

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 5 月 25 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H02892

研究課題名(和文)精密ハドロン物理学のための高強度レーザー電子光ビームの開発

研究課題名(英文)Development of High Intensity Laser-Electron Photon beam for high precision hadron physics

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) 15,300,000円

研究成果の概要(和文)：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空打ちを減らし、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。

研究成果の学術的意義や社会的意義

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。本研究が成功した場合、レーザー電子光ビーム強度が現在の数倍のに達し、LEPS2でのハドロン物理研究が格段に進展するのみならず、現在の方法では出力パワーが足りずに諦めている波長200 nm領域のレーザー入射による、最高エネルギー3.5 GeVのレーザー電子光ビームの生成への道も拓ける。

研究成果の概要(英文)：In order to obtain the high intensity laser electron-photon beam, a brute method of increasing the total output of the incident laser has traditionally been adopted. However, there is a problem of lowering the efficiency due to distortion of the optical system due to the thermal load. Another problem is a high cost due to the necessity of providing multiple high-intensity lasers. In this study, we synchronized the timings of incident laser and electron beam bunches entering the inverse Compton scattering region. The intensity of the laser electron-photon beam has become several times higher than that of an asynchronous laser of the same output.

研究分野：原子核物理学

キーワード：レーザー電子光 ハドロン物理学 パルスレーザー レーザー同期

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

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とパリティ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。 $\Lambda(1405)$ 粒子の分子共鳴描像に基づく最近の理論は、負 K 中間子交換により生成された $\Lambda(1405)$ の質量が大きい方にシフトし、その崩壊幅も狭くなると予測している。

このようにレーザー電子光ビームは、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、従来の制動放射光ビームと比べ、強度が低いという欠点があった。これまでは、その強度面での欠点を、より強度の高いレーザー発振器を導入することと、複数のレーザー光を同時に入射することによって、克服しようとしてきた。しかしながら、高強度レーザー光の平行入射は、大きな熱負荷のために光学系に歪みをもたらし、逆コンプトン散乱効率の低下をまねく。また熱負荷を一定にした状態で光学系を調整しなくてはならないので、ビーム調整に時間がかかるという難点があった。

2. 研究の目的

本研究では、1) 電子ビームがバンチ構造を持つこと、2) 数 MHz から数 10MHz の高繰り返し周波数の紫外レーザーでは繰り返し周波数が低いほど出力が大きいこと、3) 外部時間信号に同期したレーザー発振が技術的に可能になったこと、に着目し、約 0.8m の有効長を持つ散乱領域で、繰り返し周波数を最適化した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、レーザー電子光ビームの高強度化を実現する。逆コンプトン散乱効率の改善により、ハドロン物理研究を遂行するのに必要なビーム強度(毎秒 50 億個の光子)が現在より低いレーザー出力で可能になることから、光学系の熱負荷が低減し、レーザー電子光ビーム強度も安定する。

3. 研究の方法

まず、平成 29 年度にレーザー同期システムを導入し、1~50 MHz の広い周波数領域で、レーザー発振が十分な出力と時間精度を持つことを確認する。ビームバンチ間隔が等間隔で運転されている時期に同期テストを行い、バンチ間隔の逆数に周波数が一致した時に、レーザー電子光ビーム強度が急激に変化することを確認し、さらにディレイ調整を行うことによりレーザー光ビーム強度を最大化する。平成 30 年度以降は、シリンドリカル・エキスパンダーの導入によりレーザープロファイルを整形するとともに、タイミング制御の精度を向上させ、より複雑なバンチ構造を持ったビームでも従来の 10 倍以上の光ビーム強度が長期間安定に得られるレーザー入射パターンを開発する。

本研究は、電子ビームバンチが散乱領域を通過するタイミングに合わせて、パルスレーザーを集光させることにより、レーザーと電子ビームの衝突確率を格段に改善し、レーザー電子光ビームの高強度化を成し遂げるといふ斬新なアイデアに基づくものであるが、その実現のために以下のような課題を克服する必要がある。

- ・逆コンプトン散乱領域の長さはレイリー長の約 2 倍の長さで、355 nm の波長のレーザーを約 30m 先で最小のビームウエストを持つように集光させる我々の光学系では、その長さは約 0.8 m になる。電子ビームがこの領域を通過するのにかかる時間は、約 2.7 ナノ秒なので、それ以下の精度でレーザー発振のタイミングを制御する必要がある。

- ・繰り返し周波数についても長期にわたって安定している必要がある。電子ビーム加速の高周波(RF)シグナルによるフィードバックを考えているが、SPring-8 の電子ビームのバンチ構造がバラエティに富むので、各モード毎に発振周波数の最適化や複雑なパターンでの発振が必要である。

- ・光学系の高い安定度も求められる。これまでの高強度レーザーの平行入射の際には、レンズやミラーの熱変形により、レーザーの方向がずれたりレーザー焦点が上流あるいは下流にドリフトすることがあった。本研究では、レーザー出力を抑えられるので、熱変形の度合いは小さいと考えられるが、もし焦点のドリフトが起こってしまった場合は、その影響は大きい。

以上の課題を解決するために、スペクトロニクス株式会社の折井庸亮氏の技術的な支援を受けた。

4. 研究成果

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。これ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。

本研究で用いるレーザー発振器では、タイミング制御された光増幅を実現するためレーザー媒質に対して外部より励起を行い反転分布を形成する。定常的に外部パルスが入射されている場合、増幅過程による放出と励起が釣り合うが、入射パルスが途切れると、放出過程がなくなり反転分布密度が過剰に高くなり非常に高い利得を持つ。この状況で、パルスが入ってくると高い利得によって光学部品のダメージ閾値以上に増幅されて装置を損傷させる。そこで、本研究では、パルスが途切れたことを検出して反転分布密度が高くないように制御を行うレーザー同期システムを開発した。これにより、増幅度を抑制することなく高い出力でレーザー発振器を運用することが可能となった。SPring-8のレーザー電子光ビームラインで高繰り返し・高出力による実験を行ったところ、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。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 桂川仁志, 中野貴志, 村松憲仁, 折井庸亮, 大橋裕二, 伊達伸, 柳井優花
2. 発表標題 パルスレーザーと電子光ビームの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 日本物理学会 第74回年次大会
4. 発表年 2019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	清水 肇 (Shimizu Hajime) (20178982)	東北大学・電子光理学研究センター・名誉教授 (11301)	
研究分担者	村松 憲仁 (Muramatsu Norihito) (40397766)	東北大学・電子光理学研究センター・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
---------	---------