



# X線多重像干渉計、撮像計の開発

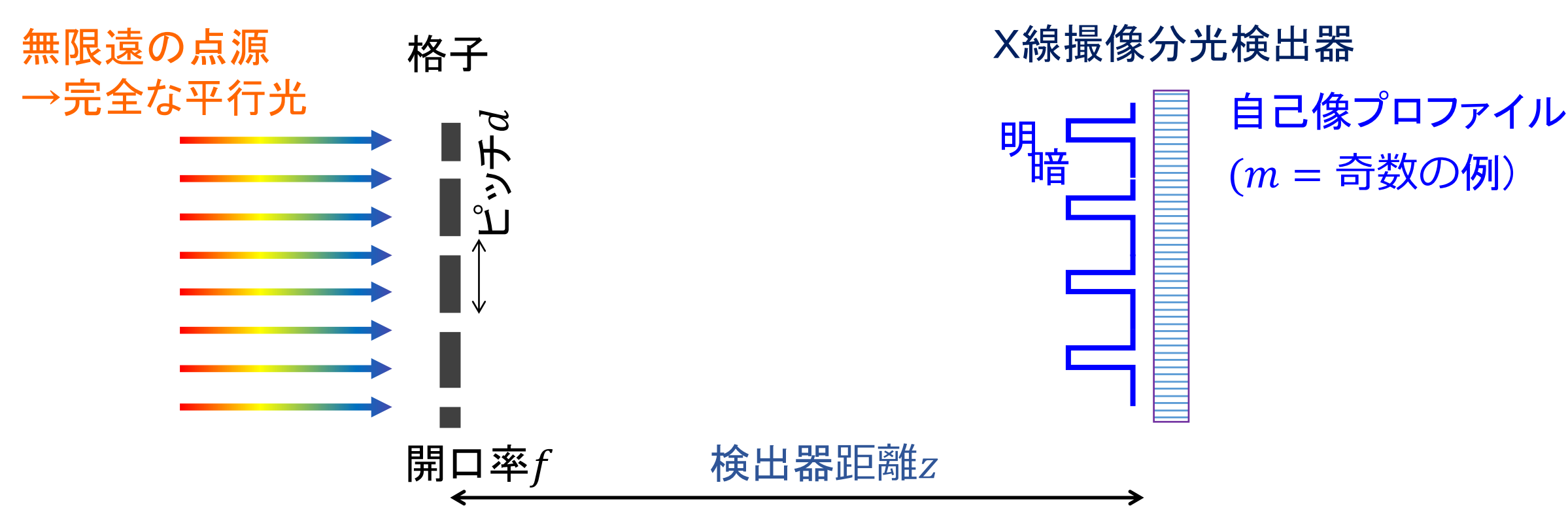
○川端智樹<sub>1</sub>, 林田 清<sub>1</sub>, 久留飛寛之, 中嶋 大<sub>1</sub>, 志村考功<sub>2</sub>, 細野 凌<sub>2</sub>, 井上翔太<sub>1</sub>, 常深 博<sub>1</sub>

<sub>1</sub>阪大院理, <sub>2</sub>阪大院工

X線天文衛星の角度分解能に関して、Chandra 衛星搭載の望遠鏡が達成した0.5秒角を超えることは容易ではないとされている。より高い角度分解能をめざしたX線干渉計も提案されているが、精密な光学系が要求されるなど実現の目途はたっていない。我々は、光学系を用いない新しいタイプの干渉計、X線多重像干渉計を提案している。構造は、数μmピッチの回折格子とX線撮像分光検出器だけを組み合わせた単純な形式で、タルボ効果によりできる多数の格子自己像を利用する。現在、マイクロフォーカスX線源を光源として、X線ピクセル検出器XRPIXを用いて回折格子の像を撮影する基礎実験を実施している。まず、8μmピッチの回折格子を用いた19倍の拡大撮影で縞の検出を確認した。続いて、電荷分割を利用した解析方法を導入し、ナイフエッジの撮影でXRPIXのピクセルサイズ30μm以下の位置検出ができることを確認した。この解析手法を利用し、4.8μmピッチの回折格子の像を様々な拡大率(距離)で撮影した。干渉条件を満たす距離、拡大率5.2倍で検出された0.8ピクセル(24μm)周期の構造を我々は干渉縞と考えている。さらに数倍高い位置分解能が達成できれば、格子検出器距離25cmで、像幅は2秒角が実現できる。また、現状の検出器の性能でも格子ピッチを5倍にすることで、10秒角の像幅のX線多重像撮像計が実現できる。

## サブ秒角を目指すX線多重像干渉計の提案

X線天文学の分野では、1999年打ち上げのChandra衛星の望遠鏡が0.5"という角度分解能を達成しているが、これを超えることは難しいとされ、実際、2028年打ち上げ予定の大型X線天文台ATHENAでも角度分解能は5"が目標である。X線干渉計のアイデアも提案されているが、複数衛星の編隊飛行、精密な光学系、あるいは高い分光性能などが必要で実現のめどはたっていない。そこで我々は、回折格子とX線撮像分光検出器を用いた光学系未使用の天文用干渉計を考案した<sup>1)</sup>。



回折が無視できる場合には、格子穴の像が明瞭に撮影できる。解析において、周期 $d$ で重ねあわせれば、光源のプロファイル(を反映した)精度の高い像が得られる。回折が効く場合、逆に、干渉によって特定距離  $z = m d^2 / \lambda$  ( $m$ は整数、 $\lambda$ は波長)に格子の自己像ができるタルボ効果を利用すると、波長 $\lambda \sim \lambda + \Delta \lambda$ 範囲のイベントのみ選ぶことで、やはり光源プロファイルが得られる。(X線多重像干渉計と仮称)

5μmのピッチの格子、0.1nm(12keV)のX線を使用した場合、格子と検出器の距離は $m$ を次数として

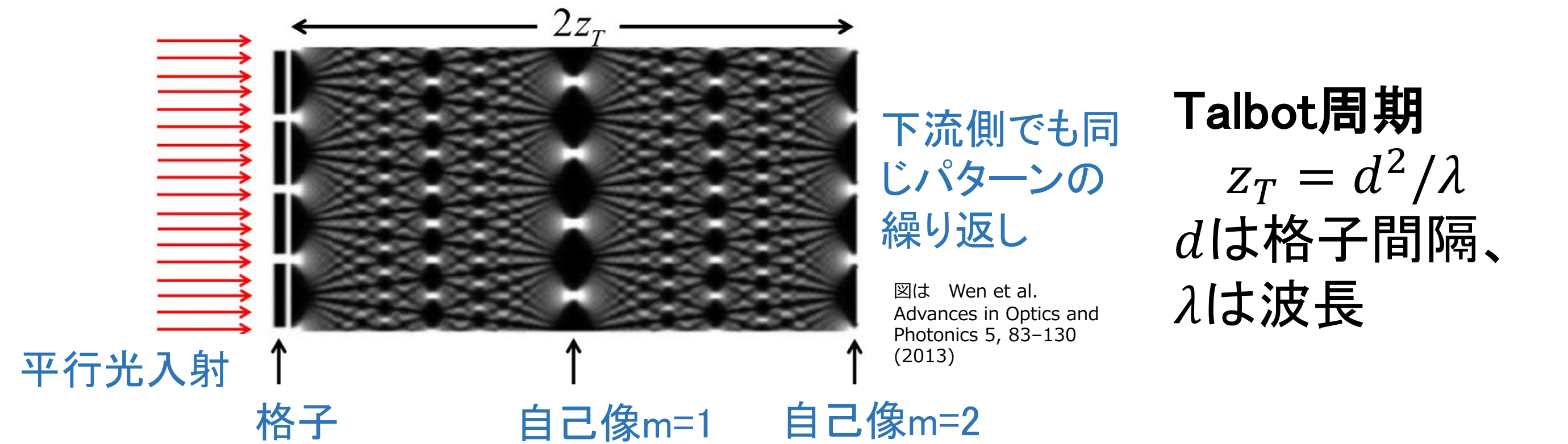
$$z = m z_T = m d^2 / \lambda = 25 \text{cm} \left( \frac{m}{1} \right) \left( \frac{d}{5 \mu\text{m}} \right)^2 / \left( \frac{\lambda}{0.1 \text{nm}} \right)$$

自己像の幅は、開口率を $f$ として

$$\theta = f d / z = f \lambda / d m = 2'' \left( \frac{f}{0.5} \right) \left( \frac{\lambda}{0.1 \text{nm}} \right) / \left( \frac{d}{5 \mu\text{m}} \right) \left( \frac{m}{1} \right)$$

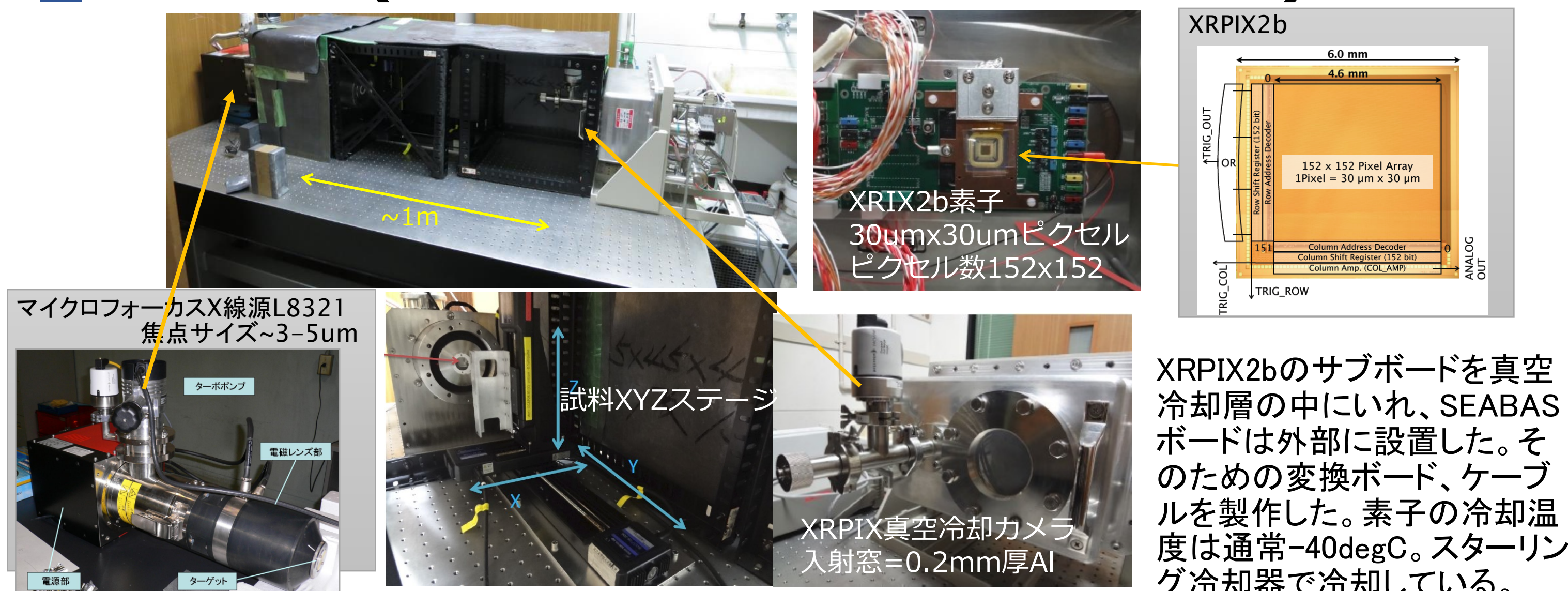
もし像幅の1/4の精度で測定できれば角度分解能 $\Delta \theta$ は0.5"で、Chandra衛星(焦点距離10m)に匹敵する。ブラックホールの分解 $\sim 10 \mu\text{arcsec}$ は難しいが、 $m, f$ を調整することで、数10 $\mu\text{arcsec}$ も可能と見込める。降着円盤の端、トラスからの反射、バイナリSMBHなどを(超)小型衛星で観測するのが目標となる。

なお、バンド幅 $\Delta \lambda / \lambda$ としては0.1近くまで広くとれる(下の図参照)。さらに、よりピッチの大きい格子を用いてタルボ距離よりずっと近い位置に検出器をおいた場合でも、(回折が効かない場合の;単なる透過像の)プロファイルが広いバンド幅で得られる。この場合も機能するのでX線多重像撮像計と呼ぶことにする。

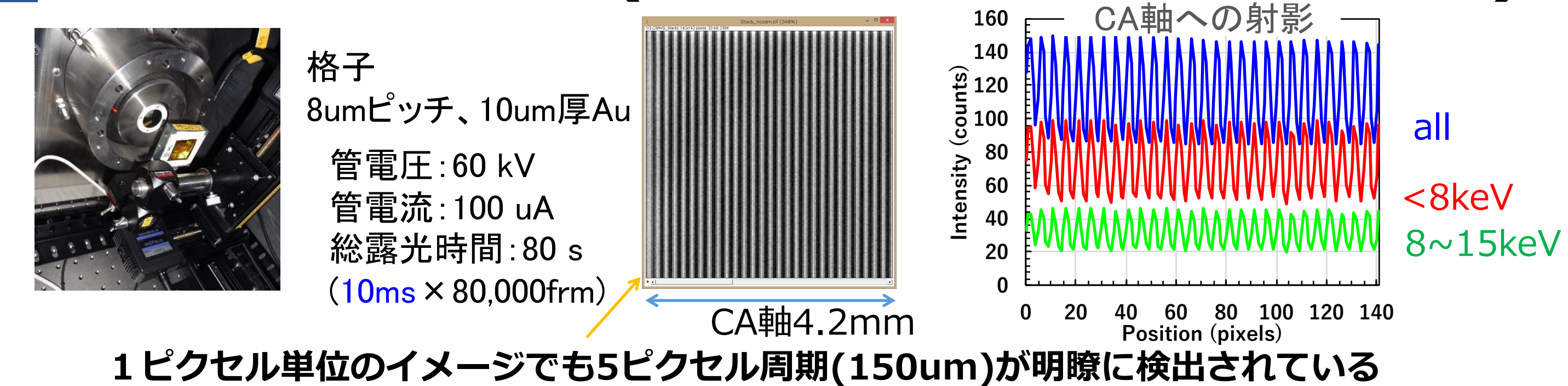


## 基礎実験：XRPIXの動作→サブピクセルの位置測定→X線干渉像の撮影

### 実験装置(マイクロフォーカス+XRPIX)

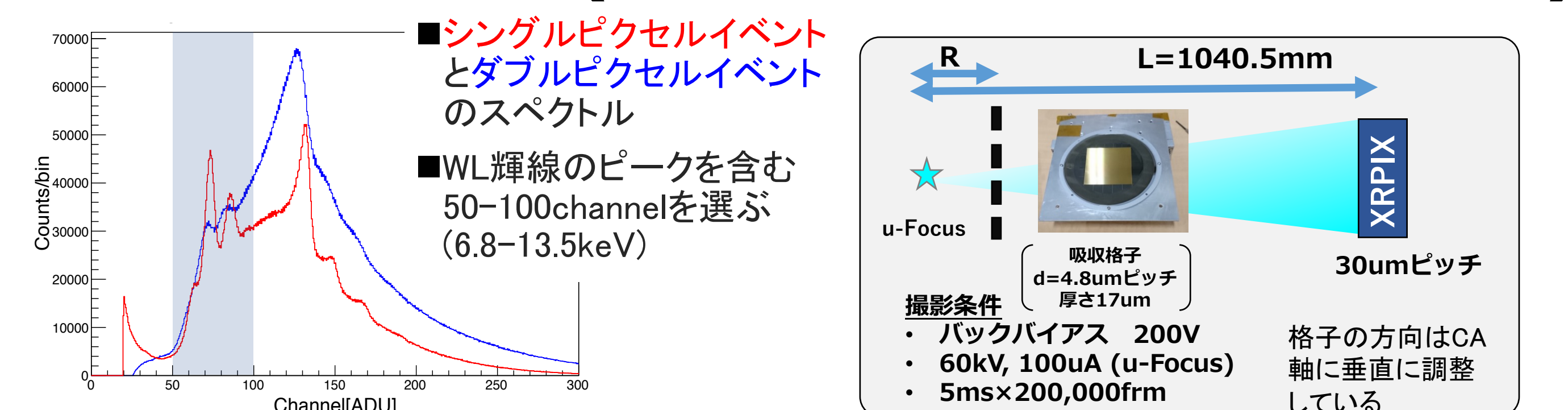


### 回折格子の撮影1 (8μmピッチ、18.75x拡大)



1ピクセル単位のイメージでも5ピクセル周期(150μm)が明瞭に検出されている

### 回折格子の撮影2 (4.8μmピッチ、17μm厚Au)



左の電荷分割解析を適用したあと、黒は横方向ダブルのみ赤はシングル+横ダブルを使用してプロファイルを作成した。ただし、1ピクセル周期の構造の補正も行っている。

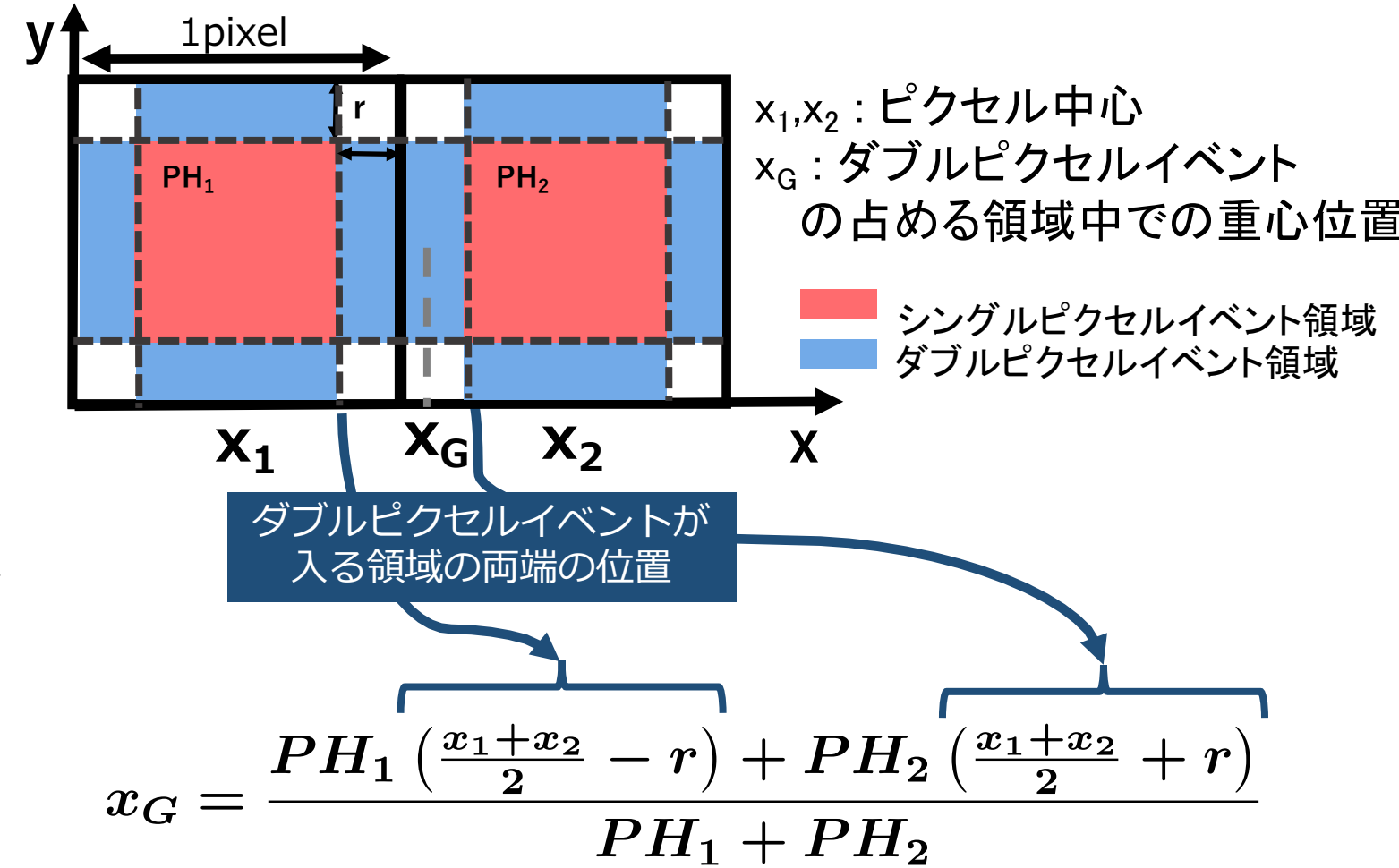
### 電荷分割を利用した位置分解能向上

ピクセル検出器で光子計数した場合に、複数ピクセルに分かれたイベントを利用することでサブピクセルの位置情報を知ることができる。

今回は、最も単純な方法として、シングルピクセルイベントとダブルピクセルイベントの計数比が、右の図のピンク領域、水色領域の面積比に等しくなるようにパラメータを決めた。ピンクの領域の内部、青の領域のピクセル境界に平行な位置は一様乱数を振って決めていく。現段階では、マルチピクセルイベントは採用していないので白の領域に位置をもつイベントはない。

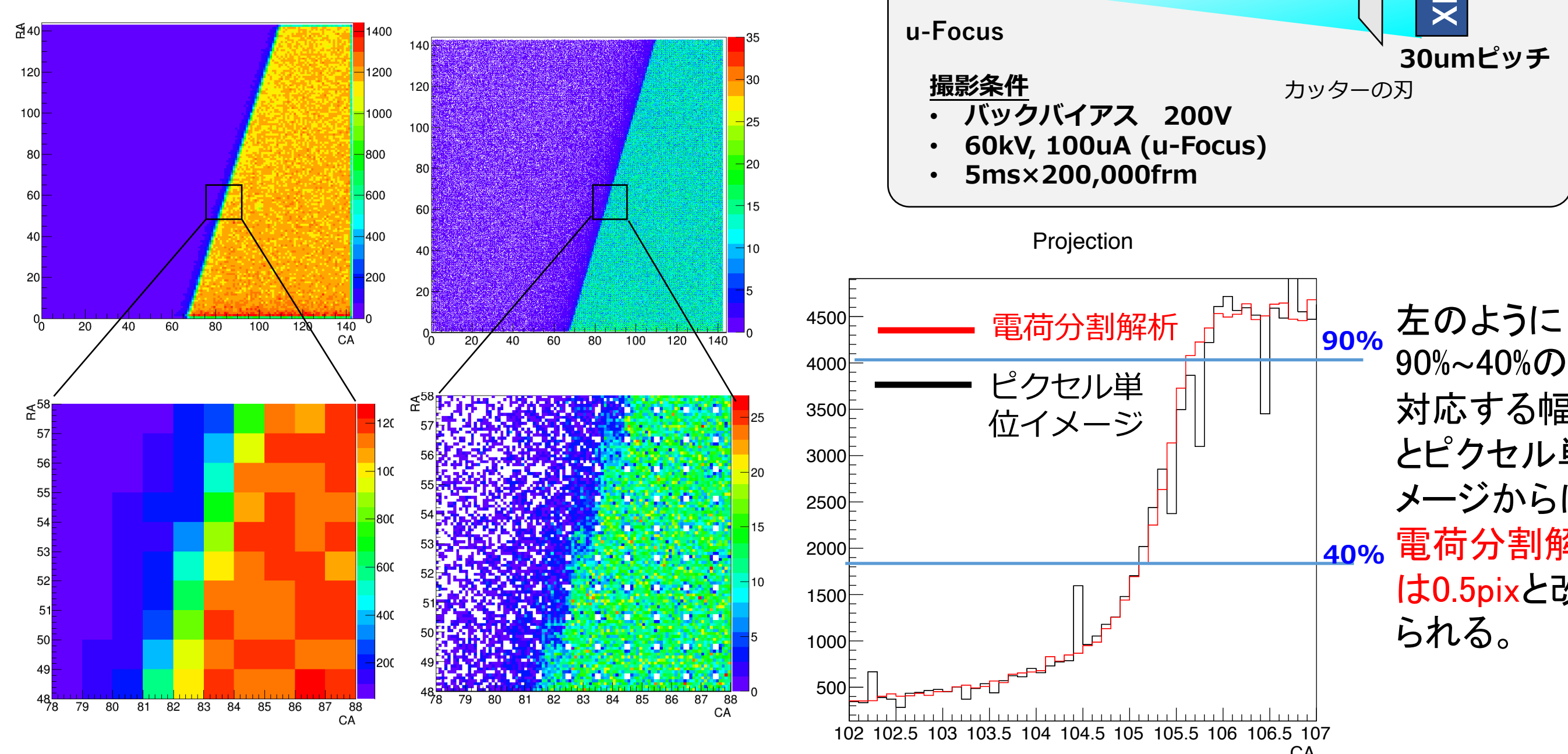
ただし、上の方法で実施したところ、1ピクセル周期の構造が残存する。右の回折格子の撮影2では、1ピクセル内の平均のプロファイルをもとめ、これで実際に得られたプロファイル割ることで、1ピクセル周期の構造を補正している。

#### ダブルイベントの位置の求め方

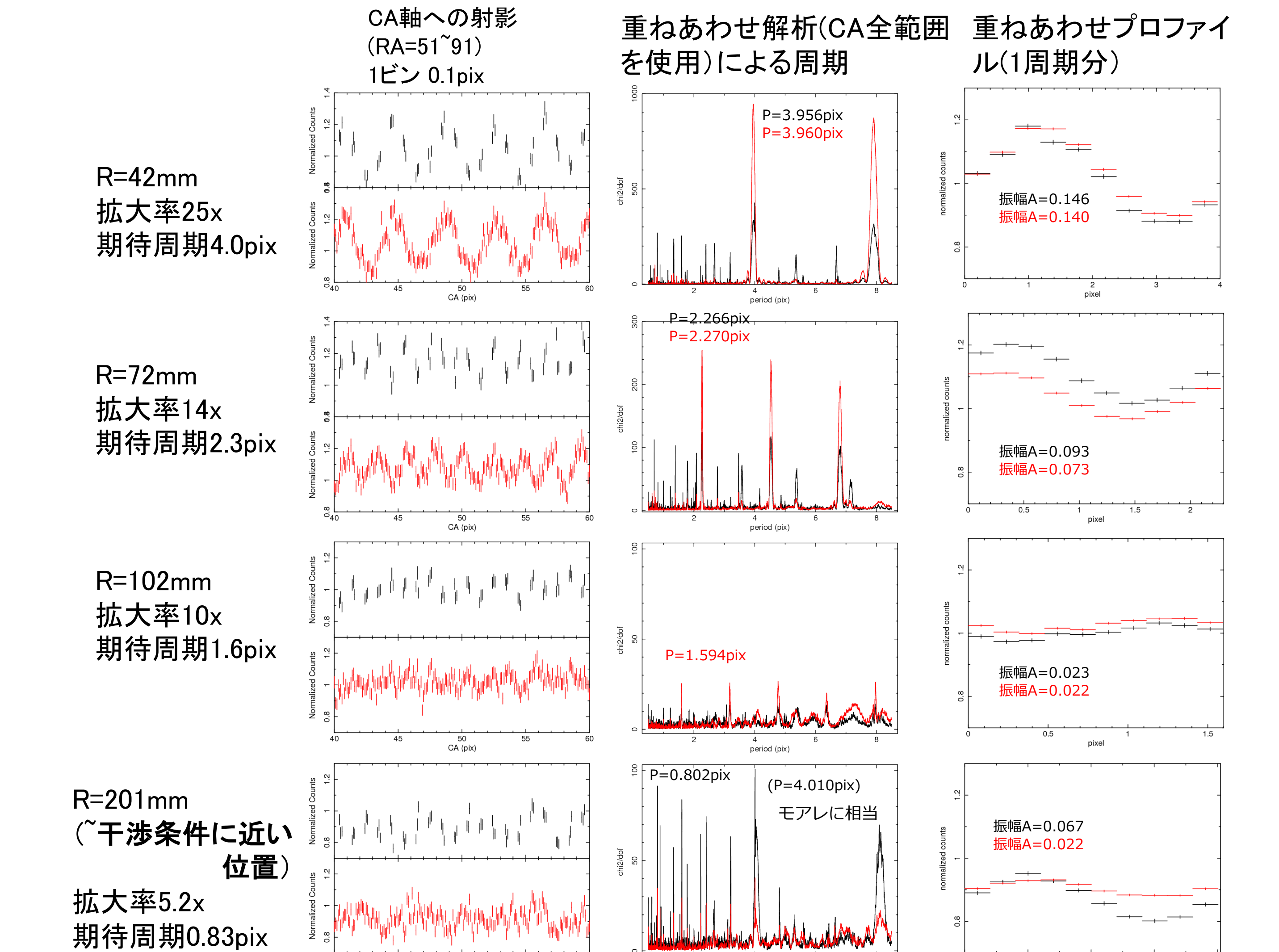


### ナイフエッジの撮影

XRPIXカメラの直前にナイフを設置し撮影した。



左のように90%~40%の高さに対応する幅を求めるとピクセル単位のイメージからは0.7pix、電荷分割解析からは0.5pixと改善がみられる。



R=42mm, R=72mmのケースは、黒でも赤でも明確に期待される周期、4.0pix, 2.3pixが検出されている。これらは格子の透過像といえるが、R=201mmの位置は干渉条件を満たす位置で、干渉縞の可能性が高い。実際、距離がおおよそ半分のR=102mmでは振幅が非常に小さいこともそれを支持する。エネルギーバンドをさらにわける、異なる位置の撮影をするなど、今後より詳しく調べていきたい。

いずれにせよ、0.8pix周期 24μmに相当するサブピクセル位置分解能が実証できた。天体からの放射はほぼ平行光なので、これを距離25cmのX線多重像干渉計(像幅2")として動作させるためには、さらに1/5の位置分解能が必要となる。一方、例えば、ピッチ25μmの格子を用いて透過像を利用すると、同じくL=25cmで像幅10"のX線多重像撮像計として、現状のXRPIX検出器で実現できる。

### 参考文献

- Hayashida et al., 2016, SPIE proc.
- Wen et al., 2013, Advances in Optics and Photonics 5, 83