

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 20 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420911

研究課題名(和文) レーザー加速陽子のスピン偏極の可能性

研究課題名(英文) Possibility of spin polarization of laser-accelerated protons

研究代表者

余語 覚文 (YOGO, Akifumi)

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：50421441

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：高強度レーザーを薄膜に集光すると、レーザー電磁場と薄膜プラズマの相互作用により1ミクロンあたり100万ボルトに達する強力な電場が発生し、これにより100万電子ボルト級の陽子が加速される。同時に、電場を形成する電子流によりキロテスラ級の強力な磁場が発生すると予想される。この磁場により加速された陽子の核スピンの偏極されることを実証することを目指した。

阪大レーザー研に設置された世界最高強度レーザー(LFEX)を用いた実験で、開発したエネルギー分析器により5000万電子ボルトの陽子加速に成功したが、核スピン偏極は実証できていない。今後も研究を継続する。

研究成果の概要(英文)：When a high-intensity laser is focused on the thin film, a strong electric field reaching a few million volts per micron is generated by the interaction of the laser electromagnetic field and the thin-film plasma. This electric field accelerates protons up to a few million electron volts. At the same time, a kilotesla-class strong magnetic field is expected to be induced by the flow of electrons. We aimed to demonstrate nuclear spins of accelerated protons are polarized by the magnetic field.

In experiments with the world's highest intensity laser (LFEX), protons were successfully accelerated up to 50 million electron volts, which was analyzed by the ion-energy spectrometer developed in this study. However, nuclear spin polarization has not been demonstrate. We continue the investigation.

研究分野：レーザー粒子加速

キーワード：レーザープラズマ相互作用 高強度レーザー 高エネルギー密度科学

1. 研究開始当初の背景

レーザー駆動イオン加速では、薄膜に集光された高強度レーザー ($> 10^{18}$ W/cm²) の進行方向に電子が加速され、薄膜の裏面にイオン加速電場が発生する。このとき、還流電子の運動により、薄膜裏面には $10 \sim 100$ メガガウスにおよぶ強力なトロイダル状の磁場が発生するとされている。この強力な磁場が、加速された陽子の核スピンに対して影響を与えうることは実験的に確かめられておらず、研究開始当初、他に類似の研究例は無かった。

2. 研究の目的

本研究では、薄膜の裏面に発生した強力な磁場を通過したレーザー加速イオン (陽子) がスピン偏極している可能性を探求することを目的とし、スピン偏極の可能性の是非も含めて、研究としての将来性を判断するための原理実証研究を計画した。しかしながら、研究開始後に、同等のレーザー装置を用いた実験で陽子のスピン偏極が十分に測定されなかったことを示す論文 (Phys. Plasmas **21**, 023104 (2014)) が発表されたため、より高出力のレーザーによる実験を実施すべく計画の大幅な変更を行った。なお、研究代表者は、本研究期間の途中に、大阪大学レーザーエネルギー学研究所 (レーザー研) に転籍し、レーザー研に設置された世界最高強度レーザー LFEX を使用してレーザーイオン加速の実験を実施する機会を得たため、高出力レーザーに対応したイオン分析装置の開発や、イオン加速スケールリング則の構築などを開始し、将来の高度な実験研究に備えることとした。

3. 研究の方法

(開始当初に計画した研究方法) 日本原子力研究開発機構・関西光科学研究所に設置された 10TW レーザー装置: JLITE-X を使用して、集光強度 10^{18} W/cm² のレーザーをターゲット薄膜に照射して MeV 級エネルギーの陽子線を発生させる。アパーチャを用いて発生した陽子線の発散角を選択した後、ターゲット薄膜の下流に設置した別の薄膜に陽子線を入射し、弾性散乱した陽子の角度分布の非対称性を測定する。予備実験としては、スピンがどの方向に偏っているかは未知であるため、アパーチャの角度を横断的に変化させながら、イオン飛跡検出器 (CR-39) を用いて陽子数の空間分布を測定してゆく。これにより陽子の偏極方向に当りを付けた後、シンチレータを用いた飛行時間測定法による検出器を使用して本実験を実施する。

本研究においては、使用する高強度レーザー装置の性能が実験の成否に大きく影響する。そこで、提案者を中心として、10TW レーザー装置: JLITE-X のパルス時間波形に関する性能を向上させる取り組みを行う。

(レーザー研転籍後の方法) LFEX レーザーを用いたイオン加速実験を実施した。イオ

ン加速研究において一般に利用されている高強度レーザーは、パルス幅が 10 数 100 フェムト秒であるため、相対論的集光強度であっても、全エネルギーは数 10 ジュール程度である。これに対し、LFEX は時間幅 1.5 ピコ秒、エネルギー 1 キロジュールの光によって相対論的集光強度に達することが可能であり、時間幅の長い磁場が発生することが予想される。イオン加速実験では、高エネルギーイオンに対応した質量・電荷比分析装置 (トムソンパラボラ) を開発した。本装置の真空層と分析装置部は、将来的なイオンのスピン偏極測定にも使用できるように、セットアップの変更が可能なように設計を考慮してある。

4. 研究成果

原子力機構においては、10TW レーザー装置: JLITE-X のパルス時間波形に関する性能を向上させる取り組みを実施した。既存のシングル CPA システムに対して、可飽和吸収体を備えたダブル CPA 化モジュールを組み込むことで、レーザー背景光の集光強度コントラストを 3 桁向上することに成功し、主パルス前 500 ps において 1×10^9 のコントラストが得られた。主パルスのピーク強度は $\sim 10^{18}$ W/cm² であるので、背景光は $\sim 10^9$ W/cm² に抑制されていることになる。これは一般的なプラズマ化しきい値 $10^{10} \sim 10^{12}$ W/cm² より十分に低い値であるため、プリプラズマの無い状態での高強度レーザー物質相互作用を実現することができる。この高コントラストレーザーパルスを、厚さ 100 nm の極薄膜に集光したところ、エネルギー 250 mJ on target のレーザーで約 2 MeV の陽子加速に成功した。また、レーザーの偏光方向を p 偏光から s 偏光へ回転させると、回転角の cos 関数に依存して陽子のエネルギーが減少するなど、急峻な密度勾配を持つ薄膜表面と高強度レーザーの相互作用に特徴的な現象を捉えた。

レーザー研においては、LFEX レーザーによる実験では、エネルギー最大 1 kJ、パルス幅 1.5 ps のレーザーパルスを薄膜上に照射し、薄膜裏面方向に加速されるイオンのエネルギー分析を行った。集光強度はエネルギー 1 kJ の場合で 1×10^{19} W/cm² であった。薄膜ターゲットとしては厚さ 5 ないし 10 μm のアルミニウムを使用しており、質量電荷比 (q/M) の最も大きい陽子 (ターゲット裏面の表面不純物に起因) が優勢に加速される。

図 1 には集光強度を $2 \times 10^{18} \sim 1 \times 10^{19}$ W/cm² の範囲で変化させた際に加速された陽子の最大エネルギーを示す。その結果、52 MeV の陽子加速に成功した。図中には比較として、LFEX と同クラスのペタワットレー

ザーによる陽子加速の結果[3]を示すが、LFEX では 1 桁以上低い集光強度で同等のエネルギーの陽子が加速されており、圧倒的に加速効率が良いことが判る。図中の 2 本の実線は、典型的なイオン加速機構である 1 次元 TNSA モデル[4,5]による予想値を示すが、従来の実験結果(青丸)は常に 1 次元モデル(青線)より低い加速エネルギーとなるのに対し、LFEX では 1 次元モデル(赤線)を上回る加速が発生している。加えて、集光強度を $2 \times 10^{18} \text{ W cm}^{-2}$ に固定したままレーザーのパルス時間幅を 1.5 ps から 3 ps および 6 ps に伸長すると、陽子エネルギーが最大 32 MeV まで増加することが明らかになった。このようなイオン加速を可能にする物理的機構としては、(1) 1 ショットあたり 1 kJ におよぶターゲット入射エネルギーの利点として、集光径を大きくすることで横方向のエネルギー散逸を抑え、理想的な 1 次元のプラズマ膨張が実現された(2) 電子がターゲットの表裏を往復することで繰返し加速され、通常のスケーリング則を超える電子加速が発生した、の 2 点であると考察している。特に近年、パルス時間幅の増加に伴って電子加熱が促進されることを示す理論的研究[6-8]が提案されてきており、本講演ではこれらとの関連性を議論する。

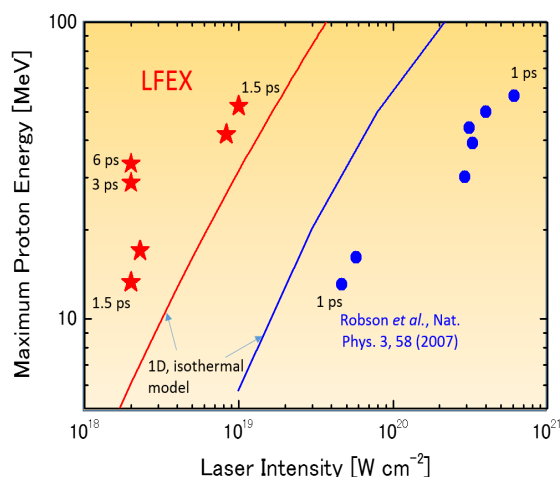


図 1 : 陽子の最大エネルギーに関する成果。赤星が本グループの結果を示し、従来値(青丸)に比べて圧倒的に効率が良いのが分かる。

さらに、LFEX レーザーの高コントラスト性を活かして、厚さ 0.1 μm の金属薄膜を用いたイオン加速も実施している。陽子エネルギーおよびエネルギースペクトルのターゲット厚さ依存性についても考察する予定である。

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 3 件)

- [1] Ion acceleration via ‘nonlinear vacuum heating’ by the laser pulse obliquely incident on a thin foil target, A. Yogo, S. V. Bulanov, M. Mori, K. Ogura, T. Zh. Esirkepov, A. S. Pirozhkov, M. Kanasaki, H. Sakaki, Y. Fukuda, P. R. Bolton, H. Nishimura and K. Kondo, *Plasma Physics and Controlled Fusion*, **58** 025003 (2016).
- [2] Stochastic regimes in the driven oscillator with a step-like nonlinearity, Bulanov S. V., Yogo A., Esirkepov T. Zh., Koga J. K., Bulanov S. S., Kondo K., Kondo M., *PHYSICS OF PLASMAS*, **22**, 063108 (2015)
- [3] Insertable pulse cleaning module with a saturable absorber pair and a compensating amplifier for high-intensity ultrashort-pulse lasers, A. Yogo, K. Kondo, M. Mori, H. Kiriya, K. Ogura, T. Shimomura, N. Inoue, Y. Fukuda, H. Sakaki, S. Jinno, M. Kanasaki, and P. R. Bolton, *Optics Express* **22**, 2060-2069 (2014).

〔学会発表〕(計 14 件)

- [1] Yogo A. “Efficient ion acceleration with high-contrast petawatt laser LFEX” US-Japan JIFT workshop on High Energy Density Science 福井市 大安寺温泉平成 28 年 3 月 24–25 日
- [2] 余語覚文, 戸崎翔太(中16名) 西村博明(他19名) 「高コントラストピコ秒レーザーによるパルス幅依存電子異常加熱現象を考慮したイオン加速エネルギースケールリング」日本物理学会第71回年次大会東北学院大学(泉キャンパス)平成28年3月19日
- [3] 戸崎翔太, 余語覚文(中15名) 西村博明(他20名) 「高コントラスト、ピコ秒、kJクラスレーザー駆動イオン加速の薄膜厚さ依存性」日本物理学会第71回年次大会東北学院大学(泉キャンパス)平成28年3月21日
- [4] 岩田夏弥, 余語覚文, 戸崎翔太, 古賀啓資, 長友英夫, 岸本泰明, 西村博明, 三間園興, 疇地 宏 「高強度レーザー照射薄膜におけるピコ秒スケールでの電子温度上昇とイオン加速機構」日本物理学会第71回年次大会 仙台市、東北学院大学 平成28年3月21日
- [5] 余語覚文 「高強度レーザーイオン加速における電子加熱機構の時間依存性」レーザー学会学術講演会第36回年次大会名城大学 平成28年1月11日
- [6] 「kJクラス超高強度レーザーパルスを用いたイオン加速実験」余語覚文、第32回プラズマ・核融合学会 年会、2015年11月25日(水)、名古屋大学東山キャンパス

- [7] 「LFEXレーザーを利用したプラズマ科学研究-高コントラストkJレーザーによるイオン加速-」余語覚文、日本物理学会2015年秋季大会、平成27年9月18日、シンポジウム「高強度ペタワットレーザーとX線自由電子レーザーを活用したプラズマ科学の展望」、関西大学
- [8] A. Yogo et al., "Ion Acceleration with High-Contrast, Kilojoule, Picosecond Laser Pulses on LFEX" The Ninth International Conference on Inertial Fusion Sciences and Applications, Seattle, Sep. 20 - 25, 2015.
- [9] A. Yogo et al. " Ion Acceleration via Stochastic Vacuum Heating," ,17th International Congress on Plasma Physics, 15-19 Sept., 2014, Lisbon, Portugal
- [10] A. Yogo et al., "Insertable pulse cleaning module for high-intensity ultrashort-pulse lasers" The 3rd Advanced Lasers and Photon Sources (ALPS'14), Apr. 22 - Apr. 25, 2014 Yokohama, Japan
- [11] LFEXレーザー生成イオンのエネルギースペクトル分析」、戸崎 翔太、余語覚文他、日本物理学会2015年秋季大会 平成27年9月18日 関西大学
- [12] 「レーザー波長より薄い薄膜からの陽子加速」余語覚文他、日本物理学会第69回年次大会、2014年3月27日-30日、東海大学平塚市
- [13] 「高コントラストダブルCPA レーザーの開発とレーザーイオン加速への応用」余語覚文他、レーザー学会学術講演会第34回年次大会、2014年1月、小倉市
- [14] 「レーザー駆動イオン加速のための10TW級高コントラストレーザーの開発」余語覚文他、レーザー学会学術講演会第33回年次大会、2013年1月、姫路市

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 1 件)

名称：高強度レーザーの時間波形性能を向上するためのビームラインシステム

発明者：余語覚文、近藤公伯

権利者：独立行政法人日本原子力研究開発機構

種類：特許出願

番号：特許 2013-005131

出願年月日：2013年1月16日

国内外の別：国内

取得状況(計 0 件)

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

取得年月日：

国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究代表者

余語 覚文 (YOGO, AKIFUMI)

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：50421441

(2)研究分担者

()

研究者番号：

(3)連携研究者

()

研究者番号：