

# Sunyaev-Zel'dovich効果の 高精度観測と宇宙論的意義

Hubble and ESO Picture of the week  
(2017/2/20)

Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO),  
NASA/ESA Hubble Space Telescope

東邦大学理学部物理学科

北山 哲

# 内容

- SZ効果とは？
- 高精度SZ効果観測の重要性
- ALMA によるSZ効果の初検出
- 宇宙論的展望

## 主な参考文献

レビュー: Kitayama (2014) PTEP, 06B111 (arXiv:1404.0870)

ALMA観測: Kitayama et al. (2016) PASJ, 68, 88 (arXiv: 1607.08833)

# 共同研究者 (アルファベット順)

赤堀卓也 (鹿児島大)

伊王野大介 (国立天文台)

泉拓磨 (東京大)

川邊良平 (国立天文台)

河野孝太郎 (東京大)

小松英一郎 (MPA)

松尾宏 (国立天文台)

大栗真宗 (東京大)

太田直美 (奈良女子大)

須藤靖 (東京大)

高桑繁久 (鹿児島大)

滝沢元和 (山形大)

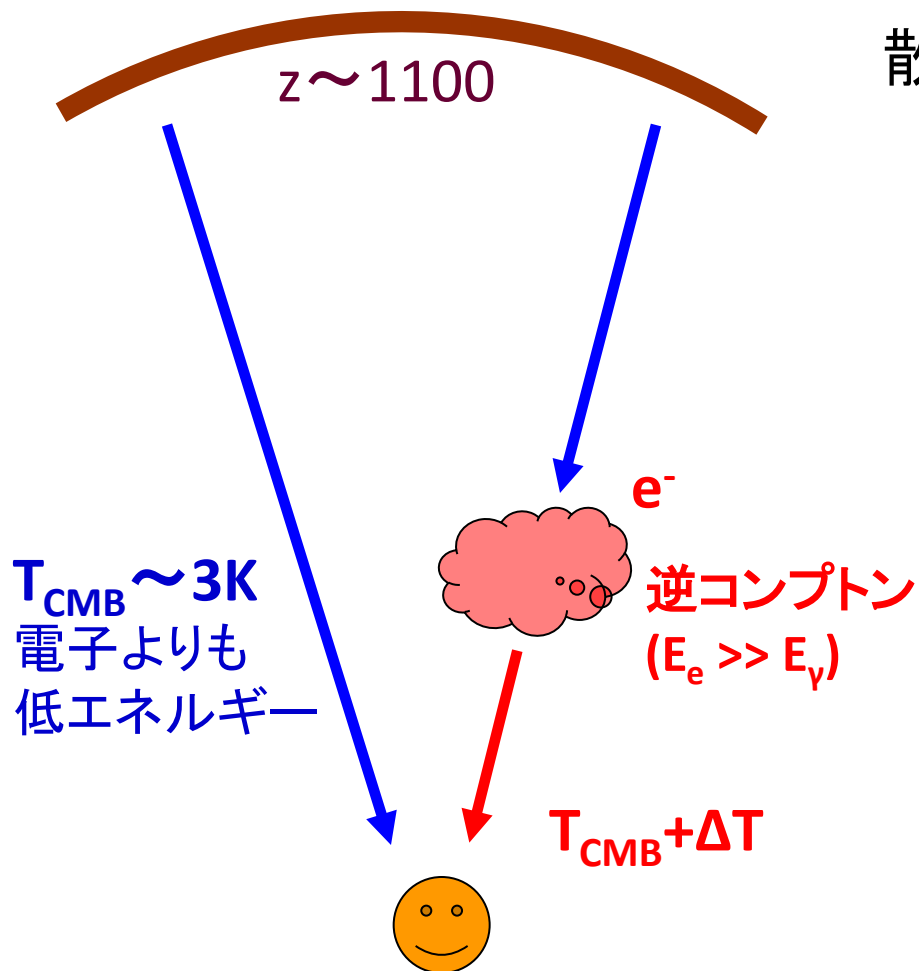
堤貴弘 (NRAO)

上田周太郎 (宇宙研)

吉川耕司 (筑波大)

# Sunyaev-Zel'dovich Effect (SZE)

プラズマ電子によるCMB光子の散乱 (SZ 1970)



散乱確率

$$\tau_e = \int \sigma_T n_e dl$$

小さい!

$$\sim 2 \times 10^{-3} \left( \frac{n_e}{10^{-3} \text{ cm}^{-3}} \right) \left( \frac{l}{\text{Mpc}} \right)$$

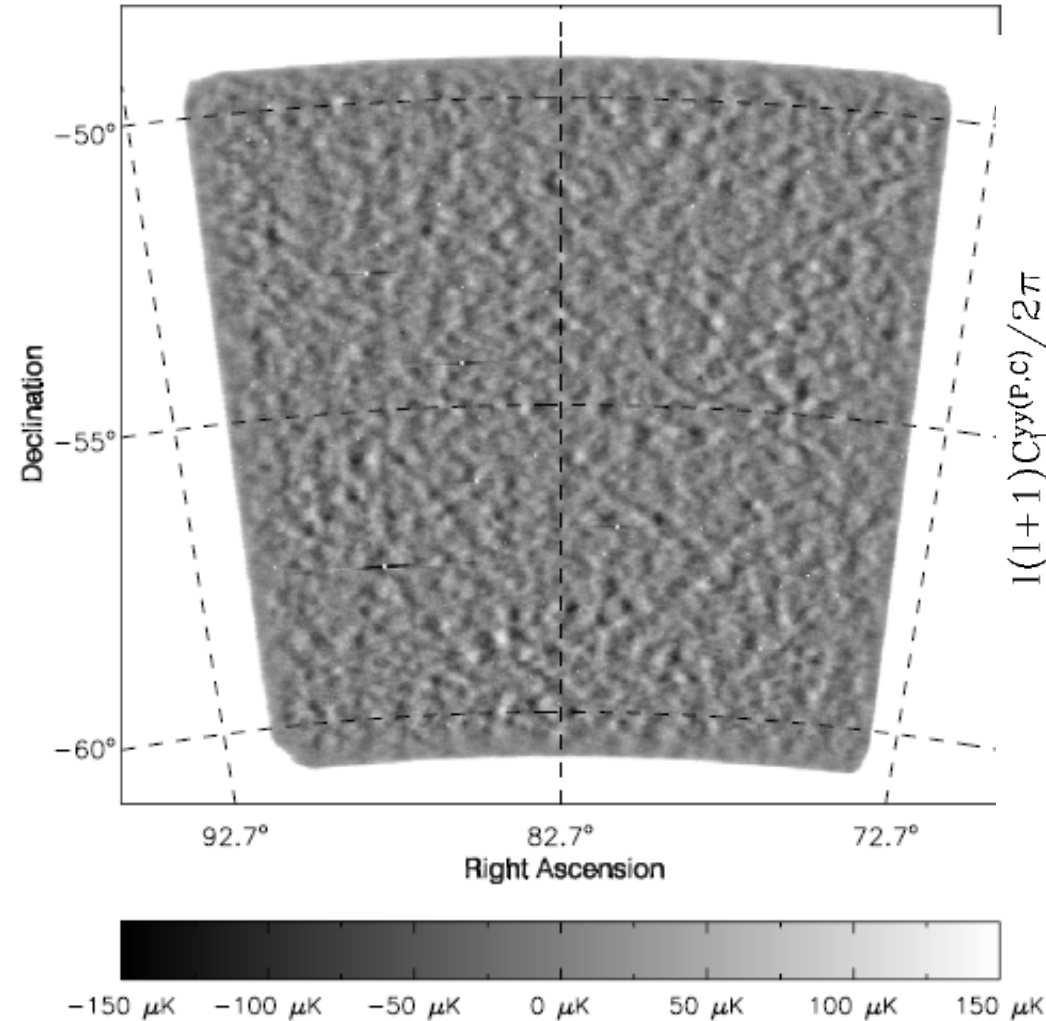
理論的に扱いやすい

最初の予言は約50年前

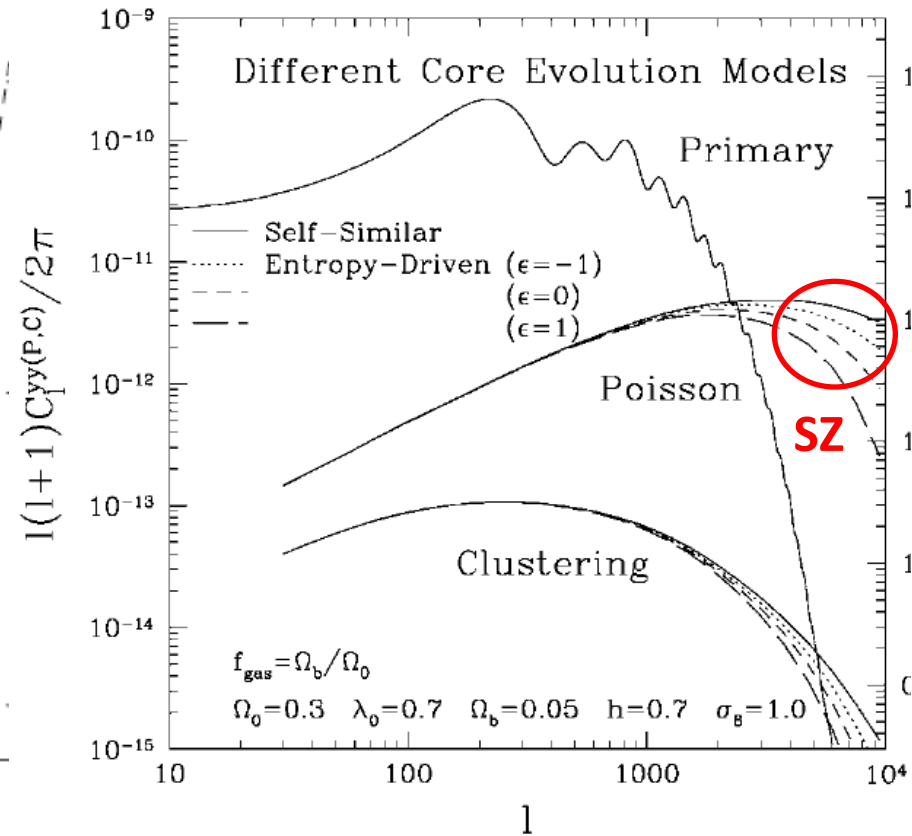
観測は困難

高信頼度になったのは最近

# CMB異方性



CMB sky map by South Pole Telescope (SPT)  
 150GHz, 95 deg<sup>2</sup> FOV, 1.1' FWHM (Schaffer+11)  
 Primary CMB & 20 galaxy clusters (SZ効果)

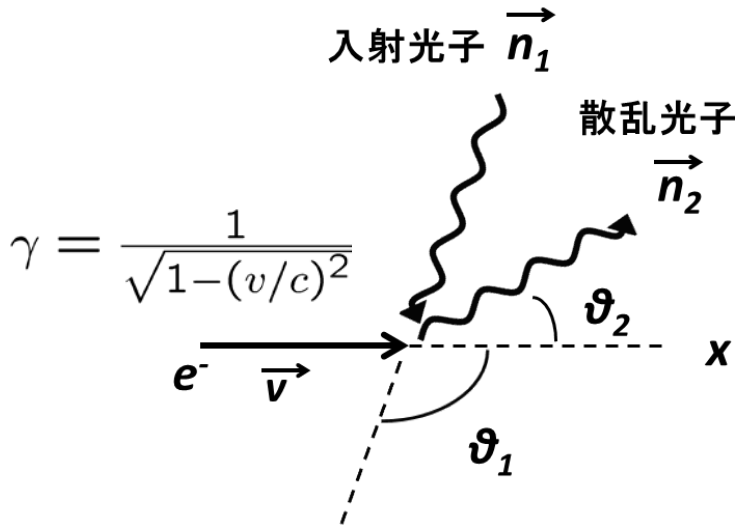


CMB 温度異方性スペクトル  
 (Komatsu & TK 1999)  
 $l \sim \pi/\theta > 3000$  ( $\theta < \text{arcmin}$ )  
 で卓越する2次異方性

# 逆コンプトン散乱

$$E_e > E_\gamma \text{ i.e.,}$$

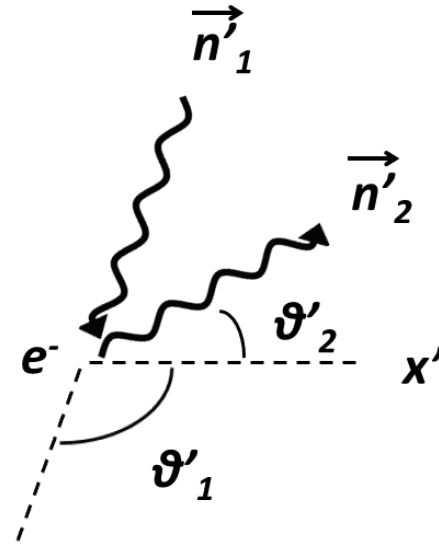
$$v_e > \sqrt{kT_{\text{CMB}}/m_e} \\ \sim 10(1+z)^{1/2} \text{ km/s}$$



**CMB系**

入射光子(1)は等方的  
散乱光子(2)は前方に偏り、  
(相対論的ビーミング)  
平均エネルギーが増加する。

$$\epsilon_1 : \epsilon'_1 : \epsilon'_2 : \epsilon_2 \sim 1 : \gamma : \gamma : \gamma^2$$



**電子静止(')系**

入射光子(1')は前方に偏る

$$\epsilon'_2 = \frac{\epsilon'_1}{1 + \frac{\epsilon'_1}{m_e c^2} (1 - \vec{n}'_1 \cdot \vec{n}'_2)}$$

$$\epsilon'_1 \sim \gamma kT_{\text{CMB}} \ll m_e c^2$$

では弾性的、広角度に散乱(2')

# Sunyaev-Zel'dovich Effect (SZE)

CMBの逆コンプトン散乱のうち、**弱相対論的電子** (宇宙の電子の大半) 起因のもの

•  $v_e/c$  の1次: **固有運動**

**運動学的 (kinetic) SZ効果**

$$\frac{\Delta T}{T_{\text{CMB}}} = \int \sigma_{\text{T}} n_e \frac{v_{\parallel}}{c} dl$$
$$\sim 7 \times 10^{-6} \left( \frac{n_e}{10^{-3} \text{ cm}^{-3}} \right) \left( \frac{v_{\parallel}}{10^3 \text{ km s}^{-1}} \right) \left( \frac{l}{\text{Mpc}} \right)$$

•  $v_e/c$  の2次: **ランダム運動**

**熱的 (thermal) SZ効果**

$$\frac{\Delta T}{T_{\text{CMB}}} = g(v) \int \sigma_{\text{T}} n_e \frac{k_{\text{B}} T_e}{m_e c^2} dl$$

Compton  $y$ -parameter

$$\sim 4 \times 10^{-5} \left( \frac{n_e}{10^{-3} \text{ cm}^{-3}} \right) \left( \frac{T_e}{10^8 \text{ K}} \right) \left( \frac{l}{\text{Mpc}} \right)$$

銀河団が主要ソース

•  $v_e/c$  の高次: **相対論的補正**

※ 銀河団の固有速度 ( $\sim 1000 \text{ km/s}$ ) よりも、電子の熱運動速度は数10倍大きいため、熱的SZ効果が卓越する。

# 熱的SZ効果

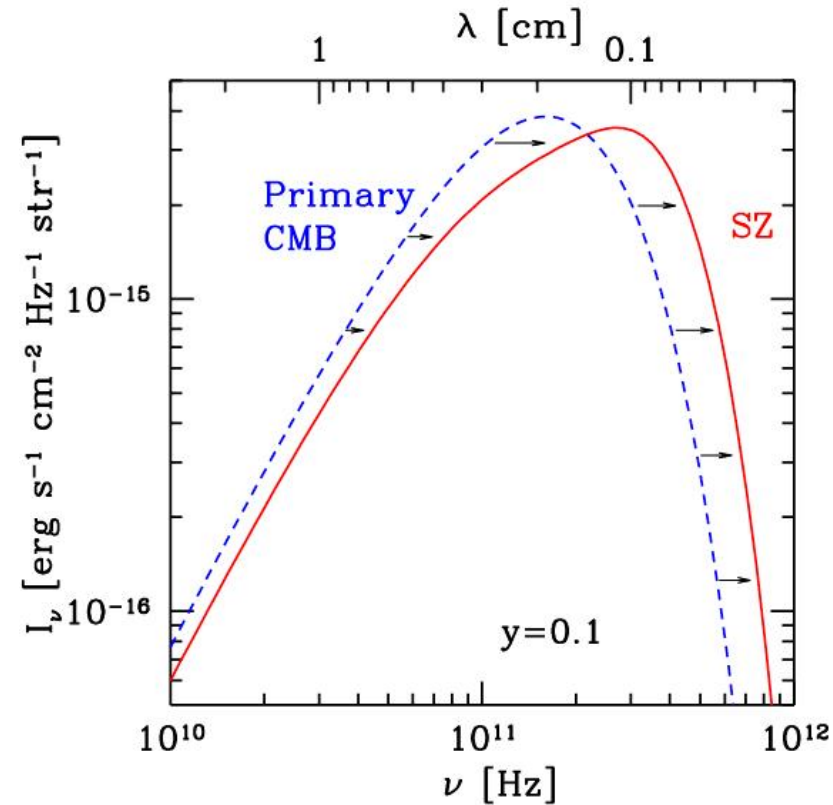
1) ユニークなスペクトル:

$\Delta T < 0$  at  $\nu < 220$  GHz 負のソース

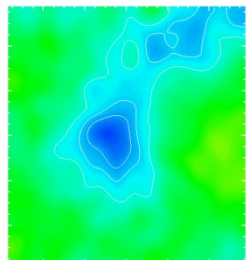
$\Delta T > 0$  at  $\nu > 220$  GHz

2)  $\Delta T/T_{\text{CMB}}$  or  $\Delta I/I_{\text{CMB}}$  は  $z$  によらない  
遠方でも観測輝度が落ちない

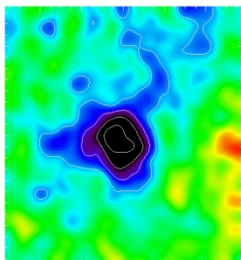
3) 銀河団(高温、大サイズ)が主要源



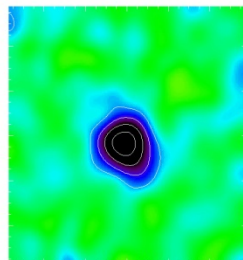
Abell 2319 at  $z=0.056$  by Planck (ESA/ LFI & HFI Consortia)



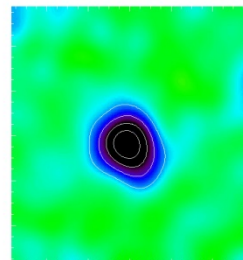
44 GHz  
FWHM=24'



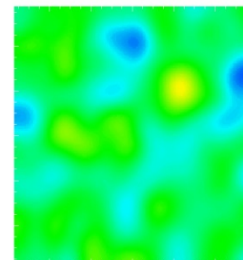
70 GHz  
14'



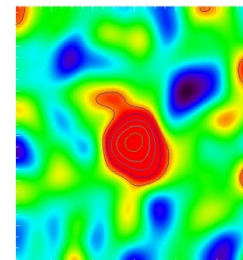
100 GHz  
10'



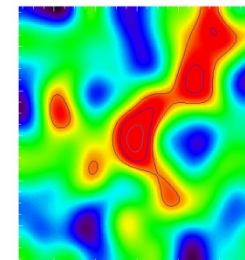
143 GHz  
7.1'



217 GHz  
5.5'



353 GHz  
5.0'



545 GHz  
5.0'



# 銀河団とは

## 宇宙最大の天体

総質量  $\sim 10^{15} M_{\odot}$

半径  $\sim \text{Mpc} = 8' (0.1/z)$

※宇宙論的に決まる

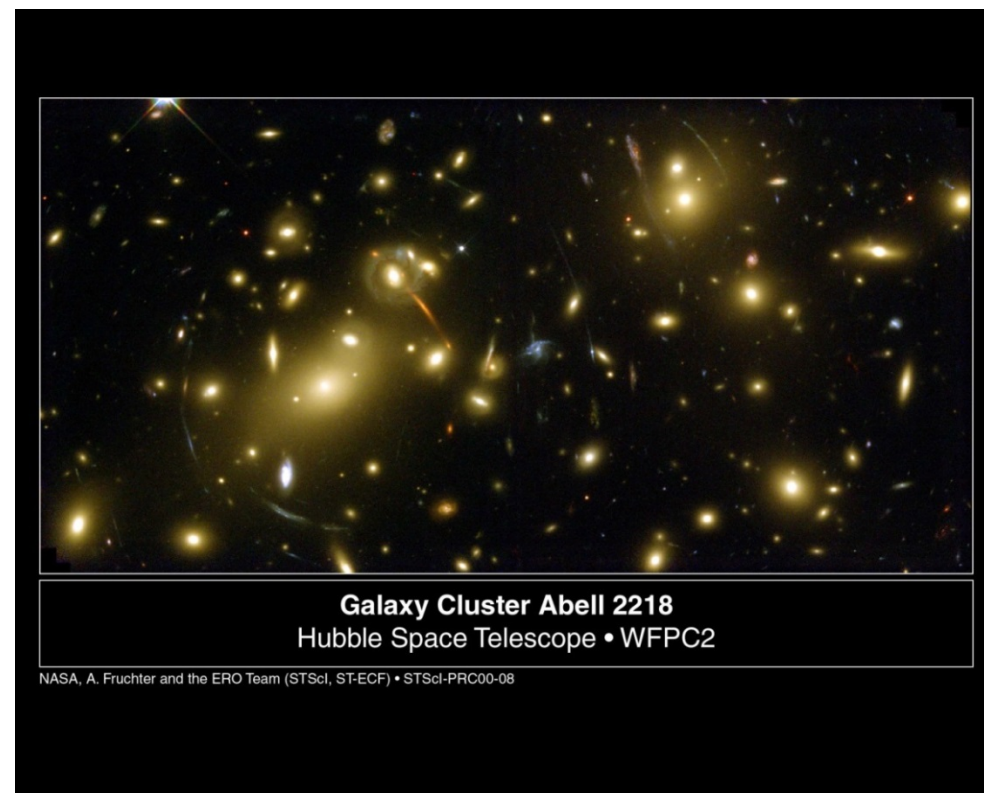
## 構造形成の現場

ボトムアップ構造形成の終着点

→ 初期密度ゆらぎ、  
宇宙論パラメータ  
プラズマ物理、粒子加速、etc.

## 宇宙に多数存在

& 多波長で観測可能



## ※ 単位

1pc (パーセク) =  $3.09E18$  cm  
~ 銀河内の恒星間隔

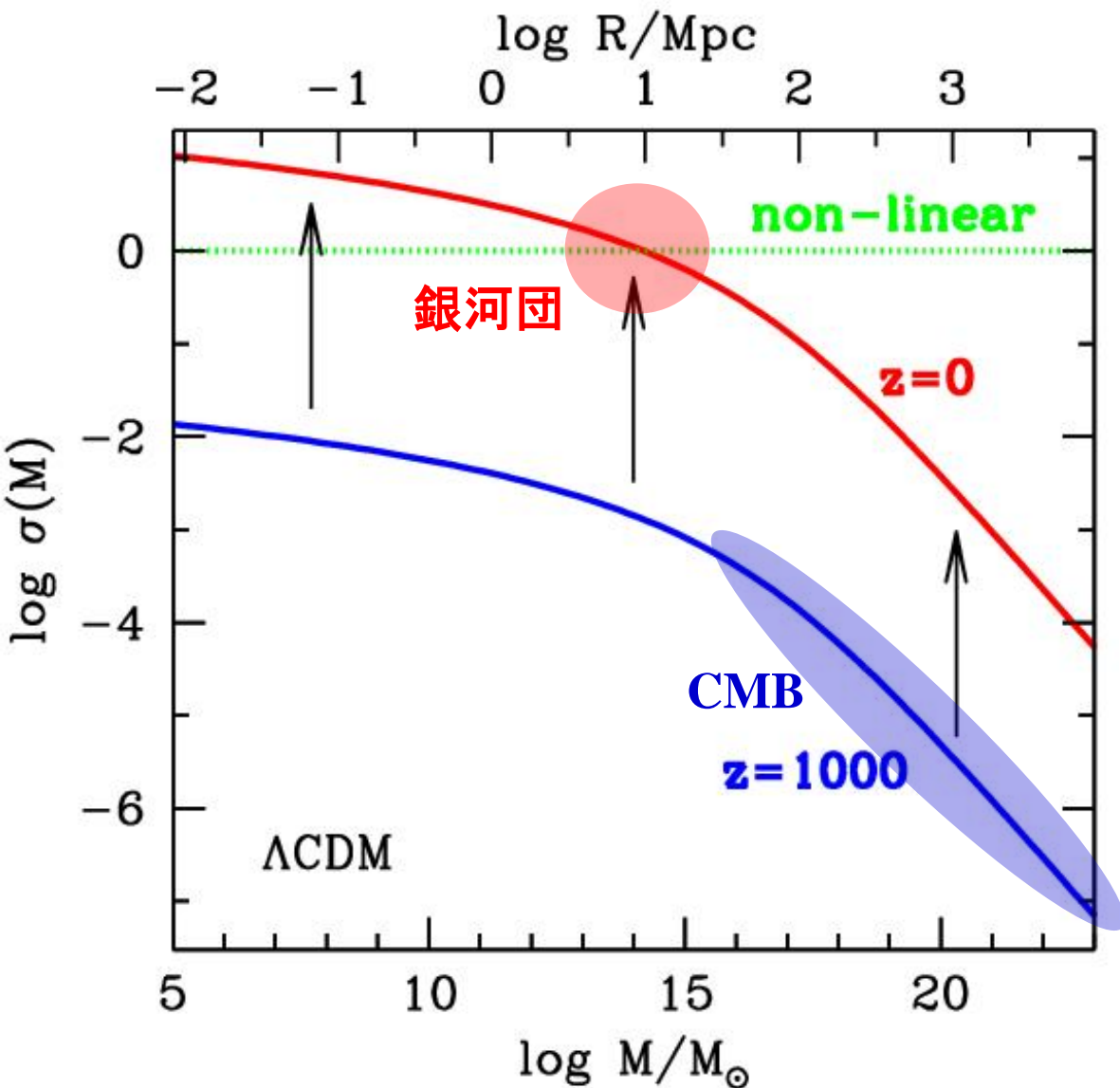
1  $M_{\odot}$  (太陽質量) =  $1.99E33$  g

1 yr (年) =  $3.16E7$  sec

1 eV =  $1.16E4$  K

1 Jy =  $1E-23$  erg/s/cm<sup>2</sup>/Hz

# 宇宙の構造形成と銀河団



密度ゆらぎの2乗平均値

$$\sigma^2(R, t) = \langle |\delta(< R, t)|^2 \rangle$$

$$\sim D^2(t) \int_0^{1/R} P(k) d^3k$$

↑ growth rate  $(\Omega_M, \Omega_\Lambda, \dots)$     ↑ Power spectrum  $(DM, n, \dots)$

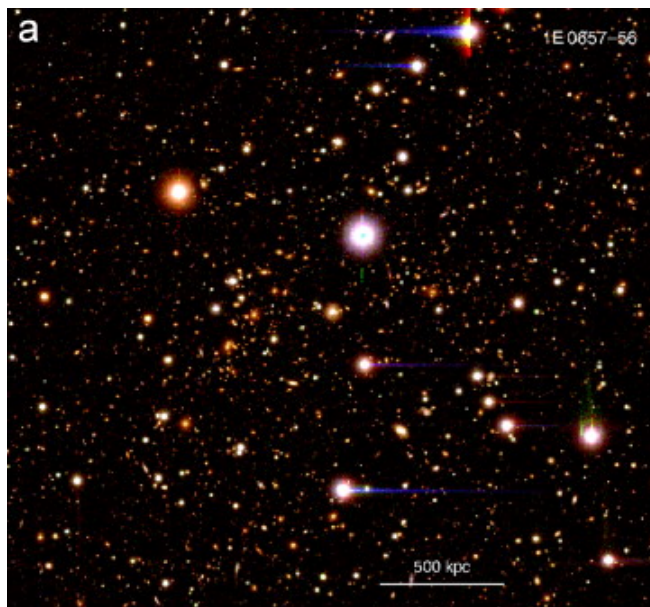
現在の宇宙の  
非線形スケール  
= 銀河団

# 多波長で見た銀河団

1E0657-56 at  $z=0.3$  (Markevitch & Vikhlinin 2007)

Optical  
銀河・星

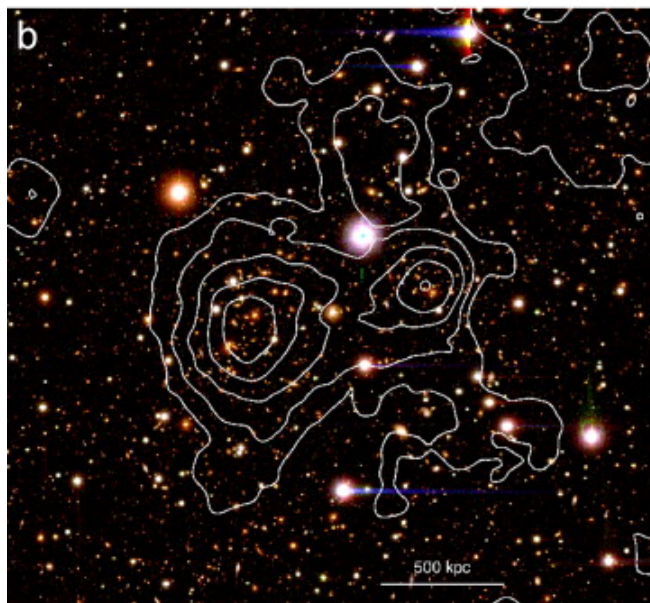
~5%  
少数派



Lensing  
contours

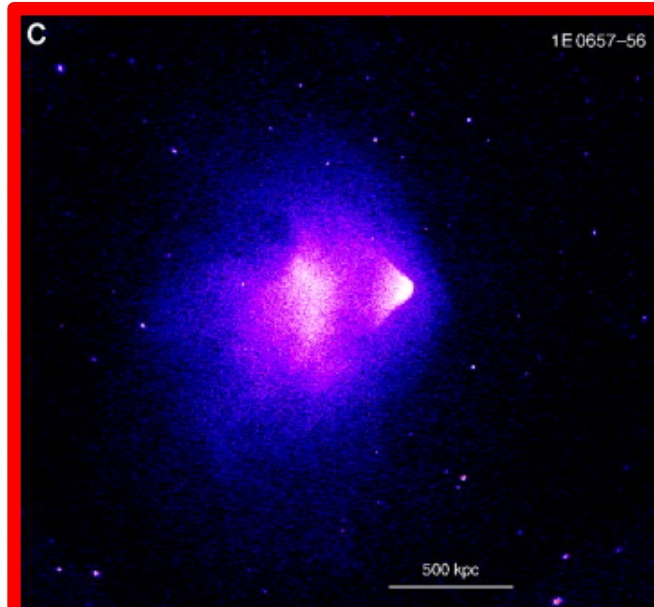
ダーク  
マター

~80%



X-ray  
(制動放射)  
熱的ガス

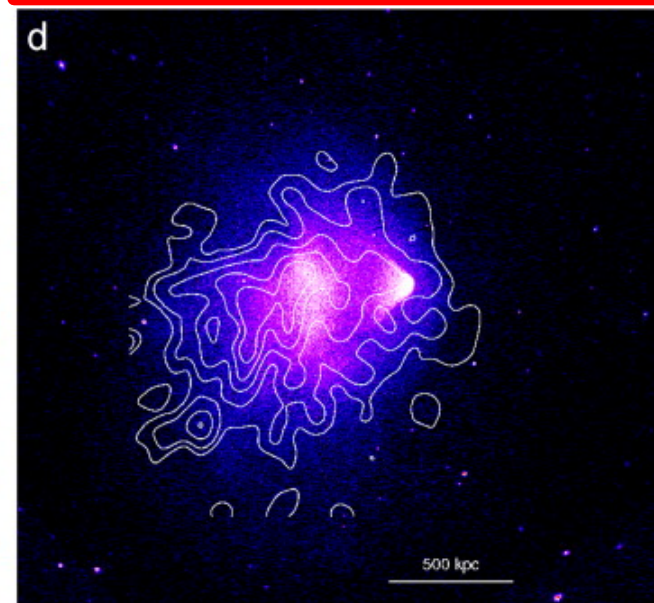
~15%  
バリオン  
の大半  
(SZ でも  
輝く)



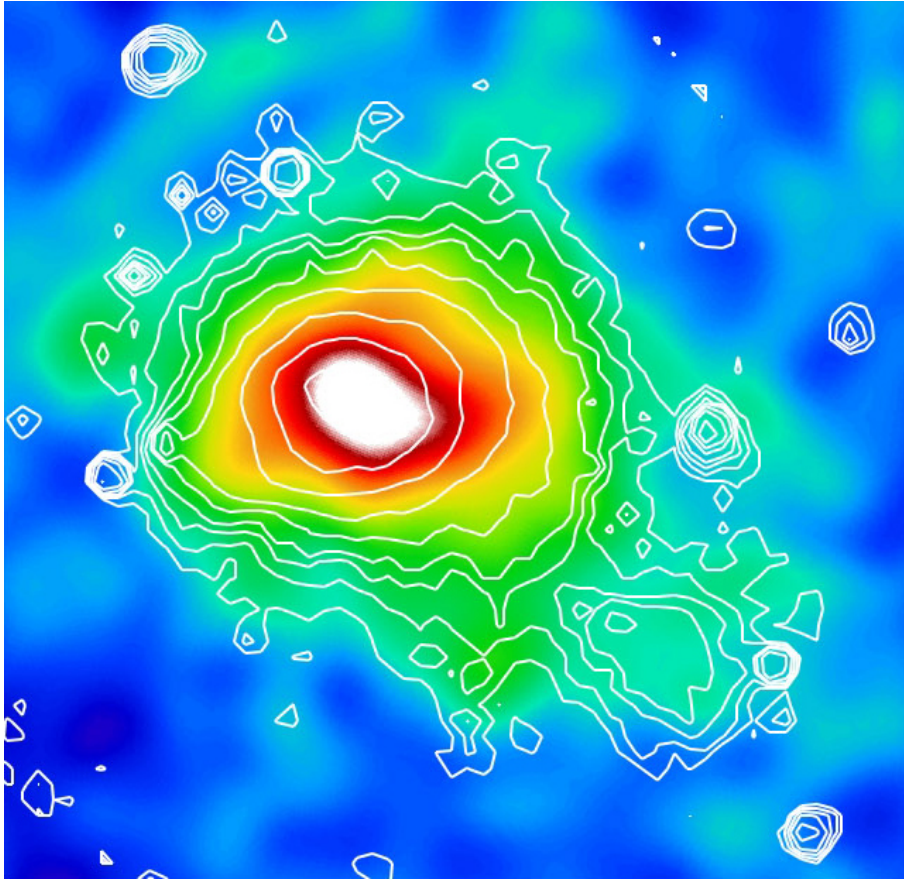
Radio

contours  
(シンクロトロン)  
非熱的ガス

量、起源  
は不明



# SZ効果 vs. X線



Coma cluster (Planck Collaboration 2013)

color: y-parameter (SZ) by Planck

contour: X-ray by ROSAT

同一の熱的プラズマに対し、

$$I_{\text{SZ}} \propto \int n_e T_e dl, \quad z \text{ によらない}$$

逆コンプトン散乱

$$I_x \propto \int n_e^2 T_e^\alpha dl / (1+z)^4, \quad \alpha < 1/2$$

主に制動放射

- 遠方観測に有利
- 圧力の直接測定
- 衝撃波、熱エネルギー、重力質量、距離など

# SZ効果観測の変遷

1980年代以前  
1点の on-off

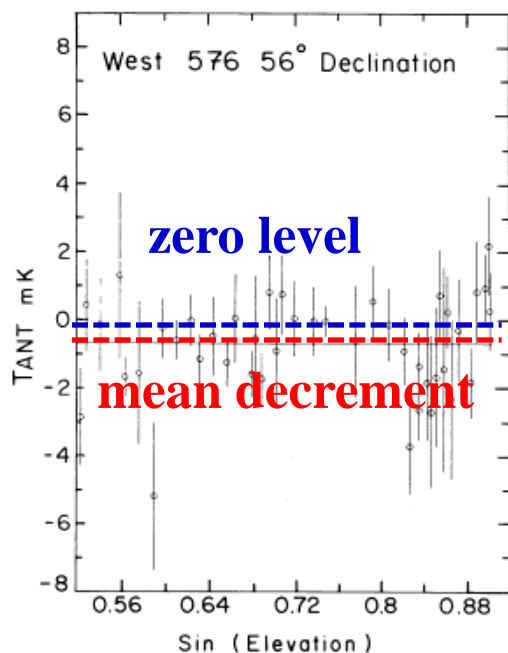
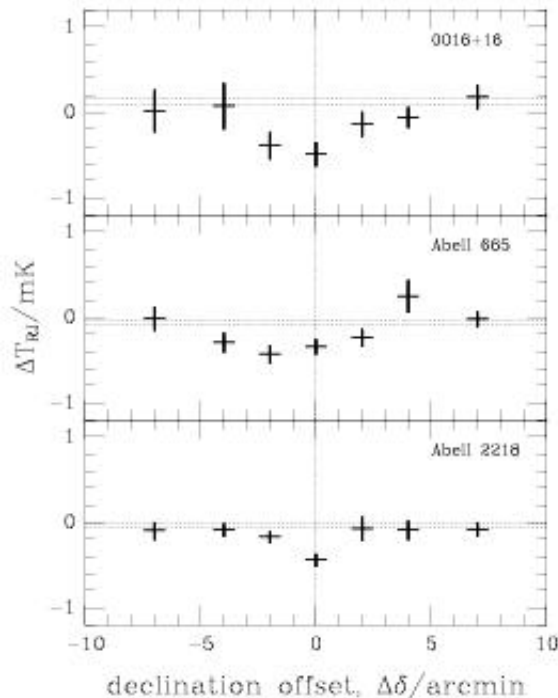


FIG. 7.—Observations of Abell 576. The straight line is the computed mean diminution,  $\Delta T_d$ .

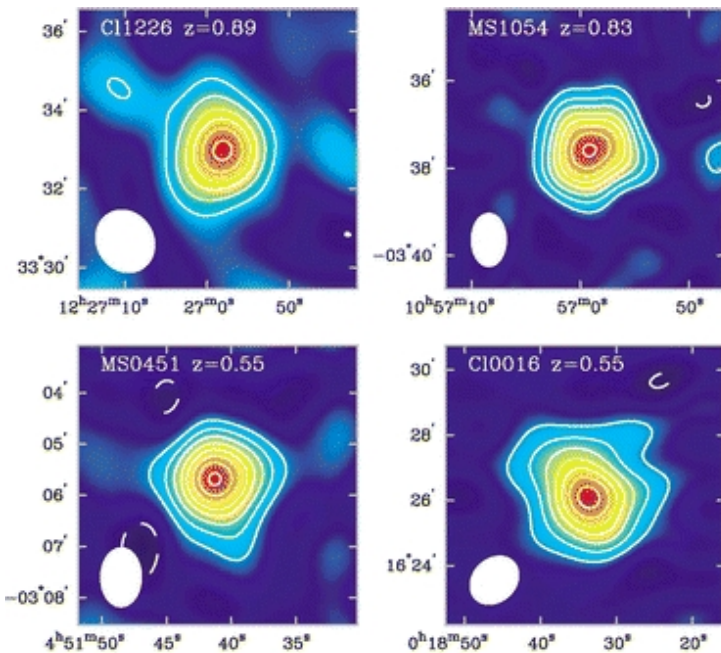
NRAO 11m, 31.4GHz  
観測16個中、検出1個  
(Lake, Partridge 1980)

1990年代  
1次元スキャン



OVRO 40m, 20.3 GHz,  
Single-dish 1.7' FWHM  
(Birkinshaw 1999)

2000年代以降  
2次元マップ



OVRO/BIMA, 28GHz  
45''~3' FWHM  
(Carlstrom et al. 2002)

# 初期のSZ効果観測データ

Abell 2218 external consistency

$\Delta T_{\text{RJ0}}$  (mK)

Reference

- 2.6  $\pm$  1.2  
+ 2.2  $\pm$  1.1  
- 3.04  $\pm$  0.61  
- 4.49  $\pm$  0.80  
+ 0.8  $\pm$  2.4  
- 0.77  $\pm$  0.38  
- 0.48  $\pm$  0.39  
+ 7.8  $\pm$  5.3  
+ 0.21  $\pm$  0.57  
+ 0.46  $\pm$  0.36  
+ 0.40  $\pm$  0.70  
- 3.2  $\pm$  1.1  
- 0.90  $\pm$  0.10  
- 0.88  $\pm$  0.26  
- 0.67  $\pm$  0.08  
- 0.68  $\pm$  0.19

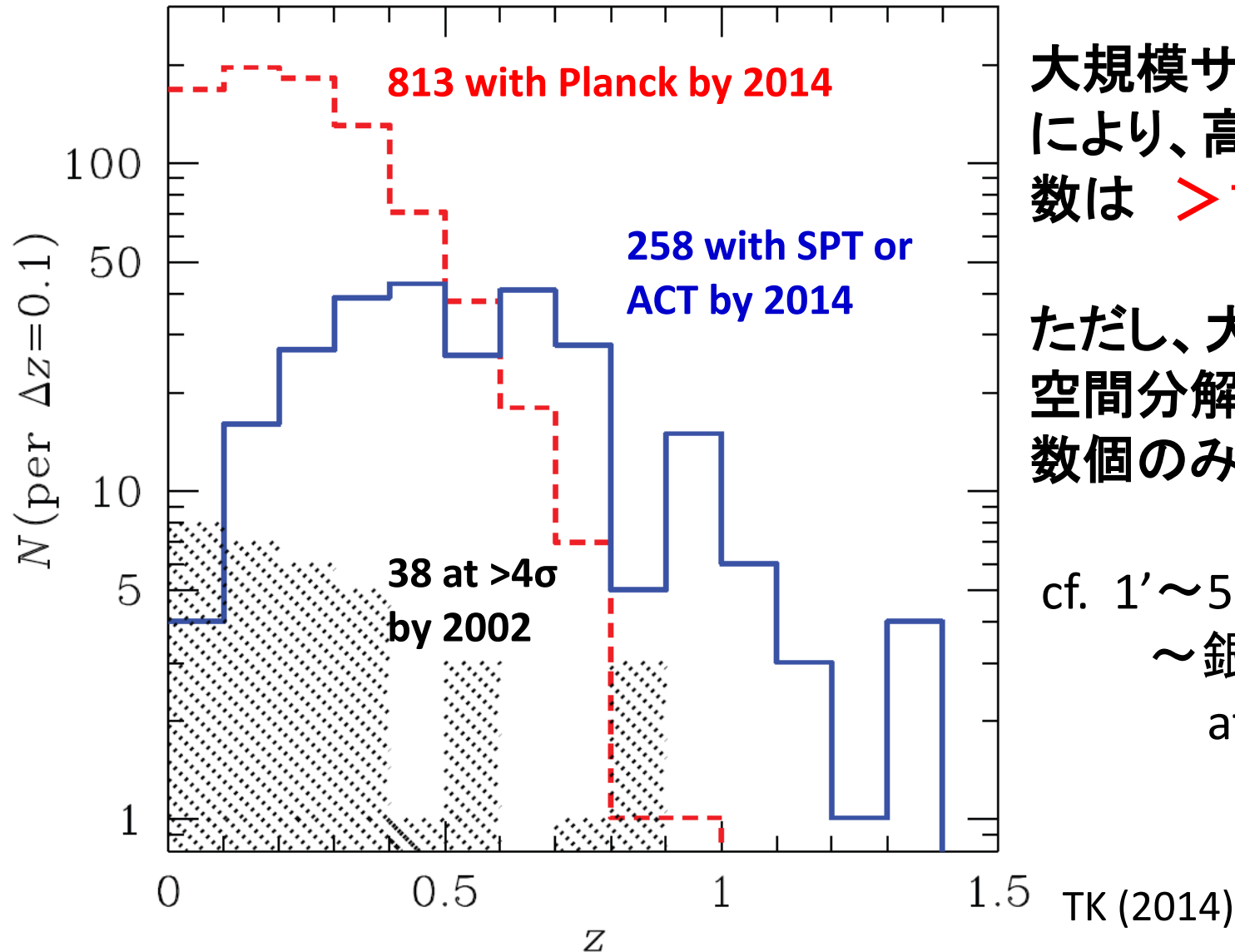
**「同一の」銀河団中心方向  
の測定報告の比較**

**系統誤差(大気、検出器、  
時間変動する電波銀河等)  
の除去が最大の課題**

Perrenod and Lada (1979)  
Lake and Partridge (1980)  
Birkinshaw et al. (1981b)  
Schallwisch (1982)  
Lasenby and Davies (1983)  
Birkinshaw and Gull (1984)  
Uson (1985)  
Radford et al. (1986)  
Radford et al. (1986)  
Radford et al. (1986)  
Partridge et al. (1987)  
Klein et al. (1991)  
Jones (1995)  
Uyaniker et al. (1997)  
Birkinshaw et al. (1998)  
Tsuboi et al. (1998)

Birkinshaw (1999)

# SZ効果観測の現状

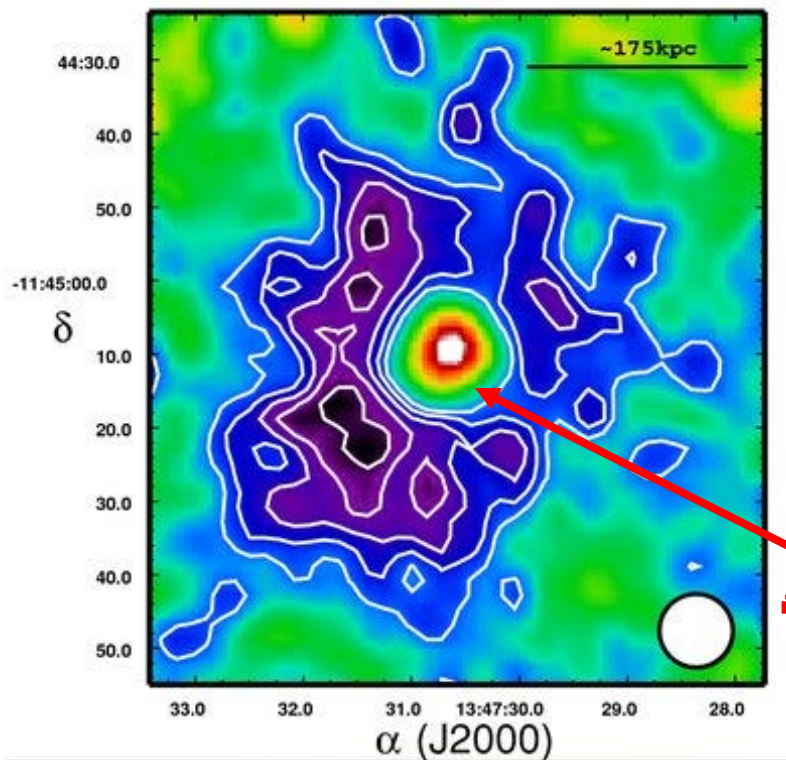


大規模サーベイの台頭により、高信頼度の測定数は  $>1000$ 個に。

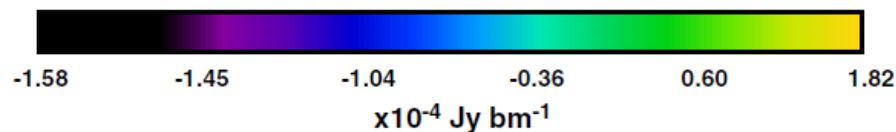
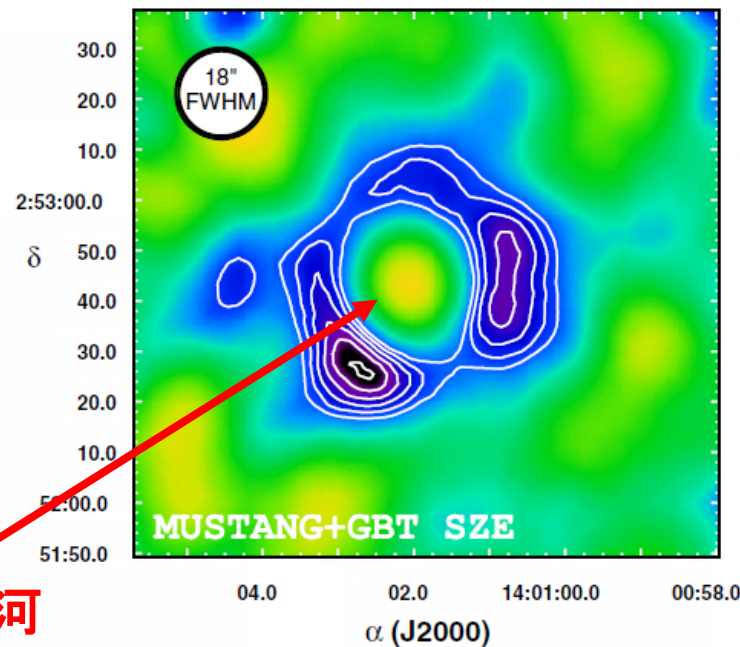
ただし、大半のデータの空間分解能は  $>1'$ 。数個のみ  $10'' \sim 20''$

cf.  $1' \sim 500\text{kpc}$   
~ 銀河団の半径  
at  $z>1$

# 空間分解能の重要性



電波銀河



RXJ1347.5-1145 (Mason+10)

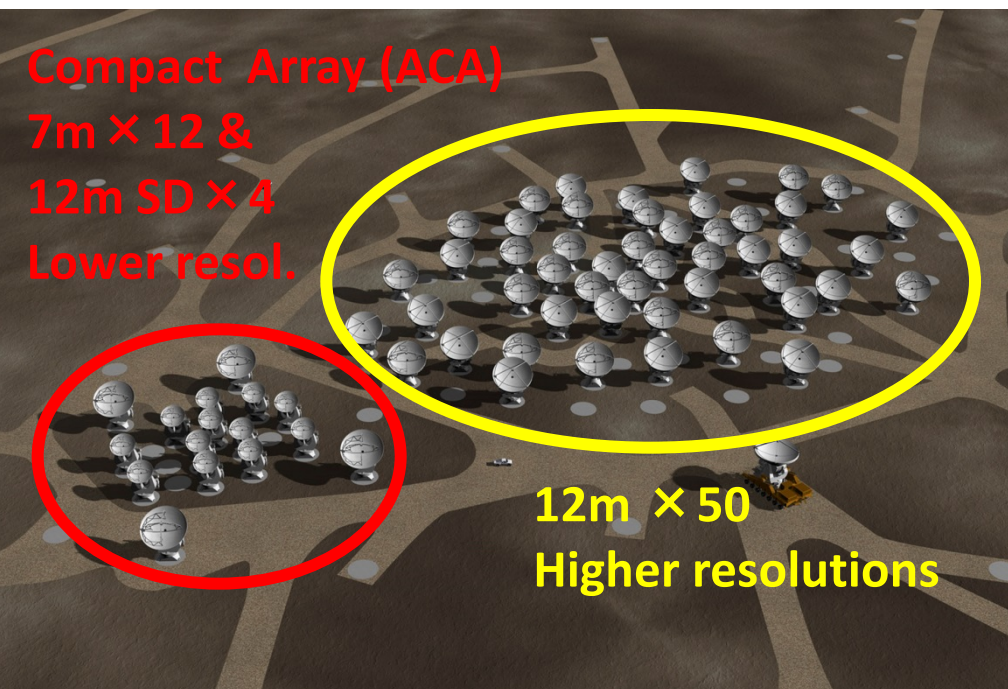
Abell 1835 (Korngut+11)

Green Bank Telescope (直径100m) によるイメージ  
単一鏡による最高分解能 ( $10''$  @ 90GHz) データだが、  
電波銀河等を除去するのは困難 → 干渉計





# ALMAによる干渉計SZ効果観測



Band	$\nu$ [GHz]	resolution["]	FOV["]
(1)	31-45	13-0.1	145-135
(2)	67-90	6.0-0.05	91-68
<b>3</b>	<b>84-116</b>	<b>4.9-0.038</b>	<b>72-52</b>
4	125-163	3.3-0.027	49-37
5	163-211		37-29
6	211-275	2.0-0.016	29-22
7	275-373	1.5-0.012	22-16
8	385-500	1.1-0.009	16-12
9	602-720	0.68-0.006	10-8.5
10	787-950	0.52-0.005	7.7-6.4

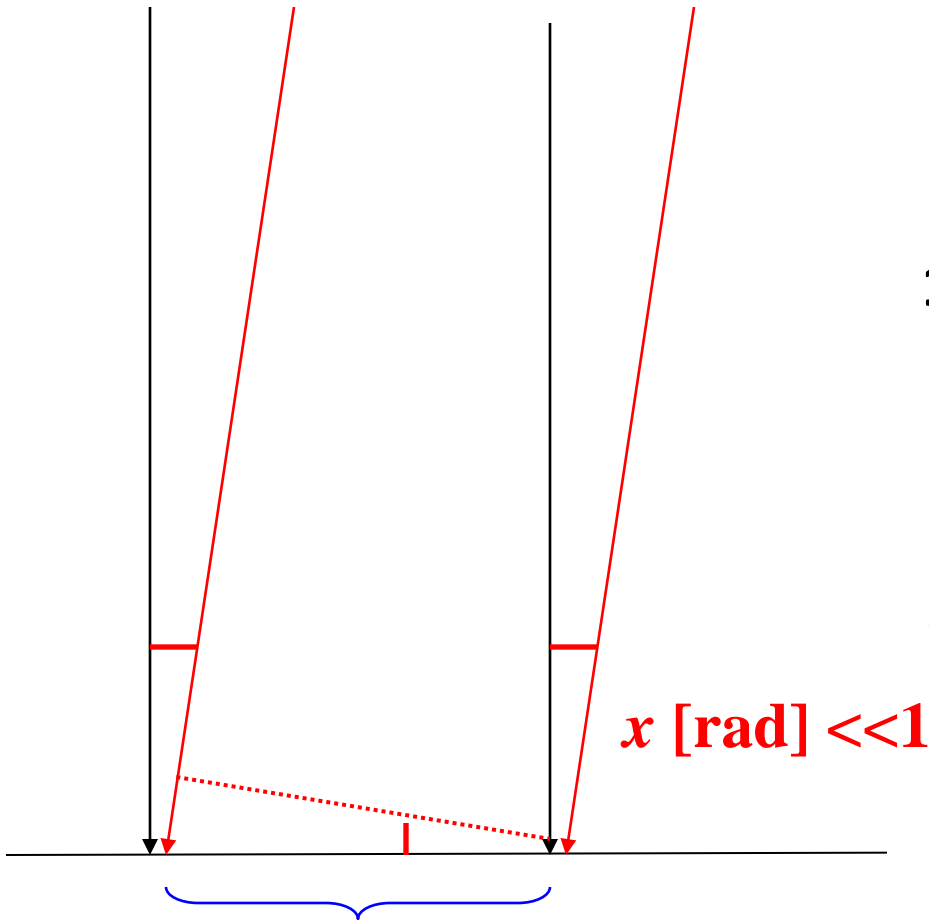
※Bands 1 & 2 は将来。

⇒ 現状は、Band 3 (90GHz帯)  
が最適

長所: 高感度, 系統誤差に強い  
様々なスケールの情報を含む  
汎用望遠鏡 (SZでは珍しい)

短所: 視野小さい  
広がった信号は落ちる

Source 1 Source 2



# Basics of radio interferometers

- 1) Correlated signals among separate telescopes  
→ **reduced systematics**
- 2) Separate source positions  
↔ phase difference

$$\Delta\phi_{12} = 2\pi \frac{b_{\perp}}{\lambda_{\text{obs}}} x$$

空間周波数  $u$

$b/\lambda$  が大きいほど、小さな  $x$  が判別可



# Interferometers measure “Visibility”

2D Fourier transformation of intensity on the sky

$$V(u, v) = \int \int I(x, y) e^{i2\pi(ux+vy)} dx dy$$

空間周波数

$\propto b/\lambda$

天球上での放射強度

干渉計データには、様々な空間スケールの情報が含まれる  
→ 電波銀河と広がったSZ効果を“同時観測”で分離可能

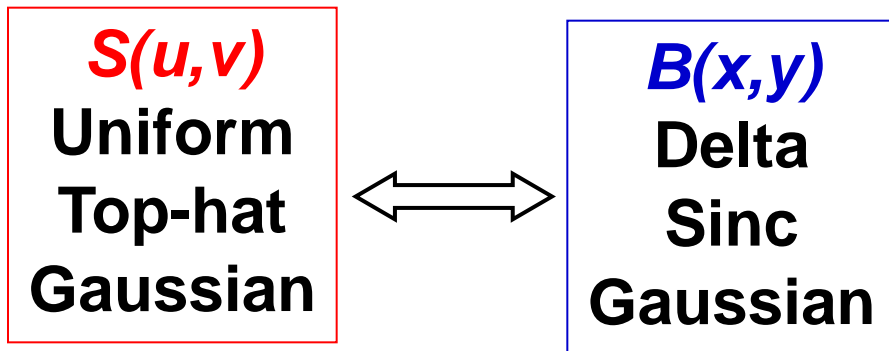
大きな  $b/\lambda$   $\Leftrightarrow$  小さな空間スケール

# Finite sampling

現実の観測では、全(u,v)はカバーできない

$$S(u, v)V(u, v) = \int \int B(x, y) * I(x, y) e^{i2\pi(ux+vy)} dx dy$$

**u-v sampling function**      **dirty beam (PSF)**      **dirty image (convolved)**

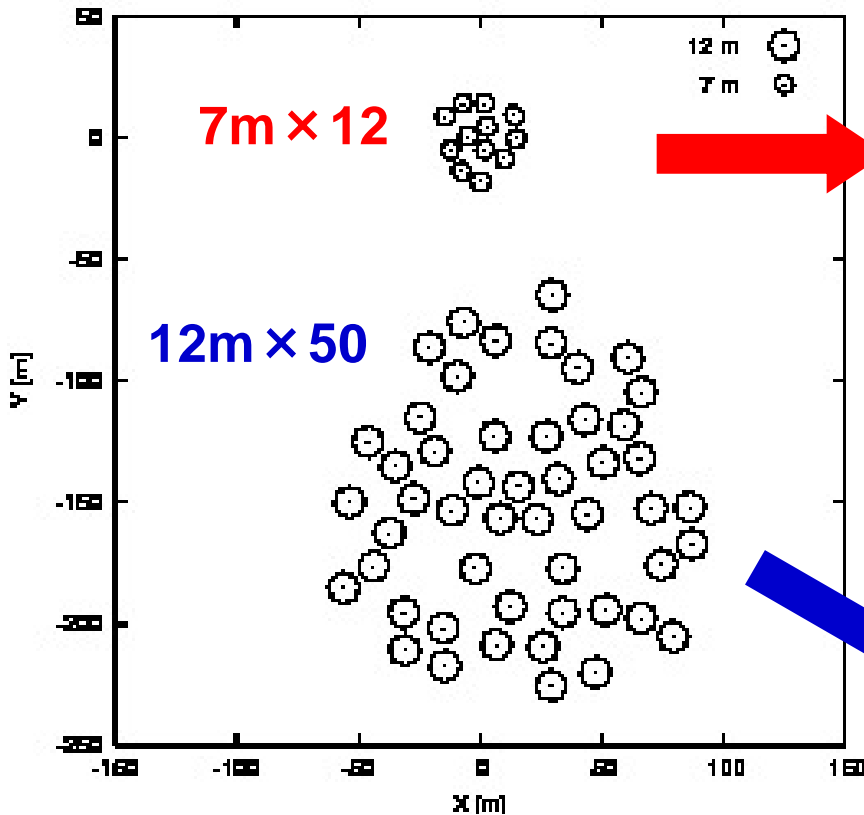


- 1) サンプリング情報から、 $B(x, y)$ は正確にわかる。
- 2) 通常、 $B(x, y)$ を **deconvolve** し、ガウシアンで convolve した  $I(x, y)$  をイメージとして示す。  
i.e. サンプリング欠落を補う外挿 (e.g. CLEAN)処理  
⇒ **missing flux** が存在

# u-v coverage of ALMA

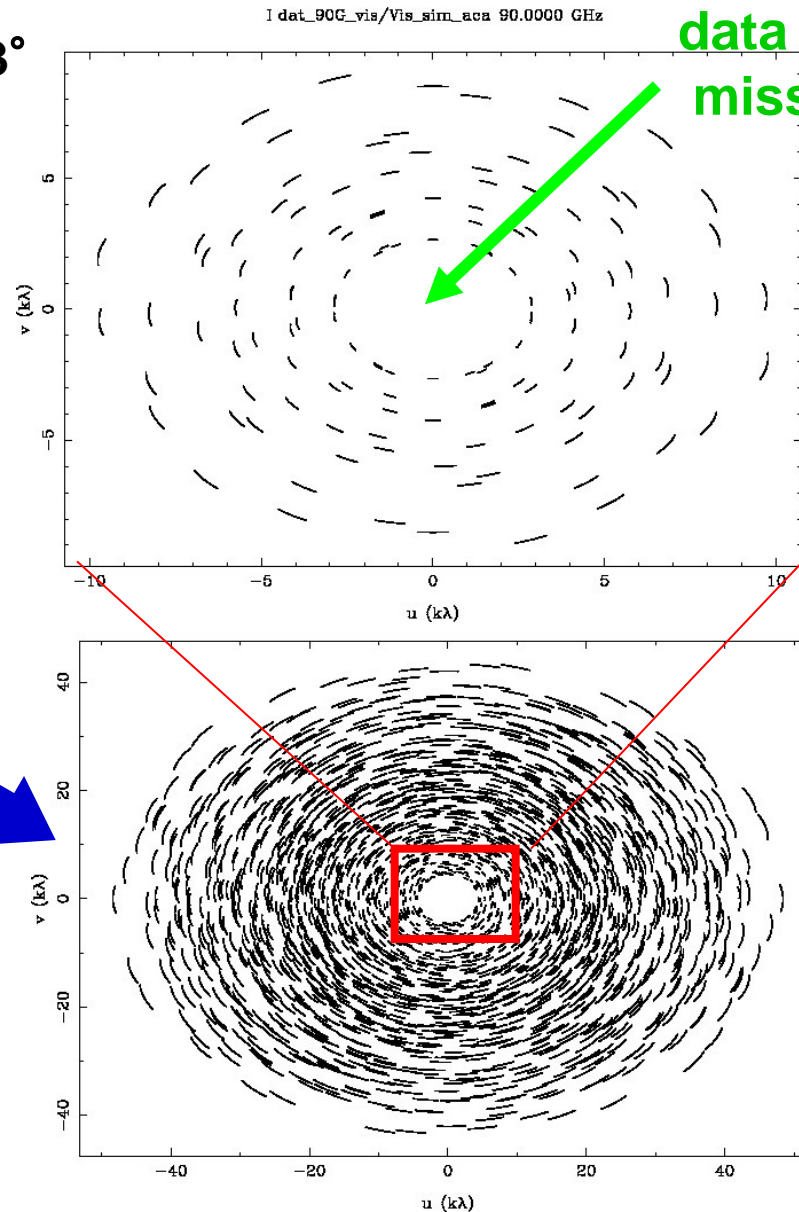
Lack of zero-spacing data leads to missing flux

Dec =  $-23^\circ$   
1 hr



Compact configuration

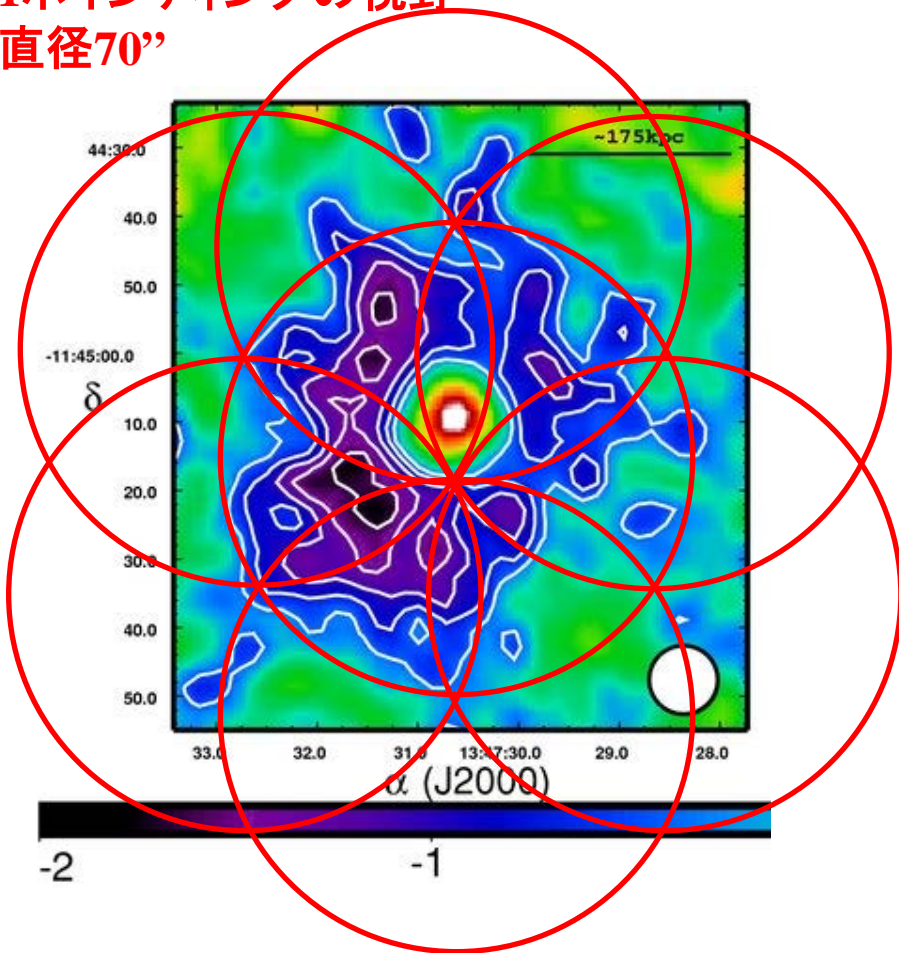
# of baselines =  $N(N-1)/2$



# ALMAによるSZ効果の初検出

(Kitayama et al. 2016, arXiv: 1607.08833)

1ポインティングの視野  
直径70''



単一鏡 (GBT) によるイメージ  
(Mason+2010)

Target: RX J1347.5-1145 @z=0.45  
(strongest SZE & compact)

Band 3 (84-100 GHz)

7 mosaics for both 12m and 7m

Baselines: 8.9-348.5m (compact)

=2.1 k $\lambda$  ~ 116 k $\lambda$

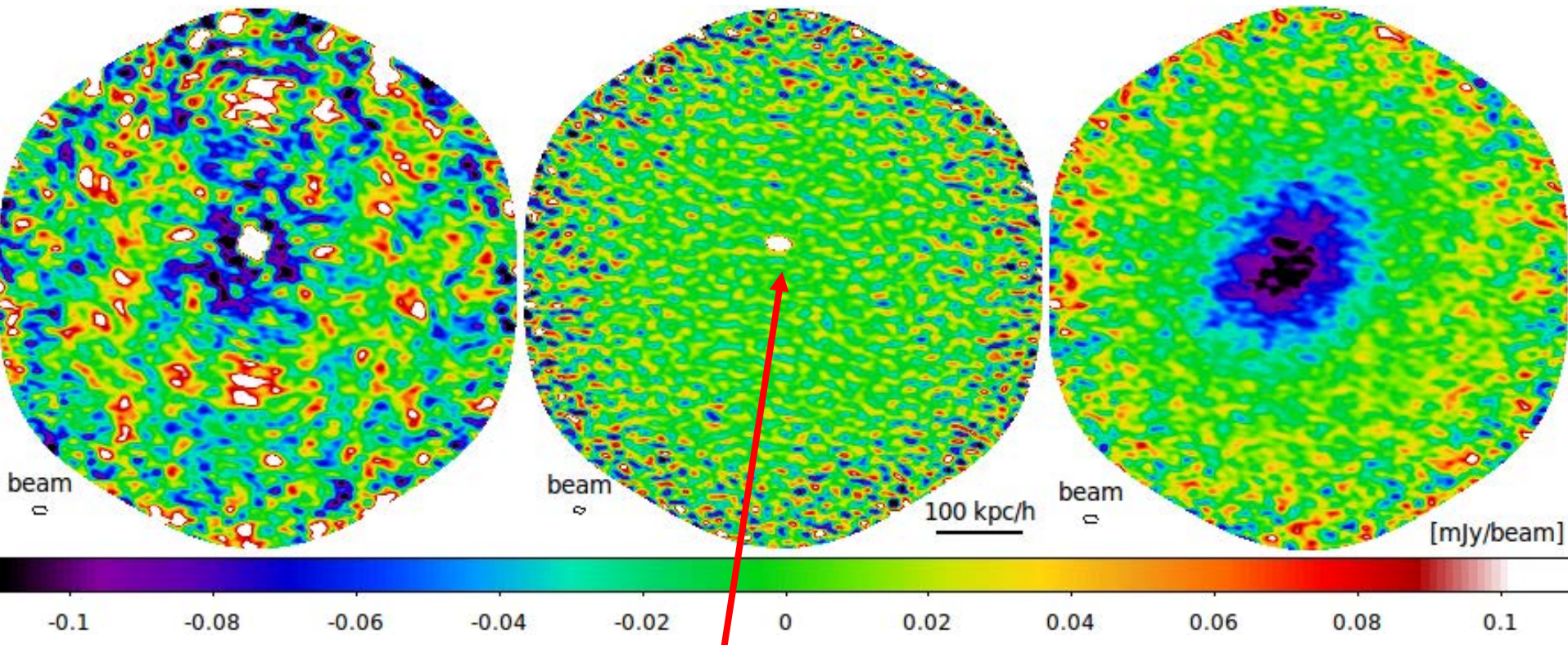
→  $\lambda/b = 2'' \sim 70''$  (目安)

Total on-source time:

2.6hr (12m) + 5.6hr (7m)

2014/8/16 ~ 2015/1/4

# ALMA images of RX J1347-1145 at $z=0.45$



**生データ**

(dirty map)

92GHz

7 pointings

12m+7m arrays

**ポイントソース**

長基線のみ

( $uv > 30 \text{ k}\lambda$ , CLEAN後)

$4.06 \pm 0.03 \pm 0.25 \text{ mJy}$

@92GHz (limited by calibration)

**SZ効果**

(ソース除去、  
& CLEAN後)

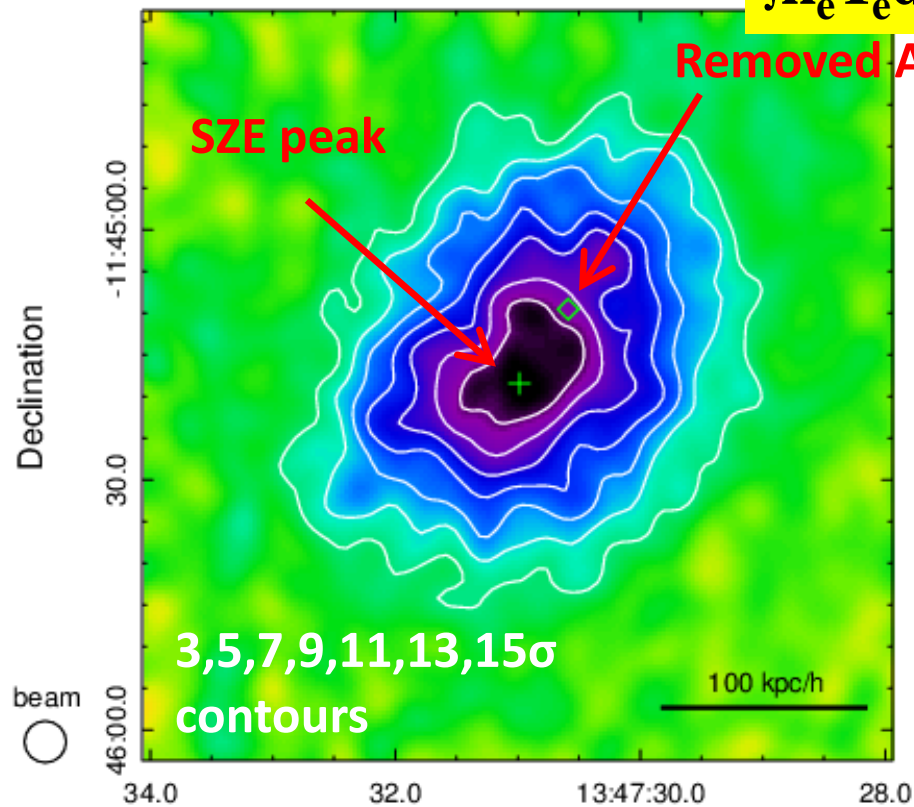
$1\sigma = 12 \text{ uJy/beam}$

beam =  $4.1'' \times 2.4''$

# ALMA SZ vs. Chandra X線

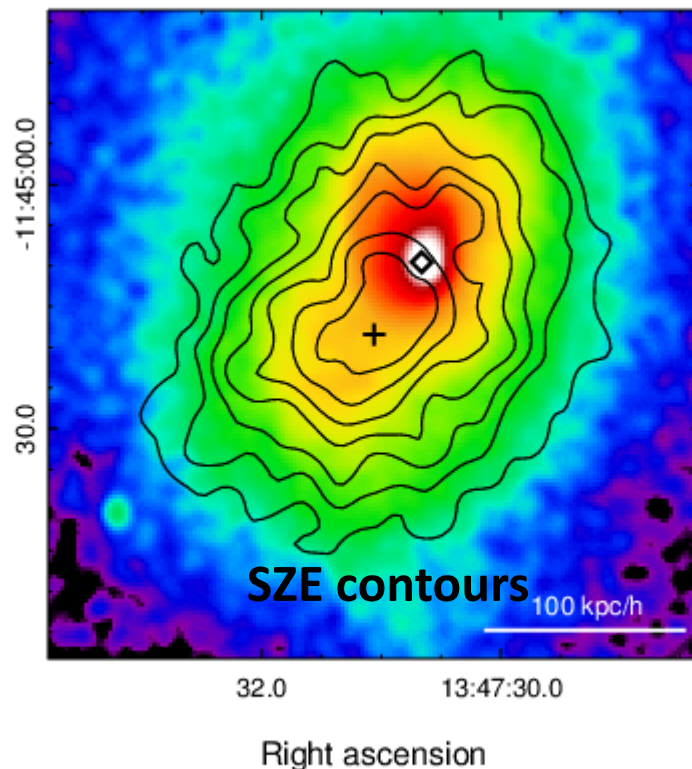
ALMA 92GHz

$$\int n_e T_e dl$$



$$\int n_e^2 dl$$

(a) X-ray surface brightness

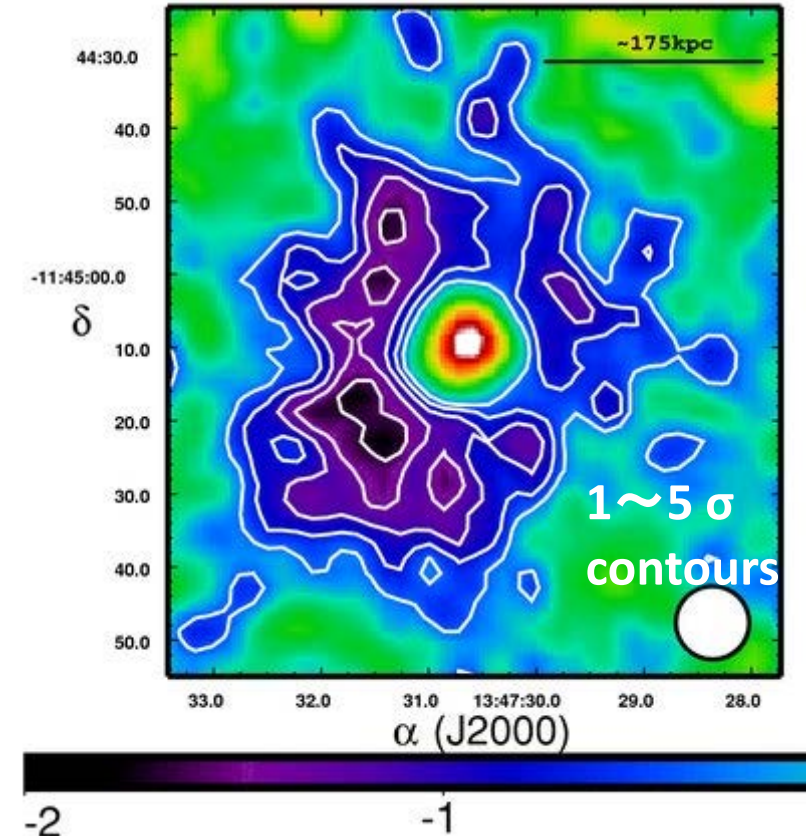
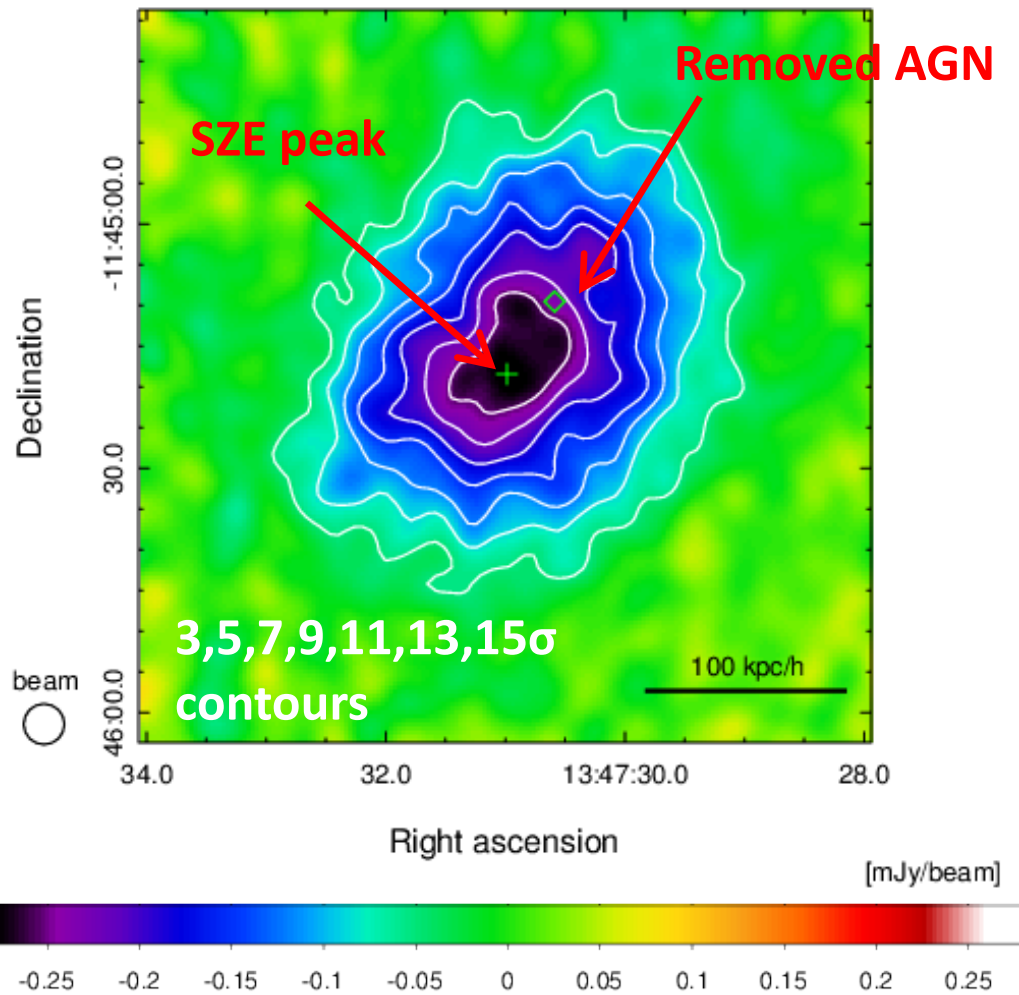


5" FWHM

>15 $\sigma$  で SZ効果検出 & X線とのピークのずれ 11"=60kpc (クールコアの外側)



# 100m 単一鏡データとの比較



ALMA 92GHz image

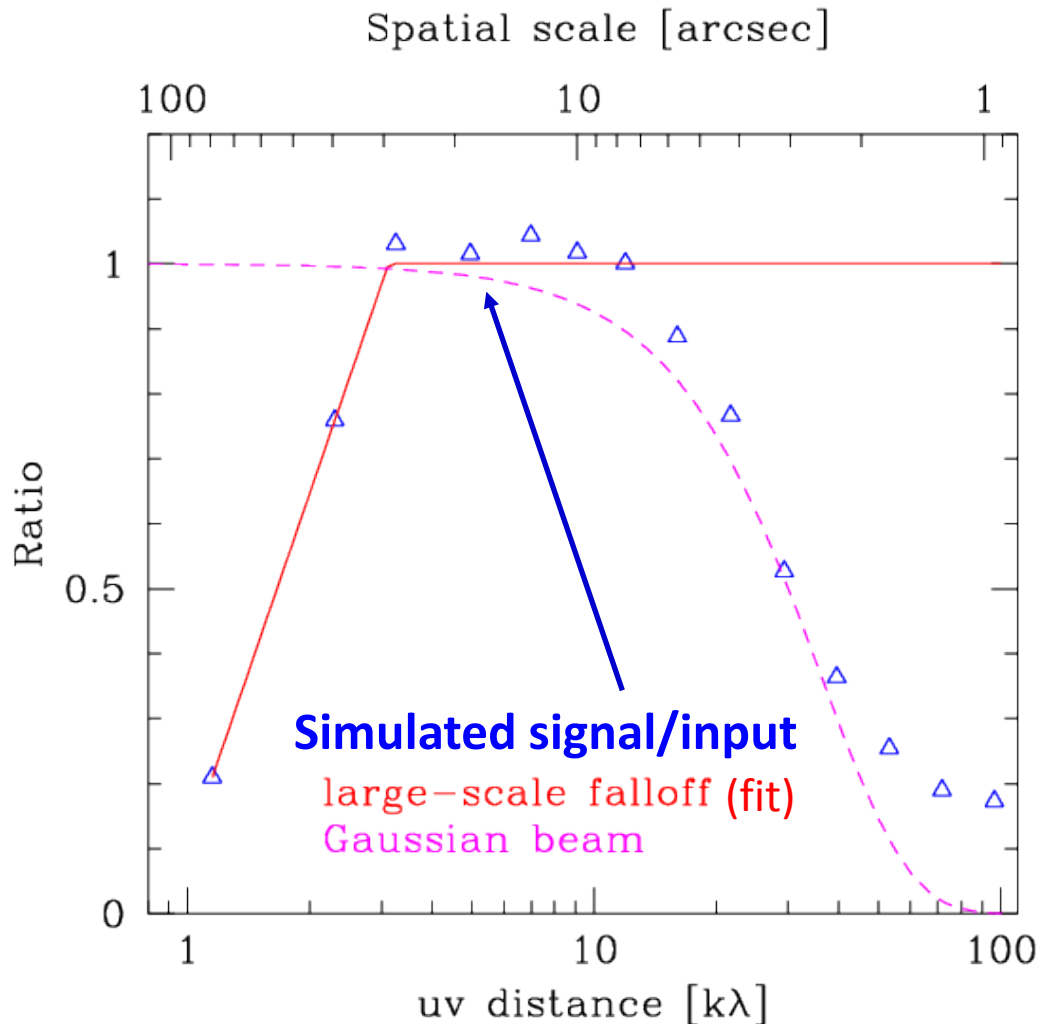
5" FWHM

解像度2倍、感度10倍(同一解像度において)

MUSTANG 90GHz image  
(Mason et al. 2010)

10" FWHM

# Missing flux ?



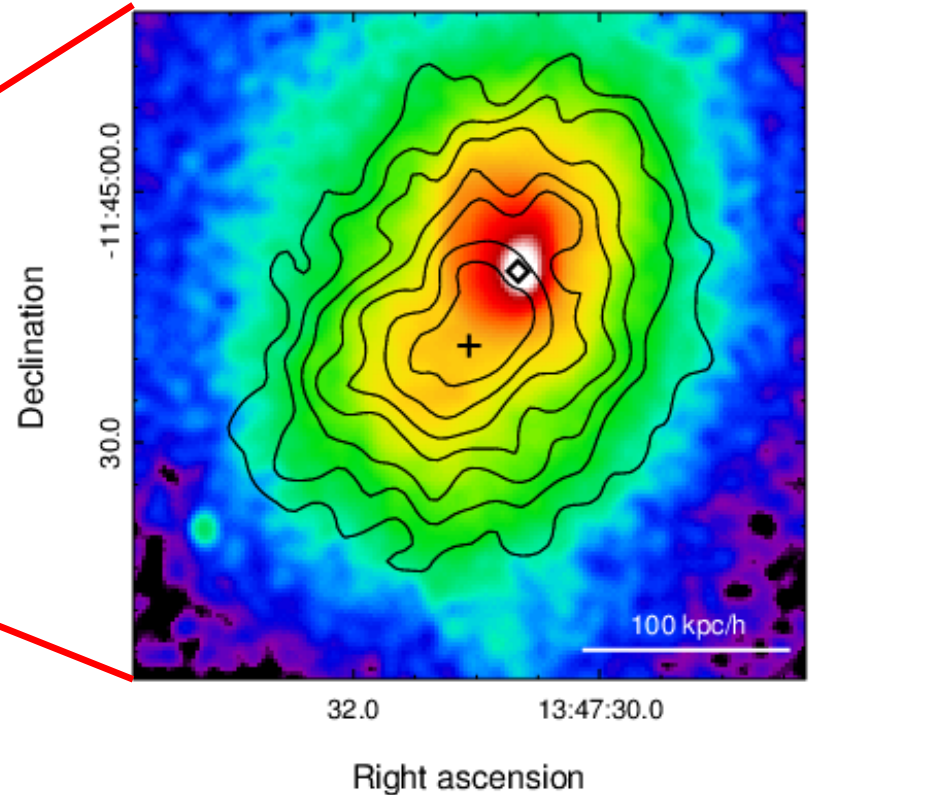
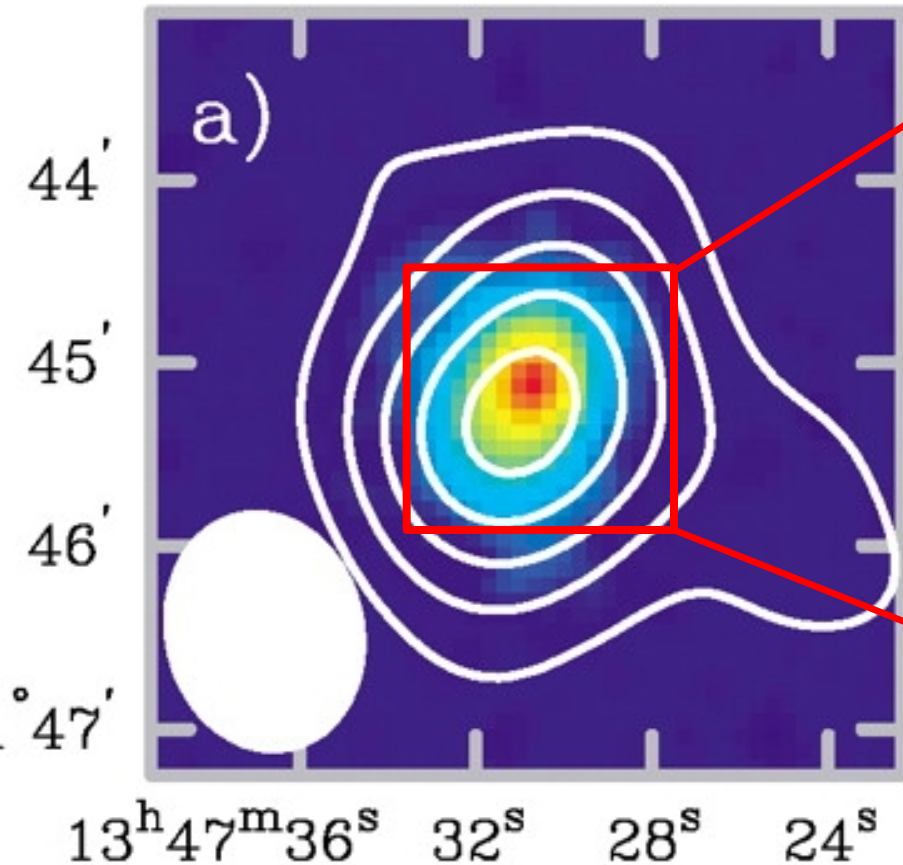
観測条件、サンプリングを考慮したシミュレーションで評価

信頼できる空間スケール:  
5" ~ 40"  
(20 kpc/h ~ 160 kpc/h)

それ以上では missing flux  
それ以下では 空間分解能  
が制約

# 高分解能観測の意義

(a) X-ray surface brightness



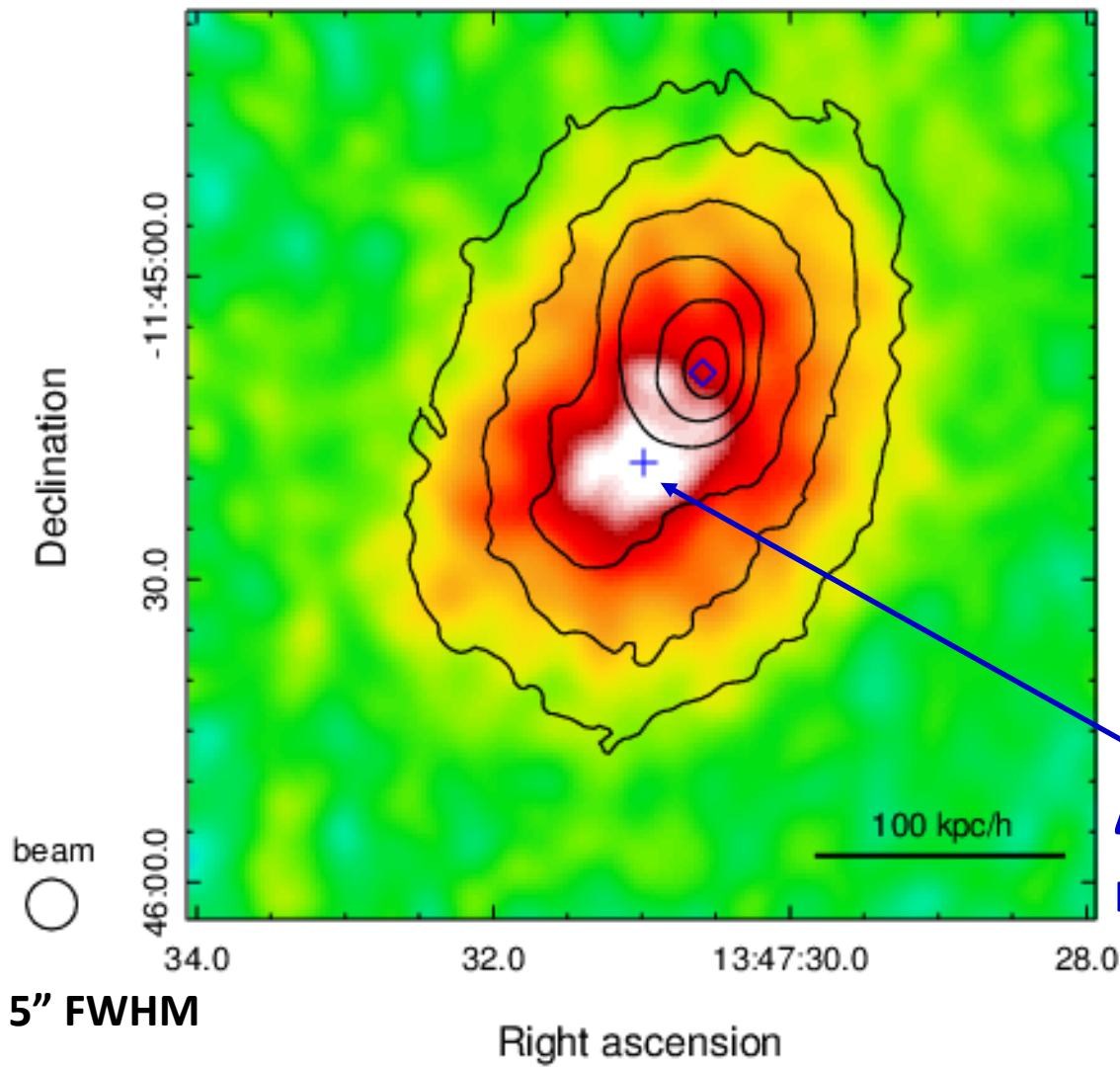
Color: X-ray 0.5-2 keV ROSAT  
Contours: SZE 30GHz, OVRO/BIMA  
(Carlstrom et al. 2002)

**FWHM $\sim$ 70", 十分緩和している  
と考えられていた**

Color: X-ray 0.4-7 keV Chandra  
Contours: SZE, 92 GHz, ALMA  
(TK et al. 2016)

**FWHM=5" 激しい衝突の証拠**

# Compton y-parameter of RX J1347



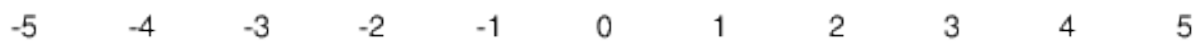
y-parameter map  
& X-ray brightness  
contours

$$y = \int \sigma_T n_e \frac{k_B T_e}{m_e c^2} dl$$

$\Delta y_{\text{peak}} = (5.9 \pm 0.4 \pm 0.8) \times 10^{-4}$   
relative to  $r=40''$  (230kpc)

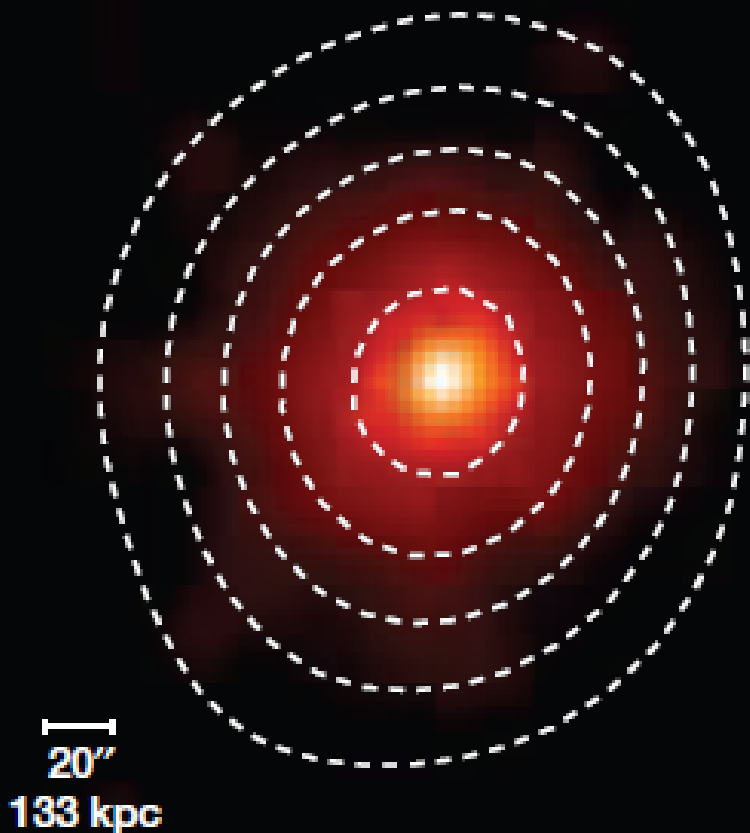
5" FWHM

[10<sup>-4</sup>]



# 次の例 : Phoenix cluster

**b** Color: X-rays (Chandra)  
Contours: SZ (SPT),  $\sim 1'$  FWHM



SPT-CL J2344-4243 at  $z=0.60$

- SZ サーベイ(SPT)で発見  
分解能  $1'$  では対称性良い
- 全銀河団中でX線光度最大  
& 唯一の cooling flow 候補
- 中心銀河で激しい星形成  
SFR  $\sim 700 M_{\text{sun}}/\text{yr}$   
dusty starburst  
type 2 QSO

McDonald et al. (2012)

# 宇宙論的展望

- (1) CMB温度の時間変化
- (2) 距離測定
- (3) 銀河団質量関数

# (1) CMB温度 の時間変化

$$\frac{\Delta T_{SZ}}{T_{CMB}} = \left( x \coth \frac{x}{2} - 4 \right) y$$

$$x = \frac{h_p \nu}{k_B T_{CMB}}$$

複数の周波数(x)で  
同一の銀河団(y, z)  
の  $\Delta T/T_{CMB}$  測定

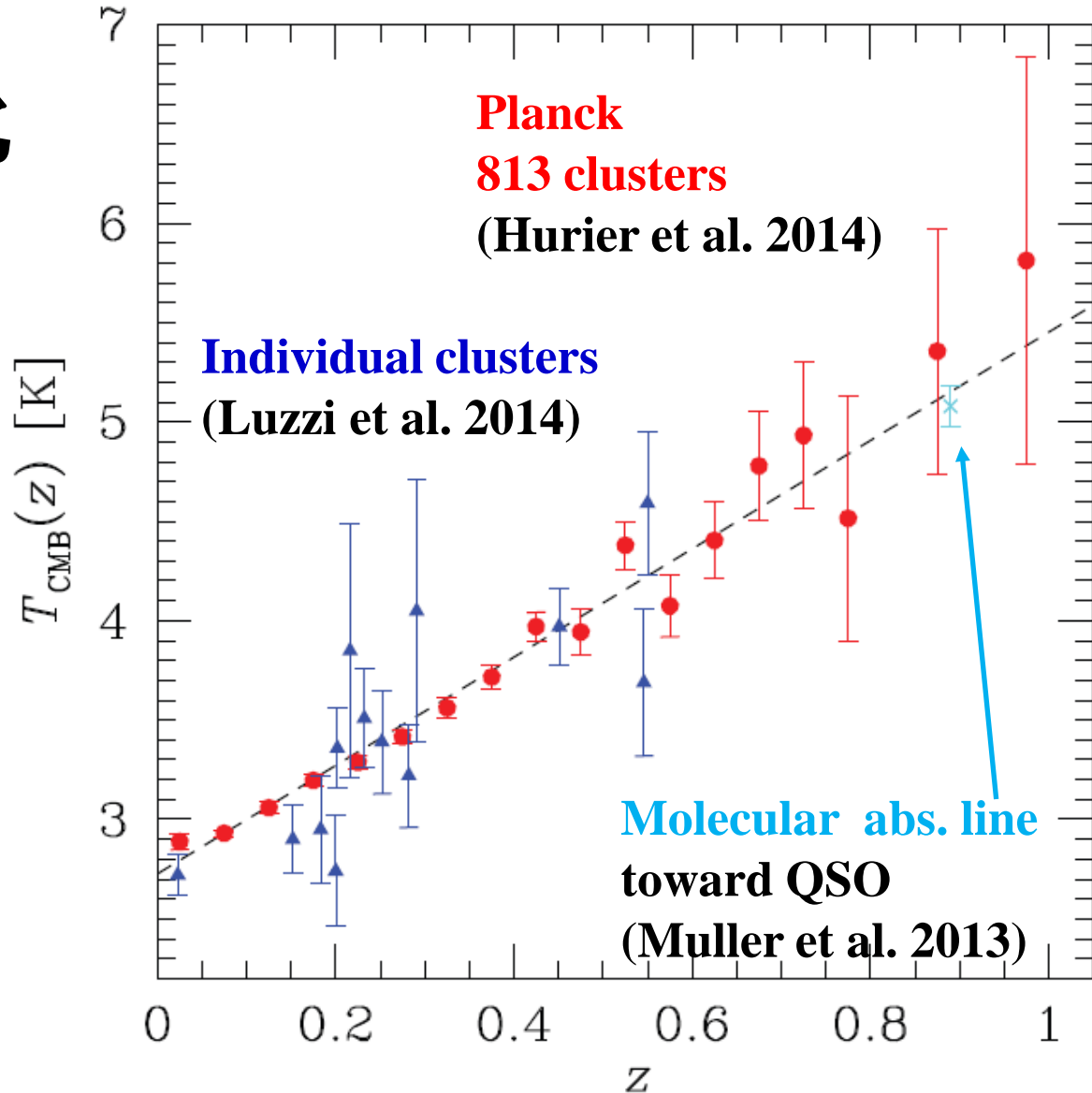


標準宇宙論の予言

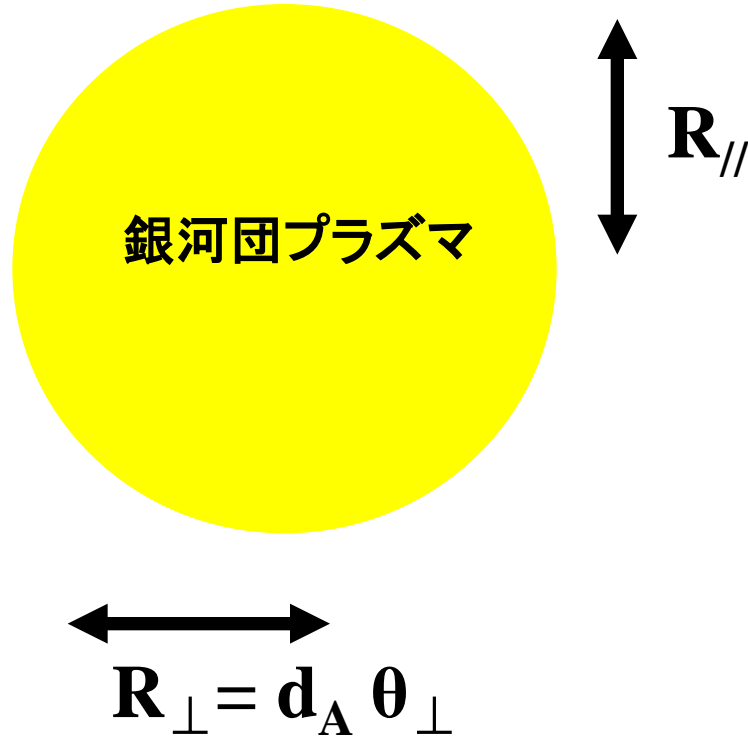
$$T_{CMB}(z) \propto (1+z)$$

の直接検証

(現状は、低空間分解能データのみ)



## (2) 距離測定: 原理 (Cavaliere+ 1977; Silk & White 1978)



同一の熱的プラズマからの放射

- $I_{SZ} \propto n T R_{//}$
- $I_X \propto n^2 \Lambda(T) R_{//}$
- $R_{//} = R_{\perp} = d_A \theta_{\perp}$  (仮定)

$$H_0 \propto \frac{1}{d_A} \propto \frac{I_X \theta_{\perp} T}{I_{SZ}^2 \Lambda(T)}$$

「球対称」は、多数の銀河団で統計的に実現。

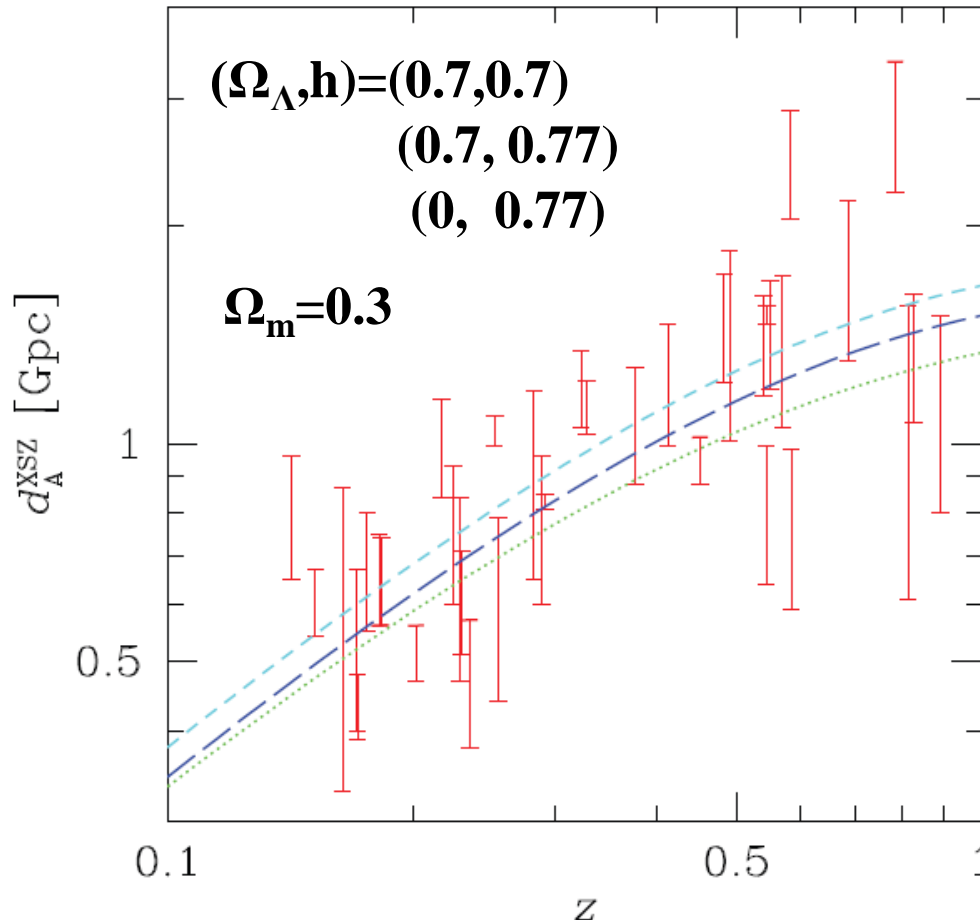
原理が完全にわかっている

希少な距離指標





## (2) 距離測定：宇宙論パラメータ



Chandra X-ray + SZ, 38 clusters

$$H_0 = 76.9^{+3.9}_{-3.4} {}^{+10.0}_{-8.0} \text{ km/s/Mpc}$$

(Bonamente et al. 2006)

cf. Planck CMB:

$$H_0 = 67.8 \pm 0.9 \text{ km/s/Mpc}$$

(Planck collaboration 2016)

cf. Local SN Ia & Cepheid

(距離はしご)

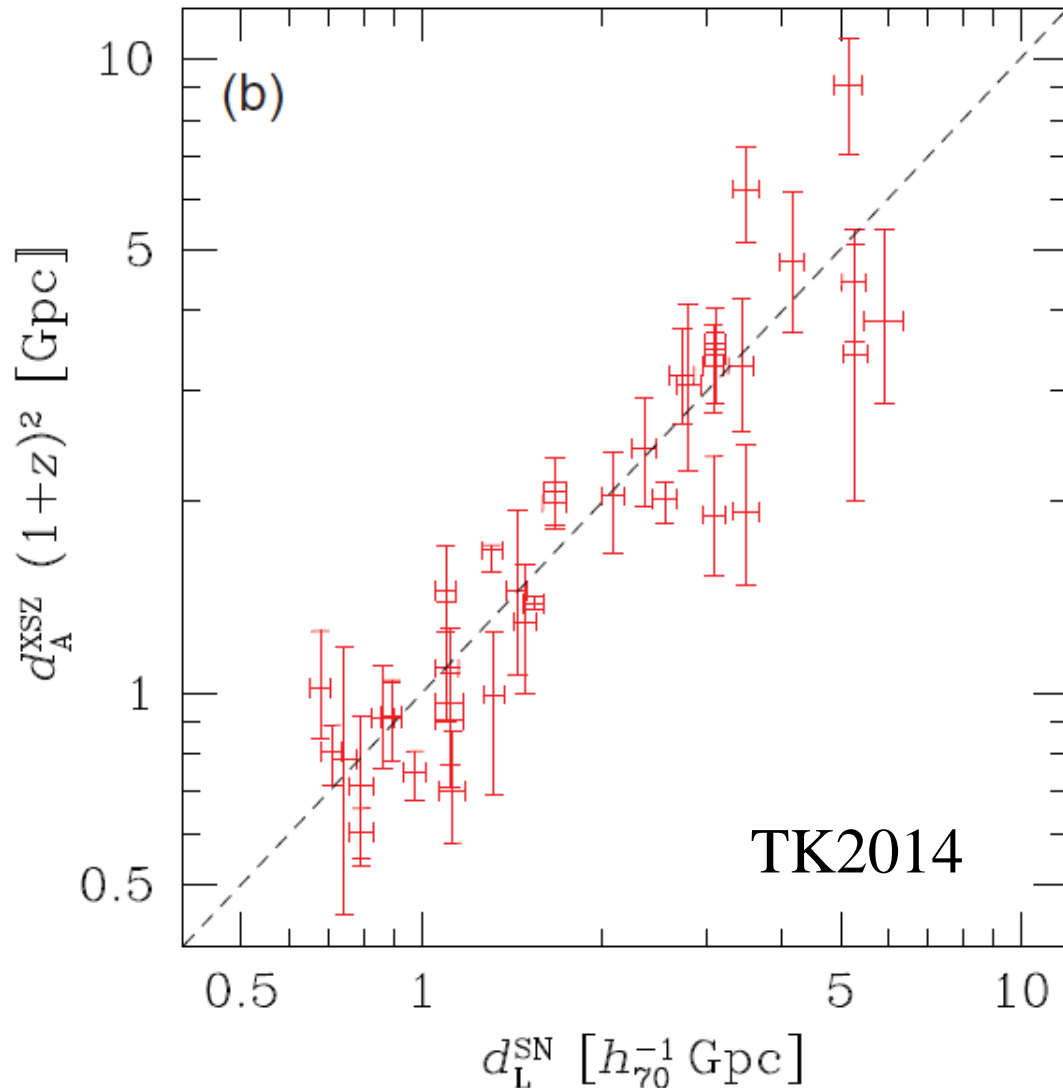
$$H_0 = 73.24 \pm 1.74 \text{ km/s/Mpc}$$

(Riess et al. 2016)

Tension?

→ 独立な測定を提供可能。  
ただし、系統誤差(温度・  
密度ゆらぎ、電波銀河等)  
の除去が本質的

## (2) 距離測定 : distance duality relation

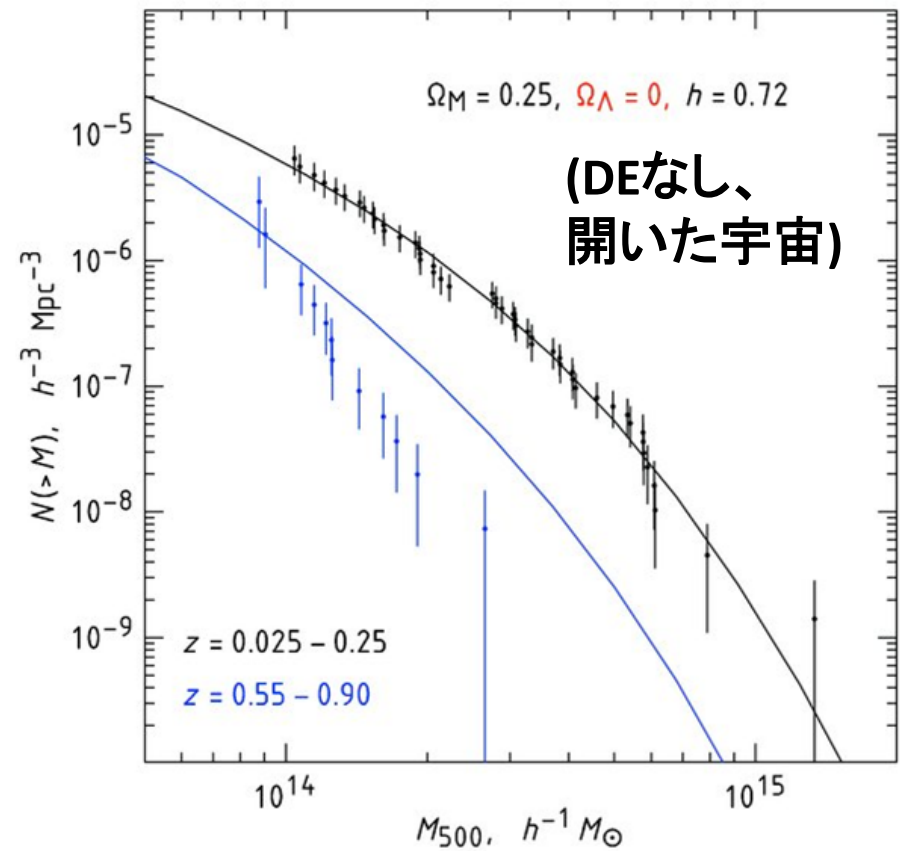
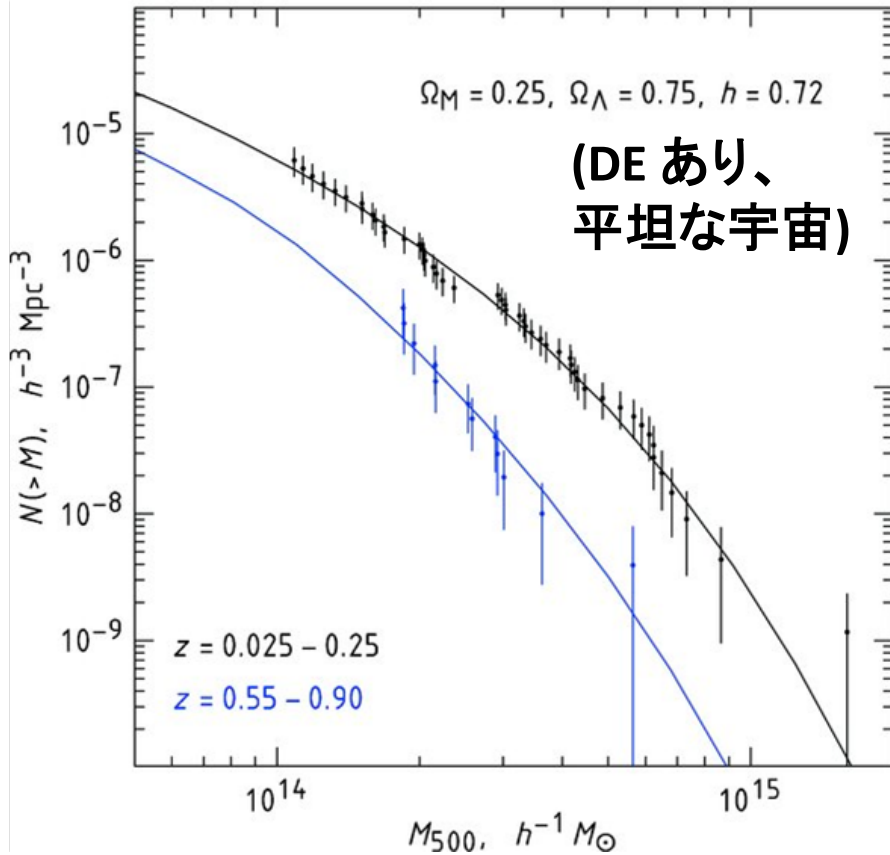


1) SZ+X  $\rightarrow$   $d_A$  (absolute)  
38 clusters  
at  $0.14 < z < 0.89$   
(Bonamente et al. 2006)

2) SNIa  $\rightarrow$   $d_L$  (relative)  
Union2.1 580 total  
(Suzuki et al. 2012)  
 $\sim 10$  SNIa per cluster  
within  $\Delta z/z < 0.03$

標準宇宙論の予言  
 $d_L = d_A (1+z)^2$   
の直接検証にもなる

### (3) 銀河団質量関数: X線データ



Vikhlinin et al. (2009)

ROSAT selected & Chandra follow-up

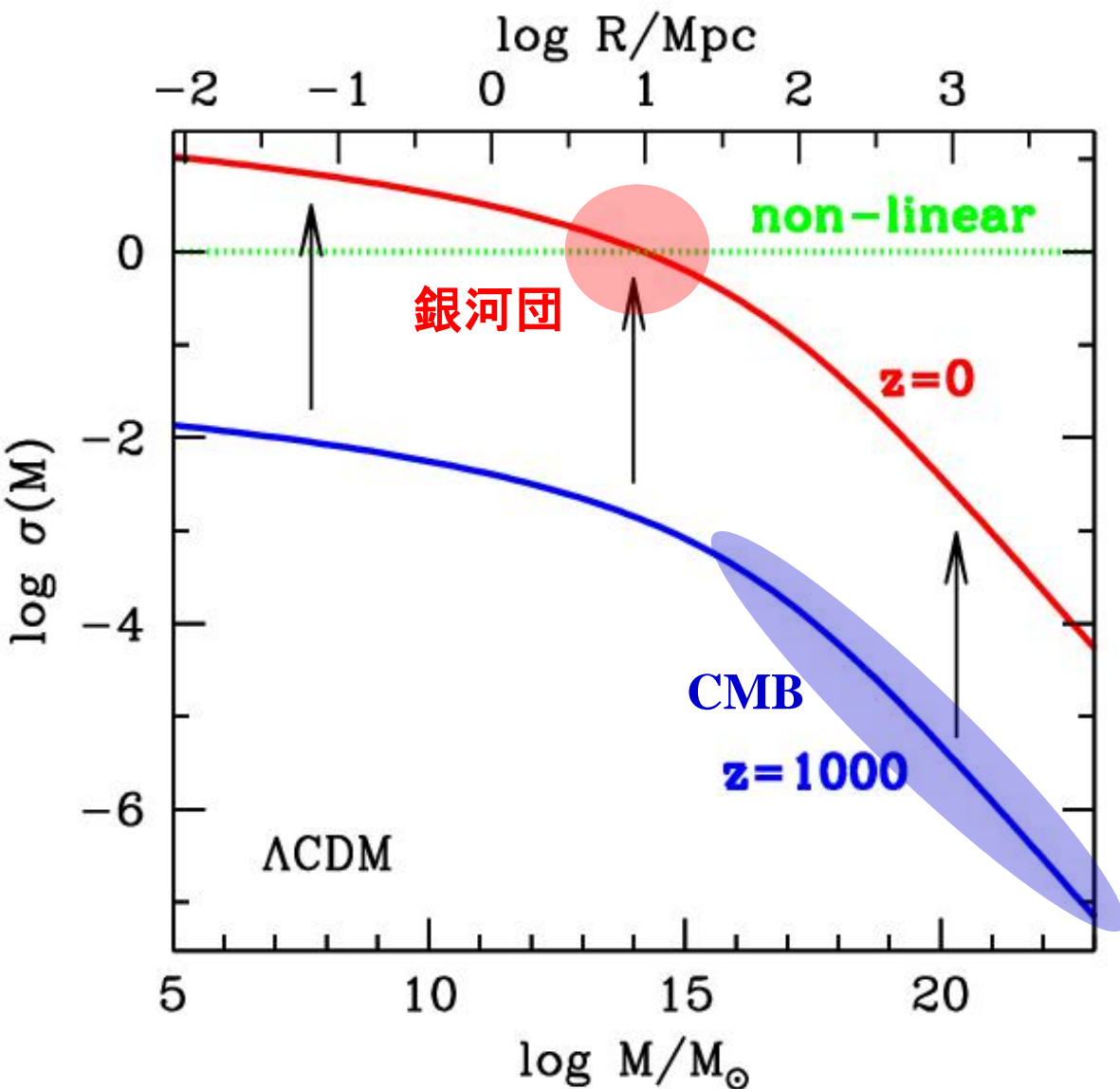
49 clusters with  $\langle z \rangle \sim 0.05$

37 clusters with  $\langle z \rangle \sim 0.55$

model: Tinker et al. (2008)

単位共動体積あたり数密度の絶対値  
第一原理的に予言可能  
& X線では分解能向上により急進展  
→ ダークエネルギー等の宇宙論的情報  
 $z > 1$  への拡張が重要 → SZ

# 宇宙の構造形成と銀河団



密度ゆらぎの2乗平均値

$$\sigma^2(R, t) = \langle |\delta(< R, t)|^2 \rangle$$

$$\sim D^2(t) \int_0^{1/R} P(k) d^3k$$

↑ growth rate ( $\Omega_M, \Omega_\Lambda, \dots$ )    ↑ Power spectrum (DM,  $n, \dots$ )

※ニュートリノ:  
free-streaming により、  
小スケールのゆらぎ  
成長を抑制

### (3) 質量関数: ニュートリノ質量への制限

非相対論的になる時期:

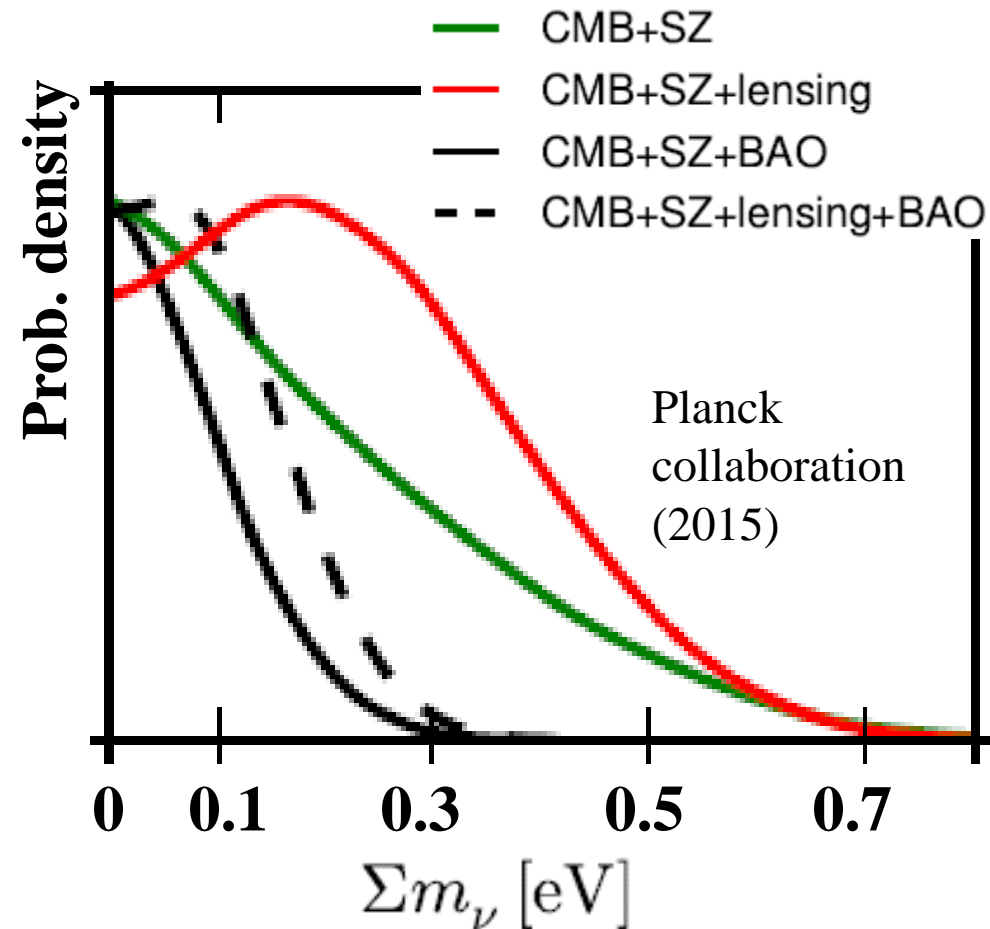
$$z_\nu \sim 200 \left( \frac{m_\nu}{0.1 \text{eV}} \right)$$

Free-streaming scale (comoving):

$$l_\nu \sim 600 \text{ Mpc} \left( \frac{m_\nu}{0.1 \text{eV}} \right)^{-1}$$

宇宙の平均密度への寄与:

$$\Omega_\nu h^2 \sim 10^{-3} \left( \frac{m_\nu}{0.1 \text{eV}} \right)$$



現状のCMB+銀河団(&重力レンズ)データは、振動実験による最小質量( $\sim 0.05$  eV)よりも大きな  $m_\nu$  (強い free streaming = 遅いゆらぎ成長 = 大質量の銀河団数が少ない)を許容。銀河団質量の過小評価など系統誤差の排除が課題。

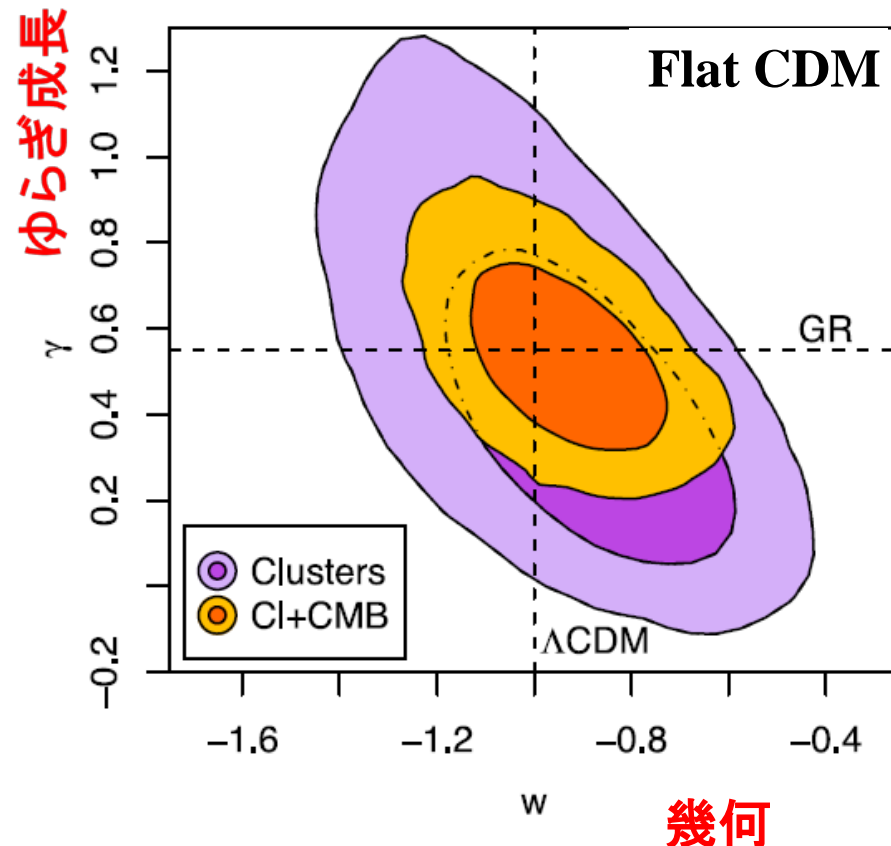
### (3) 質量関数: 重力理論への制限

既存データ(X-ray sample at  $z < 0.5$  & WMAP)による制限 (Mantz+15)

線型ゆらぎ成長率の一般化  
(Linder & Cahn 2007)

$$\frac{d \ln \delta}{d \ln a} = \Omega_M(a) \gamma$$

$\gamma=0.55$ : GR,  $\Lambda$ CDM,  $w=-1$   
(1%以下の誤差)  
 $0.57$ : GR,  $w$ CDM,  $w=-1/3$   
 $0.68$ : DGP (braneworld) gravity  
 $z$ , スケールに依存:  $f(R)$  gravity



幾何学的情報(距離、膨張率)とは独立な制限  
加速膨張開始期( $z \sim 1$ )をまたぐデータが重要

# まとめ

- **Sunyaev-Zel'dovich (SZ)効果**: 代表的なCMB2次異方性、遠方宇宙における構造形成の有力な観測手段。  
系統誤差の除去が最大の課題。
- ALMA (90GHz 帯)を用いて、**空間分解能 5秒角 (20 kpc/h @  $z=0.5$ )** のSZ 効果測定に初めて成功
  - 電波銀河等の混入を排除した初の高精度SZ効果マップ  
ただし、信頼できる空間スケールは40秒角まで
  - ALMA 40GHz帯(開発中) and/or 単一鏡との組み合わせ
- 宇宙論的展望
  - CMB温度の時間変化、距離測定、銀河団質量関数など  
による標準宇宙論・ニュートリノ質量・重力理論の検証