

Plasma Diagnostics for Non-Standard Supernova Remnants in the Galactic Center Region

—Origin of Recombining Plasma and Missing Branch of SNR Evolution—

Makoto Sawada

Kyoto CR group ➡ AGU Bamba group

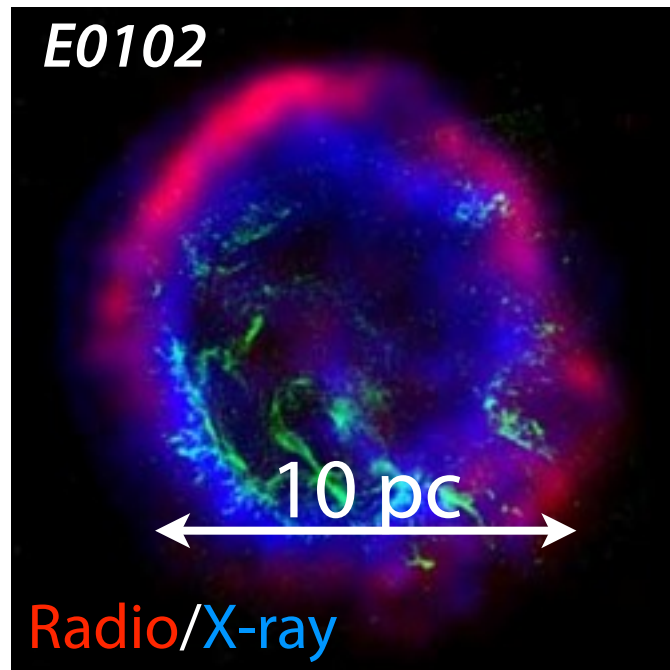
At the 12th HEAPA workshop, Mar. 30 2012.



1. Introduction

Standard SNRs

シェル型

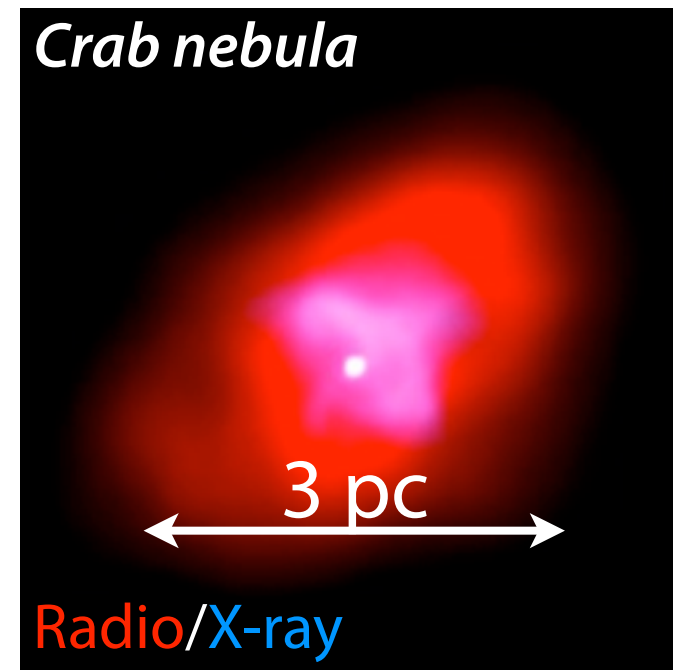


リング状の熱的X線

爆発衝撃波により
加熱された高温プラズマ

本研究の対象

かに星雲型



中心集中の非熱的X線

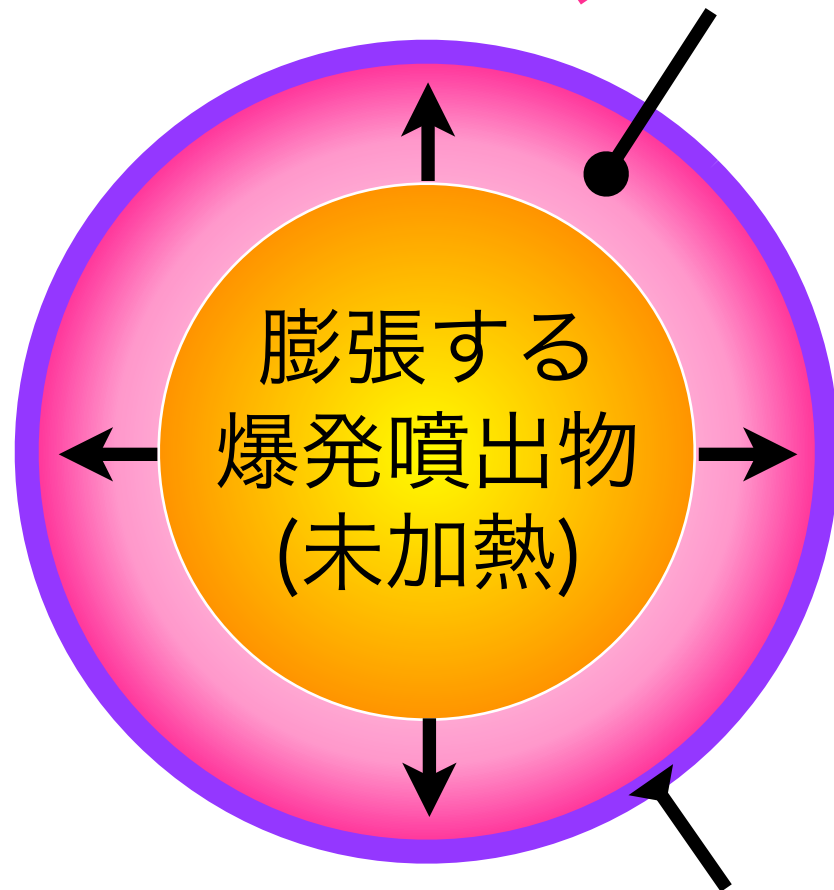
パルサーで加速された電子
(パルサー風星雲)

1. Introduction

Standard Evolution of Thermal SNRs

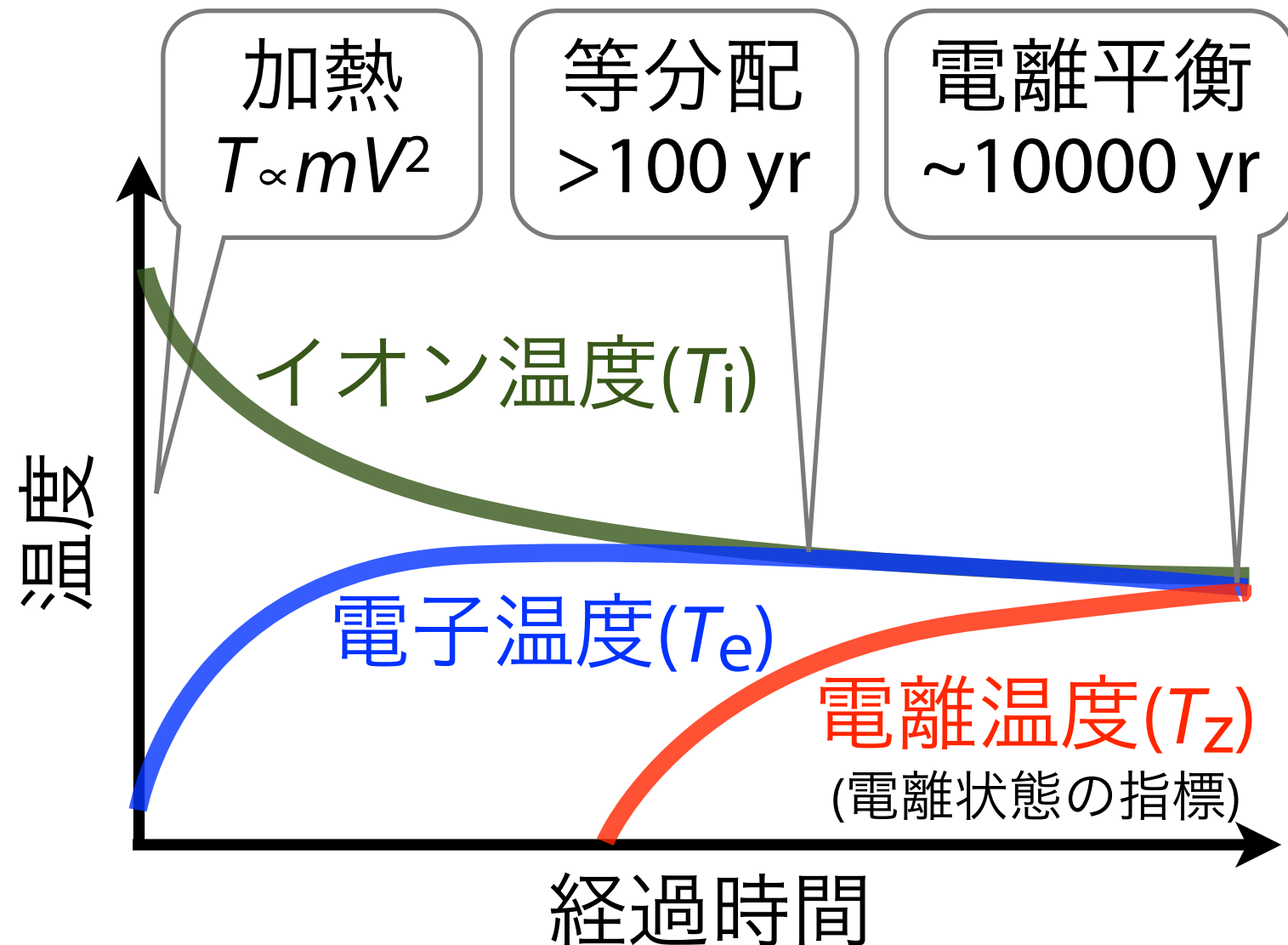
= 一様な星間物質中の点源爆発

熱的プラズマ (X線放射)



衝撃波面 (電波放射)
(e.g. Sedov+56)

• 空間構造=シェル型



(Masai+84,94)

• 熱的構造=電離過程優勢
($T_z < T_e$, $d/dt T_z > 0$)

1. Introduction

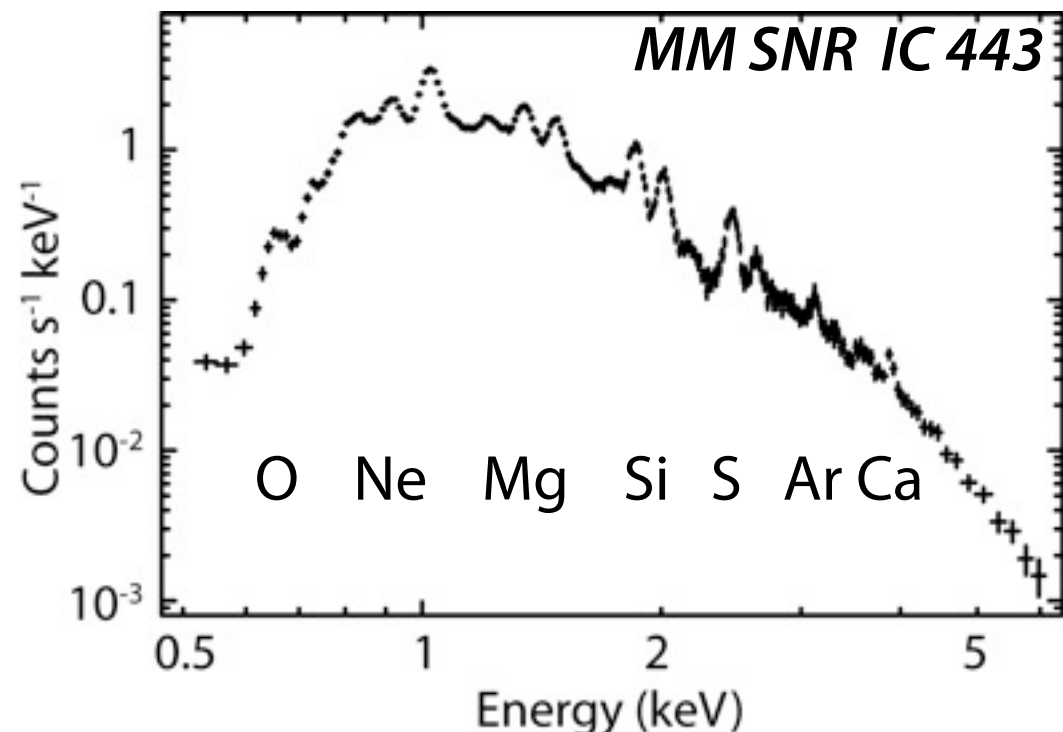
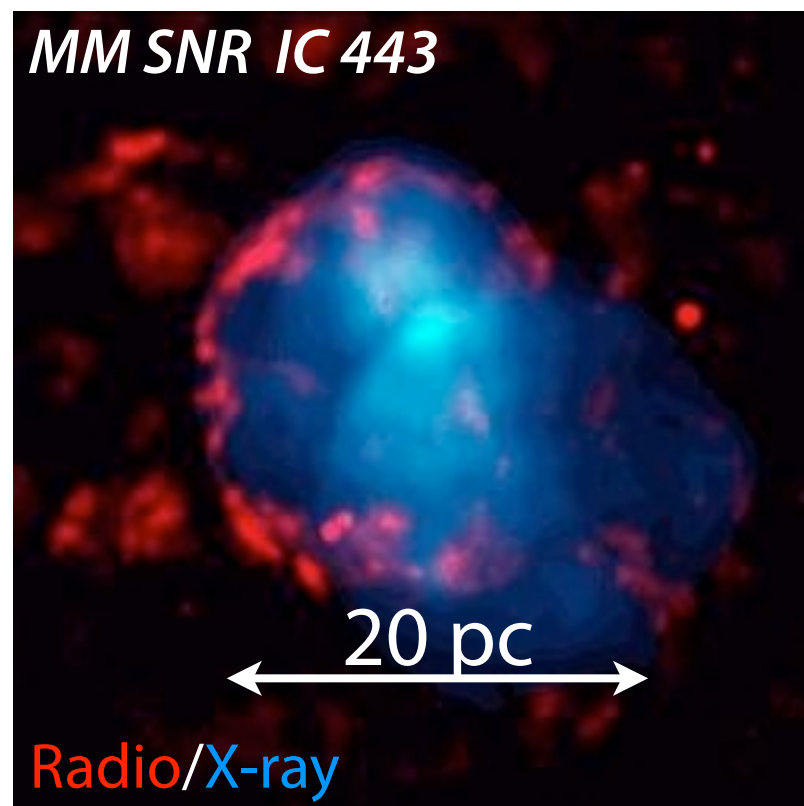
Non-Standard SNRs

= シェル型でない熱的SNR

- 空間構造=不規則, 多様
- X線放射=熱的

Mixed-Morphology (MM) SNRs

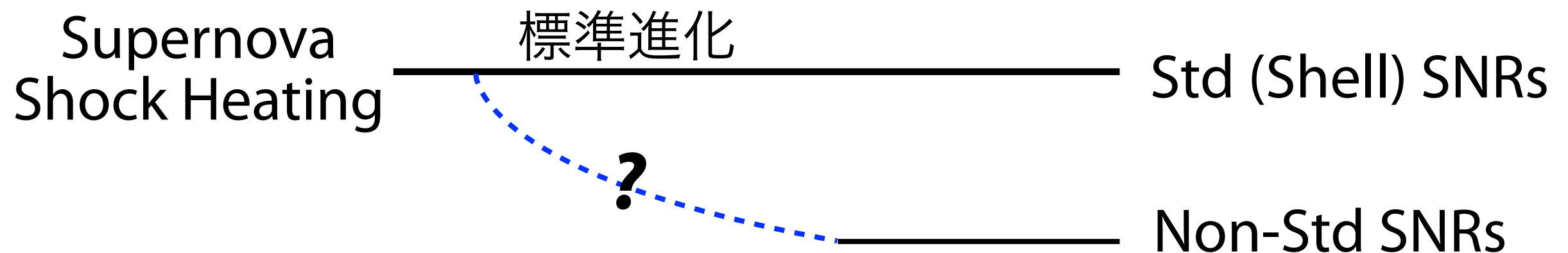
Non-Stdの中でも、多数を占めるもの。
電波はシェル型だがX線は中心集中の形状。 (*Rho+98*)



高階電離輝線→熱的

Motivation & Purpose

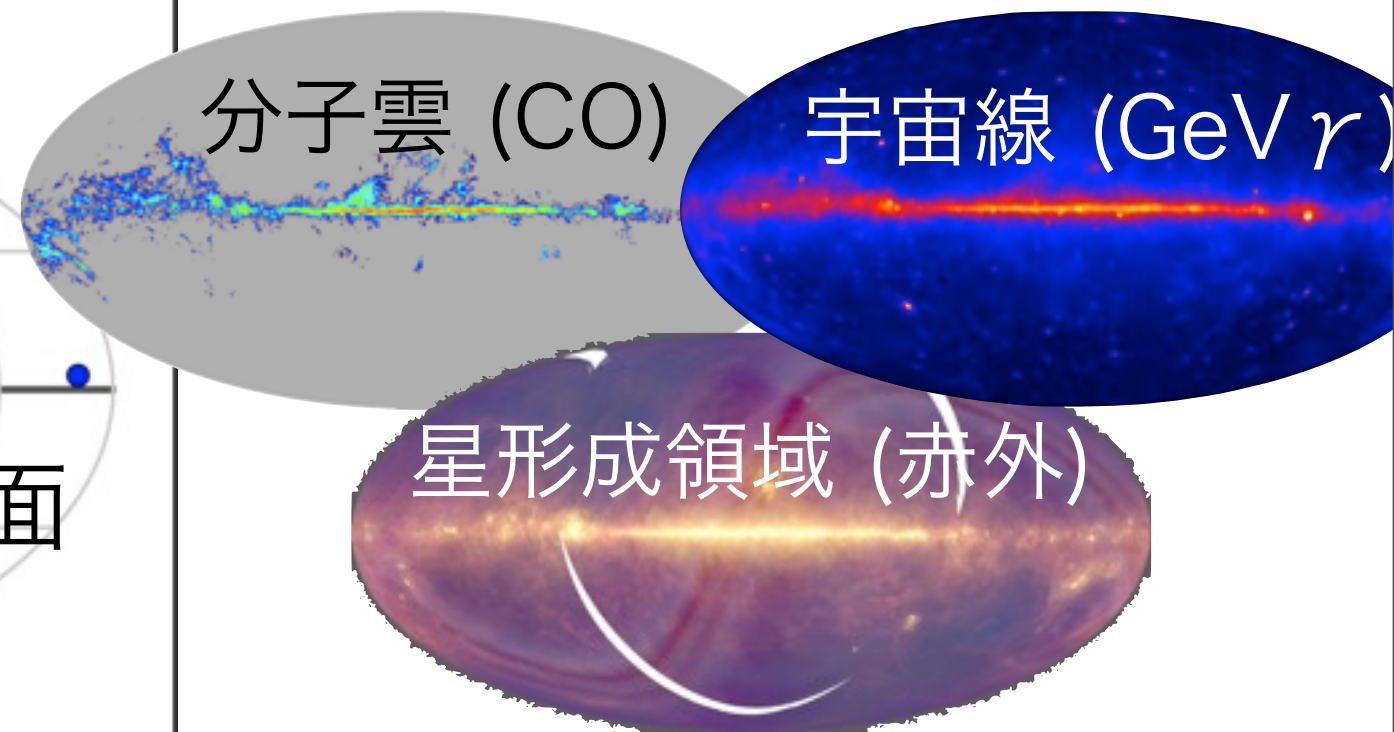
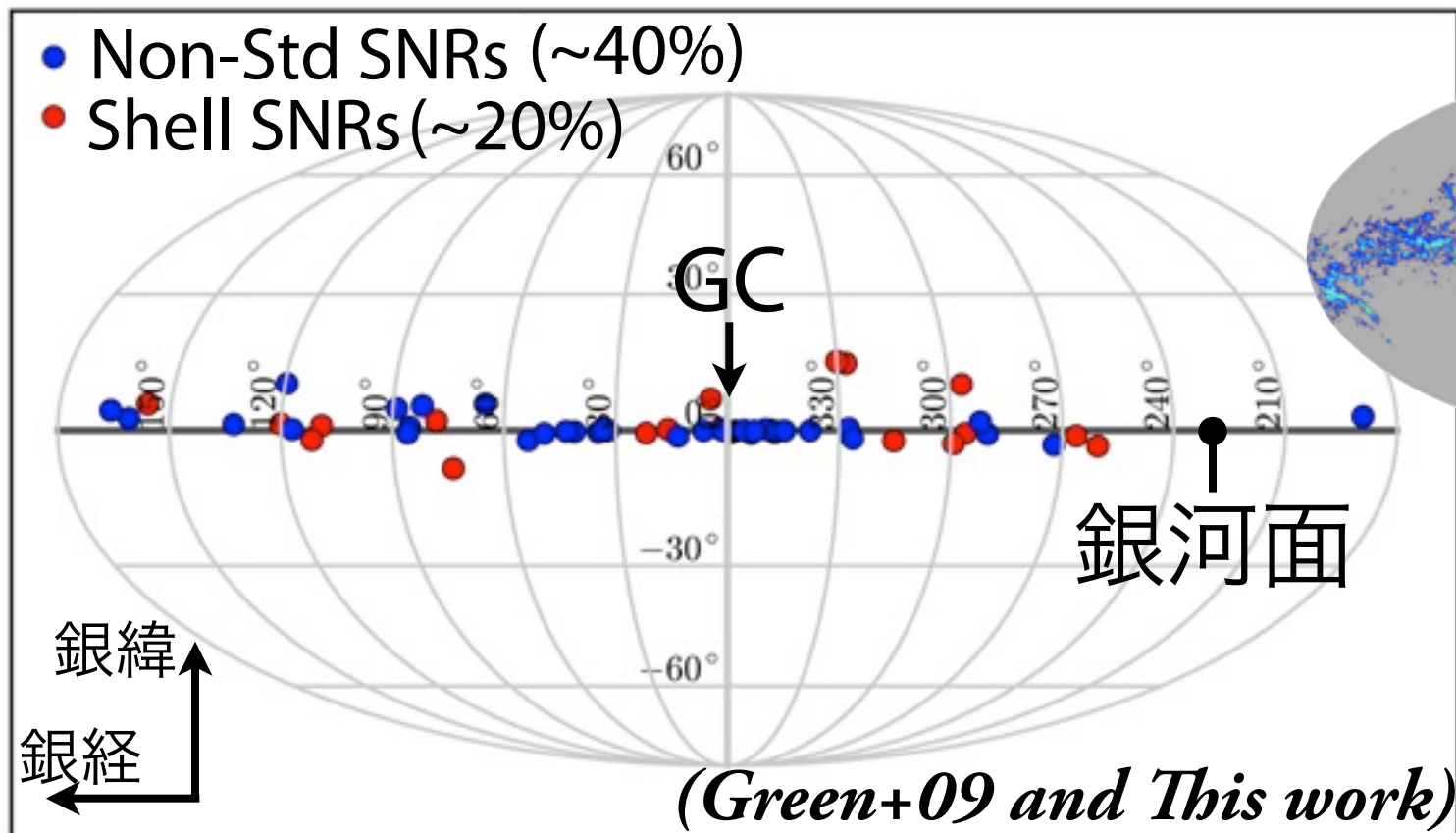
- 標準進化では実現しない多様なNon-Std SNRs
→ SNR進化の*Missing Branch* (未知の進化過程)があるはず



- Non-Std SNRsに**特有の熱的構造**があれば、その形成・進化を解明する鍵となるかも

1. Introduction

Target Selection



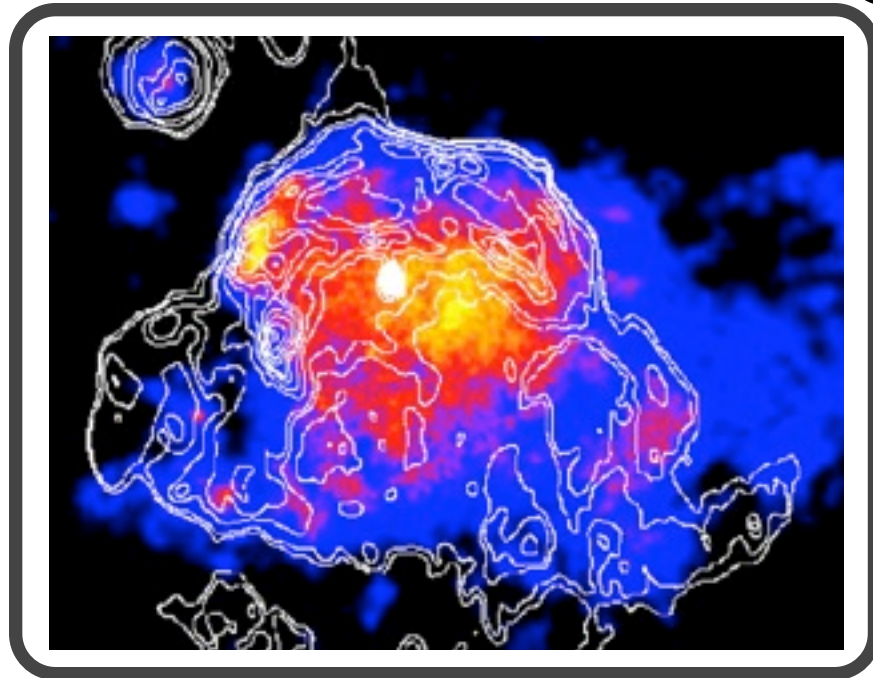
Non-Std SNRsは銀河面、
特に銀河中心(GC)に集中

GCは星形成が活発、
高密度な極限領域

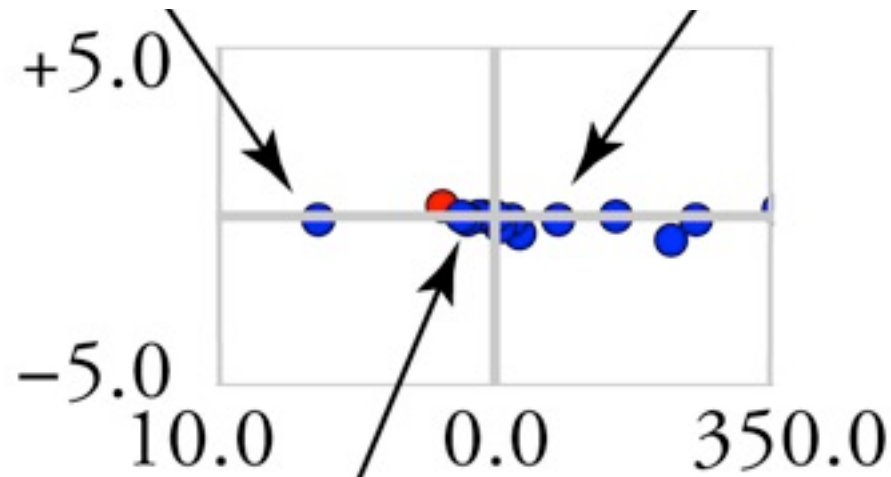
標準モデルの仮定とはかけはなれた
極限環境がNon-Std SNRの形成に関連？

1. Introduction

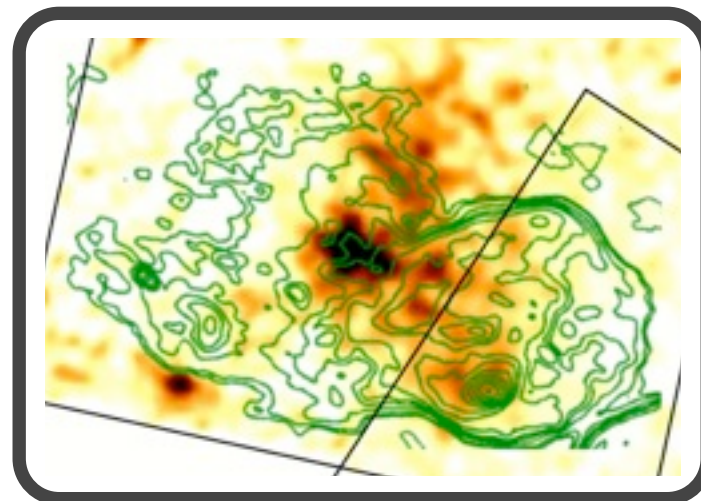
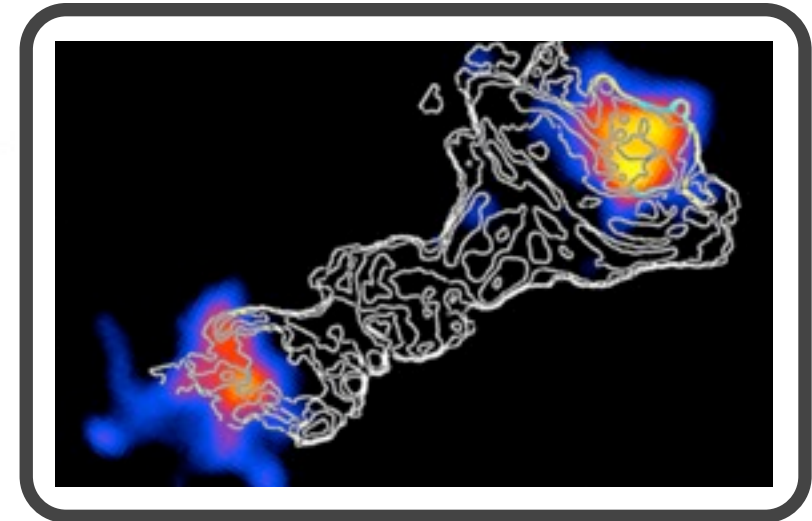
Target Selection



W28 *G357.7-0.1*

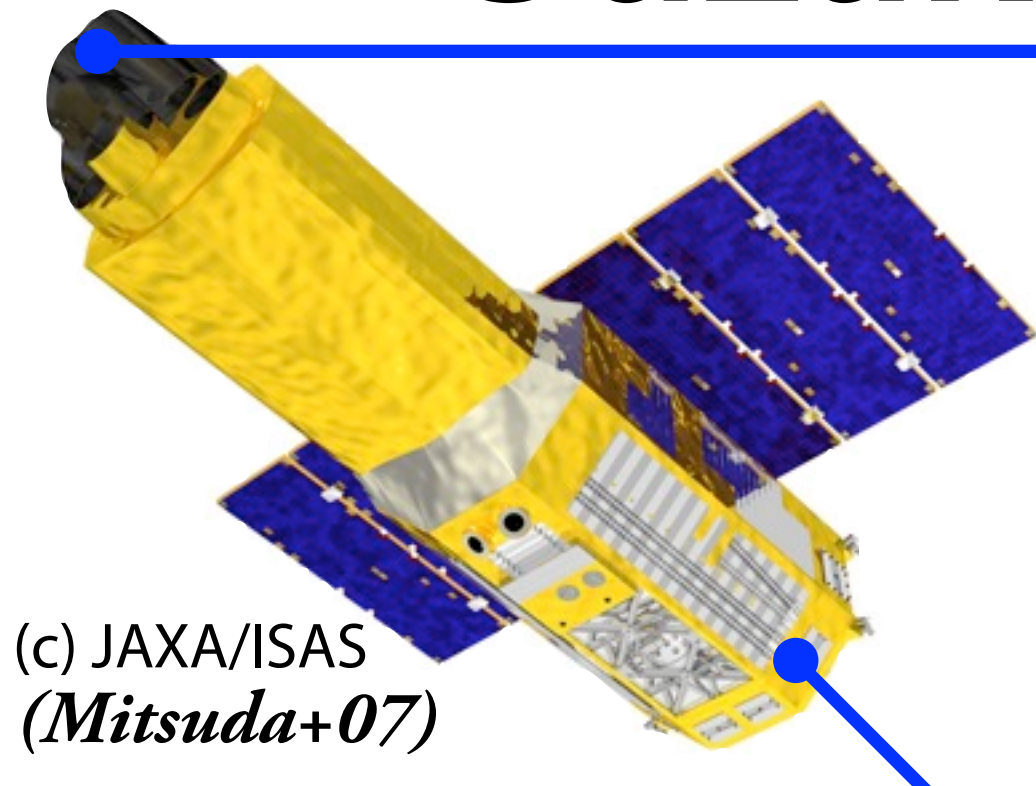


G1.2-0.0



GC領域から、極めて特異な構造・環境をもつ
3つのSNRまたはSNR候補プラズマを解析

Suzaku XRT + XIS



(c) JAXA/ISAS
(Mitsuda+07)

X-Ray Telescope (XRT)

(Sermitsos+07)

- Wolter type-I X線望遠鏡
- 空間分解能 $\sim 2'$
- 視野 (with XIS) $\sim 18' \times 18'$
- 有効面積 $\sim 1000 \text{ cm}^2$ @1 keV (3台)

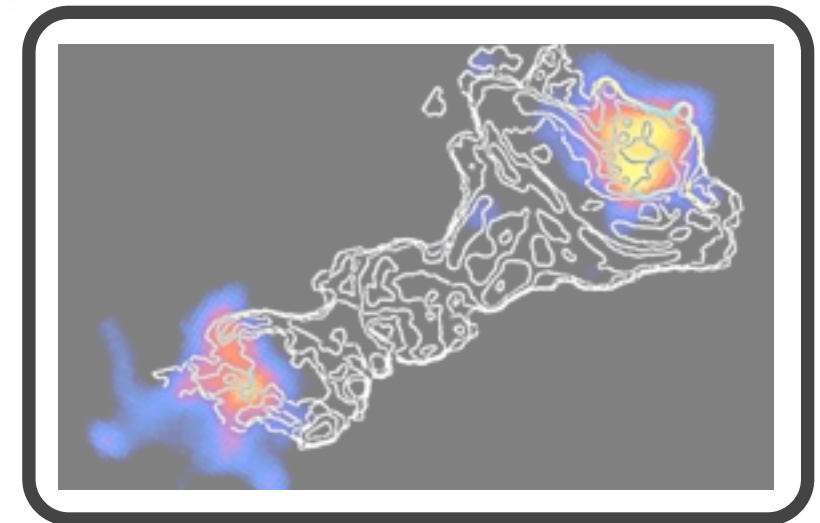
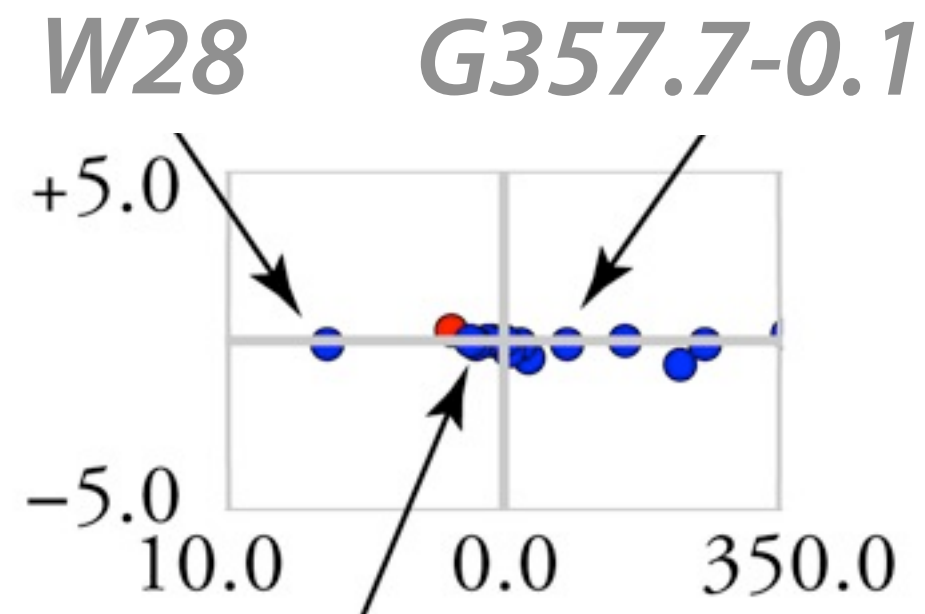
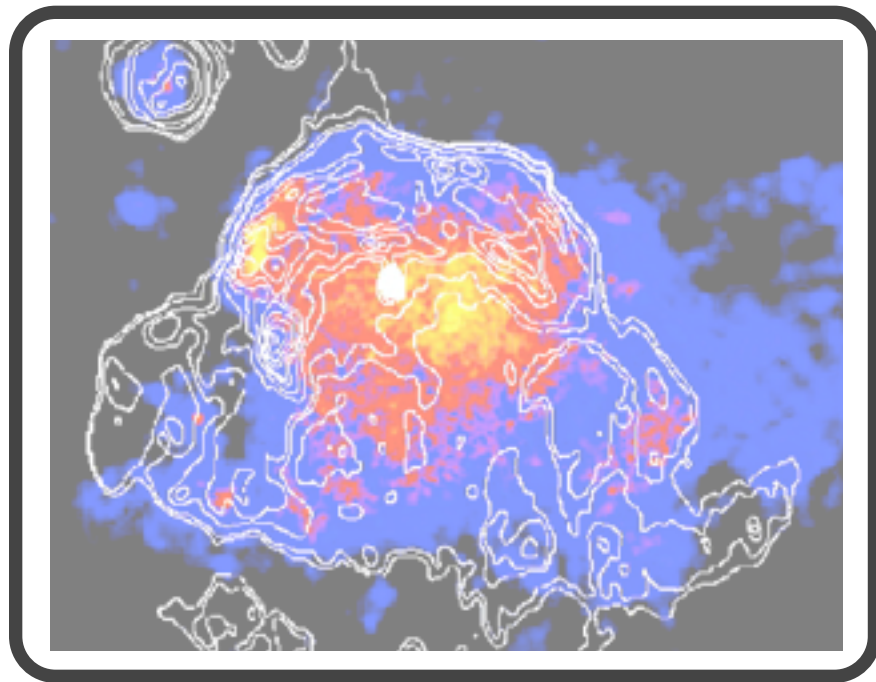
X-ray Imaging Spectrometer (XIS)

(Koyama+07)

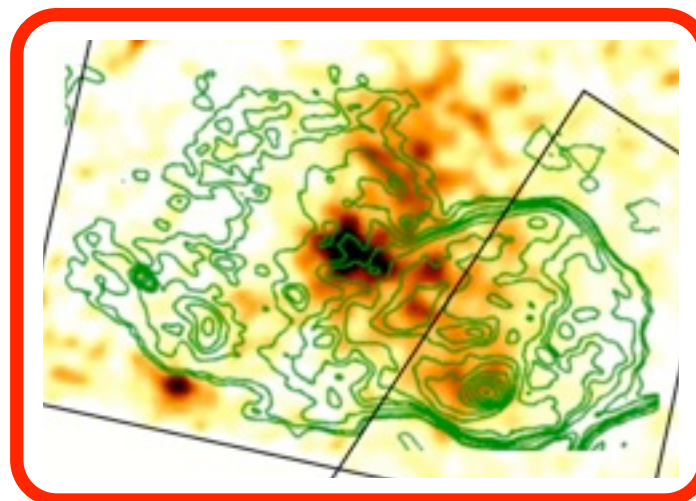
- X線CCDカメラ
- エネルギー分解能 (打ち上げ時) $\sim 130 \text{ eV}$ @6 keV
- 機上calibrationによる**高精度の応答関数**

大有効面積 + 高分光性能
→ SNRのプラズマ診断に最適

3. Results - G1.2

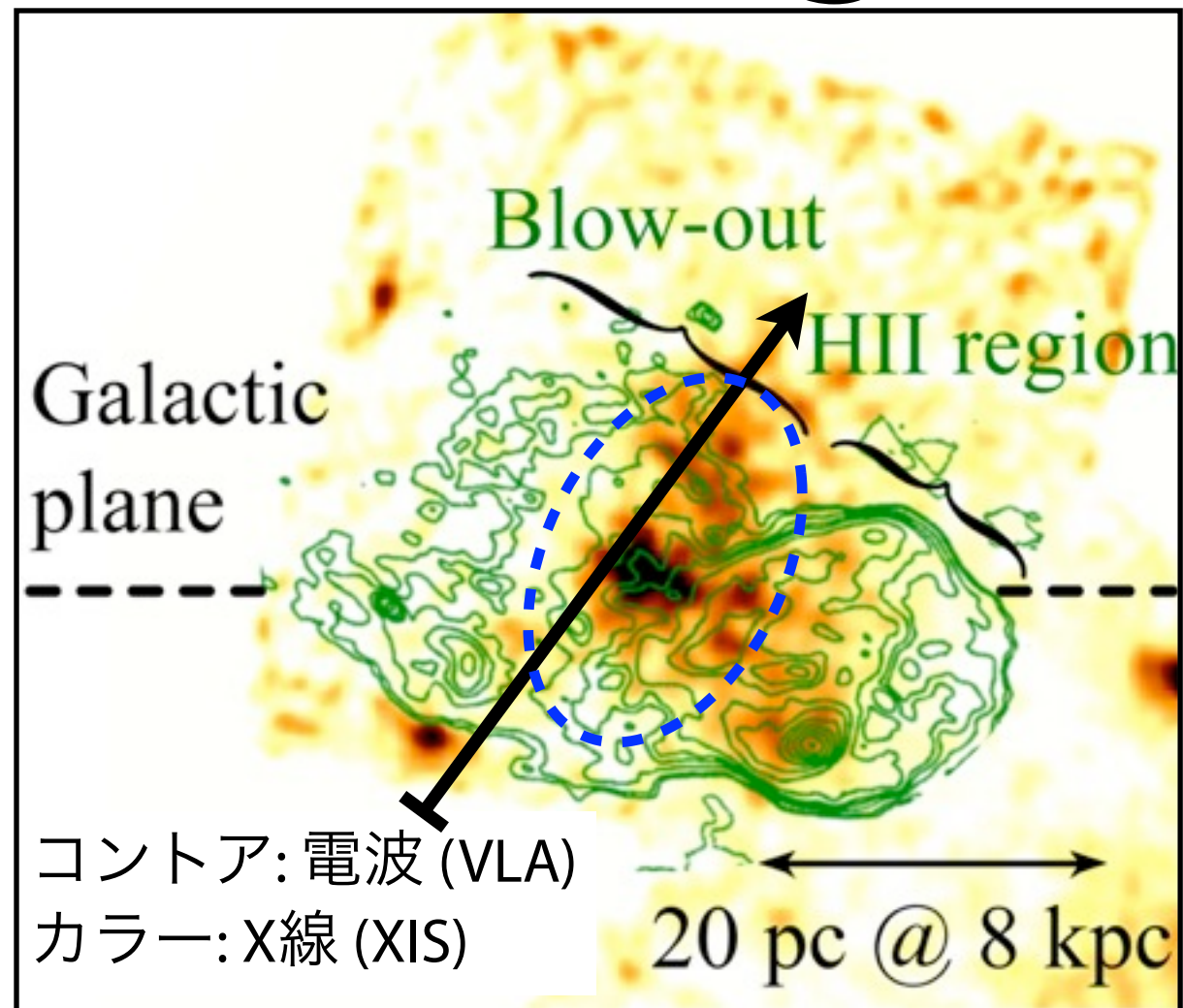


G1.2-0.0

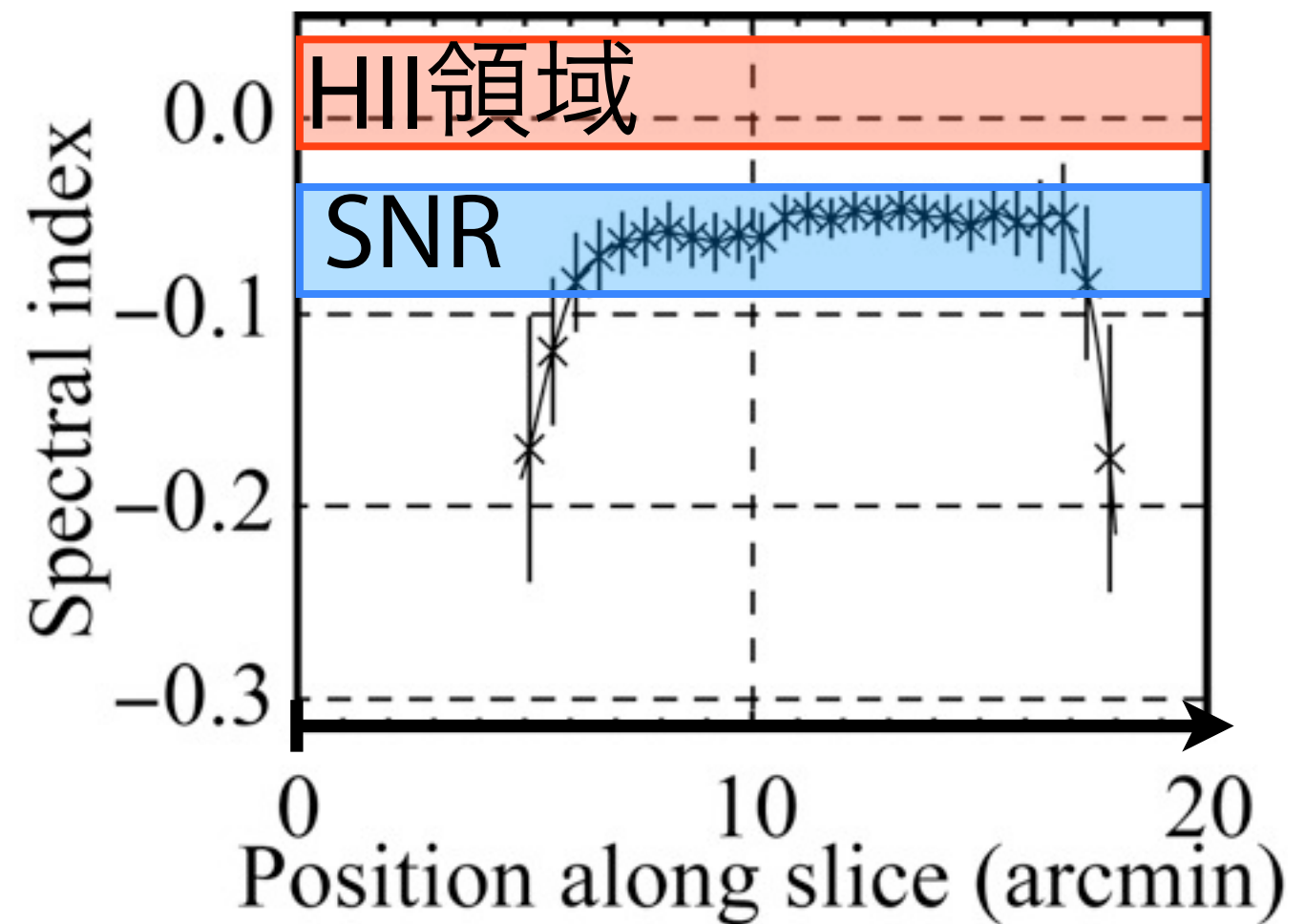


(Sawada et al. 2009)

Image & Spectrum



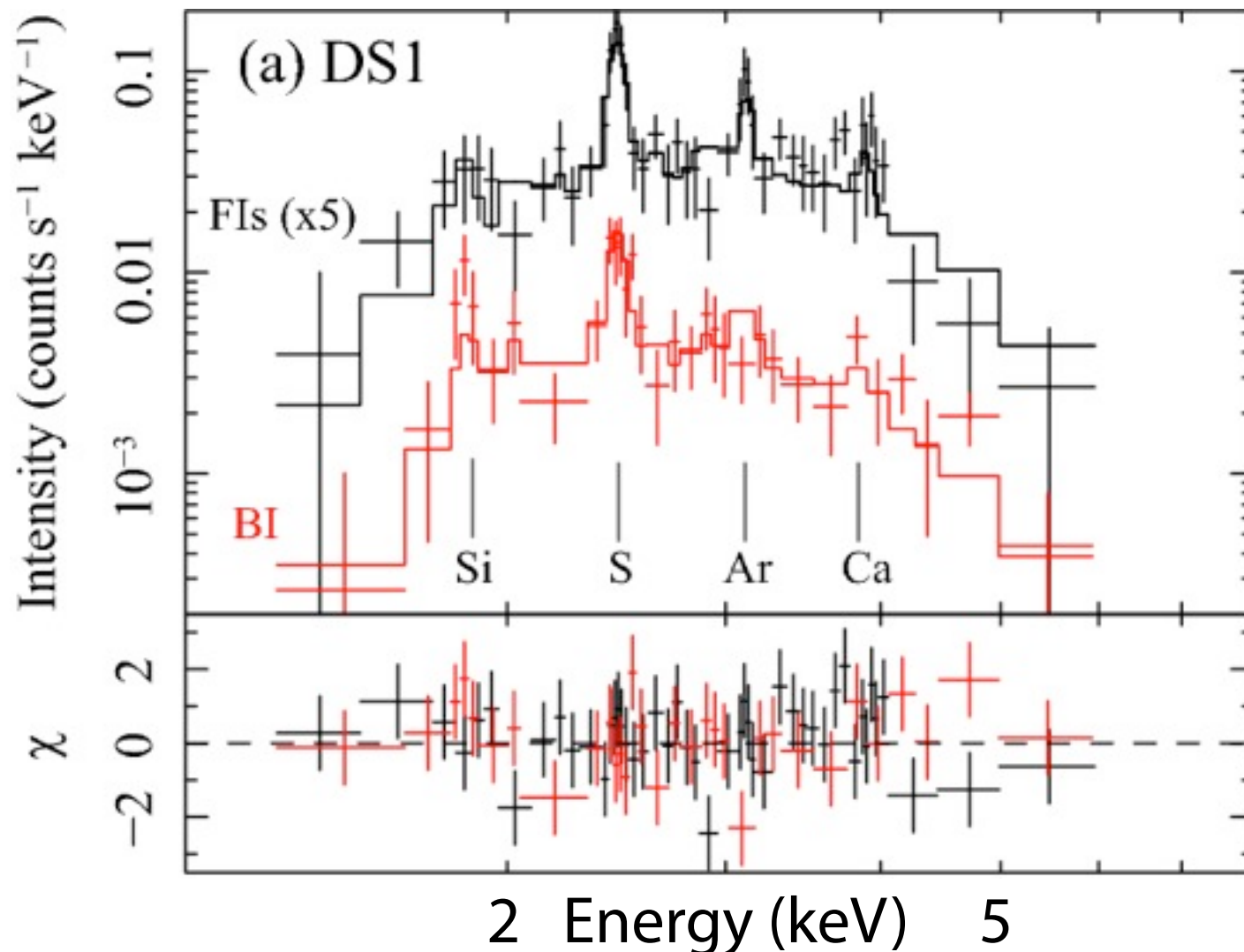
すざくのG1.2探査で発見
射手座D 星形成領域の
blow-outから~10pcのX線



X線放射に沿って電波放射が
非熱的であることを発見
HII領域 (**熱的**電波源) ではない

3. Results - G1.2

Nature of G1.2-0.0



- 強い高階電離輝線
→ 温度 ~ 0.9 keVの電離平衡
重元素組成 > 1 solar

非熱的電波＋熱的X線放射

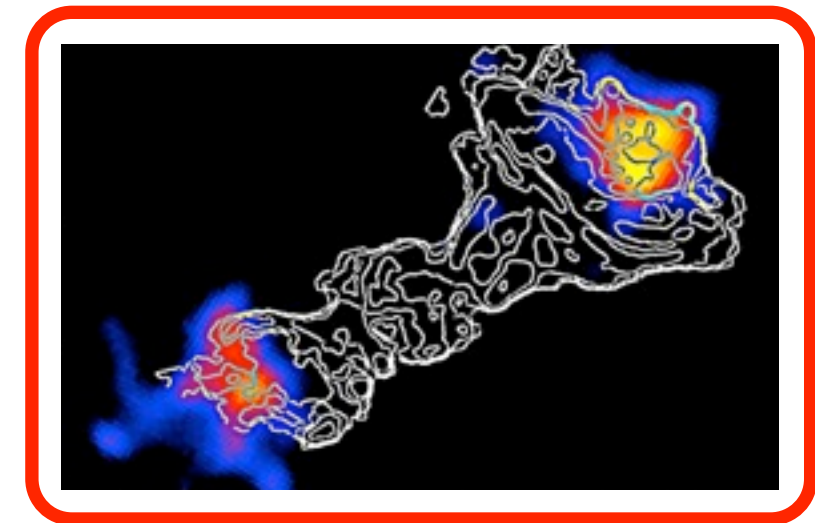
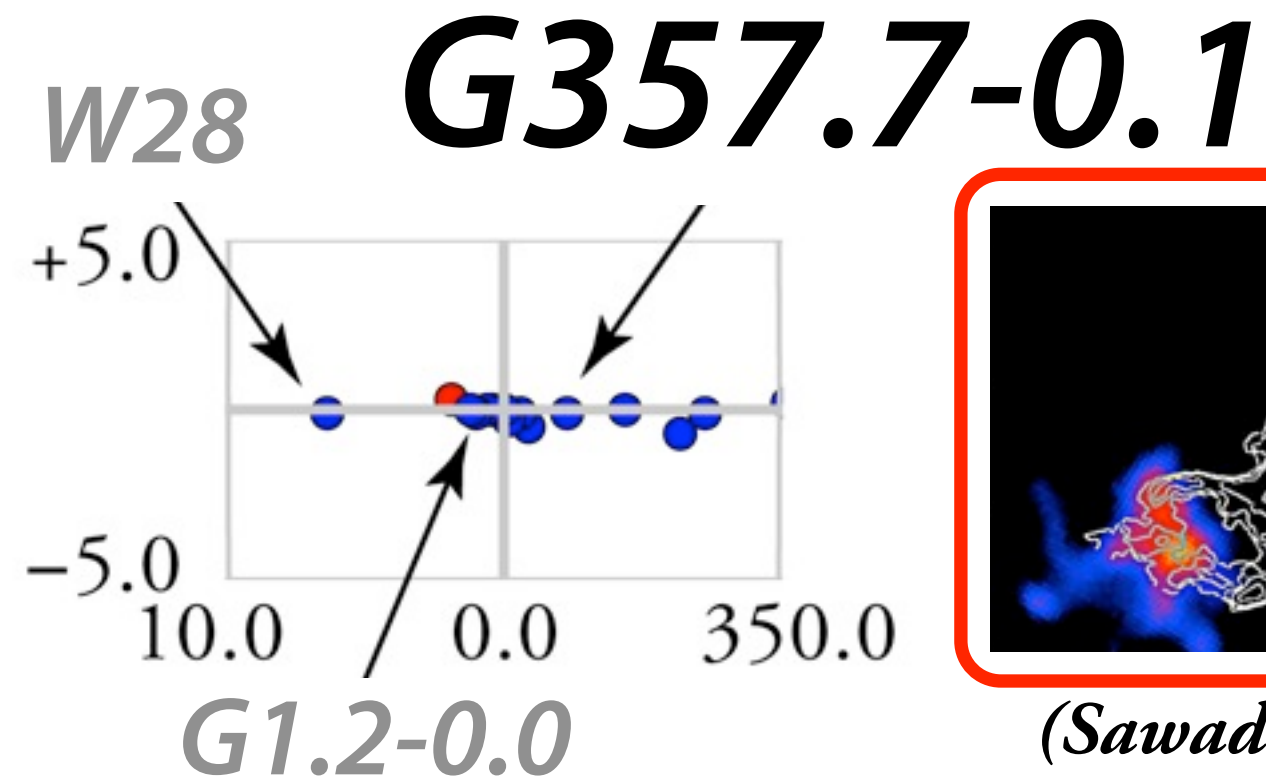
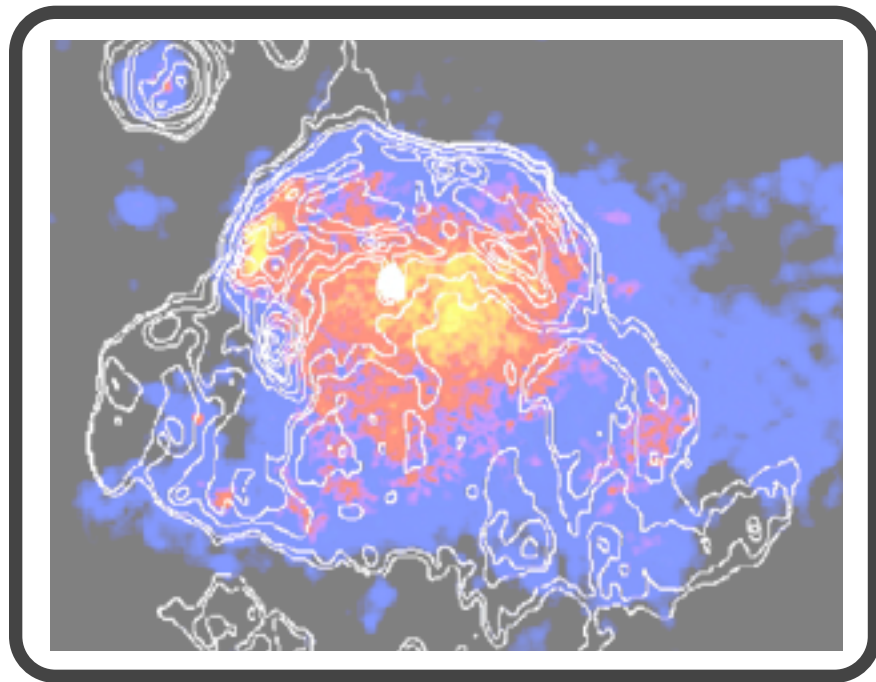


単一のSNRと確定

- 星間吸収量 $\sim 9 \times 10^{22}$ H cm⁻²
→ 射手座Dと同じ距離

- 星形成領域からblow-outした空間構造はきわめて特異
- 電離平衡を棄却できず、特別な熱的構造はない

3. Results - G357



(Sawada et al. 2011)

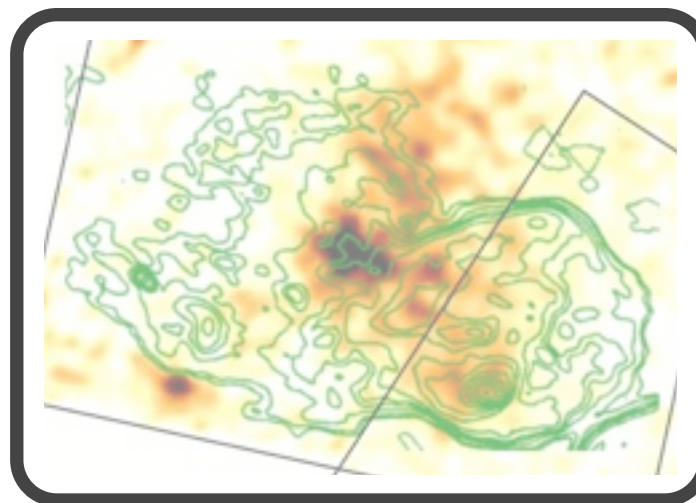
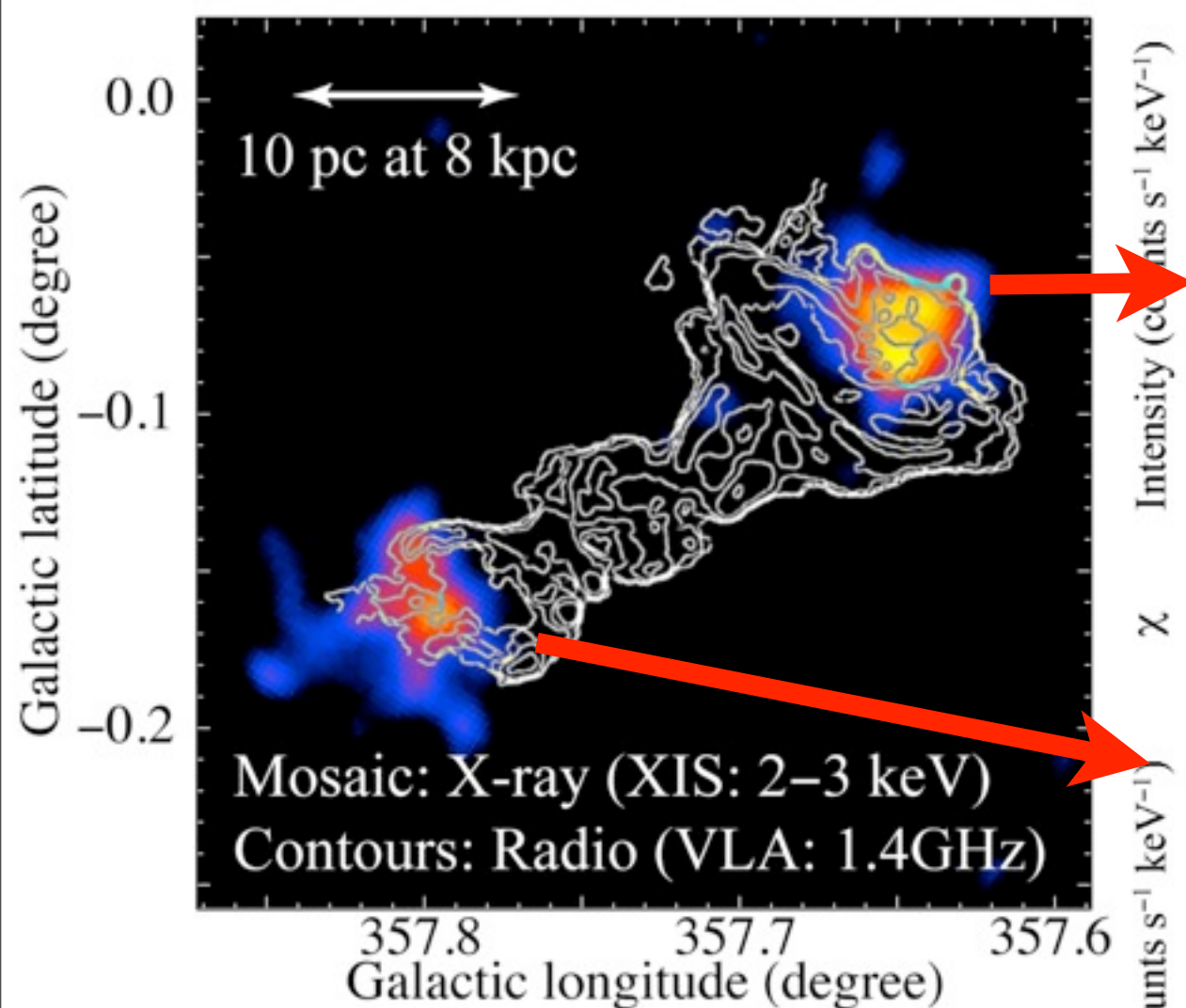
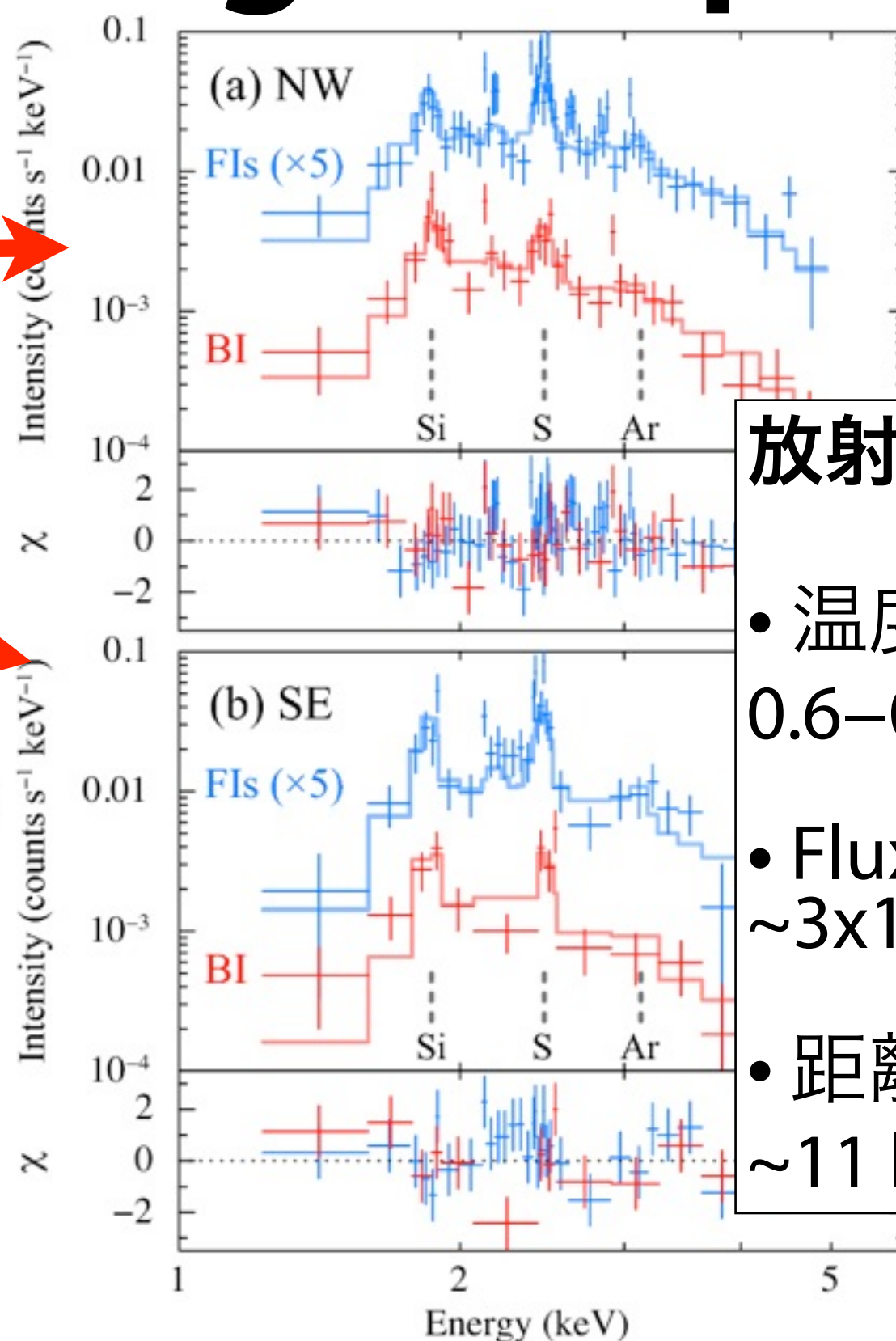


Image & Spectra



竜巻状の奇妙な電波構造
(*Shaver+85*)

両端から~4'のX線放射

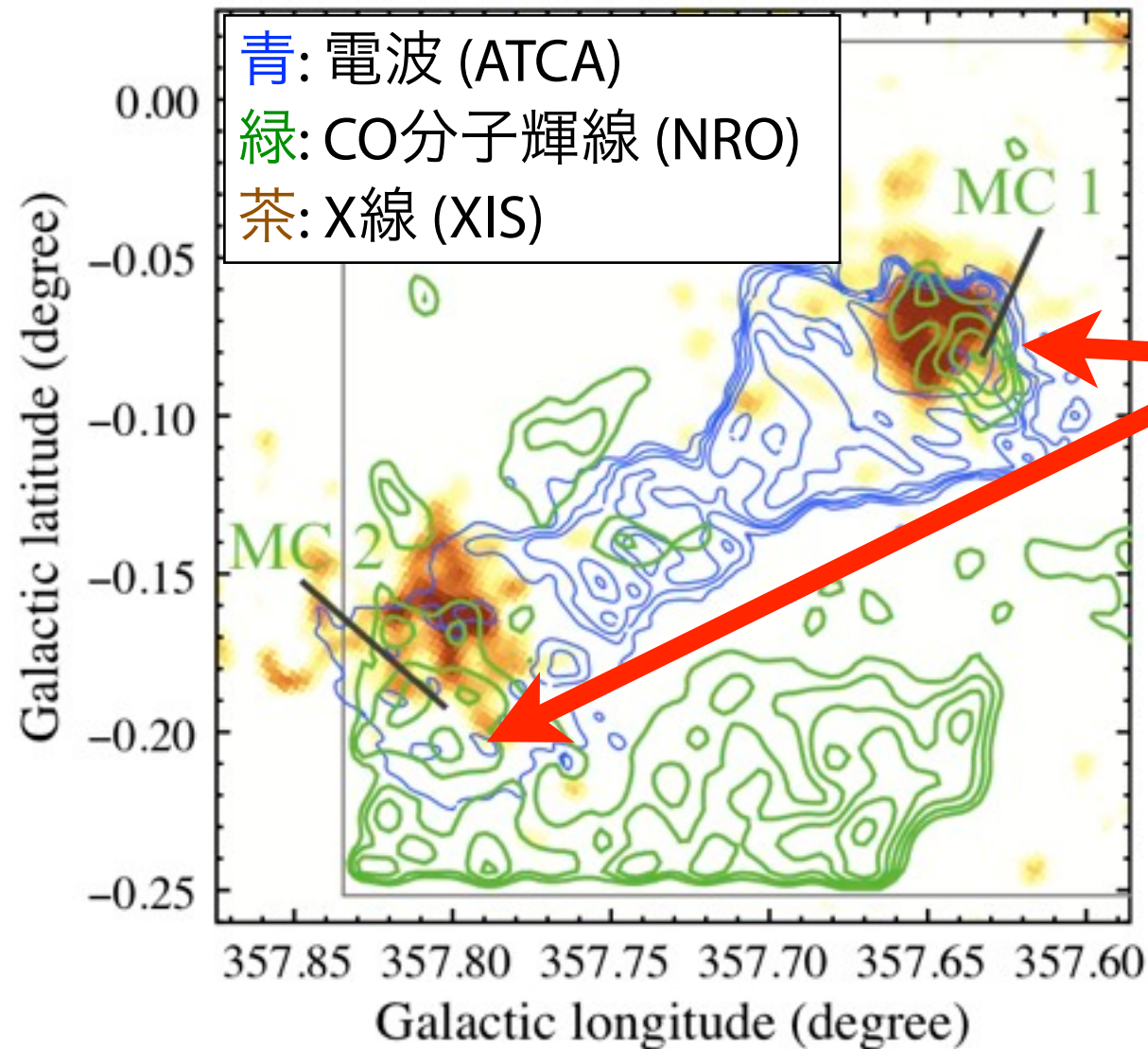


放射は酷似

- 温度:
0.6–0.7 keV
- Flux:
 $\sim 3 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$
- 距離:
 $\sim 11 \text{ kpc}$

→ 同じ起源 (“双子の”プラズマ)

Nature of G357.7-0.1



双子プラズマと電波構造は
同じ距離(~12 kpc)

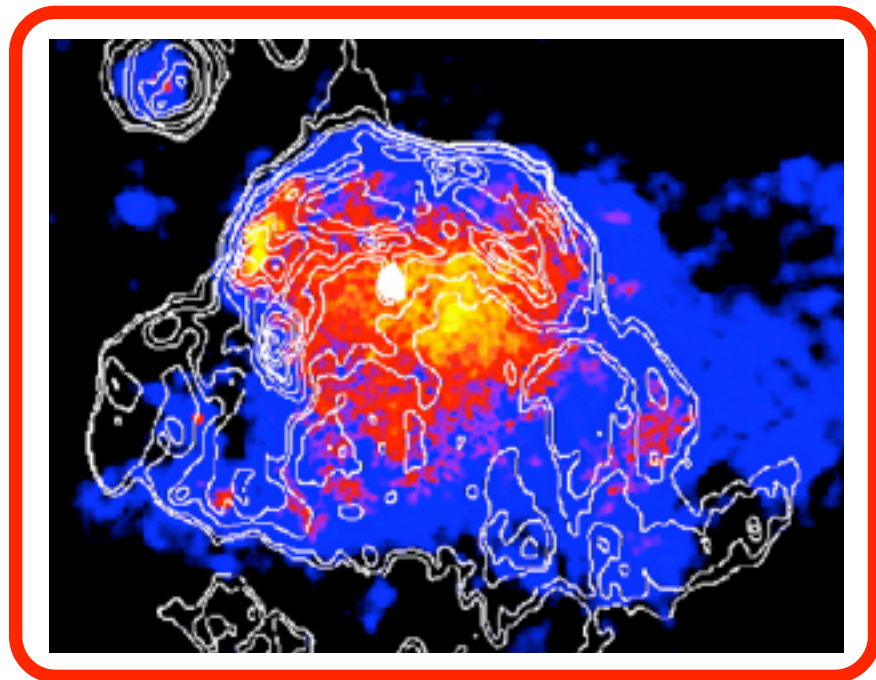
衝撃波に励起された分子雲を発見

プラズマの起源:
双極アウトフローと分子雲の衝突

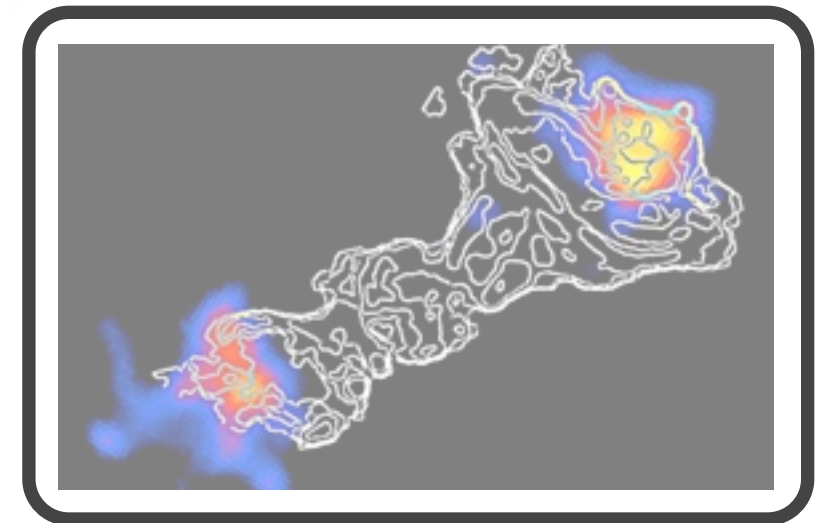
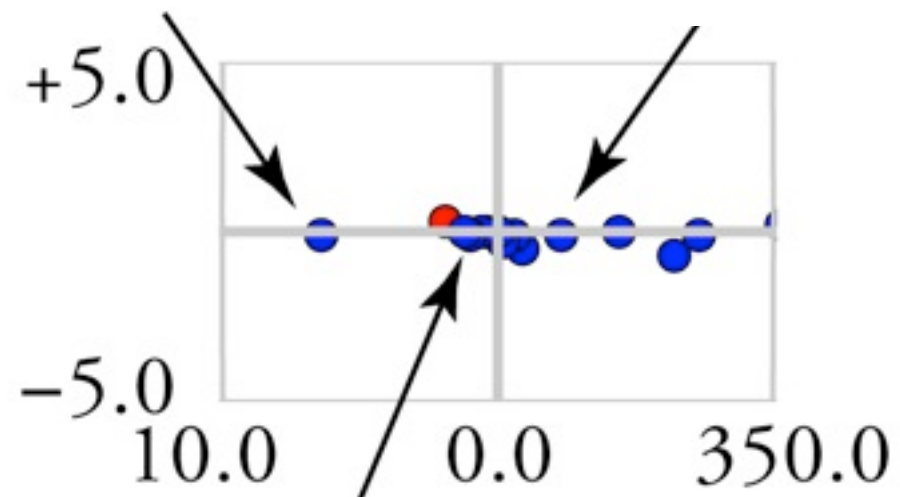
大質量星の双極爆発か?

- 双極爆発による双子のプラズマ構造はきわめて特異
- 熱的には電離平衡を棄却できず、特別な構造はない

3. Results - W28



W28 *G357.7-0.1*



(Sawada et al. 2012 and in prep.) **G1.2-0.0**

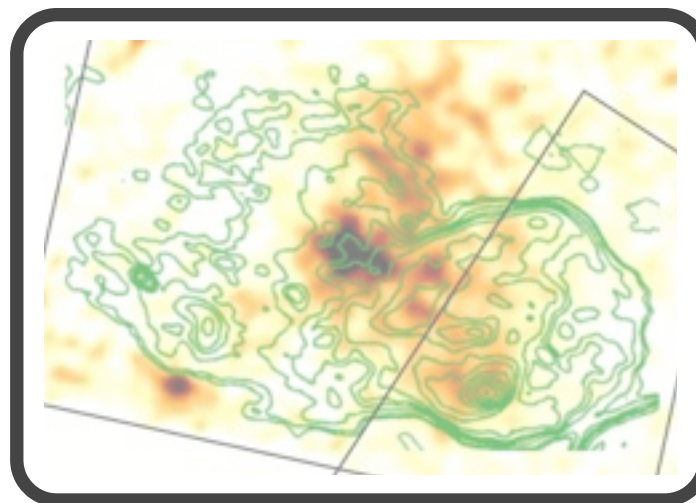
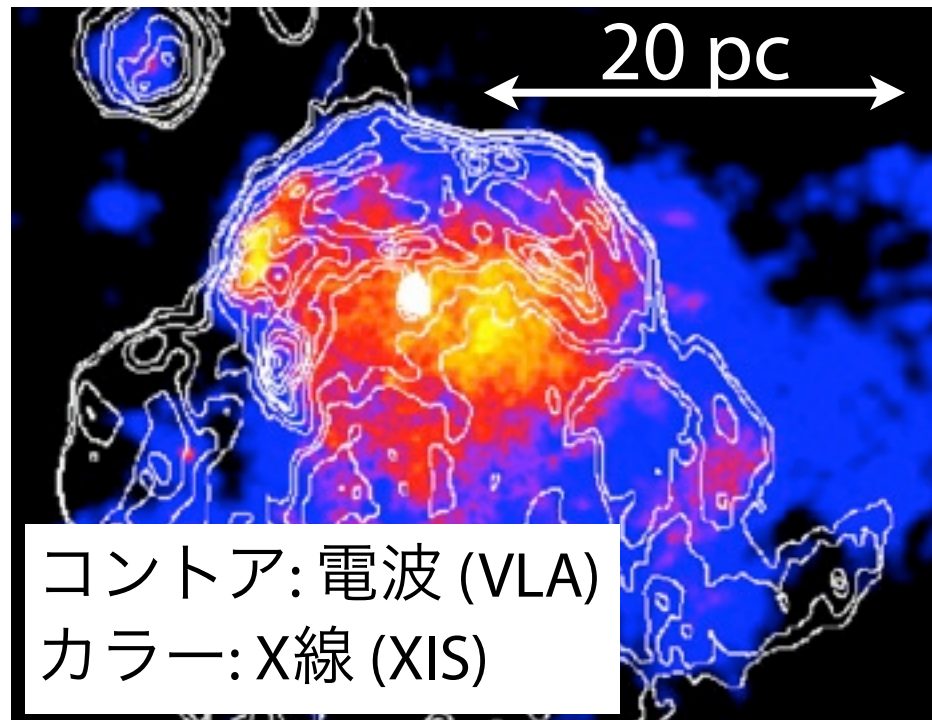


Image & Spectrum

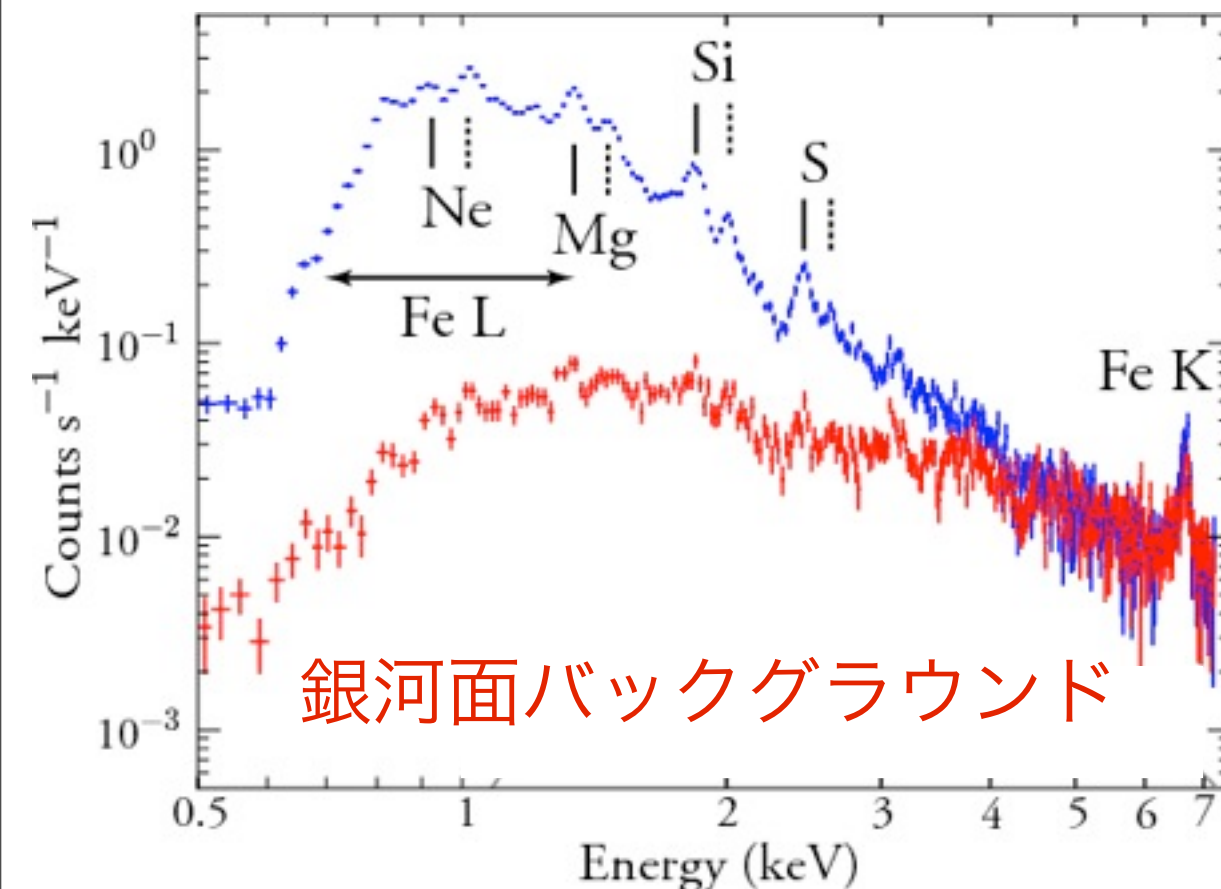


MM SNR候補

ASCA : (*Rho*+98,02)

~7 keVまでの硬いX線放射
異常に高い温度(~2 keV)

⇔MM SNRの典型値 (<1 keV)

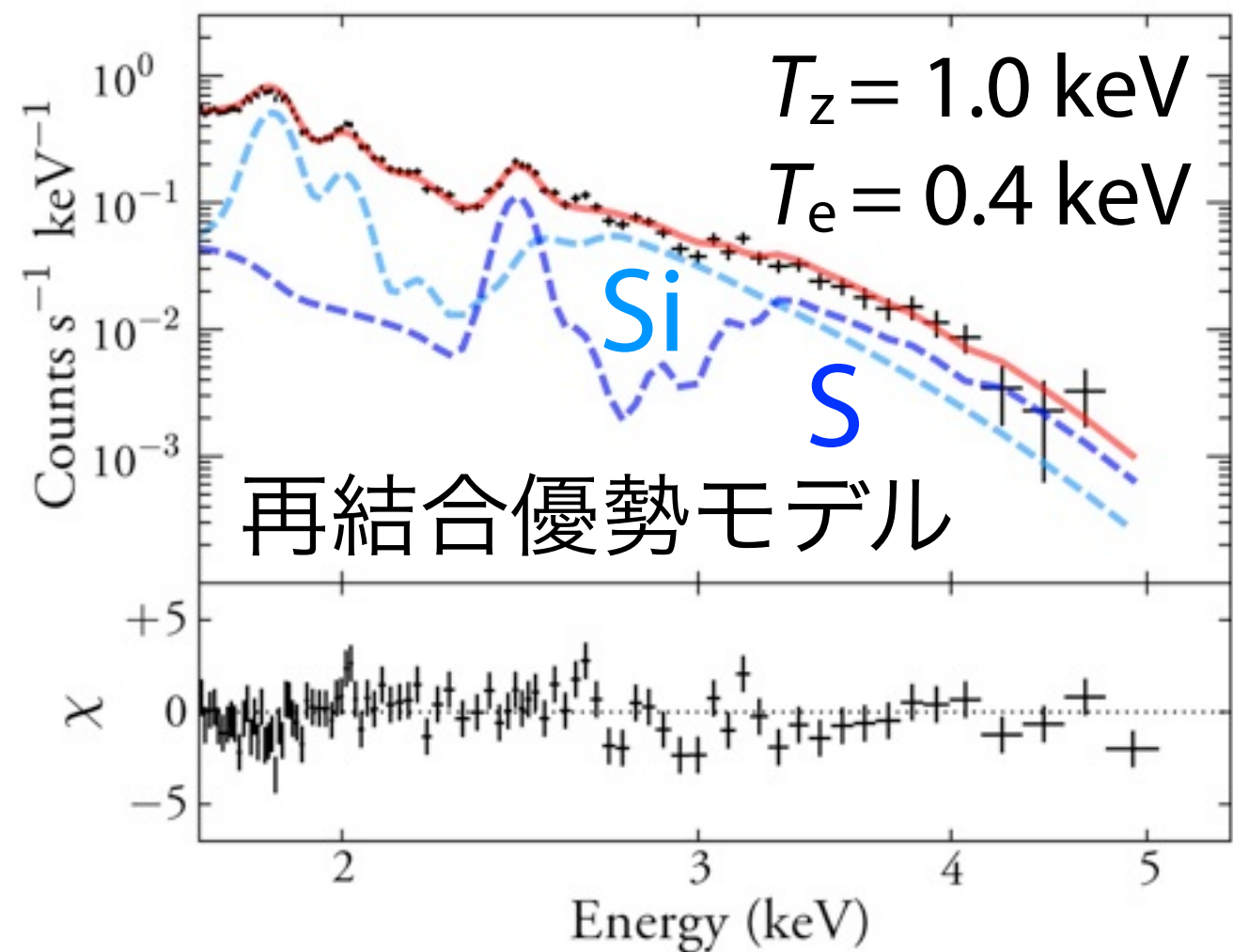
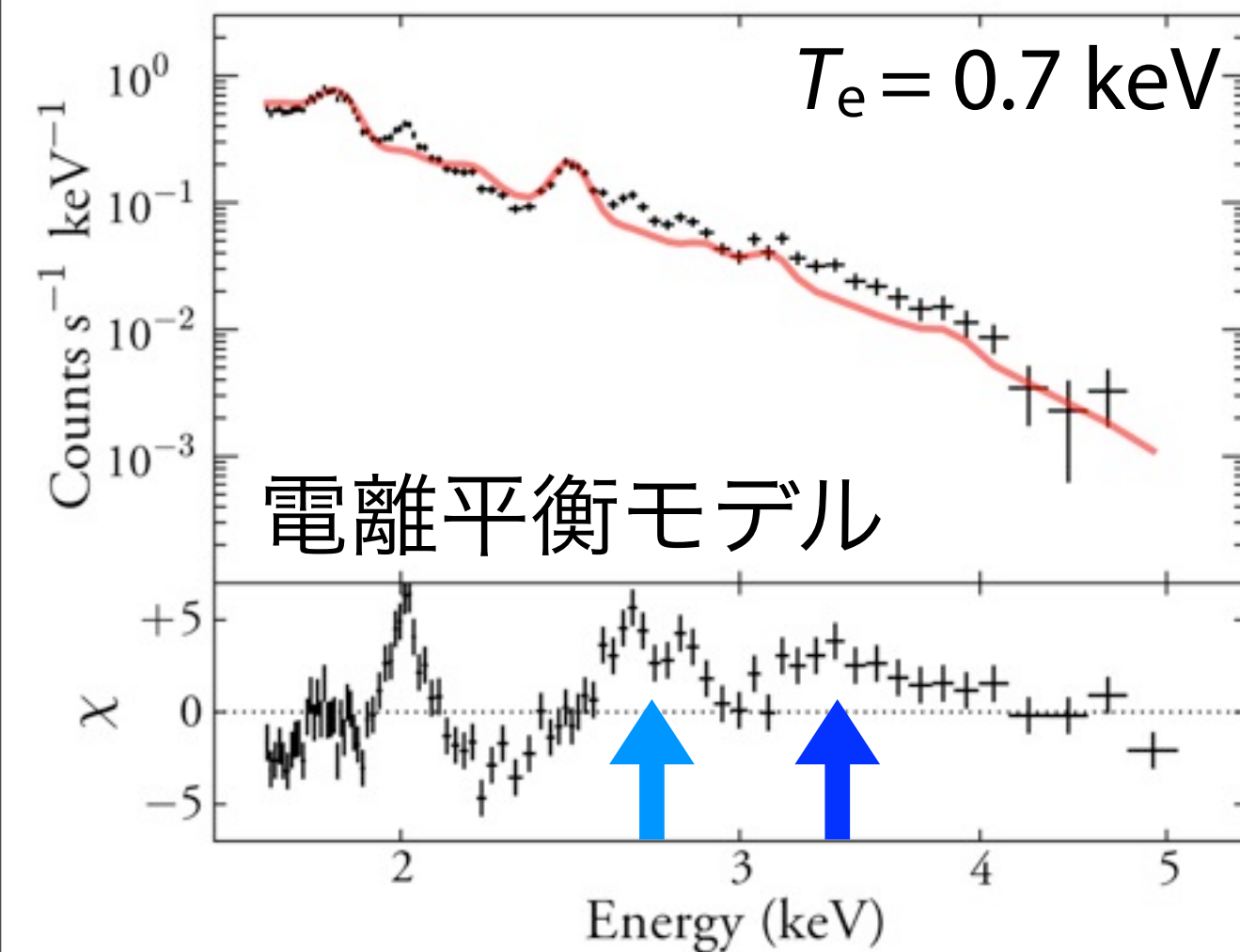


Suzaku XIS :

>5 keVに有意な放射なし

ASCAが検出した~7 keVまでの
硬X線放射を否定。

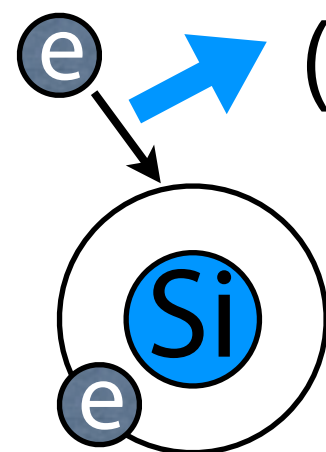
Discovery of Recombining Plasma (RP)



再結合連続線
バンブ状のexcess (RRC)

~ 2.7 keV: He状 Si K

~ 3.2 keV: He状 S K



標準モデルでは実現しえない
再結合優勢プラズマを発見

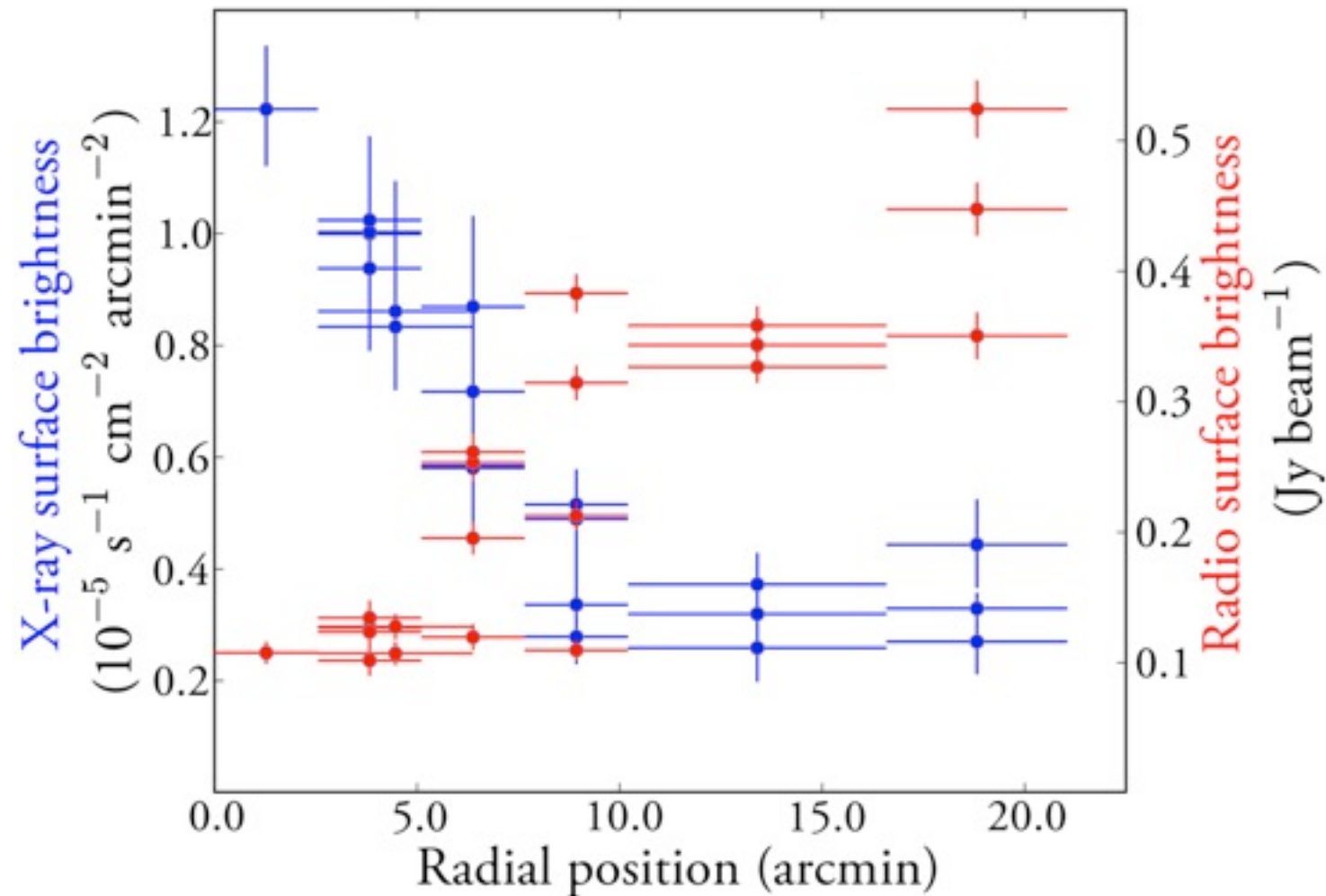
Nature of W28

- 空間構造

X線放射は中心集中型で、
電波シェルの内側を満たす
→MM型をconfirm

- スペクトル

異常に高温な成分を否定
むしろ典型的なMM SNRで
あることを説明



- 空間構造・温度はごく典型的なMixed Morphology型
- 熱的には標準進化では実現しえない再結合優勢状態

Summary of Results

Object	空間構造・環境	熱的構造
G1.2-0.0	星形成領域での爆発によるblow-out	電離平衡
G357.7-0.1	大質量星の双極状の爆発と分子雲の衝突	電離平衡
W28	中心集中 & 低温のごく典型的なMM SNR	再結合優勢

- いずれもきわめて特異な空間構造・環境をもつ
- 典型的MM SNR, W28が唯一 熱的にも特異 (再結合優勢)

Discussion

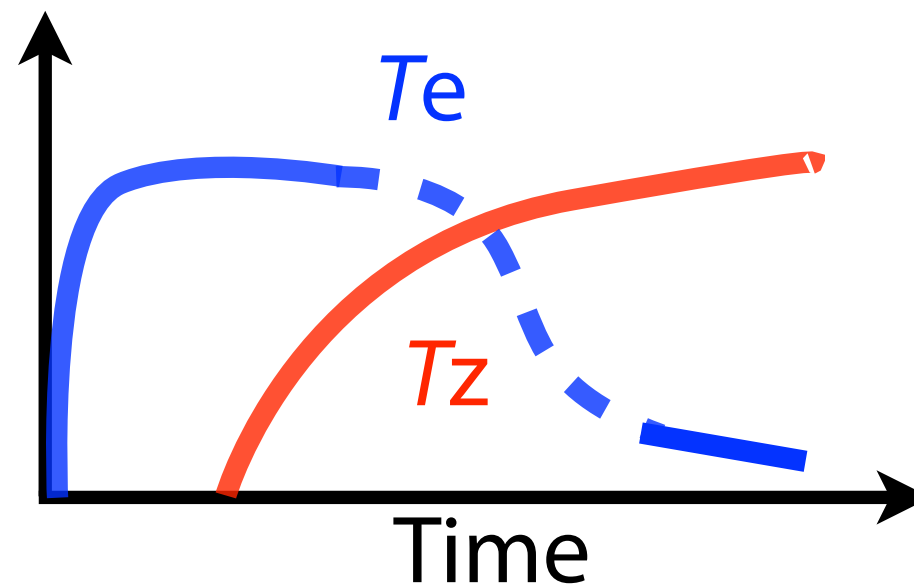
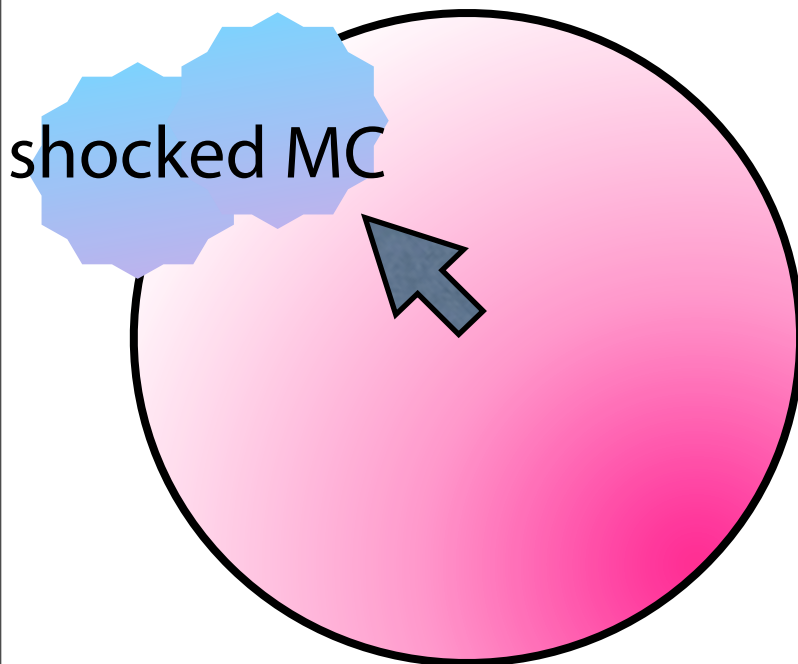
- すざくがこれまで発見した3つのRP
IC 443, W49 B, G359.1-0.5 とあわせ、4例目
- RPは典型的なMM SNRのみから発見された。
(*Yamaguchi+09, Ozawa+09, Ohnishi+11, This Work, Uchida+12*)
- W28の良質なスペクトルを用い、
RP-SNRsで最も精密・詳細な解析を行い
RPの形成メカニズムにせまる。

4. Discussion

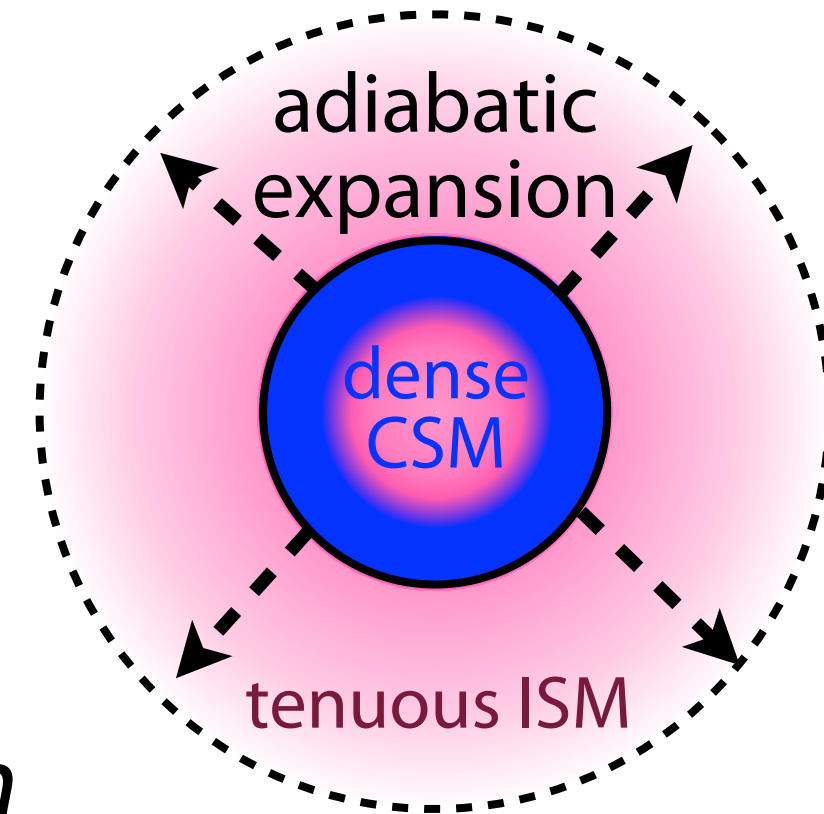
Possible scenarios

Case 1: Electron cooling

Conduction



Rarefaction



Case 2: Selective ionization

Supra-thermal particles

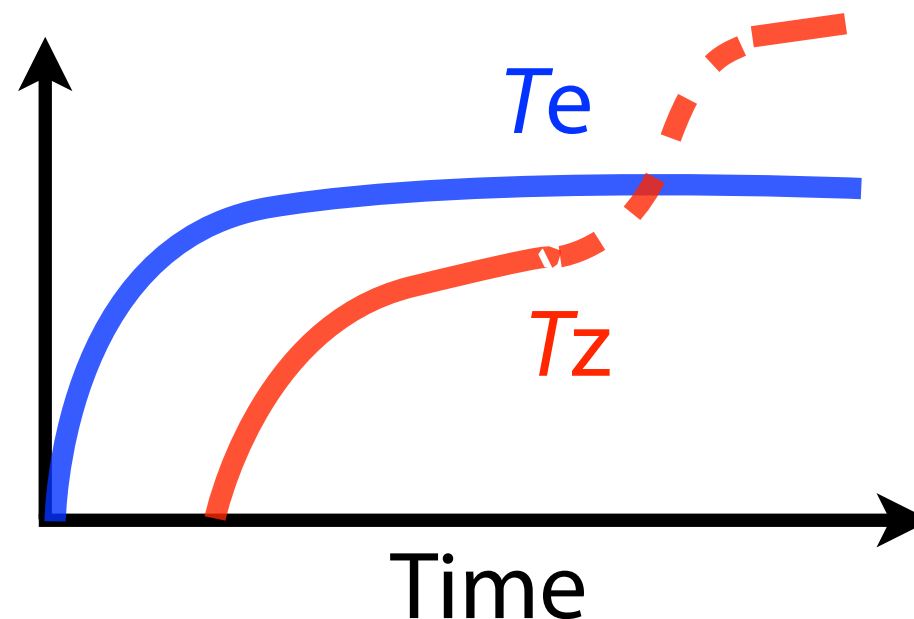
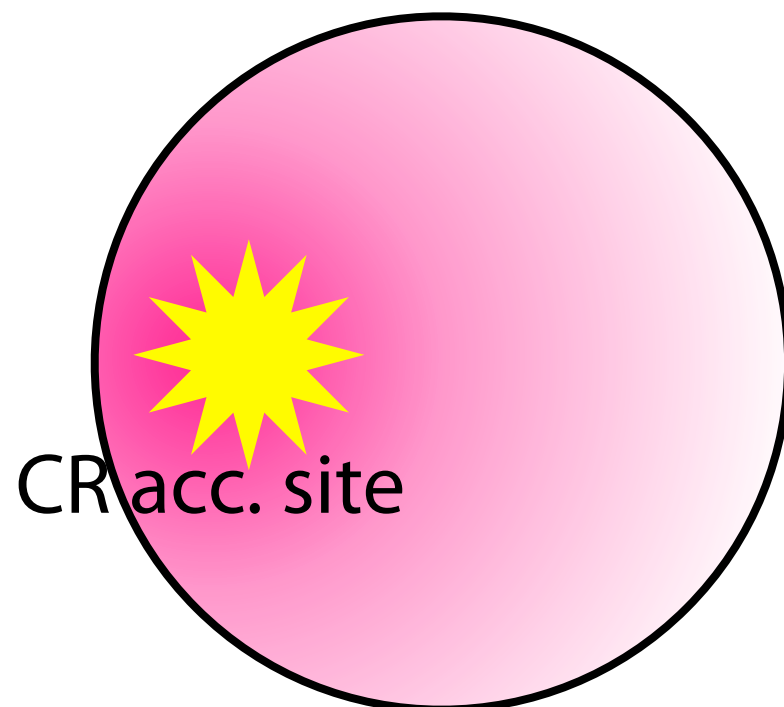
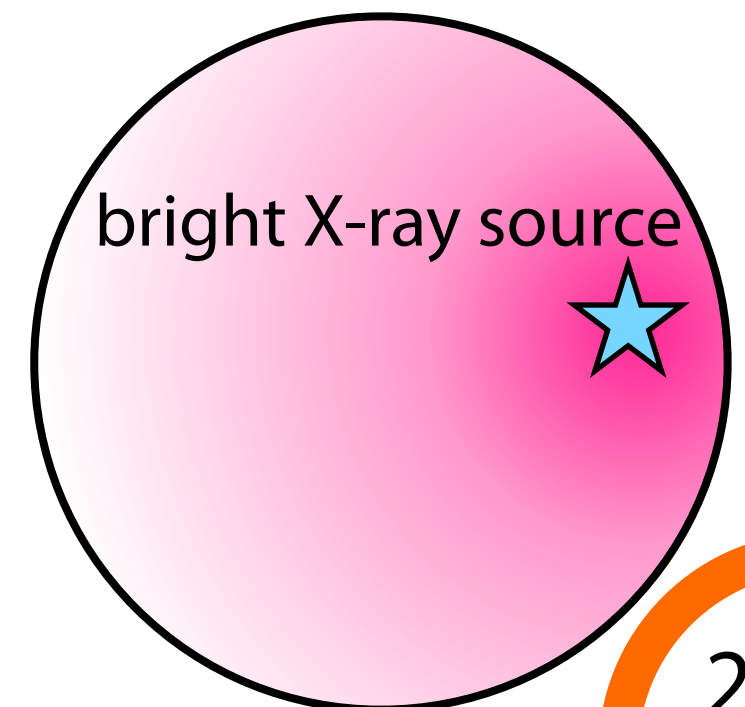


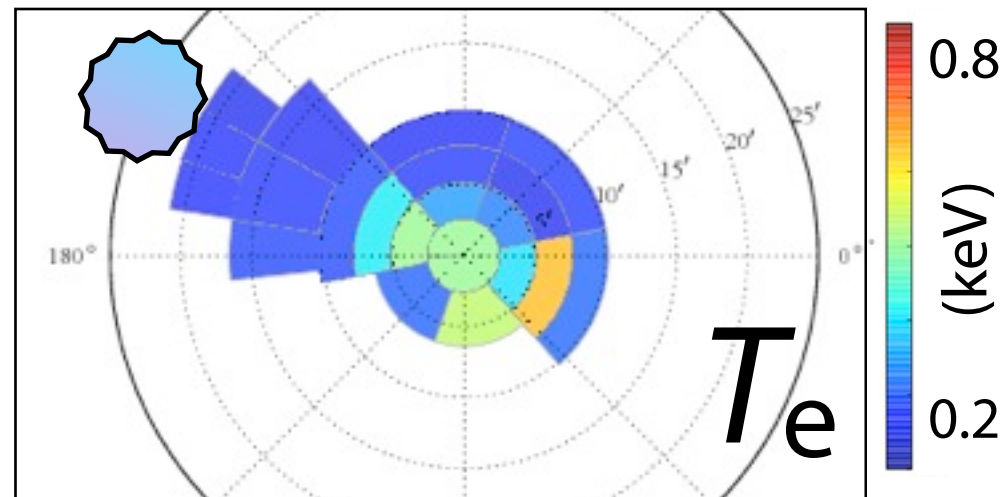
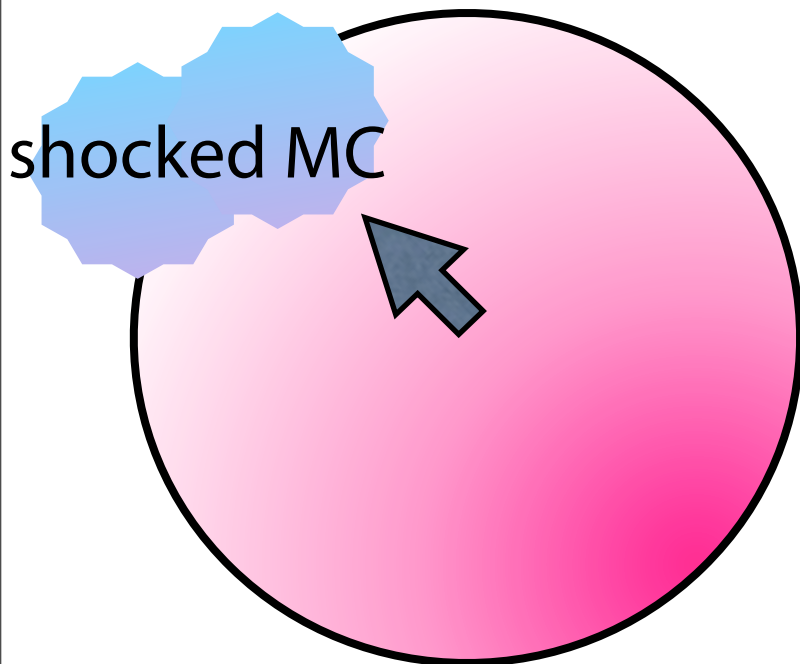
Photo-ionization



4. Discussion

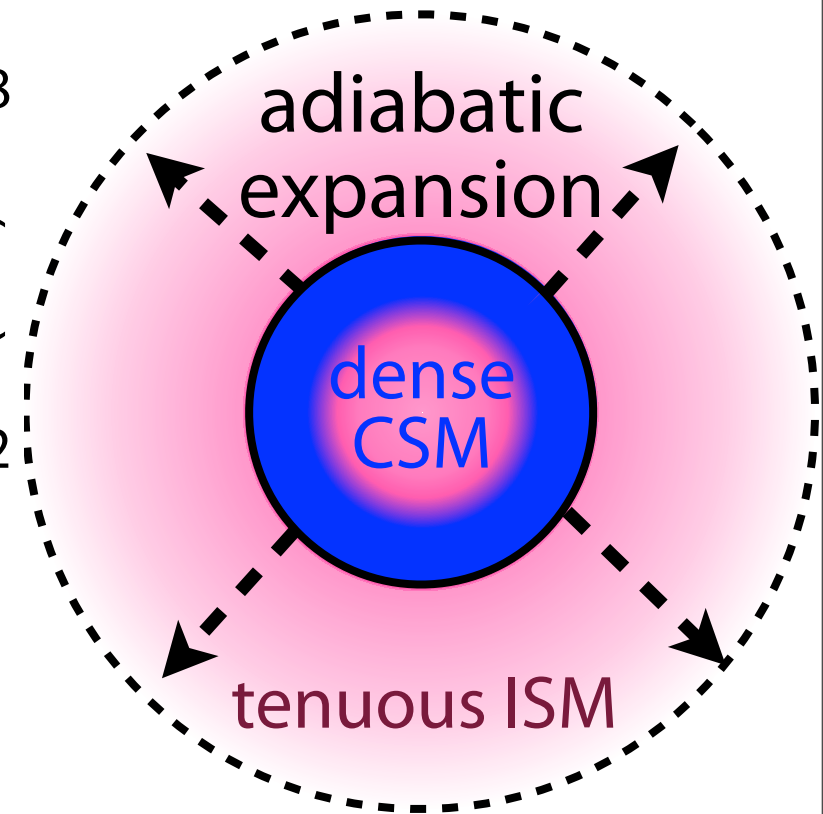
Possible scenarios

Conduction



*Spatial distribution of
RP in W28
(Sawada+ in prep.)*

Rarefaction



Supra-thermal particles

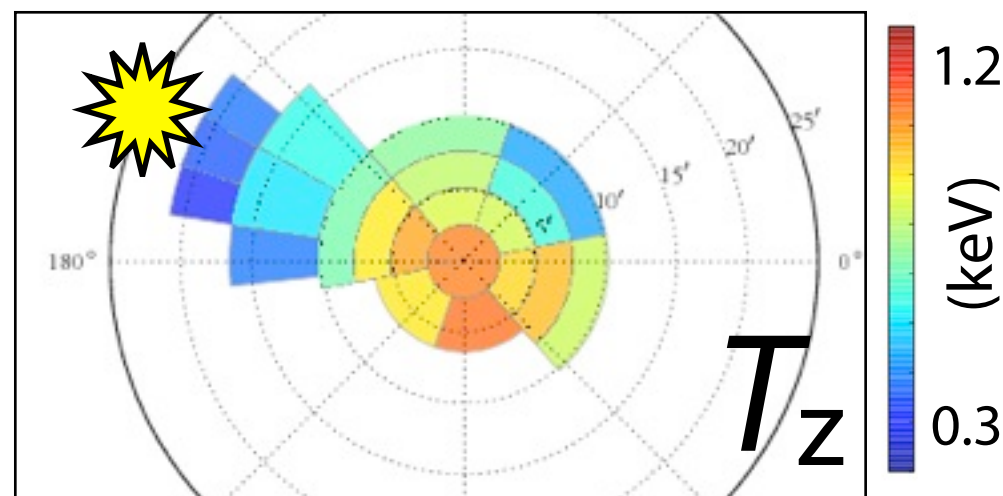
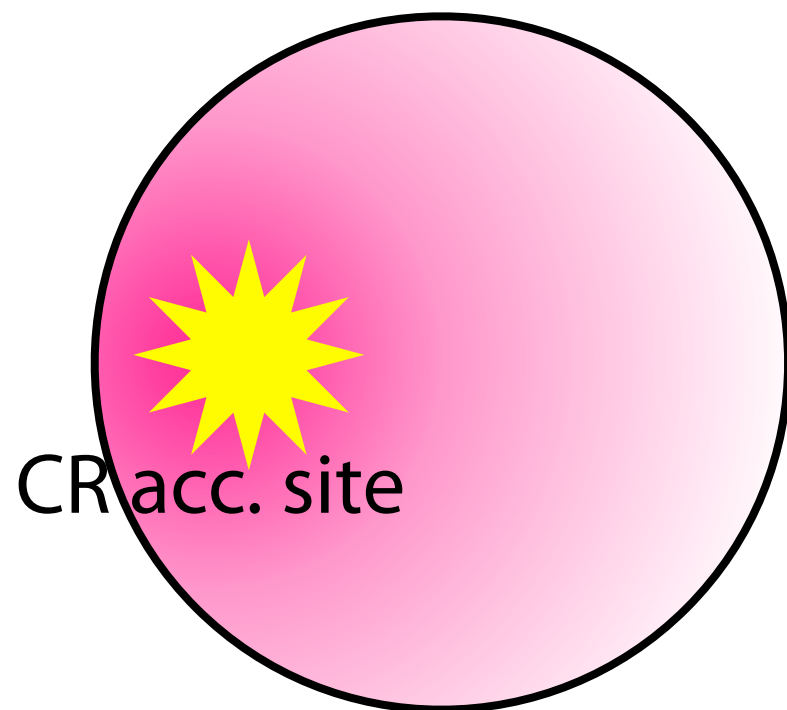
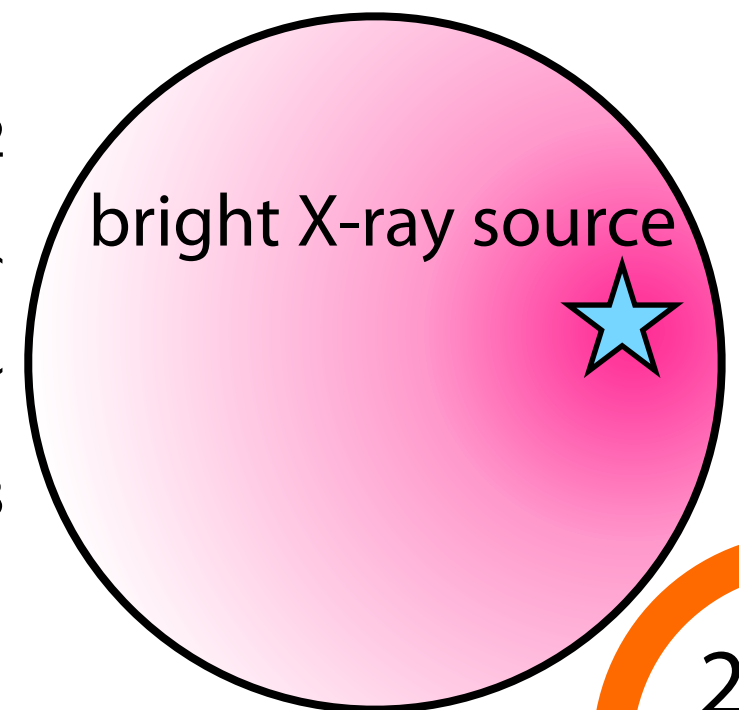
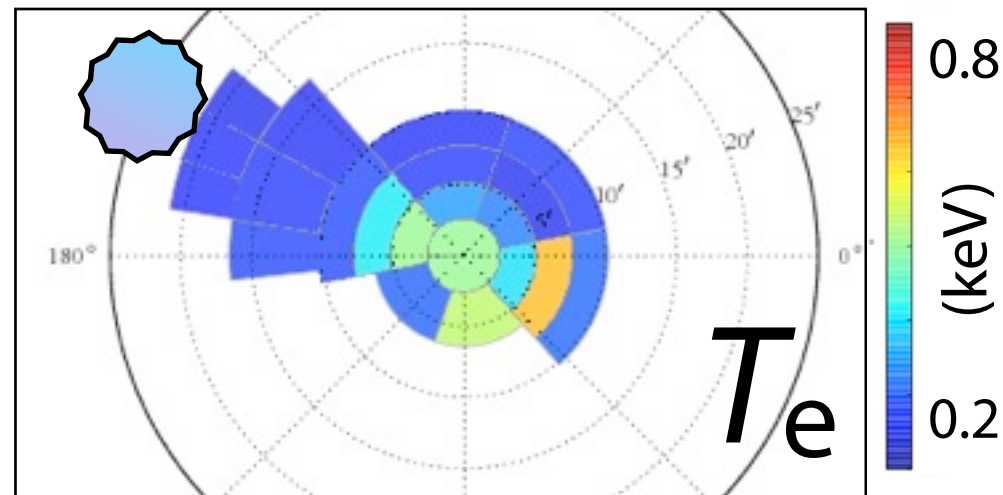
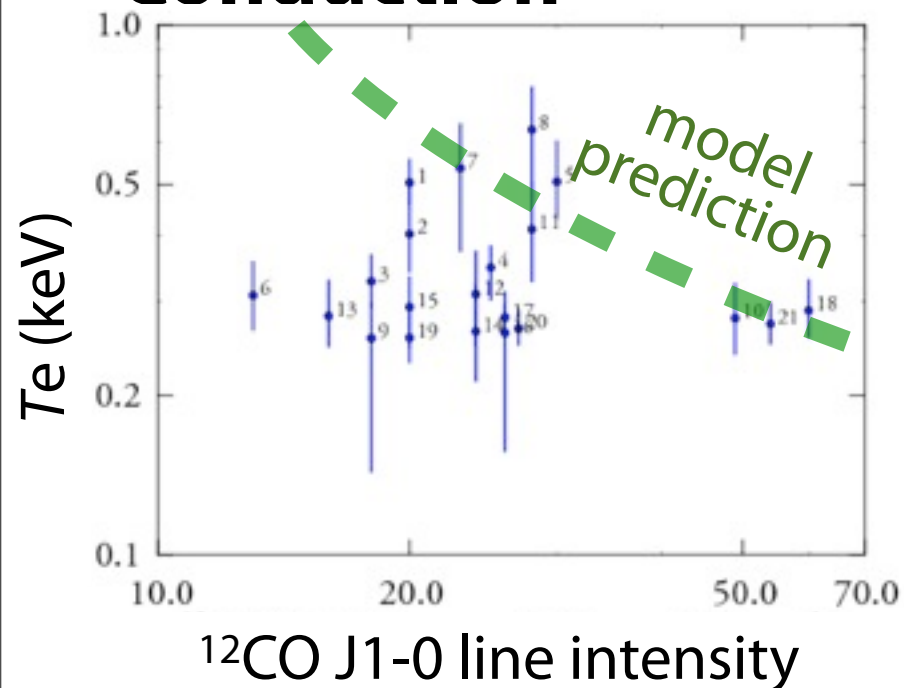


Photo-ionization



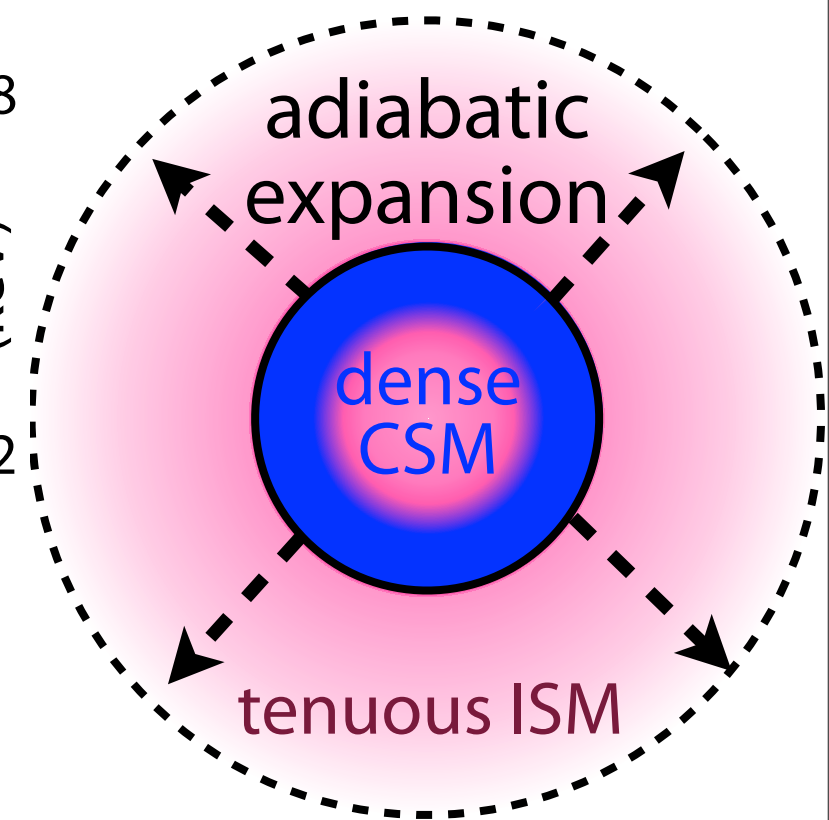
4. Discussion Possible scenarios

Conduction



Spatial distribution of RP in W28 (Sawada+ in prep.)

Rarefaction



Supra-thermal particles

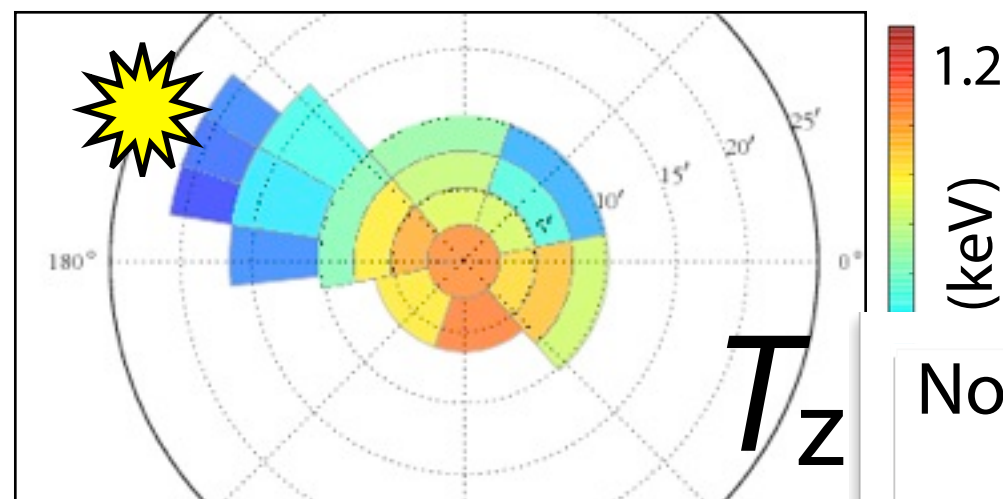
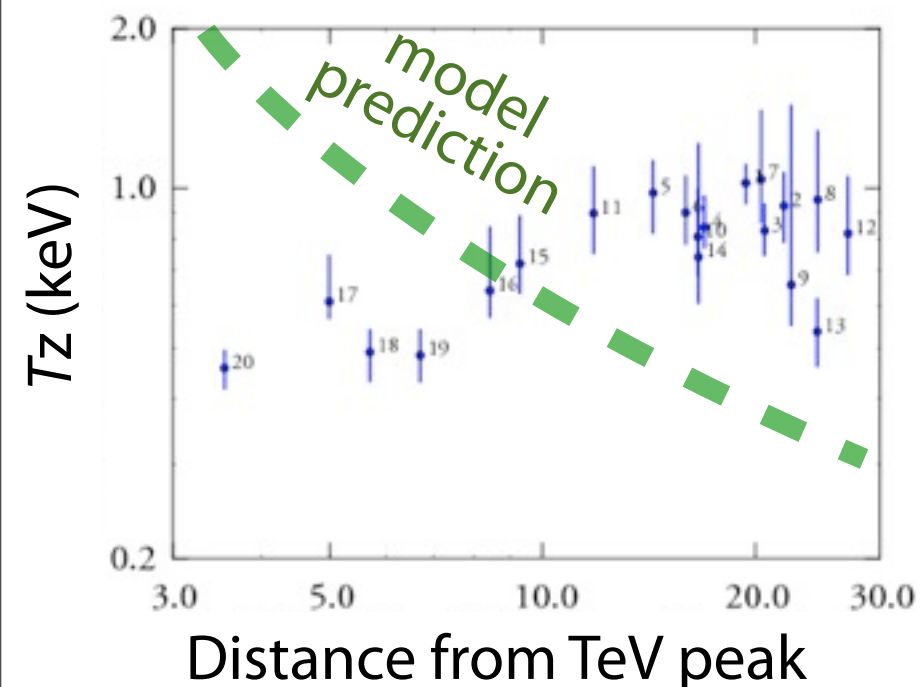
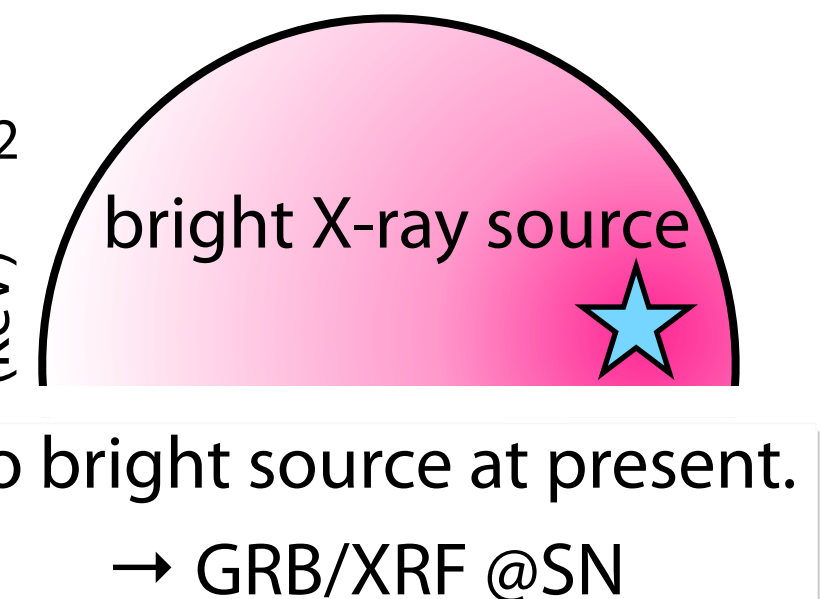


Photo-ionization



4. Discussion

Elemental Distribution of T_z

衝突電離・再結合の特性時間→元素により異なる。

1. Formation of RP

a. Photo-ionization @ GRB
非常に明るいため完全電離
($>10^{44}$ erg/s $\Leftrightarrow \xi > 4.5$)
⇒ 電離温度は元素間共通

b. Rarefaction
衝突電離
⇒ 電離の特性時間を反映して電離温度がばらつく。

2. Relaxation of RP

再結合の特性時間を反映して T_z がばらつく。

4. Discussion

Elemental Distribution of T_z

再結合の特性時間→元素により異なる

- 基本的にはZ依存性



速 ←→ 遅

再結合する電子の数が異なる
⇒重い元素ほど時間がかかる

- 結合殻K→Lでの T_z 降下
(Feのみ)

$T_z \sim$ 最外殻電子の束縛 E

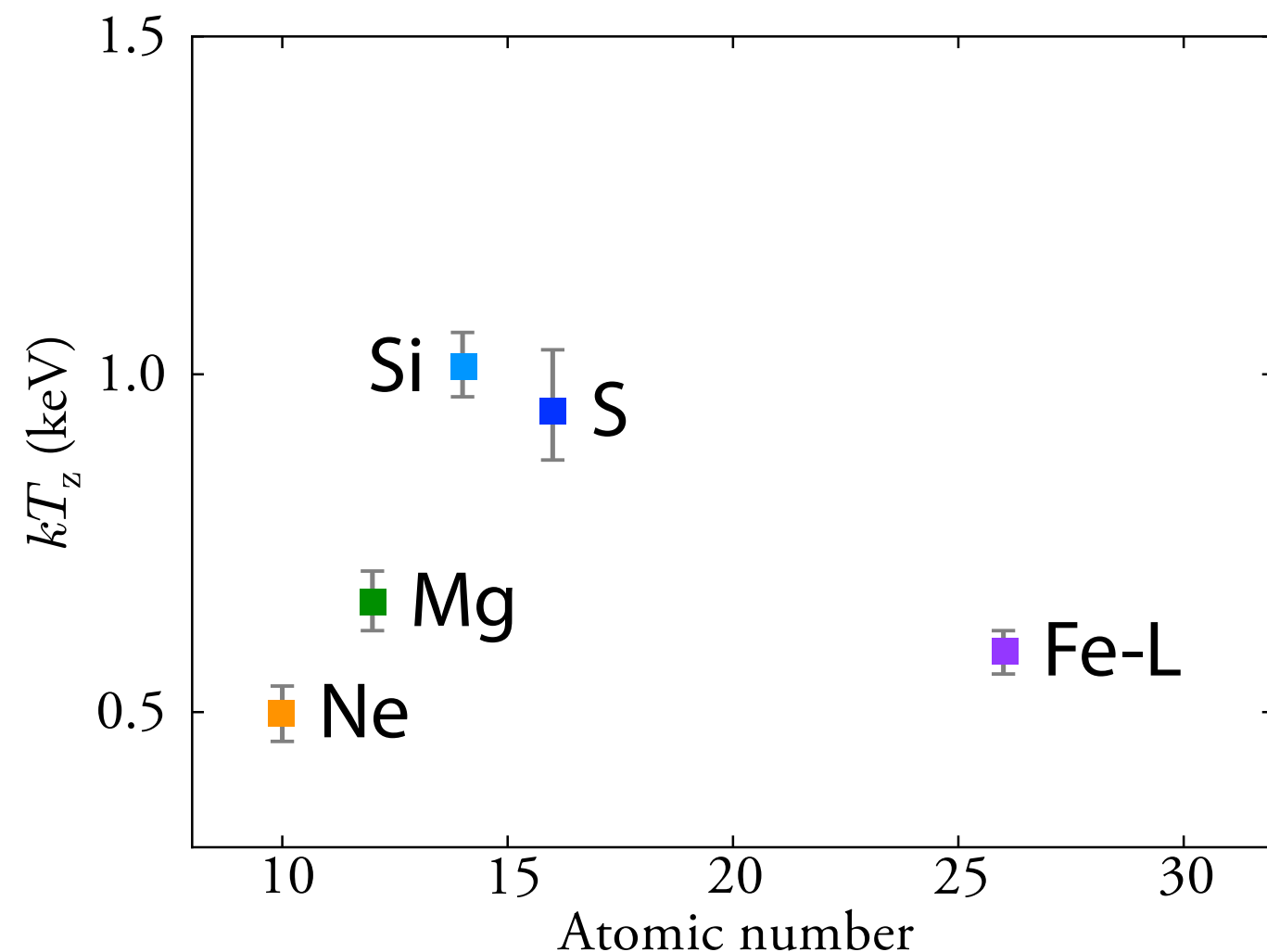
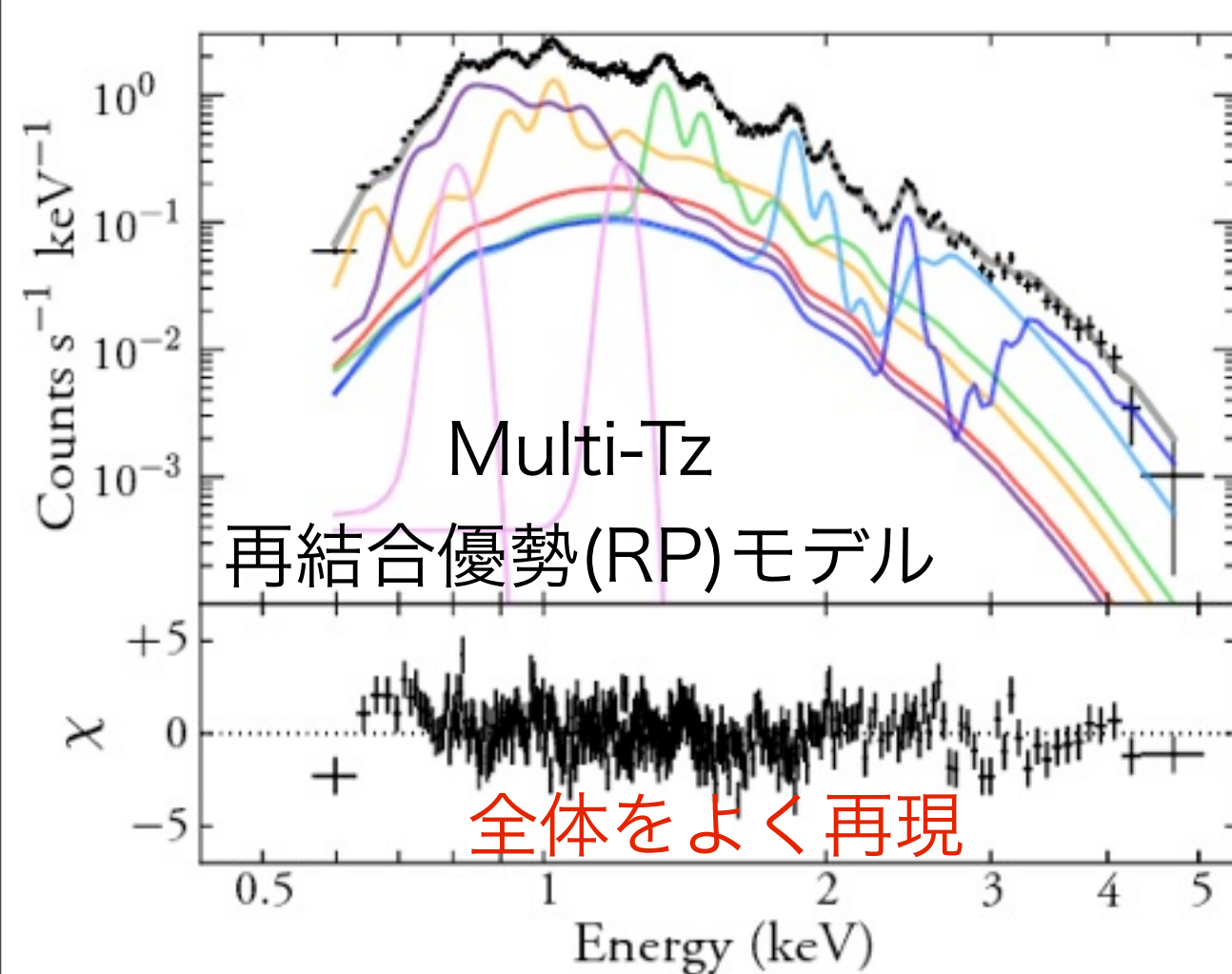
He-like→Li-likeに再結合する際、
 T_z が急激に低下

※L殻まで再結合が進むのはFeのみ

- $T_z(\text{Si}, \text{S}) > T_z(\text{Ne}, \text{Mg}, \text{Fe})$ を期待

4. Discussion

Elemental Distribution of T_z



Si, Sで高い T_z 。軽いNe, MgおよびFeでは低い T_z
→定性的には再結合の特性時間で説明可能

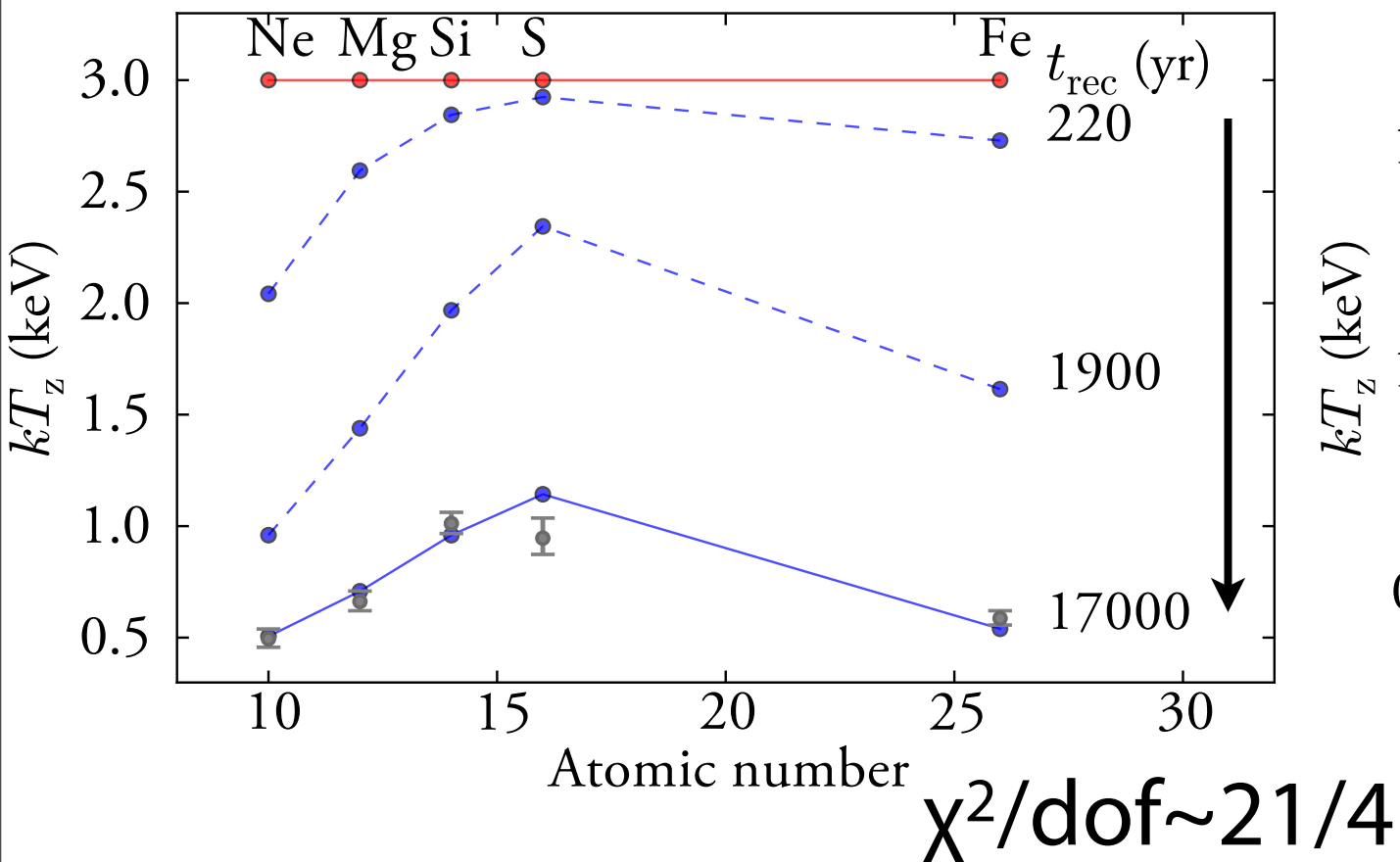
4. Discussion

Elemental Distribution of T_z

RP形成(赤)以後の緩和過程(青)をsimulate

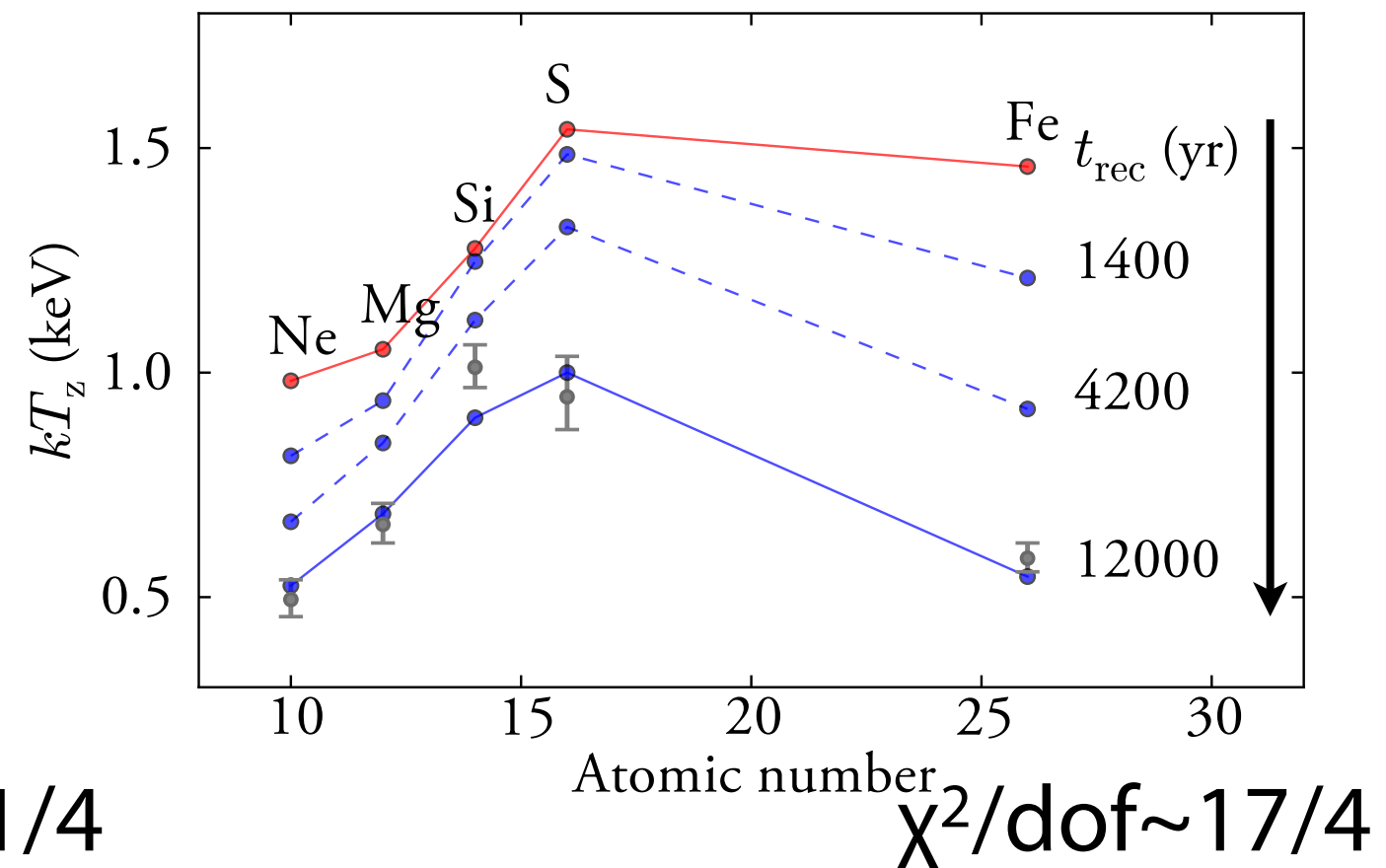
(a) Photo-ionization;

完全電離→元素間で初期 T_z 共通



(b) Rarefaction;

衝突電離→元素間で初期 T_z バラつく

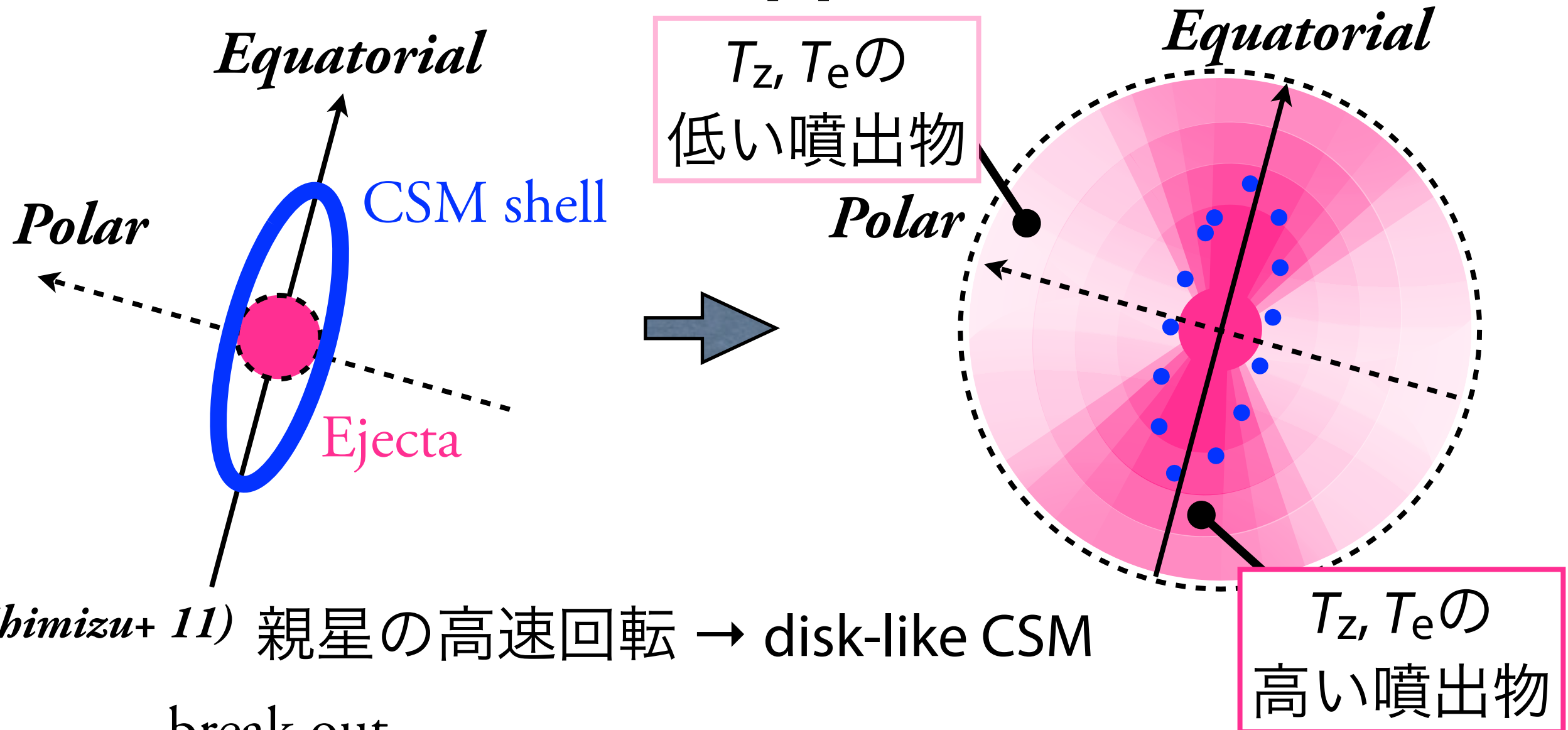


いずれも観測された T_z をおおよそ再現

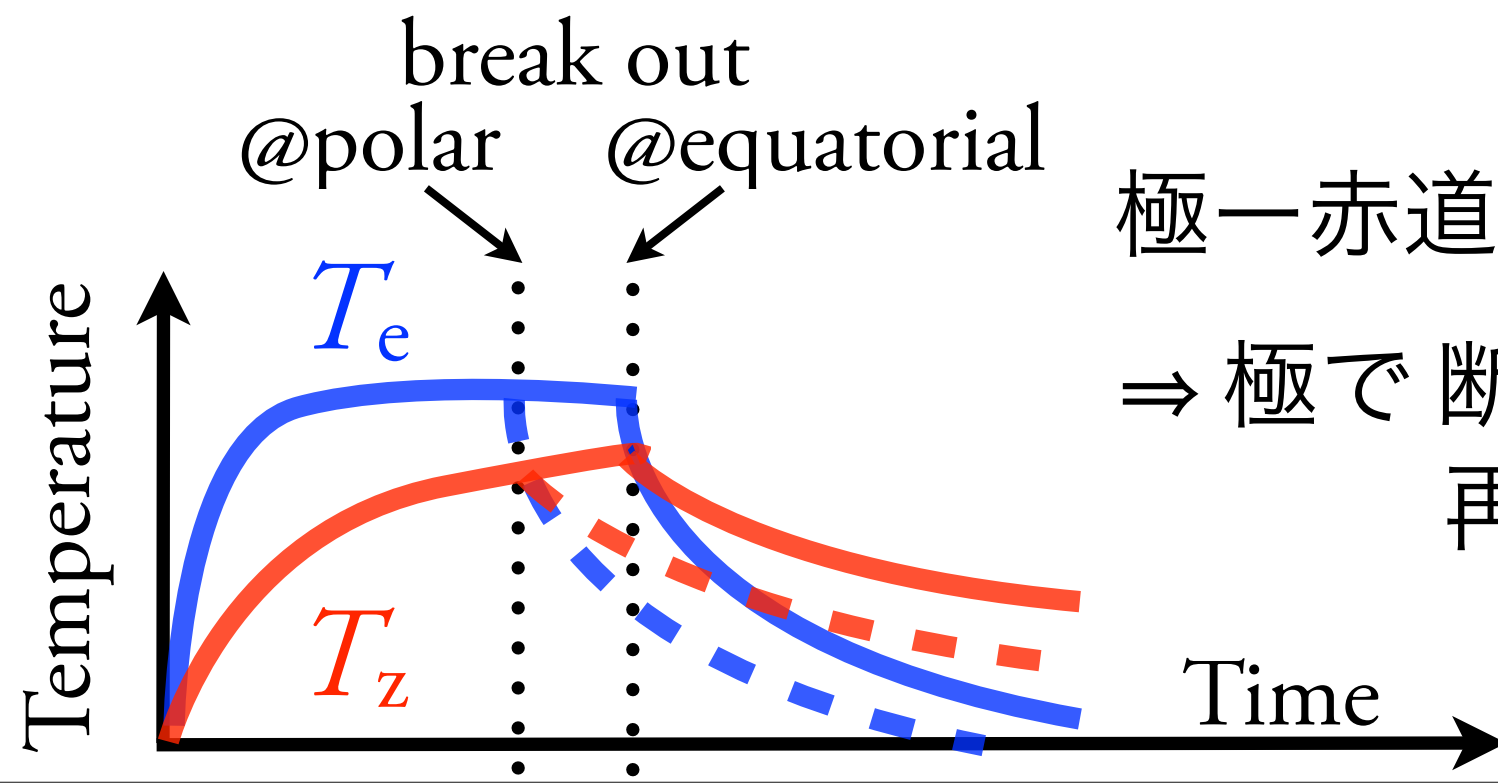
$t_{\text{rec}} \sim \text{age} \Rightarrow$ 進化の初段階にRP形成: self-consistent

やや(b)の合いが良い, GRBの傍証なし→Rarefactionをprefer

4. Discussion Further Support for Rarefaction



(Shimizu+ 11) 親星の高速回転 → disk-like CSM



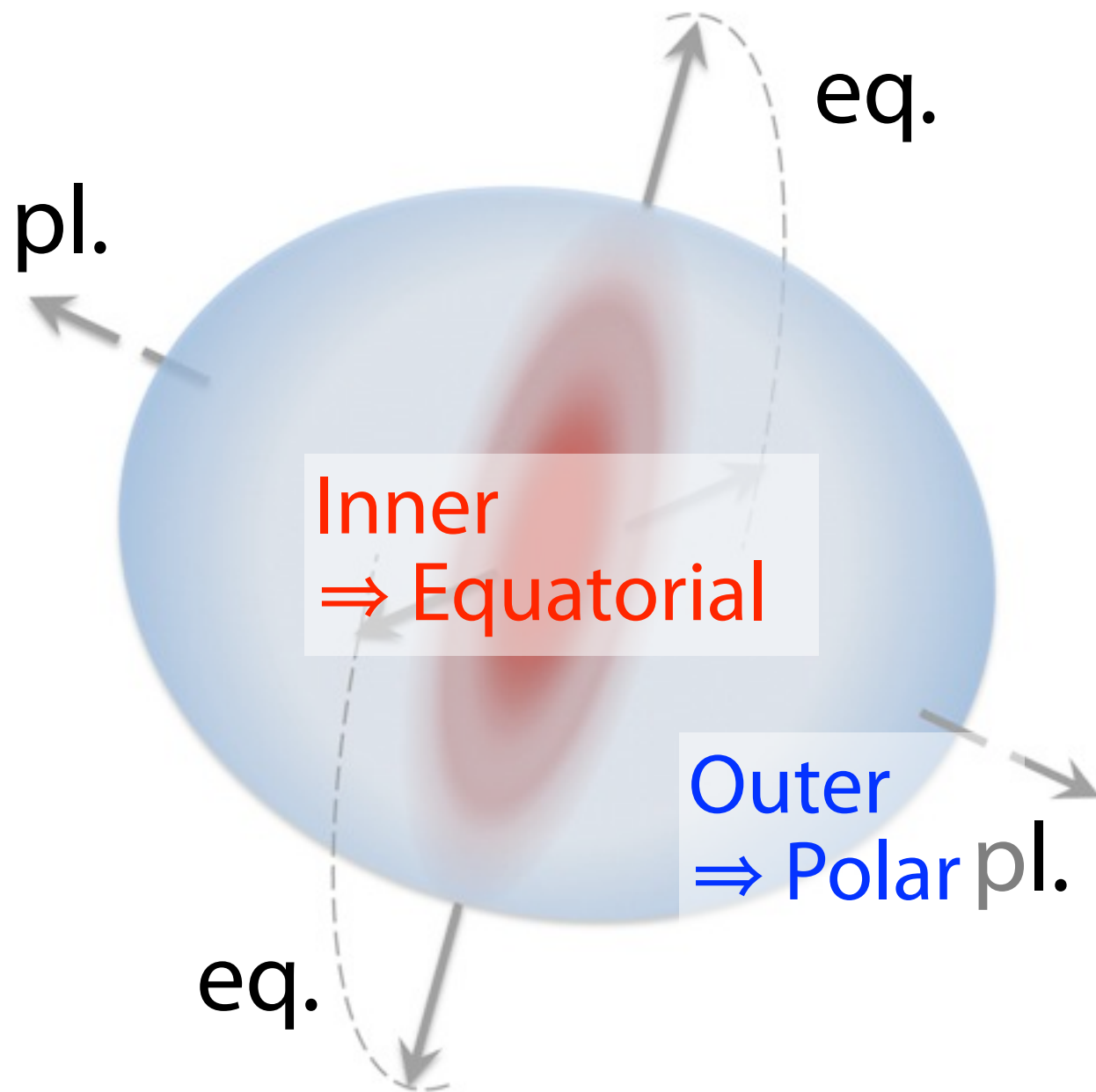
極—赤道でbreak-outに時間差

⇒ 極で断熱冷却がより進む
再結合もより進む

4. Discussion

Origin of RP and Missing Branch

Projection from equatorial direction



T_e, T_z

Inner > **Outer**

☞ RPの空間分布を再現

$EM \propto n_e^2 \propto T_e^3$ (adiabatic)

Inner > **Outer**

☞ MM型の空間構造を再現

SNR進化のmissing branch = Rarefaction

Conclusion

- GC方向の3つのNon-Standard SNRs候補天体は、いずれも特異な空間構造・環境であった。
- 典型的なMM SNRからのみ再結合優勢プラズマ(RP)が発見されることをconfirmした。
- Non-Standard SNRsのうち、MMとRPをもたらす“Missing Branch”は、回転大質量親星の星風による爆発初期のrarefaction processであることを解明した。

