

原子核実験におけるアンジュレータ放射光干渉法による電子ビームエネルギー測定 UNDULATOR RADIATION INTERFEROMETRY FOR ELECTRON BEAM ENERGY MEASUREMENT IN NUCLEAR PHYSICS

西幸太郎 ^{*,A)}, 中村哲 ^{A)}, 永尾翔 ^{A)}, P. Klag ^{B)}

Kotaro Nishi ^{*,A)}, Satoshi N. Nakamura ^{A)}, Sho Nagao ^{A)}, Pascal Klag ^{B)}

^{A)} the University of Tokyo

^{B)} Johannes Gutenberg-Universität Mainz

Abstract

Our international collaboration conducts light hypernuclei spectroscopy at the Mainz Microtron (MAMI), 1.5 GeV electron beam facility. We have developed the decay pion spectroscopy and have achieved about 10 keV mass resolution, but large systematic error from spectrometer calibration limited the overall error to 100 keV order. This is mainly due to the inaccurate energy measurement of the 200 MeV range electron beam. To solve large systematic error problem, we have developed a new energy measurement technique, the Undulator Radiation Interferometry. From the two undulators aligned along the beamline, coherent radiation light is emitted when the electron passes through them successively. The phase shift depends on the electron energy, which can be extracted from the interference observation of two wave packets. In March 2024, we conducted our first calibration experiment with Undulator Radiation Interferometry. We performed measurements for three beam energy: 180, 195, 210 MeV and achieved less than 20 keV accuracy in beam energy that corresponds 10-20 keV in hypernuclei mass resolution.

1. はじめに

我々の国際共同研究グループはハイペロン (s クォークを含むバリオン) を含んだバリオン間相互作用の理解を進めることを目的として、ハイパー原子核 (ハイペロンを含む原子核) の質量分光実験を実施している。特に独マインツ大マイクロトロン (MAMI) においては、約 1.5 GeV の電子ビームによって電磁生成した軽い Λ ハイパー核の質量分光実験を実施し、崩壊パイ中間子法と呼ばれる質量分光法を確立した。この手法では、電子生成したハイパー原子核が標の中で静止し、弱崩壊によりパイオンを含む 2 体崩壊により崩壊する反応を検出する (Fig. 1)。静止した原子核の 2 体崩壊であるから、パイオ

と合わせて Λ N 相互作用の荷電対称性の破れを発見した [1]。また 2022 年から ${}^3_{\Lambda}\text{H}$ 質量分光実験が実施され現

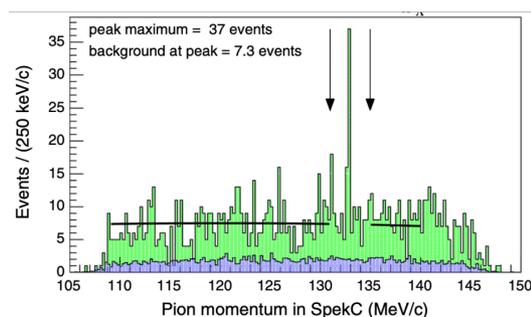


Figure 2: pion momentum peak of ${}^4_{\Lambda}\text{He}$ spectroscopy [1].

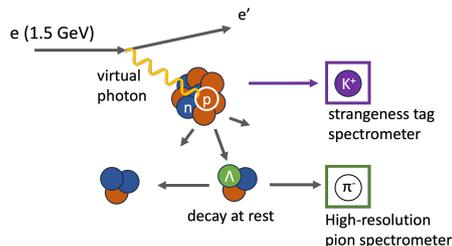


Figure 1: Decay pion spectroscopy.

ンの運動量 p_{π} のみによって

$$m({}^A_{\Lambda}Z) = \sqrt{m(A(Z+1))^2 + p_{\pi}^2} + \sqrt{m_{\pi}^2 + p_{\pi}^2} \quad (1)$$

と計算することができる。ここからコア核に対する Λ 粒子の結合エネルギーが計算できる。2010 年代に実施された ${}^4_{\Lambda}\text{He}$ 質量分光実験では、ガンマ線分光実験の結果

在解析が進められている。

崩壊パイ中間子法では、MAMI の高精度磁気運動量スペクトロメータによりパイオン運動量が 10 keV 程度の分解能で測定可能であることから、 Λ 結合エネルギーを 10 keV 程度の高い精度で決定可能である (Fig. 2)。しかしながら 2010 年代からの課題として、磁気スペクトロメータの較正精度が 100 keV 程度と大きく、実験全体の誤差を制限していることが指摘されていた。これは、約 200 MeV の電子ビームを用いた電子弾性散乱実験によるスペクトロメータの較正を行う上で、入射する電子ビームのエネルギー絶対値決定精度が 100 keV 程度と大きいことに起因している。エネルギー分解能に匹敵する 10 keV 程度の系統誤差を実現するためには、200 MeV 領域の電子ビームエネルギー絶対値を 10 keV 程度の高精度で決定する必要があるものの、このエネルギー領域での高精度測定手法は限定的であった。このような背景から我々の研究グループは、新たな電子ビームエネルギー絶対値較正手法としてアンジュレータ放射光干渉法を開発した [2]。

* kotaro.nishi@nex.phys.s.u-tokyo.ac.jp

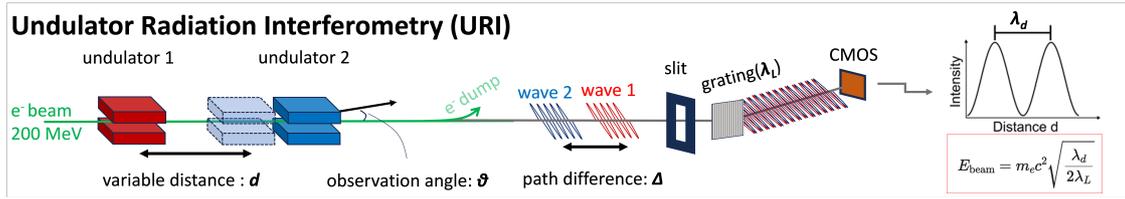


Figure 3: Undulator Radiation Interferometry Principle.

2. アンジュレータ放射光干渉法

2.1 原理

アンジュレータ放射光干渉法の原理を Fig. 3 に示す。電子ビームライン上に直列に配置された2台のアンジュレータを電子が通過するとそれぞれのアンジュレータで放射光が前方に放射されるが、放射光に対して電子が遅れて通過することにより2つの波束には光路差 (Δ) あるいは位相差 (Φ) が発生する。この位相差はアンジュレータ間の距離に比例するため、可動式の下流アンジュレータを移動させることで位相差が連続的に変化し、2つの波束の干渉光はアンジュレータ間距離に依存して周期的に変動する。またこの位相差は電子ビームラインから観測点を見込む角 (θ) にも依存し、これを取り入れた位相差が Eq. (2) のように表せる。

$$\Delta = \left(\frac{1}{\beta} - 1 + \cos \theta \right) d \sim \left(\frac{1}{2\gamma^2} + \frac{\theta^2}{2} \right) d \quad (2)$$

$$\Phi = \frac{2\pi}{\lambda_L} \Delta = \frac{2\pi}{\lambda_L} \left(\frac{1}{2\gamma^2} + \frac{\theta^2}{2} \right) d \quad (3)$$

このことから、放射光の強度変化の周期 λ_d は

$$\lambda_d = \frac{\lambda_L}{\frac{1}{2\gamma^2} + \frac{\theta^2}{2}} \quad (4)$$

と表せるから、特に $\theta = 0$ において電子ビームエネルギーが

$$E_{beam} = m_e c^2 \sqrt{\frac{\lambda_d}{2\lambda_L}} \quad (5)$$

と決定することができる。

2.2 アンジュレータ及び光学系

Equation (4) が表すようにビームエネルギーは測定する波長 (λ_L) や放射光の放射方向 (θ) に依存する。光学系では回折格子を用いて分光した画像を CMOS camera (Hamamatsu C1440-20UP) で撮影する。波長較正には水銀灯輝線スペクトル (404.7 nm, 407.8 nm) を用いた。波長アクセプタンスは 398 ~ 410 nm である。放射光の放射角を較正するために、一般的に用いられるピンホールではなく矩形スリットを用いた。アンジュレータからスリットまでの距離 10 m に対してスリットの垂直方向の開口は 6 mm に設定したため、角度アクセプタンスはおおよそ $\pm 600 \mu\text{m}$ である。アンジュレータはビームエネルギー 180, 195, 210 MeV に対して 404 nm が共鳴波長となるように電磁石の電流を設定した。

3. ビームタイムにおける運用

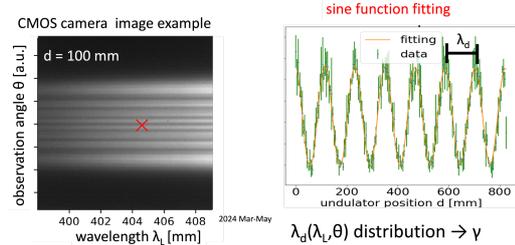


Figure 4: Online analysis procedure. Each pixels corresponds to (λ_L, θ) and oscillates in Eq. (4).

2024年3月-5月にMAMIにおいてスペクトロメータ較正実験を行い、同時にアンジュレータ放射光干渉法を用いたビームエネルギー測定を実施した。これはアンジュレータ放射光干渉法を初めて弾性散乱実験と並行して運用する初めての実験となった。実験中の解析として、CMOS cameraの画像の全ピクセルの変動波長 λ_d をサイン関数でフィッティングした (Fig. 4)。こうして得られた $\lambda_d(\lambda_L, \theta)$ の分布を Eq. (4) に従ってフィッティングすることで γ の暫定的な値を求めた。この結果の一例として $E_{beam} = 194.768 \pm 0.021$ MeV という結果を得た。

4. 解析の現状

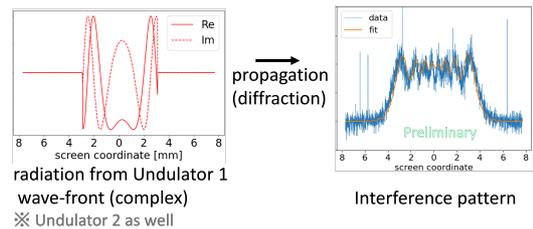


Figure 5: Radiation and Fresnel diffraction modelling scheme.

上で述べたオンライン解析では各ピクセルが独立に振動すると仮定しているが、実際の干渉パターンは回折効果やビームサイズ、ビームエネルギー幅の効果により独立に振動するとは限らない。そのため、より詳細な解析として放射光の位相情報とスリットによるフレネル回折効果のモデリングによる干渉パターンフィッティングを進めている。放射光の位相、振幅情報には γ (すなわち

E_{beam}) が調整可能なパラメータとして導入されており干渉パターンを最も再現する γ の値を最終的な解析結果とする。放射光の計算では $\pm 600 \mu\text{m}$ の比較の大きな角度アクセプタンスに対して球面波的な位相情報を計算している。このような位相を入れることでカメラでの干渉パターンの幅が再現できる (Fig. 5)。またスリットからカメラまでの波面の伝搬計算では畳み込みフーリエ変換法と呼ばれる数値計算手法を用いてフレネル近似のもとでの伝搬計算を行なっている。放射光および光学系の各種パラメータを調整し、最適なモデル関数の形と E_{beam} を今後決定する。

5. 今後の展開

今回のビームタイムでは、MAMI のビームラインの制限により弾性散乱実験とアンジュレータ放射光干渉法を行うビームラインが別れており、都度ビームスイッチをしながら較正実験を行った。本来放射光を利用したビーム品質モニタリングではビームの非破壊性を生かした同時かつ連続測定が可能である。今後 MAMI のアップ

グレードに伴い建設中の電子線加速器 MESA では同じビームラインでの測定を可能にできるよう準備を進めている。

また干渉パターン再現のために放射光の位相の空間分布情報と光波の伝搬計算を組み合わせたパラメータ調整計算手法は、一般的な放射光を用いたビーム診断にも応用可能な技術であると考えられる。より良い較正手法について検討したい。

参考文献

- [1] A. Esser, S. Nagao, F. Schulz *et al.* (A1 Collaboration), “Observation of ${}^4_{\Lambda}\text{H}$ Hyperhydrogen by Decay-Pion Spectroscopy in Electron Scattering”, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 114, p. 232501, 2015. doi:10.1103/PhysRevLett.114.232501
- [2] P.Klag *et al.*, “Novel optical interferometry of synchrotron radiation for absolute electron beam energy measurements”, *Nucl. Instr. Meth. A* vol. 910, Pages 147-156, 2018. doi:10.1016/j.nima.2018.09.072