

村上弘志、北本俊二、竹中恵理、柴田拓磨、吉田正樹、東慶一、武井大 (立教大)

概要

X線による観測は、ブラックホールや中性子星、超新星残骸など宇宙の高エネルギー現象を探る強力な手段である。波長が短いため、理論的限界となる角度分解能(回折限界)は口径1m程度の望遠鏡でも1marsec以下と非常に小さい。しかし、形状精度の問題からこの角度分解能を実現するのは非常に難しく、現在最高の分解能を達成しているチャンドラ衛星でも0.5秒角の分解能となっている。我々は、補償光学を用いて形状精度を補正し、高い角度分解能を実現することを目指している。試験として、直入射光学系の副鏡を可変形状鏡としレーザー光を参照して補償光学を行った。可視光と13.5nmのEUV光での撮像を行った結果、いずれも2.1秒の角度分解能を達成した。可視光についてはほぼ回折限界に達しているがEUV光はまだ限界には遠いので、引き続き開発を行う。

検出器の角度分解能

天文学は大きい非常に遠方にあるものを対象とするため、詳細な構造を研究するためには高い角度分解能での観測が必要となる。例えば銀河中心核のブラックホールを直接観測するには、μ秒角の分解能を実現しなくてはならない。

検出器の理論的角分解能(回折限界)φは、波長λと口径Dにより次式で表される。

$$\phi = 1.22 \frac{\lambda}{D} \quad \dots(1)$$

したがって、角度分解能を高めるには、口径を大きくする他に、短い波長で観測する手段がある。X線は、波長がnmを切るため、小口径でも高精度分解能を実現できる可能性がある。しかし、実際には、主に反射鏡の形状精度が問題となり、(1)式の分解能は達成できていない。X線領域において現在最高の分解能を達成したチャンドラ衛星は、0.1ミリ秒角の限界に対して、0.5秒角の分解能となっている。

我々は、X線領域で補償光学を用いてミリ秒角の分解能を達成することを目指し、Xmas計画(X-ray milli-arc-sec Project)を進めている。ミリ秒角の観測が実現すれば、AGN jetなどのX線での観測が可能となる。

Xmas望遠鏡

望遠鏡は、図1に示す構成になっている。直入射光学系であり、副鏡が可変形状鏡である。対象光と同様の経路の参照光をCCD検出器の近傍にある波面センサーに当て、波面の形状を補正するように副鏡を制御する。対象光としては、レーザープラズマ光源(LPS)を利用し、途中にフィルターを入れることで可視光と13.5nmのEUV光を選別している。

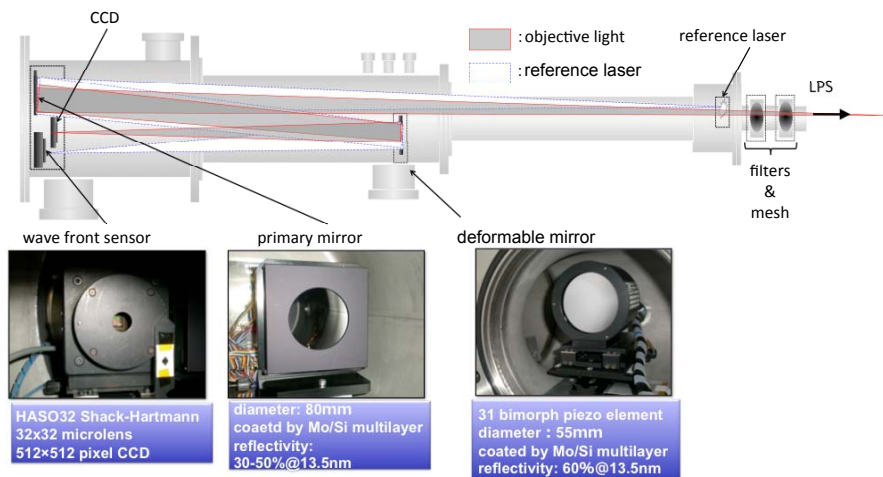


図1: Xmas望遠鏡の概観図。参照用のレーザー光を波面センサーで検出して補償を行う。

結果

図2に、得られた画像を示す。主鏡から4.5mの距離に、ピッチ386um、線幅31umのメッシュを置き、この像から角度分解能を見積もった。ラインプロファイルと求められた角度分解能を図の下に示す。

左と中央を比較すると、可視光とEUVのいずれも、補償光学により角度分解能が改善していることがわかる。しかし、回折限界はこの光学系では可視光で1".67, EUV光で0".04であるため、まだ回折限界にはほど遠い。

光路差の補正

図2中央のイメージは、参照光の波面を補正したものであるため、参照光と対象光の光路差の分だけ対象光の波面は乱れていることが考えられる。そこで、参照光の補正目標とする波面を变形し、補償を行った。この際、収差の成分ごとに補正波面を变形し、最も像が鋭くなる係数を調べた。図3と表1に得られた補正波面と係数を示す。これにより、図2右に示すようにもっとも角度分解能が高い結果がえられた。可視光についてはほぼ回折限界に達している。表2に実験で得られた角度分解能をまとめた。

表1: 補正した収差の量

収差名	係数 [um]
傾き 0°	-16.45
傾き 90°	-1.96
焦点成分	-4.65
非点収差 0°	0.13
非点収差 45°	0.01
コマ収差 0°	-0.09
コマ収差 90°	0.04
球面収差	0.03

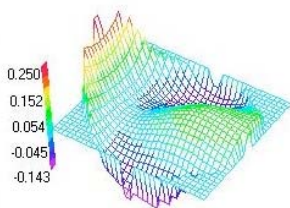


図3: 補正波面の形

補償なし 補償あり 補償あり(光路差補正)

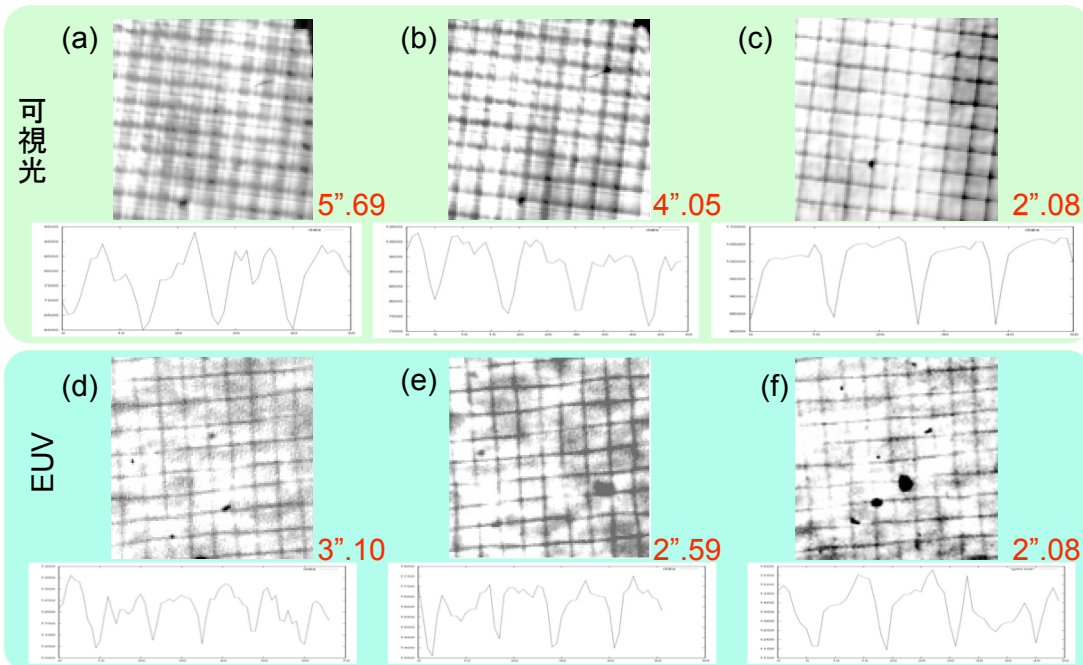


図2: 得られたイメージとラインプロファイル。可視光について (a)補償光学なし、(b)補償光学あり、(c) 光路差を補正した補償光学あり、の3通りを示した。(d),(e),(f)は同様にEUV光での結果である。

表2: 各実験で得られた角度分解能をまとめたもの。参考に回折限界も示した。

	(単位: 秒角)			回折限界
	補償光学なし	補償光学あり	補正した補償光学	
可視光	5.69	4.05	2.08	1.67
EUV	3.10	2.59	2.08	0.042

まとめと今後の課題

参照光と対象光の光路差を補正した波面を用いることで、可視光については回折限界に近い性能が達成できた。EUV光についても、可視光と同等の分解能が達成できているが、限界にはほど遠い。CCDの画素のサイズと線幅が同等となっているため、画素の効果が効いている可能性がある。今後はまず画素の小さいCCDにより実際の角度分解能を評価する予定である。その後、排気系などによる振動の調査と解消、より高次の収差まで取り入れた補正などを行い、EUV光でも回折限界の達成を目指す。