

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月 15日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22540248

研究課題名（和文） 極端紫外光星の次期全天サーベイに必要な技術修得

研究課題名（英文） Development of optics for future EUV astronomy

研究代表者

吉川 一郎（YOSHIKAWA ICHIRO）

東京大学・大学院理学系研究科・准教授

研究者番号：10311169

研究成果の概要（和文）：

Mg/SiC の多層膜鏡は Mo/Si に比べ、反射率を約2倍に高めることができ、経時変化が大きいため、実用には現段階では不向きであることがわかった。また、 Y_2O_3/Al の多層膜反射鏡は、Mo/Si に比べ、反射率を約1.5倍、58.4nm の長波長側の光に対しては5分の1に落とすことができることを確認した。経時変化もなく、将来の飛翔体計画に利用できる目処がたった。 $R_{30.4}/R_{58.4}=18$ 倍とほぼ目標を達成した。

研究成果の概要（英文）：

I have manufactured two multilayer mirrors. One has a pair of 40 Y_2O_3/Al layers and the other has a pair of 20 Mg/SiC layers. I concluded that (1) An Mg/SiC mirror has about twice higher reflectivity than that of Mo/Si, but (2) it decreases the performance under the atmosphere, (3) a Y_2O_3/Al multilayer mirror has higher reflectivity at 30.4nm than that of Mo/Si, furthermore (4) it can reduce the reflectivity at 58.4nm to one-fifth in comparison with Mo/Si pairs. The Y_2O_3/Al multilayer has enough capability to use space-borne instrument in the near-future.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2011年度	600,000	180,000	780,000
2012年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：天文学

科研費の分科・細目：紫外線天文学

キーワード：EUV・極端紫外線・多層膜反射鏡・紫外線天文学

1. 研究開始当初の背景

月を周回する人工衛星「かぐや」に搭載した極端紫外光（EUV）望遠鏡は地球のプラズマ圏の映像を我々に送り続けている。送られてくる画像を見て、私が最も驚いたことは沢

山の極端紫外星が写っていることである。地球の電離圏やプラズマ圏からの光の混入を受けない月の周回軌道から全天をサーベイすることが発見につながった。

EUV波長域の天文観測の意義は diffuse EUV の起源を同定することである。つまり、

diffuse EUV の起源が個々の暗い星 (UV star) の集合なのか、それとも高温な星間ガス (温度 10 万度 K) であるのか、という長年の謎を解明することにある。UV star とすると、diffuse EUV の強度から 40 パーセクに 1 程度の密度になり、白色矮星の密度と比べるとかなり高くなってしまふ。EUV 領域では銀河中心まで見えないので、一様な分布に見えるはずだが、かぐや衛星の観測結果を見る限りそうは見えない。星間高温ガスの割合が多くなれば、遠方まで見通すことができるが、決定的な証拠はない。この問題は、天文衛星 EUVE の観測によって明らかにされるべきであったが、地球の周回からの観測では、地球のジオコロナの光の混入が大きく、暗い星までは同定することはできなかったであろう。つまり、惑星間空間からの EUV 天文学観測の重要性が確認された。かぐや衛星はそれを実現し、その有効性も十分に確認した。左図の中心上方に大きく写る半円が地球の昼面であり、その周りの領域 (紫色) は地球起源のヘリウムイオンが散乱する EUV (波長 30.4nm) である。002、006、007 等と番号を付してある映像が EUV 星である。かぐやの望遠鏡がもう少し高精度、例えば ISM (He I: 58.4nm) の混入をもっと抑えることができれば、高銀緯にある系外銀河も観測できたであろう。

EUV 天文学は硬 X 線天文学と同様に未開拓の分野であり、望遠鏡の感度と S/N が向上すれば、面白いことがたくさんある。たとえば、新しいタイプの星、radiation field、活動銀河核や銀河団の観測も可能になるであろう。直入射光学系が可能になると、回折限界で天体の大きさが観測でき、例えば、中性子星はそれ自身で 10 万度の熱放射をしているとすると、100 パーセクの距離ならば、大きさが観測できるかもしれない。高銀緯にある銀河団の EUV 観測も重要である。Virgo 銀河団から届く EUV の分光観測から高温プラズマ (10**7 Kelvin) に加え、これまでに知られていない Warm プラズマ (0.5~1x10**6 Kelvin) の存在が示唆されたが、S/N の低さが問題となり未だ決着がつかない (例えば、Bowyer et al., Science, p13339, 1996; Lieu et al., APJ, L5-7, 1996)。Warm プラズマが暗黒物質 (ダークマター) の候補になり得るかどうかは、宇宙科学にとって最大の関心事のひとつである。

次期 EUV 天文観測には、ISM の散乱光 (He I 58.4nm) の混入を可能な限り低くする技術が重要である。下図は、かぐや衛星やのぞみ衛星に搭載した Mo/Si の多層膜反射鏡の特性である。30nm 付近に反射率のピーク (約 20%) を持つことが特徴であるが、最上層における反射により、波長 58.4nm (ヘリウム原子の共鳴散乱線) でも比較的高い (約

10%) 反射率をもつ、という欠点もある。これが、かぐや衛星による EUV 観測の S/N を低下させた。

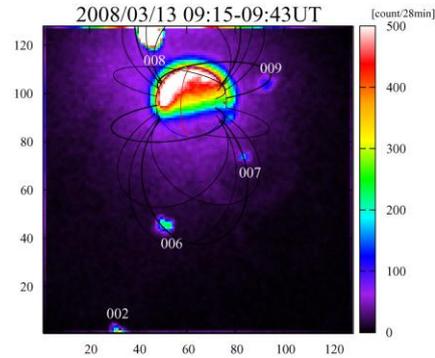


図 1: 中央やや右に見える大きな半円が地球の日照領域、その周辺の紫色がプラズマ圏である。002, … 009 と書かれた斑点が EUV 星である。

2. 研究の目的

目的とする波長域 (10nm から 30nm) において高い反射率をもち、その一方、波長 58.4nm (ISMからの散乱光) では低い反射率をもつ EUV 反射鏡を開発することに専念する。事前検討の結果から、Mo/So, Y₂O₃/Al, Mg/SiC と U/Si 多層膜が候補として残った。Mo/Si は従来から広く使われているが、その他は前例のない組み合わせである。最適なものを見つけ出すことが本研究の目的である。

3. 研究の方法

EUV 波長域では、物質の光学定数 (n, k) が実験的に測定されているケースが少ないため、単層膜の薄膜を自作し、光学定数を測定することから始める。Mo/Si は従来から広く使われているが、その他は前例がない。次期 EUV 全天サーベイを効率よく行うことができる多層膜を見つけ出す。

4. 研究成果

成膜装置で単層膜を作り、その反射率特性から光学定数 (n, k) を導出し、再現性を確認した。やはり、今回使用する装置で成膜した Y2O3 薄膜と文献値の光学定数には大きな違いがあり、
 @30.4 nm, n=0.80, k=0.14 (実測) <->
 n=0.77, k=0.21 (文献値)
 @58.4 nm, n=1.03, k=0.49 (実測) <->
 n=1.04, k=0.54 (文献値)
 であることが分かった。さらに、Y2O3 結晶は、蒸着する際に用いるスパッターガス

のエネルギーに依り組成比が変化する。その結果、光学定数(n, k)も大きく変化することも理解した。

新たに求めた光学定数に基づき多層膜反射鏡を製造し、校正してみた。校正に用いた波長(λ)は30.4 nm (又は、58.4 nm)である。SiC/Mg 多層膜(設計値と試作品の実測値)波長 30.4nm における反射率の計算値(2d=18.08, $r=0.3$, N=40)と実測値は非常に一致した。従来から広く使われているMo/Si よりも、 $\lambda=30.4\text{nm}$ における反射率を約2倍(約35%)に高めることができた。Y₂O₃/Al の試作結果は、計算値(2d=17.0, $r=0.3$, N=20)に非常に近い反射率を達成することができた(27%)。SiC/Mg 反射鏡に比べると、30.4nm における反射率は劣るが、58.4nm に対する反射率の比は非常に高いことがわかる。以上の結果を欧米の研究者と議論したところ、次期太陽衛星に搭載する望遠鏡の鏡のコーティングに使用する可能性が出てきた。

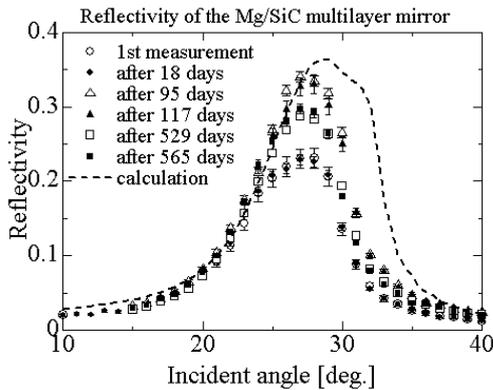


図2：(SiC/Mg 多層膜鏡) 波長 30.4nm における反射率の計算値と実測値。従来から広く使われている Mo/Si よりも反射率を約2倍に高めることができた。しかし、経時変化が深刻である。

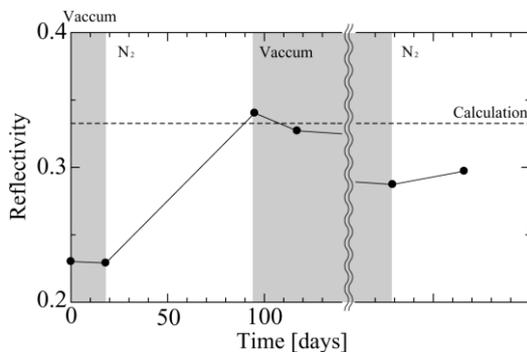


図3：(SiC/Mg 多層膜鏡) 反射率の時系列変化。純窒素パーズと真空保管を繰り返すと、周期長に変化が起こり、反射率が安定しないことが分かった。

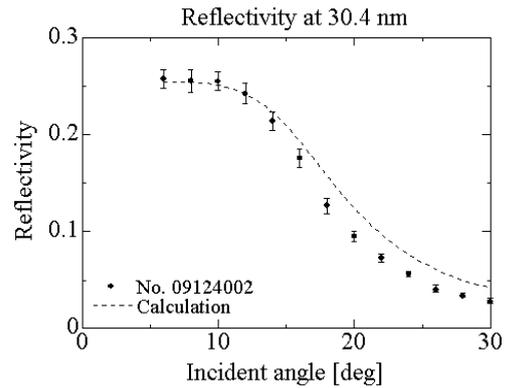


図4：Y₂O₃ 多層膜反射鏡の特性。 $\lambda=30.4\text{nm}$ で27%の反射率を達成することができた。計算値ともよく一致する。

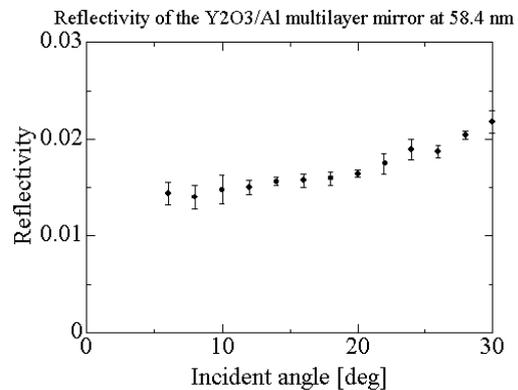


図5：波長 58.4nm における反射率の特性。入射角 10deg で27.% @ 30.4nm に対し1.5% @ 58.4nm であるので、おおよそ18:1の比を達成することができた。

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 1件)

- ①Yoshioka, K., I. Yoshikawa, F. Tsuchiya, M. Kagitani, G. Murakami, K. Sakai, and T. Homma, Feasibility study of EUV spectroscopic observation of the Io plasma torus from the Earth-orbiting satellite EXCEED, *Planetary and Space Science*, 62, 104-110, 2012. 査読有り

〔学会発表〕（計 2件）

① I. Yoshikawa, The EXCEED mission, American Geophysical Union, Fall Meeting, 2012 December 4, San Francisco, USA

② Ichiro Yoshikawa, Earth-orbiting extreme ultraviolet spectroscopic mission: SPRINT-A / EXCEED, European Planetary Science Congress, September 23 2012, Madrid Spain

③ Yoshikawa, I., The Exceed mission, American Geophysical Union, Fall Meeting, 2011 Decembe 6, San Francisco, CA, USA

6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉川 一郎 (YOSHIKAWA ICHIRO)
東京大学・大学院理学系研究科・准教授
研究者番号：10311169

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 なし