

令和 3 年 6 月 3 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17H02812

研究課題名(和文) ナノ構造体による準単色陽子ビームの生成とコンパクト中性子源の開発

研究課題名(英文) generation of quasisimonoenergetic proton beam by nano-structured target

研究代表者

村上 匡且 (Masakatsu, Murakami)

大阪大学・レーザー科学研究所・教授

研究者番号：80192772

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究を通して得られた一連の成果は、マイクロバブル爆縮という極めてユニークな物理コンセプトが世界に大きなインパクトを与えたこと、そして相対論から量子論に至る幅広い基礎研究プラットフォームを形成することで多種多様な研究へと発展し得ることを示唆している。今後、この新たな物理現象を通じてレーザー科学・高エネルギー密度物理学・宇宙物理学等における新たな研究潮流の創生が期待される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来、電子・陽電子の対生成は超高強度のレーザーの対向照射による光子-光子衝突が議論されてきた。これに対し、今回のように“球収縮による幾何学的圧縮効果”を利用して“角砂糖大で数百kg”に匹敵する超高密度にまでプロトンを圧縮し、その結果生成される超高静電場により電子・陽電子対生成雪崩を誘導しようという物理コンセプトは世界初であり類似研究・先行研究は一切無い。

研究成果の概要(英文)：The series of results obtained through this research is that the extremely unique physical concept of microbubble implosion has given a great impact to the world, and that it forms a wide range of basic research platforms from relativity to quantum theory. It suggests that it can develop into a wide variety of research. In the future, through this new physical phenomenon, it is expected that Leh will create a new research trend in the science, high energy density physics, astrophysics, etc.

研究分野：高エネルギー密度物理

キーワード：マイクロバブル物理の解明

1. 研究開始当初の背景

現代物理の中でも、とりわけ量子電磁力学(QED)の延長線上にある“シュウィンガー極限電場”付近で起こるとされる電子・陽電子対生成雪崩(cascade)現象は、未だ解明されていない未踏の挑戦的研究領域である。しかし、この現象を通常議論されている光子同士の衝突を使い実験するに、現在のレーザー技術で達成される最大照射強度で、さらに一千万倍が必要とされている(図1)。本報告者は、ミクロンサイズのバブル(空洞)構造を内部に持つ固体ターゲットを超高強度・超短パルスレーザーで照射することで、シュウィンガー極限電場を達成し得る物理機構を発見し「マイクロバブル爆縮」と命名した(図2)。G. Mourou(ノーベル物理学賞 2018)が発明したレーザー光増幅法によって、超高強度場に絡む様々な基礎実験が可能となってきた。しかし、現代物理(量子電磁力学:QED)の枠を超えて新たな未踏領域へと歩を進めるには、電場の値をシュウィンガー極限と呼ばれる閾値にまで増大させることが必要とされる。然るに、その実現に向け殆んど研究者が想定する「レーザービーム同士の対向照射(即ち、光子と光子の衝突)」というアプローチを採用すると、レーザー照射強度において未だ6~7桁足りないのが実情である。これに対し、本申請者は2018年春「マイクロバブル爆縮による超高電場の生成」という新たな物理原理を発表した。同原理は「プラズマを媒介することでレーザーの持つ電場を空間・時間双方で圧縮する」という意味において画期的な発案となった。さらに2019年春、同原理に基づいて「原理的に現在のレーザー技術でシュウィンガー極限近傍の超高強電場を実現できる」ことを理論モデルと3次元粒子シミュレーションを使って明らかにした。本研究の特色・着眼点としては、従来、電子・陽電子の対生成は超高強度のレーザーの対向照射による光子-光子衝突が議論されてきた。これに対し、今回のように“球収縮による幾何学的圧縮効果”を利用して“角砂糖大で数百 kg”に匹敵する超高密度にまでプロトンを圧縮し、その結果生成される超高静電場により電子・陽電子対生成雪崩を誘導しようという物理コンセプトは世界初であり類似研究・先行研究は一切無い。

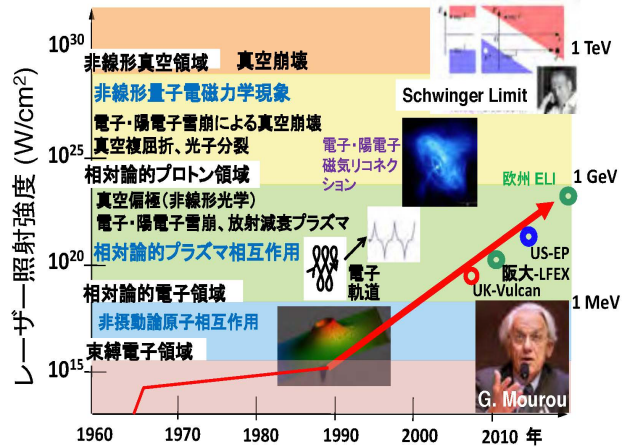


図1 Mourou ダイアグラム

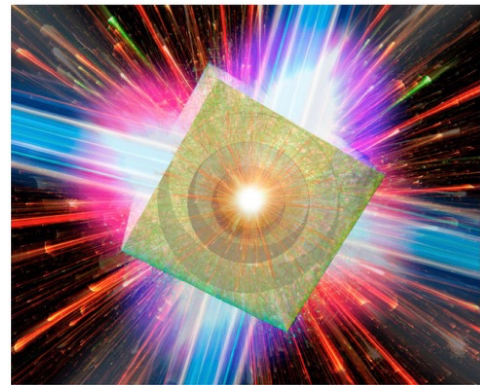


図2 マイクロバブル爆縮の概念図

2. 研究の目的

マイクロバブル爆縮の原理は以下のようなものである。(1)まず、水素含有固体ターゲット中に直径数ミクロン程度のバブル構造をこしらえておく。(2)この固体を $10^{20} \sim 10^{22} \text{ W cm}^{-2}$ 程度の超高強度レーザーで照射すると $10 \sim 100 \text{ MeV}$ (メガ電子ボルト) の高速電子が生成される。(3)この高速電子は固体内だけでなくバブル内部をも満たす。(4)これら電子が作る $10^{13} \sim 10^{15} \text{ V/m}$ 程の強力な球対称静電場によってバブル境界付近のプロトンのバブル中心に向けて加速・爆縮し、最大速度が高速の半分程度に達する。(5)バブル表面付近のプロトン中心からの距離がナノメートルサイズになるまで収縮が続き、この時のプロトンの最大圧縮密度、固体密度の数十万~百万倍という前人未踏の領域に達することがわかった。こうしてナノサイズの超高密度プロトン球が 0.01 フェムト秒 という極短時間に形成されることを理論および3次元シミュレーションから判明した。本研究の目的は、第一に、マイクロバブル爆縮というこの全く新しい物理コンセプトにより、シュウィンガー極限電場近傍における電子・陽電子対生成雪崩物理を解明する。第二に、本研究を通じて、「バブル爆縮」原理実証実験に向けた理論設計を行う。

3. 研究の方法

まず理論モデル構築と併せて3次元MDシミュレーションを行う。ついで、これらのデータを基にしてロシア側でQED計算を組み込んだ3次元粒子シミュレーション(Particle-in-Cell: PIC)により電子・陽電子対生成に対する定量的評価を行い、これらを互いにフィードバックをか

けながら、全体的な物理を解明してゆく。また、これと併せて、近未来的に原理実証実験を行うことを想定した理論設計を作り上げる。理論モデル構築と併せて3次元 MD シミュレーションを行う。ついで、これらのデータを基にして QED 計算を組み込んだ 3 次元粒子シミュレーション (Particle-in-Cell: PIC) により 電子・陽電子対生成定量的評価を行い、これらを互いにフィードバックをかけながら、全体的な物理を解明していく。また、これと併せて、近未来的に原理実証実験を行うことを想定した理論設計を構築する。

4. 研究成果

本研究を通して得られた一連の成果は、マイクロバブル爆縮という極めてユニークな物理コンセプトが世界に大きなインパクトを与えたこと、そして相対論から量子論に至る幅広い基礎研究プラットフォームを形成することで多種多様な研究へと発展し得ることを示唆している。今後、この新たな物理現象を通じてレーザー科学・高エネルギー密度物理学・宇宙物理学等における新たな研究潮流の創生が期待される。相対論的分子動力学手法 (MD) を採用した三次元粒子シミュレーションにより得られた初期半径 $1\mu\text{m}$ のバブル爆縮最大圧縮時の電場プロファイルを示したことからナノメートルという極小スケールで、シュウィンガー極限電場まであと一桁のところまで迫っていることがわかった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 6件/うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 Myles-Allen Oosa, Masakatsu MURAKAMI	4. 巻 27
2. 論文標題 Generation of quasi-monoenergetic ions using optimized hollow nano spheres	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 033103: 1 - 7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5132822	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 J.K. Koga, M. Murakami, A. Arefiev, and Y. Nakamiya	4. 巻 4
2. 論文標題 Probing and possible application of the QED vacuum with microbubble implosions induced by ultra-intense laser pulses	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Matter Radiation. Extremes	6. 最初と最後の頁 034401: 1 - 7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5086933	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 M. Murakami, A. Arefiev, M. A. Zosa, J. K. Koga, and Y. Nakamiya	4. 巻 26
2. 論文標題 Relativistic proton emission from ultrahigh- energy-density nanosphere generated by microbubble implosion	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 043112: 1 - 8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5093043	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 M. Murakami, A. Arefief, M-A. Zosa	4. 巻 8
2. 論文標題 Generation of ultrahigh field by micro-bubble implosion	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 7537: 1 - 10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-018-25594-3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 H. C. Wang, S. M. Weng, M. Liu, M. Chen, M. Q. He, Q. Zhao, M. Murakami, and Z. M. Sheng	4. 巻 25
2. 論文標題 Ion beam bunching via phase rotation in cascading laser-driven ion acceleration	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 083116 :1 - 6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5051522	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 J.J. Honrubia, A. Morace, M. Murakami	4. 巻 2
2. 論文標題 On intense proton beam generation and transport in hollow cones	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Matter and Radiation at Extremes	6. 最初と最後の頁 28-36
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.mre.2016.11.001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Yogo, K. Mima, N. Iwata, S. Tosaki, A. Morace, Y. Arikawa	4. 巻 7
2. 論文標題 Boosting laser-ion acceleration with multi-picosecond pulses	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 42451: 1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/srep42451	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Masakatsu Murakami and Daiki Nishi	4. 巻 2
2. 論文標題 Optimization of laser illumination configuration for directly driven inertial confinement fusion	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Matter and Radiation at Extremes	6. 最初と最後の頁 55-68
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.mre.2016.12.002	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 7件 / うち国際学会 7件）

1. 発表者名 村上匡且
2. 発表標題 マイクロバブルを使った超高場の生成とシュウインガー極限への挑戦
3. 学会等名 プラズマ核融合学会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 M. Murakami
2. 発表標題 Generation of ultrahigh field by micro bubble implosion
3. 学会等名 APS-DPP（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Murakami, A. Arefiev, M.A. Oosa
2. 発表標題 Ultrahigh field generation by micro bubble implosion
3. 学会等名 ECLIM2018（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 村上匡且
2. 発表標題 マイクロバブル爆縮による超高場の生成
3. 学会等名 日本プラズマ核融合学会年会（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Murakami
2. 発表標題 Generation of ultrahigh field by micro-bubble implosion
3. 学会等名 3rd International Conference on Matter and Radiation at Extreme (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masakatsu Murakami and Javier Honrubia
2. 発表標題 Instant Heating and Proton Acceleration with nm to um Targets
3. 学会等名 2nd International Conference on Matter and Radiation at Extreme (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Masakatsu Murakami and Myles-Allen Zosa
2. 発表標題 Advanced Neutron-Free Proton-Boron Inertial Fusion Target Design
3. 学会等名 10th International Conference on Inertial Fusion Sciences and Applications (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Masakatsu Murakami and Myles-Allen Zosa
2. 発表標題 Quasimonoeenergetic Proton Generation for Compact Neutron Sources
3. 学会等名 1st Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 M. Murakami and M-A. Zosa
2. 発表標題 Expansion of Non-Quasi-Neutral Limited Plasmas Driven by Two-Temperature Electron Clouds
3. 学会等名 APS (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------