

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 26 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2012～2014

課題番号：24244095

研究課題名(和文) 超高強度レーザーを用いた電子・陽電子プラズマ生成に関する研究

研究課題名(英文) Study for generation of electron-positron plasma by using ultra-high intensity laser

研究代表者

中井 光男 (NAKAI, MITSUO)

大阪大学・レーザーエネルギー学研究センター・教授

研究者番号：70201663

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 35,100,000円

研究成果の概要(和文)：相対論的電子陽電子プラズマの生成とその特徴を実験的に検証することを最終目的として、大阪大学レーザーエネルギー学研究センターのピコ秒キロ・ジュール出力のLFEXレーザーを用いた電子・陽電子生成実験を実施し、パルス形状ならびにそれに伴うターゲットプラズマの生成過程の制御が、対生成の最適化には不可欠であることを実験的に検証した。合わせて、以下の今後の本研究の基盤となる技術の開発を行った。集光照射条件の制御に必要なプラズマミラー技術、新しい計測概念による高エネルギーX線計測装置(コンプトン散乱分光器、光核反応分光器)、放射反作用の新たな表式並びにシミュレーションコード。

研究成果の概要(英文)：It was demonstrated by using the LFEX laser system at the Institute of Laser Engineering, Osaka University for the first time to generate abundant electron-positron pairs through the Bethe-Heitler process. It was shown that the control of the pulse contrast and pre-forming plasma is important and essential to maximized the efficiency of pair creation. Following elements for the future study to create and investigate the electron-positron plasmas were developed in this project. 1) Plasma mirror system for the LFEX laser to decrease the pre-pulse level and separate focusing of the four beams from the LFEX. 2) New diagnostics were developed and installed on the LFEX such as high energy x-ray spectrometers with new design concepts and an imaging system for the scattered light. 3) A new remedy to avoid the run-away solution of radiation friction was introduced and relativistic PIC codes have been developed to investigate the pair-creation by ultra-high intense lasers.

研究分野：数物系科学

キーワード：プラズマ物理 対生成 超相対論的プラズマ 超高強度レーザー

## 1. 研究開始当初の背景

相対論的電子陽電子プラズマは、活動銀河ジェットや線バーストといった、宇宙に於ける高エネルギー現象の根源物質であると考えられている。相対論的プラズマに関する理論モデルは数多く提唱されているものの、このような反物質を含む高エネルギー密度状態は、地上実験に於いては実現されておらず、その物性も検証されていない。

近年、超高強度レーザー技術が大きく進展し、キロジュール級のエネルギー下で、 $10^{21}\text{W}/\text{cm}^2$  超の照射強度を実現出来るようになってきた。この超高強度のレーザー光を物質に照射することにより MeV を超えるエネルギーをもった相対論的高速電子が発生し、その制動放射には高強度の線領域の光子が大量に含まれる。こうして発生した高強度パルス状の線を光源として Bethe-Heitler 過程によって電子・陽電子を効率よく発生できることが、最近の実験によって示されつつあり[1]、デバイ長を超えるサイズの相対論的電子・陽電子の集団を生成する可能性が見えてきた。

相対論的電子陽電子プラズマの理論的解析を実験的に検証することは、類似の解析手法による、クオーク・グルオンプラズマの解析にも役立つと考えられている[2]。また、レーザーによって生成された高密度の電子・陽電子プラズマに、近年開発が進んでいる陽電子蓄積技術[3]を使うことによって、大量のポジトロニウムを生成することができ、それを使ったボーズ・アインシュタイン凝縮の研究の可能性も検討されている。

## 2. 研究の目的

本研究は、高エネルギー密度プラズマ物理、高エネルギー物理、実験室宇宙物理、反物質の科学的応用などの学術研究に「相対論的電子陽電子プラズマ」と言う新しい実験対象物提供しようとするものである。

相対論的プラズマ物理の実験的検証を目

指し、超高強度レーザーによる電子・陽電子生成機構のスケーリングを明らかにし、相対論的電子陽電子プラズマを生成する。合わせて、観測技術を開発することによって、今後の相対論的プラズマ物性研究の基盤を確立することを目的とする。

## 3. 研究の方法

本研究では、大阪大学レーザーエネルギー学研究センターの高強度レーザー(LFEX)装置を用いて相対論的電子陽電子プラズマを生成し、その物理的な特徴を解明することを最終的な目標として、相対論的電子陽電子プラズマ生成とその診断技術開発の基礎となる以下の開発研究を実施した。

### (1) ピコ秒キロジュール級レーザーへのプラズマミラーの導入

大阪大学レーザーエネルギー学研究センターの LFEX レーザーは4ビームが一つの集光鏡によって一点に集光されるように構成されている。プラズマミラー[4]を用いることによって、分割集光することができれば、電子陽電子ジェットを交差、重畳させることによって相互作用実験、高密度化が可能となる。また、プラズマミラーの導入によってレーザーパルスのパワーコントラストの向上を図り、レーザー照射条件を制御することが可能となる。さらに、低F値の楕円体プラズマ集光鏡を挿入することによって、スポット径数 $\mu\text{m}$ で、集光照射強度  $10^{21}\text{W}/\text{cm}^2$  を実現することが可能となる。

### (2) プラズマ診断装置の開発

Bethe-Heitler 過程による対生成を最適化するためには、レーザー駆動相対論的電子の生成過程とターゲット内での輸送過程を理解する必要がある。そのため、理論的に予測される最適レーザー集光照射強度  $10^{21}\text{W}/\text{cm}^2$  を超えるレーザー・プラズマ相互作用を観測するために 1GeV 領域までの電子・陽電子スペクトロメータ、MeV-数十 MeV を対象とする高エネルギーX線計測器、

レーザー照射領域の形状、非線形相互作用を観測するための散乱光計測系を開発する。

(3) 大阪大学レーザーエネルギー学研究中心の LFEX レーザー装置を用いた実ターゲット照射実験

LFEX レーザーを固体ターゲットに照射し、Bethe-Heitler 過程によって生成される電子・陽電子対を測定し、最適化へ向けての基礎データを取得する。また、ピコ秒・キロジュール級レーザーでは、初めてのプラズマミラーの基礎実験を実施し、条件の最適化ならびに導入による効果を明らかにする。

(4) 解析シミュレーションコードの開発

本研究では、固体ターゲット中での高エネルギー電子からの制動放射過程と発生する高エネルギーX線(線)の輸送が重要な役割を演じる。対生成の最適化並びに相対論的プラズマ中でのラマン散乱の様な特徴的な現象を調べるために、放射の反作用を組み込んだ計算機解析コードの開発を行う。

#### 4. 研究成果

下記の通り、開発研究は予定通り実施された。

(1) ピコ秒キロジュール級レーザーへのプラズマミラーの導入

大阪大学レーザーエネルギー学研究中心の LFEX レーザーにプラズマミラーを導入するにあたって、既存の LFEX の条件で、ミラー表面での照射強度の最適化を行った。無反射コートをした平板 BK ガラスに LFEX ビームをパルス幅 1.5 ピコ秒で照射し、反射光のエネルギーとパターンを観測した(学会発表、図1)。80-100 J/cm<sup>2</sup> のフラックスでビームパターンの有意な変調なく、50%を超える反射率が安定に得られることが確認された。この結果をうけて、反射面全面に渡り必要なフラックスを維持する縮小像倍率 1/8 の回転楕円体集光鏡(10<sup>21</sup> W/cm<sup>2</sup>以上の集光強度を実現できる)の設計を完成するとともに、安価な球面鏡を用いた実照射

システム(図2)を作成し、プラズマ実験に供した。

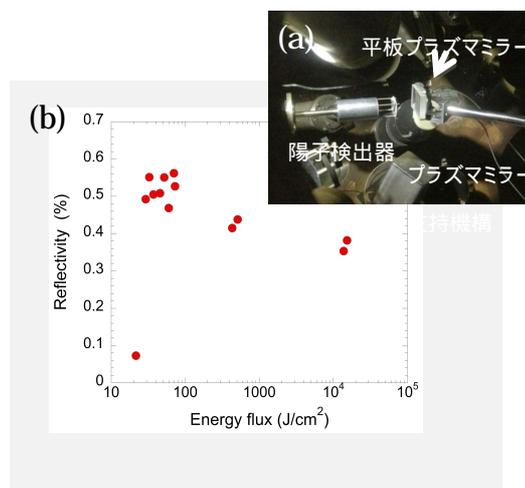


図1. 平板 BK ガラスによる反射率測定

(a) 実験配置図、

(b) 反射率の照射強度依存性

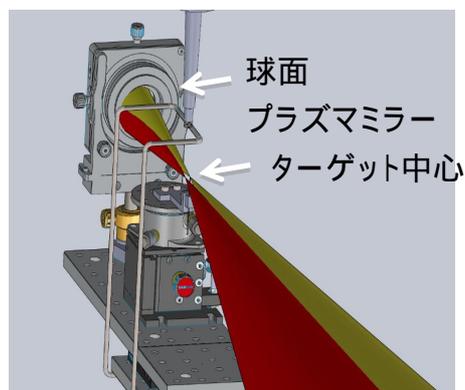


図2. 球面プラズマミラー保持具

実験用真空容器外でターゲットと一体で調整され真空容器内にセットされる。

(2) プラズマ診断装置の開発

レーザー電子加速研究等で実績のある近藤グループの指導のもと、1 GeV まで観測可能な電子・陽電子スペクトルメータを LFEX レーザー装置での実験用に新たに設計、製作した。また、数-数十 MeV 領域の高エネルギーX線のスペクトルを観測するために、2種の新たな手法による検出器を開発した。一つは、Compton 散乱された電子をスペクトルメータによって計測し、X線スペクトルを算

出するもの（コンプトン散乱 X 線分光器[論文]、図3）。もう一つは、異なる閾値を持つ複数の材料中で光核反応によって生成される中性子数を（バブル）検出器によって計測することによって X 線スペクトルを導出する光核反応 X 線分光器[論文]である。

ターゲット内ならびに電子陽電子プラズマ中の陽電子の輸送を把握するためには陽電子の対消滅ガンマ線の検出が有用である。そのため、減衰時定数の短い LuAG シンチレーターをアレー化し、光出力をマルチアノード PMT で検出する多チャンネル高エネルギー X 線検出器を作成する予定であったが、モンテカルロコードを用いた実際の実験環境でのシミュレーション結果では、光変換率の高い CsI(Tl)を用いる方が現実的であることが分かった。そのため、シンチレーターとしては CsI(Tl)を用いることに変更し、全体を構成したが、本研究期間内には、システムの最終的な動作特性を評価するまでには至っていない。

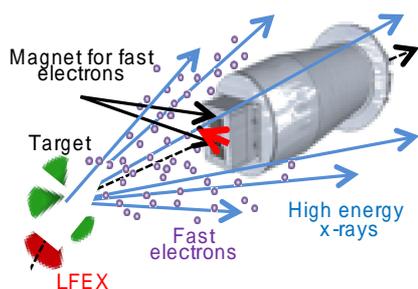


図3.コンプトン散乱 X 線分光器

ターゲットからの散乱光計測については、基本波並びに第2高調波の散乱強度とパターンを観測する光学系を設置し、LFEX レーザーの集光照射領域での散乱分布を計測した。今後、PIC コードを用いた相互作用のシミュレーション結果と比較するとともに、より短波長領域の光学系を付加する予定である。

(3) 大阪大学レーザーエネルギー学研究中心の LFEX レーザー装置を用いた実タ

## ターゲット照射実験

種々の事情により、当初予定していたマシンタイムを確保することができなかったが、前述のプラズマミラーのための基礎実験と、基本的な対生成実験を実施することができた。LFEX レーザーは本研究期間を通して、単パルス化（パルス圧縮のための回折格子の設置）が進められており、平成26年度末にようやく4ビームの単パルス化が完成した。その間、段階的にビーム数を増やししながら、パルスコントラストの向上を図るなどの整備が進められてきた。

最初の対生成実験では、直径2mm、厚み1mmの金の円盤を LFEX の2ビームで照射し、 $10^{10}$ 個を超える陽電子の生成が観測された[論文、学会発表]。この実験では、ターゲットから放出される電子、陽電子、X線に加え、ターゲット中で光核反応によって生成された中性子が計測された。観測された電子スペクトルは、2温度成分で記述され、10 MeV を超える高温成分が観測された。この高温成分の生成は、この時点での LFEX のコントラストの低さに起因すると理解された。一方、LFEX レーザーのコントラストが改善された平成26年末に実施された実験では、同程度のエネルギーの照射にも関わらず、微弱な陽電子の生成しか観測されなかった。これらの結果から、パルス形状とそれに伴うプラズマ形成を制御することが、高速電子の生成とスペクトル制御に極めて重要であることが確認された。プラズマミラーの導入によって、パルスコントラストをさらに向上させることによって、電子スペクトルの高速成分がさらに、抑制されることが確認された。今後は、PIC シミュレーションとも比較を行いながら、パルス波形を制御した実験を行う予定である。

## (4) 解析シミュレーションコードの開発

高強度のレーザーによって駆動される高速の電子ビームを記述するためには、放射の

反作用を考慮する必要がある。ところが、PICシミュレーションに組み込むには、これまで放射の反作用を記述する方程式として知られていた Lorentz-Abraham-Dirac (LAD) 方程式[5]には問題があり、これを解決するための種々の処方が提案されている。長友のグループでは、この問題を原理的に解決する方を研究[6]しており、本研究期間中には、Heisenberg-Euler Lagrangian をもとに真空分極の効果を考慮することによって問題を回避することができることを見いだした[論文]。一方、高部のグループでは、新しい計算スキームで高エネルギー光子の輸送と QED 過程を取り込み、放射の反作用については Sokolov[7]の手法を用いた相対論的 PIC シミュレーションを開発し、レーザー照射による高速電子生成、制動放射、対生成、ターゲット裏面でのシース電場による電子、陽電子の加速を包括的にシミュレーションすることに成功した[論文]。これまでに、LFEX での実験で示されている様に前駆パルスによって生成されるスケール長 20  $\mu\text{m}$  程度の前駆プラズマの存在によって、高速電子のエネルギーが大幅に高エネルギー側にシフトすることを確認している。また、幾何形状を反映した最適化を実施するには、超高強度レーザー照射に依る磁場生成とそれを用いた電子・陽電子ジェットの制御が、不可欠と考えられる。長友等は、この問題に対して、MHD 化した輻射流体シミュレーションコードを用いた解析が可能であることを示した。

これらの成果によって、今後の具体的な電子・陽電子プラズマ生成の最適化と相対論的電子陽電子プラズマ中の現象の解析を行うための基本的な道具立てが整った。

<引用文献>

- [1] T.E. Cowan *et al.*, Phys. Rev. Lett. **84**, 903 (2000).  
 [2] M. H. Thoma, Rev. Mod. Phys. **81**, 959(2009).

[3] N. Oshima *et al.*, Phys. Rev. Lett. **93**, 195001(2004).

[4] G. Doumy, *et al.* Phys. Rev. E **69**, 026402(2004).

[5] P.A.Dirac, Proc. Roy. Soc. A**167**, 148(1938).

[6] K. Seto, *et al.*, Plasma Fusion Research **6**, 2404099(2011).

[7] I.V. Sokolov, *et al.*, Phys. Plasmas **18**, 093109(2001).

## 5. 主な発表論文等

(雑誌論文)(計13件) すべて査読あり。

Q. Jia, K. Mima, H. Cai, T. Taguchi, H. Nagatomo and X. T. He, Phys. Rev. E **91**, 2015, 023107-1-7. DOI:10.1585/pfr.9.1404118.

Keita Seto, Sen Zhang, James Koga, Hideo Nagatomo, Mitsuo Nakai, Kunioki Mima, Prog. Theor. Exp. Phys. **2014**, 043A01-1-11, DOI: 10.1093/ptep/ptu031.

S. Sakata, H. Nishimura (11 番目), M. Nakai (12 番目), 他 12 名, Rev. Sci. Instrum. **85**, 11D629 (2014). 1-3, DOI:10.1063/1.4893943

S. Kojima, M. Nakai (13 番目), H. Nishimura (14 番目), 他 15 名, Rev. Sci. Instrum. **85**, 11D634 (2014). 1-3, DOI:10.1063/1.3272789

Z. Zhang, H. Nishimura, H. Nagatomo (6 番目), M. Nakai (7 番目), H. Chen (12 番目), 他 20 名, Plasma and Fusion Research **9**, 2014, 1404118-1-4. DOI:10.1585/pfr.9.1404118.

中井光男、有川安信、宇津木卓、西村博明、宮永憲明、疇地宏、Hui Chen、レーザー研究 **43** 巻, 2015, 98-102

H. Chen, M. Nakai, H. Nishimura (14 番目), H. Takabe (18 番目), 他 16 名, New Journal of Physics **15**, 2013, 065010-1-11. DOI:10.1088/1367-2630/15/6/065010.

Z. Zhang, H. Nishimura, T. Namimoto, S. Fujioka, Y. Arikawa, H. Nagatomo, M. Nakai, T. Ozaki, M. Koga, T. Johzaki, A. Sunahara, H. Chen (12 番目), 他 13 名, High Energy Density Physics, Vol. **9**, Issue 3, 2013, 435-438.

K. Seto, H. Nagatomo, J. Koga and K. Mima, Prog. Theor. Exp. Phys. **2013**, 053A01-1-10, DOI:10.1093/ptep/ptt023

T. Moritaka, L. Baiotti, A. Lin, L. Weiwu, Y. Sakawa, Y. Kuramitsu, T. Morita, and H. Takabe, Journal of Physics: Conference Series 454, 2013, 012016-1-12, DOI:10.1088/1742-6596/454/1/012016

[学会発表](計39件)

H. Nishimura, "Quantitative x-ray spectroscopy for energy transport in fast ignition plasma driven with LFEX PW laser" Joint ICTP-IAEA School and Workshop on Modern Methods in Plasma Spectroscopy (23-27 March, 2015), 23 March, @International Center for Theoretical Physics / Trieste / Italy)

A. Morace, "Plasma Mirror technology on a PW, multi-kJ class Laser for application to Fast Ignition research." IAEA conference, Saint Petersburg, Russia (2014).

S. Sakata, "High energy X-ray spectrometer using photo-nuclear reaction" 20th Topical Conference on High-Temperature Plasma Diagnostics (HTPD 2014), InterContinental Hotel Buckhead, Atlanta, Georgia USA.

S. Kojima, "Development of Compton X-ray spectrometer for fast ignition experiment" 20th Topical Conference on High-Temperature Plasma Diagnostics (HTPD 2014), InterContinental Hotel Buckhead, Atlanta, Georgia USA.

H. Chen, "NEW RESULTS ON THE LASER PRODUCED RELATIVISTIC ELECTRON-POSITRON PAIR PLASMA RESEARCH" Inertial Fusion Sciences and Applications (IFSA2013), Nara, Japan 12 September 2013.

T. Moritaka, "Plasma particle-in-cell simulations of pair production experiments using a high-Z target" Fourth International Conference on High Energy Density Physics (ICHED 2013), Saint-Malo, France, June 25-28 2013.

H. Chen, M. Nakai (発表者), "First electron-positron pair experiments using the Osaka LFEX laser" 54th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics Oct.29-Nov.2, 2012 Providence Rhode Island, Rhode Island Convention Center (30 Oct.)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

中井 光男 (NAKAI, Mitsuo)  
大阪大学・レーザーエネルギー学研究センター・教授  
研究者番号: 70201663

### (2) 研究分担者

西村 博明 (NISHIMURA, Hiroaki)  
大阪大学・レーザーエネルギー学研究センター・教授  
研究者番号: 60135754

高部 英明 (TAKABE, Hideaki)  
大阪大学・レーザーエネルギー学研究センター・教授  
研究者番号: 20150352

長友 英夫 (NAGATOMO, Hideo)  
大阪大学・レーザーエネルギー学研究センター・准教授  
研究者番号: 10283813

近藤 公伯 (KONDO Kininori)  
日本原子力研究開発機構・研究主席  
研究者番号: 80225614

### (3) 連携研究者

Hui Chen (CHEN, Hui)  
Lawrence Livermore National Laboratory  
・Physicist