

「すざく」衛星による 銀河団外縁部の観測

東京理科大学理学部物理学科

松下 恭子

宇宙の進化を調べる

天体はどのように生まれ進化してきたか？

- 暗黒物質の正体と重力による天体形成と進化は？
- 陽子、中性子から構成される物質（バリオン）の進化は？
 - 星はいつ、どこでどのように形成されたか？
 - 星になったことのない物質（ガス）の進化は？

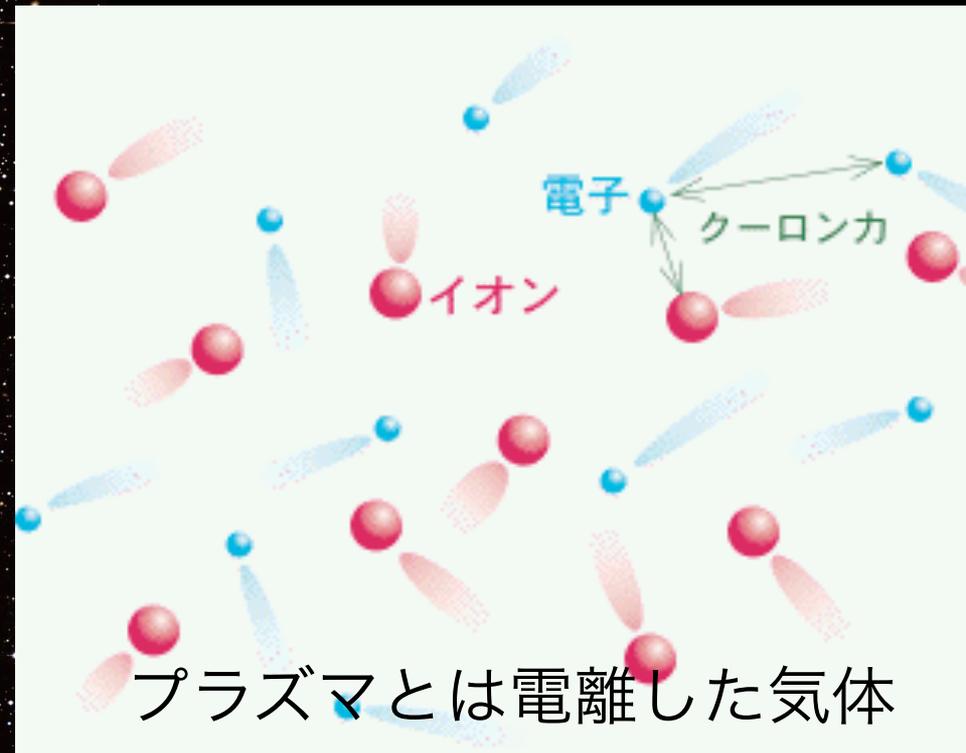
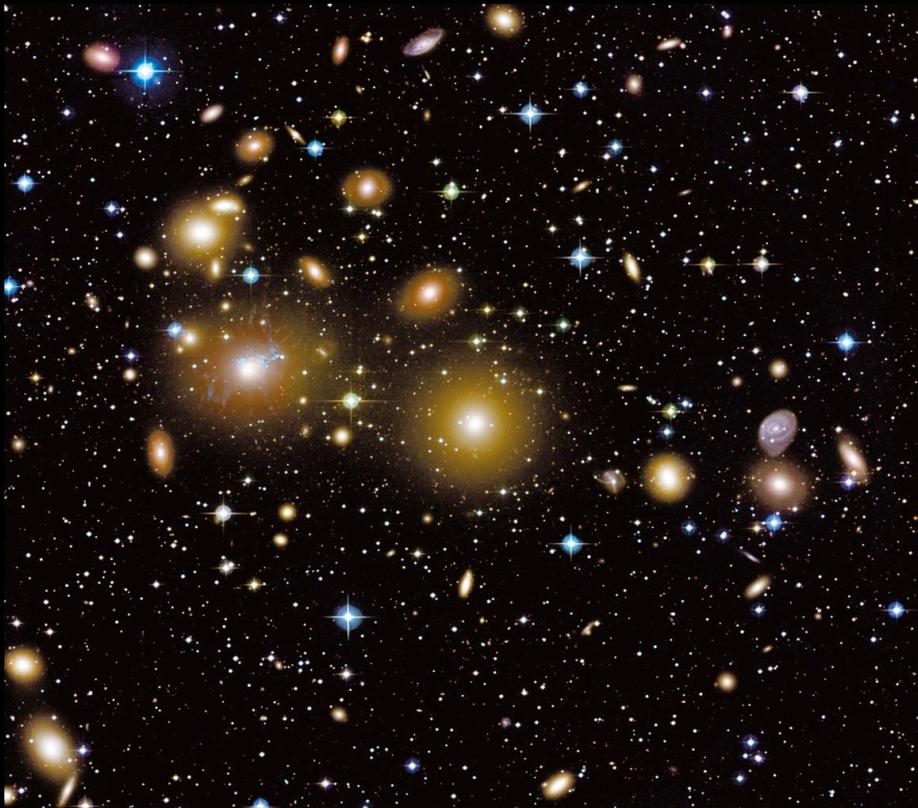
X線による銀河、銀河団の観測を手がかりに

- 暗黒物質の分布を探る
- ガスの進化を探る
- 星形成史を探る

目次

- 銀河団とは
- 銀河団ガスの重元素
- 銀河団ガスのエントロピー
- 次期X線天文衛星ASTRO-H

銀河団



COELUM

銀河団では銀河間空間を
大量の数千万度のプラズマが
満たす — **X線を放射**

- 銀河団とは、
数百から数千の銀河の集団
- 重力的に束縛された宇宙で最大の構造

銀河団進化の理論と観測による検証

銀河団形成の理論

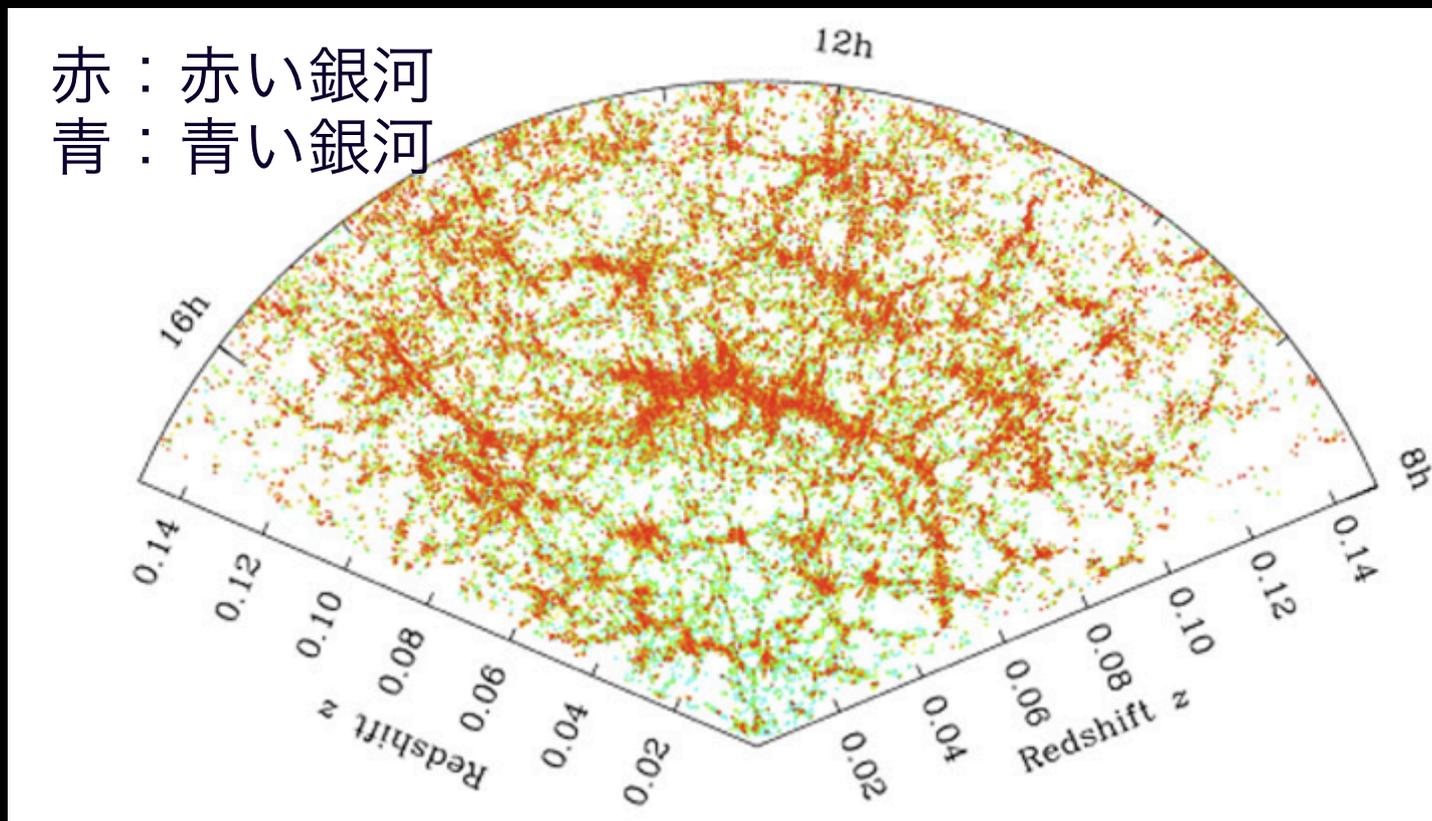
- 宇宙の大規模構造と銀河団形成の数値シミュレーション
- 銀河団の形成と銀河の形成
- 銀河団ガスの重力加熱と銀河からのエネルギー供給

銀河団の観測

- 銀河団の暗黒物質の分布
- 銀河団ガスの温度分布、エントロピー分布と加熱
- 重元素の分布と星形成史

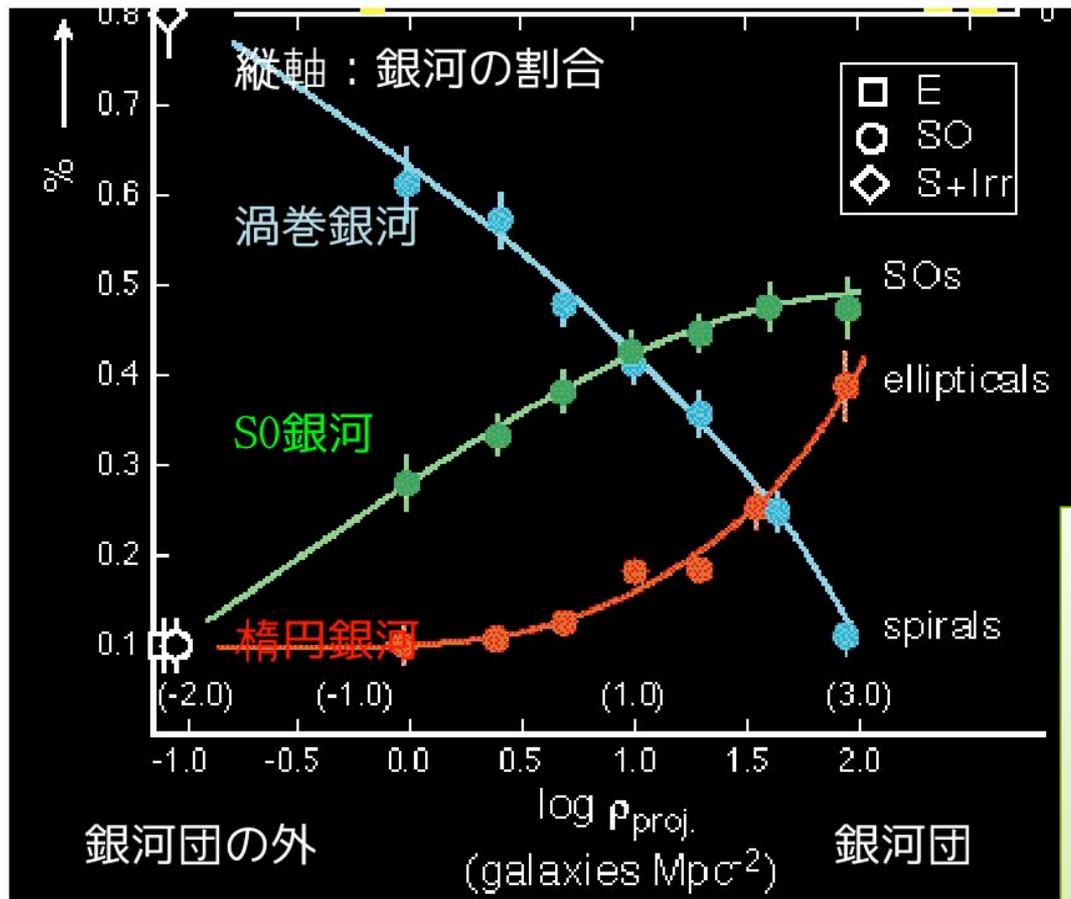
宇宙の大構造と銀河団

我々の銀河系近傍の宇宙の銀河の分布



- 銀河は泡状に分布
- 銀河が特に集中しているところ = 銀河団

銀河の形態と環境効果



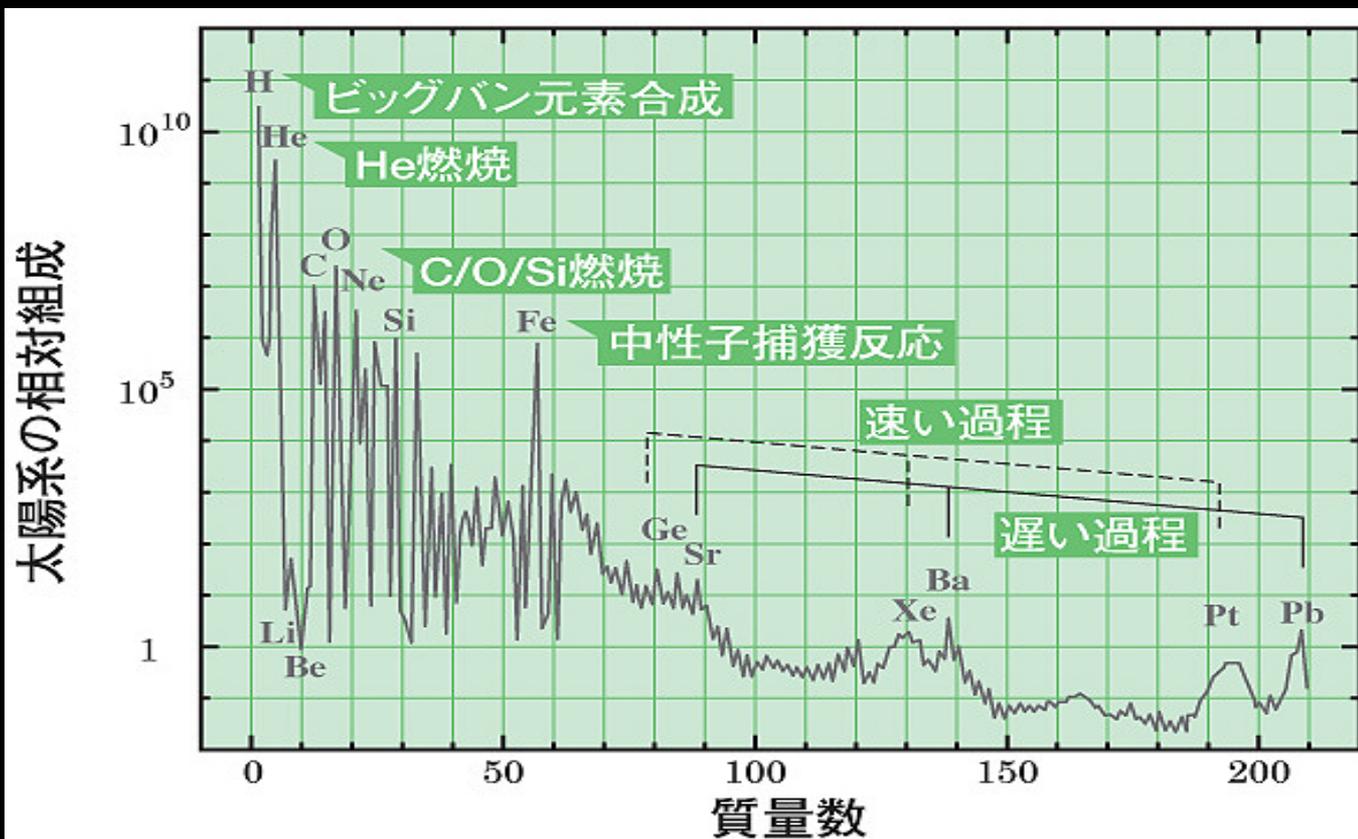
銀河団の楕円、S0銀河の星形成は我々の銀河系のような渦巻銀河とどのように違うか？

星が合成した重元素量が手がり

重元素はどこに？

元素と宇宙の星形成史

- 我々の体や地球を作っている元素はどのように合成されたか
- 宇宙のどこにどのような元素が存在するか
- 銀河団では合成した重元素をすべて閉じ込めている？



銀河団からのX線

明るい-黄 赤 青-暗い

可視光でみた銀河団 (恒星)

恒星⇒可視光

X線でみた銀河団

数千万度の高温のガス
(銀河団ガス)

質量は星の数倍

バリオンのかなりの部分はX線でしか観測できない

なぜ銀河団ガスは高温なのか？

銀河団が重いから

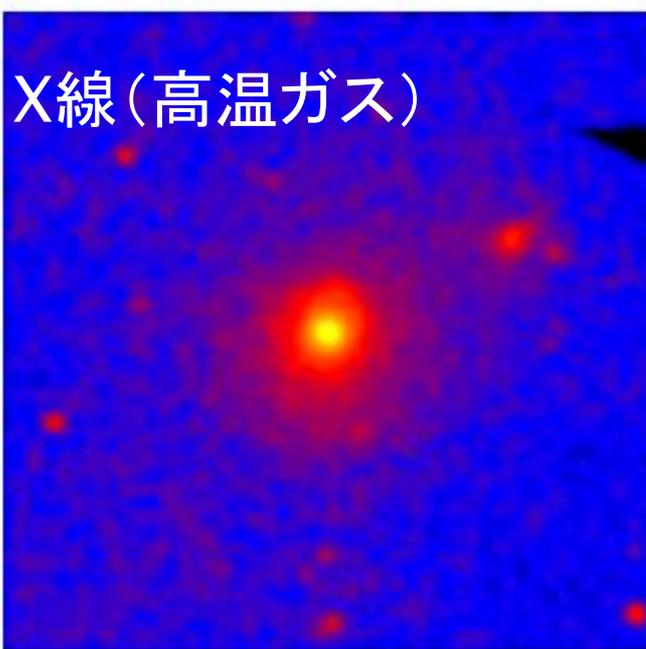
重力エネルギーがガスの温度に！

X線観測により銀河団の重力質量がわかる

可視光(恒星)



X線(高温ガス)



暗黒物質

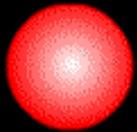
?

薄いプラズマからの放射

熱制動放射 + 輝線

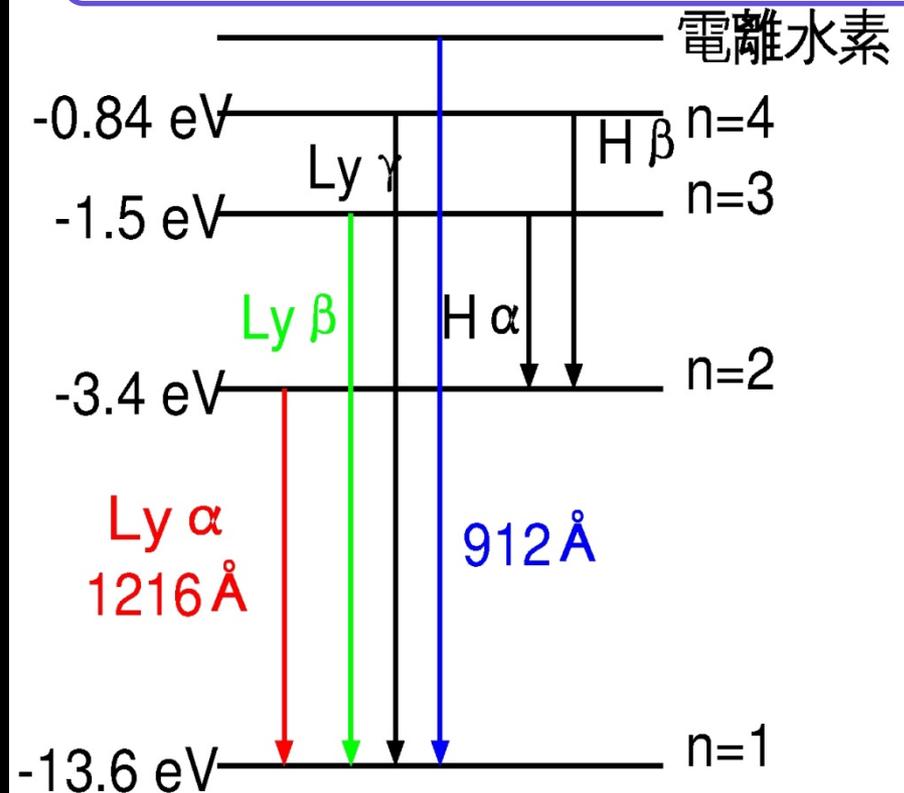
電子がイオンにより加速を受けると電磁波を放射 = 制動放射

- 電子の速度分布がMaxwell分布 = 熱制動放射



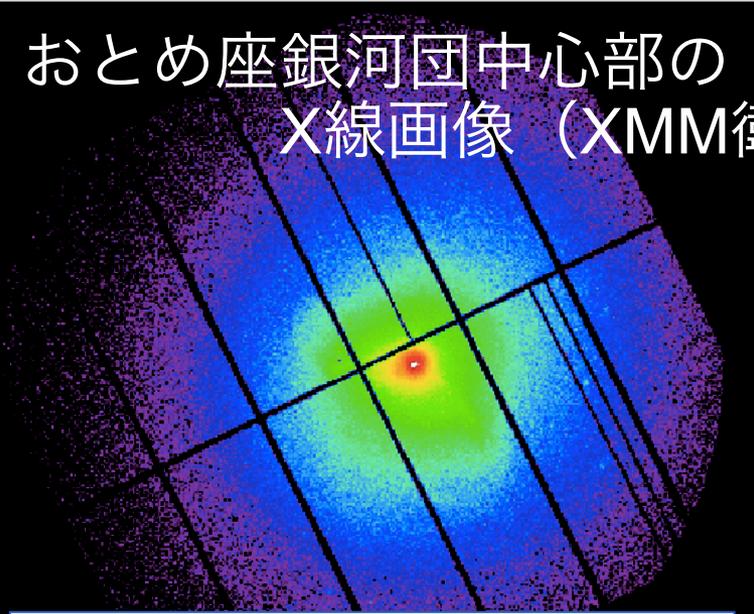
電子が一個の原子

エネルギー準位 $\propto Z^2$



銀河団ガスのスペクトル

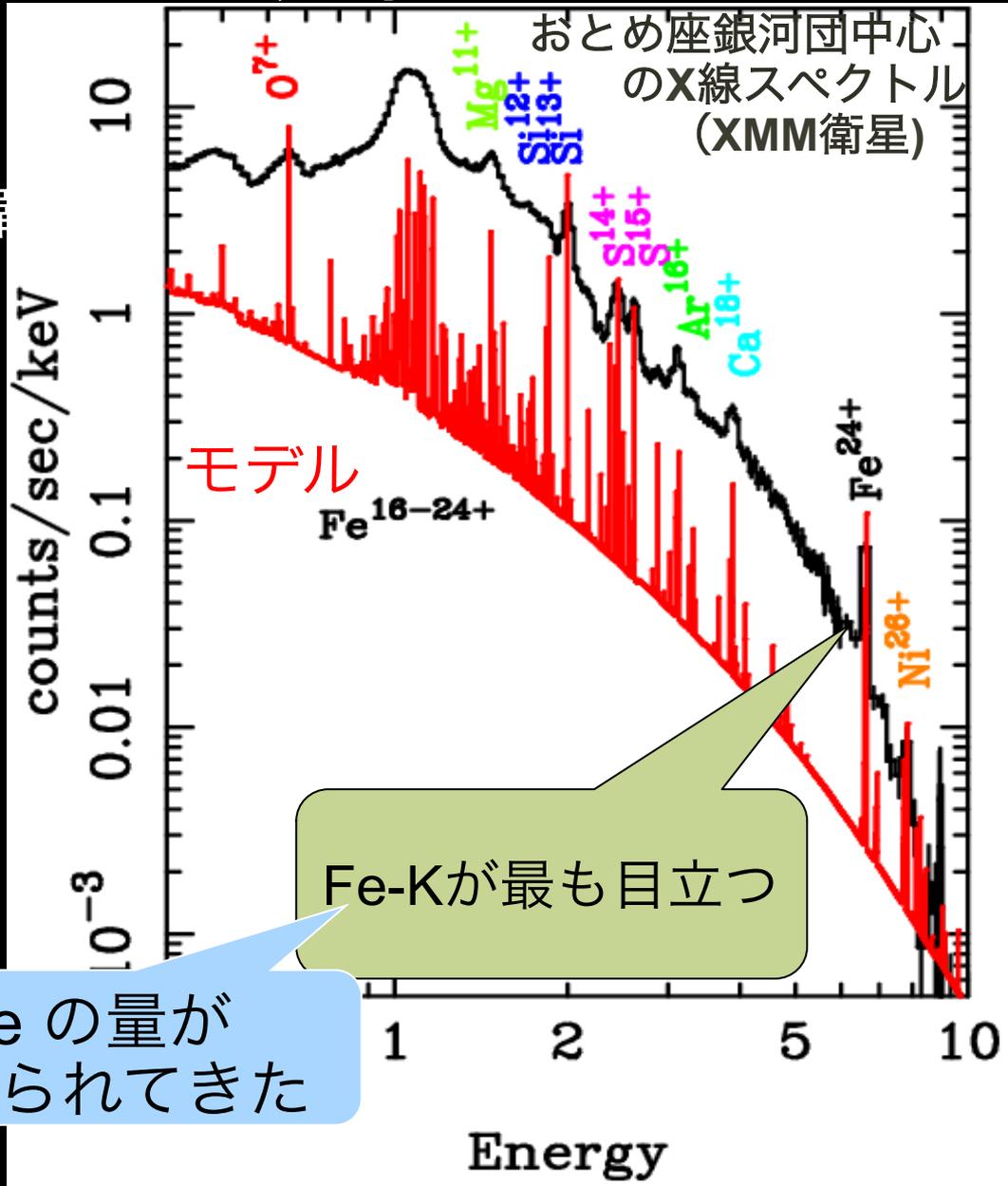
おとめ座銀河団中心部の
X線画像 (XMM衛星)



銀河団ガスには
大量の重元素が存在
高階電離

- K α 輝線が主 (一部L輝線も)
- Atomic dataが単純
- 光学的に薄い

Feの量が
調べられてきた



おとめ座銀河団中心
のX線スペクトル
(XMM衛星)

モデル

Fe¹⁶⁻²⁴⁺

Fe-Kが最も目立つ

銀河団ガスに含まれる大量の鉄

鉄の組成比(太陽組成を1とする)

2

1

0.5

0.2

0.1

あすか衛星(1993年打ち上げ)により
観測された~30個の銀河団ガス中の
鉄の割合(Fukazawa et al. 1998)

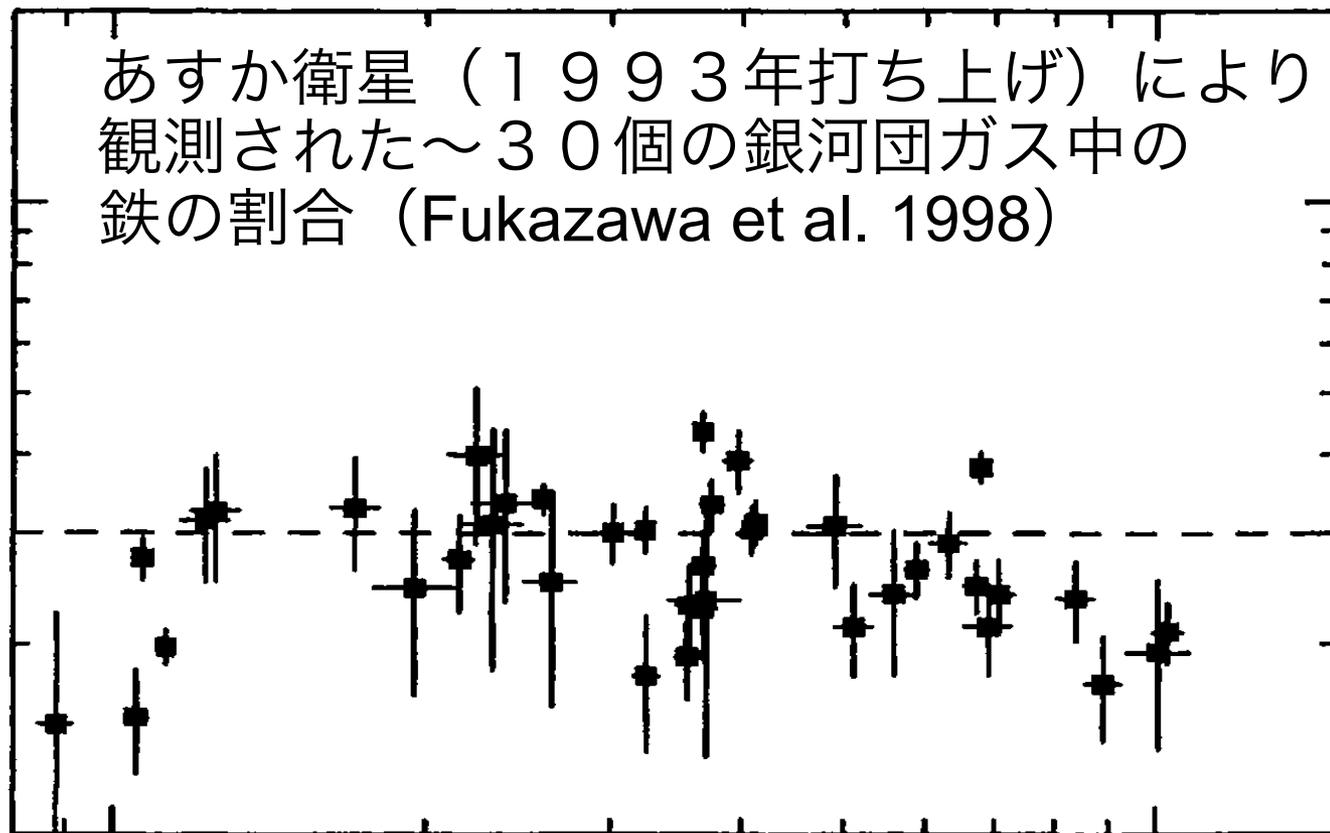
1

2

5

10

銀河団ガスの温度(keV)



銀河団ガスに含まれる大量の鉄

銀河団ガス

- 鉄の割合～太陽の0.3倍
- 銀河団ガスの質量～恒星の数倍

銀河の恒星

- 鉄の割合～太陽と同じぐらい？

銀河団ガス中の
鉄の質量

≈

銀河の恒星
の鉄の質量

銀河団の高温ガスの重元素量と星形成史？

銀河団の主要メンバーである楕円銀河の星形成は渦巻銀河と違うのか？

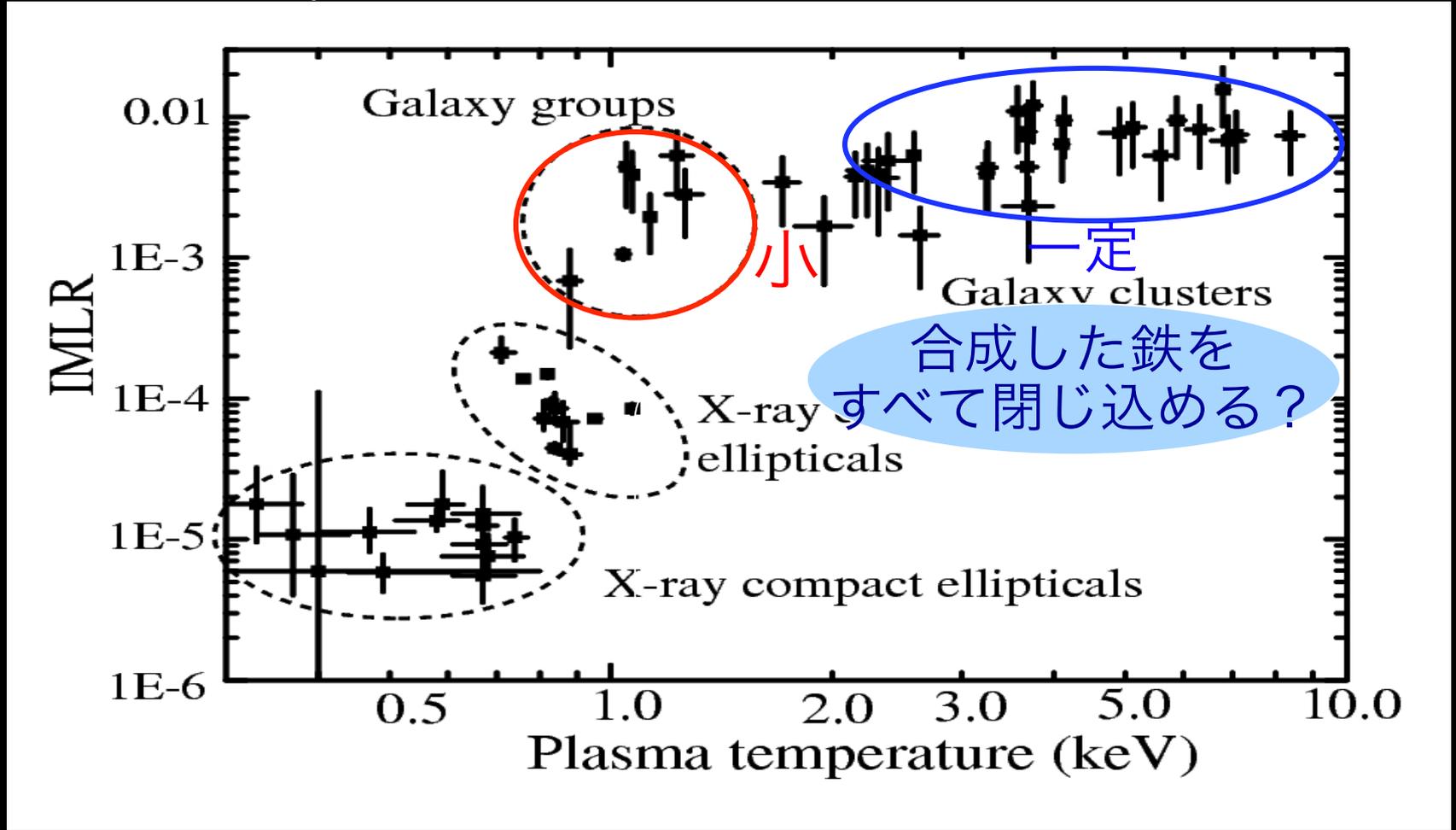
- 星形成時期は？（現在の楕円銀河の星形成は不活発）
- 星の初期質量関数は？
- 形成した星の総質量は？

銀河中で合成した元素をどのように銀河間空間に放出したか？

鉄の質量 / 銀河の光度 (IMLR)

あすか衛星の結果 (銀河団の数分の1の領域)

Makishima et al. 2001)



銀河の光度：寿命の長い小質量星の光度が主

銀河団の鉄の総量を合成するためには？

重力崩壊型超新星

- 銀河の星形成期に合成
- $O/Fe > O/Fe_{\text{太陽}}$
- 太陽近傍と同じ初期星質量関数
 - \Rightarrow 鉄の質量/銀河光度 \sim 観測の 1/10

Ia型超新星

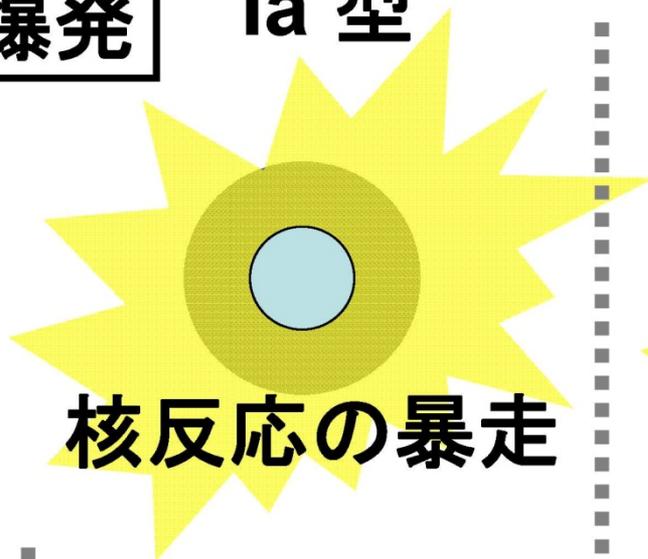
- 星形成から 10 ~ 数百億年後
- $O/Fe \ll O/Fe_{\text{太陽}}$
- 現在のIa型超新星爆発率
 - \Rightarrow 鉄の質量/銀河光度 \sim 観測の 1/10

鉄以外の元素、特に酸素の観測が重要

超新星による重元素合成

超新星爆発

Ia 型



核反応の暴走

II型



重力崩壊

起源

白色矮星

(軽い星の最期)

重い星

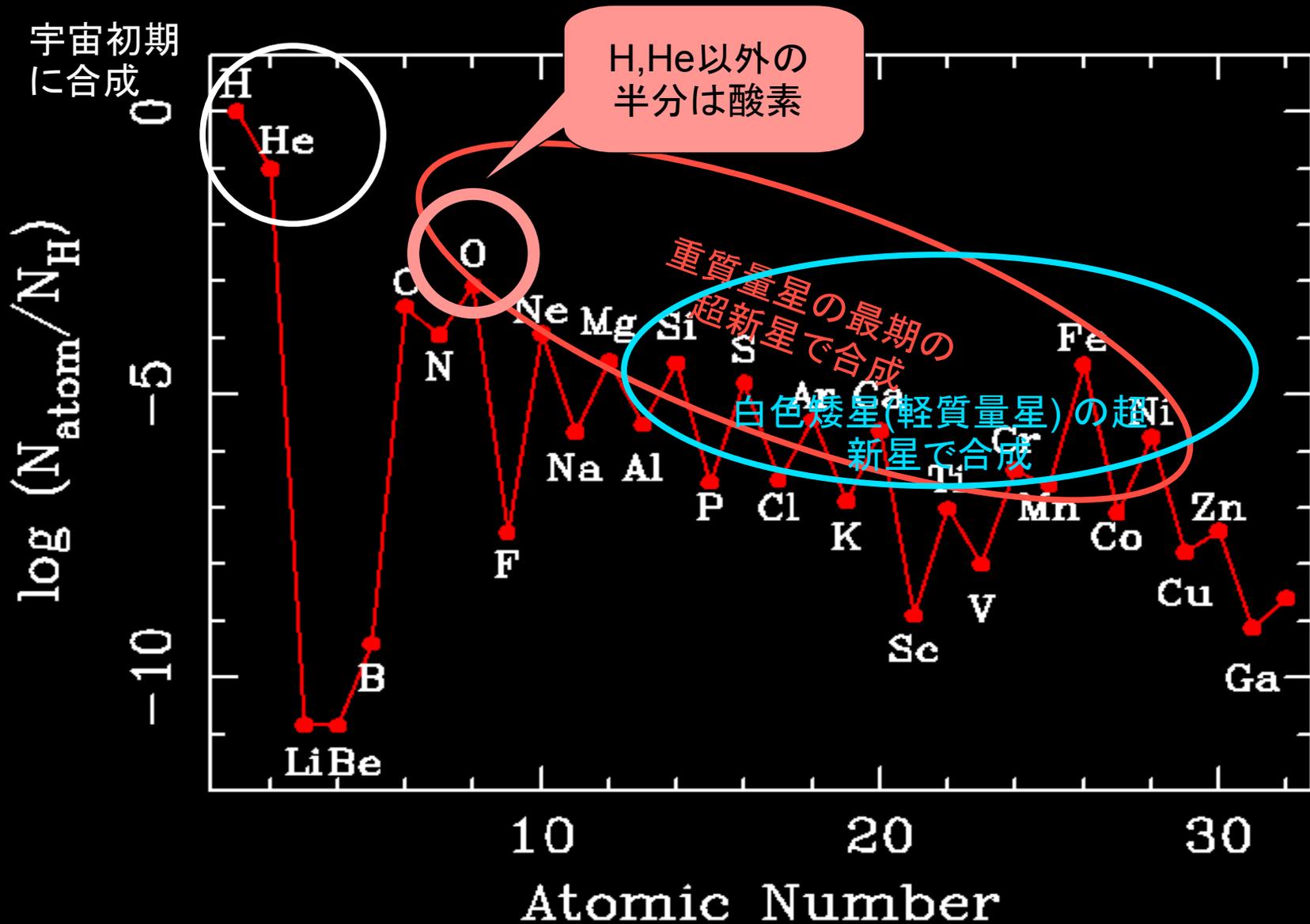
(太陽の10倍以上)

主な
生成元素

ケイ素・硫黄
鉄

酸素・マグネシウム
ケイ素・硫黄

我々の太陽系の元素組成比



宇宙の酸素の質量

重元素
の半分
は酸素

- 宇宙の化学進化≡酸素の合成史
- 重力崩壊型超新星によって合成される - 重い星の星形成史

酸素の質量 / 銀河光度



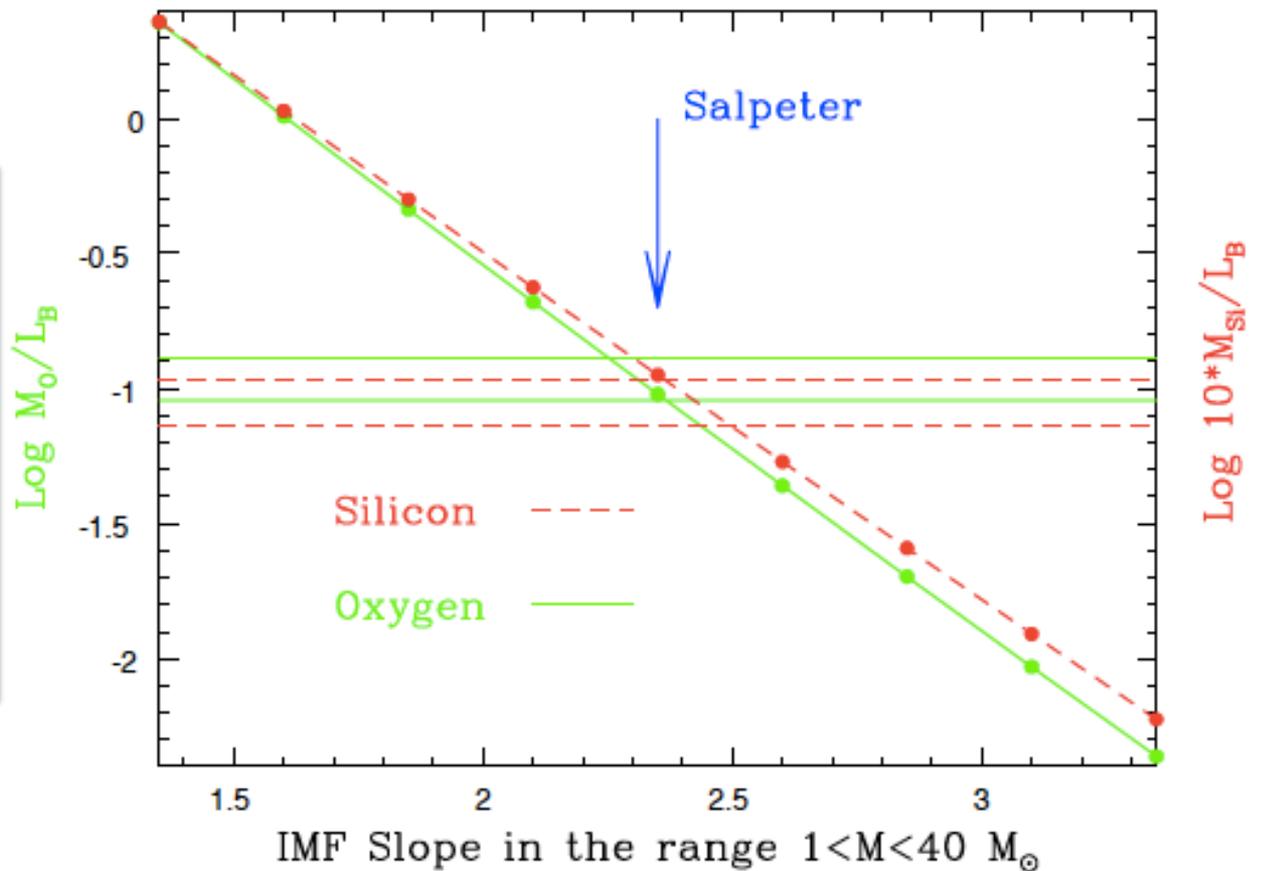
酸素の質量 / 星の質量

- 環境と星形成史の違いは？
- 超新星爆発のエネルギーによる**Feedback**は？
- 銀河風？

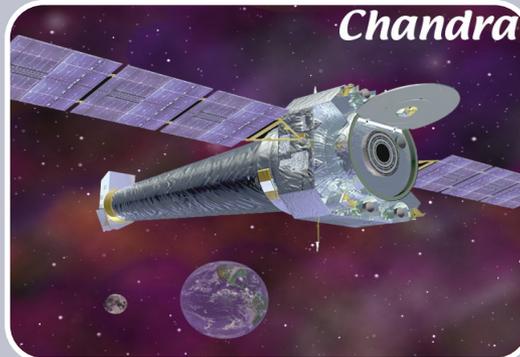
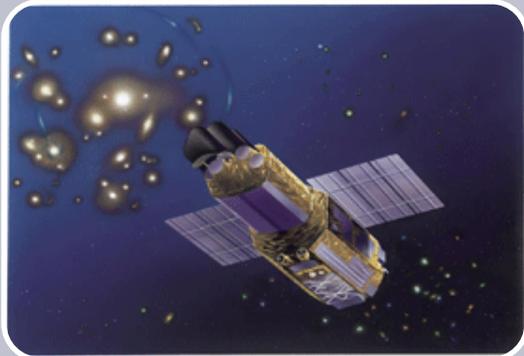
銀河団中(高温ガスと星)の酸素、ケイ素の全質量/銀河光度 の全質量/銀河光度

星の初期質量関数を強く反映 (Renzini 2005)
初期質量関数のべきの差が1のとき、
酸素、ケイ素の質量/銀河光度は20倍異なる

銀河の光度:
小質量星の質量
を反映
(銀河団銀河の多く
は古い早期型銀河)



現在活躍中の衛星



すざく衛星 (日本、アメリカ)

- 2005年～
- 低いバックグラウンド
- 広いエネルギー帯域
- 低エネルギー側でのエネルギー分解能

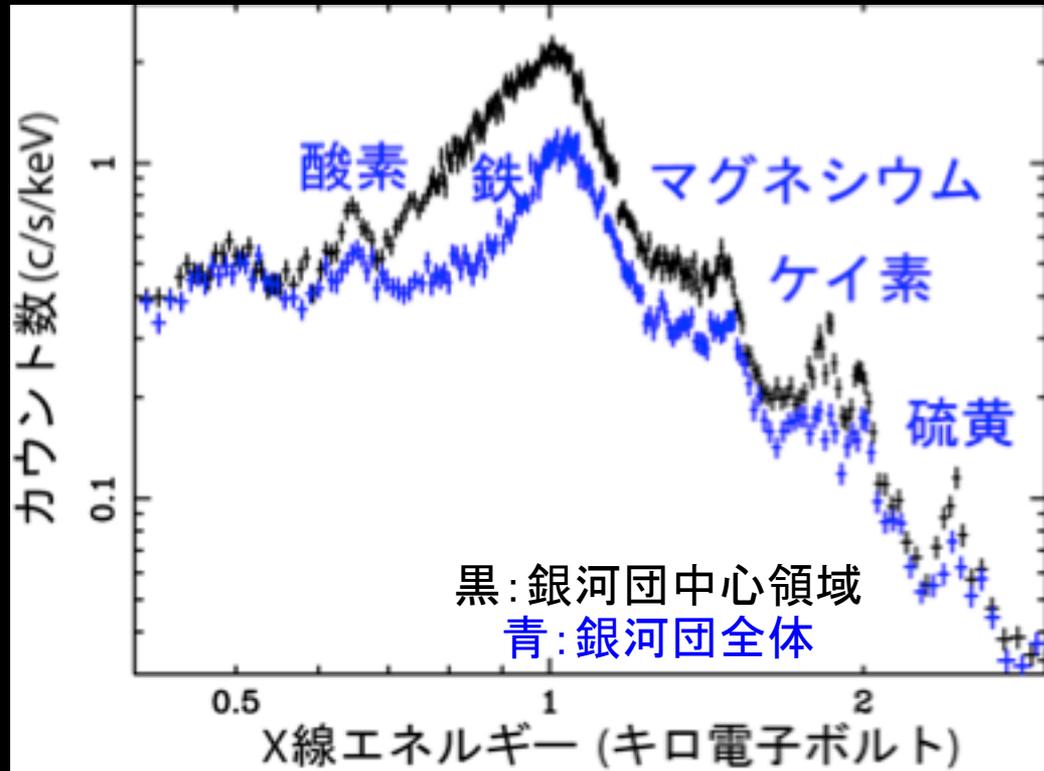
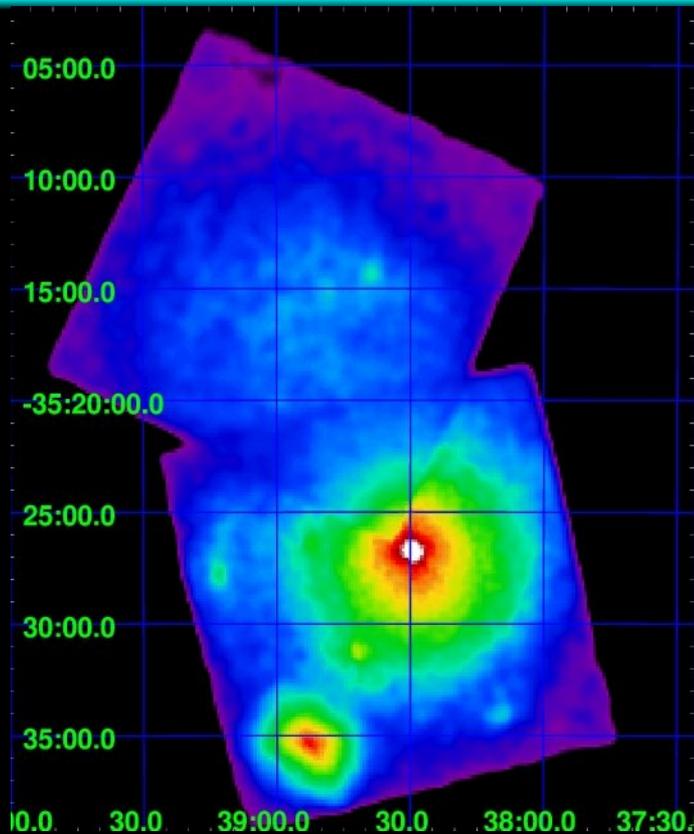
Chandra衛星 (アメリカ)

- 1999年～
- すぐれた空間分解能

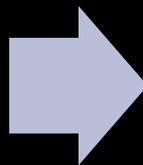
XMM衛星 (ヨーロッパ)

- 1999年～
- 大きな有効面積

すざく衛星による炉座銀河団の観測

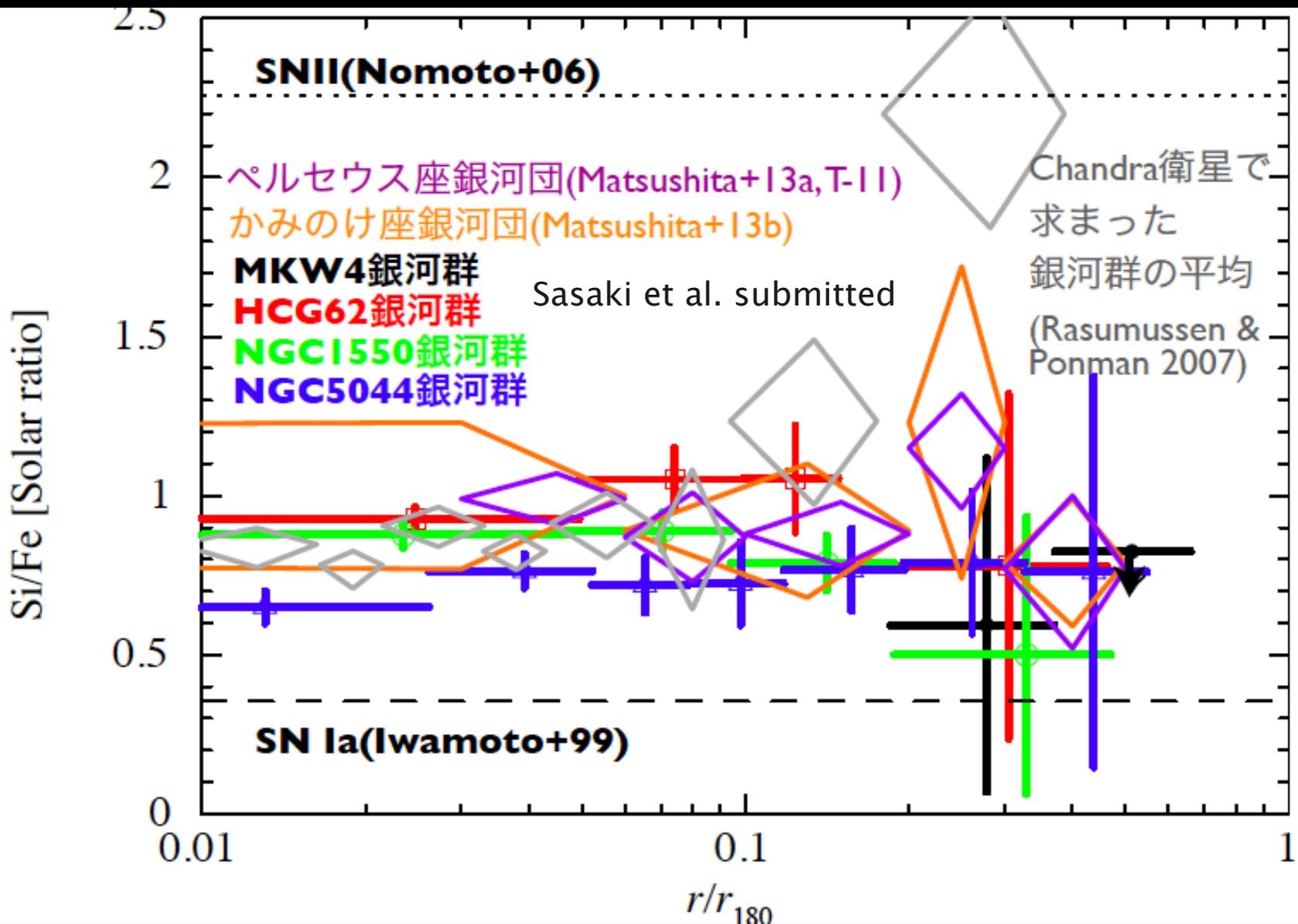


銀河間空間に大量の酸素が存在することをはじめて発見



過去に大量の寿命の短い大質量星が存在した

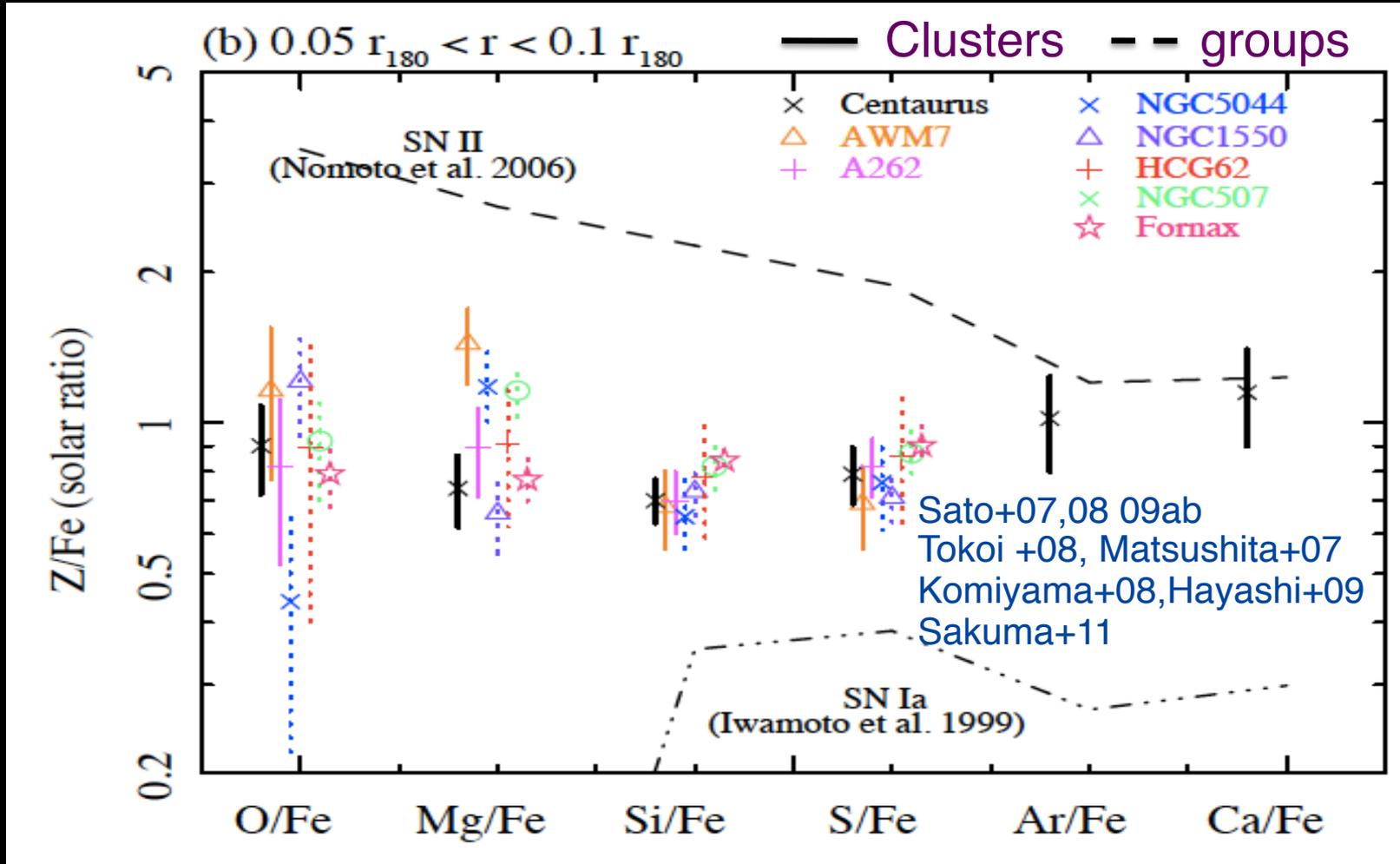
銀河団ガスのSi/Fe比の半径分布



半径によらずほぼ一定→超新星爆発比が一定

中心領域の外側の銀河団ガスの重元素の組成比

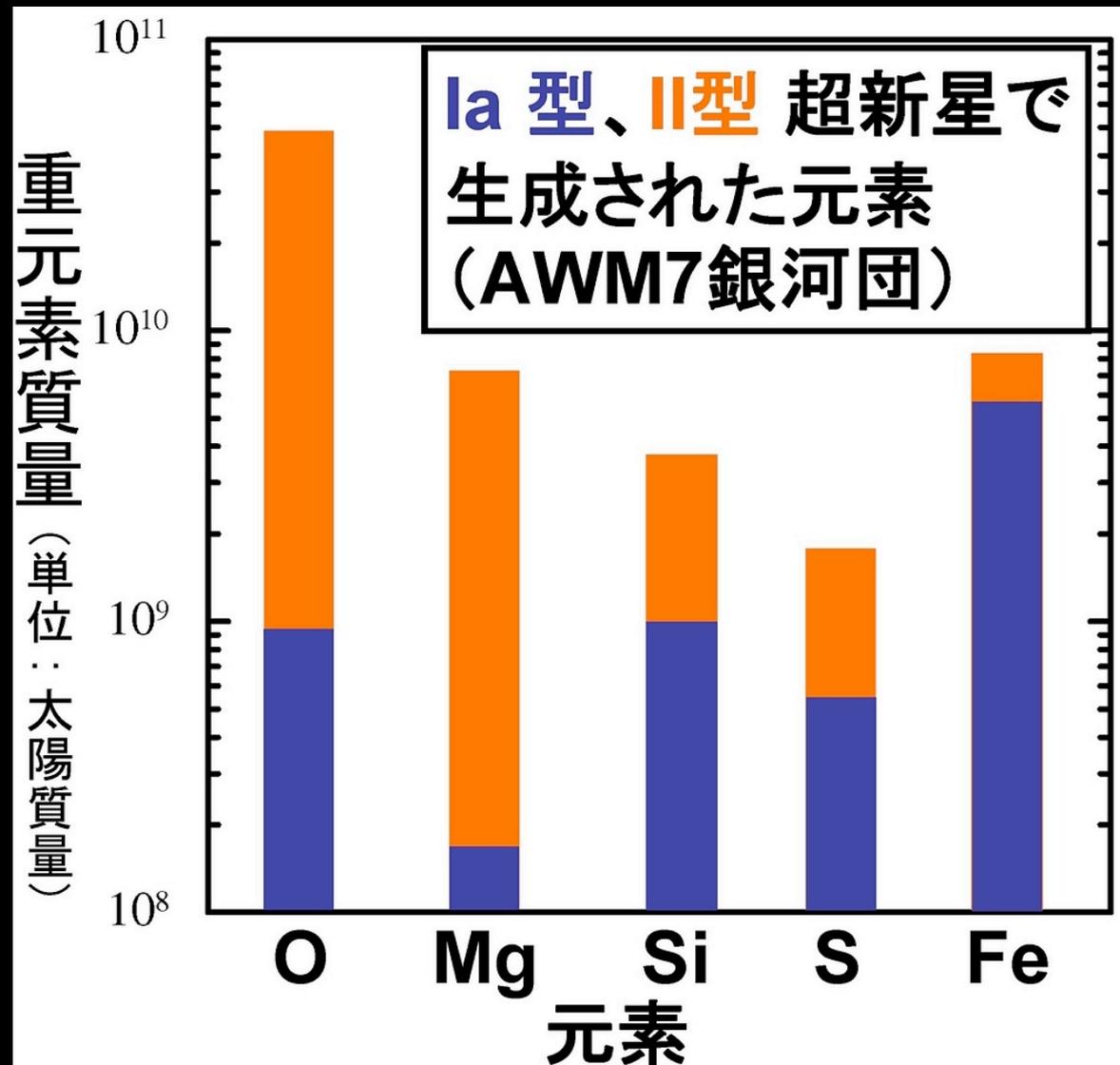
r_{180} : ヴィリアル半径



銀河団ガス中の重元素は太陽組成 (Lodders 2003)に近い
太陽近傍と同じような超新星爆発比？

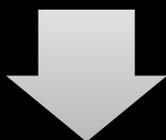
すざくにより測定された銀河団の過去の超新星爆発の寄与 (Sato et al. 2007)

- 鉄のほとんどはIa型超新星による



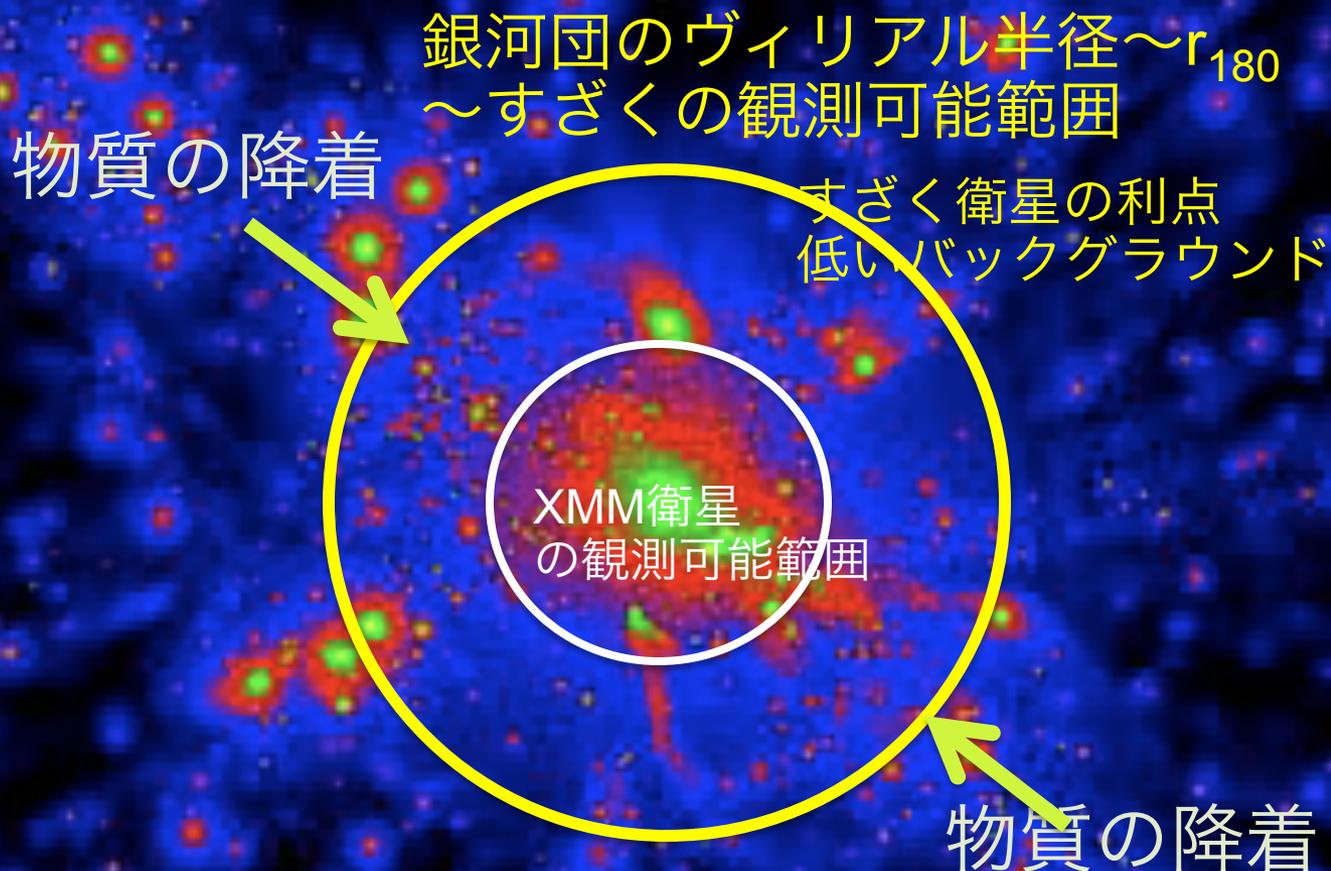
銀河団の外縁部へ

銀河団全体の
重元素量は？



すざく衛星以前は銀河団の体積
の1/8まで

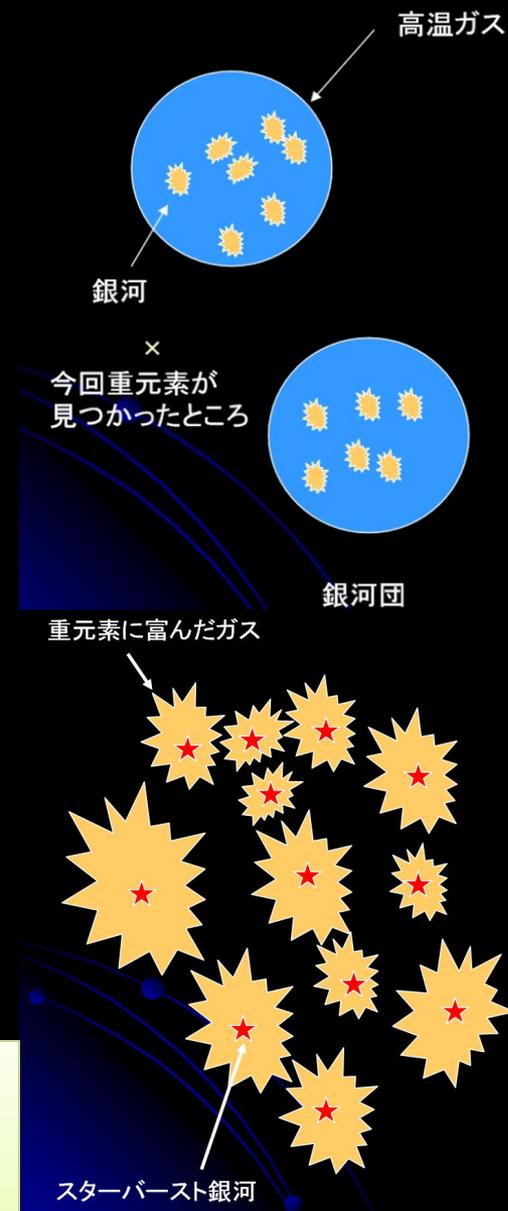
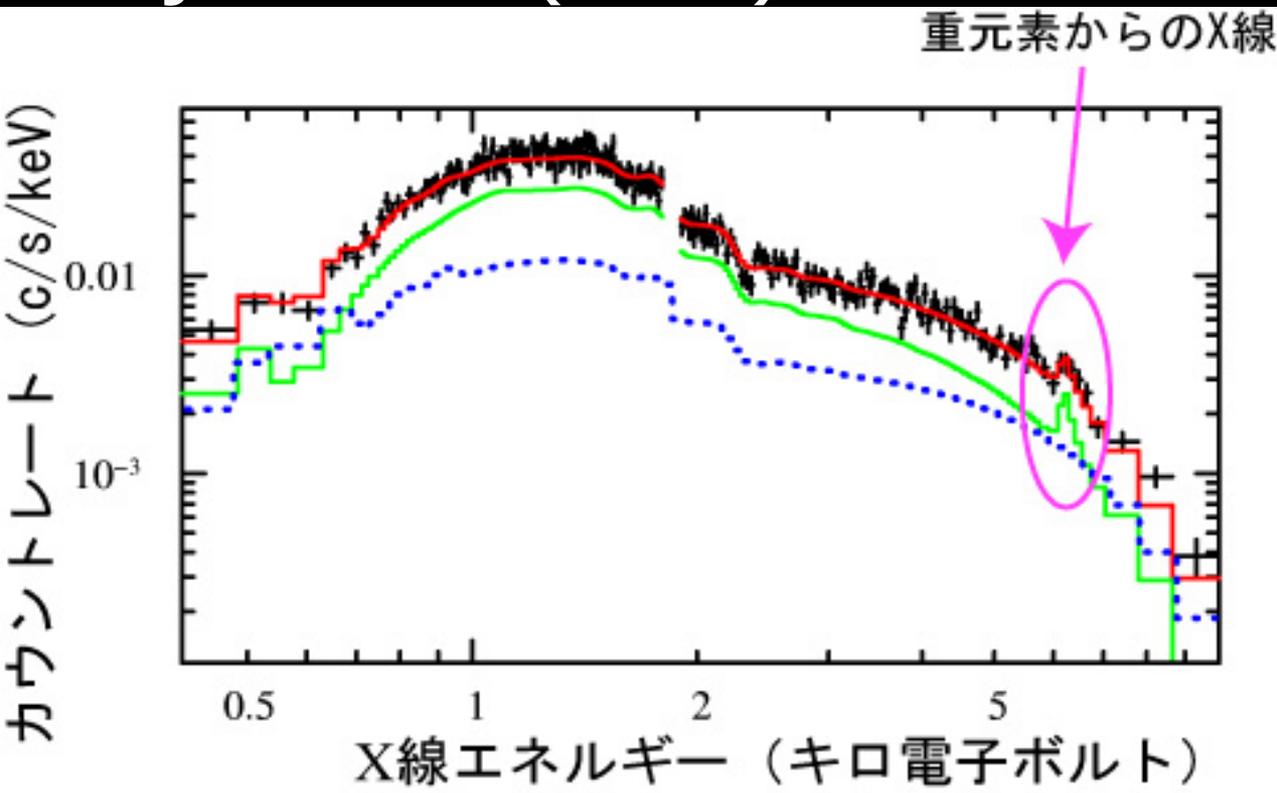
数値計算による暗黒物質の分布



numerical simulation by
Borgani et al. (2006)

すざく衛星による銀河団外縁部からの鉄の発見

Fujita et al. (2007)

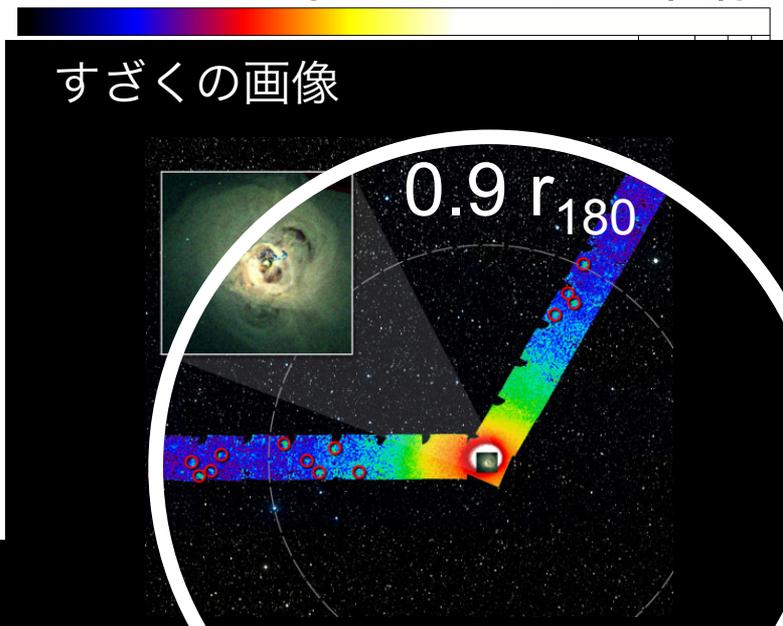
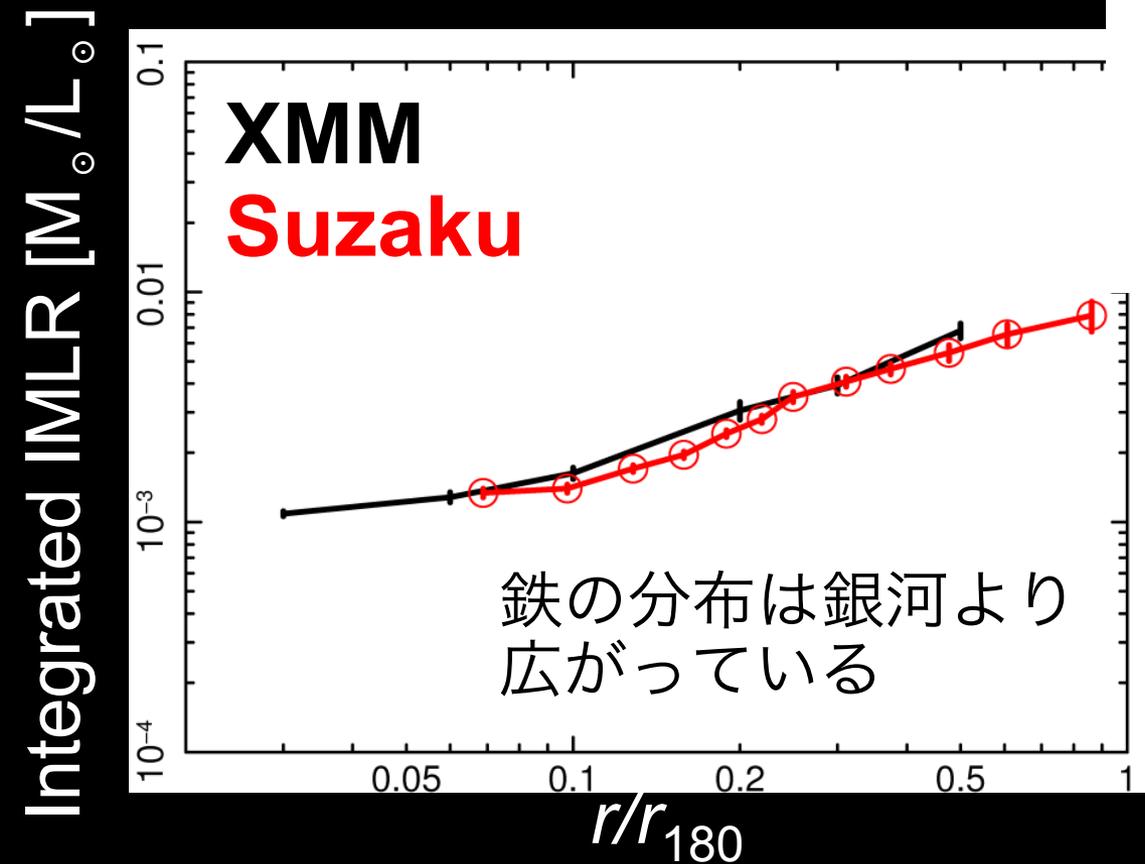
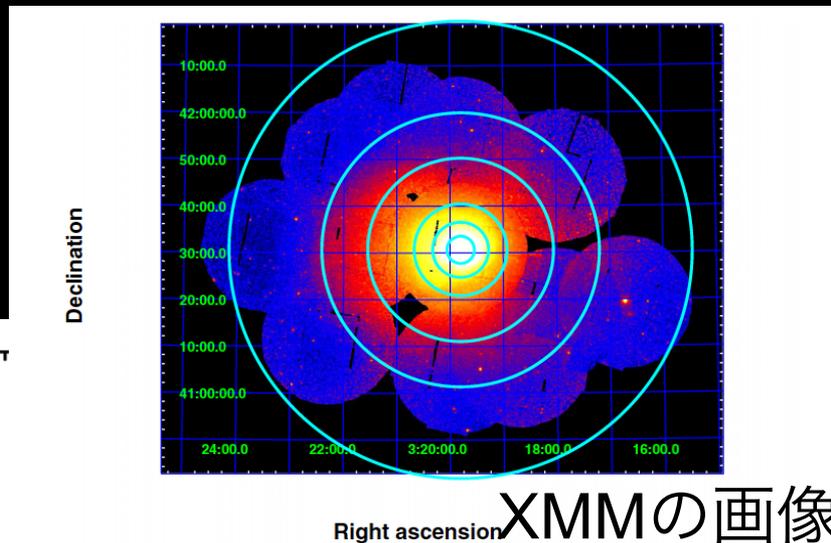


銀河団の銀河の星が大量に合成していた時代に鉄を大量に合成？

ペルセウス座銀河団のヴィリアル半径までの銀河団ガス中の鉄の質量/銀河光度

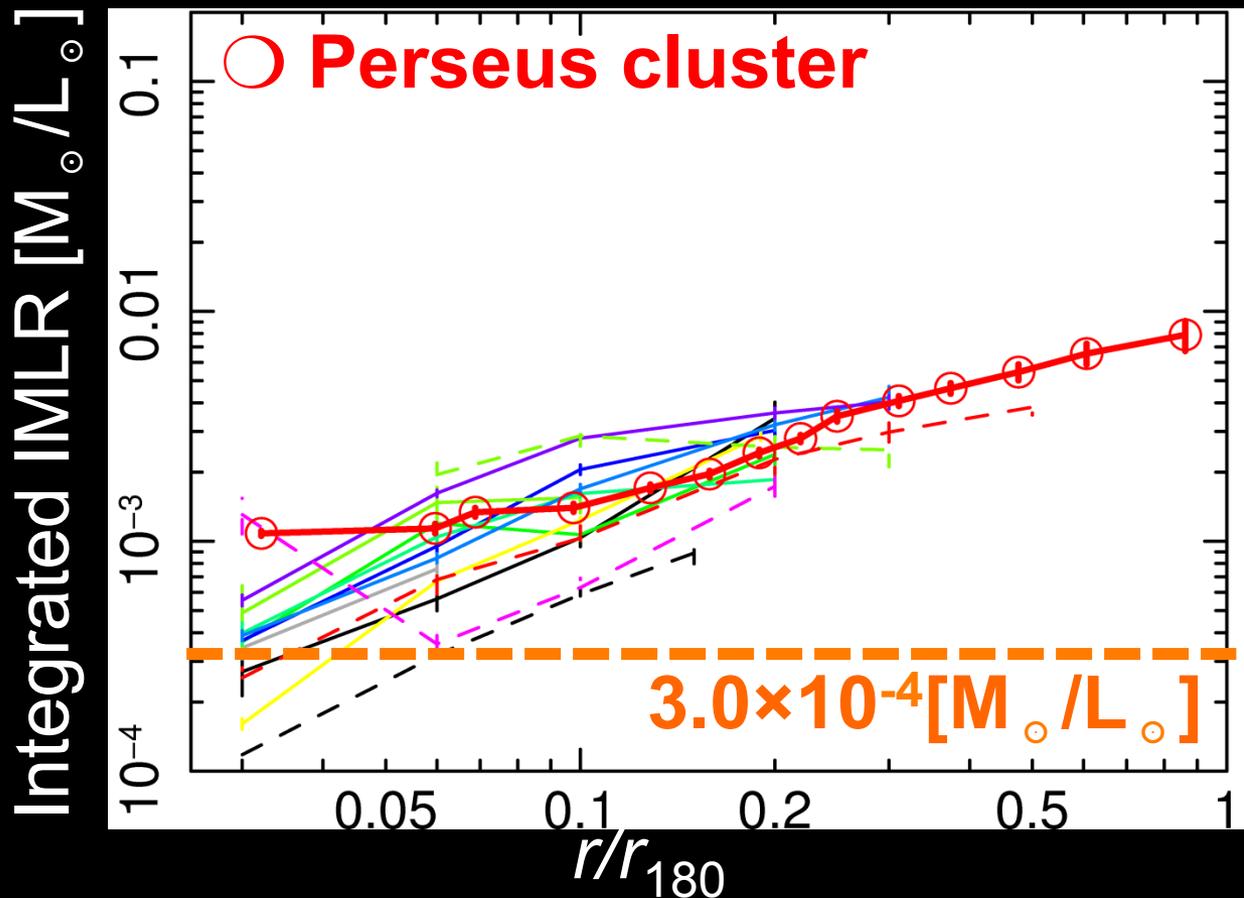
(Matsushita 2011, Matsushita et al. 2013; Simionescu+2011).

銀河光度はK-band (2MASS)



銀河団の銀河団ガスの鉄の質量/銀河光度

XMM, Suzaku衛星 Sakuma et al. in prep



鉄のほとんどは
Ia型超新星から

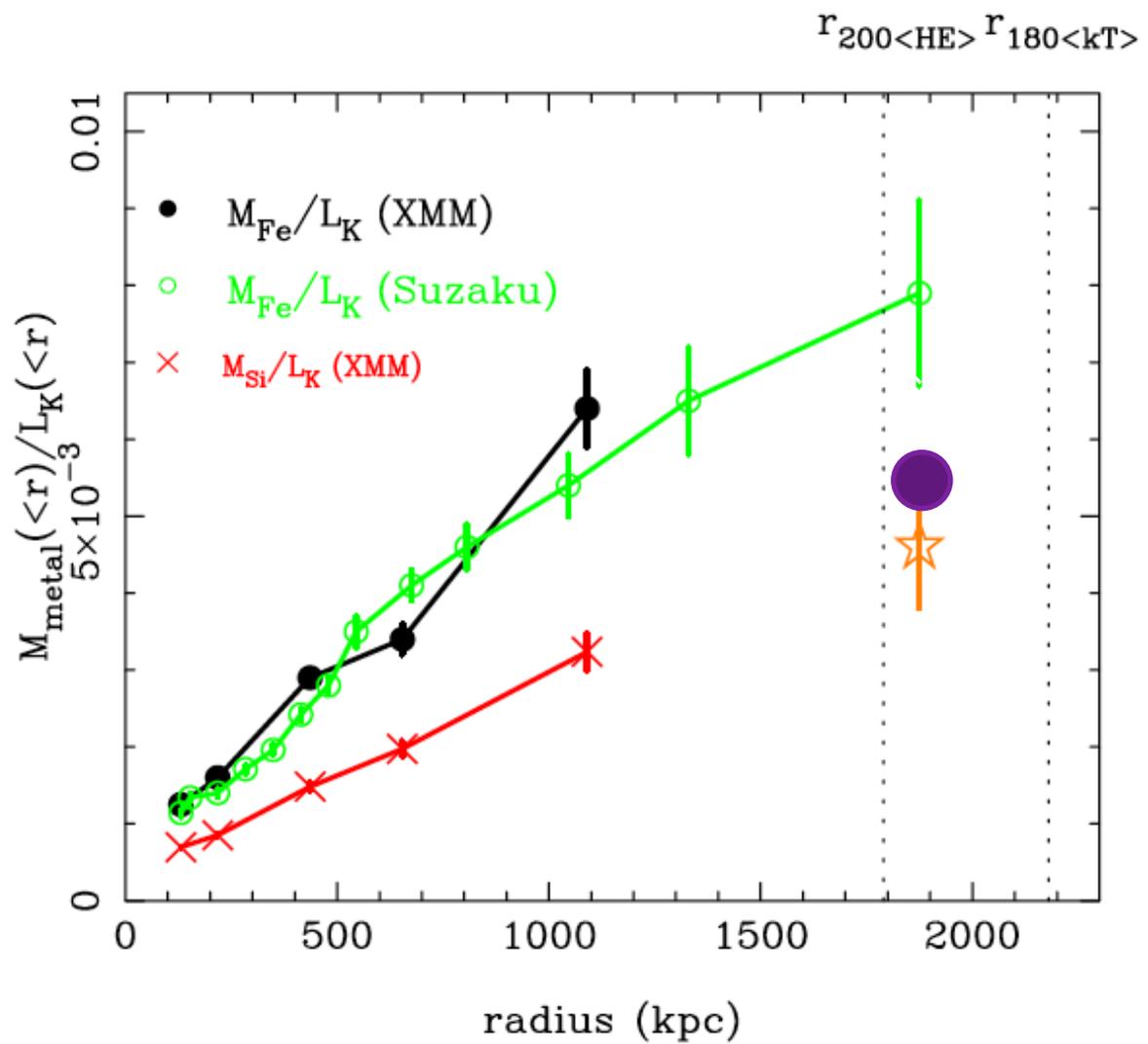
最近鉄を合成した
場合は、鉄の質量
と銀河光度比は一定

(present SN Ia rate) ×
(Iron mass per SN Ia)
×(Hubble time)
⇒ 3.0×10^{-4}
 $[M_{\odot}/L_{K,\odot}]$

昔ほど超新星Ia型の爆発率は高かった？

ペルセウス座銀河団の重元素質量と銀河光度の比

Suzaku衛星のvirial 半径（銀河団全体）までのガス密度、Fe abundanceから、virial 半径までの Si massを推定



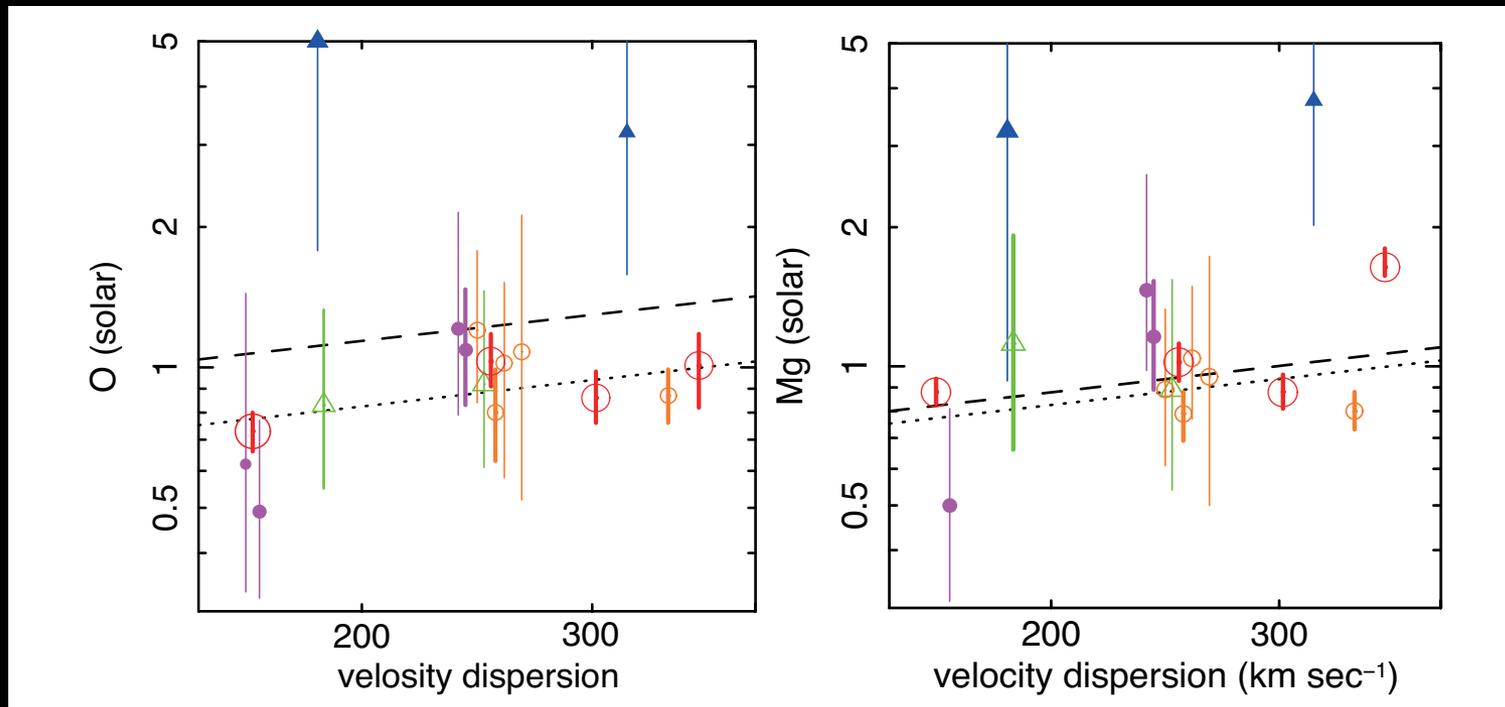
0.3-1.0 r_{180} で
Si abundance
は一定と仮定

M_{Si}/L_K for
Si/Fe=1 solar
と仮定

銀河の星に含まれるSiの質量は？

Suzaku衛星による早期型銀河の高温ガスのO, Mg abundance (Konami et al. submitted)

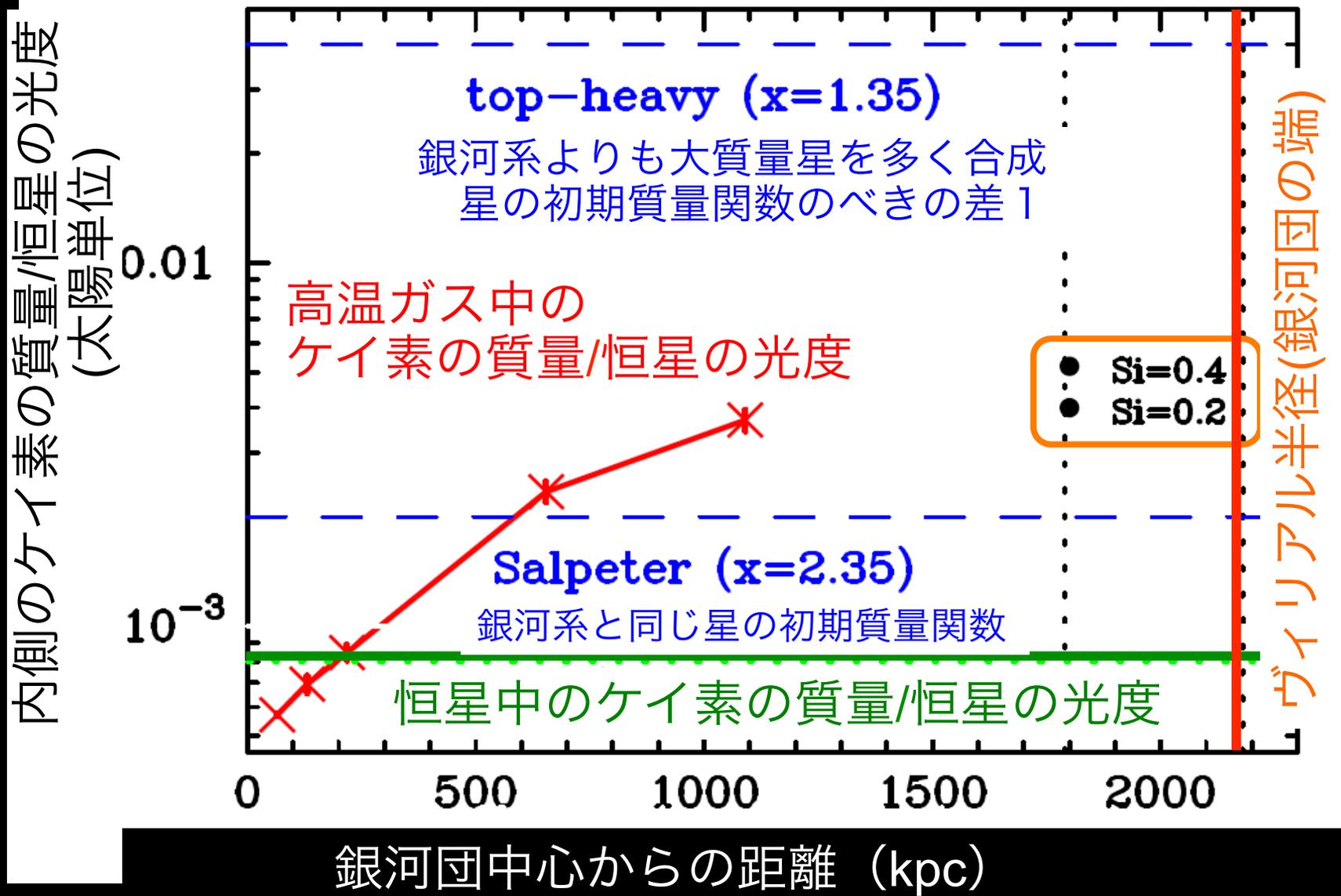
星の質量放出なので星のabundanceと一致するはず



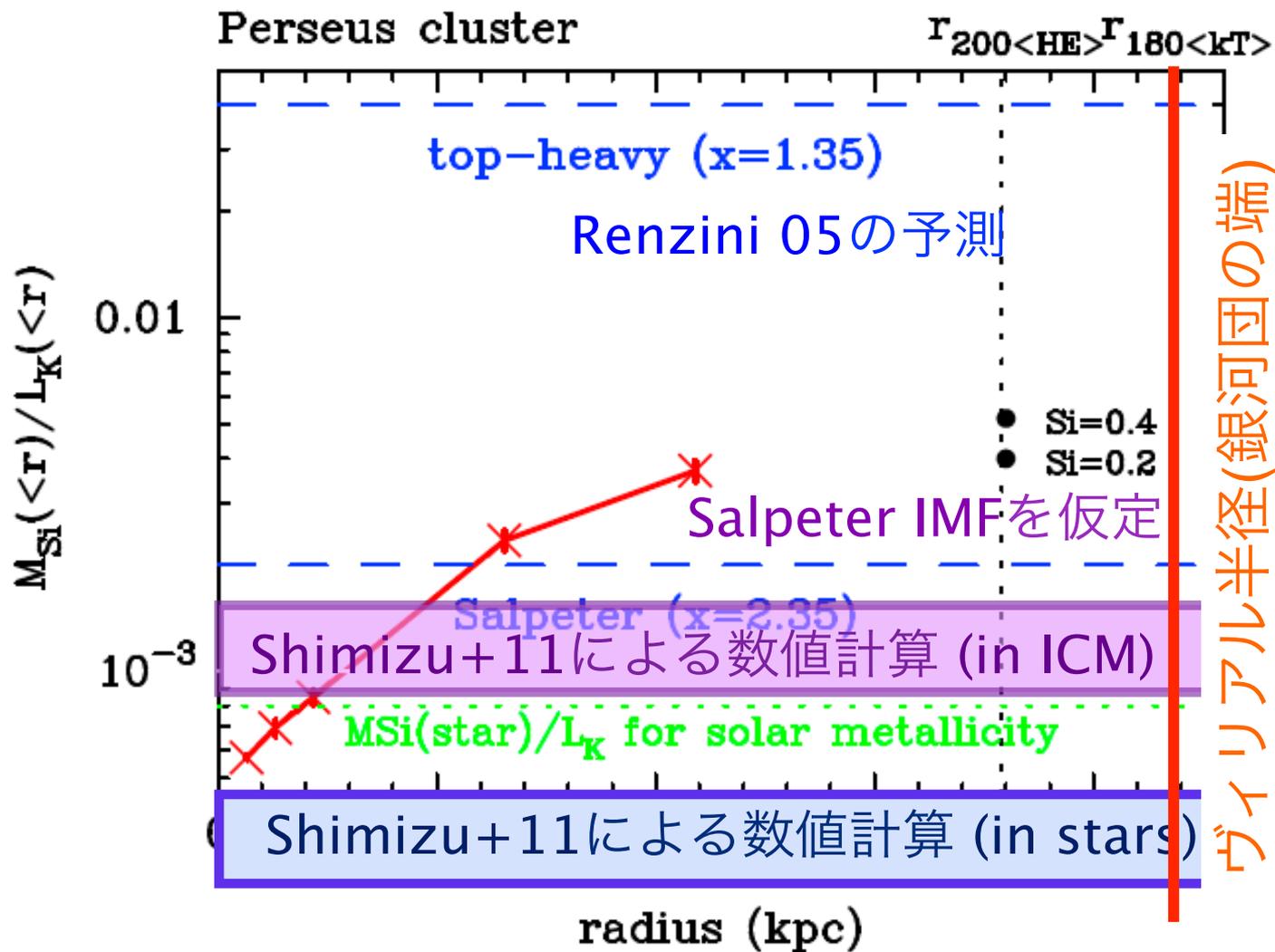
--- 可視光による星のmetallicity ($\langle r_e \rangle$), Kuntschner +10

星の組成比は太陽に近い

ペルセウス座銀河団の高温ガス中のケイ素の質量/銀河光度



数値計算との比較(Shimizu+11,T08a)



銀河団の高温ガス中の元素の起源は？

重力崩壊型超新星

銀河の星形成期に合成

太陽近傍と同じ質量分布で形成



観測された鉄の質量の1/10

すざくの観測 鉄の2割

星の初期質量関数は太陽系近傍と大きな差はない

Ia型超新星

星形成から10~数百億年後

現在の超新星爆発率



観測された鉄の質量の1/10

すざくの観測 鉄の8割

昔ほど爆発率が高かった？

銀河団ガスの重元素量/銀河光度

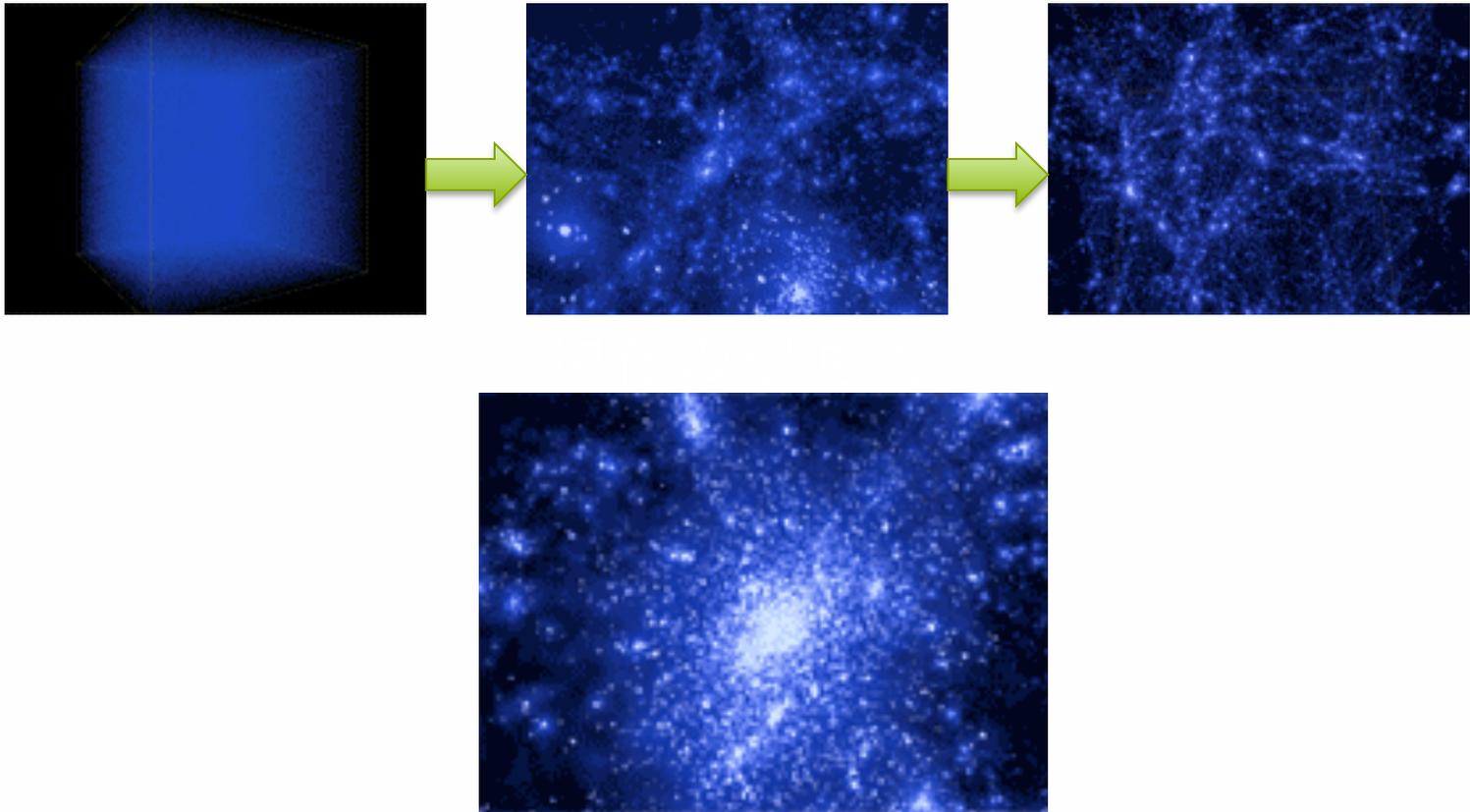
すざく衛星による、ヴィリアル半径(r_{180})までの銀河団ガスの鉄の量の測定

- 銀河団中の鉄の総量を測定
- 鉄の量/銀河光度は半径とともに増加
- 宇宙初期に鉄が合成された
- 多くはSN Ia起源 – SN Iaの多くも宇宙初期に？

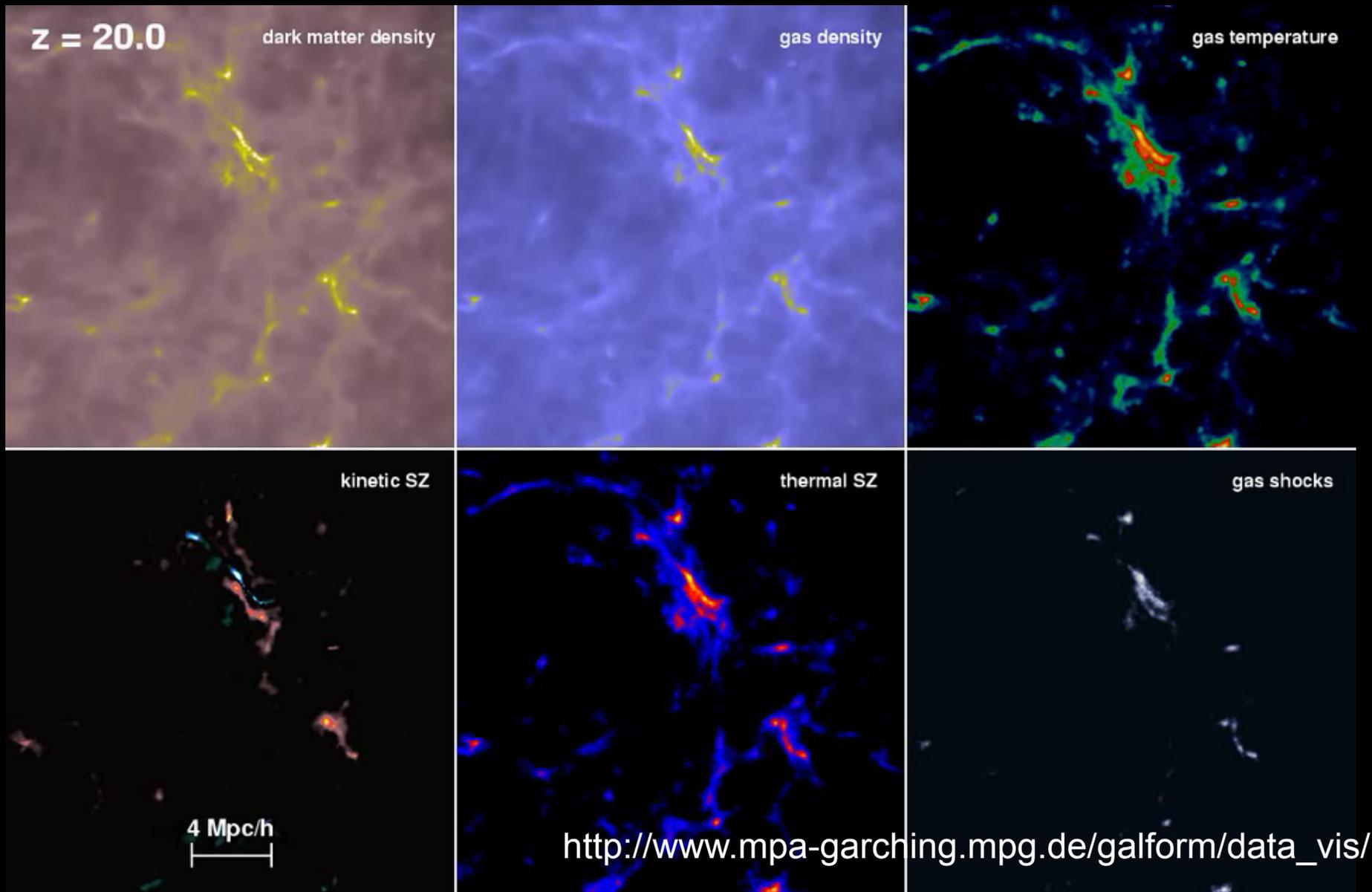
すざく衛星、XMM衛星によるO($<0.3r_{180}$), Si($<0.5r_{180}$)の観測

- Si/Fe(r)は一定
- ヴィリアル半径までのSiの量を推定
- 銀河団の星の初期質量関数のべきは2—2.4
 - 太陽近傍のべき 2.35

冷たい暗黒物質 (CDM) を仮定した数値計算

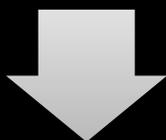


銀河団形成の数値計算



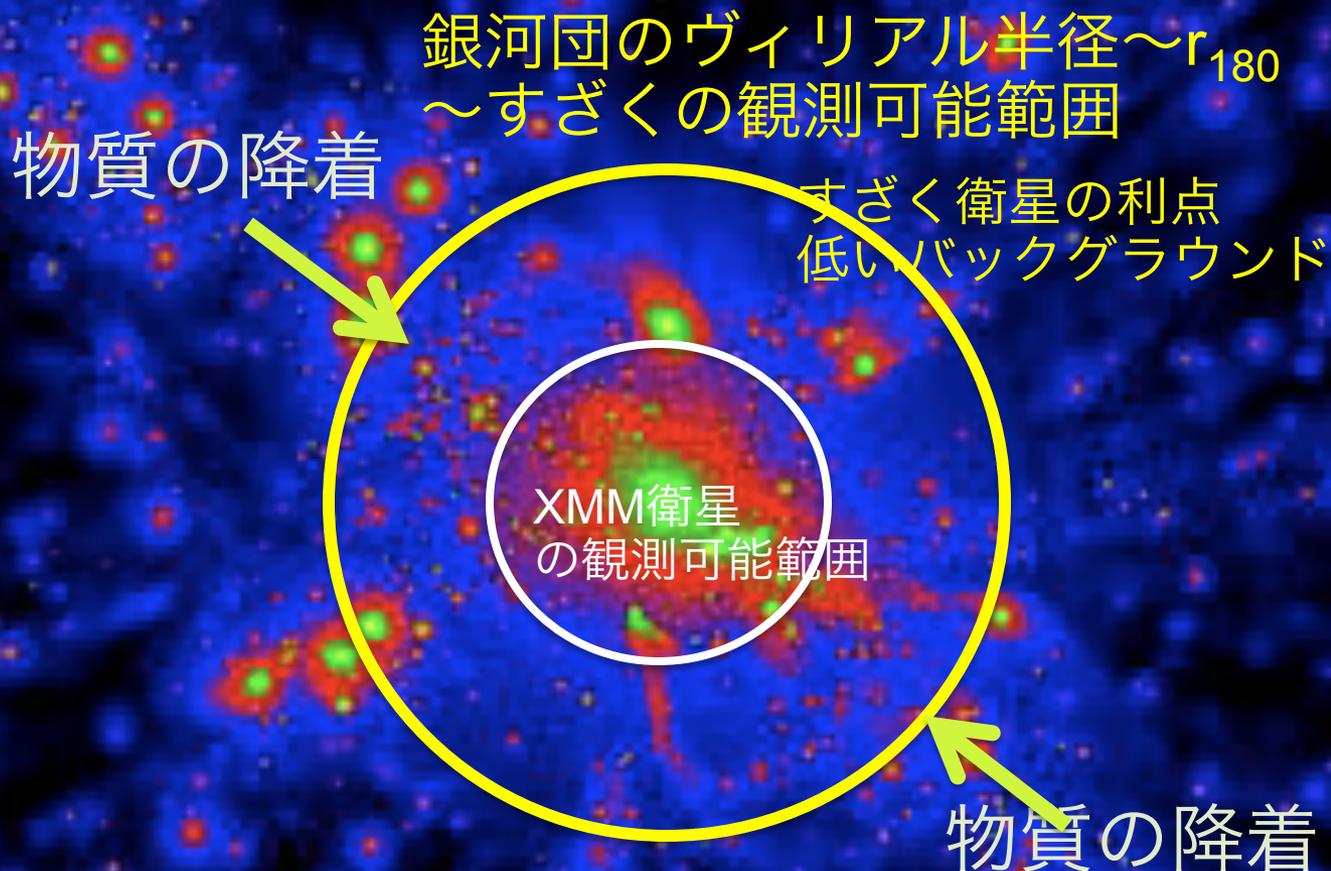
銀河団の外縁部へ

銀河団全体の
重元素量は？



すざく衛星以前は銀河団の体積
の1/8まで

数値計算による暗黒物質の分布



numerical simulation by
Borgani et al. (2006)

暗黒物質とバリオンの進化

冷たい 暗黒物質

重力により構造形成

小さな構造から形成

合体、降着により大きな構造

バリオンと 銀河形成

暗黒物質の重力により集まる

放射による冷却→星、銀河形成？

超新星、活動銀河核による銀河外へのエネルギー供給？

バリオンと 銀河団形成

暗黒物質の重力により集まる

衝撃波により加熱

銀河からのエネルギー供給？

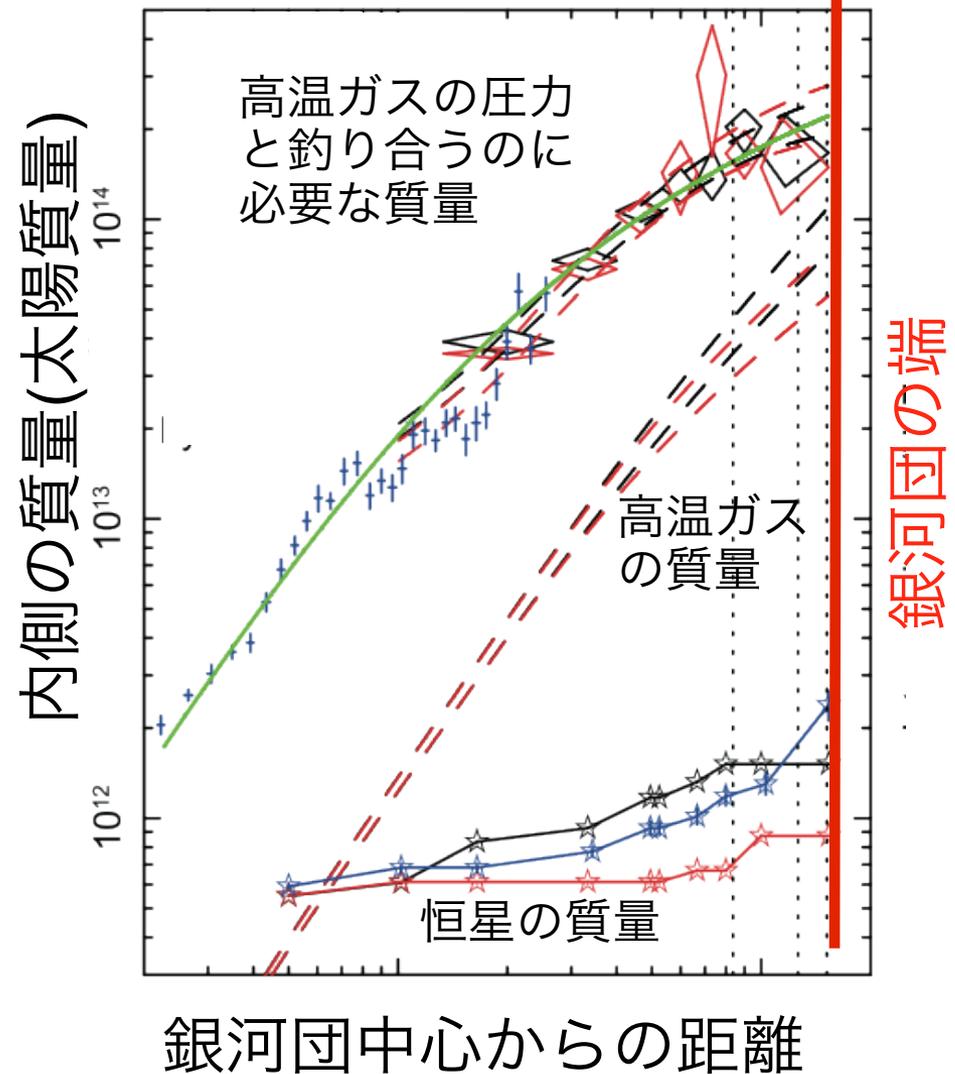
放射による冷却？

銀河団のヴィリアル半径までの質量分布

日本のX線天文衛星 「すざく」

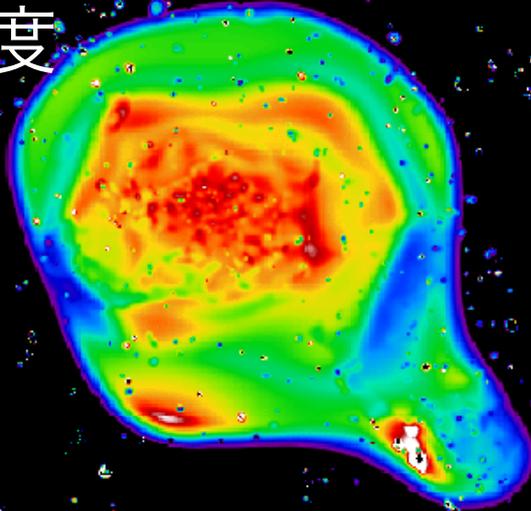
- 銀河団の端まで高温ガスからのX線放射を検出可能に
- これまでは体積の1/8まで

Sato et al. (2012)
Hydra A cluster

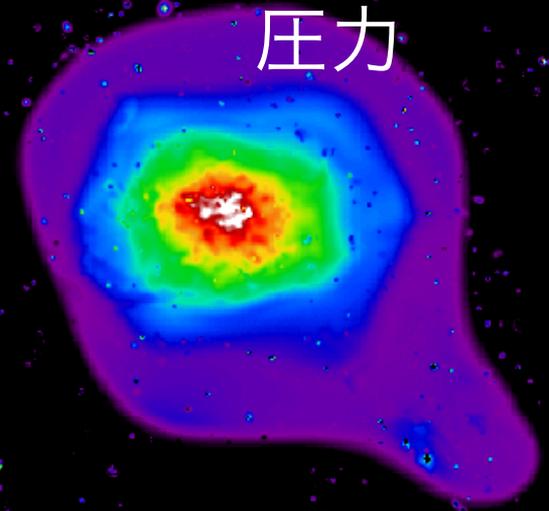


銀河団ガスのエントロピー

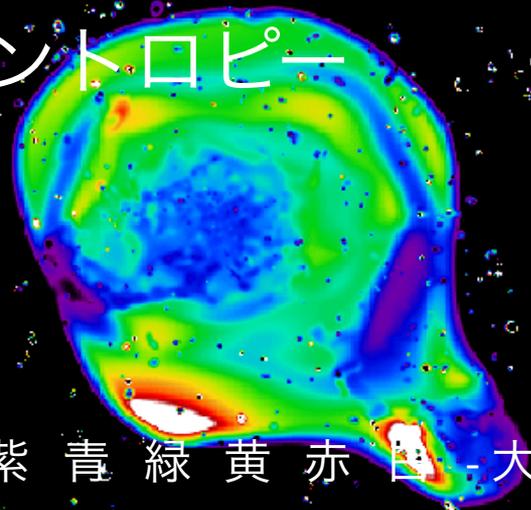
温度



圧力



エントロピー



小 - 紫 青 緑 黄 赤 白 - 大

高温ガスが加熱される



エントロピーが上昇



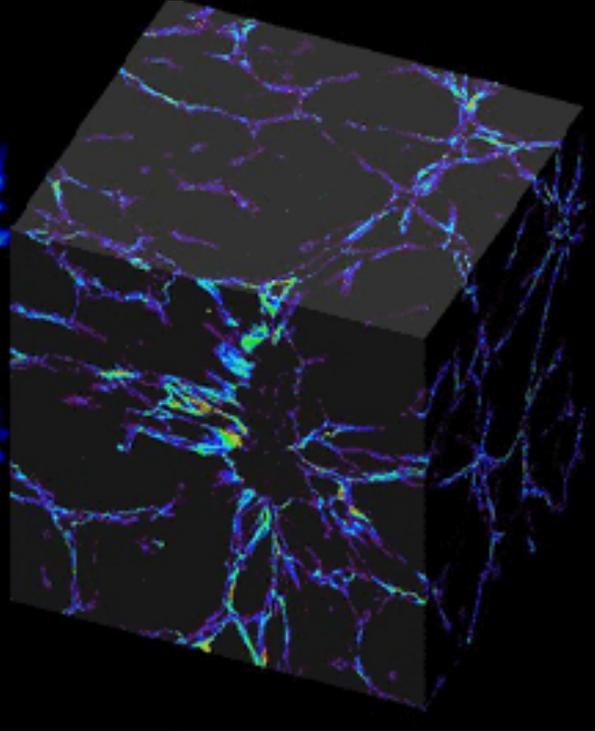
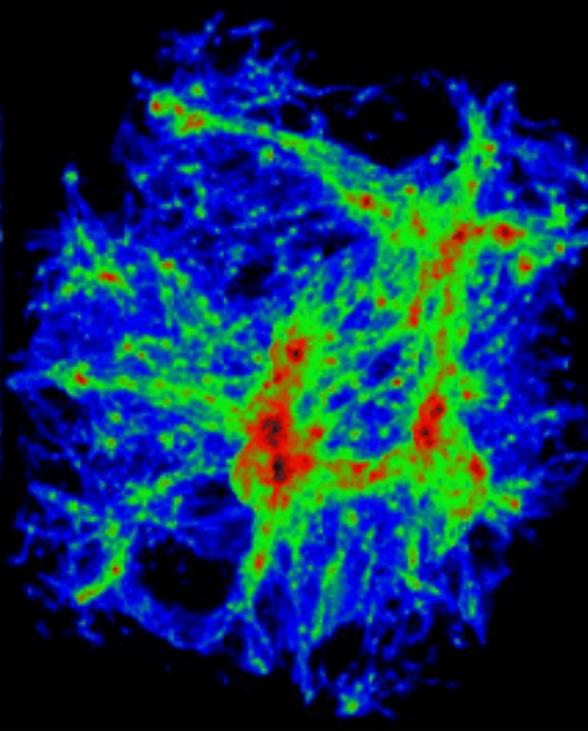
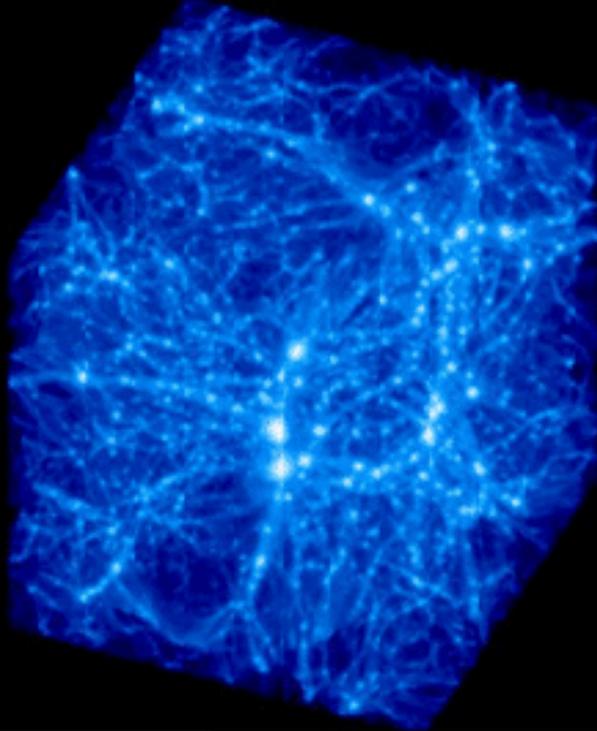
エントロピーは熱史の指標

銀河団ガスのエントロピー

X線強度

ガスの温度

衝撃波の強さ



衝撃波



エントロピーの増加



エントロピーの分布 = 銀河団の熱史

銀河団外縁部のエントロピー

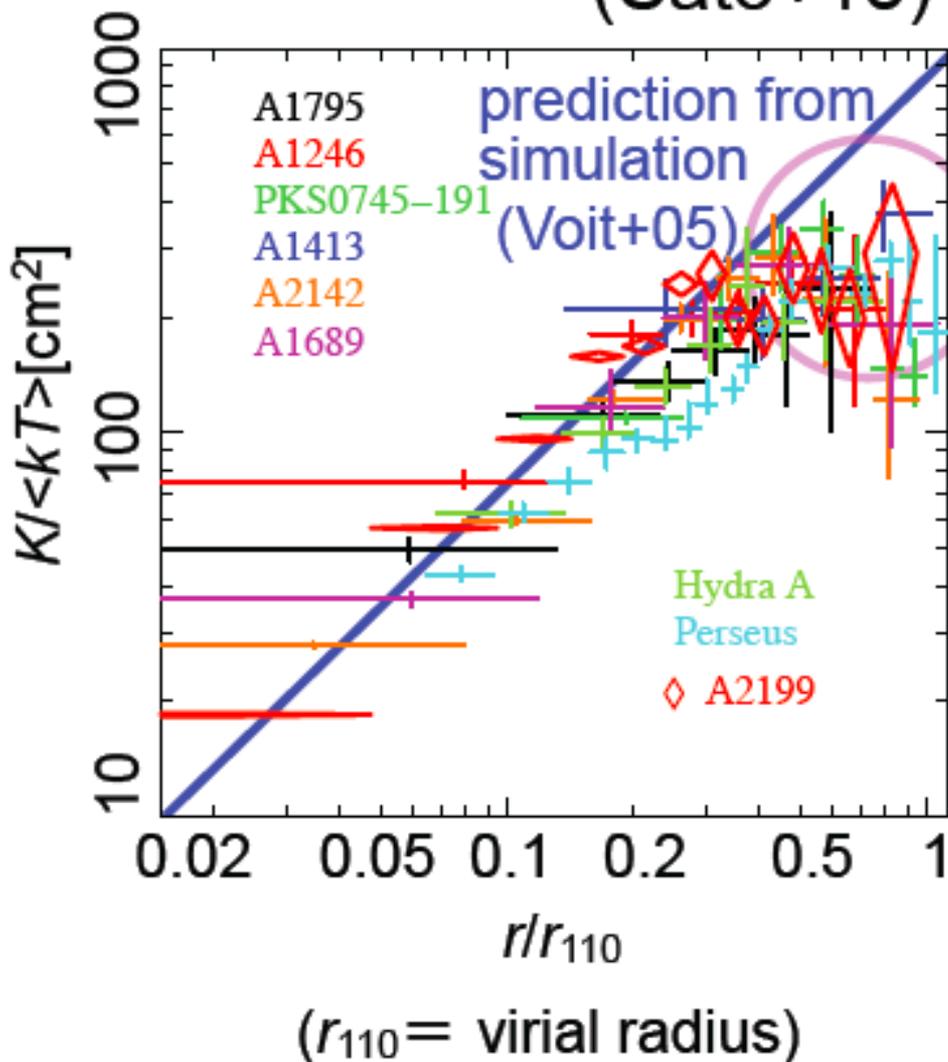
最近銀河団に降着してきたガスほど衝撃波が強いため、外側ほどエントロピーが上昇するはず。

理論予測より低いエントロピー？

銀河団外縁部では

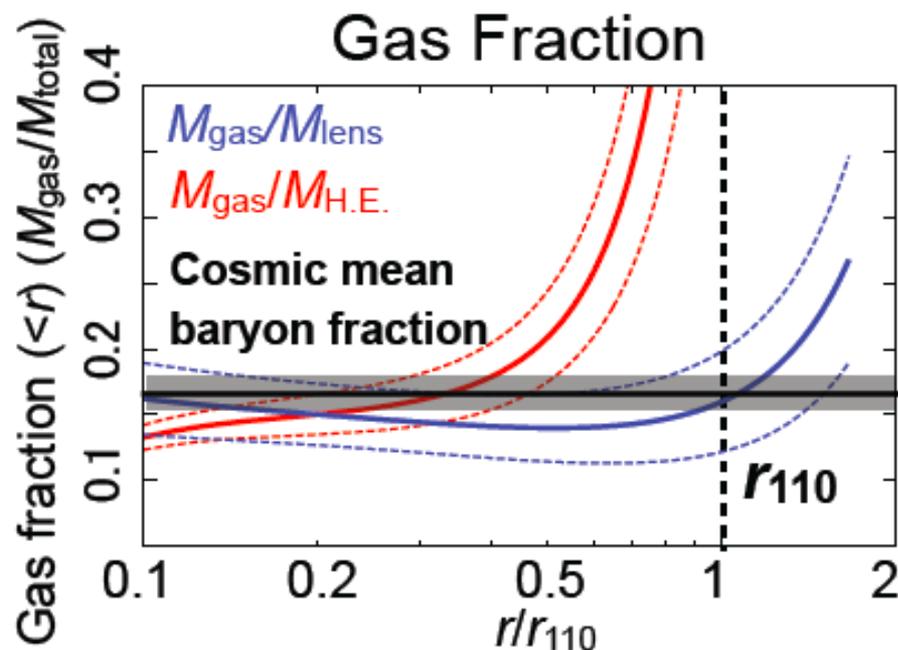
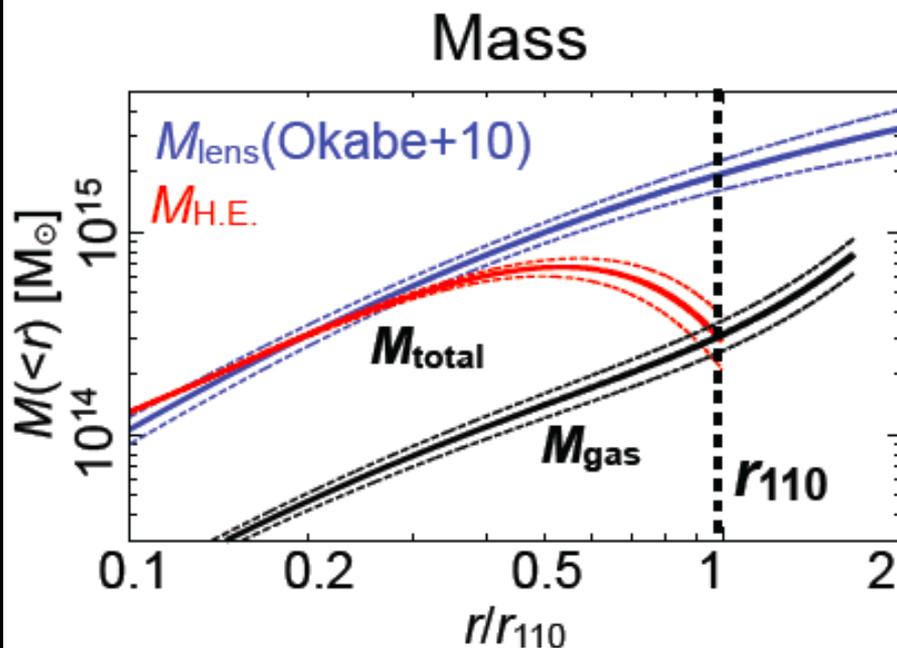
- ガスがむらをもっている？ (Simionescu et al. 2011)
- 電子温度とイオン温度に差？ (Hoshino et al. 2011)
- ガスが乱流または大規模運動？ (Kawaharada et al. 2010)

Entropy profile with Suzaku
(Sato+13)



重力レンズとX線観測から求めた質量の比較

A1835のSuzakuによる解析結果 (Ichikawa+13)



$r > 0.5r_{110}$ で

weak lensing mass (M_{lens})

> hydrostatic mass ($M_{\text{H.E.}}$)

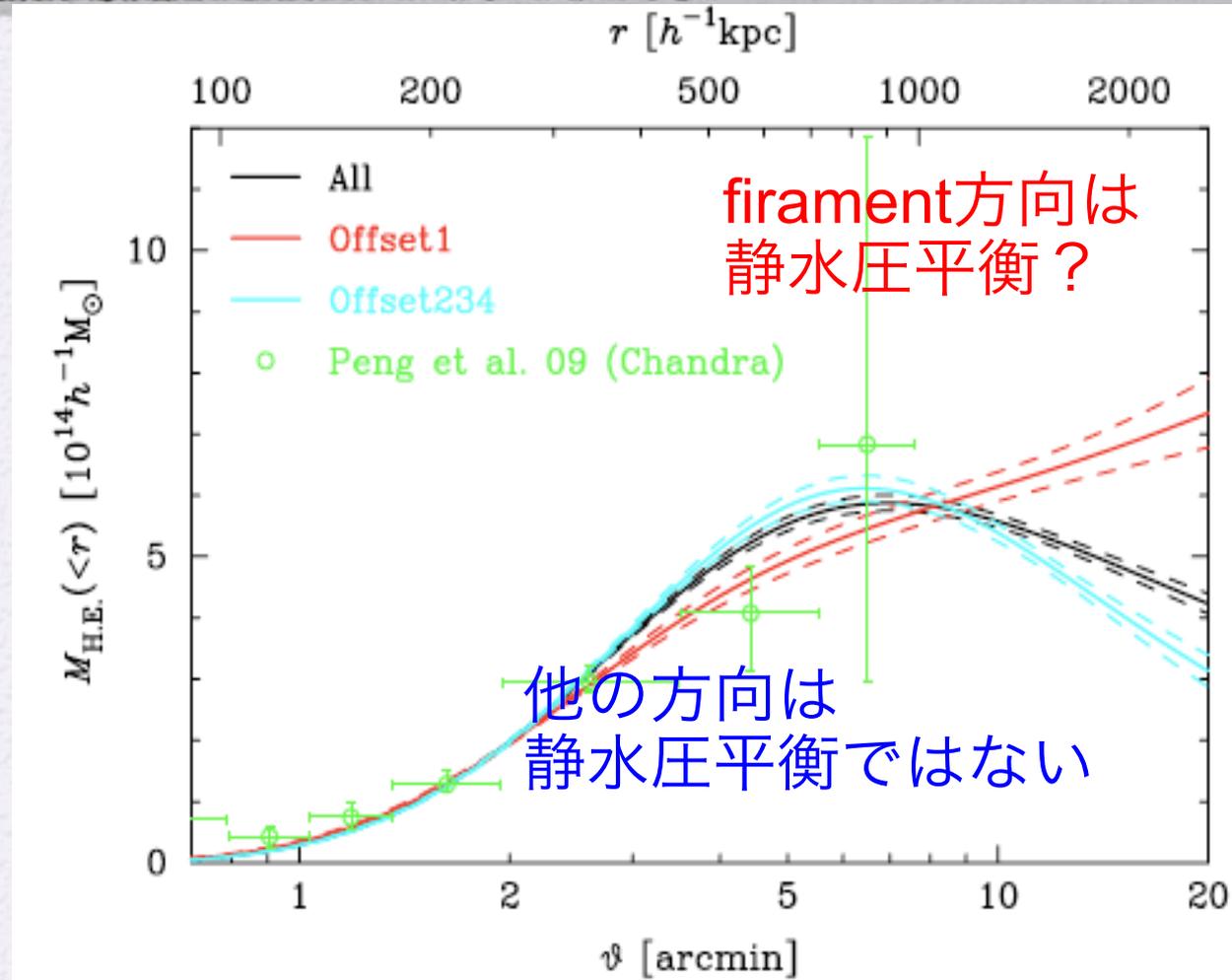
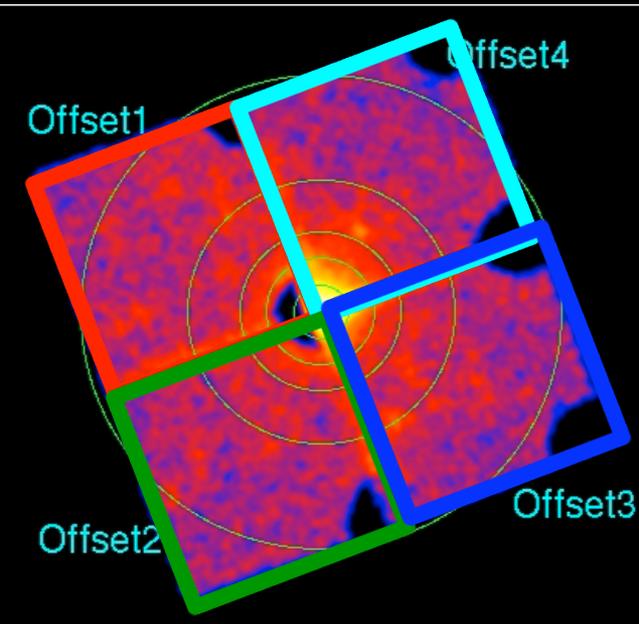
Cosmic mean baryon fraction (Komatsu+11) に対して

$M_{\text{gas}}/M_{\text{lens}}$: r_{110} 付近で consistent

$M_{\text{gas}}/M_{\text{H.E.}}$: $r > 0.5r_{110}$ で excess

A1689(z=0.19) with Suzaku

Kawaharada et al. (2010)



銀河団の巨大な質量を支えるために、フィラメント以外の方向ではガスが流れを持って動いている？

すざく衛星による銀河団外縁部のエントロピー

エントロピーは銀河団ガスの加熱史を反映

衝撃波が強くなる外縁部はエントロピーは外側ほど上昇するはず

- 観測的には一定

銀河団外縁部では重力レンズの質量 $>$ 静水圧平衡を仮定した質量

- 降着により解放された重力エネルギーがガスの内部エネルギーではなく、運動エネルギーに？

銀河団の形成現場をみている！

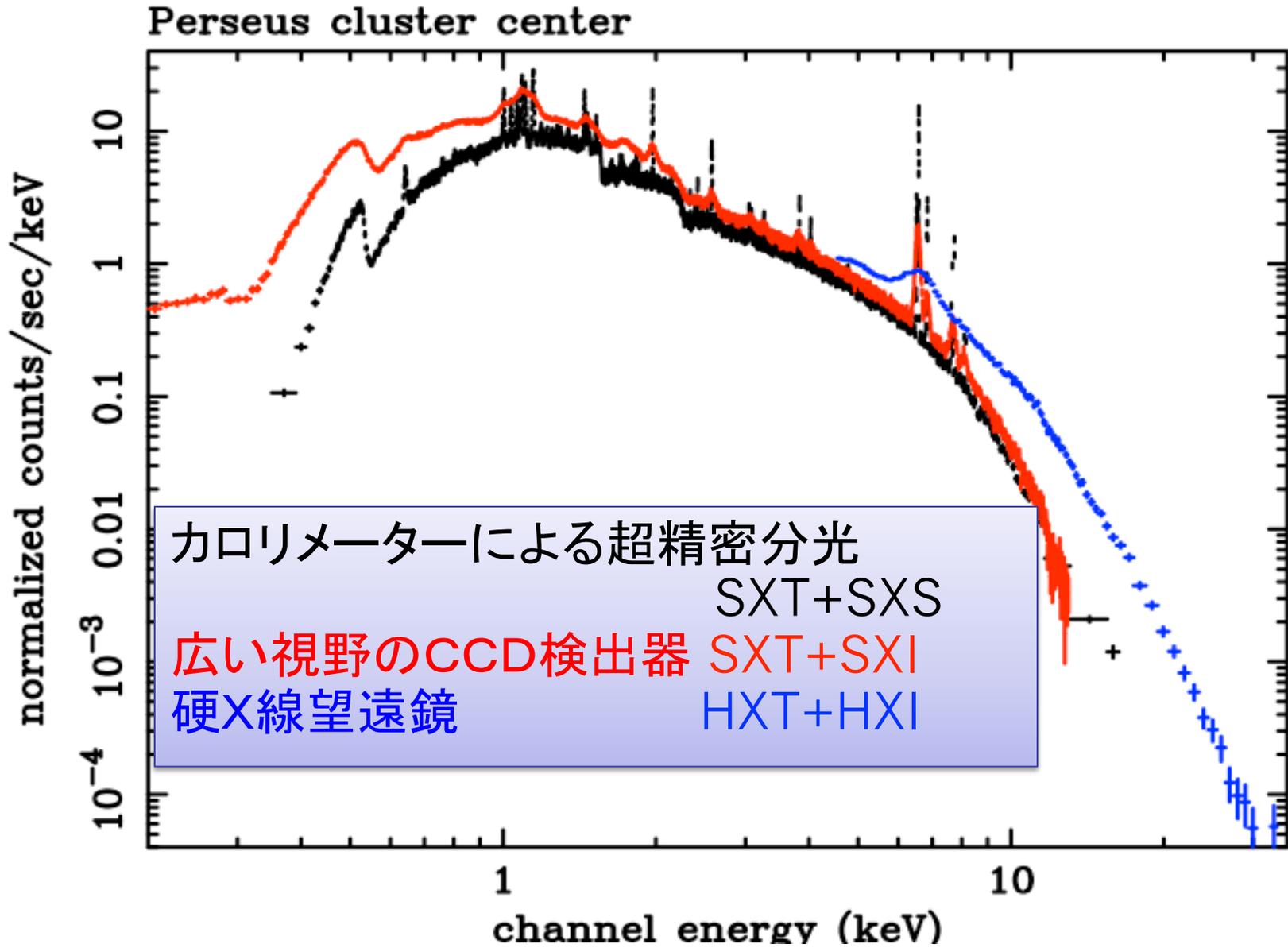
次期X線天文衛星 ASTRO-H

X線帯域での 超精密分光が始まる

2015年打ち上げ予定

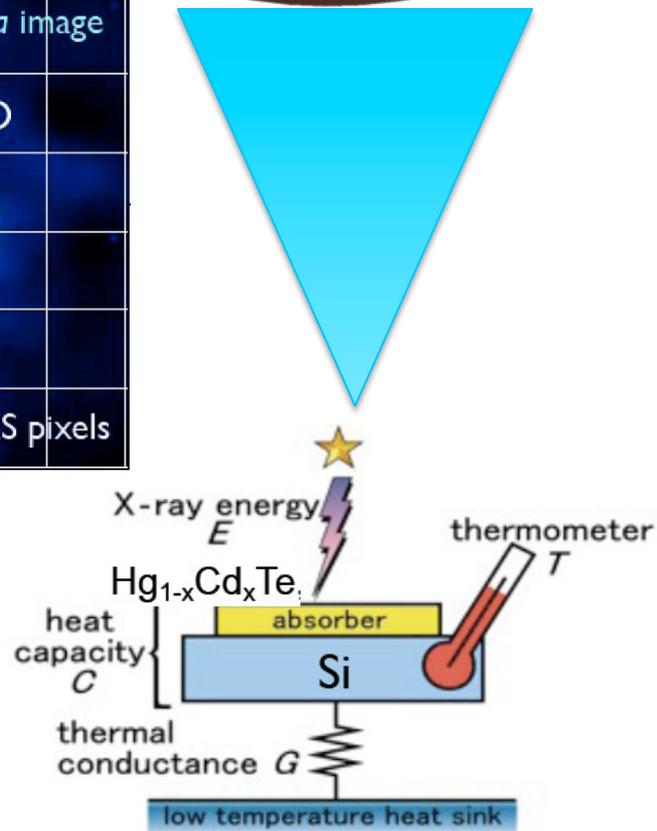
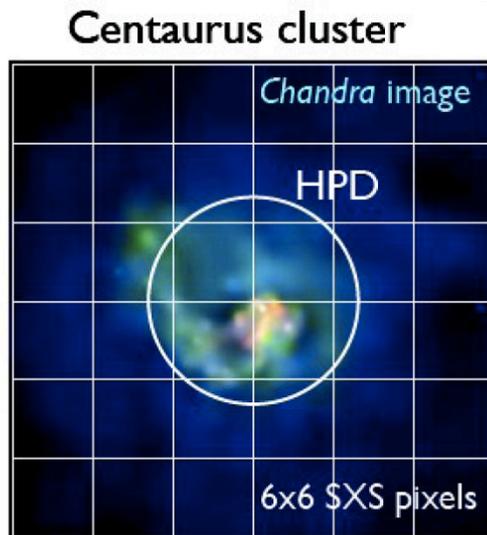
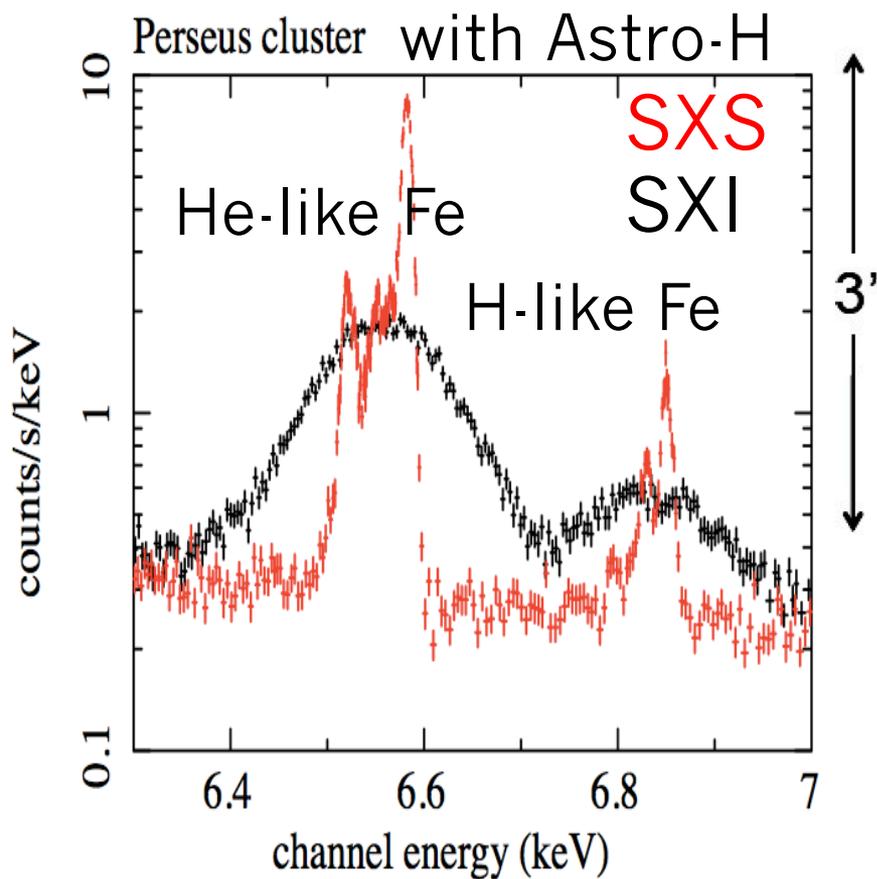
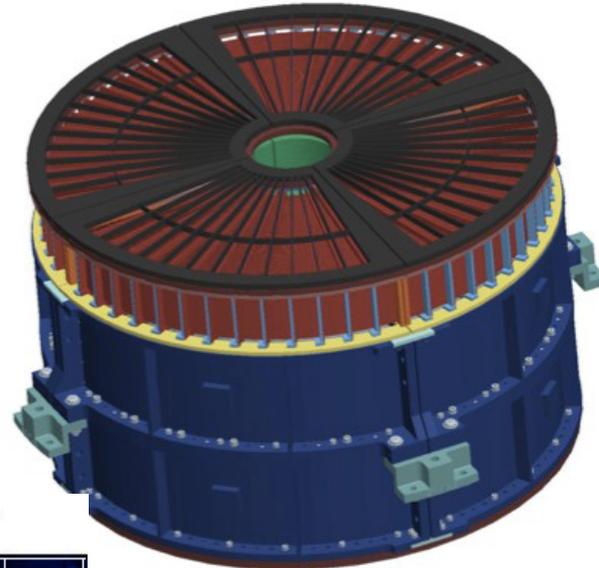
ASTRO-Hでは、宇宙最大の天体である銀河団を満たし、X線でしか観測ができない高温ガスの速度を精密に測ることで、その運動を明らかにします。そして、銀河団のエネルギーと銀河や高温ガスのダイナミックな姿を描き出します。これは宇宙の歴史の中で銀河団という巨大な構造がどうやってできたのか、そしてどのように進化してきたかの謎を解く事につながります。

Astro-H衛星によるペルセウス座銀河団中心部の 予測スペクトル



SXT + SXS(calorimeter)

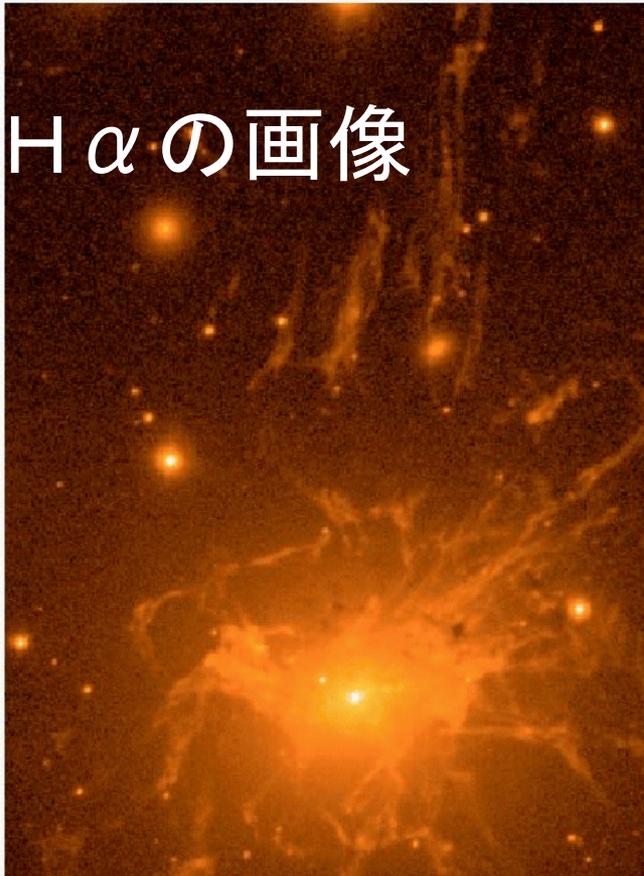
エネルギー帯域: 0.3-12keV
エネルギー分解能: 5eV
空間分解能 (HPD): 1.3'
視野: 3'x3'



ペルセウス座銀河団の中心領域

銀河、活動銀河核からのエネルギー供給→乱流？

H α の画像

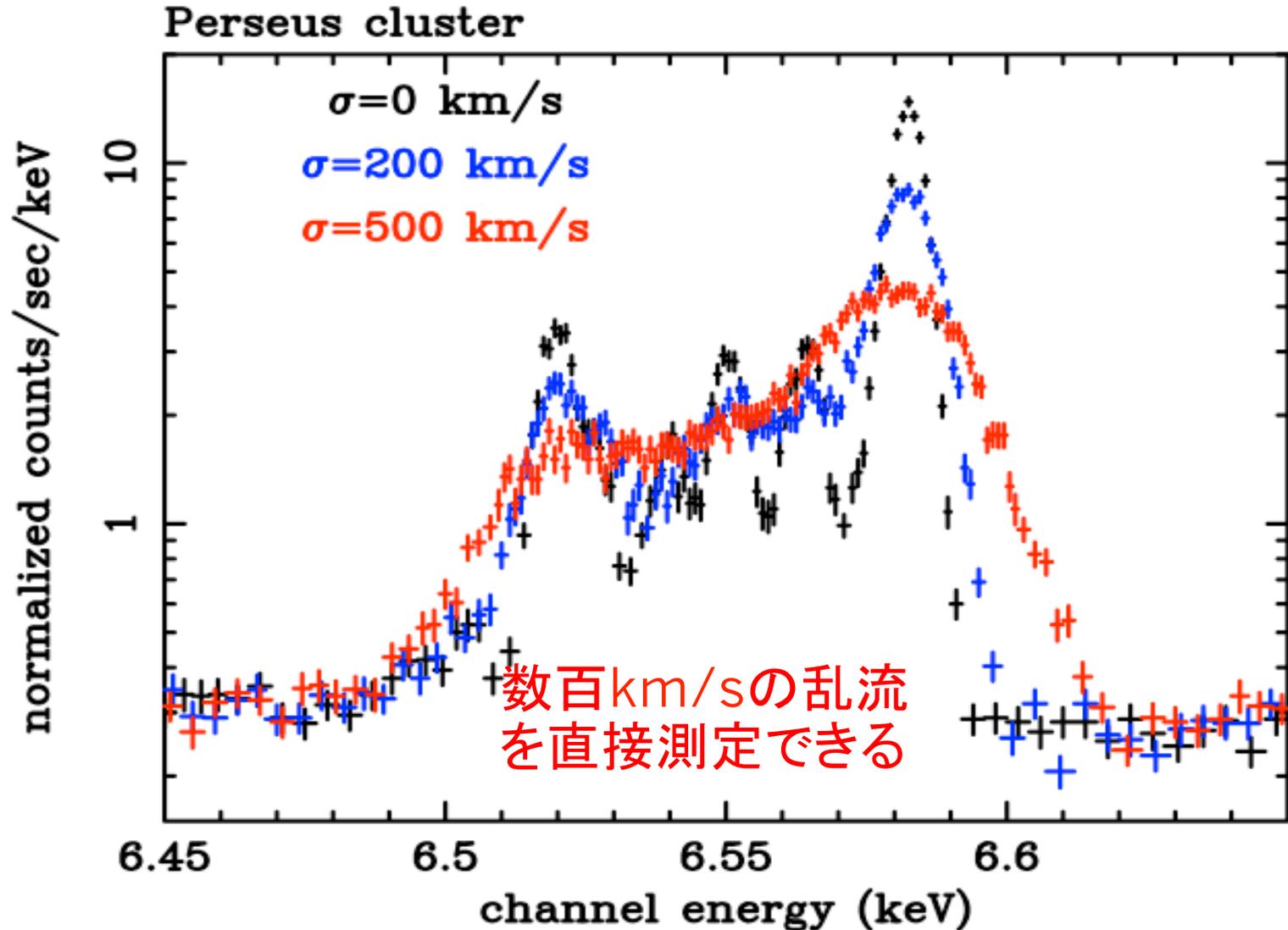


ChandraX線衛星による画像
(Fabian+03)



銀河団の中心領域からの強いX線放射を支えるためには、何らかの加熱が必要

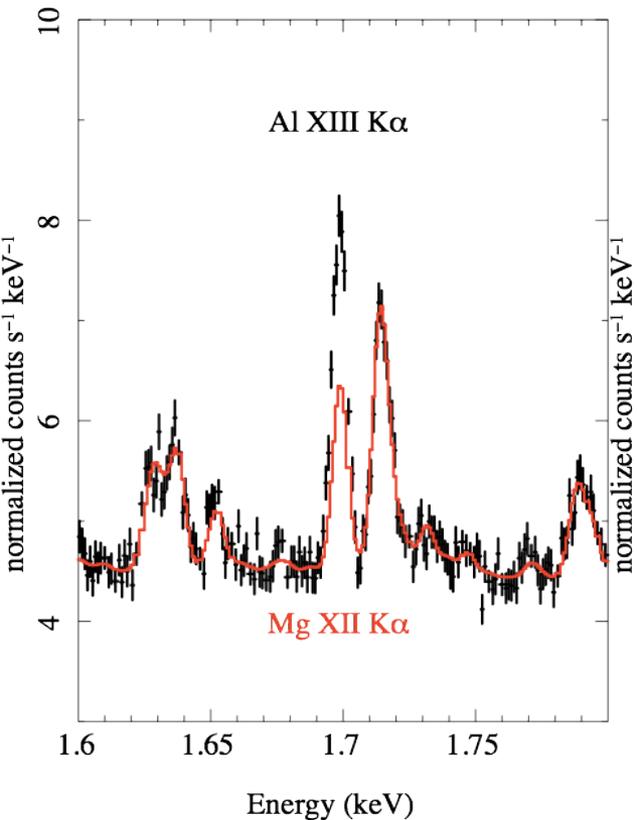
Astro-H衛星によるペルセウス座銀河団中心の He-like Feの予測



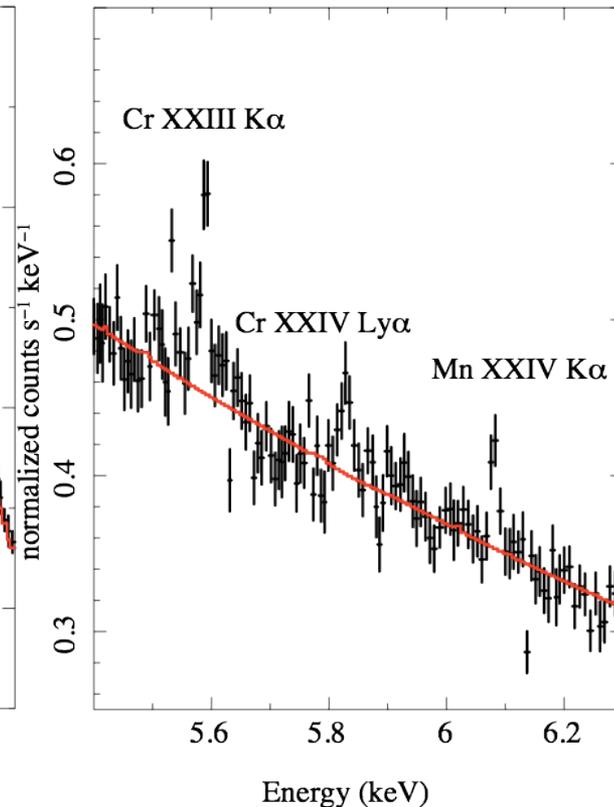
The center of the Perseus cluster with ASTRO-H

200 ks, assuming 300km/s turbulence

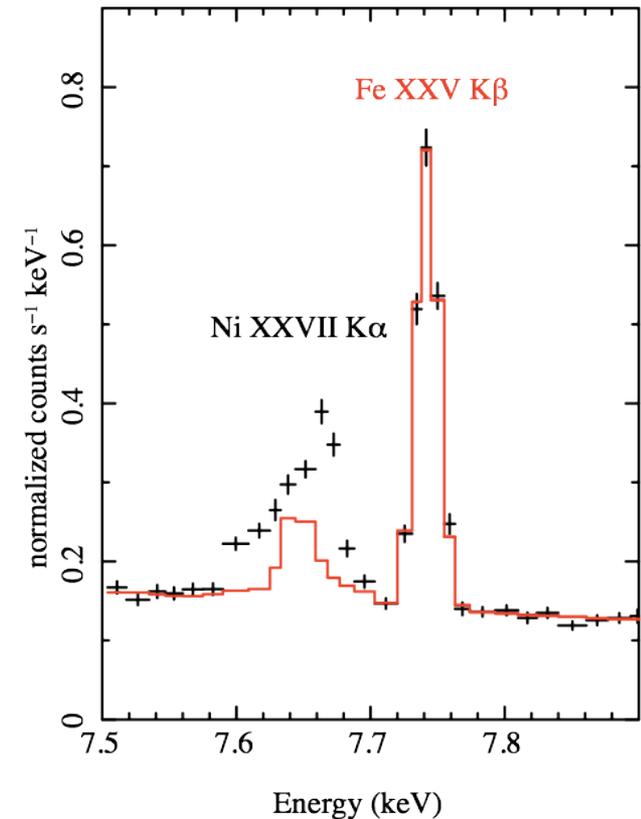
Al



Cr, Mn



Ni, Fe $K\beta$



宇宙の進化を調べる

天体はどのように生まれ進化してきたか？

- 暗黒物質の正体と重力による天体形成と進化は？
- 陽子、中性子から構成される物質（バリオン）の進化は？
 - 星はいつ、どこでどのように形成されたか？
 - 星になったことのない物質（ガス）の進化は？

X線による銀河、銀河団の観測を手がかりに

- 暗黒物質の分布を探る
- ガスの進化を探る
- 星形成史を探る