

X線ハーモニクセパレーター：「従来の100倍明るいX線ビームを実現する光学技術」

井上伊知郎 矢橋 牧名
Inoue Ichiro Yabashi Makina

1. はじめに

1895年のレントゲンによるX線の発見以来、科学者たちはより明るい、高強度なX線を求めて様々な光源開発を行ってきました。X線光源の歴史の中で大きな転機になったのが、約60年前の放射光のX線光源としての利用の始まりです。それ以来、放射光X線光源は様々な改良や進化を重ねることで、その明るさを飛躍的に増大させてきました。

SPring-8等の放射光施設では、光源から出射されたX線を分光器に通すことによって特定の波長のX線のみを抽出して実験を行っています。これは、光源から出てくるX線には様々な波長の光が含まれているために、そのままでは実験に使うことが難しいためです。世界中の放射光施設では多くの場合、2枚のシリコン結晶からなる2結晶分光器と呼ばれる装置によってバンド幅（光の波長幅を中心波長で割った値）が0.01%程度のX線が元のX線ビームから切り出されて実験に用いられています。

ところが、X線自由電子レーザーや世界各地で現在建設が計画されている次世代放射光源といった最先端のX線光源では、以降に述べるようにある決まった波長とその波長のごく近傍の光のみが強く放射されます。これらの光源性能を生かして、X線を単色化することなく取り出すことができると、従来と比較して格段に強いX線ビームを実験に用いることができるようになります。今回、筆者らは分光器なしに特定波長の光を取り出す、「X線ハーモニクセパレーター」という光学技術を開発しました¹⁾。

2. 次世代X線光源におけるスペクトル

放射光源やX線自由電子レーザーでは、アンジュレータと呼ばれる磁石列に電子ビームを通すことで高強度のX線ビームを作り出しています。

次世代放射光源やX線自由電子レーザーにおいて、このアンジュレータから放射される光は、基本波と呼ばれる光と、光子エネルギーが基本波の整数倍（周波数が基本波の整数倍、波長が基本波の整数倍分の1）の高調波から構成されています。現在の放射光施設において実験に用いられている光も基本波と高調波から構成されているのですが、次世代X線光源では基本波、高調波共にそのバンド幅が1%程度と非常に狭いシャープなスペクトル形状になるという特徴があります。

例として、現在の放射光源（SPring-8）と次世代放射光源（SPring-8の次期計画であるSPring-8 II）において、基本波の光子エネルギーが10 keVの場合のアンジュレータから放射されるX線ビームのスペクトルを図1に示します。現在の放射光源では、基本波と高調波はそれぞれ低エネルギー側へ裾を引いたスペクトル形状を持ちます。特に、より高次の高調波になるほど大きく裾を引くようになり、分光器によって光を単色化することが実験を行うために必要不可欠になります。一方、次世代光源では高次の高調波まで対称なスペクトル形状をしており、基本波や高調波のバンド幅は1%程度と非常に小さな値になります。

実は、X線を使った多くの実験ではバンド幅を0.01%程度にまで小さくする必要はなく、1%のバンド幅程度で十分実験が可能です。もし、最先端のX線光源から放射された光を分光器で単色化せずに

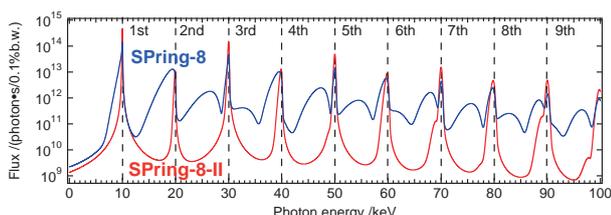


図1 現在の放射光源と次世代放射光源から放射されるX線ビームのスペクトルの比較

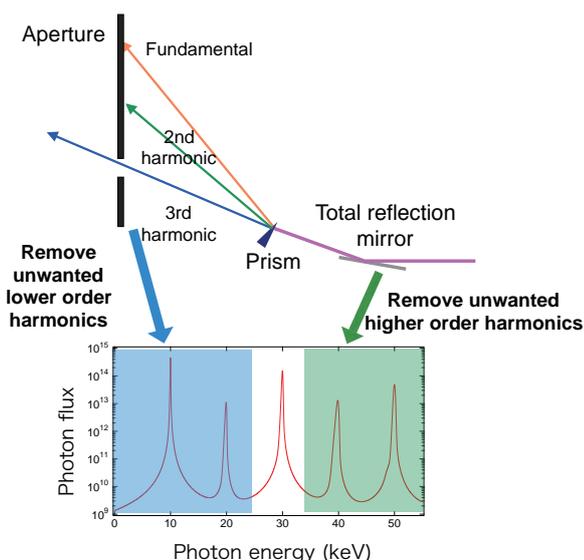


図2 3次高調波を取り出す場合を例としたX線ハーモニクセパレーター概念図

基本波や特定の高調波を取り出すことができると、2結晶分光器を使った場合と比較して約100倍強いX線を実験に用いることができるようになります。

3. X線ハーモニクセパレーター

そこで私たちは、全反射ミラーとX線プリズムを組み合わせたハーモニクセパレーターという光学技術によって特定の基本波や高調波を単色化せずに取り出すことを考案しました(図2)。この方法では、まずX線を全反射ミラーに入射します。全反射ミラーは、入射されるX線に対してローパスフィルターとして働きます。この時、X線のミラーへの入射角度を適切に調整すると、特定の波長よりも短い波長のX線はミラーによって反射されないようにすることができます。これによって取り出したいX線よりも高次の高調波を取り除きます。その後、X線を楔型のプリズムに通します。X線の領

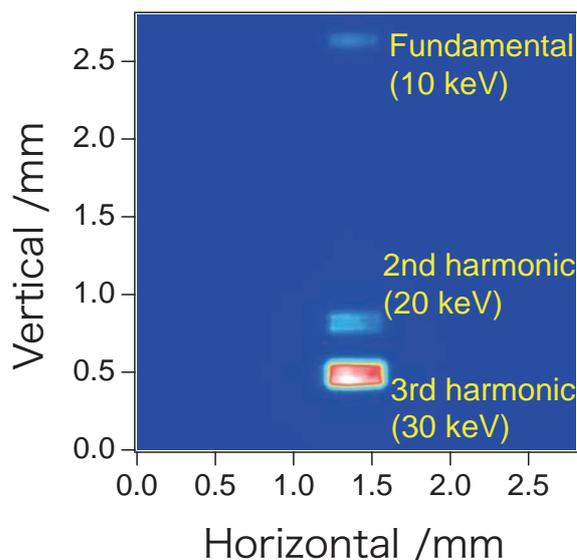


図3 X線ハーモニクセパレーターを用いて空間的に分離されたSACLAから放射された基本波・2次高調波・3次高調波の空間プロファイル

域では物質中の屈折率は1よりも僅かに小さく、波長が短くなるにつれて単調に増加していきます。そのため、プリズムを透過した基本波や各々の高調波はその波長に応じて異なる方向へ進んでいきます。十分にX線を伝搬させた後でスリットを使って不必要な波長の光を除去することによって、特定の基本波や高調波のみを取り出すことが可能になります。

4. SACLAにおける原理実証実験

X線ハーモニクセパレーターの実現可能性を調べるために、X線自由電子レーザー施設SACLAにおいて原理実証実験を行いました。SACLAにおいて基本波の光子エネルギーが10 keVのX線レーザー光を発振させ、光子エネルギー20 keVの2次高調波や30 keVの3次高調波のみを選択して取り出すことを試みました。まず、X線レーザー光からSACLAの光学ハッチに常設しているロジウムでコートされた全反射ミラー²⁾によって4次以上の高調波を除去しました。そして、グラッシーカーボンと呼ばれる材質でできたプリズムを用いて基本波・2次高調波・3次高調波それぞれを空間的に分離させることに成功しました(図3)。

分離されたこれらの光においてプロファイルの歪み等は無く、実験に用いることができる質の高い光

が取り出されていることが証明されました。

5. おわりに

今回開発に成功したハーモニックセパレーターは、高強度の短波長 X 線を実現する画期的な光学技術です。この光学技術を X 線自由電子レーザーや次世代放射光と組み合わせることで、2 結晶分光器を用いる従来の場合よりも 100 倍以上高強度な X 線を利用できるようになり、測定の飛躍的なハイスループット化・高速化の実現が期待できます。

特に、X 線自由電子レーザーにおける高次光の利

用は、その強度が限られていたためにほとんど行われていないのが現状です。X 線ハーモニックセパレーターによって、今後、短い波長の X 線レーザーの利用が広まっていくことが期待できます。

参考文献

- 1) I. Inoue, *et al.*, *J. Synchrotron Radiat.*, **25**, 346-353 (2018)
- 2) K. Tono, *et al.*, *Proc. SPIE*, 10237, 1023706 (2017)

((国研)理化学研究所放射光科学研究センター
XFEL 研究開発グループ)