

# X線でさぐる銀河の 重元素組成

小波 さおり (首都大学東京)

# 自己紹介

- 小波 さおり (首都大)
- 職：日本学術振興協会 PD
- 東京理科大学大学院博士過程卒
- 専門：X線天文学  
(データ解析、次期X線衛星ASTRO-Hチームメンバー)
- むかし、夏の学校の事務局やってみました

# 本日のアウトライン

1. なぜ元素か
2. なぜX線か
3. X線でさぐる銀河の元素組成
4. 銀河から銀河団への元素拡散
5. 次期X線衛星でさぐる宇宙の元素合成史

# 本日のアウトライン

1. なぜ元素か

2. なぜX線か

3. X線でさぐる銀河の元素組成

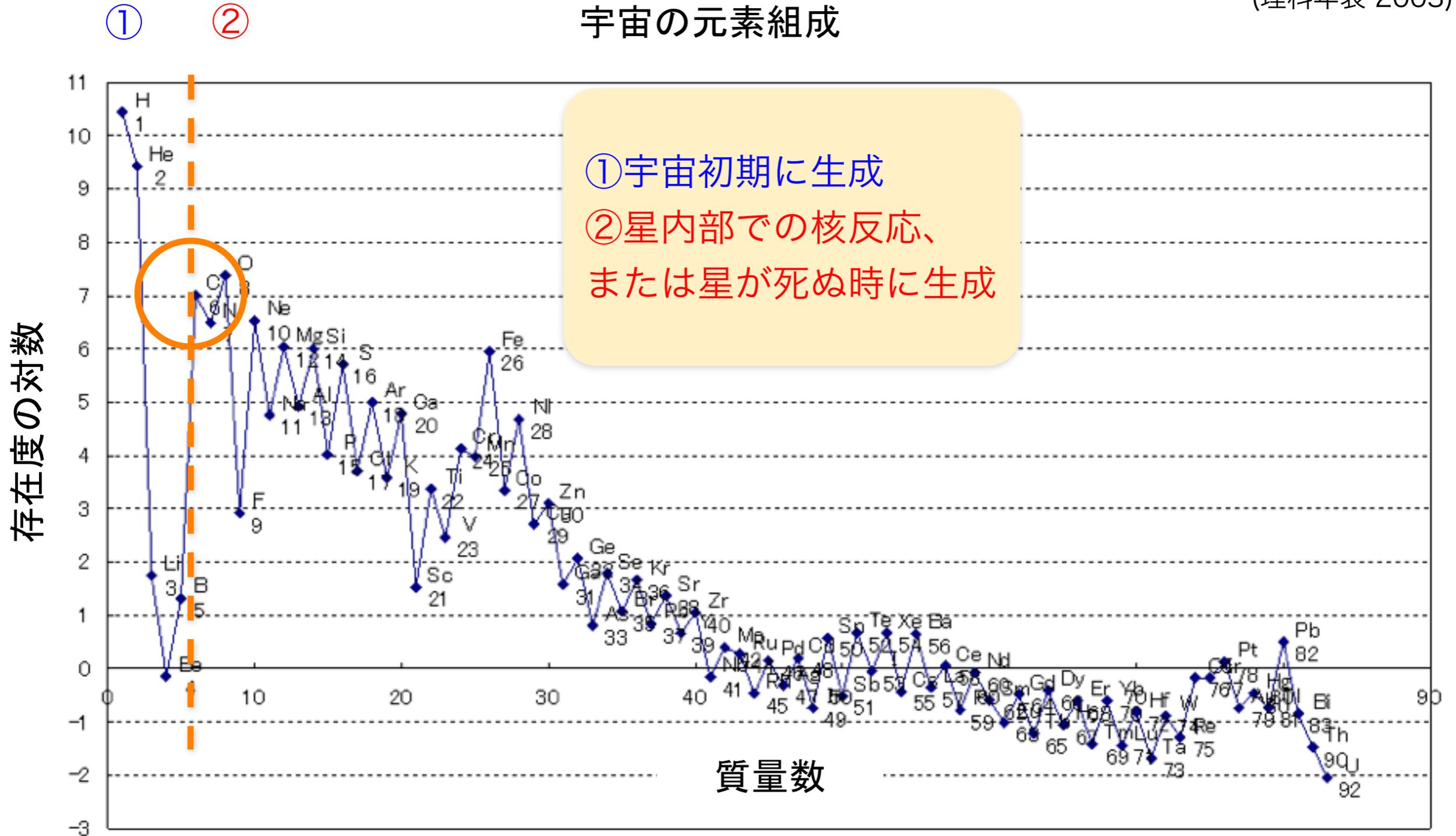
4. 銀河から銀河団への元素拡散

5. 次期X線衛星でさぐる宇宙の元素合成史

# 元素の歴史

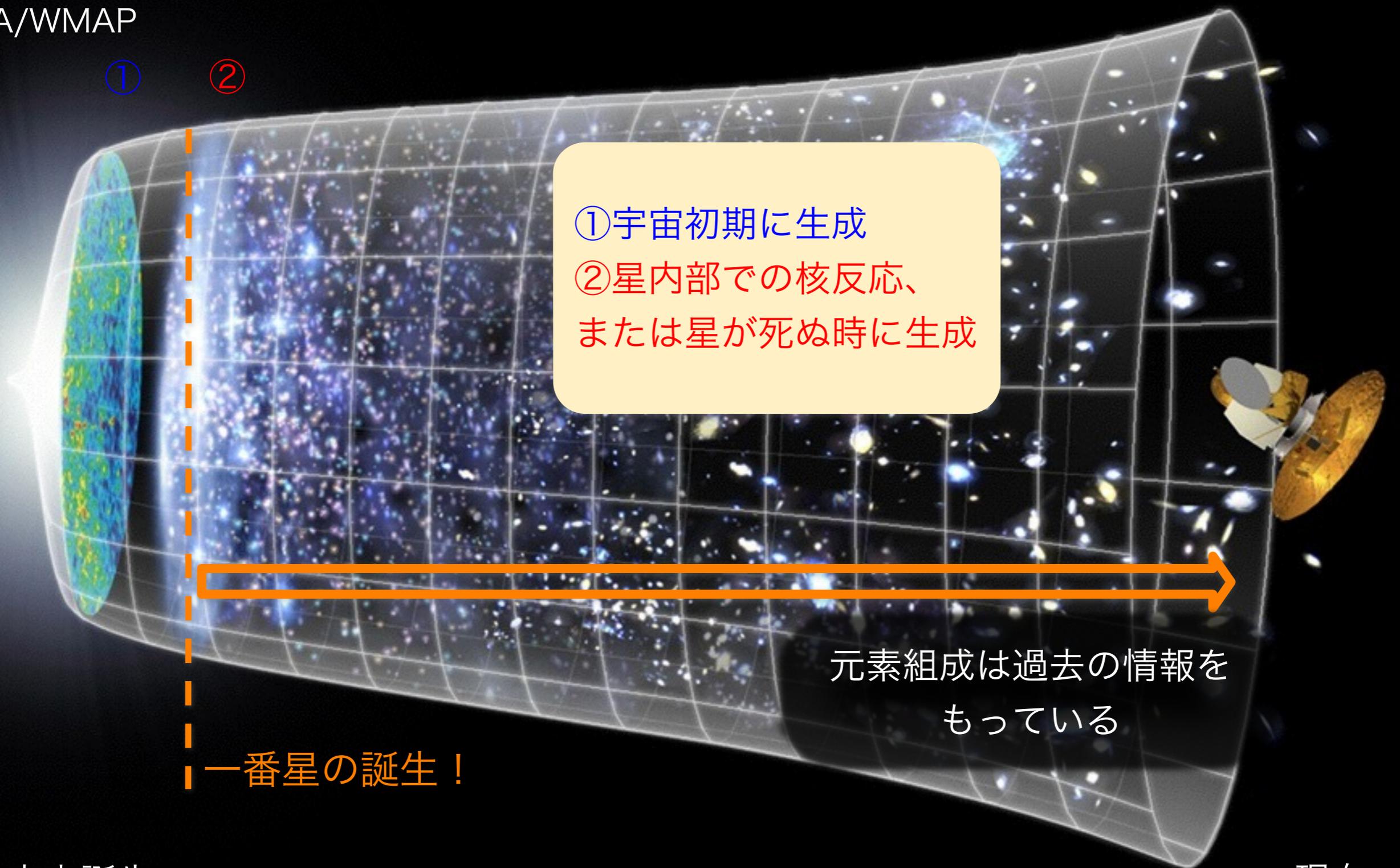
(理科年表 2003)

## 宇宙の元素組成



# 元素の歴史

NASA/WMAP



一番星の誕生！

- ①宇宙初期に生成
- ②星内部での核反応、または星が死ぬ時に生成

元素組成は過去の情報をもっている

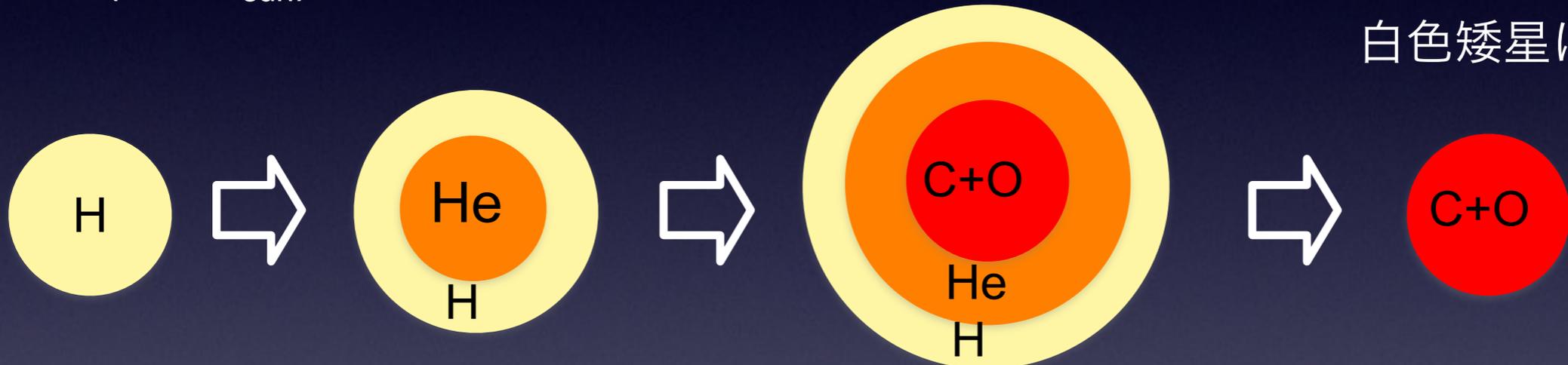
宇宙の化学進化をさぐるよい手がかり！

# 元素の生成

- 星の進化 -

星内部で起こる核融合反応によって元素が生成される

軽い星 ( $< 8 M_{\text{sun}}$ )



外層ガスは放出され  
白色矮星に

重い星 ( $> 8 M_{\text{sun}}$ )

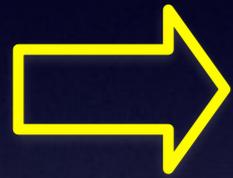


安定なFeまで  
反応が進む

# 元素の供給

- 超新星爆発 -

星内部で起こる核融合反応によって元素が生成される



星の進化の最後に起こす爆発 (超新星爆発) によって  
宇宙空間にばらまかれる

## Ia型超新星爆発

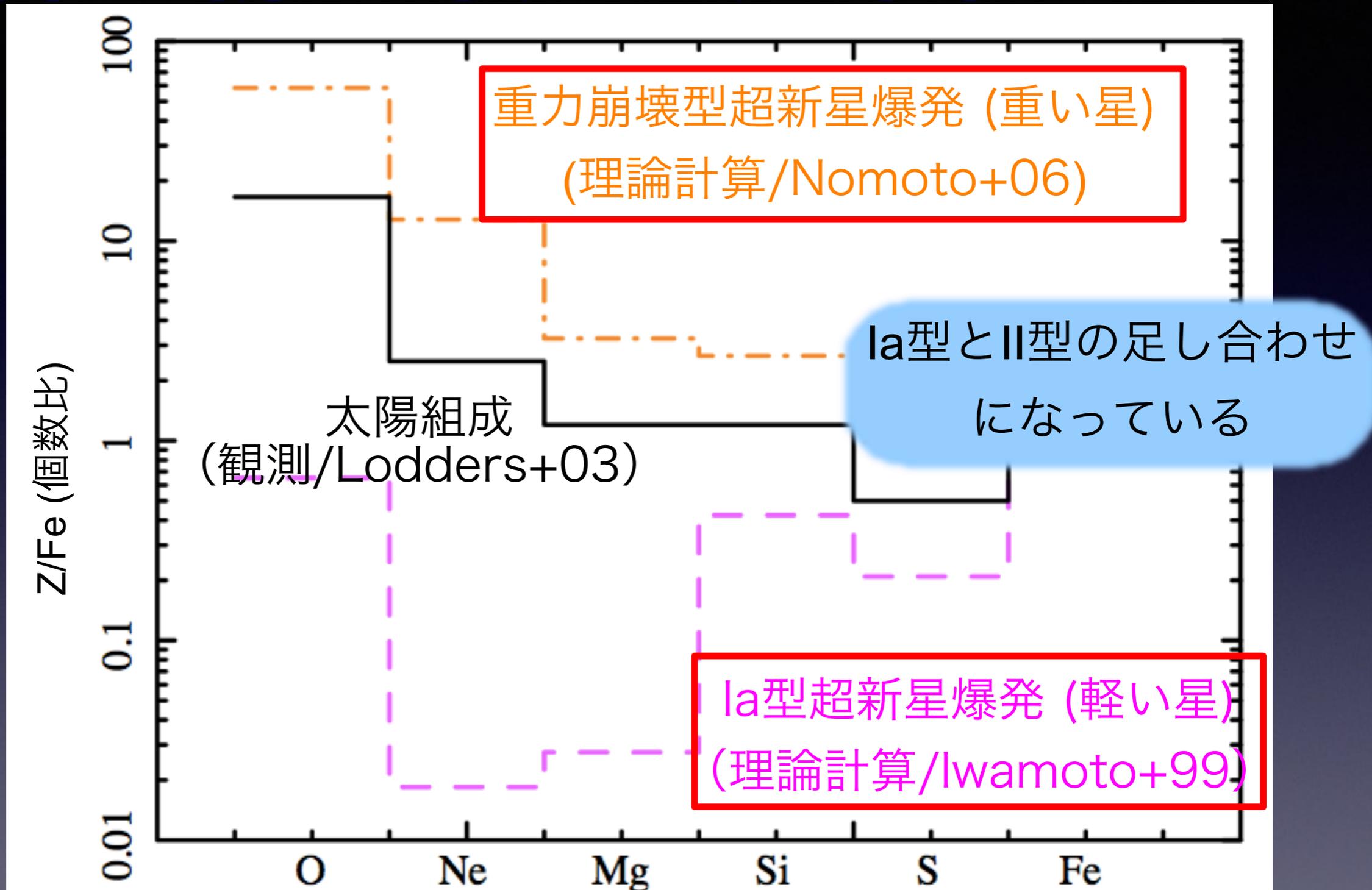
- ◆ 軽い星 ( $< 8 M_{\text{sun}}$ )
- ◆ 白色矮星へ他の星 (連星系)からの質量降着により、チャンドラセカル質量を超えると爆発
- ◆ Feを多く供給する

## 重力崩壊型超新星爆発

- ◆ 重い星 ( $> 8 M_{\text{sun}}$ )
- ◆ Fe中心コアの重力崩壊による爆発
- ◆ O, Ne, Mgを多く供給する

星の質量によって供給する元素が異なる

# 各超新星爆発の元素組成



元素組成比からどのような星がどれくらいの割合で生成されてきたかを推測できる

⇒ 宇宙における星形成史の解明

# 本日のアウトライン

1. なぜ元素か

2. なぜX線か

3. X線でさぐる銀河の元素組成

4. 銀河から銀河団への元素拡散

5. 次期X線衛星でさぐる宇宙の元素合成史

# X線で観えるもの

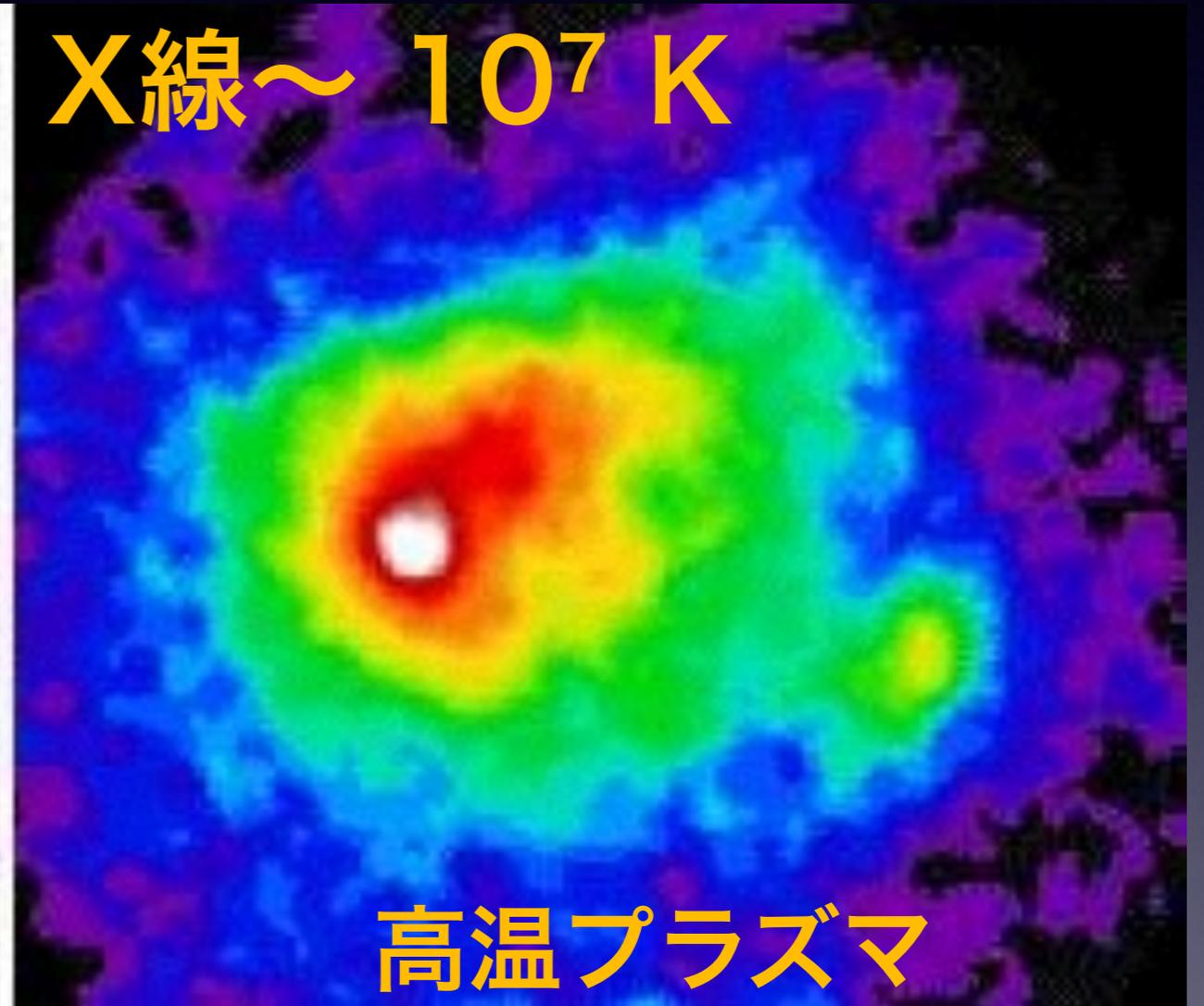
楕円銀河 (M86 M84)

可視光～  $10^3$  K



星、ガス

X線～  $10^7$  K



高温プラズマ

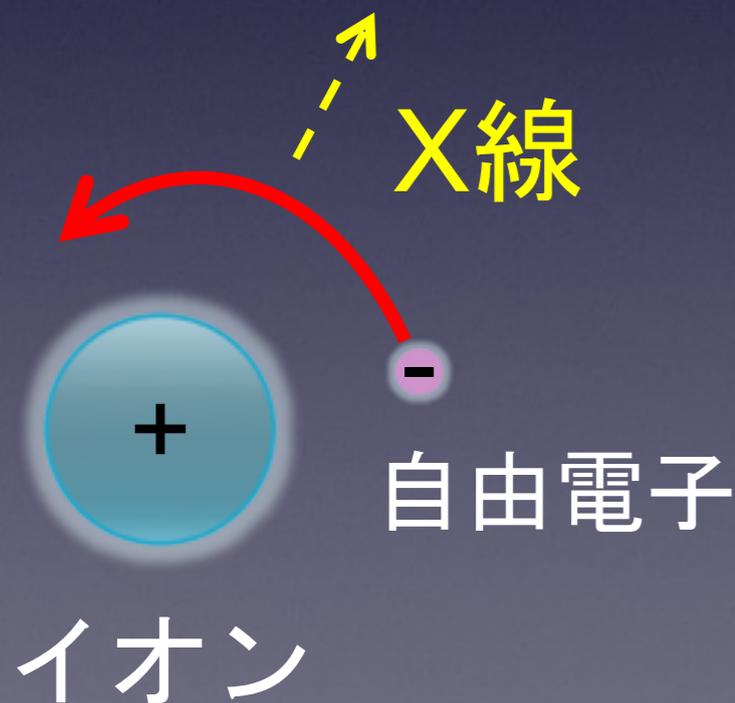
(ISASニュース 2002.2)

- 可視光より広がった放射
- 可視光と異なる物理量を反映

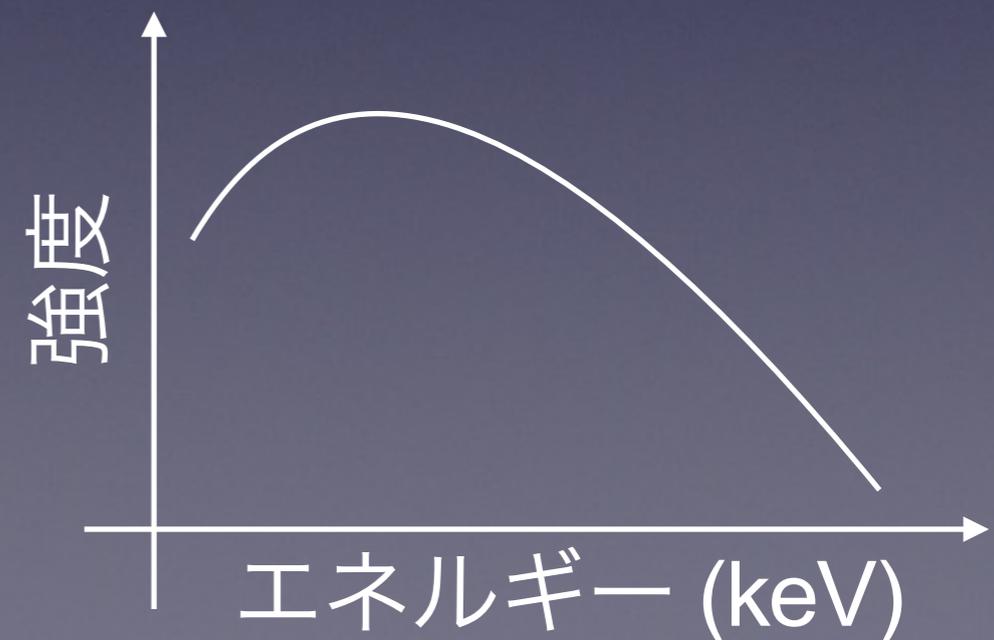
# X線の放射メカニズム

放射媒体 (主に銀河/銀河団) …  
衝突電離平行状態の高温プラズマ

1. 熱的制動放射…プラズマ中の自由電子がイオンとの相互作用により放出される放射



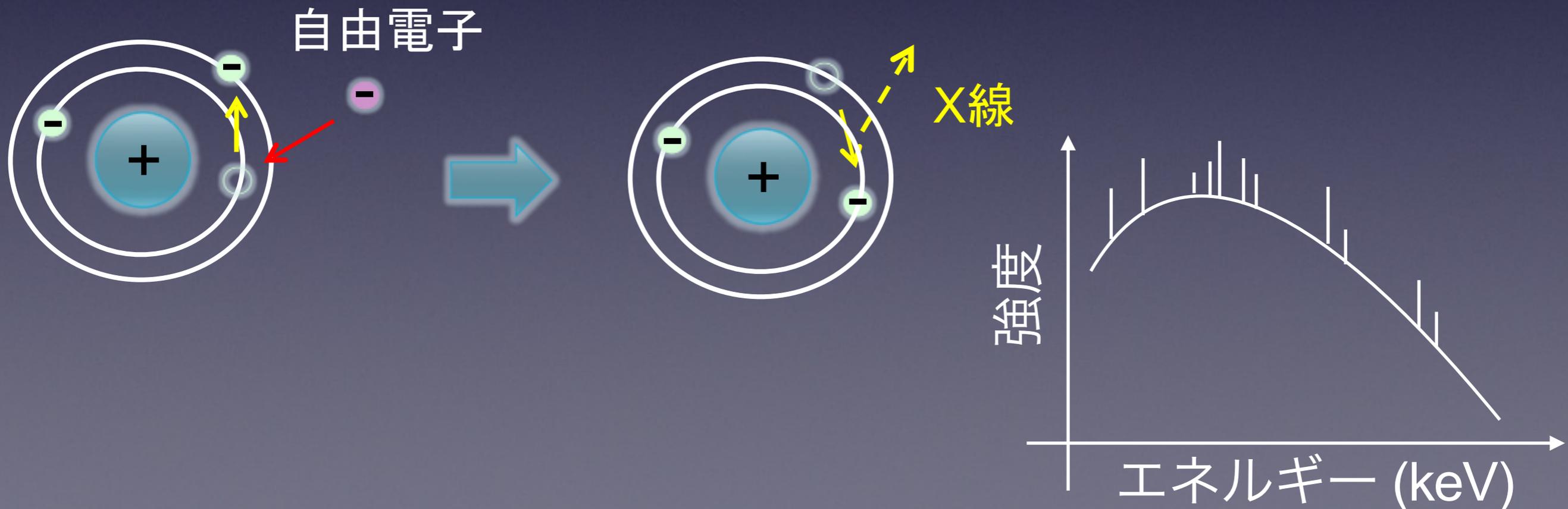
電子のエネルギー分布がボルツマン分布のため、連続的な成分



# X線の放射メカニズム

放射媒体 (主に銀河/銀河団) …  
衝突電離平行状態の高温プラズマ

2. 輝線放射…プラズマ中の自由電子がイオンの電子を  
衝突励起することにより起こる放射

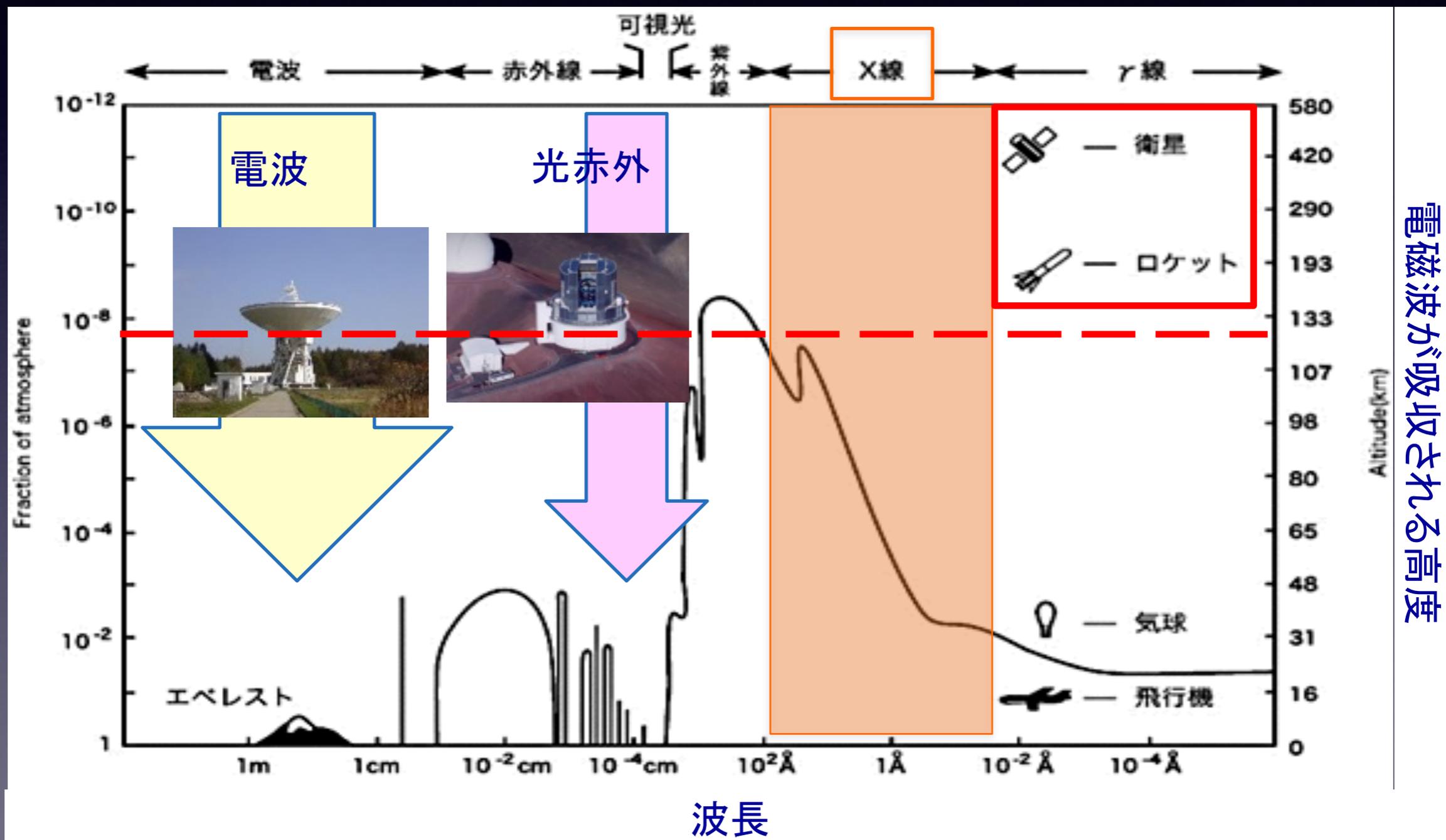


# なぜX線で元素組成を探るか

- ◆ 他の波長より物理過程がシンプル
  - 放射過程がシンプル (熱平衡と見なせ、放射は熱制動放射と元素の輝線の足し合わせ)
  - 輝線強度の計算がシンプル (X線のエネルギー帯域では、多くの元素が水素状 or ヘリウム状イオンになっている)
- ◆ 最低限必要な元素が全て検出できる
  - X線スペクトルには、O, Ne, Mg, Si, Feの輝線が見える

# X線で観るために

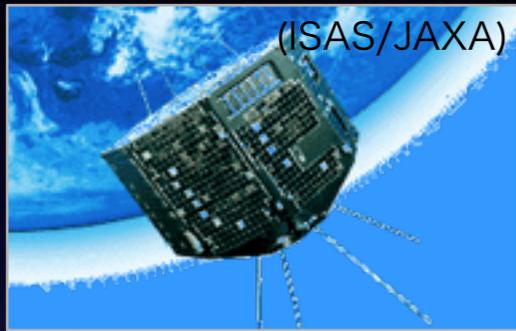
- X線は地上まで届かない



電磁波が吸収される高度

(ASTRO-HのHPより)

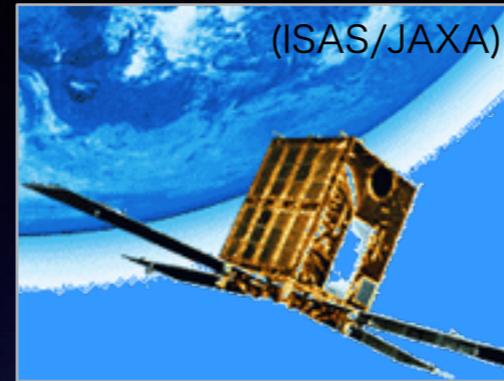
# 日本のX線天文衛星



はくちょう  
(1979-85)



てんま  
(1983-88)



ぎんが  
(1987-91)

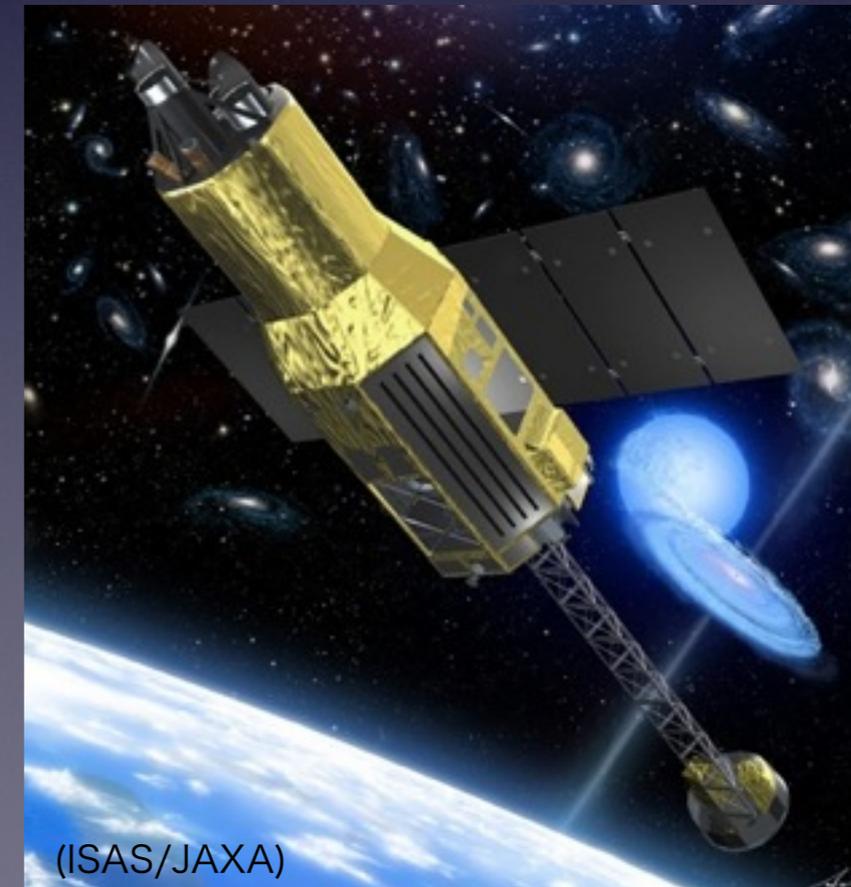


あすか  
(1993-01)



すざく  
(2005-)

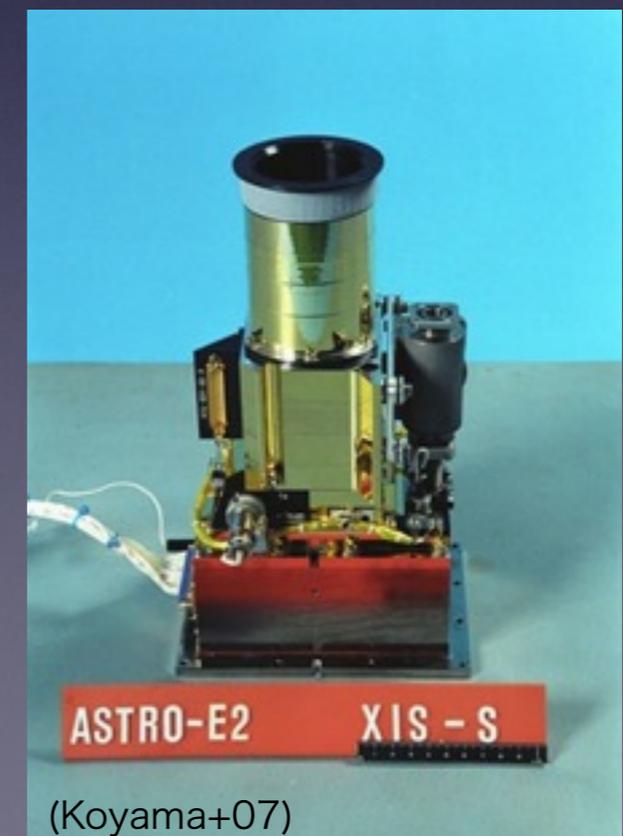
次期X線天文衛星  
ASTRO-Hへ！！  
(2015年  
打ち上げ予定)



# X線天文衛星「すざく」

- ◆ 日本で5番目のX線天文衛星
  - 現在運用中
- ◆ エネルギー帯域 (0.2-700 keV)
  - 1 eV ~ 1240 nm ~ 10<sup>4</sup> K
- ◆ 搭載されている検出器 (1部のみ)
  - X線CCDカメラ XIS (0.2-12 keV)
  - 低いX線バックグラウンド
  - シャープな検出器応答関数

⇒ 酸素やマグネシウムの輝線を検出できるように！！



# 現在稼働中の X 線天文衛星

Chandra  
(米, 1999)



XMM-Newton  
(欧, 1999)

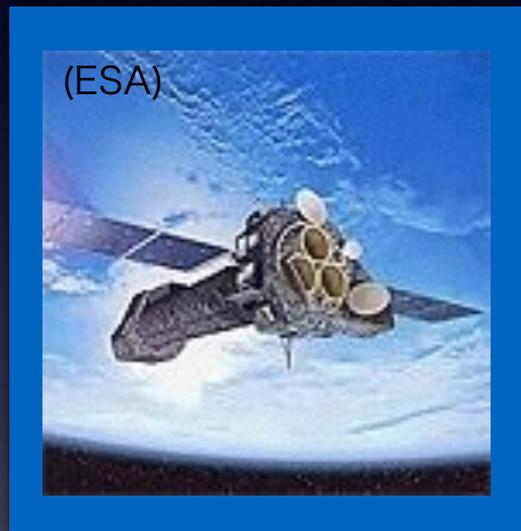


すざく  
(日, 2005)

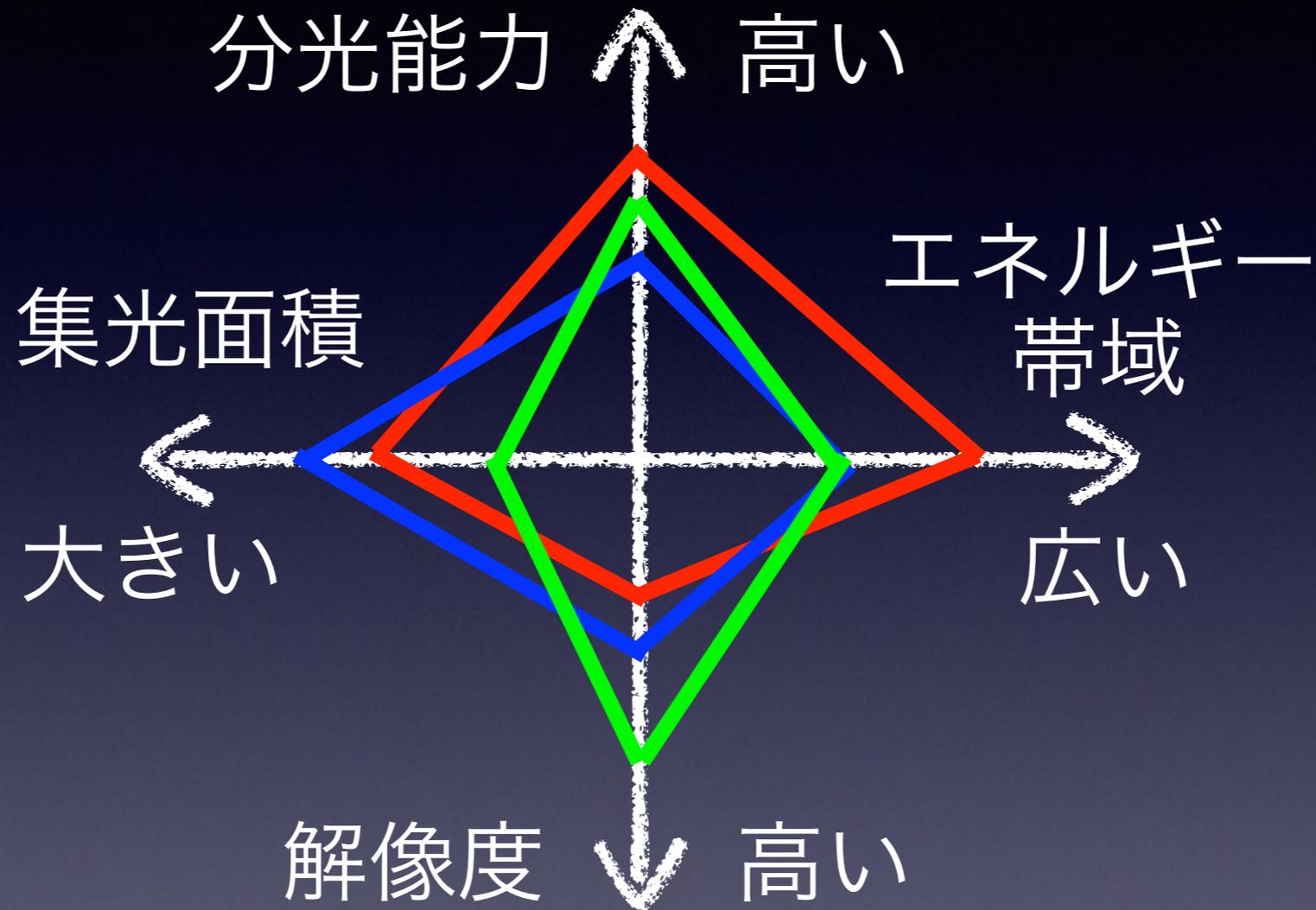


# 現在稼働中の X 線天文衛星

XMM-Newton  
(欧, 1999)



すざく  
(日, 2005)



Chandra  
(米, 1999)



# 本日のアウトライン

1. なぜ元素か

2. なぜX線か

3. X線でさぐる銀河の元素組成

4. 銀河から銀河団への元素拡散

5. 次期X線衛星でさぐる宇宙の元素合成史

# 銀河

## 楕円銀河



©SDSS

## 渦巻銀河 (不規則銀河)



©NASA



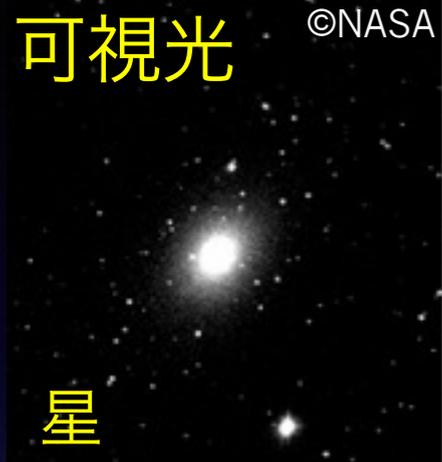
©NASA

主な星	古い	若い	若い
冷たいガス (星のもと)	ほぼない	多い	
星形成	していない	している	爆発的にしている
高温ガスの起源	小中質量星からの質量放出 + 現在起こっているSN Ia		恒星のガス + 現在起こっているSN

# 楕円銀河中の重元素

可視光

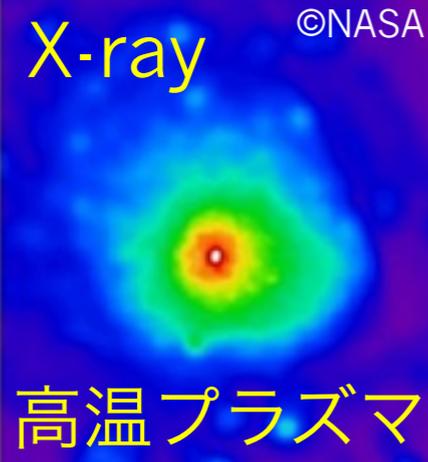
©NASA



星

X-ray

©NASA



高温プラズマ

## 楕円銀河

- 星形成率が低い
- ほとんどの星が小中質量星で古い
- X線を放射する高温プラズマは星よりもより広い領域に分布

## 星間ガス中の重元素

星の質量放出 + 現在起こっているSN Ia  
(O, Ne, Mg, Si, Fe) (Fe)



星のガスは、その星ができた当時のガス

- 元素もその当時の元素
- 元素組成比は当時の星形成の情報をもっている

# 現在まで測定された 高温プラズマ中の重元素組成

## Feの組成

	手法	Fe
高温プラズマ	これまでのX線衛星 (ASCA, XMM, Chandra)による観測	~ 1 太陽組成
星 + 現在のSN Ia	可視光観測 + 現在のSN Iaの発生頻度	~ 2 太陽組成

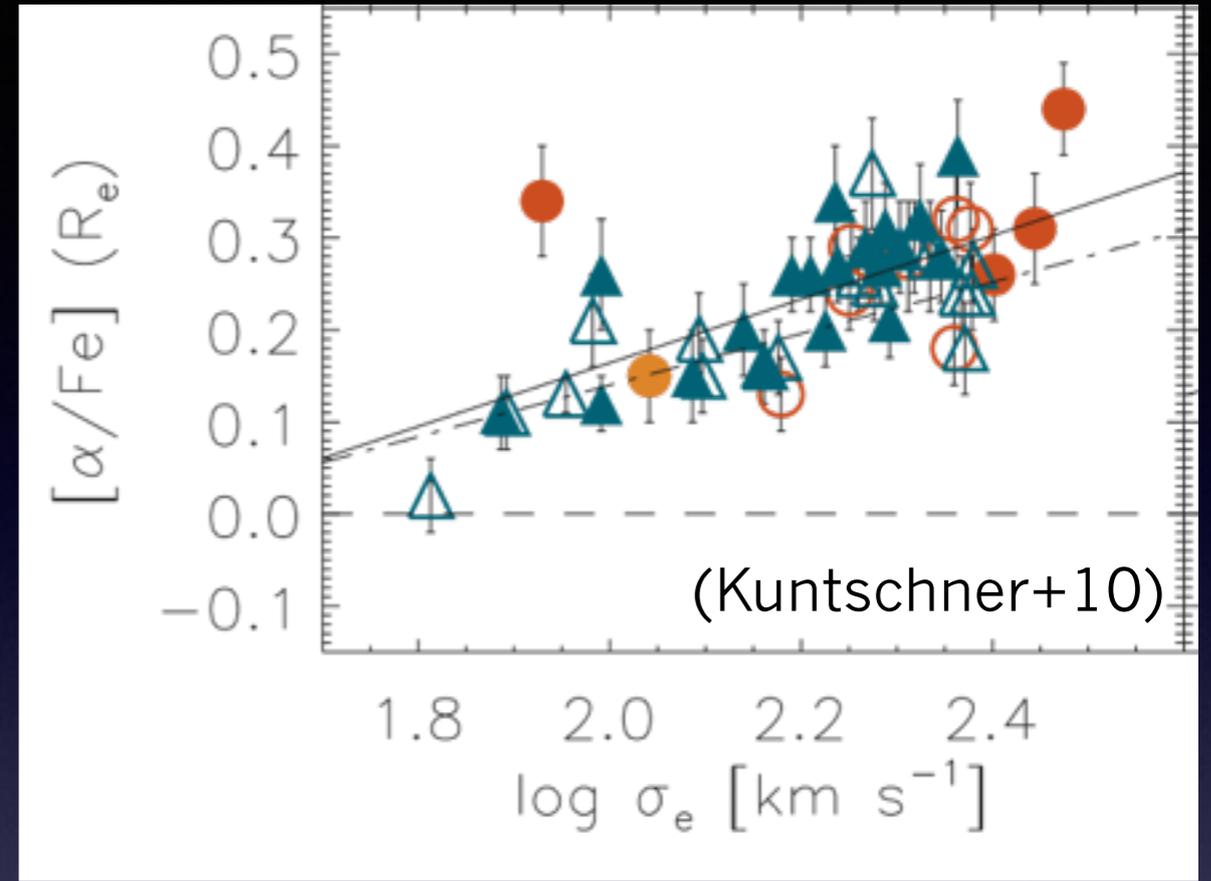
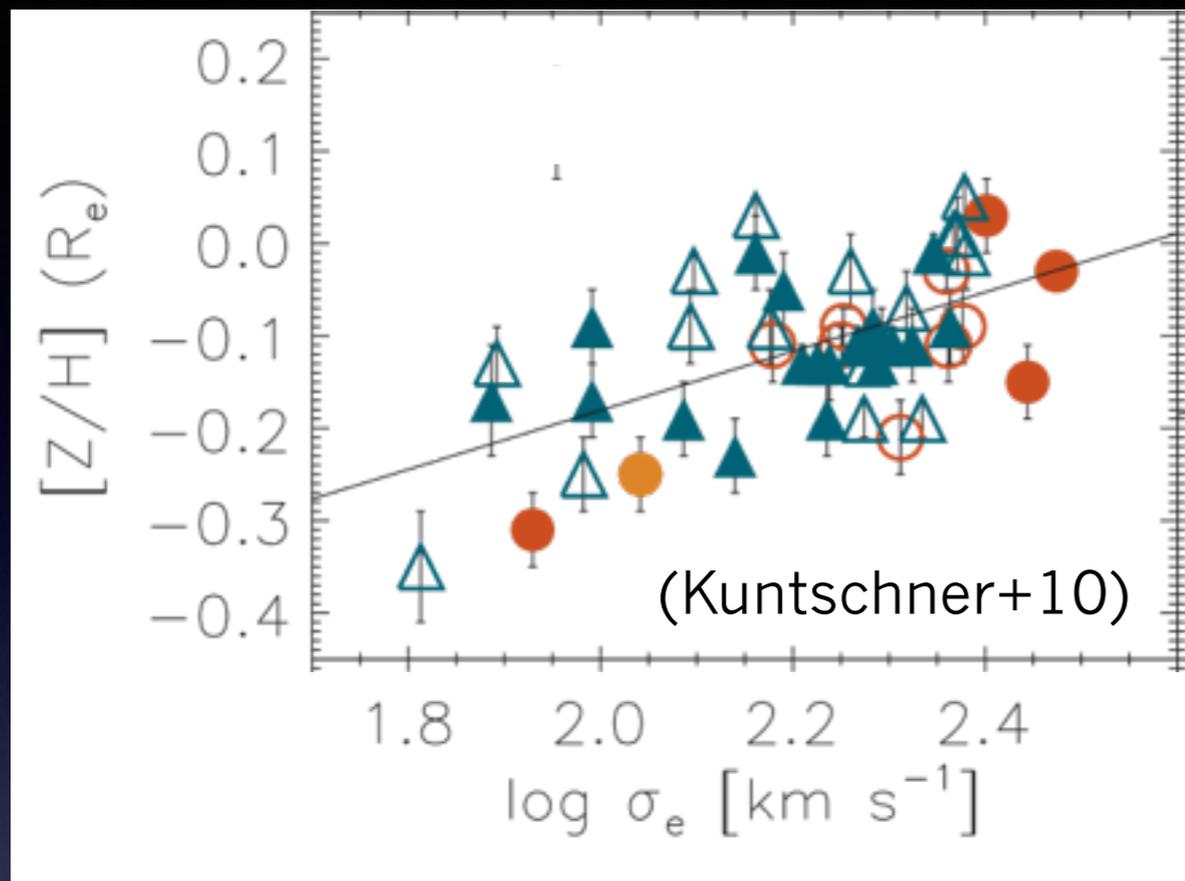
「星と現在のSN Iaで生成された量」が「高温プラズマで測定された量」と矛盾

## O/Fe, Mg/Fe, Si/Feの組成比

	Mg/Fe, Si/Fe	O/Fe
高温プラズマ (X線)	~ 1 太陽組成	~ 0.5 太陽組成
星 (可視光)	> 1 太陽組成 (II型 like)	

- Mg/Fe, Si/Fe:  
Feの組成を考えると星の組成とconsistent
- O/Fe:  
酸素だけ低い?

# 可視光観測とX線観測の補完性



元素組成、組成比ともに速度分散 $\sigma$ に比例

可視光とX線による観測の比較

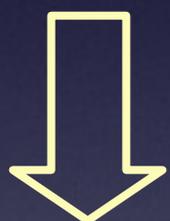
( $r_e$ : 可視光で全体の光度の半分が含まれる半径)

	対象	測定範囲	メリット	デメリット
可視光	星	$< r$	星だけの組成を測定できる	1. 範囲が中心領域のみ 2. 元素組成の見積もりが星の年齢に大きく依存
X線	高温プラズマ	~	銀河全体を測定できる	星と現在のSN Iaの足し合わされた元素組成を測定

# 楕円銀河の 元素組成比の調査

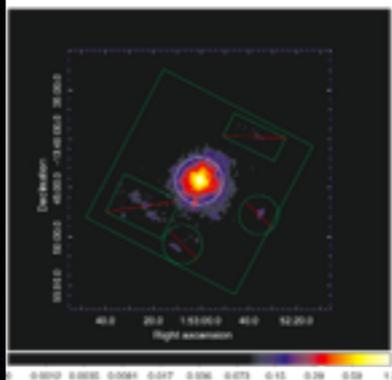
(Konami+14)  
天文月報7月号

- 鉄が少ない？
- O/Feなどの元素組成は？

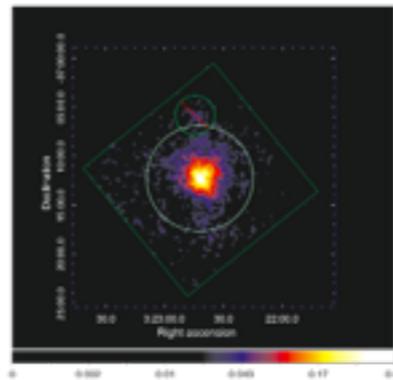


- 低バックグラウンドで  
酸素/マグネシウム輝線に  
高い感度をもつ「すざく」  
で調査
- 楕円銀河13天体、  
SO銀河4天体を解析

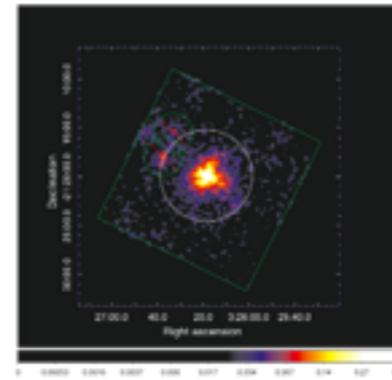
NGC720



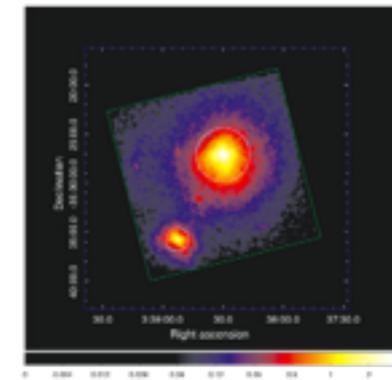
NGC1316



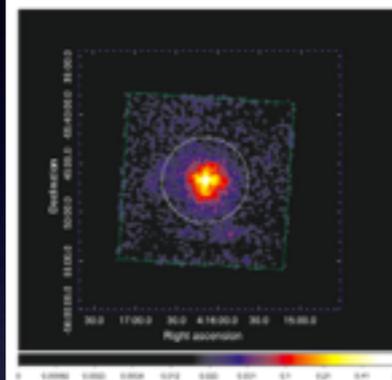
NGC1332



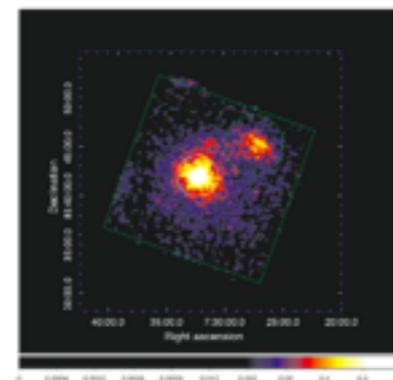
NGC1399 & NGC1404



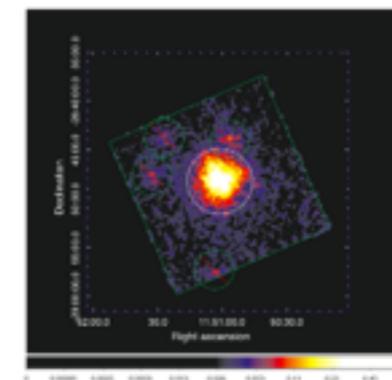
NGC1553



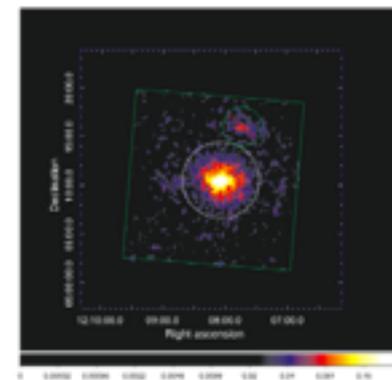
NGC2300



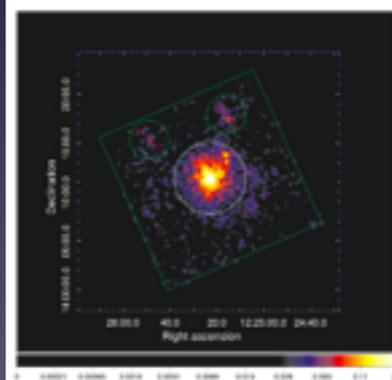
NGC3923



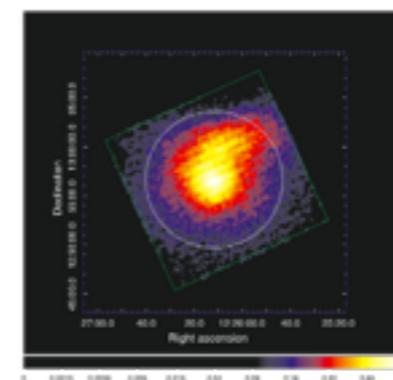
NGC4125



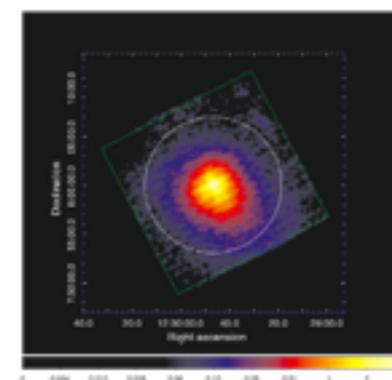
NGC4382



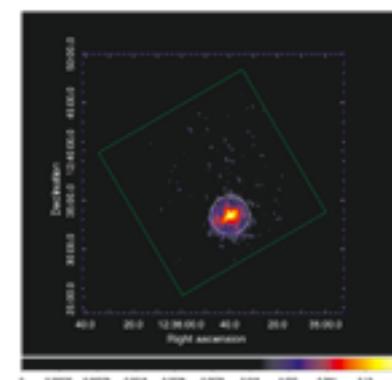
NGC4406



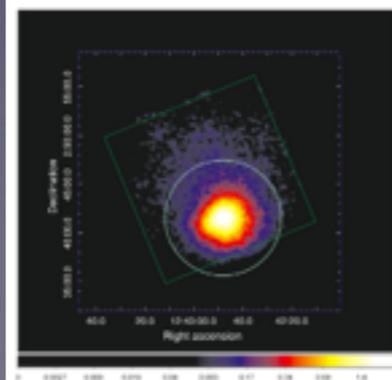
NGC4472



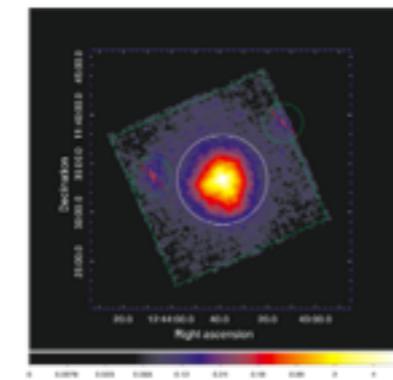
NGC4552



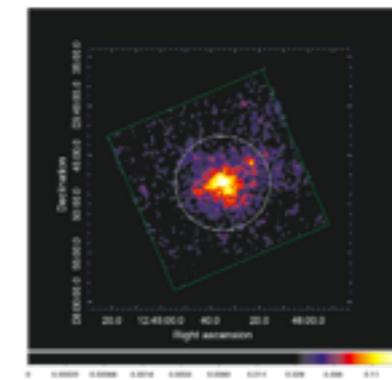
NGC4636



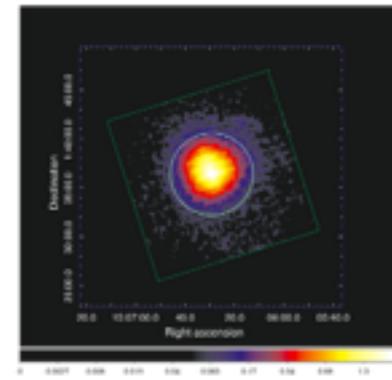
NGC4649



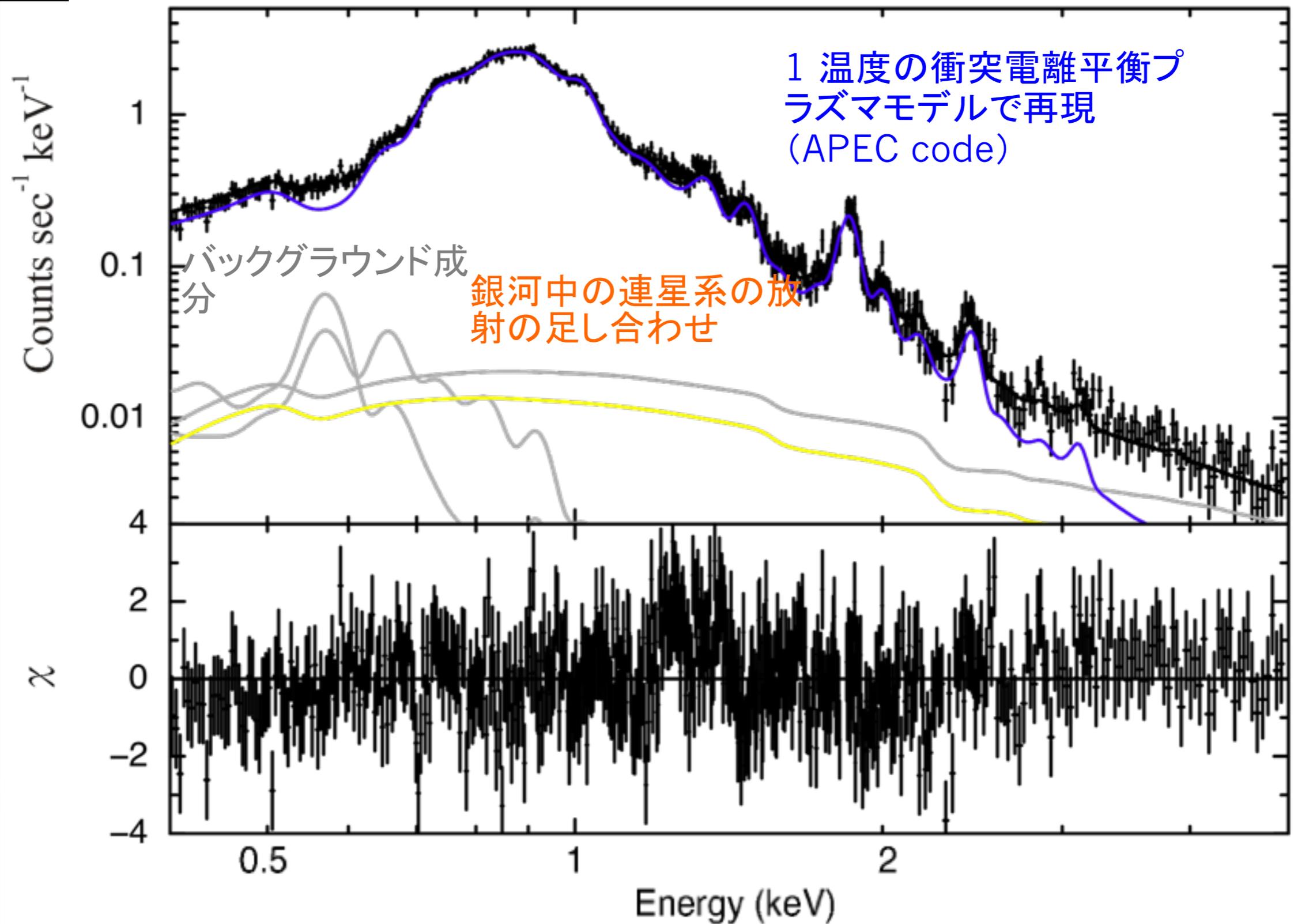
NGC4697



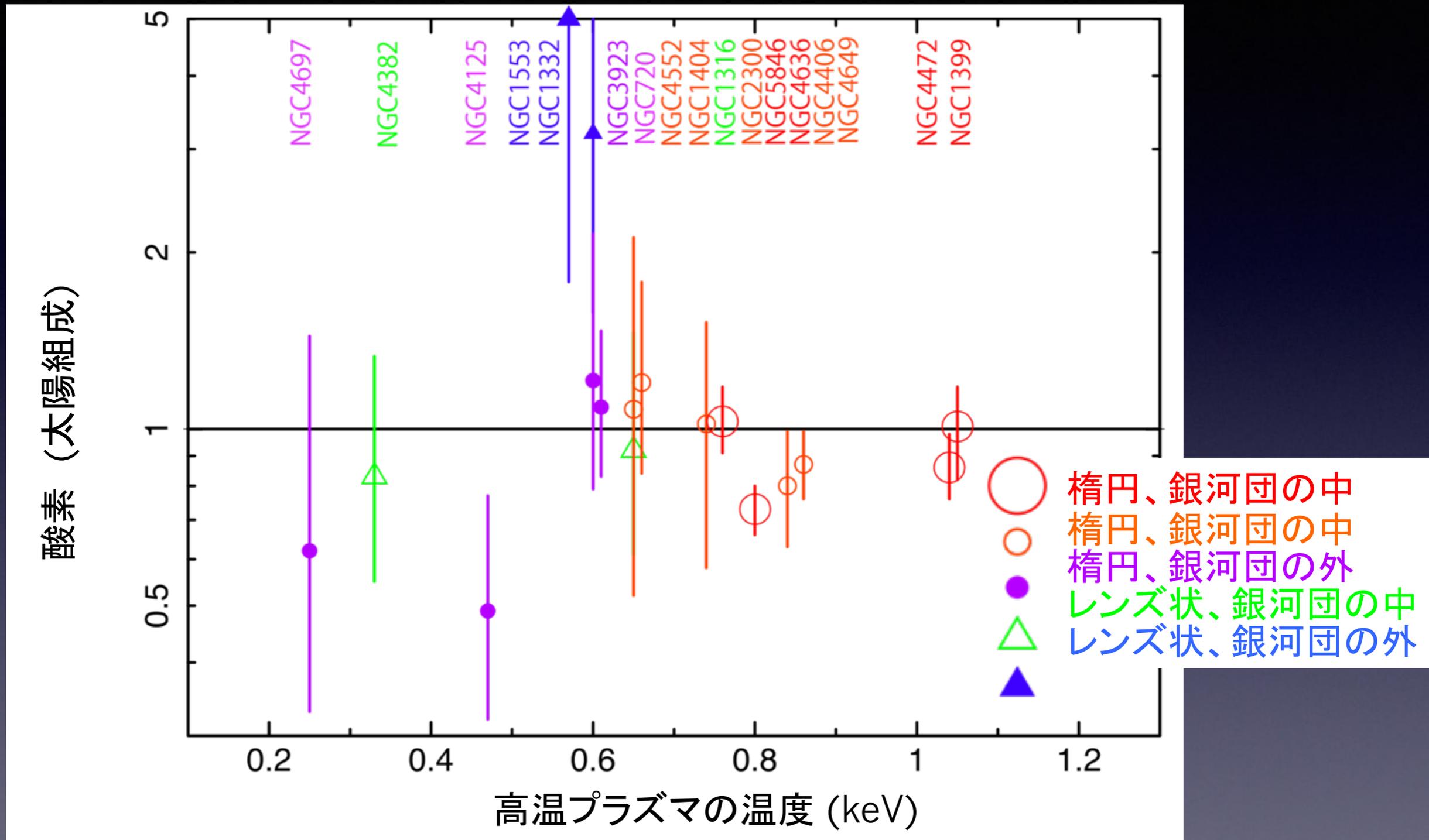
NGC5846



# スペクトル解析 — NGC4636 —

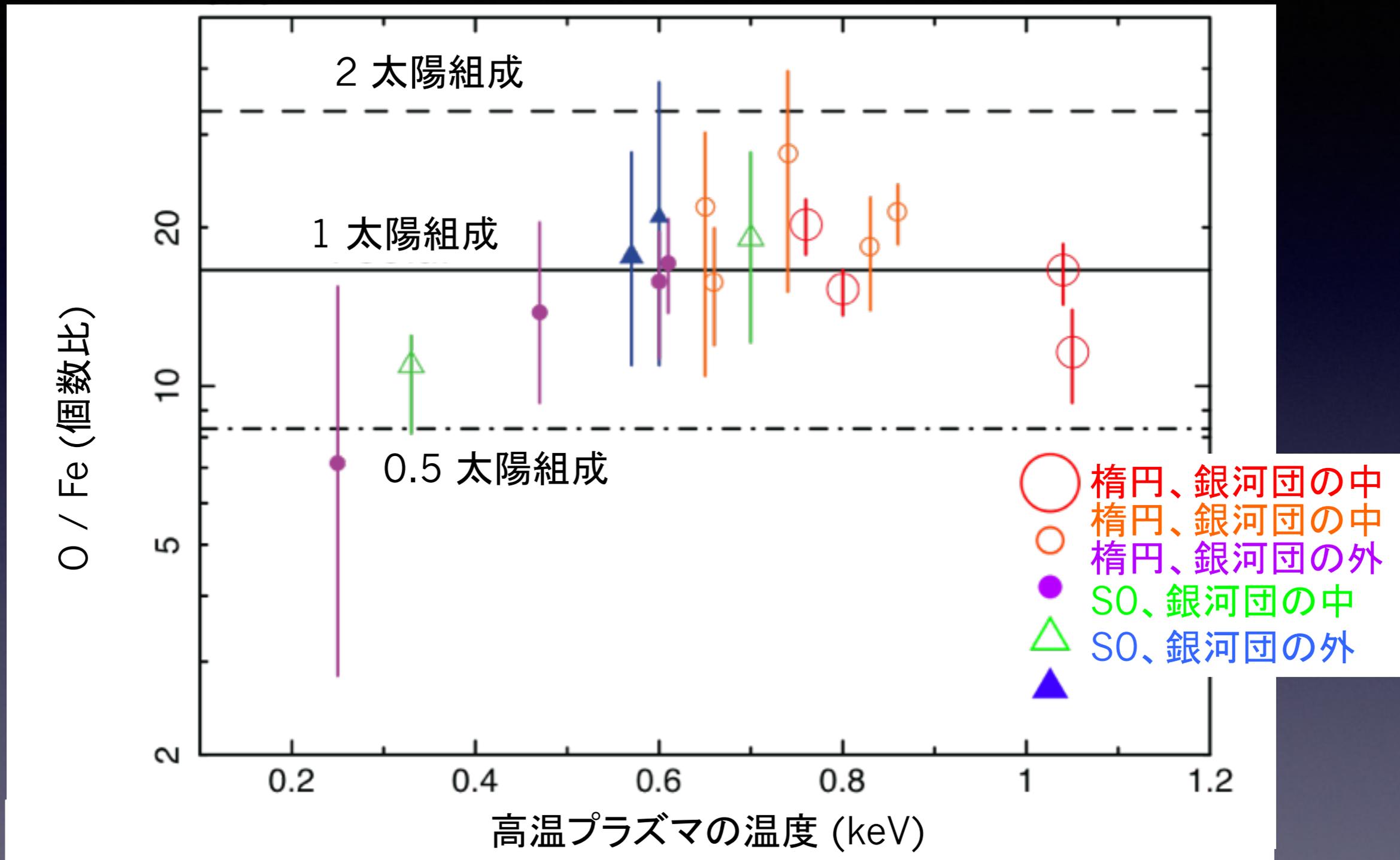


# 結果 — 元素組成 —



- \* 全ての銀河の元素組成(O, Ne, Mg, Si, Fe)はおおよそ1 太陽組成
- \* 形態 (楕円 vs レンズ状)や環境 (銀河団中 vs 外)でも違いは見られない

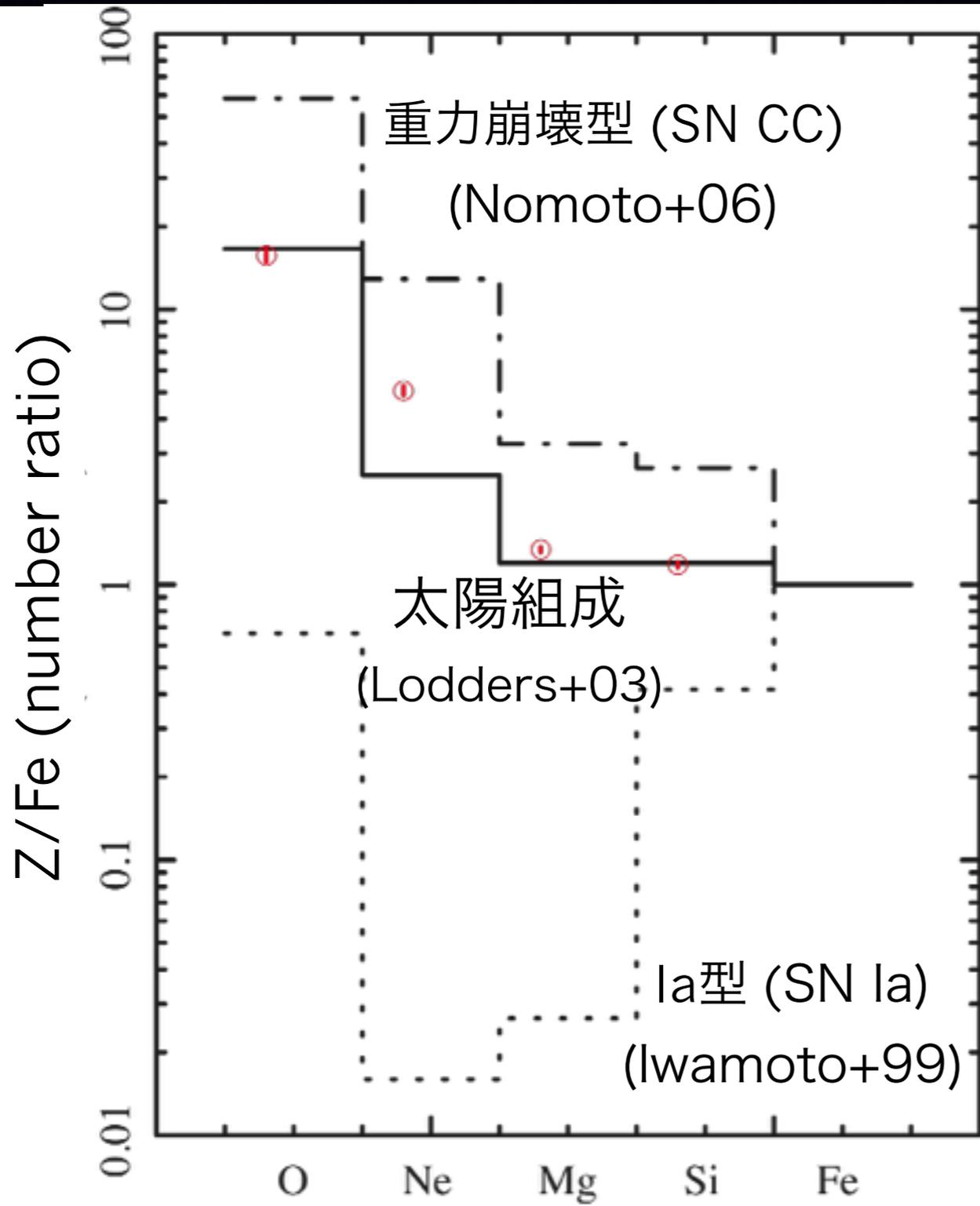
# 結果 — 元素組成比 —



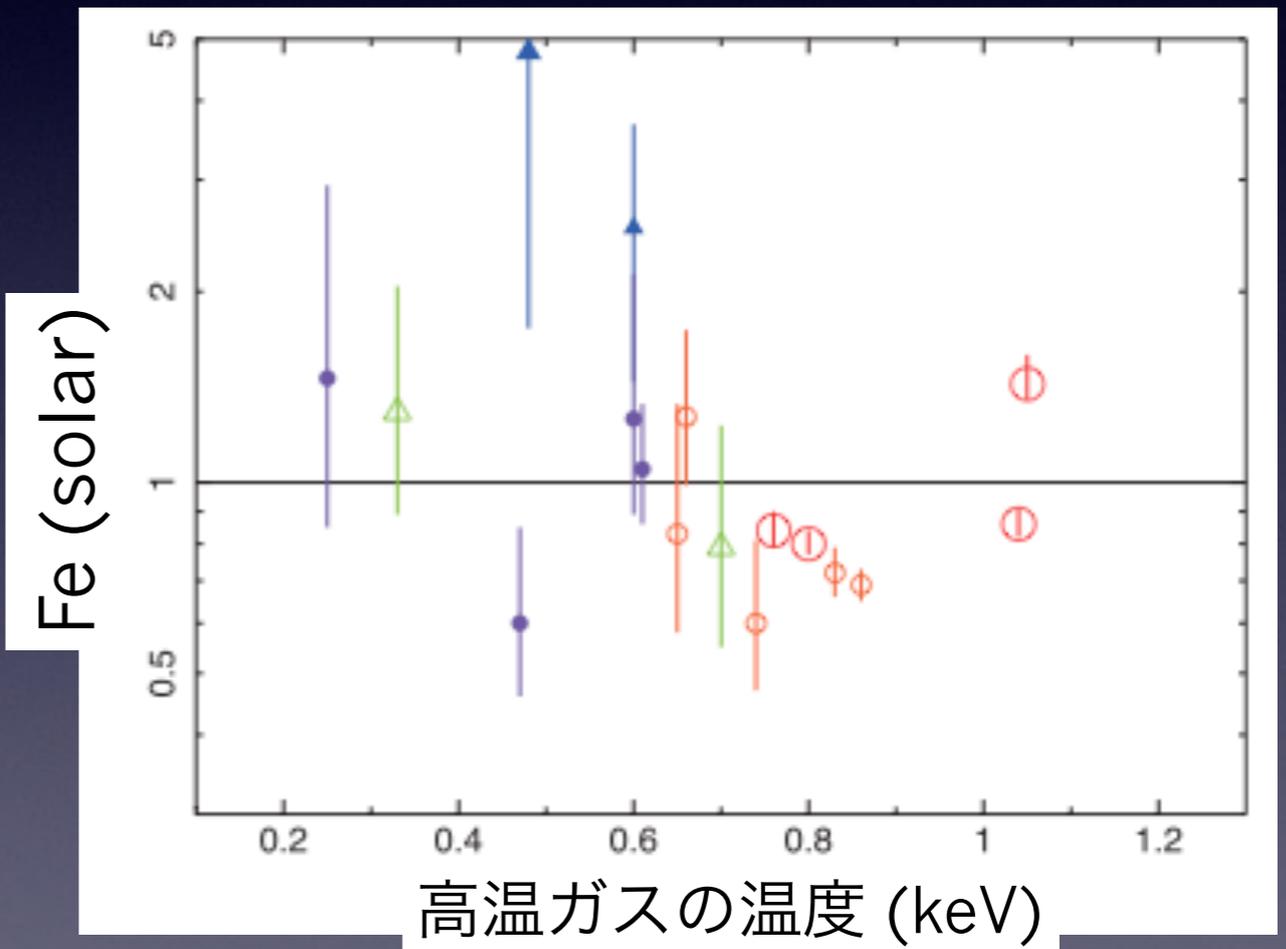
- \* 全ての銀河の元素組成比 (O/Fe, Mg/Fe, Si/Fe)はおおよそ1 太陽組成
- \* 形態 (楕円 vs S0)や環境 (銀河団中 vs 外)でも違いは見られない

# 現在起こっているSN Iaから供給されたFe

重み付き平均値 (重元素組成)



- 星間ガス中のFeはそれぞれ、  
SN Ia: 70%, SN CC 30%の割合で供給



- Feの重み付き平均値は 0.8 太陽組成  
→ ~0.56太陽組成が現在のSN Iaから供給

# 考察 — Feの組成 —

	Fe (太陽組成)	手法
高温プラズマ (現在のSN Ia分)	~ 0.8 (~0.56)	X線スペクトル解析 全体の重み付き平均
現在のSN Ia	2.8 – 13.9	可視光観測 + 現在のSN Iaの発生頻度 (可視光観測)から計算

→ 高温プラズマの鉄の量が少ない？

\* 高温プラズマに十分混ぜられる or 暖められる前に銀河間空間に逃げた？

- Tang & Wang (2010)によるシミュレーションではアウトフローにより外側へ逃げていくFeを再現

⇒ 銀河からの元素供給を示唆

# 本日のアウトライン

1. なぜ元素か
2. なぜX線か
3. X線でさぐる銀河の元素組成
4. 銀河から銀河団への元素拡散
5. 次期X線衛星でさぐる宇宙の元素合成史

# 銀河

## 楕円銀河



## 渦巻銀河 (不規則銀河)



主な星	古い	若い	若い
冷たいガス (星のもと)	ほぼない	多い	
星形成	していない	している	爆発的にしている
高温ガスの起源	小中質量星からの質量放出 + 現在起こっているSN Ia		恒星のガス + 現在起こっているSN

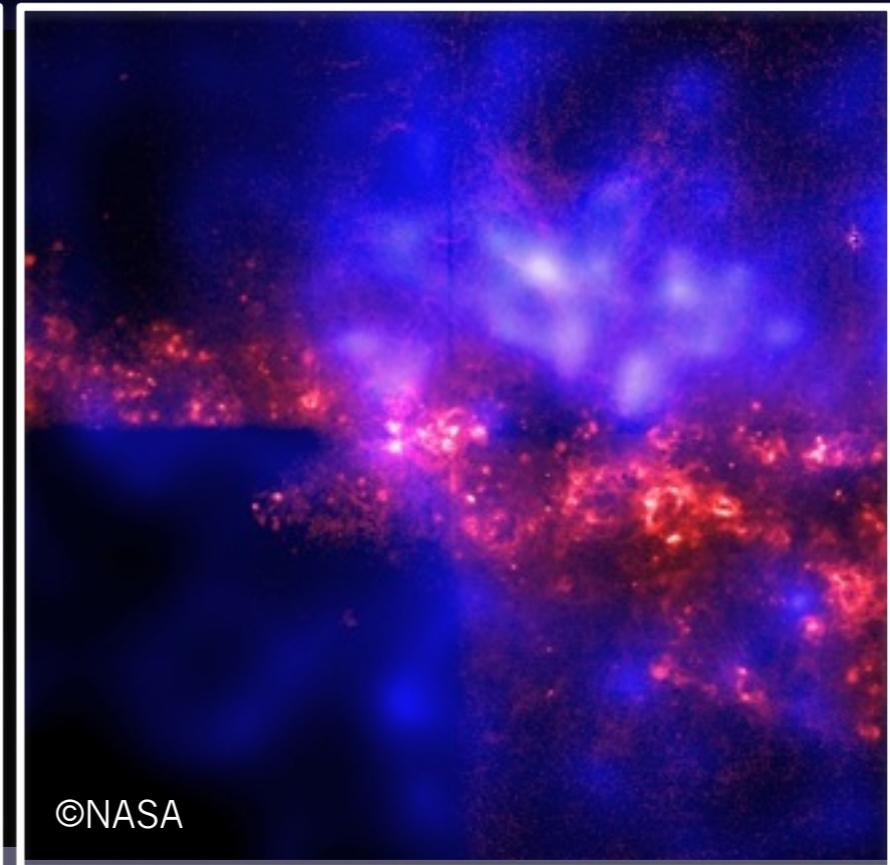
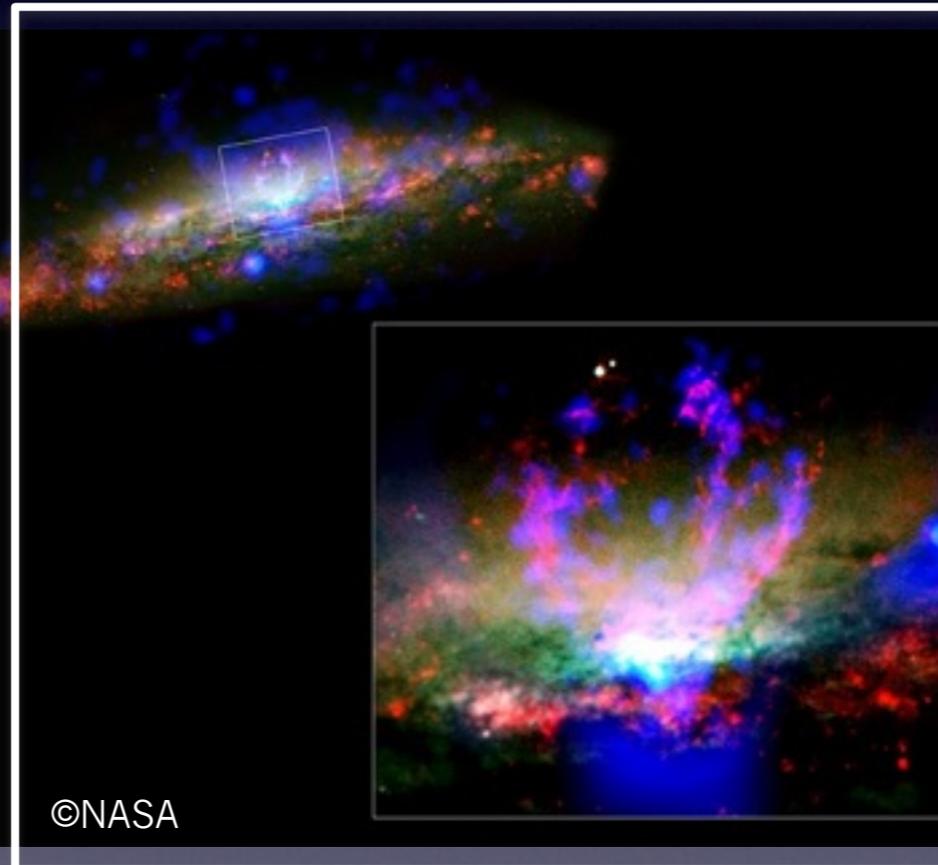
# スターバースト銀河

1年間に作る星の量：天の川銀河  
スターバースト銀河

~1  $M_{\text{sun}}$

≧ 10  $M_{\text{sun}}$

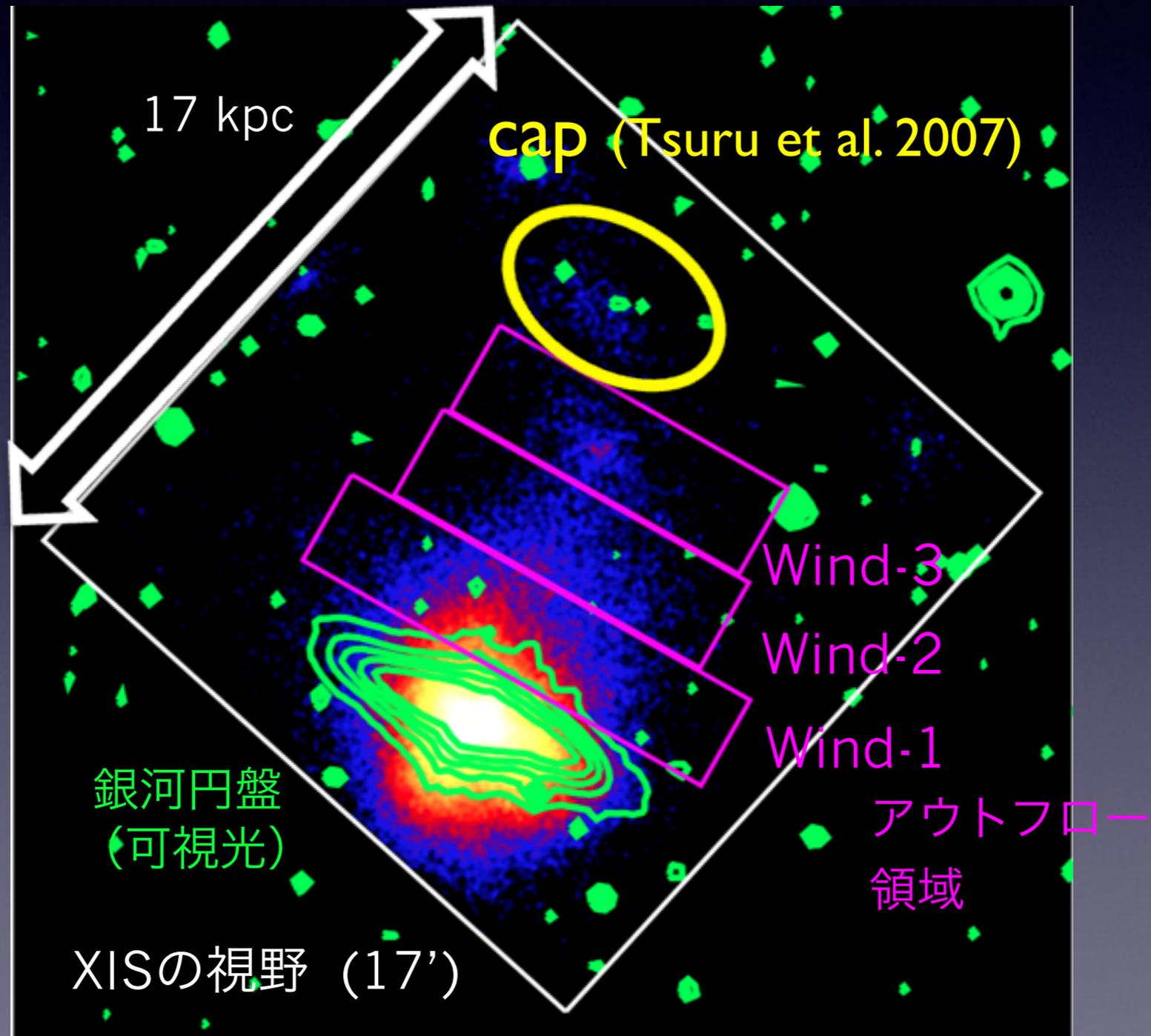
青：高温プラズマ その他：星、ガス



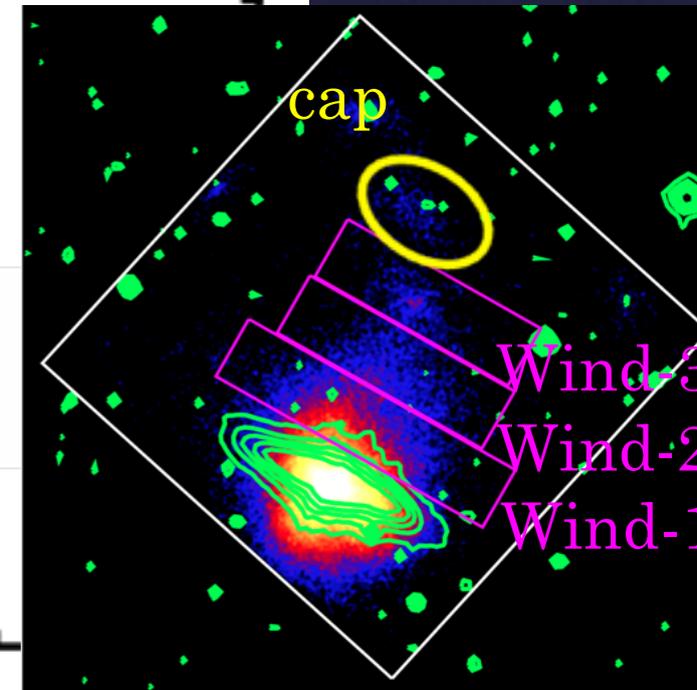
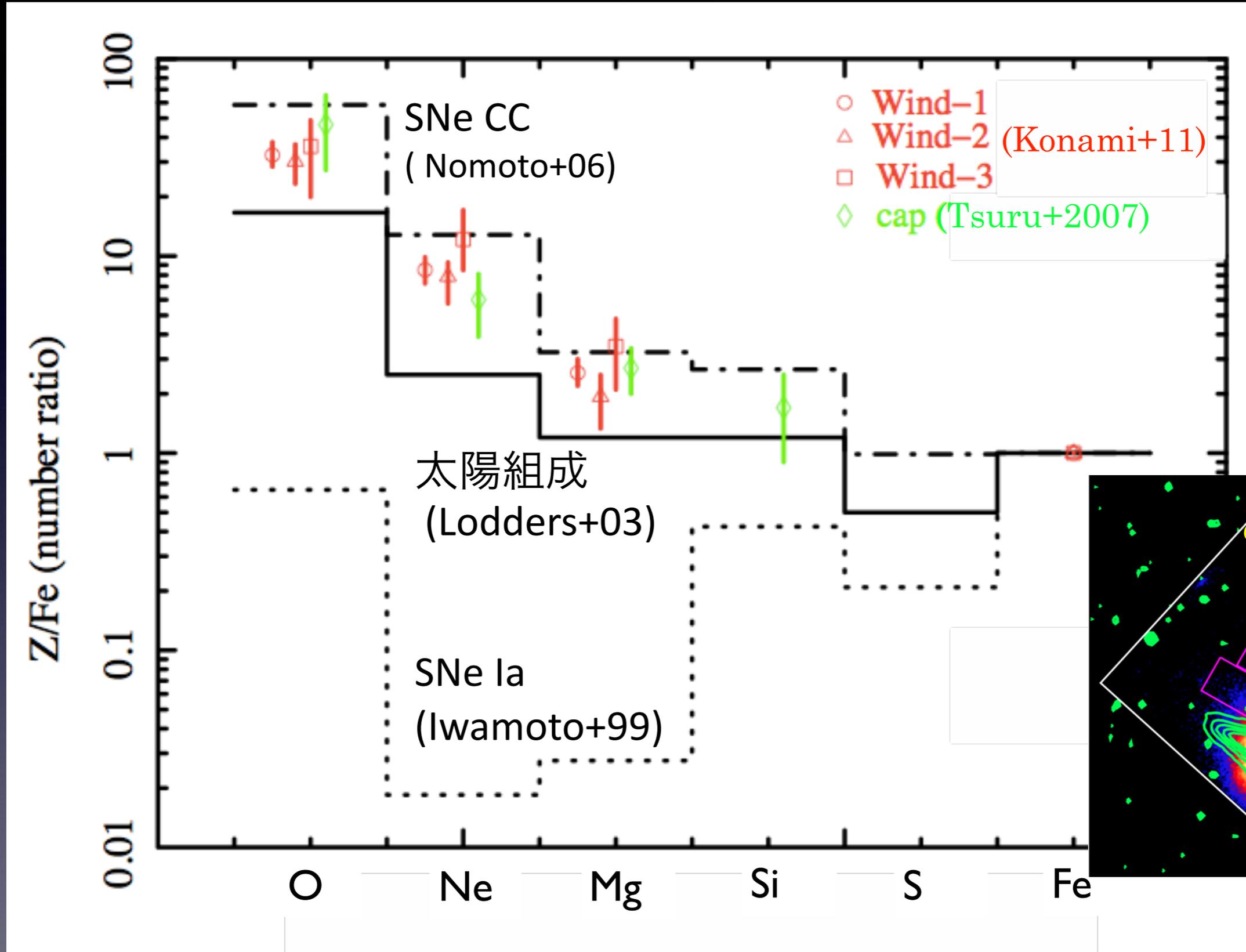
爆発的に星を作る ⇔ 次々に星が爆発する ⇔ ガスが外に吹き出す  
スターバースト銀河は銀河間空間に物質を供給している有力候補

# スターバースト銀河 M82

「すざく」イメージ (0.3–3 keV)

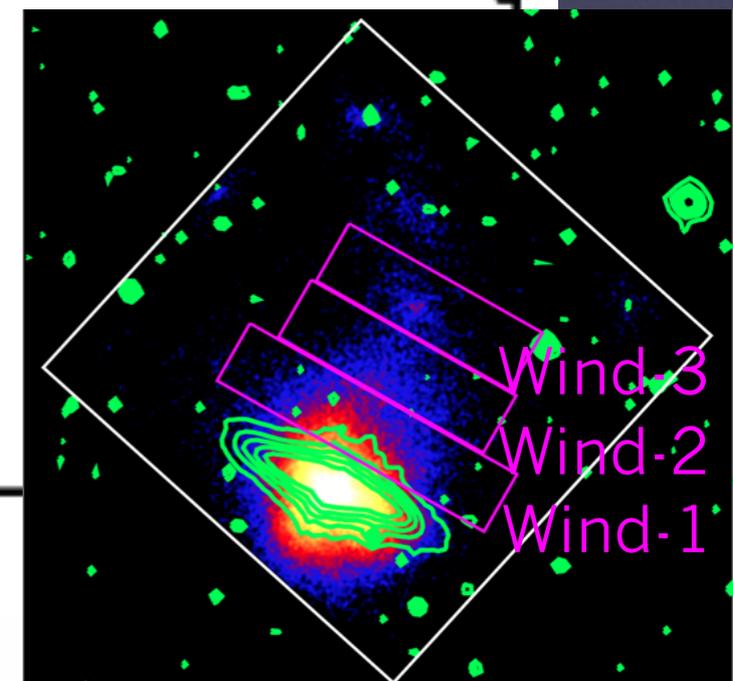
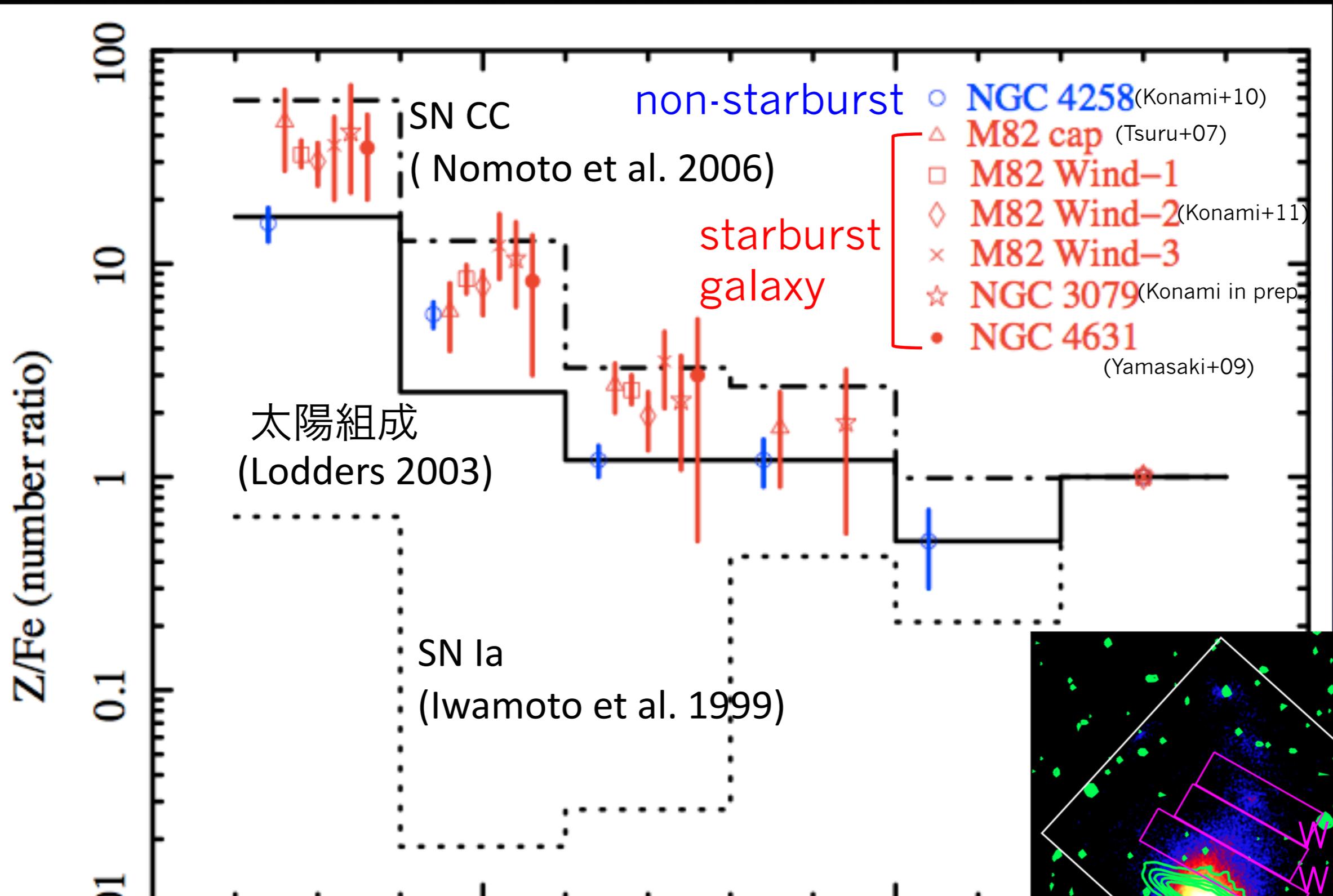


# M82の重元素組成比



すべてのアウトフロー領域で重元素組成比がSN CCに近い値を示した

# 他の星形成銀河の重元素組成比

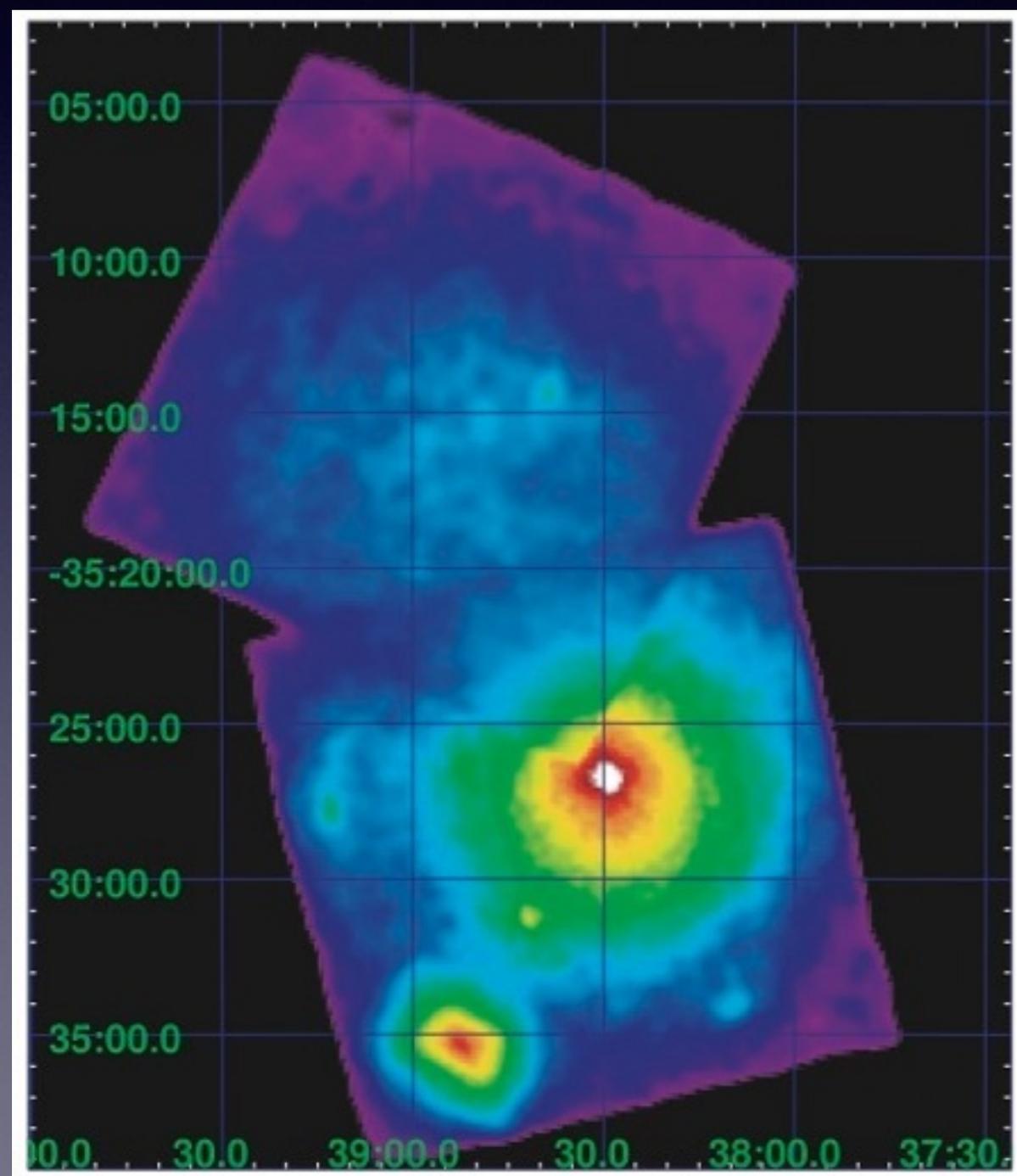


スターバースト銀河はSN CCの元素を効率よく銀河間空間に供給している

# 拡散された元素の行方

## - 銀河団の元素組成比 -

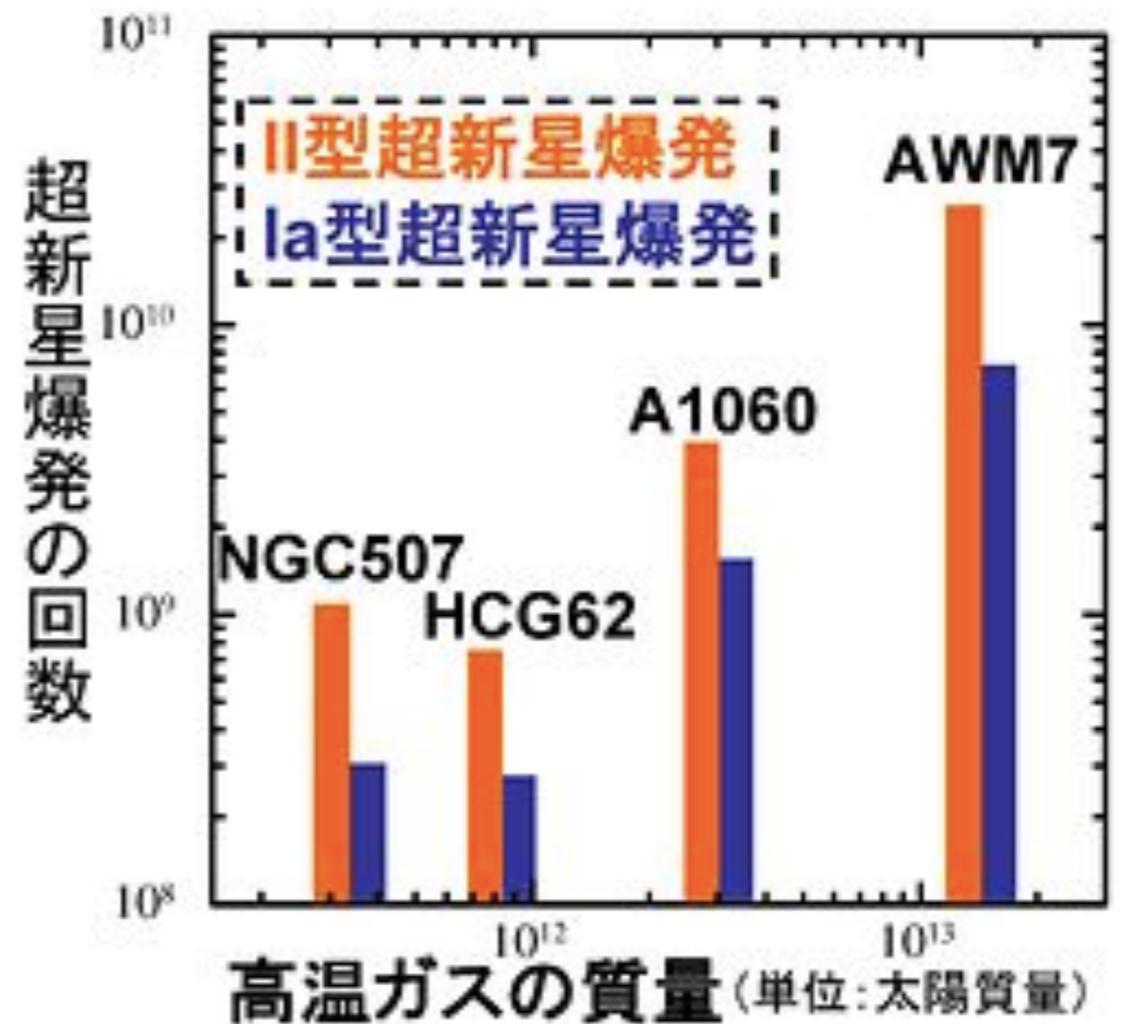
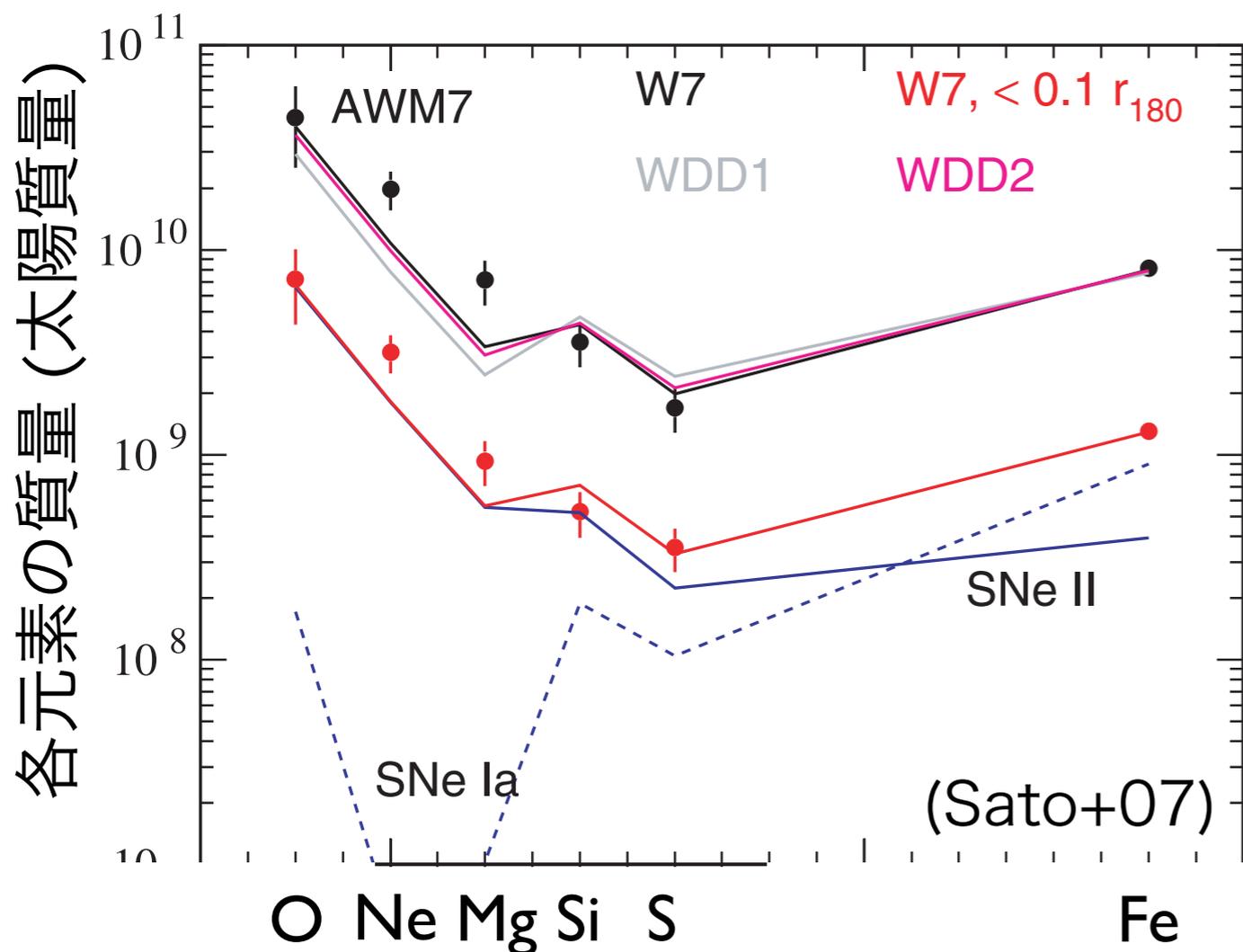
「すざく」で観測された  
Fornax銀河団 (Matsushita+07)



- 銀河団の元素組成は1990年代から測定されている
- XMM, すざく衛星により、銀河団に付随する高温プラズマから多量の元素 (O, Ne, Mg, Si, S, Fe)が検出
- 元素量、元素組成比から銀河団、宇宙の化学進化、形成史に迫る

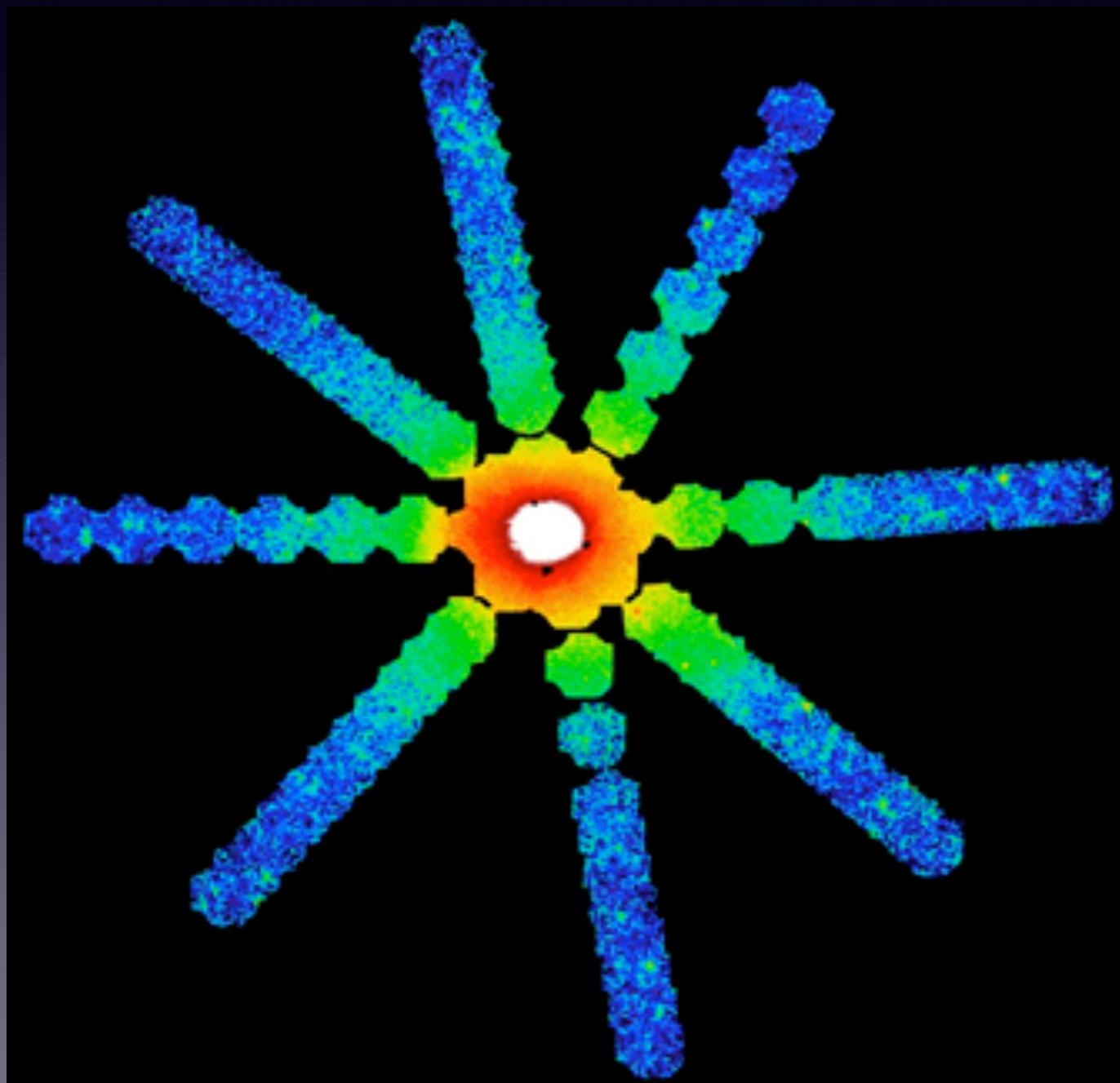
# 銀河団の元素組成比 (Sato+07)

- 各銀河団の重元素組成比を求め、II型 (CC型) と Ia型超新星爆発の回数比を計算した
- II型/Ia型の回数比はどの銀河団でもおよそ3.5となった



# 銀河団外縁部の元素測定 (Werner+13)

「すざく」で観測された  
ペルセウス銀河団 (Urban+14)

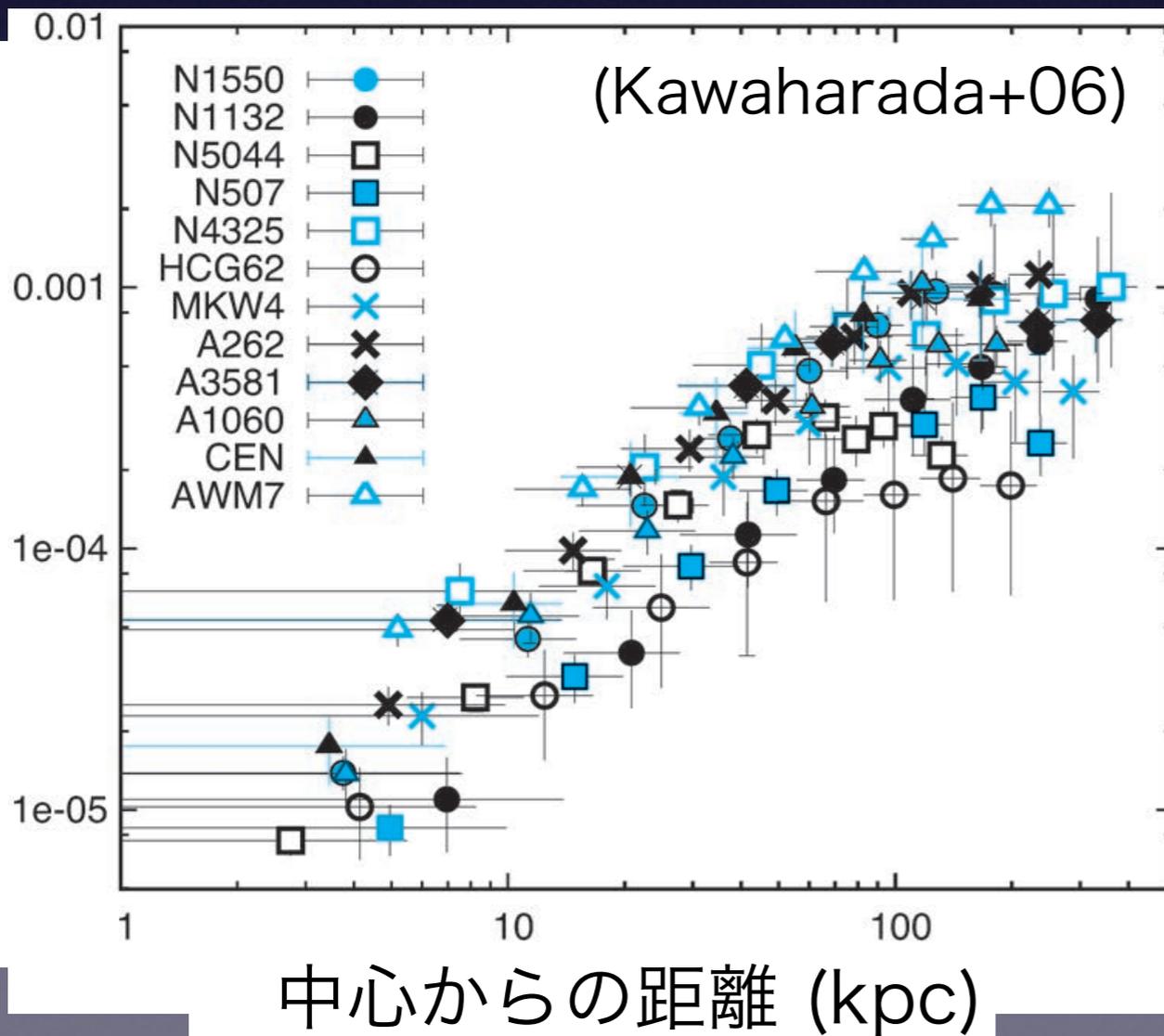


- ペルセウス銀河団を外側まで観測
- 鉄の分布を $\sim 1.5$  Mpc ( $\sim r_{200}$ )まで測定し、ほぼ一様に分布していることを解明
- 銀河の分布と一致していなことから、銀河団が形成される前に元素が拡散された？ (Werner+13)

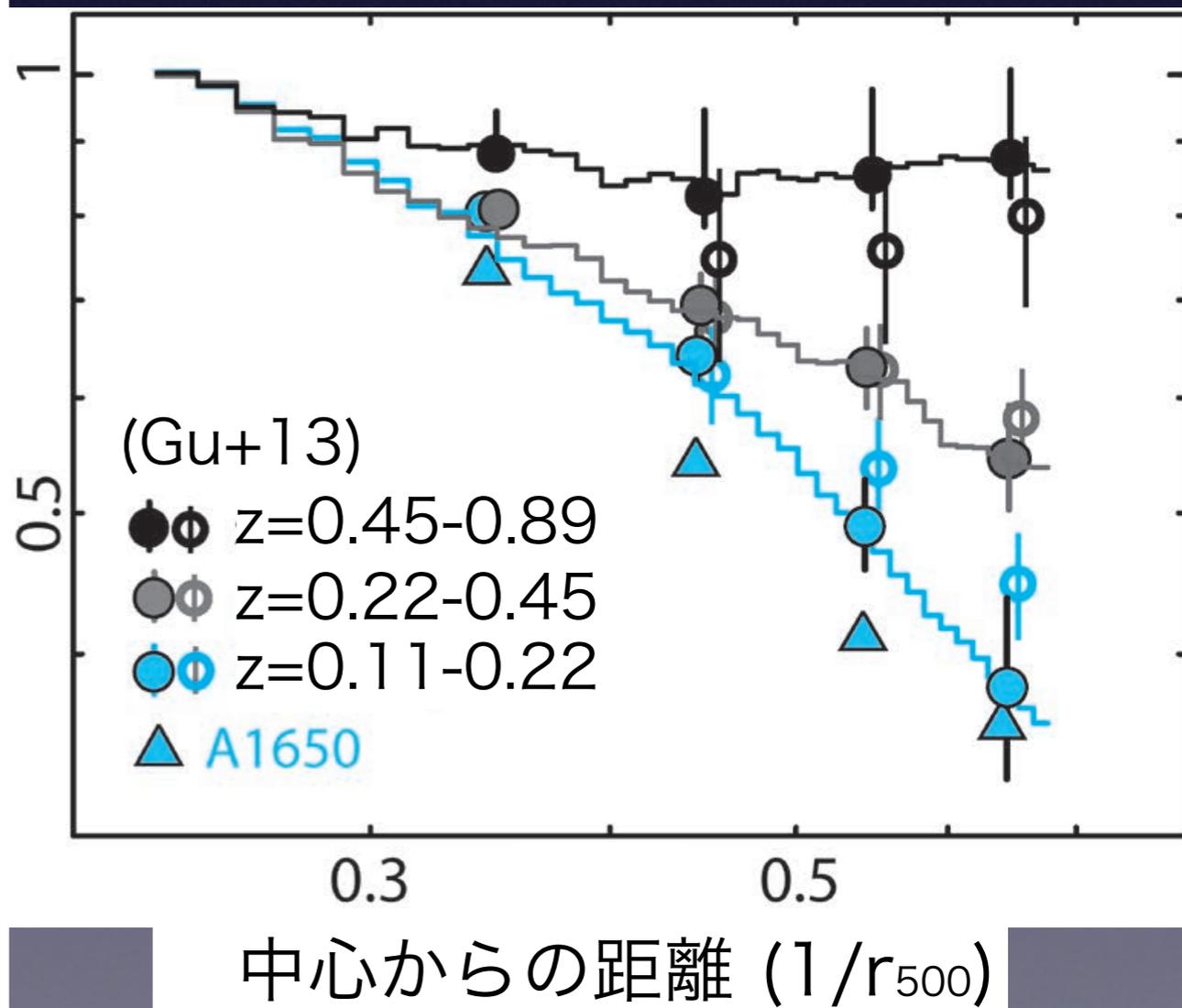
# 銀河団中の銀河と元素分布の関係 (Gu+13)

- 高温プラズマ中の鉄が銀河光度に対してより外側に広がっている
- 銀河団形成初期は一様に分布していた銀河が、形成後、元素をばらまきながら中心まで落ちてきた？
- 銀河と高温プラズマが相互作用

銀河光度に対する鉄質量の比



銀河光度に対する高温プラズマの質量比



# まとめと今後の課題

- ・ 銀河から銀河団への重元素供給が間接的、直接的に示されてきた
- ・ 銀河団には多量の重元素が含まれ、その分布や供給の割合(SN)はわかってきた
- ・ それらがいつ、どのように供給され、現在の構造に形成してきたかはまだ明らかになっていない

# 本日のアウトライン

1. なぜ元素か
2. なぜX線か
3. X線でさぐる銀河の元素組成
4. 銀河から銀河団への元素拡散
5. 次期X線衛星でさぐる宇宙の元素合成史

# 次期X線天文衛星 ASTRO-H

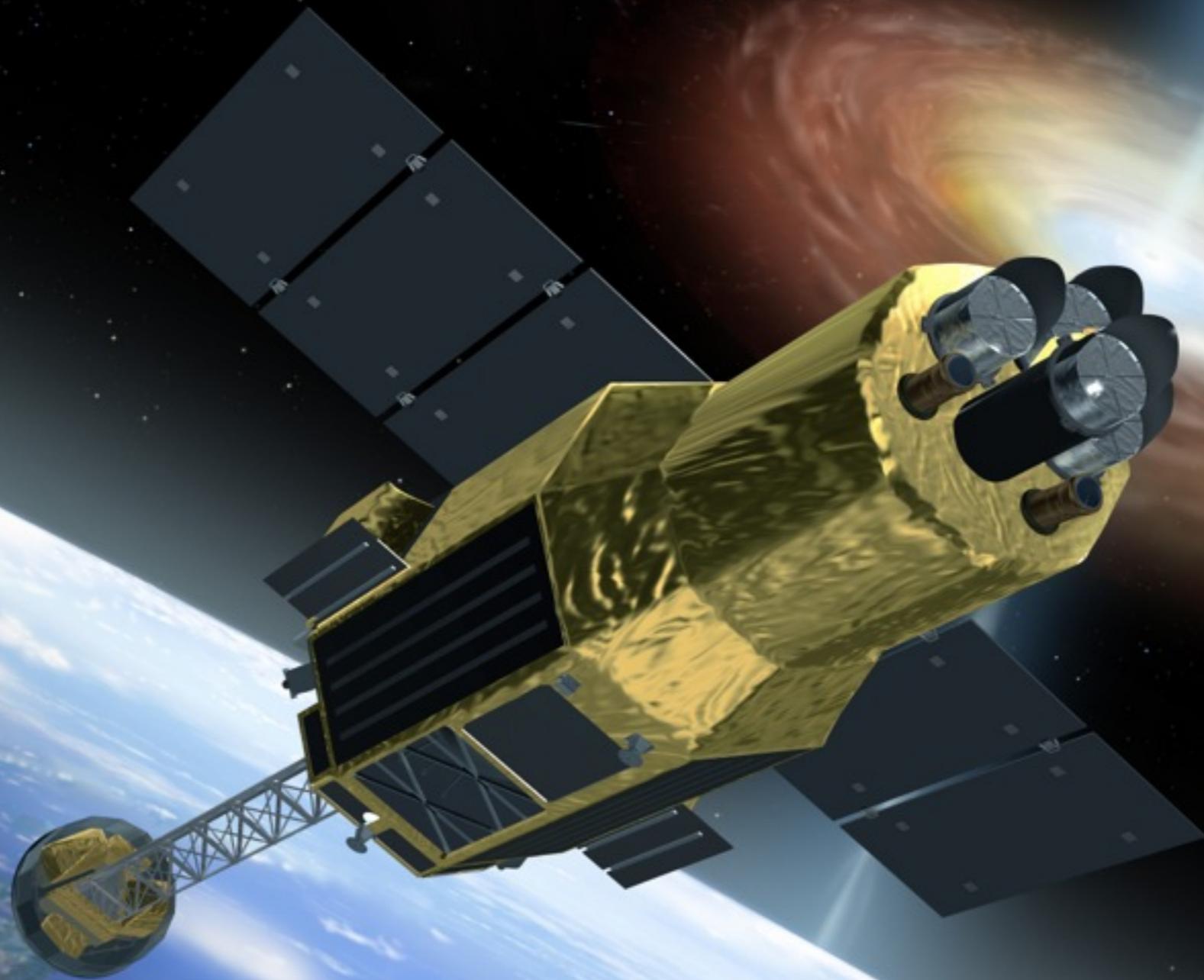


イラスト 池下章裕氏/提供 JAXA

# 次期X線天文衛星 ASTRO-H



(ISAS/JAXA)

はくちょう  
(1979-85)



(ISAS/JAXA)

てんま  
(1983-88)



(ISAS/JAXA)

ぎんが  
(1987-91)



(ISAS/JAXA)

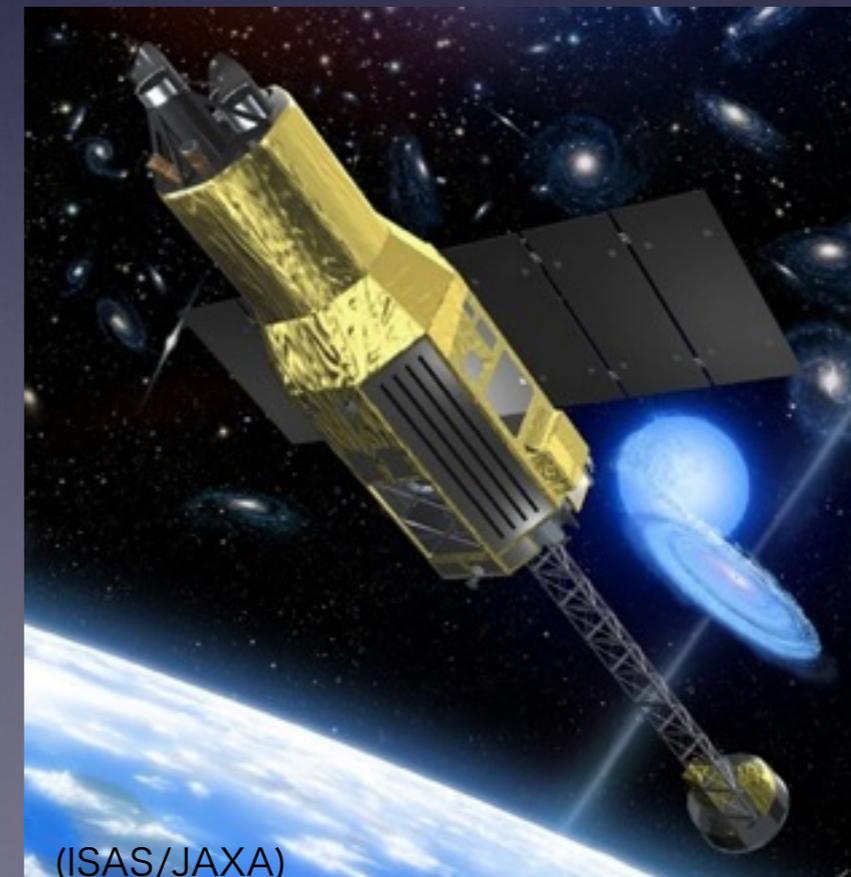
あすか  
(1993-01)



(ISAS/JAXA)

すざく  
(2005-)

次期X線天文衛星  
ASTRO-Hへ！！  
(2015年  
打ち上げ予定)



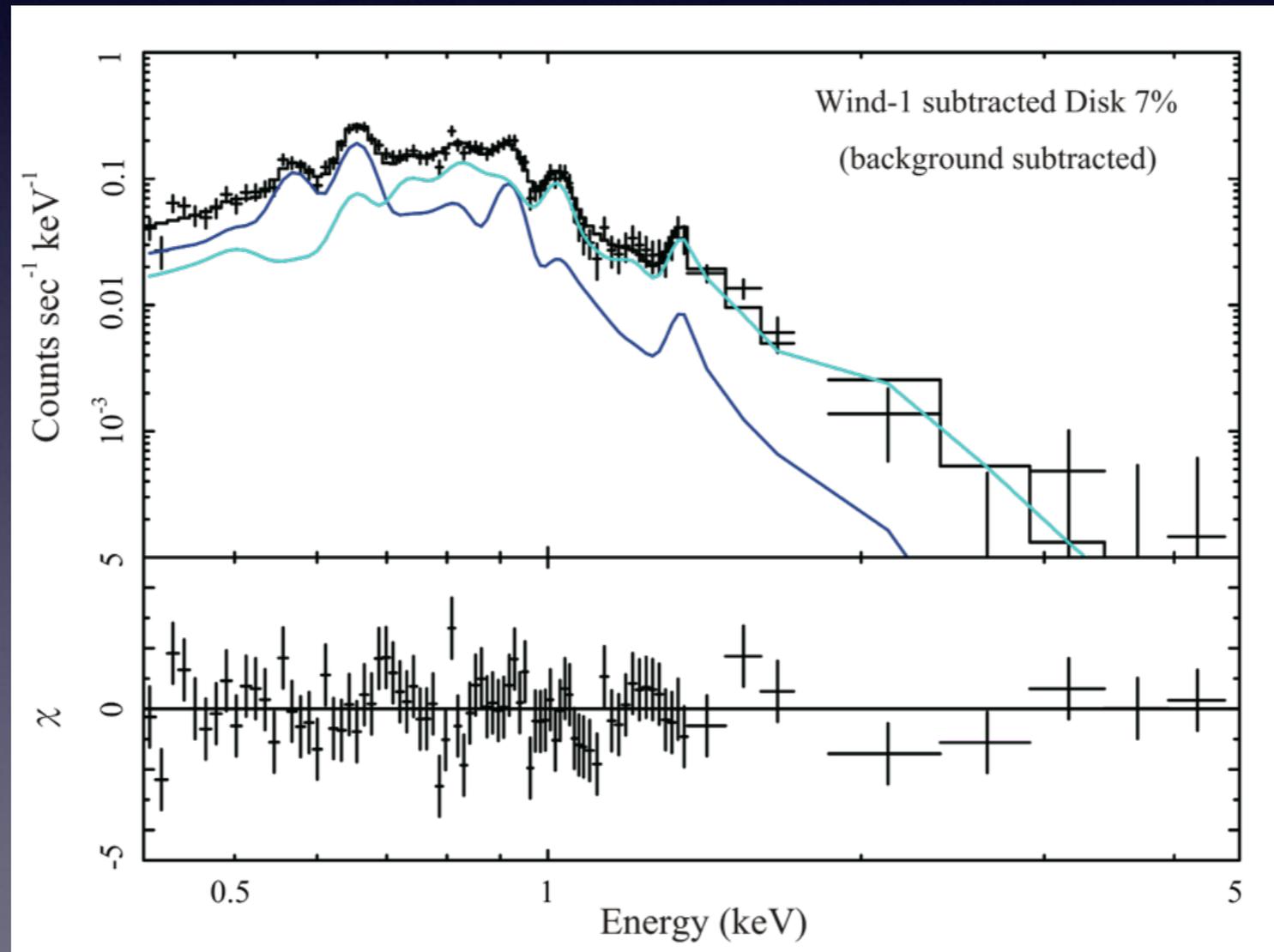
(ISAS/JAXA)

(ISAS/JAXA)



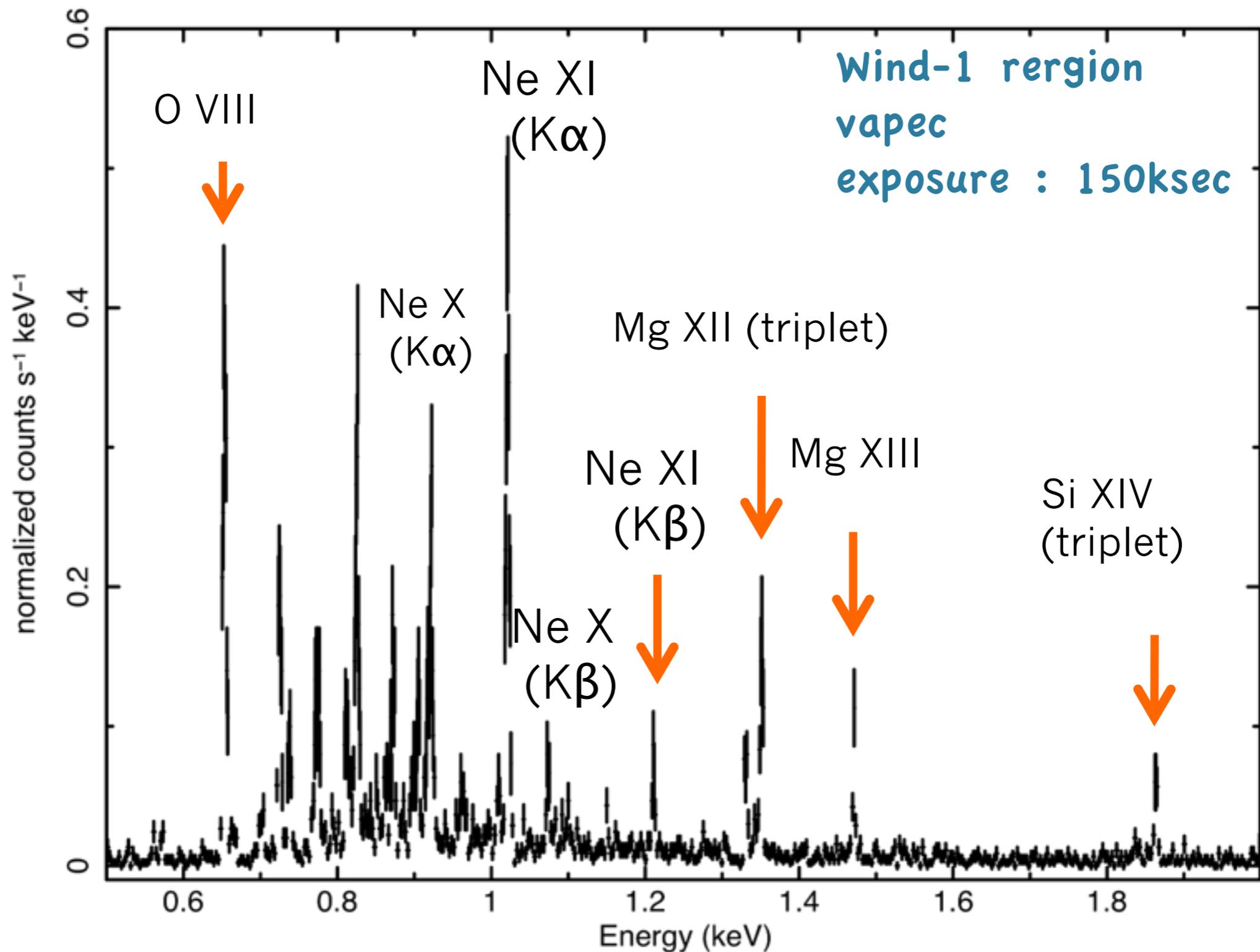
# マイクロカロリメータ SXS

- 従来のX線衛星搭載の分光器に比べ、  
圧倒的な高エネルギー分解能 (7 eV)



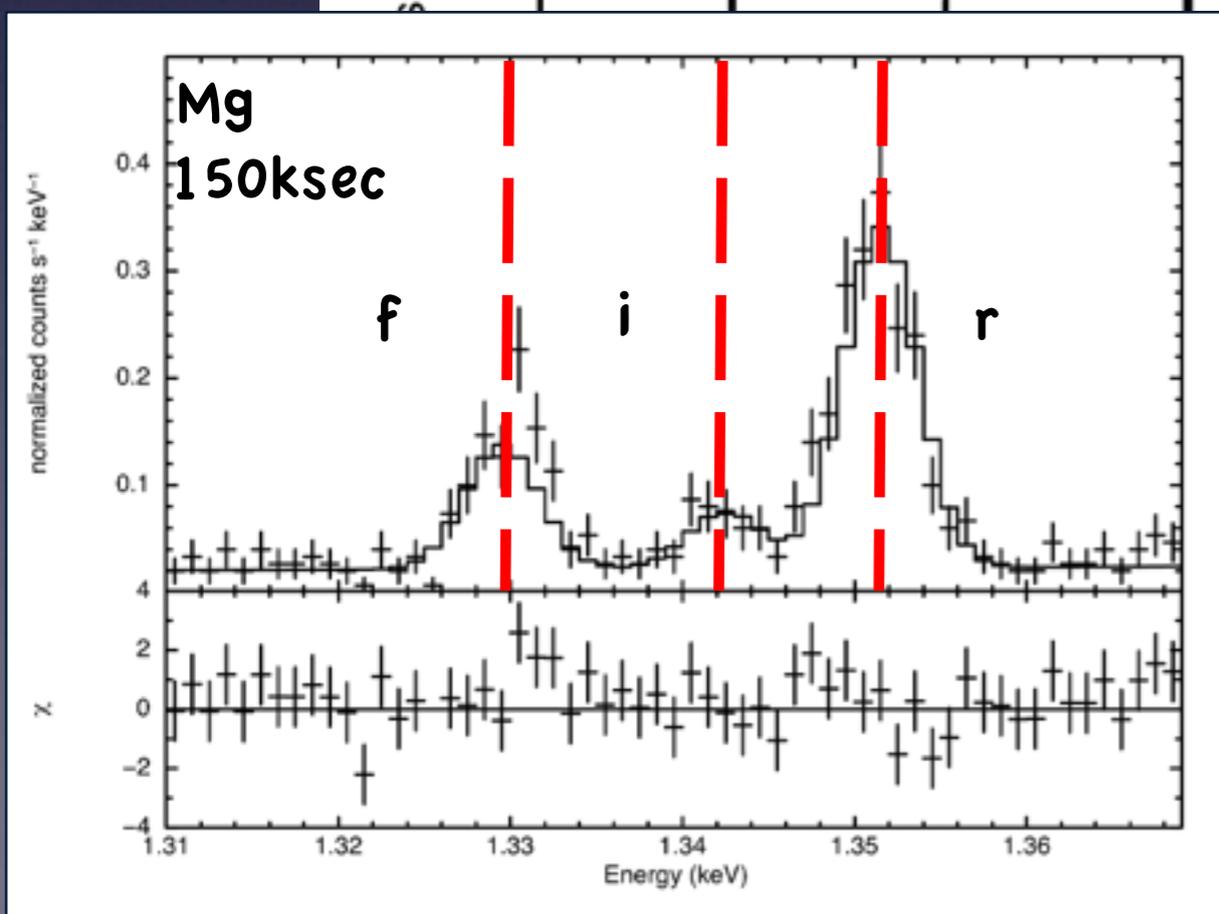
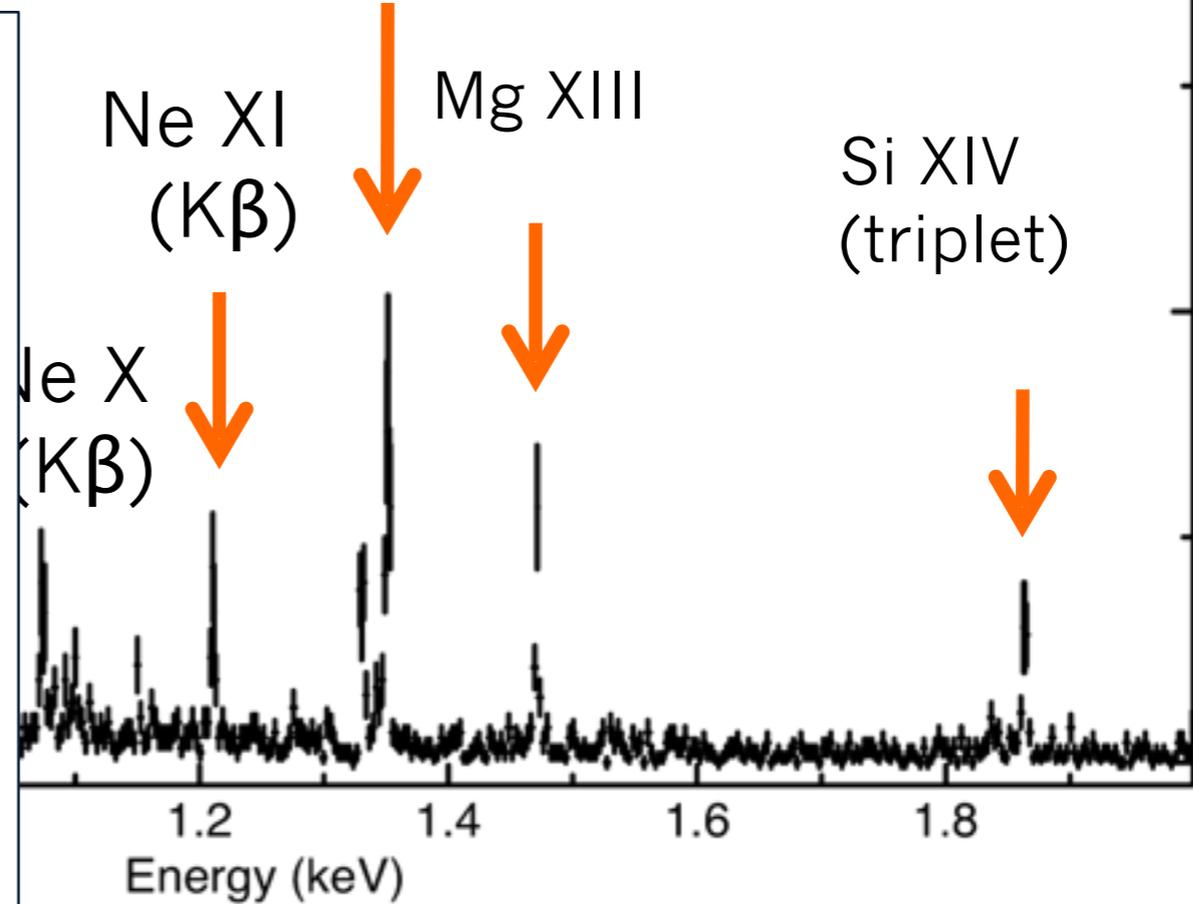
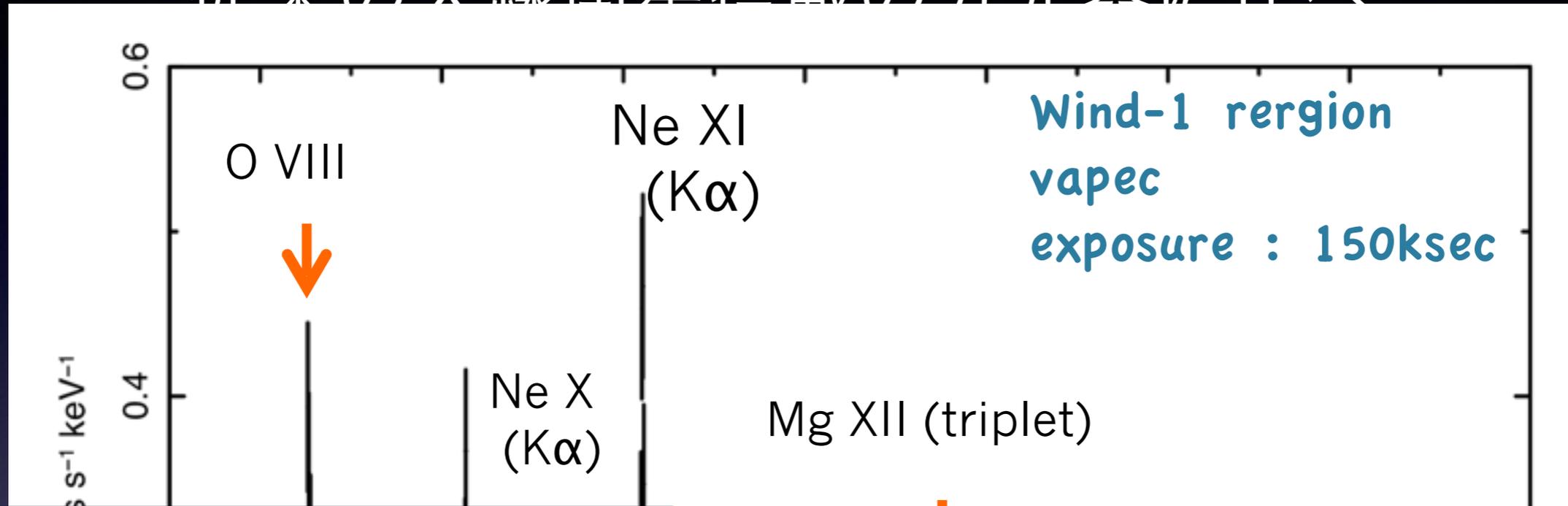
# マイクロカロリメータ SXS

従来のX線衛星搭載の分光器に比べ



# マイクロカロリメータ SXS

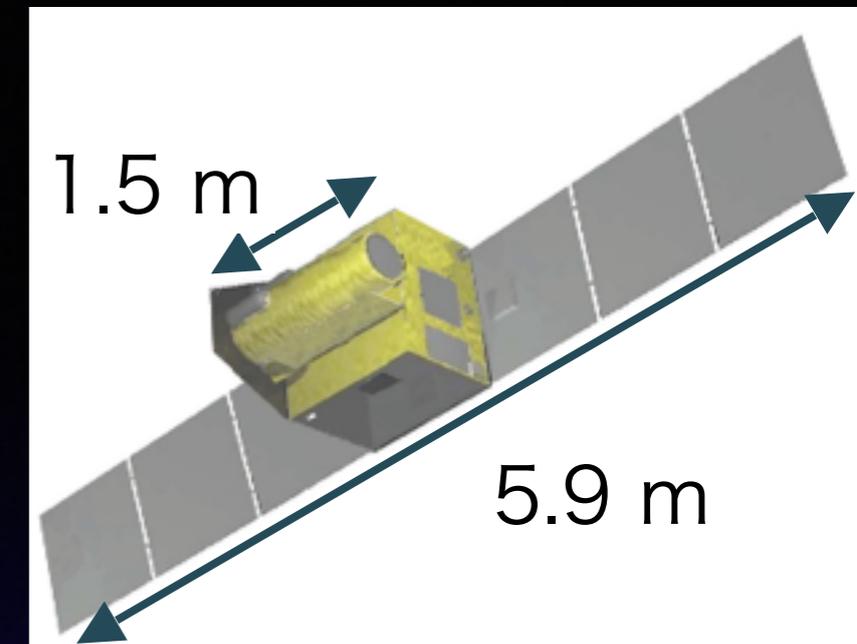
従来のX線衛星搭載の分光器に比べ



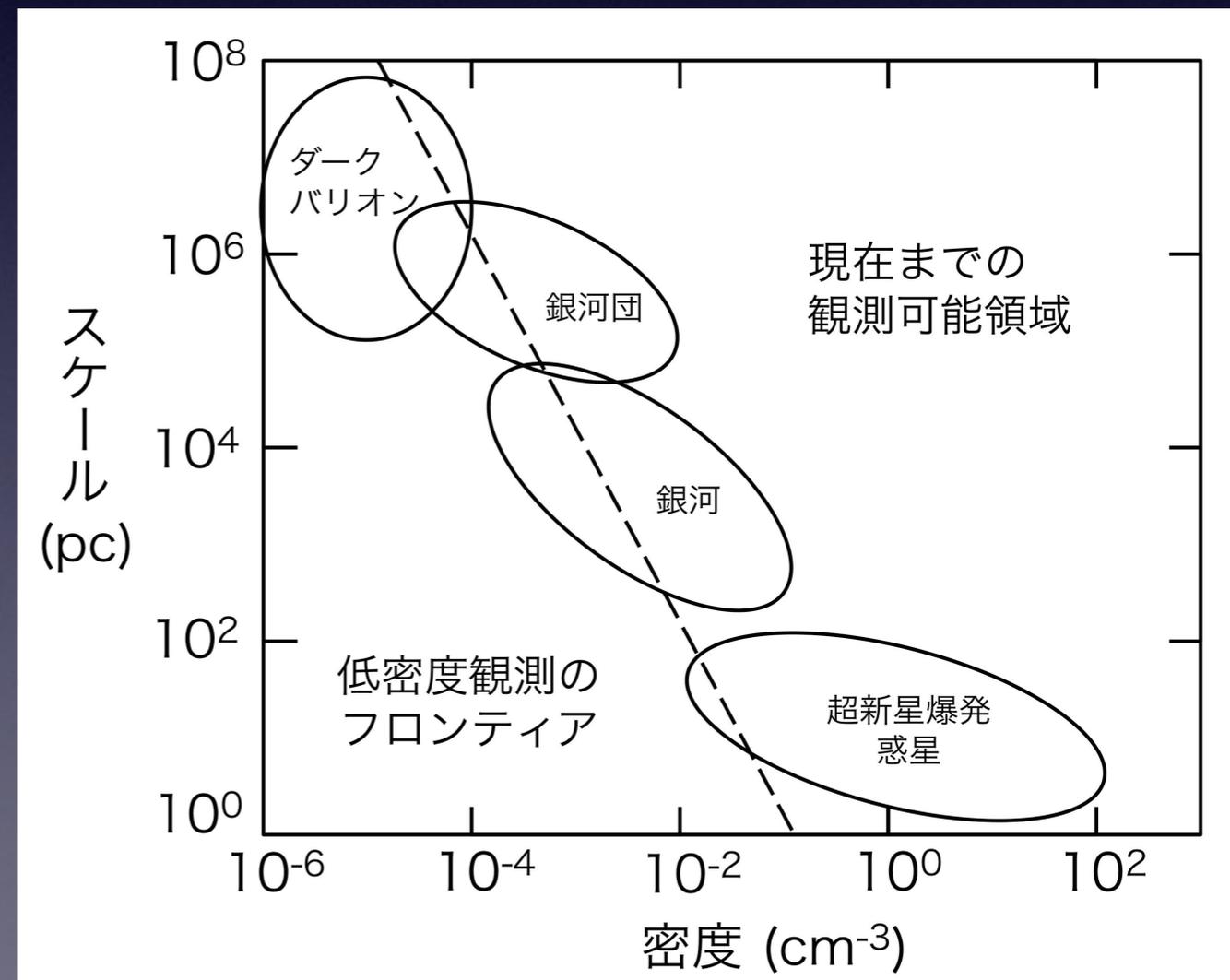
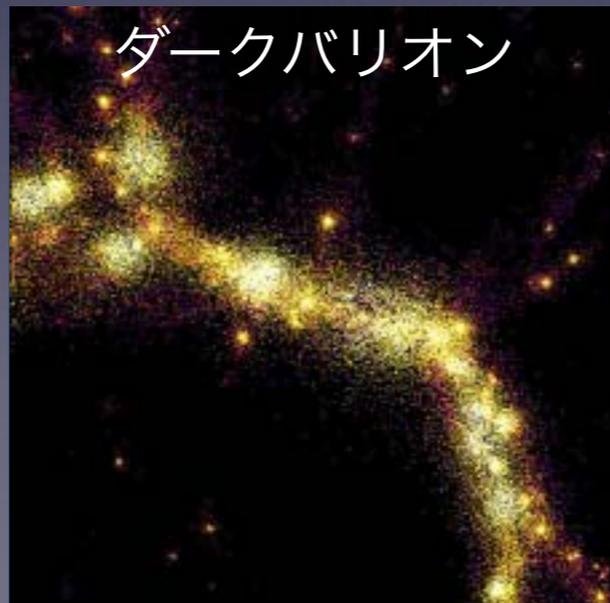
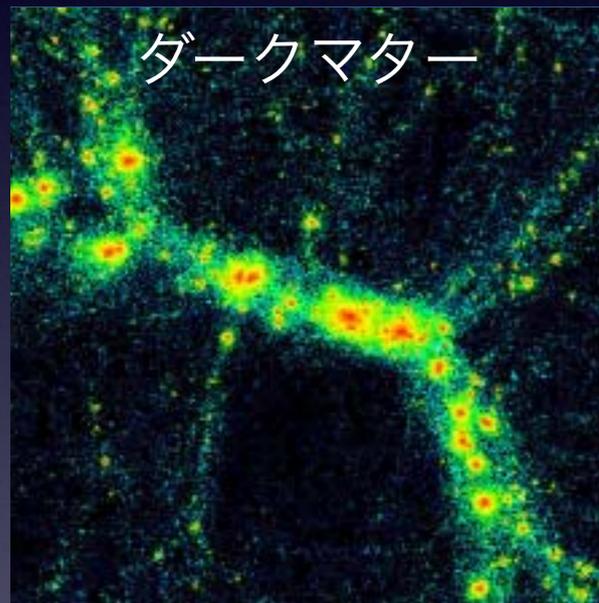
# 小型衛星DIOS

(Diffuse Intergalactic Oxygen Survey)

- バリオンの半分以上は大規模構造に付随する「温かい」ガス
- 未だ観測されていない (ダークバリオン)



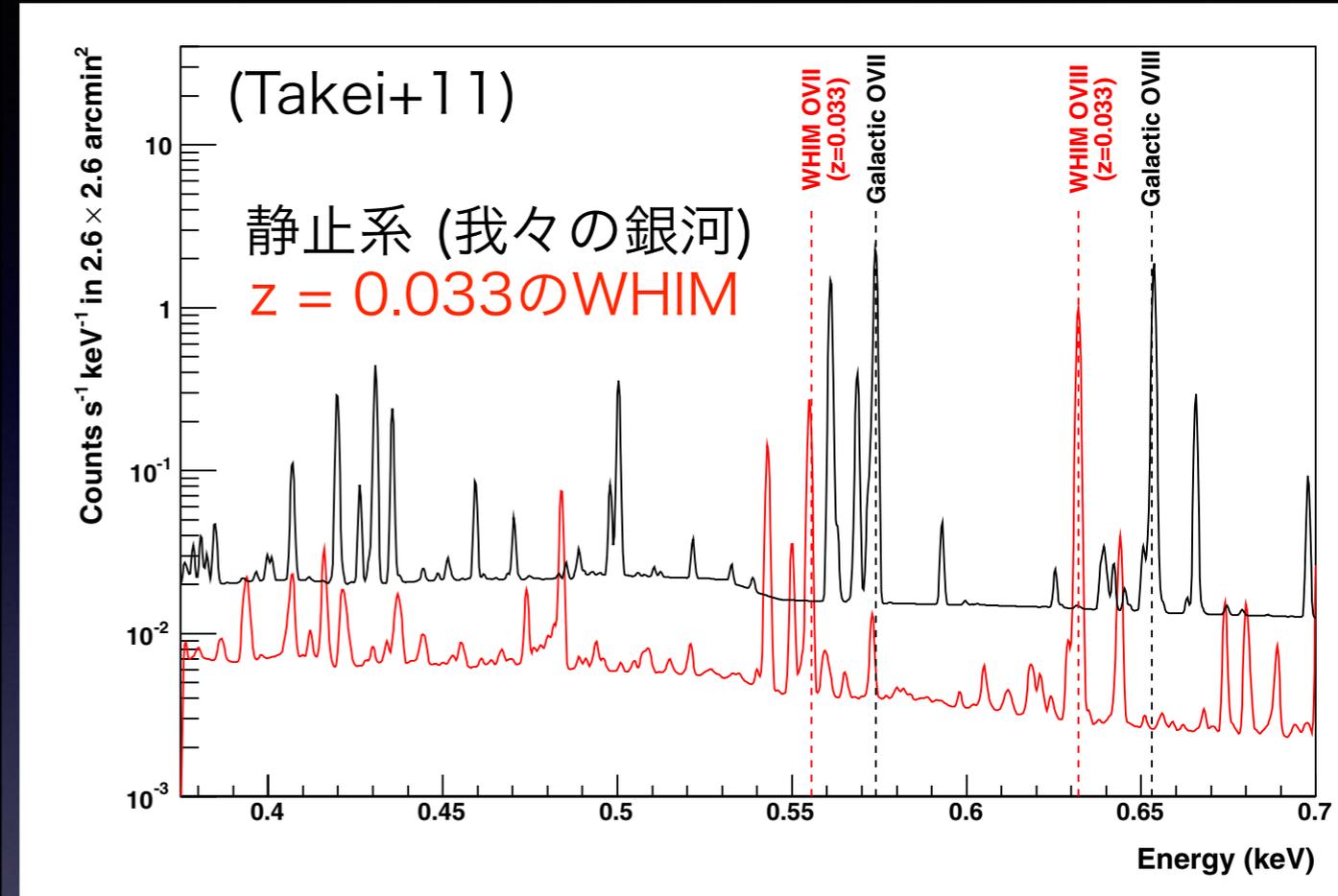
(Yoshikawa+01)



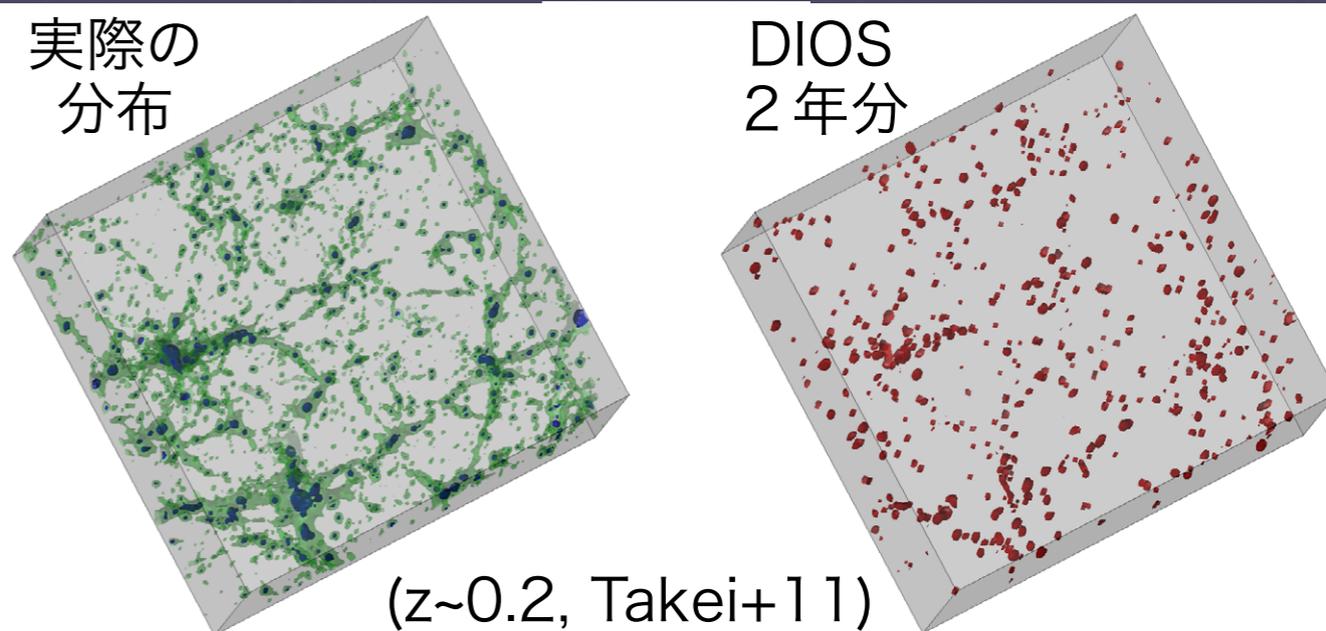
# 小型衛星DIOS

## (Diffuse Intergalactic Oxygen Survey)

Effective Area	200 cm (> 100 cm)
F. o. v	50' diameter
$S\Omega$	~ 150 cm
Angular resol.	3' (16 x 16 pix)
Energy resol.	2 eV (FWHM)
Energy range	0.3 – 1.5 keV
Mission life	> 5 yr



### DIOS観測のシミュレーション結果



大規模構造の  
3次元マッピングへ！！

# まとめと今後の課題

- ・ 銀河から銀河団への重元素供給が間接的、直接的に示されてきた
- ・ 銀河団には多量の重元素が含まれ、その分布や供給の割合(SN)はわかってきた
- ・ それらがいつ、どのように供給され、現在の構造に形成してきたかはまだ明らかになっていない

⇒ ASTRO-H, DIOSで元素/エネルギー供給や、構造形成の現場の直接検出が可能に！！