

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 13 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2016

課題番号：16K13806

研究課題名(和文)パルスレーザーと電子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

研究課題名(英文)Development of High Intensity Laser-Electron Photon beam with synchronized laser injection

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) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、様々なビームバンチ構造を持つ SPring-8 の蓄積電子ビームに対して、繰り返し周波数を最適化したパルスレーザー光を、電子ビームに同期して入射することにより、逆コンプトン散乱効率を劇的に改善し、レーザー電子光ビームの高強度化と安定化を実現することを目的とする。その原理を検証するため、電子ビームバンチが一周する周期に合わせてレーザーを入射すると非同期の場合に比べて2.2倍の強度のレーザー電子光ビームが得られた。この値は同時に測定されたレーザープロファイルから予想される値と一致しており、レーザーを理想値の150マイクロメートルまで絞ることによりその比が9.5に改善することが示された。

研究成果の概要(英文)：We aimed to improve the intensity of the Laser-Electron Photon beam at SPring-8 by synchronizing the laser injection timing to the bunched beam. The study showed the intensity was improved by a factor of 2.2 compared to the asynchronous case. The ratio can be improved to 9.5 by reducing the beam-waist to 150 micro meter.

研究分野：ハドロン物理

キーワード：レーザー電子光 逆コンプトン散乱 ハドロン

1. 研究開始当初の背景

我々は SPring-8 のレーザー電子光ビーム施設(LEPS 及び LEPS2)において、8GeV 蓄積電子ビームと短波長レーザーの逆コンプトン散乱により得られる偏極 GeV 光ビームを用いたハドロン物理研究を推進するとともに、ビーム発生装置や測定器の維持と開発を行ってきた。ほぼ 100%の縦偏極度が得られるレーザー電子光ビーム施設としては、本施設が世界最高エネルギーを誇る。

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 (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。(1405) 粒子の分子共鳴描写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 (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言している。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。我々は、このレーザー電子光ビーム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。

SPring-8 のレーザー電子光ビーム施設では、平成 29 年にレーザー電子光ビームと大型ソレノイド電磁石を用いたハドロン物理研究が本格的に稼働する。多大な電力を消費するソレノイド電磁石の運転時間を抑えつつ、ペンタクォーク粒子⁺の検証やハドロン分子共鳴状態候補である (1405) の構造解明を目的とした実験を高統計で行うためには、ビームの高強度化が喫緊の課題である。

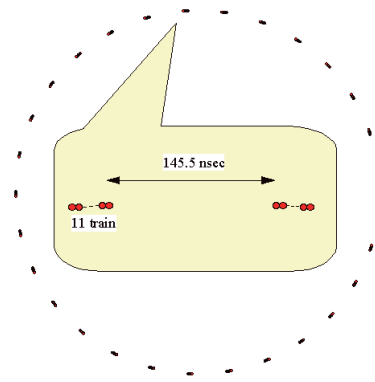
2. 研究の目的

本研究では、様々なビームバンチ構造を持つ SPring-8 の蓄積電子ビームに対して、繰り返し周波数を最適化したパルスレーザー光を、電子ビームに同期して入射することにより、逆コンプトン散乱効率を劇的に改善し、レーザー電子光ビームの高強度化と安定化を実現する。

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 $\sim 5 \times 10^6$ 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

まず最初に SPring-8 の蓄積電子ビームの“モード”と呼ばれるバンチ構造を下図に表す。



点で示されているのが、電子が局在している部分で、これらが周長約 1.4 km のリングを周回している。この周回軌道上にレーザーを集光させるわけであるが、レーザービーム径が最小に近い約 0.8 m の散乱領域以外では逆コンプトン散乱はほとんど起こらない。パルス状のレーザーを入射した場合、レーザーと電子バンチが散乱領域を通過するタイミングが合わないとレーザーは散乱領域を素通りしてしまう。そこで我々はこれまでは、CW レーザーまたは高繰り返しの疑似 CW レーザーを使ってきた。

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。しかしながら、本研究は前例の無い斬新なアイデアに基づくものであるため、その実現のためには以下のような課題を克服しなくてはならない。

- ・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、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（ジッター）でレーザー発振のタイミングをディレイ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、後述するように 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、各モード毎に最適化が必要である。

- ・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きてしまった場合は、その影響は大きい。

本研究では、レーザー同期システムに外部クロック信号を入力し、レーザー発振が十分な時間精度で制御されていることを確認する。次に、レーザーを SPring-8 に設置し、レーザー電子光ビームの生成を確認する。ついで、レーザー周波数を変化させながらスキャンし、ビームバンチ時間間隔の逆数に周波数が一致した時に、レーザー強度が急激に変化することを観測する。最後に、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、ディレイ調整を行うことによりレーザー電子光ビームの最大強度と安定度を測定する。

4. 研究成果

図1は、電子バンチが蓄積リングを1周する周期に合わせて、0.1W のレーザーを、RF 信号を基準として、遅延時間を変化させながらレーザー電子光強度を測定したものである。相互作用領域の中心で完全に同期された場合に極大になっていることがわかる。さらに同じレーザーパワーで蓄積電子ビームと非

同期の場合に得られた出力との比を取ると最大値は非同期の場合の2.2倍であることがわかった。これは同時に測定したレーザーのビームプロファイル（ビームウエストのサイズが 362 μm 、図2）を用いて計算した出力比に一致する。

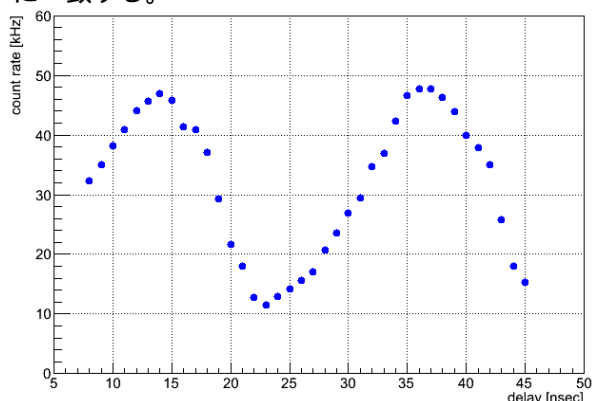


図1：レーザー電子光強度の遅延時間依存性。

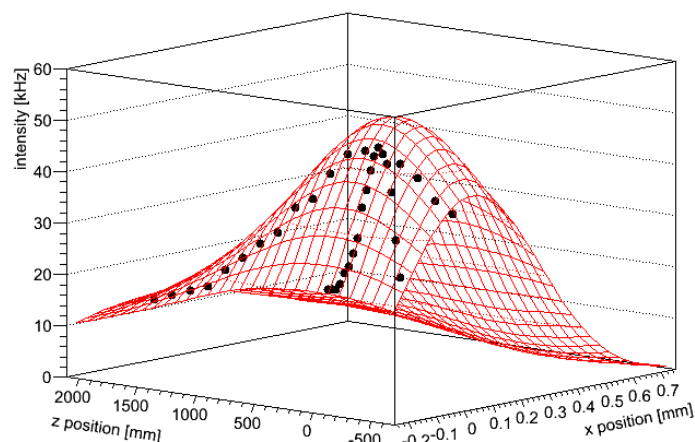


図2：ビーム方向を z、ビームに垂直な方向を x とし、各 z 点でわずかにレーザーの方向を変化させてレーザーのプロファイルをレーザー電子光ビームの強度の変化から求めた。この測定からレーザーのウエストサイズが 362 μm であることがわかった。

ビームウエストを理想値の 150 μm まで絞ると出力比は 9.5 まで改善することが計算で分かっており、本研究で得られた方法がレーザー電子光ビームの出力改善に極めて有効であることが示された。

5. 主な発表論文等

現在、上記の結果を論文にまとめている。

6. 研究組織

(1) 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

(2) 研究分担者

村松 憲仁 (MURAMATSU, Norihito)
東北大学電子光物理学研究センター・准教授
研究者番号： 40397766