

## UVSORにおける単一電子蓄積実験の現状

### PRESENT STATUS OF SINGLE ELECTRON STORAGE AT UVSOR

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

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

<sup>A)</sup> Hiroshima Univ., <sup>B)</sup> KEK, <sup>C)</sup> UVSOR

#### Abstract

We started single electron storage experiments at the UVSOR-III electron storage ring in 2021 aiming to basic researches on electromagnetic radiation from relativistic electrons. We extracted the undulator light in the ultraviolet region at a beamline BL1U of UVSOR-III, as reducing the background light using an appropriate band-pass filter. Then, we reduced the beam intensity using a beam scraper. We succeeded in observing step-function like intensity change with a good signal-to-noise ratio, and succeeded in confirming single-electron accumulation. In 2023, we attempted to observe undulator radiation from a single electron. In this report, we describe the latest status of the experiments shortly as leaving the details in a future paper.

#### 1. はじめに

電子蓄積リングにおける単一電子蓄積の試みは、蓄積リング中での単一電子の運動の観測[1]や単一電子からの放射の標準光源としての利用[2]などを目的としていくつかの実証例がある。我々は、電磁放射に関する基礎研究を目的として、2021年度より UVSOR において単一電子蓄積実験を開始した。放射光ビームライン BL1U において紫外線領域でのアンジュレータ光を取り出し、適切なバンドパスフィルターを用いて背景光を低減し、ビームスクレーパを用いてビーム強度を減少させたところ、少数電子蓄積下での階段関数的な強度変化を良好な SN 比で観測することに成功し、単一電子蓄積を確認することに成功した。現在は、応用研究へ向けて単一電子蓄積状態の観測手法を改良するとともに、単一電子からのアンジュレータ放射の観測を試みている。本報告では実験の最新の状況を報告する。なお、実験結果の詳細は、今後、論文発表を予定していることから、ここでは実験の概略を述べるにとどめる。年会では最新の成果についてポスターで発表する。

#### 2. 実験方法

本研究は、愛知県岡崎市に位置する分子科学研究所極端紫外光研究施設の電子蓄積リング UVSOR-III を用いて行った。UVSOR-III は周長 53 m、電子ビームエネルギー 750 MeV の比較的小型の放射光源である。UVSOR-III は通常 300 mA の電子ビームを蓄積し放射光利用実験を行っている。この状態では  $10^{11}$  個程度の電子が周回している。これに対して、電子を一個だけ蓄積した場合のビーム電流値は約 1 pA である。

UVSOR-III は 750 MeV まで加速された電子ビームが専用の入射器から供給される。入射器はシンクロトロンであり、約1秒に一回の繰り返しでビームを出射できる。通常の運転状態では1回の入射で 0.1 から 0.5 mA 相当のビームが蓄積リングに入射される。これを繰り返すことで 300 mA まで蓄積する。単一電子蓄積実験では、まず、

ビームを一回だけ入射し、0.1 mA 程度の電子ビームを蓄積する。この程度の微弱な電子ビームからの放射光でも、暗室内で環境光を低減すれば、肉眼で容易に光軸を確認でき、検出光学系の位置調整などを行うことができる。

実験のセットアップの模式図を Fig. 1 に示す。0.1 mA 程度の電子ビームを入射し、ビーム寿命が 10 分程度に

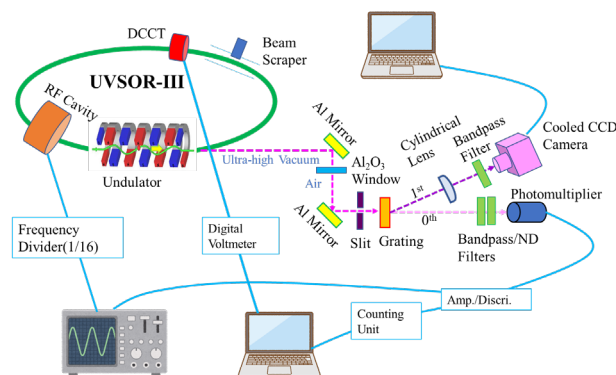


Figure 1: Experimental setup.

なるようにビームスクレーパを遠隔操作して電子の数を減らした。UVSOR では、通常、電子ビームの電流値を DCCT (Bergoz 社 PCT) を用いて計測している。しかし、0.1 mA を大きく下回る微弱な電流域では DCCT でビーム強度を正確に測ることはできない。このため、電子ビームから放射されるシンクロトロン光の強度を観測することで電子ビーム強度を観測する。

UVSOR-III の光源開発用ビームライン BL1U には 2 連の (タンデム) アンジュレータが設置されており、可視から真空紫外線の幅広い波長領域の放射光を発生できる。本実験では、アンジュレータ基本波の波長を水平偏光 355 nm に設定し、この紫外線領域の放射光を真空中に設置されたアルミラーにより 90 度反射し、サファイア窓から大気中 (暗室) に取り出した。その後、さらにミラーによって 90 度反射し幅 4 mm のスリットへ導いた。この光は

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

透過型回折格子 (Edmund Optics 社製) により分光され、0 次光を光電子増倍管 (PMT; 浜松ホトニクス社 H10721-01) へ、1 次光を冷却機構付き CCD カメラ (BITRAN 社製 BS-40L/C) へ入射した。0 次光は電子ビーム強度を計測するのに用い、1 次回折光は、本報告では詳細を割愛するが、単一電子からのアンジュレータ放射の基礎的な性質を観察するのに用いた。背景光の影響を減らすため CCD カメラ、PMT のどちらにもアンジュレータの中心波長に帯域の中心が一致するバンドパスフィルターを挟み、PMT にはさらに ND フィルターを取り付けた。微弱光の計測であり、SN 比の確保のため、バンドパスフィルターのバンド幅は数 10 nm 程度と広いものを使用した。これによりアンジュレータ放射の基本波成分を概ね全て取り込める。PMT からの信号はプリアンプ兼ディスクリミネータ (ORTEC 社 9327 1 GHz Amplifier and Timing Discriminator) に入力され、ディスクリミネータ出力はカウンティングユニット (浜松ホトニクス社 C8855-01) へ送られ、毎秒の信号計数を PC 上でリアルタイム表示し、これにより全放射光強度を観測することで電子数の変化を調べた。プリアンプ出力はデジタルオシロスコープ (キーサイト社 Infinium-S DSOS054A) へも送られた。同オシロスコープには RF 周波数信号を分周した周回周波数信号 (5.6MHz) を取り込み、この二つの信号をもとに RF バケット毎の PMT 計数出力を計測した。オシロスコープの信号処理機能を利用して、周回周波数信号に対する PMT からの出力信号の遅延時間差を計測し、遅延時間に対するパルス数を度数分布表示することで、光子が 16 個の RF バケットのどれからどの程度の数だけ放射されたかを分別して表示することができる。

### 3. 実験結果の概要

本報告では実験結果の概要について短く述べる。詳細は今後、論文発表する予定である。

実験方法で述べたように、0.1 mA 程度のビームを蓄積後、ビームスクレーパを挿入しビーム寿命を 10 分程度まで短縮し、アンジュレータ放射光強度を観測した。PMT の係数率が信号処理回路の能力の範囲に収まるように ND フィルターで調節し、最終的には全ての ND フィルターを抜いて計測を継続したところ、放射光強度が階段関数的に不連続に変化する様子を観測することに成功した (Fig. 2)。この不連続な放射光強度変化は電子一つが失われたことに相当する。また、同時に計測した RF バケットごとの放射光強度の変化からも電子がひとつずつ失われていく様子を観測することができた (Fig. 3)。これら 2 つの観測結果から最終的に電子が一個となった状態を確認した後、直ちにスクレーパを引き抜いた。その結果、単一電子状態を 2 時間以上持続できることを確認した。最終的に残った 1 個の電子は残留ガスとの衝突散乱もしくは量子寿命により失われるはずであるが、どの程度の寿命となるか、その測定は今後の興味深い課題の一つである。

UVSOR-III は低エネルギー低エミッタンスリングであり、通常の 300 mA 程度の蓄積状態では、周回する電子同士の衝突散乱である Touschek 散乱により寿命が制限されている。運転状態にもよるが、これはおよそ数時間前

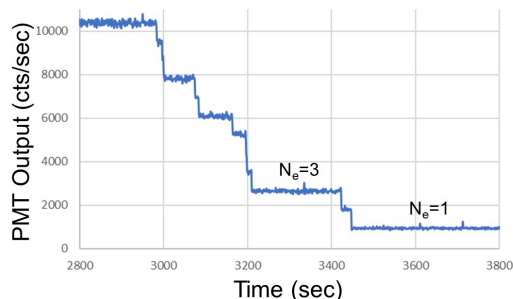


Figure 2: Change of undulator radiation intensity.

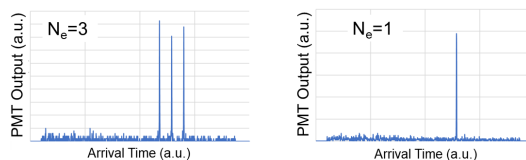


Figure 3: Undulator radiation intensity from each RF bucket.

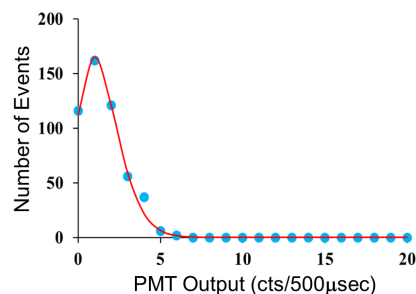


Figure 4: Photon statistics measurement.

後である。単一電子状態ではこれよりも寿命は長いはずである。実際、これまで複数回行った単一電子蓄積でも単一電子状態実現後 2-3 時間以内に電子が失われたという事例はない。以上のようにして、UVSOR-III での単一電子蓄積技術の基本を確立することができた。

本研究の最終的な目的は、単一電子からの放射の基礎研究である。本稿ではその一部のみを紹介する。一例ではあるが、光電子増倍管で計測した単位時間当たりの光子数の度数分布を Fig. 4 に示す。アンジュレータ放射は高エネルギー電子からの自発放射であるが、このことから予想される通り、度数分布はポアソン分布とよく一致することが確認できた。なお、ここで強調しておきたいのは、500 マイクロ秒程度の中に一個の電子が放出する光子数の計測数はわずかに数個であるという事実である。電子がリングを 1 周する時間は 200 ナノ秒以下であり、500 マイクロ秒の間に電子は数千回アンジュレータを通過している。光学系の透過率や PMT の量子寿命を考慮しても、一個の電子がアンジュレータを一回通過する際

に放出される基本波長での光子数は 1 よりも大幅に小さいということがわかる。これは単一電子蓄積下でアンジュレータから光子が放射される場合、複数の光子が同時に放射される確率は極めて小さく、ほぼ単一光子として放射されることを意味する。すなわち、UVSOR-III での単一電子蓄積は単一光子実験を可能とする。

#### 4. まとめと今後の展望

UVSOR-III において単一電子蓄積の技術を確認することができた。また、詳細は本稿では延べないが、単一電子からのアンジュレータ放射について、すでに、興味深い結果を得ており、データの品質向上を目指して実験を継続している。一部のデータについては年会においてポスターで発表を行う。

単一電子蓄積に関しては、基本技術は確立できたが、現在使用中の光電子増倍管や計数回路のダイナミックレンジの問題で、電子数低減途中での ND フィルターによる複数回の光量調整が不可欠であることなどから、0.1 mA から 1 pA への低減に時間と手間がかかっている。これに対してはダイナミックレンジの極めて広い光電子増倍管を新規購入しており、その試験運転を行っているところである。また、スクレーパの自動調整などの技術も今後開発を進めたいと考えている。それらにより、本研究の目的である単一電子からの電磁放射の研究を加速できると期待される。

#### 謝辞

本研究の実験は自然科学研究機構分子科学研究所の共同利用(21-810、22IMS6608、23IMS6610)として実施された。研究の遂行においては分子科学研究所 UVSOR の岡野、太田両技術職員、名古屋大学の真野篤志技術職員に多大なる援助をいただいた。この場を借りて感謝申し上げる。

#### 参考文献

- [1] A.N. Aleshaev *et al.*, NIM A 359 (1995), 80.
- [2] R. Klein *et al.*, PRSTAB 11, 110701 (2008).