

令和元年6月11日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K13787

研究課題名(和文) 秒角以下で天体サイズを測定する多重像式X線干渉計の発明

研究課題名(英文) Invention of Multi Image X-ray Interferometer Module for sub-arcsecond imaging of X-ray sources

研究代表者

林田 清 (Hayashida, Kiyoshi)

大阪大学・理学研究科・准教授

研究者番号：30222227

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：新しい原理の天文用X線干渉計、多重像X線干渉計を提案した。格子とピクセル検出器だけを組み合わせた構成で得られる多数の像を、格子周期で重ねあわせて天体の像をえる。このとき、回折による像の広がり为了避免のために、タルボ干渉条件を満たす波長のX線光子だけ選択する点がポイントになる。原理的には50cmの超小型衛星サイズでチャンドラ衛星の角度分解能0.5秒角を超える性能が期待できる。数ミクロンの位置分解能を得るために、可視光用の微小ピクセルCMOS検出器に着目、常温でX線光子計測可能であることを見出した。これを用いた放射光施設で多重像X線干渉計の原理実証に成功し、0.3秒角をきる分解能を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

天文学の観測において、優れた角度分解能が重要であることはガリレオ以来の様々な発見が証明しており、最近のブラックホールのイメージのように社会的インパクトも大きい。X線天文学では、斜入射X線ミラーを使ったシステムが必須であるという固定観念が蔓延しているが、本研究は全く異なる原理を提案し、かつ、技術的コスト的に困難とされているChandra衛星の角度分解能を超える見込みを与えた。我々の提案の方法は、格子の周期、格子・検出器間距離に関してスケールラブルで、0.1秒角、0.01秒角、さらにはマイクロ秒角のシステムも可能である。将来の様々な衛星形態に適応可能である。

研究成果の概要(英文)：We have invented a new type of X-ray interferometers consisting of a grating and an X-ray pixel detector. By stacking multiple X-ray images obtained with this configuration, we can measure the profile of the light source in principle. However, diffraction blurs the image. We thus select X-ray events of which energy satisfy the interferometric condition called Talbot effect. to obtain a sharp image. We name this Multiple Image X-ray Interferometer Module (MIXIM). We can obtain angular resolution better than the Chandra satellite (0.5 arcsecond) with very small satellite of 50 cm size. MIXIM requires positional resolution of a few micrometer for the detector. We thus introduce CMOS pixel detector designed for visible light and succeeded in detecting X-rays at room temperature. We conducted X-ray irradiation experiment at a synchrotron facility using this detector and demonstrated that MIXIM principle surely works. Our current record is 0.3 arcsecond in resolution.

研究分野：X線天文学

キーワード：X線干渉計 X線天文学 ブラックホール X線検出器

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

1993年打ち上げのあすか衛星以降、X線天体の観測には、斜入射X線ミラーとX線 CCD を組み合わせた望遠鏡システムを使用するのが標準となっている。角度分解能は、ミラーの精度で決まり、日本の衛星では 1-3 分角程度、ヨーロッパの XMM-Newton 衛星で 15 秒角と、より長波長側の観測装置に比べると十分とはいえない。唯一、1999 年打ち上げのアメリカの Chandra 衛星は、例外的に 0.5 秒角という角度分解能をもち、それをいかした多くの発見がなされている。

しかし、Chandra 衛星ミラーの再製作は技術的、コスト的に難しいとされており、実際、2030 年代打ち上げのヨーロッパの大型天文台 ATHENA でも、目標が 5 秒角である。

斜入射X線ミラーは、焦点距離が 3m から 12m と長く、必然的に衛星も大型にならざるを得ないという点も問題であった。

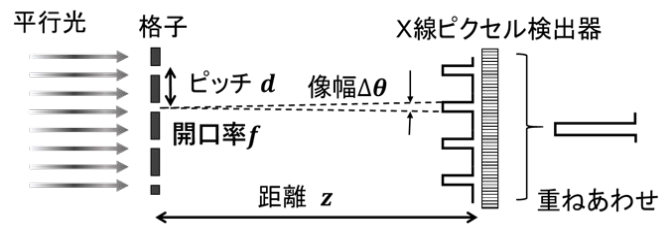
高い角度分解能を、斜入射X線反射鏡望遠鏡システムとは異なる方式、具体的には、X線干渉計で実現する構想も提案されたが、技術的、コスト的難度はさらに高く、実現は難しいと考えられていた。

2. 研究の目的

我々は、新たな構成のX線干渉計の原理を提案した(Hayashida+2016)。斜入射X線ミラーとも、従来考えられてきた天文用X線干渉計とも異なり、格子とピクセル検出器を組み合わせただけの単純な構成をとる。天体からやってきたX線が格子を透過してできた多数のスリット像をX線ピクセル検出器で撮像する。この像は天体の広がりを反映した光源プロファイルが格子周期で繰り返されたものになる。データ解析で像を重ね合わせることで精度の高い光源プロファイルが得られる。例えばピッチ $d=5\mu\text{m}$ 、開口率 $f=0.2$ の格子を用いて、 $z=50\text{cm}$ 離して検出器をおいた場合、0.4 秒角に相当する像幅になる。これは、50cm サイズの超小型衛星で、Chandra 衛星を超える角度分解能が実現できることを示唆している。

しかし、一般には回析によって像は訛されてしまう。そこで、タルボ効果を利用する。タルボ効果は光の波長を λ として、 d^2/λ の整数倍の位置にシャープな格子の像ができるという干渉現象である。X線検出器で検出した各イベントに対しX線波長を測定し、このタルボ干渉条件を満たすイベントのみを取り出すことで、クリアな像が得られる。

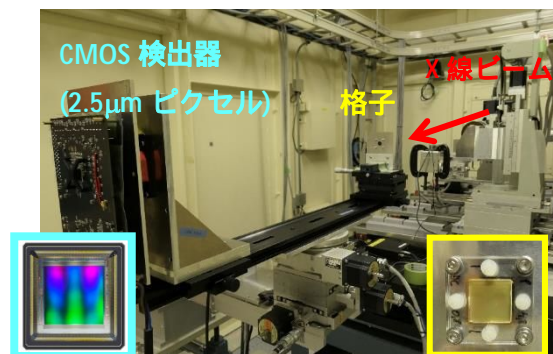
これが、我々の提案した多重像X線干渉計の原理である。



3. 研究の方法

原理提案のあと、フレネル近似の理論計算を実施し、定量的検討をすすめるとともに、原理実証実験を開始した。4.8ミクロン周期、開口率0.5の格子をLIGAプロセスで製作した。まず、実験室内でマイクロフォーカスX線源を光源に、検出器としてピクセルサイズ30ミクロンのX線用検出器(XRPIX2b)を使用して実験を行った。約4倍の拡大撮影で干渉縞の検出に成功した。しかし、天体からの平行光に対しては、等倍撮影が必要である。X線用に開発された検出器には24ミクロン以下のピクセルサイズのものがなく大きな技術的障壁になる。

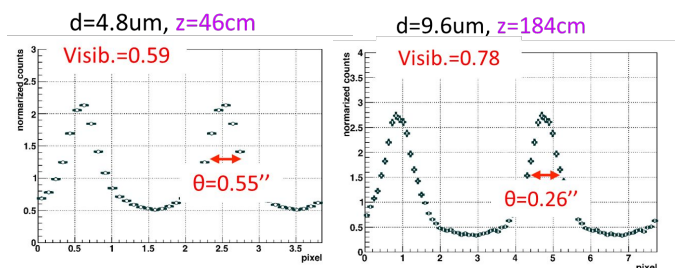
そこで、我々は、微小ピクセルの可視光用 CMOS センサーをX線検出に流用することを考えた。最初、4.25ミクロン、ついで2.5ミクロンのピクセルサイズの CMOS 検出器にX線照射した結果、常温で、X線光子の検出、エネルギー測定ができることがわかった。これは、X線用の CCD 検出器が-100 程度に冷却しなければならないことからすると驚きの性能である。新たに製作した、4.8ミクロン及び9.8ミクロン周期、開口率0.2の格子とともに、シンクロトロン放射光 SPring-8 BL20B2 に持ち込み、X線平行光照射実験を実施した



4. 研究成果

- (1) 多重像X線干渉計(MIXIM)という新原理のX線天体観測装置の提案したこと。
 - (2) 可視光用にデザインされた微小ピクセル CMOS 検出器がX線検出に使用できることを見出したこと。
 - (3) 微小ピクセル CMOS 検出器を利用した実験で MIXIM の原理実証をしたこと。
- にまとめられる。原理提案と実証をあわせて、MIXIM を発明したのが本研究である。

撮像装置としての性能向上は研究期間内、およびその後も進展している。SPRING-8 実験では様々な条件で実験を実施したが、例えば、格子・検出器間距離 46 cm、X線波長 0.1 nm では、0.55 秒角の像幅を得た。Chandra 衛星に匹敵する角度分解能を超小型衛星で実現できることを意味している。最小の像幅は 182cm の距離の実験で 0.26 秒角である。微小ピクセルの CMOS を使用したために、光電子放出方向の測定を通して、X線偏光を検出できることも実証した。



将来の衛星計画についても検討をすすめた。当初の動機は、Chandra 衛星をしのぐ角度分解能を超小型衛星で実現することであった。しかし、MIXIM の原理は格子の周期と格子・検出器間距離を同時に調整することでスケラブルとなる。10m のサイズの一般的なX線天文衛星に同乗する計画で 0.1 秒角、フリーフライヤを用いた 100m の距離をとれば 0.01 秒角、究極的には 250 万 km の距離をとった編隊飛行でマイクロ秒角が可能である。X線天文観測の新たなプランチを創出した。

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計 29 件)

- Asakura, K., [Hayashida, K.](#), 他 10 名, “X-ray imaging polarimetry with a 2.5- μm pixel CMOS sensor for visible light at room temperature”, JATIS (査読有), 5(3), 035002 (2019), DOI: 10.1117/1.JATIS.5.3.035002
- [Hayashida, K.](#) 他 10 名, ”Sub-arcsecond imaging with multi-image x-ray interferometer module (MIXIM) for very smallsatellite”, SPIE proc. (査読無し), 10699, 106990U (2018), DOI: 10.1117/12.2314181
- [Hayashida, K.](#), 他 39 名, “Soft x-ray imaging telescope (Xtend) onboard X-ray Astronomy Recovery Mission (XARM)”, SPIE proc. (査読無し), 10699, (2018), DOI: 10.1117/12.2311446
- Hosono, R., Kawabata, T., [Hayashida, K.](#) 他 7 名, “Advancement of X-ray radiography using microfocus X-ray source in conjunction with amplitude grating and SOI pixel detector, SOPHIAS”, Optics Express, 26, 21044 (2018), DOI: 10.1364/OE.26.021044
- Yoneyama T., [Hayashida K.](#), Nakajima H., Matsumoto H., “Universal detection of high-temperature emission in X-ray isolated neutron stars”, PASJ (査読有), 71, id17, (2019)
- Yoneyama T., [Hayashida K.](#), Nakajima H., Matsumoto H., “Unification of strongly magnetized neutron stars with regard to X ray emission from hot spots”, Astronomische Nachrichten (査読有), 340, 221 (2019), DOI: 10.1002/asna.201913593.
- Hitomi Collaboration, “Detection of polarized gamma-ray emission from the Crab nebula with the Hitomi Soft Gamma-ray Detector”, PASJ (査読有), 70, id.113, (2018), DOI: 10.1093/pasj/psy118.
- Hitomi Collaboration, “Hitomi X-ray observation of the pulsar wind nebula G21.5-0.9”, PASJ (査読有), 70, id.38, (2018), DOI: 10.1093/pasj/psy027.
- Takahashi et al., “Hitomi (ASTRO-H) X-ray Astronomy Satellite”, JATIS (査読有), 4, id.021402, (2018), DOI: 10.1117/1.JATIS.4.2.021402
- Yoneyama, T., [Hayashida K.](#), Nakajima H., Inoue S., Tsunemi H., “Discovery of a keV-X-ray excess in RX J1856.5-3754”, PASJ (査読有), 69, id.50, (2017), DOI: 10.1093/pasj/psx025
- Akamatsu H., Fujita Y., Akahori T., Ishisaki Y., [Hayashida K.](#) 他 5 名, ” Properties of the cosmological filament between two clusters: A possible detection of a large-scale accretion shock by Suzaku”, Astronomy & Astrophys. (査読有), 606, A1, (2017), DOI: 10.1051/0004-6361/201730497.
- Hitomi Collaboration, Solar abundance ratios of the iron-peak elements in the Perseus cluster, Nature (査読有), 7681, 478, (2017), DOI: 10.1038/nature24301.
- Tanaka Takaaki, Uchida Hiroyuki, Nakajima Hiroshi, Tsunemi Hiroshi, [Hayashida Kiyoshi](#), Tsuru Takeshi Go, Tadayasu Dotani et al., “Soft X-ray Imager aboard Hitomi (ASTRO-H)”, JATIS (査読有), 4, id.011211, (2018), DOI: 10.1117/1.JATIS.4.1.011211.
- Hitomi Collaboration, ” Atmospheric gas dynamics in the Perseus cluster observed with Hitomi”, PASJ (査読有), 70, id.9, (2017), DOI: 10.1093/pasj/psx138.
- Hitomi Collaboration, ” Measurements of resonant scattering in the Perseus Cluster

- core with Hitomi SXS ”,PASJ (査読有) , 70, id.10, (2017), DOI: 10.1093/pasj/psx127.
 Hitomi Collaboration, “Temperature structure in the Perseus cluster core observed with Hitomi”, PASJ (査読有) , 70, id.11, (2017), DOI: 10.1093/pasj/psy004.
 Hitomi Collaboration, “Atomic data and spectral modeling constraints from high-resolution X-ray observations of the Perseus cluster with Hitomi”, PASJ (査読有) , 70, id.12, (2017), DOI: 10.1093/pasj/psx156.
 Hitomi Collaboration, “Hitomi observation of radio galaxy NGC1275: The first X-ray microcalorimeter spectroscopy of Fe-K α line emission from an active galactic nucleus”, PASJ (査読有) , 70, id.13, (2017), DOI: 10.1093/pasj/psx147.
 Hitomi Collaboration, ”Search for thermal X-ray features from the Crab nebula with the Hitomi soft X-ray Spectrometer”, PASJ (査読有) , 70, id.14, (2018), DOI: 10.1093/pasj/psx072.
 Hitomi Collaboration, ”Hitomi X-ray studies of giant radio pulses from the Crab pulsar”, PASJ (査読有) , 70, id.15, (2018), DOI: 10.1093/pasj/psx083.
 21 Hitomi Collaboration, ” Hitomi observations of the LMC SNR N132D: Highly redshifted X-ray emission from iron ejecta”, PASJ (査読有) , 70, id.16, (2018), DOI: 10.1093/pasj/psx151.
 22 Hitomi Collaboration, “Glimpse of the highly obscured HMXB IGR-J16318-4848 with Hitomi”, PASJ (査読有) , 70, id.17, (2018), DOI: 10.1093/pasj/psx154.
 23 Nakajima Hiroshi, Maeda Yoshitomo, Uchida Hiroyuki, Tanaka Takaaki, Tsunemi Hiroshi, Hayashida Kiyoshi, et al. “In-orbit performance of the soft X-ray imaging system aboard Hitomi (ASTRO-H)”, PASJ (査読有) , 70, id.21, (2018), DOI: 10.1093/pasj/psx116.
 24 Hayashida, K. et al., “A new type of multiple image x-ray interferometer for arcseconds and subarcseconds Sources”, SPIE Proc (査読無) , 9905, id.990557, (2016), DOI: 10.1117/12.2232182.
 25 Hayashida, K. et al., “Hard x-ray imaging polarimeter for PolariS”, SPIE Proc(査読無) , 9905, id.99051A, (2016), DOI: 10.1117/12.2232472.
 26 Hitomi Collaboration, “Hitomi Constraints on the 3.5 keV Line in the Perseus Galaxy Cluster”, ApJ Letters(査読有)、837, L15, (2017), DOI: 10.3847/2041-8213/aa61fa
 27 Hitomi Collaboration, “The quiescent intracluster medium in the core of the Perseus cluster”, Nature(査読有)、535, 117, (2016), DOI: 10.1038/nature18627
 28 Inoue, S., Hayashida K. et al., “Search for a non-equilibrium plasma in the merging galaxy cluster Abell 754”, PASJ(査読有), 68, id.S23, (2016), DOI: 10.1093/pasj/psw027.
 29 Kamitsukasa, F., Koyama K., Nakajima, H., Hayashida, K., et al., “Suzaku study on the ejecta of the supernova remnant G272.2-3.2”, PASJ(査読有), 68, id.S7, (2016), DOI: 10.1093/pasj/psv114.

[学会発表] (計 27 件)

Hayashida, K. et al, Sub-arcsecond Imaging with Multi Image X-ray Interferometer (MIXIM) for Very Small Satellites, SPIE Astronomical Telescopes and Instrumentation, 2018

Hayashida, K. et al, S Soft x-ray imaging telescope (Xtend) onboard X-ray Astronomy Recovery Mission (XARM), SPIE Astronomical Telescopes and Instrumentation, 2018

林田清、他、サブ秒角でX線天体を撮像する多重像X線干渉計 MIXIM の開発 , 日本物理学会秋季年会、2018

林田清、他、X線多重像干渉計 MIXIM の開発現状(2) モデルプランの策定と概念検討、日本天文学会秋季年会、2018

林田清、他、多重像 X線干渉計 MIXIM 概念検討とモデルプラン策定、量子イメージング研究会、2018

Hayashida, K. et al., Sub Arc-seconds to Micro Arc-seconds Imaging with Multi Image X-ray Interferometer Modules (MIXIM), Japan-China High Energy Astrophysics Meeting, 2018

Hayashida, K. et al., Sub Arc-seconds to Micro Arc-seconds Imaging with Multi Image X-ray Interferometer Modules (MIXIM), 第 19 回宇宙科学シンポジウム, 2019

林田清、他、サブ秒角を達成した多重像X線干渉計(MIXIM)開発の現状とスケラブルなミッション形態、ブラックホール研究会、2019

林田清、他、多重像 X線干渉計 MIXIM の開発の現状微小ピクセルサイズの効能とスケラブルな計画立案、日本天文学会春季年会、2019

林田清、他、サブ秒角を達成した MIXIM の開発の現状とスケラブルな計画、高エネルギー宇宙物理連絡会シンポジウム、2019

林田清、他、サブ秒角で X線撮像する多重像 X線干渉計 MIXIM, 超小型衛星利用シンポジ

ウム,2019

Hayashida, K. et al., “Arcsecond and Sub-arcsecond Imaging with X-ray Multi-Image Interferometer and Imager for (very) small satellites”, X-ray Universe 2017, 2017

林田清, 他, サブ秒角の X 線天体撮影をめざす MIXIM 計画, 第 8 回 SOIPIX 会議, 2017.

Hayashida, K., SXI and Future Application of XPD, SNR, XPD, and X-ray Astronomy, 2017.

Hayashida, K. et al., Arcseconds and Sub-Arcseconds Imaging with Multi Image X-ray Interferometer Modules for Small Satellites, HSTD11&SOIPIX2017 Symposium, 2017.

林田清, 他, すざく衛星搭載 XIS の Si-K 吸収端付近の応答関数の問題とその改善, 日本天文学会秋季年会, 2017

林田清, 他, X 線天文衛星代替機(XARM) 搭載の軟 X 線撮像装置の検討状況, 日本天文学会秋季年会, 2017

林田清, 他, サブ秒角で X 線天体を撮像する多重像 X 線干渉計 MIXIM, 第 14 回 X 線結像光学研究会, 2017

林田清, 他, 近傍 AGN トーラスの X 線空間分解, 超巨大ブラックホール研究推進連絡会, 2017

林田清, 他, サブ秒角で X 線天体を撮影する多重像 X 線干渉計 MIXIM (1) 概念検討, 第 18 回宇宙科学シンポジウム宇宙科学研究所, 2018.

21 林田清, 他, サブ秒角で X 線天体を撮影する多重像 X 線干渉計 MIXIM (1) 概念検討と観測目標, 日本天文学会春季年会, 2018.

22 林田清, 他, X 線多重像撮像計, 干渉計の概念検討, 日本天文学会春季年会, 2017.

23 林田清, 他, 反射鏡を使用しない高解像度 X 線撮影法 X 線多重像撮像計・干渉計, 高エネルギー宇宙物理学連絡会シンポジウム, 2017.

24 林田清, 他, XRPIX を用いた地上用, 天文用 X 線干渉計の開発と基礎実験, 第 7 回 SOIPIX 研究会, 2016.

25 林田清, 他, X 線多重像干渉計の概念デザイン検討, 日本物理学会秋季年会, 2016.

26 林田清, 他, X 線多重像干渉計の概念検討と基礎実験, 日本天文学会春季年会, 2016.

27 Hayashida, K. et al., A New Type of “Multiple Image” X-ray Interferometer for arcseconds and subarcseconds sources, SPIE Astronomical Telescopes and Instrumentation, 2016.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ <http://wwwxray.ess.sci.osaka-u.ac.jp/~hayasida>

6. 研究組織

(1) 研究分担者 なし

(2) 研究協力者 なし

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。