

# 中性子星の表面温度観測による 暗黒物質の探索可能性

柳 圭祐 (東京大学)

Ongoing work with 濱口幸一 & 永田夏海

イントロ

# 中性子星を使ったWIMP探索の提案

## Weakly Interacting Massive Particle (WIMP)

暗黒物質の有力な候補で、標準模型の弱い相互作用をする

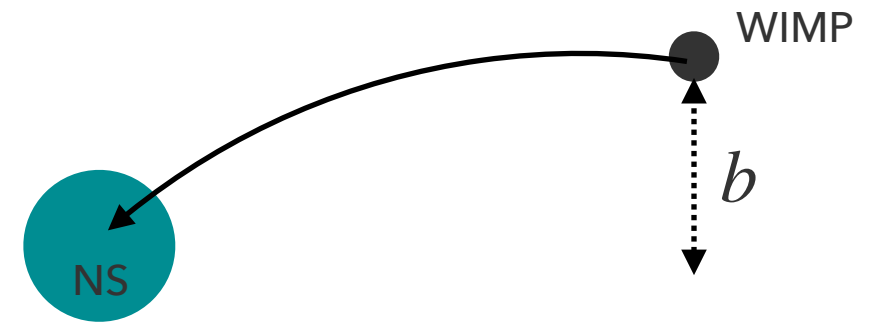
最近「WIMPを中性子星の温度観測によって探索しよう」という提案がされている

[Kouvaris, 0708.2362 ;Baryakhtar+, 1704.01577]

WIMPと中性子の散乱により、WIMPが星に捕獲

→ 散乱や対消滅で熱エネルギーへ

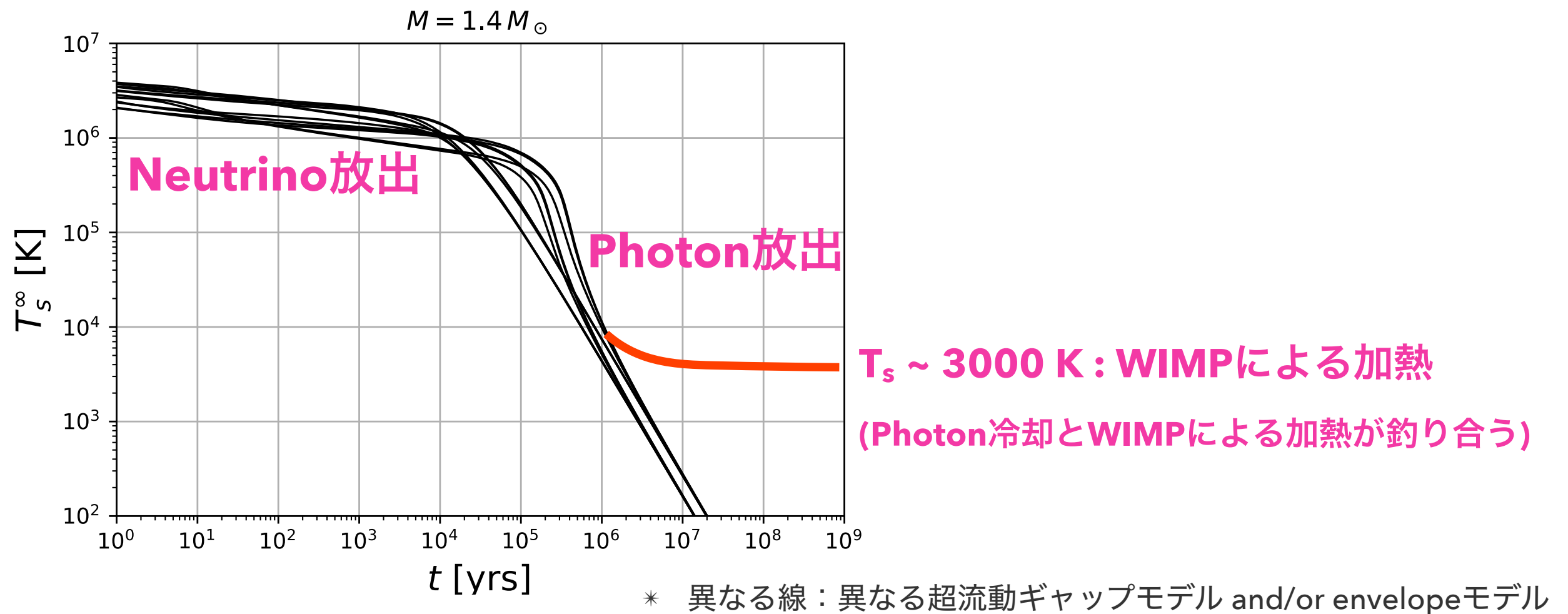
$$L_{\text{WIMP}} = (\text{Energy flux}) \times (\text{Capture probability})$$
$$\sim \rho_{\text{DM}} v_{\text{DM}} \pi b_{\text{max}}^2 \propto \sigma_n$$



$\text{GeV} \lesssim m_\chi \lesssim \text{PeV}$  ,  $\sigma_n \gtrsim 2 \times 10^{-45} \text{ cm}^2$  のWIMPに特に感度がある

# 中性子星の冷却曲線

内部からのニュートリノ放出+表面からのPhoton放出

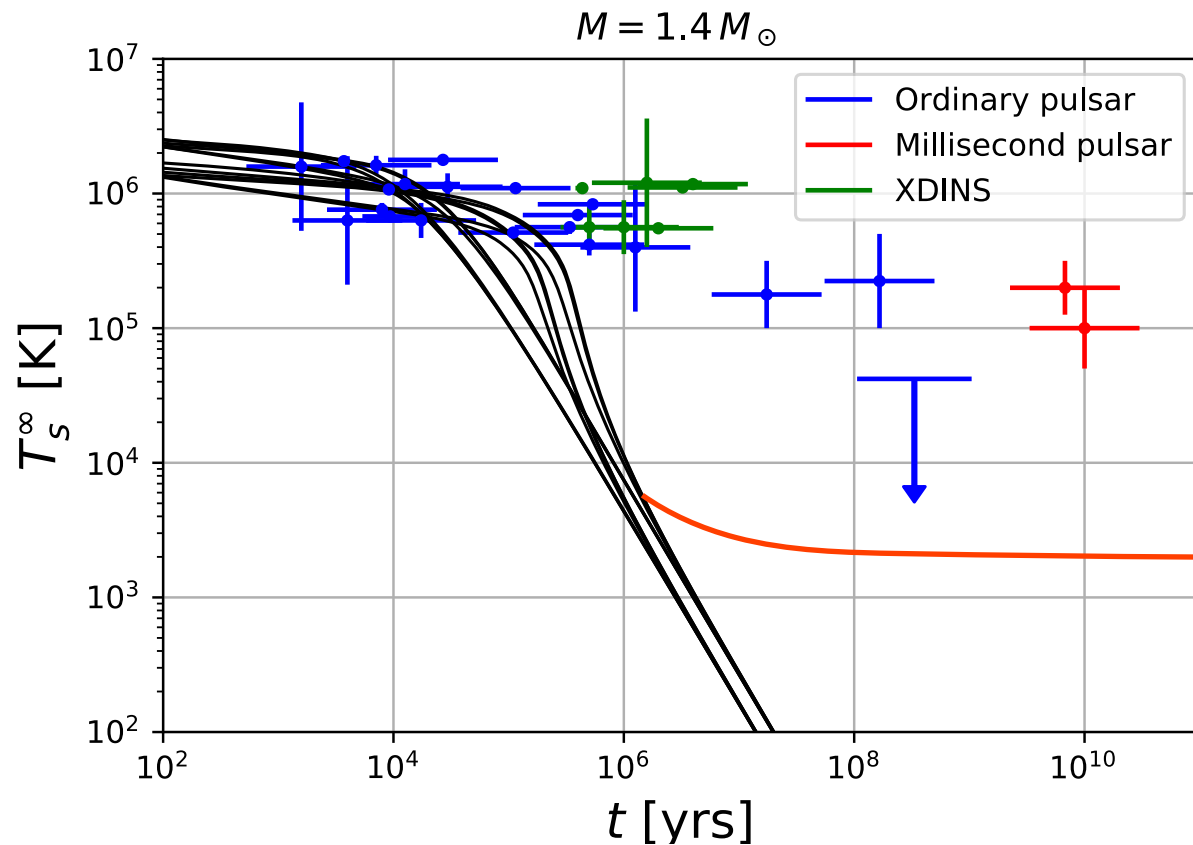


- WIMPなし :  $t > 10$  Myr で  $T_s < 1000$  K
- WIMPあり :  $t > 10$  Myr で  $T_s \sim 3000$  Kまで暖まる

[Kouvaris, 0708.2362 ;Baryakhtar+, 1704.01577]

# 本当に可能か？

観測からWIMP以外の加熱機構の存在が示唆されている



- $t > 10 \text{ Myr}$  で  $T_s \sim 10^5 \text{ K}$  もある中性子星がいくつか見つかった
- $T_s \propto \rho_{\text{DM}}^{1/4}$  : WIMPだけでは  $T_s \sim 10^5 \text{ K}$  は出せない
- $t \sim 100 \text{ Myr}$  で  $T_s < 4 \times 10^4 \text{ K}$  という冷たい星も見つかった (PSR2144-3933)

冷却機構は概ね理論的にわかっているが、加熱機構に関しては議論がある

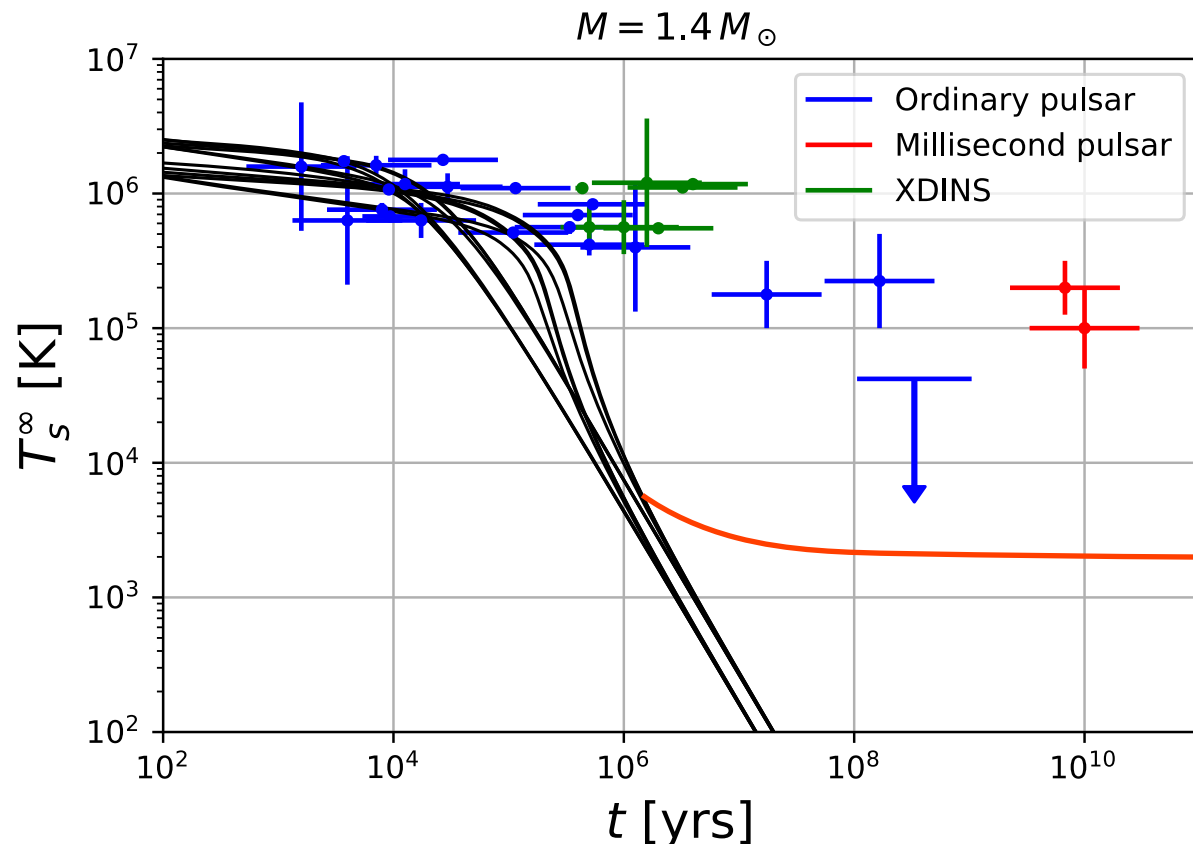
[Gonzalez & Reisenegger, 1005.5699]

- 非平衡Urca
- 超流動渦糸
- 磁場の崩壊 e.t.c...

**WIMPの効果が本当に見えるか？見えるならその条件を明らかにしたい！**

# 本当に可能か？

観測からWIMP以外の加熱機構の存在が示唆されている



- $t > 10 \text{ Myr}$  で  $T_s \sim 10^5 \text{ K}$  もある中性子星がいくつか見つかった
- $T_s \propto \rho_{\text{DM}}^{1/4}$  : WIMPだけでは  $T_s \sim 10^5 \text{ K}$  は出せない
- $t \sim 100 \text{ Myr}$  で  $T_s < 4 \times 10^4 \text{ K}$  という冷たい星も見つかった (PSR2144-3933)

冷却機構は概ね理論的にわかっているが、加熱機構に関しては議論がある

[Gonzalez & Reisenegger, 1005.5699]

- 非平衡Urca
- 超流動渦糸
- 磁場の崩壊 e.t.c...

**WIMPの効果が本当に見えるか？見えるならその条件を明らかにしたい！**

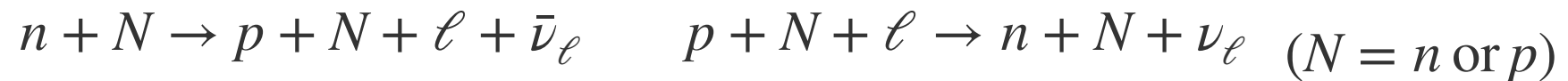
# 中性子星の冷却・加熱理論

# 理論：中性子星の冷却

$$C \frac{dT}{dt} = -L_\nu - L_\gamma + L_H$$

[e.g., Page+, astro-ph/0403657]

- $t < 10 - 100 \text{ yr}$  (核子は常流動) : Modified Urca process

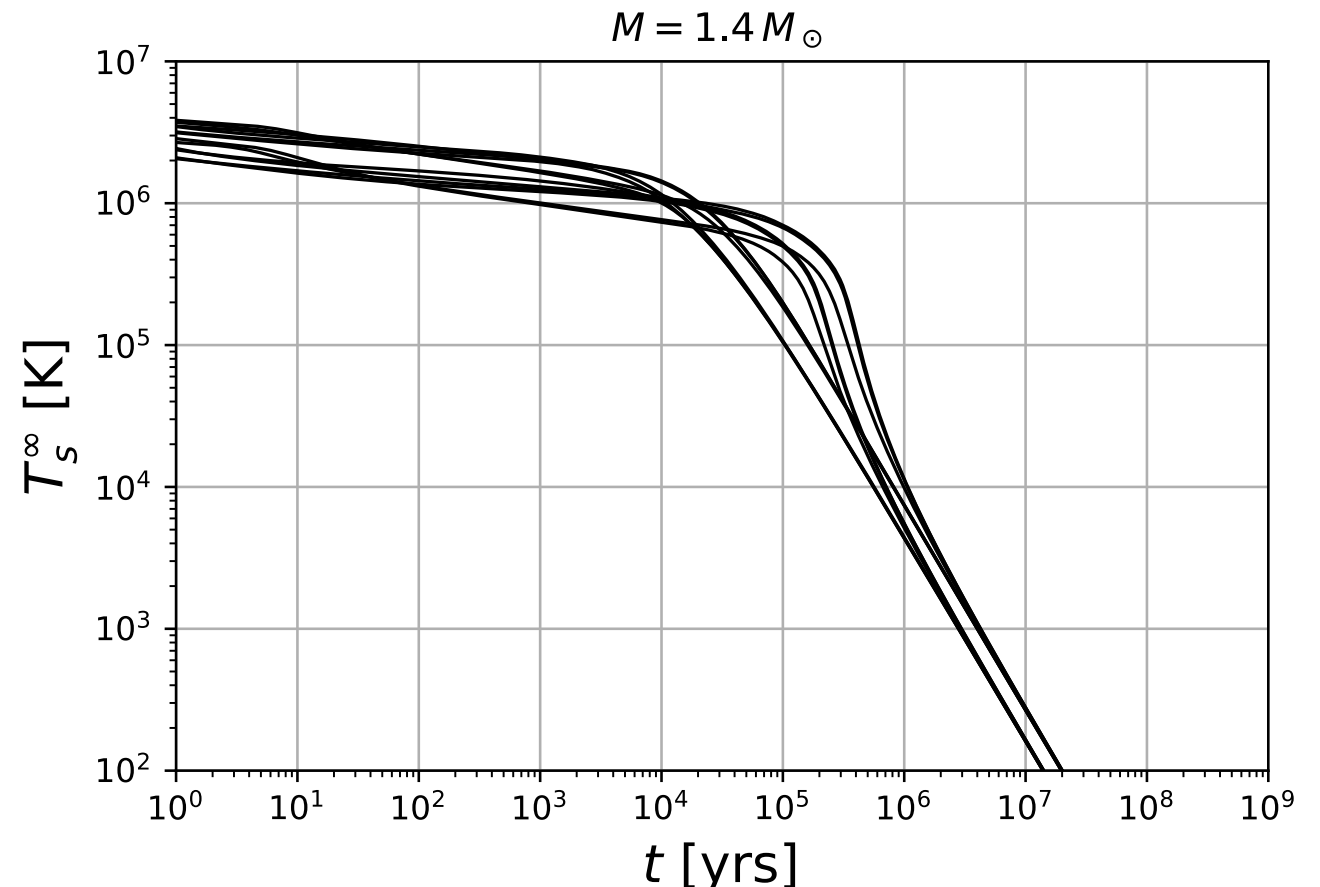


- $10 - 100 \text{ yr} < t < 10^5 \text{ yr}$  (核子は超流動) : Superfluid pair-breaking and formation



- $t > 10^5 \text{ yr}$  : 表面からのPhoton放出

$$L_\gamma = 4\pi R^2 \sigma_B T_s^4$$





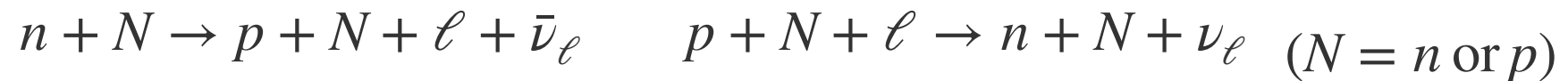
# 理論：中性子星の冷却

$$C \frac{dT}{dt} = -L_\nu - L_\gamma + L_H$$

[e.g., Page+, astro-ph/0403657]

実はここからは加熱も起こる

- $t < 10 - 100 \text{ yr}$  (核子は常流動) : Modified Urca process

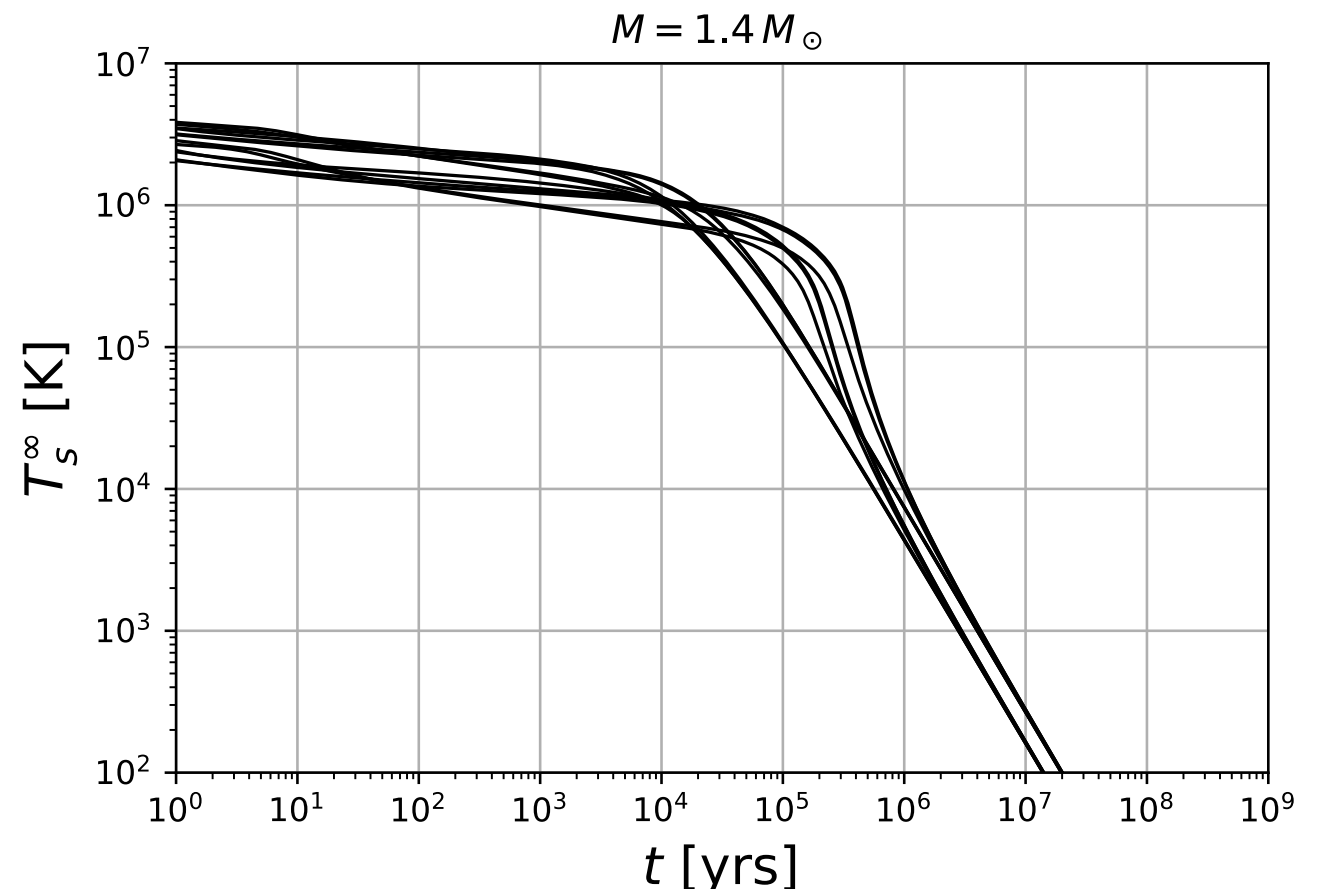


- $10 - 100 \text{ yr} < t < 10^5 \text{ yr}$  (核子は超流動) : Superfluid pair-breaking and formation



- $t > 10^5 \text{ yr}$  : 表面からのPhoton放出

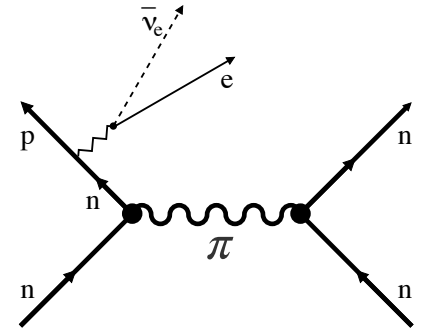
$$L_\gamma = 4\pi R^2 \sigma_B T_s^4$$



# “非平衡” Modified Urca process

## Modified Urca process

$$(1) : n + N \rightarrow p + N + \ell + \bar{\nu}_\ell \quad (2) : p + N + \ell \rightarrow n + N + \nu_\ell$$

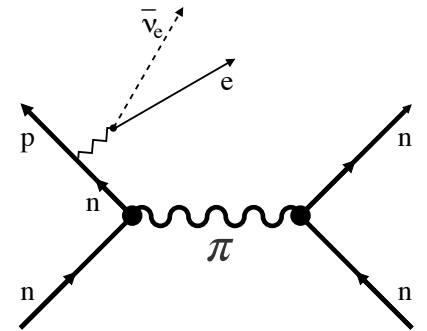


- よくある cooling 計算では  $n \rightleftharpoons p + e$  の平衡が仮定される (ベータ平衡)

$$\Gamma_{n \rightarrow p+e} = \Gamma_{p+e \rightarrow n}$$

# “非平衡” Modified Urca process

## Modified Urca process

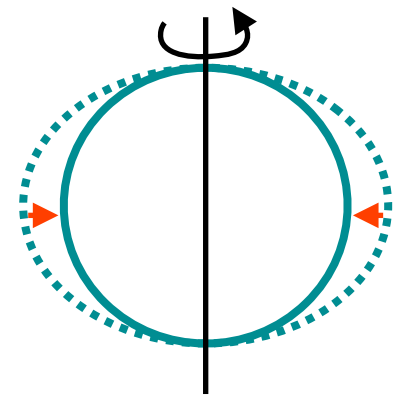


- よくある cooling 計算では  $n \rightleftharpoons p + e$  の平衡が仮定される (ベータ平衡)

$$\Gamma_{n \rightarrow p+e} = \Gamma_{p+e \rightarrow n}$$

パルサーではベータ平衡の仮定は正しくない! [Reisenegger, astro-ph/9410035]

- パルサーの回転は徐々に遅くなる (*Spin-down*)
- 遠心力の低下 → 時々刻々と  $n, p, e$  の ベータ平衡における数密度が変化



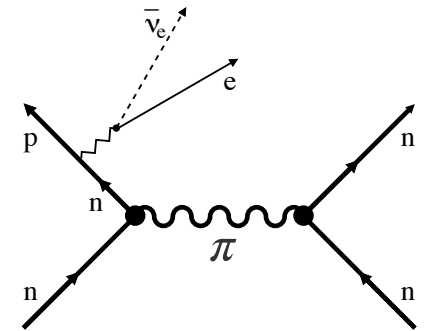
↑  
重力、圧力、遠心力の釣り合い

- (1)と(2)が平衡からずれ、エントロピー生成によって発熱

$$L_H \sim (\mu_n - \mu_p - \mu_e) (\Gamma_{n \rightarrow p+e} - \Gamma_{p+e \rightarrow n}) > 0$$

# “非平衡” Modified Urca process

## Modified Urca process

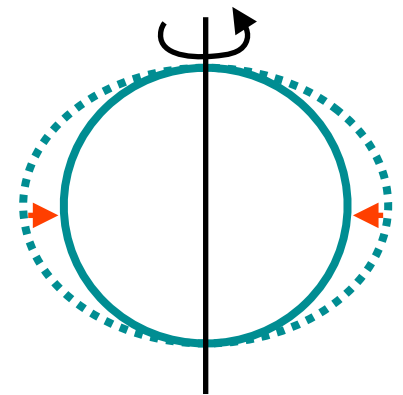


- よくある cooling 計算では  $n \rightleftharpoons p + e$  の平衡が仮定される (ベータ平衡)

$$\Gamma_{n \rightarrow p+e} = \Gamma_{p+e \rightarrow n}$$

パルサーではベータ平衡の仮定は正しくない！ [Reisenegger, astro-ph/9410035]

- パルサーの回転は徐々に遅くなる (*Spin-down*)
- 遠心力の低下 → 時々刻々と  $n, p, e$  の ベータ平衡における数密度が変化



↑  
重力、圧力、遠心力の釣り合い

- (1)と(2)が平衡からずれ、エントロピー生成によって発熱

$$L_H \sim (\mu_n - \mu_p - \mu_e) (\Gamma_{n \rightarrow p+e} - \Gamma_{p+e \rightarrow n}) > 0$$

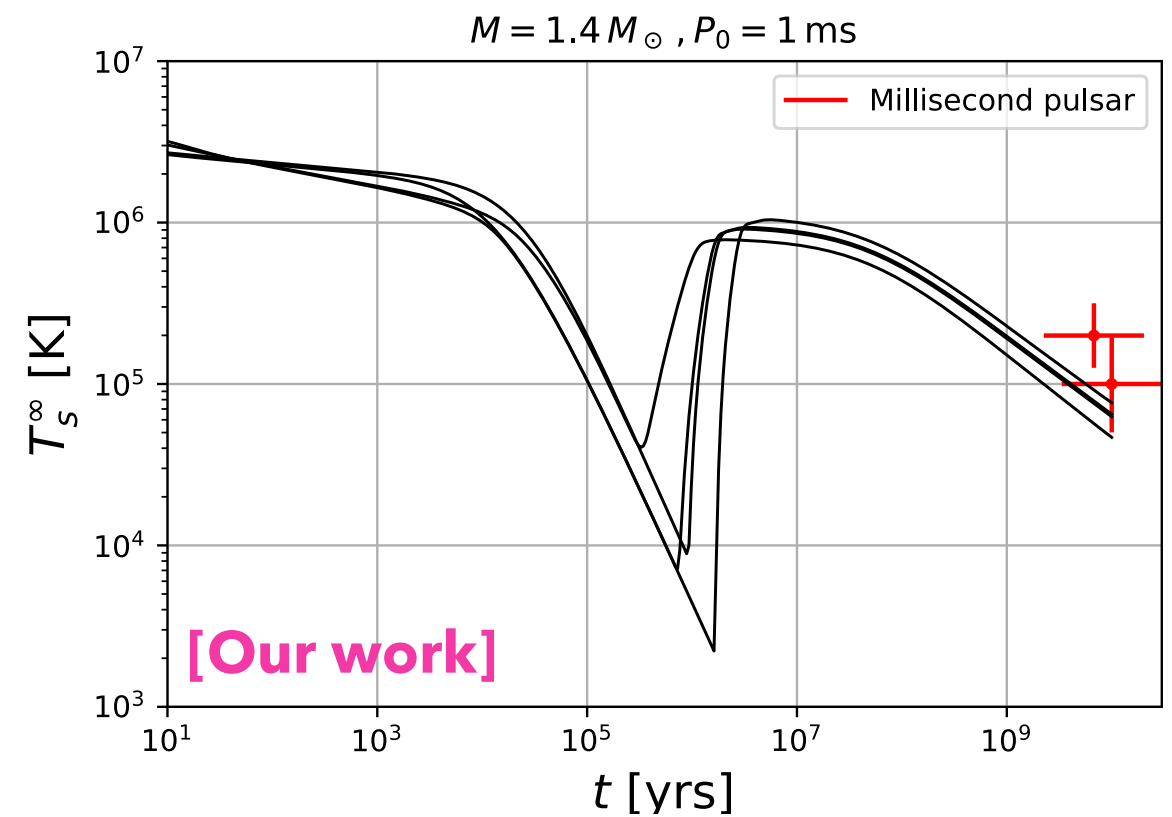
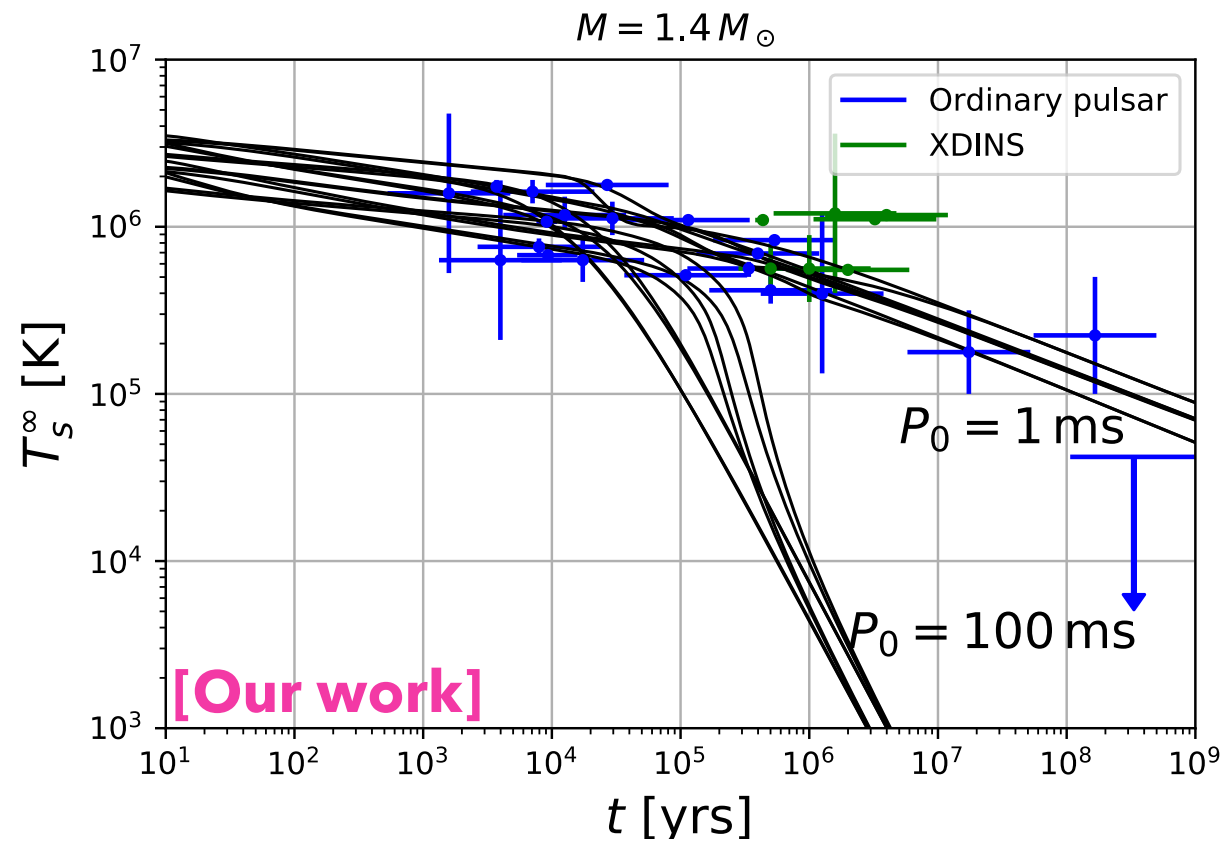
特にエキゾチックな物理を仮定せずに最小限の設定で起こる加熱現象である！

結果

# 数値シミュレーション

非平衡 Urca を考慮した際の観測との整合性・WIMP探索可能性を調べた

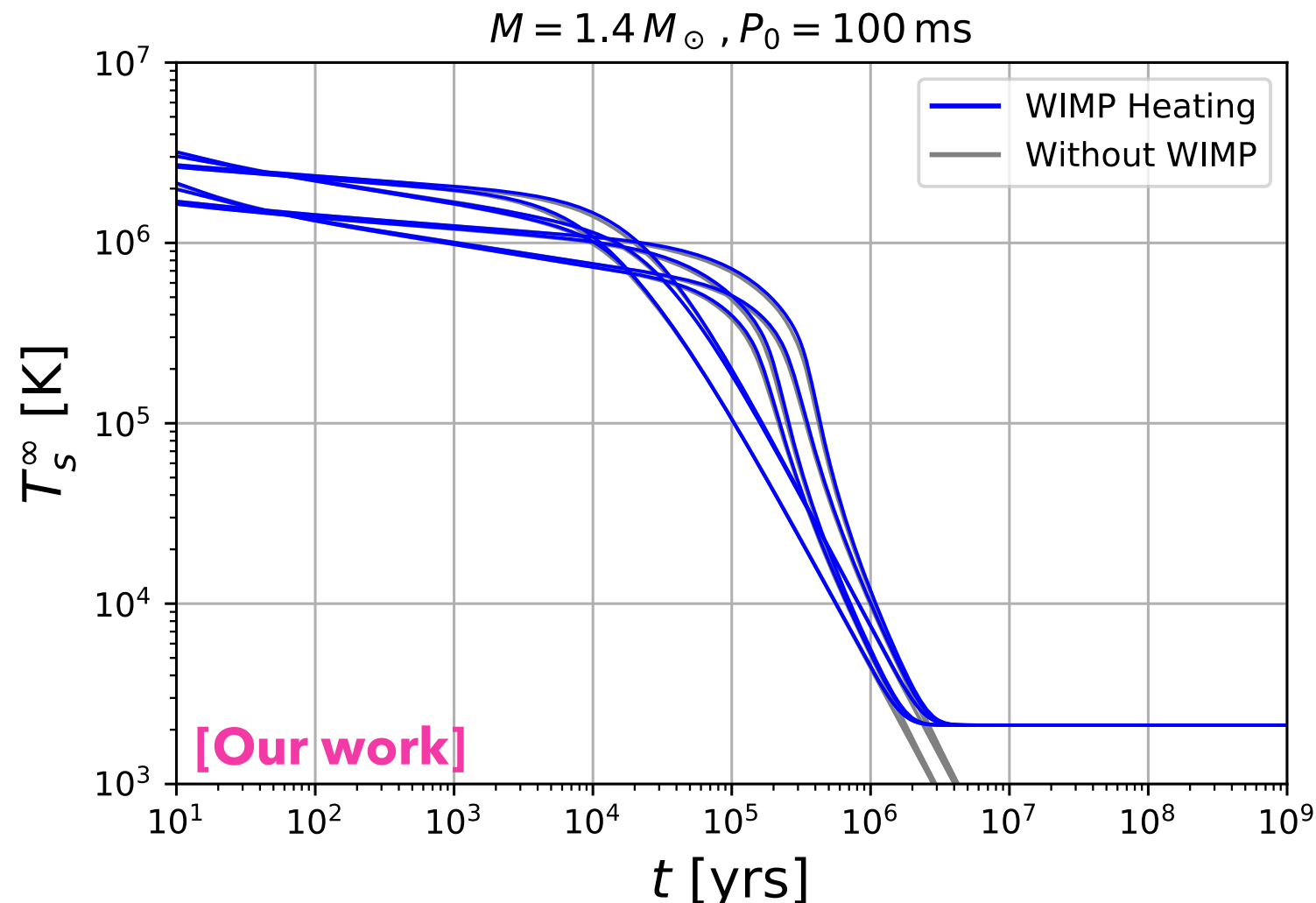
→ 内部加熱の大きさは初期の自転周期  $P_0$  に強く依存



- $P_0 \sim 1 \text{ ms}$  : 内部加熱が発動。観測されている熱い星を説明可
- $P_0 \sim 100 \text{ ms}$  : 加熱が弱い → WIMPによる加熱が見えると期待

# WIMPの効果が見える場合

WIMP :  $\text{GeV} \lesssim m_\chi \lesssim \text{PeV}$     $\sigma_n \gtrsim 2 \times 10^{-45} \text{ cm}^2$



- 通常のパルサーで、 $P_0 \sim 100 \text{ ms}$  ならばWIMPで  $T_s \sim 1000 \text{ K}$  に
- $P_0 \sim 100 \text{ ms}$  というのは中性子形成シミュレーションで得られる典型的な値のようである

# まとめ

## まとめ

- 非平衡 Urca process を考慮した際に、中性子星を使ったWIMP探索が可能な条件を明らかにした
- 基本的には生まれた時の回転周期が短すぎなければ良い ( $P_0 \sim 100$  ms)
- 中性子形成のシミュレーションによると、これは突飛な設定では無いようである

## 課題

- 非平衡 Urca 以外の加熱メカニズムでも同様に調べたい
- 観測の feasibility :  $\sim 1000$  K の表面温度を将来の望遠鏡で観測できるか？



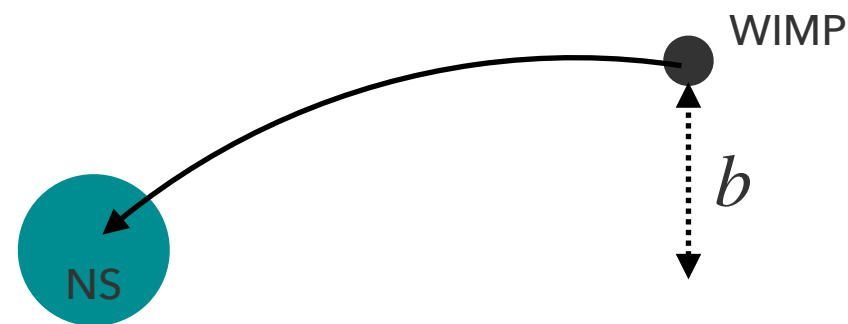
Backup

# 中性子星を使ったWIMP探索の提案

WIMPと中性子の散乱により、WIMPが星に捕獲される

→ 散乱や対消滅で熱エネルギーへ

[Kouvaris, 0708.2362 ;Baryakhtar+, 1704.01577]



$$L_{\text{WIMP}} = (\text{Energy flux}) \times (\text{Capture probability})$$
$$\sim \rho_{\text{DM}} v_{\text{DM}} \pi b_{\text{max}}^2 \propto \sigma_n$$

中性子星は重力が強い！

- DM flux が大きい  $b_{\text{max}} \sim 1000R$  ( $R \sim 10 \text{ km}$ )
- 相対論的速度のDMが衝突する

→ **Inelastic scattering**でも $\Delta M \sim 1 \text{ GeV}$ までなら起こる

Neutrino floor も無関係

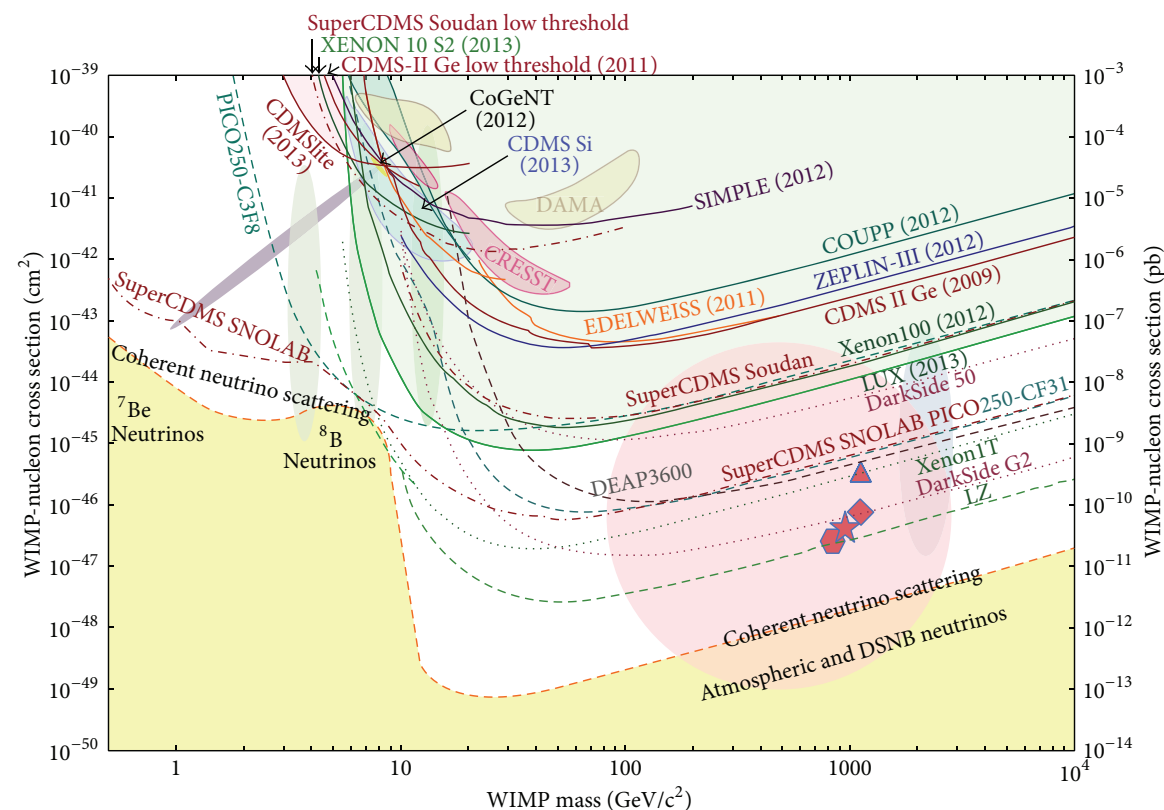
# WIMP暗黒物質の直接検出

## Weakly Interacting Massive Particle (WIMP)

- 標準模型の弱い相互作用をする安定な粒子
- $m \sim 100 \text{ GeV} - 1 \text{ TeV}$  でダークマターの残存量を説明可能

## 暗黒物質の直接検出

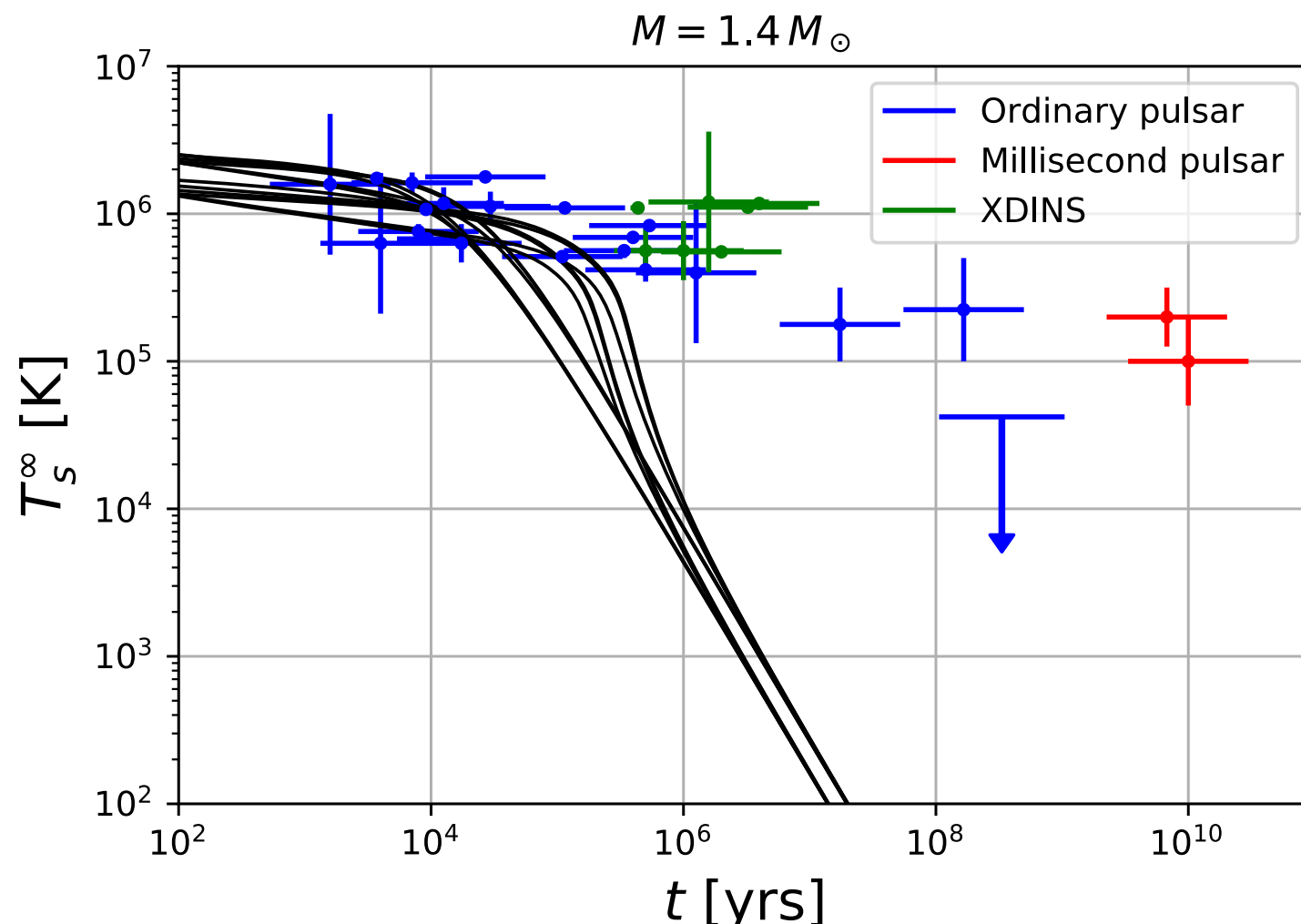
- DM + nucleus  $\rightarrow$  DM + nucleus
- Neutrino floor という限界がある**
- Inelastic scattering には insensitive ( $\Delta M \sim 100 \text{ keV}$ )**



# 観測：中性子星の分類

$t \gtrsim 10^3 \text{ yr}$  で表面温度が観測されている中性子星は3つに大別される

- (普通の) パルサー：多くの中性子星はパルサーとして見つかる  $P \sim 1 \text{ s}, \dot{P} \sim 10^{-15}$
- ミリ秒パルサー：連星系のリサイクルでできたと考えられている。回転周期が短く、周期の変化率が小さい  
 $P \sim 1 \text{ ms}, \dot{P} \sim 10^{-20}$
- XDINs (X-ray dim Isolated Neutrons Stars)：マグネターの名残と考えられており、磁場が比較的強い  
 $P \sim 10 \text{ s}, \dot{P} \sim 10^{-13}$



$P$ : 自転周期

$$B \sim 3.2 \times 10^{19} \left( \frac{P \dot{P}}{s} \right)^{1/2} \text{ G}$$