

令和 6 年 6 月 5 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20H00175

研究課題名(和文)大型国際X線天文衛星計画Athenaの科学成果最大化

研究課題名(英文) Maximize the scientific results of the international large X-ray observatory Athena

研究代表者

松本 浩典 (Matsumoto, Hironori)

大阪大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：90311365

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 33,300,000円

研究成果の概要(和文)：Athena計画は、欧州宇宙機構が大型計画に採択した、大型X線天文衛星計画である。巨大なX線望遠鏡、精密撮像分光を可能にするX線マイクロカロリメーター(X-IFU)、広視野を誇るDEPFET(WFI)を搭載する。その規模から、日米の国際協力が必須の計画である。AthenaのX線望遠鏡は、正規の2回反射以外のパスで混入する迷光が非常に多い。この迷光を減少するため、我々は超軽量のプリコリメーターの開発を行った。また、望遠鏡の反射材イリジウムのX線吸収端による集光力減少を防ぐため、ダイヤモンドライクカーボンなどの軽元素コーティングの基礎開発を行った。また、観測計画立案にも関わった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

Athenaは、1.どのようにして物質が集積して、今日の大規模構造を形成したのか、2.どのようにして超巨大ブラックホールは成長し、そして宇宙に影響を与えたのか、の解明を目指す。これらのテーマは、「宇宙・物質・空間は何故できたのか」という人類の知的興味に深く関わっており、この課題にX線天文学を通して真っ向から答えようとするミッションである。また、Athenaは2030年代において、ALMA、SKA、TMTなどの他の波長の大型観測装置と並んで、宇宙物理学の重要な課題に挑戦するミッションの一つとなる。この研究は、Athenaを確実に実行可能なミッションとする意義を持つ。

研究成果の概要(英文)：The Athena mission is a large X-ray astronomy satellite program selected by the European Space Agency for the Large Program. It will carry a huge X-ray telescope, an X-ray micro-calorimeter (X-IFU) for precise imaging spectroscopy, and DEPFET (WFI) with a wide field of view. Because of its size, international cooperation with Japan and the United States is essential to the project.

Athena's X-ray telescope has a very large amount of stray light that is introduced by paths other than the two regular reflections. To reduce this stray light, we have developed an ultra-lightweight pre-collimator. We also developed a coating of light elements, such as diamond-like carbon, to prevent the reduction of light-gathering power due to the X-ray absorption edge of iridium, the reflector material of the telescope. We were also involved in the planning of the observations.

研究分野：X線天文学

キーワード：X線天文学 X線光学系

様式 C-19、F-19-1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

Athena は、欧州宇宙機構が Cosmic Vision Program において採択した、大型 X 線天文衛星である。Athena は、1) 物質がどのようにして今日の大規模構造へと集積したのか、2) どのようにして巨大ブラックホール(BH)は成長し周囲に影響を与えたのか、という現代宇宙物理の 2 大問題の解明を目指す。1 平方メートルに迫る大面積の望遠鏡と、焦点面に TES 型マイクロカロリメーターアレイを用いた高エネルギー分解能分光撮像検出器 (X-ray-Integral Field Unit; X-IFU) と、半導体検出器 DEPFET を用いた広視野撮像分光検出器 (Wide Field Imager; WFI) を搭載する。欧州が開発の中心であるが、その規模の大きさから、日本とアメリカの国際協力が必須となっている。Athena は 2030 年代以降、世界で唯一の大型 X 線天文計画である。この時代には、ALMA、SKA、TMT、CTA などの大型天文台による宇宙多波長観測時代が到来するが、Athena はその X 線観測部分を担う唯一の存在である。したがって、Athena を確実に実行可能なミッションとすることが最重要課題となっていた。

2. 研究の目的

(1) Athena X 線望遠鏡は、リブを刻んだシリコン (Si) 板に X 線反射材イリジウム (Ir) をつけてスタックしたモジュールを、約 700 個敷き詰めて構成する。多数の穴のそれぞれが、内壁で X 線を 2 回反射し集光するので、Silicon Pore Optics (SPO) と呼ばれる。Athena には正規の 2 回反射以外の経路をたどる迷光を防ぐ仕組みがない。そのため、観測方向以外からの迷光が、観測天体の結像位置に混入する。Athena の大目標である「大規模構造への物質集積過程の解明」には、赤方偏移 $z \sim 2$ の初期銀河団から現在の銀河団まで、銀河団ガスの温度・密度・乱流の空間分布と時間発展を明らかにする必要がある。その鍵は、X 線輝度分布と X 線スペクトルの空間変化の精密測定である。しかし、 $z \sim 0.1$ の標準的な明るさの銀河団においてさえ、宇宙背景 X 線放射の迷光で、ピリアル半径付近での温度や密度の決定精度の系統誤差が 20% を超える。「巨大 BH の成長過程」を解明するには、 $10^{-18} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ を超える感度で、 $z > 6$ の 400 個以上の活動銀河核を X 線で発見し、成長初期の種 BH の性質を解明したい。しかし宇宙 X 線背景放射による迷光で感度は 30% も悪化する。このように迷光は、Athena の根幹を揺るがす大問題なのである。迷光の削減には、迷光パスを防ぐプリコリメーター (PC) が有効である。我々は、「超軽量メッシュ PC」というアイデアで、Athena 用超軽量 PC を開発する。

(2) SPO の X 線反射材である Ir は、 $E = 2.1 \text{ keV}$ の光電吸収端のために、 $E = 2 \sim 5 \text{ keV}$ の有効面積が急激に低下する。このエネルギー帯には Si や硫黄 (S) の特性 X 線がある。例えば超新星残骸では、Si と S は重力崩壊型および Ia 型超新星の両者における主要生成元素であり、その特性 X 線は特に高いプラズマ診断能力を持つ。これらの輝線が物語る豊富な物理を逃さないためには、有効面積の回復が極めて重要である。そのためには、Ir の上に軽元素層をオーバーコートし、X 線が Ir 層に届く前に、軽元素層で全反射させればよい。我々は、回折格子や MEMS X 線光学系開発を通して、様々なコーティングの経験を積んだ。この実績をもとに、SPO 用の軽元素オーバーコーティング法を開発する。

(3) 日本の X 線天文衛星は、Athena にさきがけて、X 線マイクロカロリメーターによる精密 X 線分光を切り拓く。XRISM から Athena への連携を考慮した上で、Athena のサイエンス創出を最大化する。

3. 研究の方法

(1) PC には、全体で 10kg 程度以下という、厳しい重量制限がある。我々は「PC は中抜きでも機能する」という独自の着想でこの制限をクリアする。計算では、0.6mm 厚のガラスメッシュと、4.4mm 厚のチタンスペーサーを 10 層重ねた PC で迷光を削除できることが判明しており、しかも重量制限をクリアできる。SPO の穴の大きさに合わせたメッシュは、微細加工技術で製作する。

(2) SPO のスタックでは、リブを付けた Si 基板同士を洗浄後に密着させ、原子間力でコールドボンディングする。有効面積回復のための軽元素オーバーコートは、この洗浄過程と両立しなければならない。また、軽元素自身の吸収端が観測を邪魔してはならない。その点、 $E > 0.3 \text{ keV}$ に吸収端のない炭素 (C) や炭化ホウ素 (B₄C) は理想的だが、これらは洗浄プロセスで侵されてしまい、SPO には使えない。そこで我々は、Chemical Vapor Deposition (CVD) による Diamond Like Carbon (DLC) のオーバーコート、DLC は、化学的に安定で、洗浄プロセスでも侵されないため、スタック前にコートでき、工程的にも実現の可能性が高い。ESA より SPO 基板を提供してもらい、条件出しとコーティングを行い、SPO スタック過程との両立を実証する。

(3) 欧州宇宙機構は、欧州と日米の科学者約 10 名からなる Athena Science Study Team (ASST) を結成し、ASST が Athena の科学的活動をリードしている。ASST における科学成果創出の議論に参加する。

4. 研究成果

(1) 何度かの試作を得たのち、我々はSPOの1モジュールにフィットするPCを開発した(図1)。SPOを開発するCOSINE社に持ち込み、SPOモジュールとのインターフェースも問題がないことを明らかにした。今後、これらの2つを実際に組み合わせて、迷光除去能力の確認実験を行う予定である。

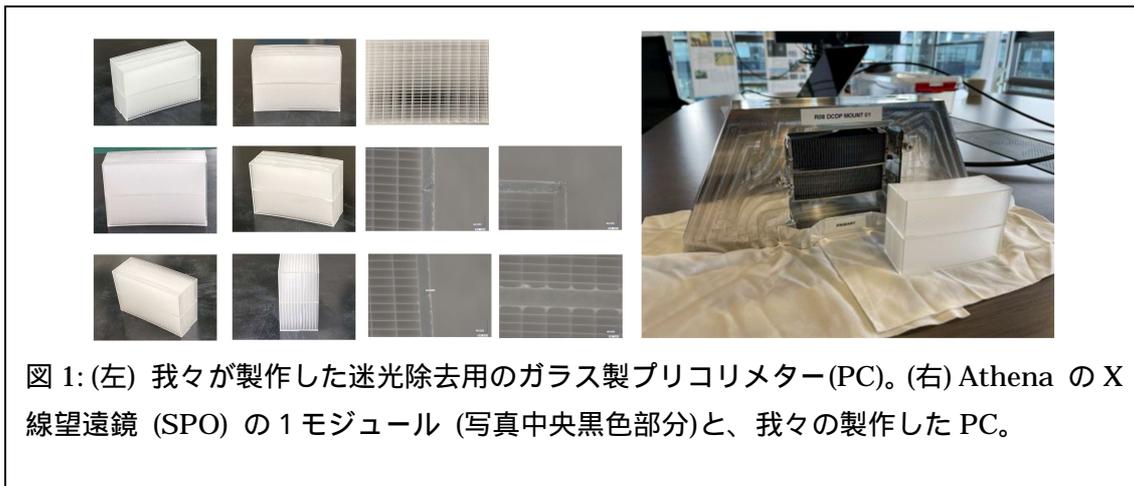


図1: (左) 我々が製作した迷光除去用のガラス製プリコリメター(PC)。 (右) AthenaのX線望遠鏡(SPO)の1モジュール(写真中央黒色部分)と、我々の製作したPC。

(2) プラズマCVDコーティングマシンを用いて、イリジウムをコーティングしたSPOサンプルに、ダイヤモンドライクカーボン(DLC)をコーティングすることに成功した(図2)。原子間力顕微鏡による測定の結果、厚さ4~8nm、表面粗度0.2nm程度のDLCコーティングであることが判明した。欧州宇宙機構にこのサンプルを送り返し、このDLCコーティングはSPO製作過程に組み込まれたクリーニング工程にも十分耐えることを実証した。

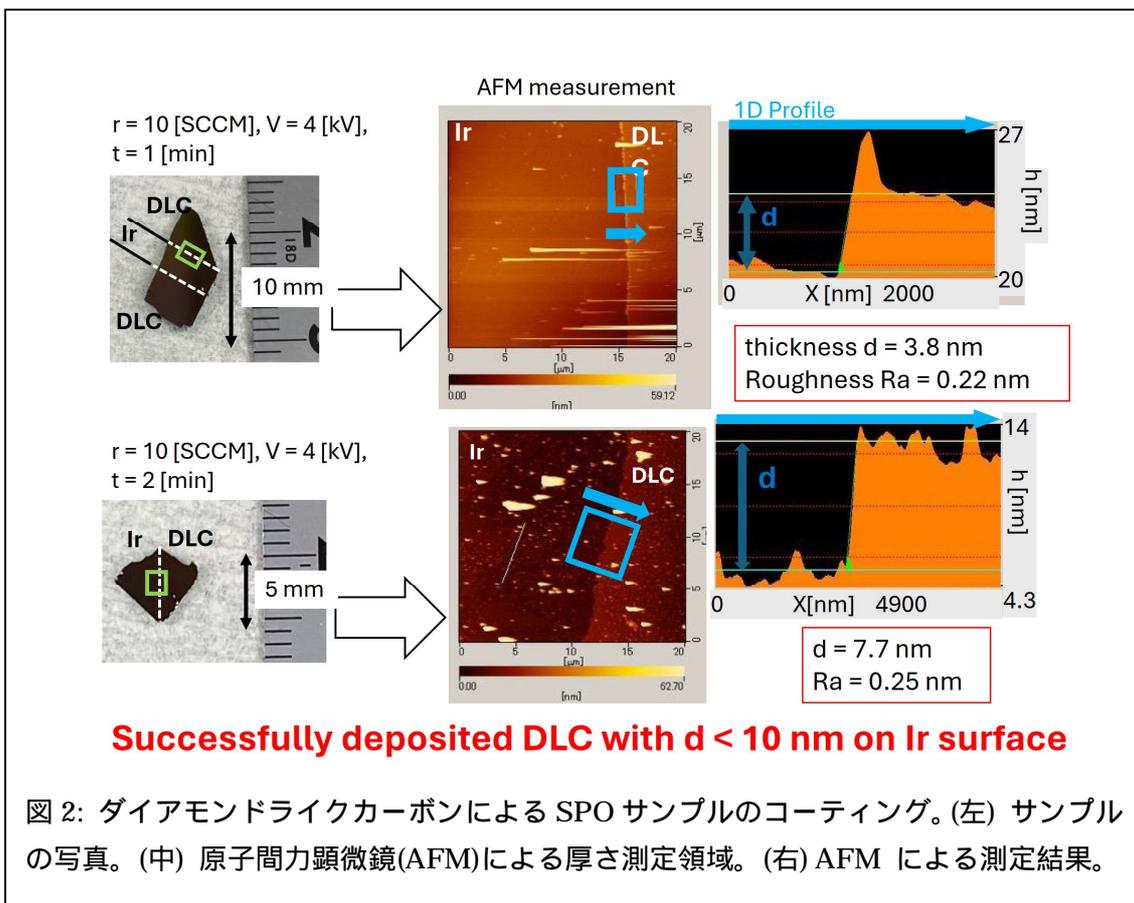


図2: ダイヤモンドライクカーボンによるSPOサンプルのコーティング。(左) サンプルの写真。(中) 原子間力顕微鏡(AFM)による厚さ測定領域。(右) AFMによる測定結果。

(3) ASSTのミーティングを通して、Athenaの観測計画(Mock observation plan)の作案の議論、サイエンス要求文書の作成に参加した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 5件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Abarr Q., Awaki H., Baring M.G., Bose R., De Geronimo G., Dowkontt P., Errando M., Guarino V., Hattori K., Hayashida K., Imazato F., Ishida M., Iyer N.K., Kislak F., Kiss M., Kitaguchi T., Krawczynski H., Lisalda L., Matake H., Maeda Y., Matsumoto H., et al.	4. 巻 126
2. 論文標題 XL-Calibur --- a second-generation balloon-borne hard X-ray polarimetry mission	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 102529 ~ 102529
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.astropartphys.2020.102529	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Maeda Yoshitomo, Awaki Hisamitsu, Furuzawa Akihiro, Gadson Thomas A., Gau Ephraim, Guarino Victor, Gunji Shuichi, Hall Kenny E., Harmon Keon D., Hattori Kengo, Hayashida Kiyoshi, Heatwole Scott E., Hossen Arman, Ishibashi Kazunori, Ishida Manabu, Kislak Fabian, Krawczynski Henric, Matsumoto Hironori et al.	4. 巻 11444
2. 論文標題 XL-Calibur: the next-generation balloon-borne hard x-ray polarimeter	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the SPIE	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2560319	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Yoneyama Tomokage, Noda Hirofumi, Hanaoka Maho, Okazaki Koki, Asakura Kazunori, Hayashida Kiyoshi, Ishikura Ayami, Sakuma Shotaro, Hattori Kengo, Matsumoto Hironori, et al.	4. 巻 985
2. 論文標題 Screening and selection of XRISM/Xtend flight model CCD	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment	6. 最初と最後の頁 164676 ~ 164676
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nima.2020.164676	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Awaki Hisamitsu, Maeda Yoshitomo, Matsumoto Hironori, Svendsen Sara, Bavdaz Marcos, Collon Maximilien, Ferreira Desiree D. M., Guainazzi Matteo, Hoshino Masato, Ide Shuntaro, Ishibashi Kazunori, Kan Wansu, Miyazawa Takuya, Shimizu Sadayuki, Tamura Keisuke, Uesugi Kentaro, Willingale Richard et al.	4. 巻 7
2. 論文標題 Measuring the atomic scattering factors near the iridium L-edges for the Athena silicon pore optics reflector	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/1.JATIS.7.1.014001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Ide Shuntaro, Hayashida Kiyoshi, Noda Hirofumi, Kurubi Hiroyuki, Yoneyama Tomokage, Matsumoto Hironori	4. 巻 72
2. 論文標題 Discovery of a transient X-ray source Suzaku J1305-4930 in NGC4945	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psaa023	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計3件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 松本浩典
2. 発表標題 X線天文衛星 Athena 計画の現状
3. 学会等名 日本天文学会2020年秋季年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松本浩典
2. 発表標題 X線天文衛星Athena
3. 学会等名 宇宙科学シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松本浩典
2. 発表標題 Athena
3. 学会等名 高エネルギー宇宙物理連絡会シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	山口 弘悦 (Yamaguchi Hiroya) (00513467)	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・准教授 (82645)	
研究分担者	石川 久美 (Ishikawa Kumi) (00709173)	東京都立大学・理学研究科・助教 (22604)	
研究分担者	粟木 久光 (Awaki Hisamitsu) (30252414)	愛媛大学・理工学研究科(理学系)・教授 (16301)	
研究分担者	坪井 陽子 (Tsuboi Yohko) (70349223)	中央大学・理工学部・教授 (32641)	
研究分担者	前田 良知 (Maeda Yoshitomo) (80342624)	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・助教 (82645)	
研究分担者	三石 郁之 (Mitsuishi Ikuyuki) (90725863)	名古屋大学・理学研究科・講師 (13901)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
オランダ	European Space Agency			