

湾曲 Si 結晶反射鏡の形状制御による X 線偏光観測能力の改善

泉谷 喬則 (中央大学大学院 理工学研究科 物理学専攻 博士前期課程 1 年)

Abstract

我々は X 線撮像偏光計の新しい反射鏡開発のために高い偏光検出能力を期待できるブラッグ反射の原理に着目した。X 線天文学で重要な鉄の特性 X 線に対してブラッグ反射を起こす Si(100) 結晶を反射鏡として採用し、その Si 結晶を曲げることでブラッグ反射の弱点であるエネルギー帯域の狭さを克服した偏光 X 線の連続成分も観測できる反射鏡を作成しようと考えた。

反射鏡を曲げる方法としては、プラズマ CVD 装置により反射鏡裏面に DLC (Diamond-like-Carbon) を蒸着することで DLC と基板の間で内部応力が発生することにより円筒状に曲げることができた。そして、曲げた試料の試料の高さのデータを求め、円とのフィッティングを行い残差を求めることで円筒形に従っているということがわかった。また、その残差のデータから角度分解能を求めると 7.98[degree] と求まり、現在国際宇宙ステーションに搭載され観測を行っている装置 MAXI は、角度分解能およそ 1.0 degree であることと比較してみても、現時点で MAXI に桁で迫る性能を実現できていると言える。

1 Introduction

1.1 background

天体からやってくる X 線から得られる情報のうち時間変動、スペクトル、イメージ、近年の衛星技術や科学技術の発展によりとても精度の良い観測が行われるようになってきたが、偏光 X 線観測はその検出器の開発の難しさから遅れている。偏光 X 線はシンクロトロン放射やトムソン散乱を起源とし、磁場構造や降着円盤の構造を特定することができ、他の波長では見えない現象を解明する鍵になることが期待される。そこで、我々は新しい X 線偏光計開発のために高い偏光検出能力が期待できるブラッグ反射の原理に着目した。ブラッグ反射の条件式は以下の式で表される。

$$2d\sin\theta = n\lambda \quad (1)$$

d:結晶の格子面間隔、 θ :X 線の入射角度、 $n:0,1,2,\dots$ 、 λ :X 線の波長

ブラッグ反射では入射する X 線を水平成分と垂直成分に分けるとそれぞれ反射率は 1 と $\cos^2\theta$ になる。そのため 45° で X 線が入射するとすると垂直成分は打ち消され、水平成分だけを取り出すことができる (図 1 参照)。

また、X 線天文学で重要な鉄の特性 X 線 (6.4keV 付近) に対して 45° でブラッグ反射を起こす Si(100) 結晶の $\langle 400 \rangle$ 反射を反射鏡として採用することとした。

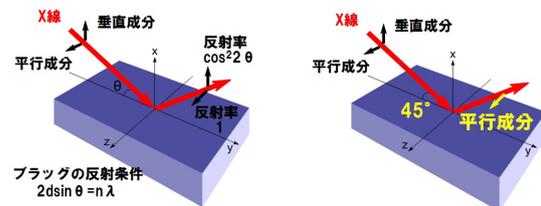


図 1: ブラッグ反射の原理

1.2 approach

ブラッグ反射の条件式 ((1) 式) に従うと X 線の連続成分が入射しても反射できるのはその角度に対応したエネルギーに限られてしまう。そこで、Si 反射鏡を湾曲させることで反射するエネルギーに幅をもたせようと考えた (図 2 参照)。これにより異なる位置で反射した X 線を集光するため、検出器も小さ

くでき S/N 比が上がるというメリットもある。

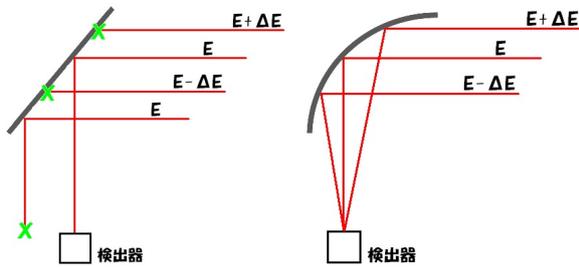


図 2: 形状による反射するエネルギーの違い 左:平らなとき 右:曲げたとき

2 湾曲反射鏡の製作

湾曲させる方法としてはプラズマ CVD 装置を用いて Si 結晶の反射面の裏側に DLC 薄膜を蒸着するというものである。原料ガス（アセチレン）を装置内に流し込むと、発生したプラズマにより分解された炭素が Si 結晶状に叩きつけられて DLC 薄膜が基板上に均一に形成される。すると、薄膜が厚くなるに従って結晶と薄膜との間に内部応力が発生し蒸着面が凸となる方向になめらかな円筒状に曲がる（図 3 上）。その曲げた試料が図 3 下である。

この手法で湾曲させた Si をレーザー変位計にて高さを測定することでどのくらい湾曲したかを評価する。高さデータを測定し理想曲線である円でフィッティングした後、理想曲線と測定値の残差をとることで曲げた反射鏡が円面に従っているかが評価できる。結果が図 4 である。この結果を見ると比較的円面に従って言えると推測できる。

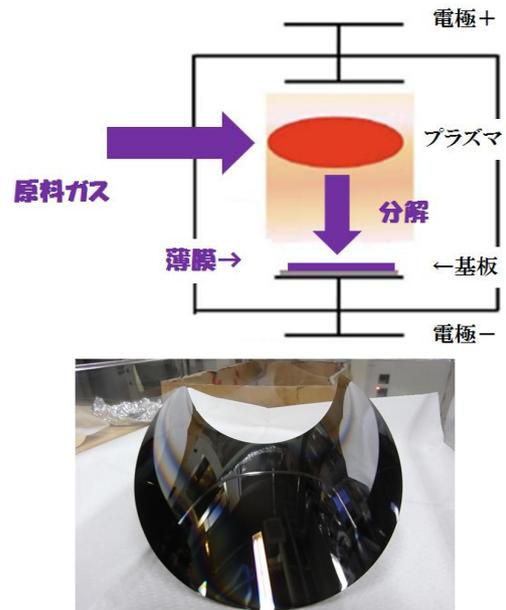


図 3: 上:CVD 装置の原理 下:CVD 装置により曲げた Si 結晶

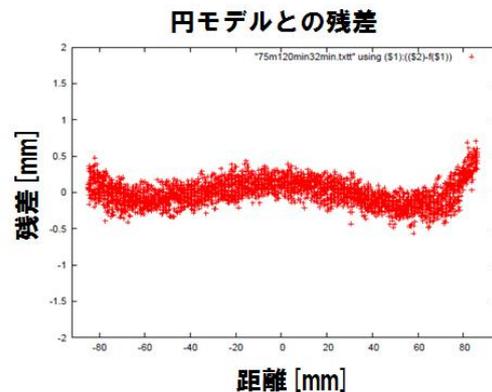


図 4: 円モデルとの残差

3 性能評価

円筒形に曲げた試料は放物面が実現できていると推測できるが、これをより数値的に評価しようと考えた。ここでは曲面の滑かさをを用いてさらなる評価を行う。前章で算出した残差は、理想放物面からのずれ、つまり表面のうねりを表している。このうねりは反射鏡として用いた場合に、焦点面での像の広がりにつながる(図5)。表面のうねりを各点の法線ベクトルの揺らぎによって表してみる。

法線ベクトルが表面の平均の向きまわりに、幅 $\sigma_{\text{法線}}$ のガウス分布でばらつくと仮定し、平均的な表面の傾きに対して入射角 θ で入射した X 線は、各点で入射角に幅 $\sigma_{\text{法線}}$ のばらつきを生じる。X 線は入射方向に対して 2 の方向に反射されるため、射出角度にはばらつき $2\sigma_{\text{法線}}$ を持つことになる。このことは、反射後の焦点面での像が $\sigma_{\text{法線}}$ のガウス分布に従うことを意味する(図5中、右)。

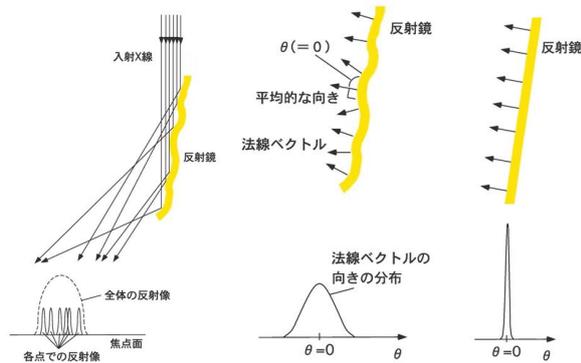


図5: 左:形状による像の広がり 中、右:各点での法線ベクトルのゆらぎ

前章で求めた残差のデータを、10点ずつ binning し、隣合う点を結んだ線の角度をそれぞれ算出した。その角度を法線ベクトルの角度に変換し、それぞれのばらつきをヒストグラムにおこした(図6)。このヒストグラムをガウシアンでフィッティングして、その幅 $\sigma_{\text{法線}}$ を求めた。さらに、

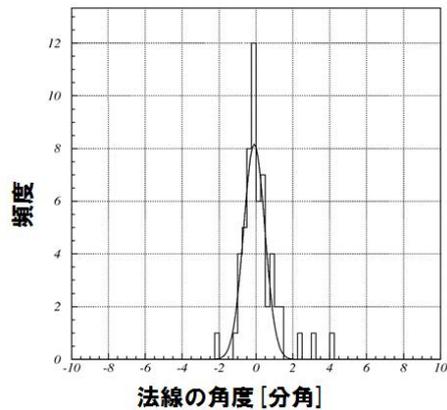


図6: 試料のヒストグラム

$$FWHM = 2\sqrt{2\ln 2}\sigma \quad (2)$$

$$\sigma = 2\sigma_{\text{法線}}$$

を用いて、 $\sigma_{\text{法線}}$ を FWHM(full width at half maximum : 半値全幅) に変換する。この場合の FWHM は角度分解能を表わす。この方法により円筒形に曲がった試料の角度分解能は

$$FWHM = 7.98[\text{degree}] \quad (3)$$

と求まった。この結果は、現在国際宇宙ステーションに搭載され観測を行っている装置 MAXI は、角度分解能およそ 1.0 degree であることと比較してみても、現時点で MAXI に桁を迫る性能を実現できているとすることができる。

Reference

- [1] 井上一、小山勝二、高橋忠幸、水本好彦「宇宙の観測 高エネルギー天文学」
- [2] 斎藤秀俊、大竹尚登、中東孝浩「DLC 膜ハンドブック」

2013 年度 第 43 回 天文・天体物理若手夏の学校

[3] 金原粲、白木靖寛、吉田貞史 「薄膜工学」

[4] 茂原正道、鳥山芳夫 「衛星設計入門」