

令和 5 年 5 月 16 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04012

研究課題名（和文）高角度分解能SZ効果とX線ジョイント解析による銀河団ガス物理の解明

研究課題名（英文）Revealing the ICM physics by joint analysis of SZ effect and X-ray imaging with high angular resolutions

研究代表者

岡部 信広（Okabe, Nobuhiro）

広島大学・先進理工系科学研究科（理）・准教授

研究者番号：00436073

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：観測的・理論的アプローチの両面から研究を遂行した。観測的アプローチでは、1から3個の球対称ガスモデルを用いてジョイントSZ効果+X線解析を行った。また、弱い重力レンズ質量、光学撮像データなども含めた多波長解析を行った。3つの銀河団に対して解析することにより、衝突タイムスケールに対する銀河団ガスの変化を定量的に評価することができた。理論的アプローチでは、天球面上に衝突している銀河団の数値シミュレーションに対して解析モデルを作成した。銀河団ガス分布を記述するgNFWモデルに衝撃波を記述するランキン-ユゴニオ関係式を導入し、全体のガス分布と局所的な衝撃波の構造を同時に再現することを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

銀河団は宇宙最大の天体であり、その衝突現象はエネルギーを最も開放する。これの詳細な物理の解明は、宇宙の構造形成を理解するのに重要であると同時に、今後の望遠鏡や衛星計画と密接に関係する。特に高角度分解能SZ効果の観測装置の技術進歩は、銀河団ガスの研究に大きな革命を引き起こす。そのため研究の舗装整備は必要不可欠である。また、一連の研究を通して、プレスリリースを行い、社会的還元を行った。

研究成果の概要（英文）：We carried out the study based on both observational and theoretical approaches. In the observational approach, a joint SZ effect and X-ray analysis was performed using one to three spherically symmetric gas models. The multi-wavelength analysis, including weak gravitational lensing masses and optical imaging data, was also carried out for three clusters, allowing a quantitative assessment of the merger boost with respect to the merger timescale. In the theoretical approach, an analytical model was developed for numerical simulations of galaxy clusters colliding on the celestial plane. The Rankine-Hugoniot relation describing the shock was introduced into the gNFW model describing the galaxy cluster gas distribution. We found that it simultaneously reconstruct the overall gas distribution and the local shock structure.

研究分野：銀河団

キーワード：銀河団 銀河団ガス スニヤエフ・ゼルドビッチ効果 X線 弱い重力レンズ効果 多波長ジョイント解析

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19(共通)

### 1.研究開始当初の背景

銀河団中の高温プラズマを銀河団ガスと呼び、X線で観測されてきた。しかし、ガス温度の測定には十分な光子数が必要であり、高い角度分解能で測定できない、複数のガス成分を空間的に分離できない、15keV以上の温度測定が困難である、という原理的な問題を抱えていた。

### 2.研究の目的

銀河団ガスと宇宙マイクロ波背景放射による逆コンプトン散乱であるSZ効果の観測技術の進歩はめざましく近年グリーンバンク電波望遠鏡のMU STANG-2によって約10秒の分解能を達成することができた。SZ効果のコンプトンパラメータはガス圧力を視線方向に積分した値に比例し、X線表面輝度はガス密度の2乗を視線方向に積分した値に比例する。ジョイント解析は、SZ効果の温度と密度の縮退を解き、ガスの温度分布をX線に対して20倍もの細かいスケールで明らかにできるだけでなく、先述した問題を一気に解決し、研究を新たなステージへと導くブレイクスルーになる。また、2030年代により高性能のSZ効果観測装置の開発が予想され、理論モデルの整備が必要不可欠と予想される。

### 3.研究の方法

観測的アプローチと理論的アプローチで研究を進める。複雑な銀河団ガスの理論モデルの整備には時間がかかるため、観測的アプローチでは、球対称ガスプロファイルを仮定して行う。理論モデルでは数値シミュレーションデータを使って行う。

#### ・観測的アプローチ

銀河団ガスの温度と密度の3次元球対称プロファイルを仮定し、複数のガス成分の重ね合わせで観測データの再現を試みる。SZ効果とX線データの2次元撮像イメージを使い、それぞれのガス成分の中心やプロファイルをパラメータにしフィッティングを行う。相補的な手法として1次元プロファイルを用いることによって、中心部のプロファイルを詳細に調べることを目的にする。また、弱い重力レンズデータや光学データ、シンクロトロン電波データなどの多波長データを用いて、銀河団ガスの様々な物理状態を調べる。

#### ・理論的アプローチ

本研究では天球面上に衝突している銀河団の数値シミュレーション(ZuHone et al. 2011)に対して解析モデルを作成する。暗黒物質の重力ポテンシャル中にある銀河団ガスの密度と温度分布をよく記述する一般化したNFWモデル(gNFWモデル)に衝撃波を記述するランキン-ユゴニオ関係式を導入し、全体のガス分布と局所的な衝撃波の構造を同時に再現することを目標にする。

### 4.研究成果

#### ・観測的アプローチ

論文を2本発表した。高角度分解能SZ効果のデータによって銀河団ガスの複雑な構造が明らかになった。特筆すべき結果は以下のとおりである。HSC J022146-034619ではSZ効果とX線ともにレギュラー分布をしている(図1;Okabe et al. 2021)。ジョイント解析から得られた結果は、X線の温度解析と一致していた。SZ効果とX線の残差マップ(図2;Okabe et al. 2021)には数値シミュレーションから期待されるようなパターンが見られた。

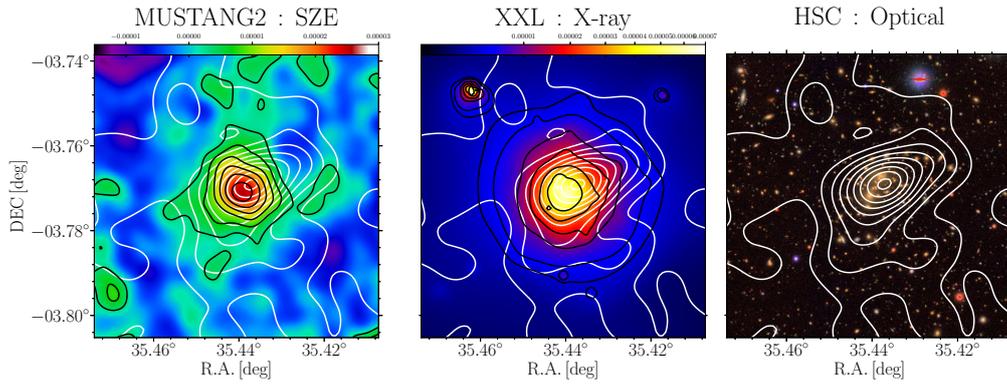


図1:左図:SZ効果マップ(MUSTANG-2)、中図:X線マップ(XMM-Newton)、右図:光学撮像データ(HSC) 白い等高線は銀河団銀河分布を表す。

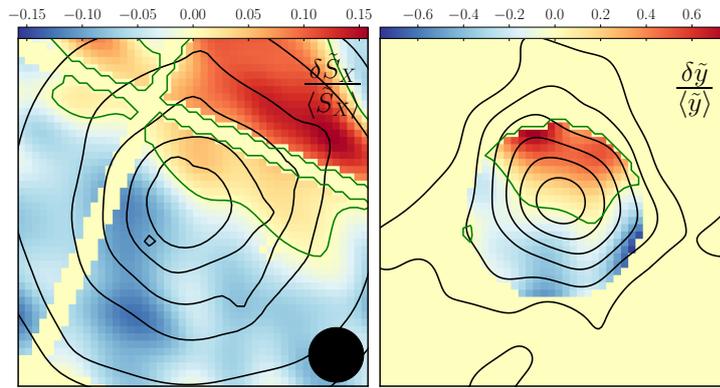


図2:残差マップ:左図はX線、右図はSZ効果の残差を表す。

HSC J023336-053022ではSZ効果はダブルピーク構造が見られたが、X線ではシングルピークであった(図3;Okabe et al. 2021)。ダブルピーク構造は銀河団銀河や弱い重力レンズ効果による質量分布とよく一致していた。ダブルピーク構造は密度が低く圧力が高いことから温度が高いことが期待される。3つの3次元球対称モデルを仮定するとダブルピーク構造に20-30keV程度の高温成分が存在することが示唆された。

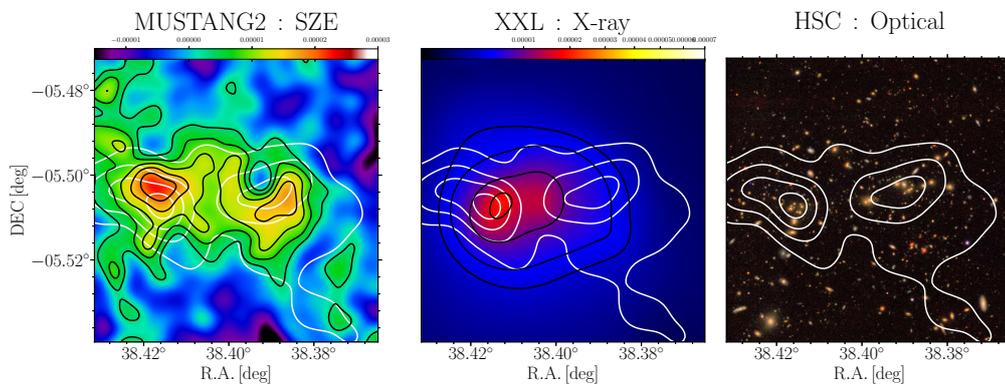


図3:HSC J023336-05302の結果。詳細は図1と同じ。

3つの銀河団でSZ効果、X線、弱い重力レンズ質量を比較することによって、銀河団衝突による銀河団ガスへの影響を衝突タイムスケールの関数として調べる事が可能になった(図4;Okabe et al. 2021)。より多くのサンプルに対して同様な研究を行うと、時間軸に対する衝突の変化を詳細に調べることができることを示した。

MUSTANG-2のSZ効果の新しいデータの取得は厳しい天候条件により未達成となった。新たなX線のデータは2回のプロポーザルに採択され現在までに1つの天体で観測が行われた。今後も観測される予定である。これらの取得したデータで次なるデータ取得への足がかりにしたい。

・理論的アプローチ

構築した理論モデルによって、シミュレーションデータで見られた全体のガス分布と局所的な衝撃波の構造を同時に概ね再現できることを確認した。本研究では最初の研究としてSZ効果のデータのみを使用した。X線とSZ効果への拡張は容易であるが、パラメータ数が2倍に増えるため今後の課題としたい。

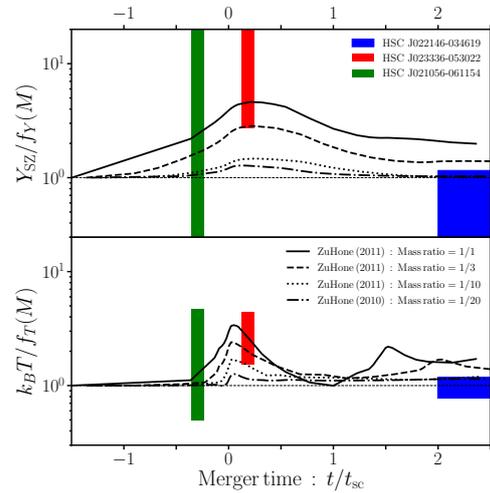


図4: 横軸は音波が銀河団を伝搬するタイムスケールで規格化した時間。上下パネルはそれぞれ、SZ効果と温度の変化を表す。線はシミュレーションによる結果を表し、赤、緑、青領域は今回の結果の1  $\sigma$  領域を表す。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件／うち国際共著 2件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Okabe, Nobuhiro, Dicker, Simon, Eckert, Dominique et al.	4. 巻 501
2. 論文標題 Active gas features in three HSC-SSP CAMIRA clusters revealed by high angular resolution analysis of MUSTANG-2 SZE and XXL X-ray observations	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 1701-1732
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/mnras/staa2330	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Kitayama Tetsu, Ueda Shutaro, Okabe Nobuhiro, Akahori Takuya, Hilton Matt, Hughes John P, Ichinohe Yuto, Kohno Kotaro, Komatsu Eiichiro, Lin Yen-Ting, Miyatake Hironao, Oguri Masamune, Sif?n Crist?bal, Takakuwa Shigehisa, Takizawa Motokazu, Tsutsumi Takahiro, van Marrewijk Joshiwa, Wollack Edward J	4. 巻 75
2. 論文標題 Galaxy clusters at $z \approx 1$ imaged by ALMA with the Sunyaev-Zel'dovich effect	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 311 ~ 337
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/pasj/psac110	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件／うち国際学会 0件）

1. 発表者名 岡部信広
2. 発表標題 Active gas features in three HSC-SSP CAMIRA clusters revealed by high angular resolution analysis of MUSTANG-2 SZE and XXL X-ray observations
3. 学会等名 日本天文学会2020年秋季年会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

多波長観測が描き出した、銀河団の衝突による超高温ガス  
<https://subarutelescope.org/jp/results/2020/11/12/2910.html>  
Complete Imaging of Cluster Collision  
<https://greenbankobservatory.org/imaging-of-cluster-collision/>  
Cosmic furnace seen by XMM-Newton  
[https://www.esa.int/ESA\\_Multimedia/Images/2020/11/Cosmic\\_furnace\\_seen\\_by\\_XMM-Newton](https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2020/11/Cosmic_furnace_seen_by_XMM-Newton)

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------