

## 第8回日本放射光学会奨励賞

# 強度干渉計による X 線コヒーレンスの研究

矢橋牧名 財団法人高輝度光科学研究センター 〒679-5198 兵庫県佐用郡三日月町光都 1-1-1

### 1. はじめに

近年、第3世代放射光源の普及とともに、X線のコヒーレンスを利用した研究手法が脚光を浴びている。相関分光法、屈折コントラストイメージング、単粒子回折法、ナノ集光等がよい例である。このためには、高輝度・低エミッタンスの光源の開発とともに、コヒーレンスを破壊しないような光学系の利用が必須である。光源開発・光学系評価・応用研究という3本柱をつなぐためには、コヒーレンスの精確な計測が非常に重要である。

しかしながら、X線領域のコヒーレンス計測は容易ではない。通常、コヒーレンス計測のためには干渉法が用いられるが、X線領域の干渉計は技術的に困難である。第一に、利用できる光学素子に非常に高い完全性が求められる。第二に、光学系全体に高い安定性を保つ必要がある。

1950年代にハンブリーブラウンとツイスが考案した強度干渉法は、このような難点を克服できる可能性がある。通常の光波の相関（振幅の干渉）でなく光電流の相関（強度の干渉）を利用することで、シンプルな光学系が利用でき、安定性に対する要求も緩和されるからである。従って、強度干渉法は、放射光におけるコヒーレンス診断のための有力な手法としてかねてより着目されていた<sup>1)</sup>。

強度干渉法の定量性を高めるためには、輝度の高い光源を利用すると共に、放射光のパルス長（数十 ps）に匹敵するような長い時間コヒーレンス長をもつ X 線を作成する必要がある。このために、我々は完全結晶を用いた高分解能分光器（HRM）の開発に取り組み、この HRM を用いて強度干渉法の研究を行った。本稿では、これらの概略について述べる。尚、詳しい解説は既に本誌上にも掲載されているため<sup>2)</sup>、合わせて参照されたい。

### 2. 空間領域の計測<sup>3,4)</sup>

27 m アンジュレータからの高輝度 X 線 ( $E=14.4$  keV) は、液体窒素冷却されたシリコン二結晶分光器により粗く単色化され、さらに4結晶の非対称反射を用いた HRM によって  $\Delta E=120$   $\mu$ eV まで単色化される<sup>5)</sup>。HRM の下流に、精密4象限スリットが設置され、検出器の実効的な開口を制御する。検出器としては2つの半透過型のアバランシェフォトダイオード (APD) がタンデムに用いられる。これらの出力はコインシデンス回路に接続され、コインシデンス計数  $C_S$  が測定される。同時に、遅延回路を用いてアクシデンタルなコインシデンス計数  $C_N$  も計

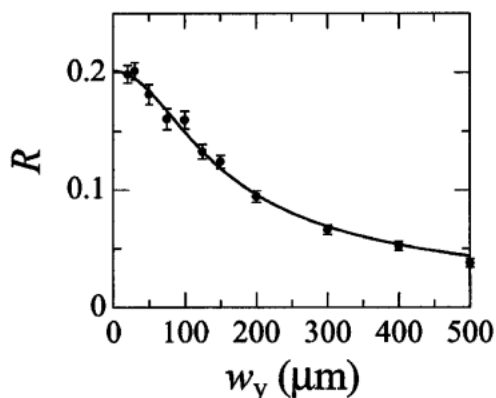


Figure 1. Coincidence enhancement  $R$  vs. vertical slit width  $w_y$ . The solid line is the fitting result.

測される。両者の比を  $R=C_S/C_N$  と定義すると、カオス光の場合、 $R$  はモード数  $M$  に反比例する。すなわち、 $R$  を計測することでモード数がわかり、ここからコヒーレンスに関する情報を得ることができる。

Fig. 1 に、スリットの垂直方向のサイズの関数として測定された  $R$  を示す。スリット位置は光源中心から  $L=66.7$  m である。スリットサイズを小さくすると  $R$  が増加するが、これは空間モード数の減少に対応している。このプロファイルから、スリット位置における垂直方向の空間コヒーレンス関数が求められる。ガウス型の関数を仮定すると実験結果とよく一致し、コヒーレンス長は  $\sigma_y=66.3 \pm 2.0$   $\mu$ m と求められた。同様な測定をスリット位置  $L=78.2$  m で行うと、 $\sigma_y$  が  $L$  に比例することが確認された。

この結果は、有名な Van Cittert-Zernike の定理に従っている。原理的には、この定理によって光源サイズが求まり、さらにベータatron関数を用いるとエミッタンスまで決定することが可能である。しかしながら、27 m アンジュレータに沿ったベータatron関数は大きく変動しており、これらの値に影響を及ぼす恐れがある。この問題を回避するには、ベータatron関数がより均一な4.5 m 長アンジュレータを光源として測定を行うのが望ましい。そこで BL29XU で同様な強度干渉測定を行った。通常のエミッタンス ( $\epsilon=6$  nrad) と低エミッタンス ( $\epsilon=3$  nrad) の2条件で計測を行った。この結果、垂直方向のビームサイズが5.9  $\mu$ m 及び4.5  $\mu$ m、垂直方向のエミッタンスに換算して6.0 pmrad 及び3.6 pmrad とそれぞれ求められた。すなわち、低エミッタンス運転時もエミッタンスのカ

ップリングはほぼ保存されていることがわかった。X線干渉法により極めて高精度の光源の診断が可能なが実証された。

ベリリウム窓、フィルター類のX線透過光学系は、しばしばコヒーレント照明化でスペックルを生じることが知られている。これらは、ビームラインコンポーネントとして広く使われており、空間コヒーレンスを劣化させる可能性がある。実際に、低品位のベリリウム窓をフロントエンド終端部に使用して、強度干渉法を行った。この結果、垂直方向の空間コヒーレンスプロファイルは大きく変化し、単一のガウシアンではなくダブルガウシアンとなることが観測された。定性的には、非散乱成分と散乱成分の重ね合わせであると解釈される。ここで注目すべきは、静的な位相物体に対し、入射光が空間的に完全にコヒーレントであれば透過光のコヒーレンスの劣化はない、という事実であり、これは実験結果と一見矛盾しているように見える。しかしながら、今の場合入射光は垂直方向はほぼコヒーレントであるが水平方向にはそうではない。コヒーレンス伝播の関係式に立ち戻ると、このような場合には位相物体によって垂直方向のコヒーレンスも劣化しうることがわかった。詳しくは原論文を参照されたい<sup>4)</sup>。

### 3. 時間領域の計測<sup>6)</sup>

前項では、強度干渉法による空間領域のコヒーレンス計測を行ったが、これは時間領域にも応用できる。ここでは、パルス幅を決定する試みを行った。我々のHRMは非対称反射を用いているため、光子エネルギーをシフトさせることでバンド幅を制御することが可能である。実際に、 $E = 14.267 \text{ keV}$  から  $14.412 \text{ keV}$  までエネルギーを変えて、前項と同様に強度干渉計測を行った。Fig. 2 に示すように、 $R$  より換算された時間モード数をバンド幅の関数としてプロットし、パルス幅をフィッティングパラメータとしてフィッティングを行った。この結果、パルス幅は半値全幅で  $32.7 \pm 1.6 \text{ ps}$  と決定され、ストリークカメラによる測定値  $32 \text{ ps}$  とよく一致した。すなわち、強度干渉法

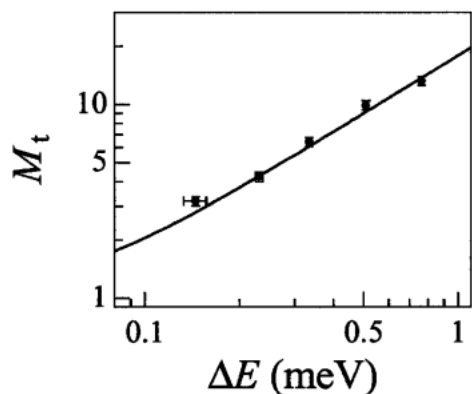


Figure 2. The longitudinal mode number  $M_t$  vs. the energy bandwidth  $\Delta E$ . The solid line is the fitting result.

によりX線のパルス幅が高い精度で測定できることが示された。この結果は、第4世代の超短パルスSASE-FEL光源に対しても、(カオス光源として取り扱える限り)パルス幅決定の有力な手段として期待される。

### 謝辞

大勢の皆様のご指導の結果、本賞の受賞に至った。特に、理化学研究所の石川哲也主任、玉作賢治博士、JASRIの菊田惺志副所長、後藤俊治博士には、今回の研究にとどまらない多くの場面でご指導・ご助言を賜った。JASRIビームライン・技術部門の竹下邦和博士、大橋治彦博士、望月哲朗博士、山崎裕史氏、谷口真吾博士、浅野芳裕博士、大端通博士、古川行人博士、中谷健博士、松下智裕博士、石澤康秀氏、高橋直博士、青柳秀樹博士、木村洋昭博士、田中政行氏、並びに理化学研究所の北村英男主任、原徹博士、田中隆次博士、山本雅貴博士には、今回の研究の舞台となったビームラインの建設・コミッショニングに当たって多大なるご協力を頂いた。JASRI加速器部門の田中均博士、高雄勝博士、高野史郎博士、正木満博博士には、マシンスタディの際にご協力頂いた。さらに、理化学研究所の新竹積主任、田中義人博士、JASRIの伊達伸博士、A. Q. R. Baron博士、大阪大学の山内和人教授、山村和也助教授と行った議論は、極めて有益であった。ここに改めて感謝の意を表する。

### 参考文献

- 1) E. Ikonen: *Phys. Rev. Lett.* **68**, 2759 (1992); Y. Kunimune et al.: *J. Synchrotron. Rad.* **4**, 199 (1997); R. Z. Tai et al.: *Phys. Rev. A* **60**, 3262 (1999).
- 2) 矢橋牧名, 玉作賢治, 石川哲也: *放射光* **16**, 77 (2003).
- 3) M. Yabashi, K. Tamasaku and T. Ishikawa: *Phys. Rev. Lett.* **87**, 140801 (2001).
- 4) M. Yabashi, K. Tamasaku and T. Ishikawa: *Phys. Rev. A* **69**, 023813 (2004).
- 5) M. Yabashi, K. Tamasaku, S. Kikuta and T. Ishikawa: *Rev. Sci. Instrum.* **72**, 4080 (2001).
- 6) M. Yabashi, K. Tamasaku and T. Ishikawa: *Phys. Rev. Lett.* **88**, 244801 (2002).



矢橋牧名

財団法人高輝度光科学研究センター  
E-mail: yabashi@spring8.or.jp  
専門: X線光学

### 略歴:

1996年7月東京大学工学系研究科博士課程中退後、同年8月より現職。SPring-8の立ち上げ時期にはビームライン建設や二結晶分光器の導入・開発に携わり、その後高分解能X線光学系・干渉計の開発と応用研究を行う。趣味は旅行、読書、グルメ、ピアノ。