

中性子星NS1987Aの温度観測 から何がわかるか？

土肥 明 (理研ABBL・iTHEMS)

共同研究者

Emanuele Greco(INAF), 長瀧重博 (理研, OIST), 小野勝臣 (中央研究院)

Marco Miceil(INAF), Salvatore Orlando(INAF), Barbara Olmi(INAF)

猪谷大輔 (慶応大), 関野裕太 (理研), 田島裕之 (東大)

本日のお品書き

- 導入：NS 1987Aの可能性

近年の ALMA観測を説明するシナリオ：

- PWN87A（非熱的放射）シナリオ

Greco+AD et al. 2021 ApJ 908 L45, 2022 ApJ 931 132

- NS87A（熱的放射）シナリオ

AD et al. 2023 ApJ 949 97

NS87Aのシナリオからわかること：

- 応用：クラスト物質の性質解明へ

AD et al., in prep.

NS 1987Aの可能性

超新星 1987A (SN1987A)



<https://public.nrao.edu/news/alma-finds-possible-sign-of-neutron-star-in-supernova-1987a/>

- 1987年に大マゼラン雲に出現したII型超新星。
- いくつかの観測より、中心天体（CCO）が中性子星（NS 1987A）であると思われる。

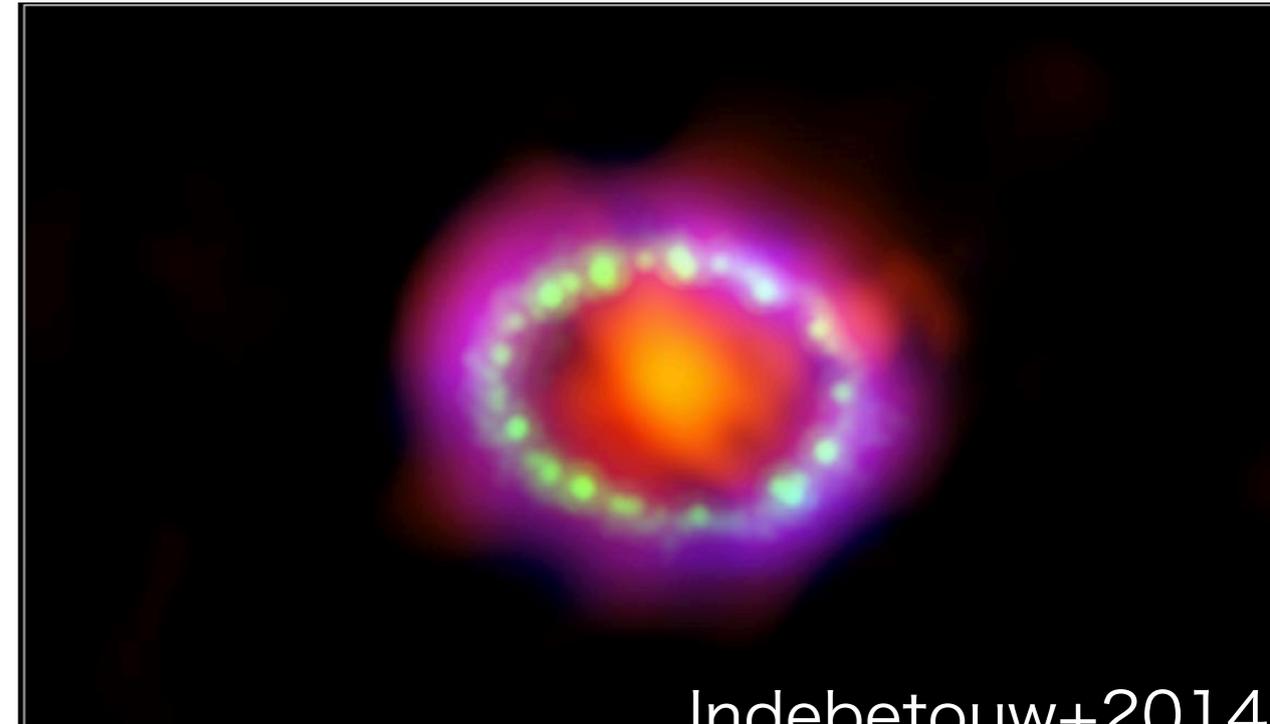
NS 1987Aの間接的観測

- 3重構造の星雲とFe, Ni等のclumpy領域の観測

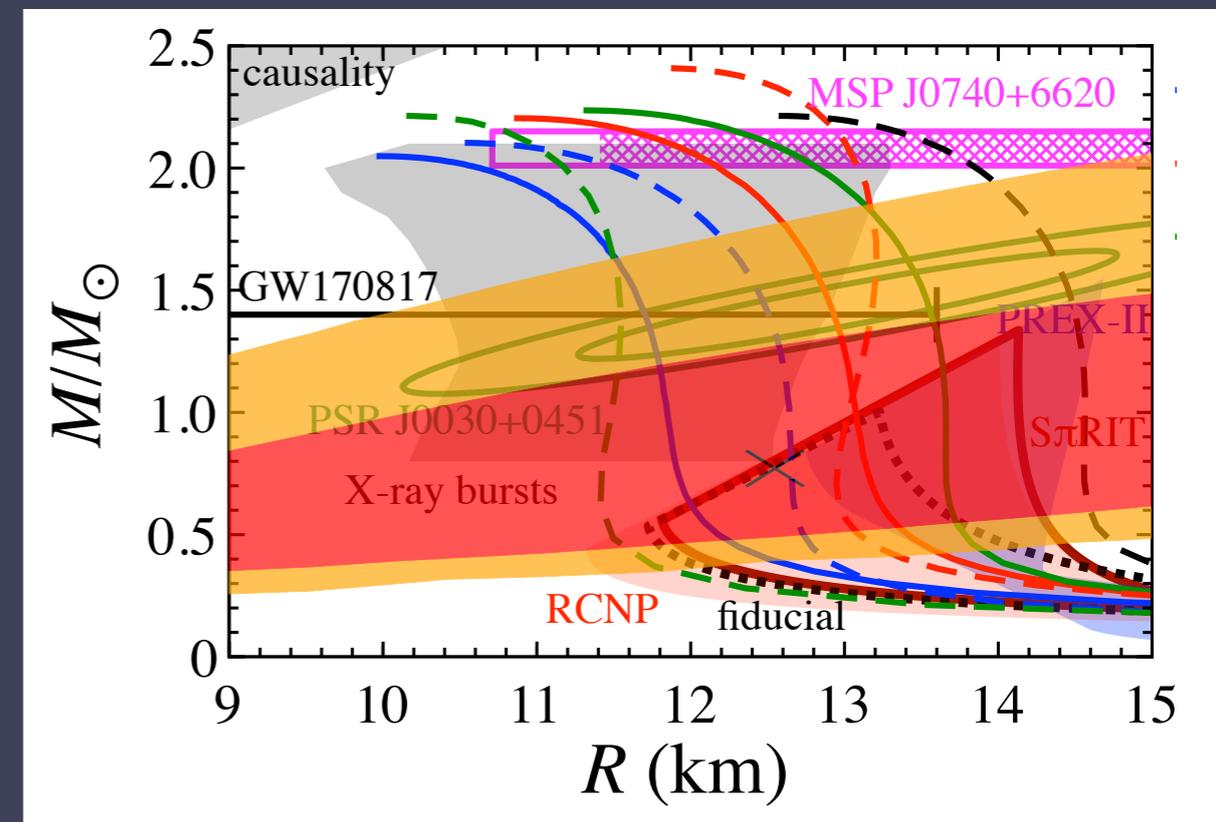
→ 中性子星の表面付近の重元素を反映か？

- カミオカンデによる10 s以上の超新星 ν 検出

→ 原始中性子星の証拠？ 予想されるMRもNSと無矛盾？！
(Harada et al., in prep.)



Indebetouw+2014



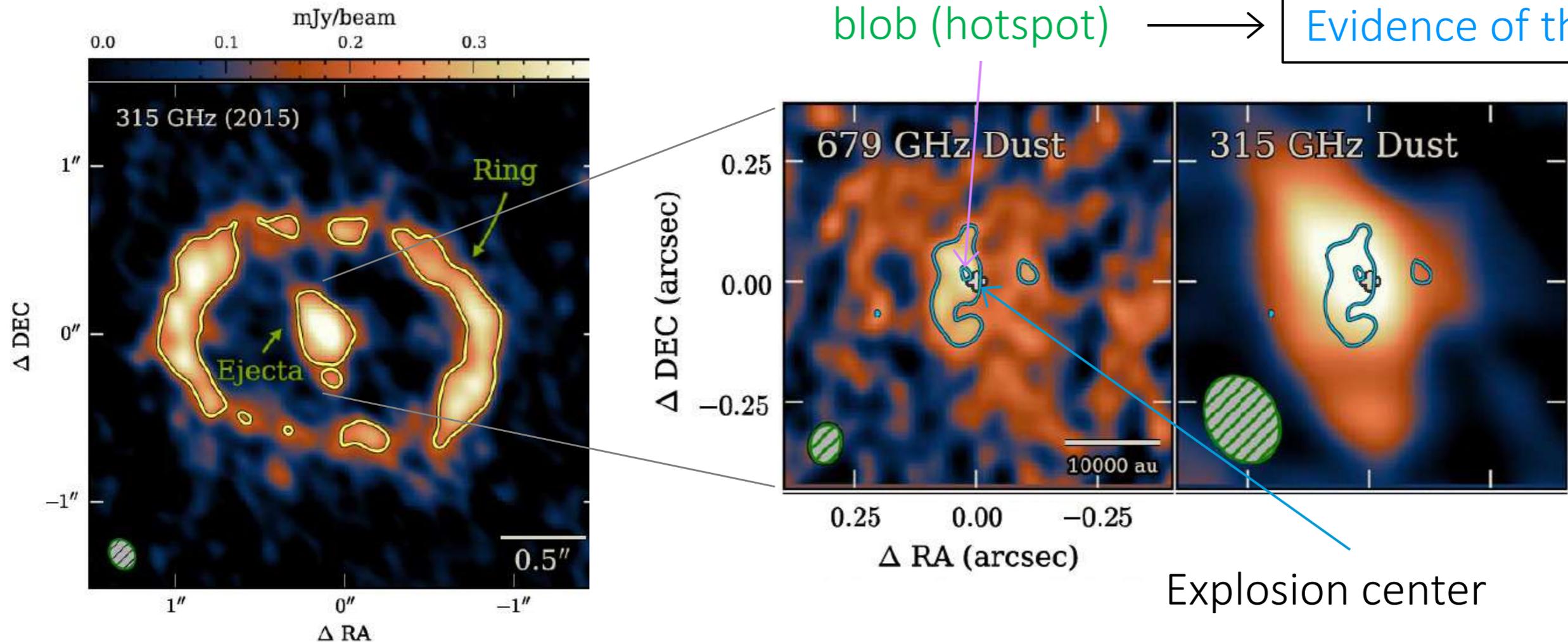
M-R関係への制限 (Sotani+ 2022のFig. 2に重ね書き)
(Harada+in prep. Sotani, Nishimura, Naito PTEP 2022 041D0 (2022))

NS 1987Aの初の直接的証拠？！

ALMAによるブローブ領域の観測

blob (hotspot)

Evidence of the NS?



○ blobの光度： $L_{\text{bol,obs}} = (26 - 90) L_{\odot}$

Cigan et al. ApJ 886 51 (2019)

Page et al. ApJ 898 125 (2020)

○ 熱源の起源として有力説は2つ：

● パルサーのスピンダウンによる非熱的放射(PWN87Aシナリオ)

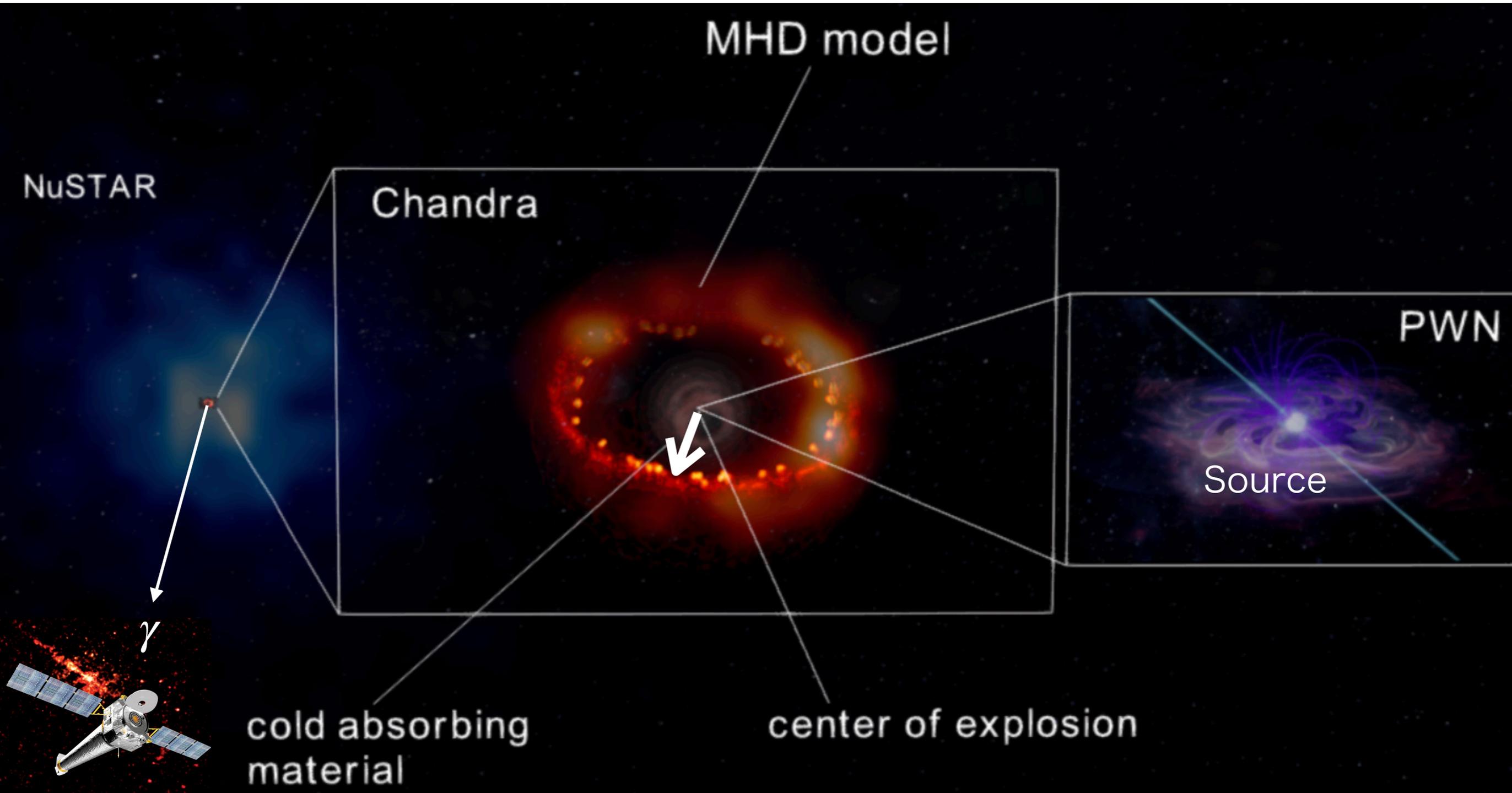
Greco+AD et al. 2021 ApJ 908 L45, 2022 ApJ 931 132

● NS表面からの熱的放射(NS87Aシナリオ)

AD et al. 2023 ApJ 949 97

PWN87Aシナリオ

イメージ (NS87Aシナリオでもほぼ一緒)

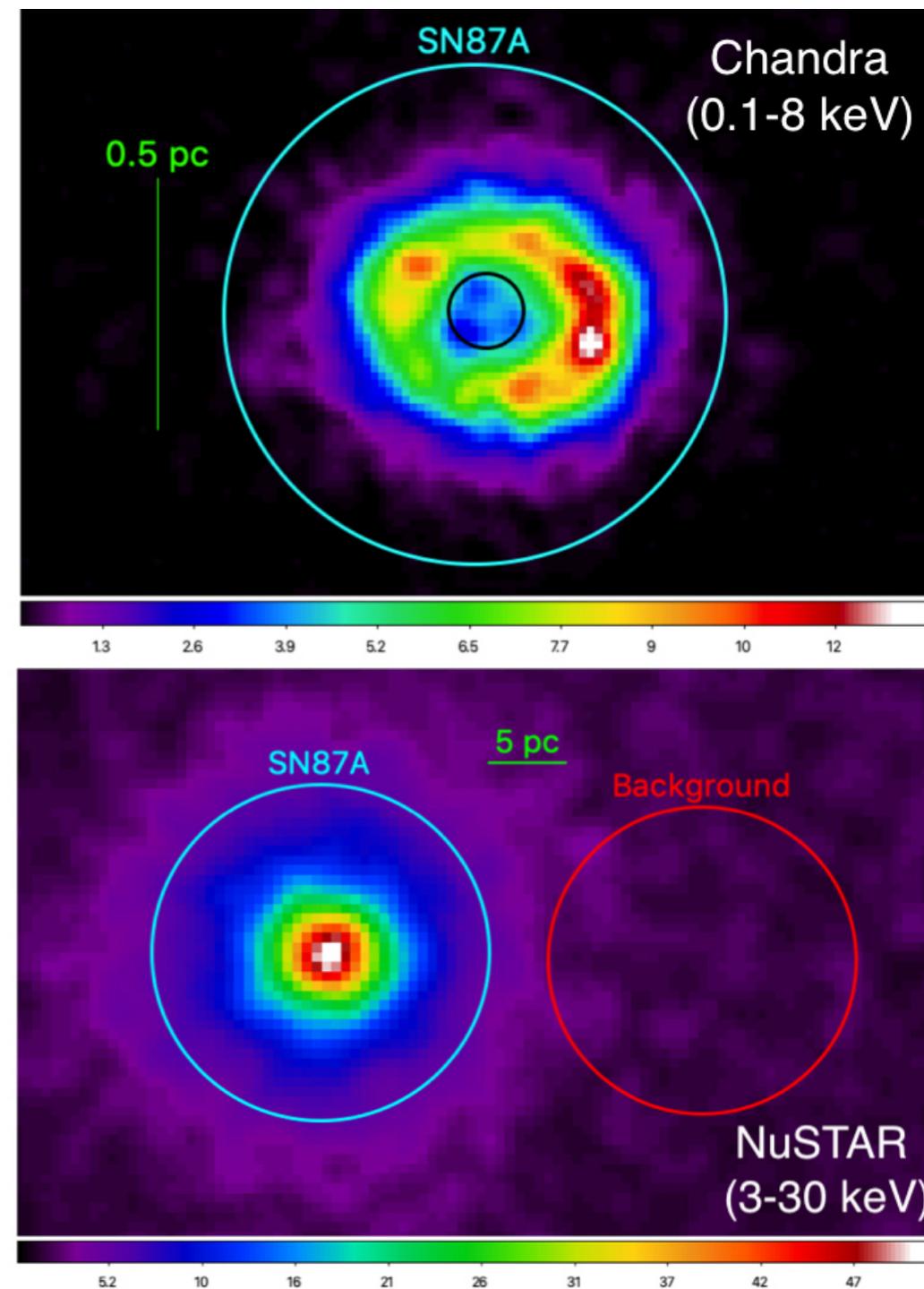


SN 1987Aの”標準”モデル+Power-law成分

- Chandra ACIS-SとNuSTAR、XMM-Newtonのスペクトルを使用
- “標準”モデル：星間吸収 (TBabs) + 2成分プラズマ (vnei*vnei)
- NS 1987AがPWNとして、スピンドウンに伴う非熱的放射、power-law成分 (pow) を加える。

エジェクタの吸収を受けるのでその柱密度+化学組成が必要

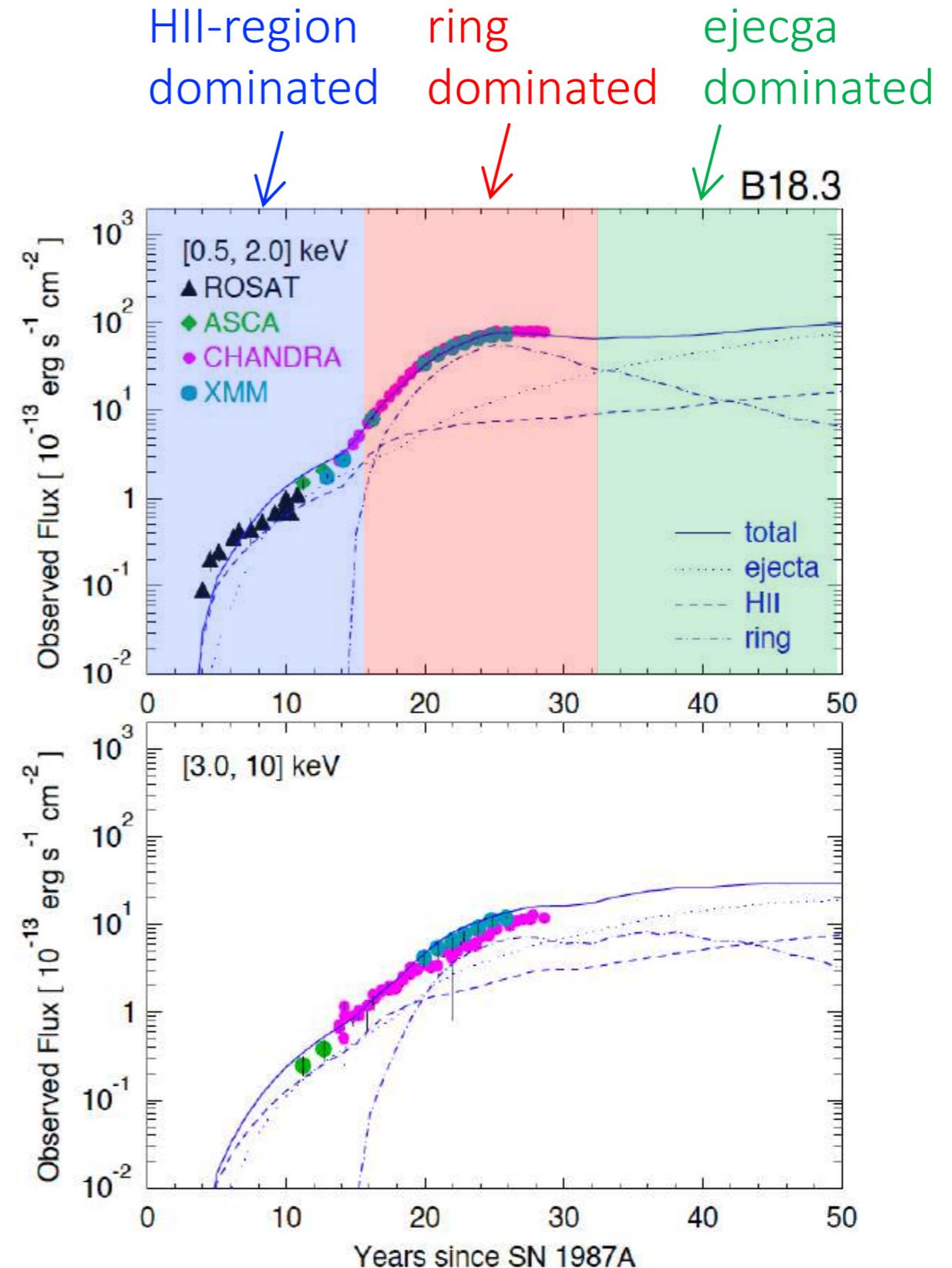
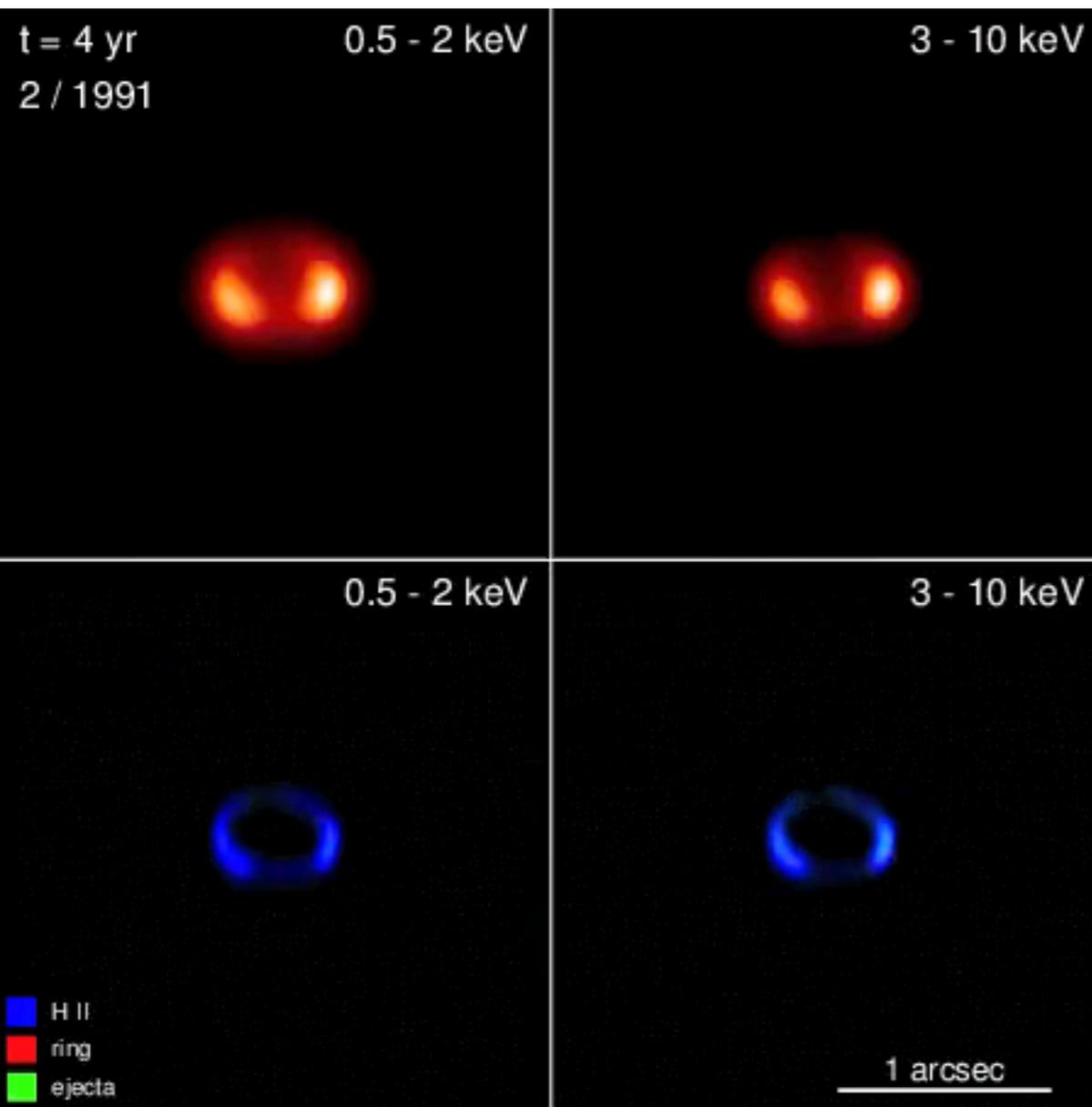
→SN 1987AのMHDモデルを採用



3D MHD Model of 87A up to 50 yrs

(Orlando et al., 2020, Ono et al., 2020)

- Binary merger progenitor model
B18.3 ($14M_{\odot}+9M_{\odot}$, Urushibata+18)
- SN 87AのX線観測と整合的。

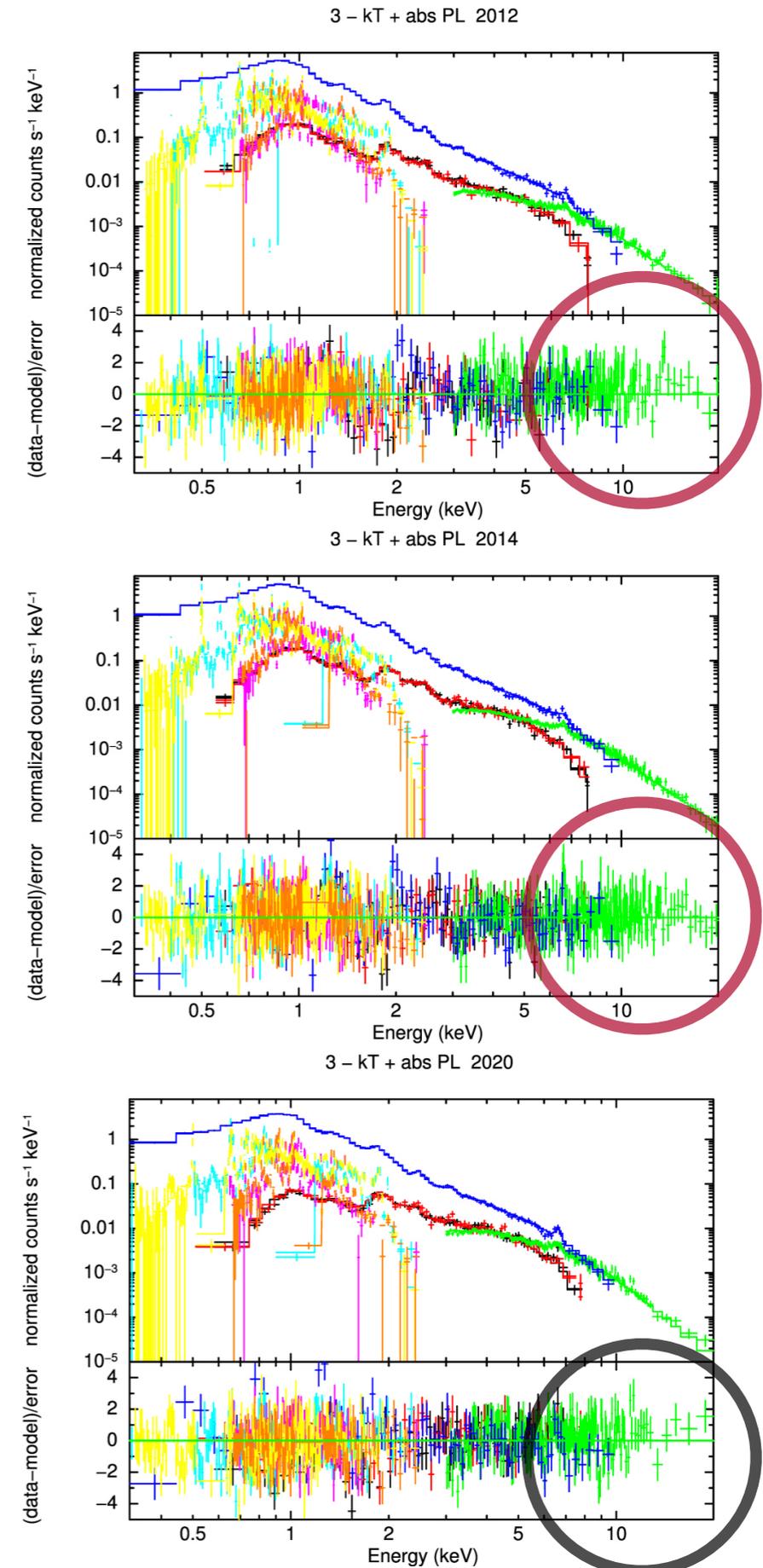


Spectral Fitting

- データ：Chandra/ACIS-S, XMM-Newton/pn, RGS, and NuSTAR/FPMA,B
- (エジェクタ吸収を含む) Power-law成分を考慮するとNuSTARの観測を説明可能！
- しかし、2020年の観測では別にPower-law成分がなくてもよい。 (See also Alp et al. 2021, 2022)

→ よりPower-law成分が吸収されたとすると、SNRの自由膨張モデル ($\rho_{\text{ejecta}} \propto t^{-3}$) と矛盾。PWN87Aからの放射の時間変化？或いは違うシナリオかも？ (NS87Aシナリオ???)

w/ pow (inc. MHD)



観測光度から推定される $P\dot{P}$ 関係

- 磁気双極子モデル

$$L_{\text{syn}} = -\eta\dot{E} = 4\pi^2 I_{\text{NS}} \dot{P} P^{-3}$$

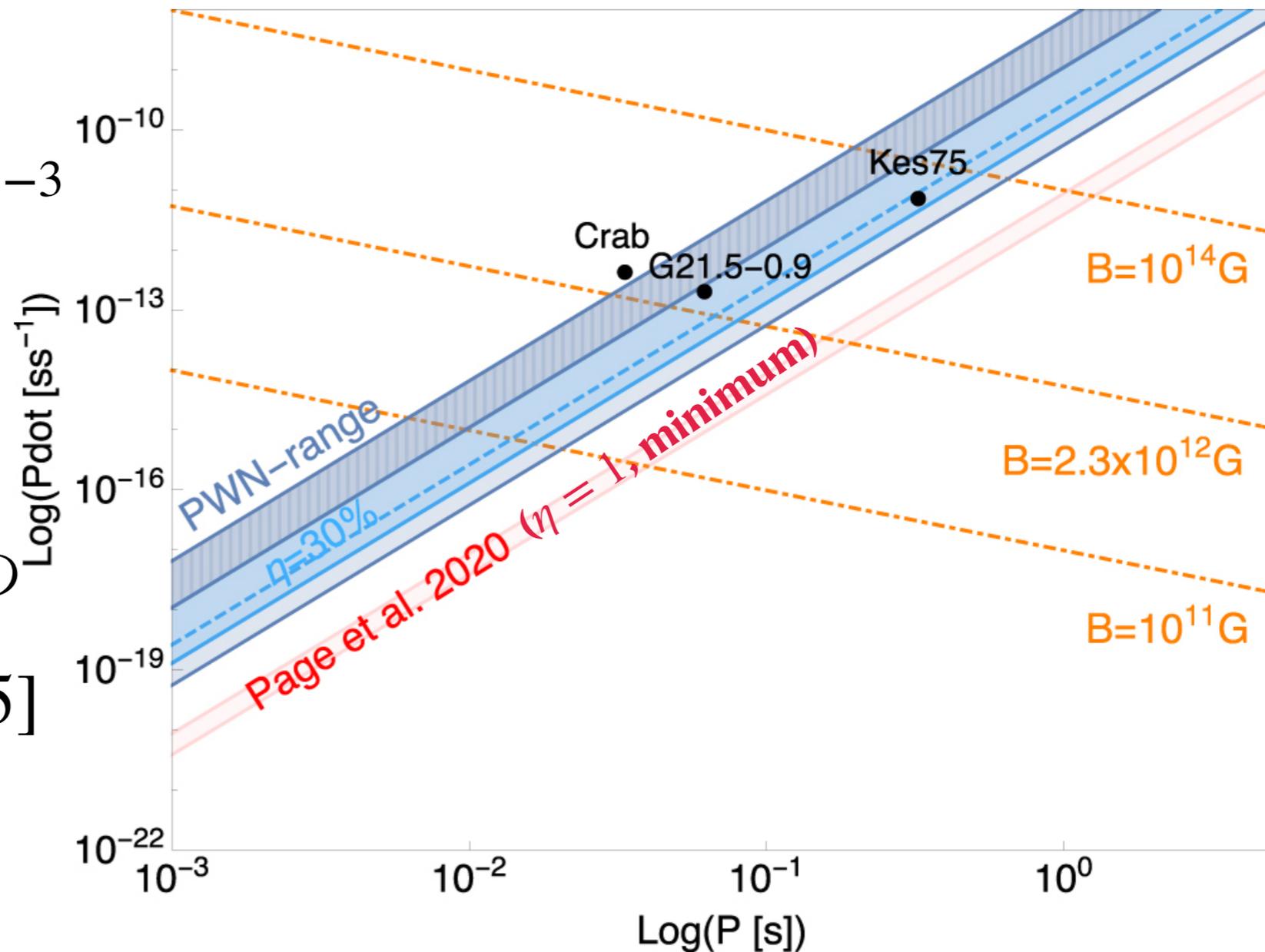
η : エネルギー変換効率

(5-70%とした)

- Cigan+2019の 10^{13} - 10^{16} Hzの

観測 $\rightarrow L_{\text{syn},37} = [0.15, 1.5]$

$\rightarrow \dot{E}_{37} = [0.3, 30]$



$$L_{\text{syn},37} = L / (10^{37} \text{ erg s}^{-1}) \quad \dot{E}_{\text{syn},37} = \dot{E} / (10^{37} \text{ erg s}^{-1})$$

NS 87Aシナリオ

SN 1987Aの”標準”モデル+Blackbody成分

- ”標準”モデルにblackbody成分 (diskbb) を加える。

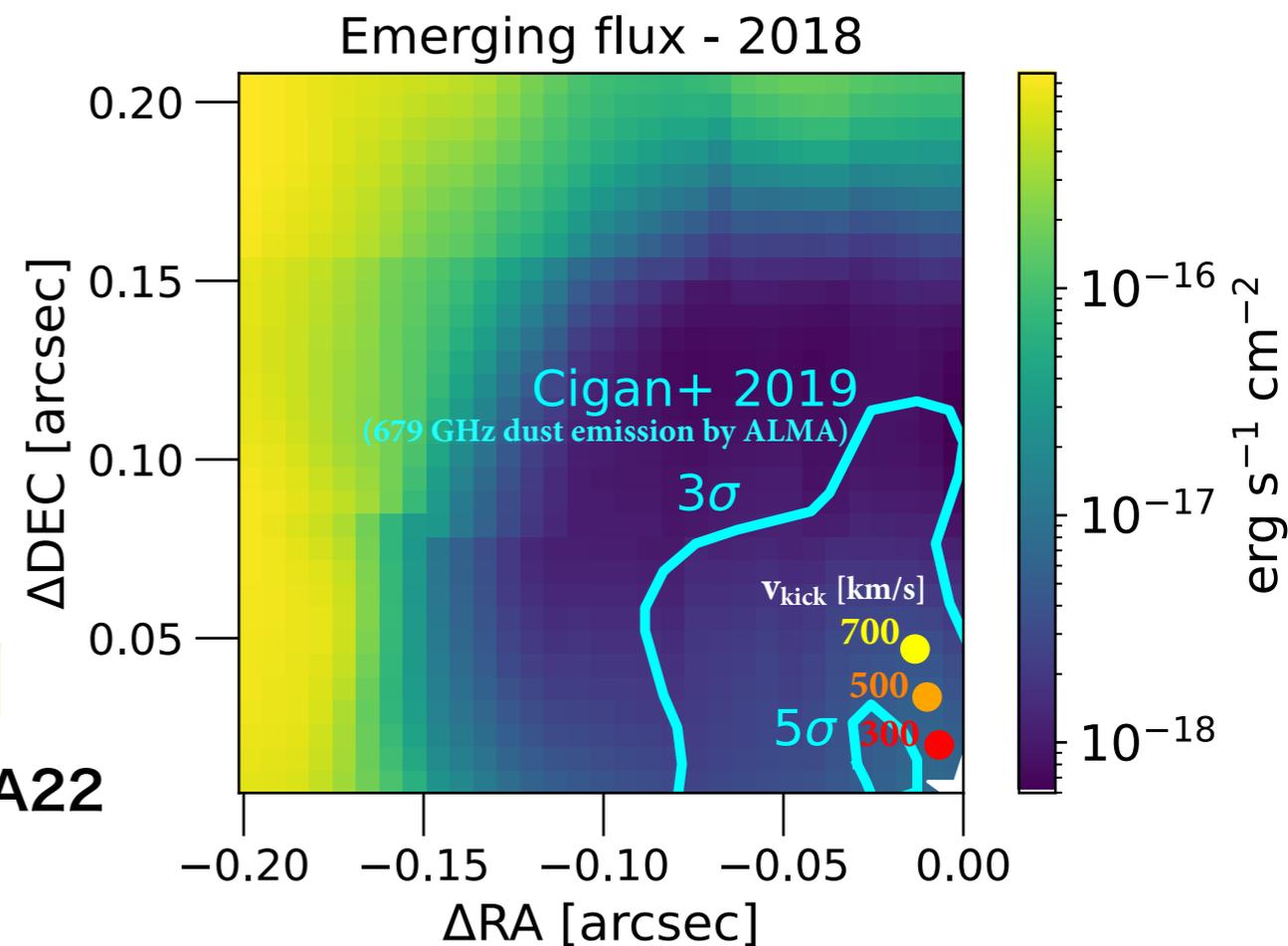
エジェクタの吸収を受けるので
その柱密度+化学組成が必要

→SN 1987AのMHDモデルを採用

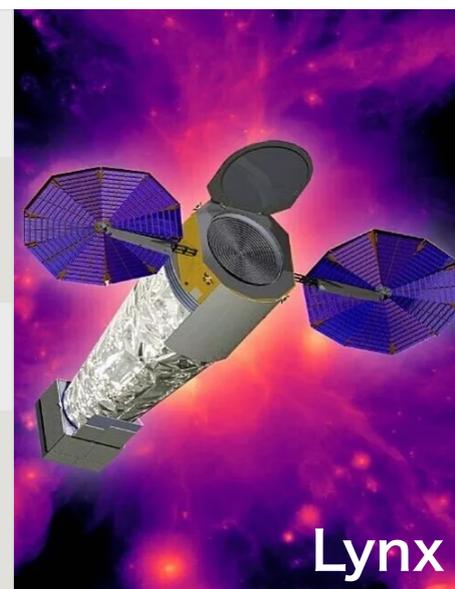
Orlando et al. 2020 A&A 636 A22

- v_{kick} の依存性：大きいとNS内部のX線が吸収されやすい

- 熱的放射がスペクトルに現れるときの観測限界光度を計算。



観測推定年	2018	2027	2037
観測装置	Chandra	Lynx	
分解能	0.5 as	0.5 as	
有効面積 @1keV	0.08 m ²	2 m ²	

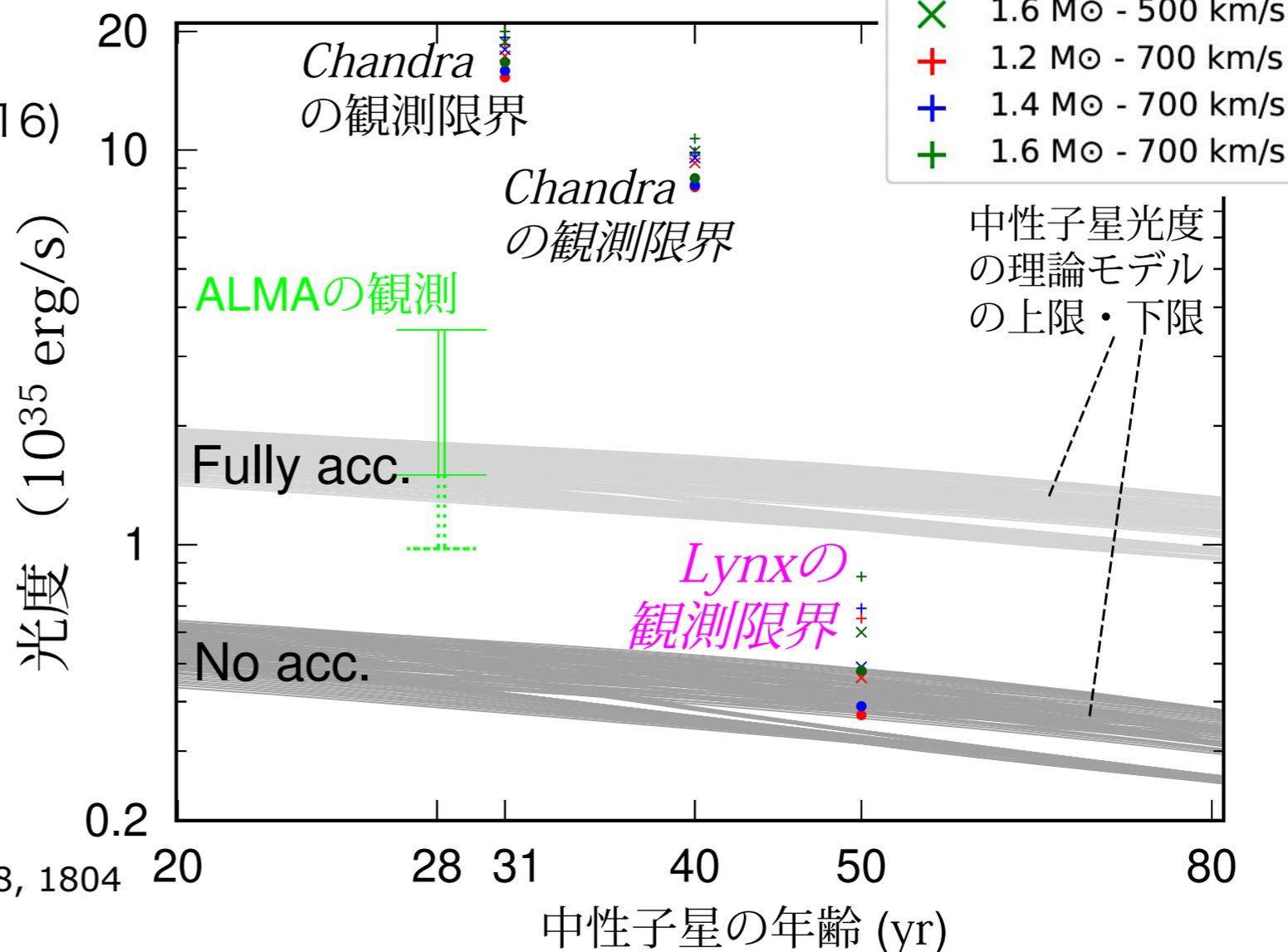


NS光度の理論と観測上限値との比較

公開コード *NSCool*
developed by Dany Page (1989, 2016)

• NS光度曲線のパラメタ

1. 表面物質の質量 M_{env}
2. クラストでの超流動の強さ
3. 質量 M_{NS} (1.18-1.62 M_{sun})
Utorbin et al 2019 A&A 624, 16
Ertl et al 2020 ApJ 890, 45
4. 状態方程式：APRで固定

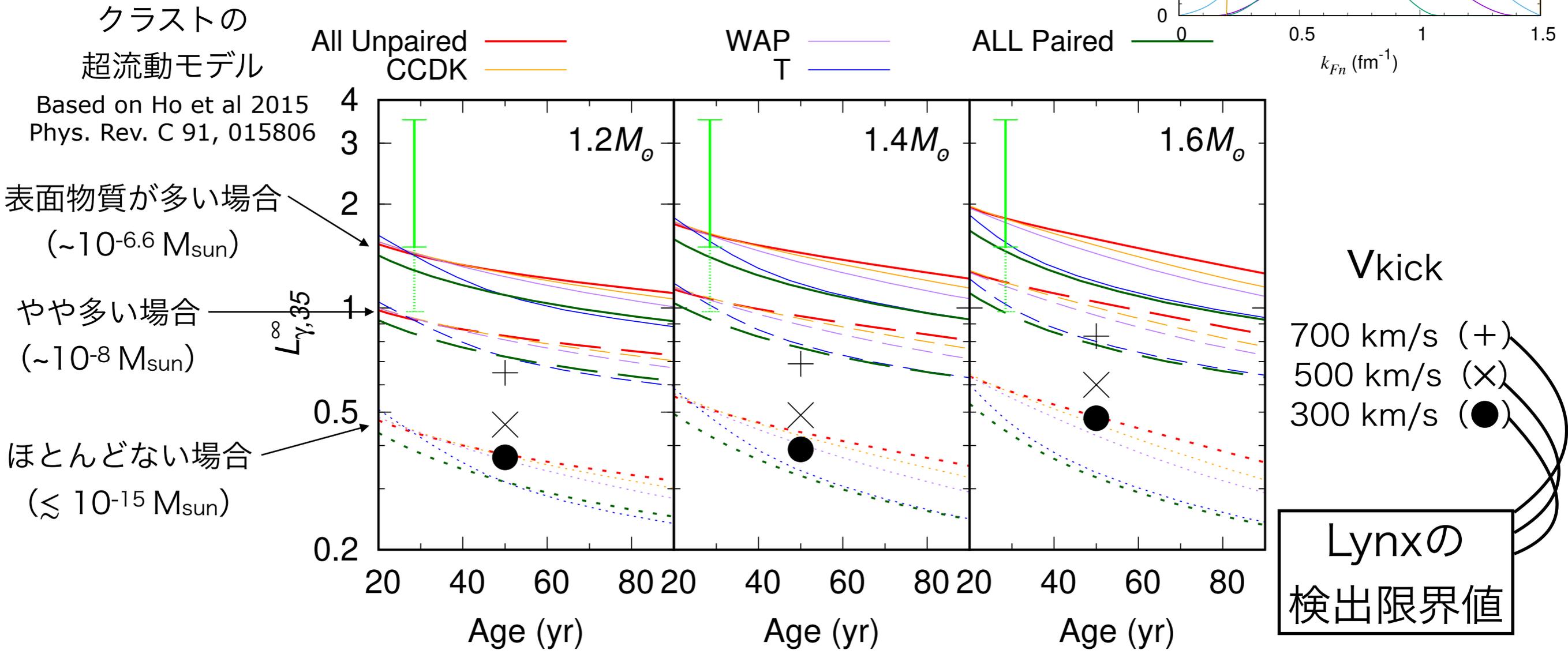
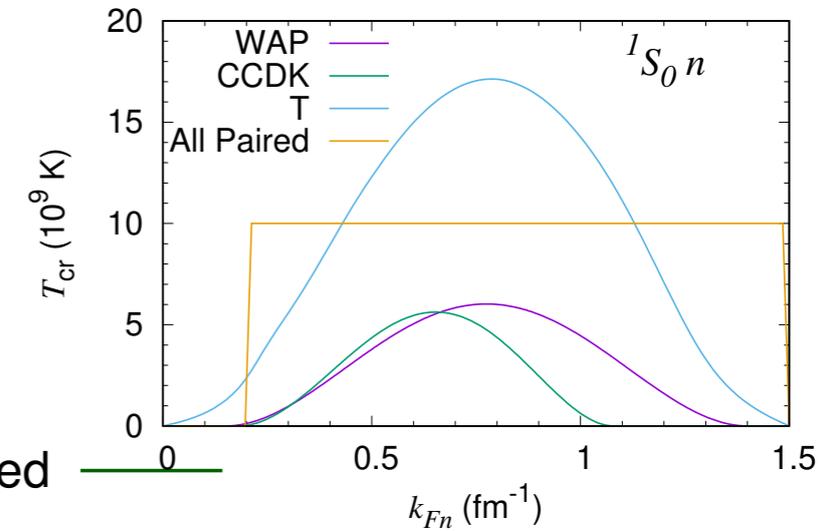


2037年（50年後）だと、NS光度が観測上限値とコンパラ

→ LynxによるNS 1987Aの検出可能性が十分ありそう！

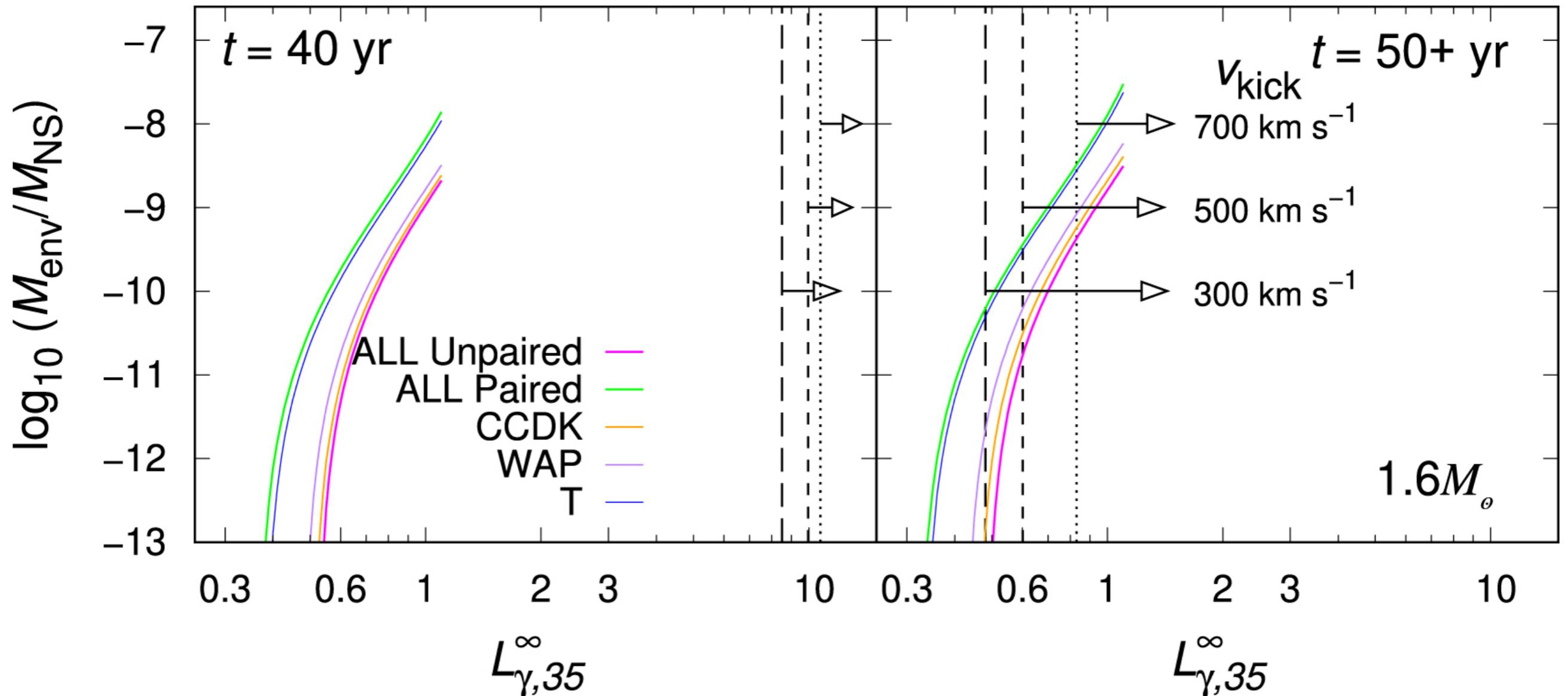
LynxによるNS 1987Aの検出可能性

～モデルパラメータ依存性～



- ALMA → 表面がrichであるべき (^{44}Ti の崩壊熱など他の熱源にもよる)
- 本研究で得られたLynx観測限界 → 検出の有無で制限の傾向が逆
(検出されない場合はALMAと逆で、強い制限 → $v_{\text{kick}} \sim 700 \text{ km/s} ?!$)

LynxによるNS 1987Aの検出可能性



- v_{kick} が小さい方がLynxに受かりやすい。
- 中性子超流動モデルが強いモデルだとやや受かりにくい。

応用：クラスト物質解明へ

(Preliminaryな内容なので省略)

まとめ

まとめ

- ALMAによるSN 1987Aのブローブ観測を元に、CCOの正体が何であるかを探った。
- ・ PWN87Aシナリオ：現地点では最もうまく説明可能。
- ・ NS87Aシナリオ：現地点ではあまり期待できないが、2040年代にはLynxにより熱的X線が見える可能性大
- NS87Aシナリオで中性子星のクラスト物質の性質を現在探っている。物性・原子核の観点でクラストで起こりそうな面白い物理があればぜひ教えてください。
- 今後：EOS（コア・インナークラスト）の不定性によるNS87Aシナリオの変更可能性の追求

補足スライド

どのような加熱機構が考えられるか？

○ NS or BHが由来：ISMからの降着による重力解放 Maybe Impossible

$$\rightarrow L_{\text{acc}} > 26L_{\odot} \Leftrightarrow \dot{M} > 1.2 \times 10^{-11} (R_{\text{NS}}/10\text{km}) (M_{\text{NS}}/M_{\odot})^{-1} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$$

Bondi降着ならISMの数密度が $n_{\text{ISM}} \sim 10^4 \text{ cm}^{-3}$ 以上必要。伴星なしでは

難しい

$$\dot{M}_{\text{Bondi}} \approx 6 \times 10^{-15} \left(\frac{M_{\text{CCO}}}{M_{\odot}} \right)^2 \left(\frac{n_{\text{ISM}}}{1\text{cm}^{-3}} \right) \left(1 + \left(\frac{v}{10^5 \text{ cm s}^{-1}} \right)^2 \right)^{-3/2} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$$

Shapiro & Teukolsky (1983)
Wijngaarden et al. MNRAS 484, 974 (2019)

○ 核燃焼が由来、特に、 ^{44}Ti 崩壊（半減期85年） Partially Possible

Optical depthが $O(1)$ になるためには、Tiが $0.77M_{\odot}$ 必要。一方観測は、

$\sim 1.5 \times 10^{-4} M_{\odot}$ でdisfavored。非常にclumpyなTi雲があればblobに効く
(Alp et al. 2021) (Jerkstrand et al. 2011, Boggs et al. 2015)

○ NSが由来：Possible

• パルサーのスピンダウンによる非熱的放射(PWN87Aシナリオ)

Greco+AD et al. 2021 ApJ 908 L45, 2022 ApJ 931 132

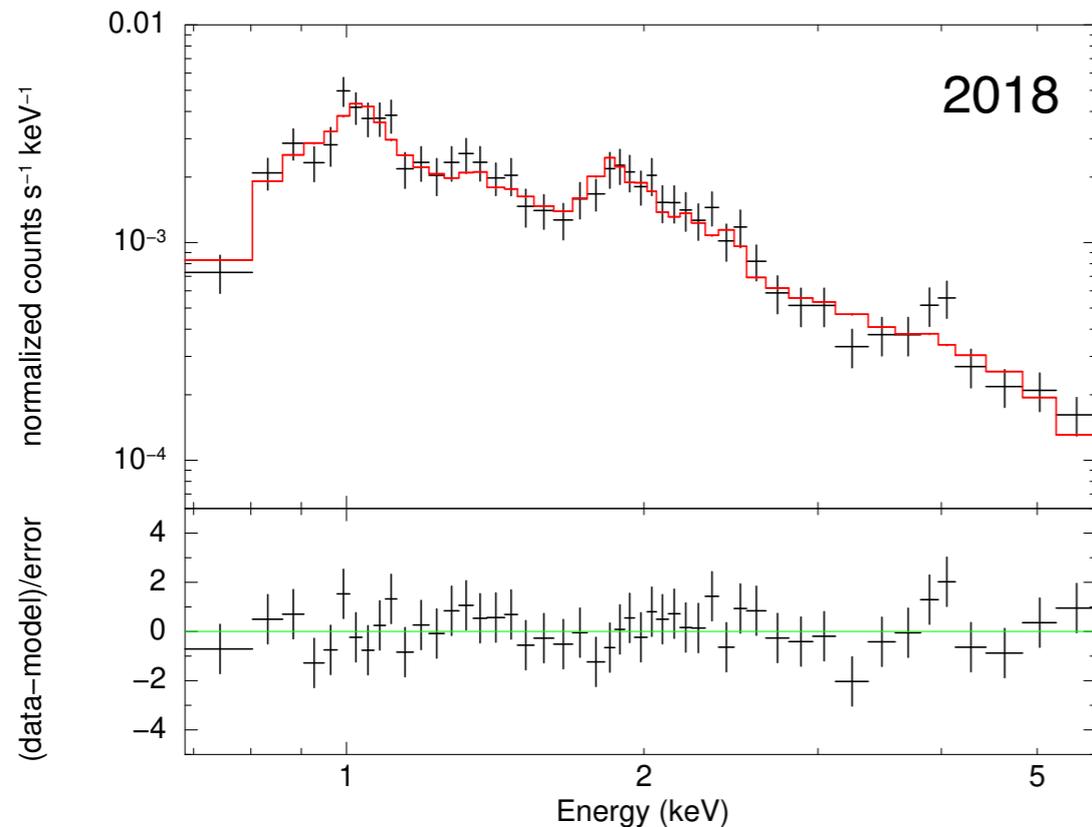
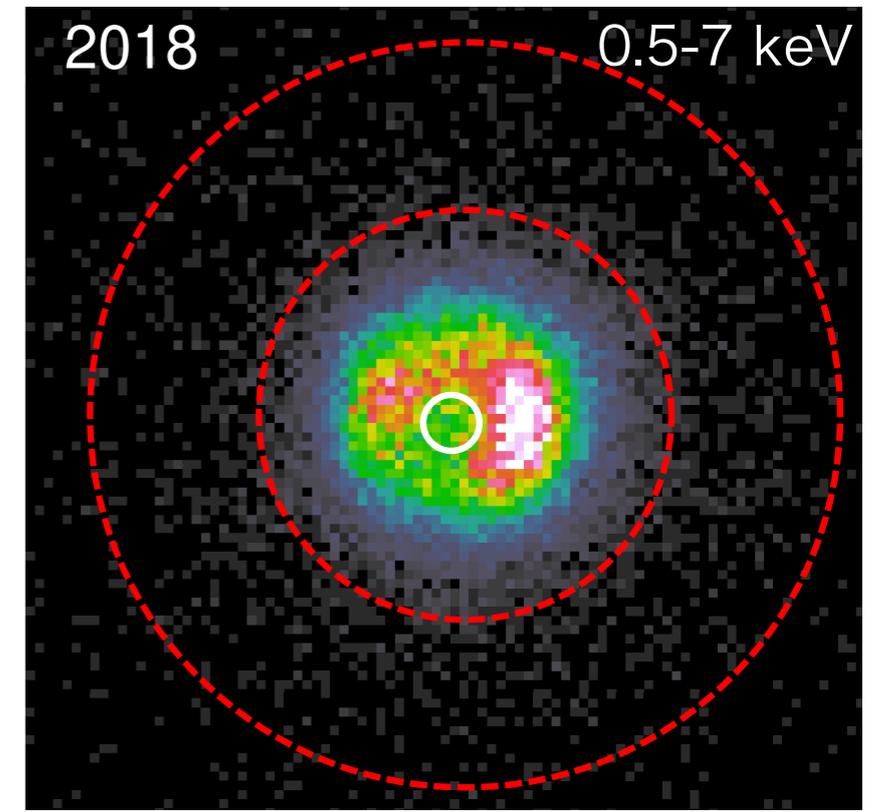
• NS表面からの熱的放射(NS87Aシナリオ)

Page et al. 2020 ApJ 898 125, AD et al. 2023 ApJ 949 97

SN 1987Aの“標準”モデル

e.g., See Greco et al. 2022 ApJ 931 132

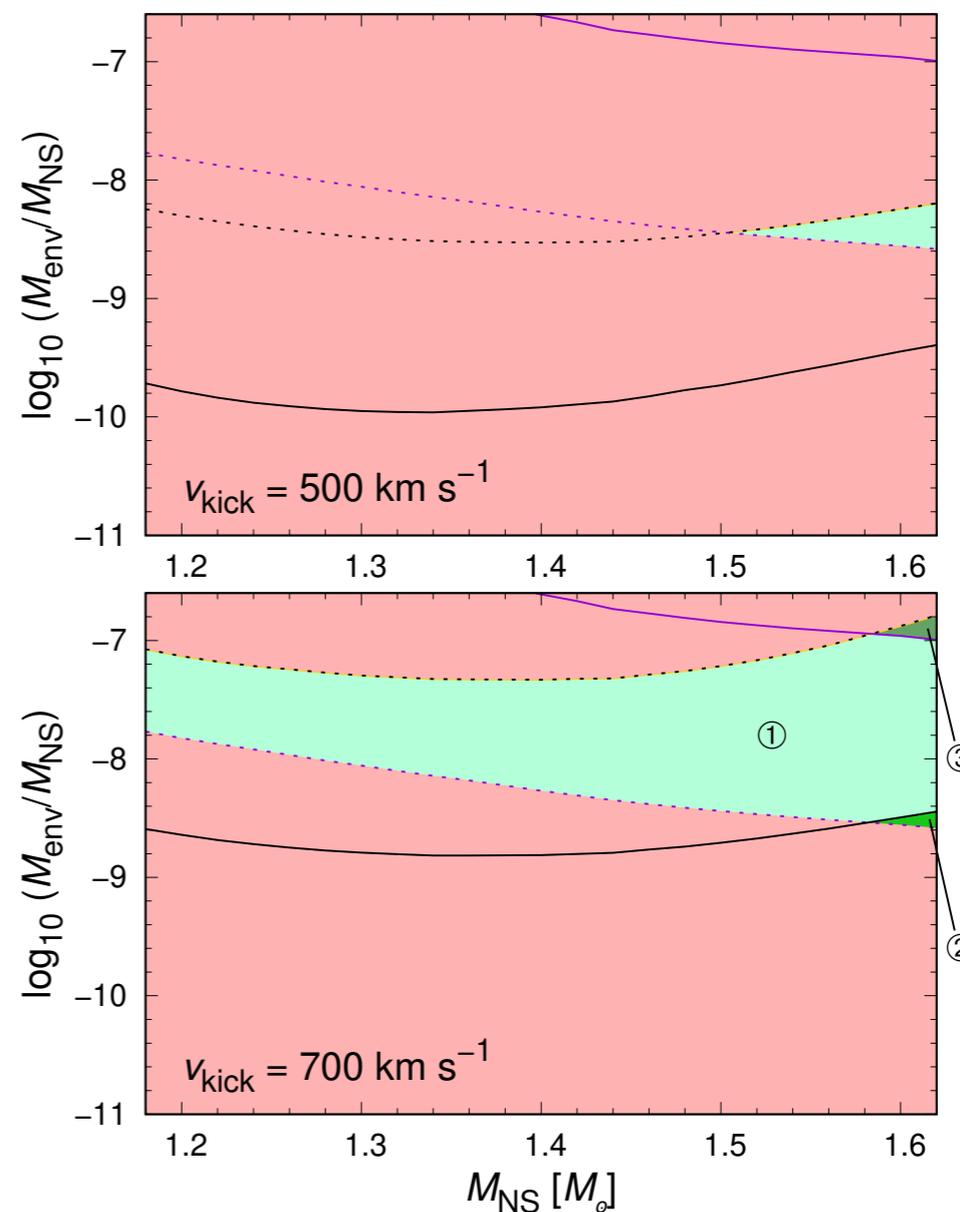
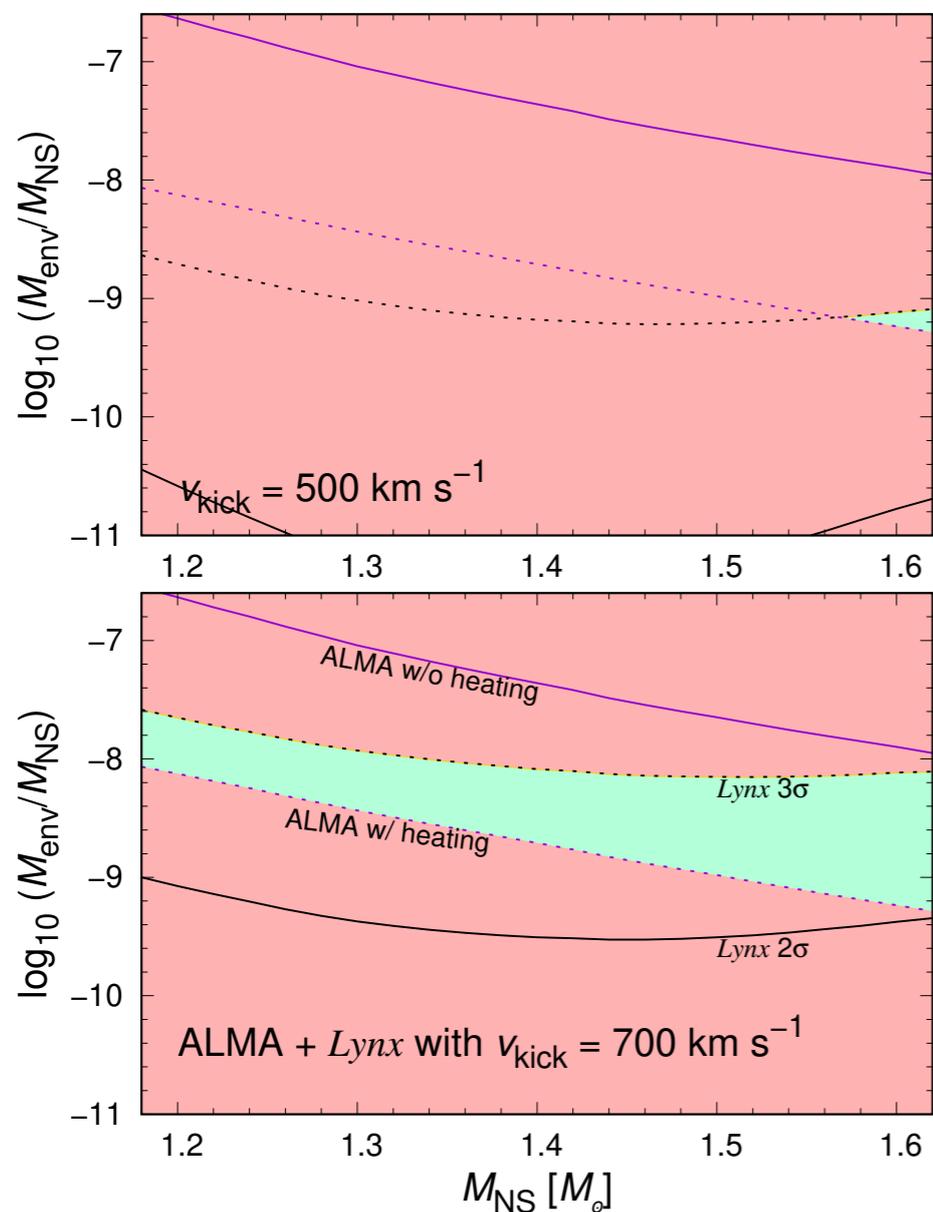
- Chandra ACIS-Sのスペクトルを使用
- Fittingモデル：星間吸収 (TBabs) + 1(2)成分プラズマ (vnei)
- 2温度vneiの方が観測と合う。



	1 温度 vnei	2 温度vnei	
温度 (keV)	$1.9^{+0.3}_{-0.2}$	$0.7^{+0.2}_{-0.3}$	$2.6^{+0.9}_{-0.5}$
金属量	$0.19^{+0.07}_{-0.05}$	$0.24^{+0.16}_{-0.10}$	1成分目と同じ
電離パラメータ (10^{11} s/cc)	$0.41^{+0.15}_{-0.10}$	> 1	$0.8^{+0.5}_{-0.3}$
EM (10^{58} /cc)	1.1 ± 0.2	1.0 ± 0.6	$0.6^{+0.3}_{-0.2}$
χ^2 (d.o.f)	49.98(44)	32.99(41)	

NS 1987AがLynxで検出されなかった場合

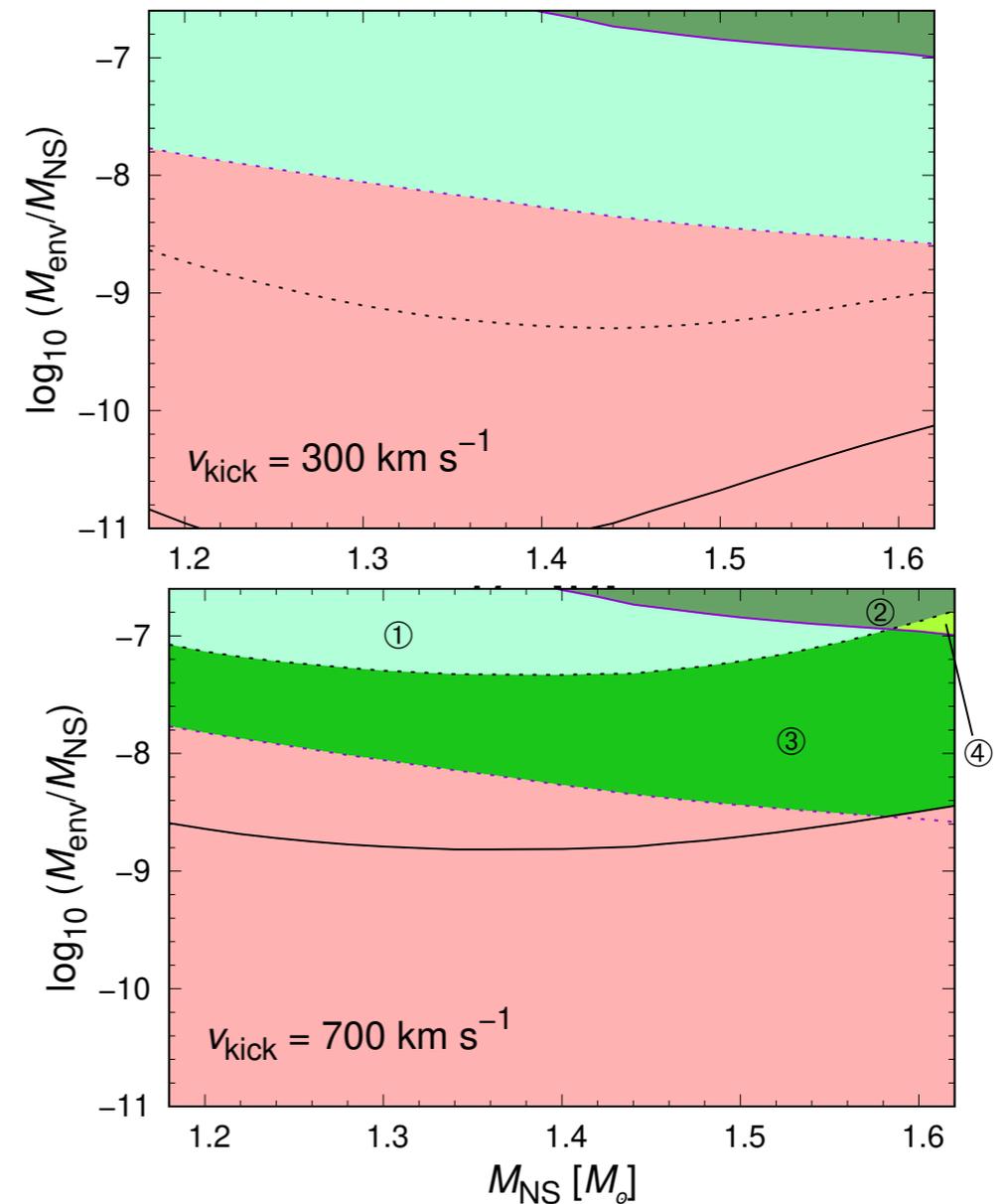
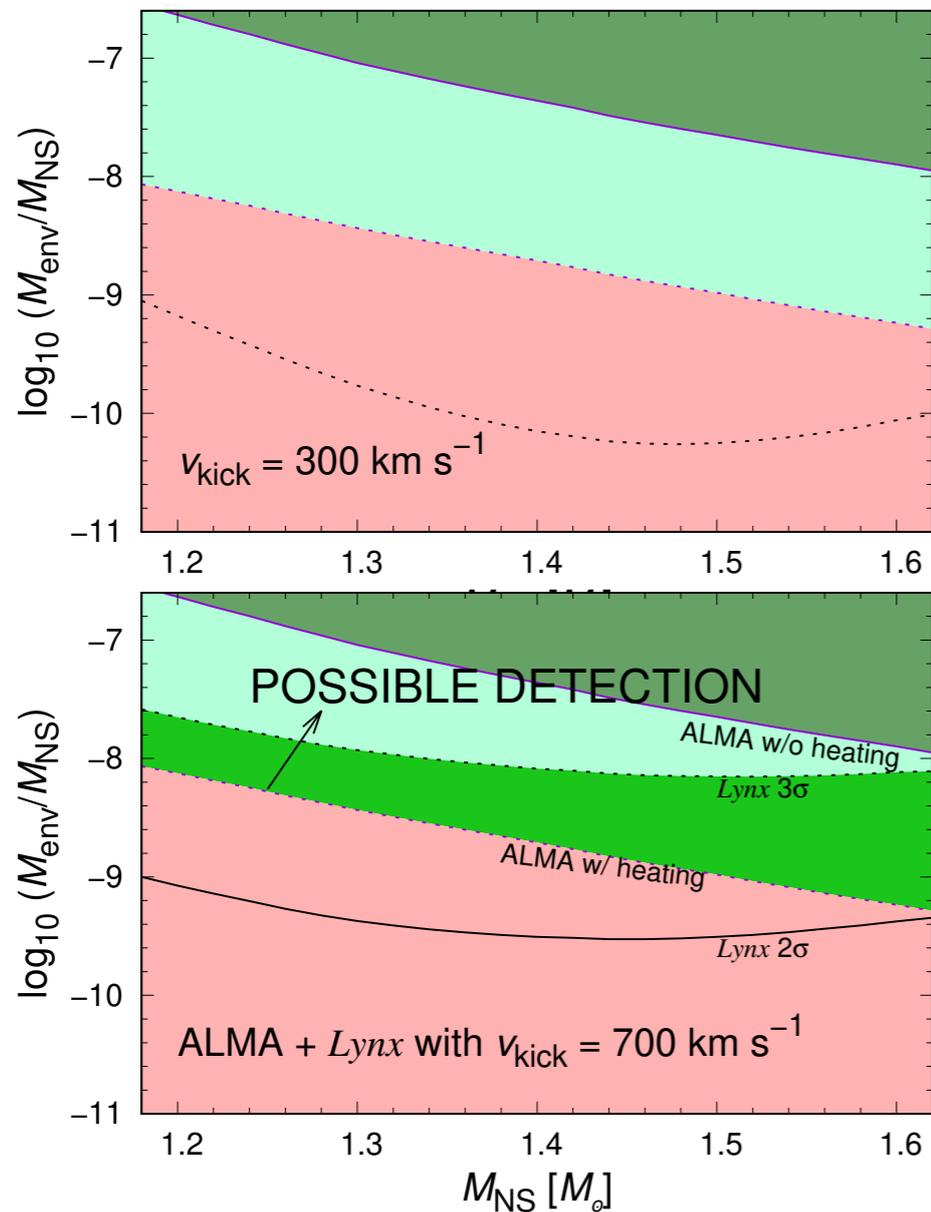
- クラスト超流動が弱いとき
- クラスト超流動が強いとき



$v_{\text{kick}} \sim 700 \text{ km/s} ?!$ (ALMA観測の上限値)

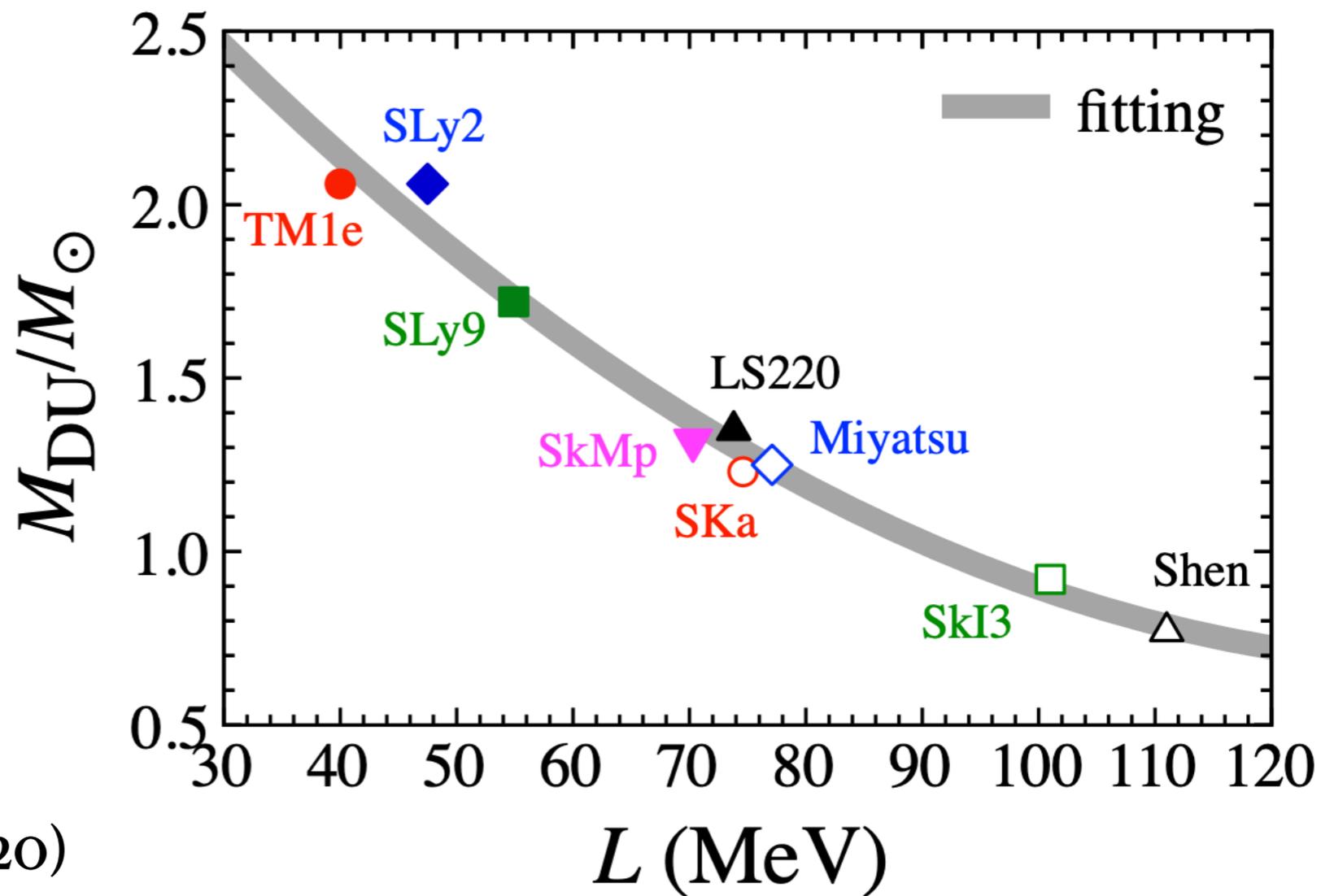
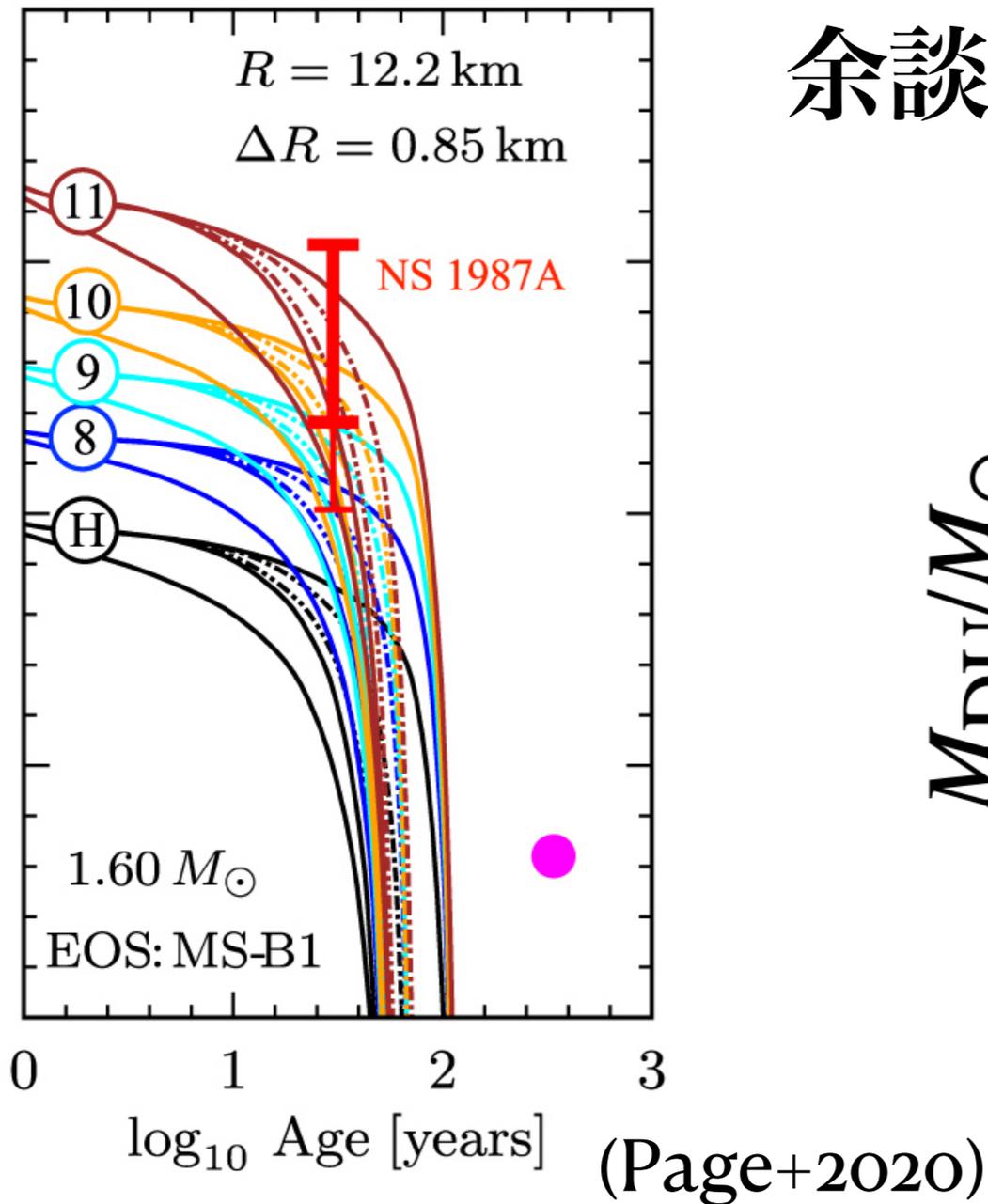
NS 1987AがLynxで検出された場合

- クラスト超流動が弱いとき
- クラスト超流動が強いとき



あまり v_{kick} に依らない (ALMAの観測が支配的)

余談：Direct Urcaは起きないか？



- Direct Urca: $p + e \rightarrow n + \nu_e$, $n \rightarrow p + e + \bar{\nu}_e$
- 陽子がある程度の割合(>1/9)いると発生。非常に強い冷却源。
- If taking fiducial value $L \approx 60 \text{ MeV} \rightarrow M_{\text{DU}} \approx 1.6 M_{\odot}$
 (SN87Aのlight curveからの制限の上限くらい。)

クラスト内の物質に関して

- NS 1987Aの光度観測より、クラスト物質の性質を探ることができる。具体的には、
 - 1S_0 中性子超流動の強さ
 - 1S_0 中性子超流動のFluctuationの強さ
 - クラスト内のイオン結晶の比熱、熱伝導率
 - パスタ構造
 - 不純物

