

# サブミリ波で銀河団をみる：観測的宇宙論の新しい窓

須藤 靖

< 東京大学理学部物理学教室・初期宇宙研究センター 〒 113-0033 東京都文京区 本郷 7-3-1 >

e-mail: suto@phys.s.u-tokyo.ac.jp

我々は最近、いくつかの偶然に恵まれて、ハワイのマウナケア山頂の望遠鏡を用いて、銀河団のサブミリ波での輝度分布を世界で初めて検出することに成功した。これは、スニャーエフ・ゼルドヴィッチ効果と呼ばれる現象のサブミリ波領域での観測可能性を明らかにしただけではなく、銀河団の多波長観測という、観測的宇宙論における新たな手法を確立する上での大きな一歩であると考えている。ここでは、この観測に関してはほとんど素人同然の集団であった我々が、幸運にも観測に成功するまでの経緯を紹介してみたい。

## 1 序

宇宙論は、ある部分では観測と理論の境界があいまいになりつつある。例えば観測的宇宙論という言葉がある。これは観測と理論という観点からの分類ではなく、観測事実をもとにして宇宙論を展開するボトムアップ的な手法に基づく研究を指すものであり、それさえ満たしていれば観測であろうと理論であろうとこの範疇に入る。実際、観測的宇宙論の研究では、理論家が観測を行ったり、観測家が詳細な理論的解析をしたりすることも多くなっている。以前は、何か観測したいと思うと自分で望遠鏡や検出器のかなりの部分を作成する必要があった。もちろん、最初はガリレオのように、理論、観測、機器開発の3業種は縮退していたはずである。しかし、資本主義の流れと同じく、効率化は分業化を促進し、その結果、この3つが異なるグループの人々に役割分担されることになる。それぞれの業種は互いにそれなりのノウハウを発展・蓄積させるために、ある人が別の業種に進出するのは容易ではなくなる。かくして、研究者は、理論屋、観測屋（通常の物理では実験屋）、機器開発屋というラベルで大まかに分類されることになる。

しかし、観測機器が比較的小さい場合には、理論屋以外の2つは事実上縮退している。例えば、通常の物性実験においては実験装置を他人の作ったものだけで、自分は実験だけするといった研究形態は考えられないであろう。しかし、装置の大型化につれて、実験・観測屋と機器開発屋の間にはさらなる分離が始まる。粒子加速器、天文衛星、10m級望遠鏡、等に関しては、それらのハードウェアを実際に完成させた人が、その後の実験・観測の主ユーザーというわけではない。必然的に、完成した機器が、その開発に直接携わらなかった他の業種（今の場合は実験観測屋）にも使いこなせるような、User Friendly な Interface が整備されることが要請される。当然、この恩恵は、理論屋もまた同時に享受できる。その結果、理論屋でも大望遠鏡を用いて観測を行うことが（再び）可能になったのである。

私は宇宙論におけるこのような、研究形態の“進化”を極めて興味深いものであると思っている。専門化の著しい物理学においては、珍しく健全な研究形態ではないかとすら思っている。以下で紹介する我々の最近の研究 [1] は、まさにこの典型的な例と言えよう。

## 2 予備知識 1 : 銀河団

銀河団は百個から千個程度の銀河が互いの重力で引き合うことによって形成されている天体である。典型的には、太陽質量 ( $M_{\odot}$ ) の  $10^{14}$  倍で数百万光年の広がりをもっており、系全体の重力的な進化の時間スケールは数十億年。宇宙の年齢はおよそ百億年であるから、銀河団はその誕生以後著しい変化を遂げるだけの時間はまだ経過していないことになる。言い換えれば、銀河団は宇宙が誕生したときの初期条件を今でもとどめたままであることが期待される。これが、銀河団の研究が宇宙論にとって極めて重要であると考えられている理由である。

歴史的には銀河団の観測的研究は可視域から出発した。これは銀河団が可視域でみたメンバー銀河の分布から定義されていることから当然といえる。しかしその後、銀河団が強い X 線源であることが認識されたことによって、その研究は大きな発展を遂げる。実は銀河団は本来 X 線で同定すべきであると言っても過言ではないことは次のように簡単に理解できる。銀河団はごく大雑把には、 $M_{cl} \sim 10^{14} M_{\odot}$  の質量が半径  $R_{cl} \sim 2\text{Mpc}$  程度の領域に集中した球状の天体である<sup>1</sup>。このような重力系が平衡状態に落ち着けば、その運動エネルギーは重力ポテンシャルエネルギーとほぼ等しくなる。この運動エネルギーを銀河団内のガスの温度に換算すれば、1000 万度程度となり、まさに、典型的な X 線に対応する。

このような高温プラズマは熱制動輻射と呼ばれる機構で光子を放射する。これは陽子と電子の 2 体反応であるから、放射率は電子の個数密度  $n_e$  の 2 乗に比例する。銀河団中で、電子密度  $n_e$  と銀河密度  $n_{gal}$  の比が場所によらずほぼ一定であるとすれば、これは  $n_{gal}$  の 2 乗に比例すると言い替えられる。一方、可視域での放射はメンバー銀河からの放射の寄与の総和であり、単純に  $n_{gal}$  に比例する。銀河団の同定は天球上で放射率を視線方向に積分した表面輝度に基づいて行われるが、放射率の  $n_e$  (すなわち  $n_{gal}$ ) 依存性の違いは重大な影響を持つ。実際、可視光観測では背景銀河が銀河団そのものと同程度の寄与をするため、銀河団を同定することは不定性をともなう困難な作業である。しかし、 $n_{gal}$  の 2 乗に比例する X 線強度を用いれば、その同定は比較的容易となる。そのため、銀河団カタログとしての統計的な信頼度は X 線観測によって飛躍的に増大する。しかしながら、X 線観測は地上では行えないため、観測衛星を打ち上げることが必要となる。

図 1 は、RXJ1347-1145 とよばれる銀河団の光学 CCD 画像の上に X 線強度の等高線を重ねてプロットしたものである。上で説明した放射率の密度依存性の違いを反映して、光学データだけではどこが銀河団なのかあまり判然としないのに対して、X 線等高線ではその中心の位置と広がりも明確である。この銀河団の電波・サブミリ波観測が本稿の主題となる。

## 3 予備知識 2 : SZ 効果

さらに興味あることに、銀河団はスニャーエフ・ゼルドヴィッチ (SZ) 効果と呼ばれる現象を通じて電波領域でも観測できる。本稿の科学的動機はこの SZ 効果にあるので少し説明を加えておこう。[3]

宇宙は熱い火の玉の状態から膨張を続けて現在に至っているとするのがビッグバン理論であるが、その最も直接的な観測的証拠が、絶対温度  $T_{\text{CMB}} = 2.7\text{K}$  の熱分布 (プランク分布) として宇宙を満たしているマイクロ波背景輻射 (CMB: Cosmic Microwave Background) の存在である。

<sup>1</sup> 1Mpc は約  $3 \times 10^{18} \text{cm}$

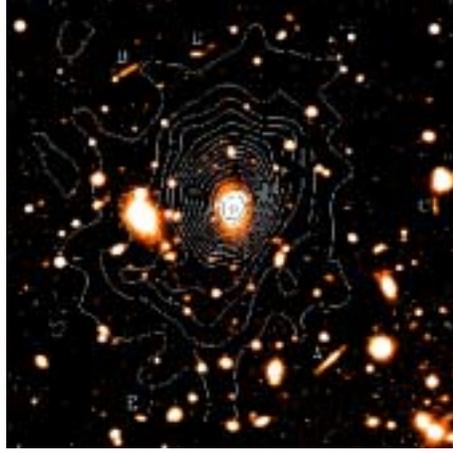


図 1: 銀河団 RXJ1347-1145 の光学・X 線 2 次元マップ。本稿とは直接関係ないが、A から E の記号で示されているのは、この銀河団の重力レンズ効果を受けてゆがんでいる遠方銀河のイメージである。

この輻射は空間的には極めて一様等方に近く、2つの異なる方向から到来する光子の温度差にしてわずかに  $10^{-3}\%$  程度のずれしかないことがわかっている。この光子が銀河団を通過すると、典型的には上述の 1000 万度の高温電子と衝突してエネルギーをもらい温度が上昇する（逆コンプトン散乱）。その結果、周波数  $\nu$  を持つ光子のエネルギー分布は  $I_\nu = I_{\nu, BB} + \Delta I_{\nu, SZ}$  となり、プランク分布  $I_{\nu, BB}$  に比べて高エネルギー側に少しだけシフトする。この SZ 効果に起因する項  $\Delta I_{\nu, SZ}$  は、その振幅を除けば、個々の銀河団の性質とは無関係に、 $T_{\text{CMB}}$  と基礎物理定数（具体的には、プランク定数  $h_p$  とボルツマン定数  $k_B$ ）のみで決まる普遍的な関数となる。この振幅の値を決めるパラメータは、通常  $y$  パラメータと呼ばれており、銀河団ガスの温度  $T_{\text{cl}}$  と電子密度  $n_e$  を銀河団の奥行きにそって積分したもので、銀河団を通過する光子の散乱確率であると考えてよい。典型的には  $10^{-3} \sim 10^{-4}$  程度の値をとる。図 2 はこの結果をプロットしたものである。観測量である  $\Delta I_{\nu, SZ}$  は、ある臨界波長 (1.38mm) 以下のサブミリ波領域では正、それ以上の電波領域では実効的に負の信号となる。

SZ 効果は、Sunyaev と Zel'dovich による 1970 年前後の理論的な予言 [2] の後、観測的にもいくつかの“検出報告”がなされたが、信頼できる結果が得られるようになったのは 1980 年代半ばである [3]。

さて、SZ 効果は銀河団内ガスの物理状態に関して多くの情報を与えてくれるが、実は X 線の観測データと組み合わせることで、その銀河団までの距離と、CMB の静止系に対して相対的に運動している速度（特異速度）を推定することも可能にする。これは定性的には次のように理解できる。まず、SZ 効果の観測量である  $y$  パラメータは、上述のように

$$y \propto R_{\text{cl}} T_{\text{cl}} n_e \quad (1)$$

の関係を持つ。一方、X 線観測からは、銀河団の温度  $T_{\text{cl}}$ 、角半径  $\theta_{\text{cl}}$ 、および輻射強度  $S_X$  が独立に決定できる。

$$S_X \propto R_{\text{cl}} T_{\text{cl}}^{1/2} n_e^2 \quad (2)$$

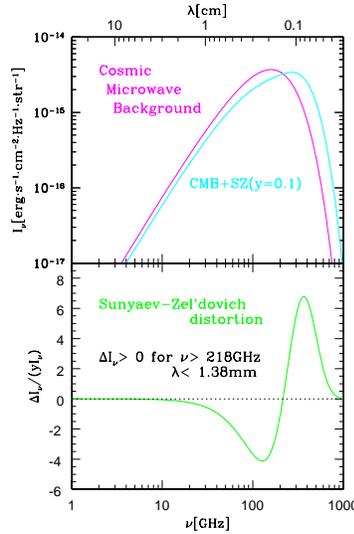


図 2: SZ 効果による輻射スペクトル。上図: SZ 効果による変形がある場合 ( $y = 0.1$ ) とない場合のマイクロ波背景輻射のスペクトル。下図: SZ 効果のスペクトル。

という関係と、銀河団までの距離  $d$  が  $R_{cl}/\theta_{cl}$  で与えられることを使うと、(1) 式と (2) 式より

$$d \propto \frac{y^2}{S_X T_{cl}^{3/2} \theta_{cl}} \quad (3)$$

が得られる。この式の比例定数は銀河団の密度・温度分布プロファイルから決まる。銀河団のように極めて遠方にある天体までの距離を、物理的な原理に基づいて決定できるのは、この SZ 効果を用いる方法だけである。距離がわかれば、いわゆるハッブルの法則を用いて、宇宙の膨張率であるハッブル定数  $H_0$  を決定できる。さらに、観測される後退速度から宇宙膨張の速度を差し引けば、銀河団の特異速度を推定できる（実は、特異速度に特徴的な運動学的 SZ 効果というものも存在し、それが観測できればさらに信頼性の高い特異速度決定が可能である）[3, 4, 5]。

## 4 発端

日本の X 線天文学は極めて高い研究水準を持つ。特に、あすか、と名づけられた X 線観測衛星は、超新星、中性子星・ブラックホール、活動銀河核、銀河団と、多岐にわたって重要な観測データを提供してきた。銀河団に関する第一線の観測的研究が身近で行われている事に刺激されて、我々も、理論的な立場から、銀河団を用いて宇宙論を検証する研究を行っていた。3 年ほど前、東京大学大学院生であった北山哲君（現日本学術振興会特別研究員）と銀河団の X 線観測データを用いた理論的研究を行っていた時 [6, 7, 8]、SZ 効果の観測の現状はどうなっているのだろうと考え始めた。少し調べてみると、cm 波帯における観測は飛躍的に進展しており、干渉計を用いた 2 次元マップまで得られるようになりつつある。2010 年頃に打ち上げが予定されている欧州の CMB 観測衛星プランクは、30GHz から 900GHz において 9 つの観測バンドを持ち、CMB の温度ゆらぎマップに加えてサブミリ波での銀河団サーベイをもめざしている。しかしながら、そ

の時点ではサブミリ波領域における SZ 効果の検出はまだ報告されていないようであった。観測機器についてほとんど何も知らない私にはその理由はよく分からなかった。

そこで私は、サブミリ波帯での SZ 効果に関していくつかの計算結果を携えて、物理学教室の同僚である山本智氏に話を伺いにいった。彼は、文部省の拠点形成プログラムのもとにつくられた東京大学理学部初期宇宙研究センターのプロジェクトの一つとして、富士山頂に日本初のサブミリ波望遠鏡の設置を行いつつあった（現在はすでに完成し優れたデータを提供しつつある）。山本氏はさまざまな助言に加えて、そのような観測であれば、ハワイの JCMT (James Clerk Maxwell Telescope) 天文台の SCUBA (Submillimetre Common-User Bolometric Array) という検出器しかないであろうと教えてくれた。SCUBA は波長 0.85mm の 37 素子からなるアレイ検出器で、14 秒の角度分解能で 2 次元マップが描ける (図 3)。サブミリ波帯で SZ 効果を観測するためには、現存する最適の検出器である。実は私は、その 1996 年の夏に英国エジンバラ天文台を訪問したことがあり、そこで何かの記念にと思ってもらってきておいたのが、実にこの JCMT のパンフレットであった (図 4。無論、その時はまさか自分がそれをういて実際に観測することになるうとは夢にも思わなかったのであるが、)。そこで早速パンフレットを引っ張り出して望遠鏡の性能の概要を調べたところ、確かに波長帯と角度分解能は必要とされる条件を満たしていることはわかった。実は山本氏は、観測プロポーザルを書いてみれば、とまで言ってくれたのであるが、私はそのような経験などなくまた山本氏もご自分のプロジェクトでお忙しい身でもあり、この件は事実上ペンディング状態となってしまった。

## 5 $4\pi$ の幸運

1997 年 7 月に、日本の次期天文プロジェクトである大型ミリ波サブミリ波アレイ計画 (LMSA: Large Millimeter and Submillimeter Array) に関する研究会の通知が回ってきた。9 月に国立天文台野辺山観測所で開催されるとのことで、専門家の方々にサブミリ波での SZ 効果の観測可能性を議論してもらう絶好の機会であると考え、口頭発表を申し込んでおいた。ところでその年の 8 月、京都国際会議場において国際天文連合総会が開催された。宇宙論のセッションで、東北大学の服部誠君が、X 線は検出されているが可視光での対応天体がない“暗黒銀河団”の存在に関する発表をした。その天体が本当に銀河団であるかどうかを検証するためには SZ 効果を観測してみるのがベストであると考えた私は、すぐに服部君にその旨を持ち掛けたところ彼も多めに興味を持ってくれた。そこで、東京に帰ってからその“暗黒銀河団”の SZ 効果について簡単な計算をして 9 月の野辺山の研究会の発表用 OHP の準備を終えた。ところがなんと、研究会の前日に持病の腰痛がでてしまった私は、参加することが不可能になった。そこで、一緒に研究会に出席する予定であった京都大学の大学院生吉川耕司君に、前日に急遽発表のピンチヒッターを頼むことにした。当時修士課程一年であった彼は、私とまさに SZ 効果に関する数値シミュレーションの共同研究を行っているところであった [5]。

さて翌週なんとか大学へ出てみると、「研究会で発表したところ、川辺さんから“そんなに強いソースならば野辺山でも数分で検出できる。ぜひ観測プロポーザルを書くべきである。”と言われた」という吉川君からの電子メールが入っていた。川辺良平さんは野辺山観測所にいる電波観測の専門家、LMSA 計画の責任者の一人である。もちろんこれを読んですぐ頭に浮かんだのは、どこか計算ミスをしたに違いない、ということである。世の中そんなに強いソースが検出されないままであるわけがない。自分で見直したのであるがどうもわからないので、北山君に頼

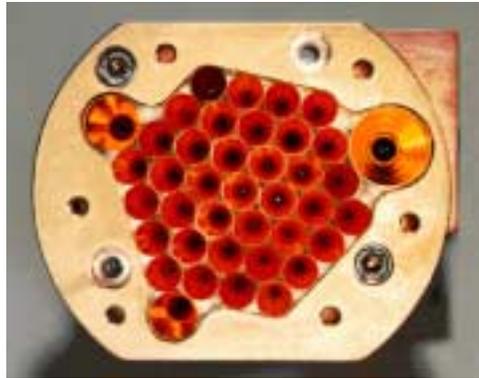


図 3: J.C.Maxwell サブミリ波望遠鏡に取り付けられている検出器 SCUBA。波長 2.1mm (右上), 1.3mm (左上), 1.1mm (左下) の 3 素子に加えて、0.85mm の 37 素子アレイから構成されている。

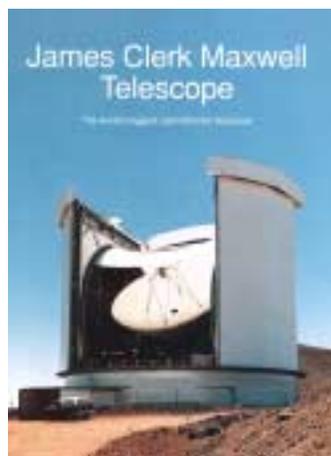


図 4: J.C.Maxwell サブミリ波望遠鏡のパフレットの表紙。

んだところ、しばらくして「強度を求めるときに立体角  $4\pi$  で割るのを忘れていました。」という返事。実は、電波の業界で使われる Jy[ジャンスキー] という単位<sup>2</sup> を初めて使った私は、その単位の換算したときに得られた値が大きいのか小さいのかという常識を全くもっておらず気付かなかったのである。強度を  $4\pi$  間違っていたことは必要な観測時間に直すと  $(4\pi)^2$  もの間違いになる。しかし結果的には、これが川辺さんの興味を誘い、共同研究へと発展したわけで、振り返ってみれば実に意義深い計算ミスであった。

これが契機となって、とにかく SCUBA に観測プロポーザルを書いてみようということになった。しかし、上述の  $4\pi$  のミスのため、当初念頭にあった服部君の“暗黒銀河団”の SZ 効果検出は事実上かなり困難であることが判明した。その過程で、服部君が提案してくれたのが RXJ1347-1145 という銀河団である。これは重力レンズを起こしている遠方(赤方偏移は 0.45)銀河団で、その X 線絶対光度は知られている銀河団中で最も明るい [9]。まさに今回のサブミリ波での SZ 効果検

<sup>2</sup> 1Jy =  $10^{-23}$  erg/cm<sup>2</sup>/sec/Hz (ではないかと思うのだが、、、)

出をねらうのに最適なターゲットであった(図1)。結局、SCUBAにはこの2つの銀河団をサブミリ波観測ターゲットとし、同時に野辺山の45m電波望遠鏡にもcm・mm波帯でのSZ効果の観測プロポーザルを提出した。結果を待つ間は、何か宝くじの発表を待つようなわくわくした気分であった。まだ職業的な感覚というよりも、初めての経験に浮かれている理論屋という気分から抜け出していなかったのであろう。ともあれ、私が生まれて初めて書き上げた観測のプロポーザルはどちらも無事採択された。

## 6 野辺山で小手調べ

野辺山での観測割り当ては1998年3月、SCUBAは5月末ということになったので、初のサブミリ波観測を前にして、まずは野辺山で小手調べという段取りになった。観測を前にして、服部君から東北大学の大学院修士課程1年生を一人連れて行きたいのだが、という連絡があった。何せ経験のないものの集まりなので一人でも多いほうが心強い程度のもりでOKを出したのであるが、実はそれどころか、この小松英一郎君は、データ解析を実質的に一人でやりとげるといって素晴らしい活躍を見せることになる[10]。

観測前日、服部、小松、北山、吉川、須藤の5人は野辺山に集結し、共同研究者である野辺山観測所の松尾宏さんより、電波観測について文字通り一夜漬けの特訓を受ける。ほとんど同じく0の状態から出発したにもかかわらず、小松、吉川の飲み込みは早い。よく観察してみると、5人の順応度は厳密に若さ順のようである(つまり私はビリ)。のみならず、松尾さんがみせた神業のような観測前のセットアップの様子に、理論屋との違いを思い知らされたのであった。

実は野辺山での観測の本来の目標は、松尾さんが開発した波長2mm(150GHz)の7素子検出器NOBAで、RXJ1347-1145のマッピングを行うことであった。しかし、観測波長が短くなるほど天候(水蒸気量)に対する要求は厳しくなる(実はこのような常識も特訓の際に初めて知ったのであるが、、、)。残念ながら我々の観測期間中あまり天候には恵まれず、観測はもっぱら21GHzと43GHzの2バンドで行わざるを得なかった。最初の夜に見たデータはある意味で我々には衝撃的であった。図2に示してあるようにこの波長でのSZ効果の符号は負のはずである。ところが、データをリアルタイムで積分した結果、端末上に姿を現した信号の符号は正だったのである(図7の上図)。最初はどこかの極性が逆になっているのではないかと疑ったが、大学の学生実験などとは違いそのような初歩的なミスがあるはずもない。つまり、この銀河団の中心部に電波源があるとしか考えられない。

急遽文献を探したり、知り合いにメールを出して情報を教えてもらったりした挙げ句、シカゴ大学のJ.Carlstrom氏から、確かに28.5GHzでこの銀河団の中心付近に点源を検出しているとの返事もらった。理論家というのはいつも理想化された状況を考えている人種なので、自分の期待する信号だけは良く理解しているが、その検出を邪魔する雑音には興味がない。理論だけをやっているのであればそれでも何とかなるかもしれないが、実際の世の中はそんな甘いものではないことを思い知らされた。幸いその後、この点源の電波強度についてデータを集め(後日、野辺山の干渉計で我々自身もデータをとった)、そのエネルギースペクトルを見積もることで、点源の影響を取り除いた結果はまさにSZ効果の予言と一致しており、一安心ということになったのである。cm・mm波帯でのSZ効果の観測例は数多いが、この銀河団に関してSZ効果を検出したのは、もちろんこれが最初である。



図 5: 我々の観測期間中に撮影した野辺山電波望遠鏡



図 6: 野辺山電波望遠鏡における観測風景

## 7 いざマウナケア

何とか野辺山でそれなりの成果をあげて気をよくした我々は、いよいよ服部、小松、川辺、北山、吉川、須藤の総勢 6 人が大挙してマウナケアに乗り込むことにした。JCMT はハワイ島のヒロにある JAC(Joint Astronomy Centre) の管理する望遠鏡の一つであり、宿舎やレンタカーまで電子メールを用いて JAC が手配してくれる。実際の観測の際にサポートしてくれるスタッフも事前に割り当てられており、あらかじめ観測の詳細について打ち合わせておくことができる。その打ち合わせの過程で、担当の Iain Coulson 氏より (図 8)、「コントロール室は狭く、6 人同時に入ることは不可能である。観測日は 2 日間なので一日 3 人ずつ交替で来てもらうことはできないだろうか」というメールが届いた。観測には JCMT 側のオペレータとサポートスタッフが一人ずつ付く。したがって、実際は誰か一人か二人現地に赴けば十分であろう。しかし我々の場合、専門家の川辺氏は必須であるとしても、むしろ観測を体験することそのものが目的で旅費を工面してハワイまで行くのである。ひょっとすると最初で最後のチャンスかもしれないのである。そういう事情を説明して何とか了承してもらった。確かにコントロール室には 6 人分の椅子はなく、「これだけの人が同時に入ったのは JCMT の記録だろう」とまで言われた。

JCMT やすばる望遠鏡のあるマウナケア山頂は海拔 4 2 0 0 m であり、そこで観測をする人

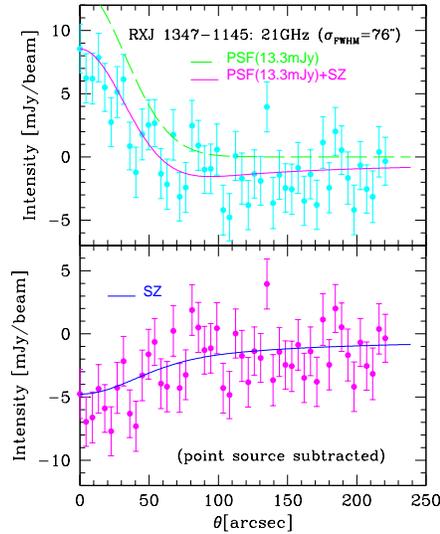


図 7: 野辺山観測所の 4.5 m 電波望遠鏡で観測した銀河団 RXJ1347-1145 の 21GHz での強度分布。上図のデータから、中心の電波源の寄与をアンテナの応答関数である PSF(Point Spread Function) を考慮して差し引いたものが下図。銀河団の中心を横切るような天球上のある経路に沿ってスキャンした結果である。実線は X 線観測から予想される SZ 効果のプロファイル。

は、海拔 2700 m にあるハレポハク宿泊所に滞在し、観測の時のみ四輪駆動車で山頂まで登ることになる (図 9)。SCUBA を用いた観測は、水蒸気量の少ない好天の日でしか行えない。実際、我々の観測日の水蒸気量は、SCUBA のマニュアルによれば観測には不適とされる多さであった。通常はこのような場合に備えて、予備観測を考えておくのであろうが、我々の場合サブミリ波観測の興味はこの銀河団 RXJ1347-1145 しかない。そこで、とにかく観測を強行するしかないという結論になった。当然ノイズレベルは高く、現地での簡単な解析では信号らしきものは何も認識できず、意気消沈して帰国する結果となった。観測は夜中に終了するのであるが、そのとき見上げた夜空はまさに満面の星をたたえていた。可視光観測には文句無し为天候であったに違いない。サブミリ波観測の難しさを身を持って感じさせられた夜であった。

## 8 失意からの挽回

ハワイから帰って一週間ほどした 6 月 10 日、いつものようにインターネット上に投稿されるプレプリントの一覧に目を通していると、“First measurement of the submillimetre Sunyaev-Zel’dovich effect” というタイトルの論文が目に飛び込んできた [11]。「よりによってここまで来ながら先を越されてしまったか」という思いで、論文を読んでもみると A2163 という全天で最も温度の高い銀河団の観測である。ただし、彼らの測定したサブミリ波領域での光度はほとんどがダストからの輻射であると考えられ、SZ 効果の寄与を推定するために、他の波長域での過去のデータを用いてその残差を求める、という間接的な結果であった (図 10)。我々の観測は、銀河団からの全輻射量のみを求めるのではなく、その 2 次元マップまでも得られる。したがって、その空間分布が SZ 効果の予言と一致しているかを直接検証できる点で、“原理的な”信頼度は比較に



図 8: サポートスタッフの Iain Coulson 氏と観測メンバー。



図 9: JAC の四輪駆動車に乗って J.C.Maxwell サブミリ波望遠鏡のあるマウナケア山頂に向かう途中の観測チーム。

ならないほど優れているはずである。とはいっても、悪天候のため満足なデータがとれていない以上、そのような批判をしたところで負け犬の遠吠えでしかないのも事実である。

ところが、その直後、小松君から「SZ 効果らしいシグナルが見えているようだ」という連絡が入った。観測の直後に行った簡単な解析から、予想通りの高い雑音レベルであったことがはっきりしている。そのような状況で、SZ 効果の信号を拾い出すのはほとんど不可能であろう、というのが私のみならずほとんどの人の印象であった。<sup>3</sup> しかし、小松君は JCMT の提供してくれるデータ処理ルーチンと格闘し、メイリングリストでユーザーズグループの人たちに多くの質問をしながら、まさに執念で解析を続けていたのである。これも若さのなせる技なのであろうか。脱帽である。その結果に勇気付けられて、北山君にお願いしてデータをさまざま角度から理論予言と比較してもらった。この後は、主として観測データの reduction を担当し SZ 信号の存在にかなり自信を持つ 服部・小松君と、理論解析を担当しやや保守的な立場を主張する北山君と私

<sup>3</sup> 山頂で軽い高山病にかかってしまった吉川君などは観測最後の日に、「はるばるハワイまで来て高山病で苦しんだ挙げ句の観測結果がこれなのか、、、」などと不満をたれながら、ふてくされてビールを飲んでいたのである。

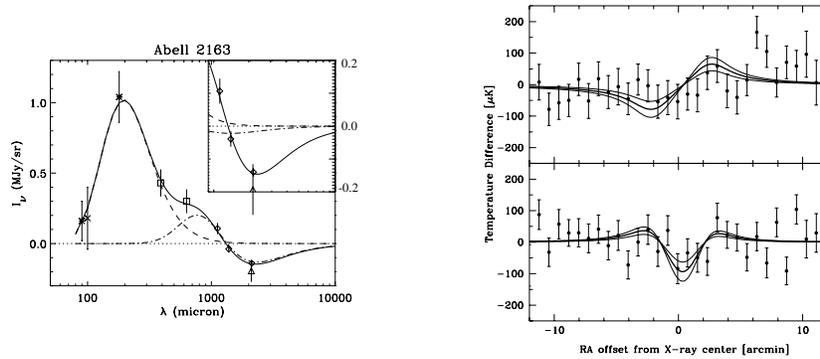


図 10: 波長 1.38mm 以下での SZ 効果観測に関する過去の報告 (銀河団 A2163)。左図: Lamarre et al. (1998: 文献 [11]) の図 2 より転載。波長 390 ミクロン と 630 ミクロンが彼らのデータ。1.1mm より長波長のデータは、右図の Holzzapfel et al. (1997: 文献 [12]) 図 5 より転載) の結果である。サブミリ波領域の放射の大部分は SZ 効果ではなくダストからのものであると結論している。右図は、1.1mm のデータで銀河団を一方向からスキャンしたもの。上下の違いは 大気ノイズの除去の方法の違いで、実線が X 線観測から予想される SZ 効果のプロファイル。

との解釈をめぐるやり取りが繰り返された。しかし、共同研究者内部でのこの役割分担のおかげで、最終結果はかなり完成度の高いものになったものと自負している [1]。

図 11 が我々のデータで、その解析結果が図 12 である。“悪天候”のもとで強行した観測であるから、ノイズレベルが高いことは否定しようもないが、X 線観測から予想される SZ 効果の信号との一致は極めて良い。まさにこれは、2次元マップがとれる検出器 SCUBA の威力である。図 10 に示した過去の検出 (を主張している) 例 [11, 12] と比較して頂ければ、今回の観測との質的な違いが明らかであると思う。その意味で、我々は今回のデータこそ、サブミリ波領域での SZ 効果の実質的な初検出と呼べるものであると理解している。その主張は別としても、サブミリ波で SZ 効果の強度プロファイルを観測したのはもちろん我々が初めてである。

## 9 回想

今まで理論的研究ばかりやってきた私にとって、今回の観測は極めて刺激的で記憶に残る経験であった。しかしこのような自明な (つまり理論家でも考え付くような) 観測をなぜ誰も試みなかったのであろうか? 少し皮肉なことではあるが、理論的な立場から科学的意義のみを追求する一方、現実的な問題を深く考えなかったおかげではないかという気がする。当初考えていた銀河団から RXJ1347-1145 という現時点でベストのターゲットに目を転じ得たこと (これは小松君を発掘したことと並んで服部君の重要な功績である) あまり JCMT/SCUBA に関して知識がなく (これは共同研究チームがほとんど理論屋から構成されていたため) その理想的な性能を盲信しとにかく観測を成し遂げたこと、も怪我の功名的な意味で本質的である。理論、観測、機器開発とそれぞれの得意分野の違いのみならず、学問的嗜好、性格がかなり違う我々が SZ 効果の観測のもとに集合したのは実に効率的であった。しかも、観測のエキスパートである川辺さんと松尾

さんの助言のもとで、実際の観測は我々理論屋でも成功できたことは教訓的である。個々の知識や能力を単純に足しあわせただけではだめなことでも、共同研究という形でそれらがまさに非線型に効果を発揮することを痛感した。

今回の観測によって、サブミリ波での銀河団観測が宇宙論の新しい研究手段であることを示し得たことは、Planck 衛星を始めとする将来のサブミリ波観測計画にとっても朗報であろう。また、まだ解析途中ではあるが、ハッブル定数として (40 ~ 50)km/sec/Mpc 程度の値が得られそうであることもわかりつつある。さらに今後のサーベイ観測等でサンプル数が増えてくれば、統計的な平均によって、宇宙論パラメータについての議論までも可能になるう [4, 7, 3]。

しかしながら、今回の観測の最大の収穫は、“理論屋も使い方によっては役に立つこと”を示し得たことのように思う。宇宙論観測は今後、光・近赤外でのすばる望遠鏡、X線衛星の XMM、AXAF、Astro-E、広域サーベイの 2dF、SDSS 等、大型計画が目白押しである。しかも、これらの観測プロジェクトにおいて日本の占める位置はかなり大きい。したがって、日本の理論家が、積極的にプロポーザルを書き、実際に観測しデータを解析するという研究形態も決して珍しくなくなるであろう。早晩、宇宙論研究において、理論屋と観測屋の明確な区別は無意味にすらなってしまうかもしれない。

今回の観測の共同研究者は、川辺良平、北山哲、小松英一郎、服部誠、松尾宏、吉川耕司、Sabine Schindler (敬称略) である。また、ハワイ滞在中には、JAC の Iain Coulson 氏、および小笠原隆亮氏をはじめとする国立天文台すばる観測所の皆様には特にお世話になった。ここに厚く感謝の意を表わせて頂きたい。

## 参考文献

- [1] Komatsu, E., Kitayama, T., Suto, Y., Hattori, M., Kawabe, R., Matsuo, H., Schindler, S., and Yoshikawa, K., *The Astrophysical Journal*, **516**(1999)L1.
- [2] Sunyaev, R. A. & Zel'dovich, Ya. B., *Comments Astrophys. Space Phys.* **4**(1972)173.
- [3] Birkinshaw, M., *Physics Report*, (1999) in press (astro-ph/9808050).
- [4] Kobayashi, S., Sasaki, S. and Suto, Y., *Publ.Astron.Soc.Japan*, **48**(1996)L107.
- [5] Yoshikawa, K., Itoh, M., and Suto, Y., *Publ.Astron.Soc.Japan*, **50**(1998)203.
- [6] Kitayama, T. and Suto, Y., *The Astrophysical Journal*, **490**(1997)557.
- [7] Kitayama, T., Sasaki, S., and Suto, Y., *Publ.Astron.Soc.Japan*, **50**(1998)1.
- [8] 北山哲, *日本物理学会誌* **53**(1998)921.
- [9] Schindler, S., Hattori, M., Neumann, D. M., and Böhringer, H., *A&A* **317**(1996)646.
- [10] 小松英一郎, *天文月報* **91**(1998)561.
- [11] Lamarre, J.M. et al., *The Astrophysical Journal*, **507**(1998) L5.
- [12] Holzzapfel, W.L. et al., *The Astrophysical Journal*, **481**(1997) 35.

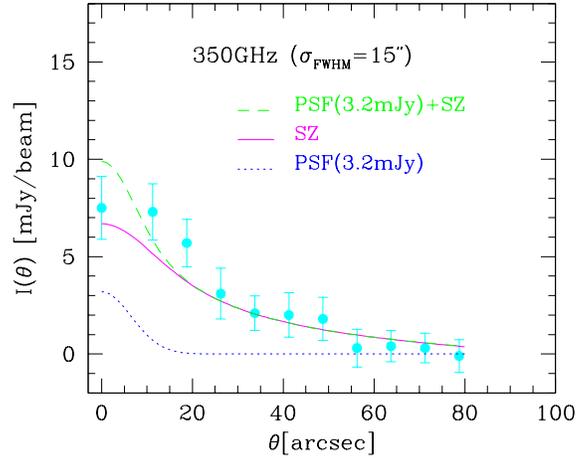


図 11: J.C.Maxwell サブミリ波望遠鏡で観測した銀河団 RXJ1347-1145 の 350 GHz での強度分布。誤差棒付きの丸が我々の観測データ。中心に 3.2mJy のサブミリ波点源があると仮定した場合のアンテナの応答 (PSF) が点線で、X 線観測から予想される SZ 効果のプロファイルが実線。それらを合わせたものが破線である。

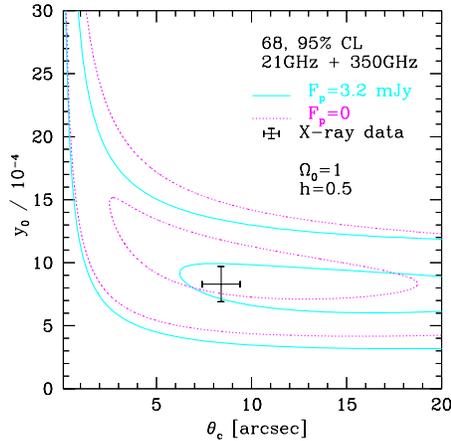


図 12: 電波 (21GHz) とサブミリ波 (350GHz) の SZ 効果観測から推定される銀河団 RXJ1347-1145 の  $y$  パラメータとコア半径。中心のサブミリ波点源の強度が 0 および 3.2mJy の二つの場合の 68% 95% の信頼度の等高線。誤差棒が X 線観測から独立に推定されたもの。