

硬 X 線望遠鏡用 光線追跡シミュレータの開発

名古屋大学大学院 宇宙物理学研究室 X 線グループ (Ux 研)

博士課程前期 1 年 坂廻邊 果林

我々の研究室では、次期 X 線天文衛星 ASTRO-H 搭載用硬 X 線望遠鏡を製作している。望遠鏡から得られたデータから正しい天体の情報を読み取るためには、予め望遠鏡の応答関数を正確に求めておくことが必要になり、ASTRO-H ではシミュレーションを用いてこれを求める。今回はこの硬 X 線望遠鏡用光線追跡シミュレータの開発の現状を報告する。

1 硬 X 線望遠鏡

我々が製作している望遠鏡は、WolterI 型光学系に多重薄板型を用いた構造になっており、全体で約 1300 枚という多数の反射鏡を使用する。硬 X 線は光子統計が低いため、硬 X 線望遠鏡には高い集光能力が求められるので、開口効率の高い多重薄板型 X 線望遠鏡を採用している。しかし全反射を利用した従来の反射鏡では、硬 X 線に対して十分な反射率を得るには極端な斜入射角にする必要があり、これを望遠鏡に用いるには焦点距離が非常に長くなるため現実的ではない。そこで、反射鏡に多層膜のブラッグ反射を応用した多層膜スーパーミラーを採用することによって現実的な斜入射角で硬 X 線領域での感度を高めている。

2 応答関数と光線追跡シミュレータ

望遠鏡を通して検出器で得られる天体の情報には、望遠鏡に固有の有効面積や像の広がりなどの情報が含まれているため、そのままでは元の天

体の正しい情報を得ることができない。この望遠鏡固有の情報は光の入射角やエネルギーに依存する関数で表され、これを応答関数と呼ぶ。

$$\begin{aligned} & (\text{天体の情報}) \times (\text{応答関数}) \\ & = (\text{検出器で得られる情報}) \end{aligned}$$

つまり、正しく天体の情報を得るためには望遠鏡の応答関数をきちんと求めておくことが重要になる。

しかし、この望遠鏡は多数の反射鏡を使用するため、全ての反射鏡の情報を地上較正実験では測定しきれない。よってシミュレーションを用いて応答関数を求める。

我々はシミュレーションに Ray-tracing という手法を用いている。Ray-tracing simulator はコンピュータ上に仮想的に光学系を作り、その光子を入射し、幾何学的にその軌跡を追跡するシミュレータである。この Ray-tracing simulator は、現在打ち上げられているすざく衛星でも用いられているが、硬 X 線領域で用いるには不十分なため改良が必要になる。

現在では、硬 X 線望遠鏡で利用されるブラッグ反射に対応できるようになり、さらに Geant4 という物質中の粒子の相互作用をシミュレート

するツールキットを用いて、硬 X 領域で重要となる、X 線の透過や散乱の影響が実装された。

3 離角依存性

望遠鏡の性能を示す指標には、結像性能、視野、有効面積の3つがある。このうち結像性能に関してはこれまでにシミュレーションに関して検証が行われていたため、今回は視野と有効面積に関して検証を行った。

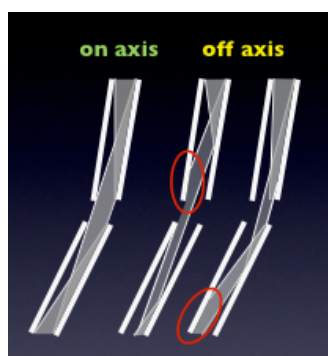


図1 反射の様子

図1は望遠鏡内部の反射鏡を描いてあり、白い線が反射鏡、灰色が光の軌跡となっている。

我々は望遠鏡の有効面積が最大となるときの光の向きを on axis と定義し、天体の方向が光軸からずれている場合を off axis と呼ぶ。on axis では入射した光は全て出射されるが、off axis になると望遠鏡に入射した光が図1のように遮られてしまうことがある。また、離角が大きくなると、反射鏡での反射率も落ち、これらの効果は離角が大きくなるほど増える。

このように、望遠鏡内部で光が遮られてしまうため、同じ天体を観測しても離角が異なれば検出器で得られる光の強度が変わってくる。天体の flux は検出器で得られた強度に観測装置の有効面積をかけて求められるため、事前に各離角での有効面積を正確に求めておく必要がある。

さらにこの関係はエネルギーによっても変化する。

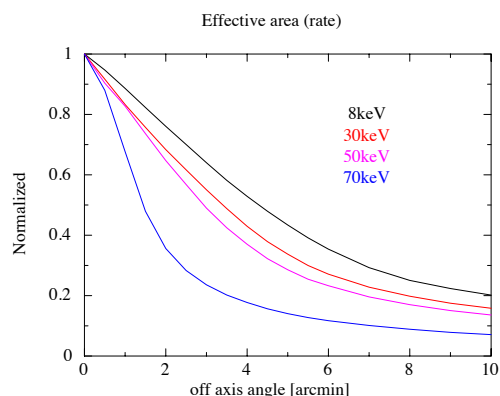


図2 エネルギーによる有効面積の比較 (比率)

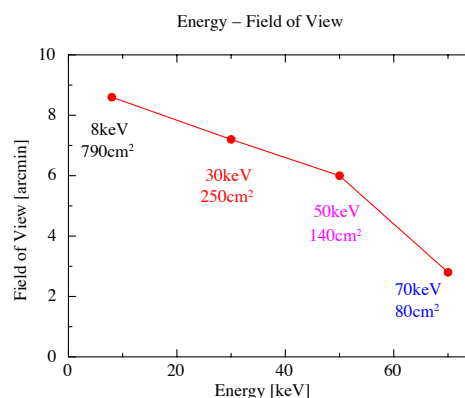


図3 視野の変化

これらの関係をシミュレーションで求めたものが図2と図3になる。このシミュレーションには円錐近似のみを考慮してある。図2は横軸が離角、縦軸が有効面積を規格化した値で、黒が8keV、赤が30keV、緑が50keV、青が70keVとなっている。これを見ると、高エネルギーになるほど有効面積の減少率が大きくなっていることがわかる。

図3は図2を横軸にエネルギー、縦軸に視野をとって書きなおしたものである。各点の下に書かれている数値はそのエネルギーでの on

axis での有効面積で、これ自体も高エネルギーになるほど減少している。8keV から 50keV ではほぼエネルギーに比例して視野が低下しているのに対し、70keV で急激に減少しているのは、望遠鏡の構造上 70keV 付近になると外側の反射鏡がほとんど利用できなくなるためである。

今回はこのうち、30keV での測定を実際に行った。

4 SPring-8 での実験

4.1 セットアップ

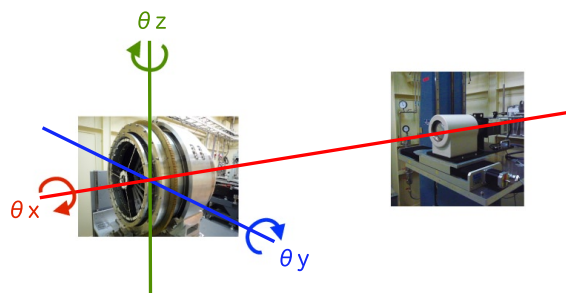


図4 望遠鏡のセットアップ

測定は高輝度放射光施設 SPring-8 の BL20B2 で行なった。この施設では高エネルギーの X 線を高い平行度で入射することができる。セットアップは図4のように、光軸上に望遠鏡を置き、その先に検出器を置く。今回は検出器にイメージインテンシファイアと CCD を用いた。望遠鏡は3方向に回転でき、図4のように光軸方向の回転軸を x 軸、鉛直方向を z 軸、x 軸と z 軸に垂直な方向を y 軸と定義すると、それぞれの軸中心に回転する方向を θ_x θ_y θ_z 方向と呼ぶ。今回はこの θ_z 方向に望遠鏡を回転させた。現在は、望遠鏡の1部のみ反射鏡が入っており、このうち今回用いたのは半径 105mm 前後の反射鏡で、これを R105band と

言う。現在ここには 10 組 (20 枚) の反射鏡が挿入されており、これは望遠鏡全体の約 60 分の 1 にあたる。

4.2 測定方法

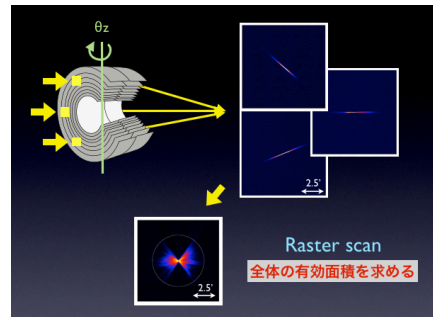


図5 Raster scan

測定方法は2つある。1つ目は図5の Raster scan と呼ばれる方法で、この方法は、本来は有効面積を求めたい範囲の反射鏡全面に、X 線をあてて測定したいが、機械的な制限によりそれができない。また、大きなビームだと平行度も落ちてしまう。そのため、まず 10mm×10mm の X 線を順次場所を変えてあて、いくつものイメージ像を作る。そして最後に得られたイメージ像を合成し、1つのイメージとして評価する。

この測定を望遠鏡を θ_z 方向に回転させて何度も行うことで離角依存性を調べた。

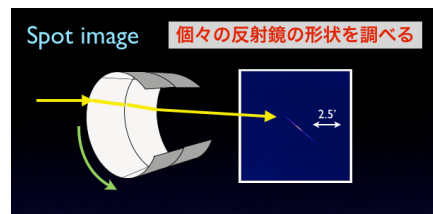


図6 Spot image

2つ目は図6の Spot image と呼ばれる測定で、反射鏡の形状を1枚1枚調べることがで

きる。1枚の反射鏡にのみ X 線を当てるため、入射 X 線のサイズは 0.45mm×0.45mm と小さくなっている。

4.3 θ_z 方向の離角依存性

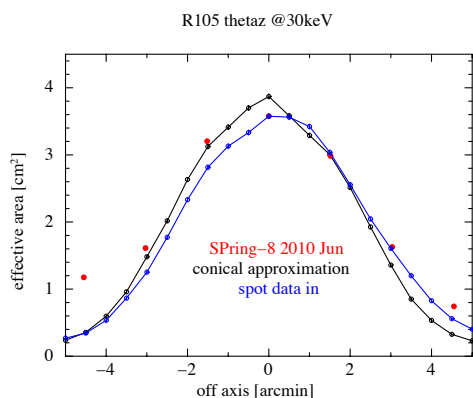


図7 θ_z 方向の離角依存性

図7は30keVでの θ_z 方向の vignetting curve を表す。赤が実験値、黒が円錐近似のみを考慮したシミュレーション値、青が2009Decで取得した Spot image の結果を取り込んだシミュレーション値となっている。

図を見てみると、off axis が正の側では Spot image を入れることによって、シミュレーションは実験値に近づいているが、負の側では実験値が大きくシミュレーション値を上回っている。ここで最も差の大きい、離角が -4.5 分角の場合のイメージ図を見てみる。

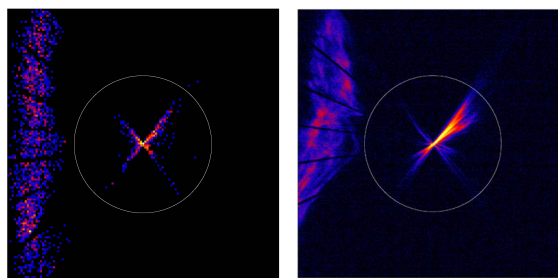


図8 Simulation

図9 SPring-8

結果が図8、と図9になる。図8は spot image を取り込んだシミュレーションのイメージ図、図9は SPring-8 での測定から得られたイメージ図で、両方とも離角は -45 分角。中心の円は半径 12.7mm の円で、この内側の光量から有効面積が計算されている。この図からも SPring-8 でのデータのほうが明るい部分が多いことが読み取れる。

左側の光の陰が曲がっていることから、有効面積の差は反射鏡の位置を調整したときに正しい位置に来ず、実際の入射角が予想される値よりも浅くなっているためではないかと考えられる。今後、このような反射鏡の位置のずれもシミュレーションに取り込んでいく必要がある。

5 まとめ

今回有効面積の離角依存性を SPring-8 で測定し、シミュレーションとの比較を行った。今回の検証で、反射鏡の情報を入れることでシミュレーションが実測値に近づくことがわかった。しかし、まだ取り込めていない情報もあり、今後も改善が必要となる。