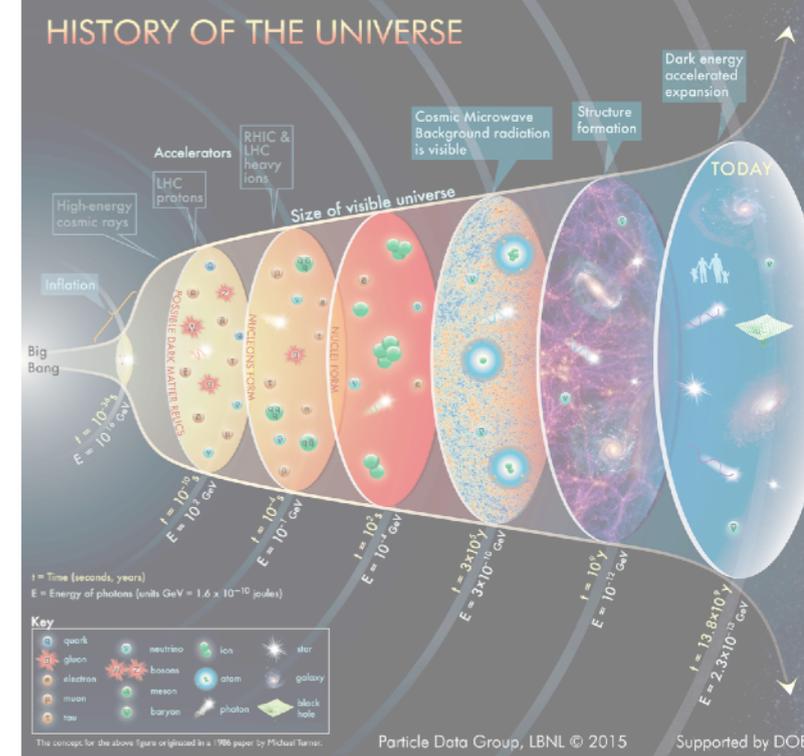


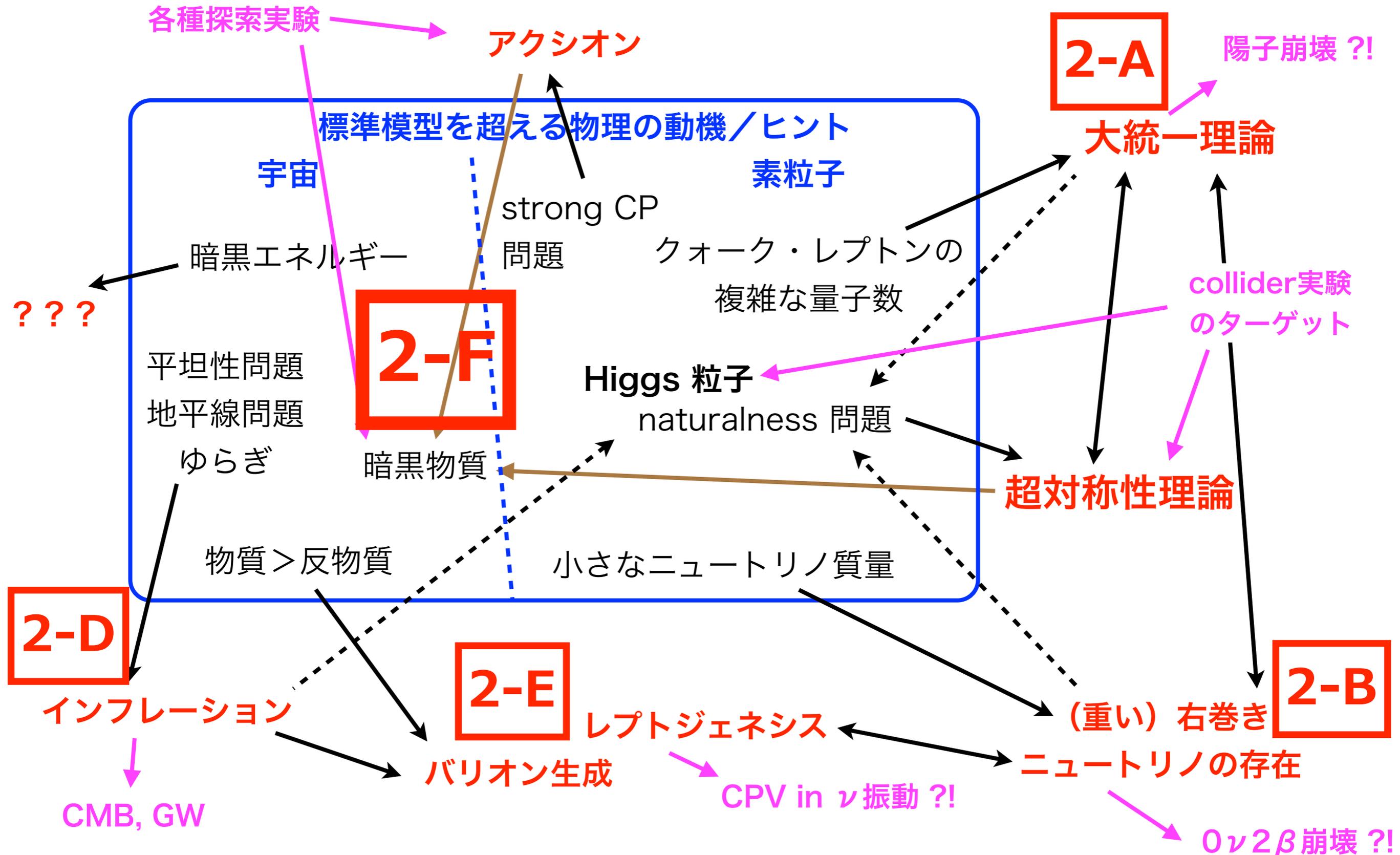
素粒子特論

浜口幸一 (東京大学 理学系研究科 物理学専攻)

@お茶の水女子大学, 2023年夏学期

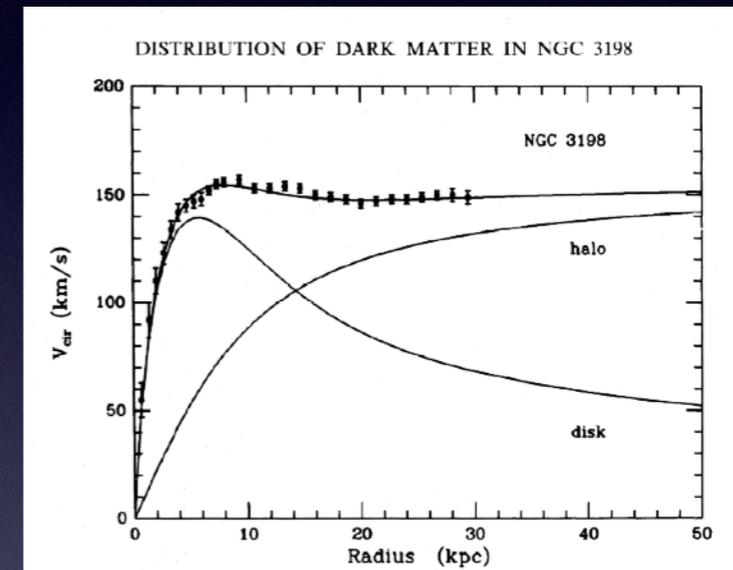


第1部まとめ



暗黒物質：重力でしか見えない物質

正体は分からないけど、
存在するという証拠は
沢山ある・・・。



- 銀河の回転速度
- 宇宙背景放射の非等方性の精密測定
- 宇宙の構造形成
- . . .

2019年に行われた研究会で・・・



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

2019年に行われた研究会で・・・

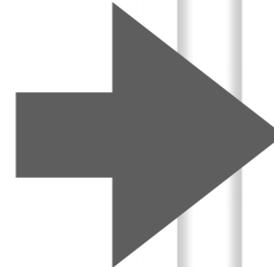


Koichi Hamaguchi
@HamaguchiKoichi

暗黒物質の正体は何だと思えますか？
(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えます。)

- WIMP
- Axion
- PBH
- それ以外/閲覧用

投票 151票・残り20時間



Koichi Hamaguchi
@HamaguchiKoichi

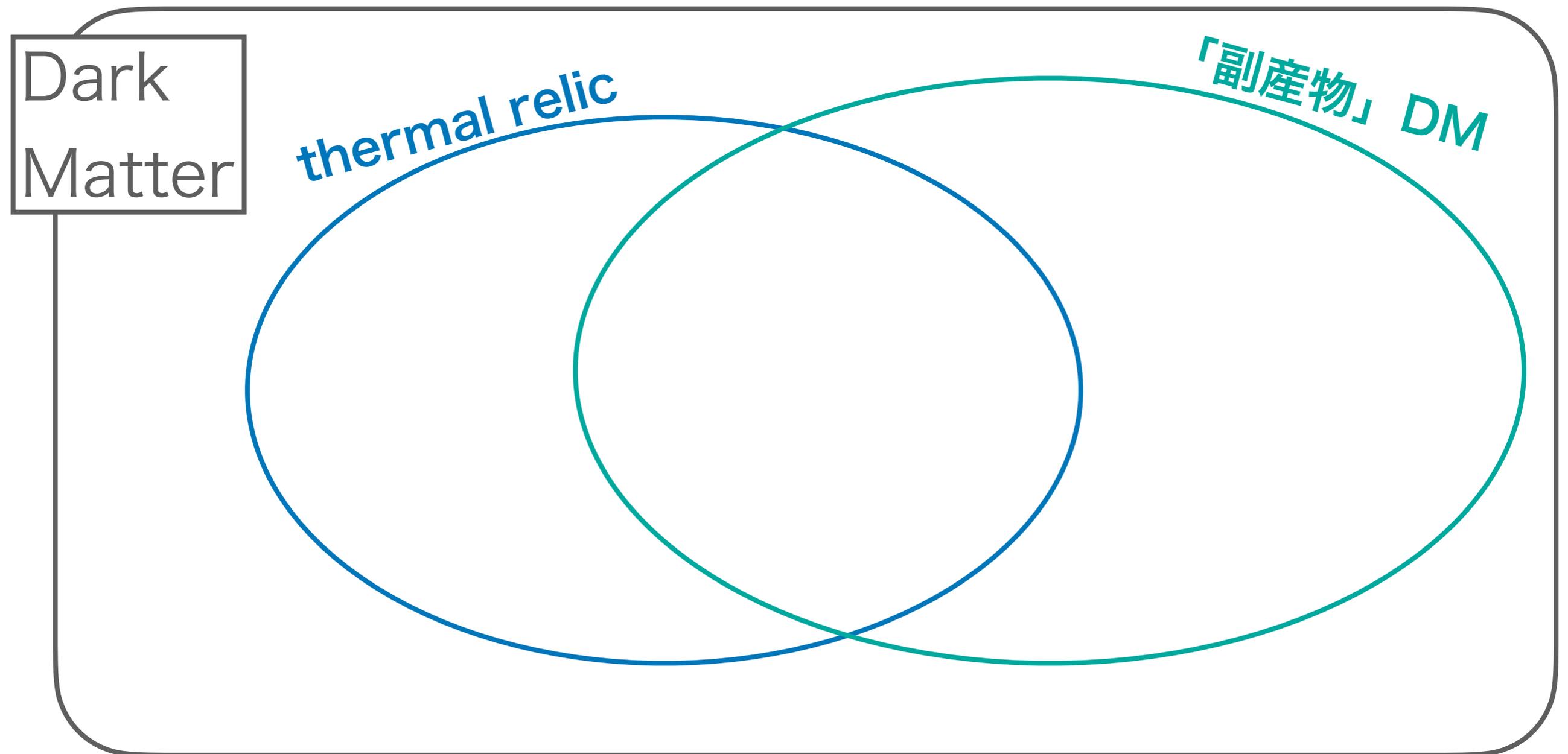
暗黒物質の正体は何だと思えますか？
(投票数が100を超えたら明日の研究会のトークで紹介しようと思えます。)

WIMP	20%
Axion	18%
PBH	6%
それ以外/閲覧用	56%

461票・最終結果

個人的な DM ランキング (2023 ver.)

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



個人的な DM ランキング (2023 ver.)

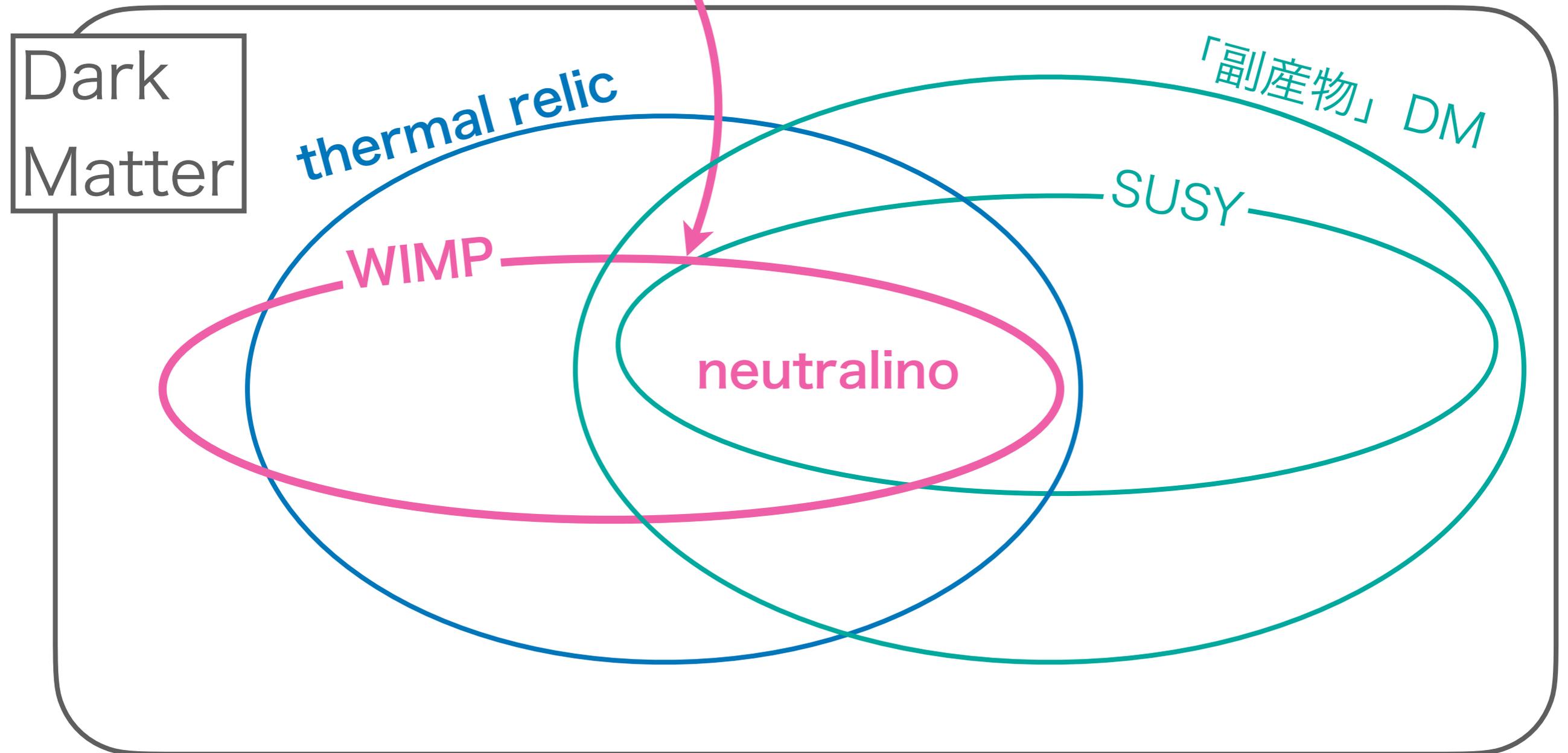
1. **WIMP**

2. axion

3. gravitino/axino

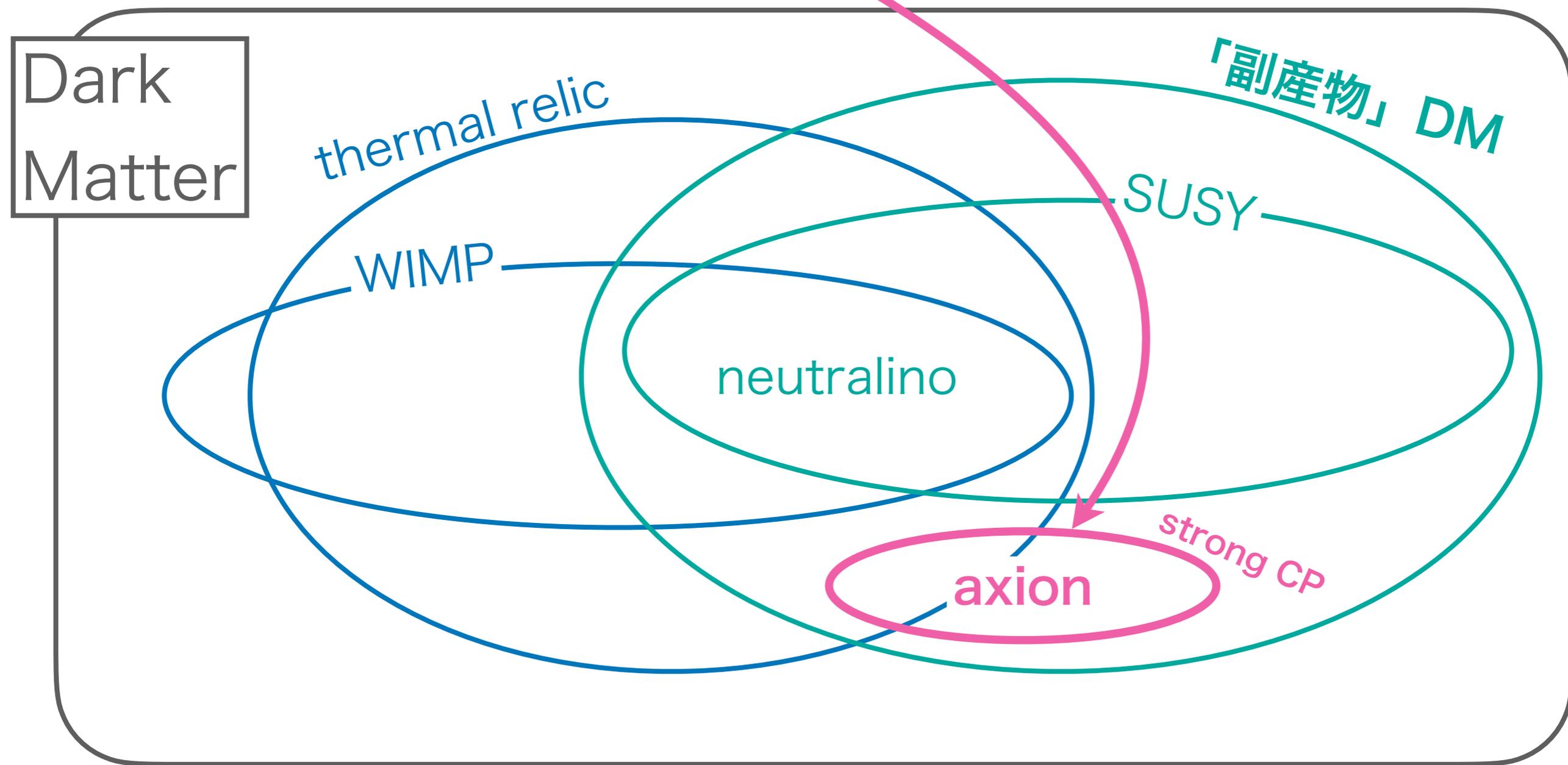
3. ADM, PBH

3. sub-GeV, ALPs



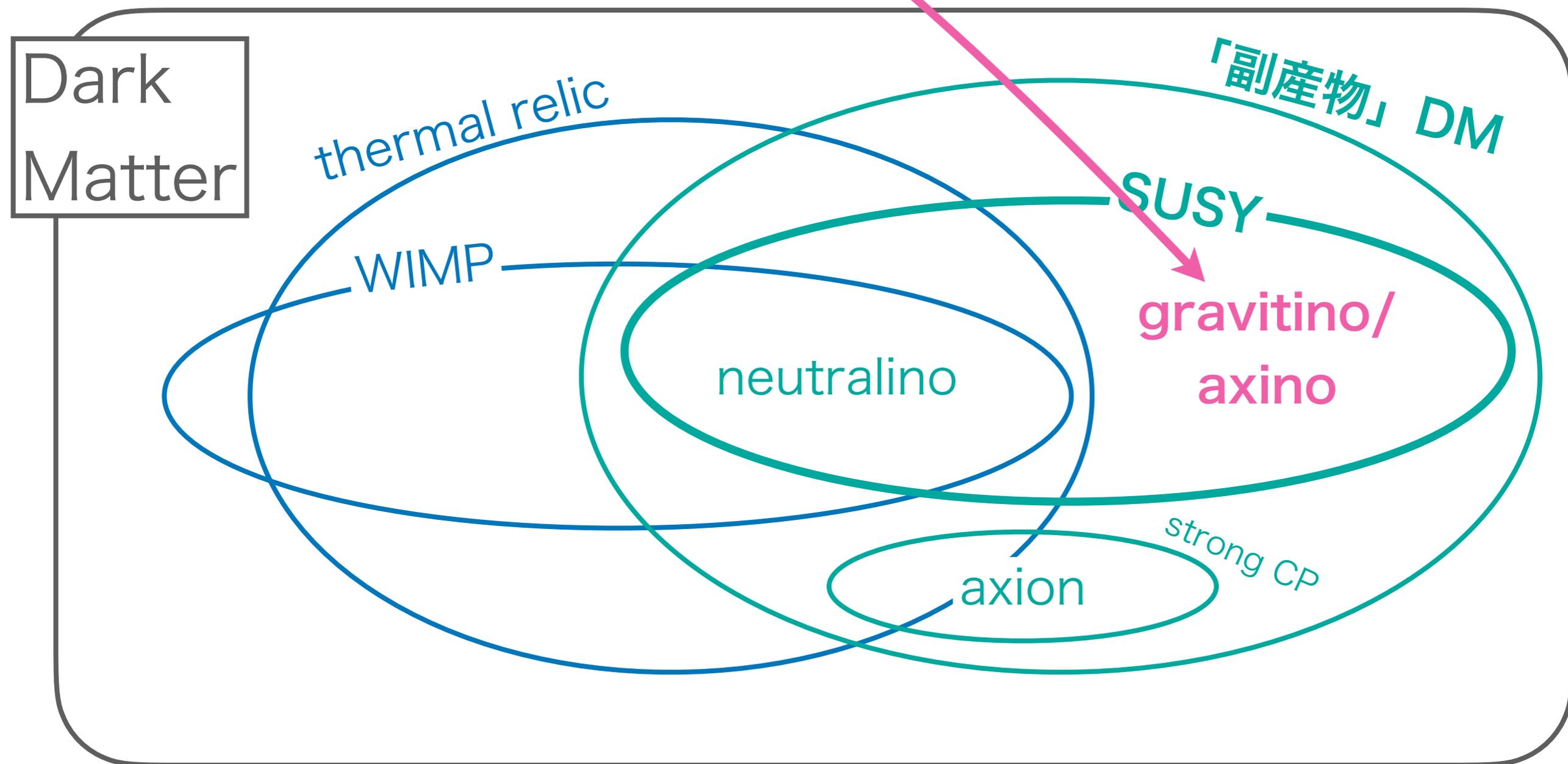
個人的な DM ランキング (2023 ver.)

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



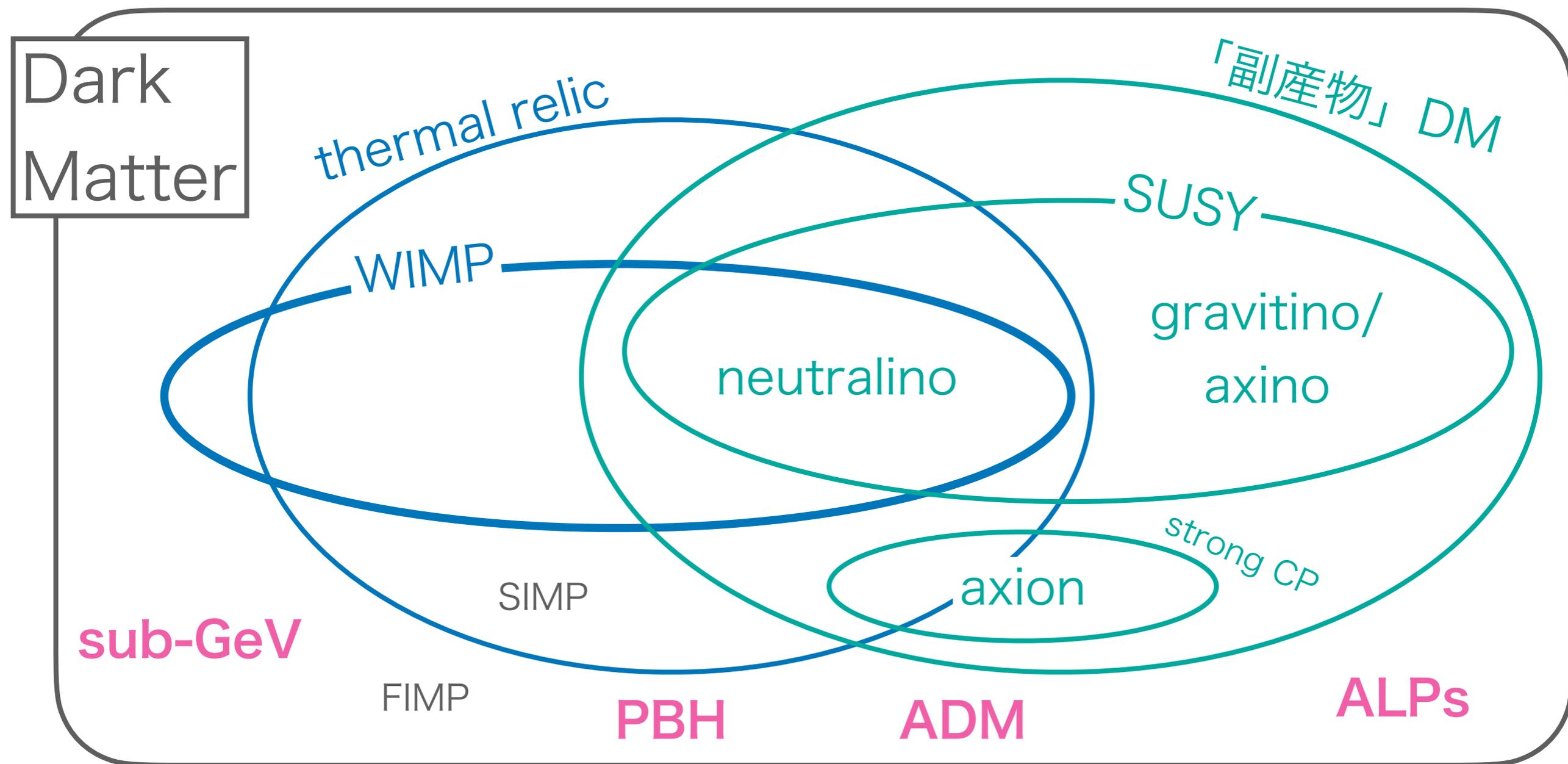
個人的な DM ランキング (2023 ver.)

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



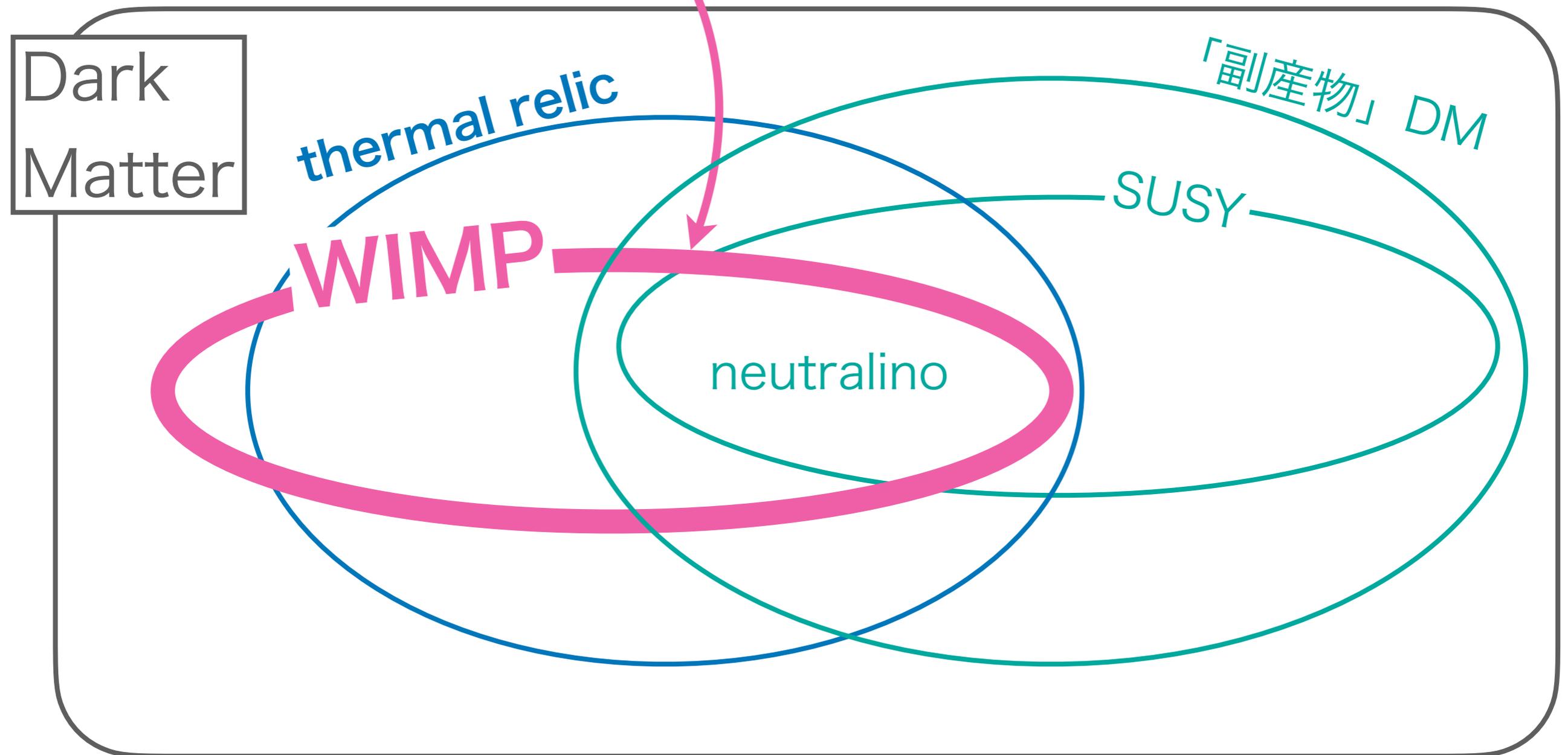
個人的な DM ランキング (2023 ver.)

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



個人的な DM ランキング (2023 ver.)

1. **WIMP**
2. axion
3. gravitino/axino
3. ADM, PBH
3. 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**.

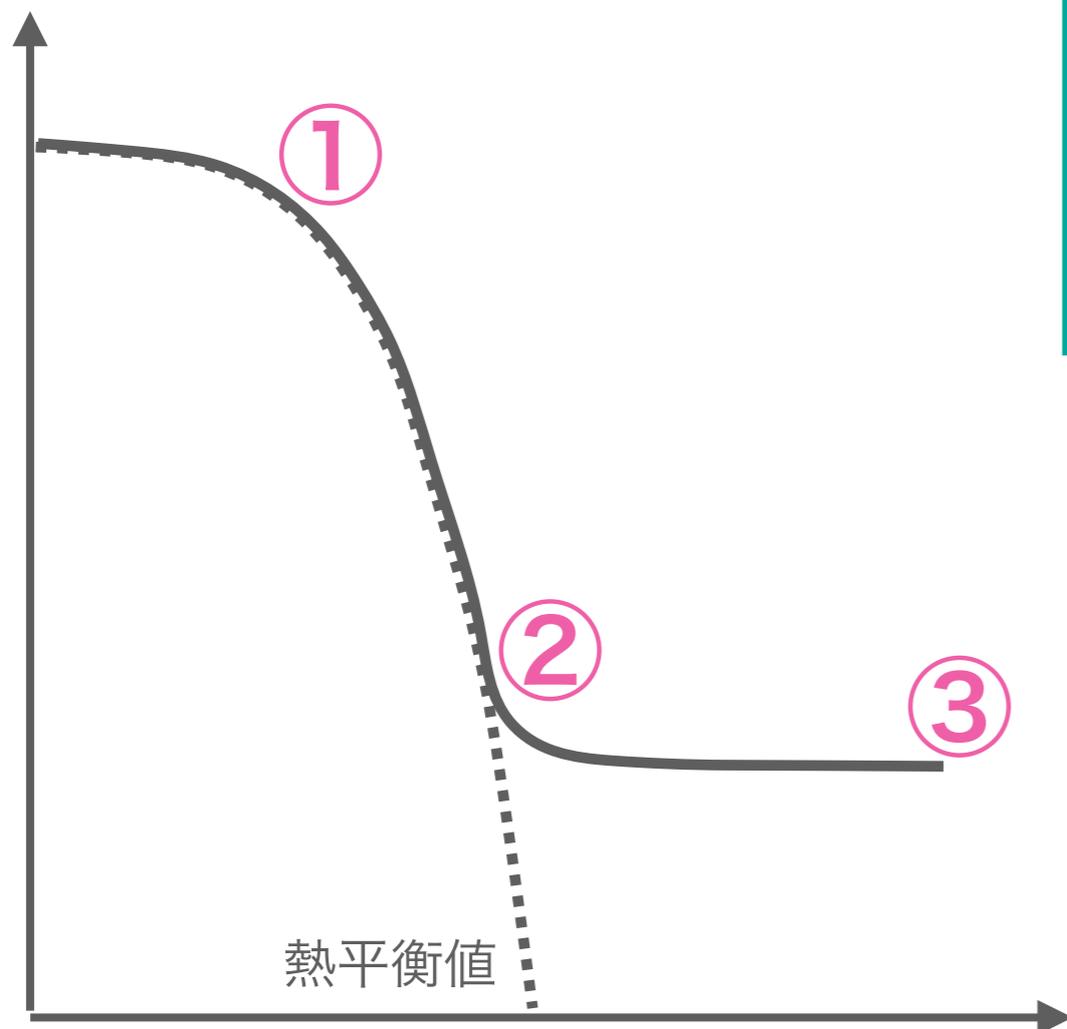
① 熱かった → ② 冷えた → ③ 今に至る

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

DMの数 (comoving)



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

weak scale mass,

weak scale interaction

でちょうど良い。"WIMP miracle"

後ほど、板書で thermal relic の計算の概要を追いたいと思います。

m_{DM}/T (時間)

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

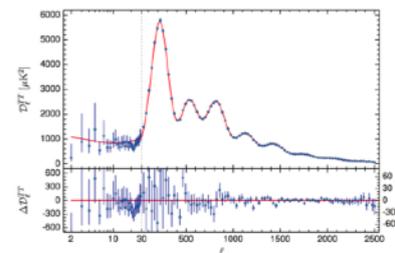
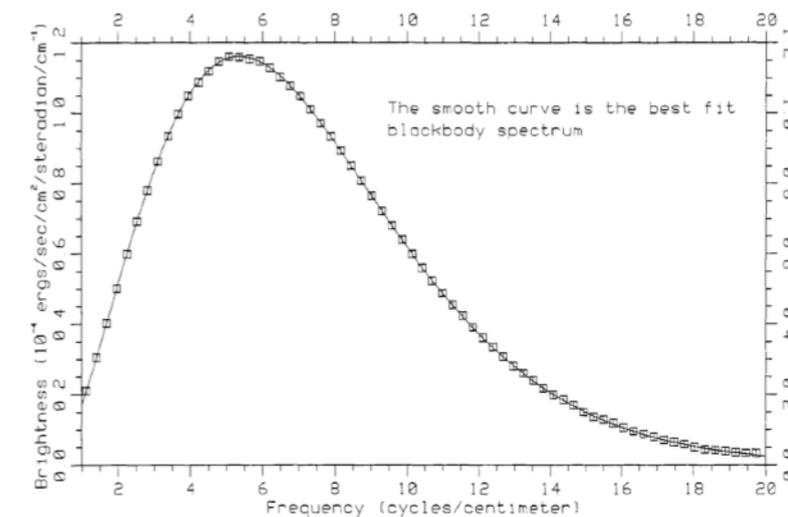
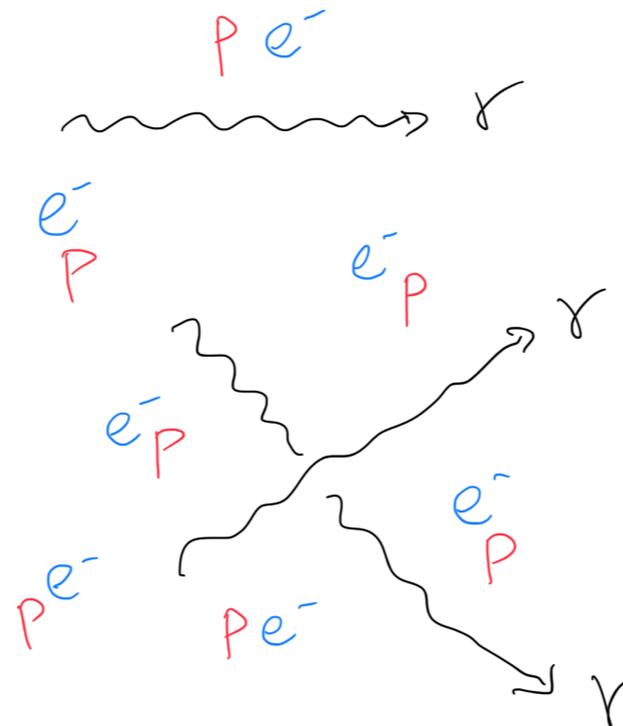
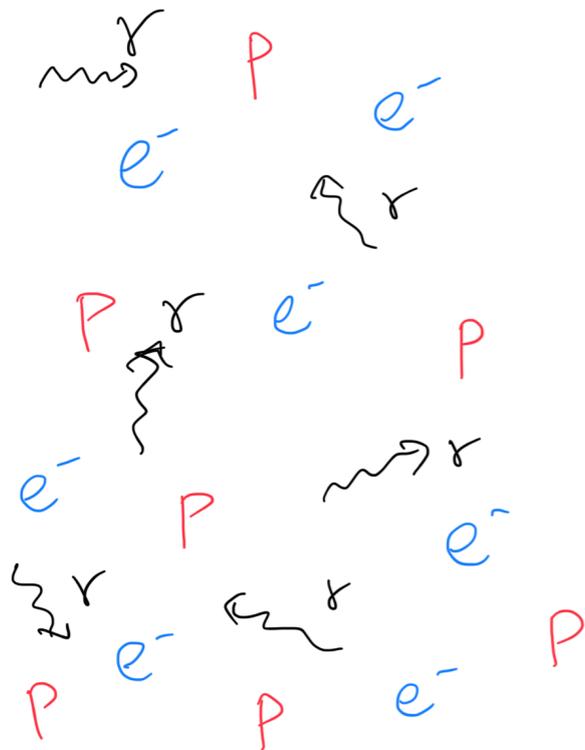
他の粒子たちと熱平衡

熱平衡から外れる

あとは宇宙膨張に従うだけ

例 1 : CMB

① $T > 3000 \text{ K}$ → ② $T \sim 3000 \text{ K}$ → ③ 2.7 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**

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

例 2 : BBN

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

n p n
 p n p
 n p n
 p n p

+ $\mathcal{O}(10^0) \times (e^\pm, \gamma, \nu)$

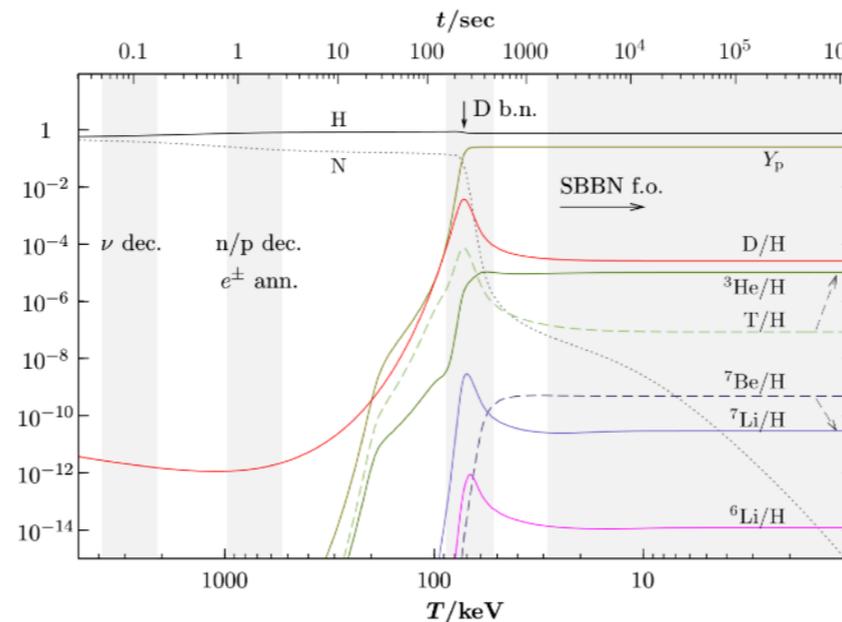


fig. from 1011.1054

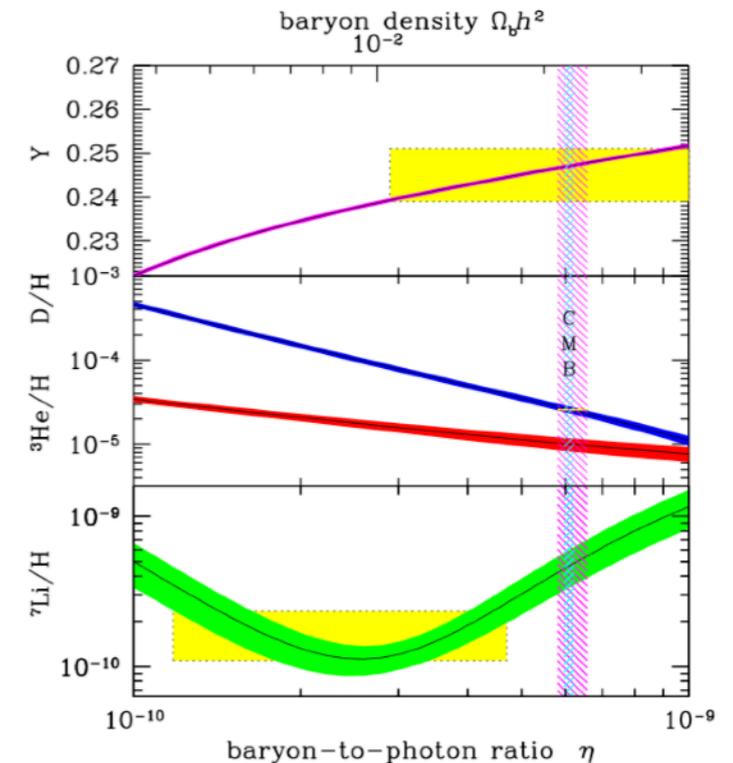


fig. from PDG

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

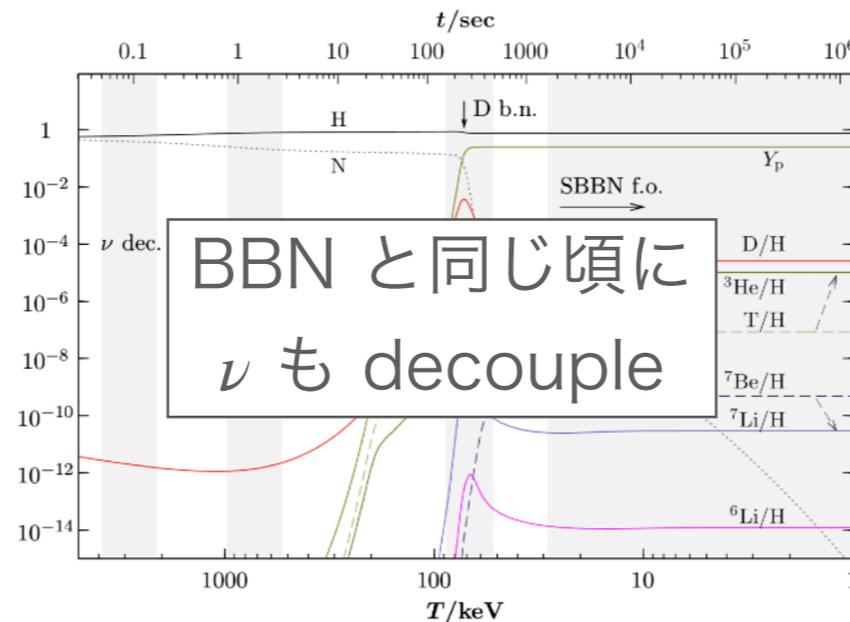
あとは宇宙膨張に従うだけ

例 3 : CνB

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

n p n
 p n p
 n p n
 p n p n

+ $\mathcal{O}(10^0) \times (e^\pm, \gamma, \nu)$

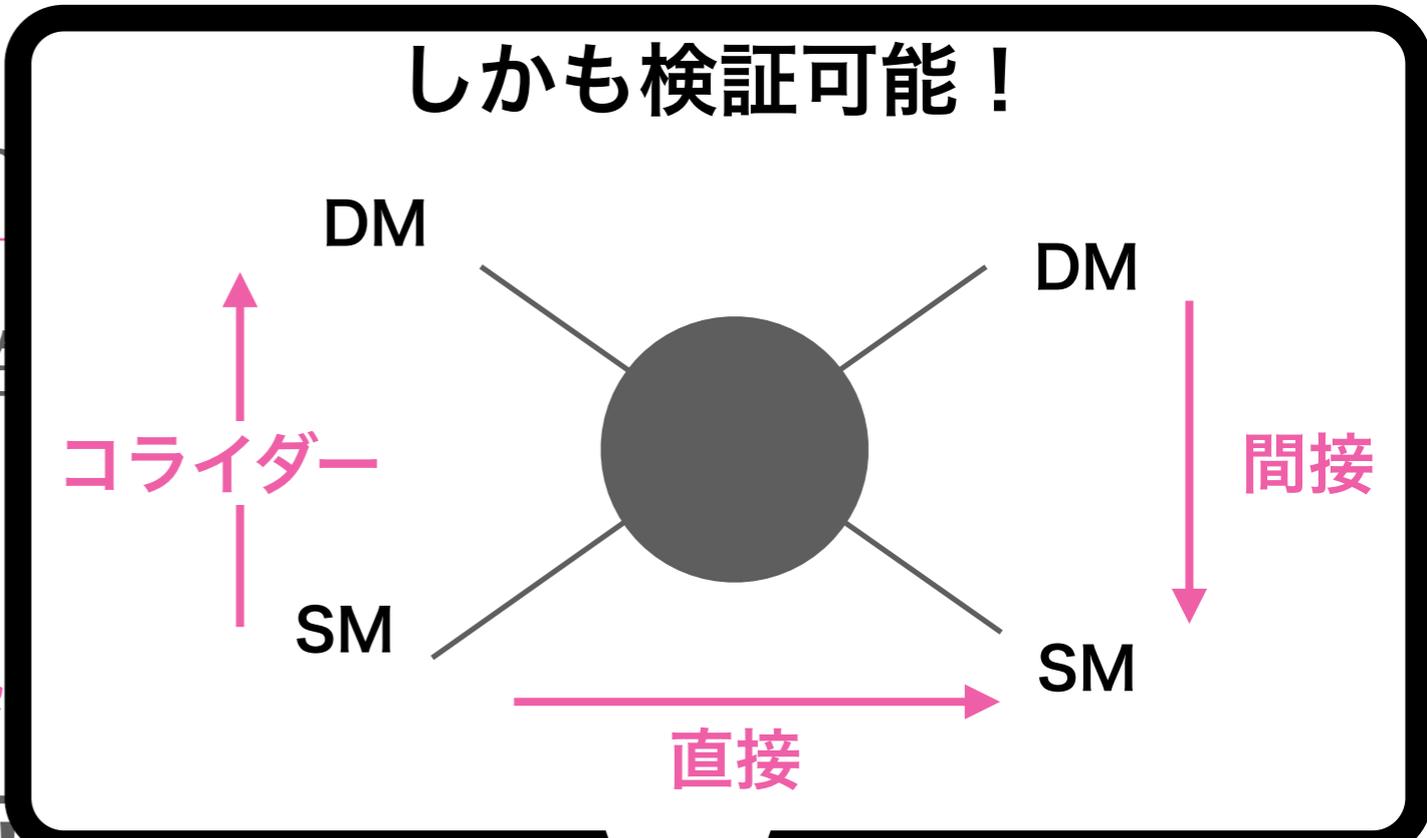


1.9 K の CνB がいるはず。
いつか観測出来るかも？

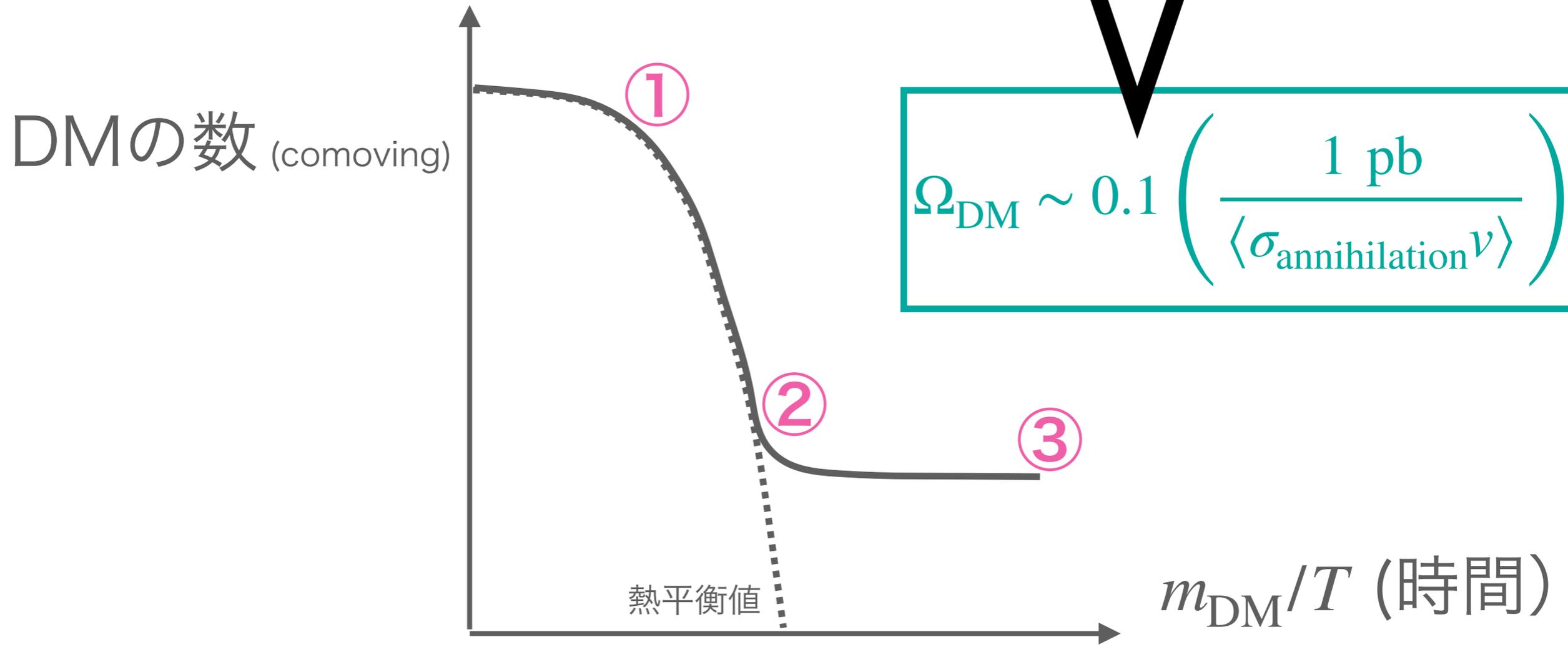
1. WIMP (= Weakly-Interacting)

▶ WIMP 最大の魅力 = シンプルな

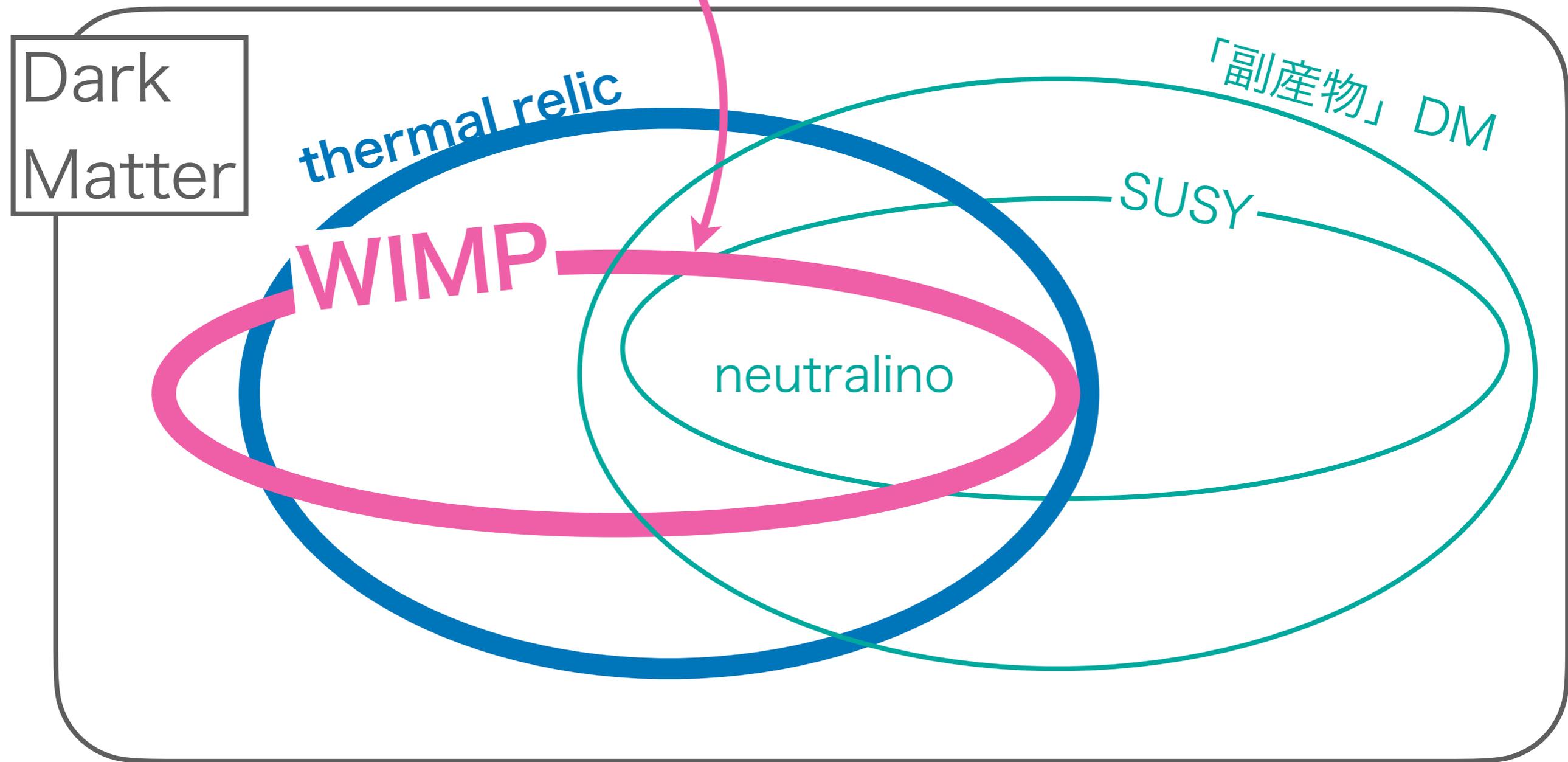
- ① 熱かった → ②
 ① 他粒子たちと熱平衡 ② 熱



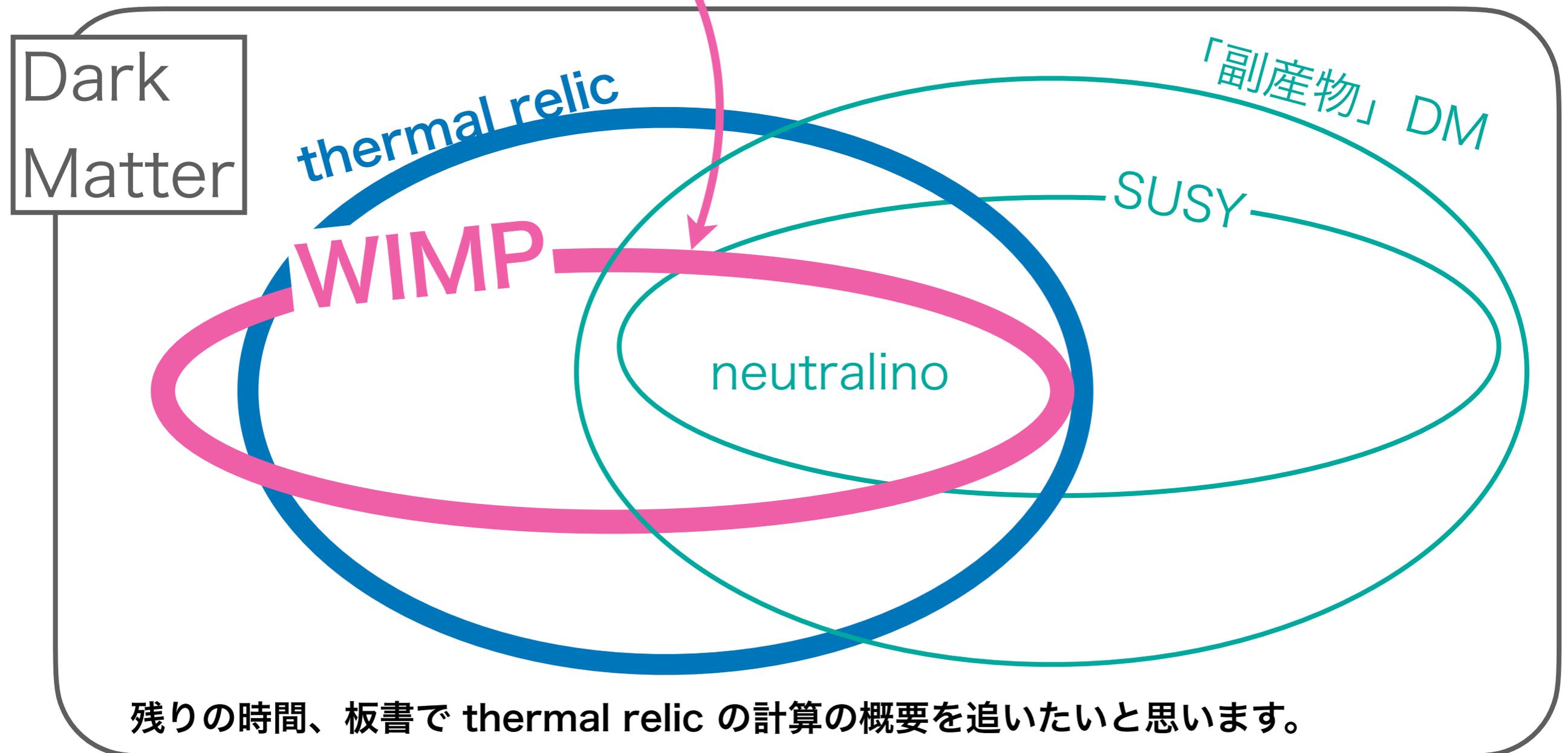
例4になるか? : WIMP DM !!!



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

neutralino

SUSY

「副産物」 DM

残りの時間、板書で thermal relic の計算の概要を追いたいと思います。