

強度相関による干渉計測

理化学研究所 玉作賢治

1. 序

一般に干渉現象を計測するとき強度検出器を用いる。例えば干渉計からの出射強度がある物理量, x , の関数として変化する場合には、その強度変化, $I(x)$, を見ることにより干渉現象の知見が得られる。あるいは干渉縞を2次元の強度検出器で測定する方法もある。これらの測定方法では干渉現象の2つの重要な物理量、可視度と位相、を同時に測定する事ができる。以下では位相情報のある程度犠牲にするかわりに、強度相関を用いて可視度を精度良く測定する方法とその応用について述べる。強度相関を用いる方法は、位相板を回転させながら強度振動を計測したり、干渉縞の写真を解析する方法に比べて簡単にリアルタイムで可視度を測定できるという利点がある。また強度相関法は位相が測定時間内で十分に揺らいでいることが前提となるため、X線領域での複数の結晶から作られる分離型干渉計との組み合わせの相性が良いと言える。

2. 原理^{1,2}

強度, I , がある位相変数, ϕ , に関して、

$$I(\phi) = \langle I \rangle (1 + V \cos \phi)$$

と表されるとする。ここで物理量 X の平均を $\langle X \rangle$ とし、 V を強度振動の可視度とする。可視度は強度振動の極大値, I_{\max} , と極小値, I_{\min} , を用いて $V = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min})$ と定義する。ここで $I(\phi)$ の自己相関の時間平均をとると、

$$\langle I(\phi)^2 \rangle = \langle I \rangle^2 \langle 1 + 2V \cos \phi + V^2 \cos^2 \phi \rangle$$

となる。この時位相が揺らいでいると仮定すると、 ϕ について平均して、

$$\langle I^2 \rangle = \langle I \rangle^2 \left(1 + \frac{V^2}{2} \right)$$

となり、規格化された強度相関 $P_{11} = \langle I^2 \rangle / \langle I \rangle^2$ から可視度, V , が決定される。このとき、可視度, V , が位相, ϕ , に関して緩やかに変化するものとする。この仮定はX線領域での干渉計では満たされる。

以上では強度変動の自己相関に関して考えたが、同じ振動の周期をもつ別々の強度間の相互相関をとることにより2つの振動の位相差を決定する事も可能となる。2つの強度, I_1 と I_2 , が同じ位相変数, ϕ , に関して振動しているとする、その位相差を α として、

$$\begin{aligned} I_1(\phi) &= \langle I_1 \rangle (1 + V \cos \phi) \\ I_2(\phi) &= \langle I_2 \rangle (1 + V \cos(\phi + \alpha)) \end{aligned}$$

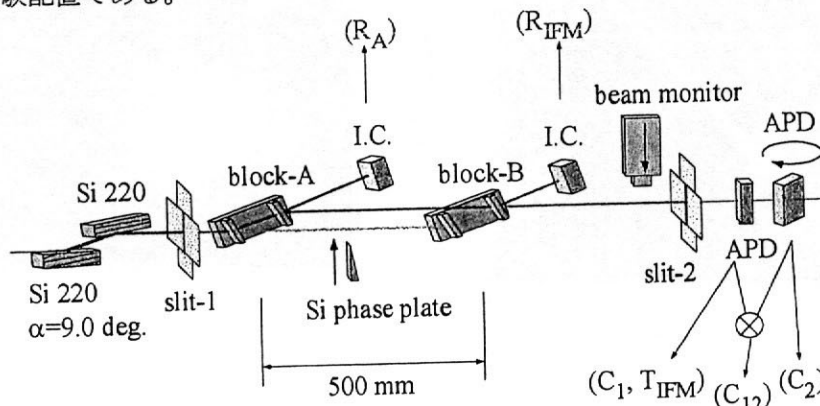
と書けるとすると、この2つの相互相関の ϕ に関する平均をとると、

$$\langle I_1 I_2 \rangle = \langle I_1 \rangle \langle I_2 \rangle \left(1 + \frac{V^2}{2} \cos \alpha \right)$$

となり、強度相関に位相差の情報が含まれる。ここで両方の強度振動の可視度は等しいと仮定した。これは干渉縞の現れるビーム断面の2か所を測定するような場合に相当する。

3. skew-symmetric LLL 分離型干渉計でのテスト²

強度相関法による可視度測定の実験配置を、干渉条件が比較的良く研究されている skew-symmetric LLL 分離型干渉計で行った^{3,4}。実験は SPring-8 の BL29XUL にて行われた⁵。下図はその実験配置である。



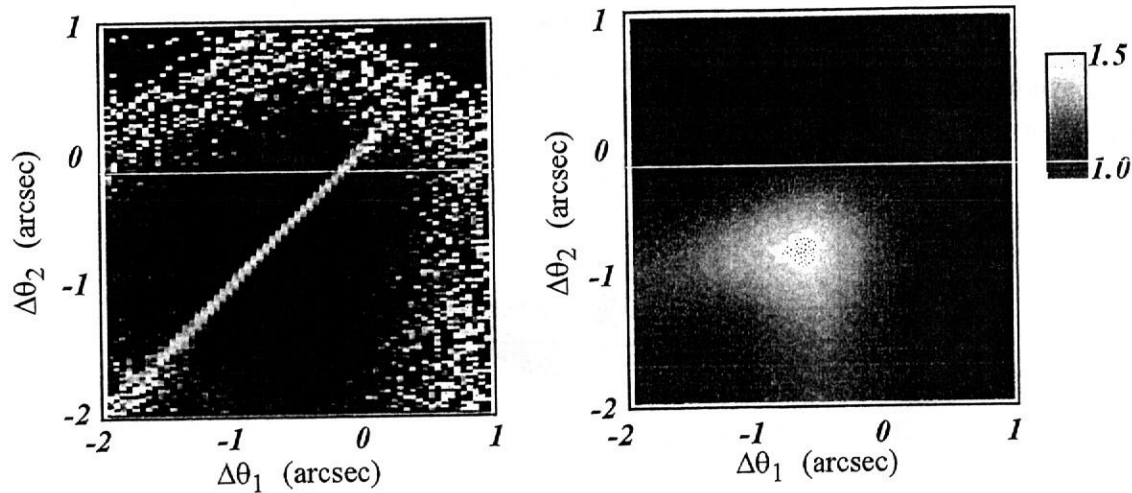
分離型干渉計は2つのシリコン結晶(block-A と block-B)からなり、回折面が220面となっている。2つの結晶は500mm離れた別々のゴニオメーターに載せられている。このため2つの結晶間の散乱面内の相対的な角度の安定度は10 nradのオーダーとなっていると思われる。この値は skew-symmetric LLL 分離型干渉計が射出ビームの位相の安定のため要求する値(0.1nradのオーダー)に比べて遥かに大きい。この不安定性の要因は主に振動によるもので、測定の結果数kHz程度で位相変化による強度振動が起きていることが分かった。

強度相関の測定は同時計測法を用いて行った。射出強度が十分な場合には相関器を用いる事も可能であるが、振動が速い場合には相関器の帯域を十分に確保しなければならない。干渉計の透過側に透過型APDを2台並べておき、その出力を同時係数回路で計測した。

まず強度相関と干渉の可視度との対応を確認するために干渉計内の片方の光路に位相板を挿入して干渉縞の像を撮影した。これを block-B の散乱面内回転、 $\Delta\theta_2$ の幾つかの点で行い、その後測定した規格化された強度相関、 P_{12} と比べた。その結果、上で述べた原理で予想されたとおり、 P_{12} の大きくなる $\Delta\theta_2$ で確かに干渉縞が確認された。

4. 干渉条件の探索

強度相関法は効率よく可視度を測定出来るので、分離型干渉計のような自由度の大きい干渉計の干渉条件を調べるのに有用である。下に示した図は、先の skew-symmetric LLL 分離型干渉計のそれぞれの結晶の散乱面内での回転、 $\Delta\theta_1$ と $\Delta\theta_2$ による規格化された強度相関(左)、 P_{12} とビーム強度(右)を示した図である。左図の周辺部に強度相関が大きくなっている部分があるが、これは強度が弱いために十分な統計精度が得られないためである。 P_{12} は $\Delta\theta_1 = \Delta\theta_2$ の直線まわりの極狭い領域—0.15°程度—で大きくなっている事が分かる。すなわち干渉計として利用できるのは、2つ結晶ブロックがあたかも一体の結晶であるかのような $\Delta\theta_1 = \Delta\theta_2$ 線上に限られる事が分かった。



5. まとめと展望

強度相関法により干渉の可視度の計測が可能となる原理を示し、それを skew-symmetric LLL 分離型干渉計を用いて確認した。また強度相関法の応用として、skew-symmetric LLL 分離型干渉計の干渉条件を明らかにした。このように干渉計が不安定な状態で干渉計測を行えることは、新しい干渉計の評価を行う場合や、上で示したように干渉計の動作点を探索する場合に威力を発揮するものと思われる。さらに2つの強度の相互相関を測定することにより位相差の情報を得る事も可能であり、この点での応用も期待される。

強度相関法の応用の目玉として、現在我々は硬 X 線領域での Michelson 干渉計の実現に取り組んでいる。それによって硬 X 線領域で高分解能の Fourier 分光を行えるものと期待される。なぜならば Fourier 分光法の分解能は、良く知られているように干渉計内の光路差に反比例するが、実は波長に比例する。したがって波長 1\AA ならばわずか 200mm の光路差で 10^{-9} の分解能を得る事ができる。このような高分解能は分散を用いた分光法では、シリコン結晶の格子定数の揺らぎのため達成困難と考えられている。また Michelson 干渉計を用いることにより次世代の放射光光源、例えば ERL や SASE-FEL、のコヒーレンスの評価が行えるものと期待される。

参考文献

1. M.Yabashi, K.Tamasaku, and T.Ishikawa, Jpn. J. Appl. Phys. **40**, L646 (2001).
2. K.Tamasaku, M.Yabashi, and T.Ishikawa, Phys. Rev. Lett. **88**, 044801 (2002).
3. D.Windisch, and P.Becker, J. Appl.Crystallogr. **25**, 377 (1992).
4. A.Momose, T.Takeda, Y.Itai, A.Yoneyama, and K.Hirano, J. Synchrotron Radiat. **5**, 309 (1998).
5. K.Tamasaku *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A **467-468**, 686 (2001).