

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 28 日現在

機関番号：37112

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25400540

研究課題名(和文) 超高強度レーザー駆動ガンマ線発生と光核反応による多様な量子ビーム発生

研究課題名(英文) Laser-driven gamma-rays and various quantum beam generations via photo-nuclear reactions

研究代表者

中村 龍史 (Nakamura, Tatsufumi)

福岡工業大学・情報工学部・准教授

研究者番号：40318796

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：超高強度レーザーと物質との相互作用では、放射反作用効果が無視できなくなる。このような場合、高密度のガンマ線が発生することが指摘されている。本研究では、ガンマ線の発生過程から輸送過程までをコンシステントに解くための新しい粒子シミュレーションコードの開発を行った。ここでは、レーザープラズマ相互作用およびガンマ線発生過程はParticle-in-Cell手法を用い、発生したガンマ線の物質中での輸送過程はモンテカルロ手法により導入した。開発したコードは放射線輸送コードPHITSにより精度の検証を行った。このコードを使い、超高強度レーザー生成プラズマからの陽電子線の可能性について検討した。

研究成果の概要(英文)：In interactions between ultra-intense laser beams and matters, radiation reaction effect plays an important role. In this regime, it was shown that high density gamma-rays are generated by laser-plasma interactions. In this project, we developed new particle code which realizes consistent analyses from laser-plasma interaction to gamma-ray transport in matters. We used Particle-in-Cell algorithm to solve the both laser-plasma interaction and gamma-ray generation via radiation reaction effect. The gamma-ray transport processes are modelled by using Monte-Carlo method. The developed code is benchmarked by using Particle and Heavy Ion Transport code System (PHITS). By using our code, we have shown that very energetic positron beams are generated from laser-plasmas, which could open a possibility of laser-driven positron source.

研究分野：プラズマ物理学、高エネルギー科学

キーワード：laser-plasma interaction gamma-ray source radiation transport pair-creation PIC simulation radiation reaction

1. 研究開始当初の背景

レーザーの集光強度は着実に上昇を続け、近い将来 $10^{22}\text{W}/\text{cm}^2$ を超える超高強度レーザーが実現し、レーザーと物質との相互作用に関する研究は新しい領域に入ろうとしている。そこでは電子運動における放射反作用の効果が顕著になることが指摘されている。放射反作用は、加速度運動を行う荷電粒子が電磁波を放射する際に、その反作用としてエネルギーを失う効果である。この放射反作用効果が無視できない場合、レーザー・プラズマ相互作用で発生する電子やイオンのエネルギーが低強度領域のスケーリング則に比べ減少することや、電子-陽電子対生成が著しく増加する可能性が指摘されている。

このような状況で、申請者は放射反作用を介したエネルギー輸送過程の解明に着目することで、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(X線)発生が可能であることをシミュレーションにより指摘した。このような条件下では、10MeV を超える線が大量に生成される結果、プラズマ内で2核子系以上の原子核との光核反応が起こり、中性子と新たな同位体が生成される。また中性子自身もプラズマ内で核反応を引き起こす。したがって、超高強度レーザーと物質との相互作用の解明には、レーザー・プラズマ相互作用に加え、光核反応等の原子核反応を取り入れたシミュレーションコードの構築が必要な状況である。しかしこれらの両者をコンシステントに扱うことのできるシミュレーションコードは、研究開始当初には存在しなかった。このため、本研究において新しいレーザー核物理コードの開発に着手した。

2. 研究の目的

本研究では、上記の原子核反応を取り入れた新しい粒子シミュレーションコードの構築を行う。それにより、超高強度線源を実現するための現実的なパラメータの模索、中性子や陽電子等の新しいレーザー駆動量子ビーム源の可能性を探求を目的とする。

具体的には次の二つの点を明らかにする。一つは、超高強度レーザーと物質との相互作用を解明するための新しいシミュレーションコードの開発と、それを利用した原子核反応を介した多様な量子ビーム発生の解明。もう一つは、線の3次元放射特性の解明とレーザー駆動ガンマ線の実証のための実験提案である。

超高強度レーザーと物質との相互作用においてレーザーから線へのエネルギー輸送が支配的になると、プラズマ中での線と原子・原子核との非弾性散乱によるエネルギー輸送・緩和過程が無視できなくなる。そこで、光核反応((γ, n) 、 (γ, p))、その生成

粒子による原子核反応及び、電子-陽電子対生成等の反応過程をレーザープラズマの集団効果を計算する粒子シミュレーションコードに取り入れることで、原子核反応を取り込んだ粒子シミュレーションコードを開発し、プラズマ中のエネルギー輸送の詳細を解明するとともに、レーザー駆動の中性子源、陽電子線源の可能性を検討する。

3. 研究の方法

レーザーと物質との相互作用の解明において、線と原子・原子核との相互作用を考慮するため、申請者が開発したレーザー・プラズマ相互作用を扱う粒子シミュレーションコードに PHITS 等の核反応シミュレーションコードの技術・データベースを取り入れた新しいシミュレーションコードの開発を行う。このコードを用いて、レーザー駆動ガンマ線の3次元放射角分布等を明らかにすると同時に、原子力機構が所有するレーザー装置を使ったレーザー駆動ガンマ線源の実証実験を提案する。また、高エネルギー線のプラズマ中での光核反応により発生する中性子や、電子-陽電子対生成による陽電子等の多種の量子線へのエネルギー輸送を解明し、新たなレーザー駆動量子線源の可能性を探る。

4. 研究成果

1) 原子核反応による量子線発生を解明するため、まずレーザー駆動線の放射特性の詳細を3次元シミュレーションを用いて明らかにした。放射反作用により発生する線の特徴は、レーザー照射面に発生するプリプラズマの密度分布や、レーザーの集光パターン、レーザーパルス長にも依存する。そこで、効果的な線発生に必要な条件を明らかにした。ターゲット前面のプリプラズマの分布はレーザー・プラズマ相互作用において重要なパラメータであり、線へのエネルギー変換効率にも大きな影響を与える。このため、効果的な線発生のためには、スケール長が数

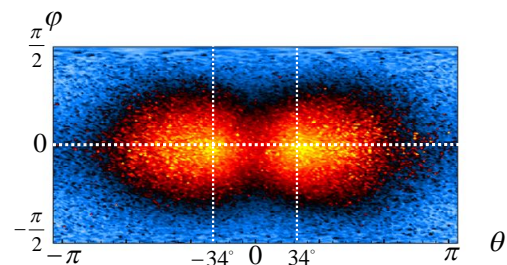


図1: 3次元シミュレーションにより計算した線放出角度分布。 $\phi = 0$ はレーザー偏光面を、 θ は面内でのレーザー軸からのずれを表す。発生した線はレーザー偏光面で強く、かつレーザー軸から 34° 程度ずれた方向に強く発生していることが分かる。

ミクロン程度のプリプラズマが必要であること、また必要なスケール長は照射レーザーの強度フラックスと共に増大することが分かった。また、理化学研究所の「京」コンピュータを利用した大規模な3次元計算を行うことで、線発生効率の定量的評価及び3次元の放射角分布の解明を行った。3次元計算では、2次元計算に比べ若干変換効率が減少するが、それでも10PWのレーザーパルスに対して最適な条件下では20%程度の変換効率が実現可能であることが明らかとなった。また、線の放射分布はレーザーの偏光面で強く、かつその面内でレーザー軸から $\pm 34^\circ$ 程度の方向に強く放出されることが明らかとなった(図1参照)。すなわち、2方向のビーム状に放出されることが3次元計算により明らかとなった。これらの研究により、レーザー及びプラズマの条件を制御することで、レーザー駆動線の放出角や出力をある程度制御可能である事が明らかとなった。これにより、レーザー駆動線を利用した新しい量子線発生の可能性が大きく開けたものと考えている。

2) レーザー・プラズマ相互作用により発生する線の輸送過程を取り込んだ新しい粒子シミュレーションコードの開発を行った。上に示したように、放射反作用過程が無視できないような強度領域のレーザー場とプラズマとの相互作用では、レーザーエネルギーの数10%が線領域の輻射エネルギーへと変換される。このため、レーザー・プラズマ相互作用の解明には、線によるエネルギー輸送の解明が必要となる。すなわち、線光子の物質中での輸送過程を考慮する必要がある。レーザー・プラズマ相互作用をコンシステントに解くことのできるシミュレーションコードとして粒子シミュレーションコード(Particle-in-Cellコード)が確立している。このコードにモンテカルロ手法を用いて線の輸送過程を取り込むことで、新しいプラズマ核物理コードの開発に着手した。具体的には、線光子も粒子コード内の荷電粒子と同様に超粒子として扱うことで、線の発生及び輸送過程を取り込んだ。線の輸送過程としては、コンプトン散乱、原子核電界を介した電子・陽電子対生成、(γ 、 n)(γ 、 p)等の光核反応過程を取り込んだ。これらの線輸送サブルーチンは、日本原子力研究開発機構が中心となり開発を進めている放射線輸送コード Particle and Heavy Ion Transport code System (PHITS) を用いて計算精度の検証をおこなった。

3) 開発したプラズマ核物理コードを用いて超高強度レーザーと物質との相互作用の解明に着手した。特に、輻射反作用線を介して発生する陽電子に着目し、新しい量子線源の可能性について検討した。線と原子核電界との相互作用による電子・陽電子対生成過

程により陽電子が発生する。その放射方向は高エネルギーの線に対しては、線の伝播方向とほぼ等しくなる。放射反作用線は、図1に示すようにレーザー軸から 30° 程度ずれた方向に強い指向性を持って発生するため、陽電子も同様の指向性を持って発生すると考えられる。また、レーザー・プラズマ相互作用により生成される高エネルギー電子が、ターゲット裏面から放出されることでターゲット裏面に静電界が誘起される。この静電界はシース電界と呼ばれ、ターゲット裏面に付着している陽子等のイオンを加速するためにも利用されている。陽電子は電荷が正で、かつイオンに比べ遥かに質量が小さいため、シース場により効率的に加速されることが予想される。これらのことを開発した新しいシミュレーションコードをもちいて調べ、集光強度が $5 \times 10^{22} \text{W/cm}^2$ 程度のレーザーパルスを使うと、200MeVを超える陽電子が発生することが分かった。またエネルギースペクトルも高エネルギー部にピークを持つことが明らかとなった。このような新しい特性を持った陽電子はレーザー駆動の新しい陽電子線源としても今後期待できる。この点については、今後の研究にて解明する予定である。

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 9 件)

- 1) T.Nakamura and T.Hayakawa, Laser-driven gamma-ray, positron, and neutron source from ultra-intense laser-matter interactions, Physics of Plasmas, vol. 22, pp. 083113 (2015) 査読有, DOI:10.1063/1.4928889.
- 2) T.Nakamura and T.Hayakawa, Numerical modeling of quantum beam generation from laser-matter interactions, Laser and Particle Beams, vol. 33, pp. 151 (2015) 査読有. DOI:10.1017/S0263034615000269
- 3) M.Nishiuchi, I.Choi, H.Daido, T.Nakamura, A.Pirozhkov, (以下16名), Projection imaging with directional electron and proton beams emitted from an ultrashort intense laser-driven thin foil target, Plasma Physics and Controlled Fusion, vol. 57, pp. 025001 (2015) 査読有. DOI:10.1088/0741-3335/57/2/025001.
- 4) T.Esirkepov, J.Koga, A.Sunahara, M.Nishikino, T.Nakamura, 他14名(全11番目), Prepulse and amplified spontaneous emission effect on the

- interaction of petawatt class laser with thin solid target, Nuclear Instruments and Method A, vol. 714, pp. 150 (2014) 査読有, DOI: 10.1016/nima.2014.01.056.
- 5) 中村龍史, 粒子シミュレーションにおける輻射放出モデル, プラズマ核融合学会誌, vol. 90, pp. 419 (2014) 査読無.
 - 6) 中村龍史, 高強度レーザーによる超高出力ガンマ線発生、放射線化学, vol. 95, pp. 11(2013) 査読無
 - 7) H.Azechi, K.Mima, S.Shiraga, S.Fujioka, T.Nakamura, 他 31 名(全 17 番目), Present status of fast ignition realization experiment and inertial fusion energy development, Nuclear Fusion, vol. 53, pp. 104021 (2013) 査読有, DOI:10.1088/0029-5515/53/10/104021.
 - 8) A.Faenov, M.Kando, J.Koga, T.Esikepov, T.Nakamura, 他 15 名, Generation of quantum beams in large clusters irradiated by super-intense, high-contrast femtosecond laser pulses, Contribution to Plasma Physics, vol. 53, pp. 148, (2013) 査読有, DOI:10.1002/ctpp.201310027.
 - 9) M.Lobet, M.Kando, J.Koga, T.Esirkepov, T.Nakamura, A.Pirozhkov, S.Bulanov, Controlling the generation of high frequency electromagnetic pulses with relativistic flying mirrors using an inhomogeneous plasma, Physics Letters A, vol. 377, pp. 1114 (2013) 査読有 DOI:10.1016/j.physleta.2013.02.042.
- 〔学会発表〕(計 11 件)
- 1) 中村龍史, 早川岳人, レーザー生成プラズマからの準単色陽電子線発生、日本物理学会、第 71 回年次大会、東北福祉大学、(2016 年 3 月 21 日).
 - 2) 中村龍史, 高強度レーザーによる多様な量子ビーム発生、第 2 回「京」を中核とする HPCI システム利用研究課題成果発表会、日本科学未来館、(2015 年 10 月 26 日)
 - 3) T.Nakamura and T.Hayakawa, Transport of laser-driven gamma-rays in ultra-intense laser-matter interactions, 9th international conference on inertial fusion science and applications, Seattle, USA, Sept. 22, 2015.
 - 4) T.Nakamura and T.Hayakawa, Generation and transport of gamma-rays in ultra-intense laser-matter interactions, 42nd EPS conference on plasma physics, Lisbon, Portugal, June 24, 2015.
 - 5) 中村龍史, 早川岳人, レーザー駆動線と物質との相互作用、日本物理学会、第 70 回年次大会、早稲田大学、(2015 年 3 月 22 日).
 - 6) 中村龍史, 高強度レーザーを使った新しい高出力ガンマ線源の提案、第 1 回「京」を中核とする HPCI システム利用研究課題成果発表会、コクヨホール、(2014 年 10 月 31 日)
 - 7) T.Nakamura, Propagation of intense electromagnetic field in gas-media, 17th conference on network based information systems, Salerno, Italy, Sept. 11, 2014.
 - 8) T.Nakamura and T.Hayakawa, Numerical study on ultra-intense laser-matter interactions, 33rd European conference on laser matter interactions, Paris, France, Sept. 7, 2014.
 - 9) 中村龍史, 砂原淳, 西原功修, レーザー生成プラズマからの E U V 光発生に関するシミュレーション研究、日本物理学会、第 69 回年次大会、東海大学、(2014 年 3 月 27 日)
 - 10) 中村龍史, 高出力ガンマ線源の提案、「京」を中核とする HPCI システム利用研究課題 中間報告会、タイム 24 ビル、(2014 年 10 月 3 日)
 - 11) T.Nakamura, J.Koga, T.Esirkepov, M.Kando, G.Korn, S.Bulanov, Laser-driven gamma-ray source via radiation reaction effect, 8th international conference on inertial fusion science and applications, Nara, Japan, Sept. 11, 2013.
6. 研究組織
- (1) 研究代表者
中村 龍史 (NAKAMURA TATSUFUMI)
 福岡工業大学 情報工学部・准教授
 研究者番号：40318796

(2)研究分担者

()

研究者番号：

(3)連携研究者

早川 岳人 (HAYAKAWA TAKEHITO)
日本原子力研究開発機構 量子ビーム応
用研究部門・上席研究員
研究者番号：70343944