

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

浅井侑哉^{#, A)}, 島田美帆^{B, C)}, 宮内洋司^{B, C)}, 加藤政博^{C, D)}

Yuya Asai^{#, A)}, Miho Shimada^{B, C)}, Hiroshi Miyauchi^{B, C)}, Masahiro Katoh^{C, D)}

^{A)} Hiroshima Univ. ADSE, ^{B)} KEK, ^{C)} HiSOR, ^{D)} UVSOR

Abstract

We are exploring the possibility of applying the quantum and coherent properties of synchrotron radiation. As a part of this project, we are working on experiments to 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 UVSOR of the Institute for Molecular Science. As a result of the efforts since FY2021, we have established 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 of UVSOR. In FY2024, we are trying to investigate radiation from a single electron from a photon statistical perspective.

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 UVSOR 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 年度には UVSOR の光源開発用ビームライン BL1U 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[4]。2024 年度は単一電子からの放射を光子統計的な観点から調べようとしている。

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[5]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。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している場合があるはずである。そこで我々は、2 つの光子が同時に放出される事象を実験的に観測することを試みた。また、単一電子蓄積を行うにあたりビーム物理的観点で興味のあるビームスクレーパとビーム寿命の関係性を実験的に検証することを試みた。具体的には以下の 3 つを実験目的とする。

- 1) ビームスクレーパの挿入位置とビーム寿命の関係性を調べる。
- 2) 単一電子時と低電流 ($I_b \sim 0.02$ mA) 時の光子統計に違いはあるか？また、理論計算と一致するか？
- 3) 単一電子から 2 光子が同時に放出される事象は起きているのか？

[#] asaiyuya0705@hiroshima-u.ac.jp

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。実験配置の概要を Fig. 1 に示す。

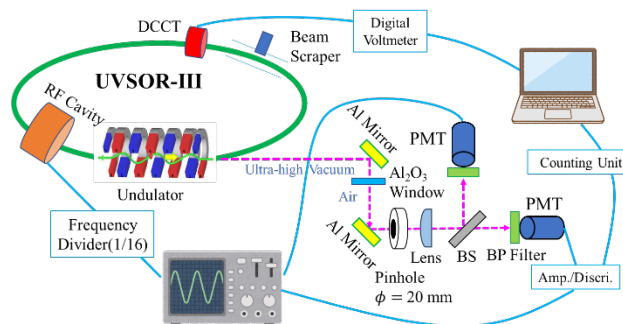


Figure 1: Schematic diagram of the experiment at UVSOR-III.

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、プレート型ビームスプリッターを用いて 2 つの光路を作り、光電子増倍管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)。

4. 実験結果

4.1 ビームスクレーパ挿入位置とビーム寿命の関係性
ビームスクレーパの挿入位置を変えながら放射光強度の変化を観測し、ビーム電流値とビーム寿命の関係式

$$\frac{\Delta I}{I_0} = -\frac{\Delta t}{\tau}$$

に従ってビーム寿命を計算した。この時ビーム電流値は 0.1 mA を下回る極低電流域で実施した。これにより放射光照射による残留ガス圧の変化や Touschek 効果などによる寿命の電流依存性を避けられると考えた。ビームスクレーパの挿入位置が浅い場合、ビーム寿命は緩やかな線形的変化が見られたが、挿入位置がビーム軌道の設

計値に近い場合でのビーム寿命は、0.001 mm 単位で大きく指数関数的変化をすることが分かった。すなわち、ビームスクレーパの挿入位置によってビーム寿命は異なる2つの領域に分かれることがわかった。しかしながらビームタイムの都合上、挿入位置が浅い場合でのデータ数が少なかったこと、さらにスクレーパの位置の再現性にハードウェア的な問題が生じたことから、再度実験し定量的なデータを取得する予定である。

4.2 単一電子時と低電流時の光子統計

単一電子時の放射光強度 (PMT output) は毎秒 3350 カウント程度であった。この強度に合わせるため、 $I_b \sim 0.02$ mA (電子数 2.0×10^7 個) 程度の際に減光フィルターを用いて単一電子レベルの強度: 毎秒 3450 カウント程度にした際の光子統計を計測した。単一電子時の光子統計と比較した結果、ほとんど差が無いことが分かった。また、SPECTRA を用いて PMT が計測する Flux の理論値を計算したところ、光学系の透過率や PMT の量子効率を考慮すると、計測値は毎秒 3400 光子程度と予想され、実験値とほとんど一致した。

4.3 単一電子蓄積におけるアンジュレータ放射の 2 光子同時放出の観測

単一電子におけるアンジュレータ放射をビームスプリッターによって 2 方向に分け、光電子増倍管を用いて光子の同時検出を行ったところ、300 秒間に 29 回の同時放出が計測された。この時、透過光・反射光の光子統計を用いて、1 秒当たりの 2 光子同時放出の回数の理論値

は 0.075、すなわち 300 秒間で 23 回の同時放出が起きると計算でき、実験値と概ね一致した。

5. まとめ

単一電子がアンジュレータを一回通過するときに基本波で放射する光子数は 1 よりも非常に小さい。しかし確率的には小さいが 2 光子を同時に放射する事象があることが確認できた。今後、放射光の光子レベルでの量子性を活用する計測法の開拓へ結びつくような研究開発を進めたい。

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 24IMS6809 及び 23IMS6610 として実施されたものである。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.*, (2021) JINST 16 P1(2009).
- [2] R. Klein *et al.*, (2010), Metrologia 47 R33.
- [3] R. Shinomiya *et al.*, UVSOR Activity Report 2021, UVSOR-49, 40 (2022).
- [4] Y. Asai *et al.*, UVSOR Activity Report 2022, UVSOR-50, 42 (2023).
- [5] K. J. Kim, AIP Conf. Proc. 184 (1989), 567.