The large scale and very deep 2-mm mapping observation of the Sunyaev–Zel'dovich effect in the most luminous X-ray cluster at $z = 0.45$

小松 英一郎, 北山 哲, 須藤 靖, 服部 誠, 川辺 良平, 河野 孝太郎,
久野 成夫, 松尾 宏, 太田 直美, Sabine Schindler, 吉川 耕司

Scientific Justification

銀河団は、自身が重力的に束縛している高温電子ガス ($\sim 10^8$ K) の熱的制動放射により X 線領域で明るいソースである事が知られているが、電波領域において非常にユニークなソースとしてふるまう事も良く知られている。電波領域では一様バックグラウンドとして宇宙背景放射 (CMB) が存在しているが、銀河団中の電子は逆コンプトン散乱を通じて CMB の光子にエネルギーを与えて CMB のスペクトルを変形させ、レイリージーンズ領域 ($\lambda > 1.4$mm) で CMB の輝度は減少し、逆にウイーン領域では上昇する。これがあたかも銀河団の輝度変化のように観測されるのである。この効果はスニヤエフ–ゼルドヴィッチ効果 (Zel'dovich & Sunyaev 1969, 以下 SZ 効果) と呼ばれ、近年の銀河団および観測的宇宙論の研究において、可視、X 線観測と並び重要な効果として注目を集めている。特に多波長で SZ 効果を測定することにより、1 Gpc 以上のスケールにわたる大域的なハッブル定数 (Kobayashi, Sasaki & Suto 1996) や、銀河団の固有運動 (Sunyaev & Zel'dovich 1980) といった、今日の観測的宇宙論において重要な情報を得ることができる。以上のような動機から過去 20 年に渡り多くの銀河団に対して SZ 効果の測定が行われてきたが、全てレイリージーンズ領域、それもセンチメートル帯における測定であった。これは SZ 効果が数 mJy という微弱なソースであり、高周波領域では大気吸収のために満足な S/N を得る事ができなかったためである。しかし上記のような情報を引き出すためには多波長観測、とりわけサブミリでの輝度上昇の測定に成功する事が決定的に重要である。そのような状況をふまえ、我々は我々の共同研究者によって発見された全天で最も明るく高温で、全天で最大の SZ ソースとして期待できる X 線クラスター RXJ1347-1145 (Schindler et al. 1997) をターゲットとして選び、JCMT/SCUBA サブミリカメラによって SZ 輝度上昇の世界初検出に成功した (Komatsu et al. 1999; 図 1 左)。

この検出に勇気づけられ、我々は銀河団の固有運動の測定を目指し 1999 年の NRO 共同利用 (No. 982002) において NOBA を用いた 2-mm 大規模、高分解能 SZ マッピングを敢行した。不幸にして悪天候と相次ぐ装置トラブルに見舞われ観測達成率は 10%に満たなかったが、NOBA の優れた性能と、NOBA を製作し熟知する共同研究者の開発した優れた解析コードにより、動径方向に平均化した輝度分布の中心領域において 5σ レベルで輝度減少の測定に成功した。我々が達成した視野 $1'.9 \times 1'.9$、分解能 $12''.5$ (図 1 右) は両者とも既存のミリ波 SZ マップにおいて世界最高の水準である。比較的なだらかに遠方まで分布した SZ をマッピングするには視野の広さが要求され、銀河団内に高い確率で存在する電波源を SZ から切り分けるためには高分解が要求される。NRO45-m + NOBA というシステムは、そのどちらの要求も満たしており、まさに理想的なシステムである事が実証された。

しかし、観測から得られた結果は我々の予想と大きく食い違っていた。X 線観測の結果から期待される SZ の輝度に比べ、測定された輝度が 2 倍近く有意に大きかったのである。最も単純な解釈に従えば、SZ から求められた銀河団の温度が X 線で求められた温度よりも 2 倍高い事を意味する。これは明らかな矛盾である。我々は 1999 年に再び SCUBA による測定を行いサブミリ SZ の S/N を向上させたが、結果は 2-mm のデータと一致した。時を同じくして他のグループから IRAM/Diabolo を用いて 2-mm でこの銀河団の SZ 効果を測定したという報告がなされたが、彼らの結果も我々の結果と同じであった (Pointecouteau et al. 1999)。SZ 効果は過去に多くの観測例があるにも関わらず、X 線との有意な矛盾が見つかった例は初めてである。この結果により、我々が従来持つ銀河団のシンプルな描像である球対称、等温仮定のどちらか、もしくは両方が修正されねばならない可能性がある。例えばこの銀河団はその高い電子数密度から中心領域の放射冷却時間が宇宙年齢の 1/10 程度であることが分かっている (Schindler et al. 1997)。そのような状況下では電子ガスは等温ではなく、クーリングフロー領域と呼ばれる低温成分をともなった 2 つ以上の異なる領域の共存が可能となり、適当な仮定のもとで導かれる SZ 効果の強度が X 線から期待される値を上回る事が可能である (Hattori et al. in

preparation)。無論これは既存のデータを説明するための一つの解釈にすぎず、本質的な理解の進歩は S/N の飛躍的向上によってのみ可能である。SZ 効果はガスの圧力に比例し、その詳細なマップは銀河団内のガスの密度、質量、温度分布といった物理状態を直接描き出すため、銀河団内の高温ガスの物理状態の解明に非常に有用である。前述のように、このような詳細なマップを描けるシステムは現在 NRO45-m + NOBA のみであり、他の低周波観測はもとより、Diabolo (分解能 30″) をもよせつけない圧倒的なスペックである。

我々は、NOBA を用いて 2-mm 帯において $1'.9 \times 1'.9$ のマッピング観測を行い、ノイズレベル $1\sigma = 1$ mJy/beam の達成を目指す。1999 年 3 月の共同利用における達成値は 8 時間で $1\sigma = 2.8$ mJy/beam であり、目標値を達成するには 63 時間必要となる。1 日あたりの要求時間は本観測 (1 時間 $\times$ 5) + チューニング (20 分) + スカイディップピング (10 分 $\times$ 2) + ポインティング観測 (5 分 $\times$ 6) + キャリブレーション観測 (50 分) = 7 時間であり、現実的なアロケーションタイムから観測達成率 60%を見込み、合計 7×20(日) = 140 時間 を要求する。

1999 年の共同利用時には、NOBA で SZ のマッピング観測が極めて困難であると予想されていたが、我々はそれが十分なスペックを持って可能である事を示した。我々はさらに、他波長観測の重要性から SCUBA においても $1\sigma = 1$ mJy/beam レベルの観測を提案中である。高周波領域の SZ 効果を高分解能マッピングをベースにして系統的に研究しているのは我々のグループが唯一である。将来的に見ても LMSA や PLANCK といったミリ、サブミリ領域で高感度を持つシステムが続々と立ち上がるため、我々の観測はそれらに対しても基本的かつ重要な意味を持つだろう。加えて、前述のクーリングフローモデルの是非を直接検証する手段として次世代 X 線天文衛星 ASTRO-E の超高分解能スペクトロメータを用いた観測、銀河団の温度と密接に関連する質量分布の測定として CTIO を用いた近赤外でのウィークシアーフィールドのマッピング観測を提案中である。我々の共同研究者は、同じく X 線衛星 XMM の特別占有時間を得ており、打ち上がり次第この銀河団を観測する予定となっている。以上のように、我々のグループは X 線から電波にいたるまで幅広い波長で RXJ1347-1145 の観測を行っているが、近傍銀河団の 70%がこの銀河団で示唆されるような多成分系の可能性を持ついわゆる「XD 銀河団」に分類されており、これらの銀河団による SZ 効果を正しく理解する事は既存の銀河団観測に基づく観測的宇宙論に潜む系統的エラーを洗い出し、より精度を上げてゆく上で本質的役割を果たすと思われる。とりわけ RXJ1347-1145 は全天最大の SZ 輝度を持つため、XD 銀河団の SZ 効果を研究するには最適のターゲットである。本観測が、NOBA の優れた性能を最大限に引き出す事を可能にすると同時に、観測的宇宙論の主要な柱の一つである銀河団についての理解を飛躍的に前進させるものであると確信している。

References

Komatsu, E., et al., ApJ, 516, L1 (1999)

Kobayashi, S., Sasaki, S., & Suto, Y., PASJ, 48, L107 (1996)

Pointecouteau, E., et al., ApJ, 519, L115 (1999)

Schindler, S., et al., A&A, 317, 646 (1997)

Sunyaev, R. A., & Zel'dovich, Ya. B., MNRAS, 190, 413 (1980)

Zel'dovich, Ya. B., & Sunyaev, R. A., Astron. Space. Sci., 4, 301 (1969)

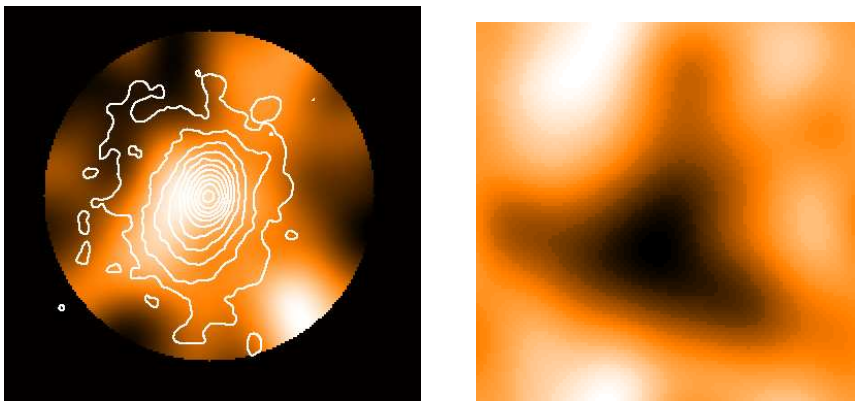

図 1: 銀河団 RXJ1347-1145 における SZ 効果。[左図] JCMT/SCUBA による SZ 輝度上昇の世界初検出。波長 0.85-mm、視野直径 160″。FWHM = 28″ のガウシアンでスムージングをかけており、ノイズレベルは $1\sigma = 5.3$ mJy/15″beam。等高線は ROSAT/HRI による X 線輝度分布。右下の明るい領域は我々が VLA 観測によって位置を同定済のサブミリソースである。[右図] NRO/NOBA による 2-mm SZ 輝度減少のマップ。視野 $111'' \times 111''$。FWHM = 24″ のガウシアンでスムージングをかけており、ノイズレベルは $1\sigma = 2.8$ mJy/12″.5 beam。ミリ波 SZ のマッピングとしては最大視野、最高分解能。