

令和 6 年 6 月 13 日現在

機関番号：82502

研究種目：若手研究

研究期間：2022～2023

課題番号：22K14021

研究課題名（和文）レーザー駆動電子雲の高時間分解計測とその集団ダイナミクスの解明

研究課題名（英文）Time-resolved measurements of laser-driven electron clouds and their dynamics

研究代表者

小島 完興 (Kojima, Sadaoki)

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・関西光量子科学研究所 量子応用光学研究部・主任研究員

研究者番号：40815156

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,000,000円

研究成果の概要（和文）：スペクトルイメージング技術に基づき、電子雲の高時間分解計測技術を開発した。高強度レーザーを2分割し、イオン加速用のメインレーザーで生成された電子雲の影をプローブレーザーで測定した。その結果、電子雲はレーザー照射後わずか2psでターゲットの横方向に直径約150μmまで急速に拡大した。その後、ナイフエッジを用いて、イオン加速に寄与する電子雲の面積を定量化した。その結果、ナイフエッジの立体角制限に制約されたエネルギーカットオフ近傍の高エネルギー陽子は、約25μmの限られたソース領域（電子雲）からしか加速できないことが実証された。レーザー駆動イオンの良好なエミッタンスは小さなソースサイズに起因した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

レーザー駆動イオン加速の加速プロセスはわずか数ピコ秒で生じる。その速さ故に、これまでの研究では実験値は時間積分で取得され、加速プロセスの理解は時間分解したシミュレーションとの比較によって主に進められてきた。本研究では、近年発展したスペクトルイメージング技術を用いてレーザー駆動イオン加速において加速管の役割を果たす電子雲膨張の高時間分解観測に取り組んだ。急速に膨張する電子雲を定量的に計測できるようになった。今後この計測技術を用いることでレーザー駆動イオン加速の安定性の向上に寄与する計画である。

研究成果の概要（英文）：A high-time-resolved measurement technique for electron clouds was developed based on the spectral imaging technique. A high-intensity laser was split into two parts, and the shadow of the electron cloud produced by the main laser for ion acceleration was measured with a probe laser. The results indicated that the electron cloud expanded rapidly in the lateral direction along the target to a diameter of approximately 150μm in only 2 ps after the laser irradiation.

Subsequently, a knife-edge was employed to quantify the area of the electron cloud that contributes to ion acceleration. It was demonstrated that high-energy protons in proximity to the energy cutoff, constrained by the steric angle limitation of the knife-edge, could only be accelerated from a limited source region (electron cloud) of approximately 25μm. This result validated the hypothesis that the good emittance of laser-driven ions is attributed to small source size.

研究分野：レーザー・プラズマ相互作用

キーワード：高強度レーザー イオン加速 ビーム物理

1. 研究開始当初の背景

高強度レーザー光を固体標的に照射することで MeV 級の高エネルギーイオンを加速する方法は、レーザー駆動イオン加速と呼ばれている。図 1 はレーザー駆動イオン加速の際に起きる 4 つの物理フェーズを示している。

◆ レーザー駆動イオン加速(TNSA)のメカニズム ◆

高強度レーザー光が照射されると標的の表面が電離し、プラズマが生成される。(図 1(a))

プラズマ中の電子が加速され、MeV 級の高エネルギー電子となる。加速された高エネルギー電子は薄膜標的の裏面へと貫通し、その一部は真空中へ飛散するが、大多数の電子は標的内部にトラップされ、標的の表面と裏面の間を往復する。(図 1(b))

標的裏面では電子が標的からデバイ長程度染み出し、イオンに比べて電子が多い領域、すなわち電子雲が形成され、イオンとの分極によって強力な分極電場が生じる。(図 1(c))

発生した分極電場は、電子雲が膨張・拡散するまでの数ピコ秒間にわたって維持されるため、質量が大きく、レーザーの振動電場では加速できないイオンが加速される。(図 1(d))

ここで紹介した加速メカニズムは、ターゲットノーマルシース加速(以下、TNSA 加速)と呼ばれ最も研究が進んでいる加速メカニズムである。レーザー駆動イオン加速は、数 $\mu\text{m}$ 程度の微小な領域から高エネルギーかつ高価数のイオンを発生させられる優れた利点を持つことから、将来の小型イオン加速器として期待され、精力的に研究が進められており、これまでにレーザー駆動で加速された陽子線の最大エネルギーはおよそ 100MeV に達している。

一方で、一連の加速がわずか数ピコ秒で起きることからそのプロセスの理解は未だ不十分であり、レーザー駆動イオン加速の社会応用に向けては、制御や安定化など未だ多くの課題が残っている。レーザー駆動イオン加速では、まず標的の表面にレーザーを照射することで高エネルギー電子を加速し標的裏面に電子雲を形成する。その後、電子雲と標的裏面との間に生じる強力な分極電場によってイオンが高エネルギーに加速される。これらの加速プロセスはわずか数ピコ秒で生じる。その速さ故に、これまでの研究では実験値は時間積算で取得され、加速プロセスの理解は時間分解したシミュレーションとの比較によって主に進められてきた。一方、近年ではスペクトラルイメージング技術が発展し、フェムト秒の高い時間分解を持つ計測手法が現れてきた。本課題はレーザー駆動イオン加速において“加速管”の役割を果たす電子雲膨張の高時間分解観測に取り組む。

スペクトラルイメージング技術が発展し、フェムト秒の高い時間分解を持つ計測手法が現れてきた。本課題はレーザー駆動イオン加速において“加速管”の役割を果たす電子雲膨張の高時間分解観測に取り組む。

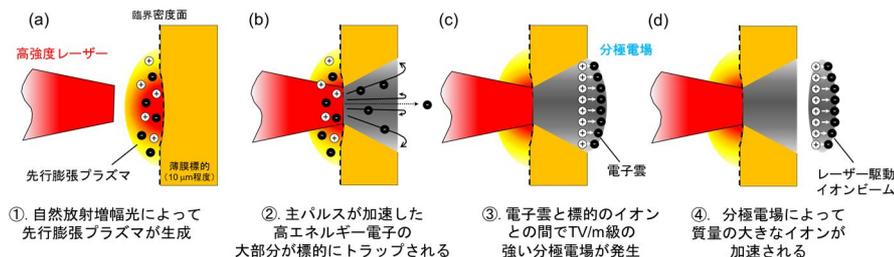


図 1 レーザー駆動イオン加速のメカニズム

2. 研究の目的

本研究の目的は、高速膨張する電子雲膨張の時間発展ならびに 3 次元的な膨張形状を数 100 フェムト秒の高い時間分解能でマルチフレーム撮影できる撮影装置を開発することである。また、構築した撮影装置を用いて電子雲の膨張の様子を撮影し、標的裏面に形成される分極電場の空間分布および時間発展を明らかにすることでレーザー駆動イオン加速の安定性の向上を行うことである。

3. 研究の方法

電子雲の 3 次元的な膨張を観測するため、本研究では膨張方向ごとに速度に合わせた別の計測原理を用いた。観測しなければならない電子雲の膨張は、標的に沿った横方向の膨張と標的から離れる垂直方向の膨張に分けられる。レーザー駆動イオン加速では、まずレーザーによって加速された高エネルギー電子が、標的を突き抜け裏面へと達する。このとき、裏面では強い分極電場が発生し、電子が引き戻される。そのため電子は標的の表面と裏面を往復しながら、標的の面に沿って広がる。これが電子雲の横方向への膨張である(図

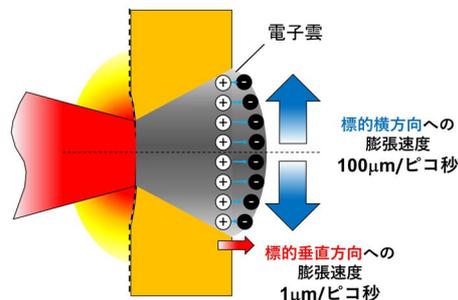


図 2 電子雲の膨張速度の違い

2) このときの電子雲の横方向への膨張速度は、光速に近い  $100\mu\text{m}/\text{ピコ秒}$  程度で進むと予測されている。その後、電子雲が横方向へに広範囲に広がり、分極電場の強度がある程度抑えられると、電子雲が標的垂直方向へと膨張すると考えられている。このときに電子雲はイオンを引き連れて膨張し、イオンを高エネルギーに加速する。電子雲の垂直方向への膨張は、電子雲とイオンとの間に発生する分極電場により制限されるため、横方向への膨張速度に比べてかなり遅く、 $1\mu\text{m}/\text{ピコ秒}$  程度と予測されている(図2)。本研究課題は、この速度の異なる2方向への膨張を2つの計測手法を組み合わせさせて計測した。すなわち、レーザー駆動イオン加速を引き起こす電子雲の発生から膨張・拡散までのわずか数ピコ秒の高速な3次元の動きの時間分解計測を行った。

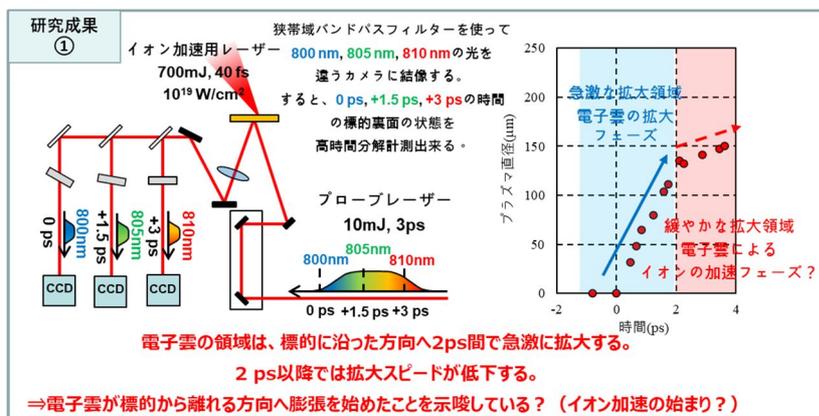


図3 チャープ光を用いた電子雲の計測実験

#### 4. 研究成果

研究初年度では高速で移動する電子雲を計測するために、スペクトラルイメージング技術に応用した電子雲の高時間分解計測技術を開発した。研究最終年度では、開発した計測器を用いてレーザーを照射した際に標的裏面に生成される加速電場の領域(電子雲のサイズ)を実験的に測定した。レーザーをイオン加速用レーザーとプローブレーザーの2つに分岐した。プローブレーザーはSF11ガラスを通過させることで、チャープし3psまでパルス幅を伸長した。チャープ光を標的裏面に反射させることで、イオン加速用レーザーが生成する電子雲の影を計測した。計測は異なる透過波長をもつ狭帯域フィルター(800, 805, 810nm)を備えたカメラで行った。図3は実験で観測された電子雲の広がりやの時間発展を示している。レーザー照射後、わずか2psで標的に沿った横方向への電子雲の拡大は直径 $150\mu\text{m}$ 程度まで急速に進むことが観測された。またその後、電子雲の拡大速度が減少した。続いて、電子雲の拡大した領域内で実際にイオン加速に寄与している領域を計測するために、標的の裏面から3mm離れた位置にナイフエッジを設置した。ナイフエッジを動かすことで、トムソンパラボライオン計測器に到着するイオンの立体角を制限した(図4(左))。ナイフエッジをわずか $25\mu\text{m}$ 程度(直径に換算すると $50\mu\text{m}$ )動かすと、最大3.5MeVあったプロトンの最大エネルギーが $0.5\text{MeV}$ 程度まで減少した。その後、ナイフエッジを $75\mu\text{m}$ 以上(直径に換算すると $150\mu\text{m}$ 以上)動かすとプロトンが観測されなくなった。このサイズは図3に示した電子雲が拡大したサイズと良い一致を示した。一方で、このナイフエッジを使った実験からたとえ $150\mu\text{m}$ 程度だけ電子雲が拡大した場合であっても、プロトンビームのカットオフ付近となる高エネルギー成分は $25\mu\text{m}$ 程度の小さなソース領域(電子雲)からのみ加速されており、レーザー駆動イオンが良いエミッタンスを持つ理由が確認された。またここまでに紹介した陽子線の加速のみならず、近年、がんの重粒子線治療のために需要が高まっている炭素イオンの加速を行った。通常の加速では、標的薄膜に付着した水素の原子核である陽子は、電荷質量比が大きいため優先的に加速され、炭素線を効率的に加速できない。本研究では誘導加熱を利用した表面汚染層のクリーニング方法を開発した。標的薄膜の一部は加熱開始後、わずか約100msで表面汚染層の除去に必要な400℃まで加熱されることが検証された。これにより10Hz以上の繰り返しで標的を交換した場合にも表面汚染層を除去することが可能となり、レーザー駆動による炭素線の高繰り返し加速を可能にした。

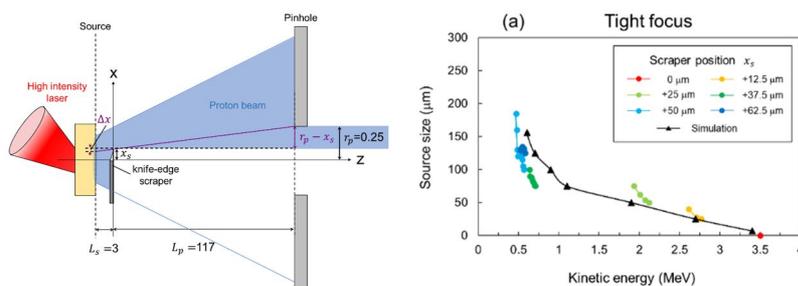


図4 (左)ナイフエッジを使ったソースサイズの計測。(右)プロトンソースのサイズ強集光の場合

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 SADAOKI KOJIMA, YUKI ABE, EISUKE MIURA, TETSUO OZAKI, KOHEI YAMANOI, TOMOKAZU IKEDA, YUBO WANG et al.	4. 巻 30
2. 論文標題 Demonstration of a spherical plasma mirror for the counter-propagating kilojoule-class petawatt LFX laser system	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 43491-43502
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/OE.475945	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 Sadaoki Kojima, Tatsuhiko Miyatake, Hironao Sakaki, Hiroyoshi Kuroki, Yusuke Shimizu, Hisanori Harada, Norihiro Inoue, Thanh Hung Dinh, Masayasu Hata, Noboru Hasegawa, Michiaki Mori, Masahiko Ishino, Mamiko Nishiuchi, Kotaro Kondo, Masaharu Nishikino, Masaki Kando, Toshiyuki Shirai, Kiminori Kondo	4. 巻 8
2. 論文標題 Induction heating for desorption of surface contamination for high-repetition laser-driven carbon-ion acceleration	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Matter and Radiation at Extremes	6. 最初と最後の頁 54002-1,54002-7
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0153578	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3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Sadaoki Kojima, Tatsuhiko Miyatake, Hironao Sakaki, Hiroyoshi Kuroki, Yusuke Shimizu, Hisanori Harada, Norihiro Inoue, Thanh Hung Dinh, Masayasu Hata, Noboru Hasegawa, Michiaki Mori, Masahiko Ishino, Mamiko Nishiuchi, Kotaro Kondo, Masaharu Nishikino, Masaki Kando, Toshiyuki Shirai, Kiminori Kondo
2. 発表標題 Induction heating for desorption of surface contamination for high-repetition laser-driven heavy-ion acceleration
3. 学会等名 Q-BASIS(Quantum Beam Application for Sciences and Industries 2023)（国際学会）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小島 完興、榊 泰直、宮武 立彦、ゲン タンフン、長谷川 登、石野 雅彦、黒木 宏芳、清水 祐輔、原田 寿典、井上 典弘、錦野 将元、神門 正城、白井 敏之、近藤 公伯
2. 発表標題 レーザー駆動重イオン加速のための誘導加熱による表面汚染の高速除去
3. 学会等名 第20回日本加速器学会年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小島 完興、榊 泰直、宮武 立彦、チン タンフン、石井 邦和、熊谷 嘉晃、近藤 公伯
2. 発表標題 量子メスに向けたレーザー駆動大強度イオンパンチの全電荷量測定
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第44回年次大会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 イオン発生装置、イオン発生方法、およびイオン発生用ターゲット	発明者 小島完興、榊泰直、 他6名	権利者 QST
産業財産権の種類、番号 特許、PCT/JP2023/041213	出願年 2023年	国内・外国の別 外国

〔取得〕 計0件

〔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