

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 20 日現在

機関番号：32686

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25400237

研究課題名(和文) 銀河団の暗黒物質の直接測定の可能性の研究

研究課題名(英文) Feasibility Study of a Direct Measurement of Dark Matter Distribution in Galaxy-Clusters

研究代表者

北本 俊二 (KITAMOTO, Shunji)

立教大学・理学部・教授

研究者番号：70177872

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、2015年度のASTRO-H衛星の打ち上げにより始まる、超高エネルギー分解能で広がった天体をX線観測できる新しい時代に先駆けた準備研究として、暗黒物質探査の可能性の評価を目指したものである。銀河団を超高エネルギー分解能で観測することで、今までとまったく独立な方法で、銀河団の重力分布、従って暗黒物質の分布を測定できる事を示した。また、ASTRO-H衛星に搭載する観測装置SXSの開発性能試験に参加貢献し、打ち上げ後に予定通りの5eV以下のエネルギー分解能を持つという高い性能を確かめた。

研究成果の概要(英文)：The soft X-ray spectrometer (SXS) on board ASTRO-H, which had been launched on 17 Feb. 2016, opened a new research field with its extremely high energy-resolution for diffuse extended celestial objects. In this work, we investigated a completely new method for estimation of dark-matter distribution in galaxy-clusters, which is a measurement of the spatial distribution of gravitational red shift, by computer simulations with a realistic response function of the SXS. We concluded that a reasonable observation could make the new method to be possible. Also, we took part in the pre-flight function test and the calibration of the SXS. We confirmed that SXS achieved the high energy-resolution less than 5eV (FWHM) in flight operation.

研究分野：数物系科学、天文学

キーワード：銀河団 ダークマター マイクロカロリメータ 重力赤方偏移

### 1. 研究開始当初の背景

本研究では、銀河団に存在する暗黒物質(ダークマター)の分布や量を、いままでの手法とはまったく異なる方法で測定できる可能性を検討する。もしここで提案する新しい方法での暗黒物質の分布や量が測定できれば、銀河団が作る重力レンズ効果や銀河団中の高温ガスの静水圧平衡の仮定により導かれる暗黒物質の分布や量と比較することで、暗黒物質の存在の是非を一層明確に示す事ができる。また、仮りに、矛盾する様な結果が出るようなら、現在の宇宙論を根底から覆す結果となり、そのインパクトは計かり知れない。本研究では、原理は非常に単純であるが、今までとはまったく違う方法で、暗黒物質を探查する方法を検討する。

特に、本研究では日本の第6番目のX線天文衛星として、2014年度中に打ち上げ予定(実際には2016年2月に打ち上げ)のASTRO-Hに搭載されるマイクロカロリメータ(SXS)による観測を想定していた。SXSは超高エネルギー分解能で銀河団の様な広がった天体を観測できるこれまでに無い装置である。そして、この検討により、ASTRO-H衛星で充分検出できる可能性があれば、観測提案をする予定であった。一方、ASTRO-H衛星では、まだ、集光能力が限られているし、将来の衛星ではエネルギー分解能もさらによくする可能性もある。そこで、仮にASTRO-H衛星では難しいとしても、どれくらいのエネルギー分解能と集光能力でどれくらいの時間観測すれば、暗黒物質の分布や量を知ることができるかを、シミュレーションにより評価することは、将来計画を考える上で非常に有用な結果となる。また、ASTRO-Hに搭載するSXSは、日本と米国、ヨーロッパの共同開発の装置であるが、この装置は日本の冷凍技術無くして成り立たない、日本がリードする重要な装置である。この装置により、インパクトの非常に大きい科学的成果をあげることは、日本の使命であった。また、ASTRO-Hでできなくても、日本がリードする低温技術を使った同種のより集光能力の高い、エネルギー分解能の優れた将来衛星での観測も視野に入れて本研究を遂行した。

本研究で、提案する銀河団重力ポテンシャルの測定方法は次の様な、非常に単純明解な方法である。それは、銀河団のいろいろな場所で輝線の重力による赤方偏移を測定することで、重力ポテンシャルの分布を測定するというアイデアである。これは、ASTRO-Hに搭載するSXSのエネルギー分解能をもって始めて実現可能となる。その理由は、ふたつある。ひとつは、SXSの超高エネルギー分解能で輝線のエネルギーの決定精度が格段に高くなる事である。ASTRO-H衛星のSXSではエネルギー分解能は4~5eV(FWHM)を達成できた。従って、単純に考えると100光子集めることで0.5eVの中心決定精度が可能である。この決定精度は、銀河団の重力ポテンシャルによる赤

方偏移を測定できる値である。もうひとつは、輝線が微細構造まで分解できるために、1本1本を電子の遷移と対応付けることができる事である。すなわち、今までは、たくさんの輝線が混ざって観測されていたため、原子のイオン化状態や放射過程の違いにより、中心エネルギーが変化しても、それを輝線の混合比の変化なのか、エネルギー偏移なのか、区別できなかった。SXSでは、電子の遷移を特定できるために、原子のイオン化状態や放射過程の違いにかかわらず、元のエネルギーがわかり、従って、重力赤方偏移によるエネルギーの偏移を正確に測定することができる。

### 2. 研究の目的

銀河団の重力ポテンシャルの測定では、エネルギーの偏移は重力ばかりでなく、ガスの運動にも大きく影響する事が懸念事項である。合体しているような銀河団では、系統的に運動するガスによるドップラー効果があるであろう。また、クーリングフローのような現象が実在するなら、中心にガスが流れるドップラー効果も存在する。熱運動や乱流により、輝線そのものがある程度自然幅を越えて太くなる。もちろん、これらすべては、SXSによる観測で初めて明らかになることであるので、それ自体がたいへん科学的に重要な結果である。しかしながら、本研究には、むしろ邪魔になる。

そこで、本研究では

- (1)これまで観測により推定されている重力ポテンシャルやガス分布を仮定して、重力赤方偏移によりどの程度のエネルギー偏移が観測されるか推定する。そのとき、銀河団の奥行き方向の射影効果が重要であるので計算機シミュレーションを行う。
- (2)奥行き方向の射影効果で、重力赤方偏移を受けた輝線がどのような形状になるか、計算機シミュレーションを行う。
- (3)銀河団のクーリングフローとの切り分けの可能性の検討を行う。
- (4)銀河団の合体等がどれくらい影響があるのか検討を行う。
- (5)ASTRO-H SXSの較正試験に参加して、正しい性能を把握する。また、より性能向上の方法を検討する。
- (6)ASTRO-H SXSの正しい性能で、重力赤方偏移の観測測定の可能性を検討する。
- (7)ASTRO-H SXSよりさらに高性能の検出器を想定して、重力赤方偏移を観測測定するために必要な集光面積と観測時間、さらにはエネルギー分解能を検討する。

### 3. 研究の方法

これまでのX線による観測結果を静水圧平衡を仮定して導出されている質量分布(e.g. Ikebe et al. 1999, ApJ, 525, 58)からどの程度の赤方偏移が期待されるかの計算を行い、観測の可能性を推定する。大雑把な結果では、中心ではおよそ0.0083%の赤方偏

移となる。鉄のK輝線の場合は0.56 eVである。この数字は ASTRO-H のSXSでは、100個の光子を集めることで検出できる値である。また、観測は、銀河団の周辺部と中心部での相対的な違いを測定することが最も重要であり、絶対値の決定精度はとりあえず不要である。もちろん、絶対値がわかれば、我々の住む地球とのポテンシャルの差となるので、それはまた、非常に重要な結果となる。このように、単純な評価では、ASTRO-H の SXSで測定できそうである。そこで、本課題の研究方法を次のように具体化した。

(1) 計算機シミュレーションによる、銀河団で、観測される重力赤方偏移の見積りを行う。特に、射影効果により、なまされる効果と、輝線の形状を調べる。熱ドップラー効果も考慮する。

(2) 巨視的運動のいくつかの場合を想定し、その効果が、どの程度影響するかを計算機シミュレーションで調べる。

(3)SXSの機能試験、較正試験に参加し、実データの解析にも参加する。そして、SXSの特性と性能を十分に理解する。そのため、SXS 製作の主担当であり、SXS 単体での試験が行われる住友重機械工業や、衛星の主たる試験を行う、JAXA(相模原,つくばの両方)に出張する必要がある。そして、SXS の応答関数の構築に貢献する。可能であれば、性能向上の方策を考える。

(4)可能な範囲で精度の高いSXSの応答関数を用いて、銀河団での重力赤方偏移の観測のシミュレーションの精度を上げる。

(5)SXSで観測した銀河団のデータを解析し、暗黒物質の存在,量,分布の検討を行う。

(6)将来衛星を睨んで、充分な重力赤方偏移を測定するために必要な、面積,観測時間,エネルギー分解能をシミュレーションによる考察をする。

#### 4. 研究成果m

(1) 計算機シミュレーションによる、銀河団で、観測される重力赤方偏移の見積り

すざく衛星のXISにより、ペルセウス銀河団を観測したデータから、ASTRO-H衛星(SXS)の視野角は $3' \times 3'$ のデータを抽出し、そのエネルギースペクトルと強度を確かめた。図1がすざく衛星のXISによるエネルギースペクトルである。このエネルギースペクトルを光学的に薄い衝突電離平衡の高温プラズマ(apec)に星間吸収のモデルを考慮したモデルでフィッティングして、ペルセウス銀河団からのX線放射モデルを決定した。

モデルスペクトルが決定できたので、ASTRO-H SXS のレスポンス関数を使い、ペルセウス銀河団の中心部分を100ks観測した場合に、期待されるエネルギースペクトルをシミュレーションで求めたものが図2である。さらに、図2の鉄K輝線を含むエネルギー範囲を拡大して図3に示した。

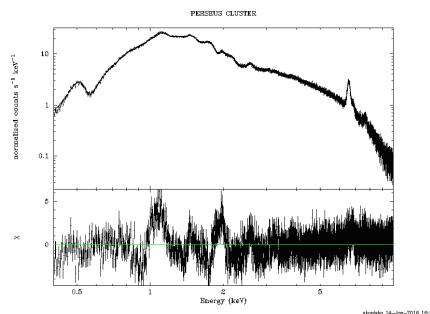


図1. すざく衛星のXISによるペルセウス銀河団のスペクトル(wabs x apec でフィッティングしたもの)

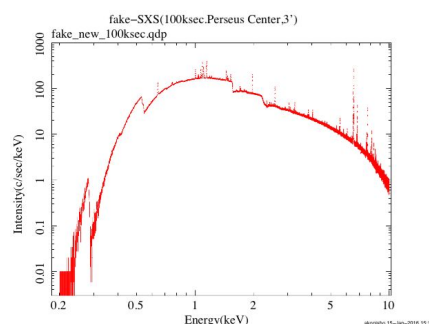


図2. Astro-H SXS で観測されると期待されるエネルギースペクトル。ペルセウス銀河団の中心部を露光時間100ksと仮定した。

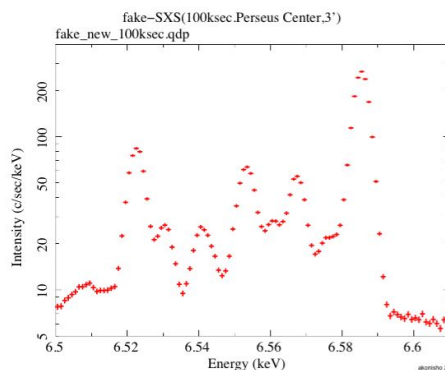


図3. 図2のエネルギースペクトルのうち、鉄のK輝線を含む部分を拡大した図。

このように、SXSで観測すれば鉄K輝線を各遷移に分離することができるということがわかる。従って、イオン化状態等も含めて各輝線を遷移と対応させることができる。すなわち、輝線のエネルギーの変移を測定することがはじめてできるようになる。

次に赤方偏移を求めるために、質量分布の推定値が必要である。そこで、Ettori et al. (1998)による、静水圧平衡を仮定して求めた分布を使用した。図4は、中心からの半径に対する赤方偏移の割合である。中心から0.5Mpcのあたりでは $E/E \sim -8.0E-05$ なので鉄K輝線( $\sim 6.7\text{keV}$ )の場合、およそ0.5eVのエネルギー偏移が期待できる。

しかしながら、実際には、視線方向に投影したガスを全て積分した結果しか観測することはできず、中心からの距離に対する赤方偏移量を求めることは不可能である。そこで、

簡単のために等温と仮定し、ガスの密度分布は、Churazov et al (2003)によって、X線の輝度分布から求めた推定値を使用すれば、各点の鉄 K 輝線の放射強度を計算できるので、これにより、実際の観測として視線方向に積分した結果のエネルギースペクトルを計算できる。

図5はペルセウス銀河団の中心、および、中心から 5.7' 離れたところを観測した場合に期待される鉄 K 輝線のエネルギースペクトルである。輝線の中心エネルギーのわずかな偏移が測定できそうであることがわかる。

当初は、この積分効果が、特徴的な輝線形状を生み出すことを期待したが、実際の所、中心に近いほど輝線強度が著しく強く、特徴的な形状を測定することは SXS では無理であることが導かれた。

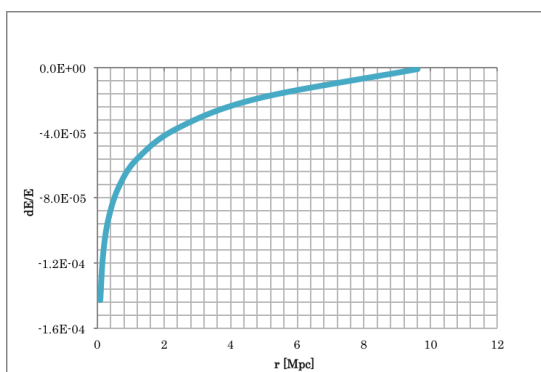


図4. ペルセウス銀河団の中心からの半径に対する重力赤方偏移によるエネルギー偏移の割合。

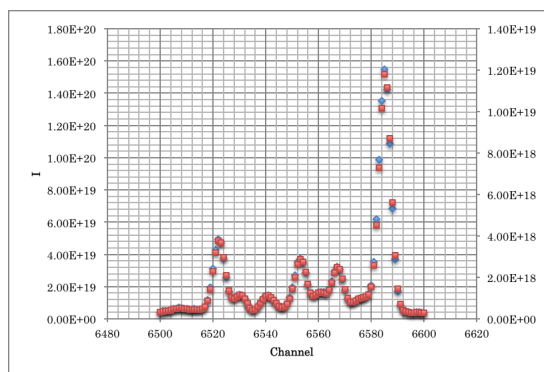


図5. 中心部分の射影の効果（青）と 5.7' 離れたところの射影の効果（赤）

## (2) 他の効果との関係

輝線のエネルギー偏移を起こす原因は、重力赤方偏移だけではなく、ガスの動きによるドップラー効果がある。重力の赤方偏移で期待できるエネルギー偏移は、およそ  $8 \times 10^{-5}$  である。この大きさのドップラー効果は  $2.4 \times 10^6$  cm/sec (24km/sec) の速度で生じる。したがって、この程度の速度が観測で導かれた場合は、重力による赤方偏移の寄与を見積もり、補正する必要がある。

なお、銀河団で考えられる、マクロなガスの流れの一つはクーリングフローである。銀河団が光学的に薄い限りは、視線方向内で赤方偏移と青方偏移が同時に観測されるため、中心の偏移は期待されないので、分離可能である。合体中の銀河団でガスの流れは、個々の銀河団により異なるので結論は一意に示すことは難しいが、一般に球対象ではありえない。従って、赤方偏移の球対象成分を抽出することができれば、重力赤方偏移を調べることが可能と期待できる。

## (3) SXS の性能の向上への貢献

本研究の遂行の間、ASTRO-H の打ち上げ前準備は順調に進み、SXSは、衛星に組み込んだ状態での機能試験を行った。そこで、振動、特に冷凍機で用いるコンプレッサーの振動が、SXSに伝道し、エネルギー分解能の低下が発見された。その後、各種機器の振動等の影響を十分に詳しく解析し、JAXA, NASAとの協力で、影響を小さくする方策をとってコンプレッサーに振動減衰機を加えることで、目標のエネルギー分解能を達成できるようになった。その結果、エネルギー分解能は5eVを切る程度になった。またその応答関数も構築できた。このエネルギー分解能は、打ち上げ後も、ほぼ同程度であることが確かめられた。図6に打ち上げ後にSXSの較正ピクセルで取得した55FeからのMn-KX線である。K<sub>1</sub>、K<sub>2</sub>の両方が期待通り分離できていることが確かめられた。求めたエネルギー分解能は5eV(FWHM) である。

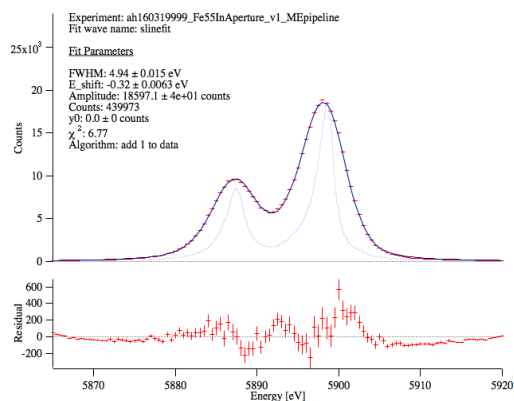


図6. 打ち上げ後えられた Mn-K 輝線のエネルギースペクトル。エネルギー分解能は 5eV (FWHM) である。

## (4) 重力赤方偏移を観測測定するために必要な集光面積と観測時間

近傍で明るいペルセウス座銀河団のこれまでの観測で推定されている半径方向の質量分布および、ガス密度分布を仮定して、ペルセウス銀河団の中心及び、中心から～5.7分角離れたところを観測した場合、エネルギーの偏移はおよそ0.4eVで、中心付近から2.9分角離れたところを観測する場合、中心とのピーク差が0.16[eV]だと仮定した。そして、その偏移を測定するために必要な観測時間の検討を行った。その結果を図7に示



した。中心から5.7分外れたところでは、0.4eVの決定制度はおよそ50ks, 中心から2.9分書く離れたところでは0.16eVの精度が必要であるので、およそ100ksの観測で可能であることがわかった。

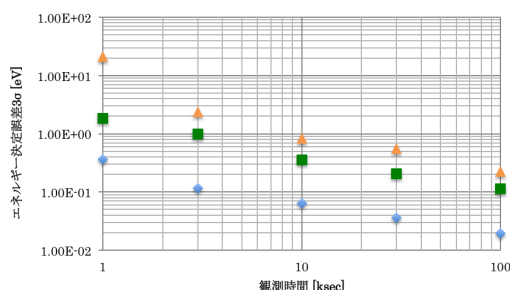


図7. 観測時間に対する、中心エネルギー決定制度。オレンジ三角、緑資格、青丸がそれぞれ、5.7分offset, 2.9分offset, と中心を観測した場合である。

ASTRO-Hは2016年2月19日に打ち上げられ、「ひとみ」と命名された。SXSは順調に初期立ち上げを完了し、銀河団をはじめ幾つかの天体を観測することができたが、残念ながら3月26日以降通信ができなくなった。それまでに観測したデータで、可能な範囲で科学的成果を出すよう今後検討していく予定である。

#### 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 6件)

- (1) "The Quiet Intracluster Medium in the Core of the Perseus Cluster", Takahashi, T. et al. Kitamoto, S. (217名共著で83番目), 2016, Nature, 掲載決定, 査読あり
- (2) "MAXI observations of long-term variations of Cygnus X-1 in the low/hard and the high/soft states", Sugimoto, Juri, Mihara, Tatehiro, Kitamoto, Shunji, Matsuoka, Masaru, Sugizaki, Mutsumi, Negoro, Hitoshi, Nakahira, Satoshi, Makishima, Kazuo 2016, PASJ, 68, SP1, S17(1-17), 査読有り
- (3) "New multiwavelength observations of the Of?p star CPD -28° 2561", Hubrig, S., Schöller, M., Kholtygin, A. F., Tsumura, H., Hoshino, A., Kitamoto, S., Oskinova, L., Ignace, R., Todt, H., Ilyin, I., 2015, MNRAS, 447, 1885-1894, 査読有り
- (4) "ASTRO-H White Paper - Accreting Pulsars, Magnetars, and Related Sources", Kitamoto, S., Enoto, T., Safi-Harb, S., et al., 2014, arXiv, 1412.1165 査読なし
- (5) "X-ray development of the classical nova V2672 Ophiuchi with Suzaku", Takei, Dai, Tsujimoto, Masahiro,

Drake, Jeremy J., Kitamoto, Shunji, 2014, PASJ, 66, 37(1-10), 査読有り  
 (6) "X-Ray Eclipse Diagnosis of the Evolving Mass Loss in the Recurrent Nova U Scorpii 2010", Takei, D., Drake, J. J., Tsujimoto, M., Ness, J.-U., Osborne, J. P., Starrfield, S., Kitamoto, S., 2013, ApJ, 769, L4-L8, 査読有り

[学会発表](計 3件)

- (1) "Prospect with ASTRO-H on New Sciences of Accreting Pulsars, Magnetars, & Related Sources", Kitamoto, S., Enoto, T., Safi-Harb, S., et al. Jan. 4-8, 2015, American Astronomical Society Meeting Abstracts, 225, 345.22, Seattle, Washington, US
- (2) 「銀河団の高エネルギー分光観測における重力赤方偏移の影響」北本俊二、津村大樹、林祐、日本天文学会、2014年度秋季年会 2014.9.11-9.13 山形大学
- (3) "Effect of Gravitational redshift in Perseus Cluster", Hayashi, T and Kitamoto, S. in "The 4-th ASTRO-H Summer School", September 5-7, 2013, Laforet Shuzenji (Shizuoka, Shuzenji, Japan)

[その他]

ホームページ等

#### 6. 研究組織

(1)研究代表者

北本 俊二(Kitamoto Shunji)

立教大学・理学部・教授

研究者番号：70177872

(2)研究分担者( ) 研究者番号：

(3)連携研究者( ) 研究者番号：