

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 矢橋 牧名

放射光は、高輝度、高指向性をもつ X 線源として広く利用されている。最先端の放射光源として、低エミッタンスの蓄積リングにアンジュレータを挿入した第 3 世代放射光源が用いられており、さらに超高輝度、極短パルスを目指して第 4 世代放射光源が精力的に開発されている。これらの光源から放出される X 線のコヒーレンス特性やパルス特性を評価することは、利用研究及び加速器科学を発展させる上で極めて重要である。しかしながら、X 線領域のコヒーレンス計測は困難であるとこれまで考えられてきた。本論文では、Hanbury-Brown と Twiss によって開発された強度干渉法により X 線のコヒーレンス計測が可能となることを実験的に検証した。

第 1 章では、本論文の背景として X 線光源の現状及びコヒーレンスの利用と診断に関するこれまでの研究の概要が述べられ、続いて本論文の目的と構成が示されている。

第 2 章では、放射光源をカオス的なパルス光とみなした上で強度干渉法の原理が述べられている。特に、X 線領域で定量的な測定を行うためには、高輝度な光源と高分解能の分光器を必要とすることが示されている。

第 3 章では、SPring-8 の 27 m アンジュレータビームラインの概要が述べられている。SPring-8 は、代表的な第 3 世代放射光施設である。SPring-8 の蓄積リングは 30 m 長の長直線部を 4 箇所もつように設計されており、1998 年、最初の長直線部利用として、27 m アンジュレータが設置された。本研究では、はじめにこの光源の性能を十分に引き出すために必要な X 線ビームラインの検討を行った。この結果、本ビームラインは SPring-8 において標準的である 4.5 m アンジュレータ用の X 線ビームラインに準じて設計された。光学ハッチと 4 つの実験ハッチがつくれ、光学ハッチの内部にビームライン光学系、輸送系が設置された。ビームライン光学系としてはシリコン完全結晶を用いた二結晶分光器が用いられ、シリコン結晶は液体窒素で間接冷却された。放射光を用いた評価の結果、設計通りの機能を有することを確認した。さらに、アンジュレータスペクトルを高い精度で測定し、本アンジュレータでは地磁気程度の微弱な磁場も補正する必要があることを明らかにした。

第 4 章では、X 線高分解能分光器の開発について述べられている。強度干渉実験に応用するため、4 回の非対称反射を用いた分光器を検討し、従来の手法と比べて 1 桁以上の高い分解能が原理的に可能なことを明らかにした。実際に、Si 1153 反射を 4 回用いた分光器を製作し、それぞれの結晶を平板結晶とすることで、高品位の表面処理を可能とした。また、垂直方向の空間コヒーレンスを保存するため、散乱面が水平面になるように結晶が配置された。この結果、格子歪みに起因する時間コヒーレンスの不均一性も低減させた。27 m アンジュレータビームラインにおける性能評価実験の結果、14.4 keV の光子エネルギーにおいてバンド幅 120 μeV を確認し、X 線結晶分光器として世界最小値を達成した。

第 5 章では、強度干渉法による空間コヒーレンス計測について述べられている。高分解能分

光器の下流に精密スリットを置き、さらにその下流に半透過型の Avalanche Photo Diode (APD) を 2 つ直列に配置した。精密スリットの垂直方向サイズの関数として APD 間のコインシデンスレート測定した。このプロファイルに対して、ガウス型の空間コヒーレンス分布を仮定したフィッティングが行われ、垂直方向のコヒーレンス長は 66.3 ± 2.0 ミクロン (光源からの距離 66.7 m) 及び 77.5 ± 2.0 ミクロン (同 78.2 m) と求められた。この結果はコヒーレンス長が光源からの距離に比例するという Van Cittert-Zernike の定理によく合致し、さらに垂直方向の光源サイズが 13.8 ± 0.4 ミクロン と求められた。この値は、偏向部からの放射に対して可視の振幅干渉計で測定した結果と比較され、わずかにそれより小さいことが確認された。理由として、強度干渉法は瞬時のサイズ、振幅干渉法は長時間平均のサイズをみていることが考えられる。また、位相物体を挿入したとき、コヒーレンスプロファイルが大きく変化することを確認した。

第 6 章では、強度干渉法によるパルス計測について述べられている。高分解能分光器のバンド幅の関数としてコインシデンスレート測定することで、X 線パルス幅を決定した。バンド幅を変えるために、入射エネルギーをわずかにシフトさせることで非対称度を変化させた。それぞれの条件でスリットサイズを狭めることで空間モードの効果を取り除き、時間モード数をバンド幅の関数として表した。この結果、パルス幅は 32.7 ± 1.6 ps と求められた。この値は X 線ストリークカメラによる測定値とよく一致することが確認された。続いて、第 4 世代の極短パルス放射光の診断に強度干渉法を応用することを検討した。このときの約 100 fs 幅のパルス光に対して最適化されたバンド幅は約 50 meV であり、本研究で開発したものよりはるかに簡単な分光器が適用可能である。よって、ミクロンオーダーの X 線光源サイズ、fs 領域の X 線パルス幅、さらには SASE-FEL が線形領域から飽和領域に達したときの光子統計の遷移が観測可能であると考えられる。

第 7 章では、X 線干渉計に対する強度相関法の応用について述べられている。1 次及び 2 次のコヒーレンスの寄与を含めて、X 線干渉計の出力とコインシデンスレートの対応を導いた。特に、X 線のバンド幅が十分広い条件のもとでは、コインシデンスレートは干渉縞の可視度 (Visibility) の関数として表されることを示した。テストのために、一体型の LLL 干渉計を設計、製作した。安定な光学系に対して人為的に光路差を与えることで、位相平均操作を行った。長時間平均したコインシデンスレートと可視度 (Visibility) の対応が理論と一致することを確認した。

第 8 章では、本研究の結論が述べられている。

以上のように、本研究では X 線のコヒーレンス特性を強度干渉法によって計測できることを実験的にはじめて明らかにした。また、干渉計において光路長が不安定な場合は干渉の観測が不可能であると従来考えられていたが、本研究によりそのような系でも干渉計測が可能なが示された。これらによって X 線光学に新展開がもたらされることが期待される。さらに、本研究において開発された高分解能分光器は、精密 X 線分光学への広範な応用が期待される。よって本論文は博士 (工学) の学位請求論文として合格と認められる。