

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 18 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H01933

研究課題名（和文）高エネルギー大強度レーザー電子光ビーム生成によるハドロン物理学の革新

研究課題名（英文）Innovations in Hadron Physics by Generating High-Energy Intense Laser-Electron Photon Beams

研究代表者

中野 貴志（Nakano, Takashi）

大阪大学・核物理研究センター・教授

研究者番号：80212091

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 14,000,000円

研究成果の概要（和文）：SPring-8のLEPS2実験では、ハドロンを記述するもっとも基本的な自由度は何がという問いに答えるため、ベクターK中間子光生成実験の実施が計画されている。本研究は、実験に必要な最高エネルギー3 GeVの高強度高偏極光ビームを生成するために、深紫外パルスレーザーをSPring-8の蓄積電子ビームに同期して入射する。高統計実験を遂行することを目的とする。

実験室内の測定で255nmレーザーが高強度化のために必要な性能を満たしていることを確認すると同時に、LEPS2で、様々な同期パターンを用いた実測による最適化を行い、高強度光ビームが長時間安定に動作することをLEPS2実験により確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

レーザー電子光ビームの高輝度化のためには、従来は入射レーザーの総出力の増強という方法が取られて来たが、熱負荷による光学系の歪みによる効率低下の問題があり、さらに高価な大強度レーザーを複数台用意する必要から生じる費用面の問題があった。本研究では、電子ビームバンチが逆コンプトン散乱領域に入ってくるタイミングを見計らって、レーザーを照射することにより、同じ出力の非同期レーザーの数倍の強度のレーザー電子光ビームが長時間安定に生成されることが確認された。

研究成果の概要（英文）：In the LEPS2 experiment at SPring-8, a vector K meson photoproduction experiment is planned to answer the question of what is the most fundamental degree of freedom describing hadrons. A deep ultraviolet pulsed laser will be injected synchronously with the stored electron beam at SPring-8 to produce an intense, highly polarized light beam with the highest energy of 3 GeV required for the experiment. The objective is to carry out high-statistics experiments. We confirmed that the 255-nm laser meets the performance requirements for high intensity by laboratory measurements, and at the same time, we optimized the laser by actual measurements using various synchronization patterns at LEPS2 and confirmed that the high intensity optical beam operates stably for a long time by the LEPS2 experiment.

研究分野：原子核物理学

キーワード：レーザー電子光 高エネルギー光ビーム 高強度光ビーム ハドロン

1. 研究開始当初の背景

QCDにおけるカイラル対称性の自発的破れに対応する南部ゴールドストーンボソンである π , K , η 中間子の質量が軽い為、一般にペンタクォークやテトラクォーク等のマルチクォーク粒子は π 中間子等を放出する崩壊が起りやすく、極めて不安定であると考えられている。しかしながら、もし比較的安定なマルチクォーク粒子が存在すれば、通常のハドロン分光では得られない情報、すなわちハドロンを記述するもっとも基本的な自由度として構成子クォーク以外に何が可能かという問いに答える直接的な方法を与える。中でもシータ粒子 (Θ^+) は、反ストレンジクォークを1つ含むバリオンで、最小でもクォークと反クォークの数の和が5になるペンタクォーク候補である。 Θ^+ の軽い質量と狭い崩壊幅をナイーブなクォークモデルで説明するのは極めて困難であり、その存在が確立されれば、ハドロン媒質中での準粒子 (例えばダイクォークやハドロンレベルでの粒子空孔励起) に対する重要な知見を与える。

光核子反応でハドロン (複数のクォークからなる複合粒子) が生じる際、中間状態で様々な粒子が光子と核子の間で交換されうるが、交換粒子は直接観測できないので、一般にどのような粒子が交換されたか知ることは難しい。しかしながら、縦偏極ビームを用いると、放出される中間子の方向や偏極方向と偏光面との相関から、交換される粒子のスピンの組み合わせを知ることができる。例えば、負 K 中間子と核子のハドロン分子共鳴状態の可能性が高い $\Lambda(1405)$ 粒子の構造を、負 K 中間子を交換する生成過程により検証するためには、偏光面に対して垂直方向に崩壊面を持つベクター K 中間子が前方に放出される事象を選べば良い。

Θ^+ 探索についても、ベクター K 中間子光生成による方法は極めて有効である。3 GeV ビームと液体水素標的を用いたベクター K 中間子生成を伴う Θ^+ 光生成反応による探索では、t-channel での K 中間子の交換が可能で、さらには水素標的であるためフェルミ運動量の影響を受けないという利点がある。

2. 研究の目的

高偏極のレーザー電子光ビームによるベクター K 中間子光生成実験は、ハドロン物理を推進する上で、ユニークかつ強力な研究手法を与えるが、LEPS 実験ではベクター K 中間子光生成に必要な 3 GeV 領域で十分なビーム強度が得られなかったという点とベクター K 中間子からの崩壊粒子を十分広い立体角で測定できなかったという点が問題であり、それらの解決が課題であった。後者の測定システムの立体角についての課題は、BNL の E949 実験で用いられた大型ソレノイド電磁石を SPring-8 の LEPS2 ビームラインに移設することにより開発された大立体角スペクトロメーターにより解決された。本研究では、前者の課題を解決するために、最高エネルギー3 GeV の大強度レーザー電子光ビームを生成することを目的とする。本研究により、3 GeV 光ビームの高強度化が実現すると、LEPS2 スペクトロメーターを用いたベクター K 中間子光生成によるペンタクォーク粒子 Θ^+ の検証やハドロン分子共鳴状態候補 $\Lambda(1405)$ の構造解明を目的とした実験が短期間に高統計で遂行できるようになり、レーザー電子光ビーム用いたハドロン物理学研究の発展が格段に加速する。

3. 研究の方法

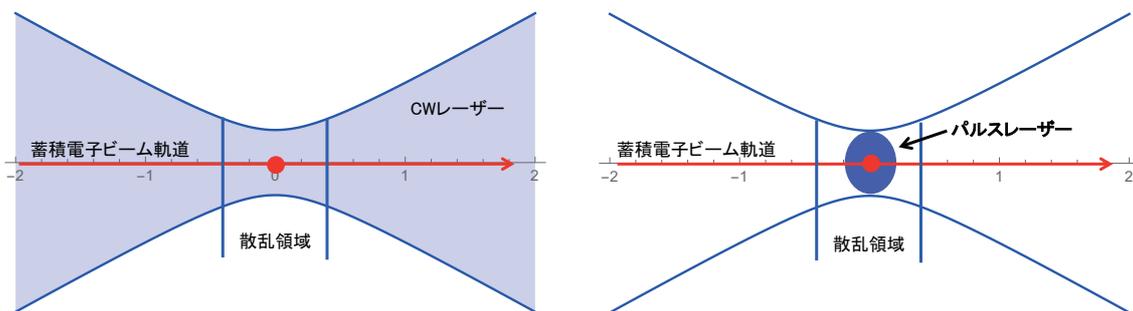


図1. 従来の CW レーザー光による逆コンプトン散乱 (左) と本計画の同期パルスレーザーによる逆コンプトン散乱 (右)

レーザー電子光ビームの高輝度化のためには、従来は、もっぱら入射レーザーの総出力の増強という方法が取られて来たが、熱負荷による光学系の歪みによる効率低下の問題があり、さらに高価な大強度レーザーを複数台用意する必要から生じる費用面の問題があった。本研究では、蓄積電子ビーム軌道にやみくもにレーザー光を打ち込むのではなく、電子ビームバンチが逆コンプトン散乱領域 (レーザービーム径が最小になる領域) に入ってくるタイミングを見計らって、レーザーを照射する (図1)。このことによりレーザーの空打ちが減り逆コンプトン散乱が起こる頻度が増すので、レーザーの出力を抑えつつレーザー電子光ビーム強度を格段に増加させるこ

とができる。蓄積電子ビームの持つバンチ構造に合わせて、入射レーザーの時間構造を制御した例は我々以外には無く、本提案は、オリジナルなアイデアに基づく提案である。先行研究では、紫外波長領域の同期パルスレーザーを開発することにより最大エネルギー2.4 GeV の高強度レーザー電子光ビームの生成に成功した。本研究では、深紫外波長領域の同期パルスレーザーを開発することにより、光学系に対する熱負荷が問題にならない5W程度の入射レーザー強度で深紫外レーザーと電子ビームを同期することにより、逆コンプトン散乱の効率を劇的に改善し、高強度レーザー電子光ビーム（毎秒 $\sim 5 \cdot 10^6$ 個の光子）生成を実現する

4. 研究成果

電子ビーム RF 信号のサンプリング信号をレーザー同期システムへの入力とし、ディレイを変化させてレーザー電子光ビームの強度変化を測定することにより同期とその時間精度の確認を行う。逆コンプトン散乱が実効的に起こる領域の長さはレイリー長の約2倍の長さで、我々の光学系では約0.8 mになる。図2はD-modeと呼ばれるビームバンチ構造を持った蓄積電子ビームに波長355 nmの紫外レーザーを入射して、同期を確認した例である。684.3 間隔の孤立電子バンチにレーザーが同期すると鋭いピークが現れる。

LEPS2 実験での研究が波長355nmのレーザーを用いた最高エネルギーが2.4GeVのレーザー電子光ビームを用いる実験が主体となったため、深紫外パルスレーザーの開発は実験室内で行い、パルス同期レーザーによるレーザー電子光の生成と大強度ビームの生成効率及び安定性の確認は波長355nmのレーザーを用いて行った。

実験室内の測定で255nmレーザーが高強度化のために必要な性能を満たしていることを確認すると同時に、D-modeを含むSPring-8の8種類のビームバンチ構造で、様々な同期パターンを用いた実測による最適化を行い、高強度光ビームが長時間安定に動作することをLEPS2実験により確認した。

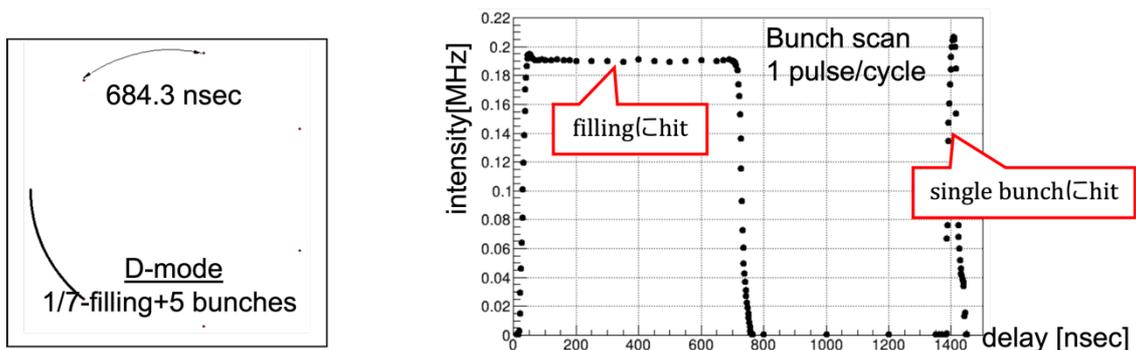


図2. D-modeは684.3 ns毎の孤立した電子バンチと2 ns間隔で連続するfillingと呼ばれる電子バンチで構成される(左)。ディレイを変化させた時のレーザー電子光ビームの強度変化(右)。孤立した電子バンチに同期すると鋭いピークが現れる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 N.Muramatsu, et al. [全51名]	4. 巻 1033
2. 論文標題 SPring-8 LEPS2 beamline: A facility to produce a multi-GeV photon beam via laser Compton scattering	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nucl. Instrum. Methods A	6. 最初と最後の頁 166677-1 ~ 14
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.nima.2022.166677	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 桂川仁志, 中野貴志, 村松憲仁, 折井庸亮
2. 発表標題 ピコ秒パルスレーザー同期による 高強度レーザー電子光ビームの開発
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第42回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 桂川仁志
2. 発表標題 Development of high intensity laser electron beam by synchronizing a pulse laser and electron beam
3. 学会等名 RCNP workshop on Hadron Physics at the LEPS2 photon beamline (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	村松 憲仁 (Muramatsu Norihito) (40397766)	東北大学・電子光物理学研究センター・准教授 (11301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------