

サブ秒角撮像を目指す X 線多重像干渉計 MIXIM の基礎開発 要旨

平成 29 年度 大阪大学 大学院理学研究科 宇宙地球科学専攻 修士論文 川端智樹

[1] X 線天文衛星の観測装置 斜入射 X 線反射鏡の問題点

現在の X 線天文衛星搭載の観測装置は、斜入射 X 線反射鏡と X 線 CCD などの X 線ピクセル検出器を組み合わせた形式が主流になっている。日本のあすか、すざく、ひとみ衛星、ヨーロッパの *XMM-Newton* 衛星、アメリカの *Chandra* 衛星も全てこの形式である。望遠鏡システムの角度分解能は、それぞれ、3–1 分角、15 秒角、0.5 秒角で、*Chandra* 衛星が例外的に優れている。しかしこれを再現あるいは凌駕することはコスト的、技術的に困難で、2028 年打ち上げ予定のヨーロッパの大型天文台 *ATHENA* でも 5 秒角が目標となっている。



図 1 *Chandra* 衛星

X 線より長波長側の観測装置の角度分解能が 0.1 秒角以下になりつつある現在、角度分解能の根本的な向上が求められている。また、斜入射反射望遠鏡は焦点距離が 3–12m と長く、衛星が巨大化しているのも、超小型衛星の打ち上げ機会が増している現在、問題である。

[2] 多重像 X 線干渉計 *Mutli Image X-ray Interferometer Module (MIXIM)*

我々は、以上の問題点を解決する新たな原理の X 線天文用観測装置、多重像 X 線干渉計を提案している (Hayashida et al. 2016)。アイデアの基本はスリットカメラで、回折格子を通した X 線を X 線ピクセル検出器で検出し、その像 (格子の影) を撮影する。得られた像を、データ処理において格子周期で重ね合わせ、光源プロファイルを得る。X 線用の格子としては、現在では数ミクロン周期のものが入手できるので、これを利用すると数 10 cm の距離においた検出器によって 1 秒角以下の像幅、すなわち、サブ秒角の角度分解能が得られる計算になる。

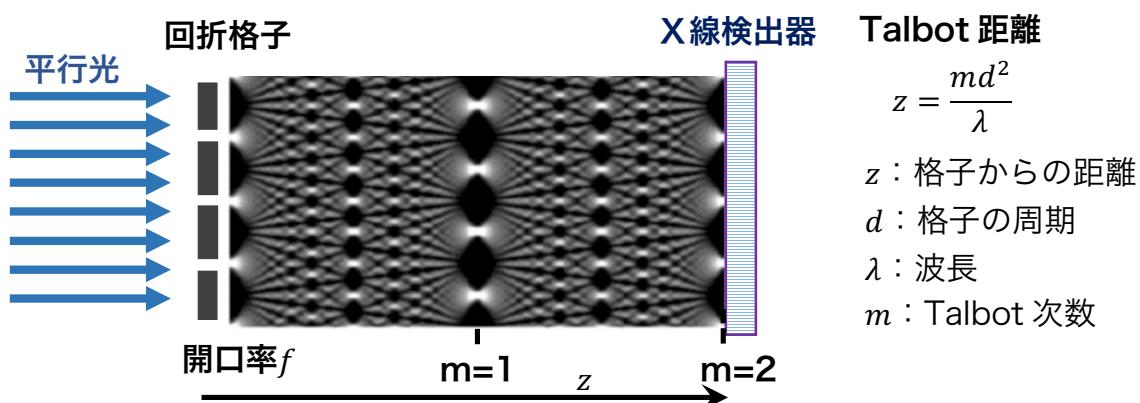


図 2 Talbot 効果と *MIXIM* 原理。上の幾何学模様はそれぞれの位置に検出器を置いた場合に期待されるプロファイルを表している。

実際には、回折が効き、上で示したような幾何光学的な議論は適用できない。しかし、Talbot 効果という干渉現象を利用すると、X 線の波長と回折格子の周期に対して、特定の距離の検出器をおいたときだけ、シャープな格子の影 (格子の自己像；干渉縞) が得られる。天体からの X 線は様々な波長を含んでいるが、X 線イベントごとにエネルギーを測定し、

選択すればよい。本研究では、フレネル近似による計算を実施し、Talbot 干渉条件を満たす波長よりおよそ 10 %程度ずれた波長でも光源プロファイル測定のために利用できると評価した。これはエネルギー分解能 2-3 %の半導体検出器が使用できることを意味する。

格子と検出器の距離は m を次数として

$$z = md^2/\lambda = 50\text{cm} \left(\frac{m}{2}\right) \left(\frac{d}{5\mu\text{m}}\right)^2 / \left(\frac{\lambda}{0.1\text{nm}}\right)$$

自己像の幅 θ は、開口率を f として

$$\theta = \frac{fd}{z} = 0.4'' \left(\frac{f}{0.2}\right) \left(\frac{d}{5\mu\text{m}}\right) / \left(\frac{z}{50\text{cm}}\right)$$

$$\theta = \frac{fd}{z} = f\lambda/dm = 0.4'' \left(\frac{f}{0.2}\right) \left(\frac{\lambda}{0.1\text{nm}}\right) / \left(\frac{d}{5\mu\text{m}}\right) \left(\frac{m}{2}\right)$$

とかける。50 cm のサイズの超小型衛星で *Chandra* 衛星の角度分解能を凌駕できる。

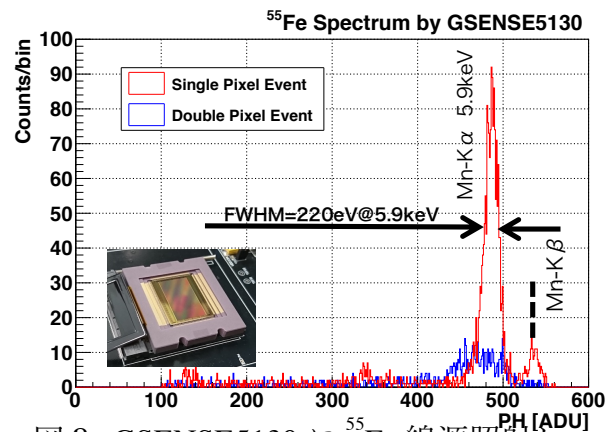


図3 GSENSE5130 に ^{55}Fe 線源照射して得た X 線スペクトル (常温)

[3] マイクロフォーカス X 線源と XRPIX2b を組み合わせた拡大撮影実験

基礎実験として、マイクロフォーカス X 線源を光源として、回折格子 (周期 $4.8\ \mu\text{m}$ 、開口率 0.5, 厚み Au $17\ \mu\text{m}$) とピクセルサイズ $30\ \mu\text{m}$ の SOI 検出器 XRPIX2b を組み合わせた撮影実験を行った。マイクロフォーカス X 線源は発光点のサイズが数 μm と小さく、発する X 線は球面波とみなすことができ、格子の拡大撮影になっている。球面波の場合も、条件は [2] で示した式とは異なるものの、特定の距離で Talbot 干渉が起こる。

今回の実験では光源と検出器の距離を 104 cm で固定し、間においた格子の位置を変えた数点で撮像し干渉縞を撮影することをめざした。ただし、Talbot 干渉条件を満たす位置では、拡大率は 4.4 倍で、検出器面での像周期は $21\ \mu\text{m}$ と XRPIX2b のピクセルサイズより小さくなる。そのために隣あうピクセル間に電荷がまたがるイベント (ダブルピクセルイベント) を使用し、重心をとることでサブピクセルの位置分解能を獲得するデータ処理方法 (電荷分割解析) を導入した。また、像周期を探す重ね合わせ (フォルディング) 解析 のアルゴリズムを作成し、Talbot 条件の位置で、確かに期待される周期の像が得られていることを見出した。つまり、X 線干渉縞の検出に成功した。

[4] 可視光用微細ピクセル CMOS センサの導入

[3] のマイクロフォーカス X 線源を光源とした実験で、サブピクセル分解能を達成する電荷分割解析を導入することで、X 線干渉縞を得た。このときの拡大率は 4.4 倍であったが、最終的に天体からの X 線を撮影する際には、平行光、拡大率 1 倍である。X 線用の (光子のエネルギー計測ができる) ピクセル検出器でピクセルサイズ $10\ \mu\text{m}$ より小さいものは現状では存在しない (X 線天文衛星搭載の X 線 CCD では $24-100\ \mu\text{m}$)。XPRIX は 2b 以降も開発が進んでいるが、最新の素子で $36\ \mu\text{m}$ ピクセルサイズである。

一方、可視光用に開発されている CMOS ピクセル検出器に視野を広げるとピクセルサイ

ズ数 μm の素子も多数存在する。その中で、科学計測目的と称する素子は読み出しノイズや暗電流も小さい。ここに着目し、Gpixel社のGSESNSE5130というピクセルサイズ $4.25\mu\text{m}$ 、ピクセル数15Mの表面照射型CMOSピクセル検出器を導入した。

同素子用の評価ボードを使用し、カメラリンクI/FでPCとつないで動作させたところ、常温大気中の動作で、 ^{55}Fe からのX線の検出に成功した。エネルギー分解能は $220\text{ eV}@5.9\text{ keV}$ で、ファノ限界には及ばないものの我々の目的には十分である。X線CCDでは、真空中で -90°C 、 -120°C といった低温に冷却しなければならず、XRPIX2bも -40°C に冷却していたことからすると、常温でX線検出可能な点は大きなアドバンテージである。

4.25 μm というピクセルサイズは、エネルギー測定を伴うX線検出を実現したピクセル検出器としては最小である。本研究のほかにも応用が期待される。

[5] SPring-8 BL20B2における平行ビームを照射した等倍撮影実験

X線ピクセルGSENSE5130を[3]の実験でも用いた周期 $4.8\mu\text{m}$ の回折格子と組み合わせ、SPring-8のビームラインBL20B2で準平行光を照射した。ビームエネルギーは 12.4 keV に対して、格子・検出器間距離は 3.7 cm 、 23 cm 、 35 cm 、 46 cm で実験した。ここで 23 cm 、 46 cm は、 $d=4.8\mu\text{m}$ の格子、 12.4 keV X線に対する $m=1, 2$ のTalbot距離に相当する。GSENSE5130の空乏層が薄いことも反映し、検出されたいイベントは 3×3 あるいは 5×5 といった複数ピクセルにまたがるものも多い。その中で、シングルピクセルイベント、ダブルピクセルイベントに着目し、いくつかの条件でイベント選別を行い、イメージの回転角とX線プロファイルの周期をフォールディング解析により求めた。距離 23 cm 、 46 cm では期待される周期 1.13 ピクセルの周期構造が、重ね合わせプロファイルにより検出された。 46 cm のケースでは像幅(周期の半分)はちょうど1秒角に相当する。つまり、MIXIMの構成、 50 cm 以下サイズで1秒角の角度分解能が達成できることが実証された。

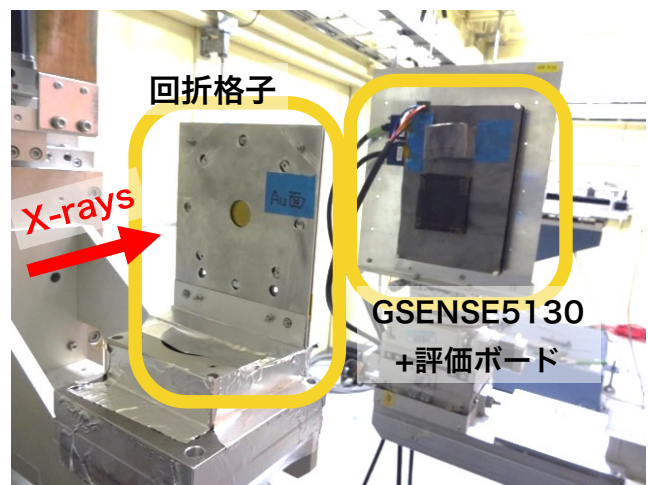


図4 SPring-8 BL20B2 実験

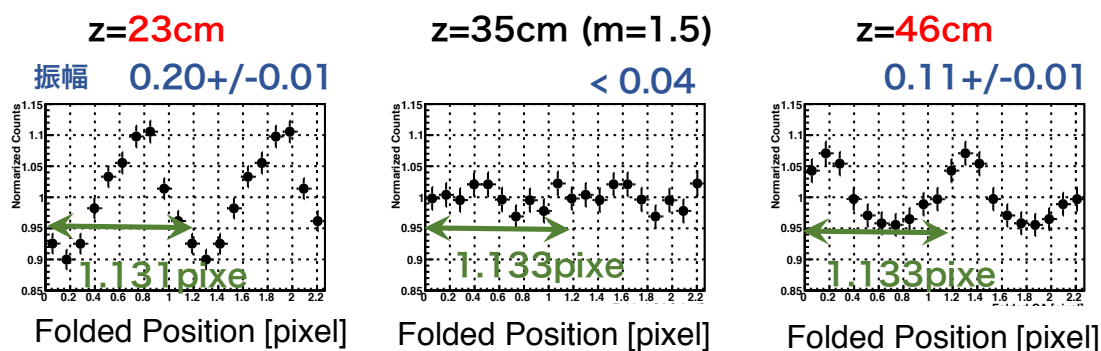


図5 重ねあわせプロファイル (2周期分を表示)

[6] 今後の見通し

本研究で、*MIXIM* の原理で高角度分解能の X 線撮像が可能であることが示された。もちろん、今回は光源が 1 秒角以上の構造であればそれが無限小のサイズと区別できるというにとどまっており、2次元化、有効面積の確保、バックグラウンド除去や姿勢検出、など衛星搭載、活動銀河核トラスの X 線撮像などの観測結果が得られるまでには、様々な開発要素がある。当面の興味として、近く納入予定の開口率 0.2 の格子で 0.4 秒角の像を得ることに期待する。

本研究における申請者の寄与

多重像 X 線干渉計の原理の発案とシミュレーション、可視光用微細ピクセル CMOS センサの導入は、指導教員の林田清先生による。また、前半の実験で用いた XRPIX2b は京都大学、KEK、ラピスセミコンダクタ他の開発によるものである。それを阪大実験室で動作させ、マイクロフォーカス X 線源と組み合わせた撮影システムを開発したのは、先輩の久留飛寛之氏である。しかし、同装置を使用した回折格子撮像実験とその解析は、その解析ツール開発も含めて、私がほぼ一人で実施した。本研究の後半、CMOS センサの動作試験と解析、SPring-8 における平行ビーム照射実験も、私が中心になり、指導教員の林田清先生、後輩の花坂剛史、朝倉一統両氏等の協力によって実現したものである。特に、苦勞した点として、位置分解能向上のための電荷分割解析のアルゴリズム、パラメータ決定と、フォールディング解析の部分あげたい。