

氏 名 邨 仁 忠

学位（専攻分野） 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第371号

学位授与の日付 平成11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 A new method to measure true two-photon
correlation of soft X-ray synchrotron
radiation

論文審査委員 主 査 助 教 授 那 須 奎 一 郎
教 授 松 下 正
教 授 安 藤 正 海
教 授 前 澤 秀 樹
教 授 柳 下 明
教 授 宮 原 恒 晃 (東京都立大学)

論文内容の要旨

Two-photon correlation measurement provides a promising way to experimentally demonstrate the statistical nature of a light source, which is very significant for the deep understanding of the photon-generating process and the diagnosing of the coherence property. Quantitatively two-photon correlation is described by second-order coherence. Usually the behavior of the second-order coherence against any of the parameters defining the phase volume is different for different photon statistics. The Poisson photon statistics for coherent light gives its second-order coherence as a flat response; The Bose-Einstein photon statistics for chaotic light gives its second-order coherence as a bunching effect; While the Sub-Poisson photon statistics for non-classical light gives its second-order coherence as an anti-bunching effect. Therefore the measurement of two-photon correlation is proved to be a good finger print to check whether light is in coherent state or incoherent state such as thermal state or non-classical state.

Historically the measurement of two-photon correlation was first performed by Hanbury-Brown and Twiss (HBT) in 1956. They used a linear mixer to realize the correlation of the two currents from the photoelectric detectors illuminated by a stationary thermal light source, a mercury arc, and the photo-bunching effect was first successfully observed in the visible region of 435.8 nm.

HBT method is no doubt a good way to extract the small excess two-photon correlation for a stationary light because the background, that is the DC components, has been cut off automatically by the broad band amplifiers, which is in fact the key of the success of HBT experiment. However there exists a general problem, to which no attention has ever been paid, in measuring the two-photon correlation of non-stationary light such as synchrotron radiation (SR) by the HBT method. Here the "non-stationary" means a sense of classical mechanics that the observed intensity has some deterministic time structure. The systematic time structure of SR decided by the bunch distribution of the electric in a storage ring will give rise to a large amount of unexpected accidental correlation, which in fact has nothing to do with the inherent photon statistics of light source and usually 1000 ~ 10000 times larger than the true two-photon correlation due to the short bunch separation length ($2ns$) and the short coherence time ($\sim 0.1ps$) which is not comparable to the resolution ($1ns$) of the measuring system. The existence of the accidental correlation would severely prevent us from observing the bunching effect of the true two-photon correlation.

Therefore to suppress the much larger accidental correlation and to extract the small true two-photon correlation, a novel intensity interferometer has been developed for soft X-ray synchrotron radiation. This intensity interferometer consists of an optical vacuum chamber and an electric correlator. All the essential optical elements which includes a wire scanner, a precise diffraction slit, a grating monochromator with a coherence time modulator, a beam divider and two fast-response photon detectors (microchannel plates) are mounted in this high vacuum chamber. The electric correlator completes the multiplication of the two broad band electric currents coming from the photoelectric detectors. The basic idea to suppress the much larger accidental correlation is to modulate the coherence time by modulating the entrance slit width of the monochromator by a piezoelectric translator. The two sets of light intensity are simultaneously modulated too. When the frequency of

modulation is f , the third harmonics $3f$ is detected with a lock-in amplifier because the $3f$ components include only the true two-photon correlation. Practically it is difficult to modulate with frequency f without any higher order harmonics distortion which might add some false $3f$ components. To overcome this difficulty we have used a sharp bandpass filter of $100 \sim 350\text{MHz}$ in each branch of the correlator, which is lower than the RF frequency 500MHz and much higher than 1.6MHz , the revolution frequency of the stored beam of the 2.5GeV storage ring.

This new apparatus has been operated successfully in the measurement of the horizontal two-photon correlation for the first harmonic of undulator radiation with photon energy of 70eV at the Photon Factory, KEK. By narrowing the precise slit width which corresponding changes the spatial coherence of the incident SR, a bunching effect of the normalized excess two-photon correlation has been clearly observed. This explicit bunching effect implies that synchrotron radiation is chaotic radiation.

Further investigation shows that although second-order coherence is completely determined by the first-order coherence for case of chaotic light, the measured information from the light source is essentially different. The two-photon correlation of synchrotron radiation does not depend on the response time of the detectors but gives the information of instantaneous emittance of the stored beam with the time scale of coherence time τ_c . By fitting the experimental data, the horizontal instantaneous emittance of the stored beam is estimated to be 40nmrad .

This intensity interferometer can be utilized to characterize the coherence properties of incomplete FELs, such as SASE, because if they are fully coherent light sources the normalized excess two-photon correlation would have a flat response, but not showing a photon-bunching effect.

論文の審査結果の要旨

Tai 君の博士論文は、軟 X 線領域放射光の、2 光子相関に関する実験的研究を主な内容とする。

自然放出による光源の 2 光子相関は、1957 年に初めて Hanbury-Brown & Twiss (HBT) によって行われて以来、光源の統計的性質を明らかにする重要な実験的手段になってきた。しかるに、放射光に対する 2 光子相関の実験は、世界的に見ても、菊田等による軟 X 線領域での研究例があるのみである。最近、Gluskin 等は、菊田等と同様な手法を用いて、やや統計精度をあげた実験を行っている。

放射光の 2 光子相関を測定する上での最大の困難は、その特有のバンチ構造によって 4 桁も大きい擬の相関ができてしまい、真の相関が覆い隠されてしまう事である。従って、菊田等は、単バンチ・モードを利用し、同一バンチの相関から 1 周遅れたバンチとの相関を、データ処理で差し引くという方法を採用した。

これに対し、Tai 君は、マルチ・バンチにも適用できる手法を、全く新しく考案した。それは、回折格子分光器の入射スリット幅を、周波数 f で変調する事により、光子のコヒーレント長を変調すると云う斬新な方法である。この変調により、2 つの入射光強度のみならず、2 次のコヒーレンスも変調されるので、全体として、3 倍波、即ち $3f$ 成分をロック・イン・アンプで抽出すれば、真の相関のみを取り出せる。

Tai 君は、この原理に基づき、実際に装置を設計・製作し、軟 X 線光子 (70eV) を用いて、2 光子相関を測定し、その結果、明瞭な光子の集群効果を観測する事に成功した。測定は、極めて難しいものであったが、2 つの異なる条件下での測定を比較し、データの信頼性を一層向上させている。

本来、熱平衡ではあり得ない放射光源が、意外にも、この集群効果を示す理由は、同君によれば以下のようなものである。放射光は熱平衡光源ではないが、バンチ中の電子集団内での電子間距離が、アンサンブルとしては全く無秩序に揺らいでいる。従って、光子統計はカオス的になる。これは、嘗て、Glauber が「古典的電流からの放射光はコヒーレントである」と主張した事に対して、電子加速器内の電流の特殊性を初めて明らかにした重要な結論である。

更に、Tai 君は、この実験法によって見積もられるエミッタンスは、長時間平均したものではなく、観測する光子のコヒーレント時間である 0.1psec 程度の、殆ど瞬間的なエミッタンスを観測している事になり、加速器内ビームの診断にも応用できる事を提案するとともに、PF リングについても合理的な測定結果を与えた。

以上、全く新しい 2 光子相関法を提案し、それにより装置を建設し、実際に測定を行ない、応用まで示したという点で、量子光学、放射光加速器科学の両面の観点から、極めて高い水準の研究であると判断され、博士論文として十分な内容を有するものと判断される。