

ONLINE THOMSON PARABOLA SPECTROMETER FOR TENS OF MeV LASER-DRIVEN ION ACCELERATION

H.Sakaki^{#A)}, M.Kanasaki^{A,B)}, T.Hori^{A)}, Y.Fukuda^{A)}, A.Yogo^{A)}, M.Nishiuchi^{A)}, M.Katagiri^{C)}, and K.Niita^{D)}

^{A)} JAEA, 8-1-7 Umemi-dai, Kizugawa, Kyoto, 619-0215, Japan

^{B)} Kobe University, 5-1-1, Fukaeminami, Higashinada, Kobe, 658-0022, Japan

^{C)} Ibaraki University, 2-1-1, Bunkyo, Mito, Ibaraki, 310-8512, Japan

^{D)} RIST, 2-4, Shirane, Tokai, Ibaraki, 319-1106, Japan

Abstract

We propose a new idea of the Thomson parabola spectrometer that have an ideal flatness magnetic field is achieved by using a permanent magnet and the iron electrode. And the fluorescent film monitor for the Thomson parabola spectrometer is optimized by using the PHITS code. The highly accurate and online measurement technique is developed by using these ideal magnetic field and the fluorescent monitor. The laser-driven proton (max 18MeV) was measured with these online technique at the J-KAREN beam line. The effectiveness of our design for the Thomson parabola was confirmed.

数十 MeV 級レーザー駆動型粒子線用オンライン・トムソンパラボラの開発

1. はじめに

この 10 数年で、レーザーシステム、およびそのレーザー光ハンドリング技術の発展とともに、レーザー集光強度が 10^{22}W/cm^2 を超える値を達成できるようになり、このようなレーザーと物質との相互作用の研究が広く展開されている。中でも、レーザーと物質の相互作用によって発生するホットプラズマを利用したイオン加速は、従来型の高周波発生装置が作る電場と比較にならない加速電場(100GeV/m)を発生できるために、この電界勾配を利用した^[1-3]従来型加速器を凌駕する超小型サイズを実現するポテンシャルを有する。そこで、現状の工学的・医学的アプリケーションをレーザー駆動型加速器に置き換えることで、更なるイオンビーム利用の普及に貢献することが期待されている。

高エネルギーイオン加速を実現するために、世界的にみれば、1 ショットでペタワットを超える高強度レーザーを新規開発し、TNSA のスケールリング則^[4]から推測されるイオン加速を実現することが考えられている。また、レーザーエネルギーをイオン加速に高効率で変換できるような、様々なターゲット物質の基礎研究もすすめられている。同時に、計算機シミュレーションからは様々な加速モードが提案されており、これらのモード条件を実験的に確認していくことで、高効率な加速パラメーターを制御可能となることが予測されている。

このような中、原子力機構では、10Hz 程度の高繰り返しを実現できる高強度超短パルスレーザーと、原子力機構が発見した物質のクラスター状態を用いるという高効率なターゲットを用いて、その実現を目指すという戦略で研究を進めてきた。昨年報告したように、これまでに He 雰囲気での CO_2 クラスターをターゲットとして用いた際^[5]には、10MeV/核子を

超えるような高エネルギー粒子線が実現されているが、その物理メカニズムを深く掘り下げ、いっそう効率的な加速を行うためにレーザー光やクラスターのパラメータにおける条件を幅広く、かつ詳細に計測し、最適化を実施していく必要がある。

ところで、レーザー駆動型粒子線の計測では、レーザーが物質に照射されて生じるプラズマ状態から発生する、電子線や X 線などの様々な放射線の影響があるために、イオン以外に感度が小さい固体飛跡検出器(CR-39)を層構造で用いる方法が一般的に使われている。レーザー光とイオン発生に関する計測は実時間性のない CR-39 の解析をパラメータ毎に大量に行わねばならず、そのことが実験解析のペースを遅らせている。そこで、レーザー駆動型イオン用数十 MeV クラスのオンライン計測手法の確立を狙い、極めて安定な磁場分布をもつ永久磁石と、中性子検出用の蛍光体 (ZnS)、および、そのデータ解析にモンテカルロ粒子輸送用コードの PHITS を利用した、オンライン型の高精度トムソンパラボラ・スペクトロメーター (トムソンパラボラ) の開発手法を確立することを目指した。

2. エネルギー精密測定用安定磁場の達成

トムソンパラボラ^[6]とは、加速イオンを静電場・静磁場を用いて、その進行方向に偏向させる装置である。y 方向にかかる静電場・静磁場中に z 方向からあるエネルギー分布を持つイオンを入射させて、放物線上の軌跡をえることで、エネルギー・質量電荷比 (e/m) を分析するものである。

一般に、トムソンパラボラは計測精度を上げるために、イオンをコリメートするために数百マイクロメートルのピンホールが設置される。このピンホールのサイズが小さいほうが計測精度が向上するが、レーザー駆動型イオンの場合、レーザー光自身の集光ポジショニングの不安定性や、プラズマ相互作用の不

[#] sakaki.hironao@jaea.go.jp

安定性から、加速ビームにおける最高エネルギーのコア部分がピンホール設置軸を外し、数百マイクロピンホールでは最高エネルギー部分の計測とこぼしが起こりえる。また、ピンホール穴が小さければ小さいほど、キャッチできるイオン個数も減るために、個数減少による分解能低下を生じる。

我々は、計測分解能を上げるためにピンホールをできるだけ大きめに最適化することが可能(そのことによる計測誤差を最低限にする)なように、磁場安定度(磁場平坦度)が高いトムソンパラボラの開発を目指した。

2.1 高平坦度磁場の実現

トムソンパラボラは、静磁場を得るために「磁場強度が 1 テスラ近くまで達成可能なネオジウム磁石」と、静電場を得るために「透磁率の低い、アルミもしくは銅の電極」が用いられるのが一般的である^[7]。しかし、透磁率が低い金属電極を使用するさいには、ピーク磁場は高くとれるものの、トムソンパラボラ内の磁場分布は釣鐘状の分布となり、磁場中を通過するビームはそれが有する高次磁場の影響を受けることとなる。我々は、理想的な平坦磁場を実現し、高次磁場による計測誤差が最小になるようなアイデアを模索した。そこで、透磁率が高い金属電極(鉄板)を設置して磁場を平坦化するアイデアを思いついた。

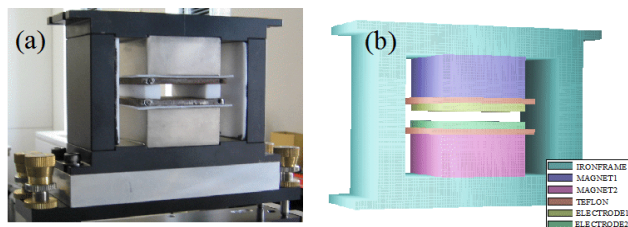


図 1: (a) 実際に開発されたトムソンパラボラ
(b) 3次元磁場シミュレーションでの形状

鉄板電極を設置した場合の磁場分布の計算を、3次元有限要素法磁場解析ソフト(Magnum^[8])にてシミュレートした。図 1(a)に実際に開発したトムソンパラボラの写真、図 1(b)に、その設計に用いた際に Magnum に入力された 3次元形状を示す。磁場中心付近は 0.2mm 刻みのメッシュで計算した。

磁場計算結果を図 2(a)に示す。これらは、 $(x,y)=(0,0)$ でのビーム進行方向 z 軸方向の磁場分布である。赤線が、鉄電極を仮定した場合の計算結果、点線がアルミ電極を仮定した場合の計算結果、ひし形が鉄電極の場合の磁場計測値である。アルミ電極の場合は、ピーク電極の高さは高いが釣鐘状の磁場分布であるのに対して、鉄電極は明らかに平坦度が高く理想的な磁場が実現されていることが分かる。実際の計測値も、この赤線上にほぼ一致しており、磁場計算の正しさが明確である。なお、アルミ電極の場合はピークが 0.7T であるが、鉄電極は 0.6T と 16%程度低い、イオンが感じる総磁場(BL 積)に依存する。BL 積は鉄電極とアルミ電極の計算結果は

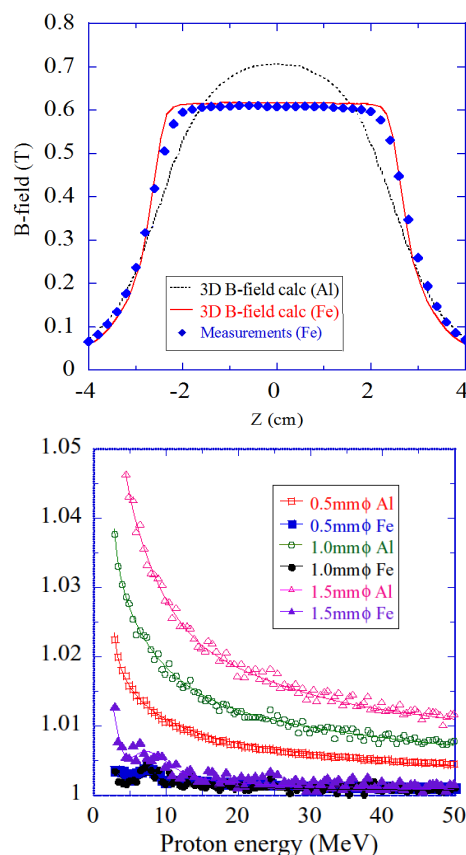


図 2: (a) 磁場計算結果。赤線が鉄電極での磁場分布、点線はアルミ電極の場合、ひし形は鉄電極の場合の磁場計測値。
(b) 電極種の違いとピンホールのサイズによるビーム中心からの左右端までの距離比。

99%の範囲で一致するため、計測できるエネルギー範囲は両者とも同じである。

図 2(b)に、3次元磁場計算結果を使って陽子線をトムソンパラボラによって計測した場合に考えられる計測誤差を示す。トムソンパラボラに設置するピンホール直径を 0.5, 1.0, 1.5mm と変化させて、電極がアルミと鉄の場合で、トムソンパラボラから 50cm 離れたところでのビーム中心から左右の距離の比を示している。理想的な 2極磁場中を、エネルギー分布が単色で円形の理想ビームが通過すると、そのビーム形状が維持されたまま、50cm の計測位置まで届くために、ビーム中心から右端までの距離と左端までの距離は等しくなる。よって、理想的な磁場がある場合、これらの距離比は 1 となる。アルミ電極の場合の釣鐘状の磁場分布であるために、ビーム径が大きくなるほど、ビーム中心から左右非対称の磁場強度の影響を受けることになり、左右の距離比は 1 からずれる。図 2(b)で示すように、左右距離比は鉄電極の場合よりアルミ電極の方が 2~3%のエラーを生み、エネルギーの計測分解能を悪くすることが分かる。

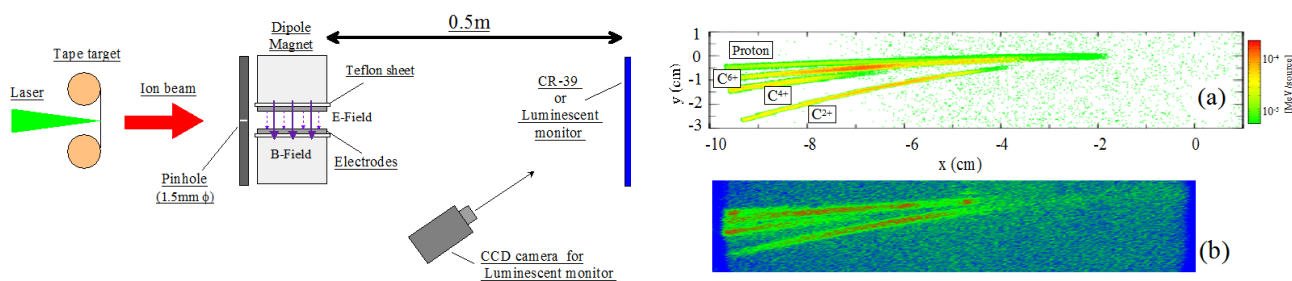


図 3: (左) J-KAREN レーザーを用いたオンライン・パラボラ実験の配置図
(右) (a) PHITS コードによる蛍光膜発光特性の予測。(b) 実際のレーザー駆動型粒子実験による発光。

3. オンライン計測用蛍光膜モニタ

トムソンパラボラのオンライン計測を行うために、J-PARC での中性子計測用に開発された ZnS 蛍光体^[10]を用いた蛍光膜モニタにて計測を行うことにした。ZnS は、イオンに対して感度が高く X 線等の光子に感度が低いためレーザー駆動型には非常に有益な蛍光体である。この蛍光膜モニタをレーザー駆動型陽子線を用いる場合の発光特性等は PHITS コード^[11]によって解析^[12]されており、その手法を適応することによりオンライン計測の実現を図ることにした。PHITS コードは、粒子に対する磁場効果のみが考慮されていたために、今回、トムソンパラボラ的设计に電場効果および粒子の電荷数も組み込んだ。

図 3 右(a)に、1.5mmφのピンホールを置いた鉄電極のトムソンパラボラから 50cm 後方に蛍光膜モニタを設置した際に蛍光膜がどのように発光するのかを PHITS コードで計算した結果を示す。陽子、および電荷数の違う炭素の軌跡（レーザー駆動型イオンを模擬して、エネルギーはブロードで与えている。陽子の最大エネルギーを 20MeV）が明確に見取れる。各イオンの蛍光膜モニタ上でのエネルギーデポジションの違いから、発光量(赤が大きい)が異なることが見て取れる。

この計算結果の検証のために、我々は関西研 J-KAREN レーザー^[9]（ターゲット上ピーク強度 $4 \times 10^{19} \text{Wcm}^{-2}$ 、波長 800nm、45 フェムト秒、コントラスト比 $> 10^{11}$ ）を 12.5 μm 厚さのポリイミドターゲットに照射することで、最大エネルギー約 18MeV の陽子線を発生させて蛍光膜の発光を確認した。図 3 左に、その時の実験概略図を示す。CCD カメラはトリガー付きの 4 ルクス程度の感度の市販品を利用した。CCD カメラ以外は真空中に設置されている。

計測結果を図 3 右(b)に示す。CCD カメラは 45 度の角度から撮影したために、正面から見た画像に変換している。計算結果と実測値である図 3 右(a)と (b)を比較すると発光特性等が計算結果と同じ傾向を示しており、オンライン・トムソン用蛍光膜モニタが PHITS コードによって最適化設計できることが確認された。この軌跡から得られるビームエネルギー等の分析はこれから実施される予定である。

5. まとめ

数十 MeV のレーザー駆動型イオン計測をトムソンパラボラで行うために、永久磁石と鉄電極を用いることで理想的な高平坦度磁場を実現するアイデアを提案し、PHITS コードを用いて蛍光膜モニタを最適化することで精度よくオンライン計測する手法の開発を行った。また、この理想磁場と蛍光膜モニタを持つトムソンパラボラにて、最大陽子エネルギー 18MeV 程度のレーザー駆動型イオンを計測しその手法の有効性を確認した。

今後は、50MeV 程度まで精度よく計測できるリアルタイムシステムを実現し、レーザー駆動型イオンが最も効率よく発生する最適化パラメーターを求めていきたい。

本研究は、日本学術振興会『最先端・次世代研究開発支援プログラム』に平成 22 年度採択された「革新的レーザー駆動イオン加速手法の開発」の研究開発の一環として行われた。

参考文献

- [1] A. P. Fews et al., Phys. Rev. Lett. **73** (1994) 1801.
- [2] F. N. Beg et al., Phys. Plasmas **4** (1997) 447.
- [3] R. A. Snavely et al., Phys. Rev. Lett. **85** (2000) 2945.
- [4] Clark E L et al., Phys. Rev. Lett. **84** (2000) 670.
- [5] Y. Fukuda et al., Phys. Rev. Lett. **103** (2009) 165002.
- [6] Philosophical Magazine, **44** (1897) 293.
- [7] D.C. Carroll et al., NIM A, **620** (2010) 23.
- [8] <http://www.fieldp.com/>
- [9] H. Kiriya et al., Optics Letters, **35-10** (2010) 1497.
- [10] M. Katagiri et al., NIMA **573** (2007) 149.
- [11] H. Iwase et al., J. Nucl. Sci. Technol. **39** (2002) 1142.
- [12] H. Sakaki Appl. Phys. Express **3** (2010) 126401.