水素クラスターをターゲットとした 100 MeV を超えるレーザー陽子加速の実証

Demonstration of laser-driven proton acceleration above 100 MeV using hydrogen clusters

神野智史#A),金崎真聡 ^{B)},松井隆太郎 ^{C,D)},浅井孝文 ^{B,D)},坂本渓太 ^{B)},清水和輝 ^{B)},中川貴斗 ^{B)}、 鍛冶賢志 ^{B)}、田邊寬之 ^{B)}、小田啓二 ^{B)},山内知也 ^{B)},上坂充 ^{A)},岸本泰明 ^{C)},桐山博光 ^{D)},福田祐仁 ^{D)} Satoshi Jinno^{A)}, Masato Kanasaki^{B)}, Ryutaro Matsui^{C)}, Takafumi Asai^{B)}, Keita Sakamoto^{B)}, Kazuki Shimizu^{B)}, Takato Nakagawa^{B)}, Takashi Kaji^B, Hiroyuki Tanabe^{B)}, Keiji Oda^{B)}, Tomoya Yamauchi^{B)}, Mitsuru Uesaka^{A)},

Yasuaki Kishimoto^{C)}, Hiromitsu Kiriyama^{D)}, Yuji Fukuda^{D)}

A) Nuclear Professional School, School of Engineering, The University of Tokyo,

B) Faculty of Maritime Science, Kobe University,

C) Graduate School of Energy Science, Kyoto University,

D) Kansai Photon Science Institute, National Institute for Quantum and Radiological Science and Technology

Abstract

We have proposed a method to generate multi-MeV pure proton beam using micron size hydrogen clusters as a target in a laser driven ion acceleration technology. A demonstration experiment of high repetition proton acceleration using hydrogen cluster targets was carried out at the J-KAREN facility. The energy spectrum of the protons was obtained using various detectors: CR -39, a nuclear emulsion, and a real-time Thomson parabola spectrometer. These detectors were calibrated using ion accelerators. We have developed a method to measure the energy spectra of proton beams with a resolution of less than a few MeV using the CR-39, which is capable of detecting proton beams of tens of MeV. The nuclear emulsion was developed for sub-GeV proton detection. In the Thomson parabola spectrometer, the characteristics of the detectors were measured so that the fluence of the energy spectra can be accurately evaluated. In addition, the generation of argon clusters was carried out for future development.

Keyword: Laser-driven proton acceleration, Thomson Parabola Spectrometer, CR-39, Nuclear emulsion

1. はじめに

レーザー駆動イオン加速は、従来の RF 加速器に おける放電領域をはるかに超える MV/µmオーダー の加速勾配を発生させることが可能であり、コンパ クトな加速器として注目されてきた[1,2]。薄膜ター ゲットを用いたペタワットレーザーによる陽子加速 では、最大エネルギーが 100 MeV に迫る陽子線発生 が報告されている[3,4]。しかしながら、薄膜ターゲ ットを用いた陽子加速は表面付着物質である水や炭 化水素からの陽子発生であり、薄膜を構成する高 Z 成分も加速される。そのため、応用研究に資する高 繰り返しの純陽子線の実現に必要な手法が必要とさ れる。

本研究では、ミクロンサイズの水素クラスターを ターゲットに利用して高繰り返しで multi-MeV の 純陽子線を発生する方法を提案しており、我々の最 近のシミュレーション研究によって、詳細な加速メ カニズムが判明しつつある。それは、高強度レーザ ーをマイクロメートルスケールの球形の物質に照射 した場合、球表面に発生した衝撃波が球の中心に向 かって伝播・収束する過程でその強度が増強され、 この増強された衝撃波により単色イオンが短時間で 効率よく加速されるという衝撃波加速の新現象を発 見したことである[5]。

そこで我々は、理想的なターゲットを生成するた めに、クライオスタットで冷却した高圧水素ガスを パルスバルブに接続した円錐形ノズルを介して真空 中に噴射することによりミクロンサイズの水素クラ スターを発生させる装置を開発した[6,7]。その上で、 関西光科学研究所J-KAREN施設[8]において水素ク ラスターをターゲットとした高繰返し陽子加速の実 証実験を実施した。陽子のエネルギースペクトルは、 固体飛跡検出器CR-39および原子核乾板とリアルタ イムトムソンパラボラスペクトロメータを用いて取 得した。ここでは、2020年度に行った各検出器の校 正実験について報告する。

2. 原子核乾板

原子核乾板は荷電粒子の飛跡を三次元的に記録す ることができ、宇宙線ミューオンなどの最小電離粒 子まで検出可能な高い感度を有するため、陽子線に 対して最大でも 27 MeV までしか感度を示さない CR-39 に比べて、大幅にコンパクトなサイズのサブ GeV 級レーザー加速陽子線計測器を実現できる。し かしながら、その感度の高さ故に、電子線やX線が 同時発生するレーザー駆動イオン加速実験に適用し た場合、それらノイズ成分によって陽子線飛跡が埋 もれてしまい、検出できないという問題があった。 そこで我々のグループは、原子核乾板の感度の最適化を 行うことで、電子線やX線によるノイズ成分の低減 を試みた。その結果、MeV 級のレーザー加速陽子線



Fig. 1 Scattering angle spread of protons in ECCs





計測に世界で初めて成功した。さらに、加速器を用いてその最適条件下の原子核乾板がサブ GeV 級の 陽子線に対しても感度を有することを確認し、将来 のサブ GeV 級のレーザー加速陽子線計測器として、 原子核乾板が有効であることを確かめた[9]。

本研究では、原子核乾板と散乱体を交互に積層した Emulsion Cloud Chamber (ECC)内での陽子線の 多重クーロン散乱量から入射エネルギーを逆推定する手法の開発を行った。まず、放射線医学総合研究 所の HIMAC(Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba)物理汎用照射室 PH1 コースにおいて、散乱体 として厚さ500 µm のタングステンを用いた ECC に 100、230 MeV(~104 protons/cm²)の陽子線を照射 し、多重クーロン散乱量に関する基礎データの取得 を行った。さらに Geant4 によるシミュレーション 結果と実験値を比較し、Gean4 が実験値を精度よく 再現できることを確かめた(Fig.1)。次に、検証済み の Geant4 コードを用いてサブ GeV 級陽子線の ECC 内での多重クーロン散乱を模擬し、その散乱角 度データを説明変数として、非線形重回帰分析を行 った。ここで ECC の散乱体は厚さ 500 µm のタング ステン、層数は 25 層とした。つまり、ECC 全体の 厚さは2 cm 程度である。非線形重回帰手法として、 機械学習の一種であるガウシアンカーネルを用いた サポートベクトル回帰を採用し、入射陽子線のエネ ルギー推定を行った結果を Fig. 2 に示す。横軸は実 際の入射エネルギー、縦軸は散乱角度から予想した エネルギーを示している。エネルギー分解能は標準 偏差(1σ)で 6%@150 MeV、11%@200 MeV、 10%@250 MeV、8%@300 MeV という結果が得られ た。まとめると、原子核乾板の技術を応用すること で、厚さ約2cmのコンパクトなサブGeV級レーザ 一加速陽子線計測の原理検証に成功したと言える。

3. CR-39

レーザー駆動イオン加速では、電子線やX線がイ オンと同時に発生するため、イオンのみに感度を有 するCR-39が信頼性の高い検出器としてレーザー加 速イオン計測に用いられている。これまでに、高強 度レーザーとクラスターの相互作用によって将来的 に発生すると予測される数百 MeV 級のレーザー加 速陽子線に対して、CR-39 と減速材を交互に積層し たスタック型検出器を開発し、実際に作成した検出 器に対し HIMAC での校正実験を実施した。その結 果、100,160,230 MeV の陽子線に対して、10%以下 の誤差でエネルギーを決定可能なことが明らかとな った。開発した手法は、100 MeV 以上の陽子線に対 して、現在用いられているトムソンパラボラ等のレ ーザー加速イオン計測が可能な手法の中で最もエネ ルギー分解能が高い。

また、水素クラスターターゲットから発生した 10 MeV 程度の陽子線に対して、階段状の減速材と CR-39 を用いた検出器体系で、数 MeV 以下の分解能で エネルギースペクトル計測可能な手法を開発した。 この手法では、エッチピット一つ一つを解析して入 射エネルギーを求める方法ではなく、厚みの異なる 減速材を透過してきた陽子線の数からスペクトルを 求める。この場合、CR-39 上には減速材を透過可能 なエネルギー以上の陽子線がエッチピットを形成す るため、単純に計数するだけではエネルギースペク トルが求められない。そこで、各領域で計測すべき 入射エネルギーの上限を決定し、また、エッチピッ ト開口径からエネルギーを選別することで、正確な エネルギースペクトルを求めた。求められたエネル ギースペクトルは原子核乾板による計測の結果とよ く一致しており、2 種類の計測方法でエネルギース ペクトルを求めることでレーザー加速イオン計測の 精度を向上させた。

CR-39を用いたレーザー加速陽子線計測について は、以上のように昨年度までに完成させた計測手法 を論文化した[10,11]。



Fig. 3 Schematic of the developed ion electron energy spectrometer.



Fig. 4 Single shot Ar ion signals detected using the developed spectrometer (a) and the conventional Thomson parabola spectrometer.

4. イオン・電子スペクトロメータ

レーザー駆動イオン加速実験において、加速機構 の詳細を理解するためには、加速されるイオンや電 子の空間分布とエネルギースペクトルをレーザーシ ョットごとに明らかにしなければならないが、両者 を同時に計測可能することは困難である。特に、こ れまでに開発されているトムソンパラボラスペクト ロメータ(TPS)はレーザーショットごとのエネル ギースペクトルを明らかにすることは可能であるが、 イオンのみを計測の対象としている。本研究では、 同軸方向のイオンと電子をレーザーショットごとに 計測可能な計測手法を開発することを目的とし、従 来の電子スペクトロメータと TPS を組み合わせた 検出器を開発した。

従来型のトムソンパラボラスペクトロメータは、 平行な磁場・電場空間を作り出す磁石と電極が同じ 位置に設置されていたが、本研究では Fig. 3 に示す ように、磁石と電極をずらして設置することで、電 子は磁場のみの影響を受けて検出器に入射し、イオ ンは磁場空間を通過後に電場空間を通過することで、 従来のトムソンパラボラスペクトロメータと同様の 軌道を描く。電子の検出器に蛍光体、イオンの検出 器に蛍光体付き Micro Channel Plate を用い、電子 及びイオンによるそれぞれの蛍光体の発光をカメラ で撮像することで、計測にリアルタイム性を持たせ た。

開発したスペクトロメータを、アルゴンクラスタ ーを用いたレーザー駆動イオン加速実験に適用し、 電子及びアルゴンイオンの計測を行った。レーザー は関西研の J-KAREN-P を利用し、集光強度は 10²¹ W/cm²以上とした。集光点から 3.2 m のレーザー軸 上に開発したスペクトロメータを設置した。また、 比較のために、レーザー軸方向から 45 度方向に従来 型のトムソンパラボラスペクトロメータを設置した。 計測結果を Fig. 4 に示す。現在、詳細なエネルギー スペクトルを解析中であるが、いずれの方向におい ても最大 8 価のアルゴンイオンが計測された。また レーザー軸方向に比べて 45 度方向の方が、ややエネ ルギーが高いということが明らかとなった。一方で、 開発したスペクトロメータにおいて、電子は検出さ れなかった。この原因として、スペクトロメータの 設置位置が集光点から遠く、入射する電子数が少な かったことが考えられるため、今後、スペクトロメ ータの設置位置を工夫する必要がある。しかしなが ら、開発したスペクトロメータは、レーザーショッ トごとのイオンのエネルギースペクトル計測に成功 しており、今後のイオン加速実験において有用なス ペクトロメータであると言える。

5. アルゴンクラスターの生成

水素クラスターと平行してアルゴンクラスターを ターゲットにすることを検討した。高強度レーザー とアルゴンクラスターとの相互作用により、Hollow イオン生成[12]、二次高調波発生[13]、自己磁場生成 などをともなう複雑プラズマの生成が観測、または、 予測されている。さらには、多価イオンの中でも極 めてまれな状態である He-like あるいは Hydrogenlike の Hollow Atom (中空原子)の生成が期待され ており X 線分光学において注目されている。この存 在を確かめるために、X 線分光器を用いた実証実験 も計画している。

アルゴンクラスターの生成は、水素クラスターの 生成と同様、冷却機構付パルスバルブを用いて行わ れた。クラスターサイズ分布の取得には、Nd:YAG レ ーザーの2倍高調波である波長 532 nm のパルスレ ーザーをクラスターターゲットに照射し、そこから の散乱光の角度分布測定し、Mie 散乱理論を用いて



Fig. 5 Phase diagram of argon.

数値解析することにより行った[14,15]。

アルゴンの臨界点(150.87 K, 4.898 MPa)付近で温 度と圧力を変化させることで、液体、気体、超臨界 状態という異なる状態からアルゴンクラスターを生 成させ、高強度レーザーとの相互作用過程を研究す る新たな試みを目指している。Figure 5 に示すよう に温度、圧力、密度の三相図で考えると2MPa,131 Kでは気体で、2MPa, 128Kでは液体と、僅かな温 度の違いであるが、相転移により密度が10倍以上異 なってくる。また、噴射後は超音速流となり、距離 と供にマッハ数が増大し、温度と密度が低下してい く。このことから見積もると、オリフィスから数100 μm で気液境界に到達することが分かった。これを 反映するように、液体(2 MPa, 128 K) では1 μm を超えるアルゴンクラスターが存在し、僅か3Kの 上昇で相転移により気体(2MPa, 131 K)になると 200 nm 以下のクラスターしか生成されない。また、 超臨界状態(6 MPa, 155 K)では、1 µm を超える アルゴンクラスターが存在しないことが分かった。

6. まとめ

以上のように、レーザー駆動イオン加速において 使用する各種検出器の校正実験を行った。原子核乾 板を用いた検出器では、現像方法を最適化すること で、低ノイズな陽子線観測に成功した。その上で、 原子核乾板と散乱体を積層した検出器を開発し、エ ネルギー分析において非線形重回帰分析を駆使する ことで、厚さ約 2 cm でありながらサブ GeV 級の陽 子線計測に成功した。CR-39 では 100 MeV を超え る陽子線に対し、数10%以下の誤差でエネルギーを 決定できる手法を開発した。、また、10 MeV 程度の 陽子線に対しては、階段状に厚みを変えた減速材と 組み合わせることで、数 MeV 以下の分解能でエネ ルギースペクトル計測可能な手法を開発した。さら に、従来型のトムソンパラボラスペクトロメータを 高度化し、電子とイオンを同時測定可能したイオン・ 電子スペクトロメータを開発した。本装置はレーザ ー駆動イオン加速において同時に生じる高エネルギ ー電子をレーザーショット毎に捉えることが出来る ので、加速機構のいっそうの理解に有用であると考 えられる。このように、各検出器の長所をより高度 化し、お互いの検出器の特性を補完するような検出 体系を構築した。また、将来展開を見据えてアルゴ ンクラスター生成を実施した。得られたデータが、 アルゴンクラスターと高強度レーザーとの相互作用 による、重粒子加速や多価イオン生成などの進展に 寄与することを期待している。

参考文献

- [1] H. Daido, et al., Rev. Prog. Phys. 75, 056401 (2012).
- [2] A. Macchi, et al., Rev. Mod. Phys. 85, 751 (2013).
- [3] F. Wagner, et al., Phys. Rev. Lett. 116, 205002 (2016).
- [4] I. J. Kim, et al., Phys. Plasmas 23, 070701 (2016).
- [5] R. Matsui, et al., Phys. Rev. Lett. 122, 014804 (2019).

[H30-5]

- [6] S. Jinno, et al., Optics Express 25, 18774 (2017).
- [7] S. Jinno, et al., Plasma Phys. Control. Fusion. 60, 044021 (2018).
- [8] H. Kiriyama, et al., IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron 21, 1601118 (2015).
- [9] T. Asai, et al., High Energy Density Physics 32, 44-50 (2019).
- [10] M. Kanasaki et al., High Energy Density Physics 37, 100852 (2020).
- [11] M. Kanasaki et al., Progress in Ultrafast Intense Laser Science XV, Chap. 7, 133-147 (2020).
- [12] A. Ya. Faenov et al., Laser Part. Beams 30, 481 (2012).
- [13] E. Oks et al., Opt. Express 23, 31991(2015).
- [14] S. Jinno et al., Appl. Phys. Lett. 102, 164103 (2013)
- [15] S. Jinno, et al., Optics Express 21, 20656 (2013).