

軟X線の1次および2次コヒーレンス測定で何が見えるか

東京都立大学大学院・理学研究科 宮原恒昱

1) 1次「コヒーレンス」の多義性を理解しておくこと

1次のコヒーレンスは空間部分(4次元)と時間部分(2次元)にわけて考えることが多いが、両方ひとまとめ(6次元)にして「モード」という考え方を導入すると、単一モードの時に1次コヒーレンスは最良となる。輝度の単位($\text{photons/sec/mm}^2/\text{mrad}^2/0.1\% \text{ b.w.}$)やボーズ縮重度はこのような6次元空間を前提に考えているのである。

ここで時間部分に注目すると、(Δt)空間では少なくとも1つの自由度があるから非常に短いパルスでは単色性が悪くなる。ところが単色性が悪ければヤングの干渉縞のコントラストが低下する。しかしフーリエ限界で単色性が悪い場合は広義の意味では1次コヒーレンスは低下していないのである。したがって、ヤングの干渉縞のコントラストの善し悪しを1次コヒーレンスの善し悪しと結びつけるのは厳密には正しくない。このことを理解しておかないとERLのような単パルスの利用法について誤解が生ずる恐れがある。

2) 2次コヒーレンスについて

2次以上のコヒーレンスは強度揺らぎに関係する。その最低次は2光子の相関または2つのビームの強度相関として観測される。空間コヒーレンスを保ったままビームを分割すると、それらのビームはもともと同一のモードの電磁場に所属していたことになる。この同一モードの電磁場の強度が揺らいでいると、2つに分割した後も一方の強度が増大すればもう一方の強度も増大するという相関が現れる。このような相関が最大になっているのがカオス光で、「 $\pm 100\%$ 揺らいでいる」と表現することがある。カオス光では、2つの分割の仕方が空間的にインコヒーレントになると相関は減少し半分になる。このことから、カオス光の場合2光子相関(または強度相関)から1次コヒーレンスについての情報も得られることになる。

ところがレーザーのような光は2つに分割してそれぞれの強度揺らぎを測定すると、それぞれが光子のポアソン統計に由来する揺らぎを示すのみである。ここで、ポアソン統計の間の偶然の相関を考えると、2光子の相関確率はカオス光のその半分となる。このような光を理想化して「全コヒーレント」という概念が生まれた。この概念は当初古典的に定義されたが、量子論的定義はGlauberによってなされた。

放射光を利用する立場からみると、時間揺らぎの大きさや周波数成分を知っておくことは極めて重要である。したがって1次コヒーレンスだけでなく、強度相関または2光子相関法により2次コヒーレンスを測定することも重要である。

3) 「全コヒーレント」の意味について

Glauberが「コヒーレント状態」を量子光学的に定義して以来、全コヒーレントという用語は当たり前のように使われている。だが、世の中に無限に単色性の良い(無限に長い)光は存在しない。そこで有限な波束長を考え、このような波束のアンサンブルの強度揺ら

ぎを、コヒーレント長を時間に換算した値 T (コヒーレント時間) の逆数程度の周波数バンド幅で観測すると、このような光の集団はゆっくりと揺らいでおりカオス的に見えるはずである。すなわち「コヒーレント光」がカオス的に見える実験条件が実現される。

その逆の場合もある。カオス光の強度は $\pm 100\%$ 揺らぐとされる。ここで揺らぎの周波数成分のピーク値が波束のコヒーレント時間 T の逆数程度であることに注意する必要がある。したがって、 T よりも十分に遅い時間分解能の検出器でこの光を観測すると、揺らぎは低減してコヒーレント光のように見える。

もちろん、だからといってこの光源がカオス光でなくなったとは言わない。なぜなら、通常、光子統計に関連した定義は観測とは独立になされるからである。Hanbury-Brown & Twiss (HBT) の2光子相関実験では、速い揺らぎを圧倒的に遅い検出器の時間分解能で検出する巧妙な方法を考え出した。

しかしながら、検出時間を変えたりバンド幅を変えたりすると、見かけ上光子統計が異なって見えることに注意することはERLの場合特に重要である。たとえば、 100 fsec のパルスを 0.1 mV の分解能で単色化するとコヒーレント長は 100 fsec よりずっと長くなる。このような光は 100 fsec より速い時間スケールの揺らぎは極めて小さくなるから見かけ上コヒーレント光に見えてしまう。

このように、測定とは独立な概念としての「カオス光」や「コヒーレント光」という概念(これは光の発生過程を反映する)と、観測に依存した統計性の区別と関連を十分に理解しておくことは重要である。

4) 軟X線領域での1次コヒーレンスの測定

まずアンジュレータ光を単色化して、ヤングの干渉縞のコントラストが空間コヒーレンスで決まる条件で実験をおこなった。間隔の異なるダブルスリットを数種類用意し、それによる回折パターンをスリットを装着した光電子増倍管を1次元的にスキャンすることにより測定した。ダブルスリットの間隔が小さいほど、また波長が長いほどコントラストは良くなった。

ダブルスリットの直上流に、ビームサイズモニタを設置してビームサイズを測定した。これとコントラストの変化から蓄積ビームの水平方向のエミッタンスを評価することができた。この結果は、設計値と極めて良い一致(約 $40\text{ nm}\cdot\text{rad}$)を示した。同様の測定を測定装置を 90 度回転させて行って垂直方向のエミッタンスを評価したところ約 $3\text{ nm}\cdot\text{rad}$ であり別の測定法による値より数倍大きかった。これはビーム断面が傾いていることを示唆する。この測定方法から明らかなように、ここで得られたエミッタンスの値は長時間平均したエミッタンスである。

一方、BL28では入射光を単色化することなくヤングの干渉縞を測定した。その結果アンジュレータの周期数できまる準単色性とエミッタンスを反映した、コントラストの低下した干渉パターンが得られた。

5) 強度相関による2次コヒーレンスの評価

光子を波束と考えれば強度相関は光子のコヒーレント時間程度以内で起きるはずである。それより十分時間的に離れていれば相関は生じなくなる。しかしながら、軟X線領域では硬X線のシリコンに相当するような完全性の高い分光素子（回折格子はスロープ誤差がありこれが分解能の上限を決める）が存在しないので、一般にコヒーレント時間は短く数10 fsec のオーダーである。このような高速の検出器、掛け算器は存在しないから、測定はコヒーレント時間よりはるかに長い時間で行われ、したがって、真の相関でない偽の相関が大量に含まれてしまう。なお悪いことに、光源はバンチ構造をなしているために、バンチ長に相当する時間で観測すると、一方のビームの強度が増大すれば他方の強度も増大するという偽の相関がさらに増大する。

この困難を解決するために、我々は測定装置の中に回折格子分光器を組み込み「コヒーレント長変調法」という方法を考案した。この方法の要点は、ピエゾ素子を用いて入射スリット幅を周波数 f で変調し、強度相関の $3f$ 成分をロックイン・アンプで検出することである。真の2光子相関の確率はコヒーレント長に比例するから周波数 f で変調される。このとき2つのビームの強度もそれぞれ f で変調される。したがって最終的に $3f$ 成分を検出すれば真の強度相関を検出できるわけである。我々はロックイン・アンプで振幅だけでなく位相も検出した。これは測定精度を上げるには必須である。

このとき注意すべきはスリット幅変調による強度変調に高調波を多く含んではならない事である。実際には強度をモニターしながらロックイン・アンプで高調波を検出し、関数発生器の波形を調整して高調波発生を1%以下に抑えた（実際には容易に0.1%以下にできる）。この程度の高調波であれば測定に与える影響が小さいことをあらかじめシミュレーションで確認した。

以上の方法で強度相関を測定しそれから1次コヒーレント成分をも見積もることができた。この結果から水平方向のエミッタンスを見積もると、リングの運転条件によってはヤングの干渉縞で見積もった値の半分程度の場合も観測された。しかしこの値は、光子のコヒーレント時間程度で見たエミッタンスであって、長時間平均エミッタンスとは異なる。このことから推測されるのは、蓄積ビーム（光子のコヒーレント時間程度の）瞬間的なエミッタンスが何らかの理由により大きく観測されると言うことである。可能性としては、バンチ毎に水平方向の重心がずれる不安定性があつたり、また同一バンチ内部でも先頭部分と後ろの部分で水平方向の重心がずれるような不安定性がある場合などが考えられる。

また、別の運転条件では、設計値とほぼ等しいエミッタンスも観測されている。このことから、2光子相関で見積もられるエミッタンスはリング内の蓄積ビームの不安定性の解析にも用いることが可能であると期待される。

6) 光子計数法による2光子相関

前項の方法の弱点は、コヒーレント光に対する強度相関の寄与が差し引かれてしまう点である。したがって、規格化を正確に行わないと、カオス光とコヒーレント光の比率を正しく求めるのが難しい。

これに対して2光子相関法では、偽の相関も含む相関データから明らかに偽の相関のみを含むデータを差し引く方法を採用する。したがって、そのなかにはコヒーレント光が示す真の相関も含まれることになり、カオス光とコヒーレント光の比率が（十分なS/N非があれば）比較的容易に求まることになる。ここで明らかに偽の相関のみを含む（真の相関を含まない）データとは、同一のバンチについてある時刻と1周遅れた時刻との間で相関をとることである。同一のバンチを観測しているにも関わらず、時刻が1周分も離れていれば真の相関はないからこの方法は有力である。

我々はBL16において、OE変換、EO変換、および光ケーブルを利用してリング1周に相当する624 nsecの遅延回路を用意した。そして2つの入力のうち一方の信号を、固体スイッチを用いて遅延状態と遅延のない状態とのあいだで0.7 Hz程度でスイッチした。これは、一方の信号のみの遅延時間を変調したのと同様である。光子相関は、標準的なCFDとTACを用いて分解能300 psec程度（となりのバンチと区別できれば十分である）で同期をとりシングル・チャンネル・アナライザを経てレートメータに入力しその出力をデジタル・ロックイン・アンプで検出した。

ロックイン・アンプの出力は入力と同位相のサイン成分と位相のずれたコサイン成分があるが、サイン成分をフラウンホーファー・スリットの幅にたいしてプロットしたところ、（軟X線領域では）従来よりはるかにSNのよいデータが得られた。得られたデータは光源のカオスの性質を反映しているが、これから蓄積ビームの水平エミッタンスを見積もったところ、39 nmradという、設計値とほぼ等しい値が得られ、あまりの一致の良さに驚いた次第である。逆に言えば、測定したときの運転条件では瞬間エミッタンスもこの程度であり、この運転条件では、長時間平均エミッタンスを増大させるような不安定性はなかったことになる。

以上の経験から、遅延時間変調法は極めて有力な方法であることが結論できた。また、光ケーブルの損失は極めて小さいことから、数 μ secの遅延も問題がない。したがってこの方法は、大きなリングからの硬X線の測定にも利用できるはずである。