

令和元年6月18日現在

機関番号：37112

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K05637

研究課題名(和文)原子核物理が関与するレーザー・プラズマ相互作用の解明と新しい量子線源の提案

研究課題名(英文) Study on laser-plasma interactions incorporating nuclear physics and proposal of new quantum beam sources

研究代表者

中村 龍史 (Nakamura, Tatsufumi)

福岡工業大学・情報工学部・教授

研究者番号：40318796

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：超高強度レーザーと固体との相互作用により発生する線領域の光子が固体内部を伝播する際に、原子核あるいは原子核電界と相互作用することで陽電子や中性子等の量子線が発生する。そのエネルギー分布や時間空間分布等の特性を調べるため、線輸送過程を取り入れた新しい粒子シミュレーションコードを開発しその解明を行った。その結果、既存の超高強度レーザー光を利用することで、200 MeVを超える準単色陽電子線や短パルス中性子線が発生することなどを明らかにした。これら量子線の特性のレーザー及びターゲットパラメータへの依存性をシミュレーションにより調べ、新しいレーザー駆動量子線源の可能性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、電磁的相互作用を扱う粒子シミュレーションコードに線と原子核との相互作用を取り入れた新しいコードを開発し、それを用いることでレーザー光を固体へ照射することで発生する電子や中性子線の特徴を明らかにした。開発したシミュレーションコードを利用することで、プラズマ運動や輻射発生、原子核反応等を含む多様な高エネルギー密度プラズマ現象の解明が期待できる。また、超高強度レーザーを用いた新しい陽電子線や中性子線の提案により、今後の実験研究への指針を示すことができた。

研究成果の概要(英文)：Intense beams of gamma-rays are generated from solid density plasmas generated by irradiations of ultra-intense laser pulses. By gamma-rays transporting through a solid density target, electron-positron pair creations and photo-nuclear reactions take place. In order to investigate characteristics of positrons and neutrons, we developed a new simulation code by including gamma-ray transport through material into Particle-in-Cell code. Using the code, we have shown that quasi-mono-energetic positron beams with spectral peak energy beyond 100 MeV, and high flux of neutron beams are generated from high-Z material. The beam characteristics dependence on laser and target parameters are explored by numerical simulations. A laser-driven positron beam, and a neutron beam are proposed.

研究分野：プラズマ物理学

キーワード：輻射反作用 レーザー駆動ガンマ線 光核反応 陽電子線 中性子線

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

研究開始当初に申請者らは、超高強度レーザー場と固体との相互作用において輻射反作用効果による電子から輻射へのエネルギー散逸過程を介し、従来の加速器技術では実現不可能なPW(10^{15} W)を超える超高出力の線発生が可能であることを明らかにし、レーザー駆動線源として提案していた[1]。この研究結果により、超高強度レーザー場と物質との相互作用の解明には線のターゲット内での輸送過程の解明が必要であることを認識した。そこで、レーザー・プラズマ相互作用に加えて線の輸送過程も統一的に解くことのできる新しい粒子シミュレーションコードの開発を目指した研究を進めていた。

2. 研究の目的

本研究では、開発の途中であった原子核反応を考慮した粒子シミュレーションコードを完成させ、それを用いた超高強度レーザーと物質との相互作用の解明と、それによる新しい量子線源の提案を目的とした。特に、新しい加速器への応用の可能性も考えられる100MeVを超えるような高エネルギーの単色陽電子線発生や、短パルス中性子源の可能性の検討を目指した。また、新しいシミュレーションコードを用いた数値計算を利用することで、当時建設中であった超高出力レーザー(10PW)装置を利用した実験提案を行うことを目的として研究に着手した。

3. 研究の方法

レーザー・プラズマ相互作用及びプラズマの集団運動を精度良く計算する手法である粒子シミュレーション(Particle-In-Cell)コードに、線と原子や原子核との相互作用をモンテカルロ手法により取り込んだ新しい粒子コードの開発を進めた。具体的には、大規模計算を行うためのコードの高速化と、多様な核種に対する光核反応の導入を行った。高速化は、線のターゲット内部での輸送過程において、電子・陽電子がカスケード的に発生しシミュレーション系内の超粒子数が急激に増大するため、計算時間が充分に取れなかった問題を解決するためである。また、レーザー駆動中性子源の提案においては、ターゲット核種の選択が重要であるため、いくつかの候補となりうるターゲット核種に対し、数値シミュレーションによる中性子発生の評価を行うためである。また光核反応断面積はアメリカ国立標準技術研究所(NIST)が提供しているデータベースを利用した。

4. 研究成果

超高強度レーザーを固体薄膜に照射すると、レーザー照射面においてイオン化により発生する電子をレーザー場が加速することで高エネルギー電子が生成される。レーザー集光強度が 10^{21} W/cm²程度を超えると、生成される高エネルギー電子のエネルギーは100MeVを超え、レーザー照射領域から飛散する。その結果、電荷分離により強い静電界が生成され、飛散した電子が再度レーザー場と相互作用をすることになり、この高エネルギー電子と超高強度場との相互作用で輻射反作用効果が無視できなくなる。その結果、MeVを超える線領域の光子が輻射として放出される。このレーザー駆動線の特性、すなわち発生数や指向性等は、レーザーの集光強度やターゲット種(イオン化電子密度や照射面の膨張プラズマのスケール長)に依存する。これらの線がターゲット内部を伝播する際に、原子核や原子核電場と相互作用することで、陽電子や中性子が発生する。このため、これらの陽電子線や中性子線の特性の解明にはレーザー・プラズマ相互作用による線の特性からその輸送過程までを同時に評価することのできる数値シミュレーションを用いた研究が必要となり、コードの開発とそれによる物理の解明を目指した研究を行った。

まず、陽電子線発生についてまとめる。図1は集光強度が 5×10^{22} W/cm²、パルス長が30fsのレーザーパルスで完全電離を仮定した厚さ1 μ mの炭素薄膜ターゲットに照射した際に発生する陽電子の特性を示している。レーザーのプリパルスにより形成され

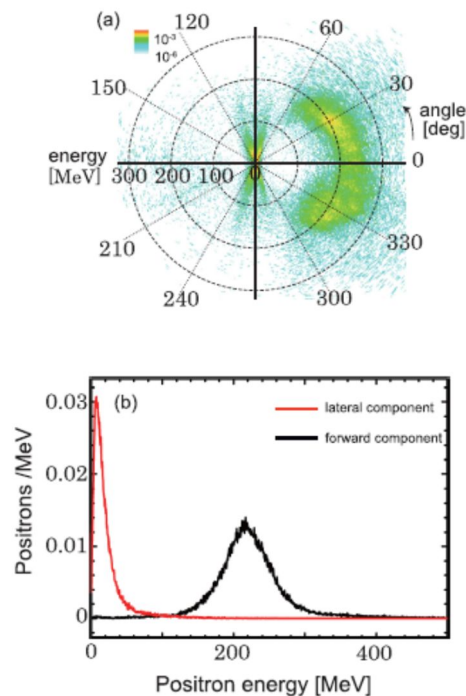


図1 (a)レーザー駆動陽電子線のエネルギー及び放出角度分布。角度はレーザー偏光面内での照射軸からの角度を表す。(b)ターゲット裏面から放出される陽電子(黒線)とターゲット内部に閉じ込められる陽電子(赤線)のエネルギースペクトル。

る膨張プラズマの密度スケール長は $2.5 \mu\text{m}$ としてある。図 1(a)は、陽電子のエネルギー及び角度分布を示している。200MeV を超える高エネルギーの陽電子が発生しており、それらがレーザー偏光面でレーザー照射軸から約 30° の方向に強く放出されていることが分かる。この方向は、レーザー駆動線の発生方向と一致する。同時に、数十 MeV 程度の陽電子がレーザー軸に対して垂直方向、すなわちターゲットの面と平行方向に放出されている。これらは、ターゲット内部で発生した陽電子が裏面を通過する際に、裏面に誘起された強い静電場で加速されると同時に、磁場によるローレンツ力によりターゲット内部方向へ反転させられるためである（図 2 参照）。これらのエネルギー分布を示したのが図 1(b)

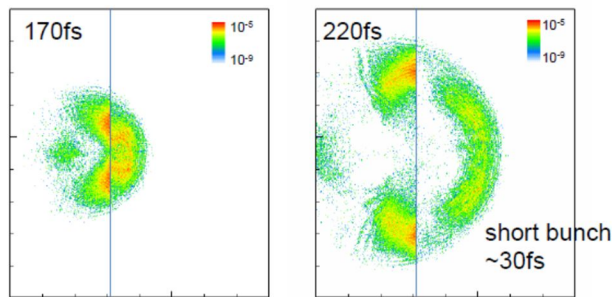


図 2 陽電子数密度の空間分布の時間変化。高エネルギーの陽電子のみがターゲットの裏面（青線で示す）から外部へ放出され、低エネルギーの陽電子は裏面の磁場で曲げられターゲット内部を伝播している。陽電子密度は波長 $1\mu\text{m}$ のレーザー光に対する臨界密度（約 $1 \times 10^{21}/\text{cm}^3$ ）で規格化しており、また座標軸の目盛りは $10\mu\text{m}$ を示す。

である。裏面から放出される成分（黒線）は約 220MeV にピークを持つ準単色ビームとなっている。その相対的なエネルギー広がり（半値半幅とピークエネルギーの比）は 0.17、エネルギー変換効率から評価した準単色の陽電子数は 9×10^4 である。レーザー駆動陽電子線の実験提案を目的として、陽電子線の発生数とエネルギー広がりレーザー及びターゲットパラメータへの依存性を調べた。エネルギー広がり、ターゲットの厚さと共に大きくなり、レーザー強度には強く依存しない。これは、陽電子ビームが角度広がりを持つため、ターゲット厚の増加がターゲット裏面での加速時刻のずれ、それによるシース場の強度の違いが出てくるためである。また、陽電子数に関しては、計算した $40\mu\text{m}$ までの範囲ではターゲット厚に比例し、レーザー強度の 2.5 乗に比例するスケールングが得られた。スケールングの詳細と、ターゲット種、シミュレーションで仮定する初期電子密度等への依存性については論文[2]に示してある。

次に、レーザー駆動線と原子核との光核反応を介した中性子発生についてまとめる。光核反応による中性子発生では、ターゲット核種の選択が重要になる。核種の違いにより、反応断面積のエネルギー依存性、反応閾値が異なるためである。また Be などの低 Z 物質では、ターゲットの電子密度が低くなるためレーザー・プラズマ相互作用により発生する線数も変化する。これらを総合的に評価するために開発したコードによる数値シミュレーションを行った。計算機のメモリの制限により、ターゲットの厚さを $1\mu\text{m}$ とし、それに強度が $5 \times 10^{22} \text{ W}/\text{cm}^2$ パルス長が 30fs のレーザー光を照射したときの、発生中性子数のターゲット核種依存性をプロットしたのが図 3 である。Be は反応閾値が低く比較的効率的に中性子を発生できる。しかし、全反応面積で有利な高 Z 物質のほうが発生中性子は多いことが分かった。

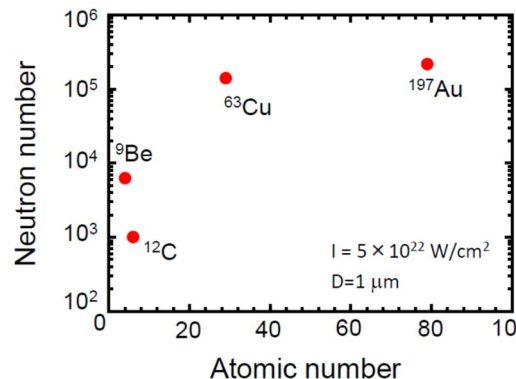


図 3 レーザー駆動線とターゲット内の原子核との光核反応により発生する中性子数のターゲット核種依存性。ターゲット厚は計算機リソースの制限のため $1\mu\text{m}$ としてある。

これらの研究により、超高強度レーザー場を固体ターゲットに照射することで、短パルス性、高指向性あるいは順単色性などの特徴を持つ線、陽電子線、中性子線が発生すること、そしてこれらの特性がレーザー及びターゲットのパラメータの選択によりある程度制御できることが示された。これにより、レーザー駆動の新しい陽電子線や中性子線の可能性を提案した。

< 引用文献 >

- [1] T.Nakamura, J.Koga, T.Esirkepov, M.Kando, G.Korn, S.Bulanov, High-power gamma-ray flash generation in ultraintense laser-plasma interactions, Phys. Rev. Lett., vol. 108, pp.195001-1-5 (2012).
- [2] T.Nakamura, T.Hayakawa, Quasi-monoenergetic positron beam generation from ultra-

intense laser-matter interactions, Physics of plasmas, vol. 23, pp. 103109-1-7 (2016),

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 3 件)

T.Hayakawa, M.Kusakabe, H.Ko, M.-K.Cheoun, G.J.Mathews, A.Tolstov, K.Nomoto, S.Chiba, M.Usang, M.Hashimoto, M.Ono, T.Kajino, T.Nakamura, K.Nakamura, M.Kando, H.Kotaki, Neutrino process with primitive meteorites and high power laser, AIP conference proceedings, vol. 1947, pp. 20021 (2018), 査読有,
DOI:10.1063/1.5030825

T.Hayakawa, T.Nakamura, H.Kotaki, M.Kando, T.Kajino, Explosive nucleosynthesis study using laser driven gamma-ray pulses, Quantum beam science, vol.3, pp. 1-1-12 (2017), 査読有,
DOI:10.3390/qubs1010003

T.Nakamura, T.Hayakawa, Quasi-monoenergetic positron beam generation from ultra-intense laser-matter interactions, Physics of plasmas, vol. 23, pp. 103109-1-7 (2016), 査読有,
DOI:10.1063/1.4965914

〔学会発表〕(計 4 件)

中村龍史、LAD 方程式における Schott 項について、日本物理学会 第 74 回年次大会(2019)
T.Nakamura, Radiation reaction with quantum effects on an electron under intense laser field, European conference on laser-matter interactions 2018 (2018).

中村龍史、早川岳人、超高強度レーザー生成プラズマからの量子線発生、日本物理学会 第 72 回年次大会 (2017)

T.Nakamura, T.Hayakawa, Laser-driven positron generation via laser driven-gamma rays, US-JAPAN workshop on laser-plasma interactions (2016).

T.Nakamura, T.Hayakawa, Laser-driven quantum beams from ultra-intense laser-matter interactions, Nuclear photonics 2016 (2016).

〔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：
国内外の別：

取得状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号（8桁）：

(2)研究協力者

研究協力者氏名：早川岳人

ローマ字氏名：Hayakawa Takehito

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。