

平成22年5月22日現在

研究種目： 基盤研究（B）
 研究期間： 2007～2009
 課題番号： 19340047
 研究課題名（和文） 超高角度分解能エックス線望遠鏡からエックス線干渉計への発展的研究
 研究課題名（英文） Development of an Ultra-High-Angular-Resolution X-Ray Telescope and an X-Ray Interferometer
 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）：補償光学を使用したX線望遠鏡を開発し、X線による撮像実験を行った。補償用の参照光源と撮像する物体との行路差を補正する方法を適用し、分解能を改善させることができた。その結果、1.55秒角の角度分解能を達成した。また、X線干渉計を製作するための検討を行った。X線用として有望な形状で可視光実験を行い、必要精度等を検証した。その結果、ピエゾ素子等を使うことでX線干渉計が作成可能という結論を得た。

研究成果の概要（英文）：We developed an X-ray telescope with an adaptive optics and performed an imaging experiment with X-rays. A difference of the path length, between the reference light and an objective light in our system, was corrected by using a modified-target-wave form for the adaptive logic and we confirmed a validity of our method. Consequently we obtained an angular resolution of 1.55 arc-sec. We examined possible problems for a fabrication of an X-ray interferometer. We constructed a test assembly for an optical interferometer and examined a possible precision for the X-ray interferometer. Consequently we found that the required precision can be achieved by using piezo-electric actuators.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	4,500,000	1,350,000	5,850,000
2008年度	3,300,000	990,000	4,290,000
2009年度	2,300,000	690,000	2,990,000
年度			
年度			
総計	10,100,000	3,030,000	13,130,000

研究分野：X線天文学、宇宙物理学

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、補償光学、望遠鏡、レーザープラズマ光源

1. 研究開始当初の背景

宇宙物理学において、質的に新しい情報を得、新しい発見をするためには、超高角度分解能を

達成することが、大変重要である。超高角度分解能を達成したい一つの動機は「ブラックホールイメージャー」として、宇宙に存在するブラ

ックホールを撮像観測してやろうということである。現在知られている知識を総合して、宇宙で最も大きく見えるブラックホールは、我々の銀河中心または、M87の中心核で、およそ10 μ 秒角の大きさである。従って μ 秒角の分解能が要求されるのである。

そこで、我々は超高角度分解能を目指したX線撮像技術として次の二つの研究を行う。

2. 研究の目的

(1) X線による補償光学

本研究前までにほぼ完成に近づいた13.5nmの直入射X線望遠鏡、「X-mas Telescope」で補償光学を実行し、撮像能力の改善を定量的に評価する。また、現状の補償方法の最適化を目指し、衛星搭載に向けた問題点を洗い出す。

(2) X線干渉計の検討

平面鏡のみを用いた単純なX線干渉計を動作させる。そして、その干渉計の将来性、あるいは改良について結論を出す。

3. 研究の方法

(1) X線による補償光学

本研究前までの状況は、X線検出ができ、可視光による補償光学もできたという段階であった。この二つを組み合わせ、補償光学の制御ソフトウェアにて、X線を撮像することで、X線の世界初の補償光学実験を行う。また、レーザープラズマ光源を立ちあげ、X線撮像に使用することで、十分な強度のX線が期待でき、大変効率よく性能評価できると期待できる。そのレーザープラズマ光源を使い、定量的性能評価を行う。

(2) X線干渉計の検討

平面鏡のみを用いたX線干渉計の、可視光用モデルを作り、動作確認を行うと共に、X線で使用した時にどの程度の精度が必要であるのか、また、問題点はどこかの検討を行う。

4. 研究成果

(1) X線による補償光学

①実験用望遠鏡

本研究で使用する実験用望遠鏡を図1に示す。上流部はLPS（レーザープラズマ光源）に接続されており、この光は主鏡、可変形状鏡を通してCCDに入射する。また、上流には補償用レーザーが設置されている。このレーザーからの光は参照波面として、主鏡、可変形状鏡を通り波面センサー（HAS032）に入射する。

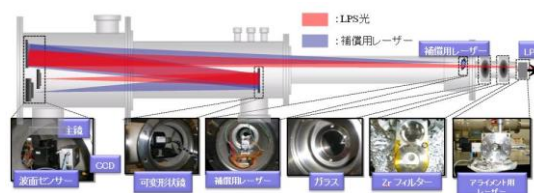


図1：X線望遠鏡

主鏡は、「新世代加工システム」で、研削、研磨した直径100mm、曲率半径4mの球面鏡である。外縁10mmはカバーで覆うことで、実験では直径80mmで使用している。表面粗さは2~7nm(rms)程度である。鏡の表面は、ロシアの「X-ray Company」でMo/Si多層膜をコーティングした。13.5nmでは場所により30~50%の反射率で、実験には支障のない値

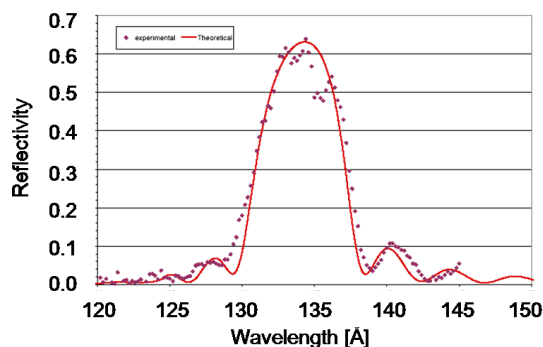


図2：可変形状鏡のX線反射率

が得られている。可変形状鏡はCILAS社(仏)製のBIM31を使用している。直径55[mm]、表

面粗さの rms は 0.32[nm]程度、電圧をかけない場合の形状誤差の rms は 5.9[nm]程度であり、主鏡と同じく Mo/Si 多層膜でコーティングされている。直入射で波長 13.5[nm]に対する反射率は 60%を超える理想的な値が得られている。図 2 に測定した反射率を示す。

可変形状鏡の鏡面内部には 31 個のバイモルフピエゾ素子が埋めこまれている。ピエゾ素子は加えられた力を電圧に変換する、あるいは電圧を力に変換する圧電効果を利用した受動素子である。バイモルフ型ではこの素子を 2 枚張り合わせ、一方に分極方向もう一方に分極と反対方向に電場を与える事で、片側が縮み反対側が伸びるため面を曲げることができる。波面センサーは Imagine Optic 社(仏)製の HAS032 を使用している。この波面センサーはシャックハルトマン型の波面センサーで、32×32 個のマイクロレンズアレイと 512×512[pixel]の CCD で構成されている。CCD 検出器は浜松ホトニクス社製の S7170-0909 を使用している。ピクセルサイズが 24[μm]、512×512[pixel]の CCD であり、低エネルギー X 線を捕らえるために有効な裏面照射型である。X 線での実験を行うときは、X 線だけ通して可視光を遮断するために Zr フィルターを使用する。Zr フィルターは間隔約 386 μm、線幅 31 μm のメッシュで保護されている。今回の実験では、このメッシュの影を撮像することで性能評価を行う。また、可視光を使った実験時には、Zr の保護に使っているメッシュと同じで Zr が無いメッシュを使う。

②LPS 可視光撮像実験

LPS は、532nm の可視光レーザーを金属(今回の実験では銅)に照射する事で高温プラズマを発生させるが、照射したレーザー光及び高温プラズマからの可視光でも輝く。今回の実験では、その可視光を使ってメッシュのイメージの撮像を行った。波面センサーは別のレーザー光をピンホールで回折させた理想

球面を使用している。補償を行う前と行ったあとで LPS 可視光による[532nm]のメッシュのイメージの変化を調べた。撮像されたメッシュのイメージと断面の輝度のグラフであるラインプロファイルは図 3 のようになった。

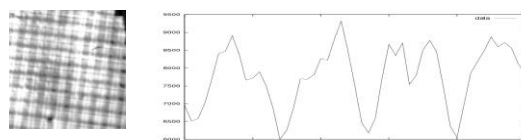


図 3 : 補償が無い時の像と断面図

焦点成分 (focus) と傾き成分 (tilt) 以外の全ての収差を取り除いた目標波面を作成した。この波面に向けて可変形状鏡を変形させる制御を行い LPS 可視光でメッシュのイメージを撮像した。この目標波面に向けて制御をかけたとき目標波面とのズレは r. m. s. で 0.041 μm、P. V. で 0.204 μm となり、制御前の 1/3 以下になった。このときのメッシュのイメージとラインプロファイルは図 4 のようになった。制御前のイメージと比較するとメッシュがより鮮明になっている。ラインプロファイルもメッシュの切れ込みによる輝度の変化が約 2500 で制御前より大きくなっていることがわかる。

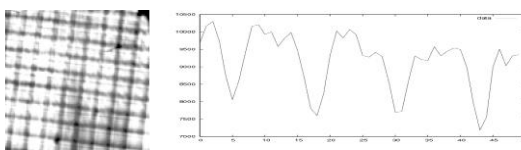


図 4. 補償を書けた時の像と断面図

③目標波面の修正

Xmas 望遠鏡はその配置上、補償用のレーザー光源と撮像を行う LPS 光源の光路に差がある。しがたって、補償波面から収差を取り除くように制御を行っても LPS 光の波面には光路差による収差成分が残ってしまう。このため②の結果のように補償をかけても回折限

界まで性能を引き出すことができない。そこで目標波面の各収差を変化させて最も LPS 光のイメージが良くなる目標波面の形を探した。そして、決定した修正量を加えた目標波面に向けて制御を行った。この目標波面に向けて補償を行ったときのメッシュのイメージとラインプロファイルは図 5 のようになった。

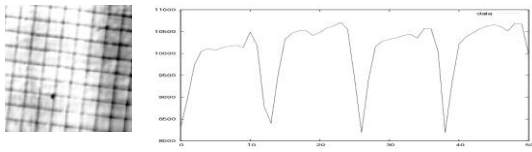


図 5. 行路差を補正した補償を書けた時の像と断面図

メッシュのイメージは補償を行う前に比べて鮮明に見えるようになった。角度分解能は 2.07 秒角となった。

④X 線撮像実験

LPS からの X 線[13.5nm]を用いて補償を行わない場合、tilt, focus 波面で補償を行った場合、光路差を修正した波面で補償を行った場合の 3 通りについてメッシュのイメージの撮像を行い分解能を算出した。光路差を修正した目標波面で補償をかけたときの X 線でのメッシュのイメージとラインプロファイルを図 6 に示す。

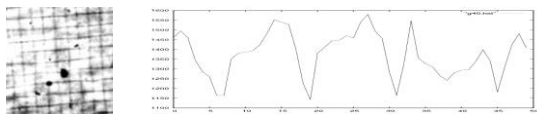


図 6. X 線の補償後の像と断面図

この結果から光路差を修正した場合が最も分解能がよく 1.55 秒角となったが回折限界の 0.04 秒角には至らなかった。

(2) X 線干渉計の検討

X 線干渉計を実現するためには、複数の X 線ビームを合成する必要がある。斜めに入射させて合成するなら、その角度を小さくしなければいけないため、必然的に長い光学系が必要になる。しかし、ビームスプリッターを用いる事で 2 つのビームを平行にする事ができる。X 線用のビームスプリッターは多層膜を用いる。波長と入射角を決めて、反射率と透過率が同じ程度になるような多層膜を作れば、これはビームスプリッターとなる。

図 7 に Mo/Si の 4 層の多層膜のエネルギーに対する反射率・透過率の計算結果をプロットした。酸素の KX 線 (2.5nm) が 8° で斜入射した場合、エネルギーは約 500[eV]でエネルギー幅は標準偏差で 50[eV]である。この条件では、 $\lambda/\Delta\lambda$ は ~ 10 の分光性能を合わせもち、コヒーレンス長は $\sim 10\lambda$ となる。また、透過率も反射率も約 8%なので天体観測に充分使うことができる。

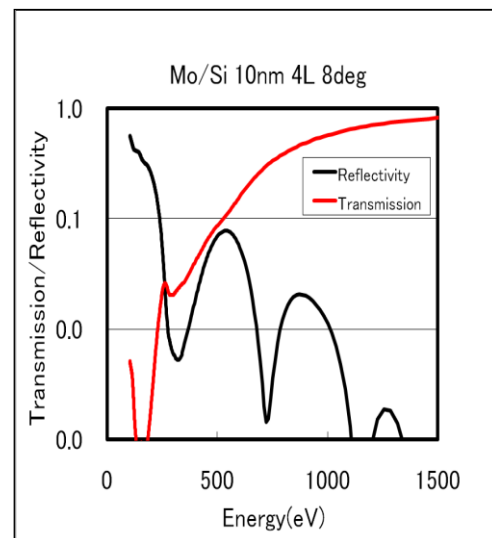


図 7. Mo/Si の 4 層多層膜へ入射角 8° で入射した X 線の透過率と反射率

干渉計の鏡の配置は図 8 の左右対称構造を考えた。このように、二つのビームを重ねることで短い光学系が実現でき、天体観測に適している。

実験をする場合、天体からの X 線と異なり広い範囲でコヒーレントな X 線を作るのは困難である。そこで細いビームを分割して実験する事となる。そこで図 8 と鏡の向きが異なるだけで基本的には同じと考えられるマツハツェンダー干渉計 (図 9) がよいという結論に至った。この配置であれば鏡が 2 つ、ビームスプリッターが 2 つ、CCD が 1 つで合計 5 箇所を調整すればよい。X 線を観測したいので鏡は斜入射である。

ビームスプリッター、CCD に対して要求される精度を検討した。その結果、平行度は波長 2nm、5nm、13.5nm で順に 0.4 秒角、1.0 秒角、2.8 秒角となった。鏡の位置のずれは波長 2nm、5nm、13.5nm で順に $0.14 \mu\text{m}$ 、 $0.36 \mu\text{m}$ 、 $0.96 \mu\text{m}$ となり、ピエゾ素子を使うことで十分達成できるという結論に至った。

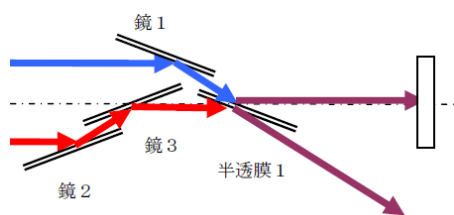


図 8. 干渉計の鏡の配置案

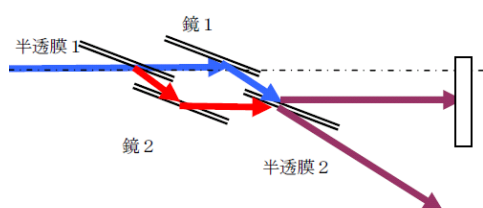


図 9. 実験室での実験時の鏡の配置案

(3) 国内外に対する位置づけと展望

本研究課題で、X線での補償光学を実現しその有効性を確かめることができた。これは、世界でも最先端のことである。本年(2010)年の国際光工学学会 (S P I E) でも X 線補償光学が主題の研究会が開かれるようになった。その中で我々は最先端を進んでいるが、今後競争が激しくなるであろう。X線干渉計での

天体観測に向けての開発は、米国のグループと我々だけであると思われる。米国のグループが大きく進んでいるが我々の新しい方式で、追随したいと考えている。

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 13 件)

- ① X-ray polarimeter with a transmission multilayer
Kitamoto, S., et al., 2010, Review of Scientific Instruments, 81, 023105, 査読あり
- ② Suzaku Detection of Superhard X-Ray Emission from the Classical Nova V2491 Cygni
 Takei, D.; Tsujimoto, M.; Kitamoto, S.; Ness, J.-U.; Drake, J. J.; Takahashi, H.; Mukai, K (2009, ApJ, 697L, 54), 査読あり
- ③ Swift X-Ray and Ultraviolet Monitoring of the Classical Nova V458 Vul (Nova Vul 2007)
 Ness, J.-U.; Drake, J. J.; Beardmore, A. P.; Boyd, D.; Bode, M. F.; Brady, S.; Evans, P. A.; Gaensicke, B. T.; Kitamoto, S.; Knigge, C.; and 11 coauthors (2009, AJ, 137, 4160), 査読あり
- ④ X-Ray Spectroscopy of the Classical Nova V458 Vulpeculae with Suzaku
 Tsujimoto, M.; Takei, D.; Drake, J. J.; Ness, J.-U.; Kitamoto, S., (2009, PASJ, 61S, 69), 査読あり
- ⑤ Search for Near-Infrared Pulsation of the Anomalous X-Ray Pulsar 4U 0142+61
 Morii, M.; Kobayashi, N.; Kawai, N.; Terada, H.; Tanaka, Y. T.; Kitamoto, S.; Shibasaki, N., (2009, PASJ, 61, 51), 査読あり
- ⑥ Super-hard X-Ray Emission from eta Carinae Observed with Suzaku
 Sekiguchi, Akiko; Tsujimoto, Masahiro; Kitamoto, Shunji; Ishida, Manabu; Hamaguchi, Kenji; Mori, Hideyuki; Tsuboi, Yohko (2009, PASJ, 61, 629), 査読あり

- ⑦ Swift X-Ray and Ultraviolet Monitoring of the Classical Nova V458 Vul (Nova Vul 2007)
Ness, J.-U.; Drake, J. J.; Beardmore, A. P.; Boyd, D.; Bode, M. F.; Brady, S.; Evans, P. A.; Gaensicke, B. T.; Kitamoto, S.; Knigge, C.; and 11 coauthors (2009, AJ, 137, 4160), 査読あり
- ⑧ Suzaku Results on Cygnus X-1 in the Low/Hard State
Makishima, Kazuo; Takahashi, Hiromitsu; Yamada, Shin'ya; Done, Chris; Kubota, Aya; Dotani, Tadayasu; Ebisawa, Ken; Itoh, Takeshi; Kitamoto, Shunji; Negoro, Hitoshi; and 2 coauthors (2008, PASJ, 60, 585), 査読あり
- ⑨ Detection of a Rare Supersoft Outburst Event during a Suzaku Observation of 1E0102.2-7219
Takei, D.; Tsujimoto, M.; Kitamoto, S.; Morii, M.; Ebisawa, K.; Maeda, Y.; Miller, E. D. (2008, PASJ, 60, S231-S239), 査読あり
- ⑩ Suzaku Spectroscopy of Extended X-Ray Emission in M17
Hyodo, Y.; Tsujimoto, M.; Hamaguchi, K.; Koyama, K.; Kitamoto, S.; Maeda, Y.; Tsuboi, Y.; Ezoe, Y. (2008, PASJ, 60, S85-S93), 査読あり
- ⑪ Low/Hard State Spectra of GRO J1655-40 Observed with Suzaku
Takahashi, H.; Fukazawa, Y.; Mizuno, T.; Hirasawa, A.; Kitamoto, S.; Sudoh, K.; Ogita, T.; Kubota, A.; Makishima, K.; Itoh, T.; and 16 coauthors (2008, PASJ, 60, S69-S84), 査読あり
- ⑫ Broadband X-Ray Spectroscopy of A0535+262 with Suzaku
Naik, S.; Dotani, T.; Terada, Y.; Nakajima, M.; Mihara, T.; Suzuki, M.; Makishima, K.; Sudoh, K.; Kitamoto, S.; Nagase, F.; and 2 coauthors (2008, ApJ, 672, 516 - 523), 査読あり
- ⑬ A Bright Transient X-Ray Source Near the Galactic Center Found in Archival Ginga Data from 1987
Yamauchi, S.; Nakagawa, Y.; Sudoh, K.; Kitamoto, S. (2007, PASJ, 59, 1141-1151),

査読あり

[学会発表] (計6件)

- ① EUV imaging experiment of an adaptive optics telescope
Kitamoto, S.; Shibata, T.; Takenaka, E.; Yoshida, M.; Murakami, H.; Shishido, Y.; Gotoh, N.; Nagasaki, K.; Takei, D.; Morii, M. 2009SPIE.7437E..51K
- ② Development of an EUV polarimeter with a transmission multilayer
Kitamoto, S.; Murakami, H.; Shishido, Y.; Saito, K.; Watanabe, T.; Kanai, J.; Takenaka, E.; Nagasaki, K.; Takei, D.; Morii, M. 2009SPIE.7435E..11K
- ③ EUV-imaging experiments of a normal incident telescope with an adaptive optics system
Kitamoto, S.; Ogita, T.; Shibata, T.; Takenaka, E.; Gotoh, N.; Shishido, Y.; Takei, D.; Yoshida, M.; Morii, M.; Murakami, H. 2008SPIE.7015E.107K
- ④ X-ray Imaging and adaptive optics system for a 13.5 nm telescope
S. Kitamoto et al, 2007, Proceedings of SPIE, 6688, "Optics for EUV, X-Ray and Gamma-Ray Astronomy III" 2007.8.28-31, Vol 6688-17-1~18

[その他]

ホームページ等

<http://www.rikkyo.ac.jp/~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

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし