

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 21 日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2014

課題番号：23540345

研究課題名(和文) プラズマ航跡場加速の検出器校正への応用

研究課題名(英文) Application of plasma wakefield acceleration to detector calibration

## 研究代表者

汲田 哲郎 (Kumita, Tetsuro)

首都大学東京・理工学研究科・助教

研究者番号：30271159

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：スーパーカミオカンデ等の検出器校正に使用できる、プラズマ航跡場加速による電子ビーム発生についてスタディを行った。コンピューター・シミュレーションの結果、通常より高密度のプラズマを利用して、電子ビームのバンチサイズよりもプラズマ波の波長がはるかに小さい領域でプラズマ航跡場加速を行うことにより、エネルギー広がりは大くなるが、加速エネルギーの最高値は大くなることが確認できた。しかし、検出器校正に使用するエネルギーには到達しないことが分かった。研究の副産物として、炭酸ガスレーザーと電子ビームのコンプトン散乱線の高次非線形効果が観測できた。

研究成果の概要(英文)：We studied production of high energy electrons using plasma wakefield acceleration for calibrating detectors, such as Super Kamiokande.

As a result of computer simulations, we found higher energy acceleration can be expected in plasma with higher density, where wavelength of the plasma is much shorter than bunch size of the electron beam, though energy spectrum of electrons is widely spread. However, the maximum energy of electrons was not high enough to be utilized for detector calibration. As a by-product of our study, we could observe nonlinear Compton scattering of electron and CO2 laser beams.

研究分野：高エネルギー物理学

キーワード：プラズマ加速 レーザーコンプトン散乱

### 1. 研究開始当初の背景

プラズマ航跡場加速は、電子ビームをプラズマ中に入射した時に励起されるプラズマ波(プラズマ航跡場)によって、その電子ビーム自体を加速する。この機構は、通常の高周波電場を用いた加速法に比べて、はるかにコンパクトな装置で電子加速を実現できる可能性がある。大強度レーザーを加速に用いるレーザープラズマ加速と比較しても、大型のレーザー装置を必要としない利点がある。

研究代表者・汲田は、米国ブルックヘブン国立研究所で、プラズマ・キャピラリーを用いたプラズマ航跡場加速の実験に成功していた。

一方、神岡地下ニュートリノ検出実験スーパーカミオカンデでは、これまでエネルギー数 MeV の太陽ニュートリノ観測のため、エネルギー 20MeV の医療用電子加速器を用いたエネルギー較正を行ってきた。しかし、超新星ニュートリノ実験や、東海村の J-PARC 陽子加速器からスーパーカミオカンデにニュートリノ・ビームを照射する T2K 実験のような、より高エネルギーのニュートリノを検出する実験のためには、高エネルギーの電子ビームを使ったエネルギー較正が必要となる。連携研究者・小汐は、スーパーカミオカンデの将来計画の実験精度評価をしており、T2K 実験のためには、ハドロン生成が可能となる数百 MeV の電子ビームを使用するのが望ましいという結論に達した。これを通常の電子加速器で実現するためには、全長数十 m に達してしまい、実験サイトに設置することができない。

このため、次世代加速器技術である、プラズマ航跡場加速を利用することが提案された。プラズマ航跡場加速は、プラズマ中を電子ビームが通過する時に励起するプラズマ波によって、電子ビーム自身が加速される現象である。プラズマ波の波長 $\lambda$ は以下の式で与えられる。

$$\lambda = 2\pi c \sqrt{\frac{\epsilon m}{ne^2}}$$

ここで、 $c$ は真空中の光速、 $\epsilon$ は真空の誘電率、 $m$ は電子の質量、 $n$ はプラズマ電子密度、 $e$ は電子の電荷である。プラズマ波によって電子を効率的に加速するためには、プラズマ波長と電子のバンチ長が同程度である必要がある。即ち、電子バンチの先頭が励起したプラズマ航跡場が加速フェーズになった時に、バンチの中心が通過するのが望ましい。プラズマ密度が高くなるとプラズマ波長が短くなり、バンチ長内に何波長分ものプラズマ波が存在することになる。この条件では、加速フェーズに何回も乗った電子は大きく加速されるが、ほとんど加速されない電子や減速される電子の割合が大きくなり、エネルギー・スペクトラムが大きく広がることになる。これは、通常の加速器としての使用には適さないが、我々の目的である、検出器のエネルギー較正では、高いエネルギーの電子が少数利用できれば良いので、高密度プラズマによる電子加速が利用できれば、通常よりも高い加速勾配が達成可能であると考えられた。

### 2. 研究の目的

ニュートリノ検出実験スーパーカミオカンデでは、将来の実験計画のため、高エネルギーニュートリノのエネルギー測定精度を高めることが要求されている。研究開始当初使用していた 20MeV 電子加速器や放射性同位元素によるエネルギー較正では、この要求を満たすことはできない。

この研究は、次世代の加速器技術であるプラズマ航跡場加速を利用して、スーパーカミオカンデ検出器のニュートリノに対する高精度のエネルギー較正が可能であることを示すことを目的とする。

### 3. 研究の方法

Particle-In-Cell 法によるプラズマ航跡場加速のシミュレーションを行い、最適なプラズ

マ密度のスタディを行う。シミュレーションには Windows workstation 上で動作する OOPICpro (Tech-X 社)を使用する。プラズマ密度とプラズマ領域の最適化によって、入射した電子のごく一部を数百 MeV まで加速できるかを検証する。

キャピラリー放電を利用したプラズマ・チャンネル装置を作成し、プラズマの生成を行う。これは、長さ数 cm のアクリル製キャピラリーの両端に取り付けられた電極からキャピラリー内壁に沿った放電を起こすことにより、プラスチックを熔融させ、プラズマを生成する装置である。図 1 に概念図を示す。数 cm の距離で放電を起こすには非常に高い電圧を必要とするため、長さ 3mm 程度のトリガー・キャピラリーを使用して二段階に分けたプラズマ生成を行う。

放電による発光スペクトル中の水素原子からのバルマー-H 線 (波長 656.28nm) の広がりを分光器で観測することにより、プラズマ密度を測定する。スペクトルの広がり $\Delta$ は Stark 効果によるエネルギー準位の広がりを反映するため、プラズマ中の電子密度と  $n[\text{cm}^3]=1.37 \times 10^{17}(\Delta [\text{nm}])^{2/3}$  という関係がある。

キャピラリーの内径、長さ、印加高電圧とプラズマ密度の相関をスタディし、シミュレーションにフィードバックする。

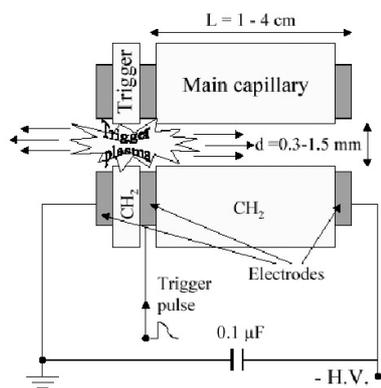


図 1: プラズマ生成の概念図

#### 4. 研究成果

Particle-In-Cell 法によるシミュレーションで、長さ 10mm のプラズマを 60MeV の電子が通過した時に加速される様子を示す。パラメータは研究代表者らが、ブルックヘブン国立研究所で行ったプラズマ航跡場加速実験 (Phys.Rev.Lett. 91 (2003) 014802)に基づいた。横軸が電子ビーム軸方向の距離。縦軸が各電子のエネルギーを表す。

上図がプラズマ密度  $10^{16}/\text{cm}^3$ 、下図が  $10^{20}/\text{cm}^3$ での結果に相当する。

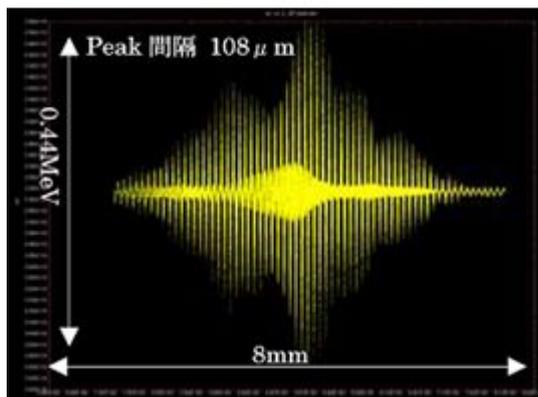
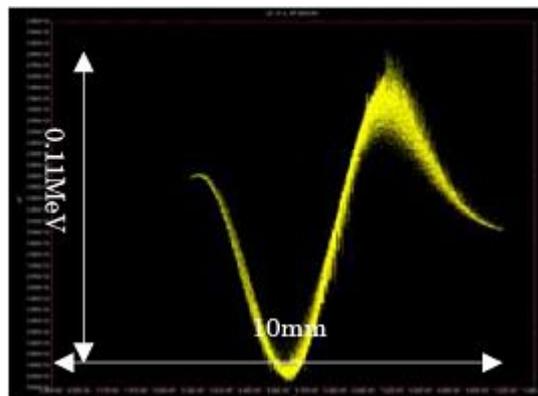


図 2: プラズマ航跡場加速のシミュレーション結果(上)プラズマ密度  $10^{16}/\text{cm}^3$  (下) $10^{20}/\text{cm}^3$

上図は、プラズマ波長が電子ビームのパンチ長程度の場合に相当し、多数の電子が最大限の加速を得ている。下図は、プラズマ波長がパンチ長よりはるかに小さい場合に相当し、各電子の加速がばらついているが、最大加速は上図よりも大きくなっているのが分かる。残念ながら、加速エネルギーの最大は 1MeV 以下であり、検出器の較正を目的として想定

していた 200MeV の電子を得ることは困難であることが分かった。

しかし、実験の副産物として、電子ビームと炭酸ガスレーザーの非線形コンプトン散乱に関する新たな知見が得られた。

図 3 に 60MeV の電子ビームと波長 10.6  $\mu\text{m}$  の炭酸ガスレーザーをコンプトン散乱させた時の生成 X 線のエネルギースペクトルを示す。これは Volkov 近似を用いた半古典論計算を基にしたシミュレーションで求められた。

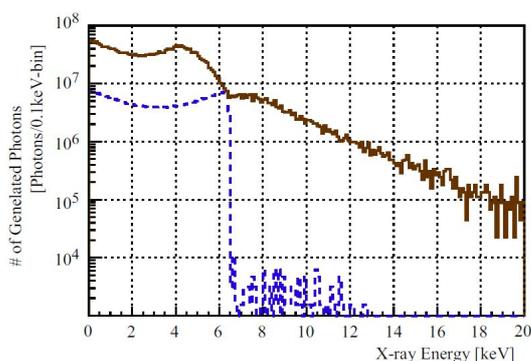


図 3: コンプトン散乱 X 線のエネルギー分布  
青破線は、レーザーのパワーが小さい時で、一光子吸収・一光子放出の線形コンプトン散乱のコンプトンエッジが 6.5keV に見られる。黒実線は、レーザーパワーを 1TW にした時で、二光子吸収・一光子放出の非線形コンプトン散乱による高エネルギー X 線がスペクトルの高エネルギー側を延ばしている。また、高電磁場中で電子の実効質量が増大する現象 (mass shift) を反映し、コンプトンエッジが鈍くなっている。

高エネルギー X 線の生成については、研究代表者らの観測結果を既に発表している (Phys.Rev.Lett. 96 (2006) 054802) が、今回、mass shift 効果の観測に成功した。

実験は、Brookhaven 国立研究所・加速器試験施設(ATF)で行われ、測定には、Si/Mo 各 2nm を 40 層積層した人工多層膜結晶を半径 4m の円柱形に湾曲させたものを使用した。

図 4 に実験装置の概念図を示す。

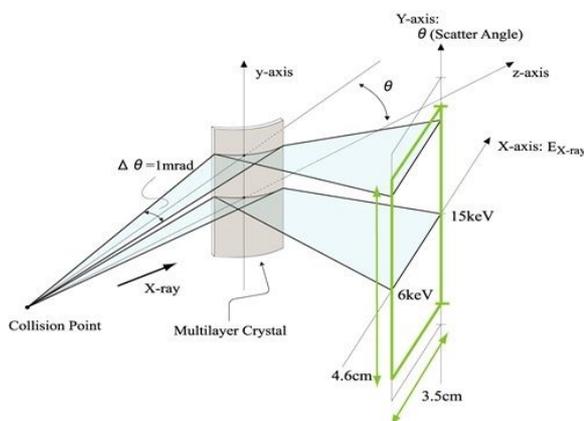


図 4: 人工多層膜結晶による X 線エネルギー測定概念図

図 5 に、人工多層膜で反射された X 線のイメージを示す。

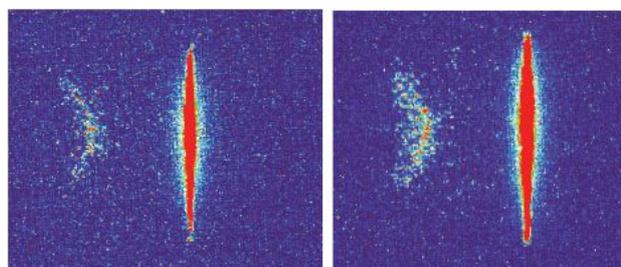


図 5: コンプトン X 線の観測イメージ (preliminary) 右図 1J、右図 3J。

左図が、レーザーのエネルギー 1J、右図が同 3J で検出されたイメージであり、各図の左側に見られる逆 C 字型イメージが人工多層膜で反射・分光された X 線である。コンプトンエッジに対応するエネルギーの強度が大きいため、濃く見えている。

エネルギー 3J の右図では、逆 C 字型が太くなっていて、mass shift 効果によって、コンプトンエッジが広がっていることを表している。

この実験結果は現在解析中であり、学術論文としての発表を予定している。

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 0 件)

[学会発表](計 0 件)

[図書](計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況（計 0件）

取得状況（計 0件）

0

〔その他〕

ホームページ等

[https://www.bnl.gov/atf/docs/](https://www.bnl.gov/atf/docs/ATFNewsletter_Oct2014.pdf)

ATFNewsletter\_Oct2014.pdf

## 6．研究組織

### (1)研究代表者

汲田 哲郎 (Kumita, Tetsuro)

首都大学東京・理工学研究科・助教

研究者番号：30271159

### (3)連携研究者

小汐 由介 (Koshio, Yusuke)

岡山大学・理学部物理学科・准教授

研究者番号：80292960