

# The Sunyaev-Zel'dovich effect **at 5''**: **RX J1347.5-1145** imaged by ALMA

滝沢元和

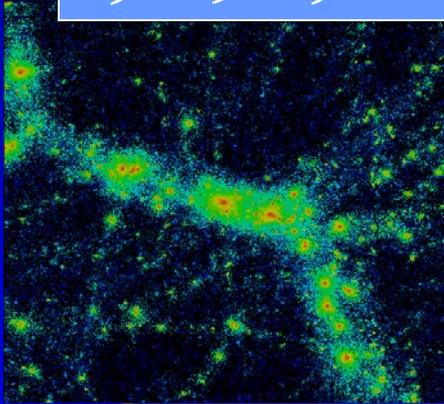
山形大宇宙グループ談話会(2017.5.12)

T. Kitayama, S. Ueda, S. Takakuwa, T. Tsutsumi, E. Komatsu, T. Akahori,  
D. Iono, T. Izumi, R. Kawabe, K. Kohno, H. Matsuo, N. Ota, Y. Suto,  
M. Takizawa, & K. Yoshikawa  
PASJ, 2016, 68, 88

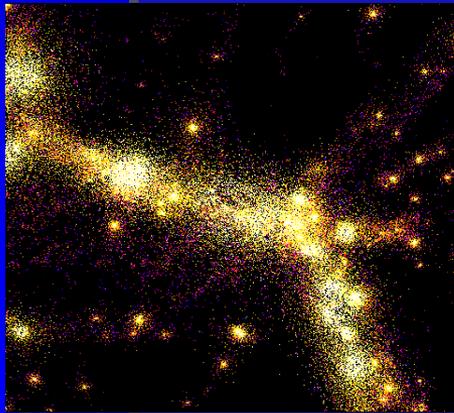
# Introduction

Yoshikawa et al. (2003)

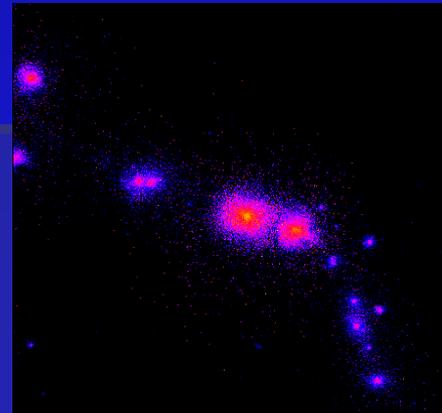
ダークマター



銀河



銀河間ガス  
( $\sim 10^5$  K)

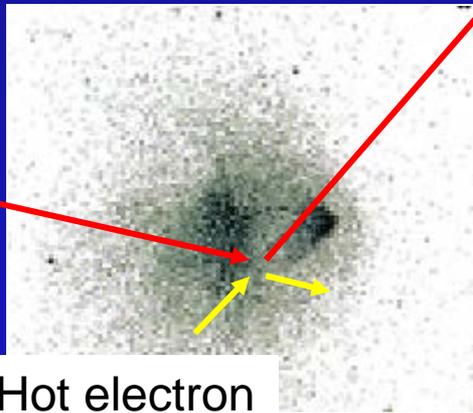


銀河団ガス  
( $\sim 10^7$  K)

- 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)

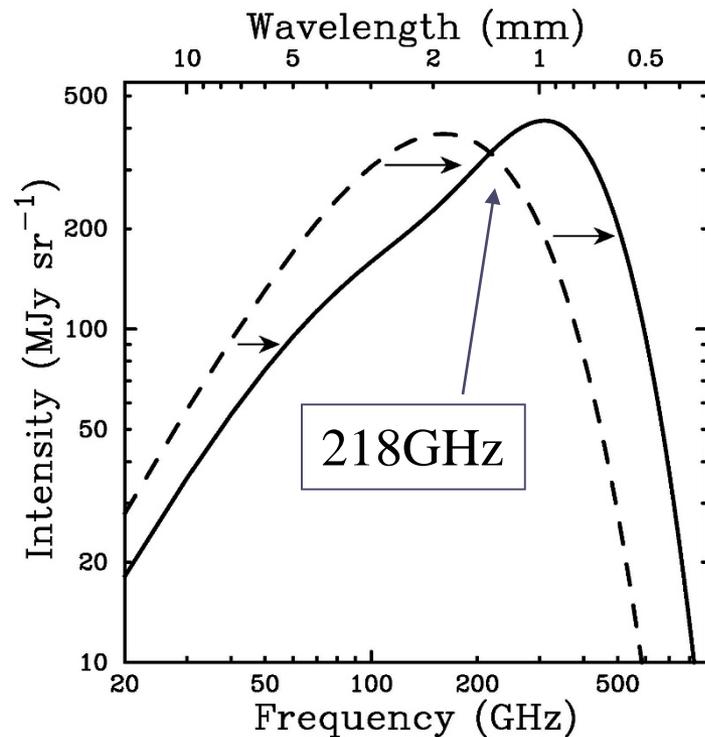
# Sunyaev-Zel'dovich 効果

逆コンプトン散乱



CMB光子  
(2.7K  
black body)

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



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

# 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

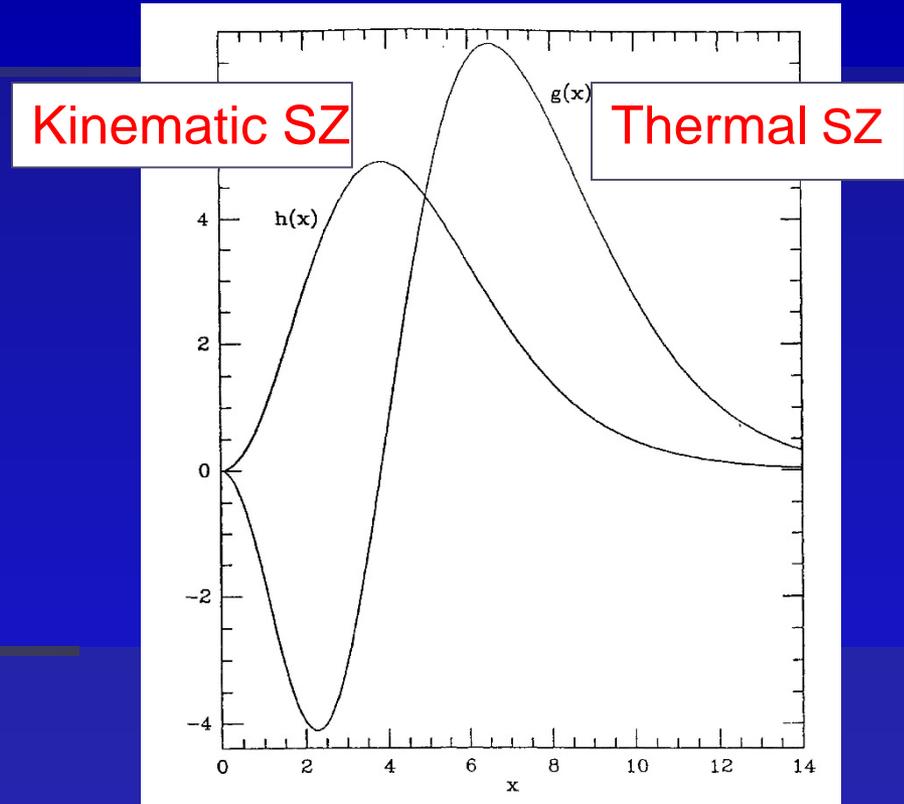
$$\Delta I_{\text{th}} = -i_0 h(x) (V_r / c) \tau$$

ただし、 $V_r$ は遠ざかる時を正とし、

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

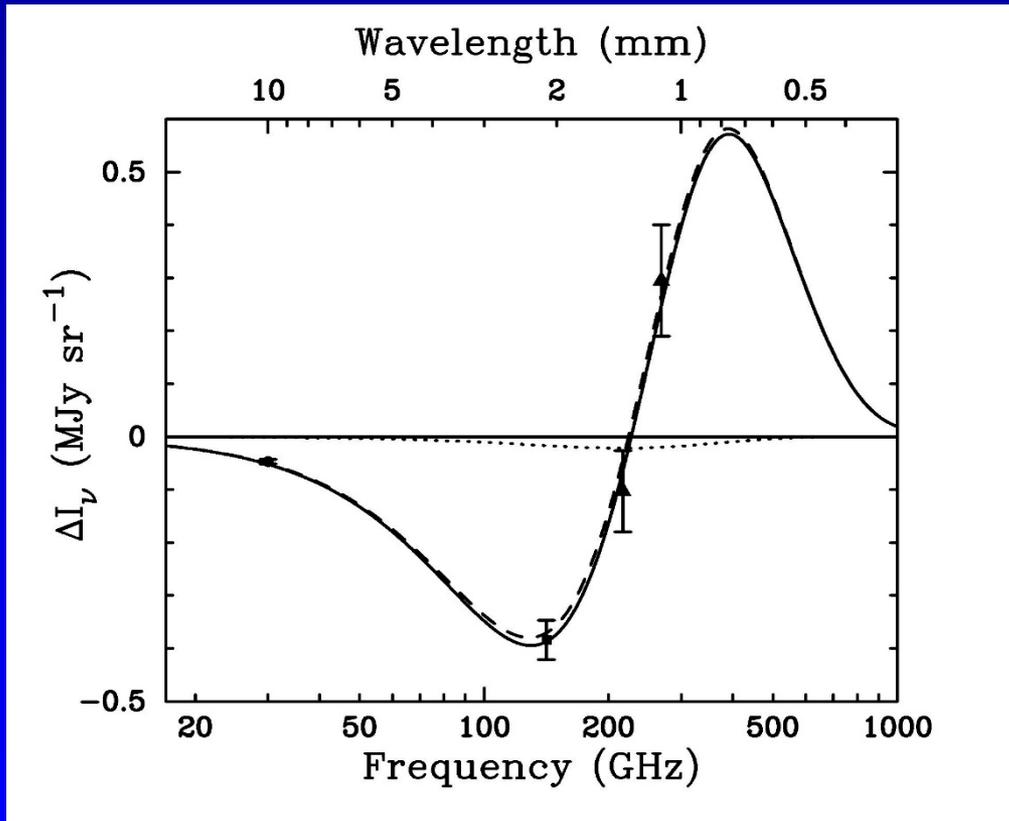
$$h(x) = \frac{x^4 e^x}{(e^x - 1)^2},$$

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。

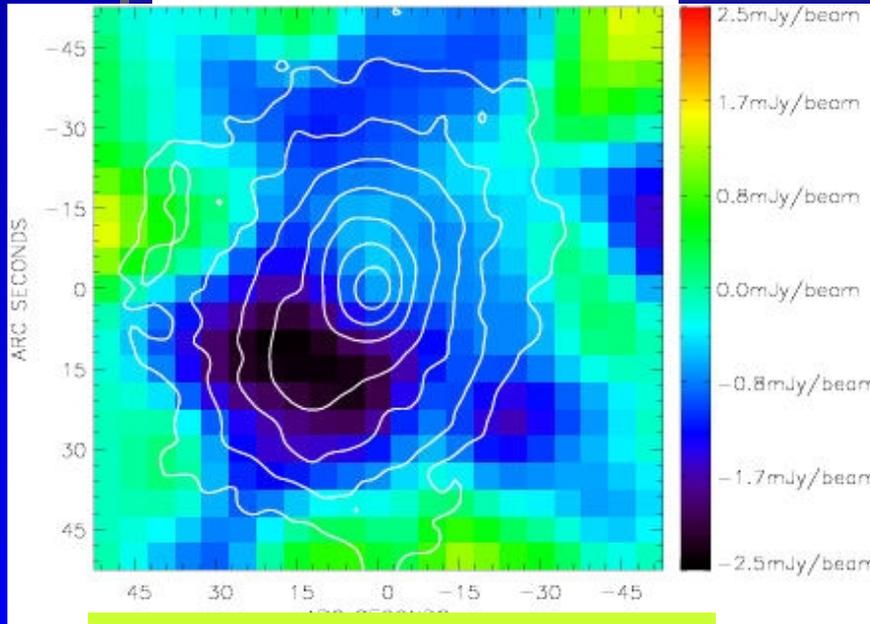
$$I_X \propto (1+z)^{-4}$$

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

high z object にはSZが相対的に有利

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

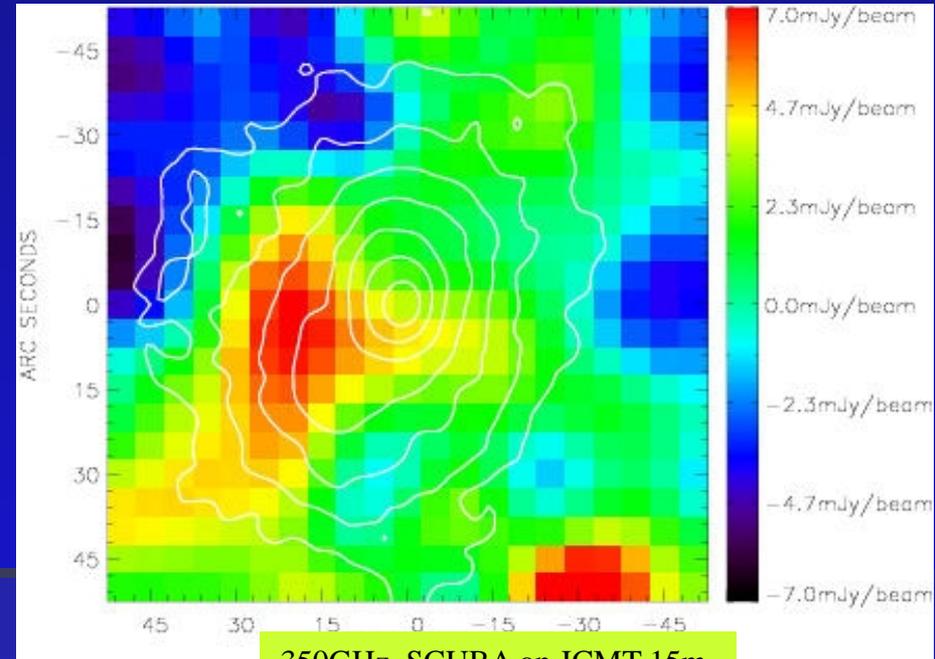
ミリ波 (decrement)



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)

X線(等高線)とSZ(カラー)で  
空間分布が違うように見える。

# 観測天体

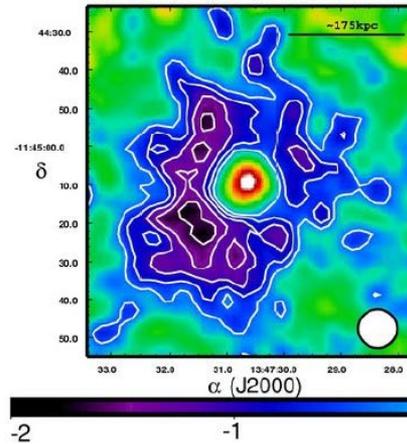
## ■ RXJ1347.5-1145

- 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)
- $z=0.451$
- $1''$ は $4.04 h_{100}^{-1} \text{kpc}$ に相当

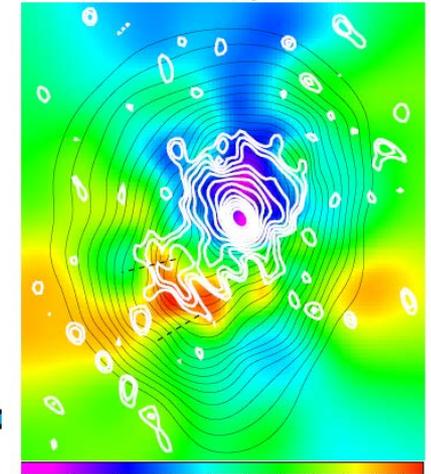
すぎくによる広帯域X線スペクトル  
(Ota et al. 2008)

Ferrari et al. (2011)

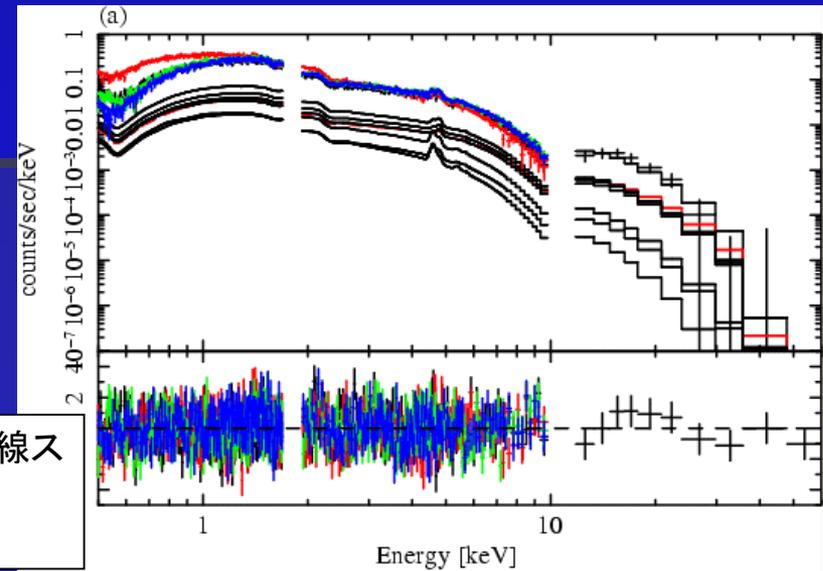
(b) 90GHz SZE



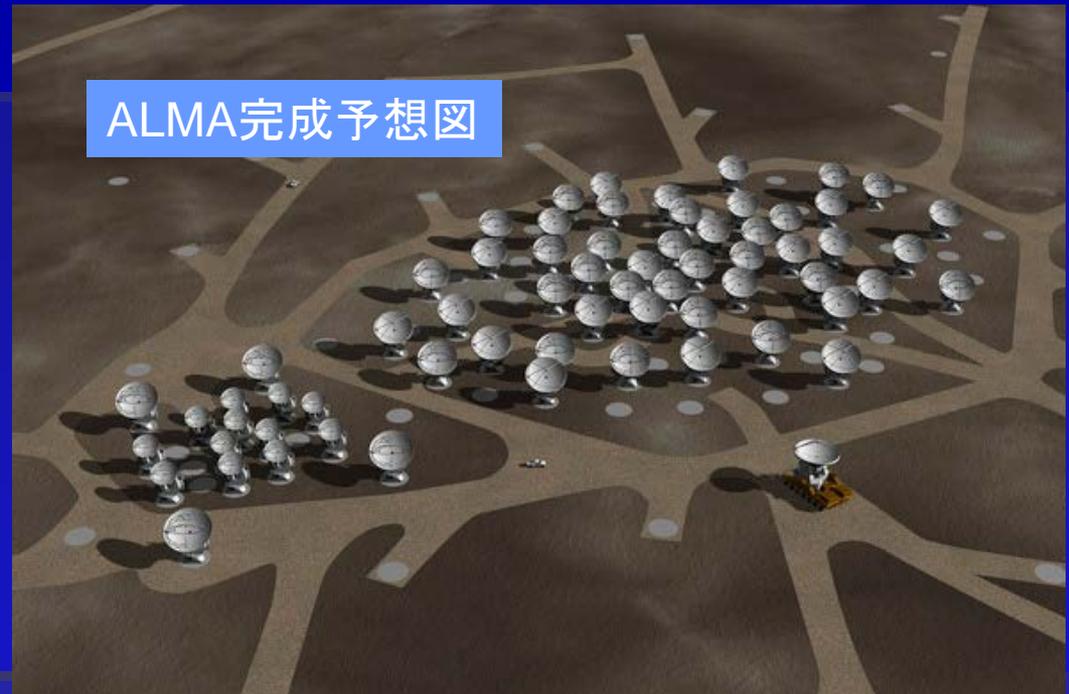
(c) Te (color) + Synchrotron (white) + X-ray (black)



Mason et al. (2010)



# Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array (ALMA)



- 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
- 12m-Array (50台)、7m-Array (12台 + 12mを4台)
- 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観測の意義

## ■ 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はなにかと面倒。
- 見かけのサイズがコンパクトな銀河団が好都合

# 観測

ID	Array	Date	Number of antennas	On-source time [min]
EB7-1	7-m	2014-08-16	10	39.43
EB7-2	7-m	2014-08-17	10	39.43
EB7-3	7-m	2014-08-17	10	19.97
EB7-4	7-m	2014-08-17	9	39.43
EB7-5	7-m	2014-12-06	7	39.43
EB7-6	7-m	2014-12-11	9	39.43
EB7-7	7-m	2014-12-15	8	39.43
EB7-8	7-m	2014-12-28	8	39.43
EB7-9	7-m	2014-12-28	8	39.43
EB12-1	12-m	2014-12-15	41	34.13
EB12-2	12-m	2014-12-29	39	40.42
EB12-3	12-m	2014-12-30	39	40.42
EB12-4	12-m	2015-01-04	40	40.42

Table 2. Parameters of observed maps.

Parameters	12-m array	7-m array
Central frequency	92 GHz	92 GHz
Band width	7.5 GHz	7.5 GHz
Primary beam FWHM at the central frequency	62"	107"
Number of pointings	7	7
Baseline coverage	3.5–116 k $\lambda$	2.1–16.3 k $\lambda$
Weighting	natural	natural
Synthesized beam FWHMs	4".1 $\times$ 2".4	20".5 $\times$ 11".1
Synthesized beam position angle	84 $^{\circ}$ 1	88 $^{\circ}$ 1
Average 1 $\sigma$ noise	0.012 mJy beam $^{-1}$	0.083 mJy beam $^{-1}$

- 2014年8月—2015年1月にかけて、都合13回に分けて観測。
  - 12m-array  $\sim$ 155min
  - 7m-array  $\sim$ 335min
- Band3
  - 中心波長 92GHz
  - 帯域幅7.5GHz
- 合成ビームサイズ
  - 12m-array 4".1  $\times$  2".4
  - 7m-array 20".5  $\times$  11".1

# 干渉計の像合成

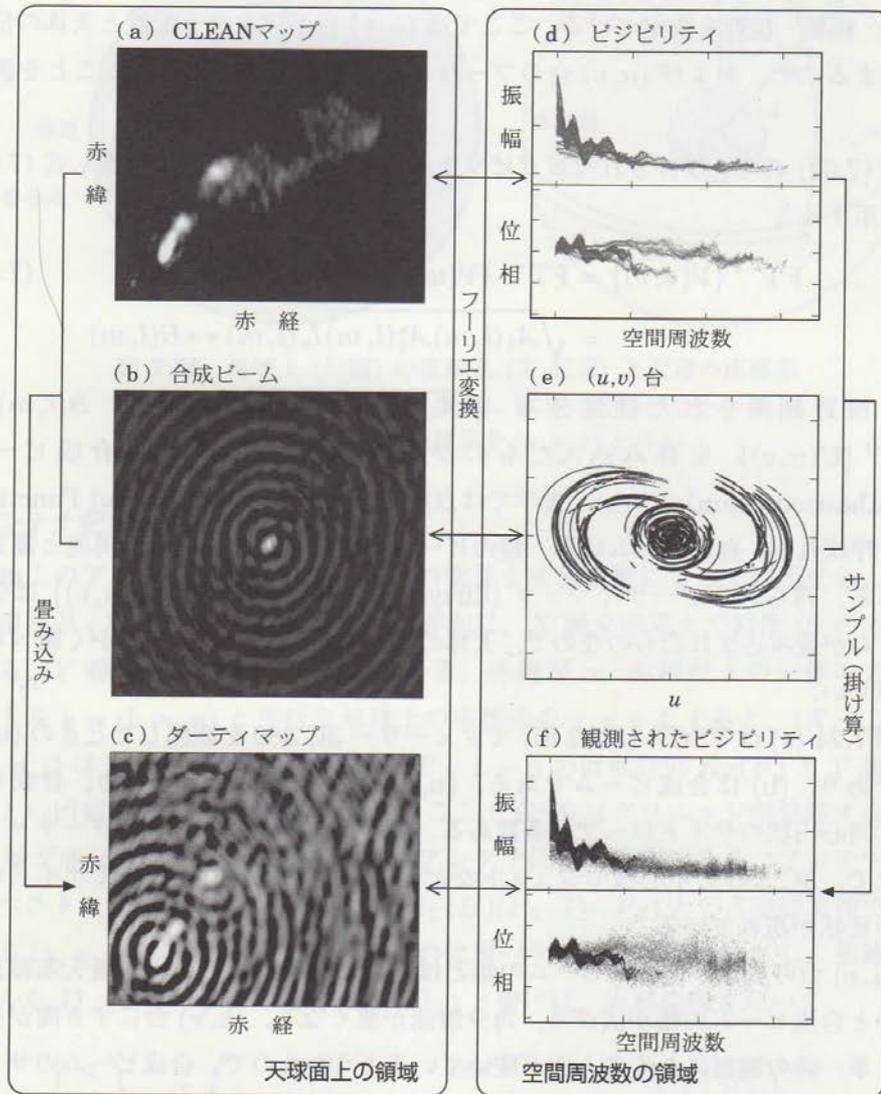
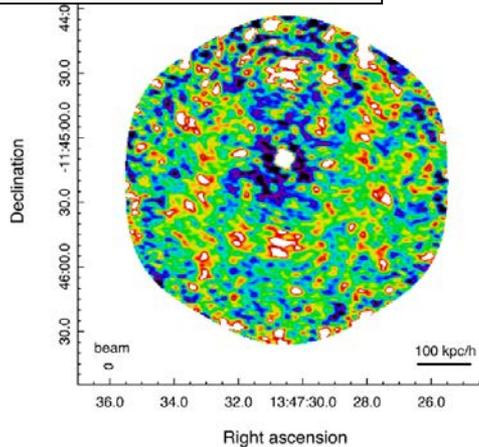


図 7.24 干渉計の像合成.

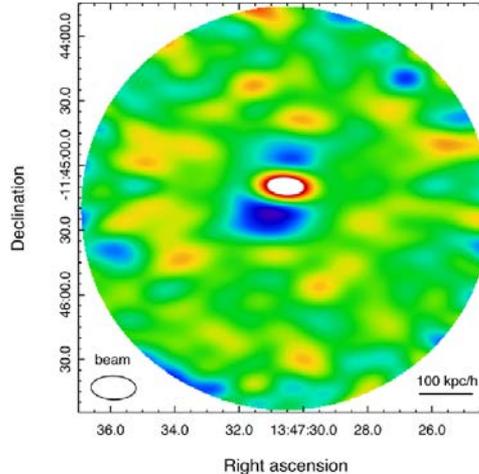
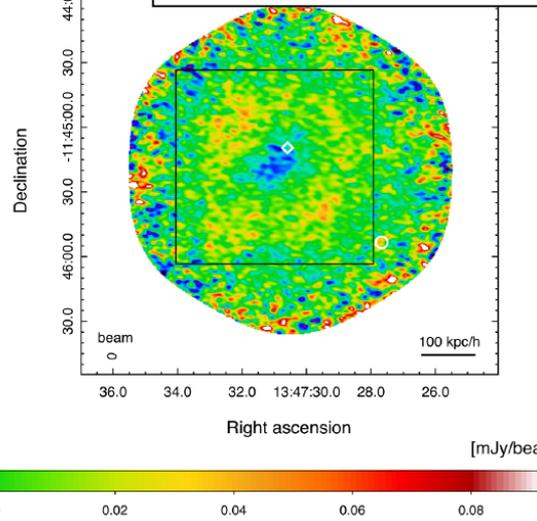
- 干渉計で得られる直接の観測量(ビジビリティ)は、天球面上のイメージのフーリエ成分の一部。
- ビジビリティをフーリエ変換したもの(dirty map)はもとのイメージにはならない(フーリエ成分の一部しか使っていないため)。
- 合成ビーム(点源のdirty map)をdeconvolveしたイメージを再構成する必要がある。

# Dirty Mapと点源の除去

12m 点源除去前

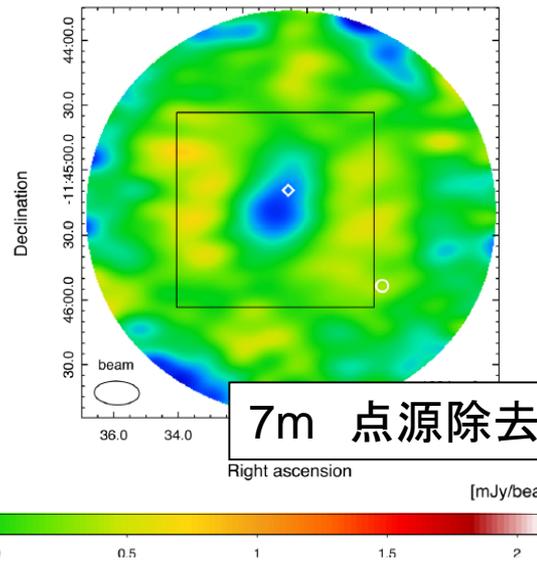


12m 点源除去後



7m 点源除去前

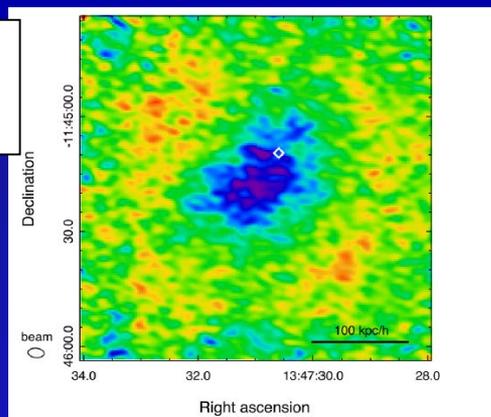
7m 点源除去後



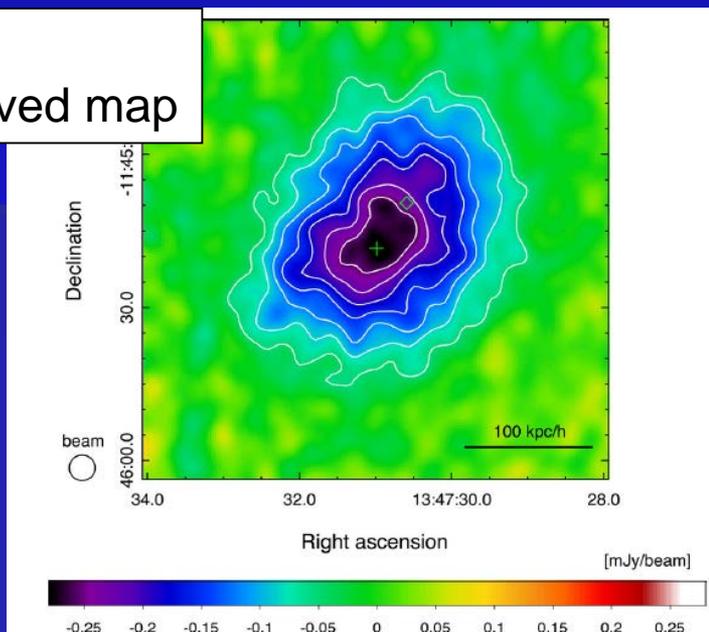
- 12m-array, 7m-array それぞれについてuv データからdirty mapを作成
- 中心に点源(AGN)
- 位置とfluxをfree parameter にした点源モデルをuv空間上でfit したのち除去

# 合成Dirty-MapとDeconvolved map

12m+7m  
dirty map



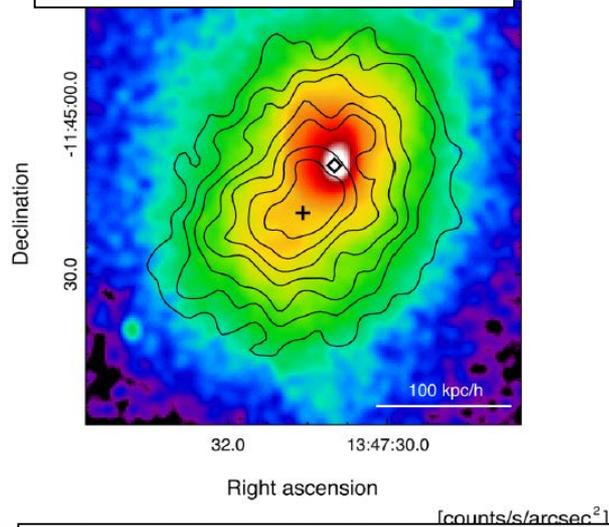
12m+7m  
deconvolved map



- 12m-arrayと7m-arrayの両方のデータを用いてdirty-mapを作成
- サイドローブが見えてはいるが、中心AGNからずれてSZのsignalが見えてる。
- Multi-Scale CLEANでdeconvolve。最終的に5"の分解能

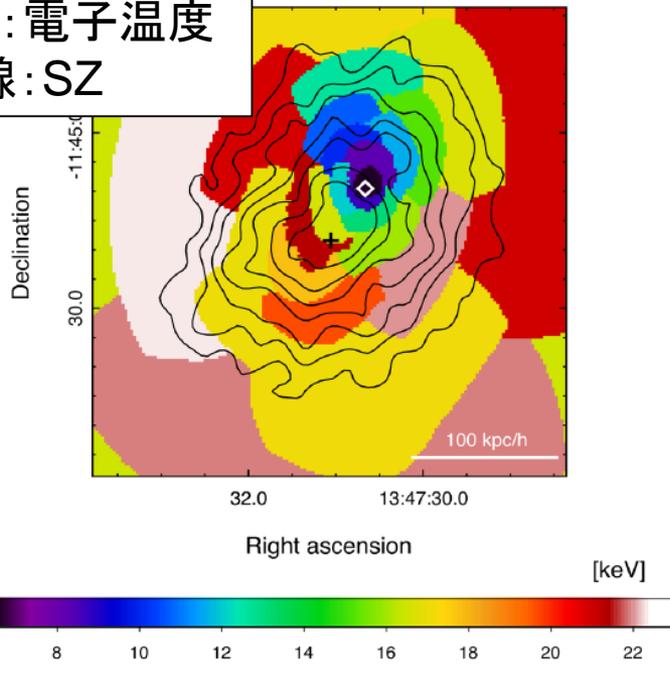
# X-ray (Chandra) との比較(1)

カラー: X線表面輝度  
等高線: SZ



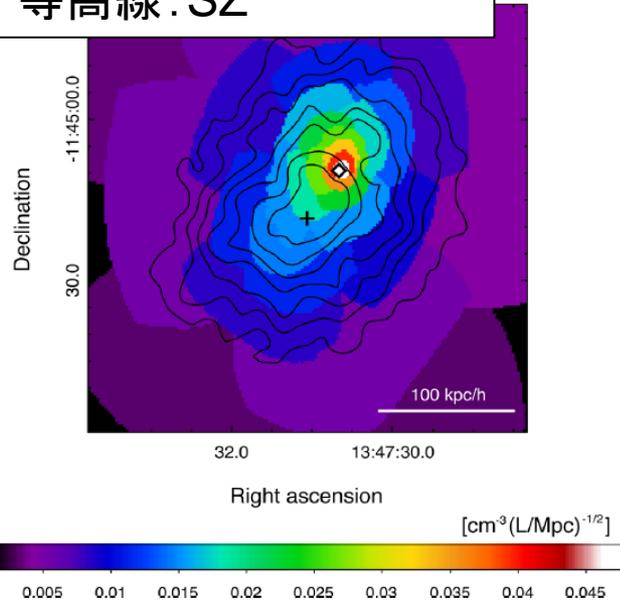
(b) Electron temperature

カラー: 電子温度  
等高線: SZ



- Chandra のアーカイブデータ (233.8ks)を解析
- BGDはX-ray peakから2'.5-3'.5の同一視野内データを使用
- エネルギー範囲は0.4-7.0keVを使用
- $z$ ,  $N_H$ は文献値で固定してスペクトル解析
- X線とSZでピークは約10"ずれてる。
- SZのピーク付近に20keV程度の高温成分がある。

カラー: 疑似電子密度  
等高線: SZ



# X-ray (Chandra) との比較 (2)

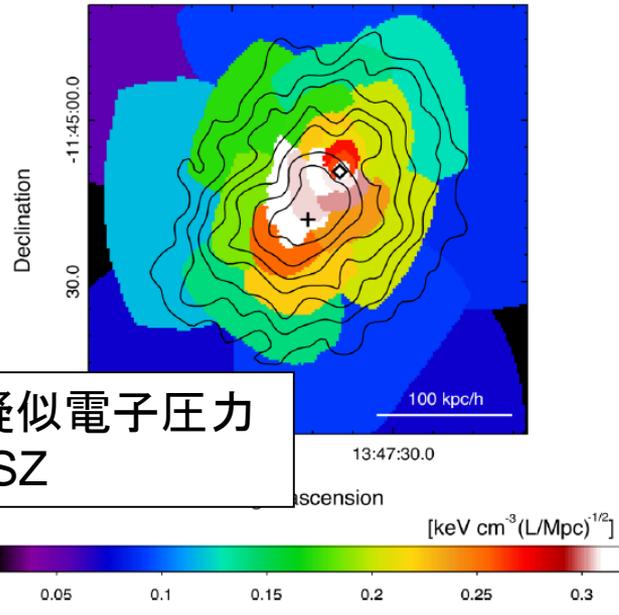
- 奥行き $L$ 一定とし、(エネルギー幅がせまいので) $I_x$ の温度依存性を無視すると、以下のようにX線データから擬似的に電子密度、温度の分布が出せる。

$$I_x \sim n_e^2 L$$

$$\rightarrow n_e \sim I_x^{1/2} L^{1/2}$$

$$P_e \sim n_e T_e \sim I_x^{1/2} T_e L^{1/2}$$

(d) Pseudo electron pressure

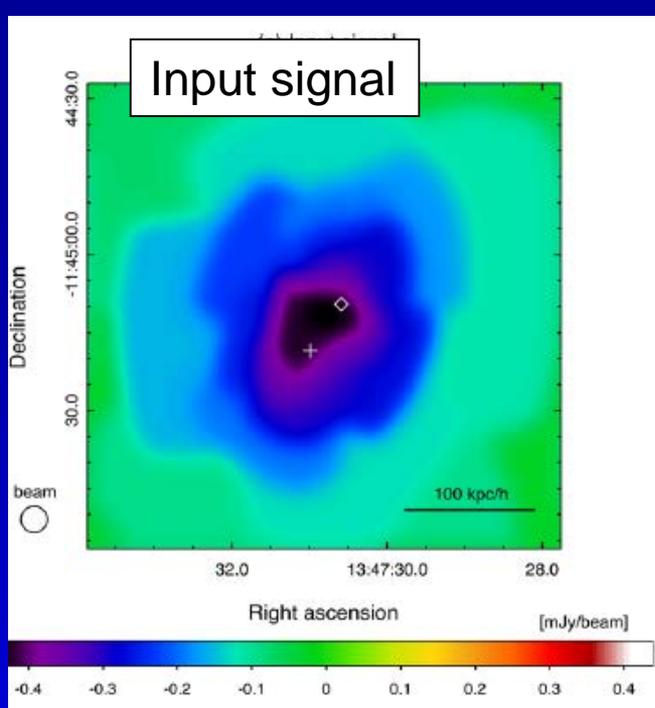


カラー: 疑似電子圧力  
等高線: SZ

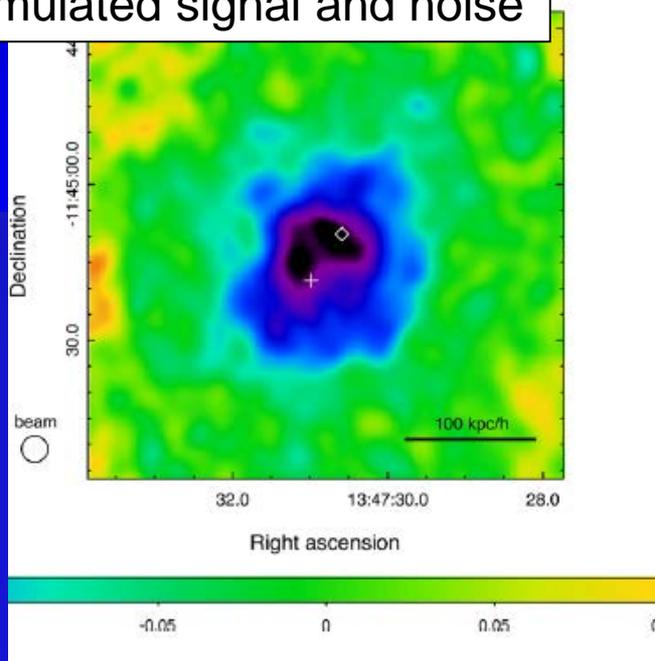
- SZと疑似電子密度でピークは約10“ずれてる。
- SZと疑似電子圧力はだいたいあっている。

# ミッシングフラックスの評価

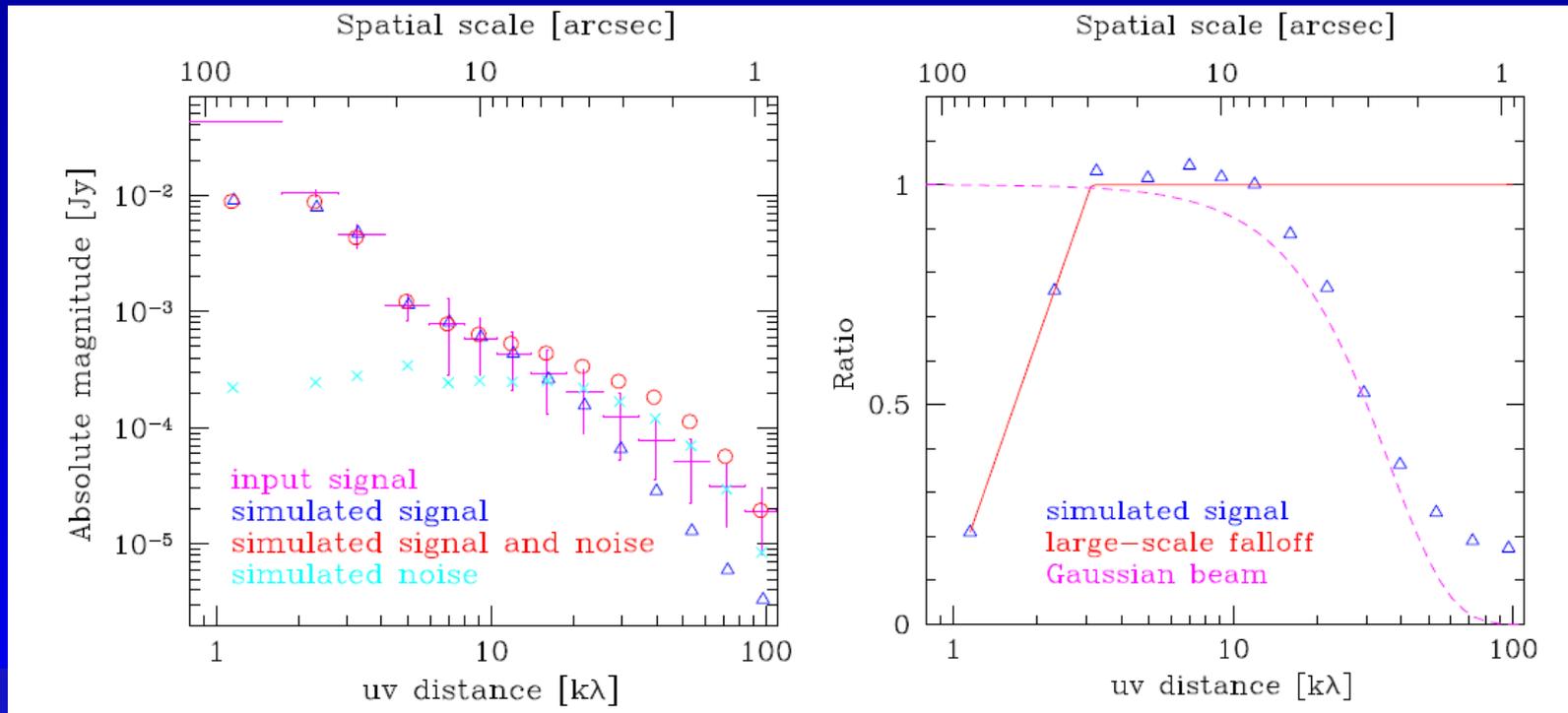
- 干渉計では大スケールの成分は失われてしまう（ミッシングフラックス）。
- ChandraのデータからSZのモデルイメージを作って、それをALMAのsimulatorに通してミッシングフラックスを評価



Simulated signal and noise

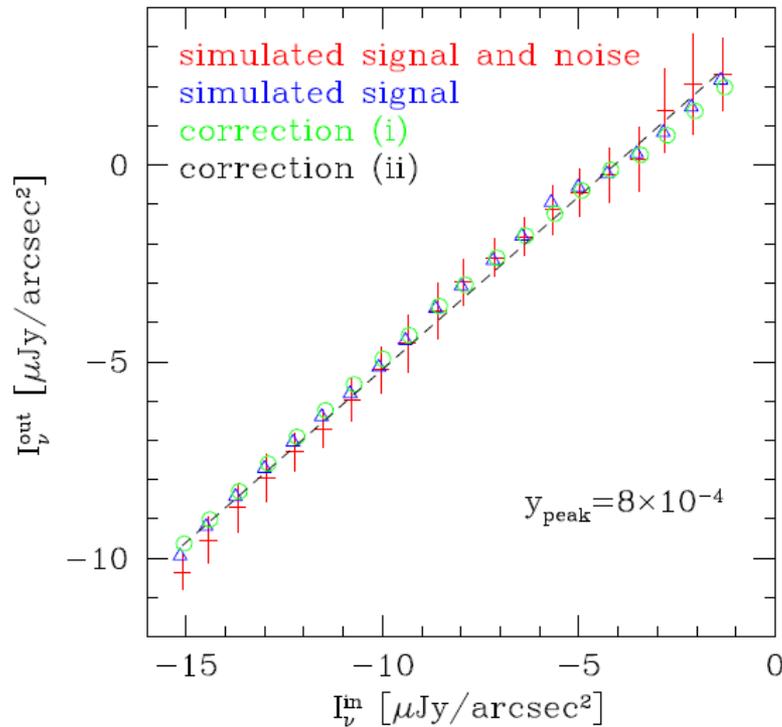


# ミッシングフラックスの評価 (uv空間で)



- Input map とsimulated mapをuv空間上で比較
- 40秒角程度の成分まではとれている。それ以上の大スケールではは失われている。
- 5秒角以下でとれていないのは、分解能(smoothing) のせい

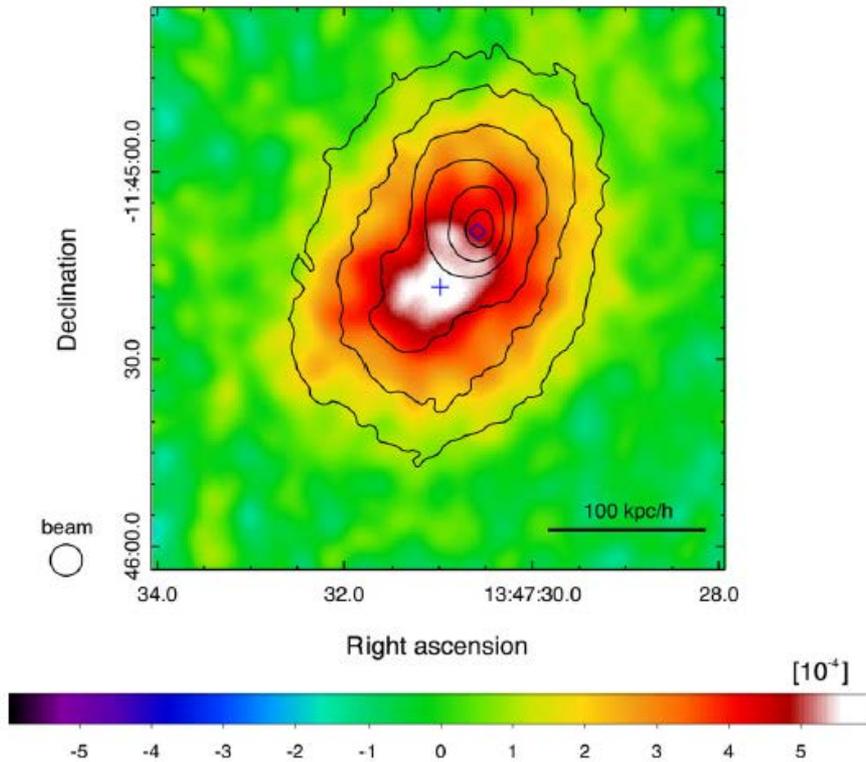
# ミッシングフラックスの評価 (天球面上で)



- Input mapとsimulated mapの天球面上での強度を比較。線形な関係でよくあらわされるのを確認。
- $I_{\text{out}} = C_1 I_{\text{in}} + C_0$   
 $C_1 = 0.88$   
 $C_0 = 3.6 \mu\text{Jy arcsec}^{-2}$
- $C_1 < 1$ : コントラストの低下
- $C_0 \neq 0$ : constant off-set

# ミッシングフラックスの補正

カラー: Compton y-parameter  
等高線: X-ray image (Chandra)



- 前述の二つの方法(uv or 天球面)どちらで行っても大差はないことを確認。
- 最終的に得られたy-parameter mapが左のよう。

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

# Summary

- 銀河団RX J1347.5-1145をALMAのband3(92GHz)で観測し5秒角( $20h^{-1}\text{kpc}$ )分解能のSZ効果イメージを得た。
  - ALMAによるSZ効果観測の最初の例である。
  - SZ効果観測としてはこれまでで最も高空間分解能なものである。
- X線観測データとの比較をおこなった。
  - X線のピークとSZのピークが10秒角ずれていることを明らかにした。
  - X線データのみから得た疑似圧力mapとSZmapはよく一致した。
- X線データを用いてミッシングフラックスの評価を行った。
- 見かけのサイズがコンパクトな銀河団のSZ効果観測においてALMAが非常に強力な装置であることを示せた。