

# 精密 X 線分光観測による銀河団の進化と暗黒物質の探査

## Cluster dynamics and dark matter search using high energy resolution X-ray spectroscopy

宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所 田村隆幸  
派遣期間 2016年8月1日～2017年1月26日  
研究機関 Institute of Astronomy, University of Cambridge  
Madingley Road, Cambridge, CB3 0HA  
United Kingdom  
研究指導者 Prof. Andy Fabian

We have developed a new X-ray astronomical observatory, ASTRO-H/Hitomi, and launched in 2016 February, under international collaboration lead by JAXA. I study nature of the Universe by collaborating with Prof. Fabian and other scientists in Europe. He has led the observatory science observation planning. In his institute, we used ASTRO-H observation data to realize the following goals.

(1) Cluster dynamics: We reveal the interplay between the thermal energy of the intracluster medium and the kinetic energy of sub-clusters, to measure the non-thermal energy and chemical composition, and to directly trace the dynamical evolution of galaxy clusters. We investigated the Perseus core observation and developed the best analysis method.

(2) X-ray dark matter search: The high-energy resolution and wide-band energy coverage of Hitomi also provided a chance to resolve a signal from dark matter candidate particles. There are a number of reports of candidate X-ray signals possibly originated from dark matter. We tested these possibilities and further searched for a true dark matter signal using deep observations of clusters and galaxies. The high-energy resolution along with accurate plasma emission modeling and understanding instrumental background and calibrations are crucial to perform the dark matter search.

### 研究目的

宇宙の物質は、星、銀河、銀河団という階層構造を持つ。X線や重力レンズの観測により、銀河の周りや銀河団には星や高温ガスを合わせた総量より十倍以上もの質量を持つダークマターの存在が明らかになっている。銀河団以上のスケールでは、X線を放射する高温ガスが星の総量を超える。宇宙で最大の構造である銀河団には、高温のガスが、ダークマターの重力によって閉じ込められている。構造形成にともなう衝撃波やブラックホールによって銀河団ガスが加熱されたと考えられている。これらの宇宙で最大規模のエネルギー交換の現場は直接的にほとんど観測されていない。銀河団ガスの分布や力学状態をX線を用いて観測することで、宇宙の大規模構

造の形成と進化、さらにはダークマターの正体に迫る。そのため、2016年にJAXAが打ち上げたX線天文衛星ASTRO-Hの高精度のX線分光性能を用いる。第一に、銀河団ガスの運動を測定し、これまでは直接的に観測ができなかったガスの加速、衝撃波、さらには加熱を伴う構造形成の現場を捕らえる。X線天文学の国際的なリーダーであるケンブリッジ大学のFabian教授の研究室に滞在して、ASTRO-Hによるデータを協同で解析する。第二に、X線分光データを広い観点から見直し、ダークマターの探査に挑む。第三に、ASTRO-Hによって開拓されると期待されている宇宙の大規模構造の精密X線分光を中心として、X線天文学の将来計画とその戦略をヨーロッパの研究者と議論する。

## 銀河団ガスの運動測定

私は、X線ドップラー分光によるガス運動という新しい測定に着目している。銀河団がより小さな構造の衝突と合体で作られる過程には、100-1000 km/s以上の運動が伴うはずである。これまでの検出器では、エネルギー分解能が不十分でこのようなガス運動によるX線ラインエネルギーの偏移の測定は難しかった。我々は、「すざく」衛星の優れた分光性能を活かし、衝突途中の銀河団において、1500 km/sの速度を持つ運動を世界で初めて実測した。これらを発展させ、ASTRO-H衛星を用いて、銀河団ガスの運動を実測する。

宇宙年齢に近い時間をかけて、衝突と合体を繰り返し成長してきた銀河団を観測し、その形成の歴史をひも解く。構造形成の現場を実測し、銀河団内のエネルギー分布を完全に理解する事で、ダークマターの質量分布を正確に測る。それによって、宇宙論、特に物理学の最大の謎である宇宙のダーク成分の実証に貢献する。

## X線によるダークマターの探査

X線分光データを広い観点から見直し、ダークマターの探査に挑む。これまで、ダークマターの候補としては、超対称性粒子やアクシオンなどが有力とされ、地上での直接探査や加速器での生成が試みられてきた。しかし、未だ発見されておらず、あらゆる可能性の探査が求められている。ダークマターがkeV程度(電子の1/100程度)の質量を持っていると、その崩壊によりX線を放射する可能性が高い。例えば、「ニュートリノの振動」と「宇宙でのバリオン生成」を同時に説明する「最少ニュートリノモデル」の中で提案されている「軽い右巻きニュートリノ」がその候補の一つである。これらの候補は、「弱い相互作用」(重力、電磁気力、「強い力」と並ぶ現在の物理学で理解されている4つの力のうちの一つ)より相互作用が弱く、地上での検出は困難を極める。唯一の検証が、宇宙の大規模構造に集まったダークマターからの信号探査である。

これまでの観測から分かるように、宇宙ダークマターからのX線は、極めて弱く、その検出は困難を極める。理論的にも、その強度やエネルギーを特定することは難しい。本研究では、ASTRO-Hの性能にユニークな観測、解析手法を組み合わせ、ダークマ

ターの探査に挑む。ASTRO-Hの高いエネルギー分解能によって、より高い信号・バックグラウンド比が期待できる。さらに、輝線のエネルギーを狭い範囲に特定できるので、天体プラズマや検出器のバックグラウンドとの切り分けがより明確になる。ダークマターX線の空間分布、強度、ドップラー速度、さらに輝線の幅(速度分散)は、天体毎の特徴を持つはずである。これらによって、信号の起源(ダークマターあるいはプラズマ)を明確にする。

## 研究経過

本研究では、JAXAのX線天文衛星ASTRO-Hを用いて宇宙の大規模構造を観測する計画であった。この衛星は、2016年の2月に種子島から打ち上げられ、「ひとみ」と名付けられました。打ち上げ後、衛星の動作確認試験が実施された。しかし、3月に衛星の異常が発生し、衛星との通信が途絶え、運用の継続が困難になった。本研究では、特にASTRO-Hによる銀河団の観測データを解析する計画であった。

幸いに、衛星の試験期間中に、我々が観測を提案してきた「ペルセウス」銀河団を観測できた。

私は、予定通り2016年の8月よりケンブリッジ大学での研究を始めた。研究内容は、提出済みの計画書に述べたように以下を進めた。

(1) 銀河団ガスの運動測定。ケンブリッジ大学のFabian教授、ポスドク研究者であるCiro Pinto, Helen Russellらと共同でデータ解析を中心に進めた。X線のスペクトルを解析するための手法を確立した。

(2) X線によるダークマターの探査。衛星の運用停止の影響もあり、本解析は、予定より早く進めた。アメリカや日本の研究者らと共に、初期的なデータ解析を行い、成果は、論文として投稿した。

なお、計画書で述べた(3)ASTRO-H観測計画の立案については、衛星の運用が継続できない状況になり、実施できなかった。これに代わりFabian教授らのヨーロッパの研究者とともに、ヨーロッパのX線衛星XMM-Newtonを使った観測提案を検討した。これに基づき、2016年の10月に観測提案を提出した。

2016年の11月には、広島大学から若い研究者をケンブリッジ大学に迎え、本研究を加速させた。また、12月にオランダの研究機関(SRON)を訪問し、共同研究、及び交流を深めた。計画通り、2017年の1月までケンブリッジ大学で共同研究を進めた。

## 考察

以下は、申請者、派遣先の受け入れ教授を含む国際チーム(ひとみコラボレーション)による成果である。

### (1) 銀河団ガス運動の測定

銀河団は、宇宙の中で最も巨大な自己重力系であり、現在も成長の途中である。したがって、宇宙論パラメータの決定や構造形成の物理の重要な観測天体である。X線を放射している銀河団ガスの力学状態を調べることで、銀河団中心の巨大ブラックホールからの運動エネルギーの注入を理解する。また、銀河団ガスで静水圧平衡の仮定の妥当性を検証する。

「ペルセウス座」銀河団の中心からのX線は、重力ポテンシャルに捉えられて五千万度の高温プラズマから出ている。銀河の分布からダークマターの重力による構造形成が示唆され、それに付随したガスの運動も予想される。中心の銀河(NGC1275)の銀河核が周りのガスにジェットによってエネルギーを注入し、相対論的な粒子に満たされた泡状の構造(巨大バブル)を作り出している。この巨大バブルによって、ガスの運動が引き起こされ、内部のガスが加熱され、それによって、放射冷却による暴走的なガス収縮が抑えられていると考えられている。これは、宇宙における最大規模の「銀河フィードバック」と呼ばれている。この銀河団を「ひとみ」衛星によってX線観測した。その結果、中心から半径30-60 kpcの領域では、ガス運動の視線方向での速度分散が、160 km/s程度であることを測定した。すなわち、中心部のガスが予想外に「静かな」環境であった。加えて、同じ領域での、ガス運動のドップラー速度には、150 km/s程度の分布(バルクな運動)を持っていることを測定した。速度分散の測定から、ガスの乱流による圧力が、熱的な圧力の数%しかないことがわかる。これに、バルクなガス運動の分を加えても、二倍程度にしかならない。この結果は、少なくともこの銀河団の中心部では、乱流が小さく静水圧平衡から決まる重力質量の推定には、誤差が無視できることを示している。

### (2) ペルセウス銀河団からの3.5keVラインX線の探査

Bulbul et al. (2014)らは、多数の銀河団のX線スペクトルを足し合わせたデータから、プラズマ起源では説明できない未同定ラインを3.5keV付近に検出した。この信号の起源として、ダークマター候補の仮想粒子の一つである「ステライルニュートリノ」が検討されてきた。別の研究グループからも、銀河団及び銀河から同じエネルギーの信号が検出されたという報告もある。その中でも、最も強い信号がペルセウス銀河団から検出されたと報告されている。ただし、これまでの測定は、全てCCDによるもので、エネルギー分解能が不十分(~100 eV程度)で、非常に弱い信号を分光検出できていない。我々は、5eV程度のエネルギー分解能を持つ「ひとみ」衛星のカロリメータによってこの銀河団を観測し、高精度なX線スペクトルを世界で初めて取得した。3.5keV付近の未同定ラインを探査し、信号は検出されなかった。その上限値は、過去の検出値を99%以上の信頼度で棄却する。3.5 keVラインの起源として、硫黄イオンの電荷交換反応によるという提案(Gu et al. 2015)もある。これらの起源の判別についても議論をおこなった。

### (3) 発展研究

以上の成果を発展させる形で、以下のような詳しいデータ解析を実施している。

(a) 最近の検出器較正情報やすべてのデータを用いたガス運動の測定。

(b) 高精度のラインX線分光を用いた温度構造の調査。

(c) 鉄に加え、これまで測定が難しかったケイ素、硫黄、クロム、マンガンなどの元素量の測定。

## 研究の発表

口頭発表

- 「ひとみ」によるペルセウス銀河団からの3.5keVラインX線の探査、日本天文学会年会、九州大学、2017年3月

誌上発表

- Hitomi collaboration, “Hitomi Constraints on the 3.5 keV Line in the Perseus Galaxy Cluster”, ApJ Letter, Vol. 837, No.1