

平成 22 年 06 月 17 日現在

研究種目：若手研究（スタートアップ）
 研究期間：2008～2009
 課題番号：20840051
 研究課題名（和文）高温宇宙の構造理解のための
 X線マイクロカロリメータカメラの開発
 研究課題名（英文）Development of X-ray microcalorimeter camera
 for understanding of hot Universe structure
 研究代表者
 竹井 洋（Yoh TAKEI）
 独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部・助教
 研究者番号：30509857

研究成果の概要（和文）：本研究では、現代宇宙論の大きな謎の一つであるダークバリオン、すなわち未だ検出されていない近傍宇宙の陽子や中性子の観測的研究、および感度上昇に向けた低温検出器マイクロカロリメータの信号多重化の開発を行った。そして、信号多重化における最も大きな制限であった帯域を、500 kHz から 5 MHz に 10 倍改善する方法を実証した。また、数値シミュレーションによりダークバリオンの観測可能性を研究し、開発している検出器で十分感度があること、我々の観測で得られた輝度の上限値とシミュレーションに矛盾がないことを示した。

研究成果の概要（英文）：We studied so-called missing baryon problem, which is one of the remaining questions in modern cosmology. We took two approaches: observational study and development of a new cryogenic detector. We have developed signal multiplexing technique for the cryogenic detector microcalorimeters and have extended the bandwidth of the detector by a order of magnitude. By performing numerical simulations, we confirmed the sensitivity of the detector and the simulation is consistent with the upper limit of the surface brightness we obtained from observations.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	1,280,000	384,000	1,664,000
2009 年度	1,120,000	336,000	1,456,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,400,000	720,000	3,120,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：X線天文学、中高温銀河間物質、マイクロカロリメータ、SQUID、X線精密分光、すざく、ダークバリオン、銀河団

1. 研究開始当初の背景

近傍宇宙においては、陽子、中性子といった普通の物質が、宇宙論の予言あるいは 137

億年前の宇宙に比べて半分程度しか観測されていないことが知られている。これは「ミッシングバリオン問題」と呼ばれ、宇宙論に

残された大きな謎の一つである。数値シミュレーションからは、この正体は、宇宙の大規模構造に沿って存在する数百万度のガスだろうと考えられ、これは中高温銀河間物質と呼ばれている。中高温銀河間物質は、重力で集まり、加熱されただけではなく、星や銀河などと相互作用して現在の温度や元素の存在比を持つようになったと考えられており、宇宙の歴史を知る上での重要な観測対象だと認識されている。中高温銀河間物質の証拠を得るには、その中の酸素イオンが出す X 線輝線を検出すればよい。そこで、高感度の X 線観測を行うこと、輝線に対して感度が高い検出器の開発を行うことが重要な研究課題である。本研究では、既存の観測装置の中で最高感度である「すざく」衛星の CCD カメラ XIS を用いた観測的研究と、将来のミッションで有望視されている極低温検出器マイクロカロリメータの研究開発の二つのアプローチを採用する。

2. 研究の目的

上記の二つのアプローチのそれぞれに対応し、研究の目的は主に以下の二つである。

- (1) 「すざく」衛星を用いて、世界初の確固たる中高温銀河間物質の検出を目指す。観測で検出できなかった場合も、表面輝度の上限値を数値シミュレーションを比較することで宇宙論モデルの妥当性を論じる。
- (2) 検出器の開発においては、極低温において、X 線のエネルギーを温度上昇として読み出すマイクロカロリメータという検出器の開発を行う。分光性能は先行研究により実証されつつあるが、将来のミッションで採用するために残された開発項目である信号多重化は世界的にも目処がたっていなかった。そこで、信号多重化に重点を置いた開発を行う。特に、信号多重化の際に必要な帯域が満足できていなかったため、それを一桁延ばすことを目的とする。

3. 研究の方法

観測的研究では、中高温銀河間物質のような広がった天体の輝線分光に最も感度の高い「すざく」の CCD カメラ XIS を用いた。輝線強度はガス密度の自乗に比例する。中高温銀河間物質から予想される強度は非常に弱いため、ガス密度の高い領域を集中的に狙うのが効率的である。中高温銀河間物質は、ダークマターのつくる重力場に沿って存在する。重力場が強い銀河団あるいは超銀河団の近傍で中高温銀河間物質の密度が比較的大きいと予想される。そこで、銀河団、超銀河団を 8 つ観測し、あるいはデータアーカイブのデータを解析し、中高温銀河間物質の証拠である、赤方偏移した酸素イオンの輝線

を探索した。

また、数値シミュレーションを用いて、宇宙のモデルから予想される中高温銀河間物質の密度、温度、および放射される酸素強度を計算した。そして、シミュレーションが予想する放射強度と観測値、将来期待される感度を比較した。

検出器の開発で課題だったのは、信号多重化、特に多重化に必要な帯域の確保である。信号多重化は、AM ラジオと同様の変調を用いる。異なる素子からの信号を異なる周波数で変調することで、素子を区別しつつ、一つの読み出し系で複数の信号を読み出すことができる。多重化が可能な素子数は周波数帯域に比例する。この帯域の確保が困難なのは、マイクロカロリメータの信号読み出し回路として用いる超伝導量子干渉計 (SQUID) をフィードバックループで動かす必要があるためである。SQUID は磁束に感度があり、マイクロカロリメータとコイルで接続することで、低インピーダンスの電流計として用いることができる。ただし、SQUID は入力磁束に対して周期的な応答をとるため、出力をフィードバックすることで、測定可能な入力範囲を延ばす必要がある。しかし、フィードバック回路は位相の遅れが大きいと不安定になってしまう。実際に、極低温検出器の極低温部と室温部を結ぶ回路で位相遅れが生じ、高速の信号を駆動することができなかった。そこで、本研究では、位相遅れを補正する手法をとった。室温回路で一旦読み出した信号を復調し、位相を調整しつつ再変調し、再変調した信号をフィードバックすることで、位相遅れによる帯域の制限を克服することを目指した。

4. 研究成果

「すざく」を用いた銀河団、超銀河団の観測においては、有意な中高温銀河間物質からの輝線を検出することはできなかった。これらの観測で得られた輝線強度の上限値は、本研究以前の観測の感度を数倍上回る。すなわち、本研究で得られた感度は、これまで CCD で得られた最高感度であった。観測した領域のバリオン密度に換算すると、宇宙の平均密度の 100 から 200 倍程度に相当する。

また、本研究を通して、前景放射である銀河系の高温度ガスの温度、密度、奥行きの見聞が得られた。中高温銀河間物質の高感度な探索のためには、前景放射の寄与を精度良く見積もり、その寄与を取り除く必要がある。本研究で得られた銀河系のガスの構造、銀河系ガス起源の放射強度の推定方法は、今後の CCD を用いた観測、および将来の観測計画をたてる上で重要な手掛かりとなる。

数値シミュレーションを用いた研究にお

いては、まず、シミュレーションから中高温銀河間物質の温度、密度の分布を推定し、その分布から期待される酸素輝線の強度を計算した。そして、「すざく」で得られた、イオン化した酸素輝線の上限值と比較した。シミュレーションから得られた輝線強度の上限値は、「すざく」の検出限界と同程度であった。「すざく」の観測では、密度が高い銀河団、超銀河団近傍を観測しているため、シミュレーションで得られている放射強度の最大値程度であるはずである。すなわち、観測とシミュレーションの間に矛盾がなく、同程度の感度の観測であれば中高温銀河間物質からの輝線を検出できる見込みがあることを示した。同時に、さらに検出限界を上げるような領域選定や戦略が重要であることを示唆している。前景放射の影響が少ない領域、適切な赤方偏移到銀河の分布が集中している領域など、別の観点から領域を選択することが有効であるだろう。

また、本研究のシミュレーションでは、先行研究では無視されていた前景放射の影響を取り込み、シミュレーションを実施した。そして、前景放射の影響を考慮した場合の、将来ミッションの検出限界、期待される感度についても議論した。まず、原理的な検出限界は前景放射の影響で決まることを示した。そして、本研究で開発しているようなマイクロカロリメータが実現した際には、赤方偏移した酸素の輝線を用いて、中高温銀河間物質をマッピングし、温度を決定できる感度があることを示した。

検出器の開発では、世界で初めて、位相調整をして SQUID の信号をフィードバックする回路を実証した。本研究では、1 チャンネルではあるものの、信号の増幅、復調、位相の調整、変調、フィードバック出力、という機能を備えた回路を開発した。そして、低温部の SQUID と常温部との配線による位相遅れを室温部で補正し、フィードバックを返した。この方式では、十分なフィードバックループのゲインを保ちつつ、5 MHz までの信号を読み出すことに成功した。通常のフィードバック方式で得られていた帯域は 500 kHz 程度であり、本方式で帯域を 10 倍改善することが可能となった。この帯域があれば、数十素子の多重化が可能だと見込まれる。今後 10 年程度の間には予定されている X 線天文衛星計画において要求されている多重化素子数は 30 素子程度である。その要求を満たす目処がたったといえる。また、共同研究を行っているオランダのグループにおいても、同様の原理で SQUID の信号多重化、TES の駆動に成功し、本方式の有効性が示された。

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 17 件)

- (1) A. Simionescu, N. Werner, W. R. Forman, E. D. Miller, Y. Takei, H. Boehringer, E. Churazov, P. E. J. Nulsen, "Metal transport by gas sloshing in M87", 査読有、Monthly Notices of the Royal Astronomical Society、405 巻、2010 年、p91
- (2) T. Hagihara, Y. Yao, N. Y. Yamasaki, K. Mitsuda, Q. D. Wang, Y. Takei, T. Yoshino, D. McCammon, "X-ray spectroscopy of Galactic hot Gas along the PKS 2155-304 sight line", 査読有、Publication of Astronomical Society Japan、62 巻、2010 年、p723
- (3) E. Branchini, 他 14 人, Y. Takei (16 番目), 他 1 人, "Studying the Warm-Hot Intergalactic Medium with Gamma-Ray Bursts", Astrophysical Journal、査読有、697 巻、2009 年、p328
- (4) T. Yoshino, K. Mitsuda, N. Y. Yamasaki, Y. Takei, 他 7 人, "Energy of the Soft X-ray Diffuse Emission in Fourteen Fields Observed with Suzaku", Publication of Astronomical Society Japan、査読有、61 巻、2009 年、p805
- (5) K. Hayashi, Y. Fukazawa, M. Tozuka, S. Nishino, K. Matsushita, Y. Takei, K. Arnaud, "Suzaku observation of the metallicity distribution in the elliptical galaxy NGC 4636", Publication of Astronomical Society Japan、査読有、61 巻、2009 年、p1185
- (6) B. P. F. Dirks, M. Popescu, M. Bruijn, L. Gottardi, H. F. C. Hoevers, P. A. J. de Korte, J. van der Kuur, M. Ridder, Y. Takei, "TiAu-based microcalorimeters for space applications", Nuclear Instruments and Methods in Physical Research Section A、査読有、610 巻、2009 年、p83
- (7) 江副祐一郎、篠崎慶亮、竹井洋、"進化するマイクロカロリメータ：精密 X 線分光で解き明かす宇宙の大規模構造"、日本物理学会誌、査読無、64 巻、2009 年、p611
- (8) Y. Takei, N. Y. Yamasaki, W. Hirakoso, S. Kimura, K. Mitsuda, "SQUID multiplexing using baseband feedback for space applications of transition-edge sensor microcalorimeters", Superconductor Science & Technology 査読有、22 巻、2009 年、p11408
- (9) K. Masui, K. Mitsuda, N. Y. Yamasaki, Y. Takei, S. Kimura, T. Yoshino, D. McCammon, "The nature of unresolved soft X-ray from the Galactic disk", Publication of Astronomical Society Japan、査読有、61 巻、

2009 年、pS115

(10) T. Tamura, K. Mitsuda, Y. Takei, N. Y. Yamasaki, A. Itoh, K. Hayashida, J. P. Henry, H. Kunieda, K. Makishima, T. Ohashi, "Suzaku Observation of the cluster of galaxies Abell 2052", Publication of Astronomical Society Japan, 査読有、60 巻、2008 年、p695

(11) Y. Takei, E.D. Miller, J. Bregman, S. Kiura, T. Ohashi, K. Mitsuda, T. Tamura, N.Y. Yamasaki, R. Fujimoto, "The lack of strong O-line excess in the Coma cluster outskirts from Suzaku", Astrophysical Journal, 査読有、680 巻、2008 年、p1049

[学会発表] (計 7 件)

(1) Y. Takei, N.Y. Yamasaki, K. Mitsuda, S. Kimura, W. Hirakoso, K. Masui, K. Masui, P.A.J. de Korte, J. van der Kuur, L. Gottardi, "Multiplexing readout of the TES microcalorimeters based on analog baseband feedback", Low Temperature Detectors 13, 2009 年 7 月 20-24 日、スタンフォード大

(2) Y. Takei, N.Y. Yamasaki, W. Hirakoso, S. Kimura, K. Mitsuda, "Development and evaluation of TES microcalorimeter arrays and frequency division signal multiplex system", international Superconductive Electronics Conference 2009, 査読有、2009 年 6 月 16-19 日、福岡

(3) Y. Takei, T. Ohashi, E. Branchini, E. Ursino, A. Corsi, H. Kawahara, H. Akamatsu, "Search for emission from warm-hot intergalactic medium", X-ray astronomy 2009, 2009 年 9 月 7-11 日、ボローニャ

(4) 竹井洋、大橋隆哉、河原創、佐々木伸、吉川耕司、Enzo Branchini、Euegnio Ursino, Alessandra Corsi, "中高温銀河間物質のマッピングを通じた大規模構造の観測の展望", 日本天文学会秋季年会、2009 年 9 月 14-16 日、山口

(5) 竹井洋、佐藤浩介、大橋隆哉、三石郁之、山崎典子、Massimiliano Galeazzi、Anjali Gupta、Richard L. Kelley、"「すざく」による銀河団、超銀河団に付随する中高温銀河間物質の探査、日本天文学会春季年会、2010 年 3 月 24-27 日、広島

[その他]

宇宙学校・とうきょう・講師 (2009 年 11 月 3 日、東京大学駒場キャンパス)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

竹井 洋 (Yoh TAKEI)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙
科学研究本部・助教
研究者番号：30509857

(2) 研究分担者
なし

(3) 連携研究者
なし