

## UVSOR-III における単一電子蓄積実験の現状

### STATUS OF SINGLE ELECTRON STORAGE EXPERIMENT AT UVSOR-III

浅井佑哉<sup>#, A, D)</sup>, 島田美帆<sup>B, C)</sup>, 宮内洋司<sup>B, C)</sup>, 金安達夫<sup>D)</sup>, 加藤政博<sup>A, C, D)</sup>

Yuya Asai<sup>#, A, D)</sup>, Miho Shimada<sup>B, C)</sup>, Hiroshi Miyauchi<sup>B, C)</sup>, Tatsuo Kaneyasu<sup>D)</sup>, Masahiro Katoh<sup>A, C, D)</sup>

<sup>A)</sup> Grad. Sch. Ad. Sci. Eng. Hiroshima Univ., <sup>B)</sup> KEK, <sup>C)</sup> HiSOR, <sup>D)</sup> UVSOR

#### Abstract

We are exploring the possibility of applying the quantum and coherent properties of synchrotron radiation. As part of this project, we are working on experiments to experimentally investigate the characteristics of synchrotron radiation at the single-photon level by accumulating a single electron in a synchrotron radiation ring and observing its radiation. Experiments are conducted at the UVSOR-III storage ring. As a result of the efforts since FY2021, we were able to establish a single electron storage technology. In FY2023, we succeeded in observing the spectral characteristics of undulator light in the ultraviolet region emitted by a single electron at the BL1U beamline for light source development of UVSOR. Furthermore, it has been experimentally clarified that, while very rare in probability, two photons can be emitted simultaneously when passing through the undulator once, by measuring the photon statistics from a single electron. In FY2025, we are designing a new optical system aimed at improving measurement efficiency. At the annual meeting, the latest status will be reported.

#### 1. 背景

我々は、放射光の量子性・可干渉性の応用の可能性を探っている。その一環で単一光子レベルでの放射光の特性を実験的に調べることを目的として、放射光源リングに単一電子を蓄積[1, 2]し、その放射を観測する実験に取り組んでいる。実験は、分子科学研究所の放射光源加速器 UVSOR-III において行っている。2021 年度からの取り組みの結果、単一電子蓄積技術は確立できた[3]。2023 年度からは UVSOR-III の光源開発用ビームライン BL1U[4]において、単一電子が放射する紫外線領域でのアンジュレータ光のスペクトル特性を観測することにも成功した[5]。また、単一電子からの光子統計を測定し、確率的には非常に稀ではあるが、アンジュレータを一度通過する際に光子が 2 つ同時に放出されることを実験的に明らかにした[6]。2025 年度は測定効率の向上を目指し、新たな光学系を設計している。

#### 2. 目的

2023 年度の本会でも報告したが、単一電子蓄積状態におけるアンジュレータ放射はポアソン分布に従い、単一電子がアンジュレータを一度通過する際に放射される光子数は微細構造定数程度である。すなわち、電子が光子を放出したとしても、ほとんどの場合、光子は高々一つしか放出されない[7]。しかしポアソン分布であるならば、まれにはあるが、二つ以上の光子を同時に放出する可能性があるはずである。昨年度の本会では、この二光子同時放射を実験的に観測することに成功した[6]ことを報告したが、実験値とアンジュレータ放射がポアソン分布に従うと仮定したときの計算値が誤差範囲からやや外れているという課題が残った。この原因として、計数機器として使用したオシロスコープのトリガーレベルの設定による数え落としや、計数回路の処理によるデッドタイムの影

響が考えられた。これらの課題を解決し、正確な測定を行うために、同時計数回路を用いた測定、マルチ・イベントタイム・デジタイザを用いた測定、の二通りの検出方法を新たに試みた。また、光ファイバーを利用した新しい光学系を構築し、バックグラウンドの低減、光学系配置の自由度の向上、光子の検出効率の向上を目指した。

#### 3. 実験の原理・手法

実験は分子科学研究所の放射光源加速器 UVSOR-III ビームライン BL1U にて行った。背景光の影響を減らすため、紫外線領域(水平偏光 355 nm)のアンジュレータ光を、サファイア窓を通して大気中に取り出し、直角プリズムミラーを用いて 2 つの光路を作り、コリメーターをそれぞれの光路上に配置することで光学系を組んだ (Fig. 1)。

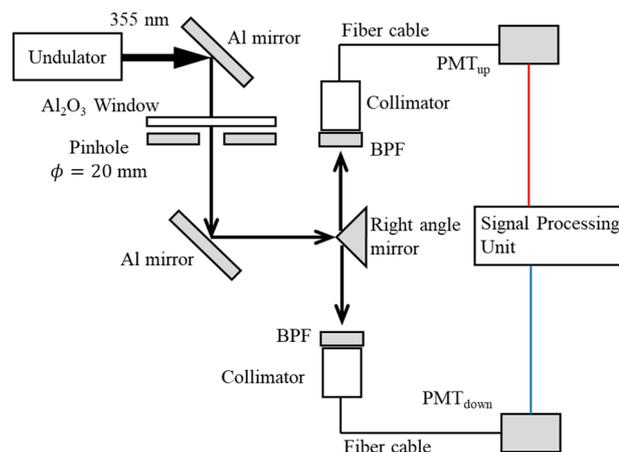


Figure 1: Schematic diagram of the experiment at UVSOR-III BL1U.

<sup>#</sup> asaiyuya0705@hiroshima-u.ac.jp

## 4. 実験結果

### 4.1 同時計数回路を用いた二光子同時放射観測実験

直角プリズムミラーによって上下に分けられたアンジュレータ光をそれぞれ光電子増倍管で検出し、その信号を同時計数回路 (PHILLIPS SCIENTIFIC Quad 300 MHz Majority Logic MODEL 754: Fig. 2 では C.C. と表記) とカウンティングユニット (Fig. 2 では CU と表記) を用いて同時性を調べたところ、二光子同時放射は毎秒 1.26 回計測された。この時、アンジュレータ放射がポアソン分布に従うと仮定した場合、直角ミラーによって分けられたアンジュレータ光の光子統計の結果を用いて二光子同時放射の検出レートを計算すると、毎秒  $1.26 \pm 0.035$  回となり、観測値とよく一致する結果を得た。

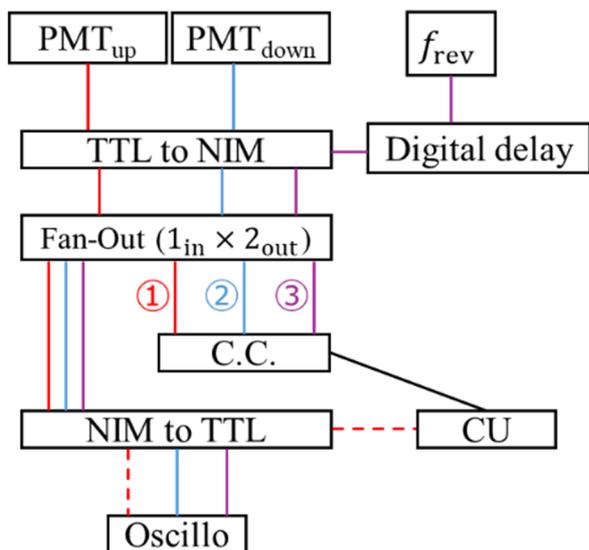


Figure 2: Schematic diagram of the signal processing unit using C.C.

### 4.2 マルチタイムデジタイザを用いた二光子同時放射観測実験

直角ミラーで上方向に分けられたアンジュレータ光を検出する光電子増倍管 (Fig. 1 における PMT<sub>up</sub>) の信号を START パルス、PMT<sub>down</sub> の信号とレボリューション信号をそれぞれ STOP 信号としてマルチタイムデジタイザ (FAST ComTec MCS8A: Fig. 3 では TDC と表記) に入力し、光子の同時性を調べた。本研究で使用した TDC は STOP 信号は 8 ch 使用でき、START 信号と STOP 信号の時間差を 80 ps の分解能で検出できる。測定時間 1450 秒で START 信号が  $5.00 \times 10^6$  回検出される間に PMT<sub>down</sub> の信号が STOP 信号として  $1.78 \times 10^3$  回検出された。この値から二光子同時放射は毎秒  $1.23 \pm 0.036$  回検出されると考えられる。この値は同時計数回路を用いた測定結果とも誤差の範囲内で一致していることがわかる。

## 5. まとめ

二つの異なる方法で行った結果が、単一電子による

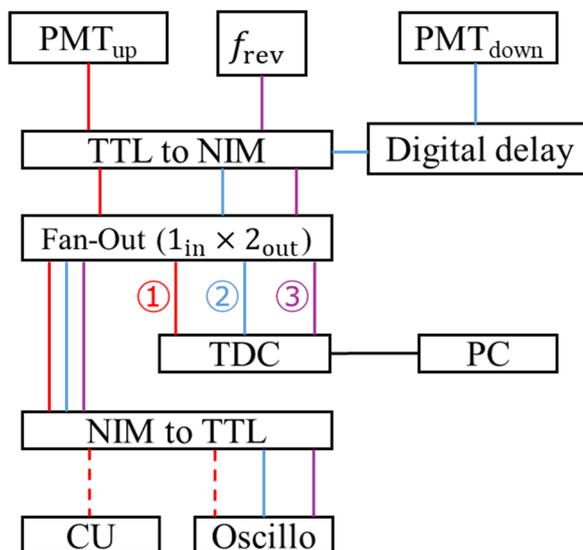


Figure 3: Schematic diagram of the signal processing unit using TDC.

アンジュレータ放射がポアソン分布に従うとした計算結果と誤差に矛盾しない範囲で一致した。このことから二光子同時放射はポアソン分布で説明できることを実証できた。今後は微弱光計測に耐えうる干渉計を構築し、この光子対の量子性を調べる。また、放射光を利用した量子論的にもつれた光子対の生成にも挑戦する予定である。

## 謝辞

本研究の実験は分子科学研究所 UVSOR BL1U における分子研課題 25IMS6608 及び 24IMS6809 として実施されたものである。また、公益財団法人光科学技術研究振興財団からの奨学金により本研究を実施できた。実験に際して UVSOR 職員の皆様には多大なるご協力をいただいた。この場をお借りして御礼申し上げる。

## 参考文献

- [1] A. Romanov *et al.*, “Experimental 3-dimensional tracking of the dynamics of a single electron in the Fermilab Integrable Optics Test Accelerator (IOTA)”, JINST 16, 2021, pp. 12009.
- [2] R. Klein *et al.*, “From single photons to milliwatt radiant power-electron storage rings as radiation sources with a high dynamic range”, Metrologia 47, 2010, pp. 33-40.
- [3] R. Shinomiya *et al.*, UVSOR Activity Report 2021, 2022, pp. 49.
- [4] M. Katoh *et al.*, “Light Source Developments at UVSOR BL1U”, J. Phys. Conf. Ser 2687, 2024, pp 032005.
- [5] Y. Asai *et al.*, UVSOR Activity Report 2022, 2023, pp. 42.
- [6] Y. Asai *et al.*, “Status of single electron storage experiment at UVSOR-III”, Proc. PASJ2024, Yamagata, Japan, Aug. 2024, pp. 915-916.
- [7] K. J. Kim, “Characteristics of synchrotron radiation”, in Physics of particle accelerators, 1989, pp. 565-632.