

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 3 日現在

機関番号：82645

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25870744

研究課題名(和文) 偏光X線観測を目指したDLC蒸着による曲げられた結晶の開発

研究課題名(英文) Development of a bent Si crystal for X-ray imaging polarimetry

研究代表者

飯塚 亮(Iizuka, Ryo)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・研究員

研究者番号：50548120

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,000,000円

研究成果の概要(和文)：偏光X線は、高エネルギー現象に携わる極限天体周辺の構造や放射メカニズムを決定する鍵になることが期待されるが、30年にわたって観測的成果がない。そこで私はX線天文学の新たな局面を斬り開くために、曲げられた大きなシリコン単結晶を用いた、鉄輝線に特化する偏光感度の極めて高いブラッグ反射型偏光計を開発する。シリコン単結晶を精度よく曲げることが難しいが、結果、CVD法とCFRPを用いて、放物面や回転放物面に制御することに成功した。また、偏光計全体の設計を行い、最適であることがわかった。

研究成果の概要(英文)：X-ray polarization is the key to search for the spatial structure and emission mechanism around the celestial object in the extreme condition. However, the progress for the polarimetry is considerably delayed because of technical difficulties. In order to make a breakthrough in the field of X-ray polarimetry, we have developed a new type of Bragg crystal polarimeter with the large bent Si crystals. We focused the energy band including the series of Fe-K line emission (~7 keV) to give important information in the X-ray astronomy. It is difficult to bend the crystals with the high accuracy. We succeeded to bend the crystals to the shape of paraboloid and paraboloid of revolution with DLC method and CFRP.

研究分野：X線天文学

キーワード：X線天文学 X線偏光計 シリコン結晶 ブラッグ反射 ダイヤモンドライクカーボン

1. 研究開始当初の背景

偏光は、電磁波の放射の空間分布、波長分布、時間変動とならんで天体の物理状態を探るための重要な情報源である。偏光 X 線は、高エネルギー現象に携わる極限天体周辺の構造や放射メカニズムを決定する鍵になることが期待され、特に、ブラックホールの時空構造や存在証明が直接的に観測できると考えられる。ところが実際には、1970年代にカニ星雲から有意な X 線偏光が検出されて以来、30年にわたって観測的成果がない。

2. 研究の目的

そこで、私は X 線天文学の新たな局面を切り開くために、曲げられた大きなシリコン単結晶を用いた、鉄輝線付近に特化する偏光感度の極めて高いブラック反射型偏光計を開発する。

特に、X 線天文学では、鉄輝線付近の偏光情報が、天体の性質を知るうえで非常に重要だと私は考えている。偏光感度を非常に高くするにはブラック反射型しかない。よって、ブラック反射させる結晶を曲げることでエネルギーに幅を持たせることを考えた(図1参照のこと)。

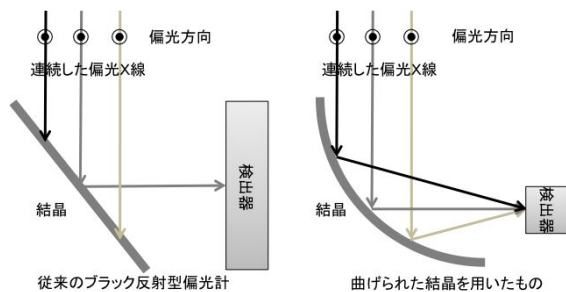


図1：ブラック反射型偏光計の概略図

現在は、我々が曲げられた結晶は円筒型だが、最終的には回転放物面の形状に制御を行う(図2)。これにより、飛躍的に S/N 比が向上し、結像も可能であるため、私が目指している設計が完成する。

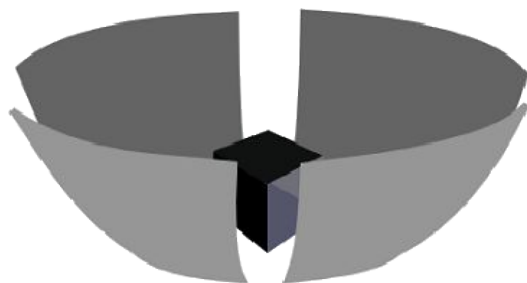


図2：回転放物面を用いたブラック反射型の光学系の設計。中心は検出器を置く。大きさは50cm四方程度。

3. 研究の方法

(1) 1年目として、まず、曲げる対象である単結晶として、直径200mm、厚み50~100μm

程度のシリコン(Si 100)を用意する。Si400の面格子間隔は、X線天文学で重要である鉄輝線に対して、45度付近でブラッグ反射を起こす。45度で入射したX線は、最も偏光が測定しやすい条件を満たすため、偏光感度がほぼ100%と最大にできる。しかし、このように大きく薄いシリコンは加工が難しいとされるが、共同研究してきた企業の精密加工技術により製作が可能である。

次に、集光能力を上げるため、CVD法を用いて、選択的にDLCを蒸着剥離することでシリコン単結晶を円筒から放物面に形状を制御する。選択的にDLCを成膜するためには、セグメント技術を応用する。これは、金属のメッシュを電極に用いて実現するもので、金網の上に単結晶を置くと、金網がマスクになってDLCがセグメント上に成膜される。このメッシュの形を変えることで、どのように形状が制御できるのかを調べる。また、酸素を蒸着することでDLCを逆に剥離することも可能である。これらから、曲げられた結晶が、放物面の表面形状を持つか、変位計で調べる。

並行して、偏光X線を放射すると考えられる新たな天体を探査する。現在打ち上げられているすざく衛星、チャンドラ衛星およびXMMニュートン衛星のデータを解析することによってそれらを探査する。特に、他の波長で強く偏光が検出されている天体について、X線でも検出可能であるか評価を行い、2年目に行く最終的な設計にフィードバックをかける。

(2) 2年目として、放物面から回転放物面へ、さらにシリコン結晶の形状の制御を行う。お椀型の回転放物面にするため、今度はDLC蒸着された曲がった単結晶をレーザーを照射して加工させることで実現する。既存するナノパルスレーザーシステムにより、DLCの選択的剥離だけでなく、シリコン単結晶自体の切断加工が可能である。これらにより、回転放物面を実現する。その2次元形状の測定として必要になるのが、非接触型レーザー変位計である。最後に、曲げられた単結晶をX線測定で評価を行う。既存するX線ビームラインは、X線偏光面回転ビームラインとして使用することも可能になっている。このシステムによって、偏光感度、有効面積、エネルギー帯域、集光能力の4つの条件を調べる。

製作によって得られたすべてのパラメータから、曲げられたシリコン結晶を用いた偏光計全体の設計を行う。回転放物面に加工されたシリコン結晶を用いて、その非焦点面にX線CCD検出器を設置することを考える。入射したX線はブラッグ反射させることによって検出されるため、偏光状態によって反射される強度に差が生じる。また、CCD検出器を焦点面から意図的にずらして設置することによって、反射したX線を点で集光せず、イメージング化する。したがって、CCD上の

画像の濃淡から入射したX線の偏光状態を求めることができる。これによって、エネルギーに感度を持ち、偏光X線を検出できる観測装置となる。

この際、1年目に探査をした天体が有力な情報になってくる。偏光X線が検出される可能性のあるいくつかの天体について、その明るさやスペクトルを仮定した場合、設計した偏光計が、鉄輝線を含めた連続成分に対して、X線天文衛星の観測装置として十分な偏光感度を持つか検討を行う。そして、国内学会や海外学会において発表を行い、次世代X線天文衛星の新しい偏光計として強くアピールしていく。

4. 研究成果

1年目として、まず曲げる対象である単結晶として、直径200mm、厚み50~100 μ m程度のシリコン(Si 100)を用意した。大きく薄い結晶は、共同研究してきた企業との精密加工により製作した。次に集光能力をあげるために、円筒から放物面の形状に制御することを目標とした。まずは、CVD法でDLCをシリコン結晶に蒸着する際、選択的に厚みに分布を持たせることにより、放物面の形状になるかを確認した。表面形状測定と集光実験をおこなった結果、1分角程度の角度分解能が得られることがわかった。並行して、X線測定をするためのビームラインを整備した。また、公開天文台に思う気、実際に天体の観測を行い、偏光観測の可能性について調査をした。

2年目として、放物面から回転放物面へ、さらにシリコン結晶の制御をおこなった。しかしながら、結晶は3次元に曲がらないため、お椀型に回転放物面に制御することは容易ではなかった。そこで、我々は炭素繊維強化プラスチック(CFRP)を用いて3次元基盤を製作し、シリコンを張り合わせていくことで回転放物面に制御するアプローチを試みた。その結果、細長い台形状にシリコン結晶を台シングカットで切り出し、CFRP上に張り合わせながら同時に成形することで、3次元形状のシリコン結晶を作ることができることを突き止めた(図3参照、2016年3月に特許出願中)。

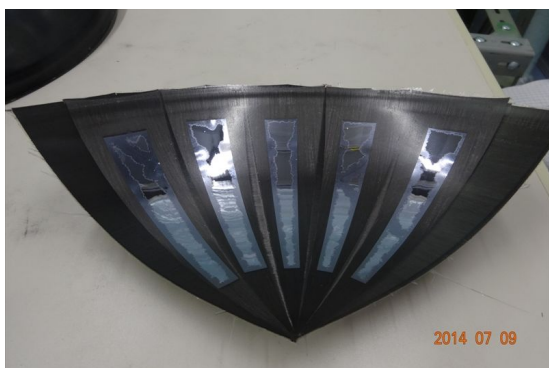


図3：試作したCFRP基盤(球型に近い)、細く台形状に切り出したシリコン結晶を5枚

貼り合わせてある。

今回は、球に近い金属金型で成形をおこなったが、1 μ m以下の精度で成形ができているため、精密な回転放物面の金型を用いて成形を行えば、我々が目指す放物面が完成する。また、これらを元に、製作によって得られたパラメーターから、曲げられたシリコン結晶を用いた偏光計全体の設計をおこなった。高い偏光感度により、鉄輝線の広がりを調べるためには最適であると言えることがわかった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計14件)

Tamura Takayuki, Iizuka Ryo, Maeda Yoshitomo, Mitsuda Kazuhisa, Yamasaki Noriko(ISAS/JAXA), An X-ray Spectroscopic search for dark matter in the Perseus cluster, PASJ, 2015, 67, 2316

Iizuka Ryo(ISAS/JAXA)、他15名、Simultaneous multi-wavelength observation of large flare stars, SUZAKU-MAXI 2014, 2014, 154

Murakami Hiroshi, Maeda Yoshitomo, Iizuka Ryo, Hayashi Takayuki, Saitoh Takayuki, Nobukawa Masayoshi, Suzaku Weekly Monitoring of the Galactic Nucleus Sgr A*, SUZAKU-MAXI 2014, 2014, 186

Miyazawa Takuya, Iizuka Ryo(12番目)、他13名、Optical measurements of ASTRO-H HXT2 between before and after the environmental tests, SUZAKU-MAXI 2014, 2014, 333

Kawagoe A., Iizuka R.(8番目)、他10名、The nature of the giant flare star HD347929 detected with MAXI/GSC, SUZAKU-MAXI 2014, 2014, 164

Iizuka Ryo(ISAS/JAXA)、他12名、Ground-based X-ray calibration of the Astro-H soft X-ray telescopes, SPIE, 2014, 914458, 11

Sato T., Iizuka R., Hayashi T., Ishida M., Tomikawa K., Kikuchi N.(ISAS/JAXA)、他6名、Revealing a detailed performance of the soft X-ray telescope of the ASTRO-H mission, SPIE, 2014, 914459, 9

Hayashi Takayuki, Sato Toshiki, Tomikawa Kazuki, Kikuchi Naomichi,

Sato Takuro, Iizuka Ryo, Maeda Yoshitomo, Ishida Manabu (ISAS/JAXA), Upgrade of the thirty-meter X-ray pencil beamline at the Institute of Space and Astronautical Science, SPIE, 2014, 91444A, 7

Mori Hideyuki, Iizuka Ryo (8 番目), 他 15 名、Recent progress in the ground calibration of the ASTRO-H Hard X-ray telescope (HXT-2), SPIE, 2014, 914457, 10

Soong Yang, Iizuka Ryo (9 番目), 他 9 名、ASTRO-H Soft X-ray telescope (SXT), SPIE, 2014, 914428, 14

Awaki Hisamitsu, Iizuka Ryo (6 番目), 他 16 名、ASTRO-H Hard X-ray Telescope (HXT), SPIE, 2014, 914426, 9

Takahashi Tadayuki, Iizuka Ryo (65 番目), 他 246 名、The ASTRO-H X-ray astronomy satellite, SPIE, 2014, 914425, 24

Tamura T., Yamasaki N. Y., Iizuka R., Fukazawa Y., Hayashida K., Ueda S., Matsushita K., Sato K., Nakazawa K., Ota N., Takizawa M., Gas Bulk Motion in the Perseus Cluster Measured with Suzaku, ApJ, 2014, 782, 38

Maeda Yoshitomo, Nobukawa Masayoshi, Hayashi Takayuki, Iizuka Ryo, Saitoh Takayuki, Murakami Hiroshi, X-ray Weekly Monitoring of the Galactic Center Sgr A* with Suzaku, COSPER, 2014, 40, 1932

[学会発表] (計 20 件)

倉嶋翔 (首都大学東京) 竹井洋、飯塚亮 (ISAS/JAXA)、菊地直道、佐藤寿紀 (首都大学東京) 林多佳由、前田良知、石田学 (ISAS/JAXA)、Astro-H 搭載 SXS 較正用 55FeX 線源の絶対強度測定、日本天文学会 2015 年春季年会、2015 年 3 月

菊地直道、佐藤寿紀、倉嶋翔 (首都大学東京) 石田学、前田良知、飯塚亮、林多佳由 (ISAS/JAXA)、他 5 名、Astro-H SXT 用反射鏡の金の L 吸収端付近の反射率測定、日本天文学会 2015 年春季年会、2015 年 3 月

馬場崎康敬 (名古屋大学) 飯塚亮 (12 番目) 他 13 名、ダークバリオン段差計画 DIOS 搭載 4 回反射 X 線望遠鏡の大口径反射鏡開発、日本天文学会 2015 年春季年会、2015 年 3 月

Yoshitomo Maeda, Takayuki Hayashi, Ryo Iizuka (ISAS/JAXA), 他 4 名、Suzaku By-week Monitoring of the Galactic Center Sgr A* in X-ray (III)、日本天文学会 2015 年春季年会、2015 年 3 月

飯塚亮 (ISAS/JAXA)、他 16 名、大型放射光施設 SPring-8 を用いた Astro-H SXT 用 X 線反射鏡の測定、日本天文学会 2014 年秋季年会、2014 年 9 月

泉谷喬則、高橋千尋、坪井陽子 (中央大学) 飯塚亮 (ISAS/JAXA) 結晶反射鏡のモザイク化による積分反射率の向上、日本天文学会 2014 年秋季年会、2014 年 9 月

佐藤寿紀 (首都大学東京)、飯塚亮 (5 番目)、他 10 名、ASTRO-H 搭載 X 線望遠鏡の望遠鏡特性の評価(2)、日本天文学会 2014 年秋季年会、2014 年 9 月

菊地直道 (首都大学東京)、飯塚亮 (6 番目) 他 13 名、ASTRO-H 搭載 X 線望遠鏡 (SXT) の迷光測定、日本天文学会 2014 年秋季年会、2014 年 9 月

三宅梢子、坪井陽子、飯田悠、渡邊千夏、秋山昌俊 (中央大学) 藤井貢 (FKO)、飯塚亮 (ISAS/JAXA)、中央大学望遠鏡 CAT による MAXI で検出されたフレア星の可視光測光モニター、日本天文学会 2014 年秋季年会、2014 年 9 月

川越淳史 (中央大学) 飯塚亮 (7 番目) 他 10 名、ぐんま天文台による巨大フレア天台 HD347929 の高分散分光観測、日本天文学会 2014 年秋季年会、2014 年 9 月

坪井陽子 (中央大学) 飯塚亮 (ISAS/JAXA)、菅原泰晴、秋山昌俊、三宅梢子、飯田悠 (中央大学) 中央大学後楽園キャンパスに設置した小型望遠鏡 CAT、日本天文学会 2014 年秋季年会、2014 年 9 月

菊地直道 (首都大学東京) 飯塚亮 (6 番目) 他 13 名、ASTRO-H 搭載 軟 X 線望遠鏡 2 号機 (SXT-2) の地上性能評価、日本天文学会 2014 年春季年会、2014 年 3 月

富川和紀 (首都大学東京) 飯塚亮 (6 番目) 他 14 名、ASTRO-H 搭載 軟 X 線望遠鏡の迷光測定、日本天文学会 2014 年春季年会、2014 年 3 月

Ryo Iizuka (ISAS/JAXA), Yohko Tsuboi, Kohta Okada, Takashi Awaya, Takanori Izumiya (Chuo Univ), Development of a bent Si crystal for X-ray imaging

polarimetry、The 12th symposium on X-ray imaging Optics、2013 年 11 月

飯塚亮 (ISAS/JAXA)、他 22 名、Astro-H 衛星搭載 X 線望遠鏡 (SXT/HXT) の開発、第 57 回宇宙科学技術連合講演会、2013 年 10 月

泉谷喬則、粟屋崇、岡田豪太、坪井陽子 (中央大学)、飯塚亮 (ISAS/JAXA)、曲がった Si 結晶反射鏡の X 線及び可視光反射集光評価、日本天文学会 2013 年秋季年会、2013 年 9 月

飯塚亮 (ISAS/JAXA)、他 12 名、Astro-H 搭載 X 線望遠鏡 SXT/HXT のアラインメント計測、日本天文学会 2013 年秋季年会、2013 年 9 月

林多佳由、富川和紀、佐藤寿紀、佐藤拓郎、菊地直道、飯塚亮、前田良知、石田学 (ISAS/JAXA)、泉谷喬則 (中央大学)、宇宙科学研究所 新ビームラインの測定精度、日本天文学会 2013 年秋季年会、2013 年 9 月

富川和紀 (首都大学東京)、飯塚亮 (6 番目)、他 14 名、ASTRO-H 搭載用 軟 X 線望遠鏡 1 号機 (SXT-1 FM) の地上性能評価、日本天文学会 2013 年秋季年会、2013 年 9 月

秋山昌俊、坪井陽子 (中央大学)、飯塚亮 (ISAS/JAXA)、他 18 名、2013 年 1 月の II Peg フレアの多波長同時観測、日本天文学会 2013 年秋季年会、2013 年 9 月

6. 研究組織

(1) 研究代表者

飯塚 亮 (IIZUKA, Ryo)

宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・
研究員

研究者番号：50548120