

X線干渉計計画

村上 弘志、北本 俊二、坂田 和也、吉田 裕貴、小川 修三 (立教大学)



概要

ブラックホールを撮像するためには、 μ 秒角の分解能が必要となる。それを可能にする一つの候補がX線干渉計である。複雑なX線干渉計は製作が大変困難であるので、ここでは、可能な限り単純な構造のX線干渉計を提案し、ブラックホール撮像の前に、サイズ測定を目指す。そのために必要な光学系の大きさや観測時間を考察してみた。その結果、全長20m程度のサイズの干渉計で、6000cm²のビームスプリッターを作ることができれば、1Msec程度の観測で、ブラックホールのサイズ測定に迫ることができることがわかった。更にブラックホールシャドワーの有無も議論できることが分かった。

Introduction

現在、最高の角度分解能を持っているX線反射望遠鏡は、米国のChandra衛星に搭載されているもので、その角度分解能は0.5秒角である。しかし、この分解能は波長と口径で決まる原理的な分解能(回折限界)より遥かに悪い。これは非球面鏡の形状精度を充分にあげることができない事が原因である。回折限界を達成する1つの方法は、高い形状精度が実現できる平面鏡を用いたX線干渉計である。我々は、平面鏡と、半透膜を用いるX線干渉計を考案した。このX線干渉計は比較的小さな構成で観測が可能である。

新型干渉計と天体サイズの計測原理

(a) 新型干渉計

図1に新型干渉計の概念図を示す。天体からのX線を二つの平面鏡で反射させ、ビームスプリッターの両側に当てる。それぞれの透過した半分と、反射した半分が、同じ経路になるようにビームを合成し、そのまま撮像可能な検出器(CCD等)で受光する。光路長がぴったり同じで、完全に平行に合成できた場合は、干渉縞は見えないが、鏡や、ビームスプリッターがわずかに傾いている場合は、干渉縞が見える。干渉縞の縞間隔は光源(天体)に関係なく、鏡等のアラインメントの誤差による。いいかえれば、鏡等を調整することで、測定しやすい縞を作ることができる。観測は縞の鮮明度(visibility)を測定する。鮮明度は光源(天体)の見かけのサイズと二つの反射鏡の間隔 d (Base-line)で決まる。

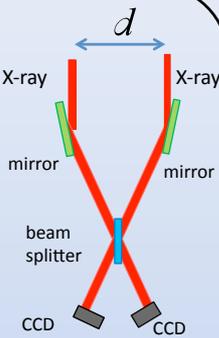


図1: 新型干渉計

(b) 鮮明度と干渉縞の関係

鮮明度(Visibility)とは、干渉縞の鮮明の度合いを示すものである。

$$V = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$$

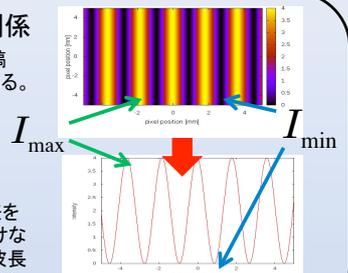


図2: 干渉縞の図と強度のグラフ

(c) 可干渉長

干渉させるためには光路長差を可干渉長以下にしなければいけない。可干渉長は波長分解能と波長の積となる。高い波長分解能が必要である。

(d) 角直径が θ の円盤状の天体の場合

光源の強度分布: $I(\beta) \propto (\beta_0^2 - \beta^2)^p$
 β : 中心から半径方向への角度

d の長さを変えたときに初めて鮮明度が0になる d を見つければ、2つの星のずれ θ や円盤状の天体の大きさ θ が分かる!

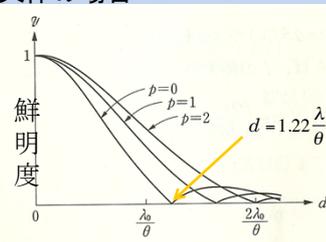


図3: 円盤状の光源の場合の鮮明度のグラフ

(e) ブラックホールシャドウのある円盤状の天体の場合

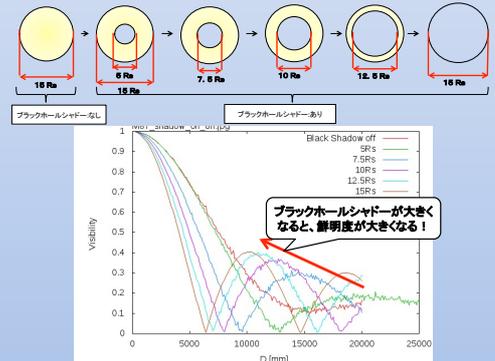


図4: ブラックホールシャドウありとなしの口径と鮮明度のグラフ

新型X線干渉計

(a) 干渉計のBase Line

新型X線干渉計の特徴は、半透膜を用いる事で2つのビームは同一線上に合成し、長い距離を必要としない点である。しかしながら、天体のサイズを測定するための鏡の間隔 d (Base Line) が重要である。測定では、図5のように鏡を点線上に沿って矢印の方向に動かすことでBase Lineを変えながら、鮮明度を測定する。ブラックホール候補天体M87とSgrA*を酸素KX線で観測した場合の、口径と鮮明度のグラフを図6に示す。尚、半径5Rs(Rs:シュバルツシルド半径)のブラックホールによる黒い影(ブラックホールシャドウ)を仮定し、降着円盤の外縁を15Rsにした。この時、天体サイズの測定とブラックホールシャドウの判別するために必要な鏡の移動距離(L)を表1に示す。

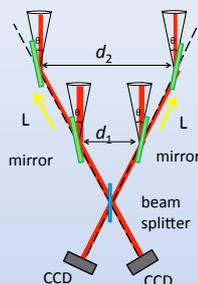


図5: 口径の変え方

	サイズ計測	ブラックシャドウの判別
	L [m]	L [m]
Sgr A*	8.0	9.2
M87	18.7	21.2

表1: M87とSgrA*を想定した場合の鏡の移動距離(L)について

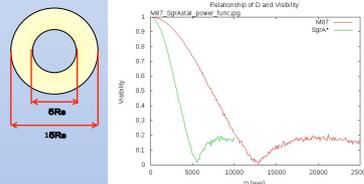


図6: M87とSgrA*を想定した口径と鮮明度のグラフ

(B) 干渉計の必要な面積

- S : ビームスプリッターの面積
 - θ : 鏡の入射角 (~ 10 deg)
 - R : 反射率(80%)
 - BS : ビームスプリッターの反射率、透過率($\sim 10\%$)
 - T_{filter} : フィルターの透過率($\sim 70\%$)
 - η : 検出器の量子効率($\sim 70\%$)
- とすると、有効面積 A は、二つのビームを二つの検出器で受けることに注意すると、

$$A = 4 \times S \times \sin^2(\theta) \times R \times BS \times T_{\text{filter}} \times \eta = 0.054S$$

M87の銀河核は0.5keVでおよそ 6.3×10^4 cps/keV/cm²である(Böhringer et al. 2001, A&A, 365L, 181)。50eV幅では100ksで 10^5 photon (5%の精度でvisibility測定)集積するには $S=6 \times 10^3$ cm² 必要となる。すなわち、たとえば60cm \times 100cmのビームスプリッターと、60cm \times 200cmの鏡が必要となる。Base Lineを10種類取るために必要な時間は1Msとなる。

(C) 実現に向けて

- 全長20m程度の衛星1個(編隊飛行は不要) 必要
- 大きなモザイクビームスプリッターが必要、または、平面反射鏡をあきらめバンディングする。
- 可干渉長を保ち、エネルギー幅を広げるために、マイクロカロリメータアレイを使う。