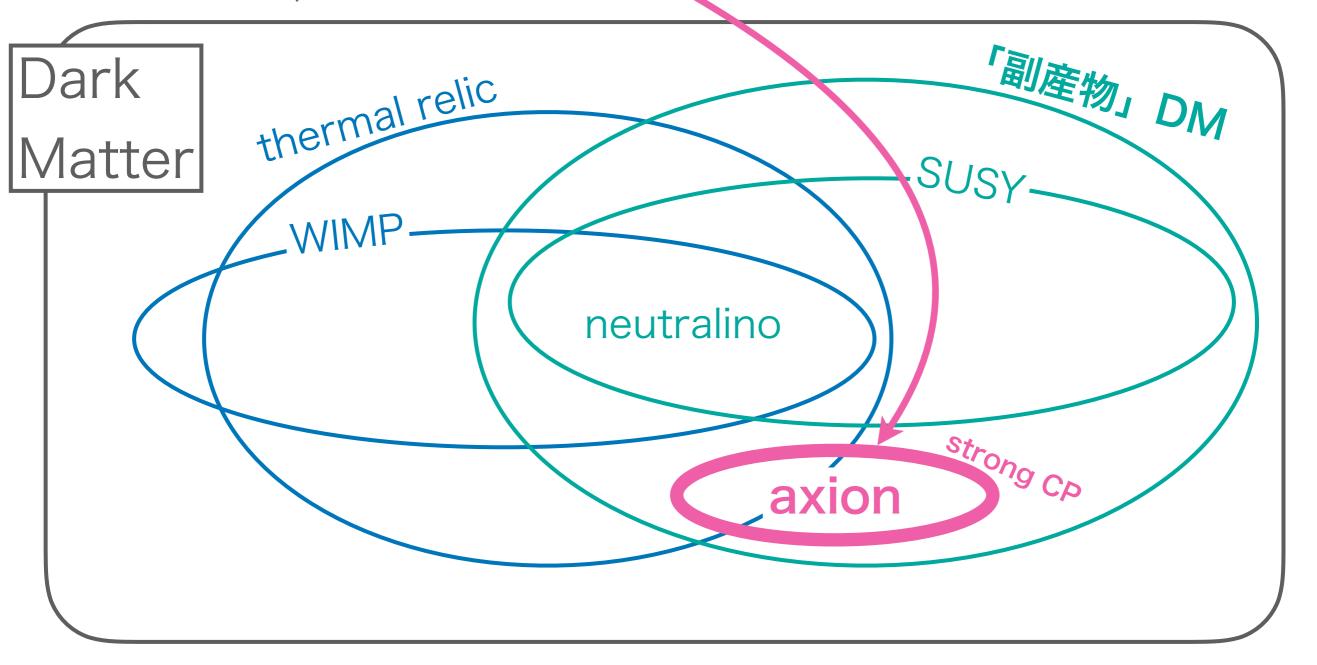


- 2. axion
- 3. gravitino/axino
- 4. ADM, PBH
- 5. sub-GeV, ALPs

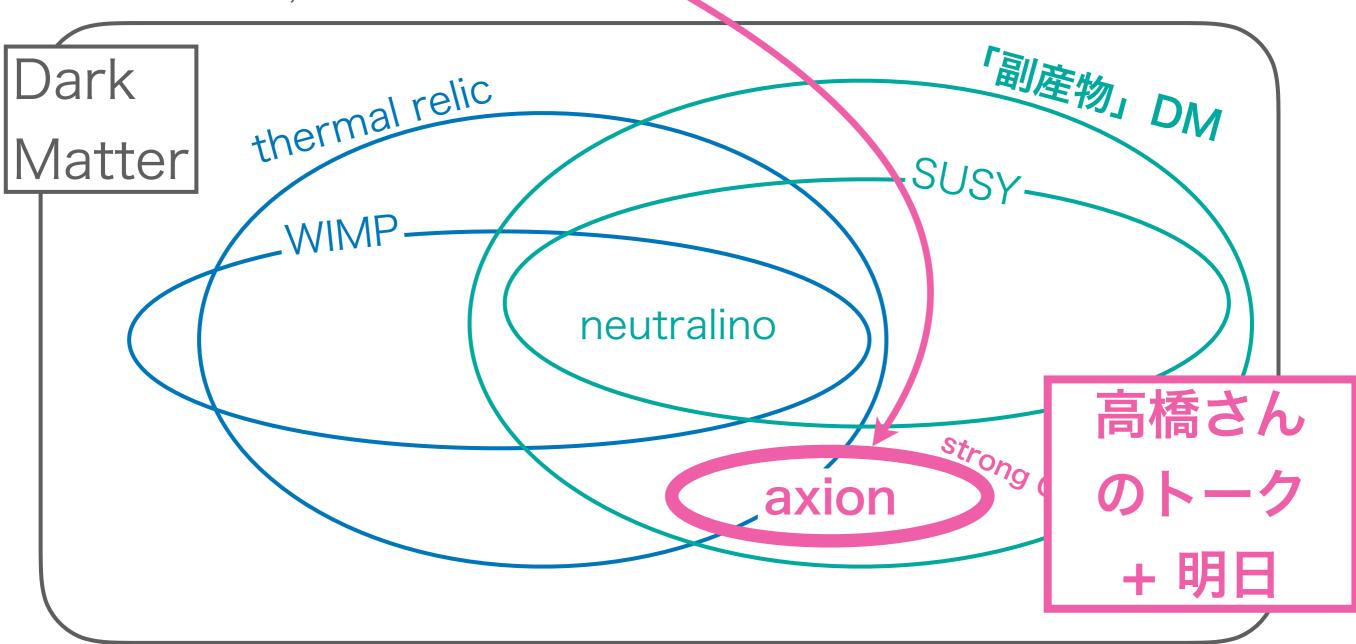


Endo, KH, Iwamoto, Yanagi, 1704.05287 しかも slepton と協力して muon g-2 まで説明してしまうかも。 -  $\tilde{\ell}_R$  mass 700 -600 500 400 ILC 500 GeV  $\widetilde{\chi}_i \ni \widetilde{\chi}_1^0 = \underline{WIMP} DM$ 300 100 <del>|</del> 100 160 180 200 220 240 120 140  $M_1$  [GeV] therme Matter neutralino

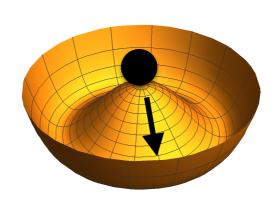
- 1. WIMP
- 2. axion <
- 3. gravitino/axına
- 4. ADM, PBH
- 5. sub-GeV, ALPs



- 1. WIMP
- axion
- 3. gravitino/axino
- 4. ADM, PBH
- 5. sub-GeV, ALPs

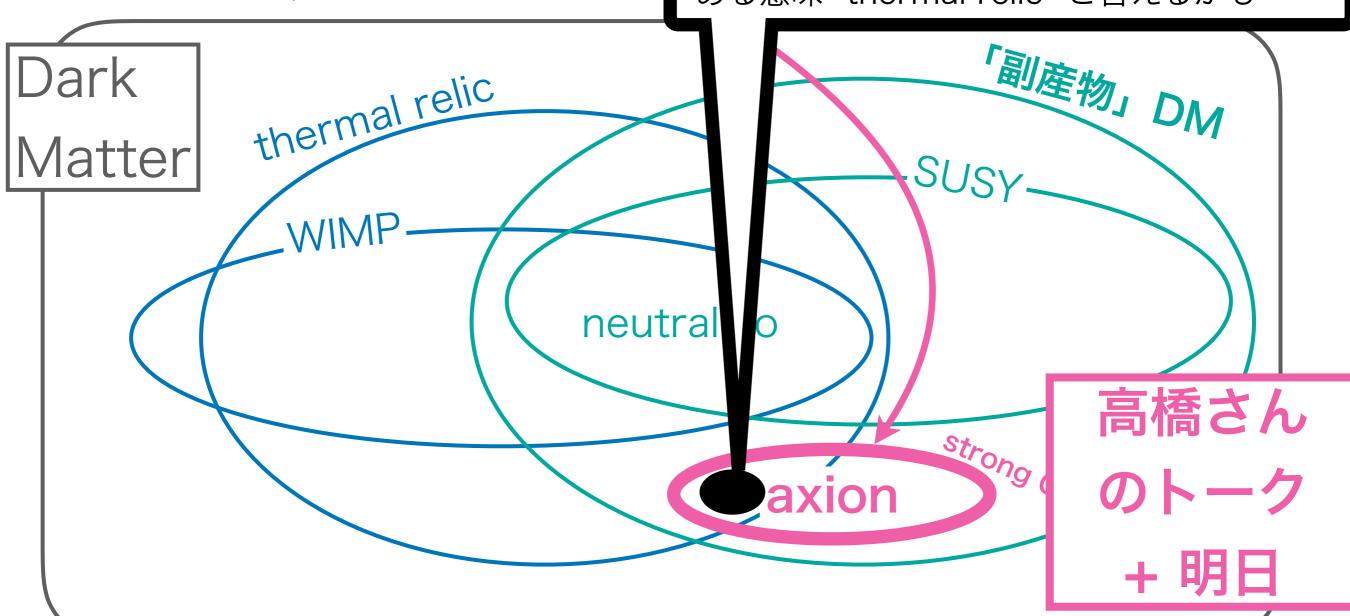


- 1. WIMP
- 2. axion <
- 3. gravitino/axına
- 4. ADM, PBH
- 5. sub-GeV, ALPs

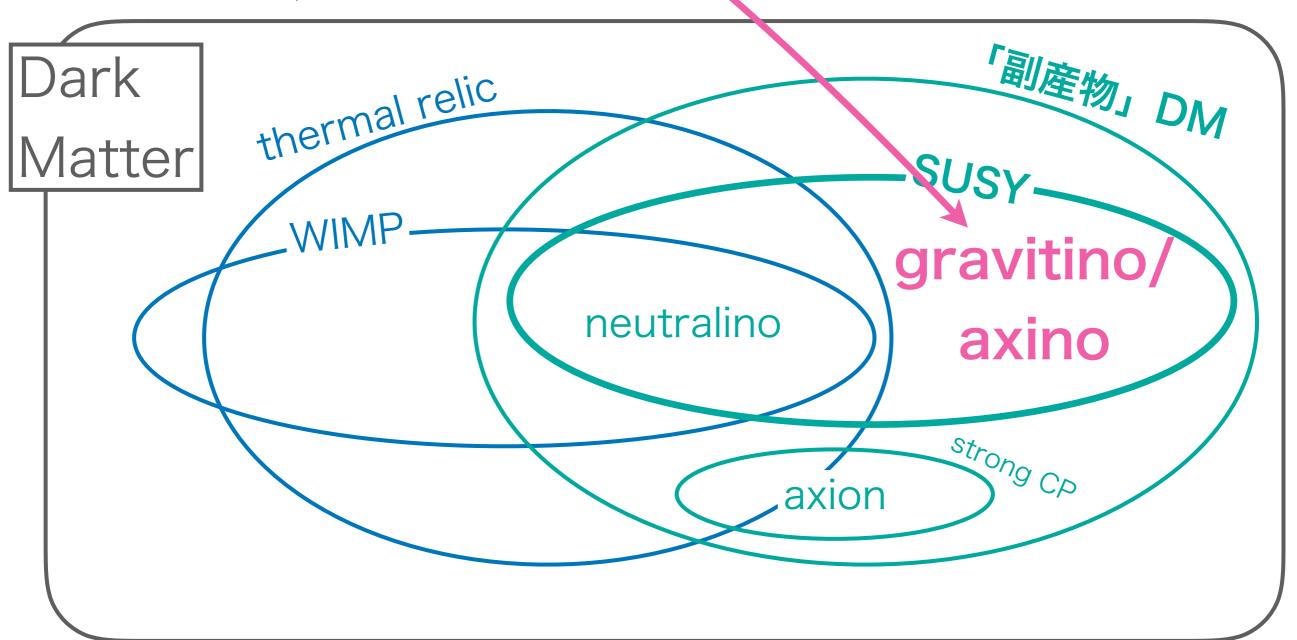


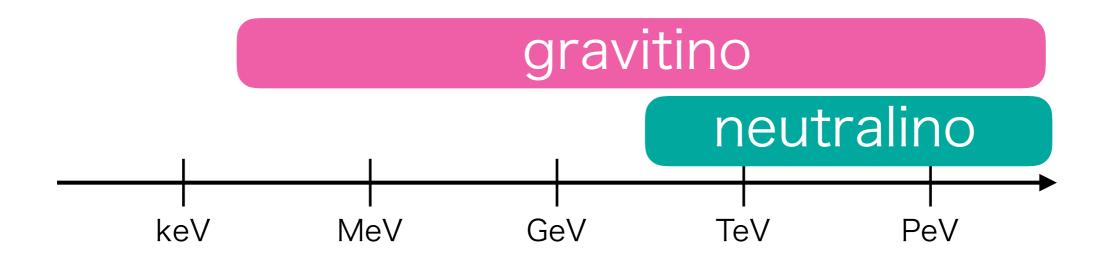
 $T > f_a$  かつ  $N_{DM} = 1$  の場合は

初期条件によらずに DM 密度が決まるのである意味 "thermal relic" と言えるかも



- 1. WIMP
- 2. axion
- 3. gravitino/axino
- 4. ADM, PBH
- 5. sub-GeV, ALPs





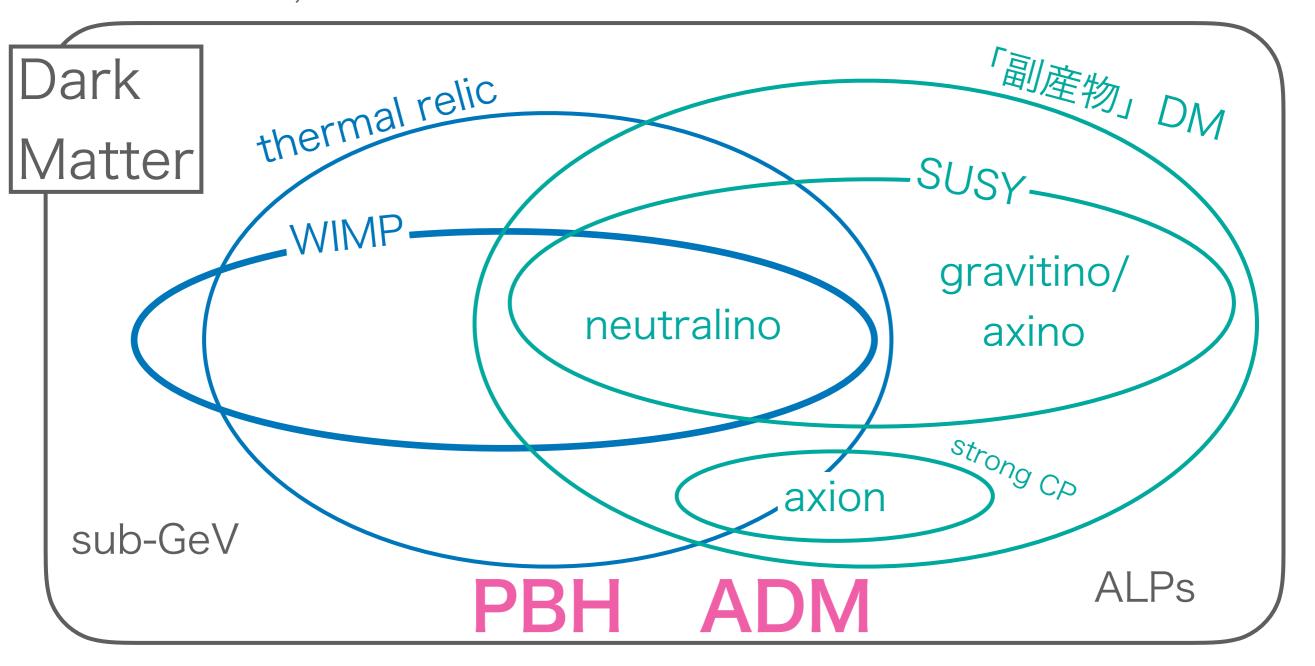
- ▶ minimal な SUSY で DM の候補は2択.
- → log scale で見ると、gravitino の方がパラメータがずっと広い!
- ▶ thermal relic にならないけど、生成機構も色々あり。 (reheating, moduli decay, inflaton decay, NLSP decay……)
- ▶ 直接生成は難しいけど、NLSP 次第では検証可能かも。

#### NLSP が charged なら Long-Lived Charged Particle.

100 TeV pp collider で 4 TeV stau まで見える. [J. L. Feng, S. Iwamoto, Y. Shadmi, S. Tarem, '15] さらに gravitino への late-time 崩壊が見えれば Supergravity のチェックも?

[Buchmuller, KH, Ratz, Yanagida,'04.]

- 1. WIMP
- 2. axion
- 3. gravitino/axino
- 4. ADM, PBH
- 5. sub-GeV, ALPs



- 1. WIMP
- 2. axion
- 3. gravitino/axino
- 4. ADM, PBH
- 5. sub-GeV, ALPs

# Dark Matter thermal relic wimp

#### **Asymmetric Dark Matter**

(伊部さんのトーク@3月仙台研究会がオススメです。)

**Baryon-DM coincidence?** 

 $\Omega_{DM}:\Omega_b\sim 5:1$ 

close with each other...

$$\eta_B = (n_B - n_{\overline{B}})/n_Y$$
 $\eta_{DM} = (n_{DM} - n_{\overline{DM}})/n_Y$ 

Asymmetry is thermally distributed in the two sectors

axion

$$\stackrel{\longleftarrow}{\longrightarrow}$$

dark matter

 $\eta_{DM}/\eta_B$  is related to the degrees of the freedom in two sectors

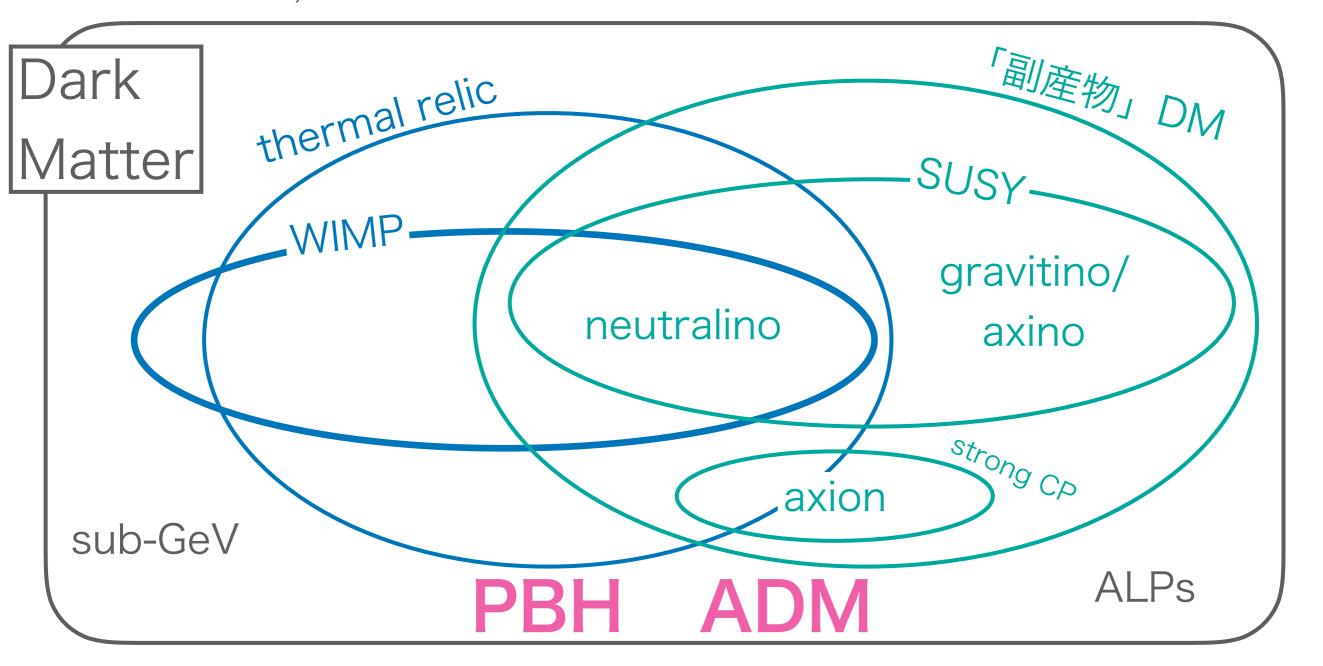
明日の郡さんのトーク

PBH ADM

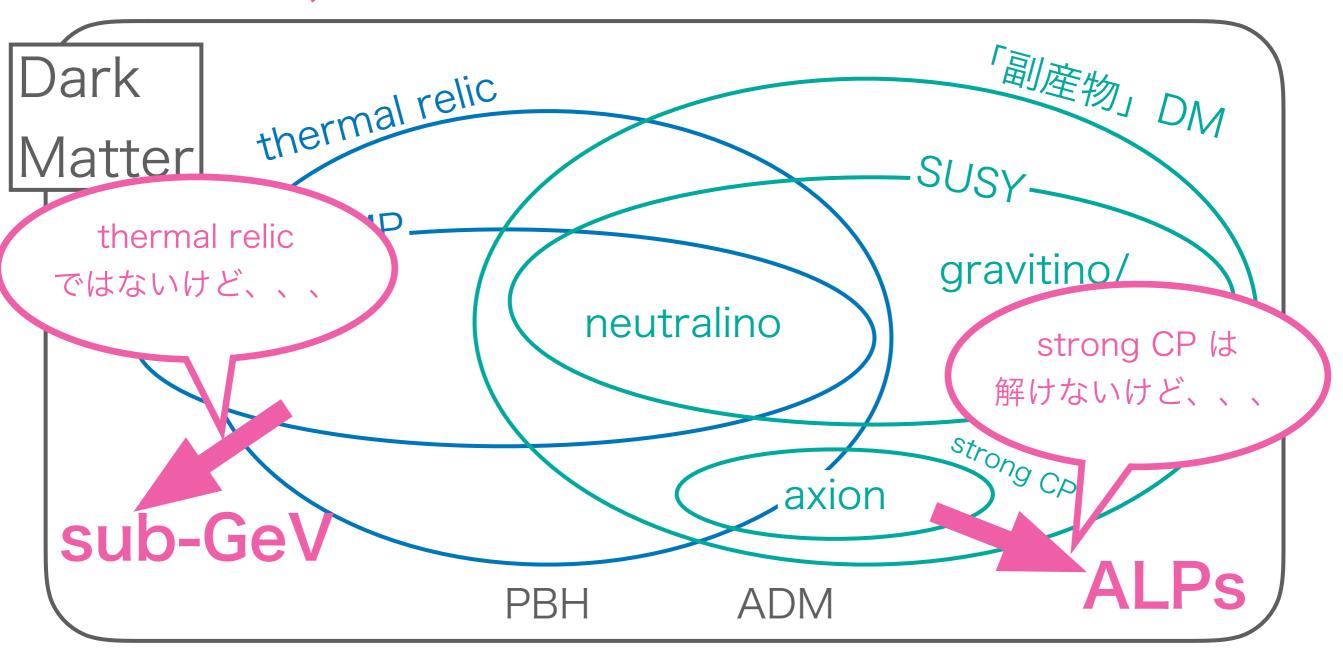
Strong Cp

ALPs

- 1. WIMP
- 2. axion
- 3. gravitino/axino
- 4. ADM, PBH・・・ただし模型/シナリオがややこしくなりがち
- 5. sub-GeV, ALPs

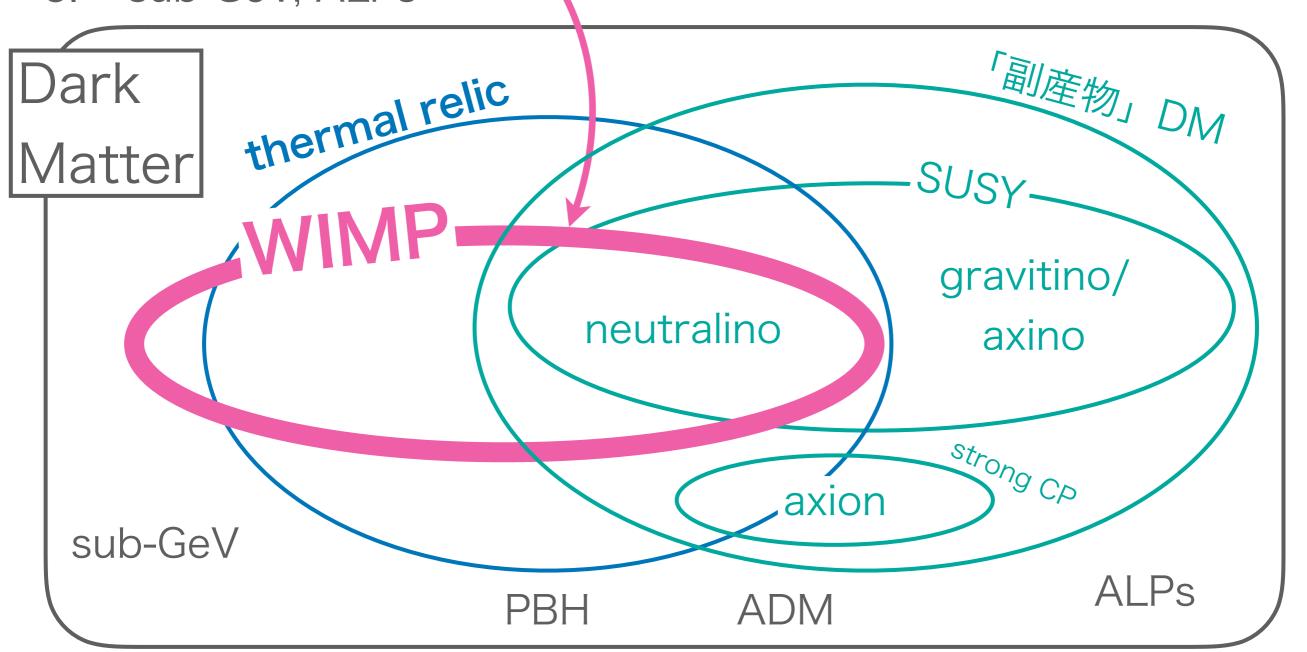


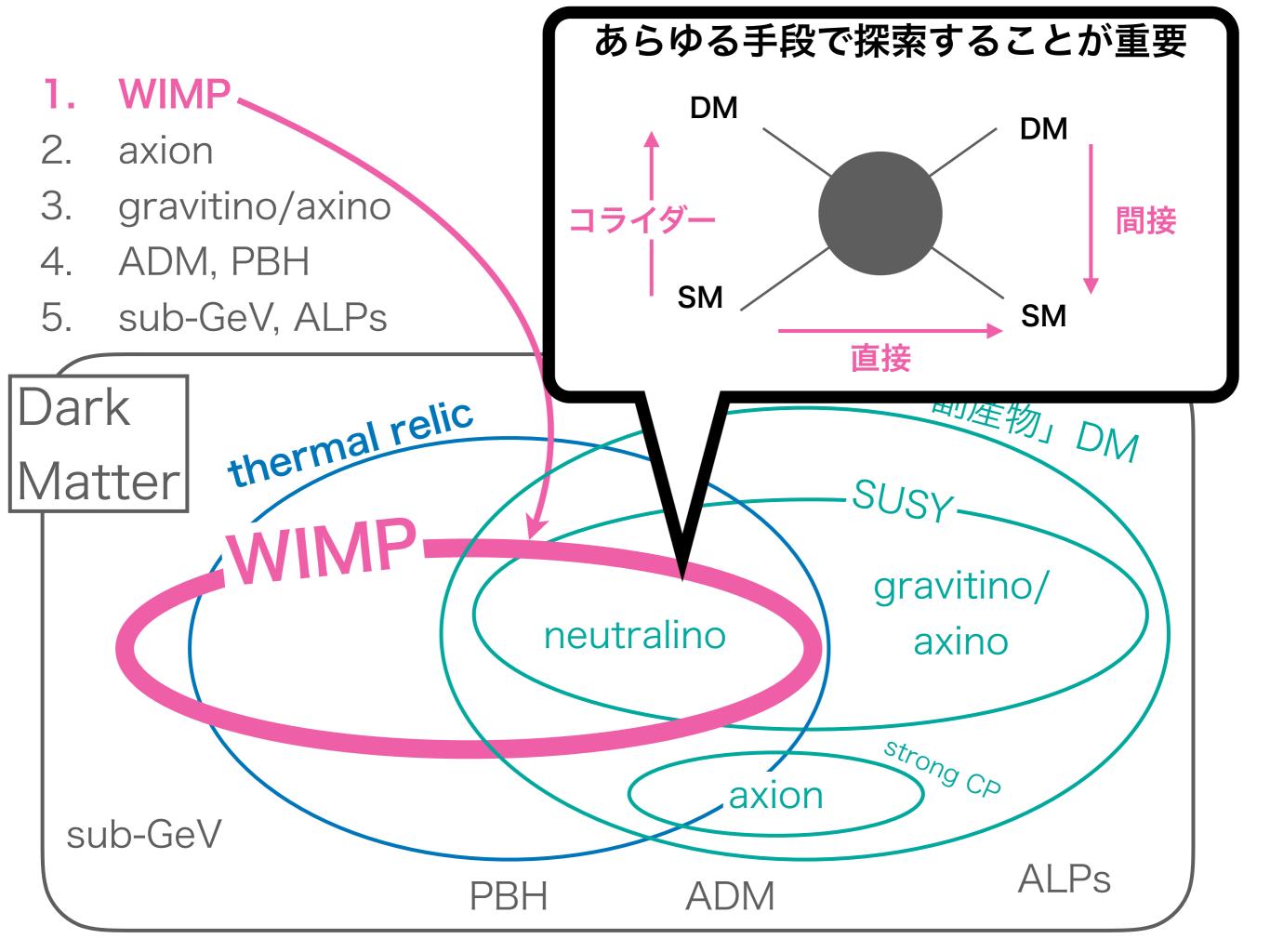
- 1. WIMP
- 2. axion
- 3. gravitino/axino
- 4. ADM, PBH
- 5. sub-GeV, ALPs・・・パラメータの拡張。(可能性を考えるのは重要だと思います)





- 2. axion
- 3. gravitino/axino
- 4. ADM, PBH
- 5. sub-GeV, ALPs





## このトークの目標

・いくつかのDM候補たちの簡単なレビュー

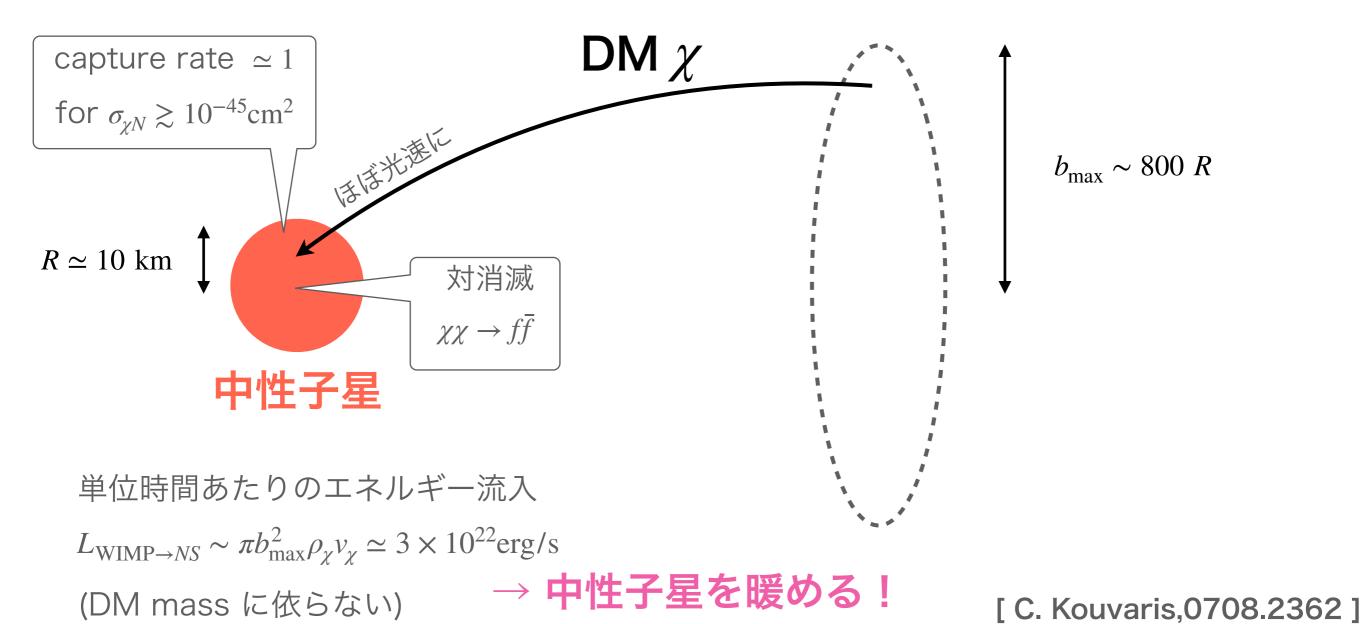
・中性子星とWIMP DMの研究の紹介

based on K.Yanagi, N.Nagata, KH, 1904.04667, 1905.02991.

K. Yanagi, N. Nagata, KH, [1905.02991 + 1904.04667]

#### あらすじ

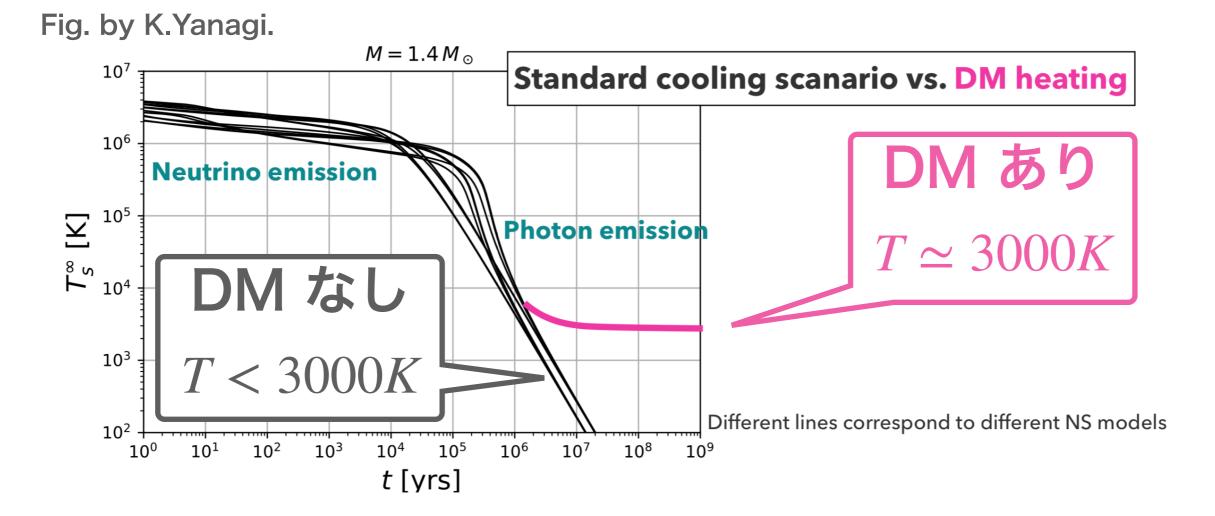
#### 1. WIMP DM は中性子星に当たって、内部で対消滅する。



K. Yanagi, N. Nagata, KH, [1905.02991 + 1904.04667]

#### あらすじ

- 1. WIMP DM は中性子星に当たって、内部で対消滅する。
- 2. 古い中性子星の温度を測れば DM の兆候が見えるのでは?



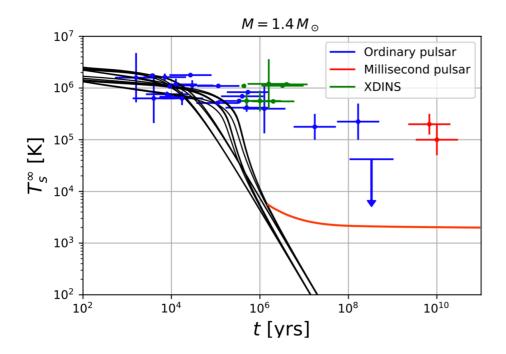
C. Kouvaris 0708.2362, Baryakhtar+ 1704.01577, 他にも最近関連論文増えてます。

K. Yanagi, N. Nagata, KH, [1905.02991 + 1904.04667]

#### あらすじ

- 1. WIMP DM は中性子星に当たって、内部で対消滅する。
- 2. 古い中性子星の温度を測れば DM の兆候が見えるのでは?

# 3.しかし!

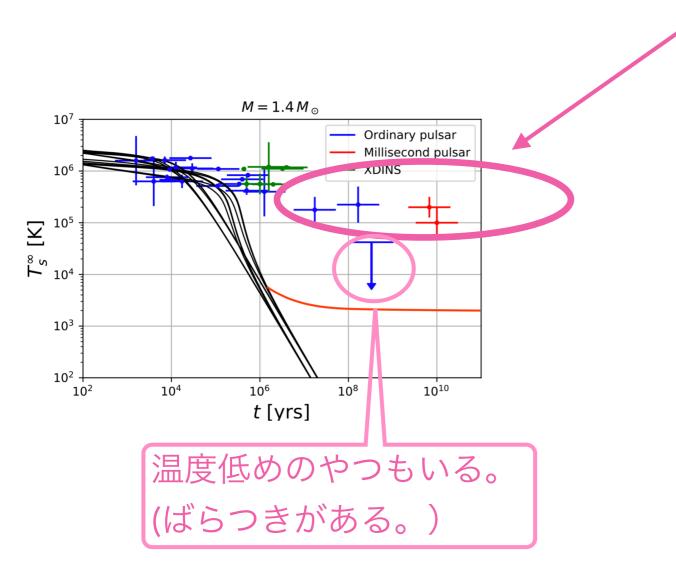


K. Yanagi, N. Nagata, KH, [1905.02991 + 1904.04667]

#### あらすじ

- 1. WIMP DM は中性子星に当たって、内部で対消滅する。
- 2. 古い中性子星の温度を測れば DM の兆候が見えるのでは?

 $3.しかし ! 古くて暖かい (T \gg 3000K)$  中性子星が見つかっている。



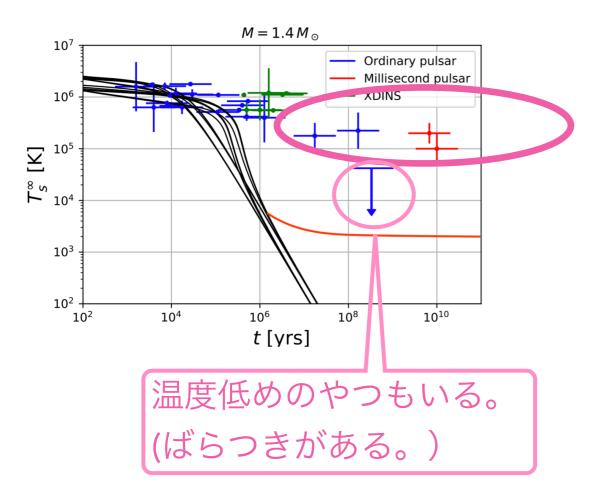
K. Yanagi, N. Nagata, KH, [1905.02991 + 1904.04667]

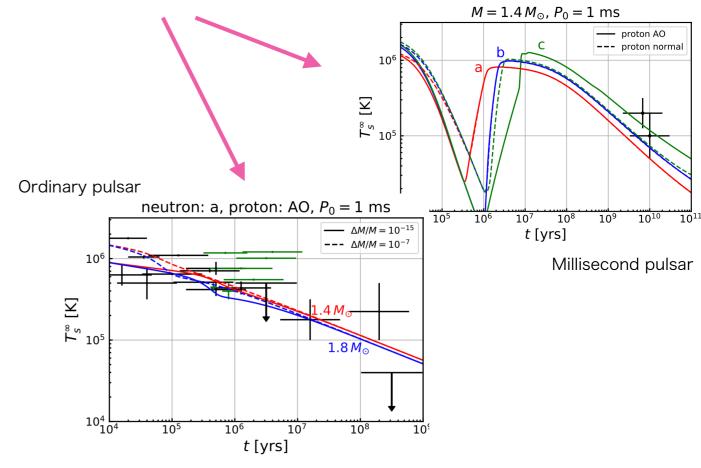
#### あらすじ

- 1. WIMP DM は中性子星に当たって、内部で対消滅する。
- 2. 古い中性子星の温度を測れば DM の兆候が見えるのでは?

# $3.しかし ! 古くて暖かい (T \gg 3000K)$ 中性子星が見つかっている。

しかも中性子星に内在する "rotochemical heating" でそれらが説明出来る。





Reisengger,'94, Haensel,'92, Gourgoulhon, Haensel,'93, Fernandez, Reisenegger,'05,..... Yanagi, Nagata, KH, 1904.04667

K. Yanagi, N. Nagata, KH, [1905.02991 + 1904.04667]

#### あらすじ

- 1. WIMP DM は中性子星に当たって、内部で対消滅する。
- 2. 古い中性子星の温度を測れば DM の兆候が見えるのでは?
- 3. しかし! 古くて暖かい  $(T \gg 3000K)$  中性子星が見つかっている。

しかも中性子星に内在する "rotochemical heating" でそれらが説明出来る。

4. DM heating は見えるのか?

見えるとしたらその条件は?・・・これを調べた。

K. Yanagi, N. Nagata, KH, [1905.02991 + 1904.04667]

#### あらすじ

- 1. WIMP DM は中性子星に当たって、内部で対消滅する。
- 2. 古い中性子星の温度を測れば DM の兆候が見えるのでは?
- $3.しかし! 古くて暖かい (T \gg 3000K)$  中性子星が見つかっている。

しかも中性子星に内在する "rotochemical heating" でそれらが説明出来る。

#### 4. DM heating は見えるのか?

#### 見えるとしたらその条件は?・・・これを調べた。

$$C\frac{dT^{\infty}}{dt} = -L_{\nu}^{\infty} - L_{\gamma}^{\infty} + L_{H}^{\infty},$$

$$C\frac{dT^{\infty}}{dt} = -L_{\nu}^{\infty} - L_{\gamma}^{\infty} + L_{H}^{\infty}$$

$$\frac{d\eta_{e}^{\infty}}{dt} = -\sum_{N=n,p} \int dV \left(Z_{npe} \Delta \Gamma_{M,Ne} + Z_{np} \Delta \Gamma_{M,N\mu}\right) e^{\Phi(r)} + 2W_{npe} \Omega \dot{\Omega},$$

$$\frac{d\eta_{\mu}^{\infty}}{dt} = -\sum_{N=n,p} \int dV \left(Z_{np} \Delta \Gamma_{M,Ne} + Z_{np\mu} \Delta \Gamma_{M,N\mu}\right) e^{\Phi(r)} + 2W_{np\mu} \Omega \dot{\Omega}$$

$$n + N_1 \to p + N_2 + \ell + \bar{\nu}_{\ell}$$

$$p + N_2 + \ell \to n + N_1 + \nu_{\ell}$$
化学ポテンシャル
$$\eta_{\ell} \equiv \mu_n - \mu_p - \mu_{\ell}$$

K. Yanagi, N. Nagata, KH, [1905.02991 + 1904.04667]

#### あらすじ

- 1. WIMP DM は中性子星に当たって、内部で対消滅する。
- 2. 古い中性子星の温度を測れば DM の兆候が見えるのでは?
- 3. しかし! 古くて暖かい  $(T \gg 3000K)$  中性子星が見つかっている。

しかも中性子星に内在する "rotochemical heating" でそれらが説明出来る。

### 4. DM heating は見えるのか?

#### 見えるとしたらその条件は?・・・これを調べた。

$$C\frac{dT^{\infty}}{dt} = -L_{\nu}^{\infty} - L_{\gamma}^{\infty} + L_{H}^{\infty},$$

$$\frac{d\eta_{e}^{\infty}}{dt} = -\sum_{N=n,p} \int dV \left( Z_{npe} \Delta \Gamma_{M,Ne} + Z_{np} \Delta \Gamma_{M,N\mu} \right) e^{\Phi(r)} + 2W_{npe} \Omega \dot{\Omega},$$

$$\frac{d\eta_{\mu}^{\infty}}{dt} = -\sum_{N=n,p} \int dV \left( Z_{np} \Delta \Gamma_{M,Ne} + Z_{np\mu} \Delta \Gamma_{M,N\mu} \right) e^{\Phi(r)} + 2W_{np\mu} \Omega \dot{\Omega}$$

$$\Delta \Gamma_{M,N\ell} = \frac{Q_{M,N\ell}^{(0)}}{T(r)} I_{M,\Gamma}^{N}$$

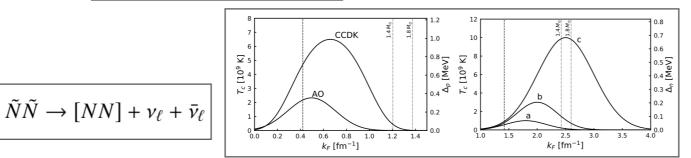
$$n + N_1 \rightarrow p + N_2 + \ell + \bar{\nu}_{\ell}$$
  
 $p + N_2 + \ell \rightarrow n + N_1 + \nu_{\ell}$   
化学ポテンシャル  
 $\eta_{\ell} \equiv \mu_n - \mu_p - \mu_{\ell}$ 

$$L_{\nu,M}^{\infty} = \sum_{\ell=e,\mu} \sum_{N=n,p} \int dV \, Q_{M,N\ell} \, e^{2\Phi(r)}$$

$$Q_{M,N\ell} = Q_{M,N\ell}^{(0)} \, I_{M,\epsilon}^{N}$$

$$Q_{M,N\ell} = Q_{M,N\ell}^{(0)} I_{M,\epsilon}^N$$

$$L_H^{\infty} = \sum_{\ell=e,\mu} \sum_{N=n,p} \int dV \, \eta_{\ell} \cdot \Delta \Gamma_{M,N\ell} \, e^{2\Phi(r)}$$



$$I_{M,\epsilon}^{N} = \frac{60480}{11513\pi^{8}} \frac{1}{A_{0}^{N}} \int \prod_{j=1}^{5} \frac{d\Omega_{j}}{4\pi} \int_{0}^{\infty} dx_{v} \int_{-\infty}^{\infty} dx_{n} dx_{p} dx_{N_{1}} dx_{N_{2}} x_{v}^{3} \cdot f(z_{n}) f(z_{p}) f(z_{N_{1}}) f(z_{N_{2}})$$

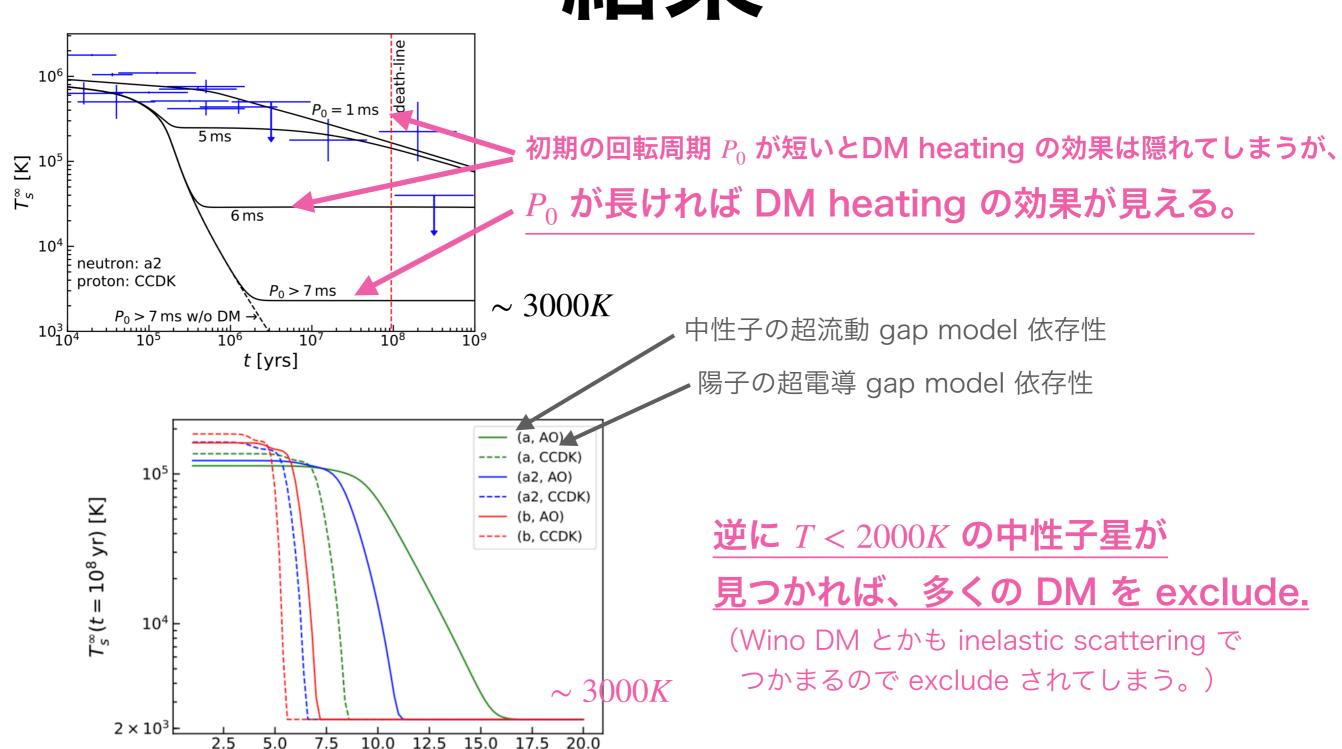
$$\times \left[ f(x_{\nu} - \xi_{\ell} - z_{n} - z_{p} - z_{N_{1}} - z_{N_{2}}) + f(x_{\nu} + \xi_{\ell} - z_{n} - z_{p} - z_{N_{1}} - z_{N_{2}}) \right] \delta^{3} \left( \sum_{i=1}^{5} \mathbf{p}_{i} \right), \quad (18)$$

$$I_{M,\Gamma}^{N} = \frac{60480}{11513\pi^{8}} \frac{1}{A_{0}^{N}} \int \prod_{i=1}^{5} \frac{d\Omega_{j}}{4\pi} \int_{0}^{\infty} dx_{v} \int_{-\infty}^{\infty} dx_{n} dx_{p} dx_{N_{1}} dx_{N_{2}} x_{v}^{2} \cdot f(z_{n}) f(z_{p}) f(z_{N_{1}}) f(z_{N_{2}})$$

$$\times \left[ f(x_{\nu} - \xi_{\ell} - z_{n} - z_{p} - z_{N_{1}} - z_{N_{2}}) - f(x_{\nu} + \xi_{\ell} - z_{n} - z_{p} - z_{N_{1}} - z_{N_{2}}) \right] \delta^{3} \left( \sum_{j=1}^{5} \boldsymbol{p}_{j} \right), \quad (19)$$

K. Yanagi, N. Nagata, KH, [1905.02991 + 1904.04667]

# 結果

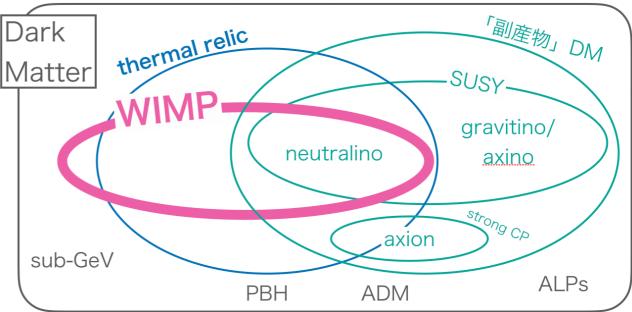


 $P_0$  [ms]

### まとめ

・いくつかのDM候補たちの

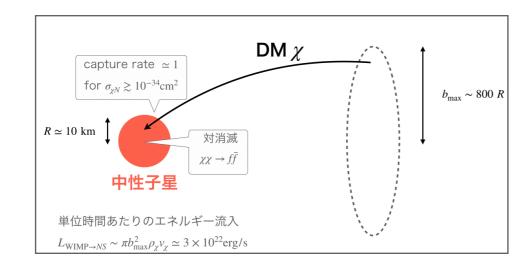
簡単なレビュー

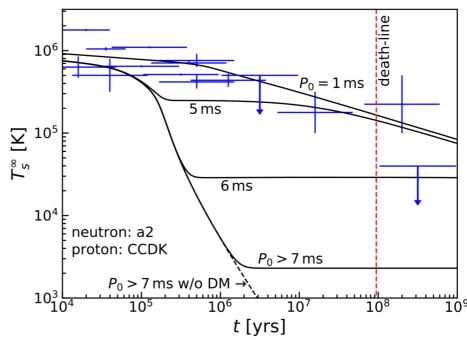


・中性子星とWIMP DMの研究の紹介

based on K.Yanagi, N.Nagata, KH,

1904.04667, 1905.02991.





# backup