

Title	High-Resolution X-ray Imaging with Multi-Image X-ray Interferometer Module
Author(s)	朝倉, 一統
Citation	大阪大学, 2023, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/92190
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

論文内容の要旨

氏名 (朝倉 一統)

論文題名

High-Resolution X-ray Imaging with Multi-Image X-ray Interferometer Module
(多重像X線干渉計 MIXIM による高分解能X線撮像)

論文内容の要旨

X線天文学において、撮像系の角度分解能はX線天体の空間構造を調査する上で最も重要な性能の一つである。1999年に打ち上げられたChandra衛星が超高精度のX線望遠鏡を搭載することで角度分解能0.5秒角という優れた性能を達成したが、技術・費用等の観点から同様の手法で角度分解能を大幅に向上させることは困難であり、Chandraを超える角度分解能を有したX線天文衛星は未だに実現していない。近年ではX線望遠鏡に代わる撮像手段としてX線干渉計が提案されているが、高角度分解能の実現には宇宙空間で非常に長い光路を確保する必要があり、それに伴う技術的な課題が多く残されている。そこで我々は、コンパクトな撮像系でChandraの角度分解能を凌駕すべく、従来の撮像系とは全く異なる新原理の撮像系「多重像X線干渉計 (MIXIM)」を提案し、開発を進めてきた。MIXIMは周期的な開口部を有するマスクと微小ピクセル撮像素子から構成され、基本的にはピンホールカメラと同様の原理で撮像を行う。角度分解能を向上させるべく開口径を小さくすると回折が結像を阻害してしまうが、MIXIMでは周期的な開口によるTalbot干渉効果を利用して回折の影響を抑制することで、高角度分解能の実現が可能である。理想的には50 cmの撮像系でもChandraの角度分解能を超えるほか、マスク・撮像素子間の距離を伸展させれば、更に角度分解能を向上させることもできる。

MIXIMの提案以後、試作品による二次元撮像の原理実証実験が続いていたが、撮像素子の位置分解能の不足が原因で期待される性能には届かなかった。そこで、従来の撮像素子よりも高い位置分解能を有する可視光用素子がX線分光撮像素子としてMIXIMに応用できることを自ら実験で実証し、その素子と周期的なピンホールマスクを用いた二次元撮像系を新たに構築した。放射光施設SPring-8の単色平行X線ビームをその撮像系に照射してビーム光源を撮像し、独自に開発したデータ解析パイプラインで解析を行った結果、1 mに満たない撮像系でも0.5秒角の角度分解能が実現可能であることを実証した。更に、マスク・素子間の距離を約9 mに伸ばすことで、0.1秒角を切る角度分解能も達成した。この段階ではマスクの開口率が著しく低いことが問題点として残存していたが、我々はその対処法として周期的な符号化開口マスクを新たに採用し、符号化開口でもTalbot干渉効果を用いた結像が可能であることを初めて実験的に実証することで、角度分解能を維持したまま撮像系の開口率を大幅に向上させることにも成功した。また、MIXIMで採用した撮像素子は高位置分解能を活用した光電子追跡法により、X線天文学において未開拓領域である10-20 keVのX線偏光検出が可能であることも新たに発見し、MIXIMは超高角度分解能の実現だけでなく、X線偏光撮像能力も有していることを実証した。

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (朝倉一統)		
	(職)	氏 名
論文審査担当者	主 査	教授 松本浩典
	副 査	教授 住貴宏
	副 査	教授 寺田健太郎
	副 査	理化学研究所 主任研究員 玉川徹
	副 査	助教 野田博文

論文審査の結果の要旨

X線天文学では撮像観測のために、ウォルターI型の斜入射X線光学系とX線撮像検出器の組み合わせが一般に用いられる。1999年に打ち上げられた米国のChandra衛星がこの方式で史上最高の角度分解能0.5秒角を達成した。しかし、これ以上の角度分解能を得ることは、この方式では技術的に非常に困難である。そのため、X線天文学の角度分解能は、電波や赤外線などの他波長天文学に比べて遅れをとってきた。角度分解能の向上を目指してX線干渉計も過去に提案されたが、システムサイズが非常に大きくなり、飛翔体観測が必須なX線天文学では実用には至っていない。

このような状況の中、朝倉氏は新しい原理に基づく撮像系 Multi-Image X-ray Interferometer Module (MIXIM) を提案し、その実証実験を行った。MIXIMは、タルボ干渉を利用したX線ピンホールカメラの発展版といえる。入射面に周期的にピンホールを配置し、入射面とカメラの間の距離を波長に応じた特定の距離に固定することで、回折による像のぼけのないシャープな像が得られる。以上がMIXIMの撮像原理である。朝倉氏以前は、1次元のスリットにより1次元撮像系の概念実証が行われているに過ぎなかった。そのような中朝倉氏は、2次元配列の多重ピンホールとピクセルサイズ2.5 μm の検出器を組み合わせ、放射光施設 SPring-8 で2次元撮像系の実証実験を行った。その結果、ピンホールと検出器の距離を92 cmにすることで、12.4 keVのX線に対して角度分解能0.5秒角が得られることを実証した。さらにピンホールと検出器の距離を866.5 cmにすることで、約0.05秒角の角度分解能を得ることに成功した。このような小さなシステムでChandra衛星を超える角度分解能が得られたことは、将来の飛翔体観測利用に向けて意義深い。なおこの実験で用いた検出器は、もとは可視光用CMOSセンサーであった。通常X線半導体検出器はノイズ軽減のために冷却が必要である。しかし、冷却などをせずとも、このセンサーがそのままX線用に使用できること、さらにX線偏光も検出できることを実証したことも、朝倉氏の重要な成果である。

2次元多重ピンホール系は有効面積が非常に小さく、天体観測への利用は現実的ではない。そこで朝倉氏は2次元ピンホールの代わりに、微小符号化マスクを2次元に配置した多重符号化マスクをMIXIMに適用した。これにより、有効面積は1桁以上増える。そしてSPring-8にて実証実験を行い、約1.5 mのサイズの系で、12.4 keVのX線に対して約0.5秒角の角度分解能が得られることを実証した。なお、この実験は複雑なパターンの周期的2次元配列でもタルボ干渉が起きることの実証にもなっており、基礎光学という面からも興味深い成果である。さらに朝倉氏は、この系で2次元X線撮像偏光観測が可能であることも実証した。

以上朝倉氏の成果は、世界中のX線天文学者の悲願であるChandra衛星を超える高角度分解能でのX線観測の実現に向けて、重要なステップを実証したものとして意義深い。よって、本論文は博士(理学)の学位論文として十分価値あるものと認める。