

X線多重像干渉計の概念提案

林田 清、久留飛寛之、中嶋 大 (大阪大学)



X線望遠鏡の角度分解能とX線干渉計

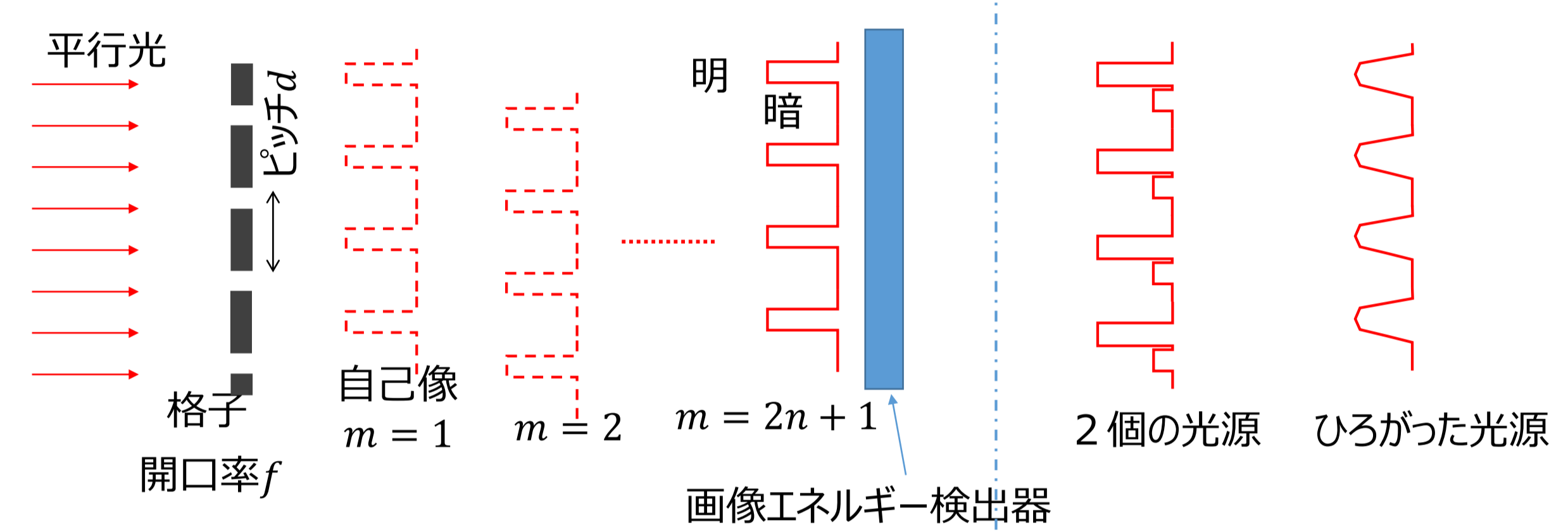
天文学の歴史において、ガリレオ以来、角度分解能の向上は常に新たな世界を開くかぎになってきた。X線の分野でも、1999年打ちあげのChandra衛星は0.5"の角度分解能をもち、バイナリー超巨大ブラックホールなど多くの新発見を生み出している。しかし、Chandra衛星を超える分解能の望遠鏡は困難とされており、実際、2028年打ち上げ目標のヨーロッパの大型X線天文台Athenaでも角度分解能は5"である。

これを打破する試みとして、X線干渉計が提案されている。Cash (2003)は、平面鏡を用いて二本のX線ビームの光路をまげ、1個の検出器上で干渉させるデザインで、MAXIM Pathfinder, MAXIMという衛星計画を提案している。しかし、0.1marcsecの分解能のPathfinderでも2台の衛星を500km離して編隊飛行させる必要がある。これに対し、Kitamoto et al.(2011)は、二本のX線ビームを半透明ミラーで透過/反射させ2個の検出器で受ける、単独衛星におさまるサイズのデザインを提案している。半透明ミラーに多層膜を用いる関係で軟X線0.6keV付近の狭いバンドをターゲットとしている。連続X線成分を利用するためにはマイクロカリメータのレイが必要である (Kitamoto et al. 2014)。

いずれの干渉計でも光学系を用いており、その技術開発が実現の必要条件になっている。本発表では、光学系を用いない形式の、(仮称) X線多重像干渉計の概念を新提案する。

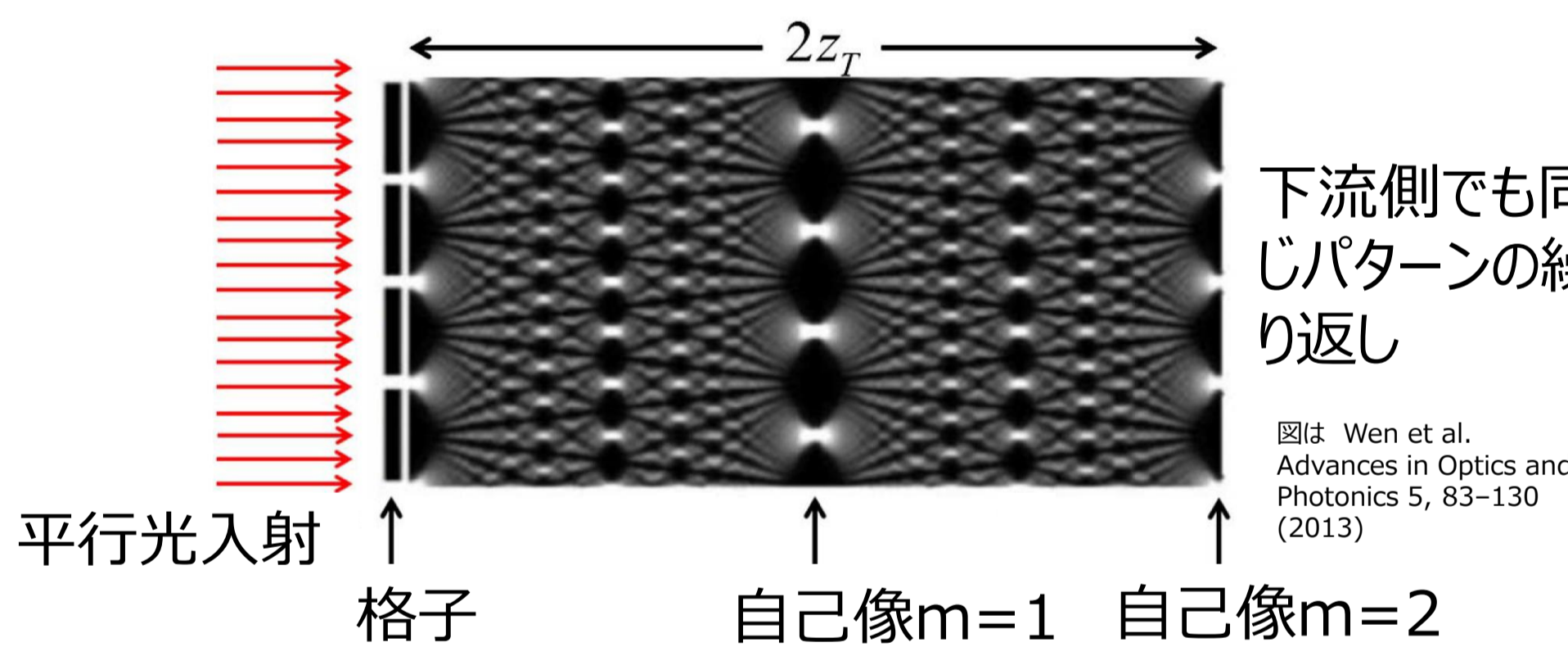
新提案 X線天体等 光源サイズ測定のための (仮称) X線多重像干渉計

- 試料なしの自己像は、光源プロファイルを反映
- 自己像の位置のグローバルなシフトではなく、各自己像のプロファイルに着目すれば、光源プロファイルが測定できるはず
- 具体的方策
 - 格子はタルボ干渉計G1格子で一般的な位相格子ではなく、吸収格子に置き換え
 - 格子の開口率をタルボ干渉計用の0.5よりは小さい方がよい
 - 目標波長に対応するタルボ距離 z_T の整数倍の位置に、エネルギー検出可能なX線ピクセル検出器をおき、目標波長のX線イベントだけ取り出す (ただし $\Delta\lambda/\lambda \sim 0.1$ くらい広くとれる)
 - 全ての自己像は同一のはずなので、適当な周期でサンプリング測定すればよい (e.g. X線ピクセル検出器のスプリットイベントだけ使用して0.1 μm の位置分解能でサンプリングするか)
- 単なるカリメータとは異なり、回折、干渉が本質的な現象であることに注意



タルボ効果

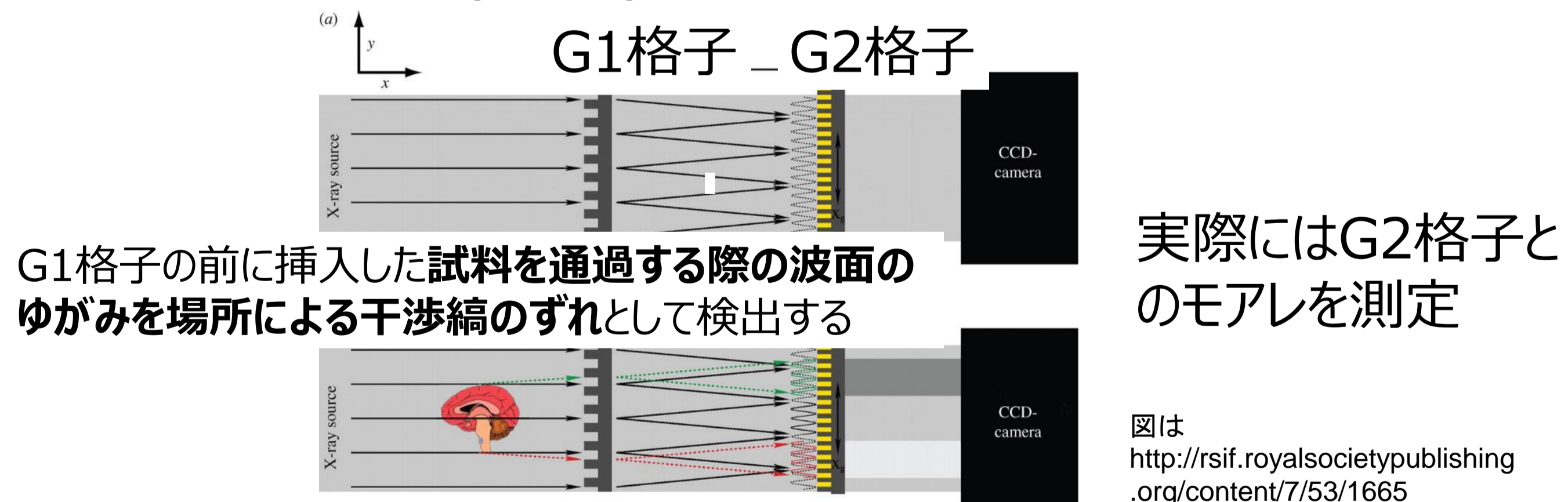
- H.F Talbot (1836)が発見、Rayleighが光の干渉で説明(1881)
- 規則的な格子を通過した平行光がある周期的な距離 (Talbot周期の整数倍) の位置に、格子と同じ像 (= 自己像) をつくる



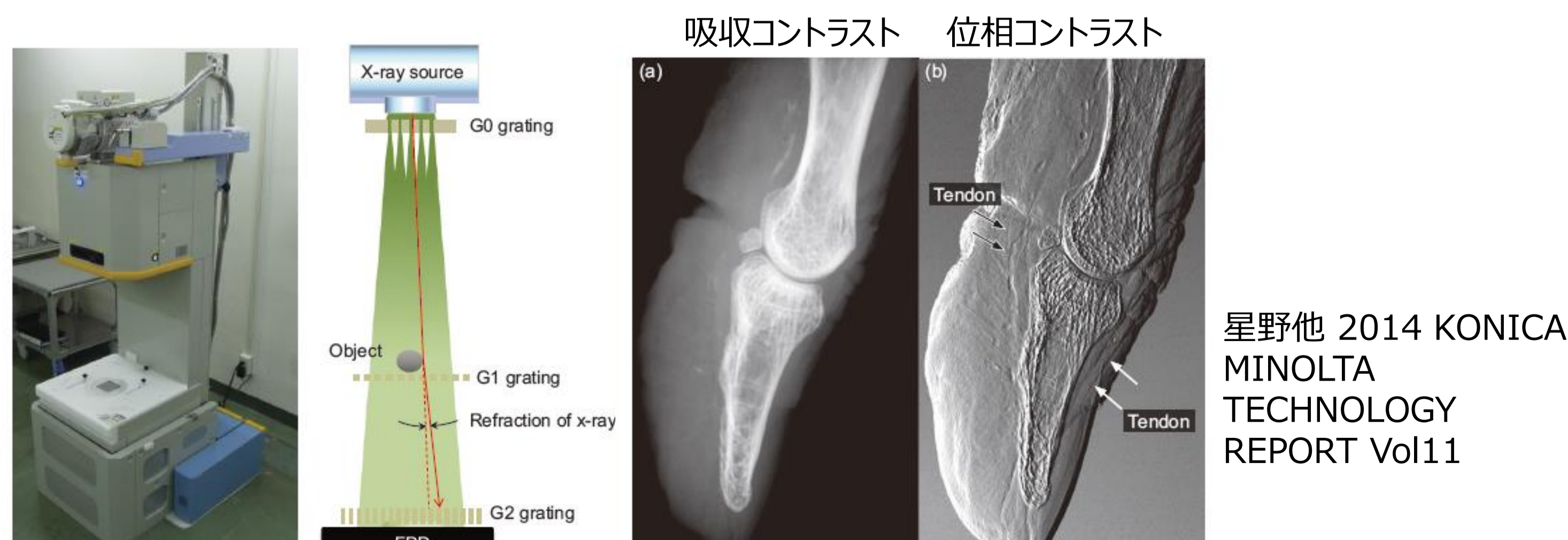
Talbot周期
 $z_T = d^2/\lambda$
 d は格子間隔、
 λ は波長

生体等 位相コントラスト撮像のための X線タルボ干渉計

- X線のタルボ効果を利用した、位相コントラストイメージングのための干渉計 Momose et al.(2003)



- 平行光以外に、球面波(マイクロフォーカスX線源)を使う方法もある
- さらに通常のX線源をG0(吸収型)格子と組み合わせて使用するTalbot-Lau X線干渉計(Pfeiffer et al.2006)もあり、医療診断に実用化(e.g. コニカミノルタ)されている。

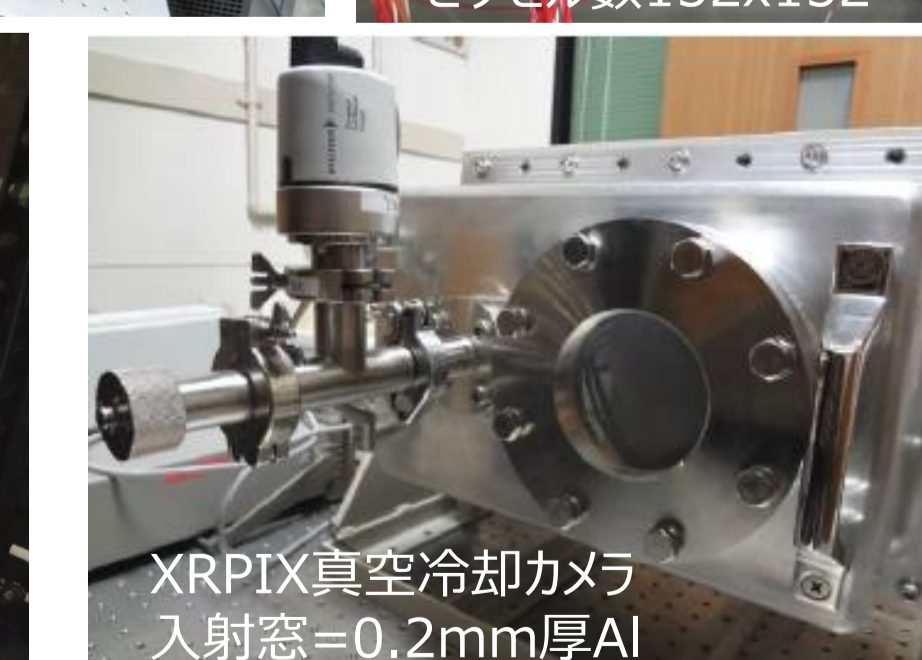
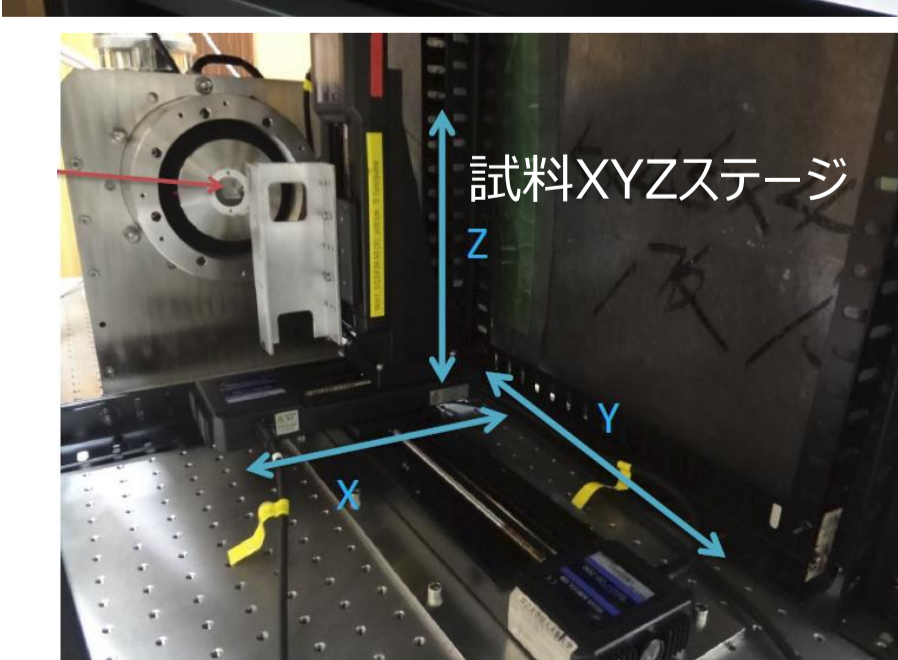


角度分解能の皮算用と将来の見通し

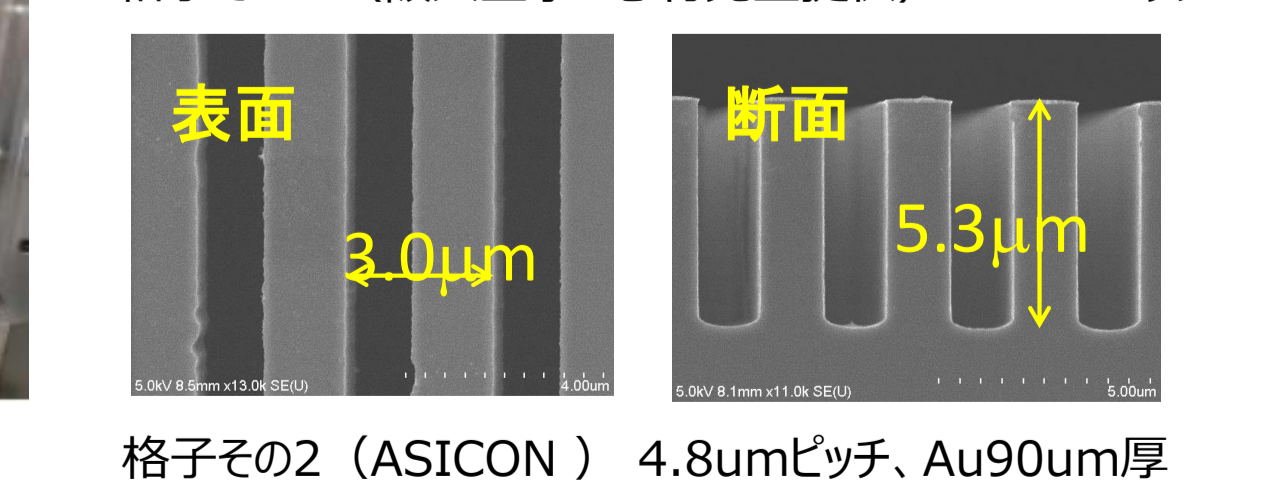
- 5 μm のピッチの格子、 $\lambda=0.1\text{nm}$ ($E_x=12\text{keV}$)のX線を想定
- 格子と検出器の距離 $z = mz_T = md^2/\lambda = 25\text{cm} \left(\frac{m}{1}\right) \left(\frac{d}{5\mu\text{m}}\right)^2 / \left(\frac{\lambda}{0.1\text{nm}}\right)$
- 自己像の幅は $\theta = fd/z = f\lambda/dm = 2'' \left(\frac{f}{0.5}\right) \left(\frac{\lambda}{0.1\text{nm}}\right) / \left(\frac{d}{5\mu\text{m}}\right) \left(\frac{m}{1}\right)$
- もし像の幅の1/4の精度が測定できれば角度分解能 $\Delta\theta$ はChandraに匹敵、1/10ならChandra超え! 焦点(?)距離25cm
- m を20 (焦点距離5m)、 f を0.1にとり像幅の1/10精度測定できれば、 $\Delta\theta$ は2marcsec達成!
- 回折限界は、例えば格子の10mmの幅が1個の自己像の干渉に寄与していると想定すると、2marcsec
 - $1.2\lambda/D = 0.002'' \left(\frac{\lambda}{0.1\text{nm}}\right) / \left(\frac{D}{10\text{mm}}\right)$
- ブラックホール分解に必要なのは10 μarcsec (上の1/200) は大幅な工夫しないと難しいかもしれない。が、恒星のフレア、ブラックホール、中性子星の降着円盤やトーラス、バイナリー超巨大ブラックホールなど、様々な発見が待ち受けているはず。
- 2次元化や偏光測定も原理的には可能はず

予備実験の状況

マイクロフォーカスX線源とXRPIXによる屈折コントラスト撮像



次に、X線回折格子を導入してX線タルボ干渉計として動作させる予定
格子その1 (阪大工学 志村先生提供) Si3umピッチ



参考文献

Cash, 2003, Experimental Astronomy, 16, 91
Kitamoto et al., 2011, SPIE Proc. 8147, 81471P
Kitamoto et al., 2014, SPIE Proc. 9144, 911441Z

Wen et al., 2013, Advances in Optics and Photonics 5, 83
Momose et al., 2003, JIAP, 42, L866
Pfeiffer et al., 2006, NaturePhys, 2, 258
星野他, 2014, KONICA MINOLTA TECHNOLOGY REPORT, Vol11
Uchida et al. 2007, JIAP, 46, 3096