

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 15 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2014

課題番号：23340177

研究課題名(和文)大規模超高強度レーザー生成電子・陽電子プラズマの科学

研究課題名(英文)Plasma Science on Electron-Positron Plasma with Large-scale Intense Lasers

研究代表者

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 7,400,000円

研究成果の概要(和文)：超高強度レーザー装置を用いた相対論的電子陽電子プラズマの研究をリバモア研の実験家H. Chenと行い陽電子発生の最適化などおこなった。理論・シミュレーション手法によりその役割を遂行した。実験は阪大のLFEX超高強度レーザーを用いておこない、論文化した。同時に、Chen博士の方法では対生成の効率が極めて悪いためプラズマのサイズがデバイ長程度にしかならないことから、近未来の24-26ワットのレーザーによる真空崩壊の物理、特に非線形QED効果について理論研究を行った。真空崩壊では約30%程度のレーザーエネルギーが対生成に使われる可能性があり、ガンマ線バーストなどの模擬実験が可能となることを示した。

研究成果の概要(英文)：We have studied the relativistic electron positron plasma production using large-scale ultra-high-intensity laser equipment with experimentalist Dr. H. Chen, Lawrence Livermore National Lab. I have performed optimization of positron generating, etc. We carried out theory and simulation on this subject. We conducted the research with her and published papers on the result of the experiment using high-intensity laser LFEX of Osaka University. Simultaneously, by Dr. Chen's method, since the efficiency of pair creation was very bad and the size of plasma was found to be only the order of the Debye length, We did theoretical research about the physics, especially the nonlinear QED effect of the vacuum breakdown by the laser of 1023-26 W/cm² to be technically realized near future. By vacuum breakdown, about 30% of laser energy might be used for pair creation, and it was shown that a model experiment of such as a gamma-ray burst becomes possible in the near future.

研究分野：プラズマ科学

キーワード：電子・陽電子プラズマ 高強度レーザー 対生成 真空崩壊

1. 研究開始当初の背景

(1) 先行研究として超高強度レーザーによる電子・陽電子の生成の理論的研究を行い、米国物理学雑誌に 2002 年に掲載していた。その後、世界最大のレーザー装置 NIF が完成し、合計 4 本のビームを超高強度とする NIF-ARC 計画が発表され、米国の Hui Chen 博士と共同で実験提案を行い、順位一位で採択された。

(2) そこで、当初の予定ではこの NIF 実験による陽電子生成を目的に掲げ、本申請を行ったが、同時に、阪大に完成しつつあった LFEX という超高強度レーザーによる国際共同実験も含め申請に至り、採択された。理論・シミュレーションによる実験の最適化を日本側が担い、実験は米国リバモア研の Hui Chen 博士のグループと阪大の坂和グループが協力することで体制を整えた。本科研費の申請はその実験の最適化を行う事前の活動と実験データ解析、および、将来の実験提案に向けた理論活動であった。

2. 研究の目的

(1) 実験の提案や解析などのための粒子コード (PIC) に量子電気力学 (QED) 的效果を Monte-Carlo 計算で導入し、超高強度レーザーで生成された相対論的電子による核との直接相互作用による陽電子生成 (Trident process) や、電子が核との相互作用で MeV 以上の制動輻射を放出し、そのガンマ線光子が核と相互作用し対生成を行う (Bethe-Heitler Process) 過程などを取り込んで、プラズマ中での陽電子生成をシミュレーションするコードを作成

(2) そのコードを用いた実験の最適化を行った。実際には、LFEX レーザーは十分制御できる状態になく、パラメータを決めて実験を行うことは難しく、実験結果からシミュレーションと比較してレーザー条件を同定するという研究となった。

(3) Hui Chen 博士が行ってきた数々の世界中のレーザーによる陽電子生成のスケールアップを LFEX、NIF というこれまでにない大出力の超高強度レーザーで伸ばすことが目的で、その結果、エネルギーのべき乗での陽電子数の増大を実証することが目的であった。

(4) 上記の延長として、現在欧州を中心に建設中のさらに強度の高いレーザーによる量子電気力学的な現象の非線形現象の理論的研究も目標に掲げた。

3. 研究の方法

(1) プラズマ物理学で実績のある粒子シミュレーション・コードに超高強度レーザーと

の相対論的相互作用モデルを組み込み、相対論的電子の生成過程を調べた。その分布関数が従来のシミュレーションや実験の結果を再現することを確認。

(2) シミュレーション・コードを 3 次元に拡張。この中に、まずは、Trident, Bethe-Heitler の素過程をその理論的断面積を用いて導入した。かつ、プラズマの運動には長波長電磁場は Maxwell 方程式を直接計算機で解いているので自己磁場生成や両極性電場の効果など、大電流が高エネルギー電子として流れることによるプラズマ効果が矛盾なくシミュレーションできるように作成した。

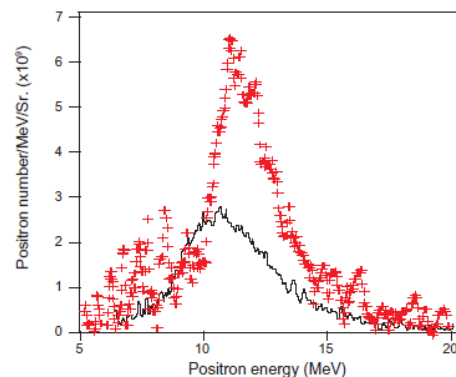
(3) 過去の実験データとの比較を行い、コードの検証を行った。

(4) 非線形 QED 効果の専門家としてロシアの Dubna 原子核国際機構の Alexander Titov 教授との共同研究を開始した。これは、阪大の核物理研究センターの保坂教授達との共同研究ともした。

4. 研究成果

(1) 超高強度レーザーを用いた電子・陽電子生成のシミュレーション研究を行うためのコード開発を行った。量子電磁力学 (QED) 効果をプラズマの標準的な粒子コードに取り込む研究を行った。このために、ガンマ線などの輸送、Monte-Carlo 法による陽電子やガンマ線の生成など多光子 QED 効果も考慮した複雑なコードの作成を行った。

(2) 阪大の LFEX レーザーを用いた陽電子生成実験を米国リバモア研の Hui Chen 博士のグループと行った。その結果、リバモア研の既存の超高強度レーザー Taitan による陽電子のスペクトルを比べると下図の様に LFEX が多量の陽電子を生成することが明らかとなった。



この図で、横軸が陽電子のエネルギーで MeV 単位。縦軸は計測器へ単位角度当たりに入射した単位エネルギー当たりの陽電子の数。陽電子は 12MeV 程度に最大値を持つが、この値は陽電子生成領域の裏面に形成される相対

論的電子運が両極性電場として作る静電ポテンシャルのエネルギー値であることがシミュレーションより明らかとなっている。

(3) 実験では角度分布も計測し、陽電子がビーム状に裏面から放射されていることが明らかとなった。このことから電子・陽電子プラズマはビーム状(ジェット状)にターゲット裏面に放射され、その速度のローレンツ因子は2.0にも達する事が明らかとなった。このローレンツ因子は活動銀河核ジェットなど遠方銀河での不思議な活動現象によるジェットと同じ程度の値である。将来、活動銀河核の宇宙模擬実験が大型レーザーで行われることを示唆した。

(4) 非線形 QED の効果を理論的に研究した。その一例を示したのが下図である。

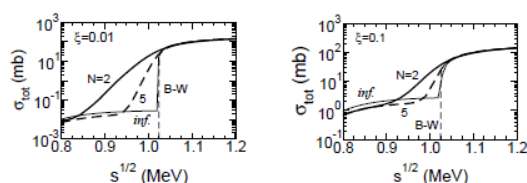


FIG. 1: The total cross section of e^+e^- pair production as a function of the total energy in c.m.s., \sqrt{s} , for the finite pulse with $\Delta = \pi N$. The dashed and thick solid curves correspond to $N = 2$ and 5, respectively. The thin solid curve is for IPA. The thin dashed curve, labelled as B-W, corresponds to Breit-Wheeler process. Left and right panels correspond to $\xi = 0.01$ and 0.1, respectively.

ここで、横軸は2光子の重心系での合計のエネルギーであり、縦軸は光子-光子が真空場と相互作用し電子・陽電子を生成する断面積である。無次元パラメータ ξ はレーザーの強度のルートに比例し、 $\xi=1$ で古典的な電子の振動速度が光速になる。非線形 QED 効果は ξ が大きくなるほど、断面積を $1M\epsilon\zeta$ 以下の領域でも大きくしていく。これは、多光子相互作用の効果である。さらに、短パルスにするほど、線形 QED では閾値以下であった低エネルギー相互作用でもこの Breit-Wheeler 過程と呼ばれる光子から対生成を可能にしてくれることを定量的にしました。

(5) 欧州で建設途上の新世代超高強度レーザーや X 線自由電子レーザーによる非線形 QED 等に関する基礎科学に貢献するべく実験提案を行ってきた。この科研費の成果は次世代のレーザー装置での基礎科学による学術の発展に世界的に貢献する成果を導く。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計6件)

Hui Chen, M Nakai, Y Sentoku, Y Arikawa, H Azech, S Fujioka, C Keane, S Kojima, W Goldstein, B R Maddox, N

Miyanaga, T Morita, T Nagai, H Nishimura, T Ozaki, J Park, Y Sakawa, H Takabe, G Williams and Z Zhang, "New insights into the laser produced electron-positron pairs", New J. Physics 査読あり 15 (2013) 065010 <http://iopscience.iop.org/1367-2630>

Alexander I. Titov, Burkhard Kämpfer, Takuya Shibata, Atsushi Hosaka, Hideaki Takabe Laser pulse-shape dependence of Compton scattering, 査読あり The European Physical Journal D, October 2014, 68:299

H Takabe Scientific Researches on High Intensity Laser Plasma in Asia-Pacific Region, JPS Conf. Proc. 1, 査読あり 015088 (2014) [9 pages]

AI Titov, B Kämpfer, H Takabe and A Hosaka, "Breit-Wheeler process in very short electromagnetic pulses", 査読あり Physical Review A 87, 042106 (2013)

Enhanced Sub-threshold e^-e^+ Production in Short Laser Pulses, A. I. Titov, H. Takabe, B. Kämpfer, and A. Hosaka, 査読あり Phys. Rev. Lett. 108, 240406 (2012)

A.I. Titov, B. Kämpfer, H. Takabe and A. Hosaka, "Neutrino pair emission off electron in a strong electromagnetic field", 査読あり Phys. Rev. D 83, 053008 (2011)

[学会発表](国際会議招待のみ:計7件)

- Theoretical and Computational Modeling of Dense pair Plasma Created by Vacuum Breakdown with Ultra-Intense Lasers, H. Takabe (Plenary speaker), The 2nd ICHEDP Conference, at Peking University, Beijing, China, September 21-24, 2014
- Induced vacuum breakdown and pair plasma production for fundamental and high-energy astrophysics science, H. Takabe (Invited speaker), The 23rd Annual International Laser Physics Workshop, Sofia, Bulgaria, July 14-18, 2014
- Vacuum Polarization, Breakdown and Pair-plasma Creation with Ultra-Intense Lasers - Nonlinear QED Plasmas -, H. Takabe (Invited Talk),

International Symposium on
Non-equilibrium Plasma and
Complex-System Sciences (IS-NPCS),
February 26 (Wed) -28 (Fri), 2014

4. Vacuum Polarization, Breakdown and
Pair-plasma Creation with Ultra-Intense
Lasers,
H. Takabe (Invited Lecture),
Cologne University – Osaka University
Winter School, Osaka University,
February 17-21, 2014
5. Vacuum Breakdown and Pair-Plasma
Creations with Ultra-Intense Lasers
Hideaki Takabe and Toseo Moritaka
(Keynote speech)
International Conference on Plasma
Science and Applications 2013, Singapore,
4-6 December, 2013.
6. Vacuum Breakdown and
Electron-Positron Fireball Production with
Intense Lasers; Modeling Gamma-Ray
Bursts and Quark Gluon Plasma in the
Early Universe
H. Takabe(Invited) , The 5th International
Workshop on Laboratory Astrophysics,
LAW, Weihai, China, August 5-8 , 2013
7. Pair Plasma Production from Matter and
Vacuum
H. Takabe (Invited)
Kick-off Meeting of HIBEF at DESY,
Hamburg, June 4, 2013

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

出願年月日：

国内外の別：

取得状況(計 件)

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

出願年月日：

取得年月日：

国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

【学術論文リスト：Google scholar】

http://scholar.google.com/citations?hl=en&user=Ij9JjsAAAAJ&sortby=pubdate&view_op=list_works

6 . 研究組織

(1)研究代表者

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

(2)研究分担者(なし)

()

研究者番号：

(3)連携研究者

()

研究者番号：