

銀河団高温ガス内部運動の 直接観測について ～過去・現在・未来～

滝沢元和

宇宙物理学研究室談話会

(2014年5月16日)

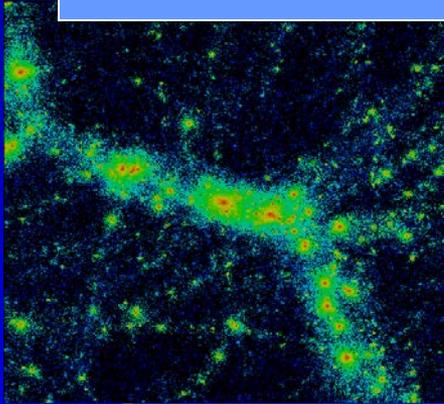
お品書き

- Introduction
- X線分光による観測(Suzaku以前)
- X線分光による観測(Suzakuでは)
- X線分光による観測(Astro-Hでは)
- 運動学的Sunyaev-Zeldovitch効果による観測可能性
- まとめ

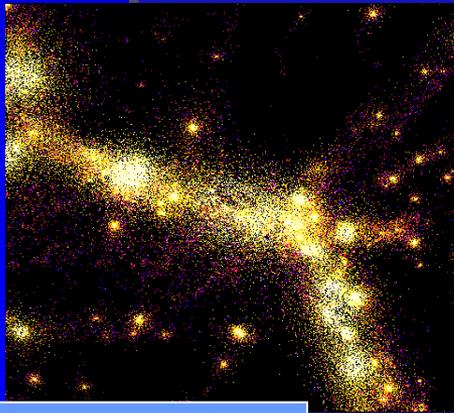
Introduction

Yoshikawa et al. (2003)

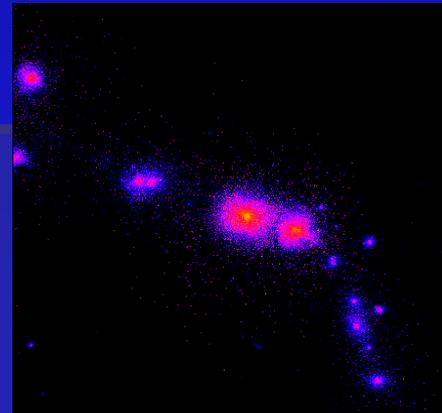
ダークマター



銀河



銀河間ガス
(10^5 K)

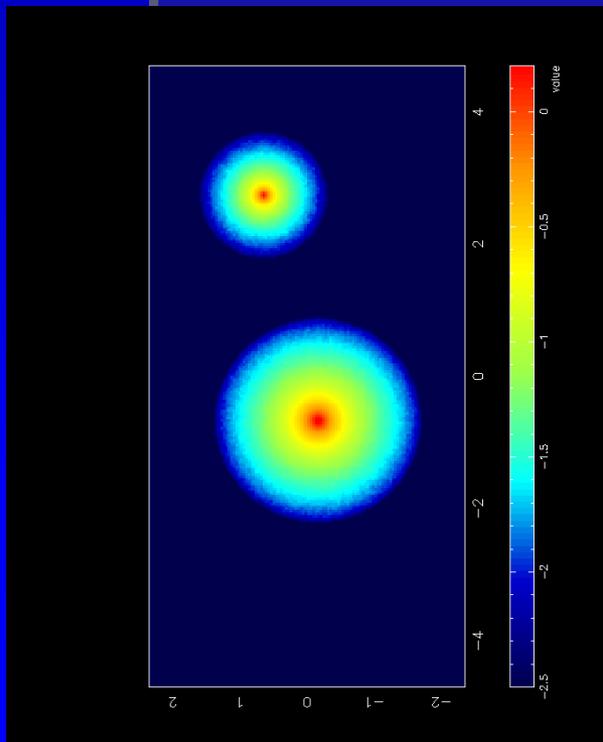


銀河団ガス
(10^7 K)

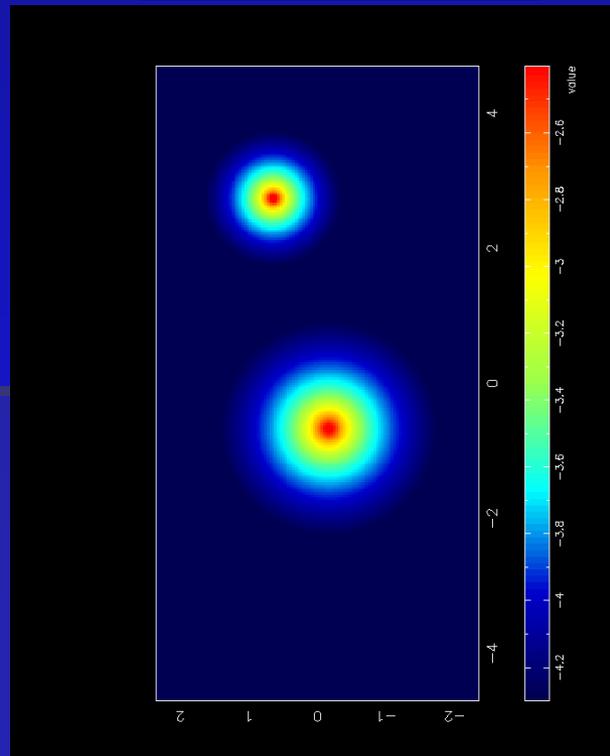
- 標準的な構造形成理論によれば、宇宙の構造は小さなものから大きなものへ (bottom up scenario)
 - Cold Dark Matter
 - Dark Halo, filaments
 - バリオン (CDMの重力ポテンシャルで加熱)
 - 一部は冷えて銀河、星へ
 - 大部分は高温ガスに
 - (X-ray, Sunaev-Zel'dovich効果)

銀河団衝突のシミュレーション(当然のようにガスは動いている)

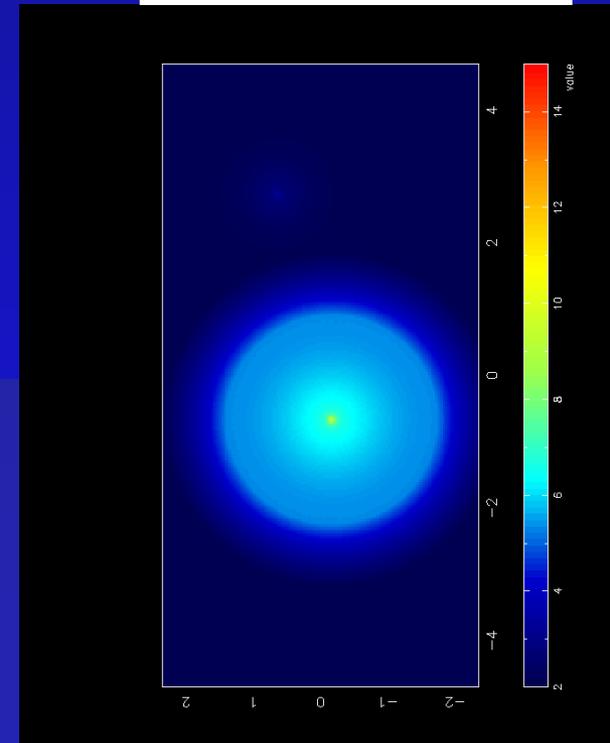
Mass distribution
--->lensing



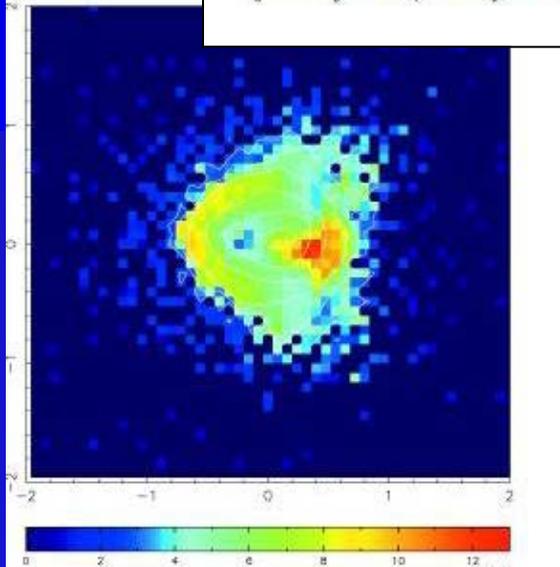
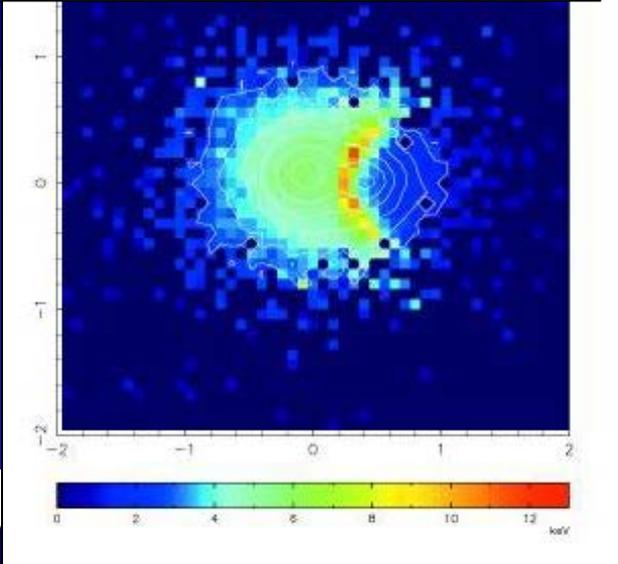
Gas density
-->X-ray image



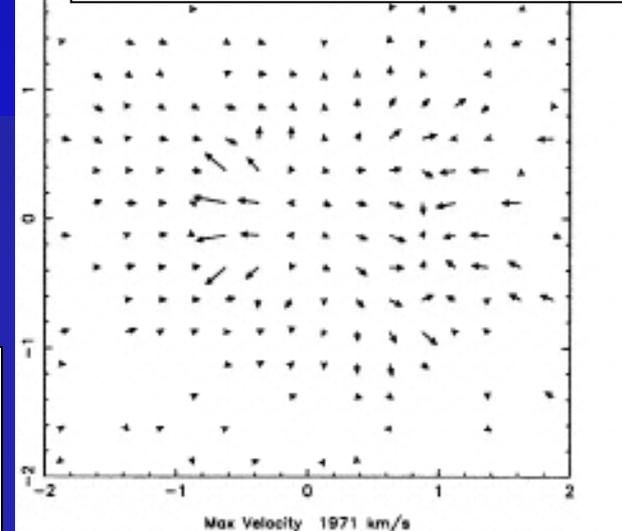
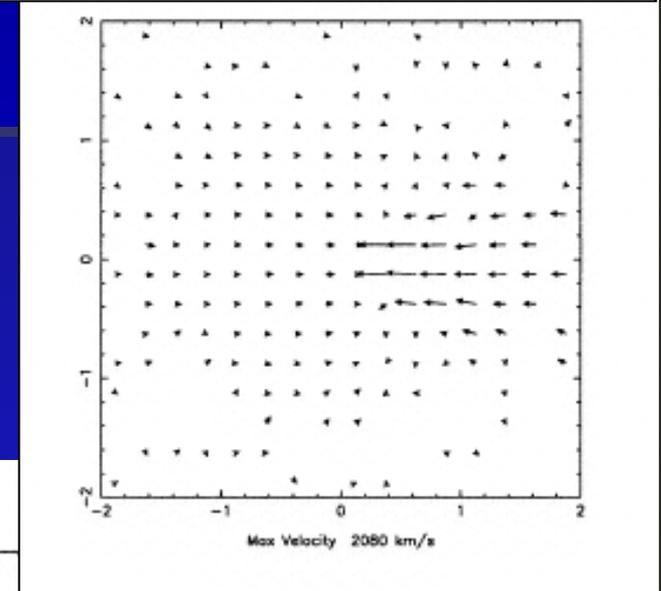
Gas temperature
-->X-ray spectrum



Simulation から作った
X線イメージ(等高線)
温度(カラー)
こちらは当時実際に見えてきていた。



Simulation での速度(面内の)
視線方向も含めてまだ見えてなかった。
こんなのがわかればいいなあと、、、



Takizawa (1999)
ちなみにD論直後
ぐらい

1E 0657-56: cold front & bow shock

Substructure 前面の密度、圧力 profileから、

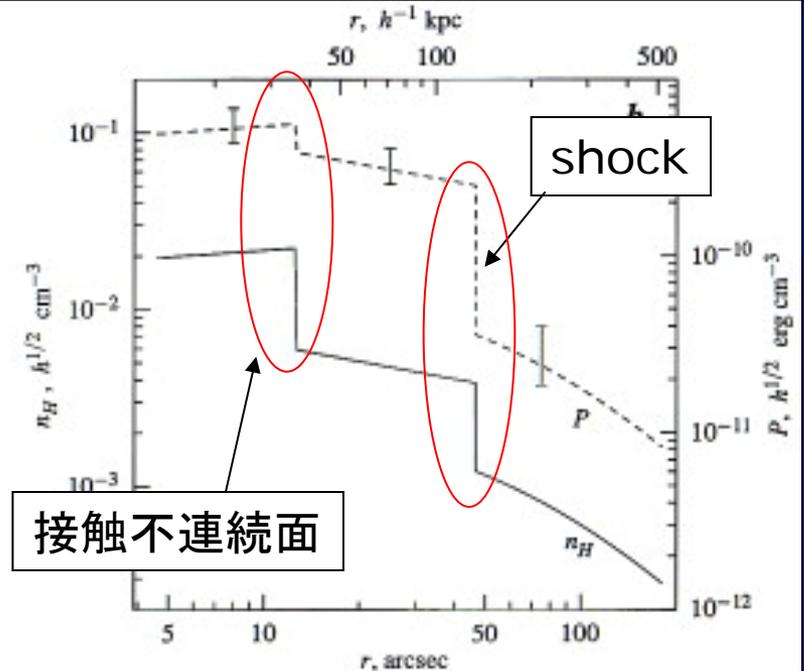
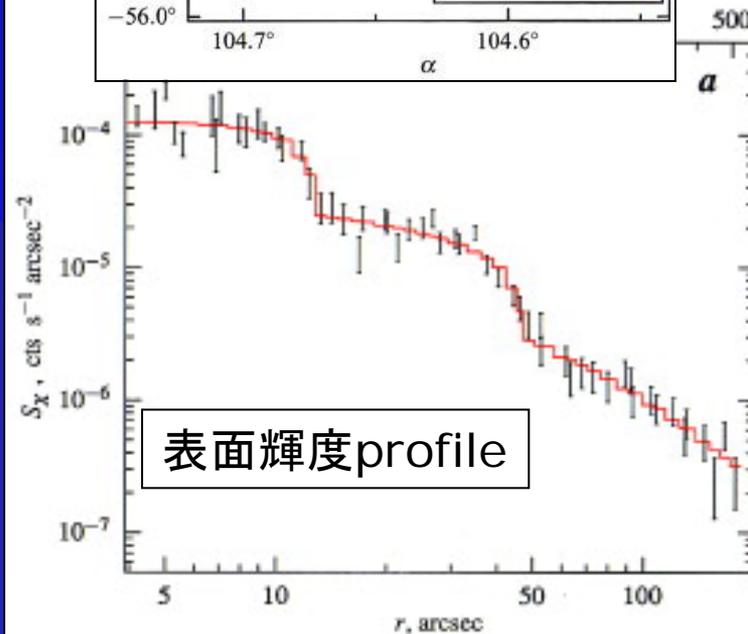
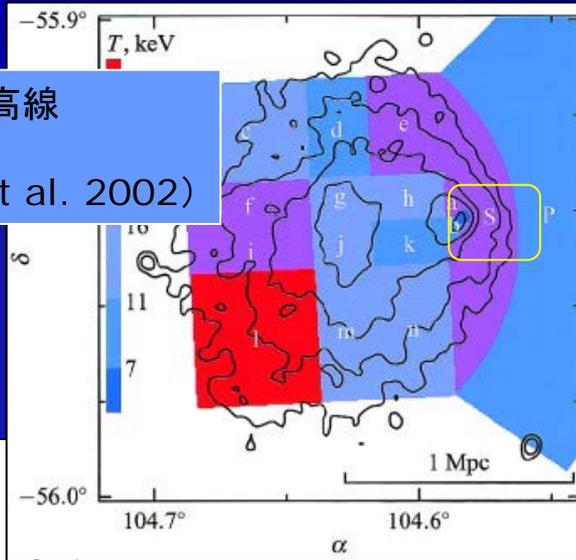
$$M = 3.0 \pm 0.4$$

$$V_s = 4740^{+710}_{-550} \text{ km/s}$$

(ちなみに $v_{200} = 2380 \text{ km/s}$)

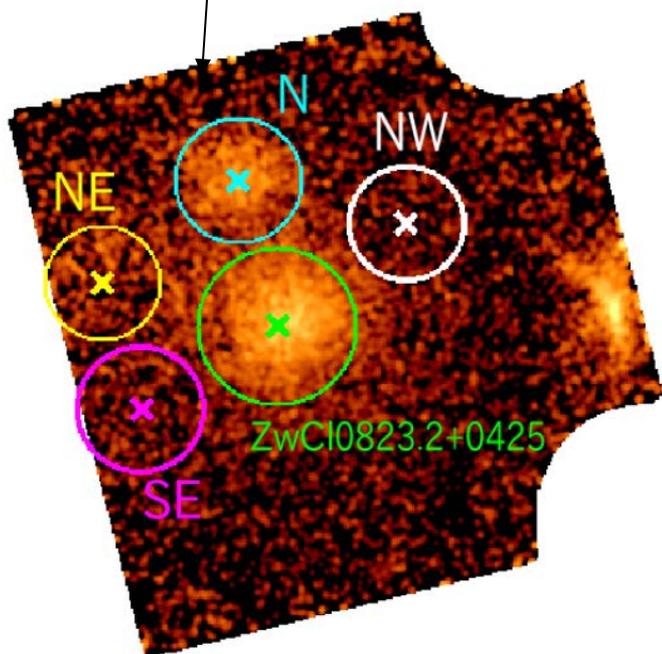
とはいえこれは速度の間接測定

X線イメージ: 等高線
温度: カラー
(Markevitch et al. 2002)

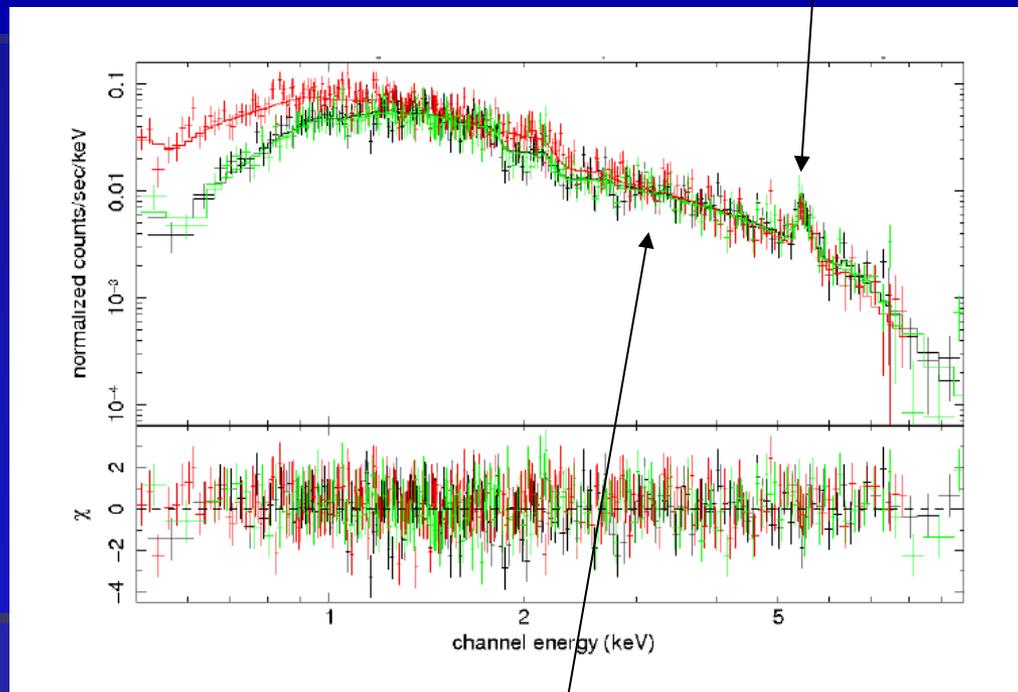


X線で見える銀河団

X線表面輝度 $\propto n_e n_i T^{0.5} L$
→ バリオンの密度分布

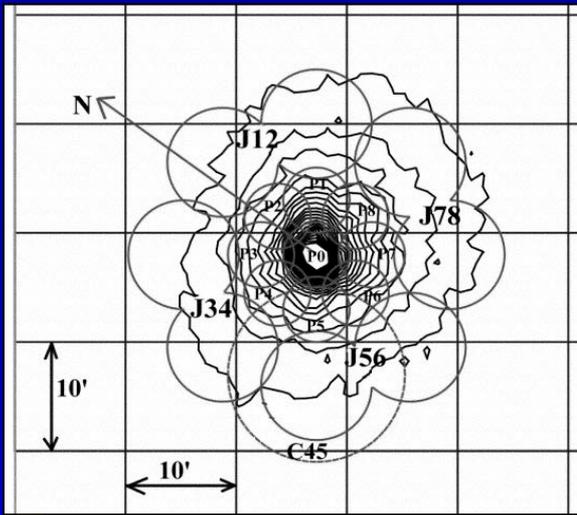


重元素の輝線
→ 重元素量、赤方変位、
ドップラー変位



連続成分の形
→ 温度

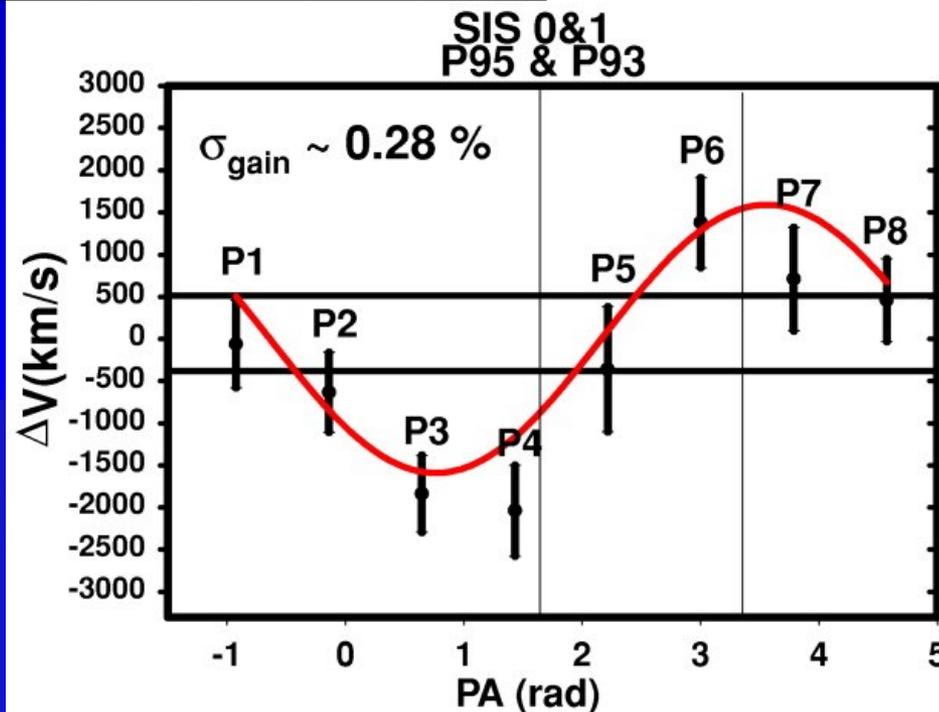
Before Suzaku



Possible detection of gas bulk motion ($\sim 1500\text{km/s}$) by ASCA and Chandra,,,,,,,,, (Dupke et al. 2001 for Centaurus cluster etc)

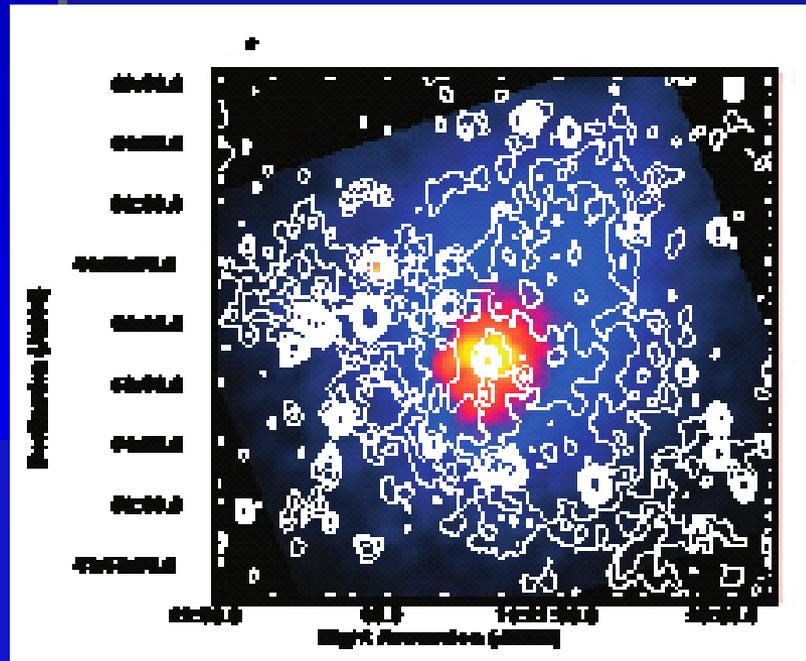
However, later Suzaku results are negative. (Ohta et al. 2006 etc)。

エネルギー決定の系統誤差の評価に問題があったよう

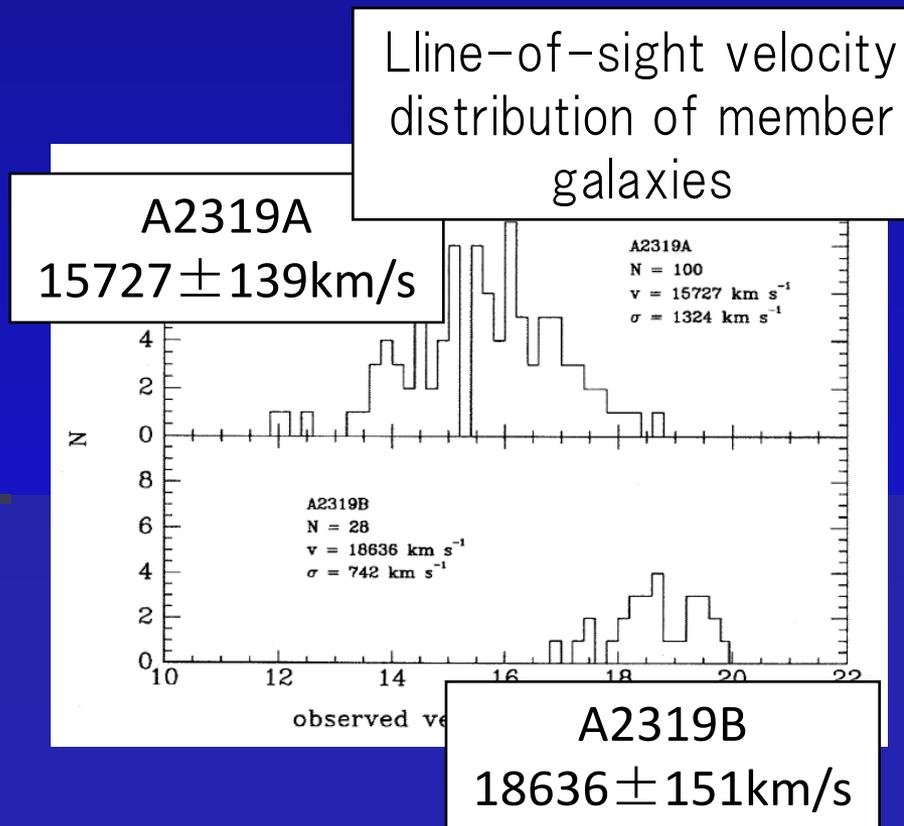


Suzakuによる例: Abell 2319

- Nearby ($z=0.0557$) well-known merging cluster with a giant radio halo
- Two subgroups are found in radial velocity distribution of the member galaxies



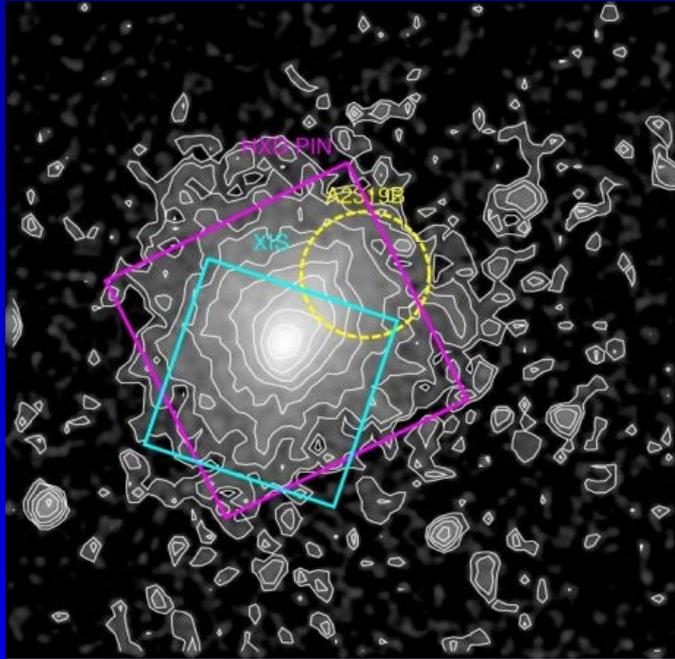
Rosat X-ray image (colors)
Radio image (contours)
Feretti et al. 1997



Oegerle et al. 1995

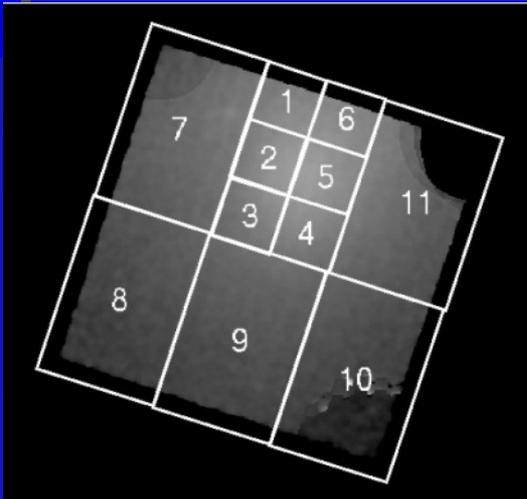
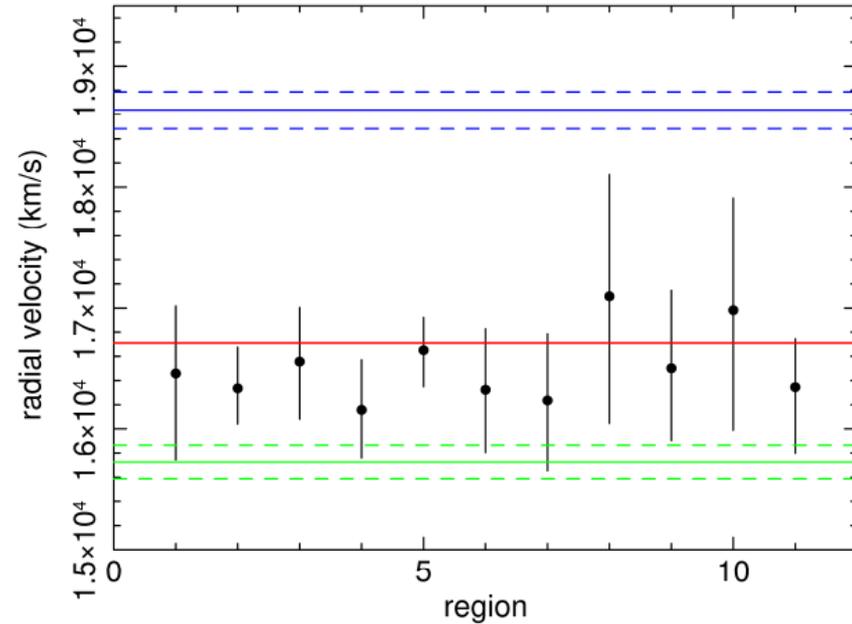
Suzaku Results of Abell 2319

(Sugawara, Takizawa & Nakazawa 2009)



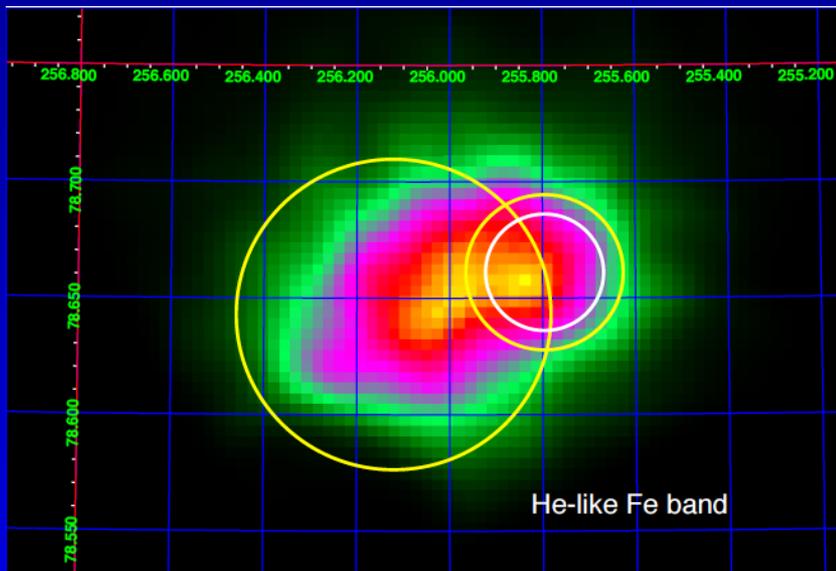
Line-of-sight velocity

Blue: A2319B subgroup
Green: A2319A subgroup
Red: A2319

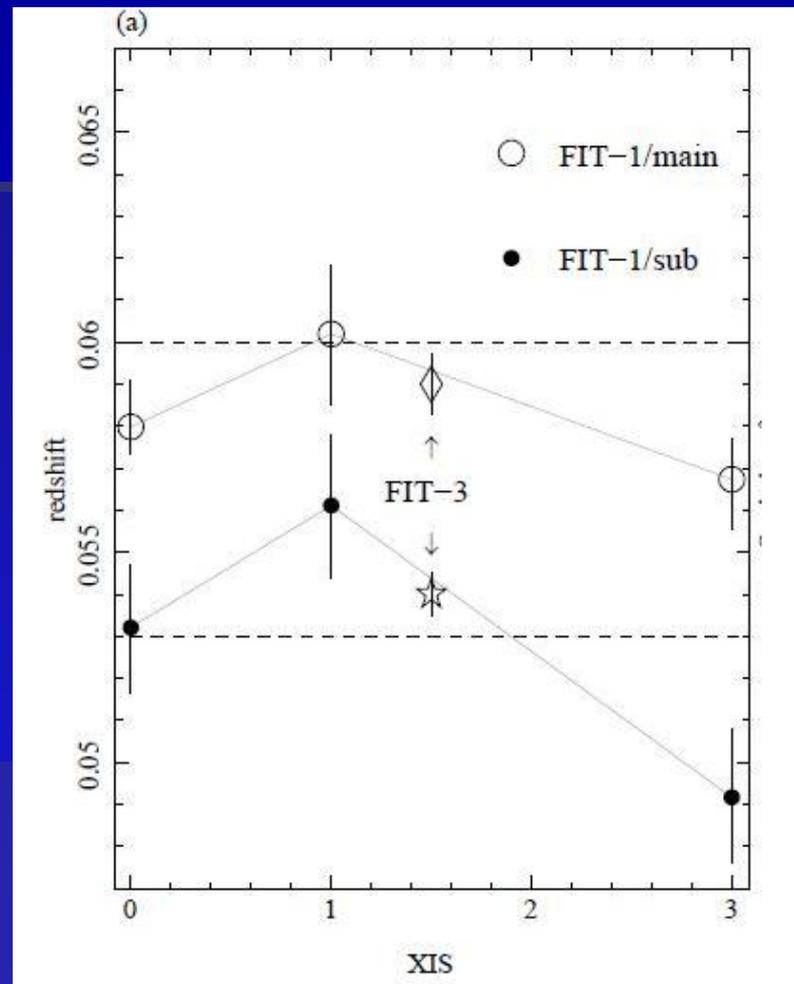


• $\Delta v < 940^{+1083}_{-1131}$ km/s.
(cf. $c_s \sim 1700$ km/s)

Suzakuによる例:A2256



- Bulk Flow detection is very close. Actually, it is possible for limited objects with good conditions (Tamura et al. 2011)。
- Detection of subsonic turbulence is impossible (Ohta et al. 2006, Sugawara et al. 2009etc)。



Line-of-sight velocity of
A2256

Tamura et al. (2011)

Suzakuによる視線速度観測 のまとめ (Tamura et al. 2014)

Table 1
Suzaku Results of Gas Bulk Motions in Clusters

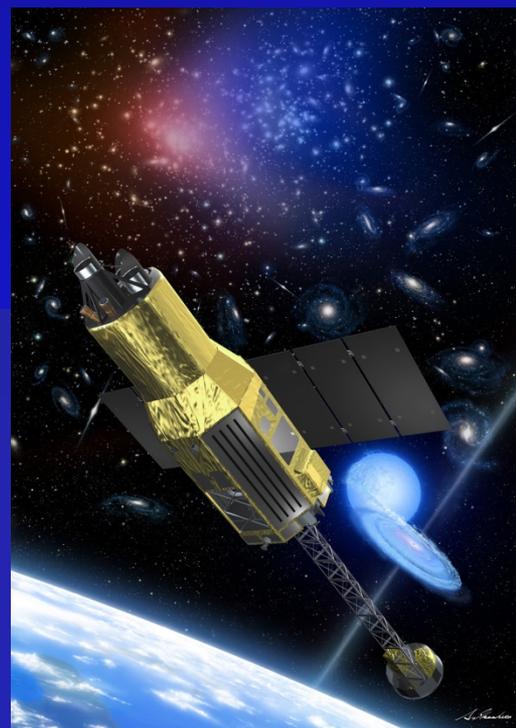
Target	Result	Reference
Centaurus	$\Delta v < 1400 \text{ km s}^{-1}$	1
Oph.	$\Delta v < 3000 \text{ km s}^{-1}$	2
AMW 7	$\Delta v < 2000 \text{ km s}^{-1}$	3
A2319	$\Delta v < 2000 \text{ km s}^{-1}$	4
A2256	$\Delta v = 1500 \pm 300(\text{stat.}) \pm 300(\text{sys.}) \text{ km s}^{-1}$	5
Coma	$\Delta v < 2000 \text{ km s}^{-1}$	6
A3627	$\Delta v < 800 \text{ km s}^{-1}$	7

Notes. Unless stated otherwise, values are 90% limit of gas velocity variation among regions within the cluster.

References. (1) Ota et al. 2007; Velocity variation among $2' \times 2'$ regions. (2) Fujita et al. 2008; (3) Sato et al. 2008; a hint of a velocity difference between two regions is found. (4) Sugawara et al. 2009; (5) Tamura et al. 2011; errors are 68% confidence limit; stat. and sys. mean statistical and systematic errors. (6) Sato et al. 2011; (7) Nishino et al. 2012; relative velocity of a subcomponent.

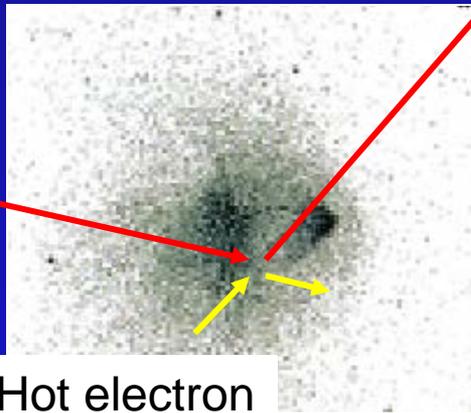
SuzakuからAstro-Hへ

- $\Delta v \sim 1000 \text{ km/s}$ だと、
 $\Delta E \sim 20 \text{ eV @ Fe-K}$
- Suzaku のXIS (CCD);
 $\Delta E \doteq 130 \text{ eV}$
- Astro-H (2015年打ち上げ
予定) のSXS (カロリメータ
ー); $\Delta E \doteq 5 \text{ eV}$



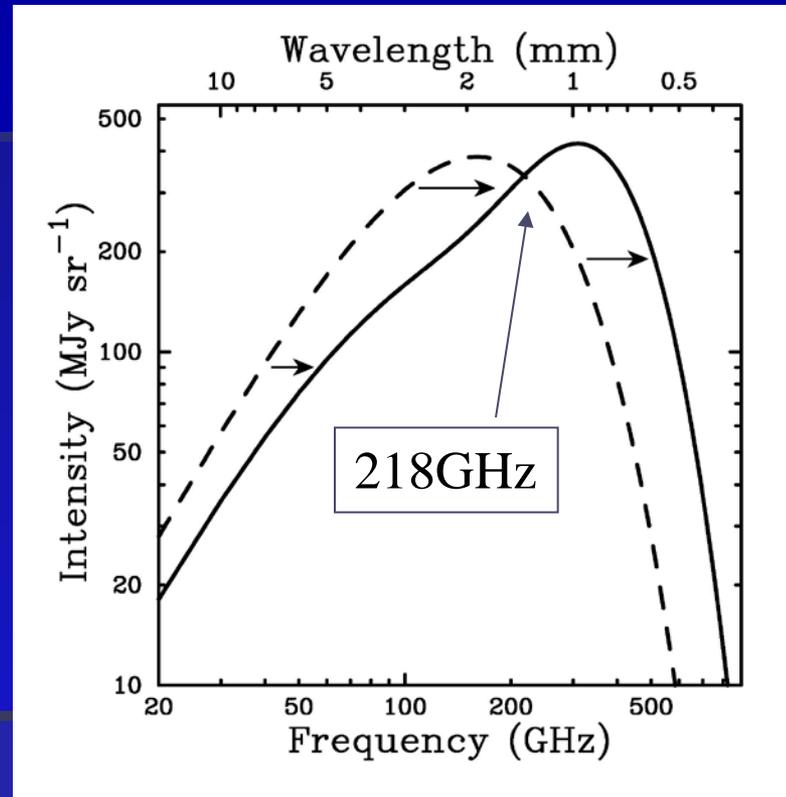
Sunyaev-Zel'dovich 効果

逆コンプトン散乱



CMB光子
(2.7K
black body)

Hot electron
(10^7-8K)

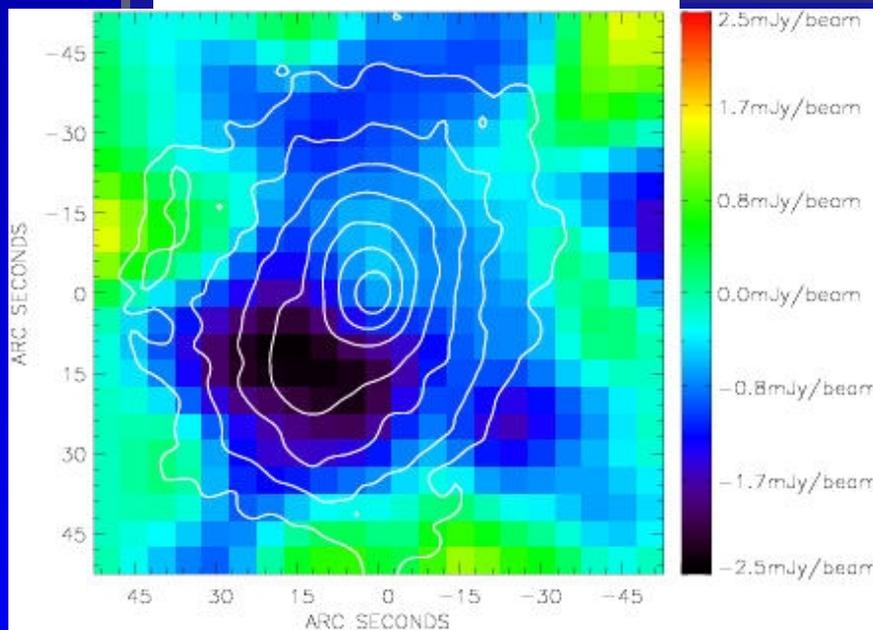


銀河団などの高温ガスによる逆コンプトン散乱で
Cosmic Microwave Background (CMB) のスペクトルが変形。

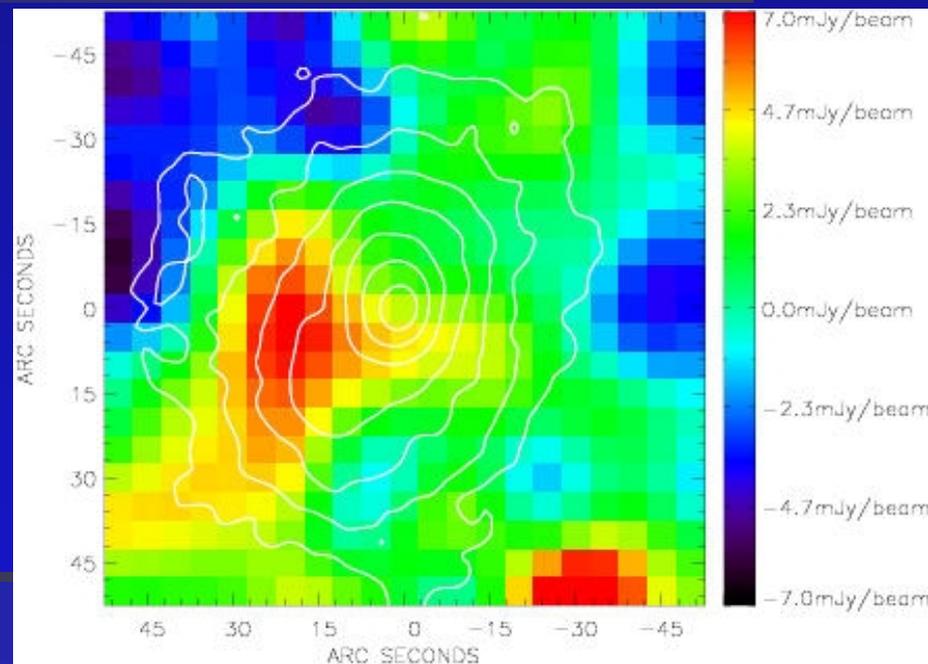
- ミリ波帯 (R-J側) では decrement
- サブミリ波帯 (Wein側) では increment

SZE maps of RX J1347.5-1145

ミリ波 (decrement)



サブミリ波 (increment)



150GHz, NOBA on Nobeyama 45m
13'' beam, 15'' smoothing
(Komatsu et al. 2001)

Contours: Chandra X-ray (Allen et al. 2002)

350GHz, SCUBA on JCMT 15m
15'' beam, 15'' smoothing
(Komatsu et al. 1999)

Thermal, Kinematic, and others

- Thermal SZ: Maxwell分布をした熱電子によるCMBスペクトルの変形。(Sunyaev&Zel'dvich 1972)
- Kinematic SZ: CMBに対するガス雲の運動によるCMBスペクトルの変形(Sunyaev&Zel'dvich 1980)

-----普通はここまで-----

- Non-thermal SZ: 非熱的電子による
(Blasi et al. 2000, Colafrancesco et al. 2003など)
- Grad-T SZ: 熱伝導による (Hattori&Okabe 2005)

SZ効果：波長依存性

Thermal SZ

$$\Delta I_{\text{th}} = i_0 y g(x)$$

ただし

$$i_0 = 2(kT_{\text{cmb}})^3 / (hc)^2$$

$$x = (hv / kT_{\text{cmb}})$$

$$y = \int \left(\frac{kT_e}{mc^2} \right) n_e \sigma_T dl,$$

$$g(x) = \frac{x^4 e^x}{(e^x - 1)^2} \left[\frac{x(e^x + 1)}{e^x - 1} - 4 \right],$$

Kinematic SZ

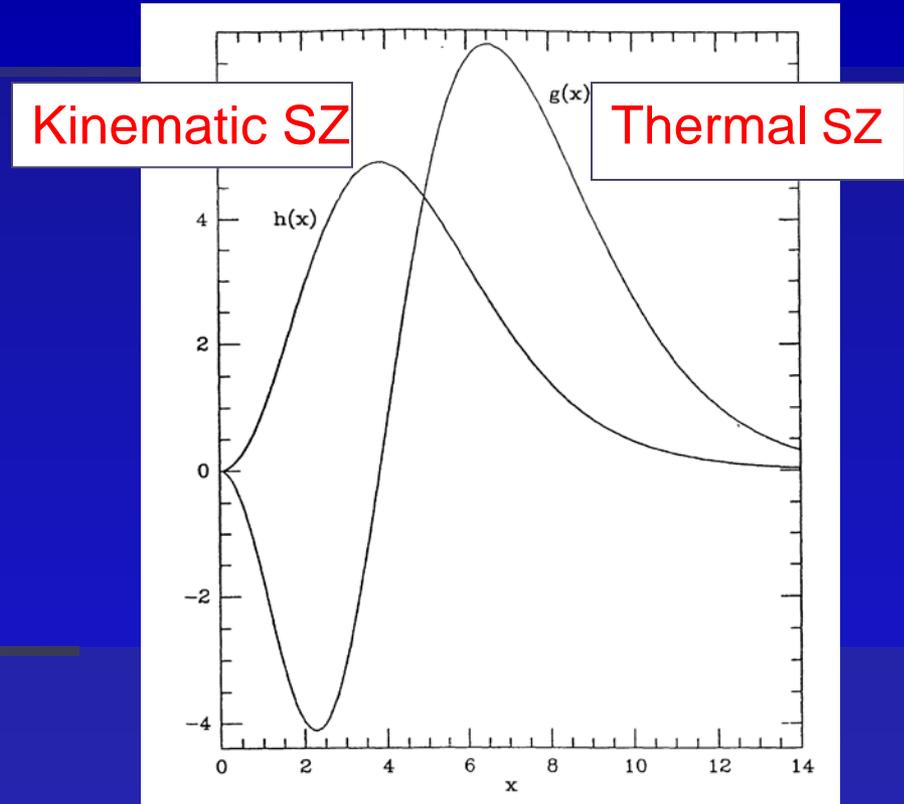
$$\Delta I_{\text{th}} = -i_0 h(x) (V_r / c) \tau$$

ただし、 V_r は遠ざかる時を正とし、

$$\tau = \sigma_T \int n_e dl$$

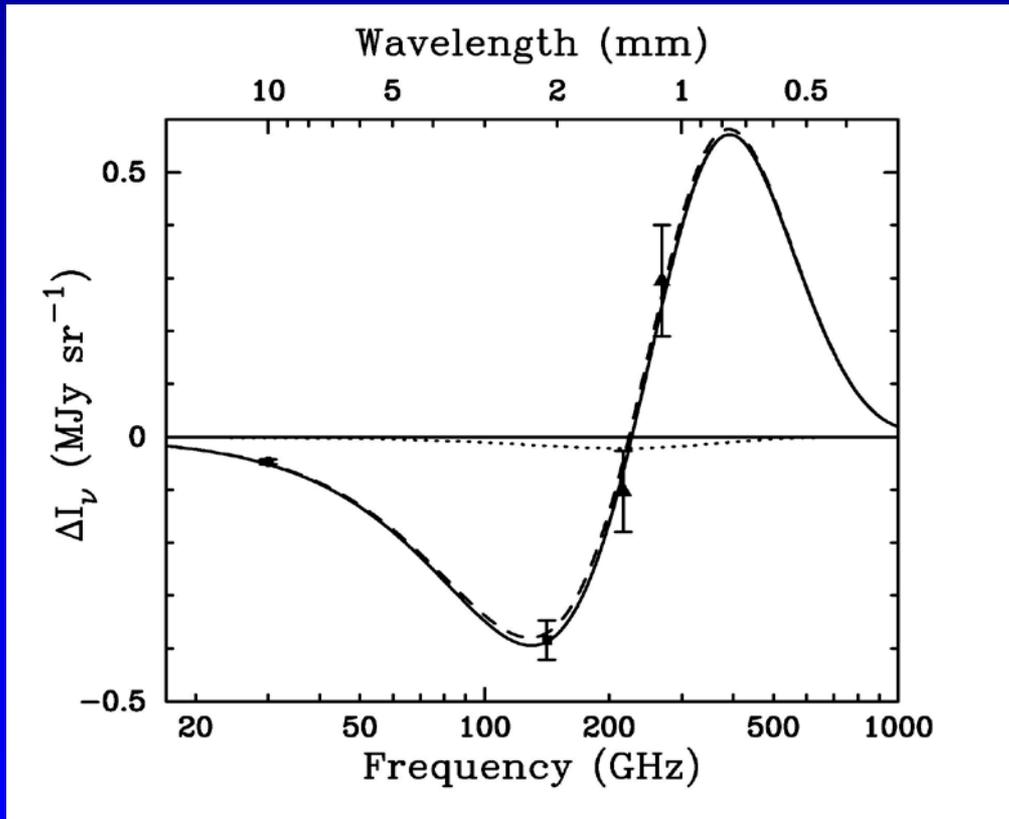
$$h(x) = \frac{x^4 e^x}{(e^x - 1)^2},$$

Black body からのずれ具合



多波長観測することで原理的には両者は分離可能。

Thermal vs Kinematic SZ



Dashed: best fit thermal SZ
 Dotted: best fit kinematic SZ
 Solid: thermal+kinematic



$$y = 3.56^{+0.41+0.27}_{-0.41-0.19} \times 10^{-4}$$

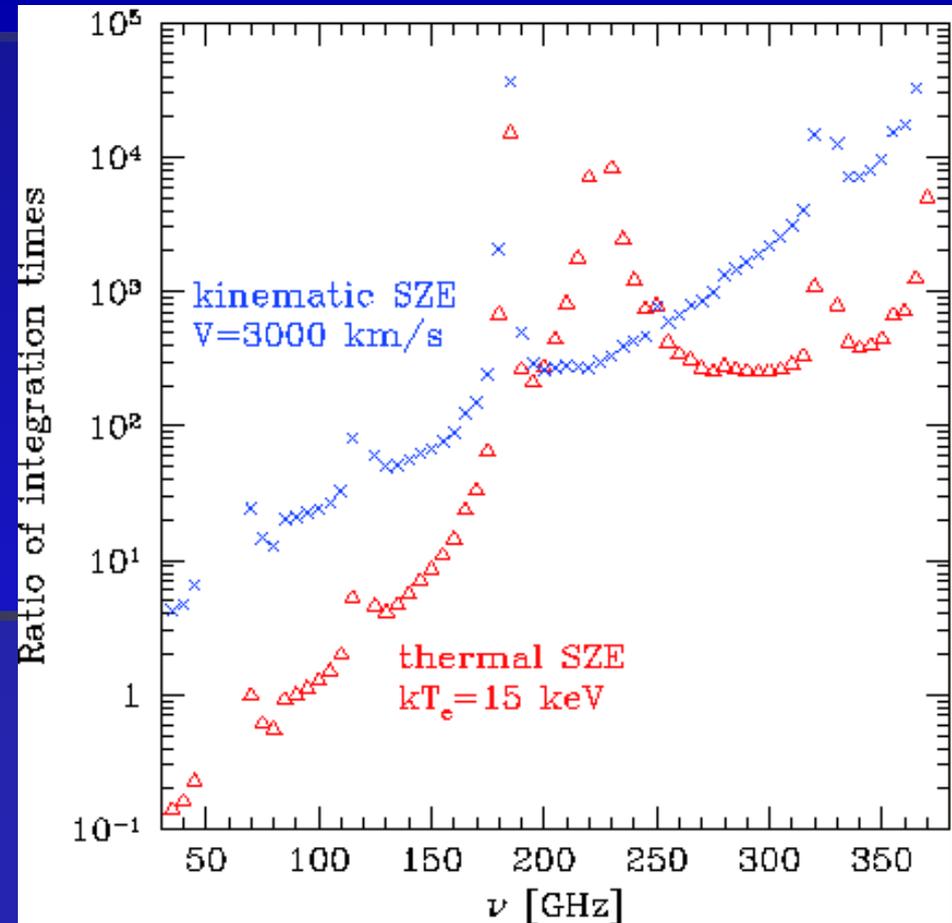
$$v = 410^{+1030+460}_{-850-440} \text{ km s}^{-1}$$

The measured SZ spectrum of A2163
 (Holzapfel et al 1997; LaRoque et al. 2002)

ALMAでKinematic SZは？

(Yamada ,,, Takizawa ,,, et al. 2012)

- Thermal SZ@90GHzを基準として、同じ領域で同じS/Nを出すのに要する積分時間を評価
- 高周波側の観測は難しそう。(システム温度の上昇、視野の狭さ)
- Kinematic SZはやっぱり難しそう。



Summary

- 銀河団はより小規模な銀河群などとの衝突合体によって成長している。その過程で銀河団ガス内で超音速な流れや亜音速乱流が予想される。
- X線分光によってガスの運動を直接とらえる試みがASCA, Chandra, Suzakuを使って行われてきた。現状では確かな検出例はSuzakuによるA2256 (Tamura et al. 2011) のみ。
- 2015年打ち上げ予定のAstro-HのSXSでこの状況は大きく変わることが期待される。ただ、結構使い方には注意が必要そう。
- 運動学的SZ効果という手もあるが、当分難しそう。