

2018. 3. 6-9 高宇連研究会 博士論文発表

X線天文衛星「すざく」による銀河系内超新星残骸の  
過電離プラズマの形成プロセスの研究

松村 英晃 (京都大学 宇宙線研究室)

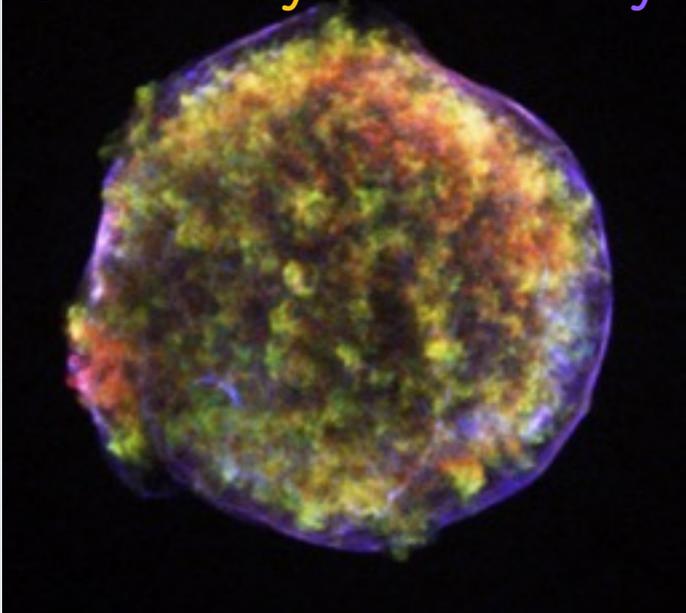
# 超新星残骸からのX線放射

超新星残骸 (SNR):

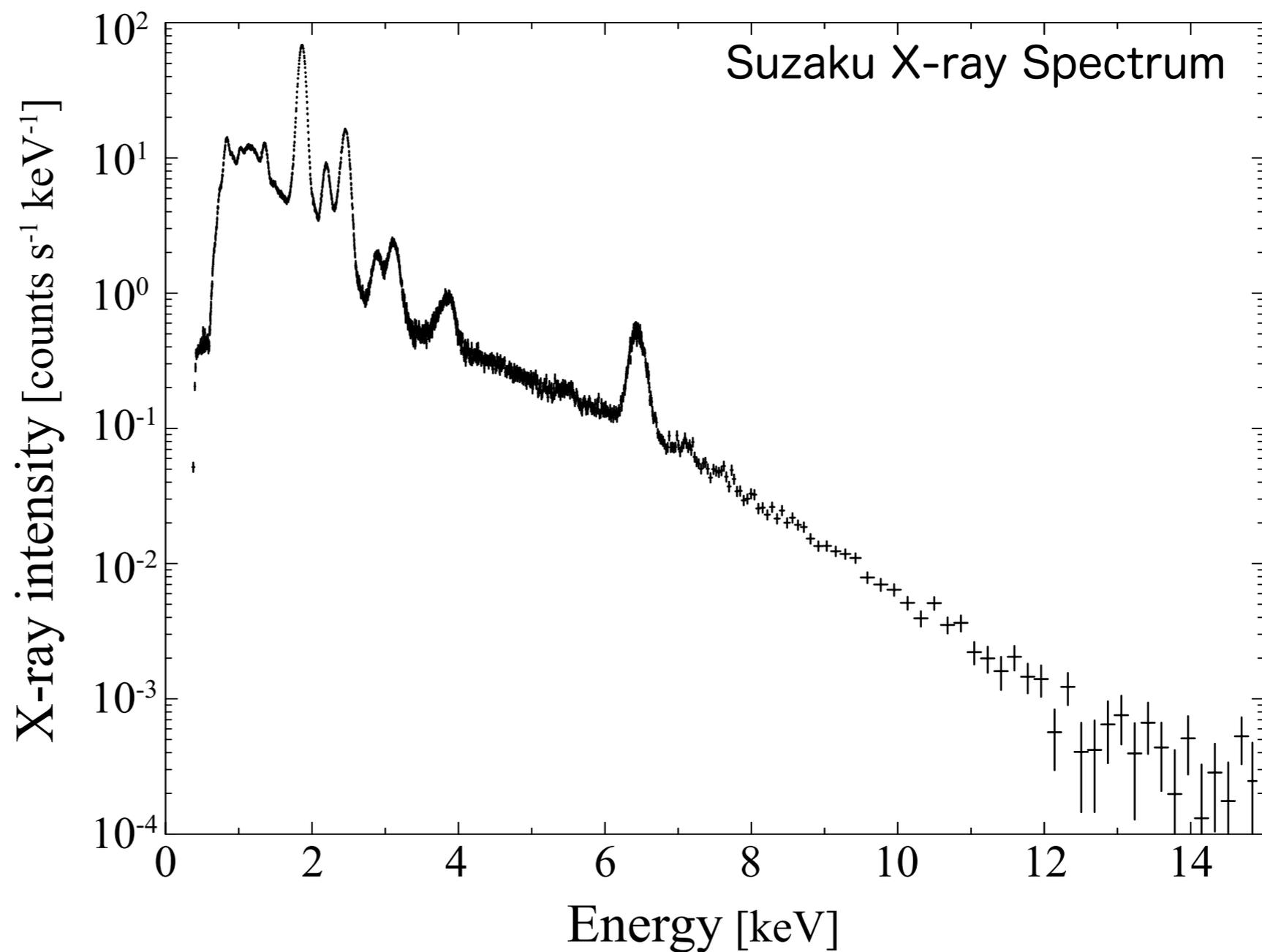
Tycho's SNR

Chandra X-ray Image

Soft X-ray Hard X-ray



NASA/CXC/Rutgers/  
J.Warren & J.Hughes et al.



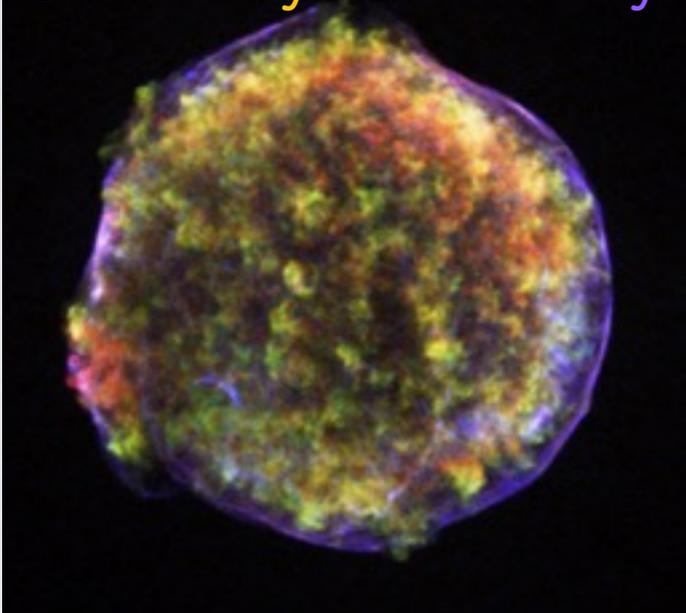
# 超新星残骸からのX線放射

超新星残骸 (SNR):

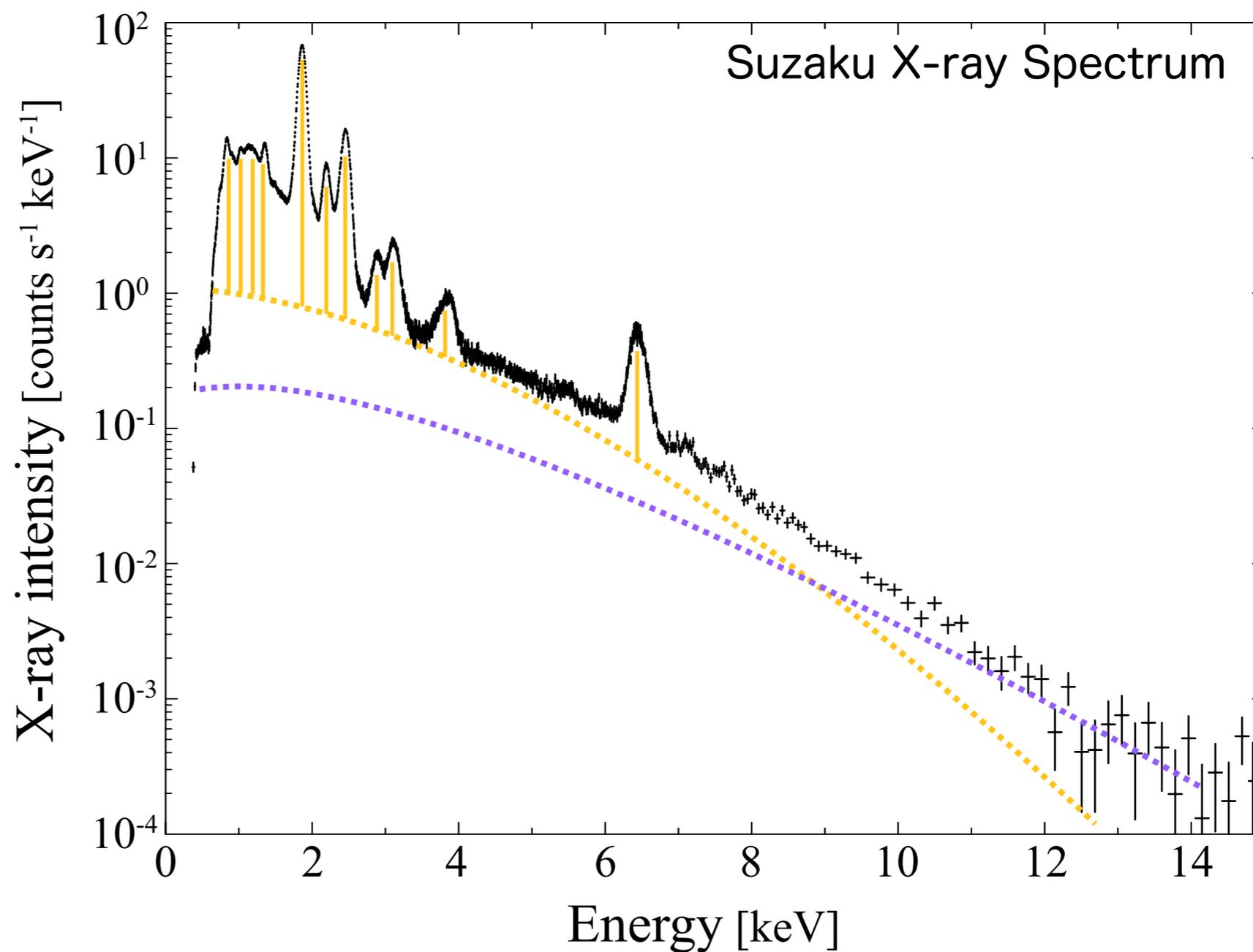
Tycho's SNR

Chandra X-ray Image

Soft X-ray Hard X-ray



NASA/CXC/Rutgers/  
J.Warren & J.Hughes et al.



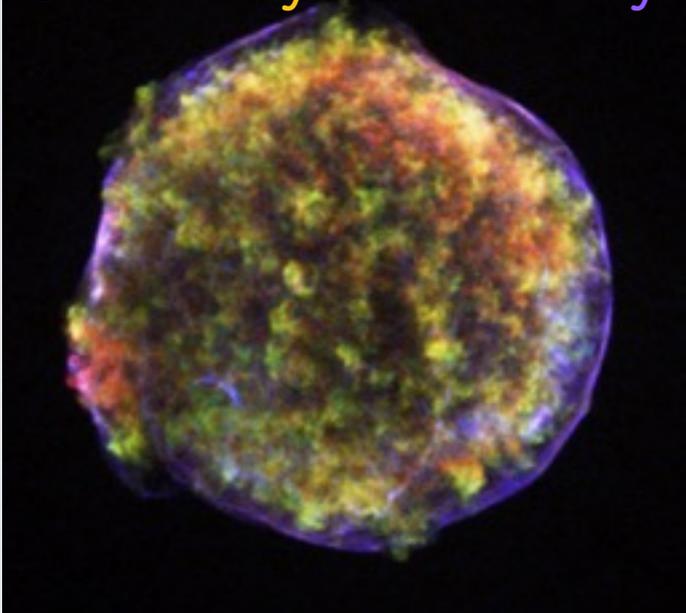
# 超新星残骸からのX線放射

超新星残骸 (SNR):

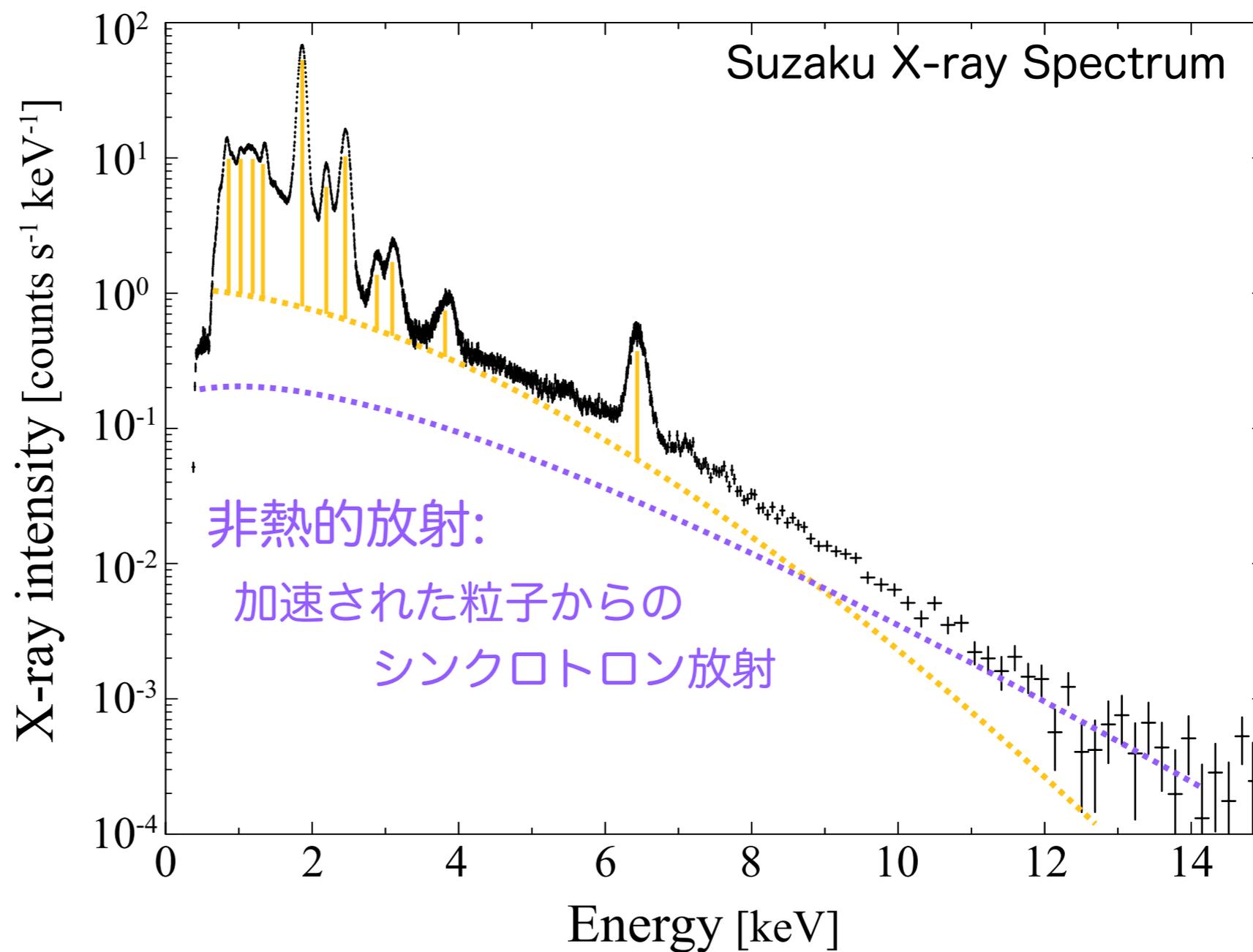
Tycho's SNR

Chandra X-ray Image

Soft X-ray Hard X-ray



NASA/CXC/Rutgers/  
J.Warren & J.Hughes et al.



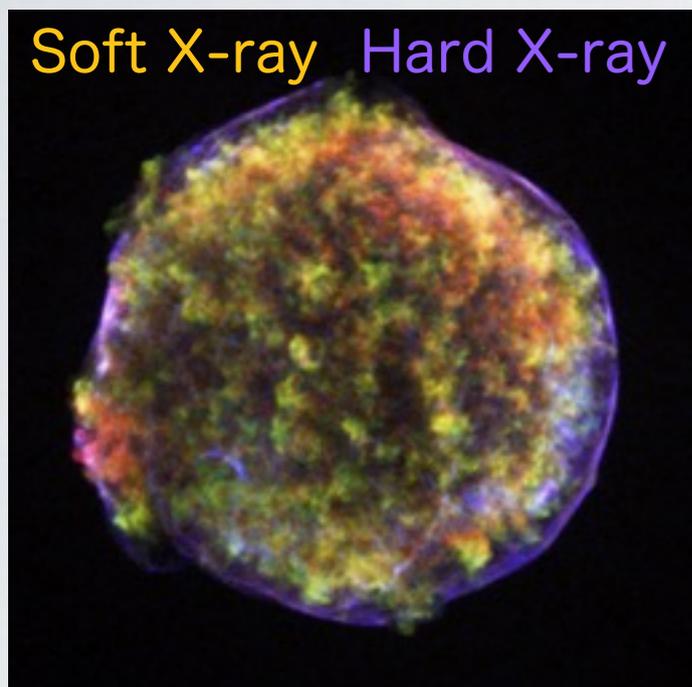
# 超新星残骸からのX線放射

超新星残骸 (SNR):

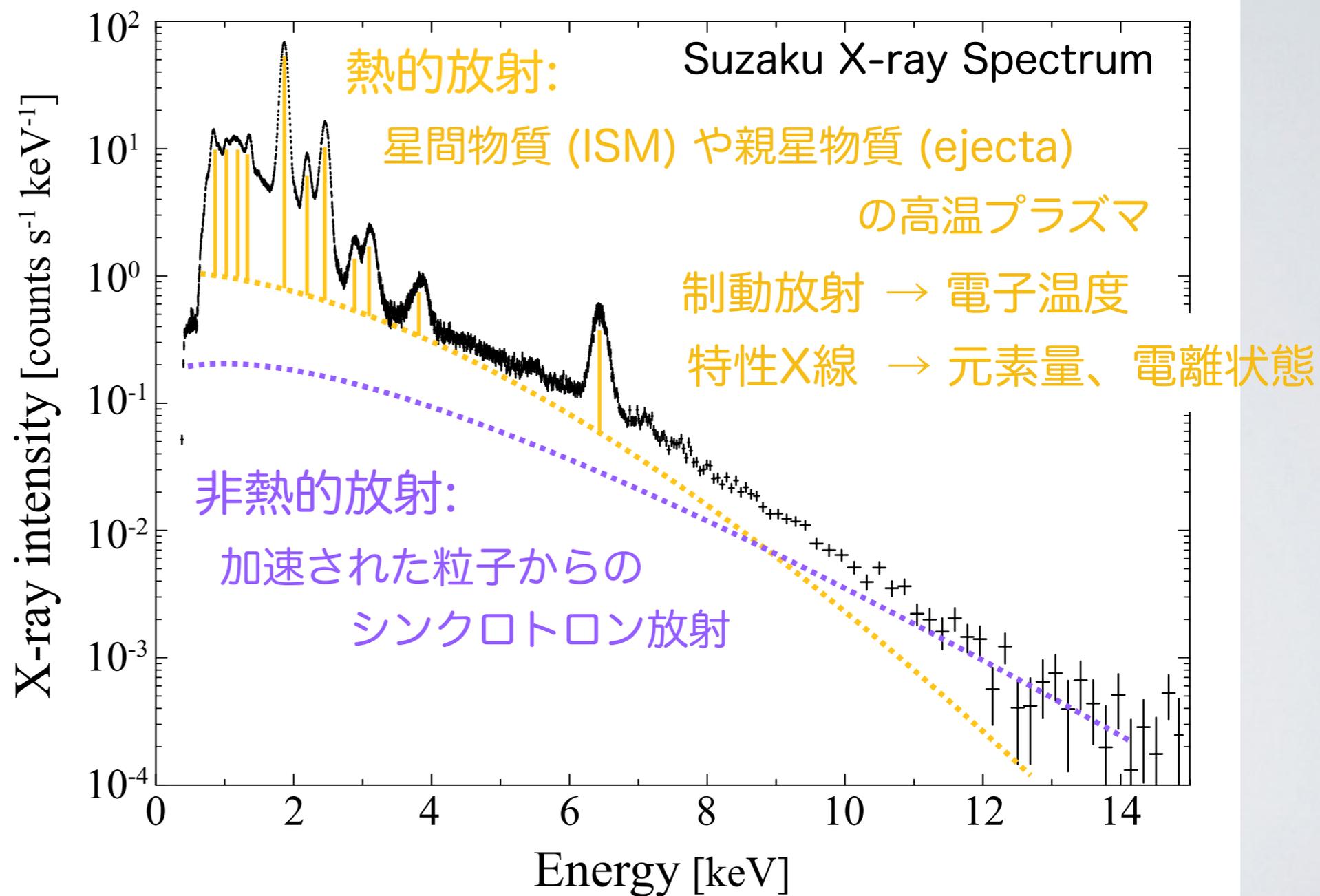
Tycho's SNR

Chandra X-ray Image

Soft X-ray Hard X-ray



NASA/CXC/Rutgers/  
J.Warren & J.Hughes et al.

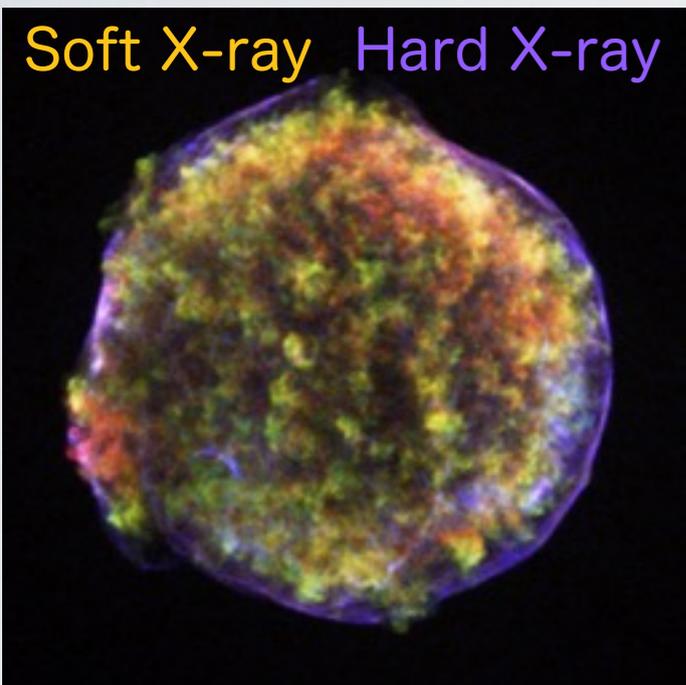


# 超新星残骸からのX線放射

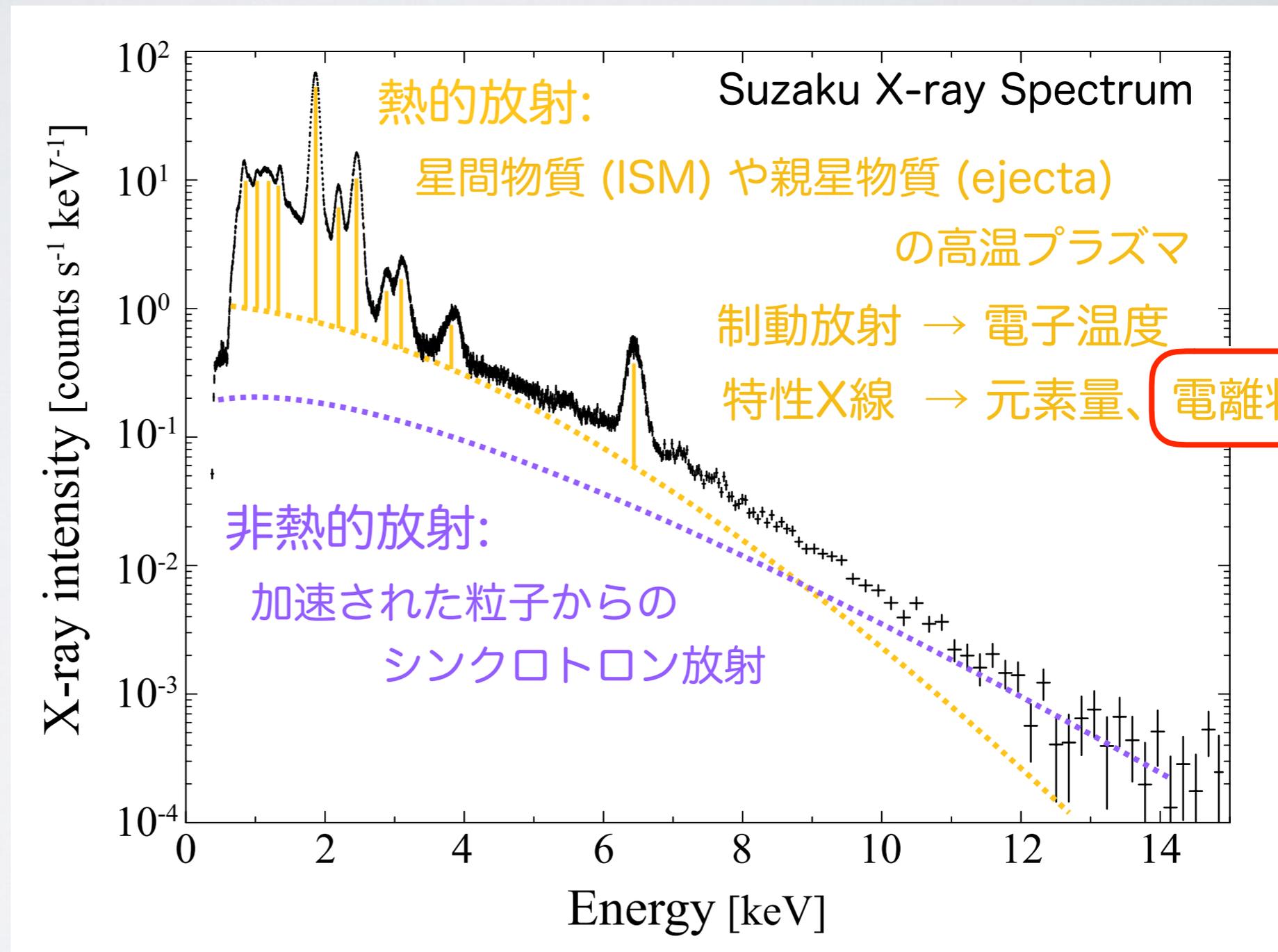
超新星残骸 (SNR):

Tycho's SNR

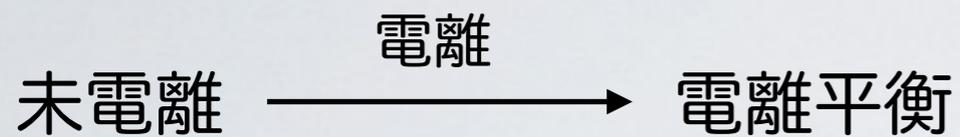
Chandra X-ray Image



NASA/CXC/Rutgers/  
J.Warren & J.Hughes et al.

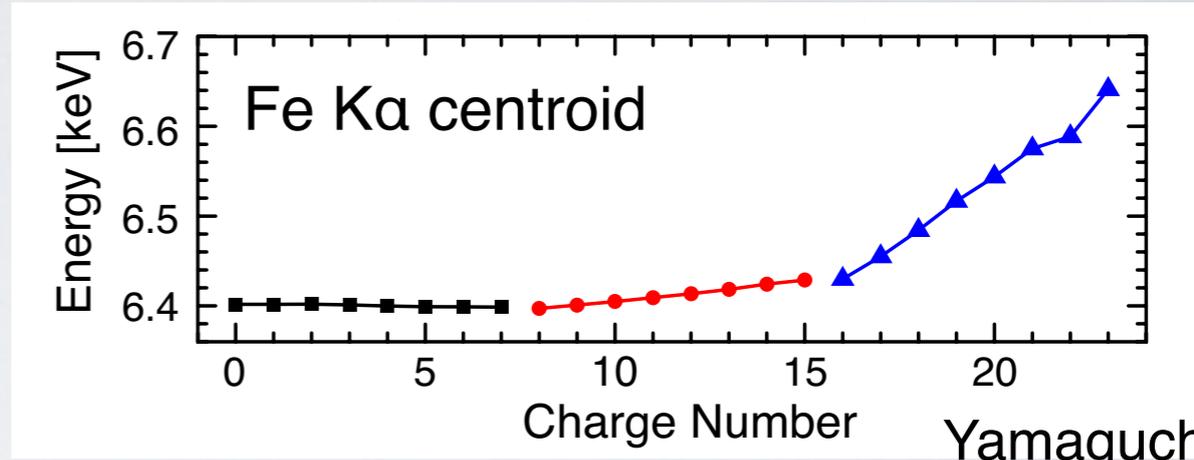


# SNRから電離非平衡プラズマの発見



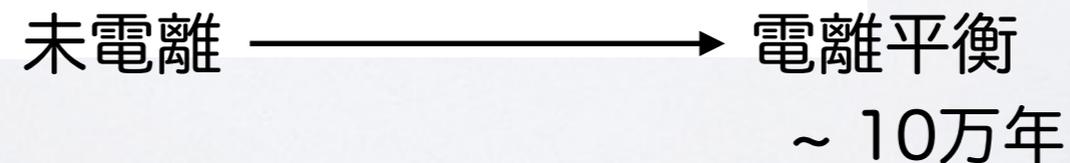
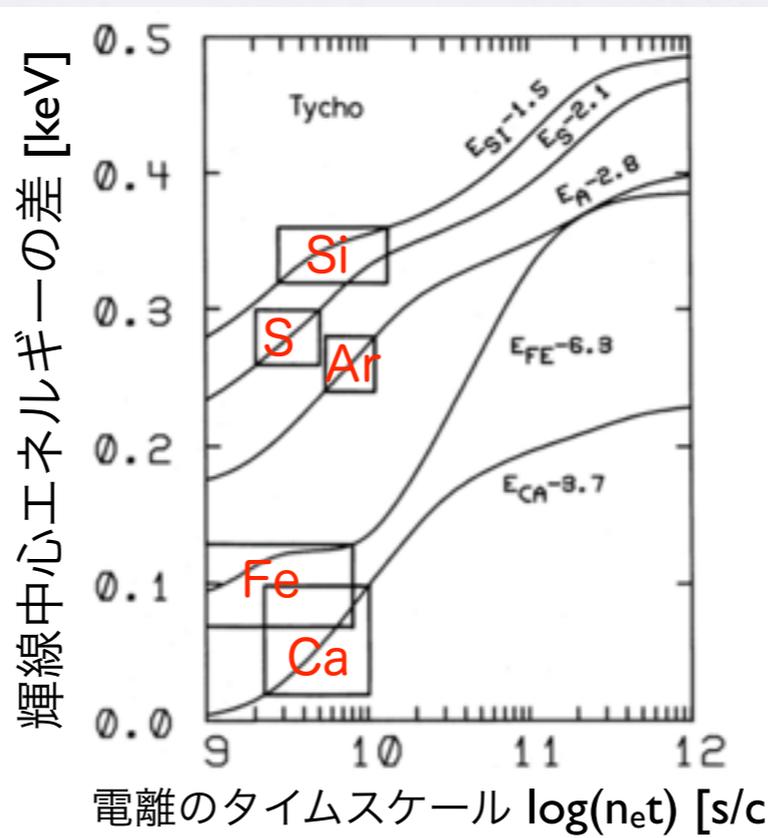
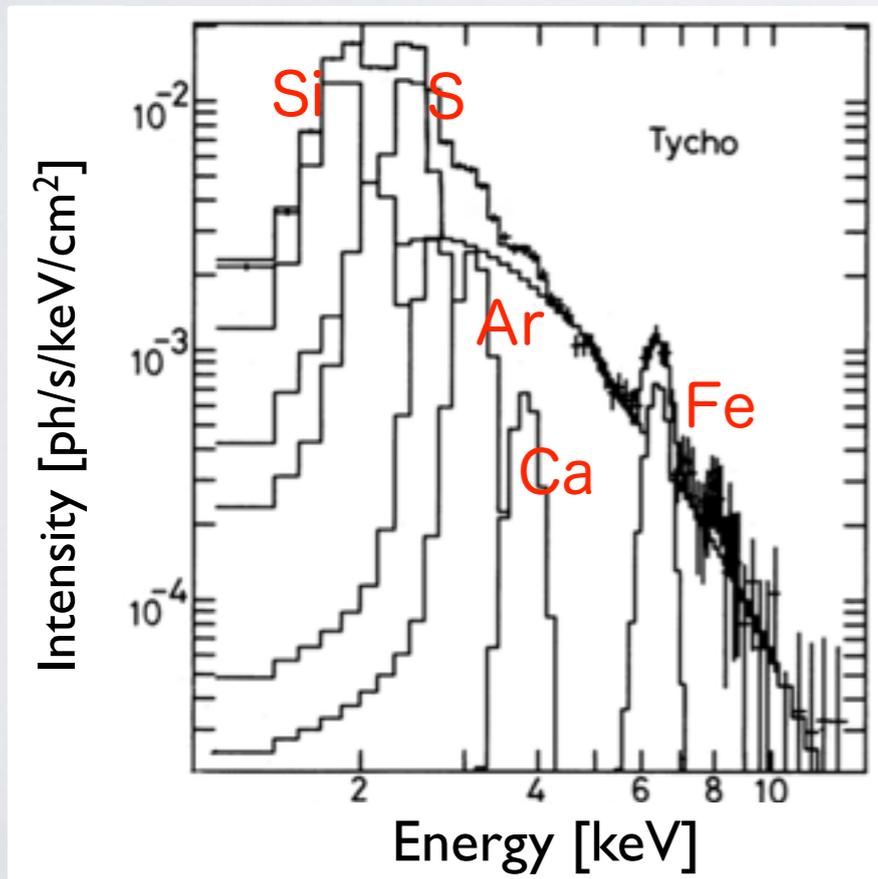
輝線の中心エネルギー

- 電離度の異なるイオンの存在比
- プラズマの電離状態

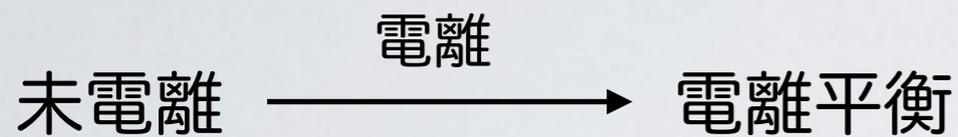


Yamaguchi+ 2014

Tycho の「てんま」の観測 (Tsunemi+ 1986)

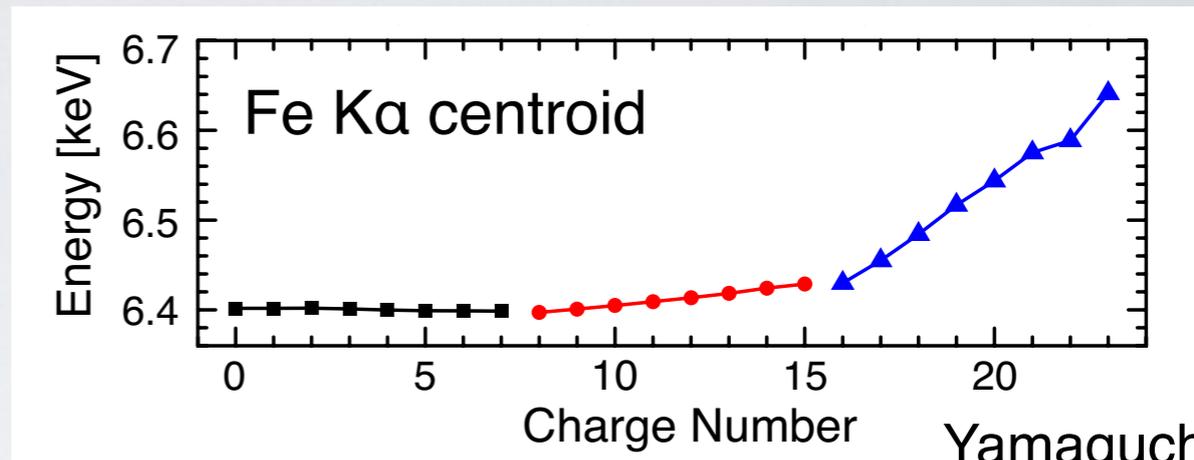


# SNRから電離非平衡プラズマの発見



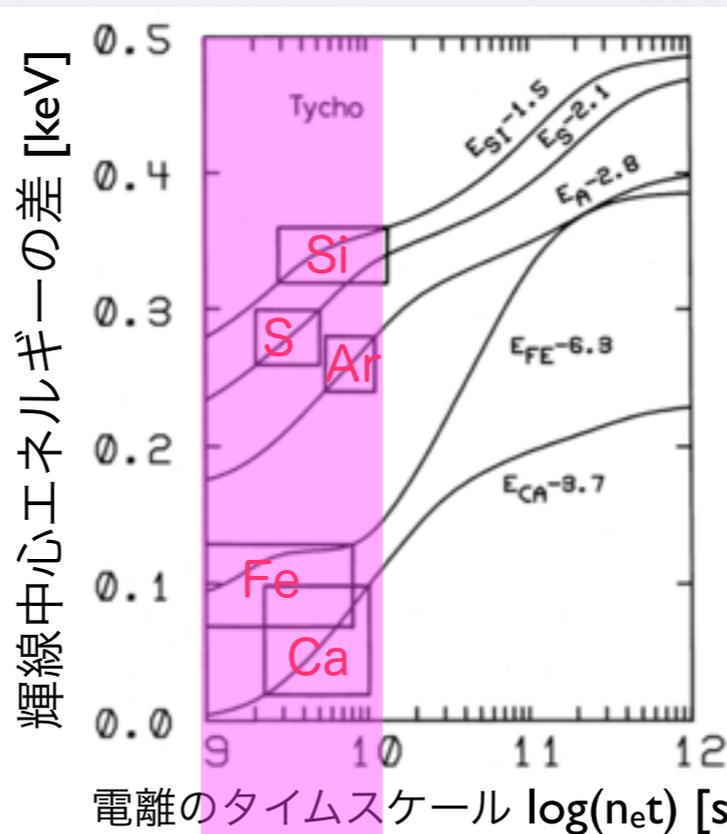
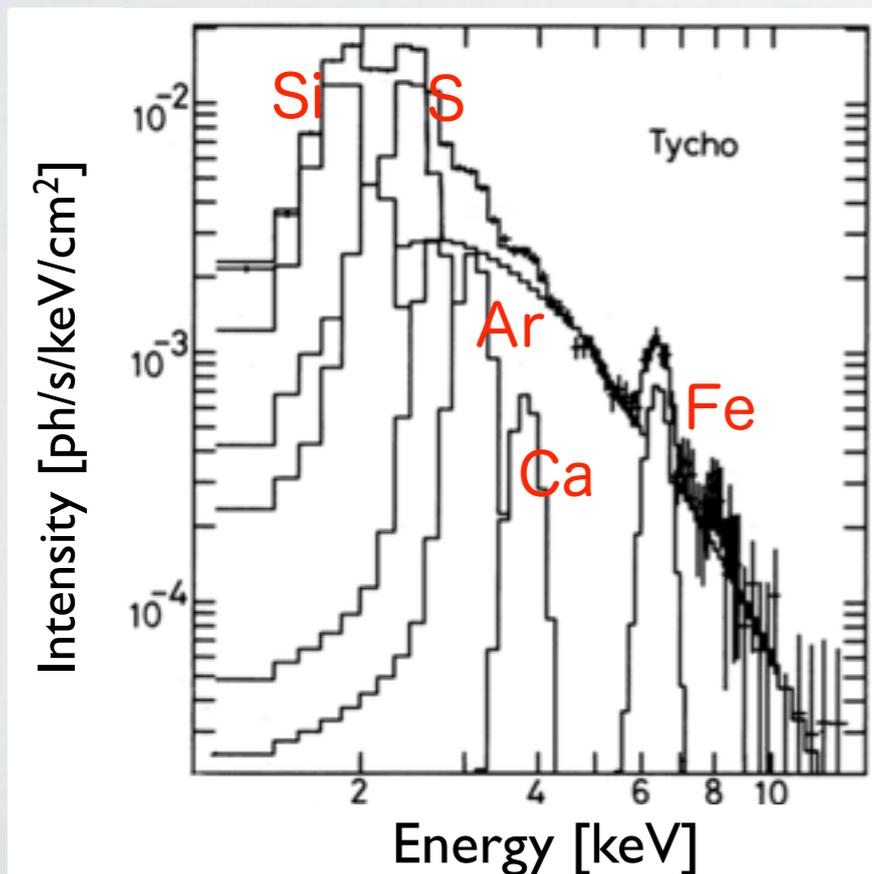
輝線の中心エネルギー

- 電離度の異なるイオンの存在比
- プラズマの電離状態



Yamaguchi+ 2014

Tycho の「てんま」の観測 (Tsunemi+ 1986)



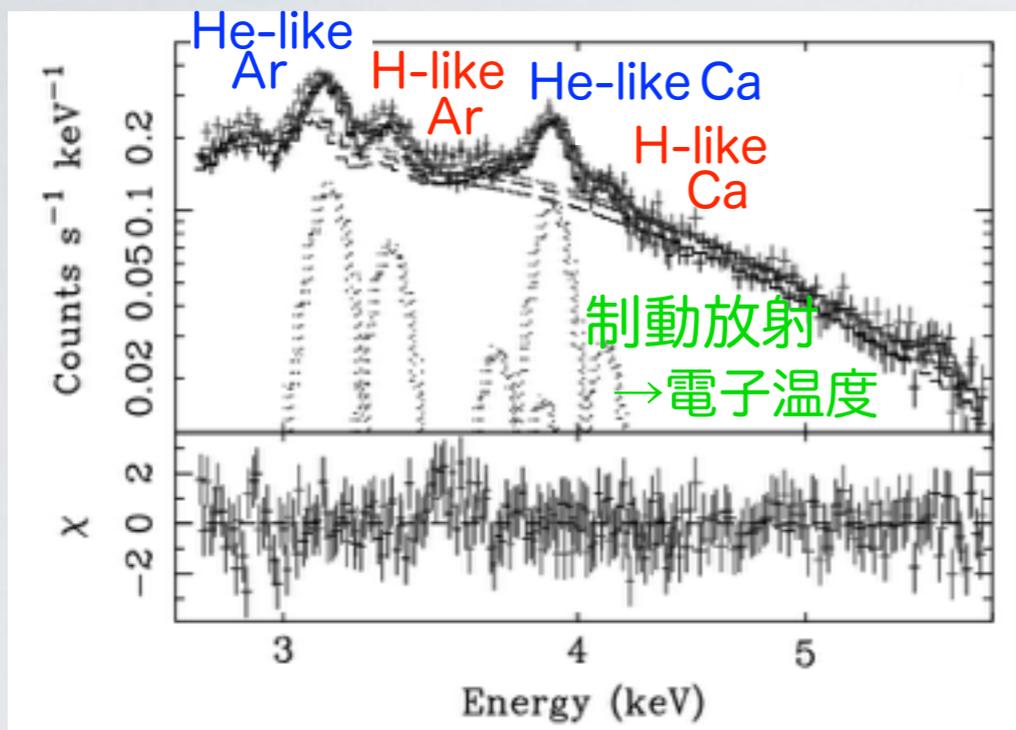
電離進行プラズマの発見

SNR の年齢 ~ 数万年

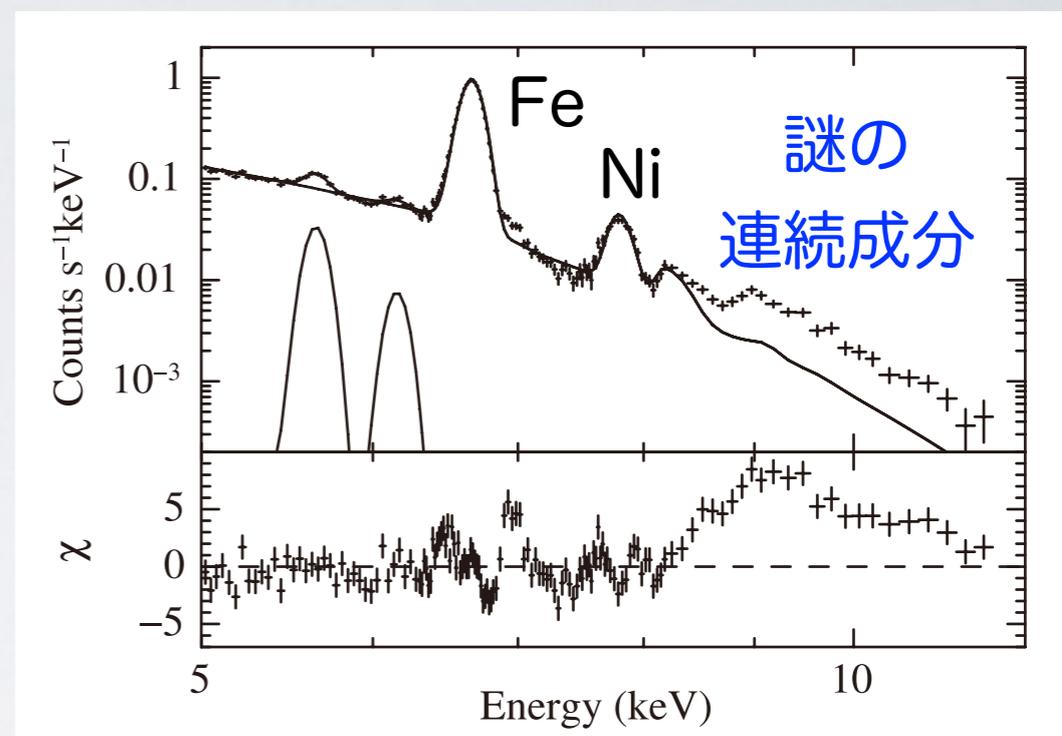
→ 典型的には電離進行

# 再結合優勢な過電離プラズマ

W49Bの「あすか」の観測 (Kawasaki+ 2005)



W49Bの「すざく」の観測 (Ozawa+ 2009)



He-like と H-like イオンの存在比

→ 電離平衡より電離度が高い



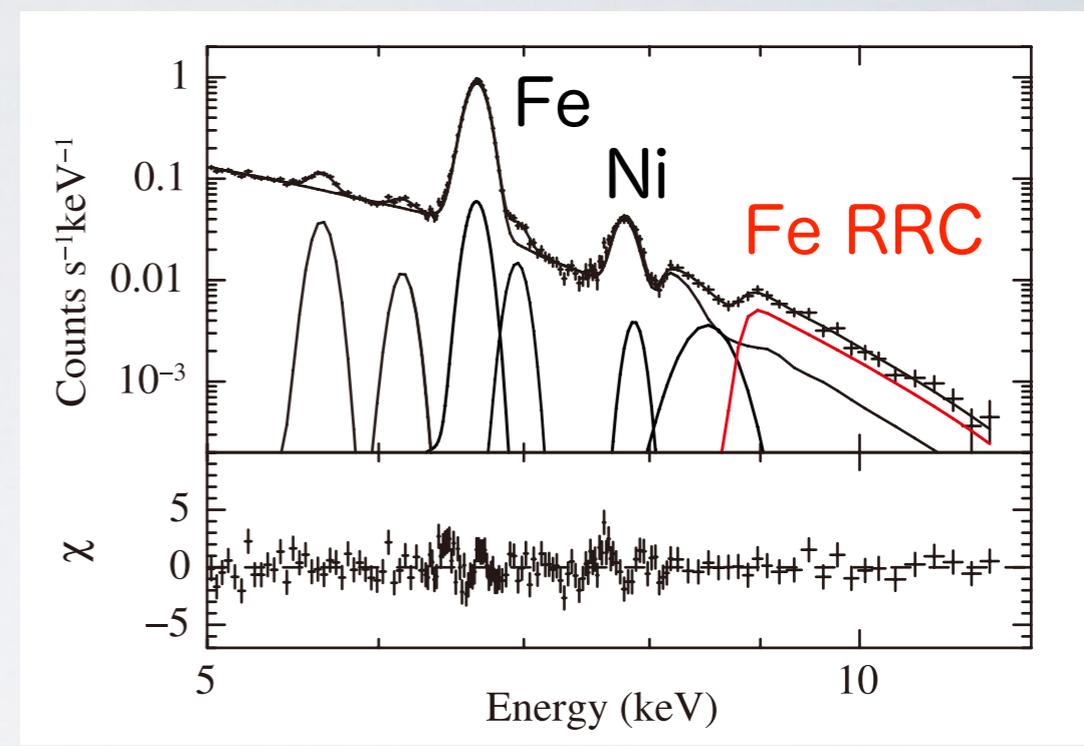
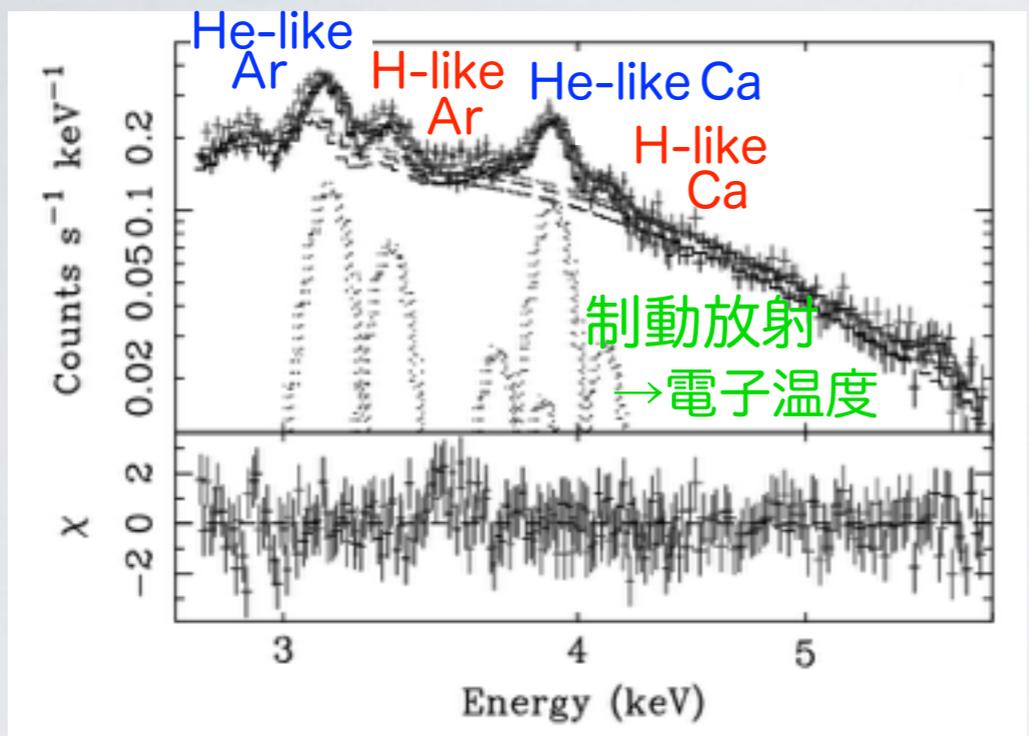
→ 再結合優勢な過電離プラズマの兆候

(RP: Recombining Plasma)

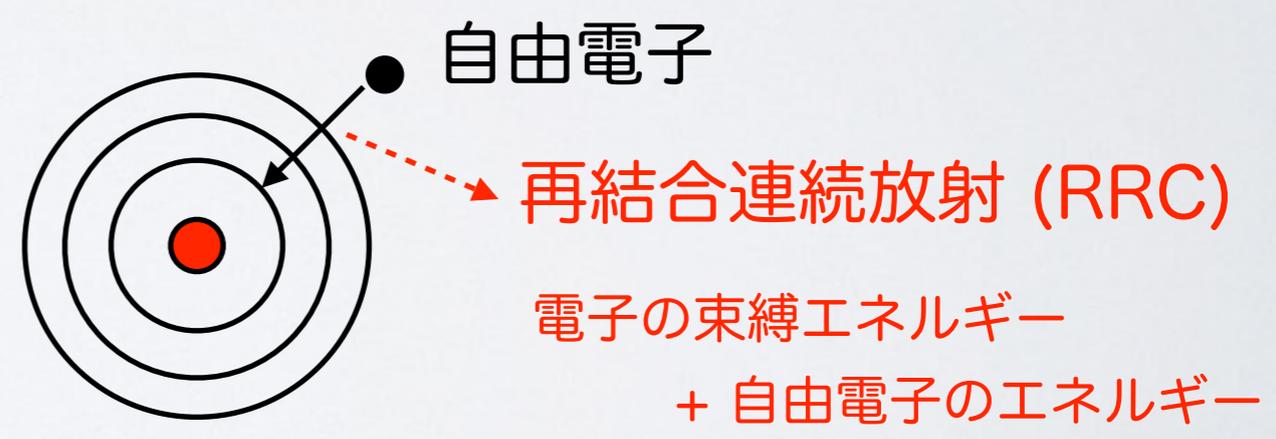
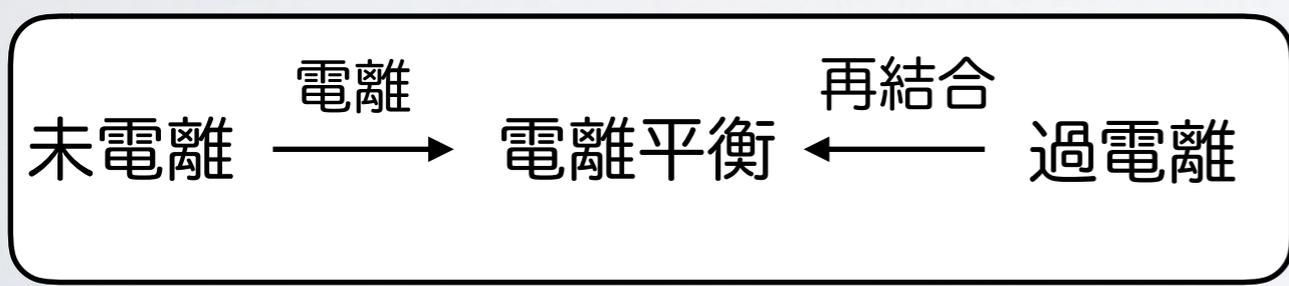
# 再結合優勢な過電離プラズマ

W49Bの「あすか」の観測 (Kawasaki+ 2005)

W49Bの「すざく」の観測 (Ozawa+ 2009)



He-like と H-like イオンの存在比  
 → 電離平衡より電離度が高い



→ 再結合優勢な過電離プラズマの兆候  
 (RP: Recombining Plasma)

→ 過電離プラズマの決定的証拠

# 「すざく」による過電離プラズマの観測例

W49B

(Ozawa+ 2009)



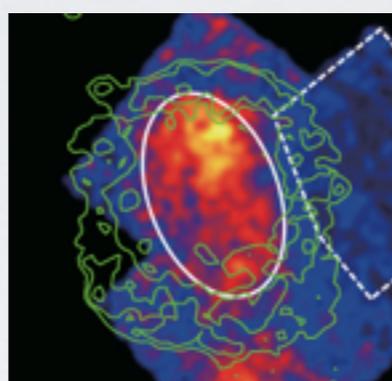
IC 443

(Yamaguchi+ 2009)



G359.1-0.5

(Ohnishi+ 2011)



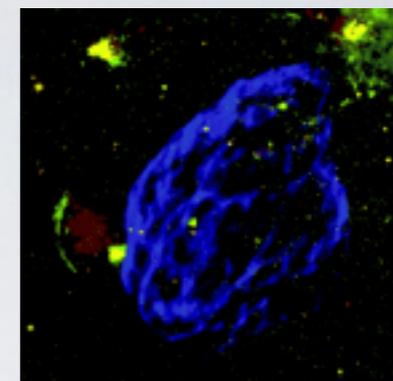
W28

(Sawada & Koyama 2012)



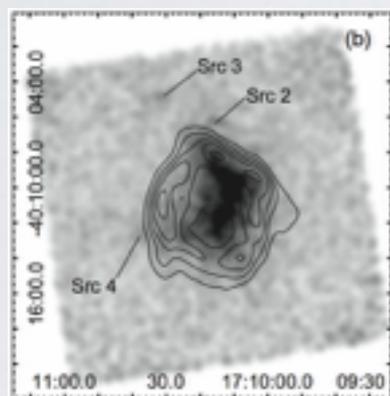
W44

(Uchida+ 2012)



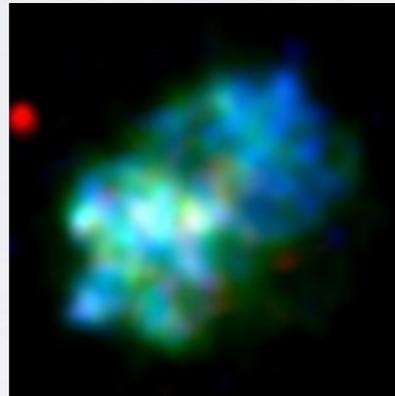
G346.6-0.2

(Yamauchi+ 2013)



3C 391

(Ergin+ 2014)



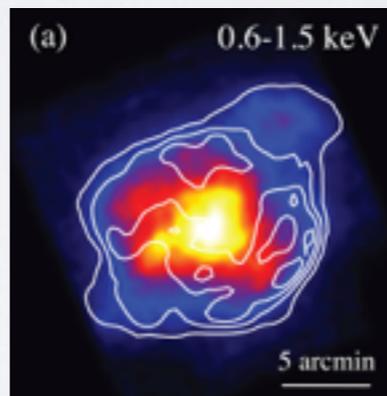
CTB 37A

(Yamauchi+ 2014)



G290.1-0.8

(Kamitsukasa+ 2015)



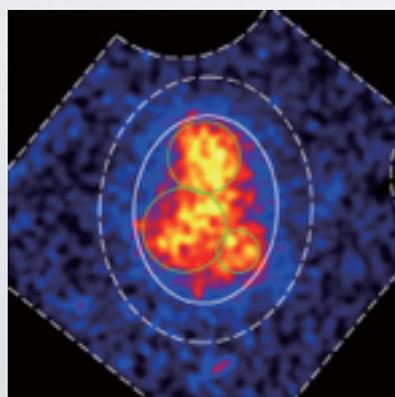
N49

(Uchida+ 2015)



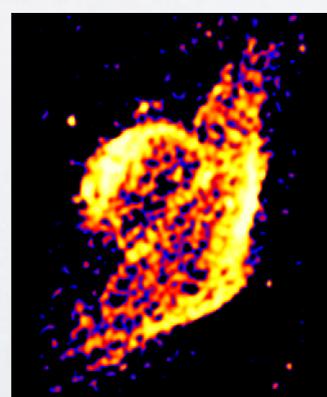
Kes 17

(Washino+ 2016)



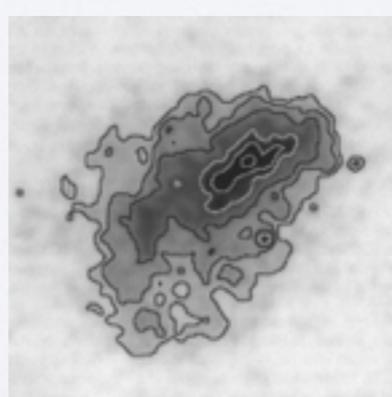
G166.0+4.3

(Matsumura+ 2017)



3C400.2

(Ergin+ 2017)



N132D

(Bamba+ 2018)



多くが、  
重たい親星  
分子雲が付随  
→ 過電離プラズマの  
生成起源のヒント？

# 過電離プラズマの生成起原

RP実現には、電離が急激に進む → 光電離？  
 電子温度が下がる → 有力な光源が無い。



(1) 希薄化シナリオ (Itoh & Masai 1989) (2) 熱伝導シナリオ (Kawasaki+ 2002)



CSM: 大質量星に付随する星周物質

# 過電離プラズマの生成起原

RP実現には、電離が急激に進む → 光電離？  
 電子温度が下がる → 有力な光源が無い。



(1) 希薄化シナリオ (Itoh & Masai 1989) (2) 熱伝導シナリオ (Kawasaki+ 2002)



CSM: 大質量星に付随する星周物質

# 過電離プラズマの生成起原

RP実現には、電離が急激に進む → 光電離？  
 電子温度が下がる → 有力な光源が無い。



(1) 希薄化シナリオ (Itoh & Masai 1989) (2) 熱伝導シナリオ (Kawasaki+ 2002)



CSM: 大質量星に付随する星周物質



# 過電離プラズマの生成起原

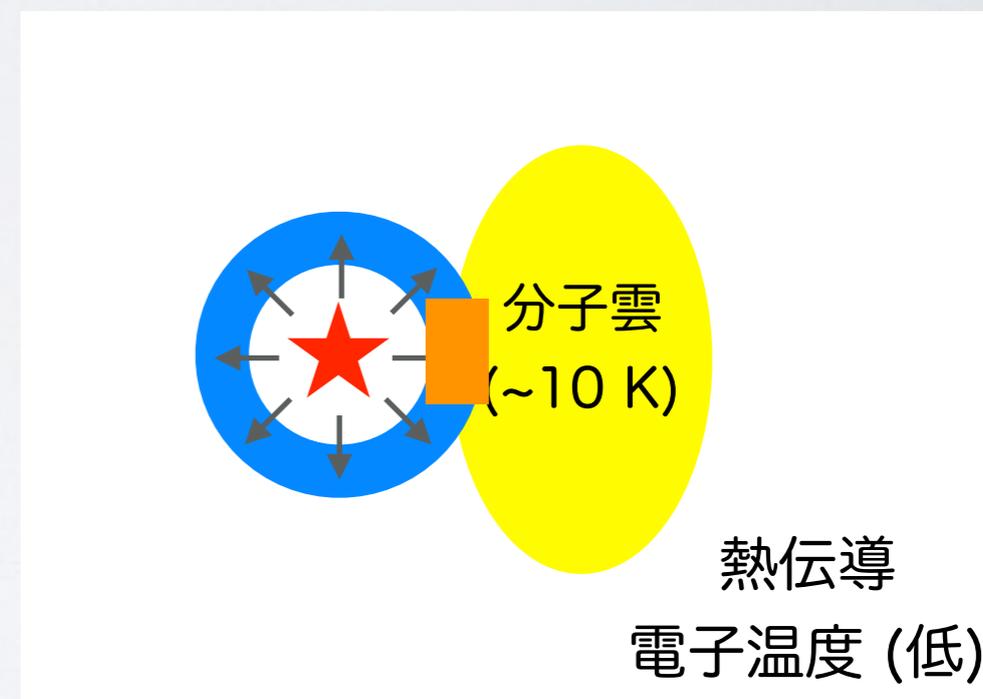
RP実現には、電離が急激に進む → 光電離？  
 電子温度が下がる → 有力な光源が無い。



(1) 希薄化シナリオ (Itoh & Masai 1989) (2) 熱伝導シナリオ (Kawasaki+ 2002)



CSM: 大質量星に付随する星周物質



# 過電離プラズマの生成起原

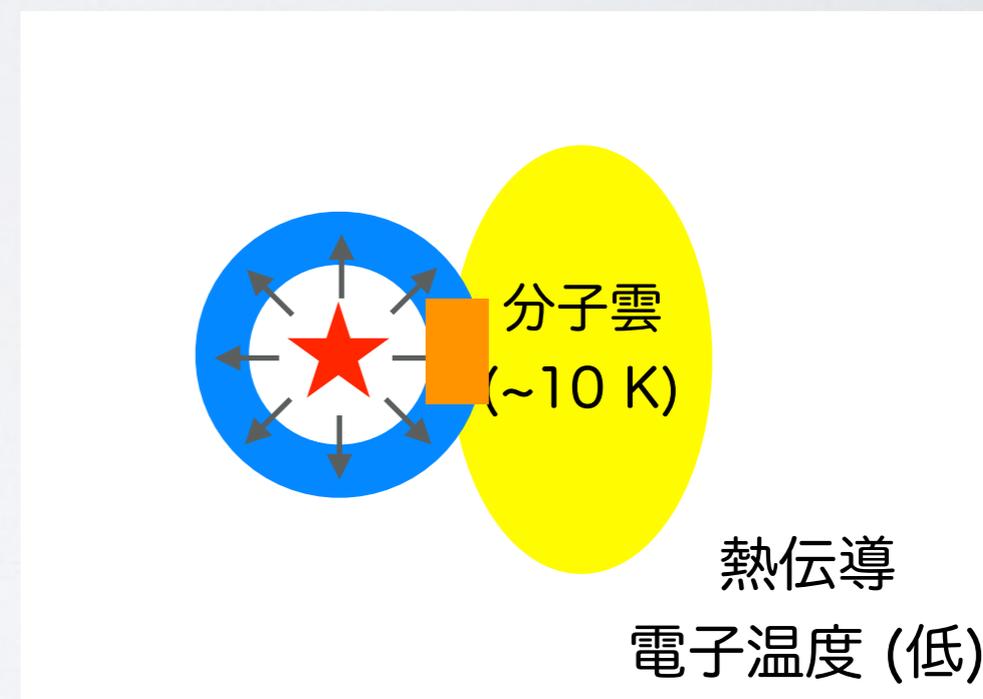
RP実現には、電離が急激に進む → 光電離？  
 電子温度が下がる → 有力な光源が無い。



(1) 希薄化シナリオ (Itoh & Masai 1989) (2) 熱伝導シナリオ (Kawasaki+ 2002)



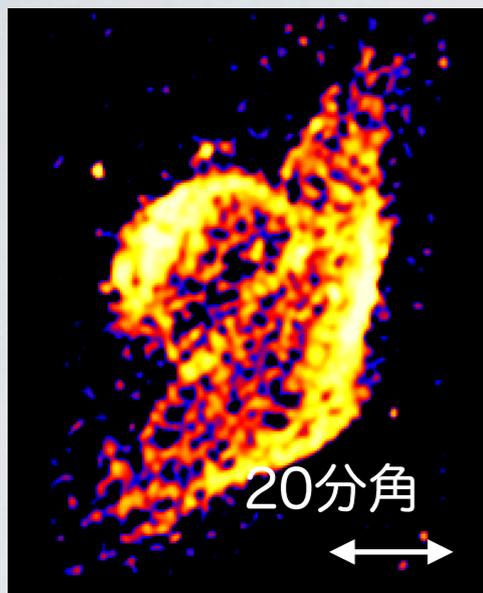
CSM: 大質量星に付随する星周物質



RPの生成起源の同定のためには、SNR周辺のガス環境とRPの温度分布を比較

# 解析する天体の選択

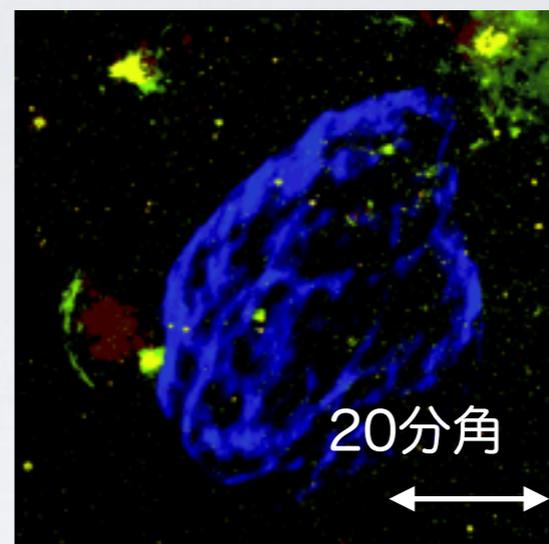
G166.0+4.3



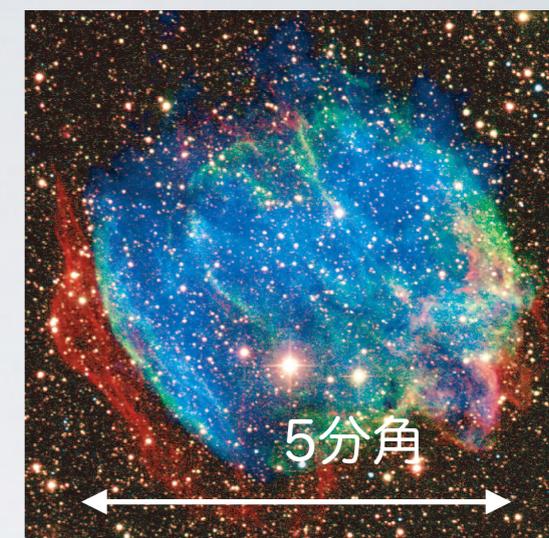
IC 443



W44



W49B



大きな視直径 (5-80分角)

ISMに密度差・分子雲が付随

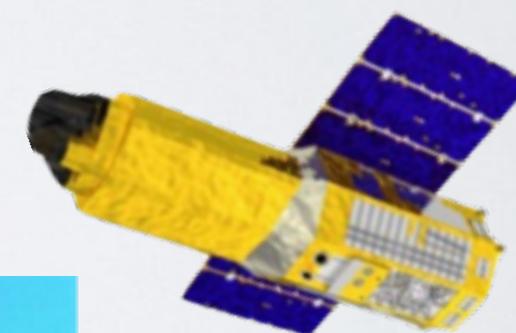
→ 領域分割したスペクトル解析

→ 電子温度の分布と比較

- ・ 低強度輝線の中心エネルギー
- ・ 制動放射に埋もれるRRC

→ 高エネルギー分解能、低バックグラウンドな  
「すざく」のX線CCDカメラ XIS

のデータを解析



すざく衛星

© ISAS/JAXA



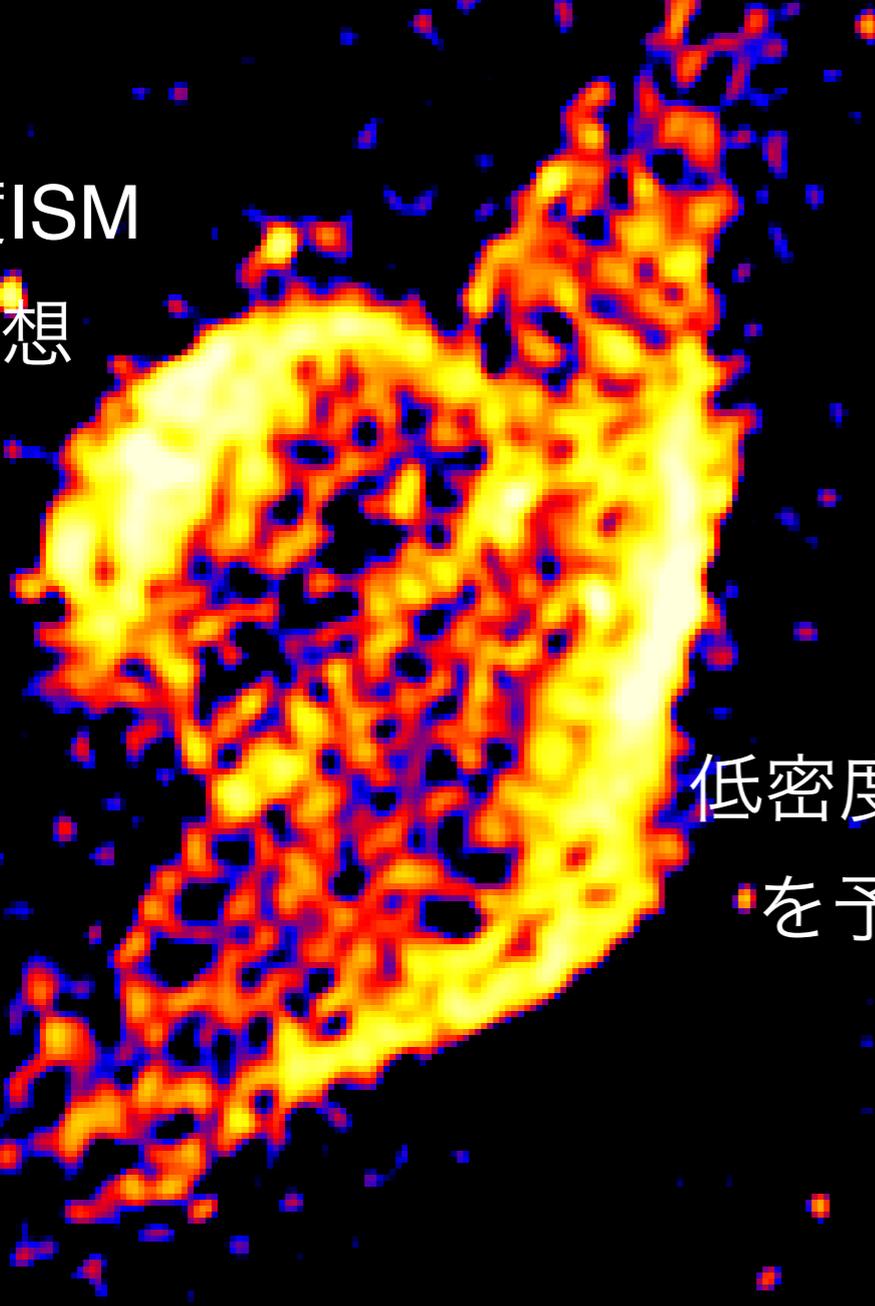
ASTRO-E2 XIS-S

XIS (Koyama+ 2007)

# G166.0+4.3: 先行研究

## 電波連続波 (325 MHz) イメージ

高密度ISM  
を予想



低密度ISM  
を予想

シェルの形状の違い

→ 異なる密度の ISM を予想

Pineault+ (1987)

→ ひとつの天体内 (距離、年齢が同じ)  
で、異なるプラズマ進化が期待.

希薄化:

高密度 → 低密度 で過電離.

→ 低密度領域での過電離プラズマが期待.

先行研究では過電離プラズマは未発見.

ROSAT (1991), ASCA (1994), XMM-Newton (2003)

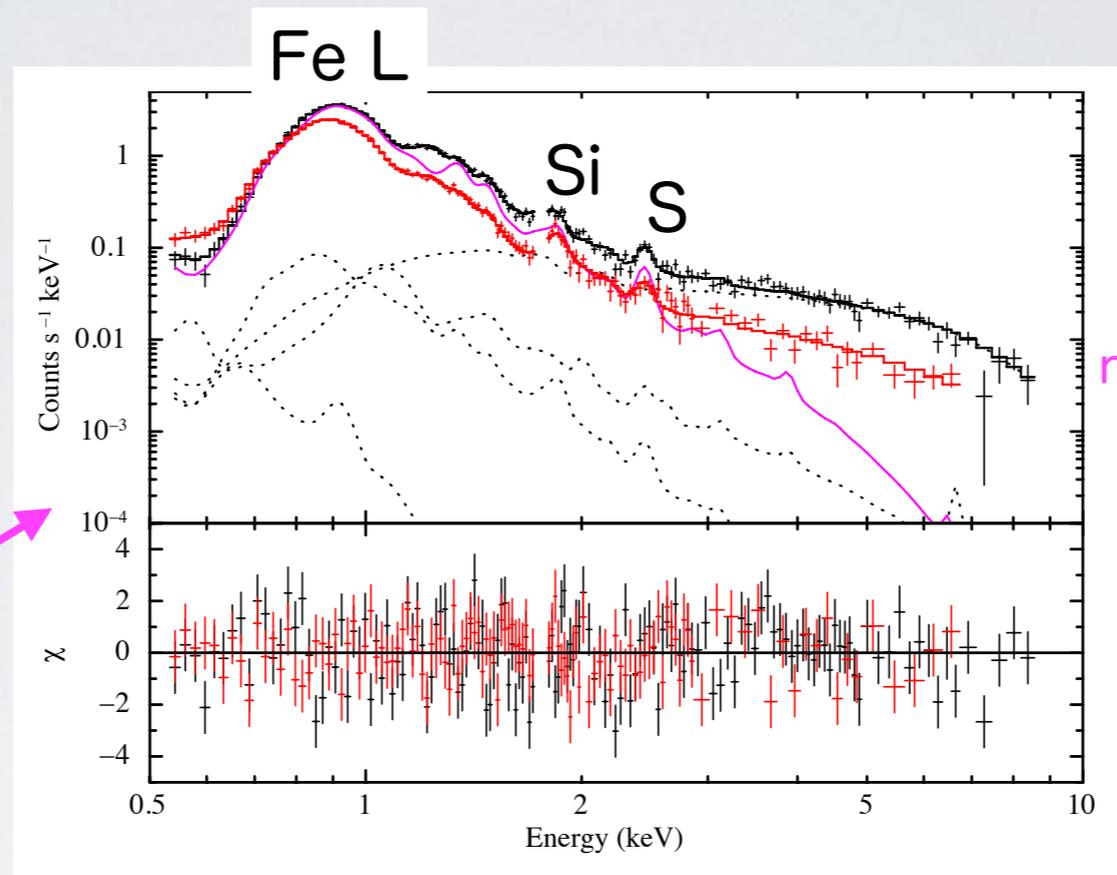
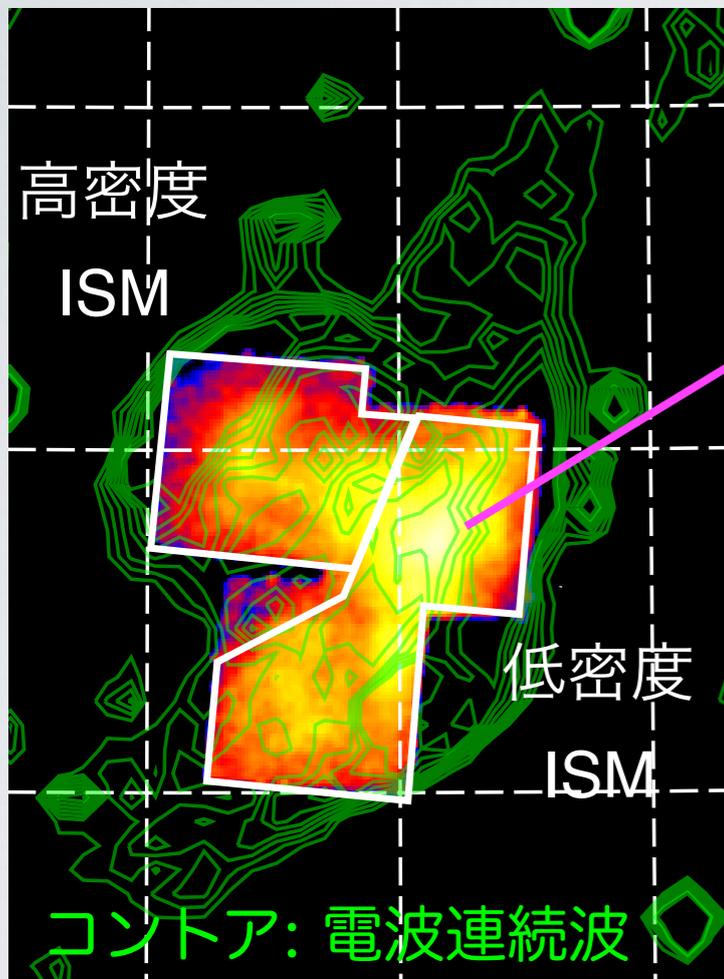
しかし、領域の違いには着目していない.

→ シェル構造に着目し、領域を分割.

プラズマを調査.

# G166.0+4.3: スペクトル解析

「すぎく」 X線イメージ  
(0.5–2 keV)

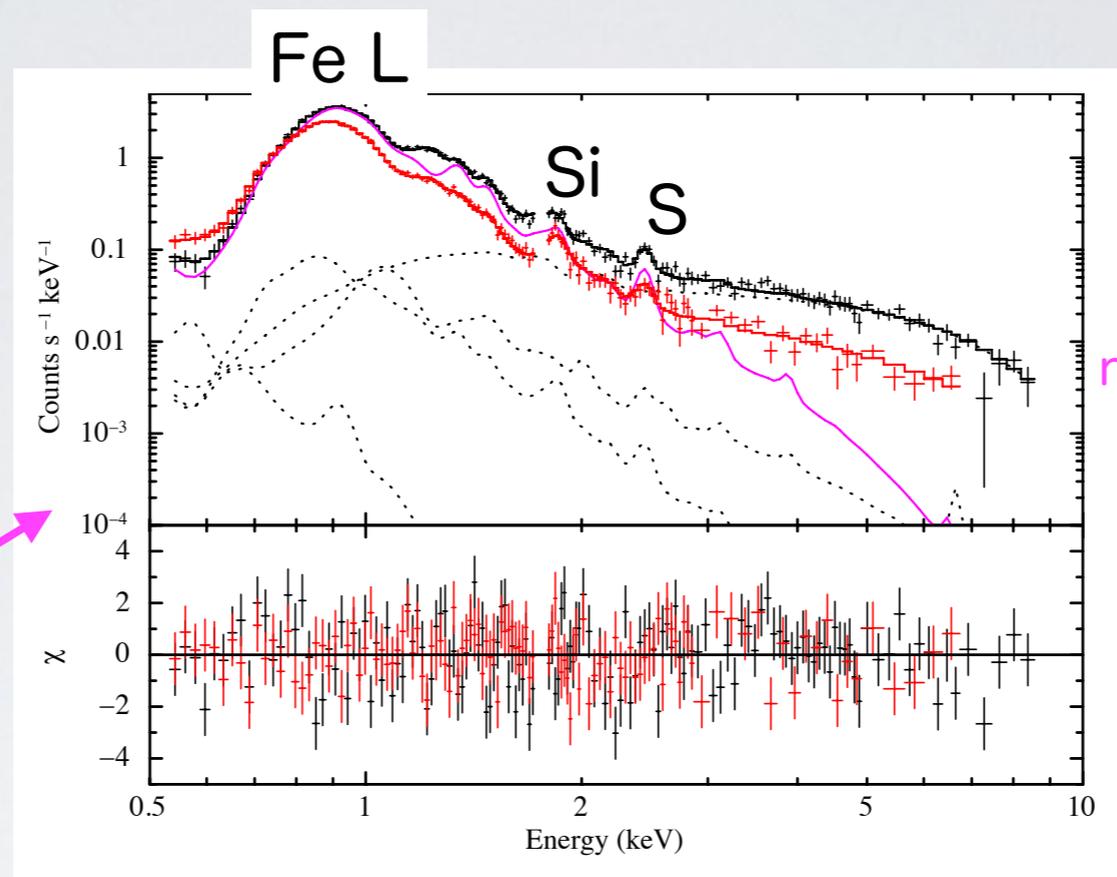
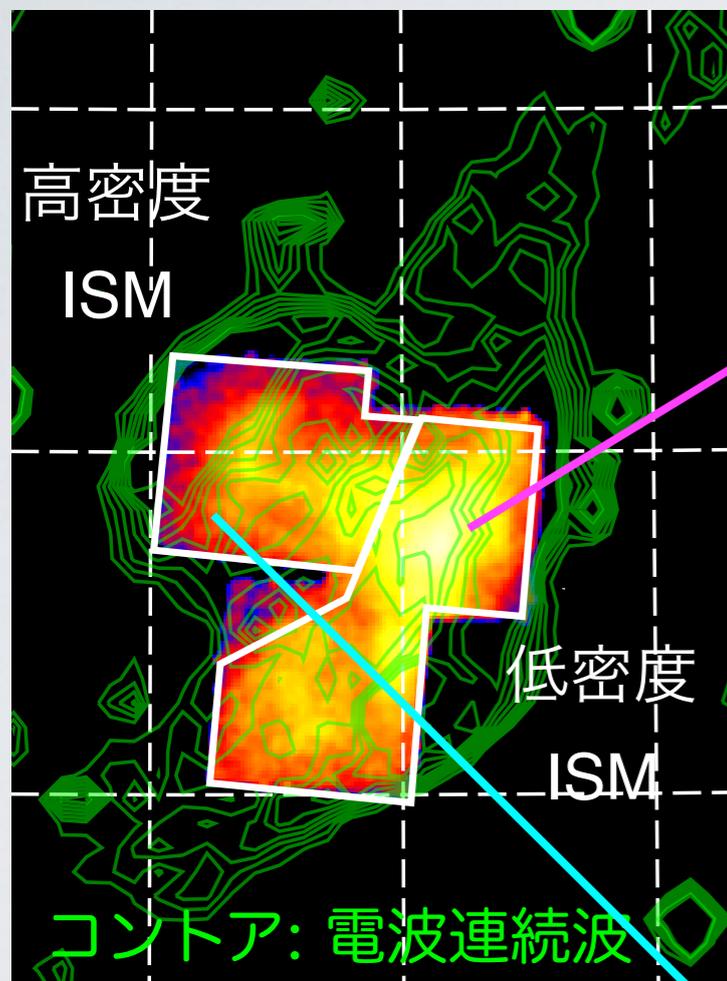


電離進行プラズマ  
 $kT_e = 0.83 \pm 0.01$  keV  
 $n_{\text{net}} = (4.0 \pm 0.7) \times 10^{11}$  cm<sup>-3</sup> s

$$\chi_\nu(\nu) = 1.37 (247)$$

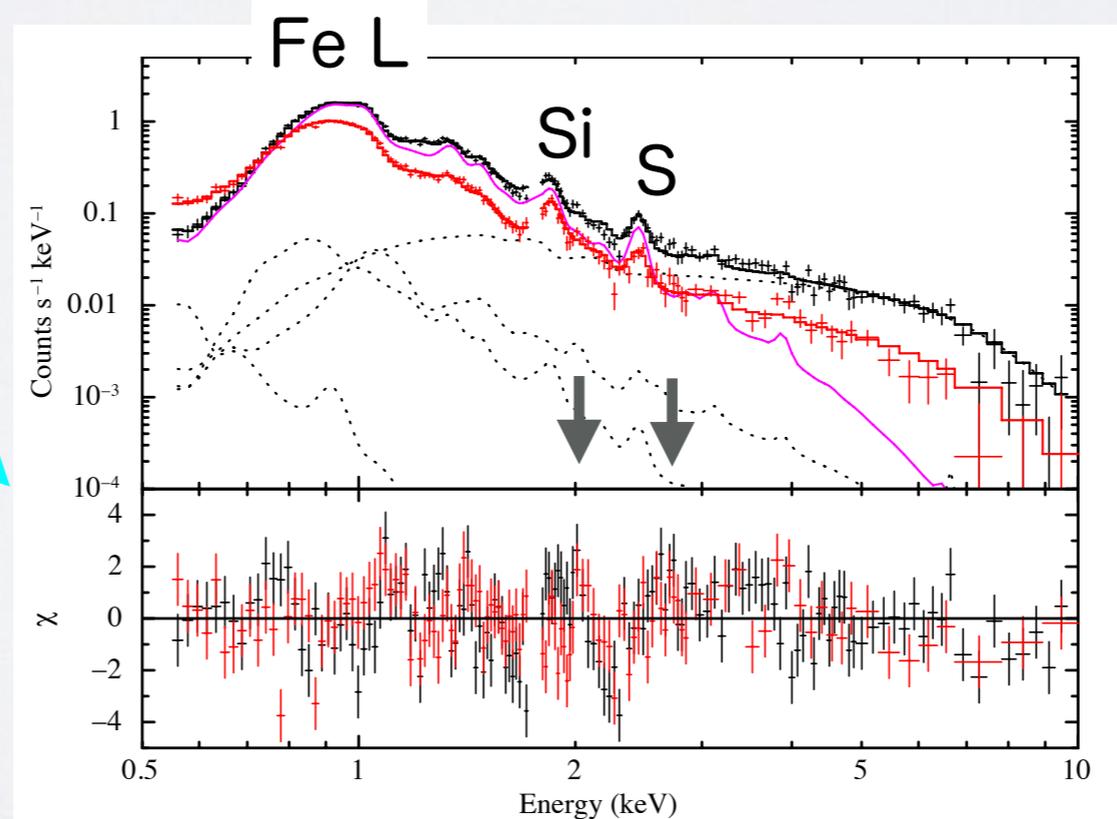
# G166.0+4.3: スペクトル解析

「すざく」 X線イメージ  
(0.5–2 keV)



電離進行プラズマ  
 $kT_e = 0.83 \pm 0.01 \text{ keV}$   
 $n_{\text{net}} = (4.0 \pm 0.7) \times 10^{11} \text{ cm}^{-3} \text{ s}$

$$\chi_{\nu}(\nu) = 1.37 (247)$$

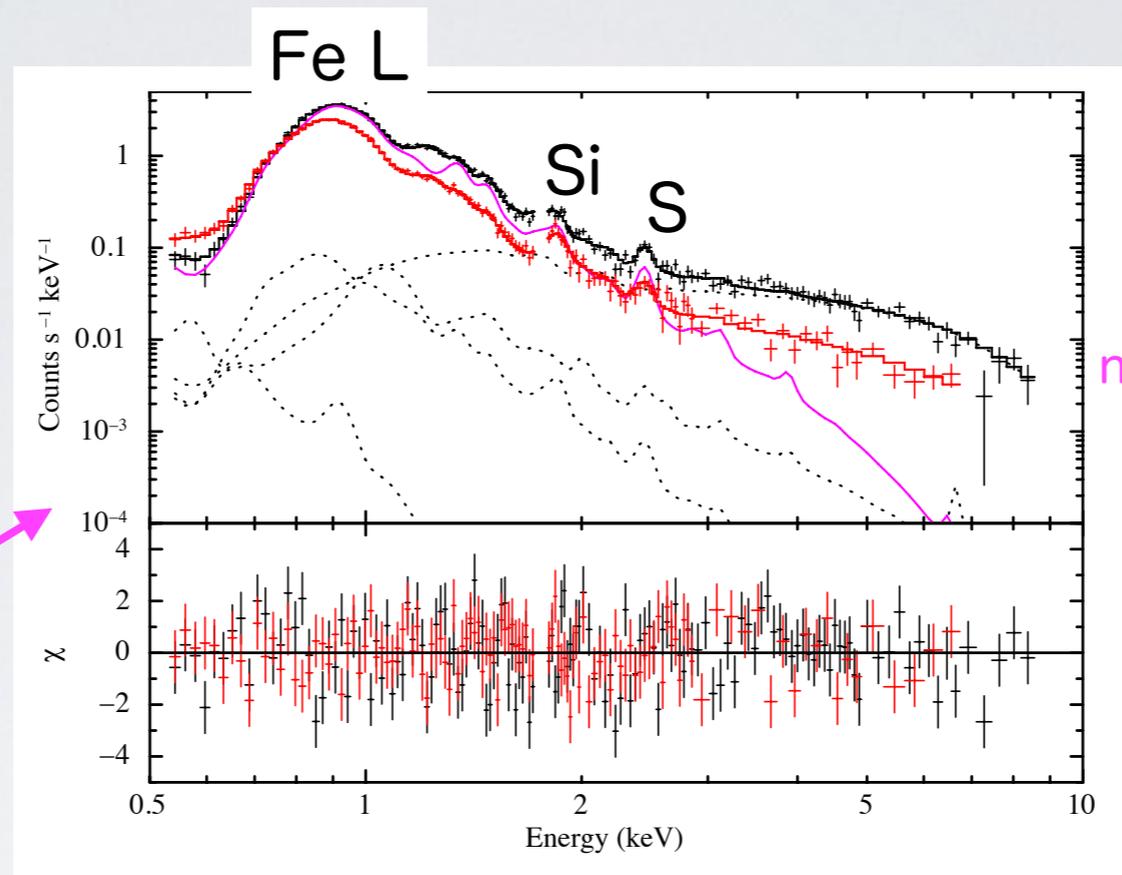
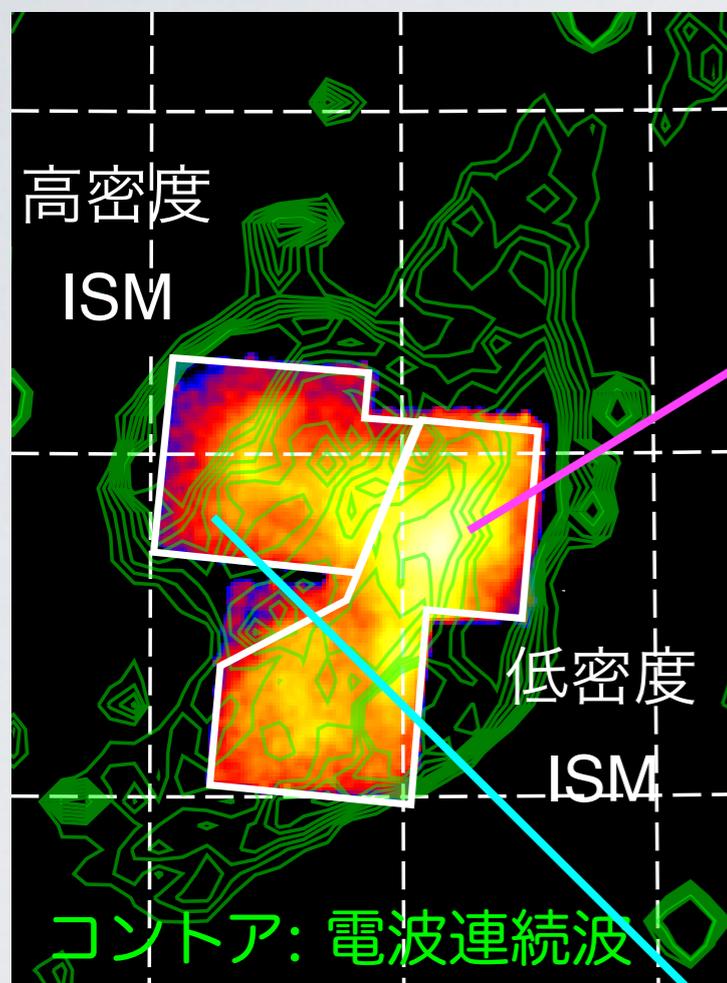


電離進行プラズマ  
 $kT_e = 0.90 \pm 0.02 \text{ keV}$   
 $n_{\text{net}} = (3.1 \pm 0.5) \times 10^{11} \text{ cm}^{-3} \text{ s}$

$$\chi_{\nu}(\nu) = 1.77 (251)$$

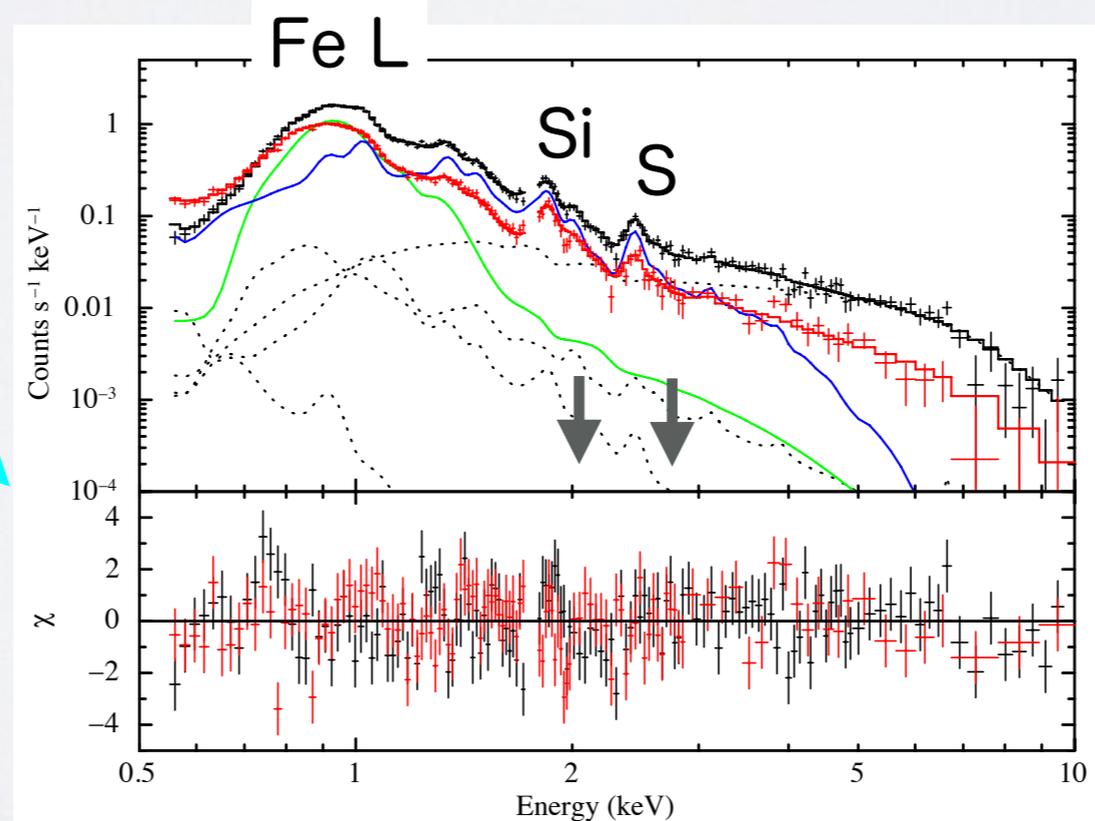
# G166.0+4.3: スペクトル解析

「すぎく」 X線イメージ  
(0.5–2 keV)



電離進行プラズマ  
 $kT_e = 0.83 \pm 0.01$  keV  
 $n_{\text{net}} = (4.0 \pm 0.7) \times 10^{11} \text{ cm}^{-3} \text{ s}$

$$\chi_\nu(\nu) = 1.37 (247)$$



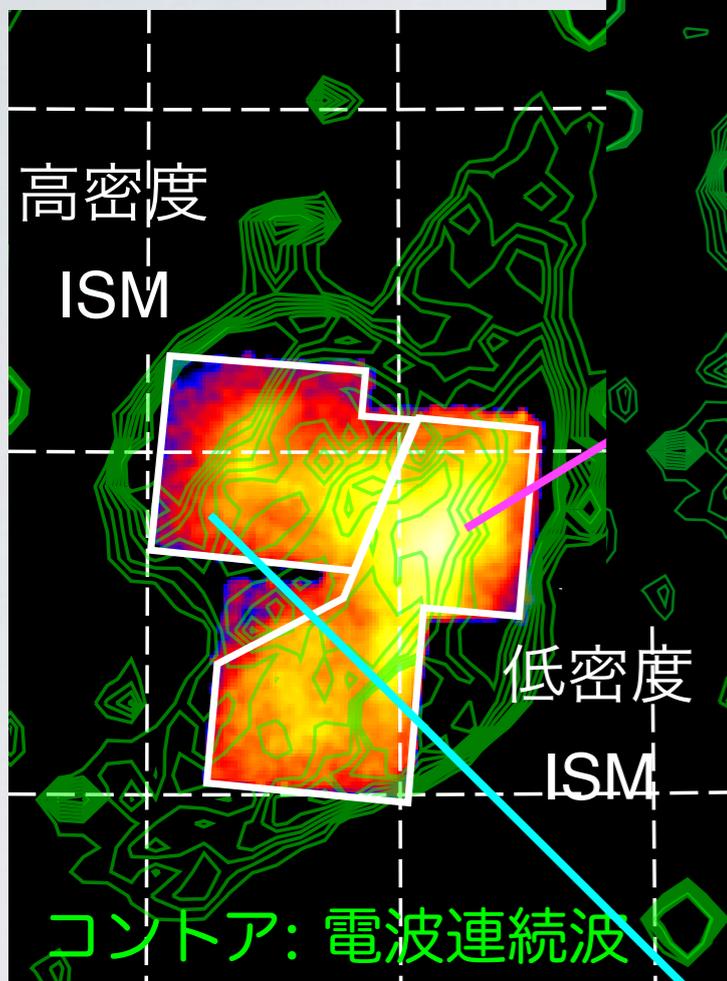
軽元素 (Fe以外)  
 過電離プラズマ  
 $kT_e = 0.46 \pm 0.03$  keV  
 $kT_{\text{init}} = 3$  keV  
 $n_{\text{net}} = (6.1 \pm 0.5) \times 10^{11} \text{ cm}^{-3} \text{ s}$

重元素 (Fe)  
 電離平衡プラズマ  
 $kT_e = 0.87 \pm 0.03$  keV

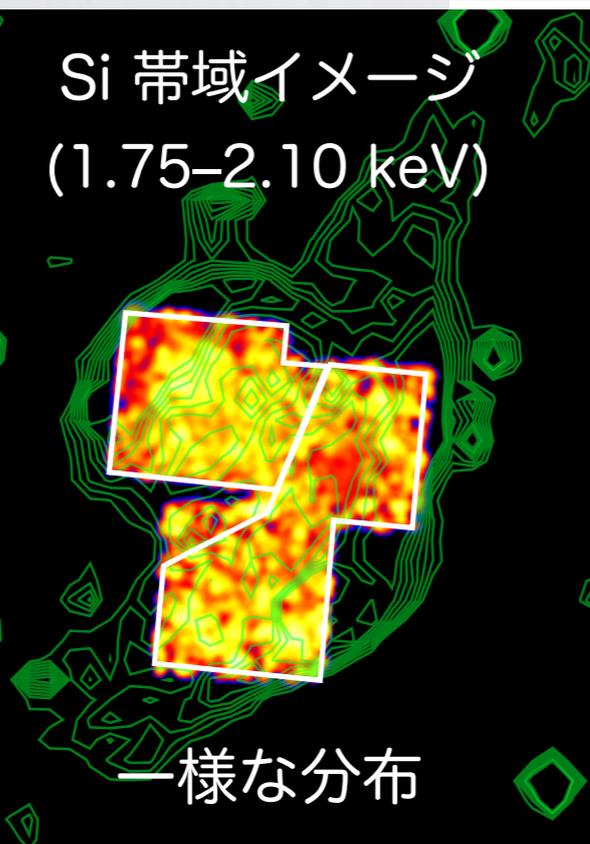
$$\chi_\nu(\nu) = 1.39 (250)$$

# G166.0+4.3: スペクトル解析

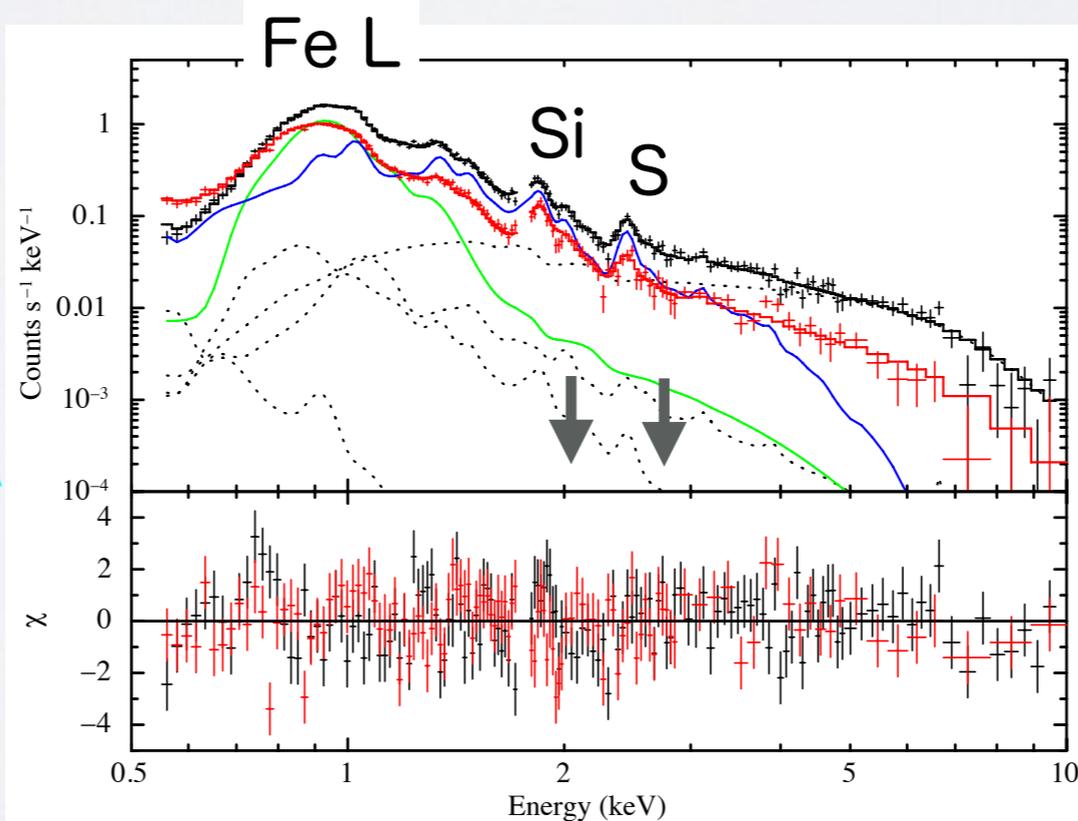
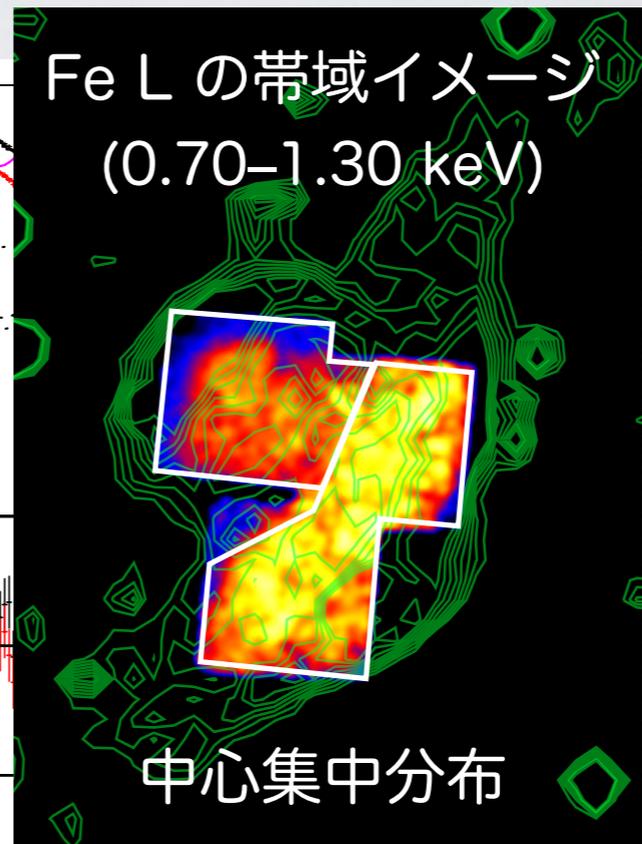
「すざく」 X線イメージ  
(0.5–2 keV)



Si 帯域イメージ  
(1.75–2.10 keV)



Fe L の帯域イメージ  
(0.70–1.30 keV)



電離進行プラズマ

$$kT_e = 0.83 \pm 0.01 \text{ keV}$$

$$n_{\text{net}} = (4.0 \pm 0.7) \times 10^{11} \text{ cm}^{-3} \text{ s}$$

$$\chi_\nu(\nu) = 1.37 (247)$$

軽元素 (Fe以外)

過電離プラズマ

$$kT_e = 0.46 \pm 0.03 \text{ keV}$$

$$kT_{\text{init}} = 3 \text{ keV}$$

$$n_{\text{net}} = (6.1 \pm 0.5) \times 10^{11} \text{ cm}^{-3} \text{ s}$$

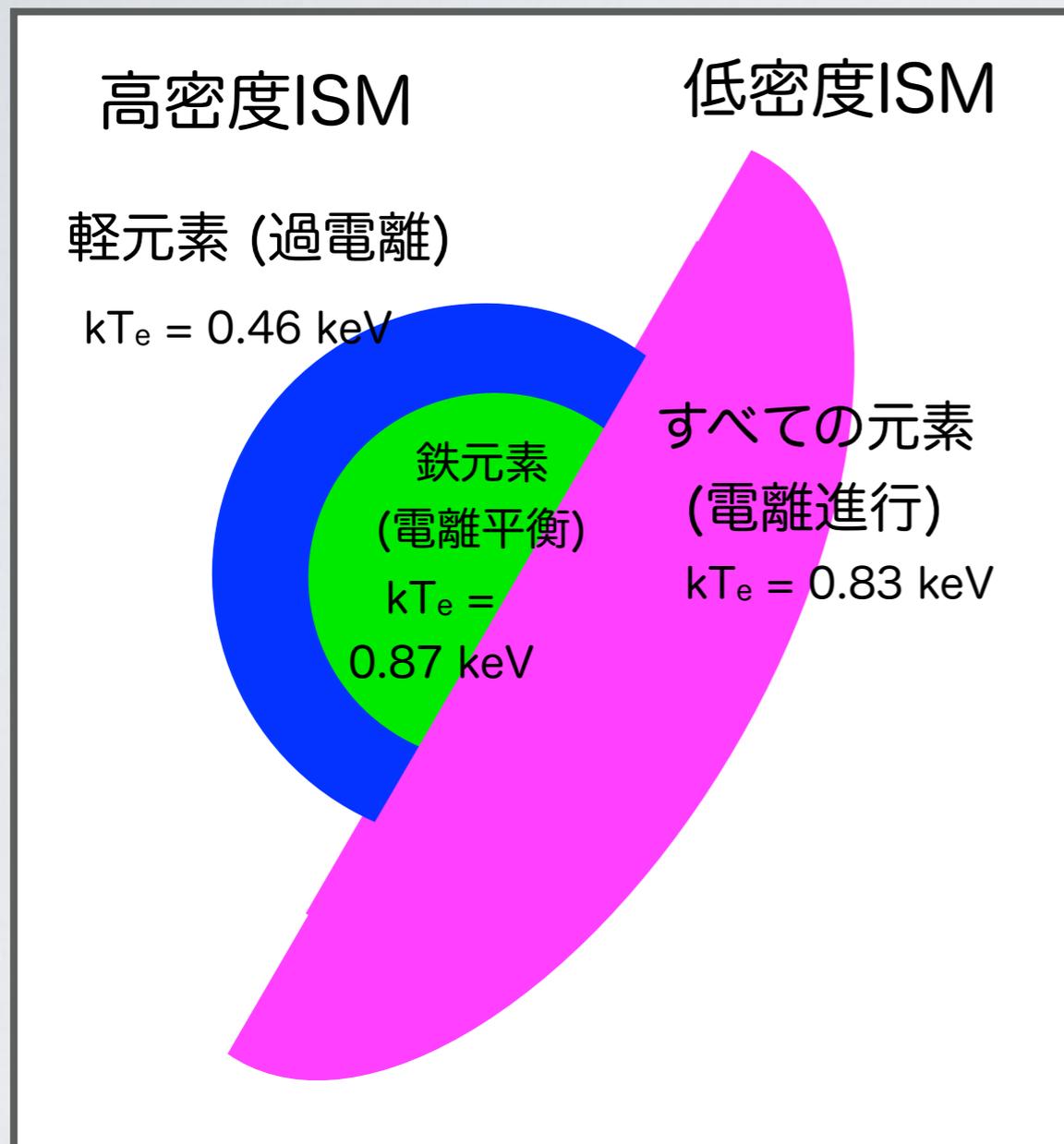
重元素 (Fe)

電離平衡プラズマ

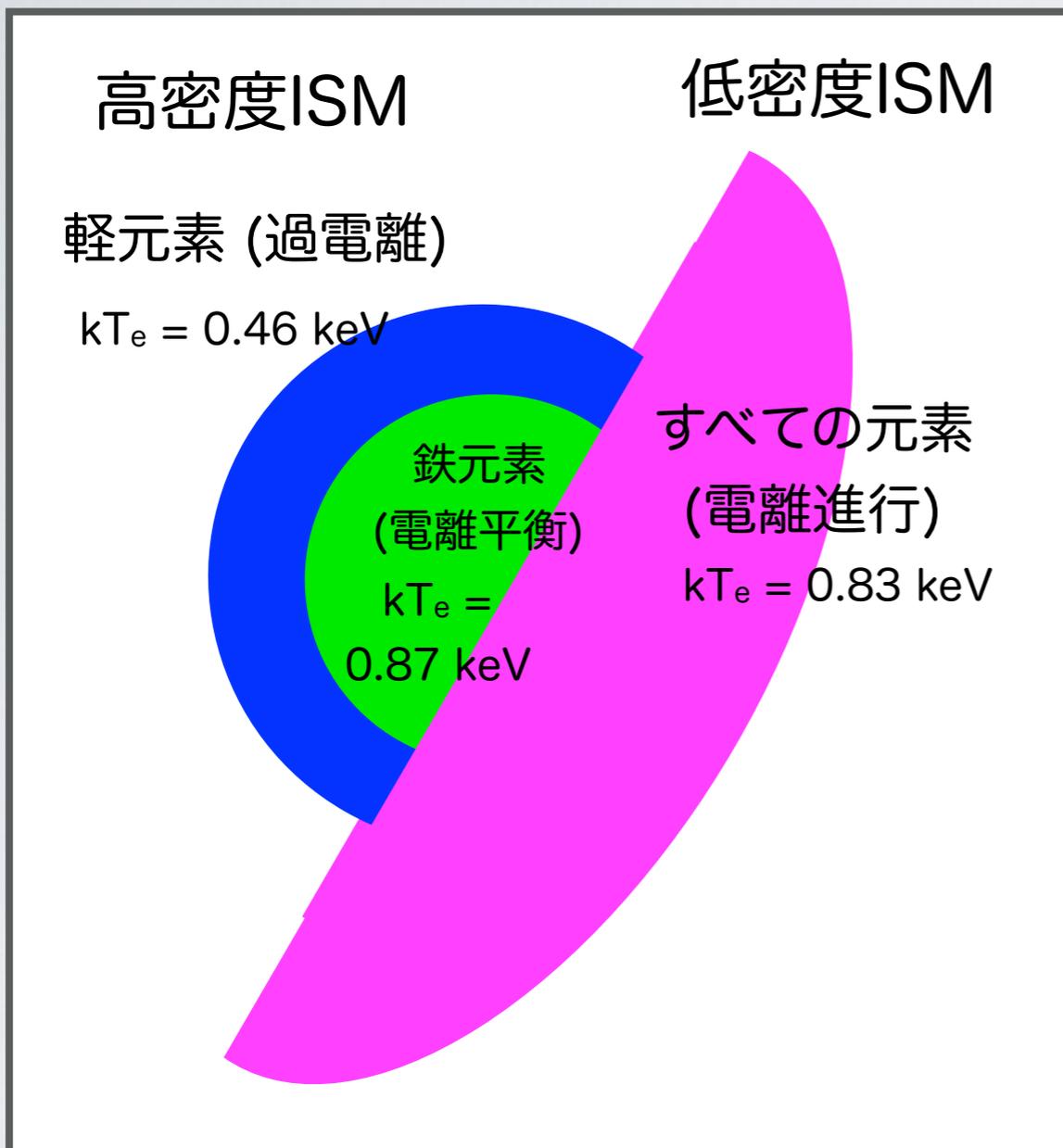
$$kT_e = 0.87 \pm 0.03 \text{ keV}$$

$$\chi_\nu(\nu) = 1.39 (250)$$

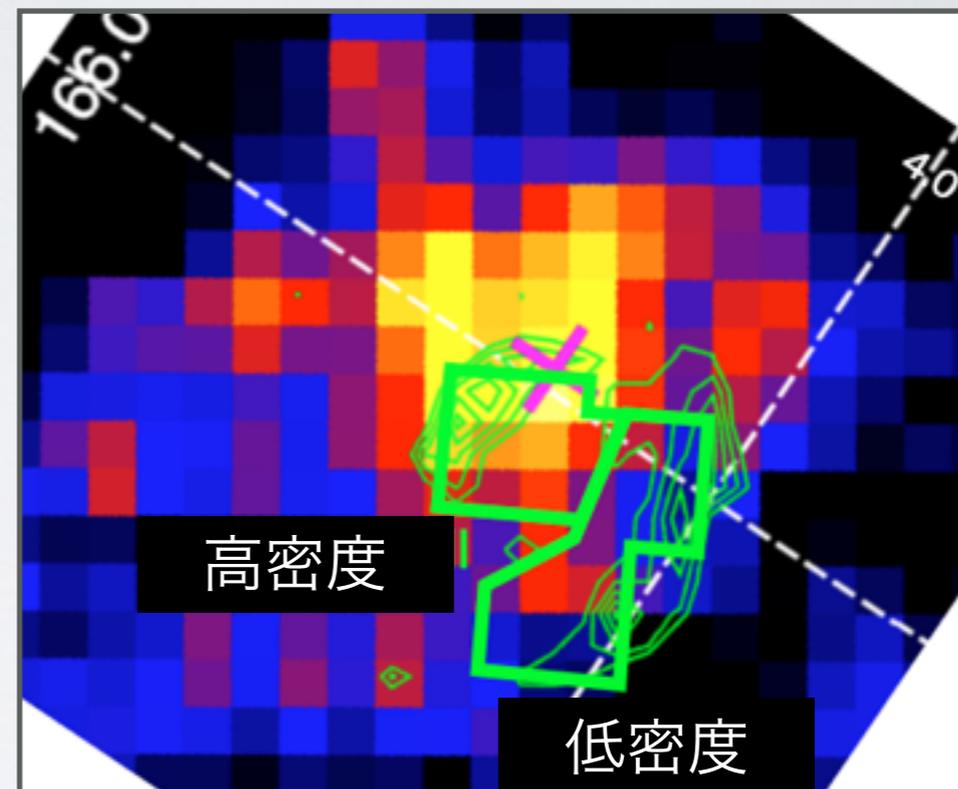
# G166.0+4.3: 解析結果



# G166.0+4.3: 解析結果

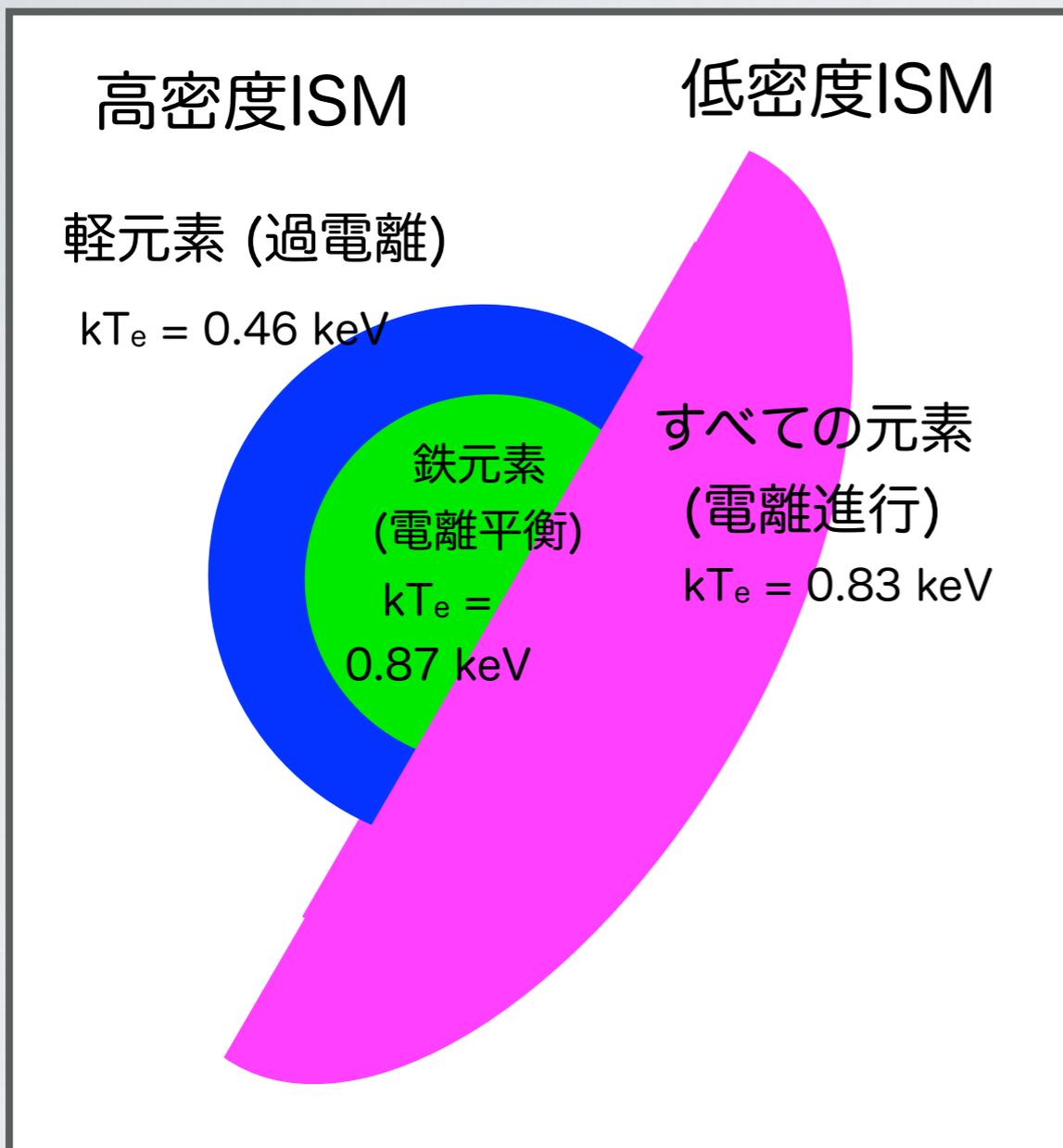


GeV ガンマ線イメージ  
 (Araya 2013)

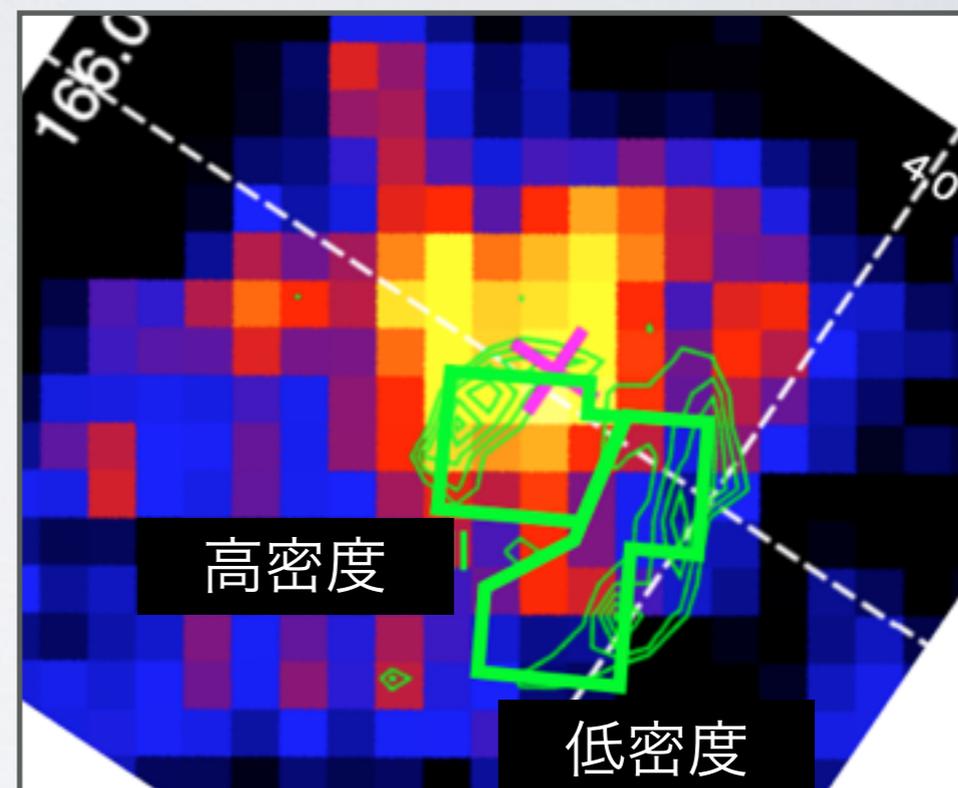


→ 高密度領域の分子雲を示唆

# G166.0+4.3: 解析結果

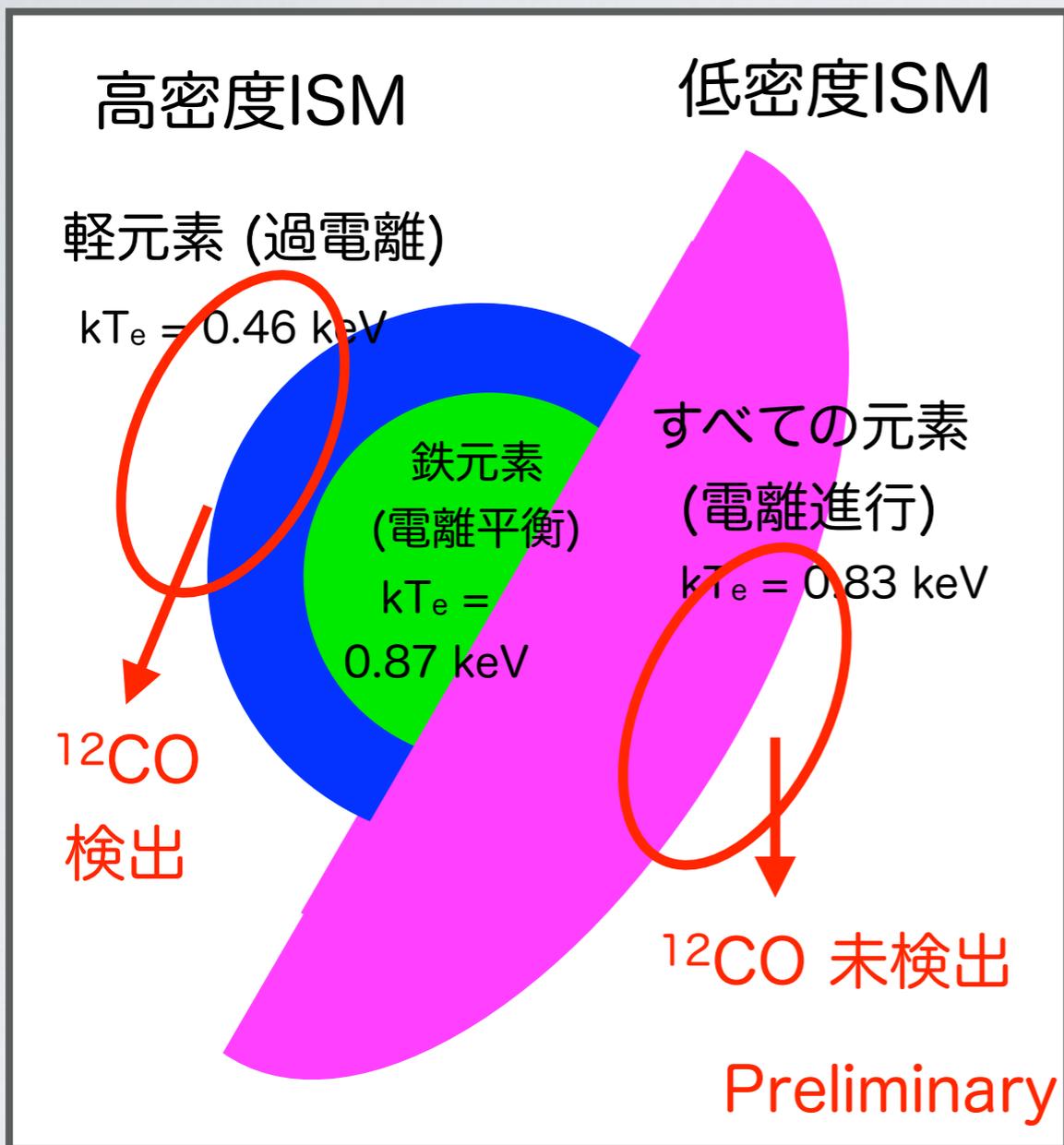


GeV ガンマ線イメージ  
(Araya 2013)



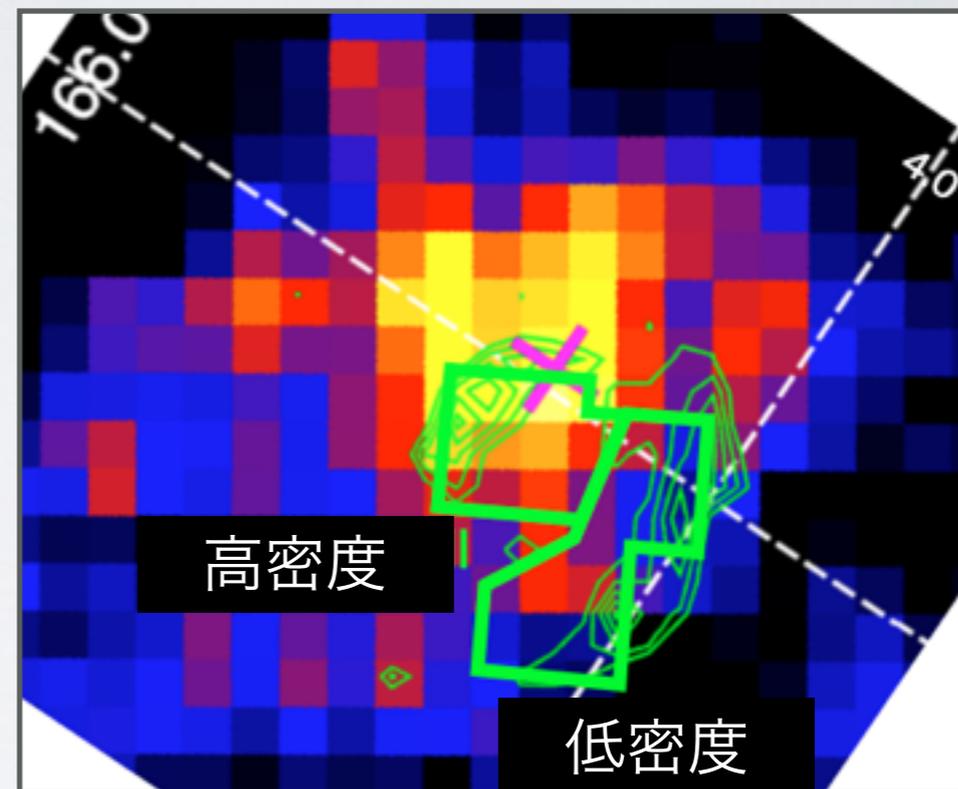
→ 高密度領域の分子雲を示唆  
野辺山電波観測所への観測受諾  
(PI: 松村)  
2017年12月に観測

# G166.0+4.3: 解析結果



分子雲の直接的な証拠

GeV ガンマ線イメージ  
(Araya 2013)

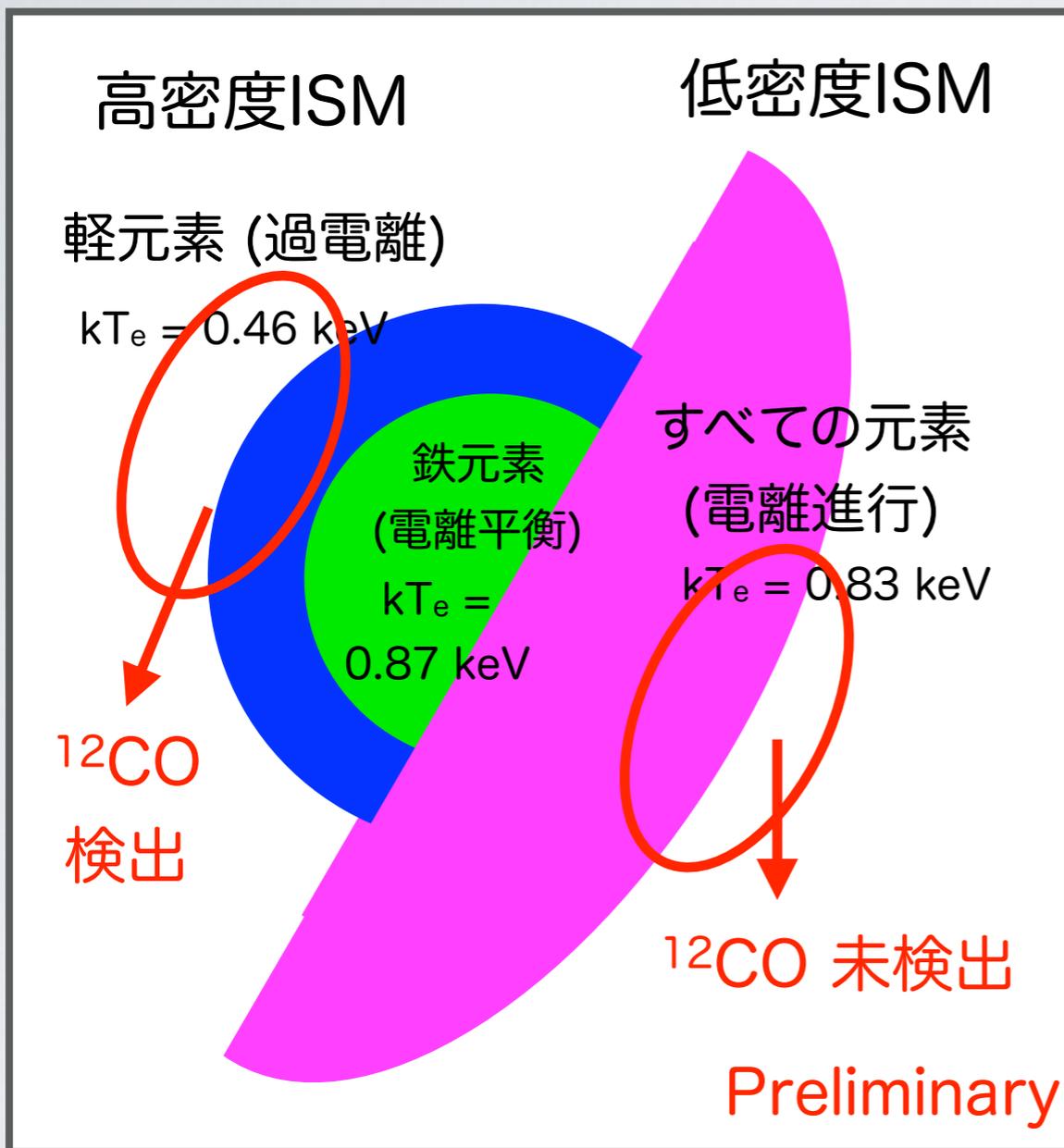


→ 高密度領域の分子雲を示唆

野辺山電波観測所への観測受諾  
(PI: 松村)

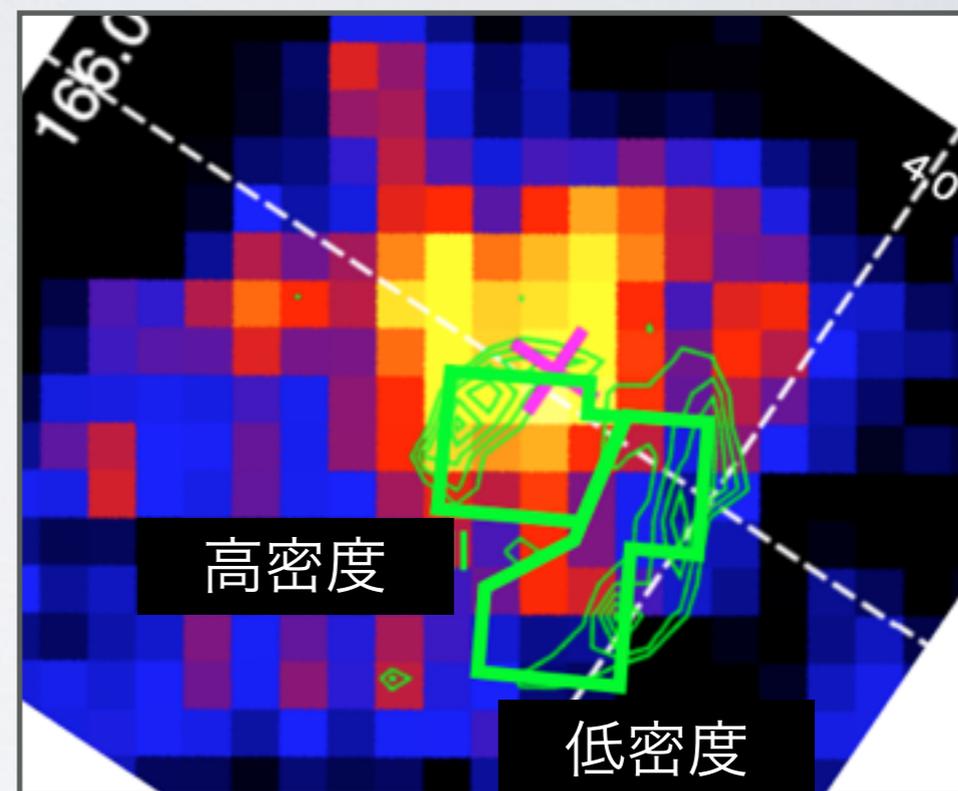
2017年12月に観測

# G166.0+4.3: 解析結果



分子雲の直接的な証拠

GeV ガンマ線イメージ  
(Araya 2013)



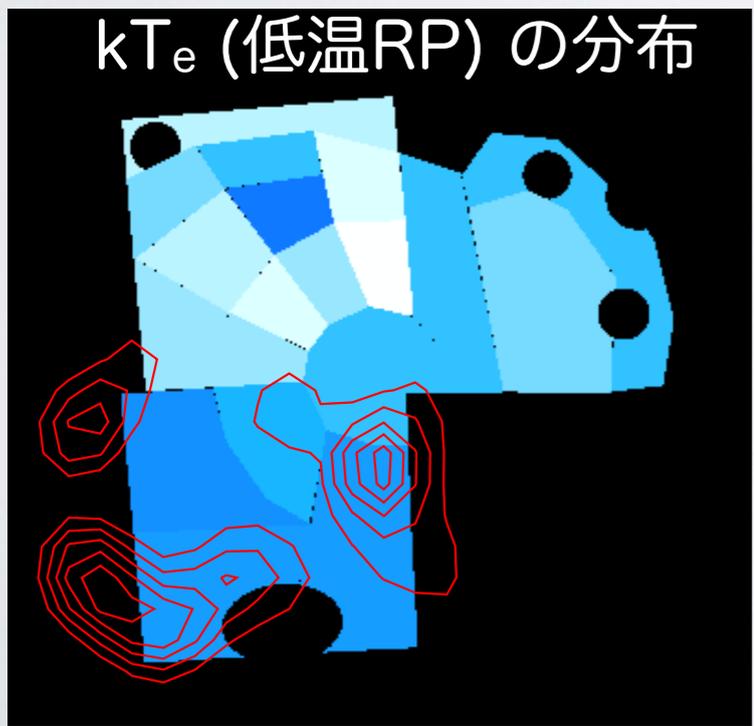
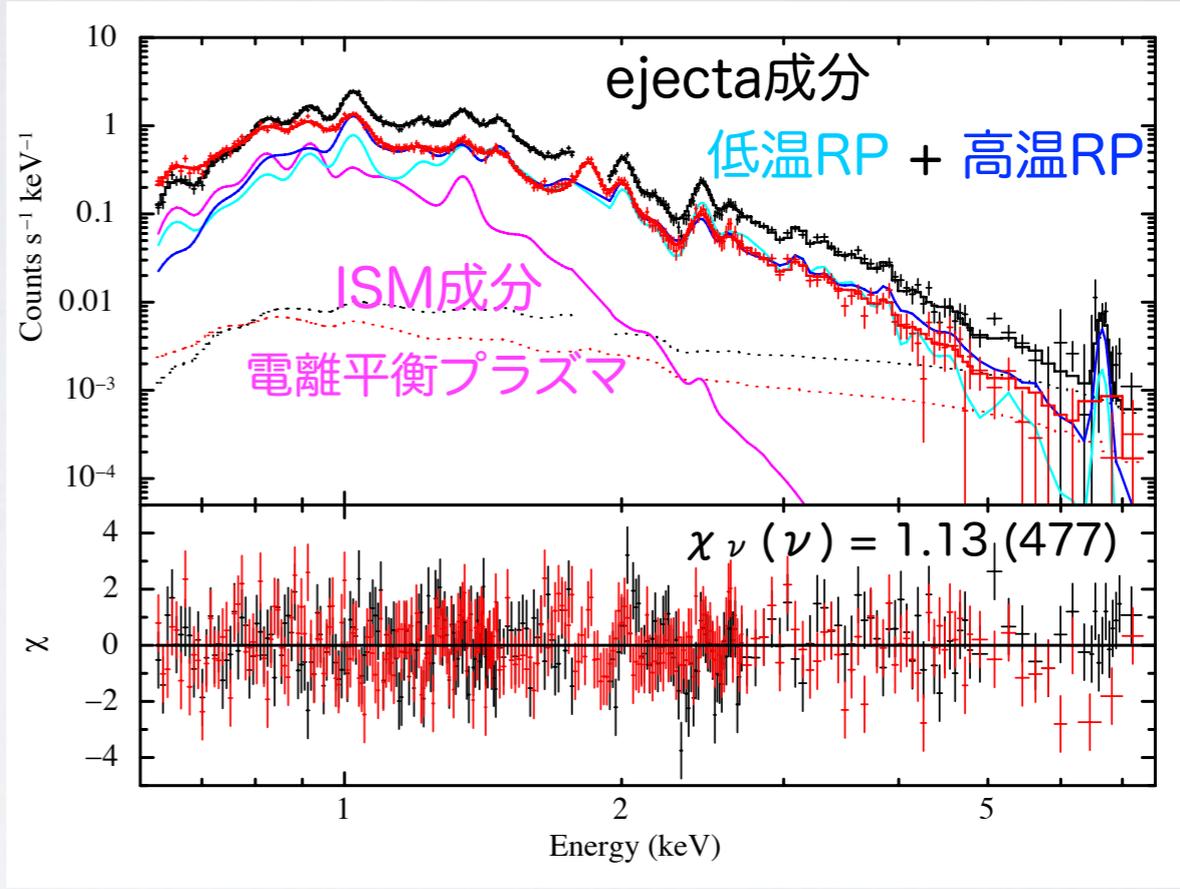
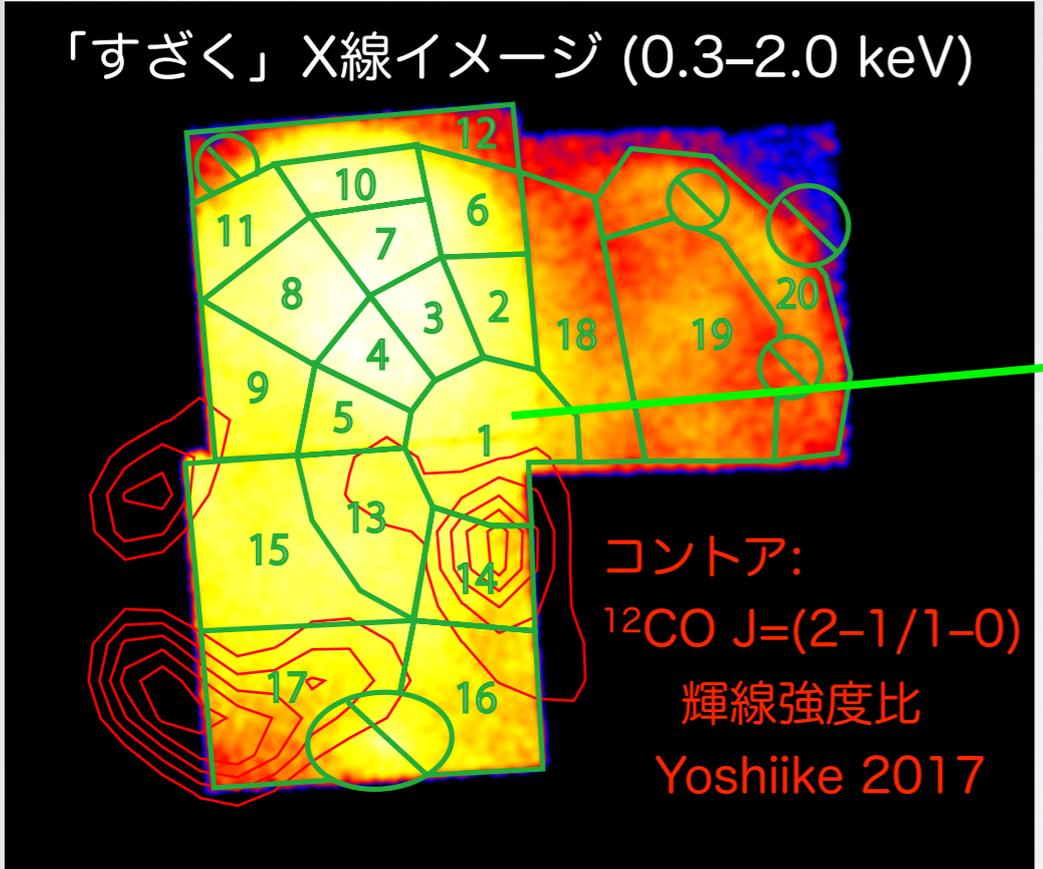
→ 高密度領域の分子雲を示唆

野辺山電波観測所への観測受諾  
(PI: 松村)

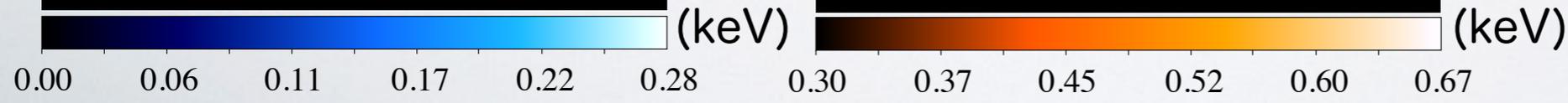
2017年12月に観測

希薄化が期待されたが、熱伝導シナリオを示唆

# IC 443: 解析結果



すべての領域でRP発見  
 分子雲衝突の領域のRPは、  
 電子温度が低い  
 → 分子雲との熱伝導を示唆



# W44: 解析結果

## 分子雲との相互作用

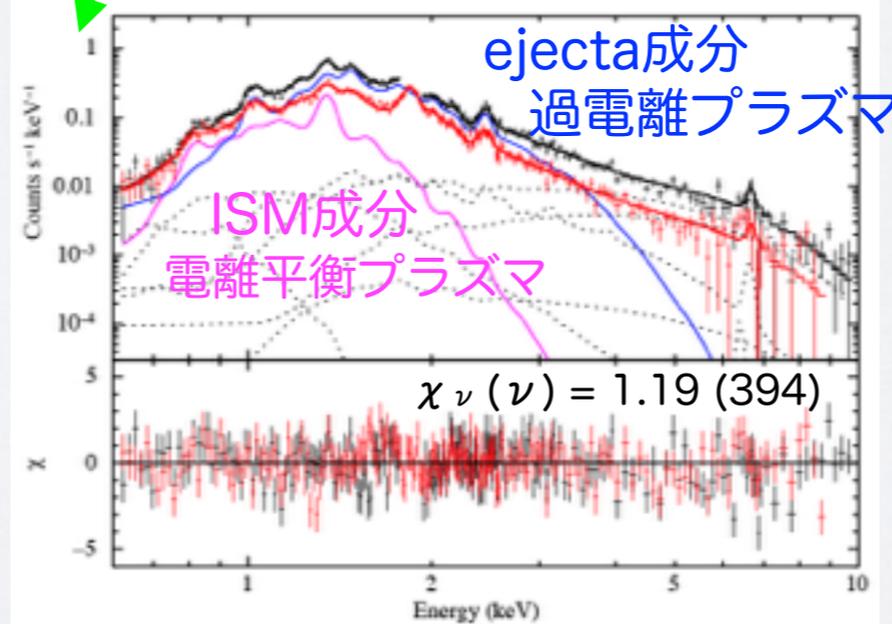
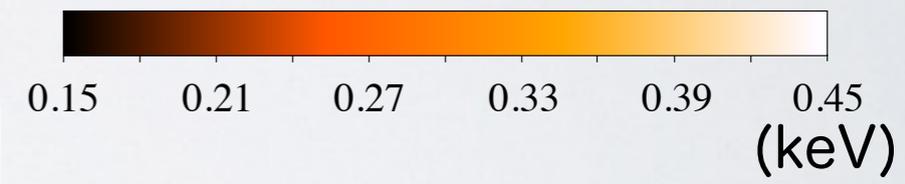
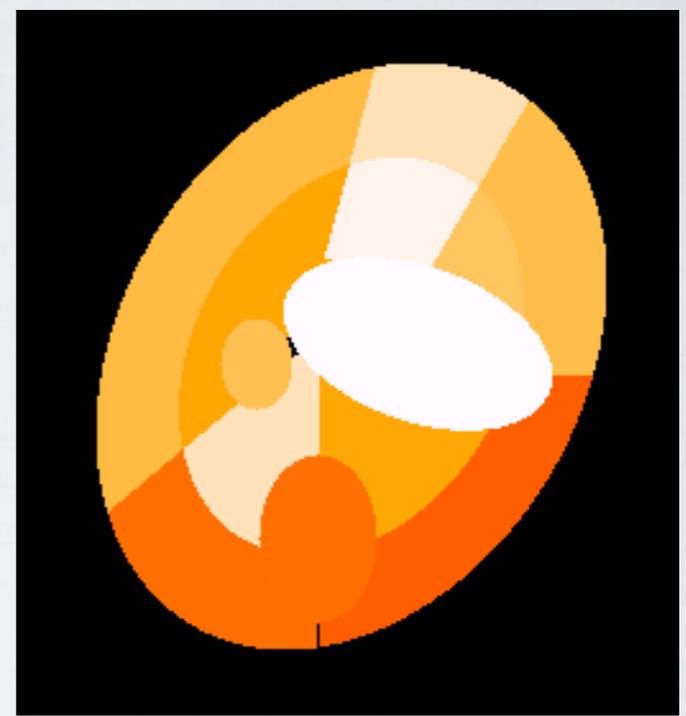
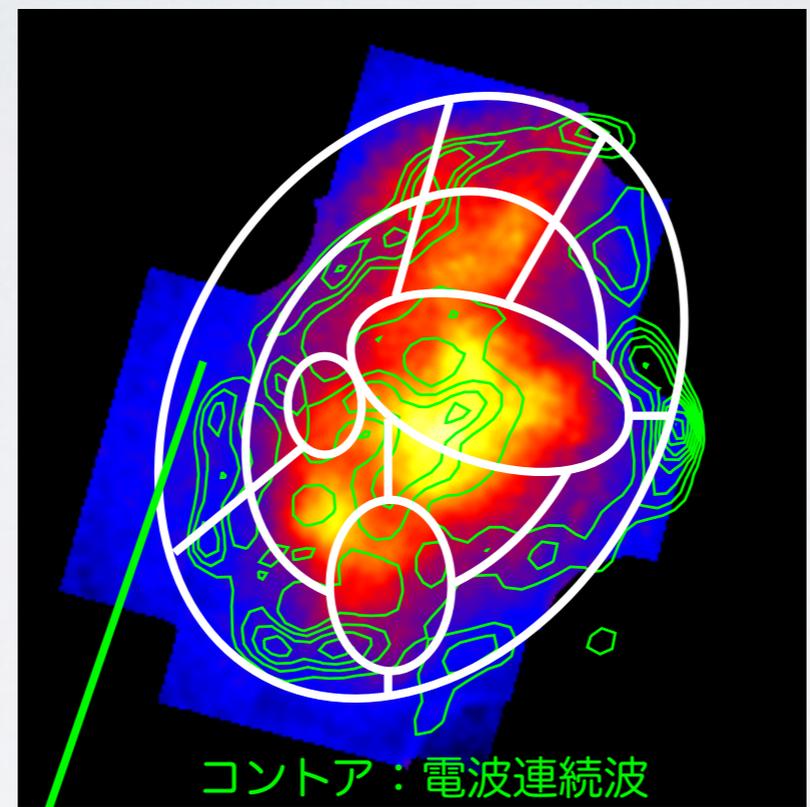
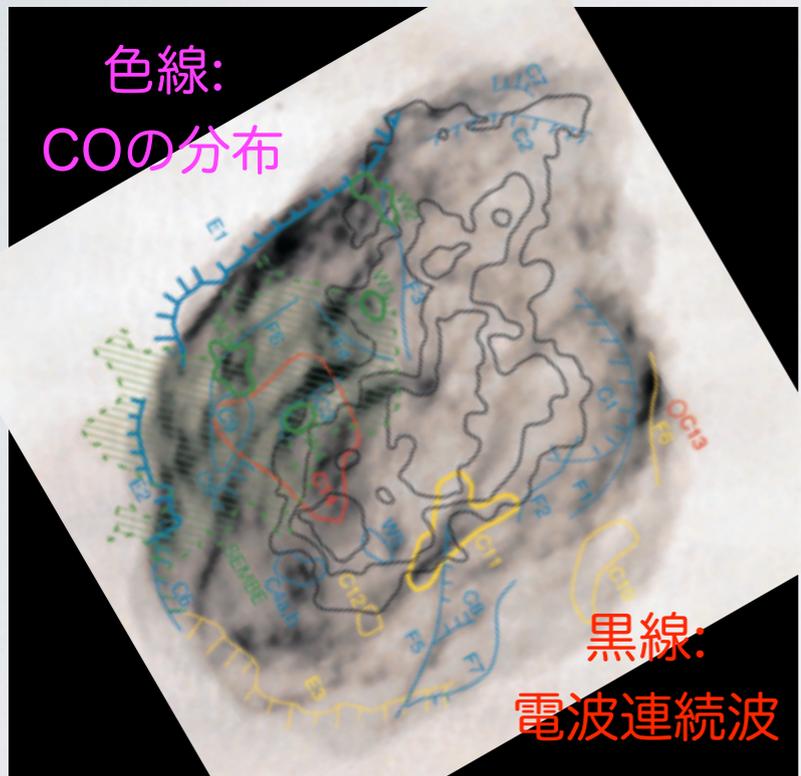
(<sup>12</sup>CO, <sup>13</sup>CO観測, Seta+ 2004)

## 「すざく」 X線イメージ

(0.3–10.0 keV)

## 過電離プラズマの

## 電子温度分布



SNRのほぼ全ての領域で  
分子雲と相互作用を示唆

すべての領域でRP発見

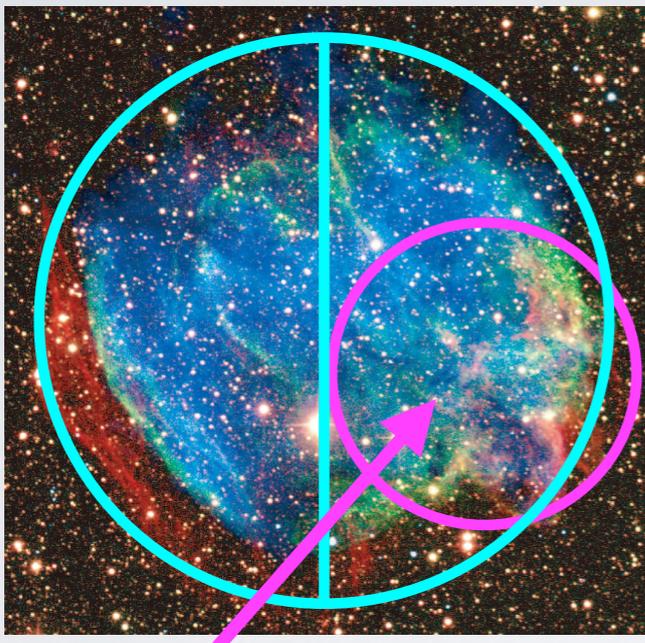
中心: kT<sub>e</sub> 大

外側: kT<sub>e</sub> 小

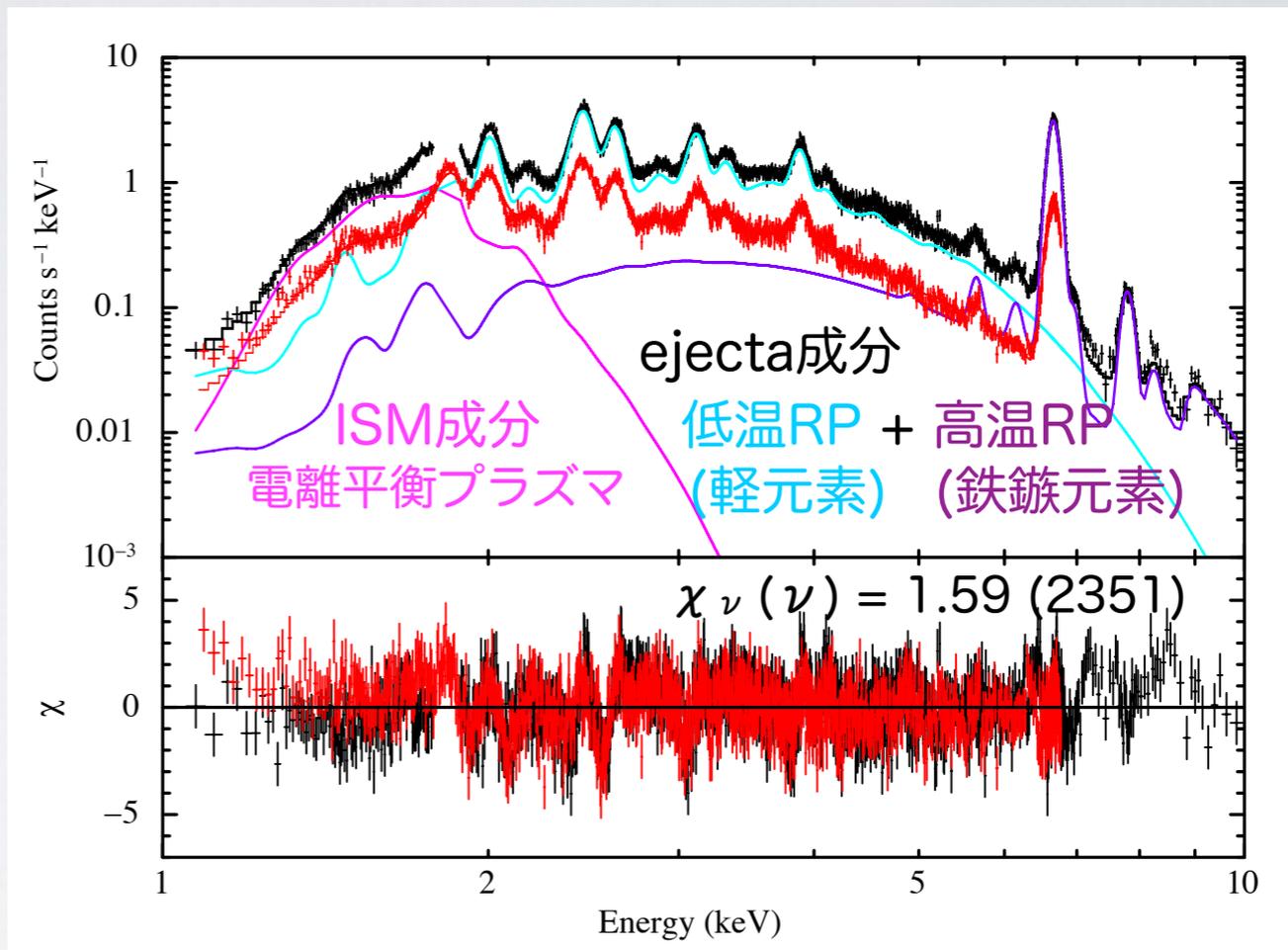
→ 外側の分子雲との熱伝導

# W49B: 解析結果

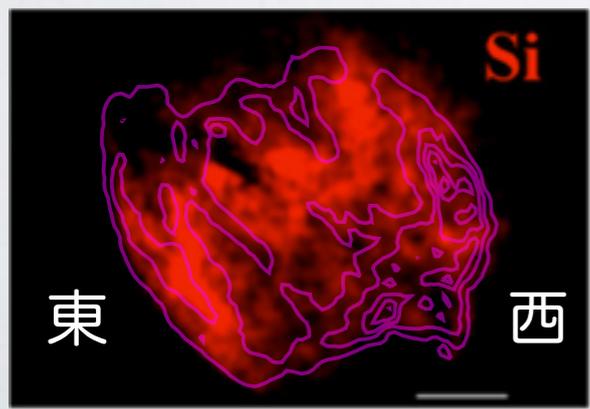
多波長イメージ  
(Keohane+ 2007)



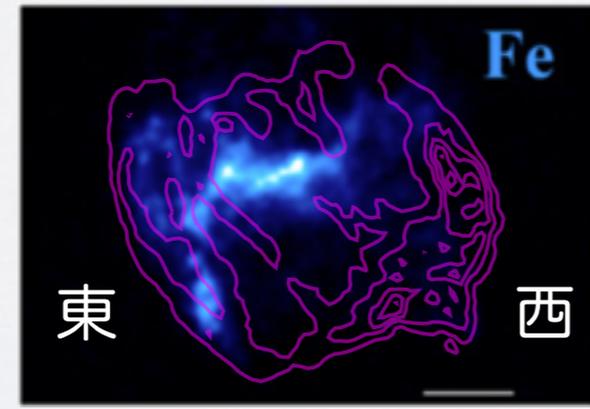
Fermi GeVガンマ線 (Abdo+ 2010)  
95% error circle



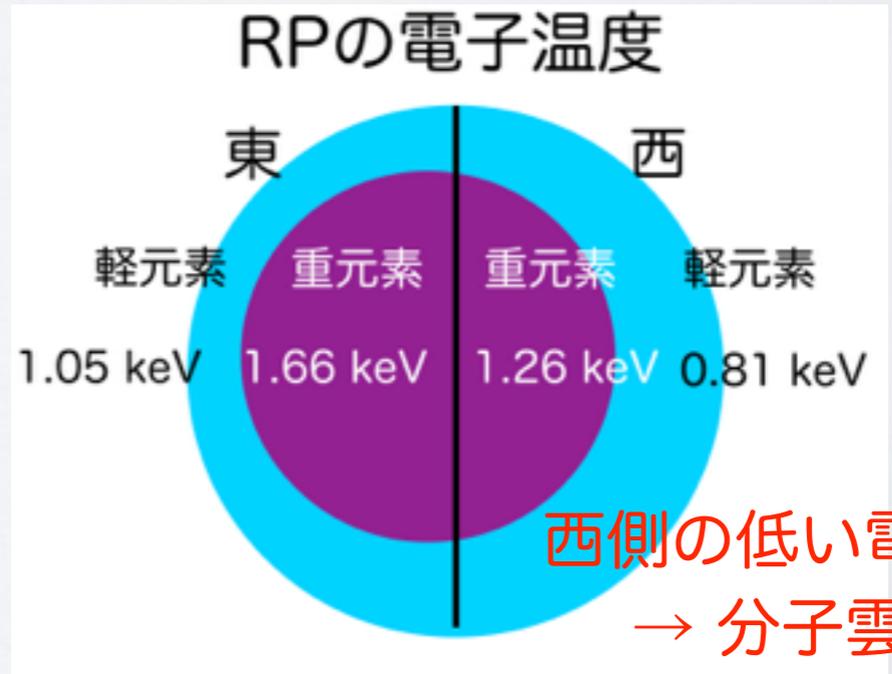
ChandraのX線イメージ (Lopez+ 2013)



全体に広がった

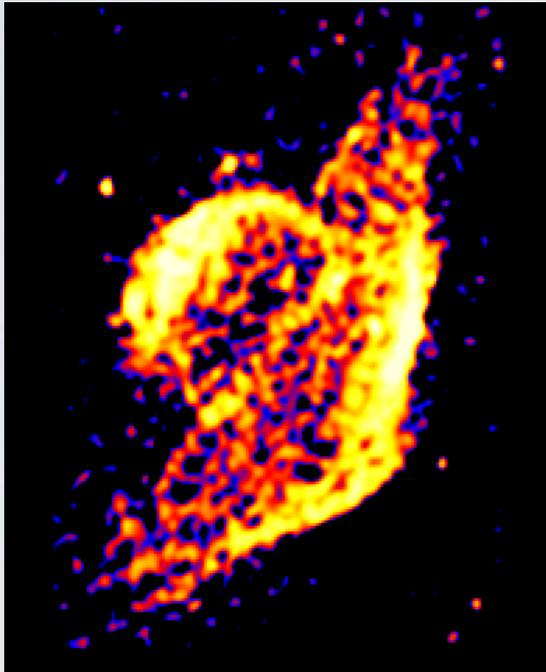


東よりの中心集中分布



# 解析結果まとめ

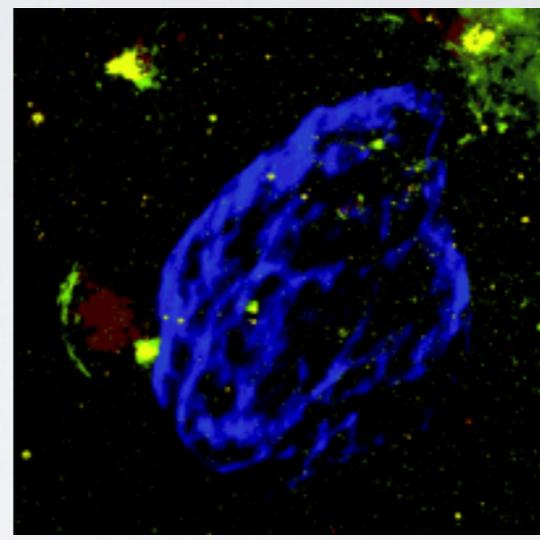
G166.0+4.3



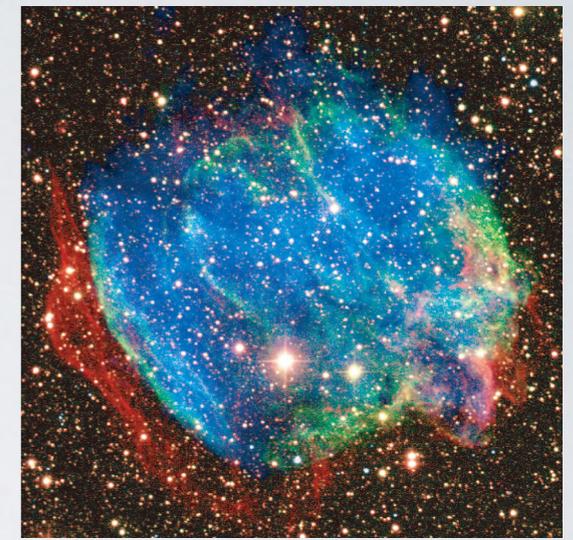
IC 443



W44



W49B



ISMの密度差、希薄化？  
 高密度領域のみ RP 発見  
 さらに、そこに分子雲  
 → 熱伝導で冷却

分子雲が付随、熱伝導シナリオ？

分子雲がある場所で、RPの  $kT_e$  が低い。  
 → 熱伝導で冷却

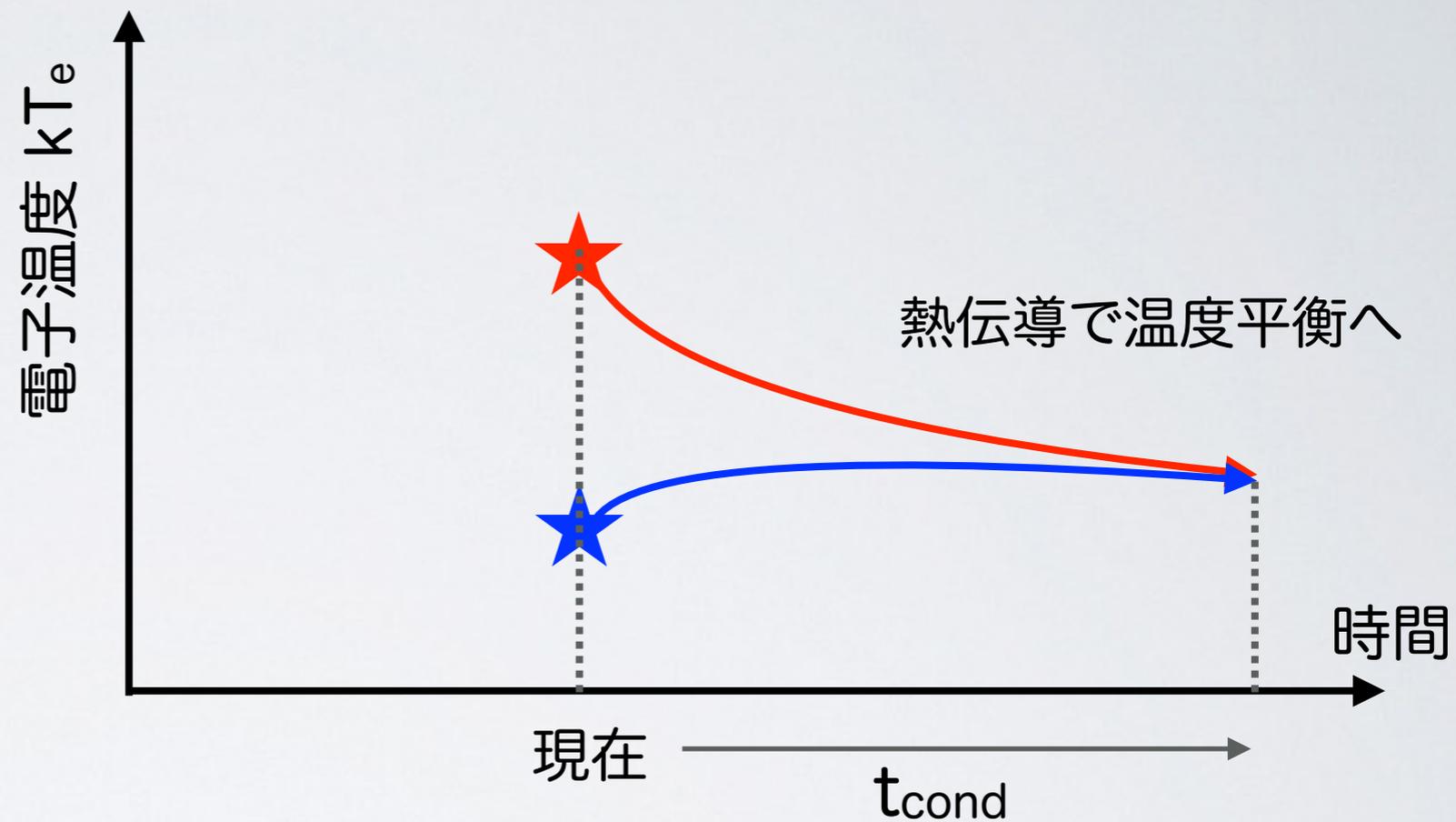
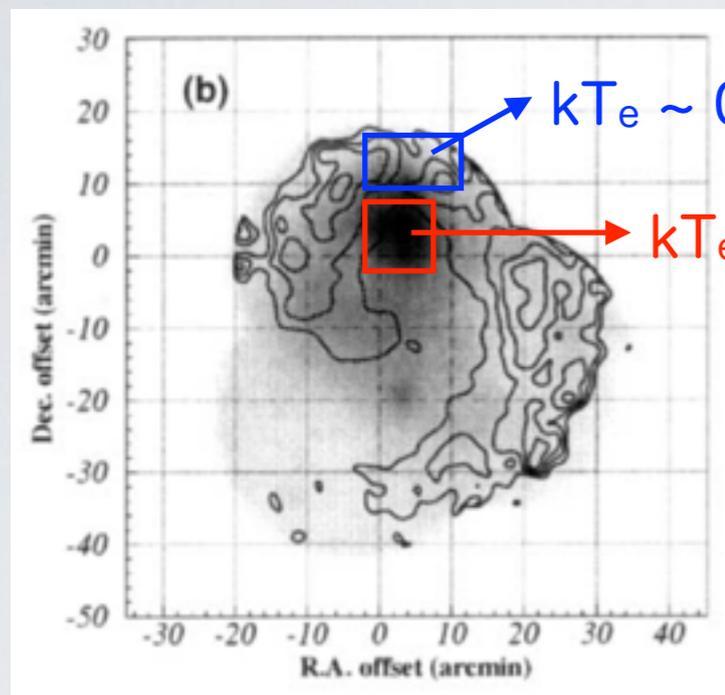
観測的研究から過電離プラズマの生成起源は、

分子雲との熱伝導

# 熱伝導タイムスケールの先行研究

熱伝導のタイムスケール ( $t_{\text{cond}}$ ) の見積もり (IC 443: Kawasaki+ 2002)

IC 443 ASCA image

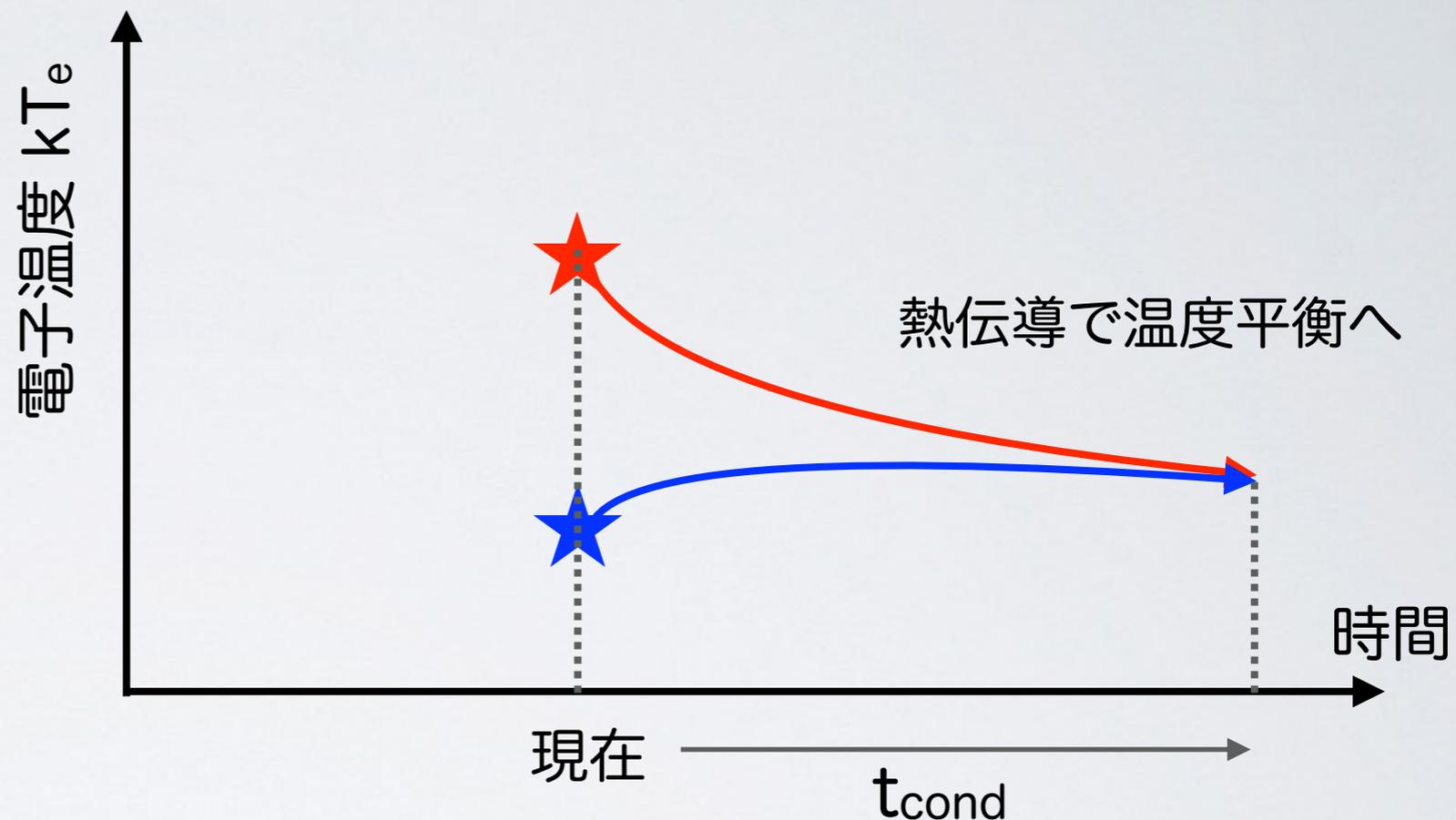
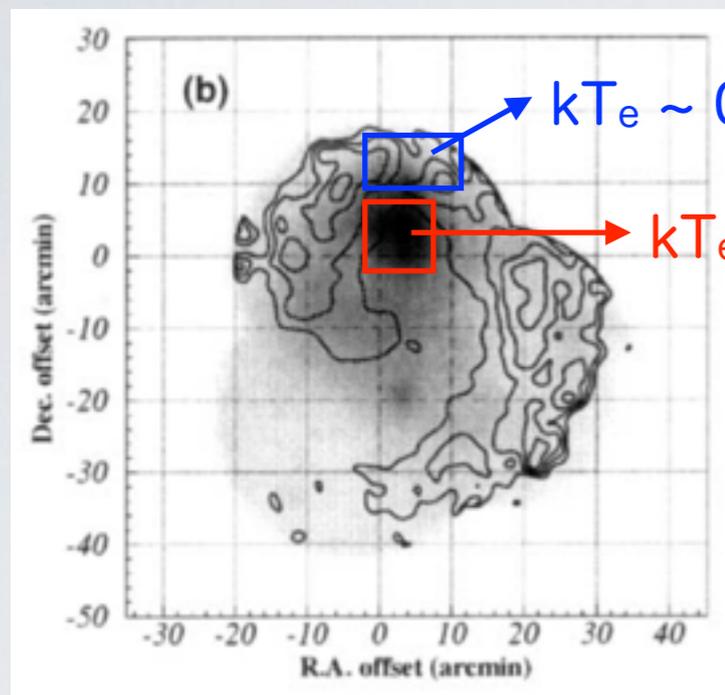


< 電離平衡の  
タイムスケール ( $t_{\text{CIE}}$ )  
→ プラズマが過電離状態

# 熱伝導タイムスケールの先行研究

熱伝導のタイムスケール ( $t_{\text{cond}}$ ) の見積もり (IC 443: Kawasaki+ 2002)

IC 443 ASCA image



同様の見積もり (W44: Uchida+ 2012)

$t_{\text{cond}} \sim 10 \text{ Myr} \gg t_{\text{CIE}} \sim 100 \text{ kyr}$

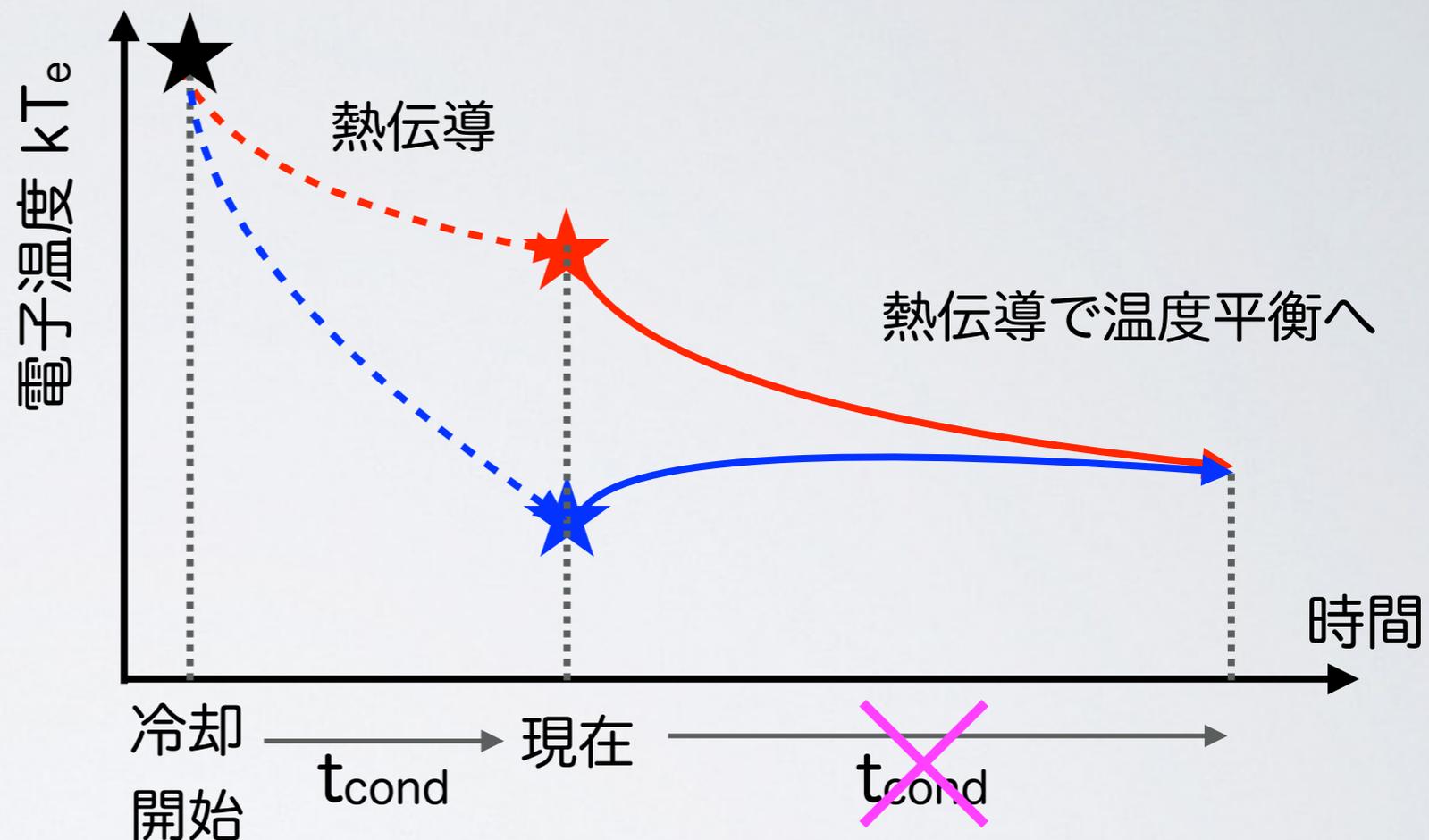
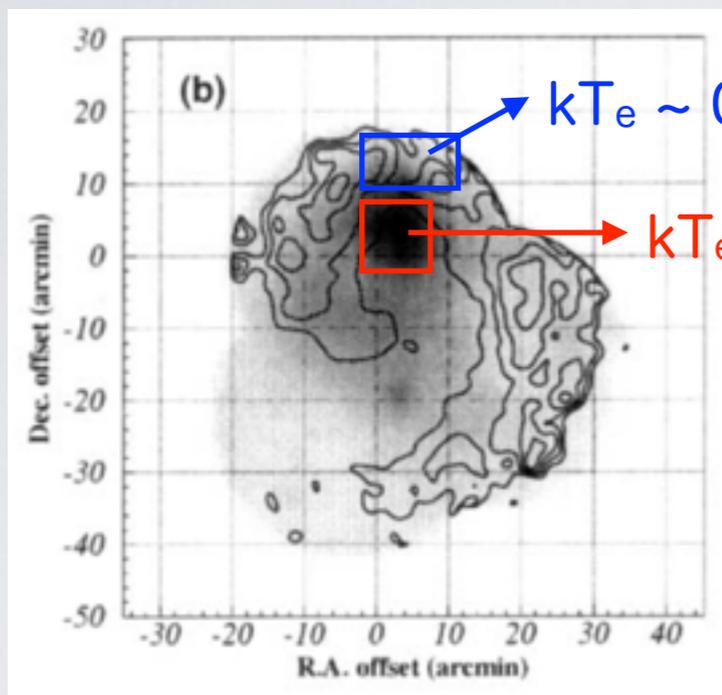
→ 熱伝導説は不適切

< 電離平衡の  
タイムスケール ( $t_{\text{CIE}}$ )  
→ プラズマが過電離状態

# 熱伝導タイムスケールの先行研究

熱伝導のタイムスケール ( $t_{\text{cond}}$ ) の見積もり (IC 443: Kawasaki+ 2002)

IC 443 ASCA image



同様の見積もり (W44: Uchida+ 2012)

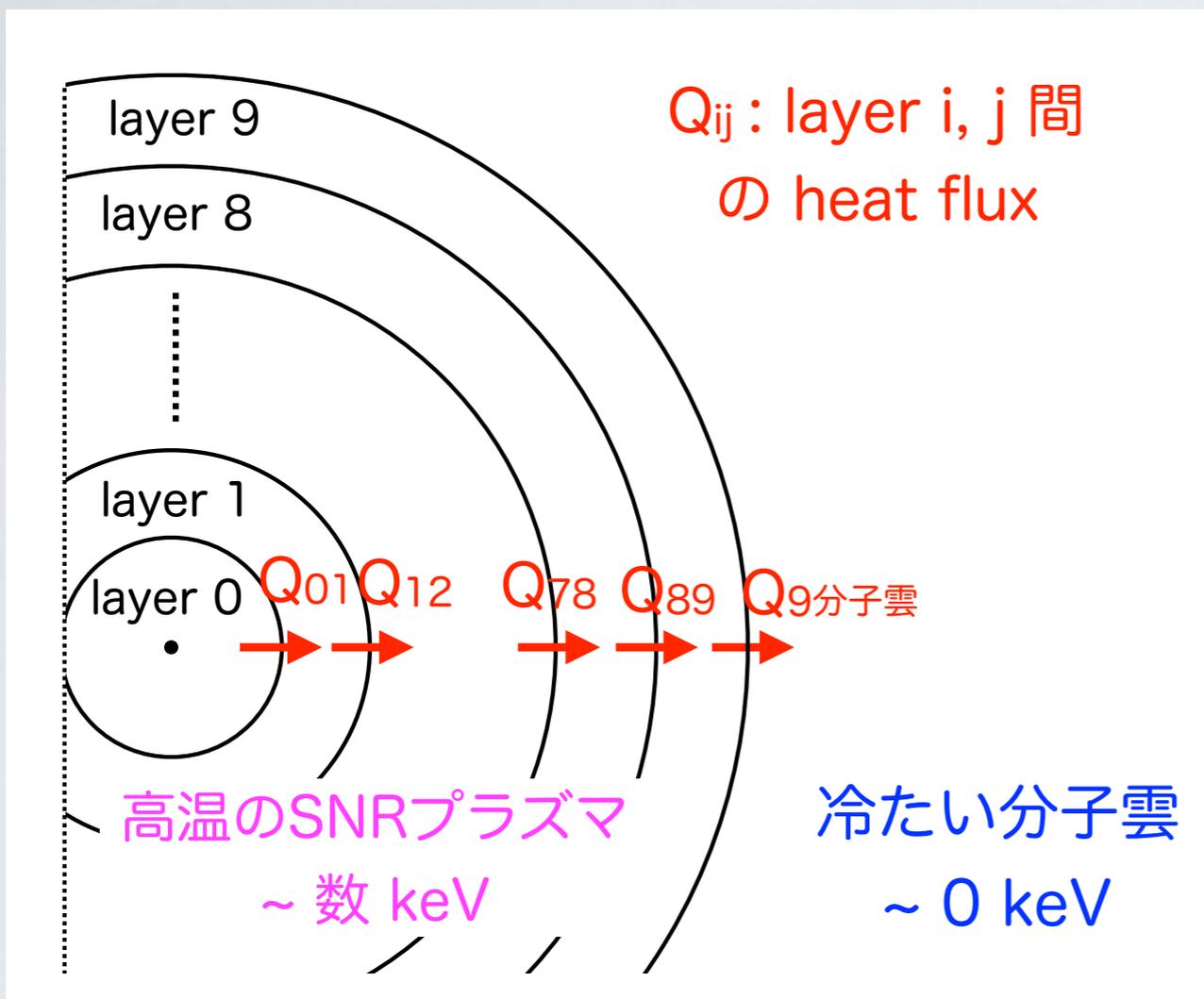
$$t_{\text{cond}} \sim 10 \text{ Myr} \gg t_{\text{CIE}} \sim 100 \text{ kyr}$$

→ 熱伝導説は不適切

< 電離平衡の  
タイムスケール ( $t_{\text{CIE}}$ )  
→ プラズマが過電離状態

# 熱伝導タイムスケールの計算概要

高温プラズマは 10 layer に分割、外側の冷たい分子雲から冷却



- ・ 計算のタイムスケール 1 yr
- ・ プラズマの電子密度一定 (観測値)
- ・ SNRサイズ一定 (観測値)

各 layer の heat flux

$$Q_{i,j} = \begin{cases} Q_{\text{class}} & (l_T/\lambda_e > 10) \\ (Q_{\text{class}}^{-1} + Q_{\text{sat}}^{-1})^{-1} & (1 \leq l_T/\lambda_e \leq 10) \\ Q_{\text{sat}} & (l_T/\lambda_e < 1). \end{cases}$$

$l_T$ : プラズマ間の温度勾配の scale length,

$\lambda_e$ : 電子の mean free path

( $Q_{\text{class}}$ : Spitzer 1956,  $Q_{\text{sat}}$ : Cowie & McKee 1977)

熱伝導によるエネルギー流出入

$$\Delta E_{\text{cond}} \simeq (Q_{i,i-1}S_{i,i-1} - Q_{i+1,i}S_{i+1,i})\Delta t$$

$S_{i,j}$ : layer  $i, j$  間の表面積

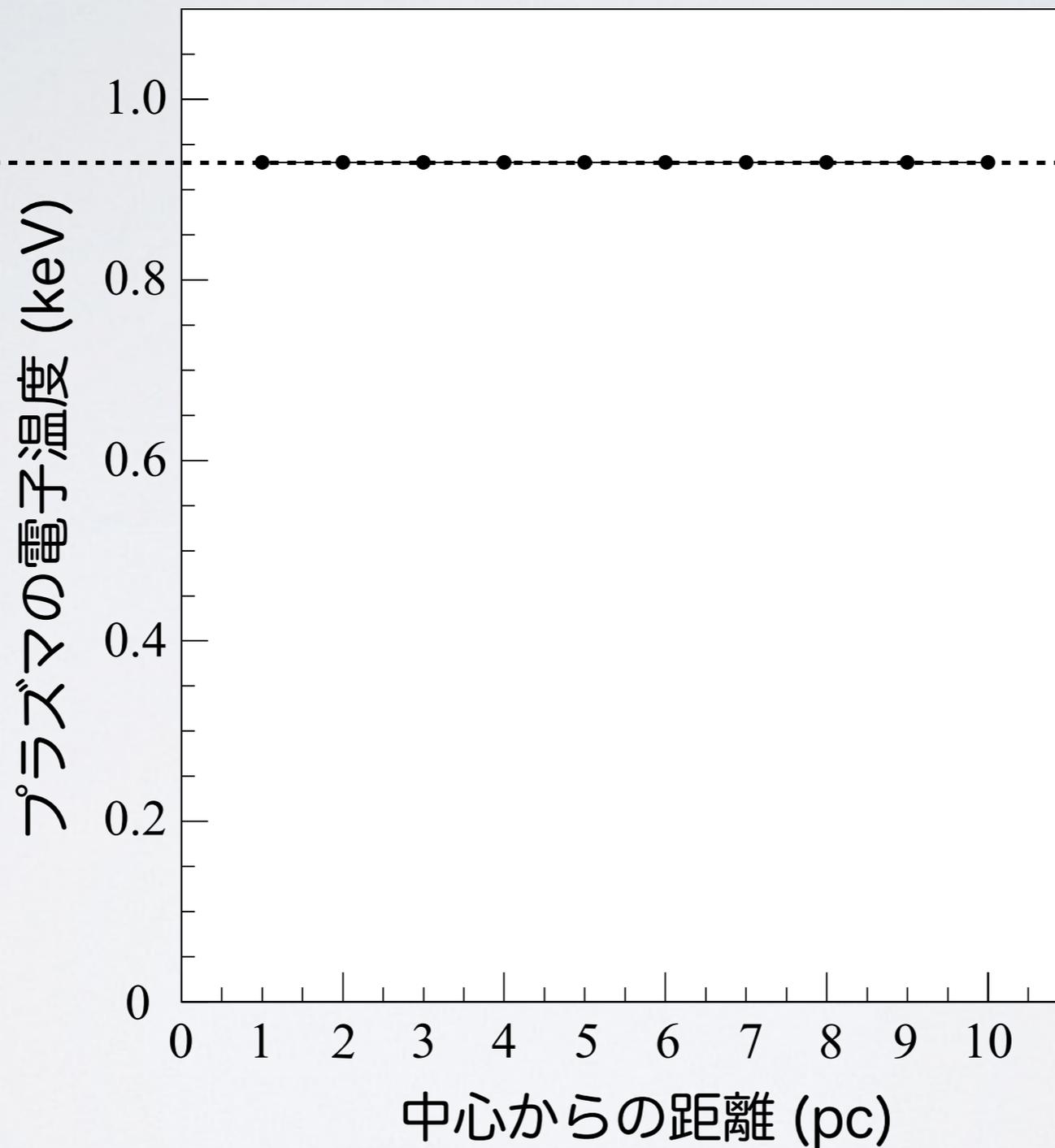
温度変化

$$k\Delta T_e = \frac{2\Delta E_{\text{cond}}}{3n_e V_i},$$

$T_e$ : 電子温度,  $n_e$ : 電子密度,  $V_i$ : layer  $i$  の体積

# W44の温度変化と、熱伝導のタイムスケール

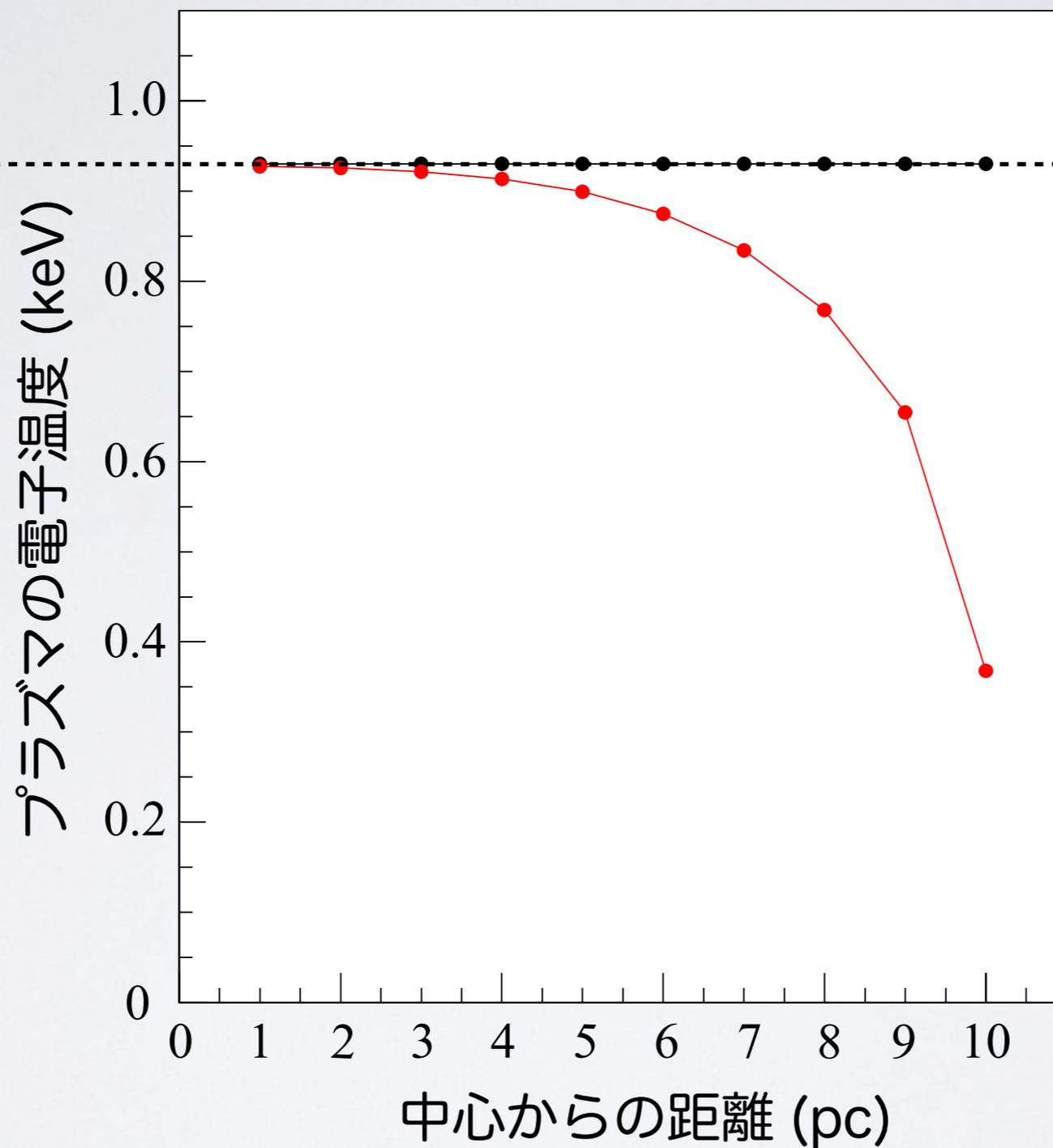
冷却前の初期温度  
 $kT_{\text{init}} = 0.94 \text{ keV}$



経過時間  
— 0 kyr

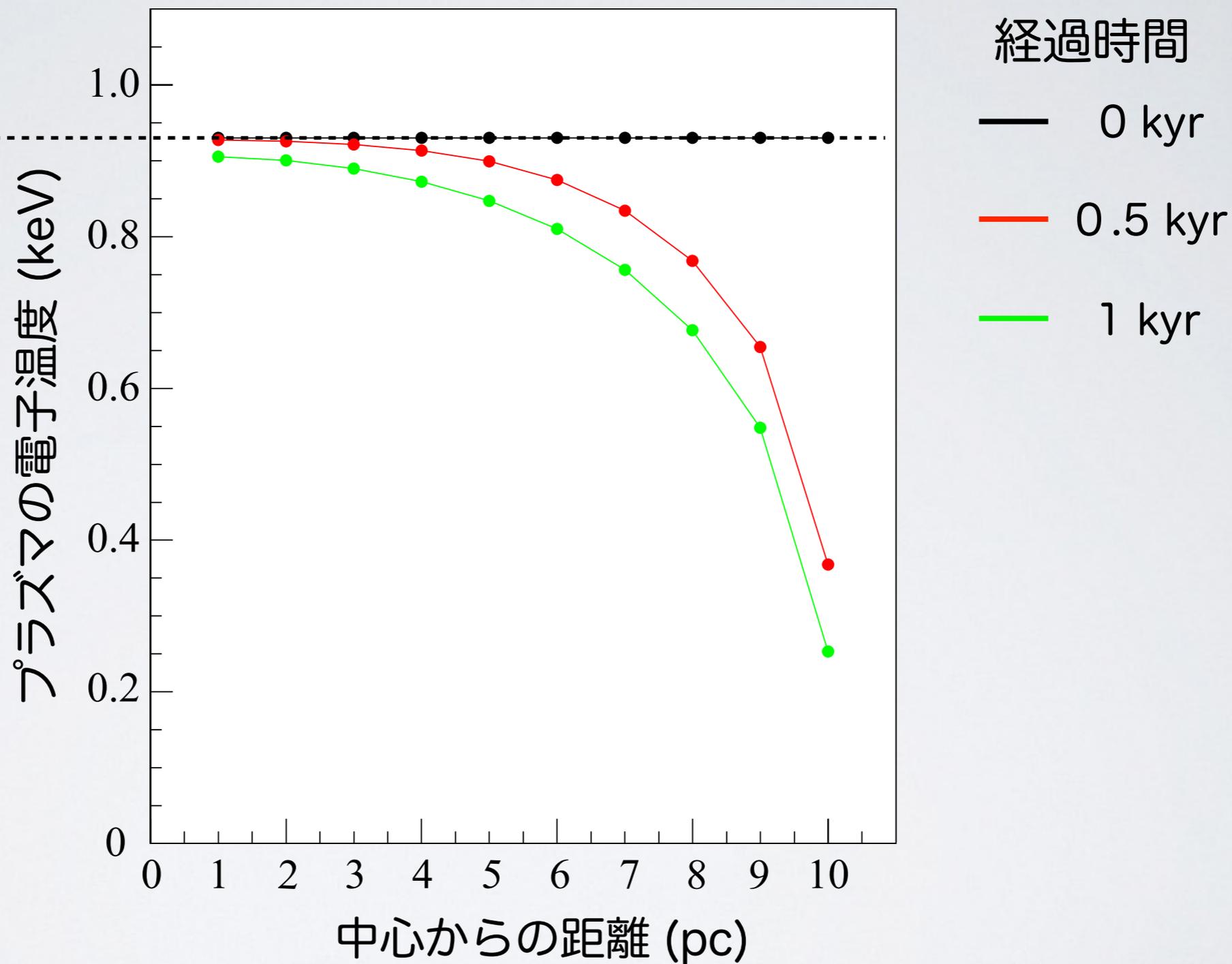
# W44の温度変化と、熱伝導のタイムスケール

冷却前の初期温度  
 $kT_{\text{init}} = 0.94 \text{ keV}$



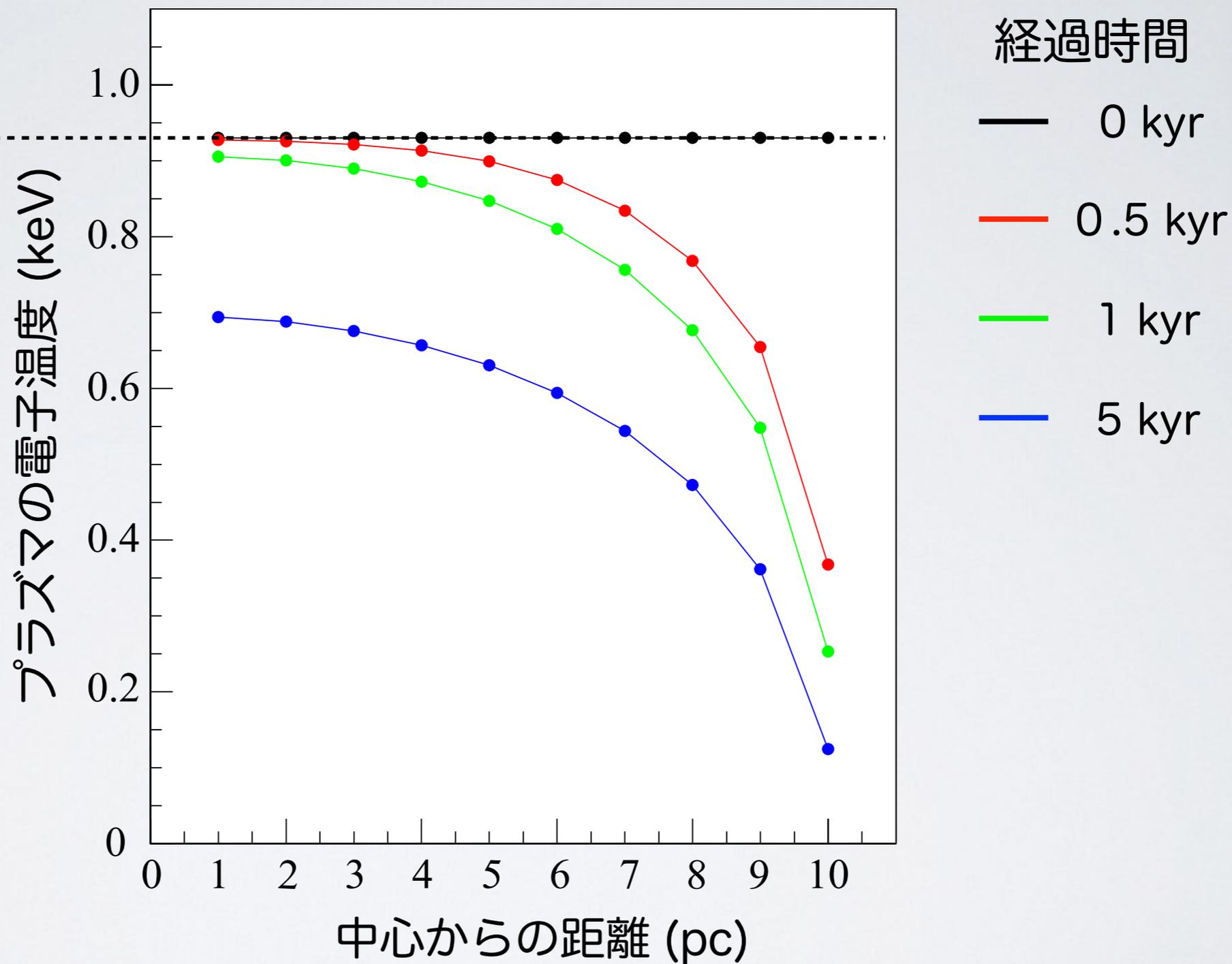
# W44の温度変化と、熱伝導のタイムスケール

冷却前の初期温度  
 $kT_{\text{init}} = 0.94 \text{ keV}$



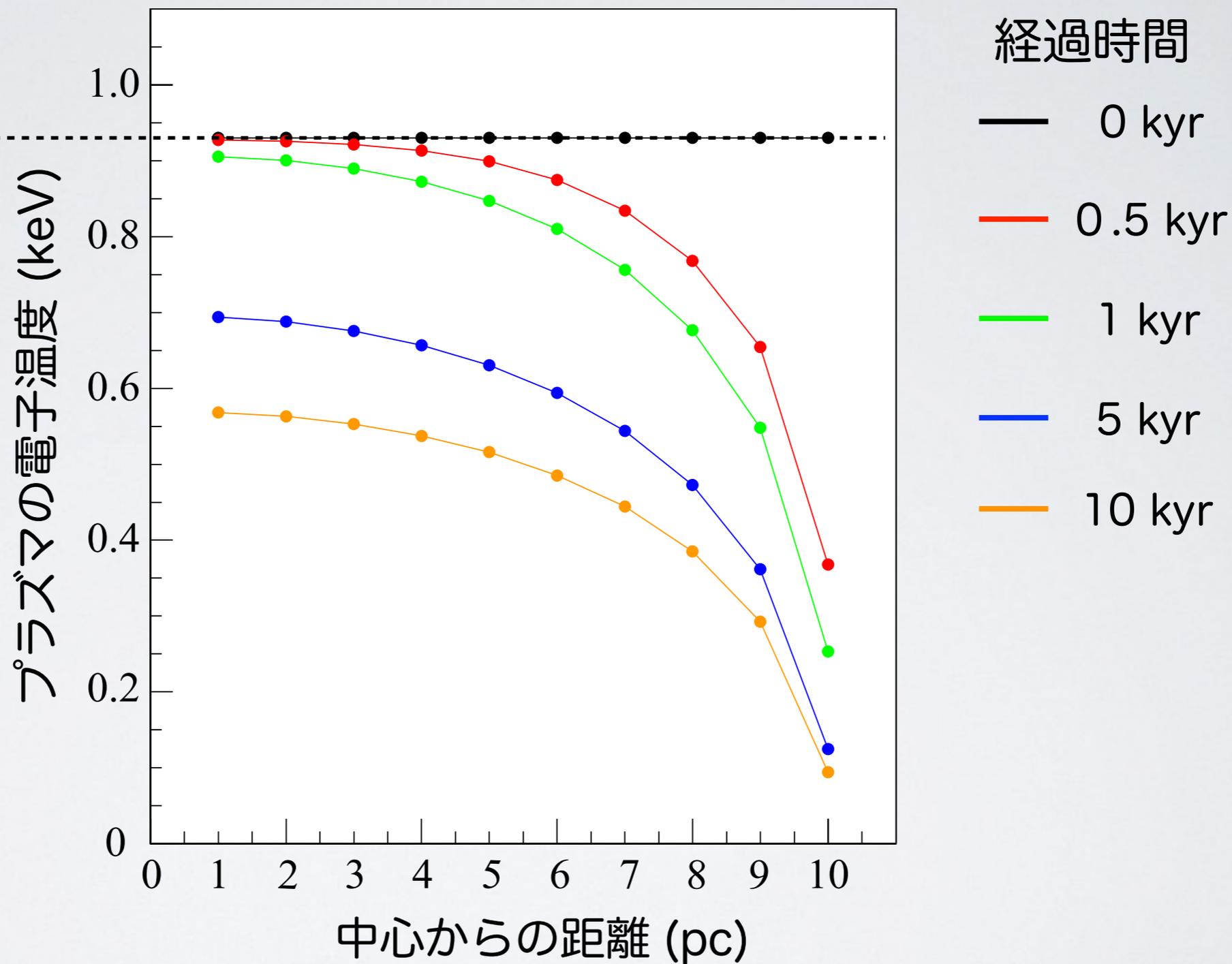
# W44の温度変化と、熱伝導のタイムスケール

冷却前の初期温度  
 $kT_{\text{init}} = 0.94 \text{ keV}$



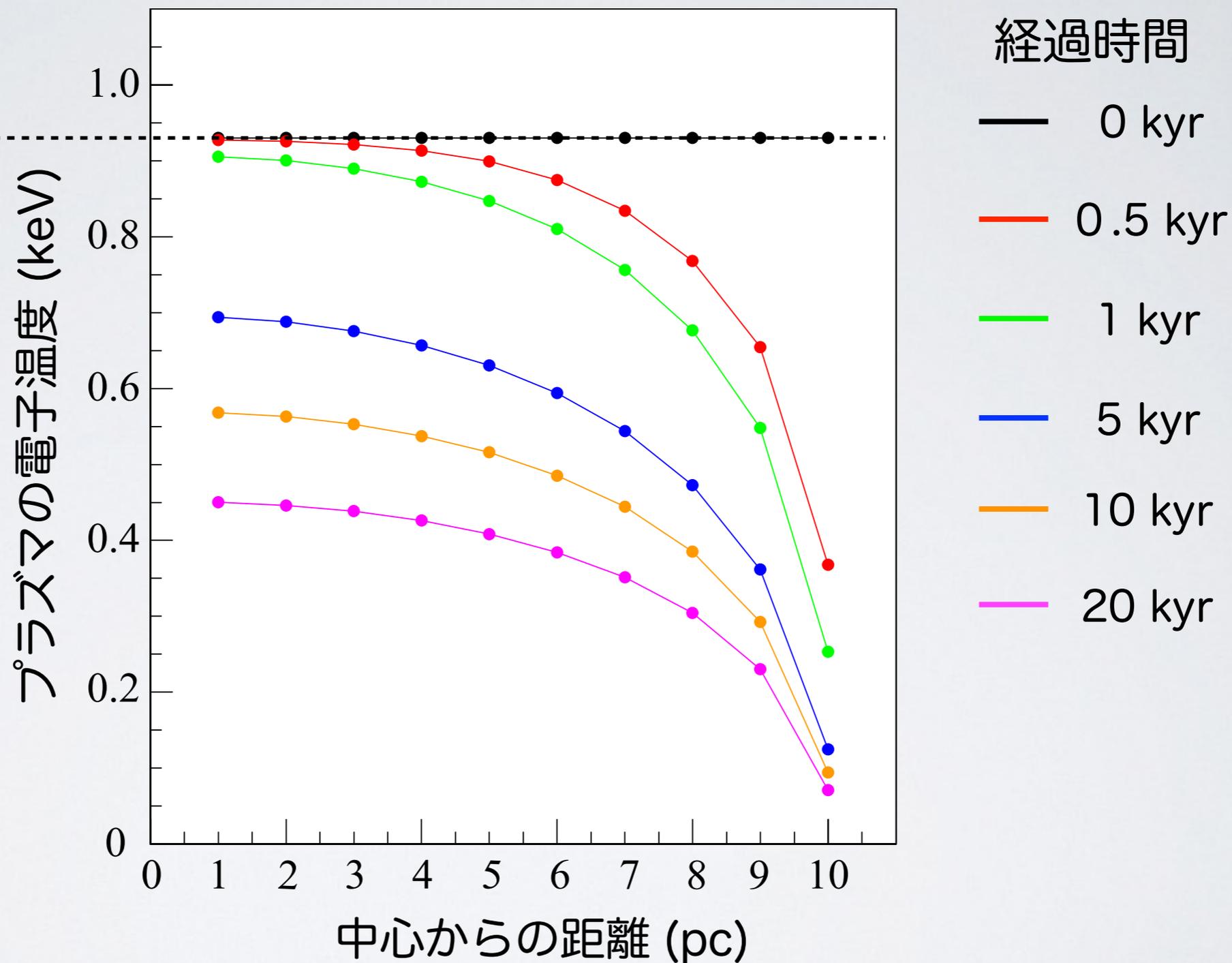
# W44の温度変化と、熱伝導のタイムスケール

冷却前の初期温度  
 $kT_{\text{init}} = 0.94 \text{ keV}$



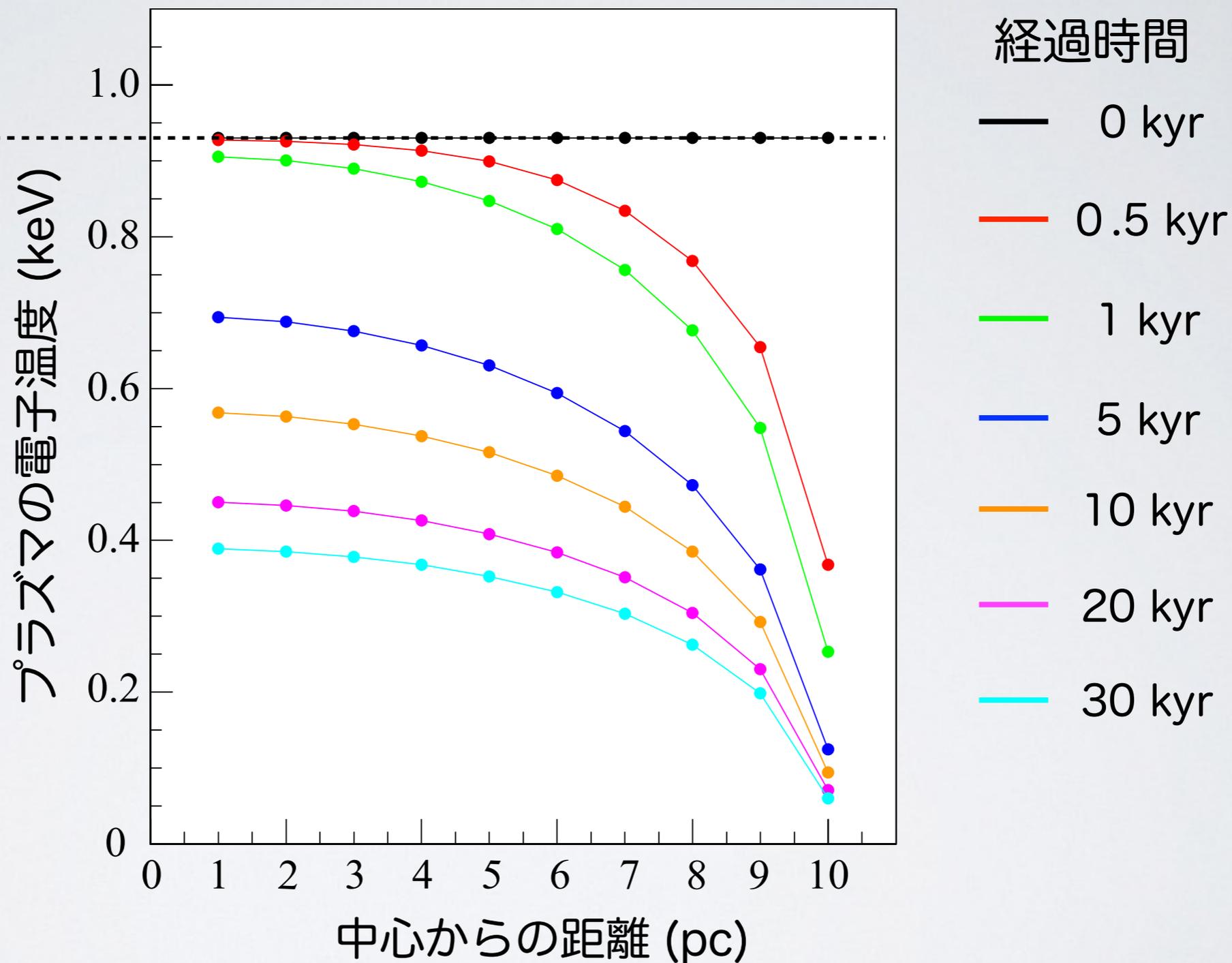
# W44の温度変化と、熱伝導のタイムスケール

冷却前の初期温度  
 $kT_{\text{init}} = 0.94 \text{ keV}$



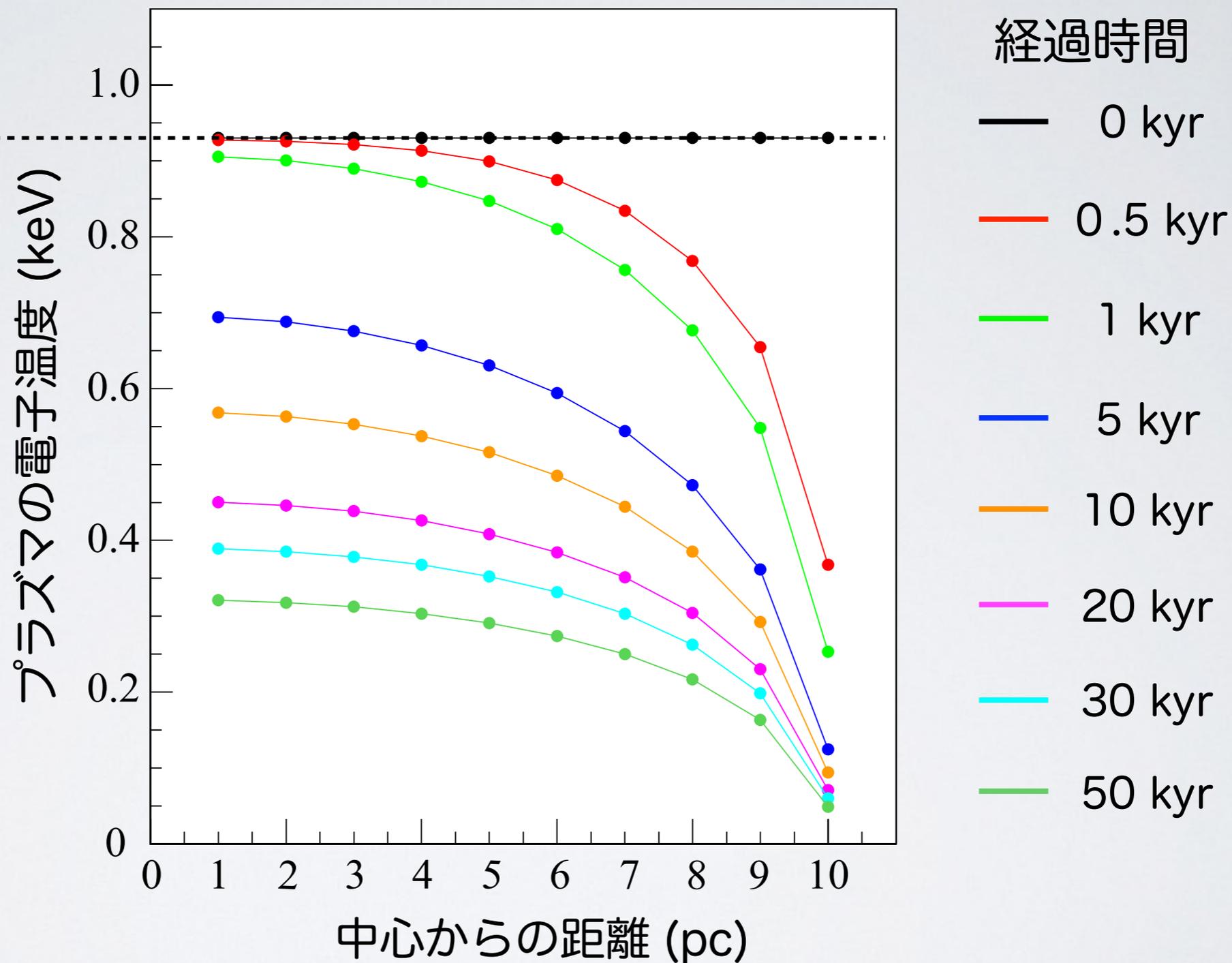
# W44の温度変化と、熱伝導のタイムスケール

冷却前の初期温度  
 $kT_{\text{init}} = 0.94 \text{ keV}$



# W44の温度変化と、熱伝導のタイムスケール

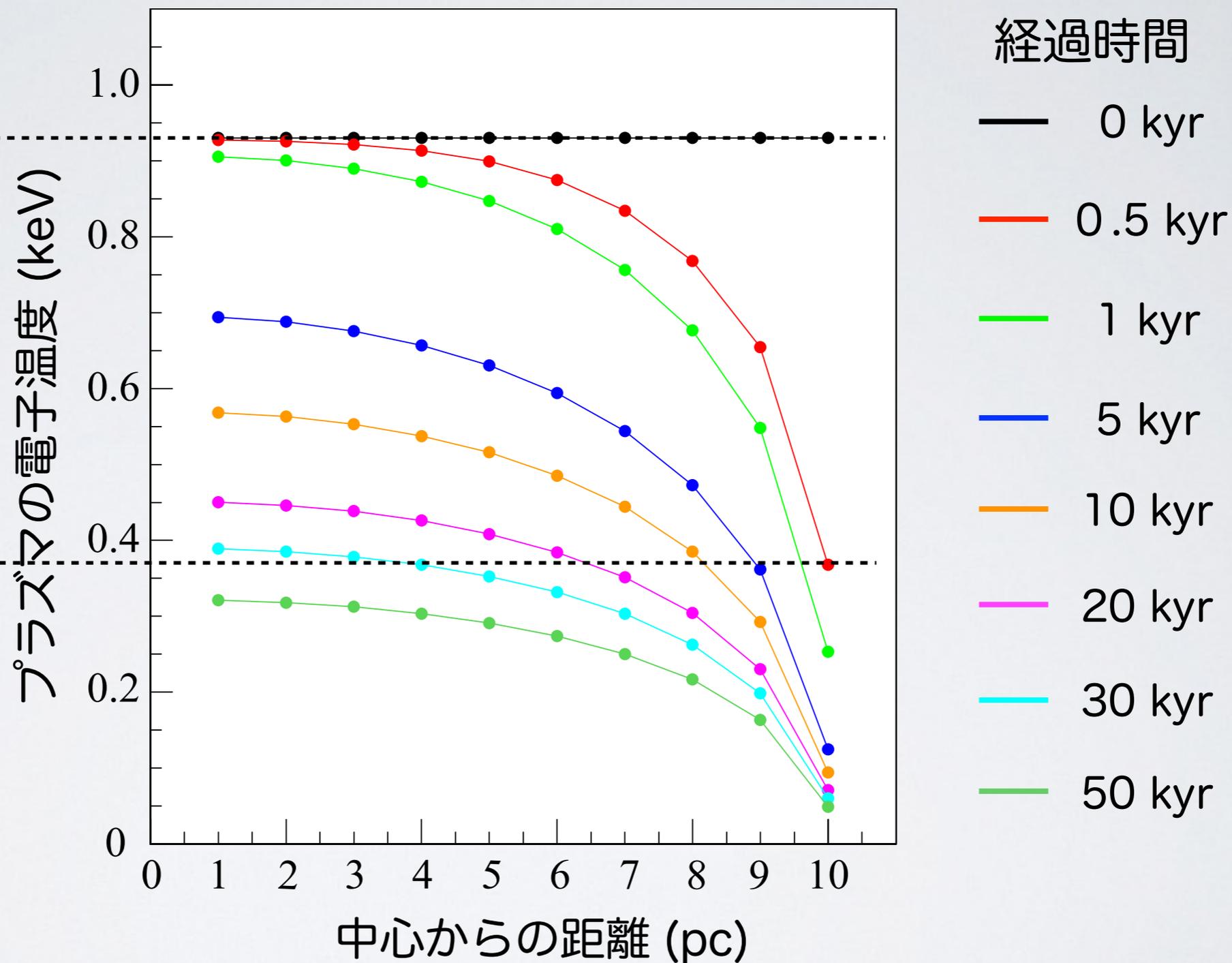
冷却前の初期温度  
 $kT_{\text{init}} = 0.94 \text{ keV}$



# W44の温度変化と、熱伝導のタイムスケール

冷却前の初期温度  
 $kT_{\text{init}} = 0.94 \text{ keV}$

現在の電子温度  
 $kT_e = 0.37 \text{ keV}$

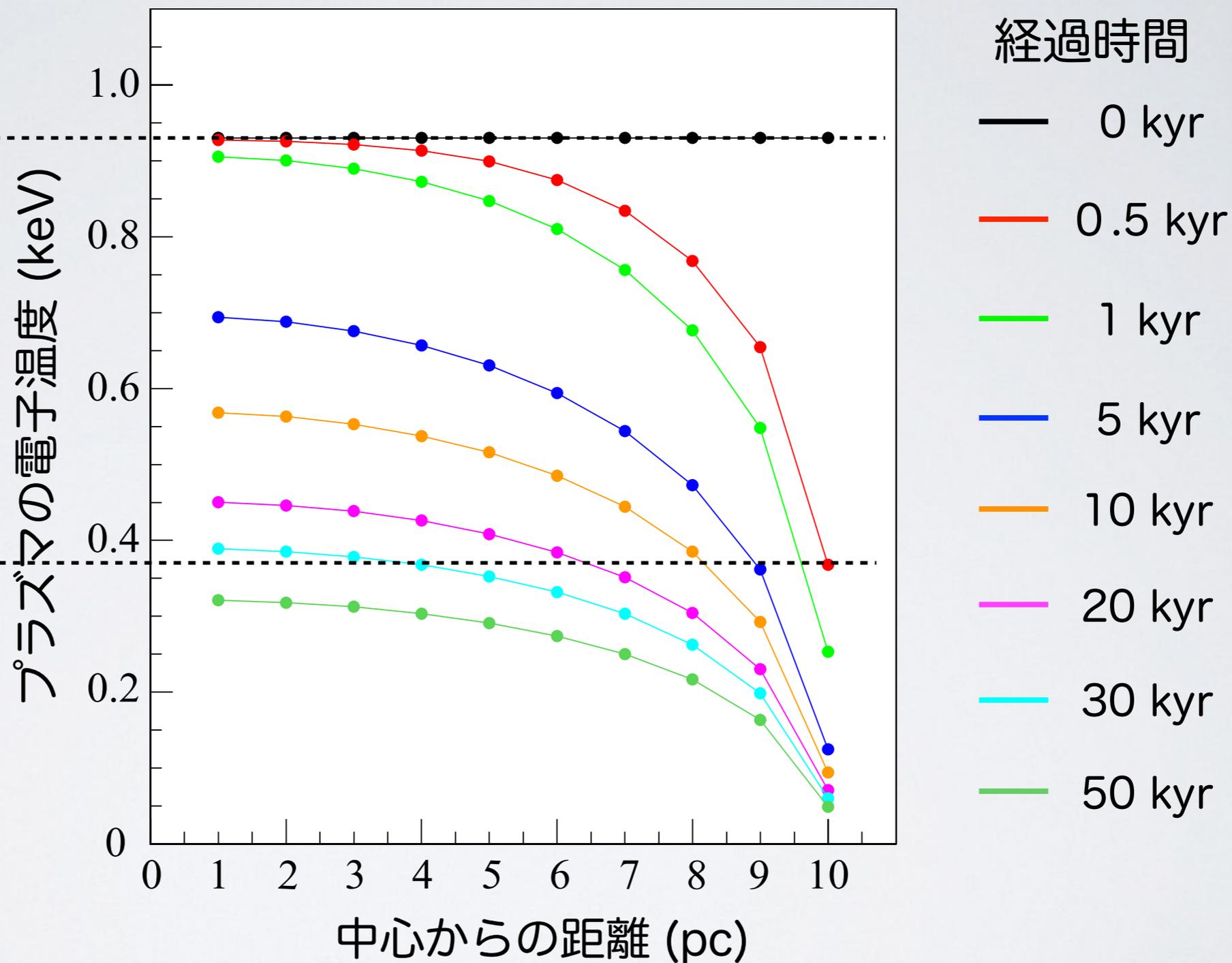


# W44の温度変化と、熱伝導のタイムスケール

冷却前の初期温度  
 $kT_{\text{init}} = 0.94 \text{ keV}$

熱伝導の  
 タイムスケール  
 $t_{\text{cond}} \sim 35 \text{ kyr}$

現在の電子温度  
 $kT_e = 0.37 \text{ keV}$



# W44の温度変化と、熱伝導のタイムスケール

冷却前の初期温度

$$kT_{\text{init}} = 0.94 \text{ keV}$$

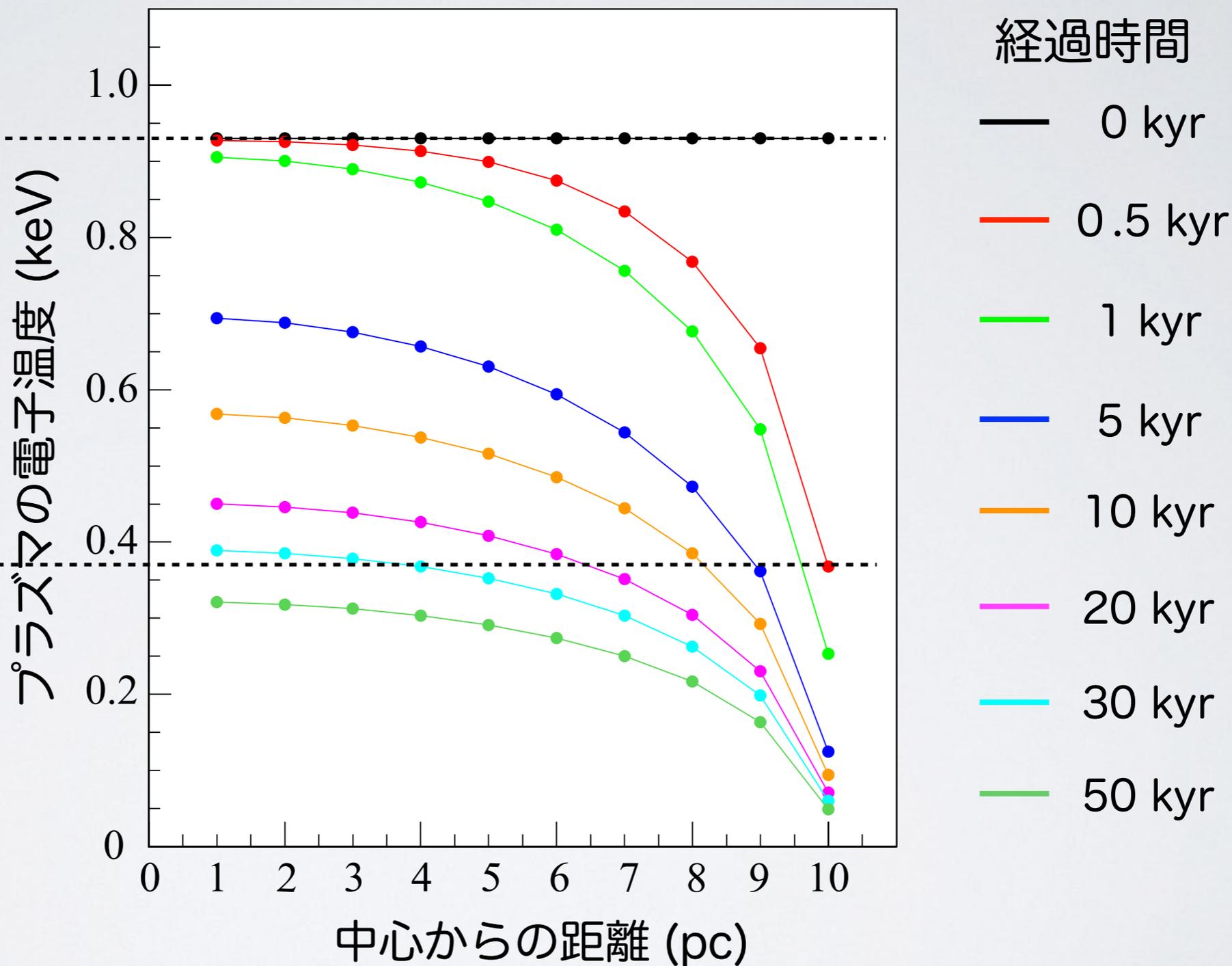


熱伝導の  
タイムスケール

$$t_{\text{cond}} \sim 35 \text{ kyr}$$

現在の電子温度

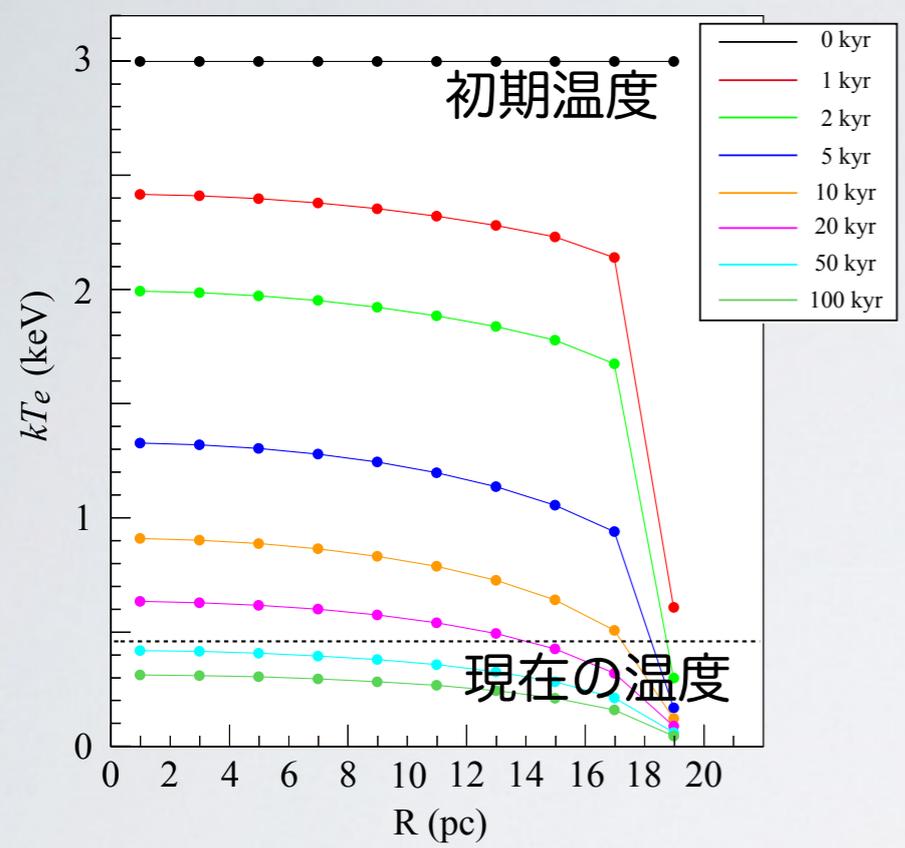
$$kT_e = 0.37 \text{ keV}$$



$$t_{\text{cond}} \sim 35 \text{ kyr} < t_{\text{CIE}} \sim 90 \cdot (n_e / 0.7 \text{ cm}^{-3})^{-1} \text{ kyr} \rightarrow \text{プラズマは過電離}$$

# 各SNRの熱伝導のタイムスケール

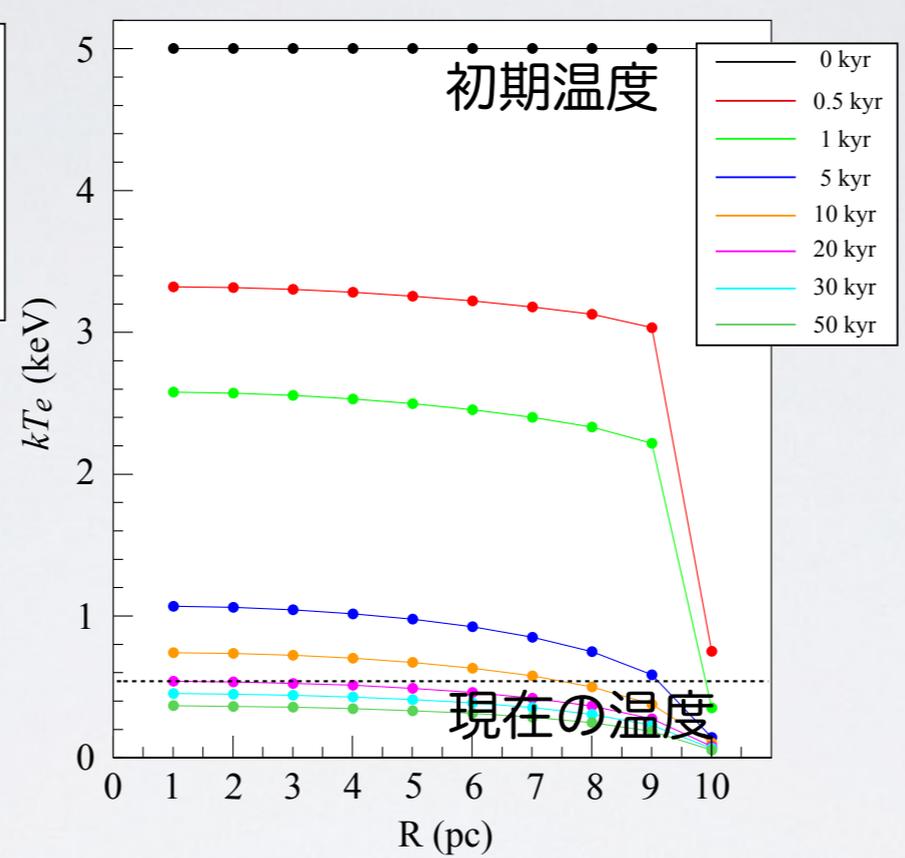
G166.0+4.3



$t_{\text{cond}} \sim 40 \text{ kyr}$

$t_{\text{CIE}} \sim 200 \cdot (n_e / 0.3 \text{ cm}^{-3})^{-1} \text{ kyr}$

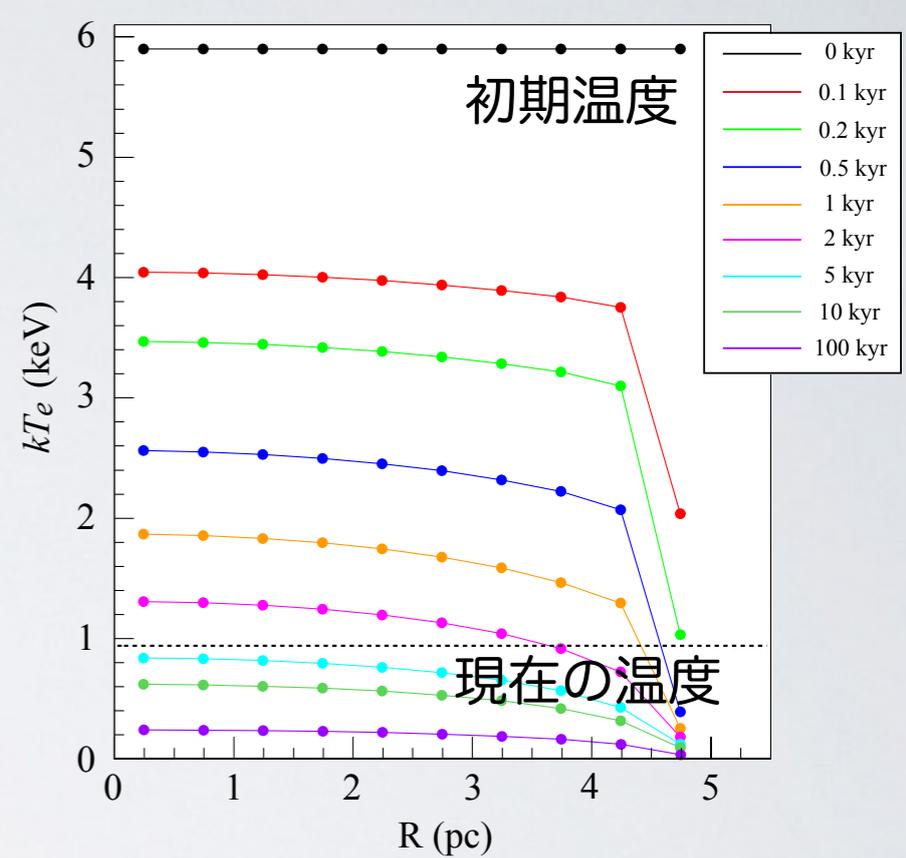
IC 443



$t_{\text{cond}} \sim 20 \text{ kyr}$

$t_{\text{CIE}} \sim 70 \cdot (n_e / 0.9 \text{ cm}^{-3})^{-1} \text{ kyr}$

W49B



$t_{\text{cond}} \sim 4 \text{ kyr}$

$t_{\text{CIE}} \sim 20 \cdot (n_e / 2.7 \text{ cm}^{-3})^{-1} \text{ kyr}$

他のSNRも  $t_{\text{cond}} < t_{\text{CIE}}$  → 熱伝導で過電離プラズマが実現可能

## まとめ

- ・ 本研究のテーマは、過電離プラズマの生成起源の解明.
- ・ 過電離プラズマの空間分布に着目し、銀河系内の4つの超新星残骸を解析.
- ・ すべての超新星残骸で、過電離プラズマの電子温度が分子雲の場所で低い.
- ・ 観測的に、生成起源が冷たい分子雲との熱伝導であることを示した.
- ・ 計算した熱伝導のタイムスケールは、プラズマが電離平衡に至る時間よりも短く、過電離状態でいられる.