

平成 30 年 6 月 4 日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H03642

研究課題名(和文) 精密ラインX線観測による宇宙の大規模ガス運動の解明

研究課題名(英文) Study of large scale gas dynamics with high resolution X-ray spectroscopy

研究代表者

石崎 欣尚 (Ishisaki, Yoshitaka)

首都大学東京・理工学研究科・准教授

研究者番号：10285091

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,300,000円

研究成果の概要(和文)：「ひとみ」のマイクロカロリメータSXSは軌道上でエネルギー分解能4.9 eV (FWHM at 5.9 keV)を達成した。立ち上げ時期にペルセウス座銀河団を300 ksec以上観測しており、銀河団の高温プラズマについて新たな制限を与えた。今年度はその科学成果をPASJ特集号に、またハードウェア関連をJATISの特集号へ論文としてまとめた。石崎は特に、JATIS特集号にSXSの波形処理装置の軌道上性能についてまとめた。「ひとみ」のサイエンスを早期に復活させるためX線天文衛星代替機XARMにはマイクロカロリメータResolveが搭載される。NASAグループと協力して設計変更の検討を進めた。

研究成果の概要(英文)：The microcalorimeter SXS (Soft X-ray Spectrometer) onboard Hitomi demonstrated the energy resolution of 4.9 eV (FWHM at 5.9 keV) in orbit. In the initial phase, Hitomi observed the Perseus cluster with more than 300 ks, and made new limitations on the hot plasma in the cluster of galaxies. In this year, those scientific results are given in PASJ special issue, and the hardware papers are published in JATIS special issue. In particular, the in-orbit performance of the digital pulse processing system are summarized as Ishisaki et al. in the JATIS special issue.

The XARM (X-ray Astronomy Recovery Mission) to recover the science of Hitomi is under progress. The XARM has a microcalorimeter instrument named Resolve, and an X-ray CCD instrument named Xtend. Ishisaki has become an instrument PI of Resolve in Japan, and the Resolve team in Japan made investigations on design changes from Hitomi SXS in collaboration with the Resolve team at NASA.

研究分野：宇宙物理学

キーワード：X線天文学 極低温検出器 マイクロカロリメータ 宇宙物理

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

1. 研究開始当初の背景

ASTRO-H は「すざく」につづく日本で6番目のX線観測衛星であり、2015年の軌道投入に向けて、日米を中心に国際協力で作成が進められた。この衛星には軟X線分光装置 SXS, 軟X線CCDカメラ XIS, 硬X線撮像装置 HXI, 軟ガンマ線コンプトンカメラ SGD の4種類の検出器が搭載されるが、特に SXS は世界ではじめて衛星上でマイクロカロリメータを実現する主力検出器である。これは 50 mK の極低温で動作し、X線のエネルギーによる温度上昇を、Si 半導体にリンとホウ素を注入した抵抗温度計で精密に測定することで、0.3-12 keV のX線に対してエネルギー分解能 $\Delta E = 7$ eV (半値全幅の要求値; エネルギーによらずほぼ一定) を上回る優れた分光性能を発揮する検出器で、世界からも大きな期待がよせられていた。

SXS が実現するサイエンスの中でももっとも期待されるものが、ガスの運動状態の直接観測である。図1に示すように、宇宙の高温(場合によっては非熱的な)ガスはあらゆる階層において 10-10000 km/s ほどで運動しており、しばしばそれが銀河や宇宙全体の進化の鍵を握っている。そのよい例が銀河団高温ガスの運動である。N 体シミュレーションの計算では、銀河団のエネルギーの約20%がガスの運動に費やされていると予想されているが、その形態が乱流なのかバルク運動が主なのかはわかっていない。ASTRO-H SXS では、図2にペルセウス銀河団の観測をシミュレーションしたエネルギースペクトルを示すように、100 km/s を超えるような乱流が存在するとライン幅が広がって観測されることが一目瞭然である。また多くの銀河に対して、中心の巨大ブラックホール(BH: 銀河質量の高1/1000)と銀河バルジの質量が4桁にもわたって相関するという「共進化」が未解決の問題になっている。その鍵を握るのが、BH からのガスのアウトフローであり、SXS は青方変位した吸収線の高感度検出により、はじめてBH によるフィードバック現象の全貌を明らかにすると期待されていた。

銀河団やBH アウトフロー以外にも、図1にあるように、超新星残骸の衝撃波、スターバースト銀河からの銀河風、銀河団同士の衝突合体など、ガス運動の解明が天体現象の解明にとって本質的役割を演じる場面は非常に多いと考えられ、これがASTRO-H に多くの期待が寄せられる理由になっている。

このすばらしいサイエンスを確実に実現させるには、SXS の特性を性格に把握し、その性能を最大限に引き出すことが最も重要である。本研究は、衛星計画の範囲を超えてSXS 検

出器のキャリブレーションを押し進め、波形処理ソフトウェアを徹底的にチューニングすることで、当初の要求性能を十分上回る結果を引き出そうとするものである。

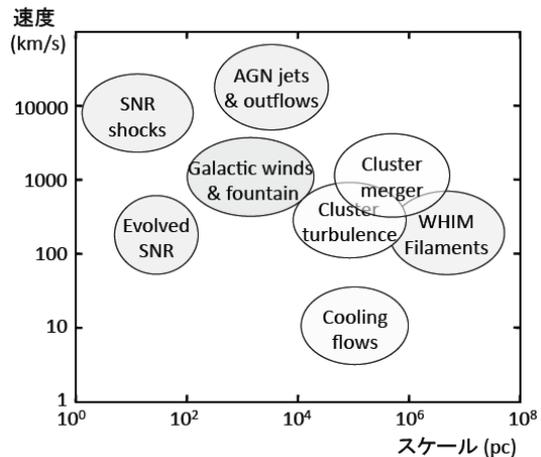


図1: 宇宙におけるさまざまなプラズマの大きさと典型的なガスの運動速度

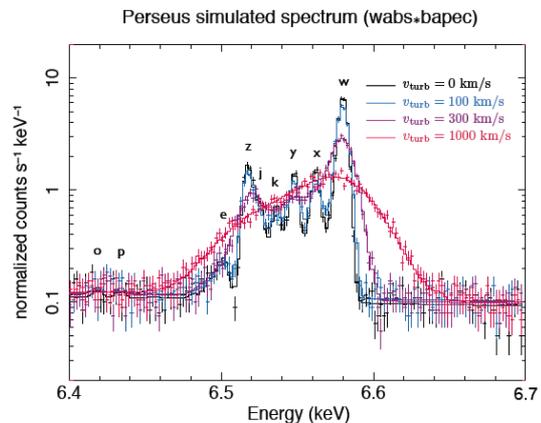


図2: SXS によるペルセウス銀河団の乱流の観測のシミュレーション

2. 研究の目的

2015年に日本が打ち上げる国際X線天文衛星 ASTRO-H では、50 mK という極低温で動作するマイクロカロリメータ SXS により、世界ではじめて精密X線分光観測が行われる。本研究は、SXS の信号波形の処理ソフトを開発し、地上と軌道上を含めた詳細な試験を重ねることで、エネルギー分解能の要求値 (7 eV) を超える性能 $\Delta E \sim 5$ eV を安定して実現させることを目指している。さらに、当初の想定を超える明るい天体に対してまで、高い分光性能を実現し、宇宙のさまざまな階層

におけるガスの運動状態を解明する。これにより ASTRO-H から最高のサイエンスを引き出すとともに、日本だけが持つ極低温検出器技術と宇宙物理学的な資産を将来につなげ、DIOS など将来衛星へむけた技術基盤を強固なものとするのも目的としている。

具体的な戦略は下記の通りである。

1. SXS のデジタル処理系 (PSP: pulse-shape processor) の波形解析ロジックを強化し、さまざまな観測に対して当初の要求値を上回るエネルギー分解能を実現させる。このロジックを打ち上げ前の地上試験で可能な限り実装する。
2. PSP のフライト同等品を新たに製作し、NASA ゴダード宇宙飛行センターにおいて、SXS スペア検出器、アナログ処理部XBOX と組み合わせた性能試験を行う。これはSXS の完全なダミーとして働くため、ASTRO-H によるすべての観測を地上で再現することができる。
3. 軌道上でのSXS の動作状況と環境による性能への影響を評価し、上記項目の結果も合わせて、最も高いエネルギー分解能を引き出せるようPSP の処理条件を改良する。

3. 研究の方法

ASTRO-H SXS 検出器の地上データと打ち上げ後のX線観測データをもとに、最大限の性能アップを図る。フライトスペアを用いることで、打ち上げ後も地上でさまざまな再現試験を行い、SXS の特性を把握し続ける。2015年度はフライトセンサの衛星上での動作試験の出力データに対し、真空断熱容器各所の温度との相関も含め、網羅的な解析を行い、エネルギー分解能5 eV を目指して解析ソフトの最適化を行う。打ち上げ後は、衛星に搭載されるX線発生装置やX線天体もちいて、軌道上での性能を確認するとともに、フライトスペアによる追試験の結果も合わせて、パラメータのチューニングを行い、キャリブレーションデータベースとして公開する。合わせて、ガスダイナミクスを中心とするサイエンスがどれだけの信頼度で達成できるかを検証し、科学成果を発表する。

4. 研究成果

(1) 2015 年度

2015年度は、ASTRO-H衛星の打ち上げにむけ、つくば宇宙センターでの熱真空試験、振動試験などを含む衛星全体での最終試験に参加し、衛星上でSXSが正常に動作して目標とするエネルギー分解能が実現できていることを確認した。SXSのデジタル波形処理を行うPSP (Pulse Shape Processor) については、波形処理が適切におこなわれることを最終版のオンボードソフトで試験した。つくばでの最終試験において、ゼロ除算などのソフト上の異常処理のコーディングが適切でない箇所が共通ソ

フト上に見つかり、修正を行った。

そのほか、衛星の姿勢制御をするためのリアクションホイールや磁気トルカからセンサへの電磁ノイズの干渉があることがわかったが、波形処理ソフトのパラメータを調整するなどすることで、性能に大きな影響のない範囲に抑えることができた。12月より衛星が種子島宇宙センターへ移動した後も、SXS機器が正常に動作することの確認および、液体ヘリウムの温度などが打ち上げ条件を満たすよう、打ち上げ直前まで衛星運用に関わった。

ASTRO-H衛星は、天候悪化による1回の延期を経て2016年2月17日に打ち上げられ「ひとみ」と命名された(図3)。その後の内之浦宇宙センターからの初期運用でもSXSの立ち上げにおいて研究代表者および分担者は主要な役割を果たし、2月末にはゲートバルブ越しではあるものの、ペルセウス銀河団からのX線の観測に成功している。PSPの明るい天体に対する処理性能については、地上でのSXS単体試験での結果をもとに、センサ全体で~200 c/s までには十分に対応できることを示し、2015年7月の極低温検出器の国際学会で口頭発表を行った。軌道上でも、X線で非常に明るい天体の代表例であるかに星雲の観測が行われており、詳細な解析を行う。

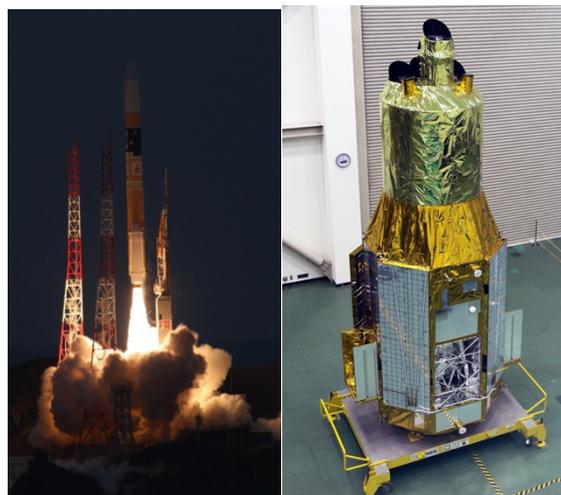


図3: ASTRO-H (ひとみ) 衛星の打ち上げの写真(左)と JAXA で公開された ASTRO-H 衛星の写真(右)。観測時の全長は約 14 m、重量は約 2700 kg

(2) 2016 年度

2016年2月に日本が打ち上げた国際X線天文衛星「ひとみ」(ASTRO-H)は、50 mK という極低温で動作するマイクロカロリメータ SXS (Soft X-ray Spectrometer) により、世界で初めて軌道上でペルセウス座銀河団などの精密X線分光観測が行われた。内之浦宇宙センターからの初期運用、およびその後の宇宙科学研究所からのSXSの立ち上げにおいて研究代表者および分担者は主要な役割を果たし、2016

年2月末にはゲートバルブ越しではあるものの、ペルセウス銀河団からのX線の観測に成功している。

「ひとみ」は、軌道上で異常が発生して2016年3月末に通信が途絶し、4月末に復旧を断念したが、その後、「ひとみ」が垣間見せたX線精密分光のサイエンスの早急な回復をめざし、日米で代替機の構想が急速に立ち上がり、2018年度中にプロジェクト化される見込みである。PSPの軌道上性能、および明るい天体に対する処理性能については、2017年7月の国際学会 SPIE で発表をおこない、論文としてまとめられた。

(3) 2017年度

「ひとみ」のマイクロカロリメータSXSは軌道上でエネルギー分解能4.9 eV (FWHM at 5.9 keV)を達成した。立ち上げ時期にペルセウス座銀河団を300 ksec以上観測しており、銀河団の高温プラズマについて新たな制限を与えた(図4)。ペルセウス座銀河団のCr, Mn, Niの存在量の正確に決定し、これらの元素の量はほぼ太陽組成に一致することが新たに分かった。ペルセウス座銀河団のガスの運動については、2016年のNature論文では中心付近での乱流の視線速度が約164 km/sであることを報告したが、それをデータ全体に拡張する結果を出した。今年度はその科学成果をPASJ特集号に、またハードウェア関連をJATISの特集号へ論文としてまとめた。石崎は特に、JATIS特集号にSXSの波形処理装置の軌道上性能についてまとめた。

また、「ひとみ」のサイエンスを早期に復活させるためX線天文衛星代替機XARMにはマイクロカロリメータResolveとX線CCD検出器Xtendが搭載される。石崎はResolveの日本側PIとなり、「ひとみ」SXSをベースとしつつ、NASAグループと協力して設計変更の検討を進めた。

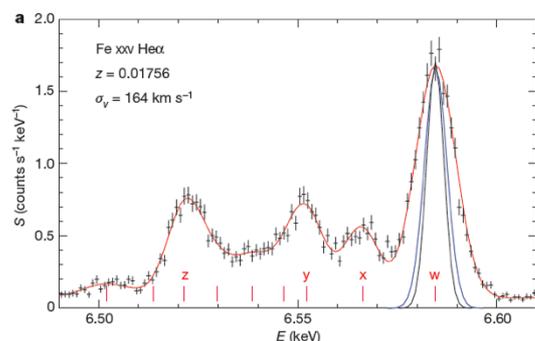


図4: 「ひとみ」が観測したペルセウス座銀河団からの鉄輝線のエネルギースペクトル。共鳴線Wには、エネルギー分解能の幅(黒)、プラズマの熱運動による幅(青)が合わせて示されている。(Nature 535, 117 に発表)

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 10 件)

- (1) Kuromaru, G.; Kuwabara, K.; Miyazaki, N.; Suzuki, S.; Hosoya, S.; Koizumi, Y.; Ohashi, T.; Ishisaki, Y.; Ezoe, Y.; Yamada, S.; Mitsuda, K.; Hidaka, M.; Satoh, T.
Investigation of Surface Roughness Effect on Transition Edge Sensor Microcalorimeters Using Multilayer Readout Wiring
Journal of Low Temperature Physics, 査読あり, 2016年
DOI: 10.1007/s10909-016-1499-7
- (2) Porter, F. S.; Chiao, M. P.; Eckart, M. E.; Fujimoto, R.; Ishisaki, Y.; Kelley, R. L.; Kilbourne, C. A.; Leutenegger, M. A.; McCammon, D.; Mitsuda, K.; Sawada, M.; Szymkowiak, A. E.; Takei, Y.; Tashiro, M.; Tsujimoto, M.; Watanabe, T.; Yamada, S.
Temporal Gain Correction for X-ray Calorimeter Spectrometers
Journal of Low Temperature Physics, 査読あり, 2016年
DOI: 10.1007/s10909-016-1503-2
- (3) Yamada, S.; Ohashi, T.; Ishisaki, Y.; Ezoe, Y.; Miyazaki, N.; Kuwabara, K.; Kuromaru, G.; Suzuki, S.; Mitsuda, K.; Yamasaki, N. Y.; Takei, Y.; Sakai, K.; Nagayoshi, K.; Yamamoto, R.; Hayashi, T.; Muramatsu, H.; Tawara, Y.; Mitsuishi, I.; Babazaki, Y.; Nakamichi, R.; Bandai, A.; Yuasa, T.; Ota, N.
Future Japanese X-ray TES Calorimeter Satellite: DIOS (Diffuse Intergalactic Oxygen Surveyor)
Journal of Low Temperature Physics, 査読あり, 2015年
DOI: 10.1007/s10909-015-1362-2
- (4) Ishisaki, Y.; Yamada, S.; Seta, H.; Tashiro, M.S.; Takeda, S.; Terada, Y.; K. Yuka; Tsujimoto, M.; Koyama, S.; Mitsuda, K.; Sawada, M.; Boyce, K.R.; Chiao, M.P.; Watanabe, T.; Leutenegger, M.A.; Eckart, M. E.; Porter, F. Scott; Kilbourne, C.A.; Kelley, R.L.
In-flight performance of pulse processing system of the ASTRO-H soft x-ray spectrometer
Proceedings of the SPIE, 査読なし, Vol 9905, 2016年
DOI: 10.1117/12.2234222
- (5) Hitomi Collaboration
The quiescent intracluster medium in the core of the Perseus cluster
Nature, 査読あり, Vol 535, 2016年
DOI: 10.1038/nature18627
- (6) Hitomi Collaboration
Hitomi Constraints on the 3.5 keV Line in the Perseus Galaxy Cluster
The Astrophysical Journal Letters, 査読あり,

Vol 837, 2017 年
DOI: 10.3847/2041-8213/aa61fa

(7) Hitomi Collaboration

Solar abundance ratios of the iron-peak elements in the Perseus cluster

Nature, 査読あり, Vol 551, 2017 年
DOI: 10.1038/nature24301

(8) Ishisaki, Y.; Yamada, S.; Seta, H.; Tashiro, M.S.; Takeda, S.; Terada, Y.; K, Yuka; Tsujimoto, M.; Koyama, S.; Mitsuda, K.; Sawada, M.; Boyce, K.R.; Chiao, M.P.; Watanabe, T.; Leutenegger, M.A.; Eckart, M. E.; Porter, F. Scott; Kilbourne, C.A.; Kelley, R.L.

In-flight performance of pulse processing system of the ASTRO-H/Hitomi soft x-ray spectrometer
Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems, 査読あり, Vol 4, 2018 年
DOI: 10.1117/1.JATIS.4.1.011217

(9) Tsujimoto, Masahiro; Mitsuda, Kazuhisa; Kelley, Richard L.; den Herder, Jan-Willem; Bialas, Thomas G.; Boyce, Kevin R.; Chiao, Meng P.; de Vries, Cor P.; DiPirro, Michael J.; Eckart, Megan E.; Ezoe, Yuichiro; Fujimoto, Ryuichi; Hoshino, Akio; Ishikawa, Kumi; Ishisaki, Yoshitaka; Kilbourne, Caroline A.; Koyama, Shu; Leutenegger, Maurice A.; Masters, Candace M.; Mitsuiishi, Ikuyuki; Noda, Hirofumi; Okajima, Takashi; Okamoto, Atsushi; Porter, Frederic S.; Sato, Kosuke; Sato, Yohichi; Savinell, Joseph C.; Sawada, Makoto; Seta, Hiromi; Shirron, Peter J.; Sneiderman, Gary A.; Takei, Yoh; Tamagawa, Toru; Tashiro, Makoto S.; Watanabe, Tomomi; Yamada, Shinya; Yamasaki, Noriko Y.; Yatsu, Yoichi:

In-orbit operation of the soft x-ray spectrometer onboard the Hitomi satellite
Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems, 査読あり, Vol 4, 2017 年
DOI: 10.1117/1.JATIS.4.1.011205

(10) Hitomi Collaboration

Atmospheric gas dynamics in the Perseus cluster observed with Hitomi

Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読あり, Vol 70, 2018 年
DOI: 10.1093/pasj/psx138

[学会発表] (計 8 件)

(1) 田代信 ASTRO-H 搭載精密軟 X 線分光装置 SXS の現状
日本物理学会 2016 年春季大会 2016 年 3 月 19~22 日 (東北学院大学泉キャンパス)

(2) 辻本匡弘 ASTRO-H 搭載精密軟 X 線分光装置 SXS の開発の現状 XV

日本天文学会 2016 年春季年会 2016 年 3 月 14 ~ 17 日 (首都大学東京南大沢キャンパス)

(3) 辻本匡弘 ASTRO-H 搭載精密軟 X 線分光装置 SXS の開発の現状 XIV
日本天文学会 2015 年秋季年会 2015 年 9 月 9 ~ 11 日 (甲南大学岡本キャンパス)

(4) 石崎欣尚 「ひとみ(ASTRO-H)」搭載 SXS の波形処理装置の軌道上性能
日本天文学会 2016 年秋季年会 2016 年 9 月 14~16 日 (愛媛大学)

(5) 石崎欣尚 X 線天文衛星代替機(XARM)搭載の軟 X 線分光器 Resolve の検討状況
日本天文学会 2018 年秋季年会 2018 年 9 月 11~13 日 (北海道大学)

(6) Y. Ishisaki X 線天文衛星代替機 XARM 搭載 Resolve の開発の現状
日本天文学会 2018 年春季年会 2018 年 3 月 14~17 日 (千葉大学)

(7) 田代信 X 線天文衛星代替機の現状
日本物理学会 2018 年春季大会 2018 年 3 月 22~25 日 (東京理科大学)

(8) Y. Ishisaki X 線天文衛星代替機 XARM 搭載 Resolve の開発の現状
日本物理学会 2018 年春季大会 2018 年 3 月 22~25 日 (東京理科大学)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

石崎 欣尚 (ISHISAKI, YOSHITAKA)
首都大学東京・理工学研究科・准教授
研究者番号 : 10285091

(2) 研究分担者

田代 信 (TASHIRO, MAKOTO)
埼玉大学・理工学研究科・教授
研究者番号 : 00251398

辻本 匡弘 (TSUJIMOTO, MASAHIRO)
JAXA・宇宙科学研究所・助教
研究者番号 : 10528178

(3) 連携研究者

山田 真也 (YAMADA, SHINYA)
首都大学東京・理工学研究科・助教
研究者番号 : 40612073