

# ALMA での Sunyaev-Zel'dovich 効果 観測の撮像シミュレーション

滝沢元和

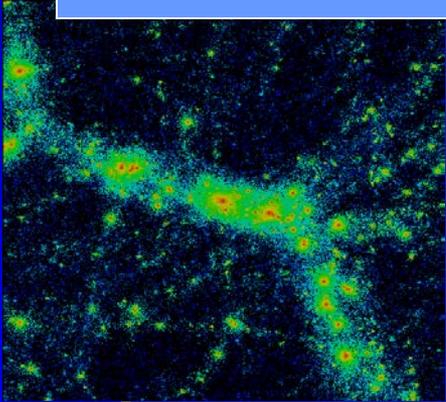
山形大宇宙グループ談話会 (2013.6.14)

Yamada, Kitayama,,,,,,,Takizawa,,,,,,, et al. , PASJ, 64,102 (2012)

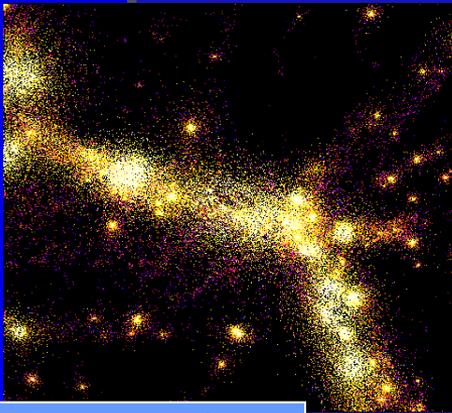
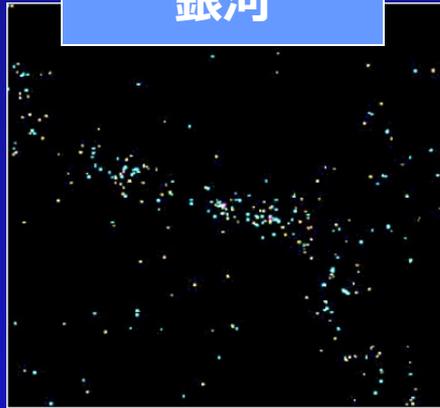
# Introduction

Yoshikawa et al. (2003)

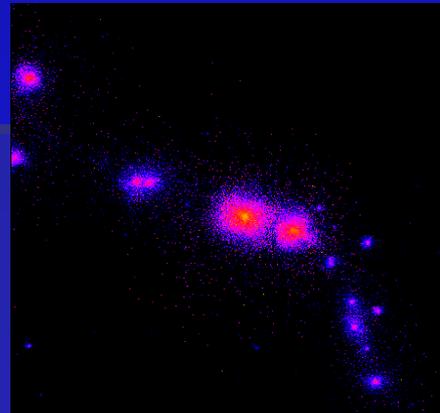
ダークマター



銀河



銀河間ガス  
( $10^5$  K)

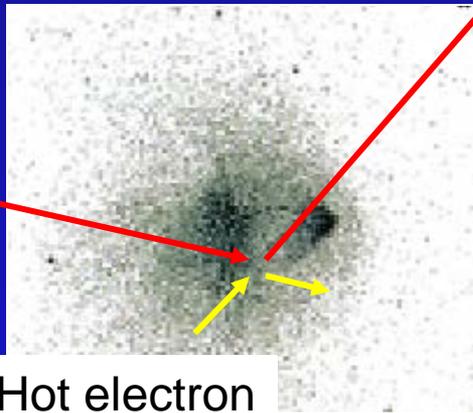


銀河団ガス  
( $10^7$  K)

- 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)

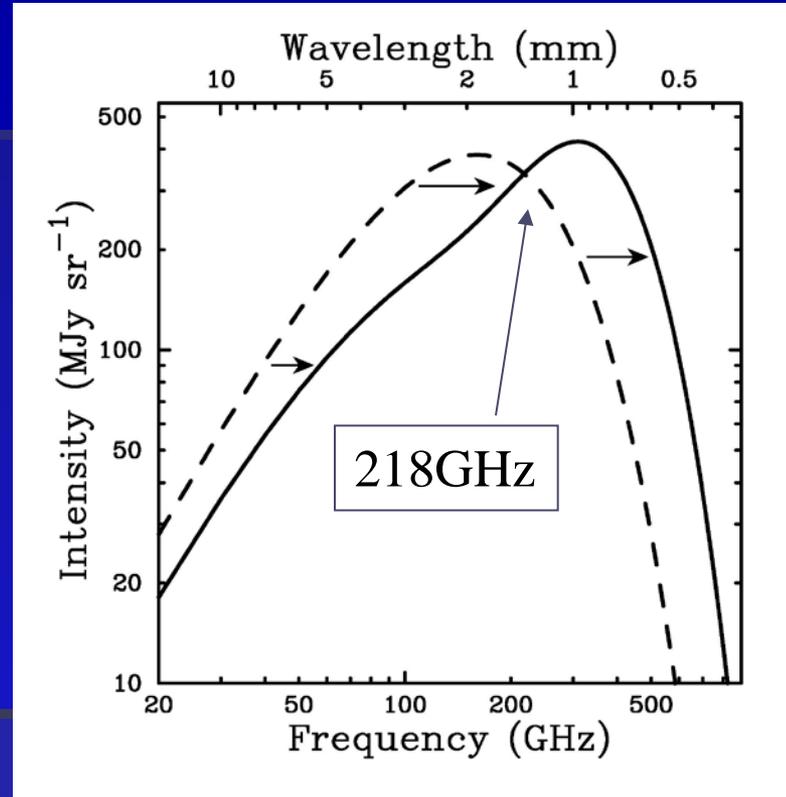
# Sunyaev-Zel'dovich 効果

逆コンプトン散乱



CMB光子  
(2.7K  
black body)

Hot electron  
( $10^7\text{-}8\text{K}$ )

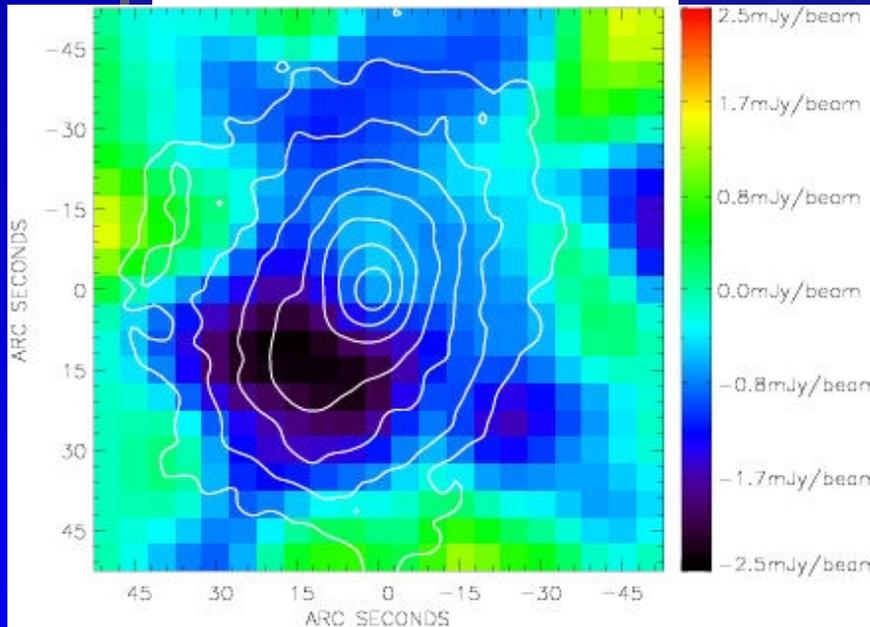


銀河団などの高温ガスによる逆コンプトン散乱で  
Cosmic Microwave Background (CMB) のスペクトルが変形。

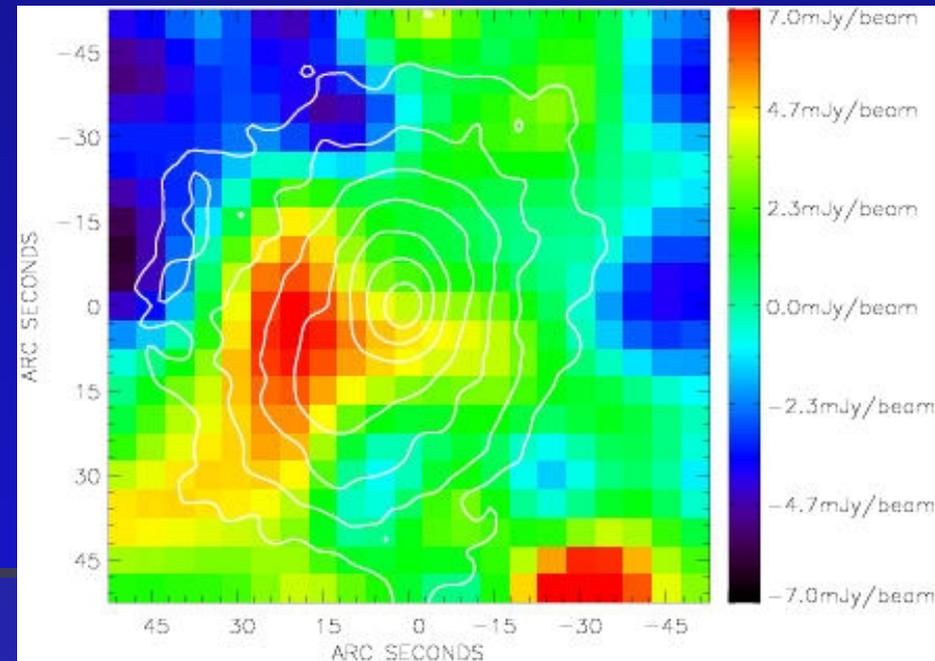
- ミリ波帯 (R-J側) では decrement
- サブミリ波帯 (Wein側) では increment

# 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

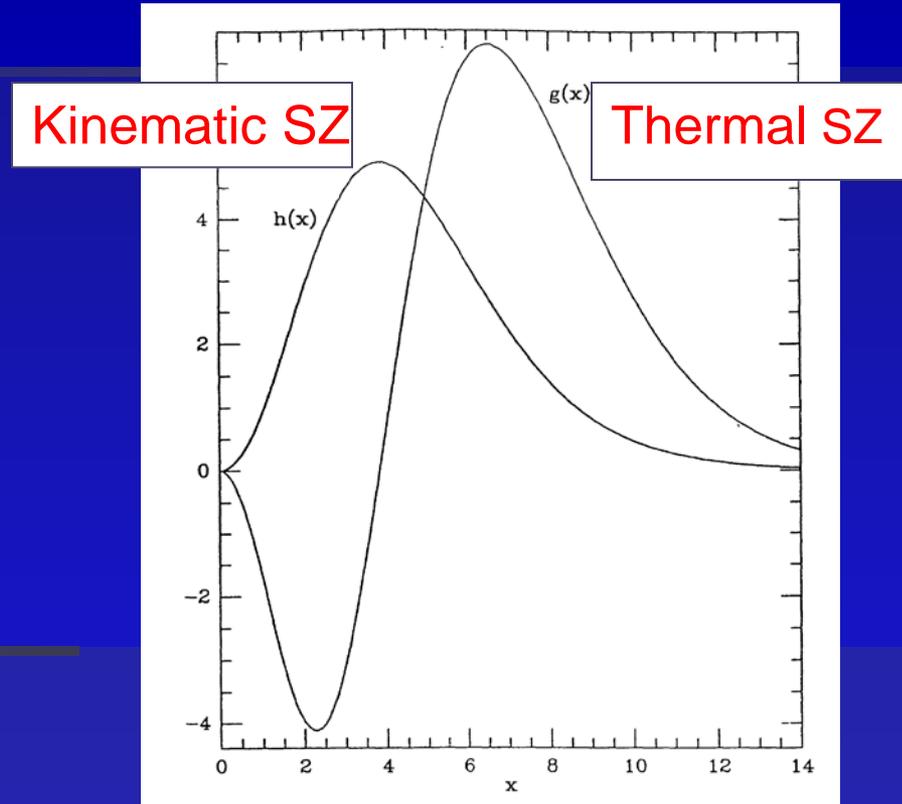
$$\Delta I_{\text{th}} = -i_0 h(x) (V_r / c) \tau$$

ただし、 $V_r$ は遠ざかる時を正とし、

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

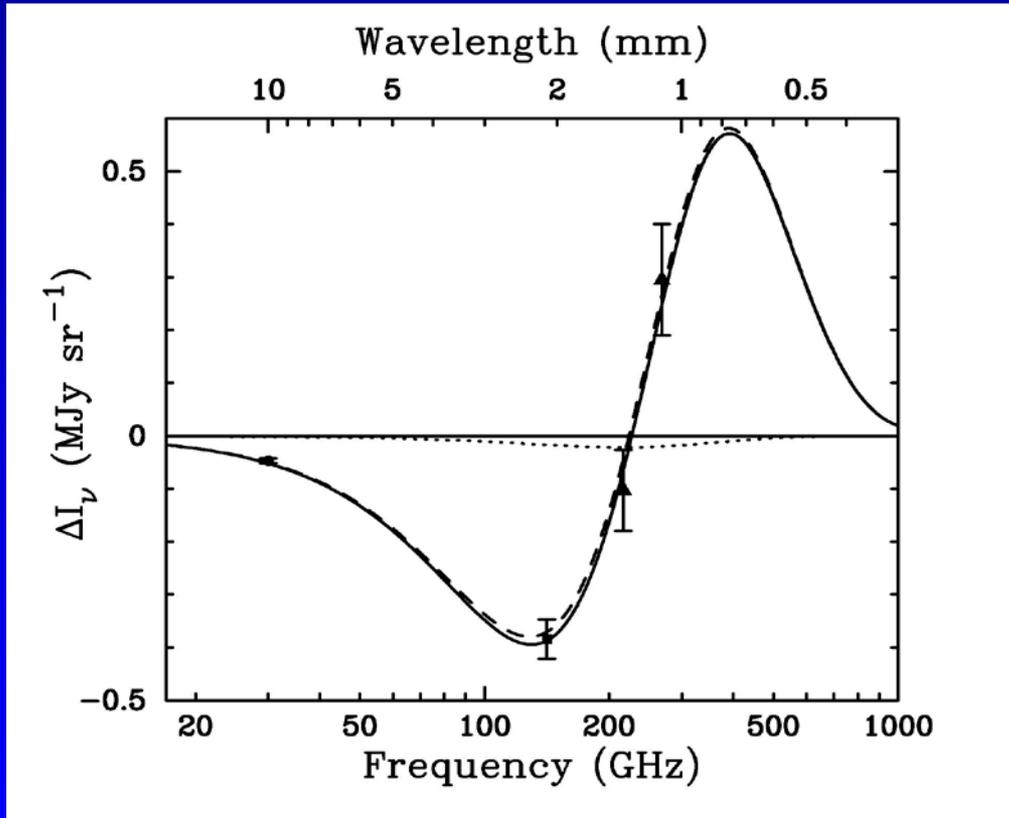
$$h(x) = \frac{x^4 e^x}{(e^x - 1)^2},$$

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)

# (Thermal) SZ vs X-ray

$$I_X \propto \int n_e^2 T_e^{-1/2} dl$$

$$I_{SZ} \propto \int n_e T_e dl$$

X線は密度構造に、SZは温度構造によりsensitive。

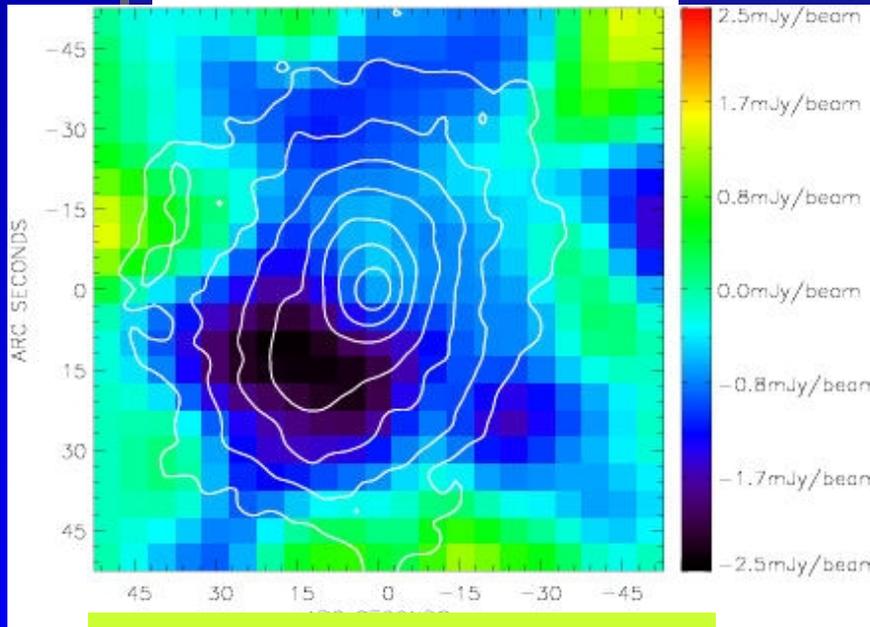
$$I_X \propto (1+z)^{-4}$$

$$I_{SZ} \propto (1+z)^0 \quad (U_{CMB} \propto (1+z)^4 \text{ ため})$$

high z object にはSZが相対的に有利

# SZE vs X-ray maps of RX J1347.5-1145

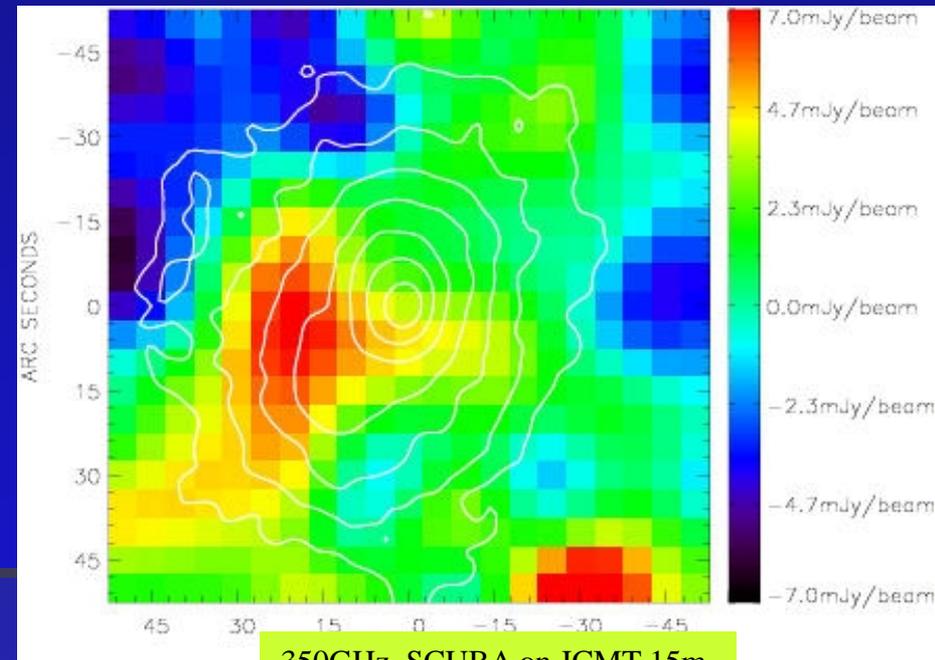
ミリ波 (decrement)



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

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

サブミリ波 (increment)



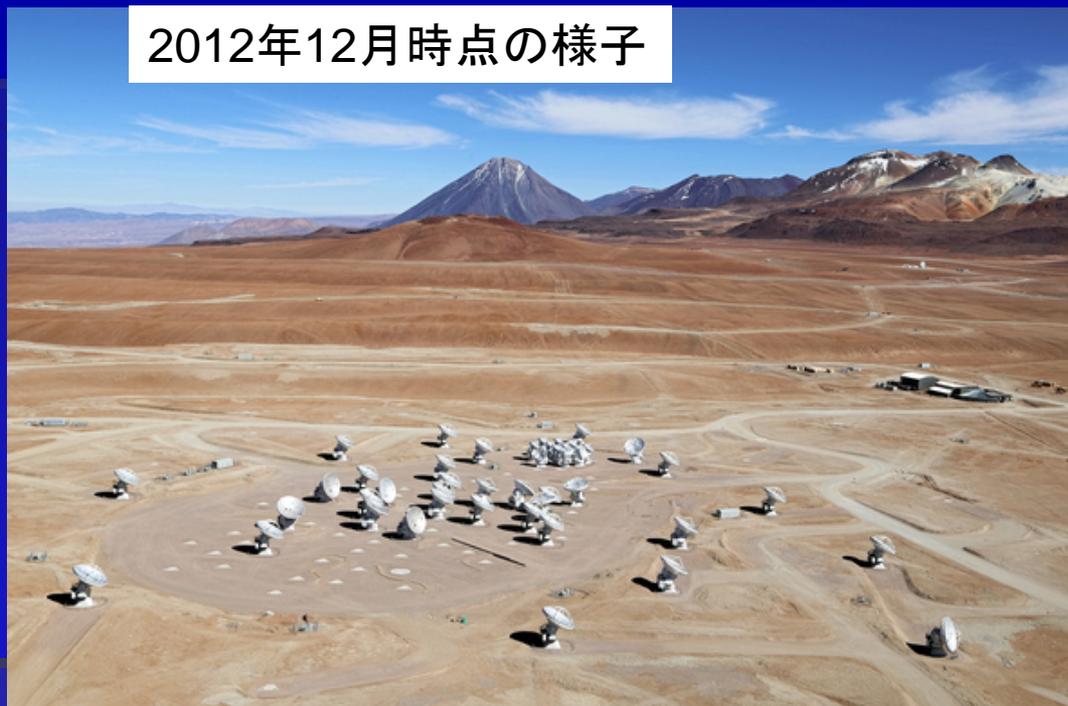
350GHz, SCUBA on JCMT 15m  
15" beam, 15" smoothing  
(Komatsu et al. 1999)

たしかに、X線(等高線)とSZ(カラー)で  
空間分布が違うように見える。

# Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array (ALMA)



2012年12月時点の様子



- ミリ波・サブミリ波で最高の感度・分解能を誇る電波干渉計
- 2011年より初期運用開始、2013年より本格運用
- 東アジア、米、欧、チリによる国際共同プロジェクト

# ALMAによるSZ観測

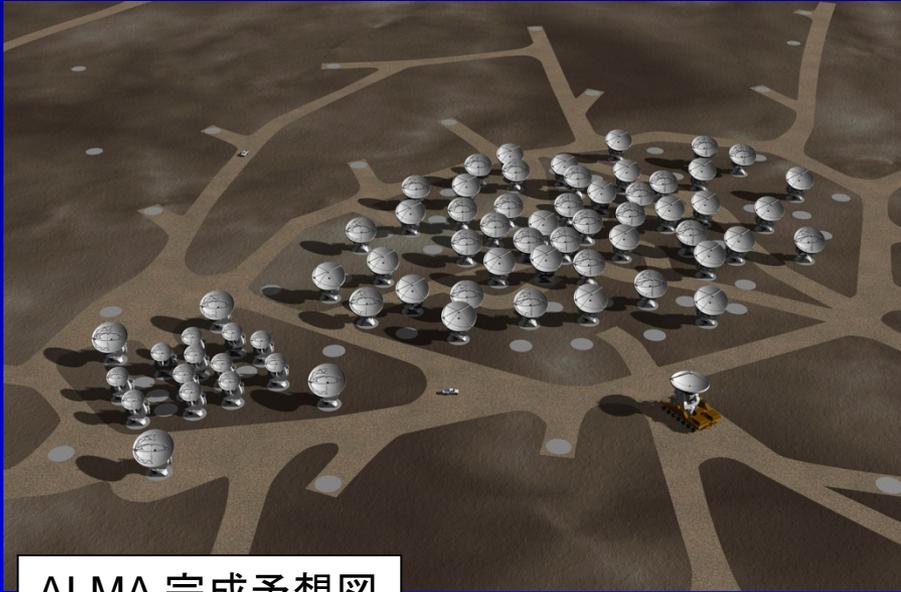
- 高空間分解能

- 超高温 ( $>10\text{keV}$ ) なICM中の衝撃波の良いプローブ (c.f. 硬X線観測)
- 点源によるコンタミは大幅に改善

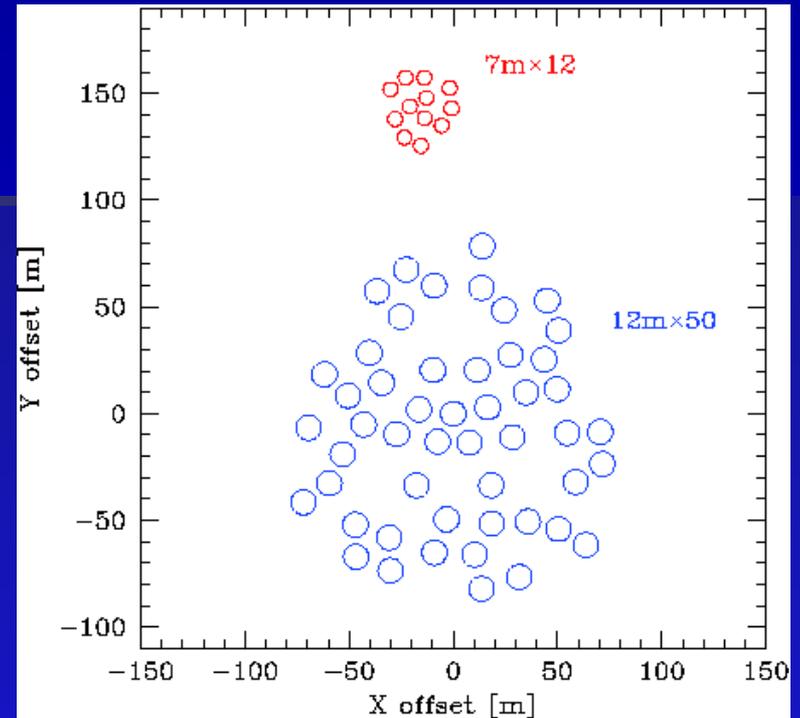
- 干渉計

- 銀河団のような広がったソースの観測可能性の議論は単純ではない。
- 流体シミュレーションデータ等を用いたイメージングシミュレーションが有用

# Imaging Simulation for ALMA



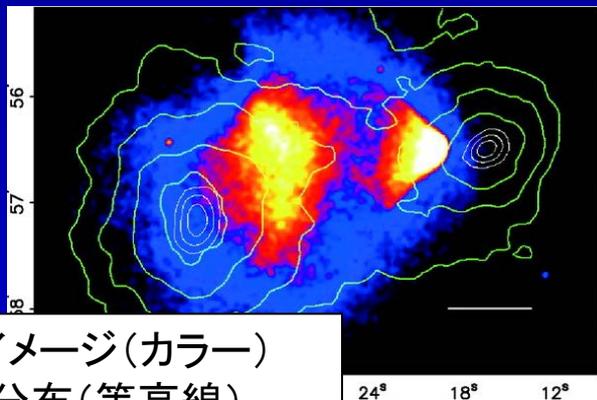
ALMA 完成予想図



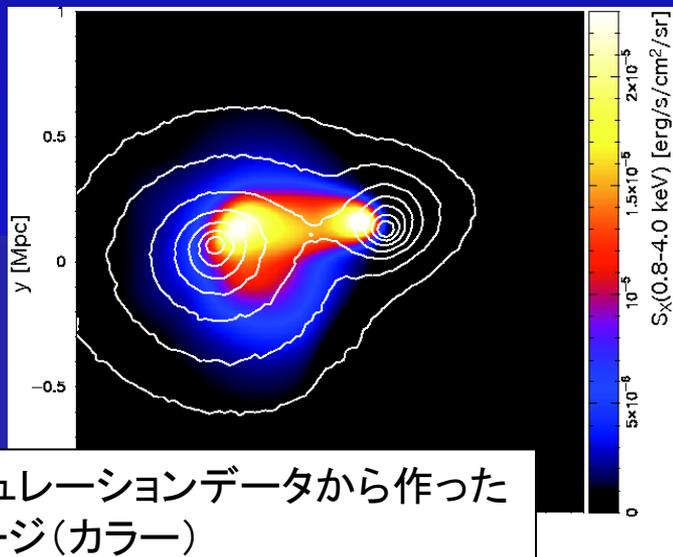
most compact configuration

- ALMA(12m × 50) + ACA(7m × 12 + SD × 4)をmost compact configuration で使用
- 90 GHz (Band 3)
- 10h(ALMA)+40h(ACA)
- 各種ノイズも適切に考慮。

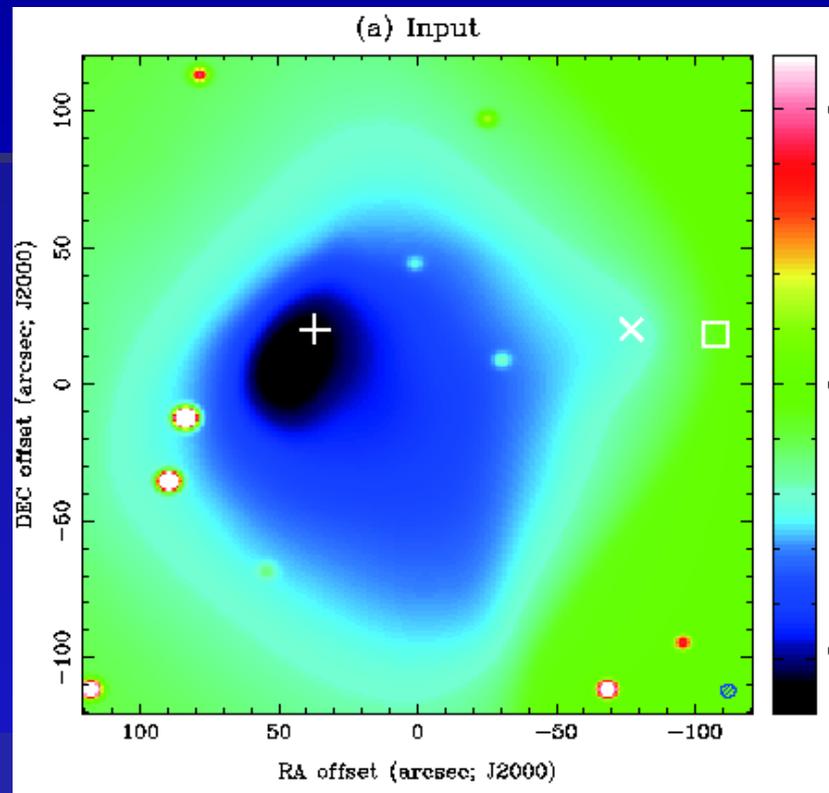
# Model: Bullet Cluster(1E0657-56)



X線イメージ(カラー)  
質量分布(等高線)  
Clowe et al. (2006)



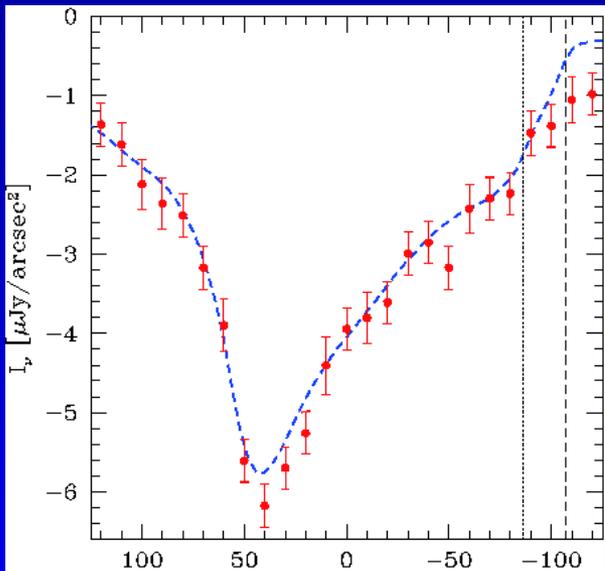
流体シミュレーションデータから作った  
X線イメージ(カラー)  
質量分布(等高線)  
Akahori & Yoshikawa (2012)



Akahori & Yoshikawa (2012)の結果  
から作ったSZイメージ(90GHz)  
実際のデータにあわせて点源も加えてある。

これをinput modelとしてmock observational data を作る

# Results: Bullet Cluster



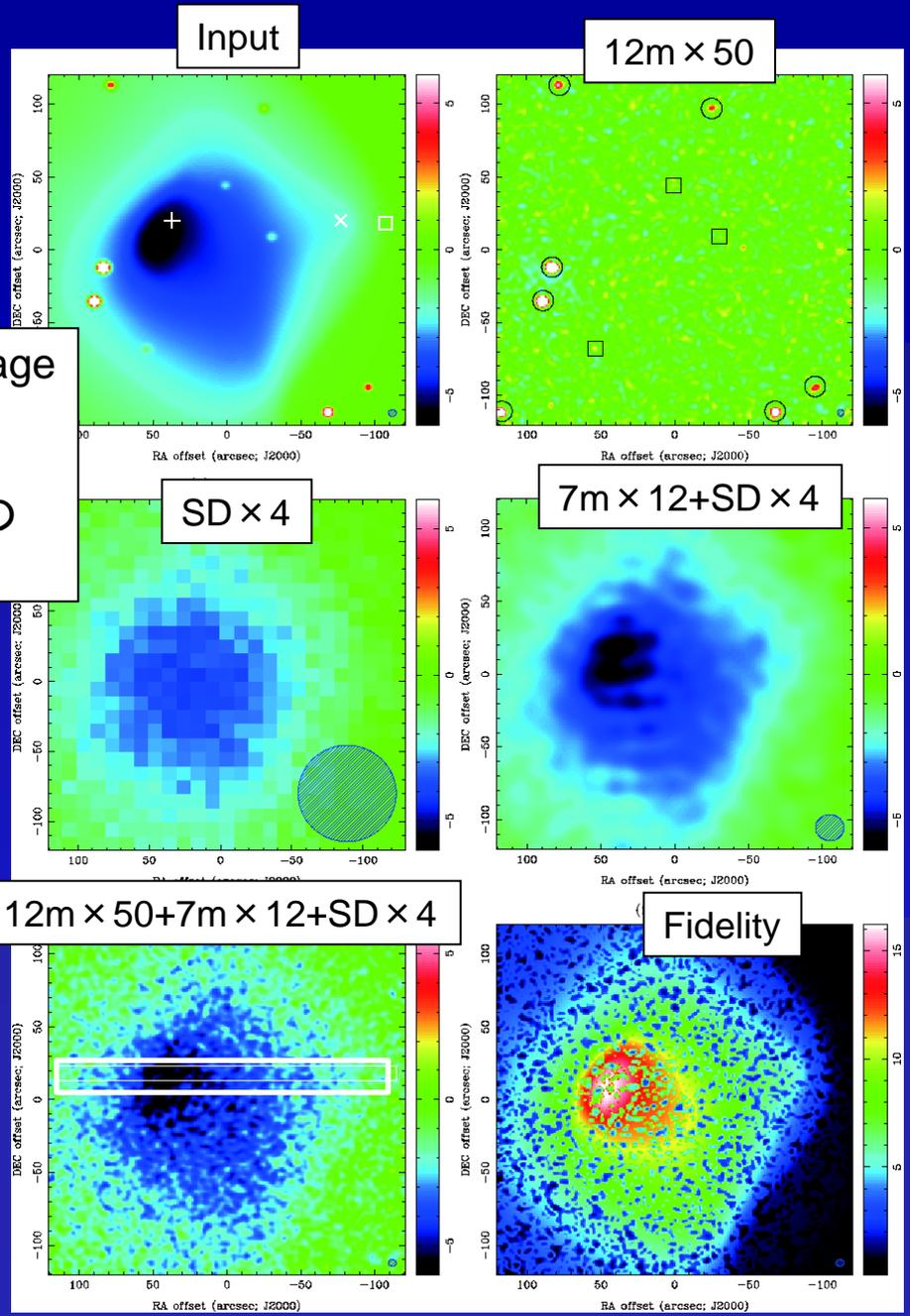
中心軸に沿ったSZ強度  
 点線: input model  
 赤点+エラーバー: mock data

mock data image  
 およびfidelity

ALMAは点源の  
 除去に寄与大

Fidelity: imageの再現性の善し悪しの指標  
 Fractional error のほぼ逆数

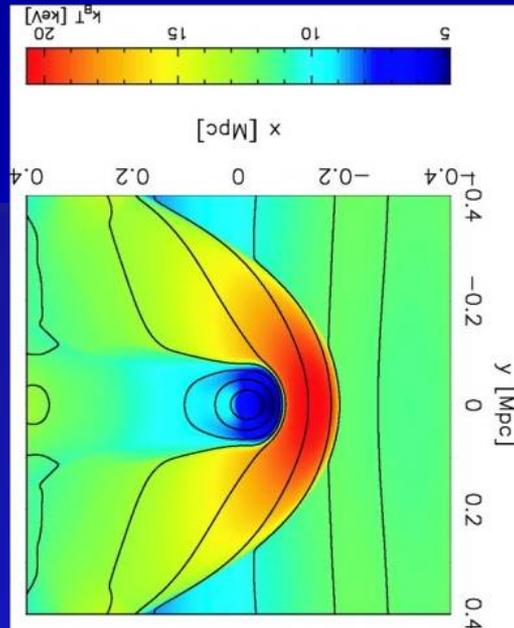
$$f(\vec{\theta}) \equiv \frac{|I_{in}^{smooth}(\vec{\theta})|}{\max\{|I_{out}(\vec{\theta}) - I_{in}^{smooth}(\vec{\theta})|, 0.7\sigma_{diff}\}}$$



# Model: shock front

X-ray image (contours)  
and kT (colors)

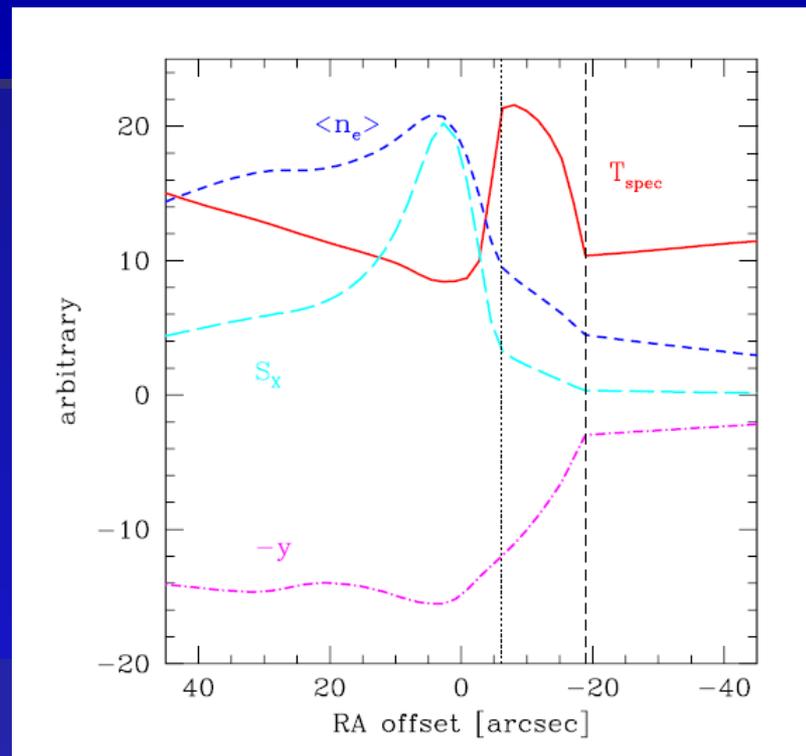
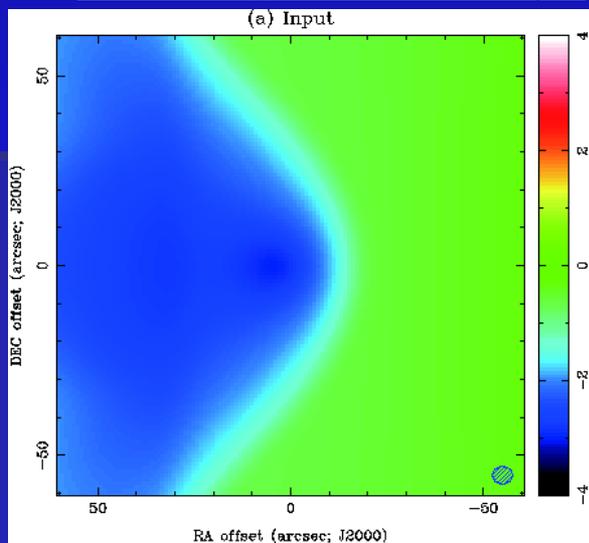
中心のSZ強度が  
1E0657-56  
のbullet部分と同じにな  
るようにTakizawa(2005)  
の結果を再規格化。



(a) Input

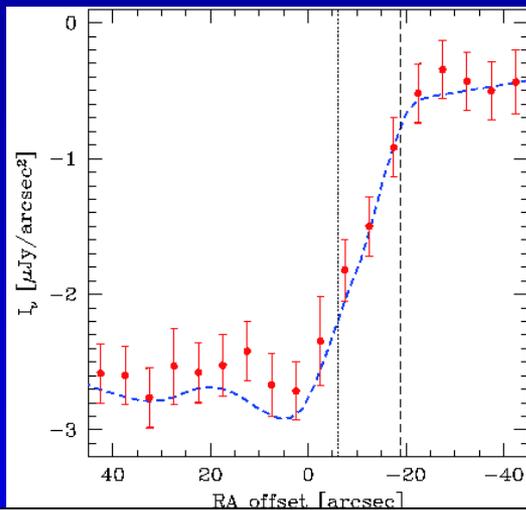
上と同じデータから  
作った  
90GHz SZ image

これをinput model  
としてmock  
observational data  
を作る。



中心軸に沿った各種物理量の  
変化。X線は密度変化を、SZは温度変化  
をよくトレースしている。

# Results: Shock Front



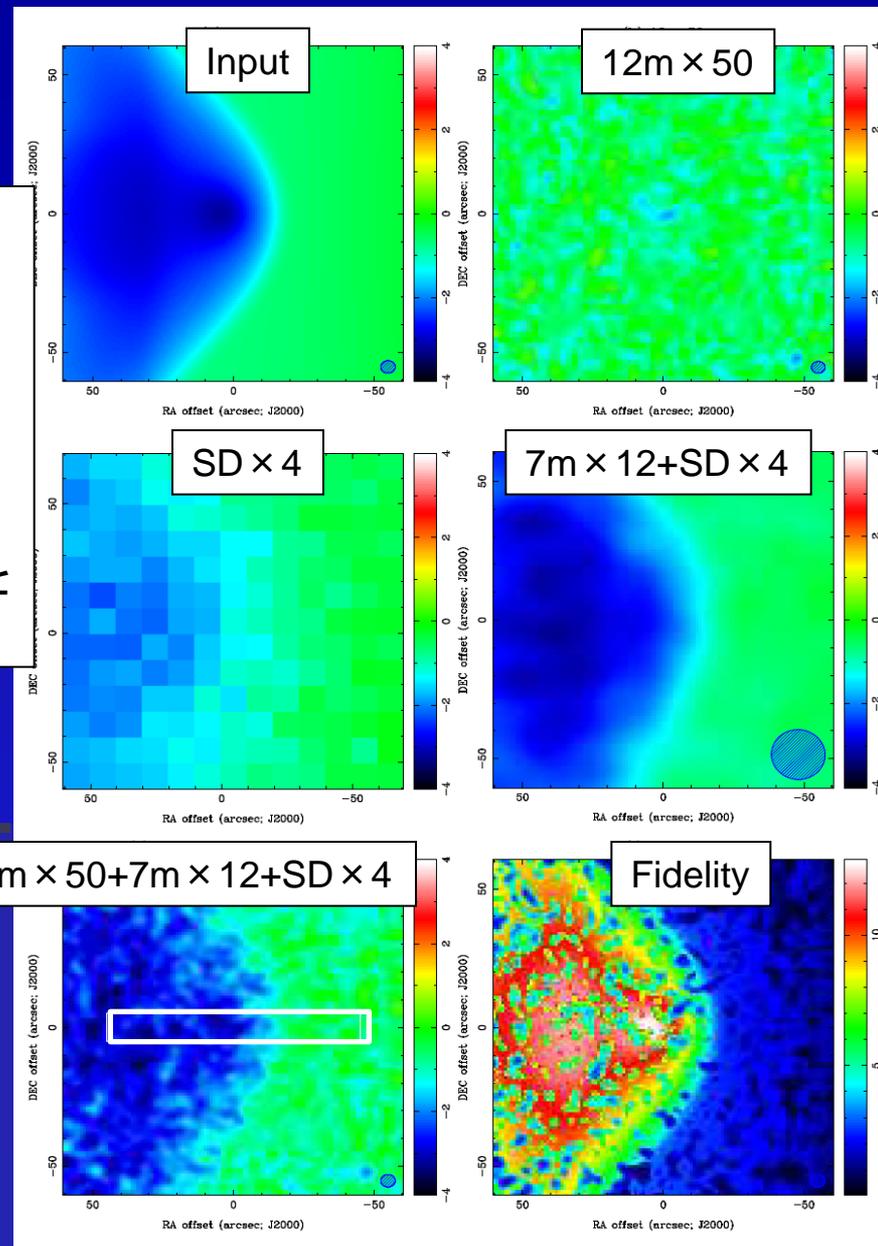
mock data image  
およびfidelity

ALMAとACAを組み  
合わせることで、銀  
河団の全体像をとら  
えながら衝撃波付近  
の構造を分解するこ  
とが可能に。

中心軸に沿ったSZ強度  
点線: input model  
赤点+エラーバー: mock data  
衝撃波による変化が  
分解できている。

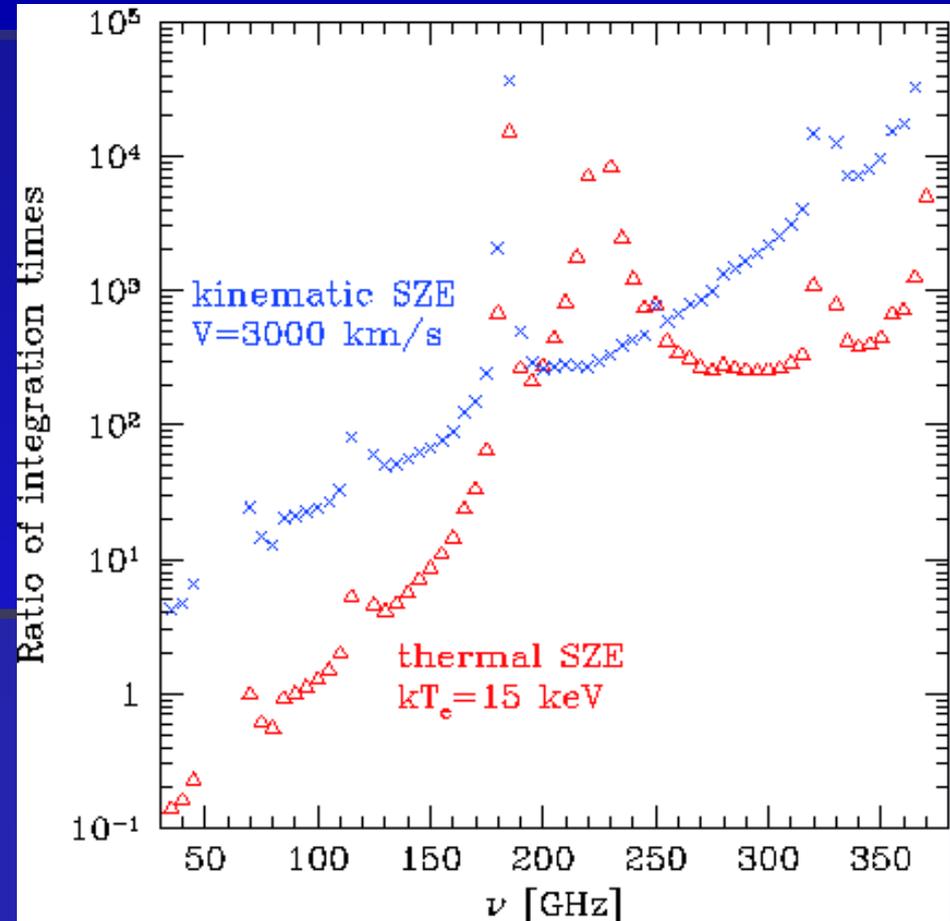
Fidelity: imageの再現性の善し悪しの指標  
Fractional error のほぼ逆数

$$f(\vec{\theta}) \equiv \frac{|I_{\text{in}}^{\text{smooth}}(\vec{\theta})|}{\max\{|I_{\text{out}}(\vec{\theta}) - I_{\text{in}}^{\text{smooth}}(\vec{\theta})|, 0.7\sigma_{\text{diff}}\}}$$



# 他の周波数帯では？ Kinematic SZは？

- 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。



# ALMAにプロポーザルを出したが、、

## ■ RXJ1347.5-1145

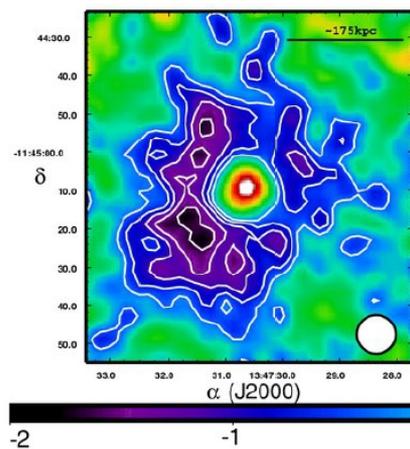
- 最も $L_x$ の大きい銀河団の一つ
- XとSZでimageの形態が異なる
- 30keV近い高温ガスの存在??
- 中心に電波銀河 (SZ観測には邪魔者)

## ■ 北山さん(東邦大)がPIでALMA cycle1に応募も残念ながら不採択

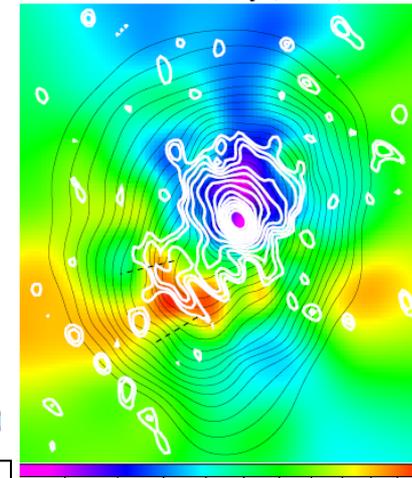
## ■ 今後については議論中

Ferrari et al. (2011)

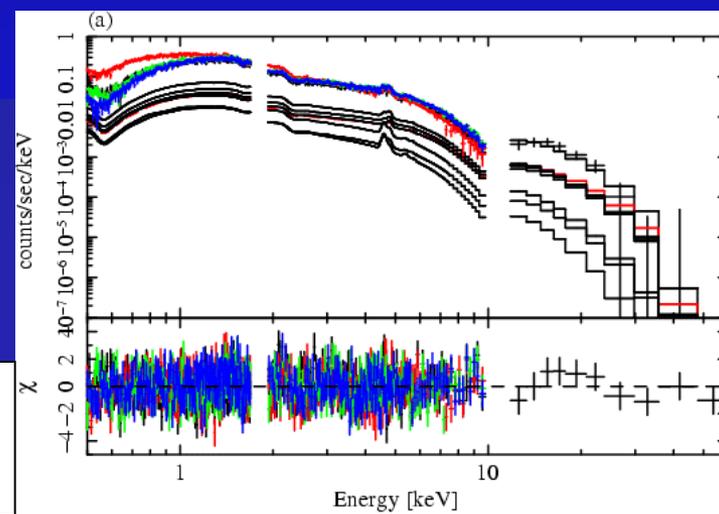
(b) 90GHz SZE



(c) Te (color) + Synchrotron (white) + X-ray (black)



Mason et al. (2010)



すざくによる広帯域X線スペクトル  
(Ota et al. 2008)

# Summary

- 流体シミュレーションデータを用いてALMA+ACAでのSZ観測のイメージングシミュレーションを行った。
- X線イメージは cold front などの密度変化の良いプローブである。その一方、衝撃波などの圧力や温度変化のプローブとしてはSZ効果が相対的に良いプローブである。
- 特に10keV以上の超高温成分の高空間分解能観測は当分SZでのみ可能。
- ALMAとACAを組み合わせることで、銀河団全体の構造の把握と衝撃波近傍の空間分解を両立することが可能である。