

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 22 日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24540243

研究課題名(和文) エックス線分光による銀河団ガスの運動測定

研究課題名(英文) X-ray spectroscopic study of cluster gas dynamics

研究代表者

田村 隆幸 (Tamura, Takayuki)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・助教

研究者番号：00370099

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,200,000円

研究成果の概要(和文)：「すざく」の性能を極限まで引き出すため、検出器の較正を行った。また、ガスのバルクな運動の解析手法を開発した。特に明るい銀河団について、ガスの運動の空間分布を調べた。これらのX線放射は、CCDの視野の数倍に広がっており、マッピング観測が行われている。各視野ごとにデータを積分し、それらの「zの差」を測定した。我々が開発した解析手法を用いて、われわれの近くにあるX線で最も明るい銀河団ペルセウスのデータを系統的に解析し、バルク運動の空間分布を測定した。銀河団の広い領域にわたり、600 km/sの精度で速度構造に制限をつけることができた。

研究成果の概要(英文)：Galaxy clusters are the largest and youngest gravitationally-bound cosmic structure. As the structure forms, gravitational potential governed by dark matter pulls and thus heats the ICM through shocks. Gas bulk or turbulent motions can be measured directly using the Doppler shift or by broadening of X-ray line emissions. However, the limited energy resolutions of current X-ray instruments continues to hinder such measurements. In order to measure the ICM gas dynamics directly, we observed the Perseus and other clusters with Suzaku. A hint of gas bulk motion, with radial velocity relative to the main system was found at west of the cluster center, where an X-ray excess and a cold front were found previously. No other velocity structure was discovered. These results of gas dynamics in the core and larger scales in association with cluster merger activities are discussed and future potential of high-energy resolution spectroscopy with ASTRO-H is considered.

研究分野：宇宙物理学

キーワード：銀河団 X線観測 暗黒物質

1. 研究開始当初の背景

銀河団の衝突と合体は、宇宙で最大の力学現象の一つである。このような構造形成のなかで、暗黒物質の重力エネルギーが、ガスと銀河の運動を經由して、ガスを加熱し宇宙線を加速する。われわれは、X線衛星「すざく」を用いて合体途中の銀河団 A2256 を観測した。その結果、X線ラインの赤方偏移を用いて、合体にともなうガスのバルクな運動を世界で初めて実測した。この新しい手法を多くの銀河団で利用し、ガスの運動を系統的に測定する。それによって、衝突と合体の物理を理解し、その力学を支配している暗黒物質の分布を制限する。

2. 研究の目的

(1) 研究の背景 - 「すざく」による銀河団ガスのバルク運動の検出

宇宙の構造は、小さな系が衝突と合体を繰り返し階層的に作られたと考えられている。その力学は、暗黒物質の重力に支配されている。一方、われわれが観測できるのは、ガスや銀河の分布や運動である。これまで銀河団の力学を調べるためには、主にメンバー銀河の速度分布が用いられてきた。それによって、まだ緩和していない成長途中の「合体銀河団」も見つかっている。X線の観測によって銀河団の合体の様子がより具体的に見えはじめています。例えば、チャンドラ衛星による高分解能画像で、衝撃波や接触不連続面が見えはじめ、ガスが音速に近い速度で動いていることが示唆されている。これらの画像解析は、視線方向に垂直な運動に敏感であるが、実際の運動の方向には不定性が残っている。

(2) 目的

ガスの運動を測るもっとも直接的な方法は、X線ラインの赤方偏移を用いるものである。しかし、これまでの検出器のエネルギー分解能が不十分で、予想されるエネルギーシフトの測定は難しかった。われわれは、「すざく」を用いて銀河団 A2256 を長時間にわたり観測した。注意深い解析の結果、この二つの構造の間に、1500 km/s の速度差を検出した。同時に、二つのガス構造のそれぞれの速度が、メンバー銀河の速度と誤差の範囲で一致することを明らかにした。これは、世界で初めての銀河団ガスのバルクな運動の直接検出である。これは、「すざく」に搭載されたX線検出器(CCD)の感度およびエネルギー決定の精度が優れていることで可能になった。

銀河団ガスの運動を実測することは、宇宙の大規模構造の形成を理解し、それを支配している暗黒物質の分布を制限するために必要なステップである。

われわれは X線分光によるガス運動の測定という新しい手法を開拓する。この手法は、2015 年度に打ち上げ予定の ASTRO-H 衛星に搭載されるカロリメータ検出器の主目的

の一つであり、大きな発展が期待されている。その観測計画およびデータ解析手法を最適化するために、本研究は重要な基礎データを与える。実際、代表者と連携研究者は、ASTRO-H 計画に参加し、銀河団の観測計画およびデータアーカイブの設計を担当している。

3. 研究の方法

「すざく」の性能を極限まで引き出すため、検出器の特性を理解し、その較正を徹底的におこなう。「すざく」は、打ち上げ後6年が経過し、較正のためのデータと知識が蓄えられている。連携研究者の林田をはじめとする「すざく」CCD チームと協力し、銀河団の解析に適した較正をおこなう。われわれは、「すざく」による銀河団解析で世界をリードしてきた。また百以上の銀河団のデータアーカイブが公開されている。世界に先駆けてこの機会を利用し、われわれが実証した新しい手法を多くの銀河団に系統的に適用する。これによって、銀河団ガスの運動を徹底的に調べ、先にあげた3つのゴールを達成する。さらに、ガス運動の測定を銀河団の他の観測と比べ、その相関を明らかにし銀河団の形成を総合的に理解する(図1)。

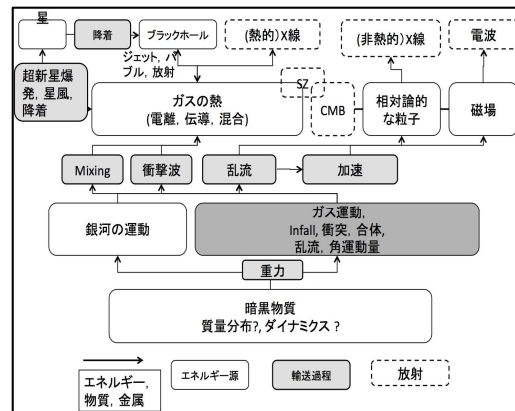


図 1: 本研究で理解を目指す、銀河団でのエネルギー相互作用

(1) 検出器の較正

検出器の較正のうち、特に CCD のエネルギー決定精度は、わずかな赤方偏移の差を調べるのに不可欠である。これまでに得られた大量のデータを使い、銀河団という広がった天体での解析に最適化した較正をおこなう。鉄の X線ラインに対して、0.1%(300 km/s)の精度をめざす。較正の成果は、本研究だけでなく、汎用的にかつ長い期間にわたり世界中の「すざく」データ利用者の役に立つ。

(2) 銀河団の X線赤方偏移の系統系測定

われわれは、X線を用いて赤方偏移を測定するという新しい手段を手に入れた。この手法は、まだ A2256 を含む数例にしか使われていない。いっぽう、「すざく」は、すでに百個以上の銀河団を観測している。このうち、お

およそ 25 個および 50 個は、X 線で A2256 より明るい、もしくはその半分より明るい。これらについては、十分な精度で赤方偏移の測定ができる。単一の構造を持つ場合は単一の赤方偏移を、A2256 のように複数の構造を持つ場合には、それぞれについて赤方偏移を測る。これによって、世界ではじめて「銀河団ガスの赤方偏移」カタログを作成する。われわれや他の研究者は、すでに「すざく」を用いて、いくつかの銀河団でガス運動の測定を試みている(e.g. Ota et al. 2007)。これらのデータも最新の較正結果を用いて、再び解析する。これまで、銀河団の赤方偏移は、限られた数のメンバー銀河の赤方偏移の平均値を使って見積もられてきた。ただし、メンバー銀河の同定は不定性が大きい。また、合体銀河団の多くでは、銀河が非対称な分布を持っており、その中心を決める事が難しい。これに対して、X 線を用いる方法は、重力ポテンシャルの真の中心を独立に測ることができる。特に完全に緩和した系では、ガスと銀河の赤方偏移は同じと予想される。しかし、実証されてはいない。両者にずれがある系が発見できるかもしれない。

実際に、いくつかの銀河団では、中心銀河の赤方偏移がシステム全体に対してずれている(e.g. Bird 1994)。また、いくつかでは、中心銀河がガス分布の中心から離れている。これらは、中心銀河がポテンシャルの底にとどまっていなかったことを示している。このような系で、ガスが中心銀河と一緒に動いているのか、あるいは銀河団全体と同期して動いているのかを明らかにする。

(3) バルク運動の探査

いくつかの合体途中にある銀河団で、ガス運動を集中的に調べる。これらからは、1000 km/s 以上の速度差を持つ複数の巨大銀河や中心銀河の特異運動が見つかった。ガスも同程度のバルクな運動をしている可能性が高い。これらはすべて、X 線で A2256 より明るい。また、すでに「すざく」で長時間の観測がおこなわれ質の高いデータが取られている。したがって、少なくとも数例のガス運動を検出し、その存在を証明することができる。これらの大部分は、「チャンドラ」によってガスの接触不連続面(cold front)が見つかっており、サブ構造の速度が見積もられている。ただし、運動の方向に不定性がある。「チャンドラ」の結果に、X 線による赤方偏移、すなわち視線方向の速度の測定をあわせることで、実際の三次元での運動を制限できる。もしかしたら、ガス運動が予想以上に小さく、有為な検出ができないかもしれない。その場合は、ガスと銀河が全く異なった運動をしていることを見いだしたことになる、ガスの運動を抑制する何らかの物理を新たに考える必要が出てくる。これらの X 線放射の大部分は、CCD の視野内に収まる。したがって、エネルギー決定精度については、視野内

での場所依存性が重要である。

4. 研究成果

「すざく」の性能を極限まで引き出すため、検出器の較正を行った。検出器に備え付けの較正線源や X 線で明るい銀河団ペルセウスのデータを用いて、特に、エネルギー決定精度の時間および検出器上の場所依存性を調べた。また、ガスのバルクな運動の解析手法を開発した。これらを用いて、われわれの近くにあり X 線で明るい銀河団の 20 個程度のデータを系統的に解析し、バルク運動の空間分布を測定した。特に明るい銀河団について、ガスの運動の空間分布を調べた(図 2)。

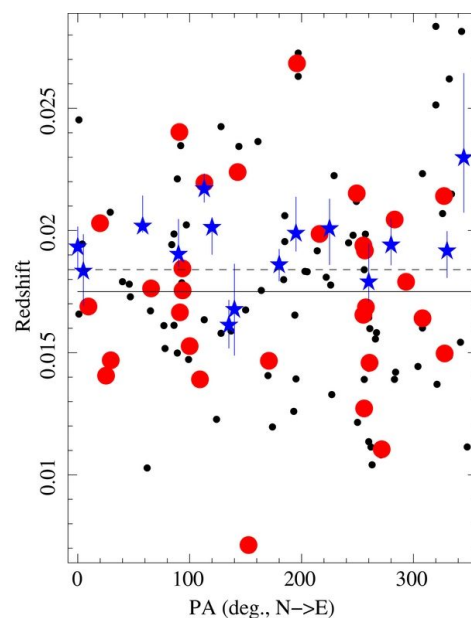
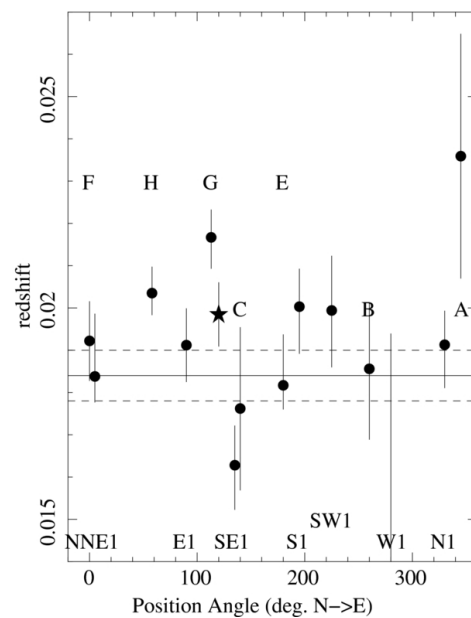


図 2: 銀河団におけるガス運動(赤方偏移)の測定結果。詳しくは、Tamura et al. 2014 を参考の事。

さらに、それぞれの銀河団について、ガスの運動に関係していると思われる可視光で測定されたメンバー銀河の運動についても、空間分布を解析している。これらは可視光での深いサーベイ観測により、メンバー銀河の速度構造が独立に測定されており、いくつかのサブ構造が見つかっている。このようなサブ構造を集中的に観測し、銀河とガスの運動を比べた。これらのX線放射は、CCDの視野(17' x 17')の数倍に広がっており、マッピング観測が行われている。各視野ごとにデータを積分し、それらの「zの差」を測定した。

我々が開発した解析手法を用いて、われわれの近くにあるX線で最も明るい銀河団ペルセウスのデータを系統的に解析し、バルク運動の空間分布を測定した。その結果、銀河団の広い領域にわたり、300-600 km/sの精度で温度構造に制限をつけることができた。これによって、重力質量の測定の精度を高めることができる。さらに、銀河団の中心領域において、小さなスケールでのガスのバルク運動を発見した。これは、リラックスしたように見える天体では初めての発見である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 2 件)

Tamura, Takayuki; Iizuka, Ryo; Maeda, Yoshitomo; Mitsuda, Kazuhisa; Yamasaki, Noriko Y.

An X-ray spectroscopic search for dark matter in the Perseus cluster with Suzaku
Publications of the Astronomical Society of Japan, Volume 67, Issue 2, id.2316, 2015
DOI: 10.1093/pasj/psu156

Tamura, T.; Yamasaki, N. Y.; Iizuka, R.; Fukazawa, Y.; Hayashida, K.; Ueda, S.; Matsushita, K.; Sato, K.; Nakazawa, K.; Ota, N.; Takizawa, M.

Gas Bulk Motion in the Perseus Cluster Measured with Suzaku
The Astrophysical Journal, Volume 782, Issue 1, article id. 38, 15 pp. 2014
DOI: 10.1088/0004-637X/782/1/38

〔学会発表〕(計 2 件)

日本天文学会, 年会
2014年9月,
「ペルセウス銀河団からの暗黒物質X線の探査」, 田村隆幸, 山形大学

日本天文学会, 年会
2013年9月,
「Perseus銀河団のガスの運動の測定」, 田村隆幸, 東北大学

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕
なし

〔その他〕
ホームページ等

<http://tamura-job-log.blogspot.jp/search/label/a2256>

<http://tamura-job-log.blogspot.jp/search/label/perseus>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田村 隆幸 (Tamura, Takayuki)
宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・助教
研究者番号: 00370099

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

林田 清 (Hayashida, Kiyoshi)
大阪大学理学部・准教授
研究者番号: 30222227

北山 哲 (Kitayama, Tetsu)
東邦大学理学部・教授
研究者番号: 00339201