

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 19 日現在

機関番号：32686

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2010～2011

課題番号：22654025

研究課題名（和文） 新型エックス線干渉計の試作研究

研究課題名（英文）

Development of a New X-ray Interferometer for Astronomical Usage.

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

研究成果の概要（和文）：

新型X線干渉計の実証実験を行うために、X線鏡とX線半透膜を製作評価した。また、実験のためのコヒーレント光源を炭素K α 線とピンホールを使い準備した。計算機シミュレーションで、これらの組み合わせと、現状のCCDで干渉縞の取得が期待できることがわかった。天体観測の評価のために、いくつかの星やブラックホールを想定して、それらのサイズ測定に必要な干渉計の基線長や面積、観測時間の評価を行った。その結果、ブラックホールのサイズ測定には、20m程度の望遠鏡があれば可能であることを示した。

研究成果の概要（英文）：

For a development of the new X-ray interferometer, we made and evaluated X-ray mirrors and X-ray beam splitters. Also we developed a coherent X-ray source for the laboratory demonstration of the X-ray interferometer with C-K X-rays and with pin-holes. We developed a simulation code and confirmed that we can obtain fringe patterns with our CCD camera. We also found that, in order to measure a size of a black hole, we need about 20m base line.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,900,000	0	1,900,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,800,000	270,000	3,070,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：天文学・天文学

キーワード：X線、干渉計、多層膜、CCD

1. 研究開始当初の背景

ブラックホールの研究、特にX線による観測的研究は、日本が世界をリードしている分野のひとつである。多種のブラックホール天体の存在とその関連、ブラックホール近傍で繰り広げられる超高エネルギー現象、宇宙ジェットとの関連等、詳しい研究結果の論文が

数多く出版されている

(<http://amalthea.phys.s.u-tokyo.ac.jp/tokuteiBH/>)。これらの進歩の先に行うべき事は、確定的なブラックホールの証拠を「像として」捉えることであると考えている。X線によるブラックホールの撮像は、NASAの「Beyond Einstein」ロードマップの最終ミ

ッションである。「Black Hole Imager」として挙げられている。そこでは、X線干渉計が用いられる予定である (<http://universe.nasa.gov/program/vision.html>)。X線干渉計は、実験室では実現されている。しかし、天体観測のためには巨大なシステムが必要である。前述の「Black Hole Imager」では5000kmにもわたる距離を稼ぐために人工衛星の編隊飛行が提案されている。実現するには50年以上はかかると思える。大きい装置が必要な理由のひとつは基線長を大きくすることであるが、それよりも、斜入射光学系で傾いた光を合成し干渉縞間隔を観測可能にすることが理由である。一方、私は、これまで、ミリ秒角を目指すという目標で、補償光学を使ったX線望遠鏡の開発を行ってきた。このミリ秒角を目指す望遠鏡の開発の中で、常に、X線干渉計のもっと実現性のある形態は無いだらうかと探し続けていた。平成21年度まで頂いている、基盤研究(B)は、「超高角度分解能X線望遠鏡からX線干渉計への発展的研究」という課題で、X線干渉計の問題点等を考察してきた。また、X線偏光計の開発も行っており、そこでは、X線ビームスプリッターを使用した。そんな中で、そのビームスプリッターを使うことで、干渉縞間隔を稼ぐ必要の無い新しいX線干渉計のアイデアが浮かんだ。

2. 研究の目的

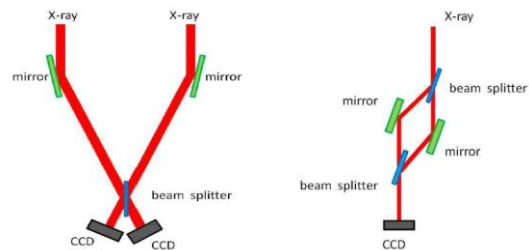
研究の最終目標は、ブラックホール候補天体を撮像して、ブラックホール候補天体が本当にブラックホールであることを示すことである。そのために、これまでも超高精度撮像を目指して、研究を行ってきた(参考文献 Kitamoto et al. 2007. “X-ray imaging and adaptive optics system for a 13.5nm telescope”, SPIE 他)。この構想の延長として、本研究では、超高精度撮像装置のひとつの候補であるX線干渉計 (<http://maxim.gsfc.nasa.gov/docs/science/science.html>) の試作実験を行う。本研究では、最近思いついた新型X線干渉計のアイデアの実証実験を行う。この実証ができれば、X線干渉計による天体観測、X線によるブラックホール撮像に大きく近づくことになる。

3. 研究の方法

2年間で、代表者である北本と大学院学生1名とで試作実験を進めた。初年度は、ピエゾアクチュエーターとドライバを購入、また、ビームスプリッター、反射鏡を試作購入した。それらを組み合わせて、X線斜入射マッハツ

エンダー干渉計として組み上げた。図1(左)は天体干渉計として考案した形状である。ビームスプリッター(半透膜)を用いることで、長い距離を必用としなくなった。右は、実験室で検証するための構成である。実験室では大きく広がった可干渉なX線を作ることが大変難しいので、やはり、ビームスプリッターを使うことで、一つのビームを二つに分割して干渉させた。形状は斜入射であるが、良く知られた、マッハツエンダー型の干渉計と同じである。

1年目は主として可視光による実験を行うとともに、X線での実験準備を行った。2年目には、X線マッハツエンダー干渉計で、干渉縞を確認することを目標に、可干渉光源の作成、鏡やビームスプリッターの性能を測定することを主眼とした。さらに、天体観測の可能性を探るために、計算機シミュレーションを行った。



4. 研究成果

X線による干渉縞の検出を目指して実験を進めたが、残念ながら、そこまでは至らなかった。可視光による構成の確認、使用するX線反射鏡およびX線半透膜の平面度測定、光源の整備、および計算機シミュレーションを行い、干渉計での今後の開発方針を確認することができた。

図1：左) 新型の天体観測用X線干渉計。右) 実験室での検証のための斜入射型マッハツエンダー型干渉計。

(1) 可視光による構成の確認

X線での実験の前に、実験室用の構成(斜入射マッハツエンダー型)の構成で、干渉縞を取得することから始めた。図2はレーザーと鏡、ビームスプリッターで構成したマッハツエンダー型の干渉計である。図3には、取得した干渉縞の例を示す。可視光では簡単に干渉縞を取得することができると確認した。



図2：可視光によるマッハツェンダー型干渉計の構成。右の端の箱が CCD である。

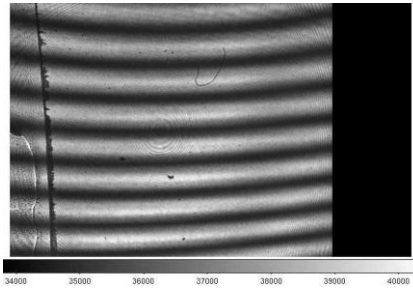


図3：可視光のマッハツェンダー型干渉計で取得した干渉縞の例。縞間隔は鏡の回転で変更できる。

(2) 平面度測定

X線鏡とX線半透膜をフィゾー干渉計で平面度測定を行った。図4に、半透膜で測定した形状を示す。形状の平面からのずれのrmsは平面鏡で5から7nm, 半透膜でも同じく5から7nm程度である。この大部分は大きなゆがみによる物である、

曲率半径の大きなゆがみはあるものの干渉縞取得実験には十分使用できる精度であることを確かめた。

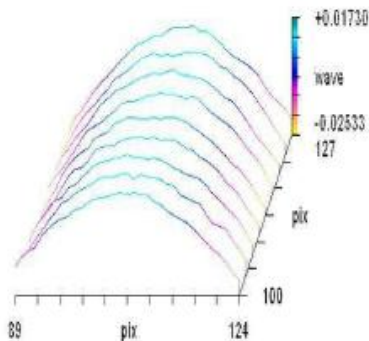


図4：ビームスプリッターの平面度。大きな曲がりが見える。

(3) 光源の準備

コヒーレント光源は、いくつかの特性X線で性能を調べた。図5は、Al-KX線を使い、100umと25umのピンホールを通して、CCD上にイメージを結ばせた時の像である。この像から、X線発生装置でのX線発生領域にの大きさは細いほうで135umであることがわかる。図6は、酸素KX線(2.37nm)で、ピンホールを通した場合の干渉による広がりを示す。5umのピンホールを通せば、かなり大きな広がりを示すことがわかる。20umでも広がりが十分見られる。従って、炭素KX線(約5nm)を用いれば、さらに回折による広がりが見え始め、可干渉な光源として使用できることが期待できる。

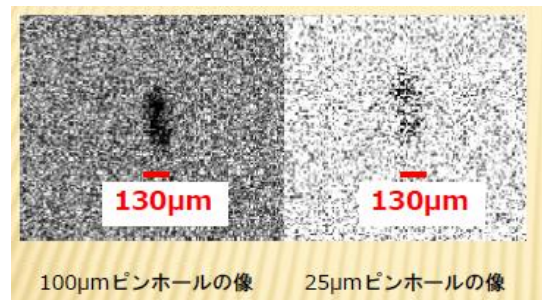


図5：Al-KX線をピンホール100umと25umを通した時に取得したイメージ

(4) 計算機シミュレーション

計算機シミュレーションは、実験室実験を想定した物と、天体観測を想定した形状の両方で行った。シミュレーションでは、対象物の広がり、波長の広がり(従ってコヒーレント長)を考慮し、フリンジパターンを計算する。そして、鮮明度を求めた。

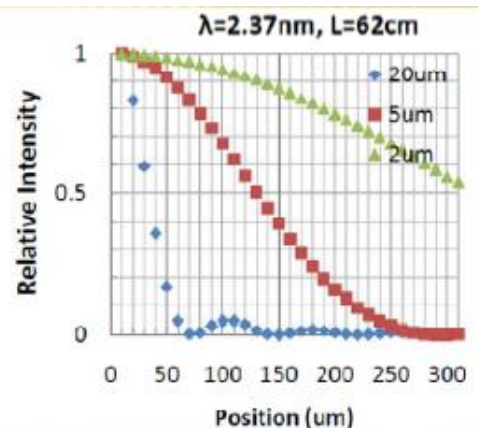


図6：酸素-KX線で20um, 5um, 2umのをピンホールを通した場合の回折による広がりの計算。

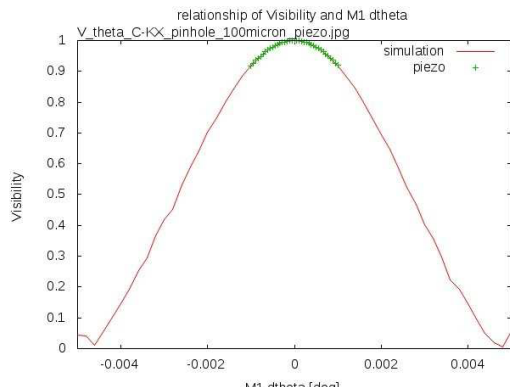


図7：マッツエンダー型干渉計での、鏡の回転角と鮮明度の関係。緑の部分が100umピンホールで実現できるところである。

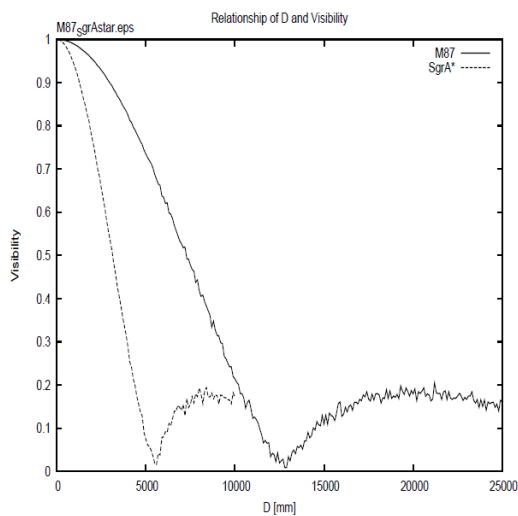


図8：Sgr A*とM87を観測した時の鮮明度。15mの基線長で最初の極小を検出できる。

実証実験のためのマッツエンダー型干渉計では、炭素K-X線で100umピンホールでも、わずかであるが、鮮明度の減少を確認することができる。図7は横軸にミラーを回転することで、可干渉度を下げた場合の鮮明度を示す。緑の部分が100umのピンホールで実現できる範囲である。1割近くの鮮明度の減少があり、現状のCCDカメラで測定できることを確認できた。

天体観測の評価には、いくつかの星やブラックホールを想定して、それらのサイズ測定に必要な干渉計の基線長や面積、観測時間の評価を行った。X線で明るい早期型星である τ Sco, ブラックホールの代表として、我々の銀河の中心のSgrA*, およびM87の活動銀河核を想定してシミュレーションを行った。図8は、SgrA*, とM87を観測した場合の基線長と鮮明度の関係である。15m程度の基線長で、ブラッ

クホールの大きさが測定できるという結果となった。干渉計の長さも20m程度で可能となる。このサイズは1個の衛星で実現可能な大きさであり、編隊飛行を必要としないという、重要な結果である。観測時間は、可能な有効面積により異なるが、現実的な面積と観測時間の組み合わせを検討することができた。

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4件)

- ①. Murakami, Hiroshi; Kitamoto, Shunji; Kawachi, Akiko; Nakamori, Takeshi, “Detection of X-Ray Emission from the Unidentified TeV Gamma-Ray Source TeV J2032+4130,” PASJ, 査読あり、2011, 63, S873-S878
- ② Takei, Dai; Ness, Jan-Uwe; Tsujimoto, Masahiro; Kitamoto, Shunji; Drake, Jeremy J.; Osborne, Julian P.; Takahashi, Hiromitsu; Kinugasa, Kenzo, “X-Ray Study of Rekindled Accretion in the Classical Nova V2491 Cygni”, PASJ, 査読あり, 2011, 63, S729-738
- ③ . Yoshida, Masaki; Kitamoto, Shunji; Murakami, Hiroshi, “Observation of the Cygnus OB2 Association with Suzaku and Long Term Light Curves”, PASJ, 査読あり, 2011, 63, S717-728
- ④ . Kitamoto, S.; Murakami, H.; Takei, D.; Sakata, K.; Yoshida, Y. “A new x-ray interferometer”, Proc. of SPIE, 査読無, 2011, 8147K, 57K, DOI. 10.1117 /12.894244

[学会発表] (計2件)

- ①. 北本俊二、“天体観測を目指す X 線干渉計とその光源の開発”、日本物理学会、2011.9.19、弘前大学
- ②. Kitamoto, S. “A New X-Ray Interferometer”, in “Optics for EUV, X-Ray, and Gamma-Ray Astronomy V”, 2011, 8.25, San Diego

[その他]

ホームページ等

<http://www2.rikkyo.ac.jp/web/kitamoto/>

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