

立教大学学術推進特別重点資金 (立教 S F R)
個人研究費
2006 年度研究成果報告書

研究代表者	所属・職名	氏名
	理学部・教授	北本 俊二 印
研究課題	多層膜蒸着 CCD を使った X 線偏光素子の開発研究	
研究期間	2006 年度	
研究経費	500,000 円	

研究の概要 (200~300 字で記入、図・グラフは使用しないこと)

我々は、偏光を観測するとき同時に撮像し、どこがどのように偏光しているのか調べる
 ことが天体の放射機構の研究で本質的であると考えている。そこで、本申請研究におい
 て、偏光した X 線で選択的に撮像できる装置として、多層膜フィルターと CCD を用い
 た偏光撮像装置の開発をスタートさせた。本申請研究で多層膜フィルターを購入し、
 別途取り揃えた、CCD、および、フィルター駆動機構を真空実験装置に組み込んだ。そ
 して、高エネルギー加速器研究機構にて、性能評価実験を行い、偏光性能を表す M ファ
 クターがおよそ 30% 以上を持つことを確認した。

キーワード (研究内容をよく表しているものを 3 項目以内で記入。)

{ 多層膜 } { X 線偏光計 } { CCD }

研究成果の概要 (図・グラフ等は使用しないこと。)

本研究の最終目的は、高性能 X 線偏光計を開発し、その偏光計で天体からの X 線を観測し、偏光情報から天体の物理状態、X 線の放射機構を研究することである。天体を観測して得られる情報は、像、エネルギースペクトル、時間変動と偏光である。これらのうち、天体からの X 線観測において、像やエネルギースペクトル、時間変動の技術はずいぶん進歩し、多くの観測が行われてきた。しかしながら、X 線の偏光観測はほとんど行われなかった。それは、効率よく X 線偏光を測定する技術が不足していたことが最大の原因である。ここ数年になって、いろいろな分野での X 線偏光計の進歩とあいまって、天体の X 線偏光観測に応用しようという機運が高まってきており、国内外での開発競争が始まっている。開発の進んでいるものは、比較的硬 X 線で利用できる散乱方向の偏光方向による違いを利用したものである。それらは撮像能力は無いかあるいは大変乏しい。われわれは、偏光を観測するとき同時に撮像し、どこがどのように偏光しているのか調べるのが天体の放射機構の研究で本質的であると考えている。そこで、偏光した X 線で選択的に撮像できる装置として、多層膜フィルターと CCD を用いた X 線偏光計の開発を始めた。

本研究では最も製作が容易と考えられる波長の長い X 線、ここでは 13.5nm の X 線、に照準をあわせ、これまで我々も X 線望遠鏡の開発等で実績のある Mo/Si の多層膜を、各物質の厚さ、総数等をパラメータとして偏光測定に最も良いパラメーターを計算により探した。

まずは、本研究申請の前から進めていた、CCD への多層膜の直接蒸着について検討した。昨年度、実際に多層膜を CCD に直接蒸着する試みを行った。しかし、偏光検出する能力は、計算値に比べてはるかに小さなものであった。その原因を追究するために、CCD の表面を AFM にて観察し、表面粗さを測定した。その結果 CCD 表面の面粗さは 10nm-rms にも及ぶもので、多層膜として十分な機能を発揮できなかったということがわかった。

その結果に基づいて、CCD への直接蒸着はあきらめて、多層膜フィルターを購入した。一方、実験に適するように裏面照射 CCD の Head 基盤を新たに製作した。偏光を検出したことを確かめるために、多層膜フィルターは CCD の前で回転させる必要がある。その回転機構を設計製作した。本研究期間では、回転は回転導入フランジを通して、真空の外から手動で回転させることとした。

これらの準備の後、高エネルギー加速器研究機構の物質構造科学研究所のフォトンファクトリーで実験を行った。フォトンファクトリーでは高度に偏光した X 線を、作成した措置に照射することができる。そこで、多層膜フィルターを回転させて様々な偏光方向の X 線に対する性能評価を行った。

フォトンファクトリーでの実験では 2007 年 2 月にビームライン 12A (BL-12A) を用いた。BL-12A は光学素子評価用に建設されたもので、軟 X 線、真空紫外領域の光学素子の特性を偏光成分別に測定できる。ブレード型の回折格子分光器を備え、エネルギー範囲は 30eV から 1000eV の偏光した光を使用できる。また 7 種類のフィルターが常設されており、選んで使用することができる。

研究成果の概要 (つづき)

実験は BL-12 からの単色で偏光した光を、我々の準備した CCD と多層膜を装着した真空槽に導くことで行った。我々の真空槽とビームラインの間には Zr フィルターを挿入し、ビームラインからの可視光や紫外線を遮断するとともに、ビームラインの要求する超高真空と、我々の比較的悪い真空状態を接続することなく実験できるように工夫した。我々の真空チェンバーには、シャッターと 45 度に傾けた回転機構に取り付けた、Mo/Si 多層膜フィルター、それから、検出器としての CCD が配置されている。多層膜フィルターの回転角度が正確にわかるように、Mo/Si 多層膜フィルターの直後には直角のメッシュを取り付けた。そのメッシュの影を解析することで、多層膜フィルターの回転角を正確に求めることができる。

実験は、多層膜フィルターの回転角を固定して、X 線のエネルギーを掃引する方法と、X 線のエネルギーを固定して、多層膜フィルターの回転角度を変えていく方法と二通り行った。また、回折格子の高次光を軽減するために Be と B のフィルターを使用した。まず、高次光遮断フィルターとして Be を用い、エネルギーを 80eV から 120eV の間の 8 点で角度を 0 度から 12 度おきに 360 度まで 31 点のデータを取得した。また、角度を 0 度から 60 度おきに 360 度までの 7 点でエネルギーを 70eV から 120eV までの間を 19 点掃引した。このときはフィルターを Be と B の両方で取得した。

Mo/Si 多層膜のデザインは 92eV でもっとも大きな偏光による違いが現れるように設計した。偏光検出の度合いを表す量として M-factor と呼ばれる量があり、

$$M = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$$

で、定義される。ここで、 I_{\max}, I_{\min} は、偏光角により最も強く受かるときの強度と最も弱く受かるときの強度である。計算機シミュレーションでは $M \sim 35\%$ が見込まれる。

実験結果によると、エネルギーが 96eV で、偏光による信号強度がもっとも大きくなり、 $M \sim 31\%$ であることが確認できた。まだ、実験データの解析において、分光器の高次光の量を十分に評価しきれていない。高次光の補正をするとさらに高い値となると予想でき、かなり理想的な場合に近いものができているといえる。実験では、高次光の量を評価するために、いろいろなフィルターでのエネルギー掃引データを取得している。それらを解析することでさらに定量的な評価は可能であろう。また、少しのエネルギーの違いは角度のわずかな違いで説明できる量である。

この研究で、多層膜と CCD を使った偏光撮像装置は大変高い性能を発揮できることを示すことができた。また、低エネルギー側で使える唯一の偏光計であるので、天体観測に向けて大きな一歩を踏み出すことができた。

研究発表 (研究によって得られた研究経過・成果を発表した①~④について、該当するものを記入してください。該当するものが多い場合は主要なものを抜粋してください。)

- ①雑誌論文 (著者名、論文標題、雑誌名、巻号、発行年、ページ)
- ②図書 (著者名、出版社、書名、発行年、総ページ数)
- ③シンポジウム・公開講演会等の開催 (会名、開催日、開催場所)
- ④その他 (学会発表、研究報告書の印刷等)

①査読論文

X-Ray Emission-Line Profiles of Three Early-Type Stars Observed with Chandra
Yamamoto Norimasa; Takano Haruko; Shunji Kitamoto; Kohmura Takayoshi (2007, PASJ, 59, 237)

Suzaku Observation of Diffuse X-Ray Emission from the Carina Nebula
Hamaguchi, Kenji; Petre, Robert; Matsumoto, Hironori; Tsujimoto, Masahiro; Holt, Stephen S.; Ezoe, Yuichiro; Ozawa, Hideki; Tsuboi, Yohko; Soong, Yang; Kitamoto, Shunji; Sekiguchi, Akiko; Kokubun, Motohide (2007, PASJ, 59, S151)

X-Ray Imaging Spectrometer (XIS) on Board Suzaku
Koyama, Katsuji et al. (46 Authors) (2007, PASJ, 59, S23)

The X-Ray Observatory Suzaku
K, Mitsuda et al. (143 Authors) (2007, PASJ, 59, S1)

Cyclotron Resonance Energies at a Low X-Ray Luminosity: A0535+262 Observed with Suzaku
Terada, Y. et al. (31 Authrs) (2006, ApJL, 648, L139)

Periodic long-term X-ray and radio variability of Cygnus X-1
P. Lauchowicz, A.A, Zdziarski, A. Schwarzenberg-Czerny, G.G., Pooley and S. Kitamoto (2006, MNRAS, 368, 1025)

- ②図書 (著者名、出版社、書名、発行年、総ページ数)
なし
- ③シンポジウム・公開講演会等の開催 (会名、開催日、開催場所)
なし
- ④その他 (学会発表、研究報告書の印刷等)

An application of active optics to x-ray imaging: X-mas (x-ray milli arc-second) Project

Tsujimoto, Masahiro; Kitamoto, Shunji; Ohkubo, Yohsuke; Sato, Jun'ichi; Watanabe, Takeshi; Sudoh, Keisuke; Sekiguchi, Akiko; Suga, Kazuharu; Sekiguchi, Hiroyuki, 2006, Proceedings of SPIE, 6272, "Advances in Adaptive Optics II," Jun. 13, 2006, 152K

X-ray polarimeter with a multilayer-coated CCD
Kitamoto, Shunji; Watanabe, Takeshi; Kanai, Jun'ichi; Sudoh, Keisuke; Satoh, Jun'ichi; Ohkubo, Yohsuke; Sekiguchi, Akiko; Tsujimoto, Masahiro; Suga, Kazuharu; Kohmura, Takayoshi; Maeda, Yoshitomo; Okada, Shunsaku; Itoh, Yumi; Nakamura, Ryoko; Kunieda, Hideyo, 2006, Proceedings of SPIE, 6266, "Space Telescopes and Instrumentation II: Ultraviolet to Gamma Ray" Jun. 13, 2006, 83K

Development and Current Status of a soft X-ray Telescope with an Adaptive Optics System

Kitamoto, S, "Workshop on X-Ray and XUV active Optics", SOLEIL Synchrotron, Orsay, France, 2006.12.15-16

Adaptive Optics System for the soft X-ray Telescope

Kitamoto, S. "Advanced Optical Fabrication for Analyzer Technologies(ADOPTTECH2006)", Riken, Wako, Saitama, Japan, 2006.6.08-6.09