



ティコの超新星残骸

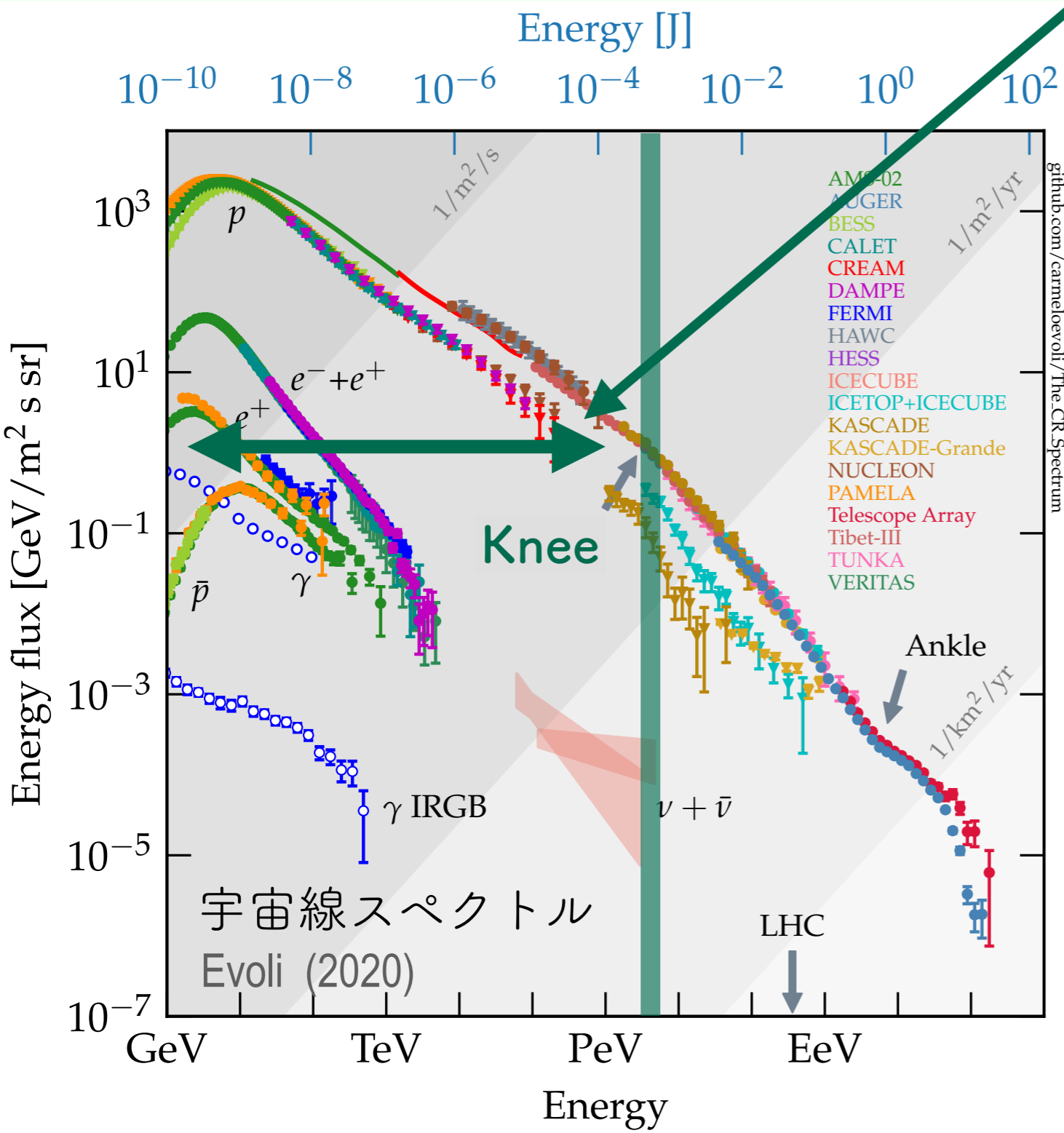
における宇宙線の起源探索

松田真宗 @ 京都大学

第五回 空気シャワー観測による宇宙線の起源探索勉強会

(2022年3月15日)

宇宙線のエネルギー分布と超新星残骸起源説



銀河系内で発生 [e.g., Amenomori+ 2021]



起源は?

超新星残骸が有力 [Baade & Zwicky 1934]

根拠

エネルギー収支 ($L_{CR} \sim 10^{41} \text{ erg s}^{-1}$)
 30-100年に1回のSN爆発を仮定
 → 運動エネルギーの10-30%がCRに変換?

加速機構
 Fermi一次加速が予測 [e.g., Axford+ 1977]

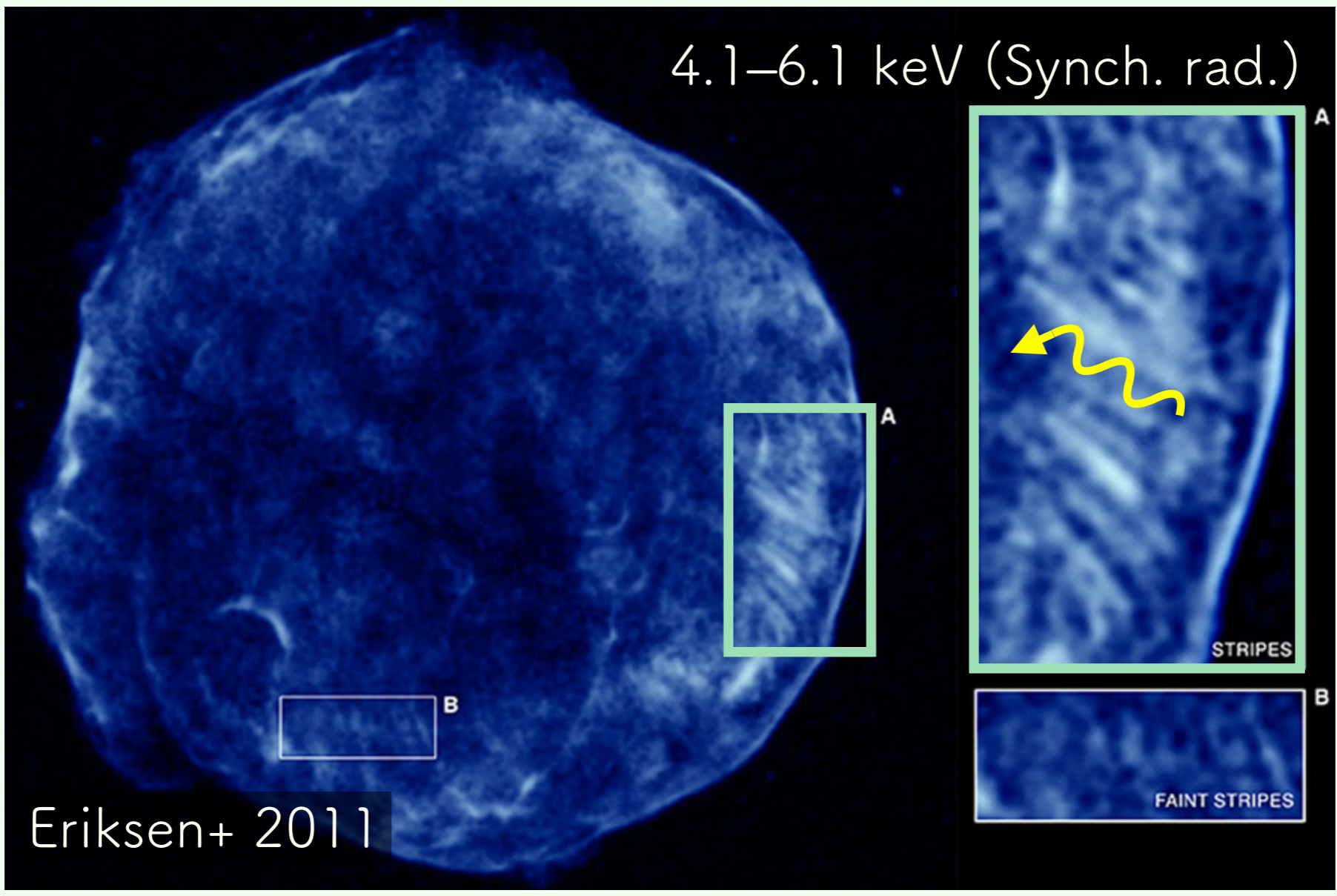
しかし、わかっていないことも多い

- 本当にPeVまで加速できる?
- どうやってFermi一次加速に注入する?
(注入問題)



PeVまで加速され得る天体 (PeVatron) の
 詳細な調査が鍵を握る

3 PeVatron候補天体: 超新星残骸Tycho



◎ 超新星残骸Tycho … 1572年(年齢450年)に超新星爆発が観測された若い残骸

▶ 西部に特異なシンクロトロン放射由来の縞状構造

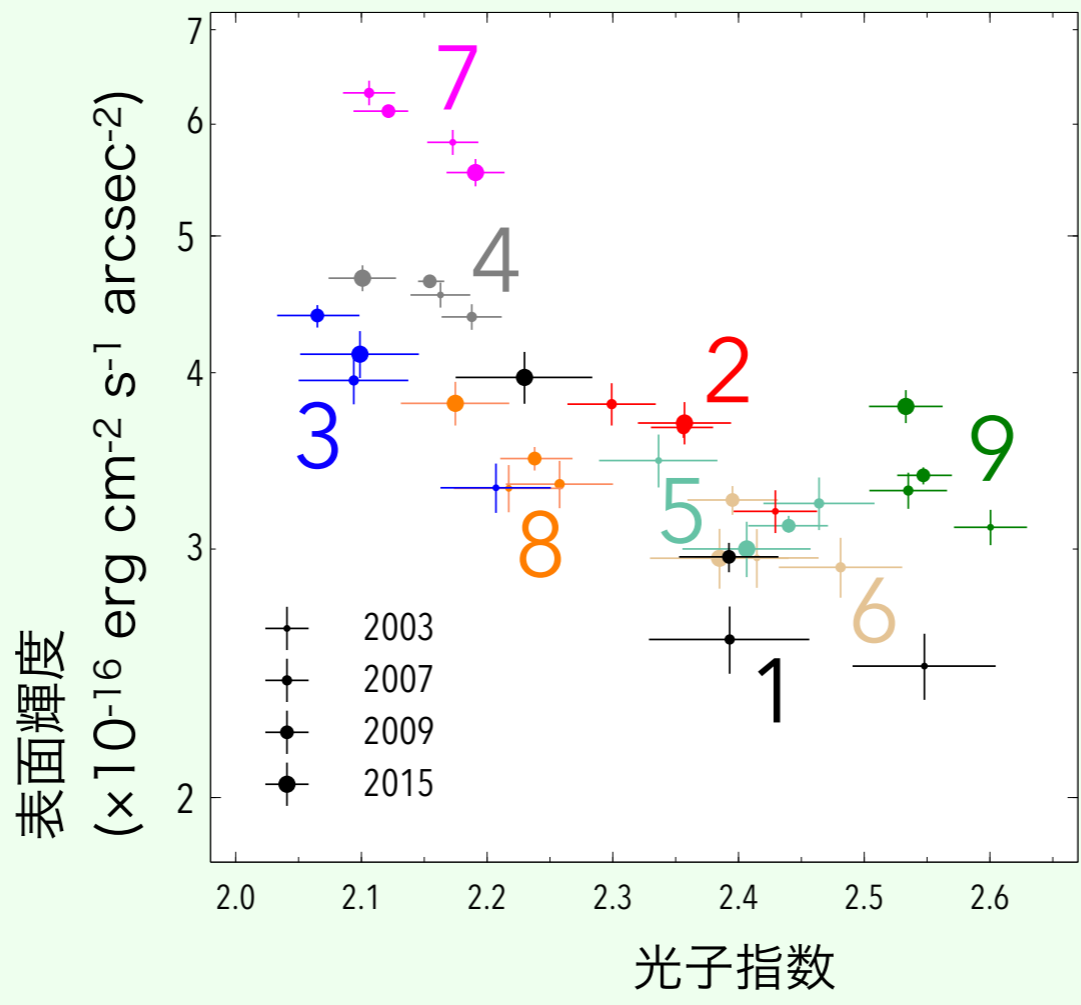
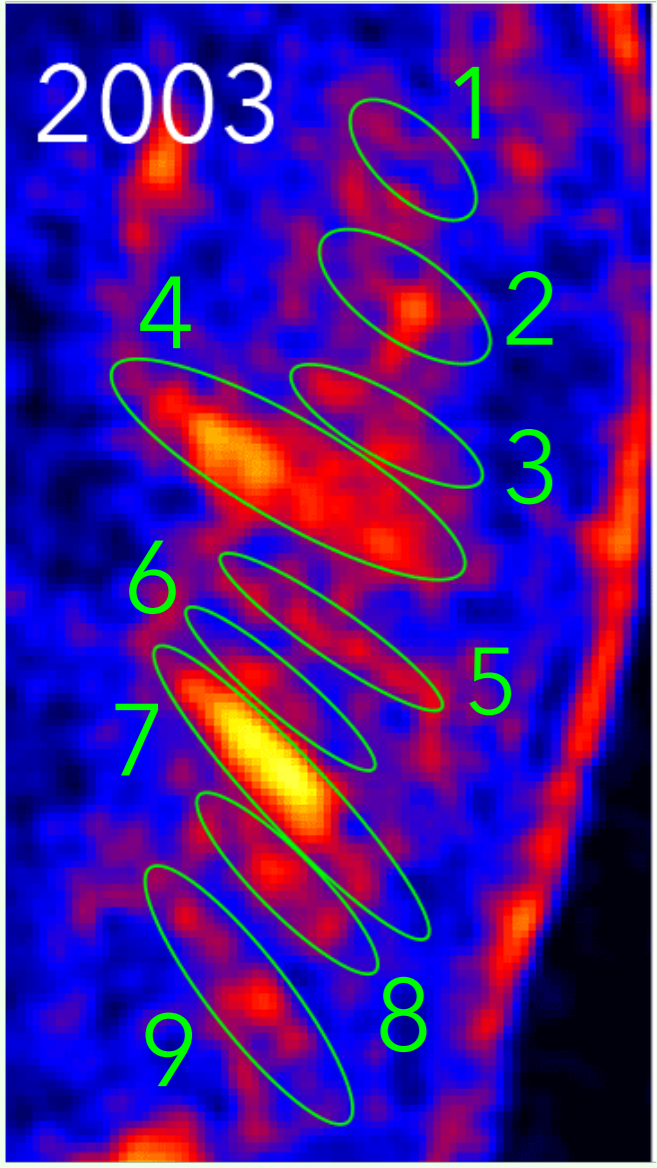
縞のピッチ幅($l_{\text{gap}} \sim 8''$)をジャイロ運動の直径とした場合、PeVまで陽子加速(?) [Eriksen+ 2011]

$$E_{\text{CR}} = 1 \times 10^{15} \left(\frac{l_{\text{gap}}}{8''} \right) \left(\frac{B}{30 \mu\text{G}} \right) \quad (\text{磁場強度は } B \sim 30 \mu\text{G} \text{ [Cassam-Chenaï+ 2007] を仮定})$$

多くの理論的研究も [e.g., Bykov+ 2011; Malkov+ 2012; Caprioli & Spitkovsky 2013; Laming+ 2015]

▶ FermiLATやVERITASの観測から、最低でも0.5 PeVの陽子加速の証拠あり [Morlino & Caprioli 2012]

4 TychoにおけるX線時間変動



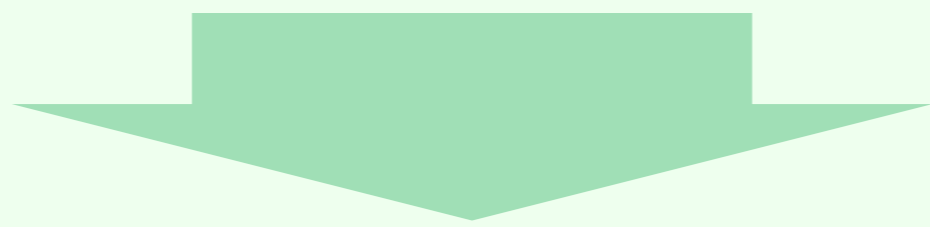
縞状構造全体で**数年単位の増光 & 減光を発見**



$$t_{\text{syn}} = 4 \left(\frac{\epsilon}{\text{keV}} \right)^{-0.5} \left(\frac{B}{500 \mu\text{G}} \right)^{-1.5} \text{ yr.}$$

$$t_{\text{acc}} = 4\eta \left(\frac{\epsilon}{\text{keV}} \right)^{0.5} \left(\frac{B}{400 \mu\text{G}} \right)^{-1.5} \left(\frac{v_{\text{sh}}}{3400 \text{ km s}^{-1}} \right)^{-2} \text{ yr,}$$

変動のタイムスケールから、**数100 μG の磁場増幅**を示唆
 → **PeV以上の陽子加速?**



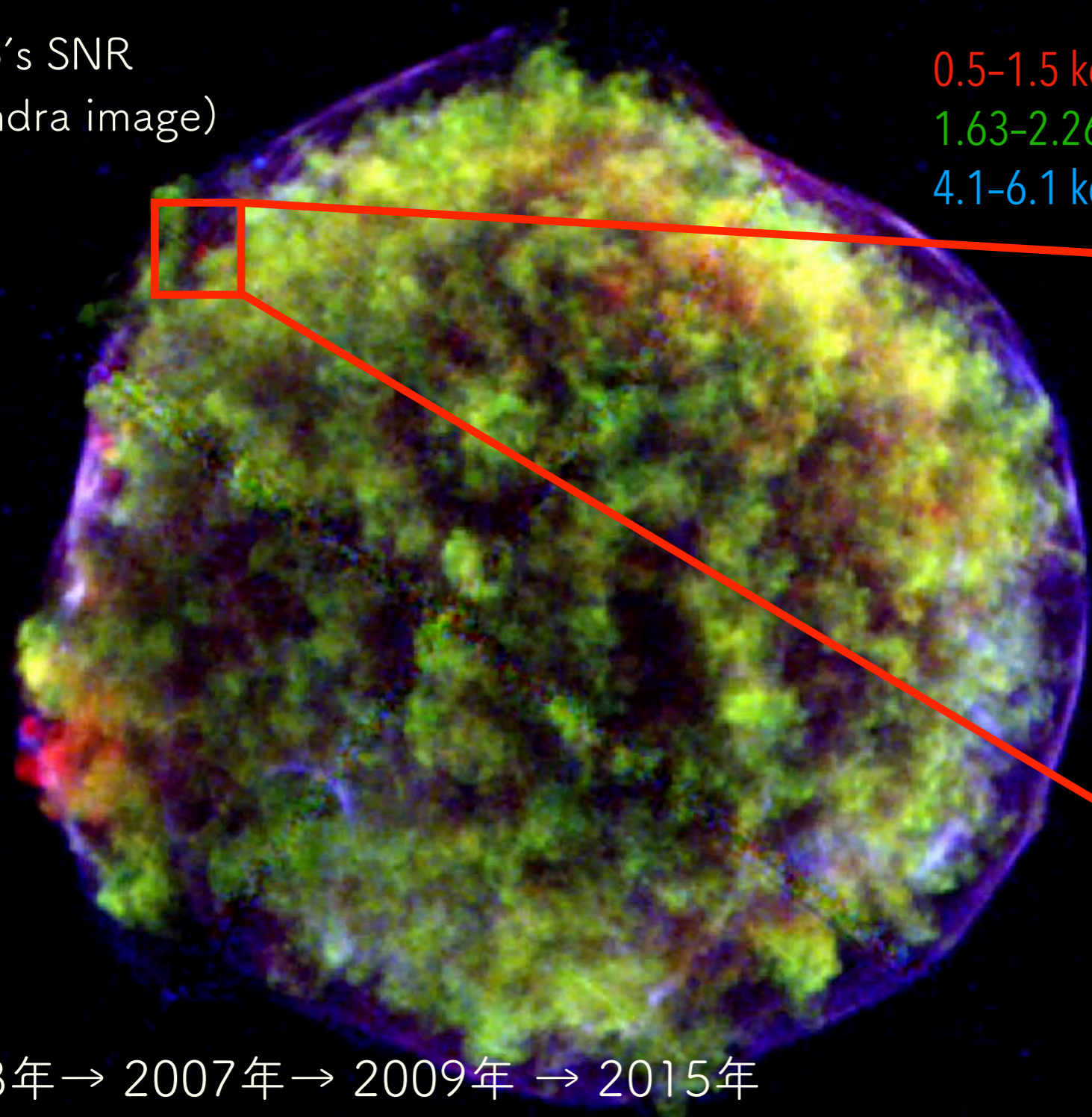
X線時間変動観測は、粒子のエネルギー変化を直接的に観測するのに有効
 熱的放射の時間変動を捉えれば

Fermi一次加速に注入するまでのエネルギー変化に対してアプローチできる

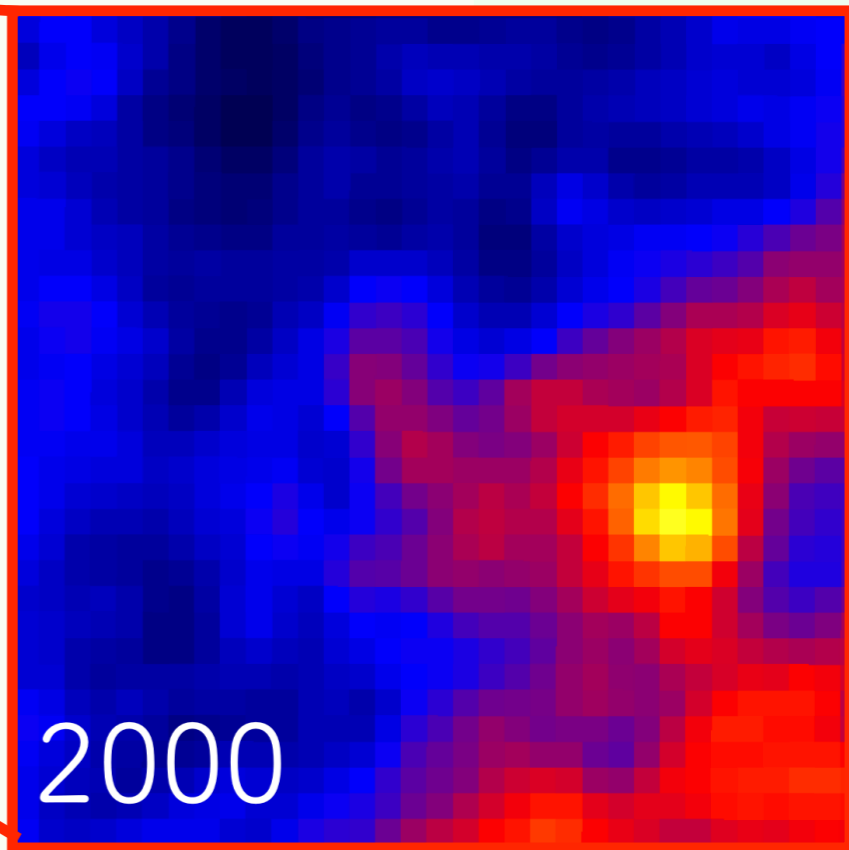
5 Tychoにおける熱的放射の時間変動

Tycho's SNR
(Chandra image)

0.5-1.5 keV
1.63-2.26 keV
4.1-6.1 keV



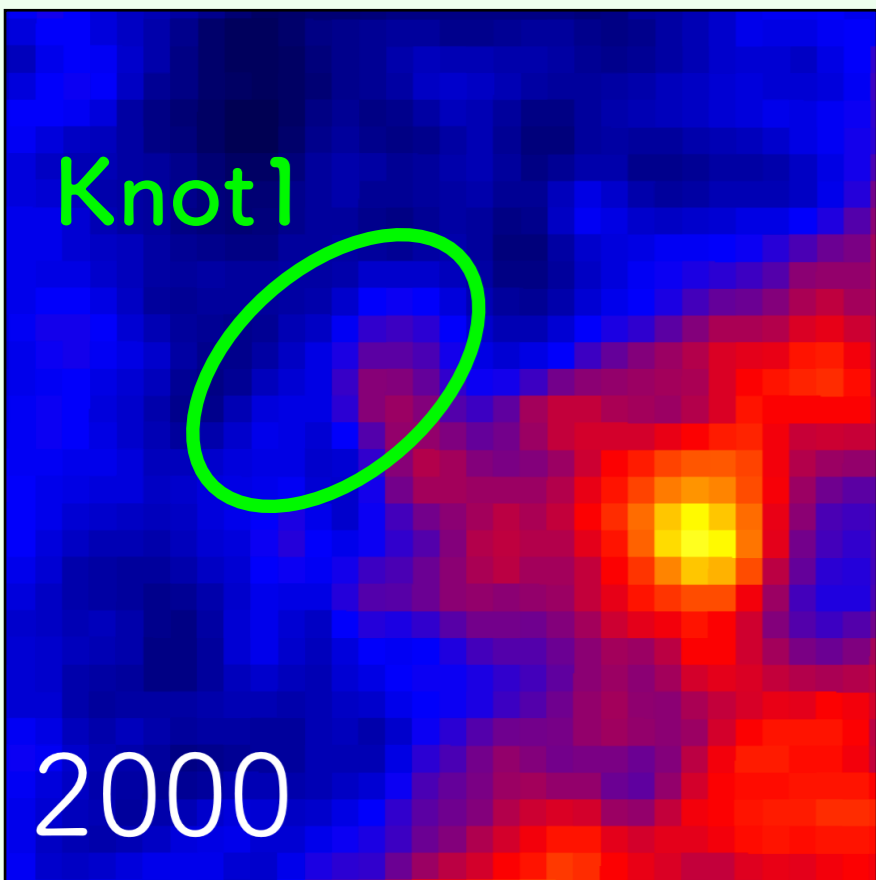
0.5-1.5 keV



2003年 → 2007年 → 2009年 → 2015年

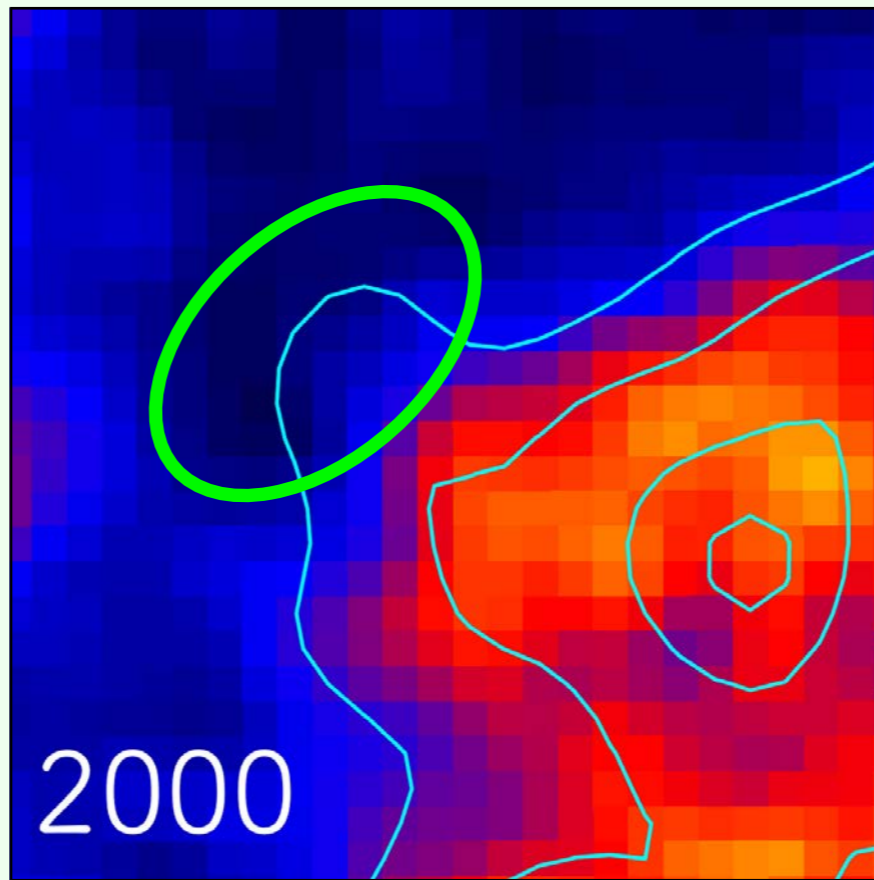
Tychoで初めて**熱的放射の時間変動**を発見

6 エネルギーバンドごとの時間変動



Soft band (0.5–1.5 keV)

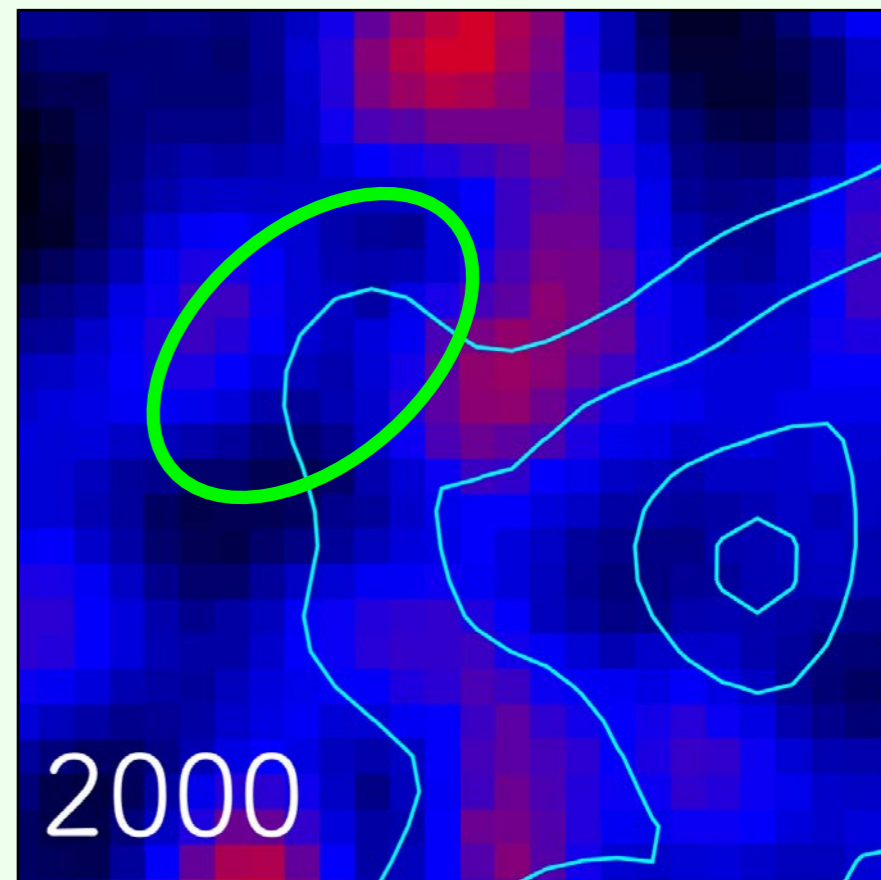
時間変動あり
(熱的放射)



Middle band (1.6–2.1 keV)

Contours: soft band

時間変動なし
(熱的放射)



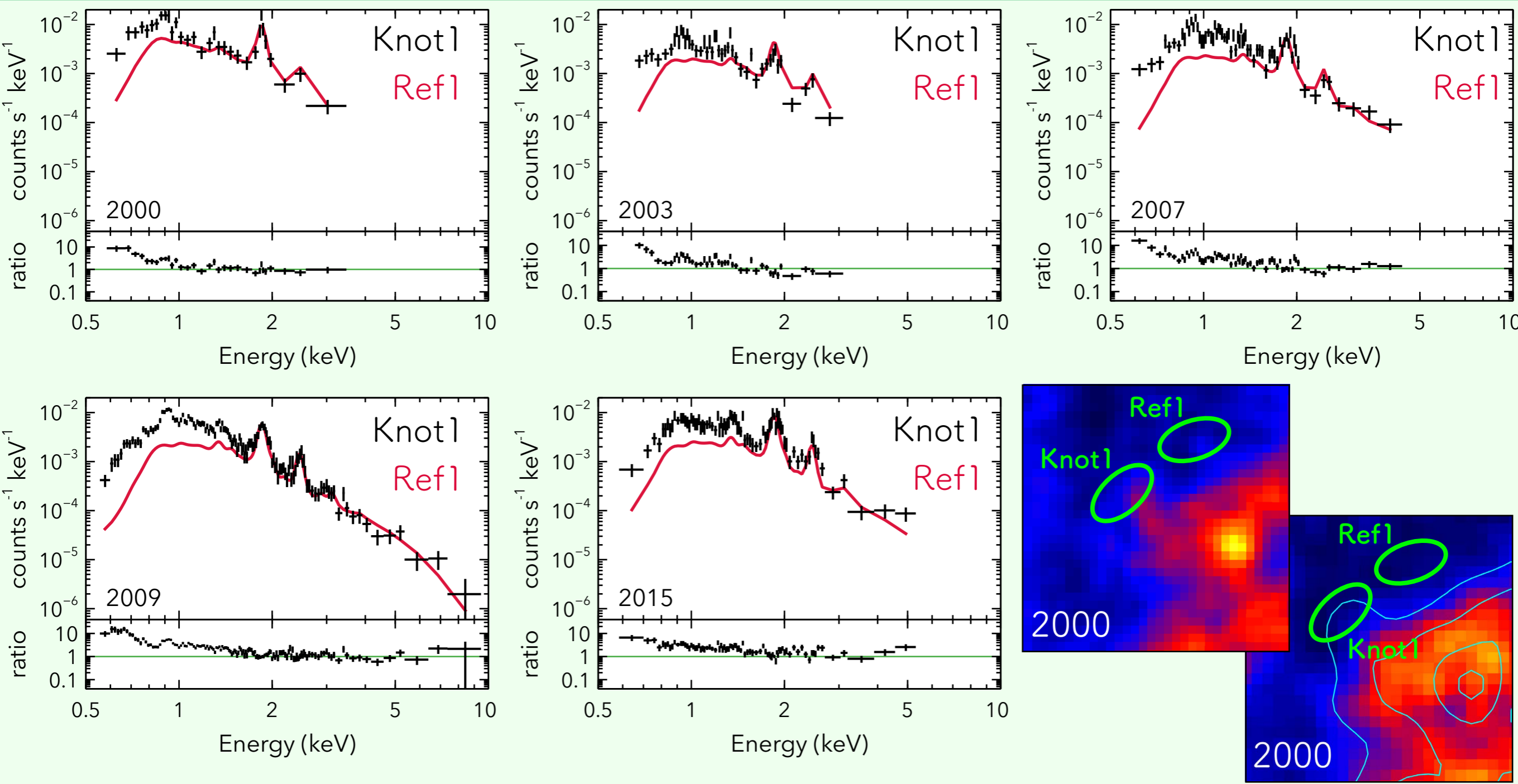
Hard band (4.0–6.0 keV)

Contours: soft band

時間変動なし
(非熱的放射)

- 非熱的放射は変動なし
- 同じ熱的放射でも Soft band と Middle band で時間変動の有無が異なる

7 Knot1とその近傍のスペクトル

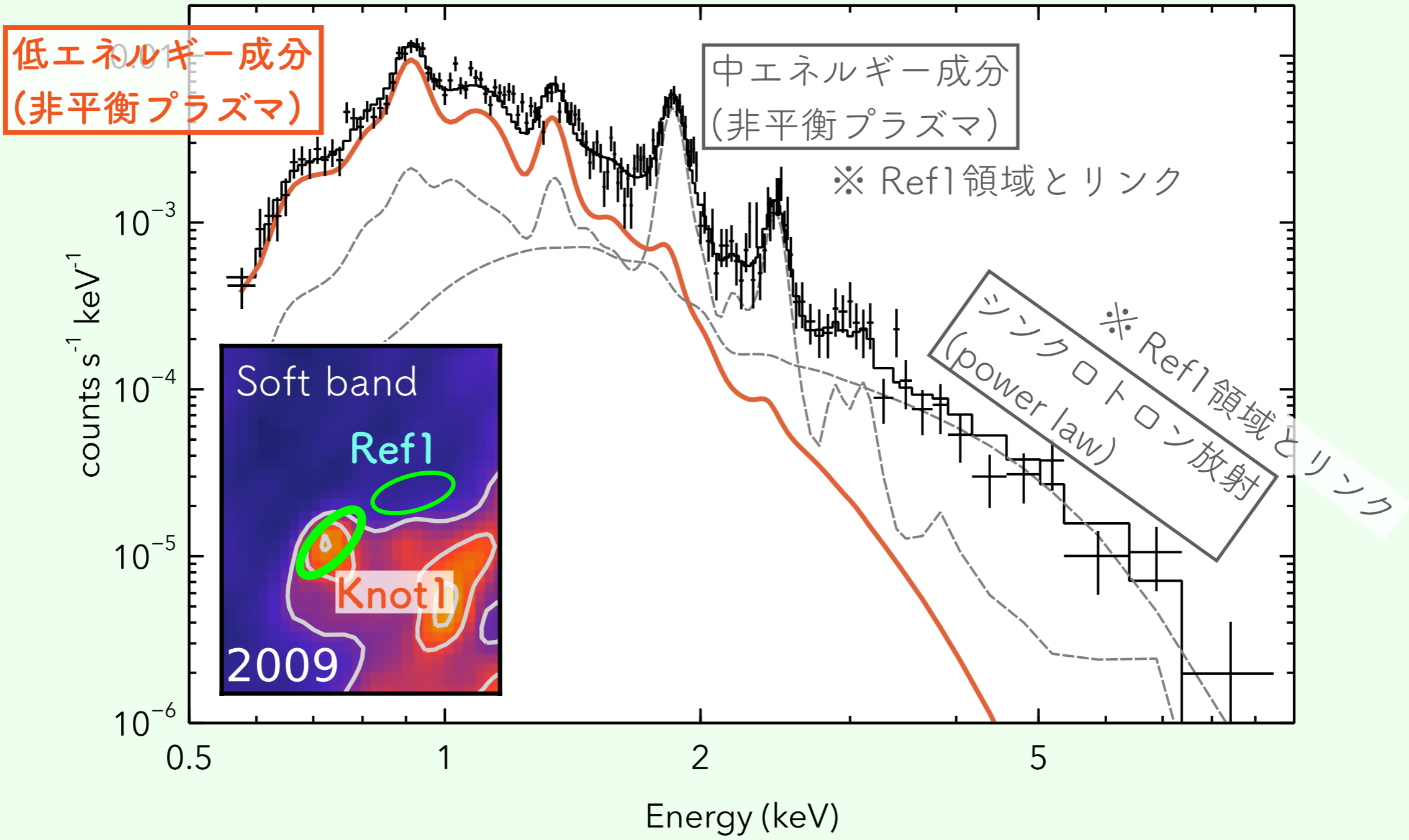


Knot1とRef1のスペクトルを比較

→ $\lesssim 1.5 \text{ keV}$ でKnot1がRef1より明るい + 年々Knot1のexcessが高エネルギー側へ拡大

➡ Knot1のスペクトルの変動を定量的に解析

フィッティングモデル

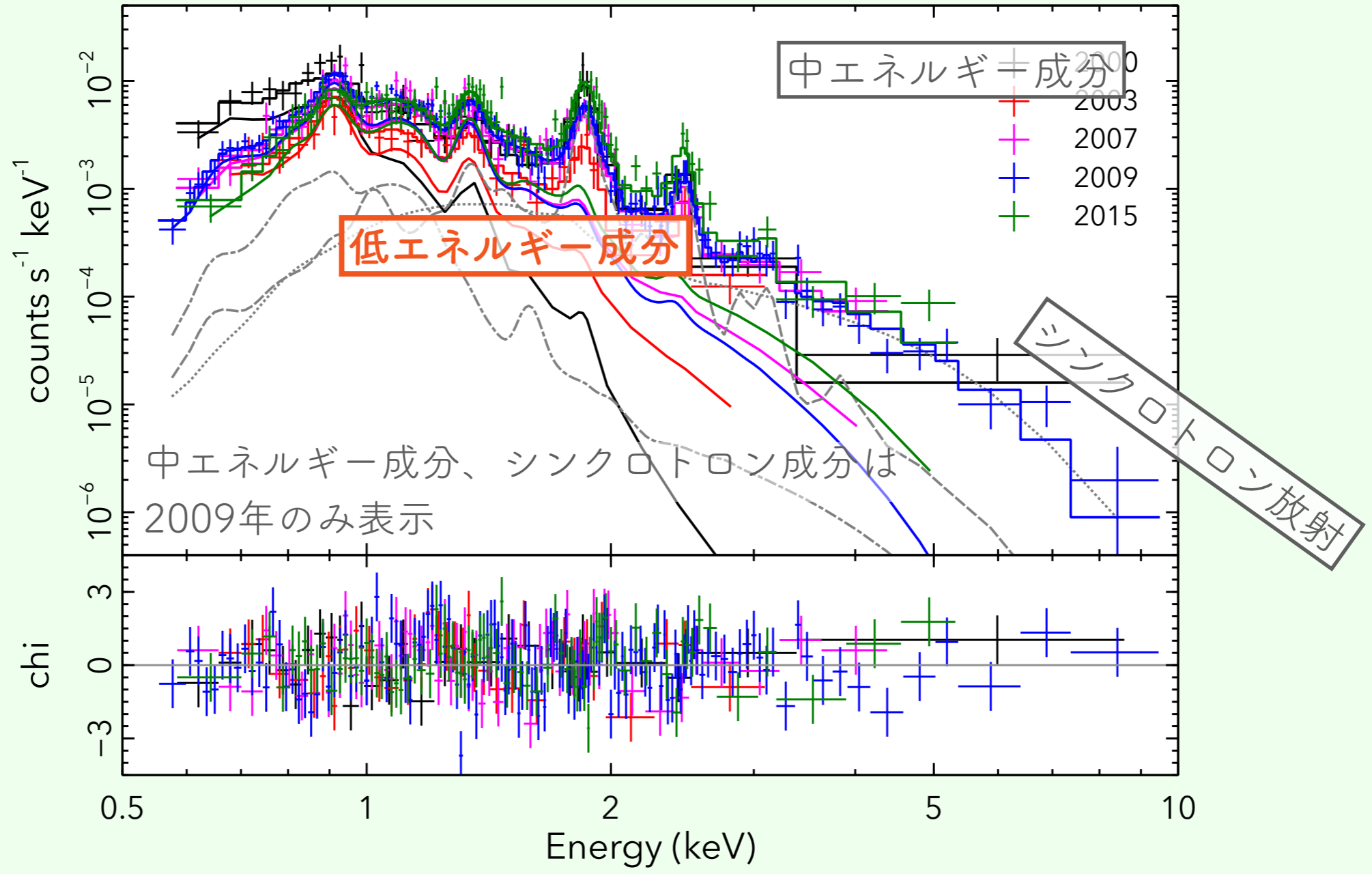


◎ Ref1領域の成分 + 低温度成分でフィッティング

- ▶ Ref1領域の成分…非平衡プラズマ + power law
- ▶ 低エネルギー成分…アバundanceは太陽組成

電子温度、イオン化年齢、Emission Measureの変化を調べる

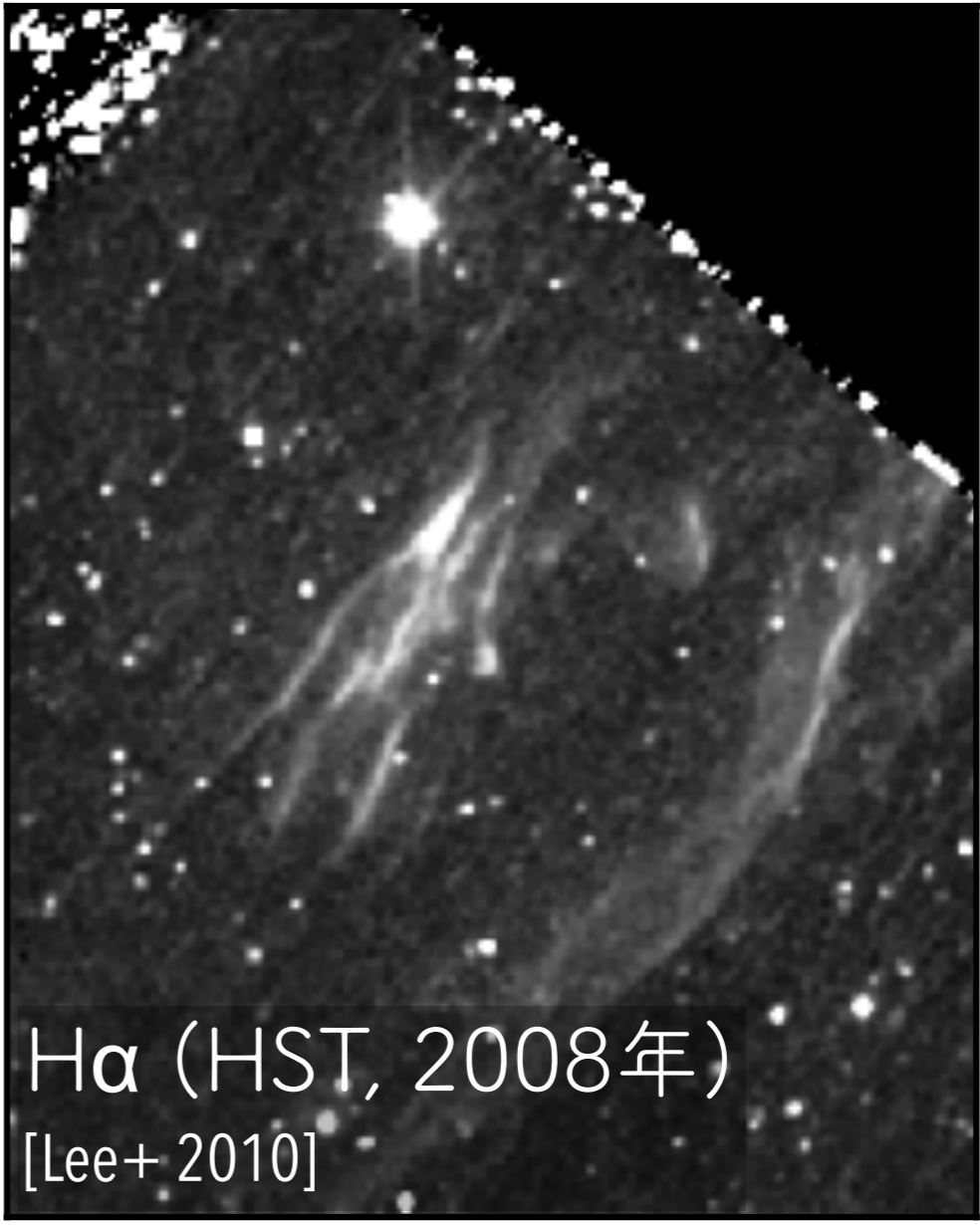
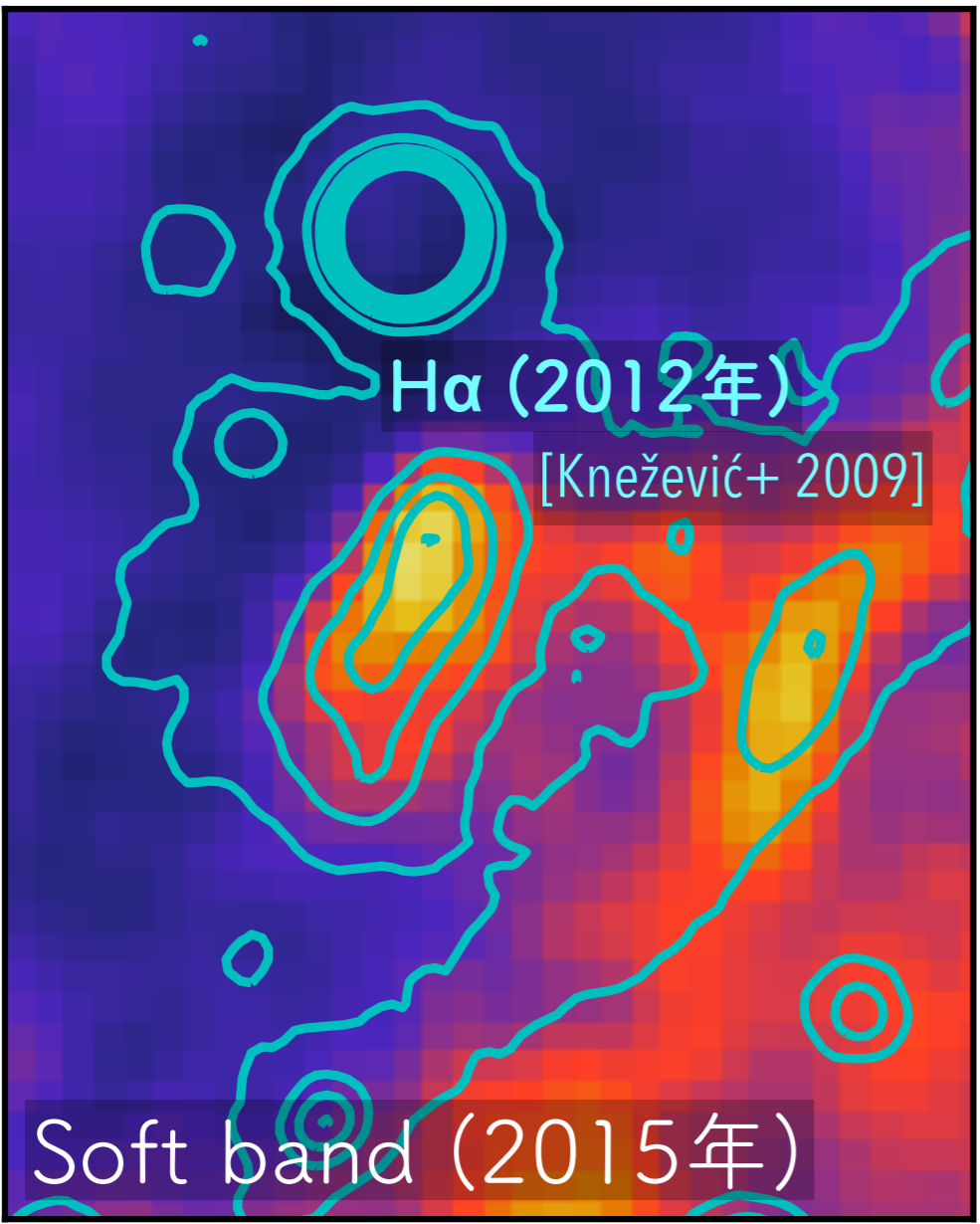
9 フィッティング結果



◎ 低エネルギー成分 + Ref1 領域のモデルでのフィッティング結果

- ▶ 低エネルギー成分の形が年々変化している (後述)
- ▶ 低エネルギー成分は太陽組成のモデルでよく再現
 - > 低エネルギー成分は星間物質由来?

Knot1の可視光のイメージ



Hα輝線画像と良い相関

濃い中性水素ガスと順行衝撃波が相互作用 [Ghavaminan+ 2000]

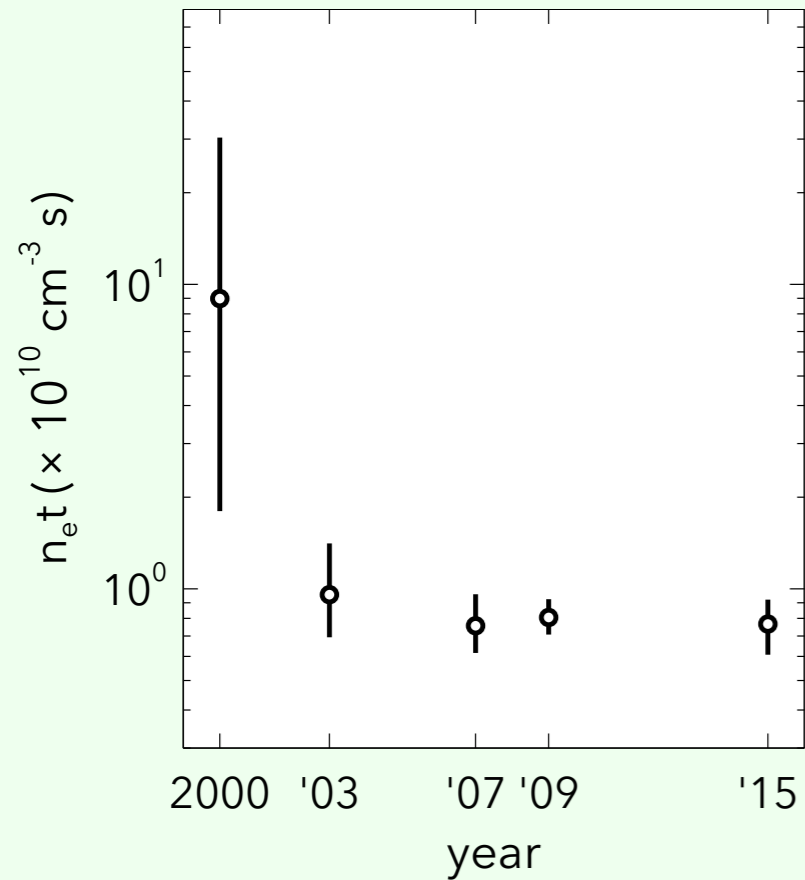
➡ Knot1は星間物質由来 (Tychoで**初検出**)

HSTの画像では、複数のフィラメントが重なった構造

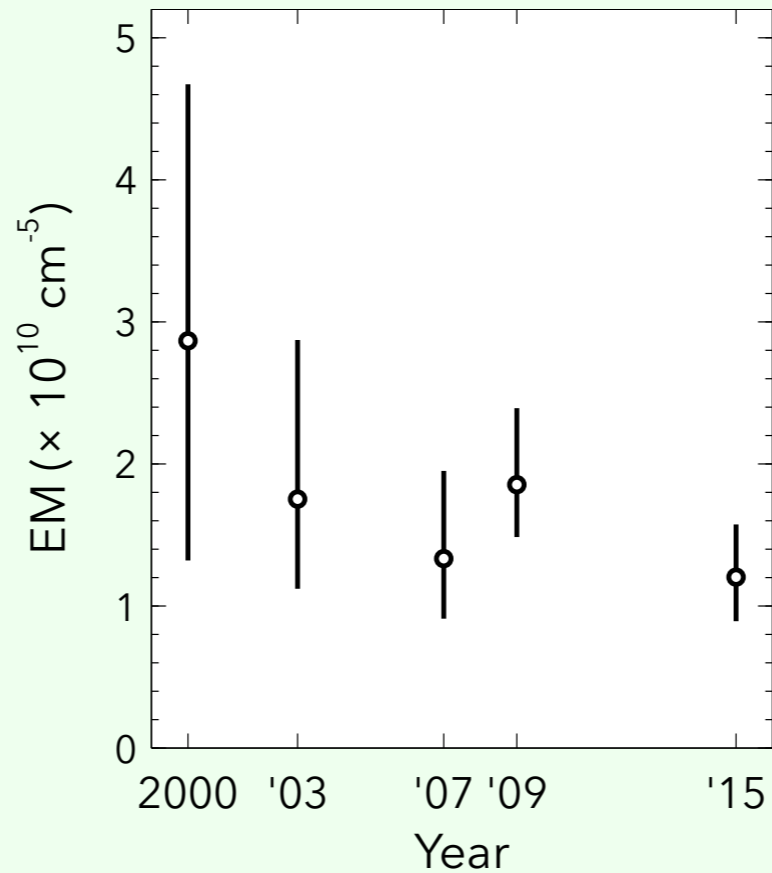
密度が高く複雑な形をした構造が存在？

11 低エネルギー成分のベストフィットパラメータ

電離度

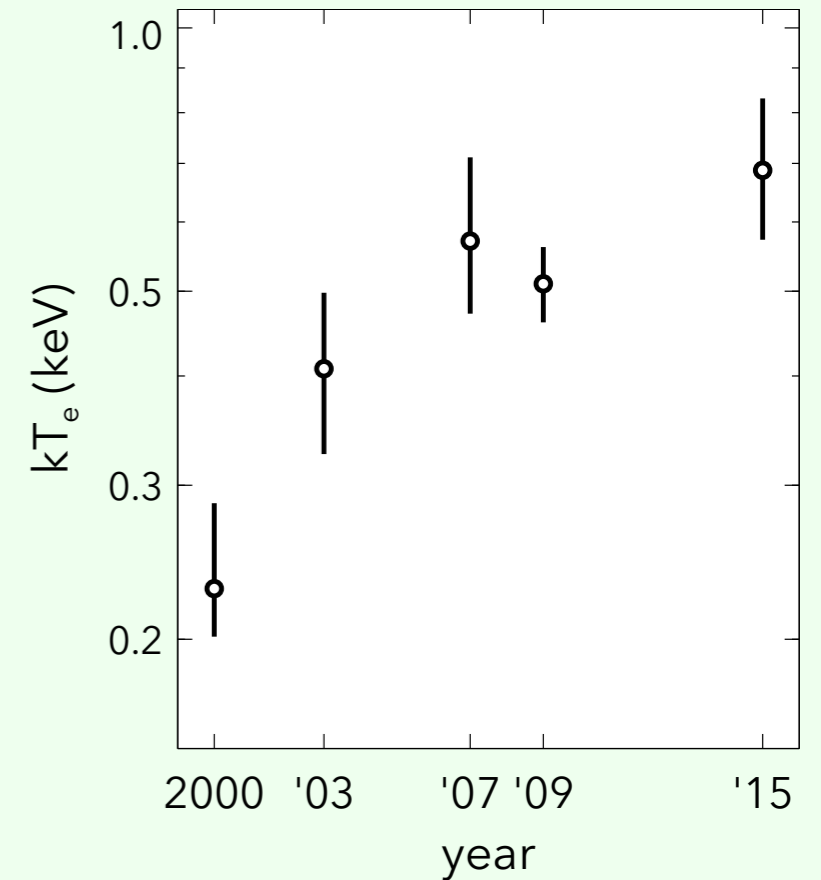


Emission Measure



有意な変化なし

電子温度



上昇の傾向を発見

- ▶ Emission Measure ($n_e n_H V$) の値から、ISMの密度は $\sim 10 \text{ cm}^{-3}$
(c.f. 周りの星間物質の密度は $0.3\text{--}1 \text{ cm}^{-3}$ (Williams+ 2013))
- ▶ この場合の15年間での電離度の変化は、 $n_e \Delta t \sim 5 \times 10^9 \text{ cm}^{-3} \text{ s}$ 程度

電子温度が15年で $\sim 0.2 \text{ keV} \rightarrow \sim 0.7 \text{ keV}$ 上昇

➡ ISM中の濃い構造と衝撃波が衝突して加熱している？

電子温度上昇の解釈

衝撃波のすぐ下流の温度

電子温度: $kT_{e,init} = \frac{3}{16} m_e v_{sh}^2$ 陽子温度: $kT_{p,init} = \frac{3}{16} m_p v_{sh}^2$

Knot1の衝撃波速度(v_{sh})は圧力平衡を仮定して、密度比から計算 $v_{sh} = (\rho_{ism}/\rho_{knot})^{1/2} v_{ism}$

Knot1の密度 Emission Measureの値から、 $n_H \sim 10 \text{ cm}^{-3}$ (前述)

周りの密度 Williams+2013より、 $n_H \sim 0.1 - 2.1 \text{ cm}^{-3}$

Knot1の密度は周りの約10倍のオーダー

ISMの衝撃波速度は4000 km/s (Tanaka+2021)

→ Knot1の衝撃波速度は~1500 km/s

→ その後、陽子-電子間でエネルギー交換して電子温度が上昇

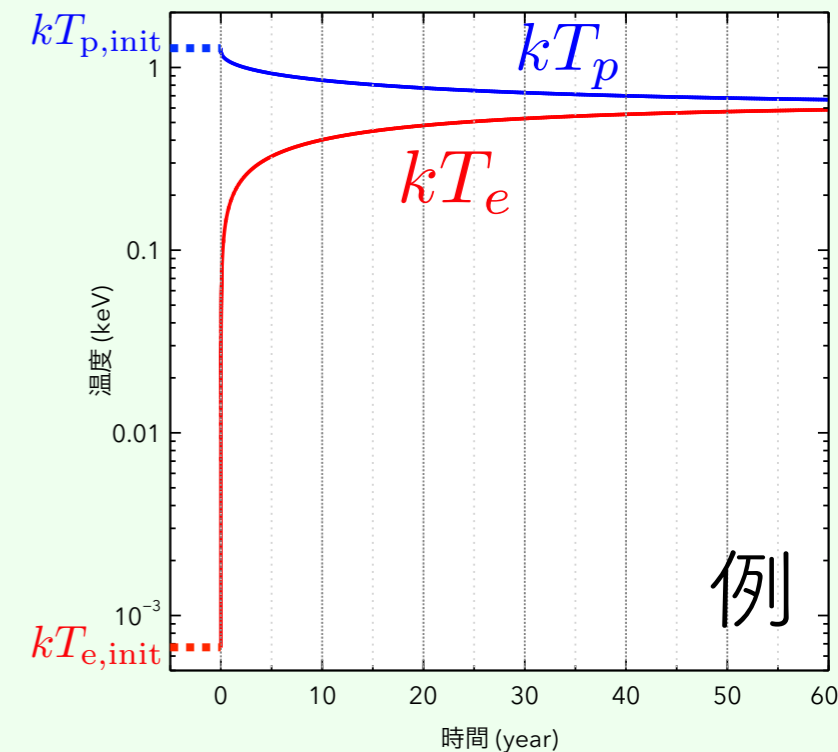
$$\frac{dT}{dt} = \frac{T_f - T}{t_{eq}}, \quad \text{[Spitzer 1962]}$$

$$t_{eq} = 3.1 \times 10^8 \left(\frac{k_B T_e}{\text{eV}} \right)^{3/2} \left(\frac{n_e}{\text{cm}^{-3}} \right)^{-1} (\ln \Lambda)^{-1} \text{ s}, \quad n_e : \text{電子密度}$$

無衝突加熱を考慮すると...

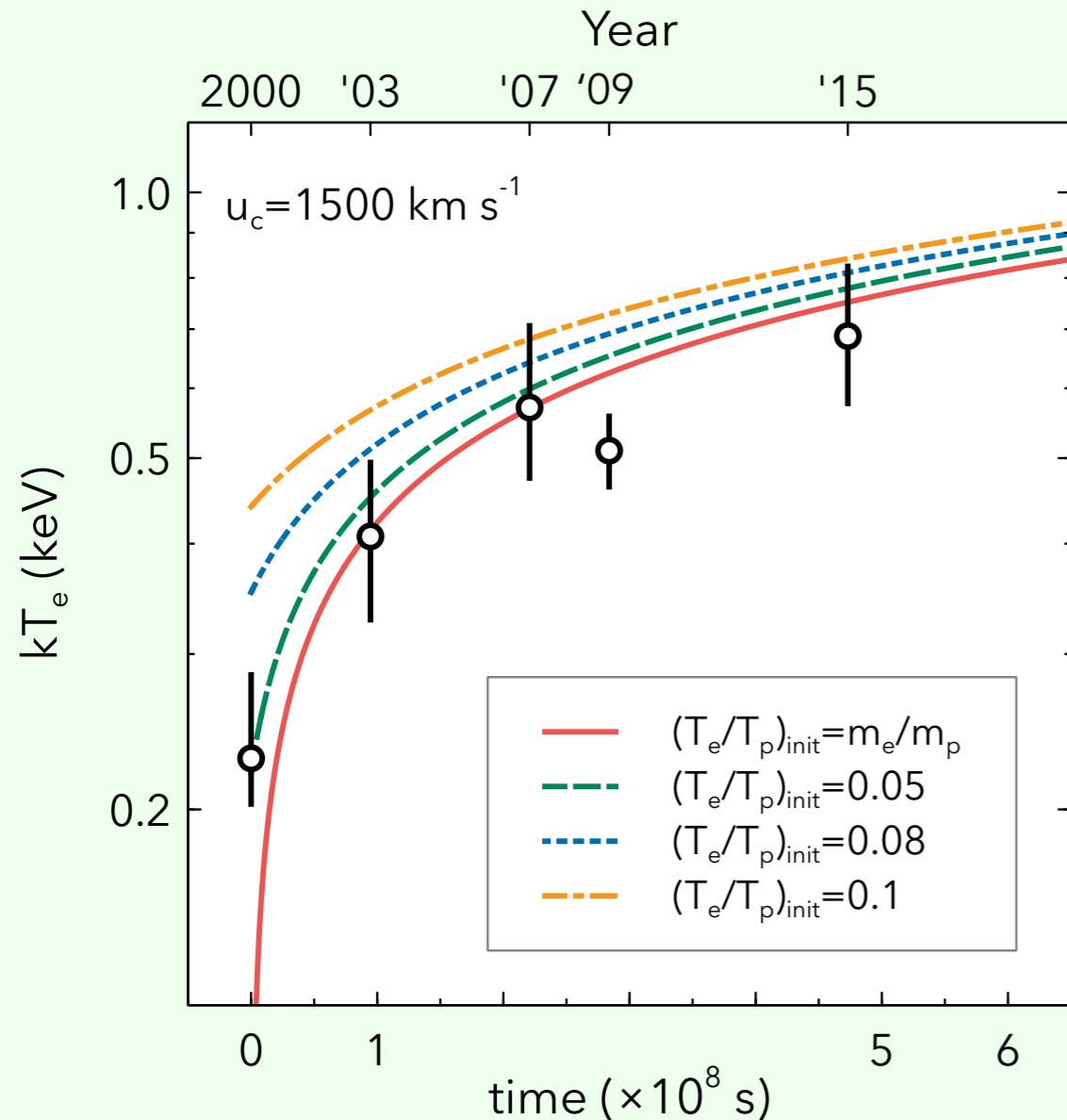
衝撃波面で熱交換が起こり、 $(T_e/T_p)_{init}$ がmass比より大きくなる

$(T_e/T_p)_{init}$ を変えた温度変化の計算結果と比較



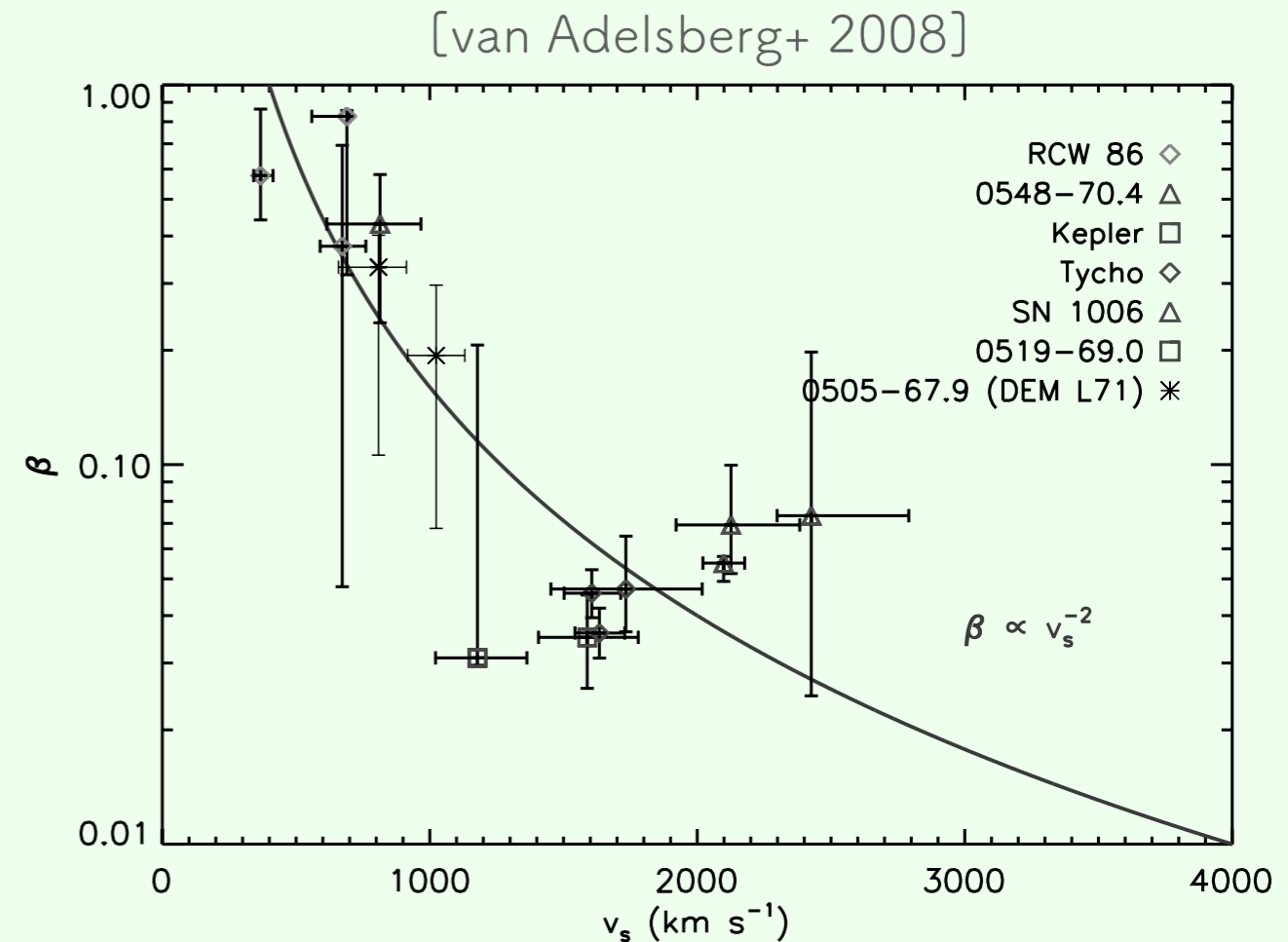
計算結果との比較

今回の結果



$(T_e/T_p)_{\text{init}} \lesssim 0.05$ で実験結果を説明できる

先行研究 (H α) での結果



H α の観測から衝撃波速度 $\gtrsim 1000 \text{ km/s}$ で

$$(T_e/T_p)_{\text{init}} \sim 0.05$$

-> 今回の結果と矛盾なし

- ▶ 今回の観測でH α の結果とは独立に衝撃波直後の T_e/T_p を推定できた
- ▶ $v_{\text{sh}} \gtrsim 1000 \text{ km/s}$ では、周辺環境や衝撃波速度に関係なく、 $T_e/T_p \sim 0.05$ ことを示唆

- ▶ 超新星残骸Tychoにおいて時間変動解析を行なった
- ▶ 熱的X線放射の時間変動を発見

- ▶ この放射の特徴

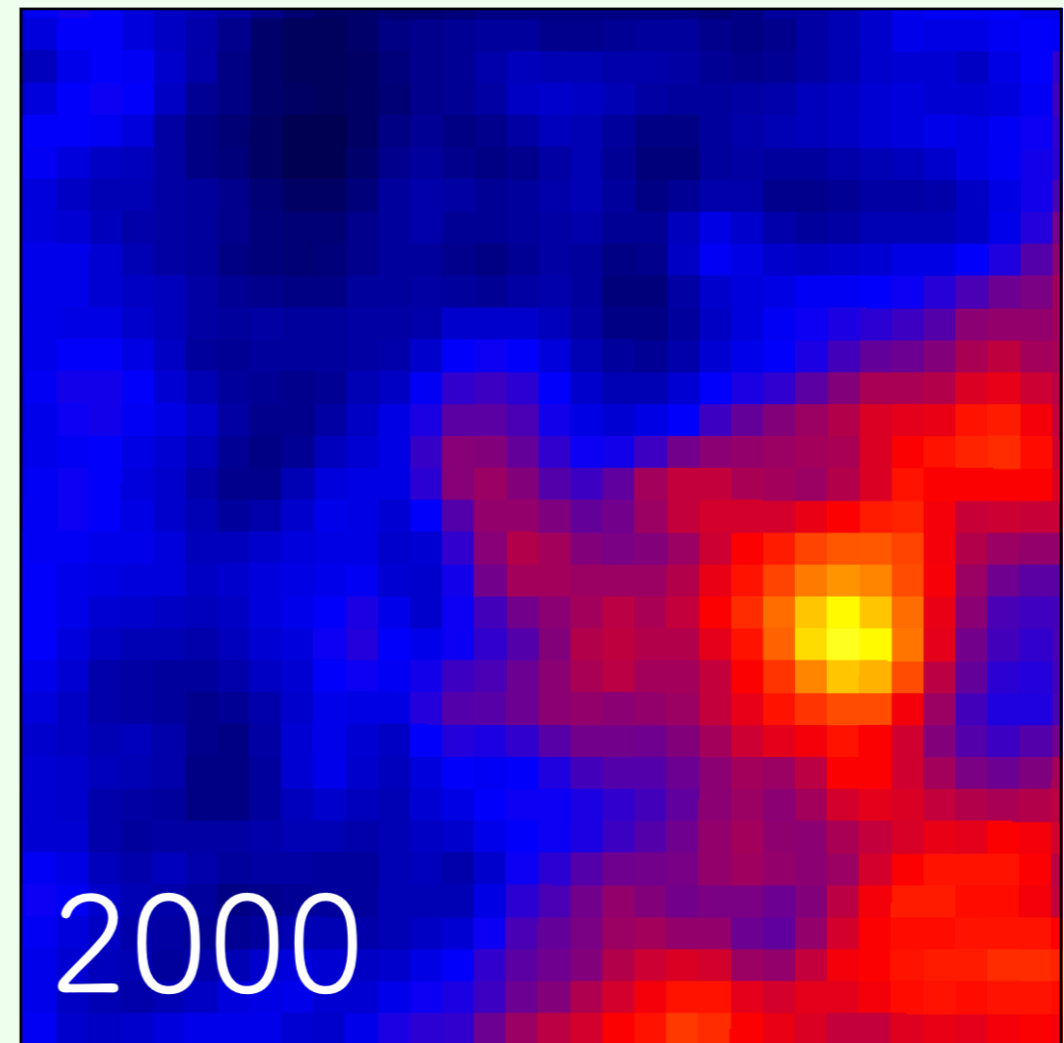
星間物質由来 (Tychoで初の発見)

温度が年々上昇

→ クーロン加熱モデルと比較すると、

$(T_e/T_p)_{\text{init}} \lesssim 0.05$ のときに測定結果を

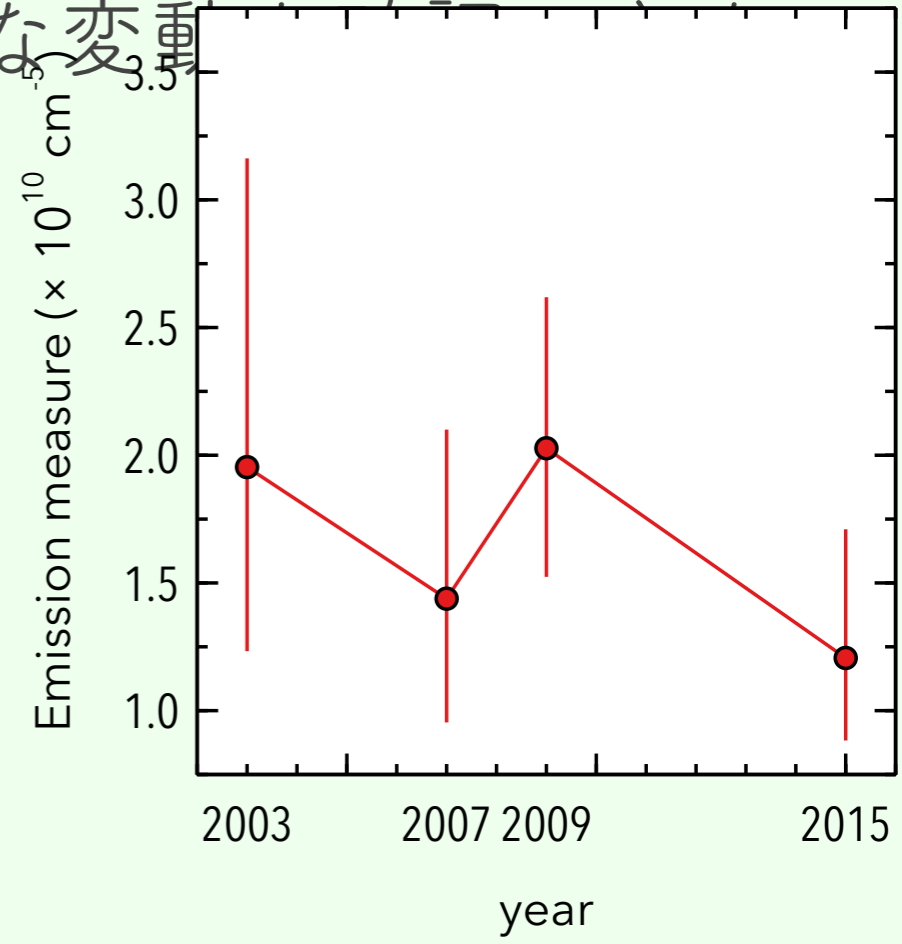
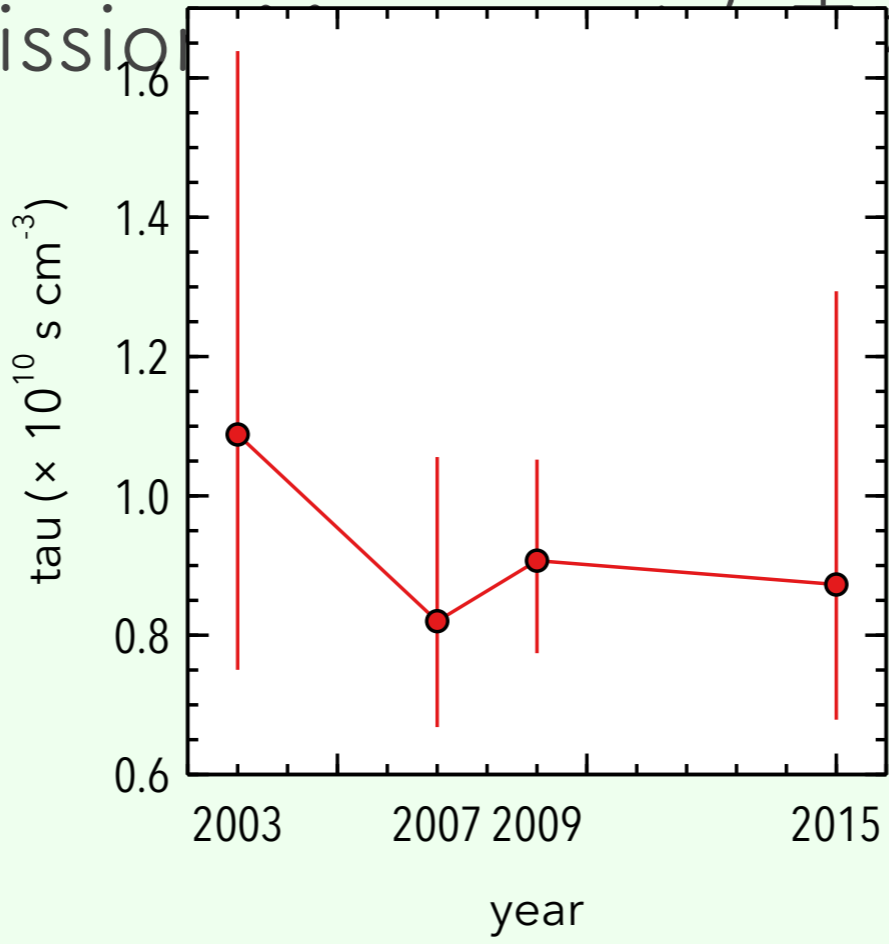
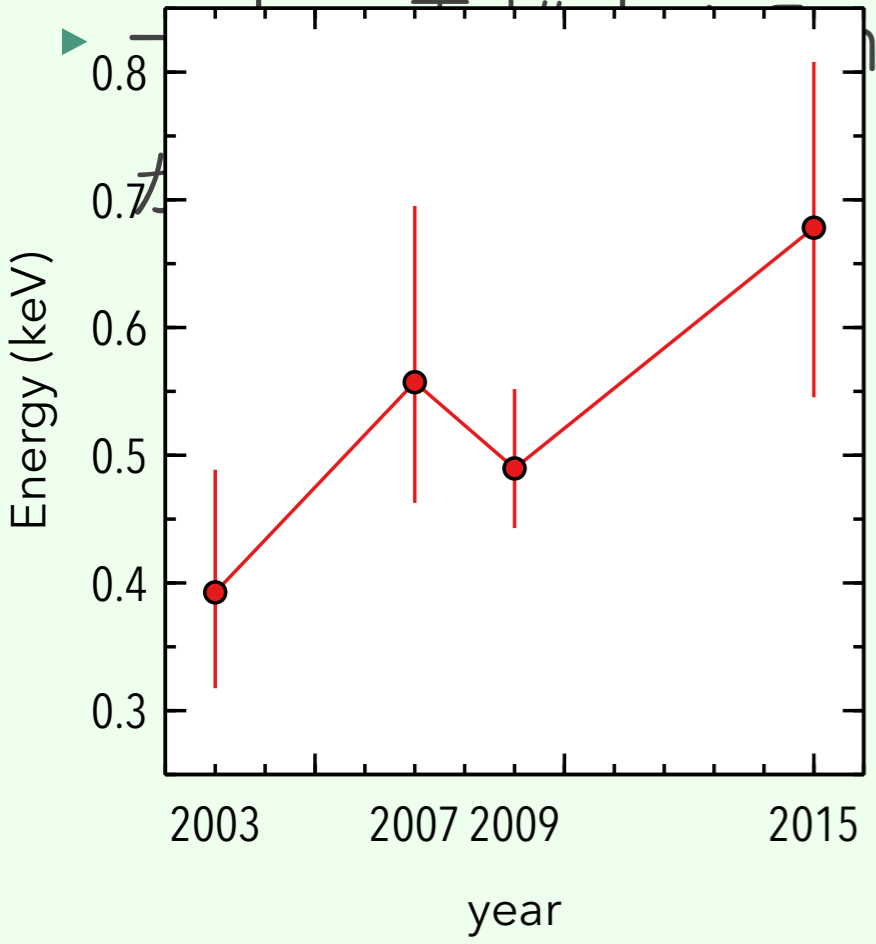
よく再現



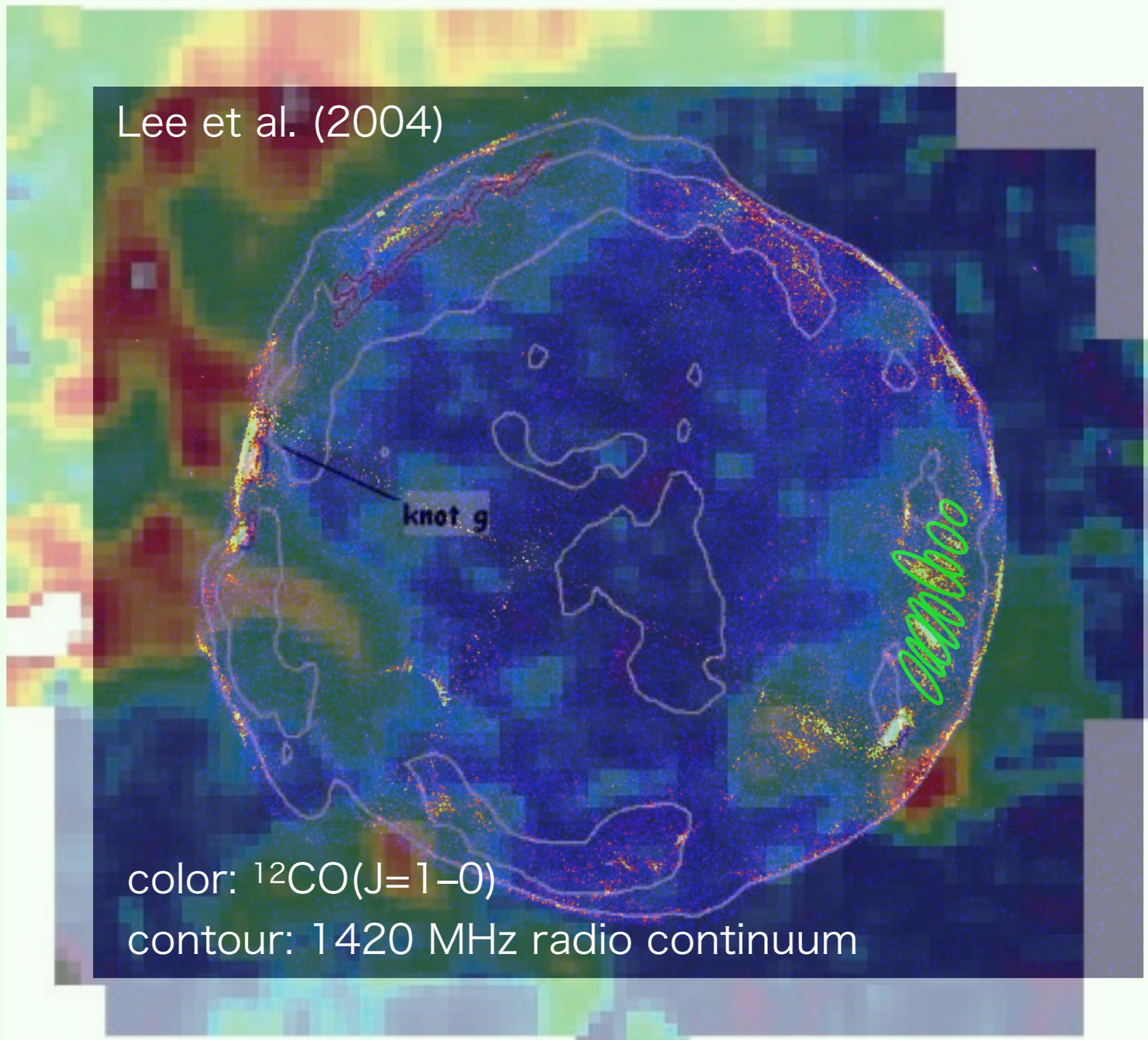
Backup

Knot由来の放射の時間変動

この電子温度のフィッティング結果では電子温度の上昇と示唆 (=放射粒子の数)



17 Correlation between stripe and ISM



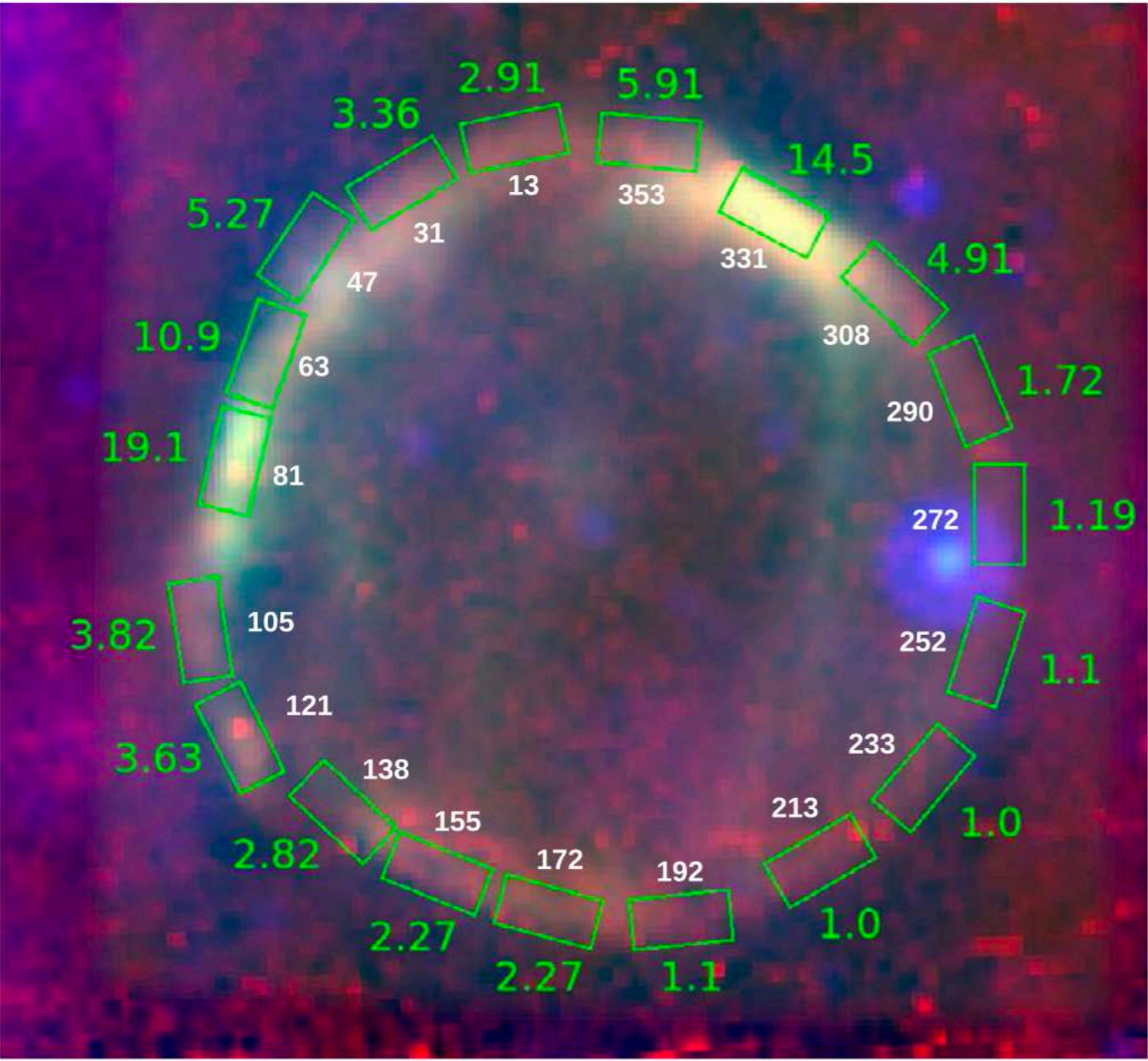


Figure 2. The normalized post-shock density in various regions of Tycho, along with outlines of the spatial regions used for our analysis, superposed on a three-color IR image, with *Spitzer* 70 μm emission in red, 24 μm emission in green, and *WISE* 12 μm in blue. North is up and east is to the left. The absolute scaling for the densities are 0.11 for the compact grain model and 0.2 for the porous grain model (see Section 4.4 and Table 2 for details). Interior numbers are azimuthal angle, in degrees.

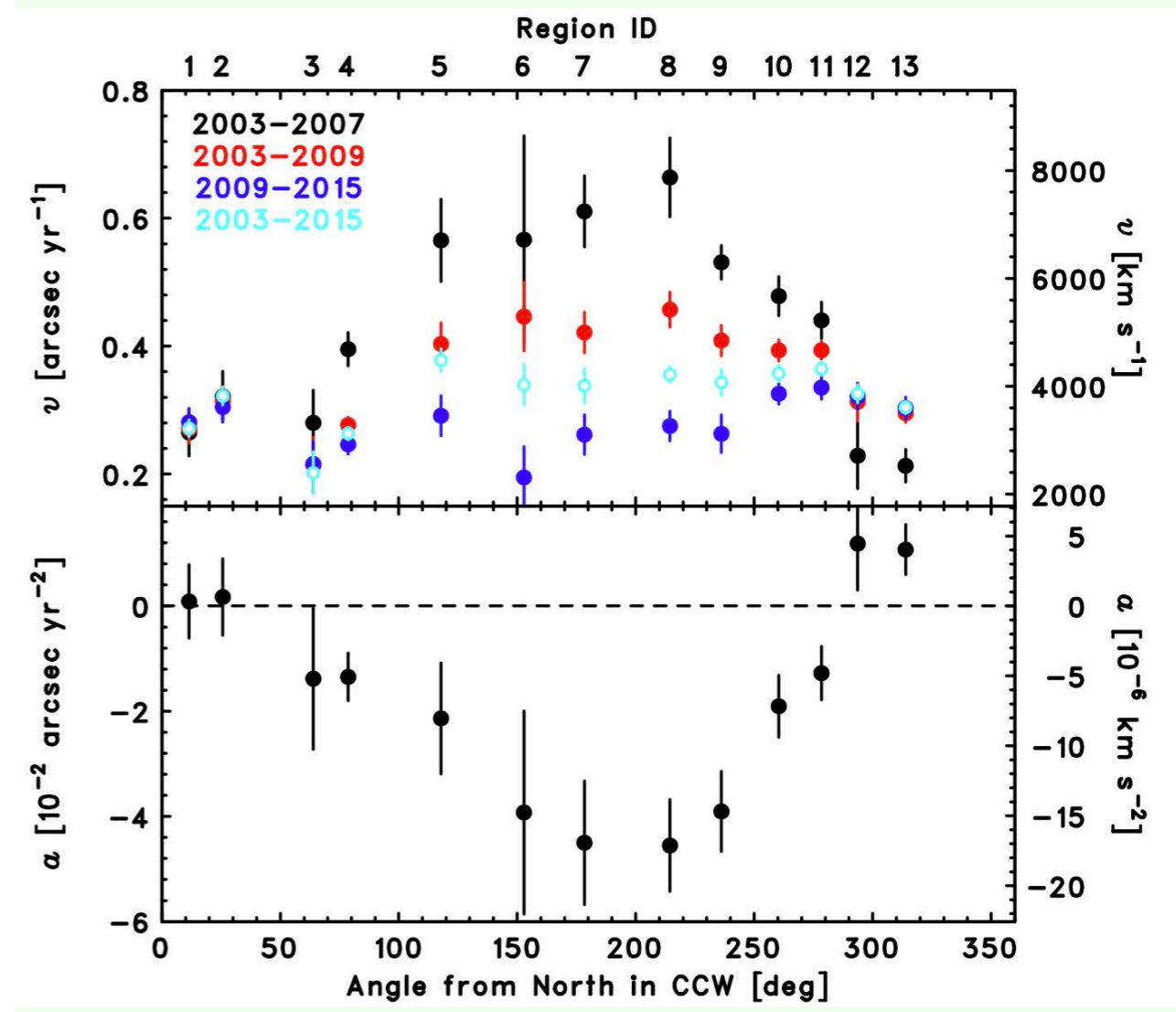
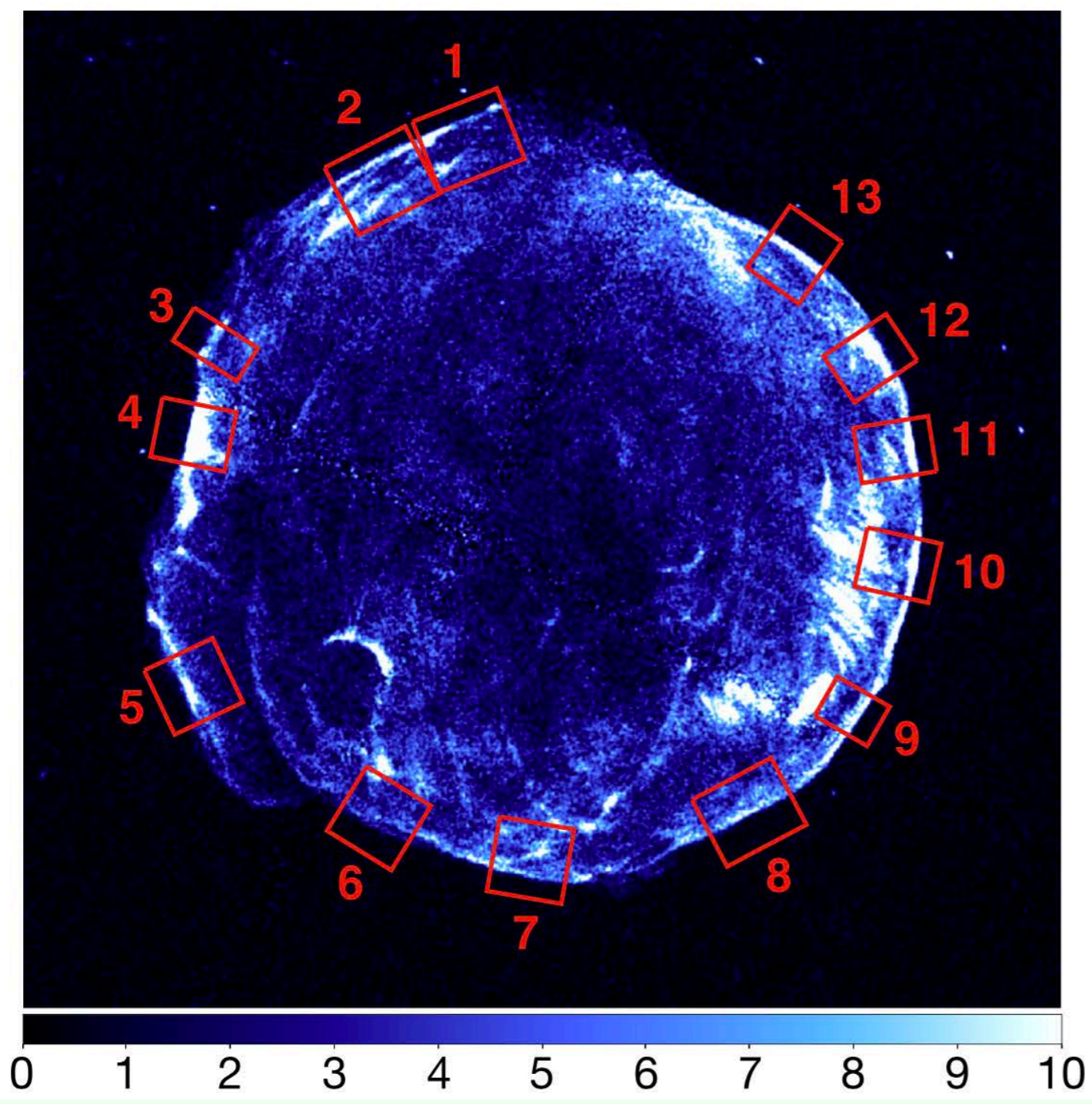
(A color version of this figure is available in the online journal.)

Table 2
Results

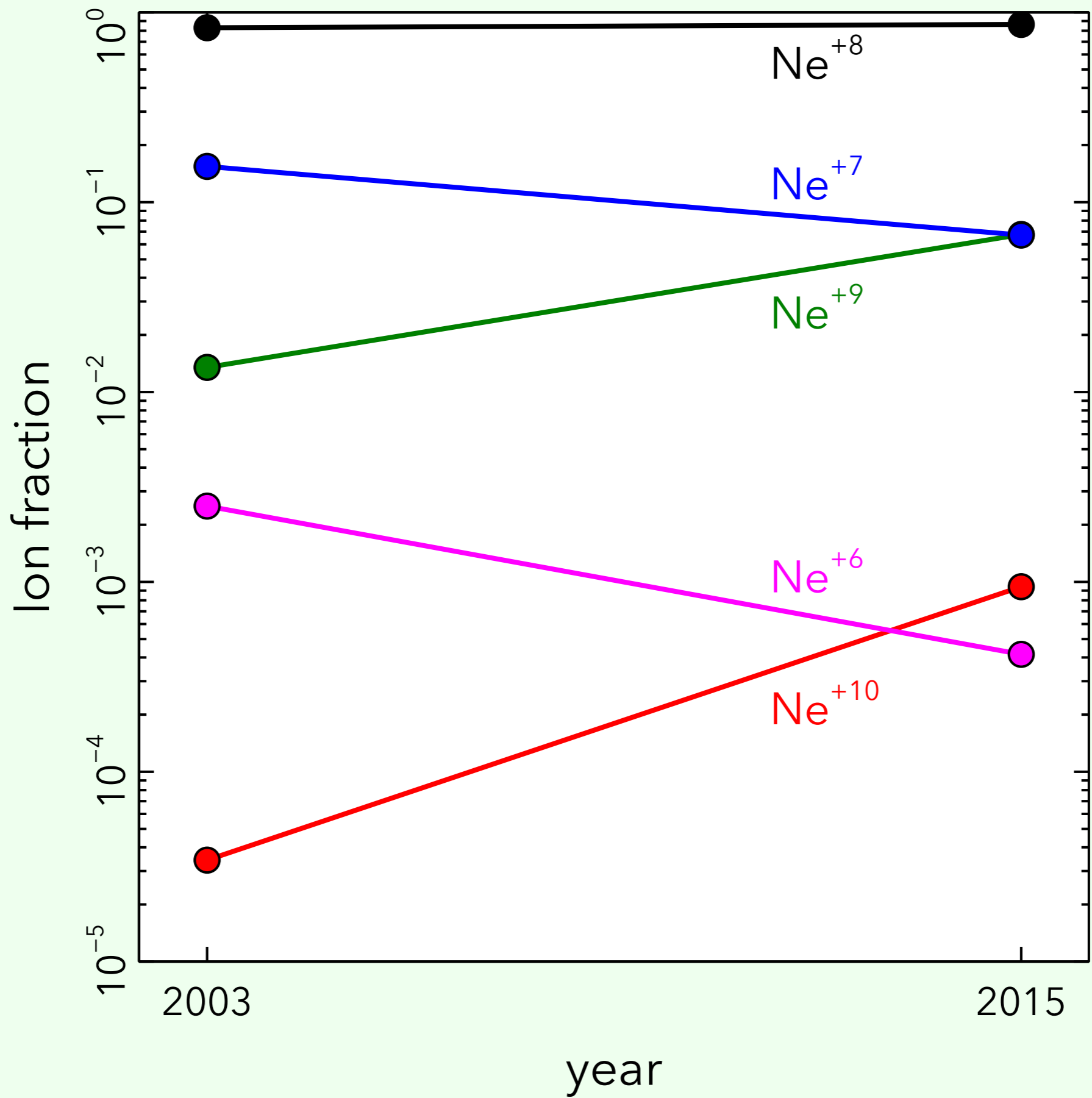
Deg.	Density (cm^{-3})	Pressure (dyne cm^{-2})
13	$0.32^{0.40}_{0.27}$	$2.51^{3.16}_{2.01} \times 10^{-8}$
32	$0.37^{0.46}_{0.31}$	$2.37^{2.99}_{1.90} \times 10^{-8}$
47	$0.58^{0.72}_{0.48}$	$1.89^{2.38}_{1.52} \times 10^{-8}$
63	$1.2^{1.5}_{1.0}$	$2.59^{3.39}_{1.92} \times 10^{-8}$
81	$2.1^{2.6}_{1.7}$	$6.00^{7.77}_{4.55} \times 10^{-8}$
105	$0.42^{0.52}_{0.35}$	$2.37^{2.99}_{1.90} \times 10^{-8}$
121	$0.4^{0.50}_{0.33}$	$2.88^{3.62}_{2.31} \times 10^{-8}$
138	$0.31^{0.38}_{0.26}$	$2.00^{2.52}_{1.61} \times 10^{-8}$
155	$0.25^{0.31}_{0.21}$	$1.77^{2.28}_{1.36} \times 10^{-8}$
172	$0.25^{0.31}_{0.21}$	$1.53^{1.97}_{1.18} \times 10^{-8}$
192	$0.12^{0.15}_{0.10}$	$1.00^{1.26}_{0.80} \times 10^{-8}$
213	$0.11^{0.14}_{0.09}$	$1.06^{1.36}_{0.81} \times 10^{-8}$
233	$0.11^{0.14}_{0.09}$	$1.02^{1.29}_{0.82} \times 10^{-8}$
252	$0.12^{0.15}_{0.10}$	$1.08^{1.39}_{0.82} \times 10^{-8}$
272	$0.13^{0.16}_{0.11}$	$1.13^{1.42}_{0.91} \times 10^{-8}$
290	$0.19^{0.24}_{0.16}$	$1.52^{1.92}_{1.22} \times 10^{-8}$
308	$0.54^{0.67}_{0.45}$	$4.05^{5.10}_{3.25} \times 10^{-8}$
331	$1.6^{2.0}_{1.3}$	$9.58^{12.1}_{7.69} \times 10^{-8}$
353	$0.65^{0.81}_{0.54}$	$2.15^{2.71}_{1.73} \times 10^{-8}$

Notes. Densities are post-shock. Pressure calculation assumes compression ratio of 4 at the shock front. Both assume standard ISM dust grain models of Weingartner & Draine (2001) and $D = 2.3$ kpc (see the text for details of dependence on these quantities).

(a)



イオンフラクション



宇宙における無衝突衝撃波

無衝突衝撃波…粒子間の衝突がほとんど起こらない衝撃波

太陽風のバウショック（無衝突系）

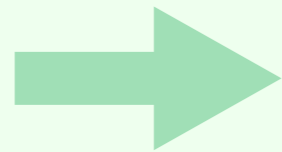
平均自由行程 = $\sim 10^{12}$ m

1AU = 1.5×10^{11} m

地球上の衝撃波（衝突系）

平均自由行程 = 数10 nm

衝撃波の厚さ = 1–10 cm

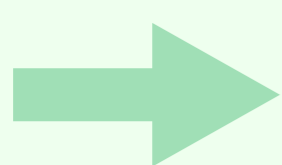


クーロン衝突による熱交換が行われにくい

衝撃波下流の温度（Rankine-Hugoniotの関係式）

$$kT_{e,i} = \frac{3}{16} m_{e,i} V_{sh}^2$$

$T_{e,i}$: 電子やイオンの温度
 $m_{e,i}$: 電子やイオンの質量



$$\frac{T_e}{T_p} = \frac{m_e}{m_p} \sim \frac{1}{2000}$$

実際の観測では、 $T_e \sim T_p$ となる (e.g., Ghavamian+ 2001)

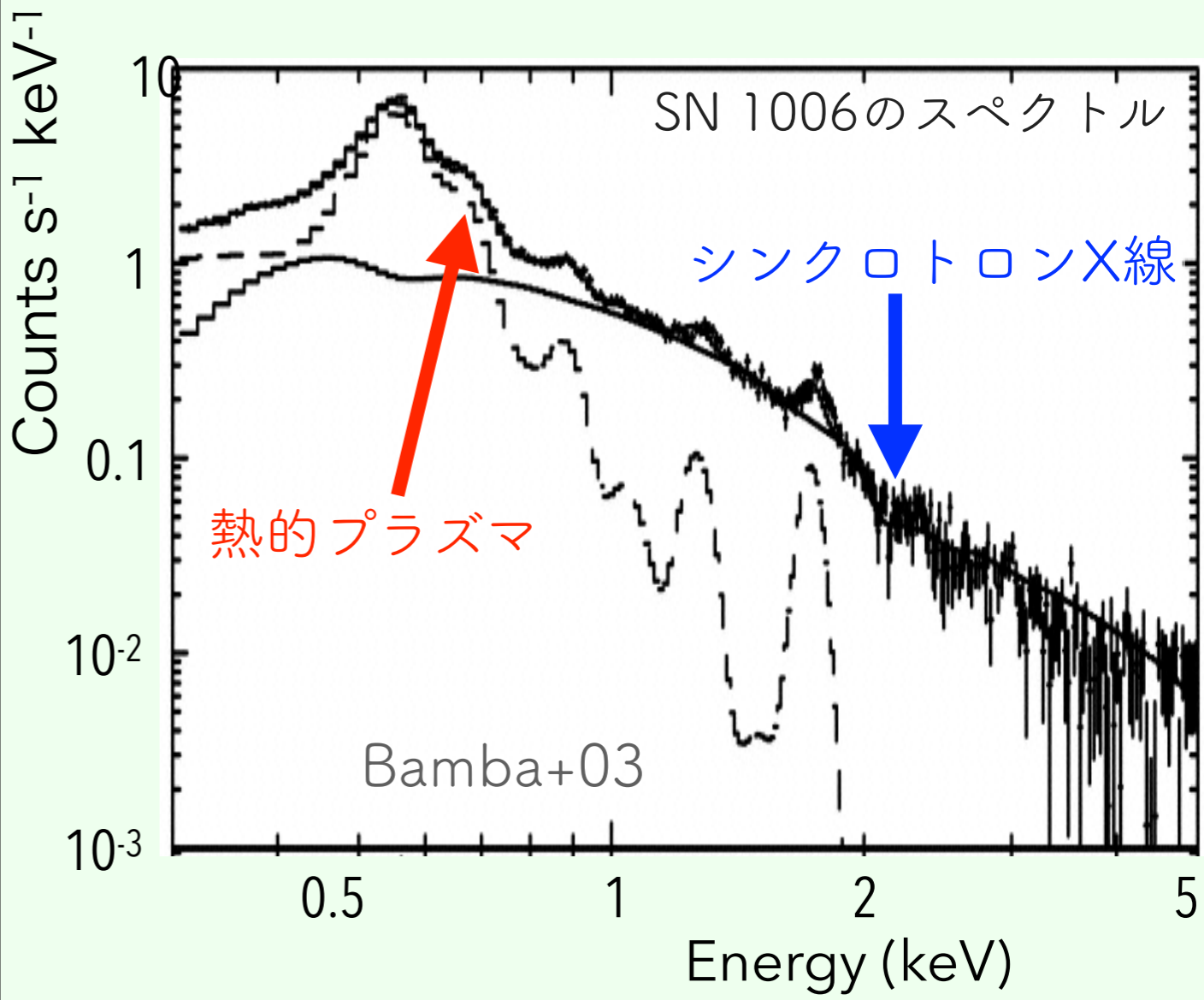
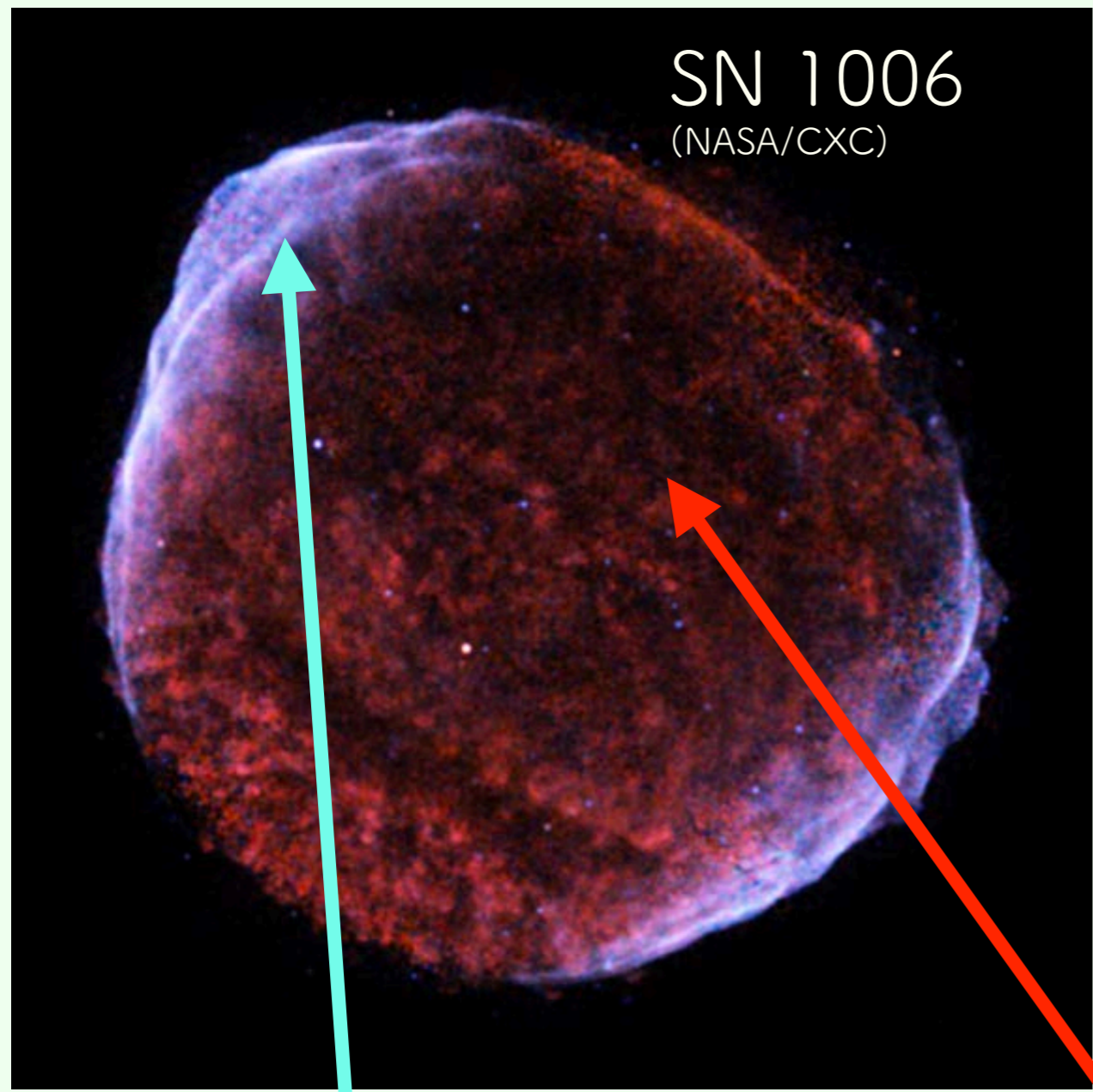
-> プラズマ中の電磁場を介して熱交換する（無衝突加熱）

(e.g., Cargill & Papadopoulos 1988)

今回の解析の目的：無衝突加熱をリアルタイムで観測する

超新星残骸 (SNR) の衝撃波

超新星残骸(SNR) … 衝撃波が掃き集めた星間物質(ISM)や爆発噴出物(ejecta)で構成



シンクロトロンX線

衝撃波加速された非熱的粒子由来

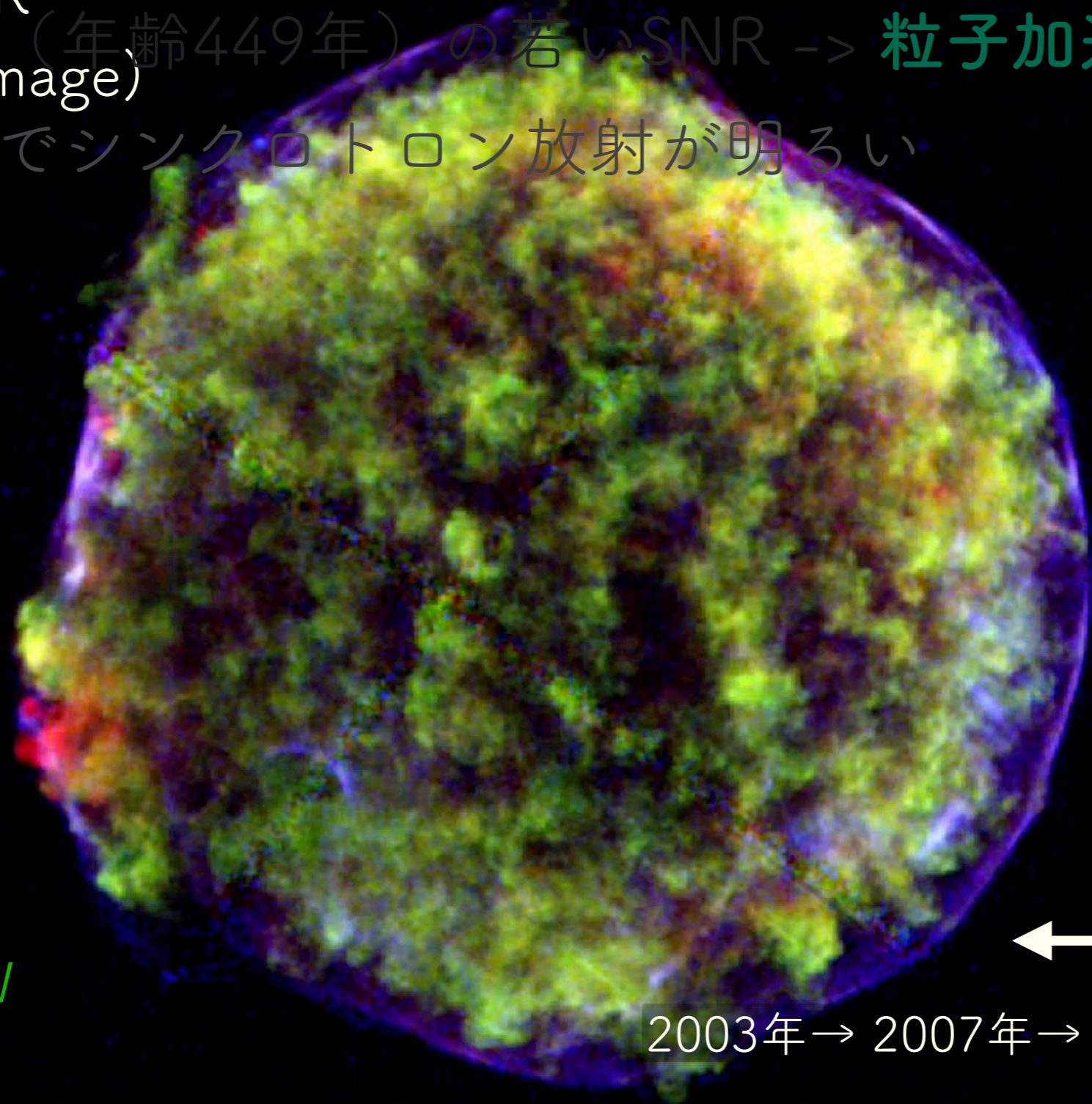
熱的プラズマ

衝撃波加熱された熱的粒子由来

超新星残骸Tycho

Tycho's SNR

- ▶ 1572年爆発（年齢449年）の若いSNR -> **粒子加速が活発**
- ▶ 4.0-6.0 keVでシンクロトロン放射が明るい



0.5-1.5 keV

1.63-2.26 keV

4.1-6.1 keV

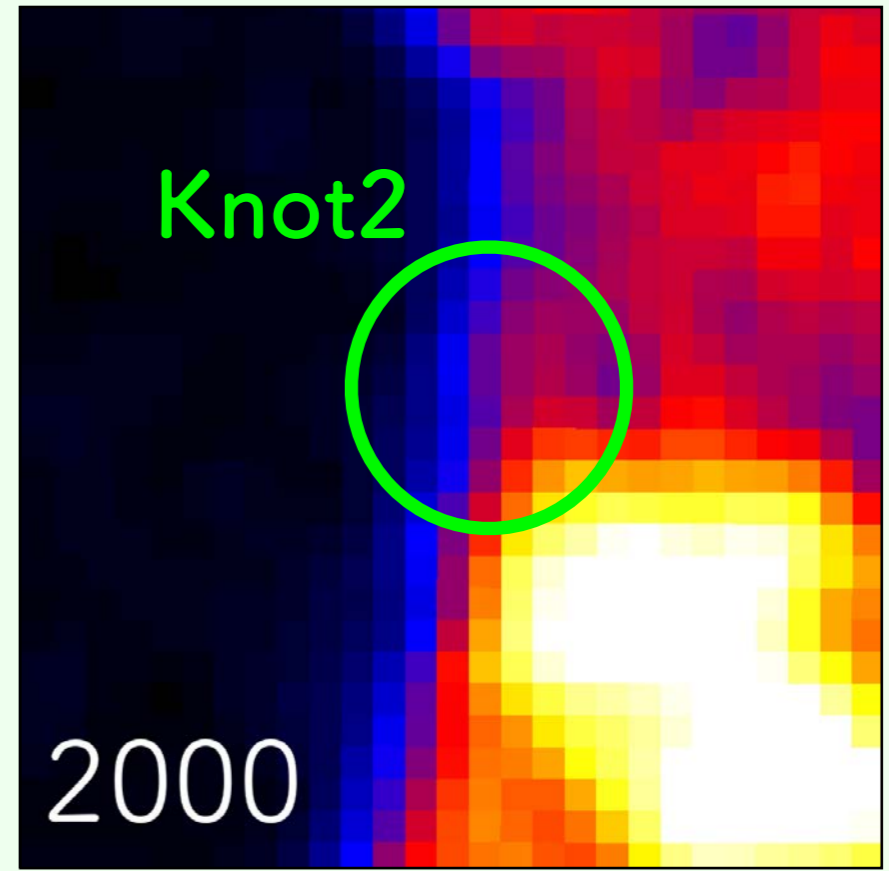
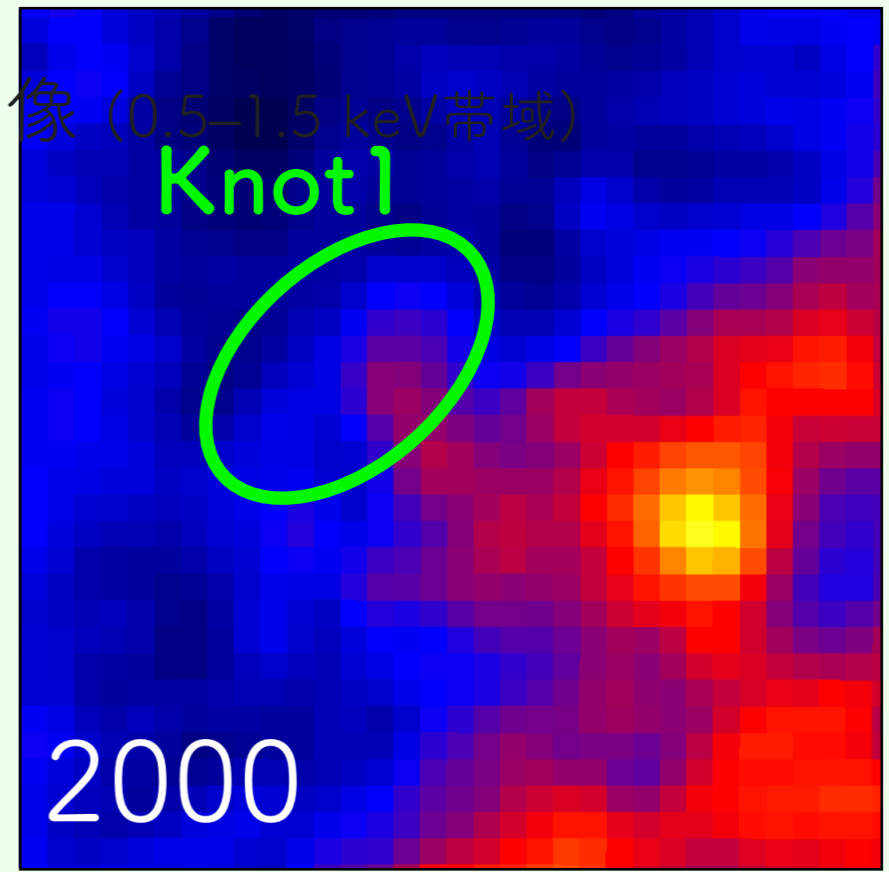
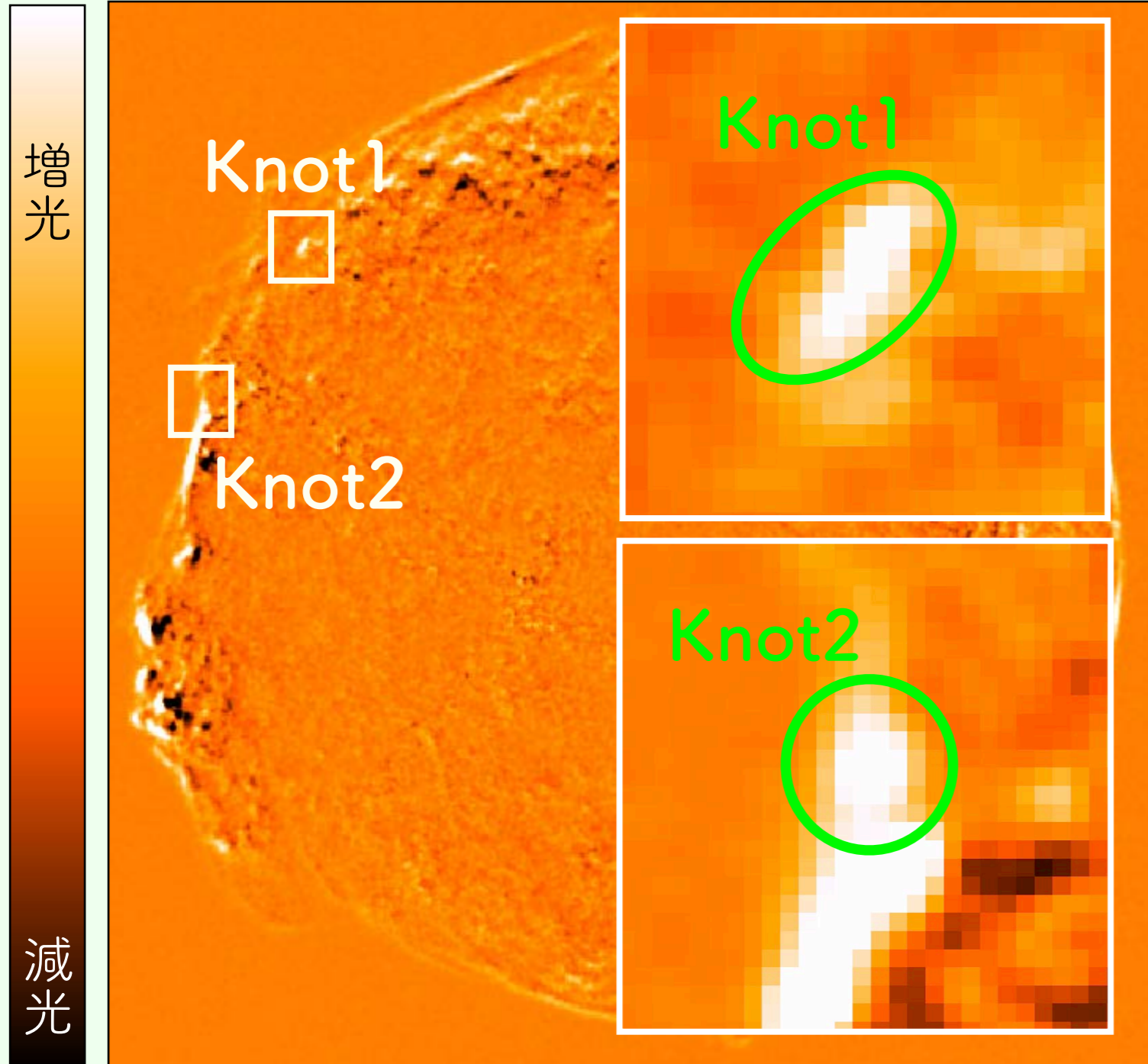
約3 pc



2003年 → 2007年 → 2009年 → 2015年

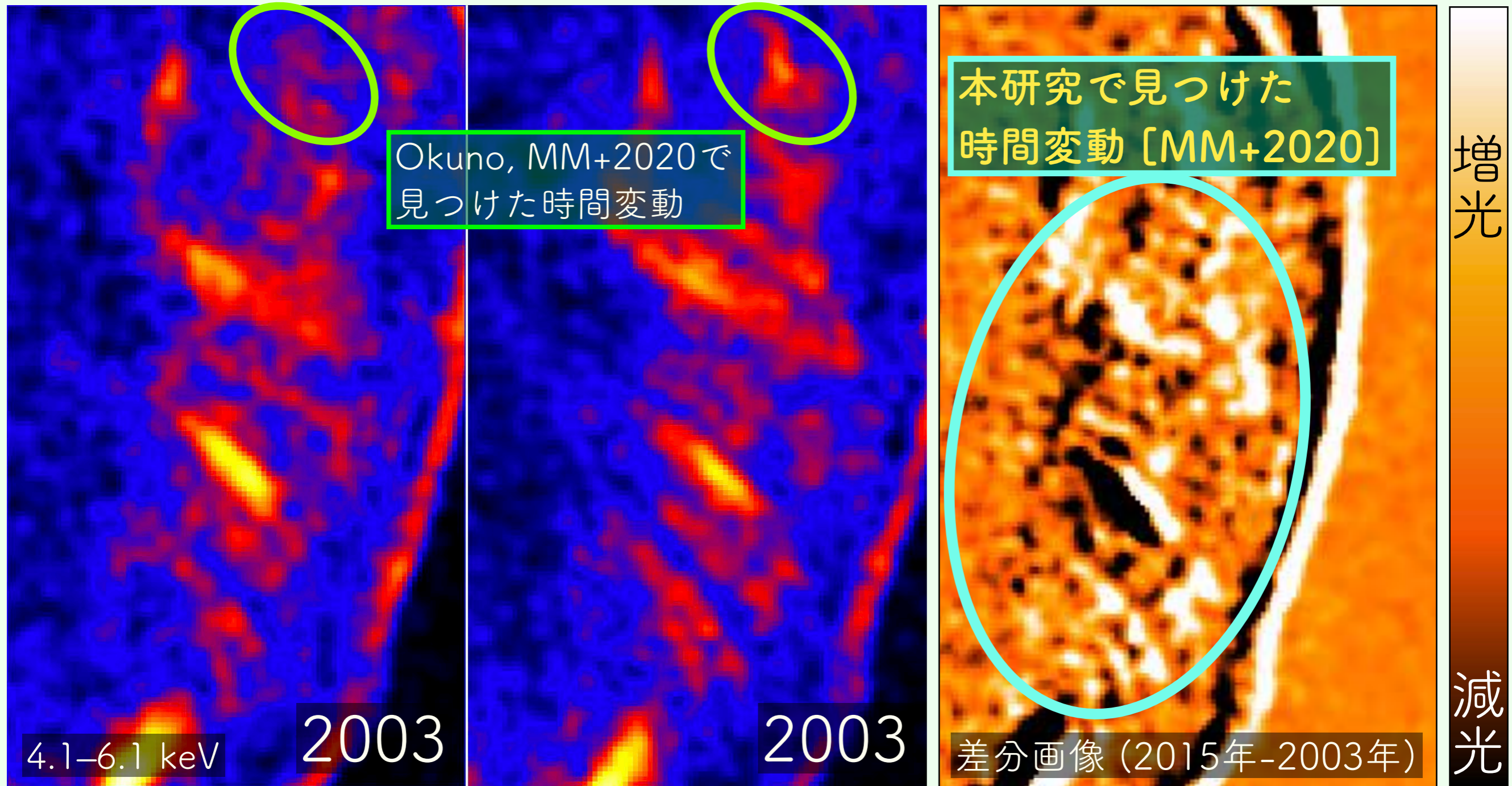
熱的プラズマの時間変動探索結果

2015年と2003年の差分画像 (0.5-1.5 keV帯域)



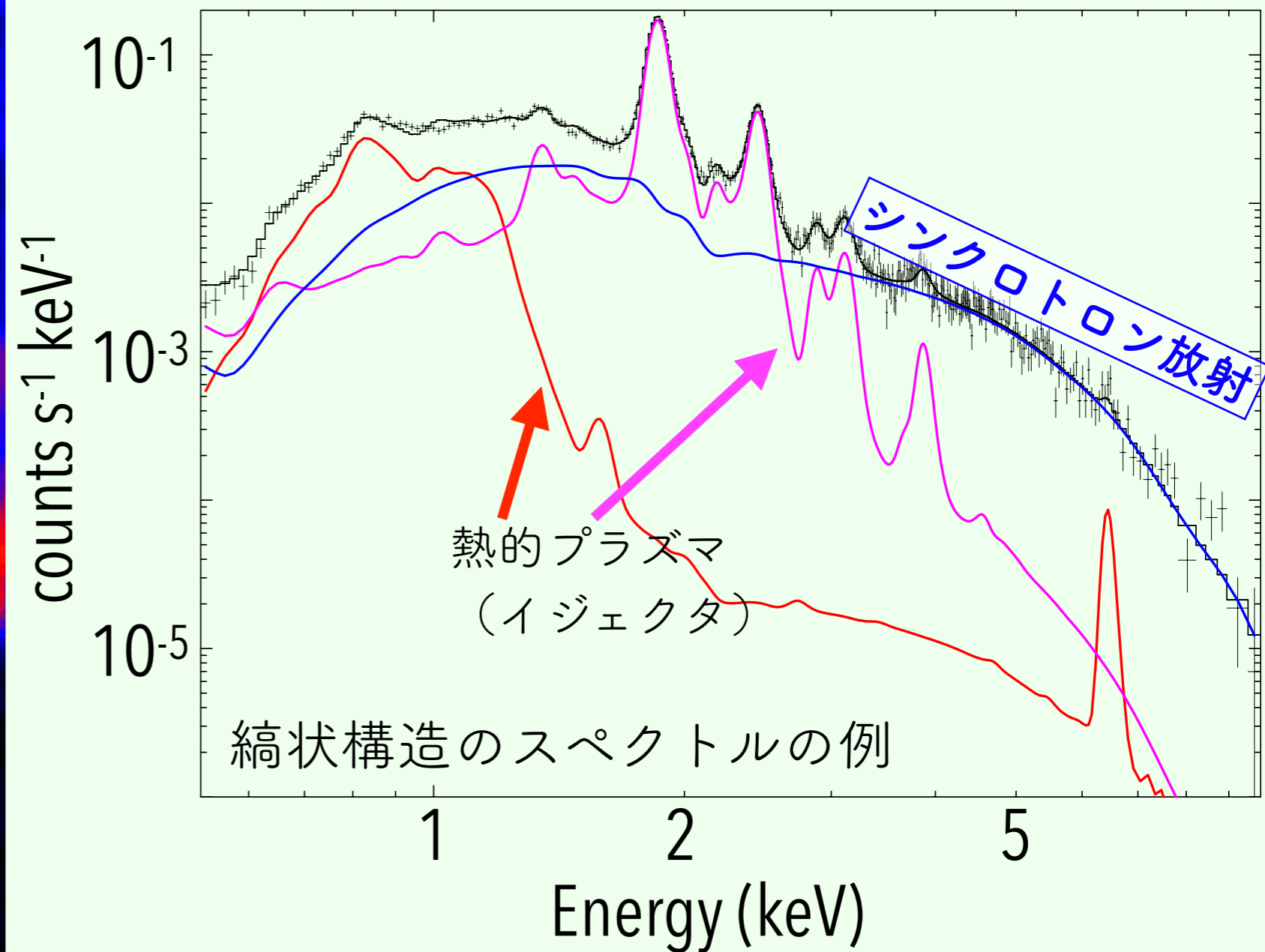
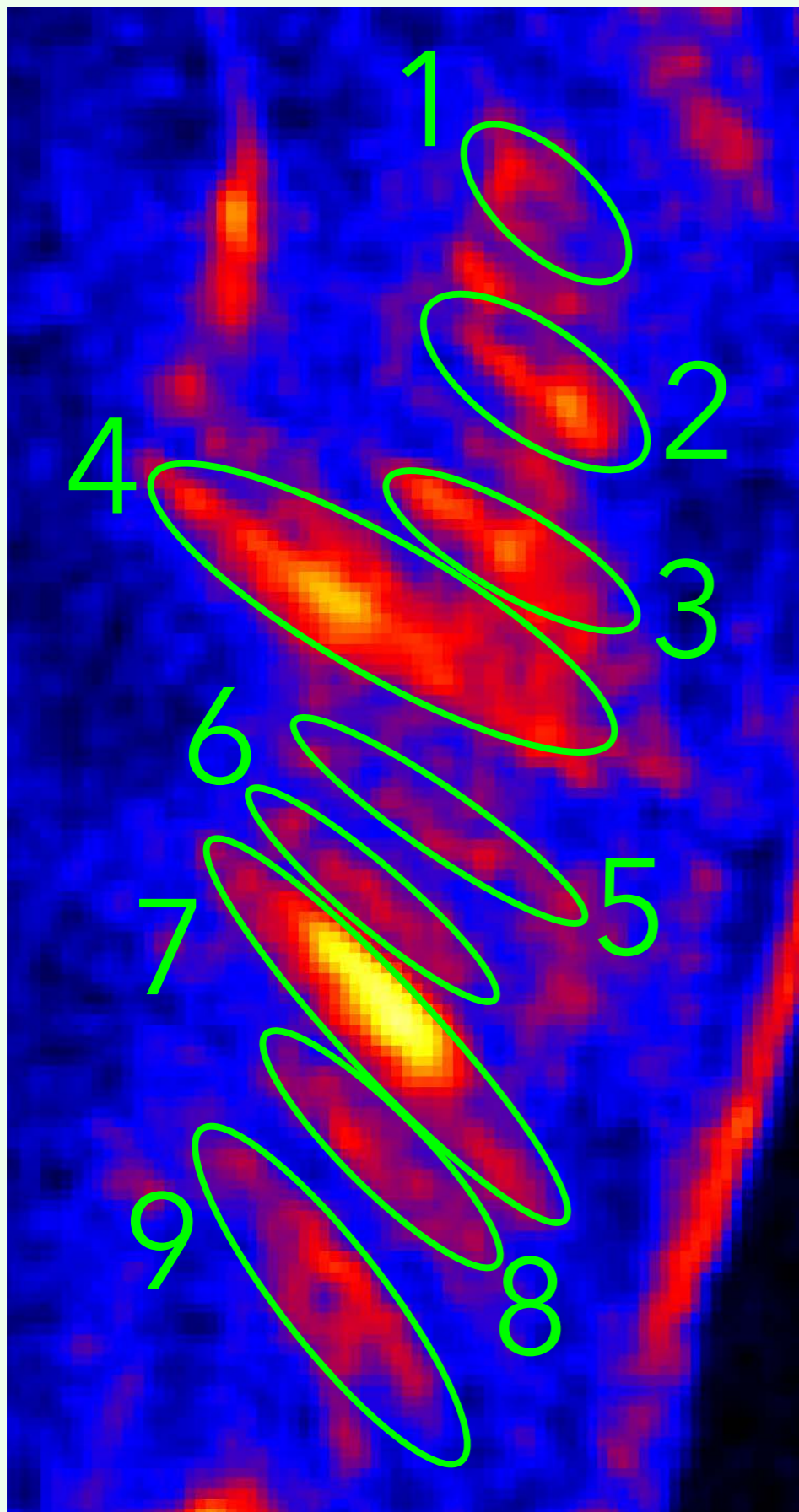
Tychoで初めて**熱的放射の時間変動**を発見

縞状構造の時間変動探索

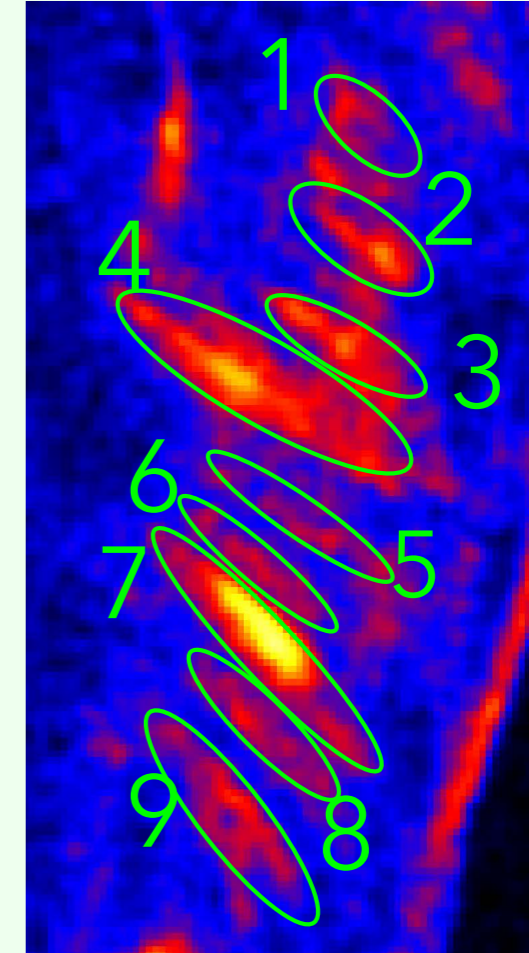
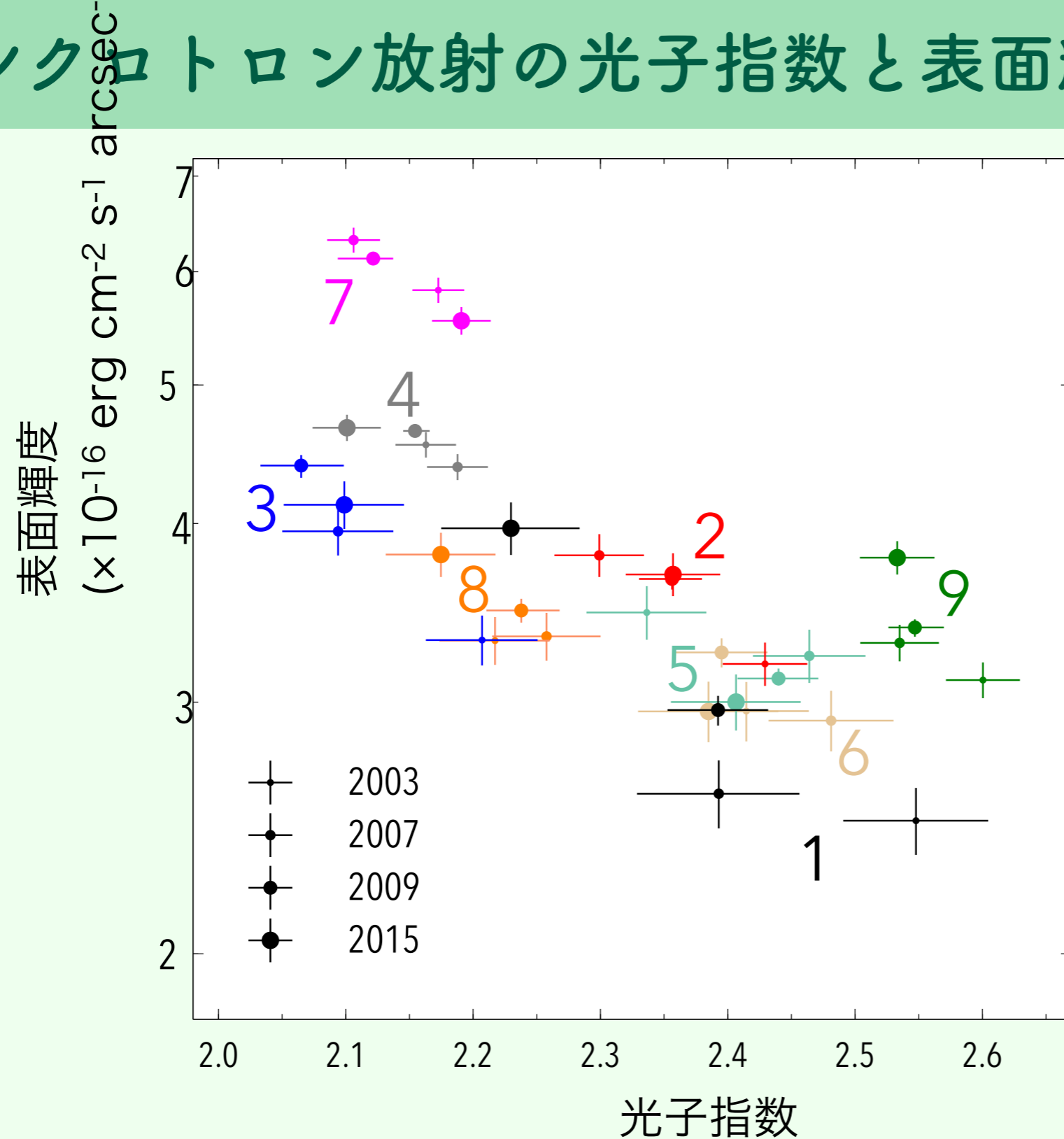


先行研究で発見した以外にも
縞状構造全体で増光&減光を

解析領域とフィッティングモデル

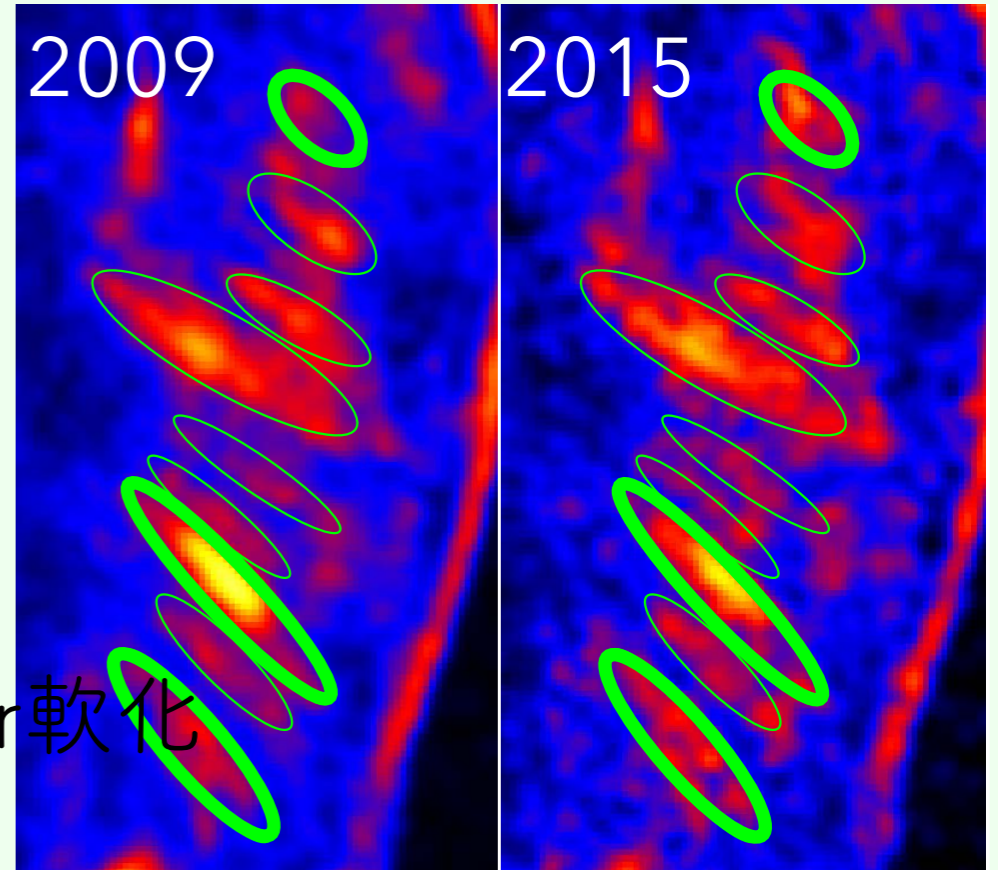
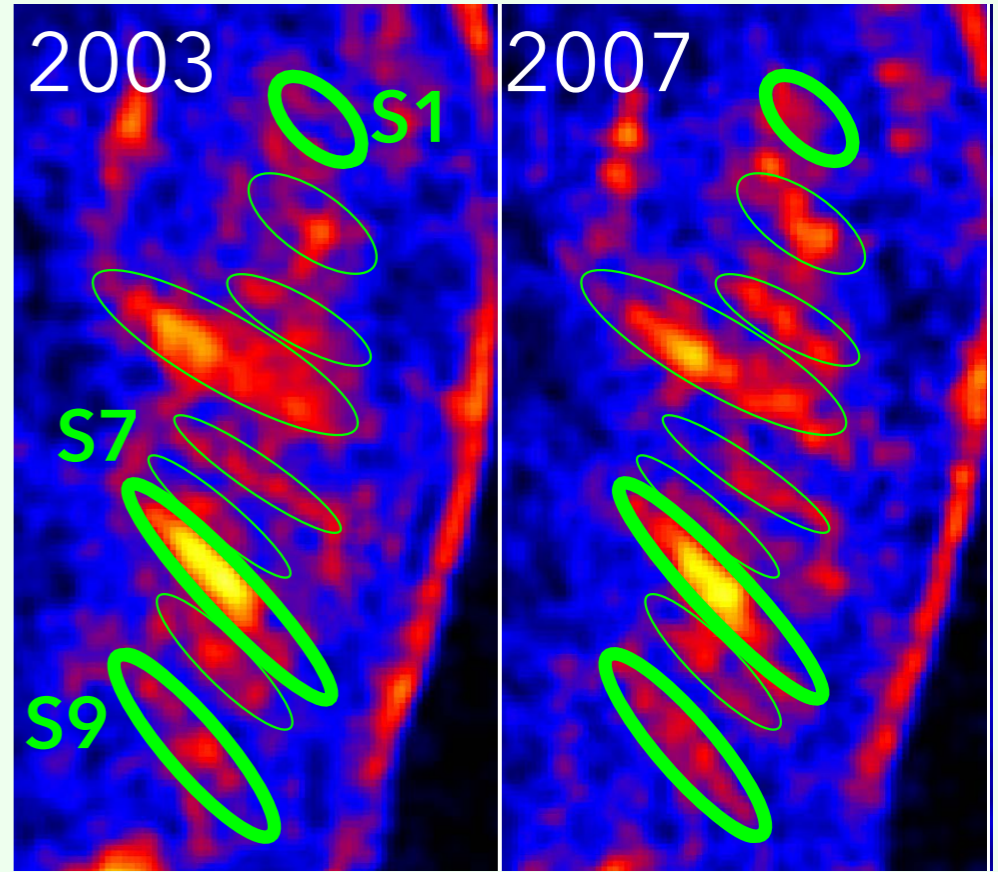
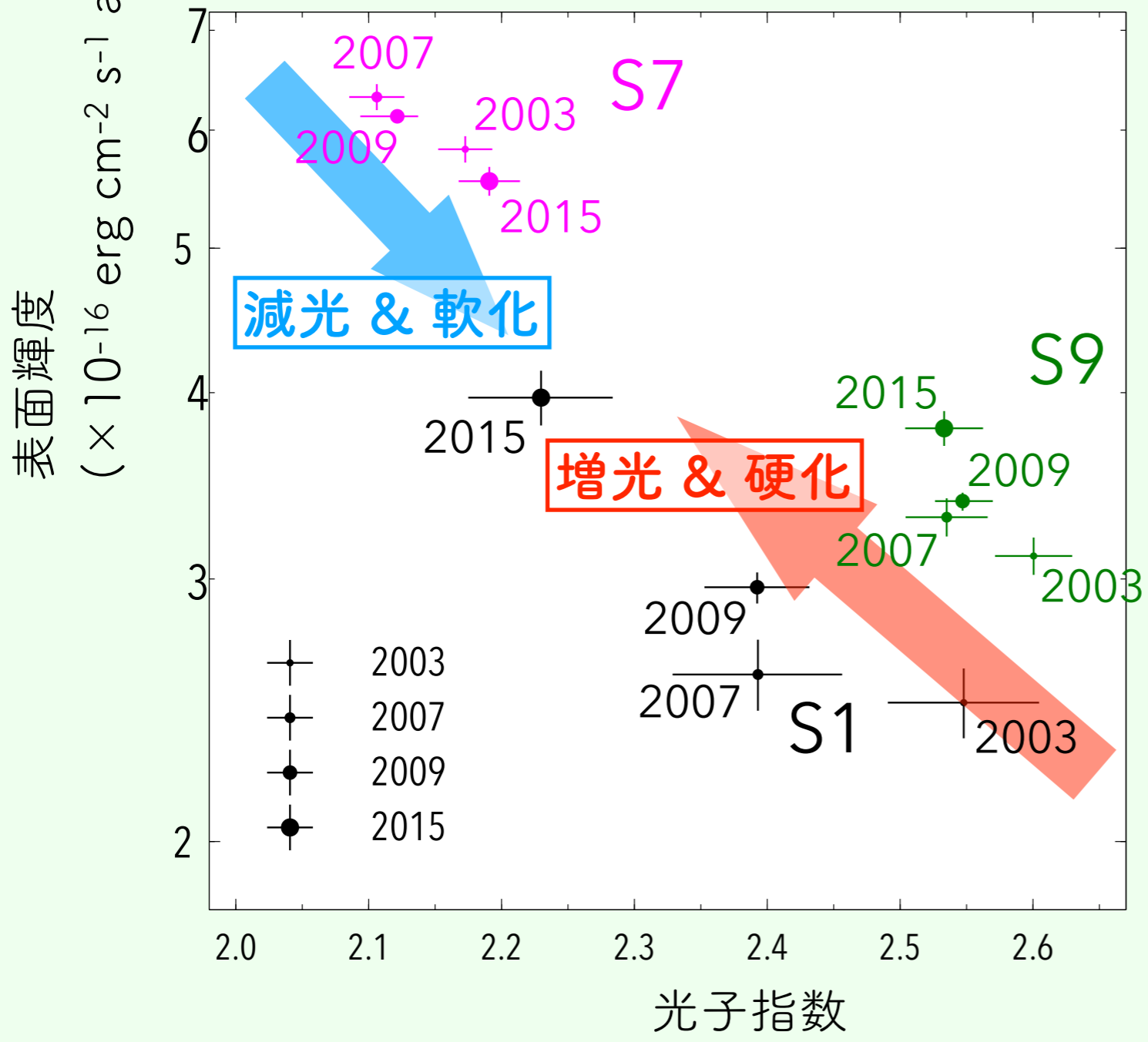


シンクロトロン放射の光子指数と表面輝度の変化



複数の縞で輝度と光子指数が
輝度と光子指数に強い相関

継続ごとの時間変動



数年スケールでの
増光or減光 や 硬化or軟化

時間変動の解釈

◎ 増光 & 硬化の解釈

- ▶ 粒子加速により、相対的な電子が増えた
- ▶ → 粒子加速のタイムスケール

$$t_{\text{acc}} = 4\eta \left(\frac{\varepsilon}{\text{keV}} \right)^{0.5} \left(\frac{B}{400 \mu\text{G}} \right)^{-1.5} \left(\frac{v_{\text{sh}}}{3400 \text{ km s}^{-1}} \right)^{-2} \text{ yr},$$

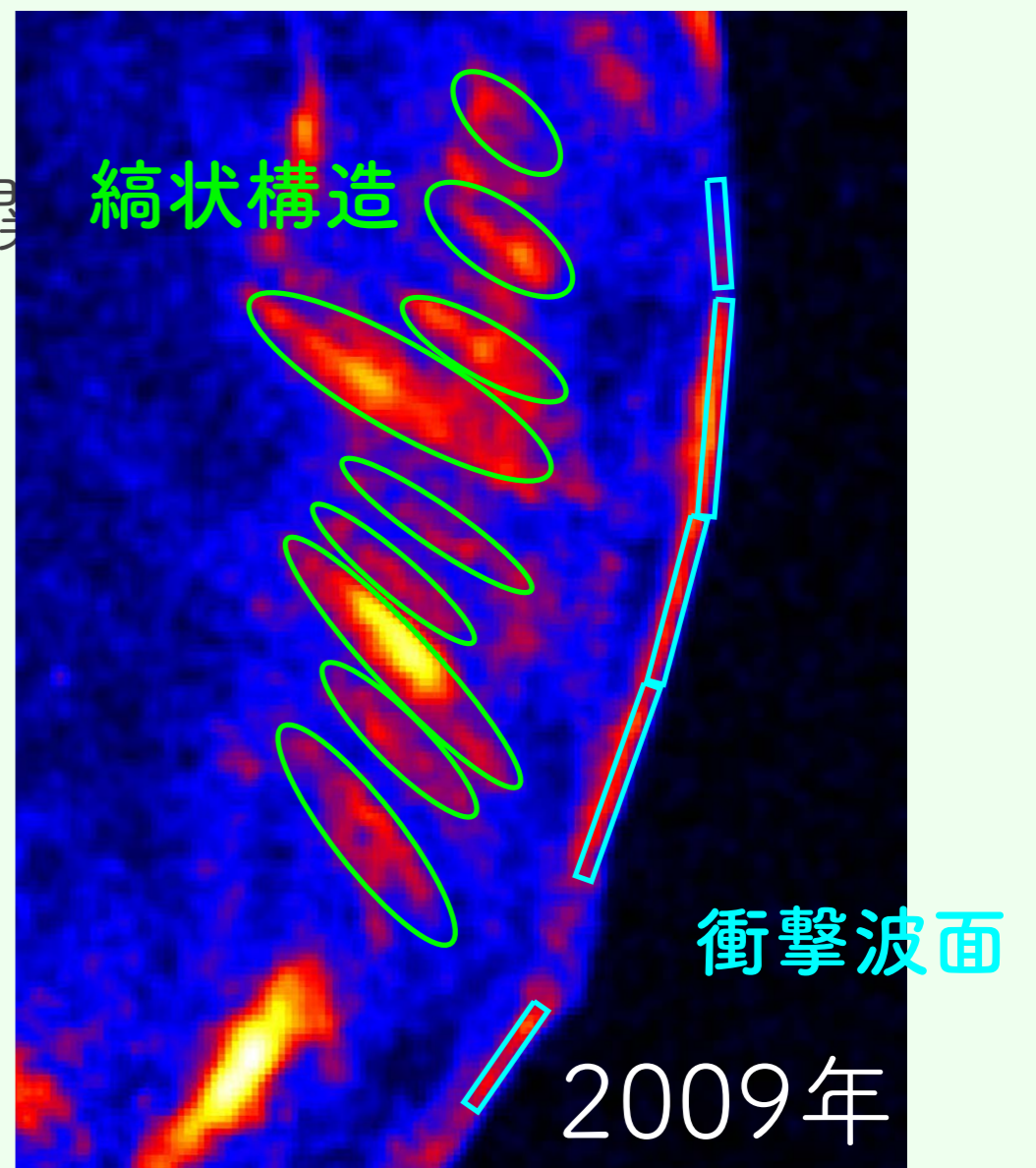
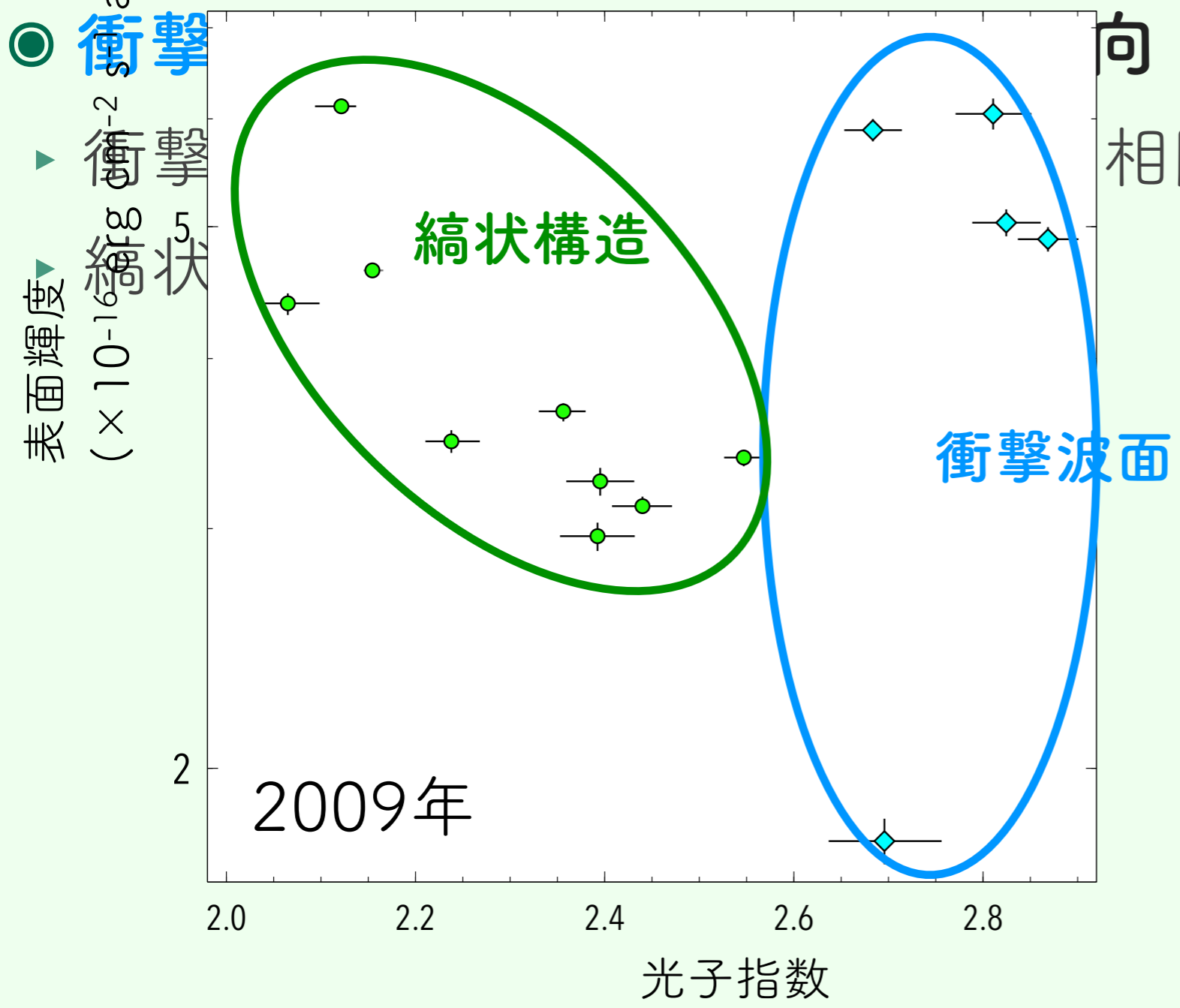
◎ 減光 & 軟化の解釈

- ▶ シンクロトロン冷却でX線を放射する電子が減った
- ▶ → シンクロトロン冷却のタイムスケール

$$t_{\text{syn}} = 4 \left(\frac{\varepsilon}{\text{keV}} \right)^{-0.5} \left(\frac{B}{500 \mu\text{G}} \right)^{-1.5} \text{ yr}.$$

$t_{\text{acc}} \sim t_{\text{syn}} \sim \text{数年} \rightarrow \text{縞状構造全体で数1}$

衝撃波面との比較



➡ 衝撃波面より効率の良い粒子加速を示唆