

氏 名 高 山 泰 弘

学位（専攻分野） 博士(理学)

学 位 記 番 号 総研大甲第311号

学位授与の日付 平成10年3月24日

学位授与の要件 数物科学研究科 放射光科学専攻

学位規則第4条第1項該当

学 位 論 文 題 目 Comprehensive determination of the coherence
of synchrotron radiation in soft X-ray region

論 文 審 査 委 員 主 査 教 授 鎌 田 進
教 授 安 藤 正 海
教 授 那 須 奎 一 郎
教 授 松 下 正
助 教 授 山 本 樹
教 授 宮 原 恒 昱 (東京都立大学)

1. Introduction

The coherence is one of the most important property for the optics. We need to treat a photon as a wave when we study the monochromator, the interferometer and so on, which are related to the coherence. The aim of our experiment is to measure the first order spatial coherence of the synchrotron radiation by the Young's interferometer and estimate the emittance of the light beam. The photon energy that we have used is in the soft X-ray region, from about 100 eV to 180 eV. The intensity interferometer to measure the second order coherence has also been constructed. The first order spatial coherence reflects the geometrical property of the light source. On the other hand the second order coherence gives the information of the photon statistic. Therefore it is possible to know whether the synchrotron radiation is the coherent light like a laser or the chaotic light like a thermal radiation.

2. Construction of the interferometers

We constructed a new system of the Young's interferometer. The light from the beamline enters the double slit. Each slit has $5\mu\text{m}$ of width and $100\mu\text{m}$ of height. We can put three of the five slits, whose separation length D are 30, 50, 100, 150 and $200\mu\text{m}$, into the vacuum chamber and exchange these slits without breaking the vacuum. These double slits are also used as an entrance slit of the monochromator. After going through the double slit, the light is reflected by the spherical grating and enters the exit slit which has also $5\mu\text{m}$ of width and $100\mu\text{m}$ of height. Just behind the exit slit a photomultiplier detector is located. The exit slit and the photomultiplier can be scanned horizontally. The maximum scan range is 8 mm. By changing the incident and exit angle for the grating and the entrance length, the wavelength is selected. This interferometer can be rotated around the optical axis preserving high vacuum with the differentially pumped rotary feedthrough (DRPF). We can easily measure the spatial coherence for an arbitrary orientation by this mechanism.

The intensity interferometer which is under construction has a similar outlook to the Young's interferometer. This also contains the monochromator and has the DRPF system. To measure the intensity correlation, the beam splitter and two MCP detectors are installed. The Fraunhofer slit is located at the upper stream in order to change the spatial coherence. Since the electron beam forms the bunch structure, the synchrotron radiation is observed as the pulses, causing the large trivial correlation which interferes the measurement of the real correlation. To get rid of this effect we have designed the special high frequency circuits.

3. Visibility and emittance

It is known that the emittance of the vertical direction of the electron beam in the storage is much smaller than that of the horizontal direction. Their ratio is about only 2 % in the PF ring. If the electron beam emittance of the vertical direction is as same as the diffraction limit of the light and that of horizontal direction is much larger than the diffraction limit, we can regard the light of the vertical direction is nearly spatially coherent and that of the horizontal direction is nearly spatially incoherent. We can investigate the degree of coherence by measuring the visibility (\simeq first order spatial coherence) of the interference pattern. In the linear and the Gaussian approximation, the relationship between the visibility V and the slit separation D is written as

$$V = \exp \left[- \frac{(\epsilon^2 - \epsilon_p^2)}{8 \bar{\Sigma}^2 \epsilon_p^2} D^2 \right], \quad (1)$$

where ϵ is the total photon emittance and ($\epsilon_p = \frac{\lambda}{4\pi}$) is the emittance of the diffraction limited light. $\bar{\Sigma}$ is the beam size on the double slit. By using Eq. (1) we can calculate the emittance of the light which is the convolution of the electron beam and the diffraction limited light. The discrepancy between the Gaussian approximation and the exact calculation of the coherence is also estimated numerically. We concluded that the Gaussian approximation is valid at the beam line where the electron beam divergence is much smaller than of a single photon.

4. Results and discussion

We have measured the interference patterns at BL-28A (a helical undulator) and BL-12A (a bending magnet) at the Photon Factory, KEK. The great differences of the visibilities for the vertical and the horizontal direction are observed which come from the electron beam property. We also verified that the visibility is lower as the photon energy becomes higher, because ϵ_p for the higher energy photon is smaller. We have also measured the interference pattern for the direct beam from the undulator and estimate the temporal coherence, which is consistent with the theory. To measure the beam size we have constructed a new beam size monitor (one dimensional wire scan monitor). It can be attached to the Young's interferometer and both the beam size and the visibility can be measured by the apparatus. The estimated emittance at BL-28A is consistent for the vertical direction and is large for the horizontal direction because the bending magnet radiation enlarges the beam size in this direction. The measurement of the second order coherence will be performed in 1997 and 1998 at the Photon Factory. It is supposed that the synchrotron radiation from the PF ring is chaotic but

never verified. This will be clear with our new intensity interferometer. In future the experiment at ATF ring is also planned. ATF ring is an extremely low emittance ring and the coherent light might be observed.

(論文審査結果)

高山泰弘君が学位請求論文で取り扱った研究は、軟X線領域に於けるシンクロトロン放射光の干渉性について、理論および実験とその解析を統合した仕事である。言うまでもなく光干渉性の意義は従前より認識されており、シンクロトロン放射光以前の古典的光源については、理論、実験の両面から研究されてきた。しかし一方、近年急速に発展した分野であるシンクロトロン放射光源については、特有の光源特性を充分取り入れた統合的光干渉性理論の展開が不十分であった。また実験面でも、軟X線のような短波長域では、実験技術上の制約のため充分定量的な光干渉度観測実験は遂行されていなかった。高山君の仕事は、光の持つ重要な性質である干渉性について、シンクロトロン放射光の光源特性を考慮した統合的理論を構築し、軟X線領域において観測実験を遂行し、その観測結果を自身の開発した理論に基づいて解析したものである。

静止した発光点が面状に広がった従来型光源では、Youngの干渉実験等により光の空間干渉度測定実験が行われてきた。ここで得られる干渉縞のVisibilityからvanCittert-Zernikeの定理を通じて光源のサイズを見積もることができる。一方シンクロトロン放射光の場合は、電子ビーム内の個々の電子は位置及び角度の少しずつ異なる軌道上を超相対論的に運動することで光を放射する。この光源特性のためvanCittert-Zernikeの定理を直接適用することが出来ない。高山君は、輝度関数(量子力学に現れるWigner関数と同等である。)を適用してシンクロトロン放射光を光源とする光ビームに対しvanCittert-Zernikeの定理を拡張する事に成功した。そして観測Visibilityから電子ビームエミッタンスを計算する解析的表式を、Gaussビーム近似が有効な放射光ビームについて、導いた。さらに、ヘリカルアンジュレータおよび偏向磁石から発生する放射光の空間干渉度を、厳密な表式に基づいた数値計算、遠距離場近似を適用した数値計算、Gaussビーム近似を適用した解析的計算の3者で比較し、それぞれの近似の有効条件を明らかにした。

さらに高山君は、軟X線領域に於けるYoungの空間干渉度測定装置を製作し、高エネルギー加速器研究機構のPFリングにおいて、偏向磁石およびヘリカルアンジュレータで生成されるシンクロトロン放射光の空間干渉度測定実験を遂行した。ここで得られた干渉縞のVisibilityから、同君が導いた解析的表式に基づいて電子ビームのエミッタンスを推定し、一定の合理的結論を導いている。

以上は光の1次コヒーレンスに関する仕事であるが、高山君はシンクロトロン放射光の2次コヒーレンスをも測定すべく、シンクロトロン放射光源の光源特性について理論的考察を加え、光子の強度相関を測定するために必要な測定回路を発案し製作している。この装置を使った系統的観測実験は未だ遂行されていないが、将来的には自由電子レーザー光を評価するシステムなどに応用の期待される重要な研究である。

審査委員会は、高山泰弘君が干渉性という基本的で重要な光の物理的性質を、進展著しいシンクロトロン放射光の分野で、総合的に研究し今後の放射光コヒーレンス研究の発展にとって必須な基礎を築いたと認め、これら一連の仕事を高く評価した。そして、この研究が数物科学研究科放射光科学専攻の博士論文としての内容に値し、更に、優秀な研究業績を挙げていると判断した。