

時空間的に収束したイオンビームによる固体からの X線放出現象解明のための装置設計

DESIGN FOR THE CLARIFICATION OF X-RAY EMISSION PHENOMENA FROM SOLIDS BY SPATIO-TEMPORALLY FOCUSED ION BEAMS

岡野朱莉^{#, A, B)}, 大石沙也加^{A, B)}, 劉暢^{A)}, 熊谷嘉晃^{A)},
デンタンフン^{B)}, 小島完興^{B)}, 榊泰直^{B)}, 石井邦和^{A)}
Akari Okano^{#, A, B)}, Sayaka Oishi^{A, B)}, Liu Chang^{A)}, Yoshiaki Kumagai^{A)}
Thanh-Hung Dinh^{B)}, Sadaoki Kojima^{B)}, Hironao Sakaki^{B)}, Kunikazu Ishii^{A)}
^{A)} Nara Women's University

^{B)} Kansai Institute for Photon Science (KPSI), National Institutes for Quantum Science and Technology

Abstract

Laser-driven ion accelerators have been attracting attention due to advances in laser technology. Laser-driven ion beams are pulsed beams with a time width of about 1 nanosecond, and are different in nature from the DC current beams of ordinary accelerators. However, the irradiation effects of this beam have not yet been clarified in detail. Therefore, we focus on the characteristic X-rays emitted when the laser-driven ion beam is irradiated. In this report, we describe the design of an experimental apparatus that compares laser-driven ion beams with ion beams from ordinary accelerators to investigate changes in characteristic X-ray emission phenomena.

1. はじめに

近年のレーザー技術の発展により研究分野の地位を確立したレーザー駆動イオン加速は、超短パルス高強度レーザーを用いることで、わずか数 μm の加速長でMeV級にまでイオンを加速することが可能である。生成されたイオンビームは、発生源において1 ns程度の時間幅に1 nCを超える電荷量をもつ高電流なパルス・イオンビーム(短パルス高電流ビーム)[1]となる。この特徴を活かして時間空間的に今までない短時間での高エネルギー密度なイオンビームを作り出すことが可能であるが、例えばそのビームを物質に照射した際の相互作用を現象論的に説明することは困難である。

一方、静電加速器などを用いた低エネルギーのMeV級のイオンビーム(低電流連続ビーム)は、物質分析などに応用されている。例えば、PIXE分析法では、プロトンやヘリウムなどの荷電粒子を物質に照射した際に放出される特性X線を測定することで、物質の元素分析が可能である[2]。レーザー駆動イオン加速によるビームをこの分析について適用することを考えれば、短時間高エネルギー密度による相互作用で、物質表面が瞬時にプラズマ化し、特性X線のエネルギーシフトやK殻ダブルホールによるハイパーサテライトX線などが見られることが期待される。そこで本研究では、レーザー駆動イオン加速を用いた「短パルス高電流ビーム」と「低電流連続ビーム」を利用し、特性X線放出現象の相違の有無を調査する。

本報告では、短時間高エネルギー密度ビームによる特性X線放出現象を解明するために必要な検出器の検討について述べる。

2. レーザー駆動イオン加速器

レーザー駆動イオン加速において一般的に知られている加速原理である、TNSA (Target Normal Sheath Acceleration) 機構[3, 4]について説明する。Figure 1のように、集光強度が 10^{18}W/cm^2 以上である短パルスレーザーを数 μm の厚さの薄膜に照射すると、レーザー電場により薄膜中の電子が原子から剥がされる。その電子は瞬時に加速を受け、薄膜を突き抜けて真空中に飛び出す。同時に薄膜は正に帯電するため、ほとんどの電子が薄膜裏面に留まる。これにより、薄膜裏面にシース電場と呼ばれる電荷分離電場が形成され、この電場によって薄膜中のイオンはわずか数 μm でMeV級にまで加速される。

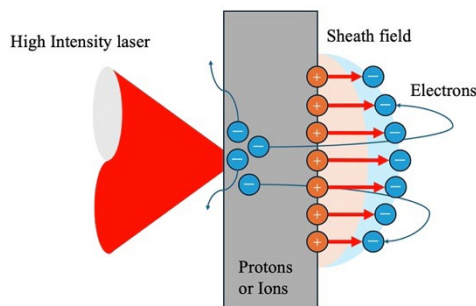


Figure 1: Schematic of TNSA acceleration mechanism.

このように生成されたレーザー駆動イオンビームは、シース電場の瞬間的な性質を引き継ぐため、時間幅わずか1 ns程度で 10^9 個のプロトンを含むビームとなる。この数は、一般的なタンデムバンデグラフ型静電加速器が1秒間に供給するプロトンビームに匹敵する。

[#] okano.akari@qst.go.jp

3. 装置設計

X線検出器を検討するにあたり、レーザー駆動イオンビームを物質に照射した際の特性 X 線の発生量を見積もる必要がある。今回は、Table 1 の条件で、全立体角に発生する K-X 線の本数を考える。この条件で、HPGe 検出器と結晶分光器の 2 つの検出器における収量を見積り、比較する。

Table 1: Conditions for Estimating

単位面積あたりの Fe 原子数 N [cm^2]	3.865×10^{17}
ビームに含まれるプロトンの総数 Q	10^9

特性 X 線発生断面積は、内殻に空孔ができる確率である内殻電離断面積と、内殻軌道の空孔あたりに放出される特性 X 線の割合である蛍光収量に依存する。イオンが物質に衝突した際、特性 X 線が放出される過程とオージェ電子が放出される過程がある。この競合過程のうち、特性 X 線が放出される割合を蛍光収量と呼び、蛍光収量は原子番号の増加に伴って増加する性質がある。したがって、イオンが物質に衝突した際の特性 X 線発生断面積 σ_X は電離断面積を σ_I 、蛍光収量を ω とすると、 $\sigma_X = \sigma_I \omega$ のように表され、その値は文献値から得ることができる[2]。

プロトンビームの分布が物質平面に対して一様で、エネルギー損失がその領域では無視できるような場合を考える。このとき、検出される特性 X 線のカウント数 Y は、物質中の単位面積あたりの原子数 N を用いて次式のように表される。

$$Y = NQ\sigma_X \frac{\Delta\Omega}{4\pi} \varepsilon \quad (1)$$

ここで、 Q はビームスポット内に入射したプロトンの数、 $\Delta\Omega$ は検出器の立体角、 ε は検出効率である。発生した Fe の K-X 線の総数は、Table 2 の値を用いて計算すると、約 6,000 本と見積もられる。以下では、HPGe 検出器と結晶分光器について、収量と分解能の観点から検討を行う。

まず、HPGe 検出器における収量の見積りを行った。Equation (1) の立体角 $\Delta\Omega$ および検出効率 ε の値は、HPGe 検出器を用いた関連研究[5]で得られた値を使用した。Table 2 の値を用いて計算すると、Fe の K-X 線の収量は $Y = 5$ と見積もられた。この値から、レーザー駆動イオン加速器において HPGe 検出器を使用できることがわかる。しかし、原理的に 1 ショットにつき 1 信号しか取り出すことができないため、統計的に十分なデータを取るには数千回以上のショットを行う必要があり、マニュアル操作のレーザー駆動イオンビーム実験においては非効率的である。

次に、結晶分光器における検討状況を紹介する。結晶分光器は、分光結晶のブラッグ反射を利用することで、物質から発生する特性 X 線を波長ごとに分離する装置である。以下にブラッグの回折条件の式を示す。

$$2d \sin \theta_B = n\lambda \quad (2)$$

Table 2: Conditions for HPGe Detector

	Fe-K $_{\alpha}$	Fe-K $_{\beta}$
X 線発生断面積 σ_X [cm^2]	1.442×10^{-23}	1.638×10^{-24}
4π に発生する特性 X 線の総数	5576.3	755.58
立体角を含む検出効率 $(\Delta\Omega/4\pi)\varepsilon$	8.835×10^{-4}	8.227×10^{-4}
収量 Y	4.46	0.578

ここで、 d は分光結晶の格子定数、 θ_B はブラッグ角、 λ は分光される X 線の波長、 n は自然数である。点光源から放出された X 線は、Eq. 2 を満たしたときのみ反射され、同じ波長の X 線がそれぞれ一点に集光される。このときブラッグの回折条件を満たしていない X 線は検出できないため、集光強度を上げるために湾曲結晶が用いられることが多い。そこで本研究では、von Hamos 幾何学を利用した湾曲結晶を検討している。

von Hamos 分光器は、Fig.2 のように、円筒状に曲げられた結晶の軸上に、X 線源と位置検出器を配置した分光器で、結晶を湾曲させることで集光効率を向上させることができる[6, 7]。

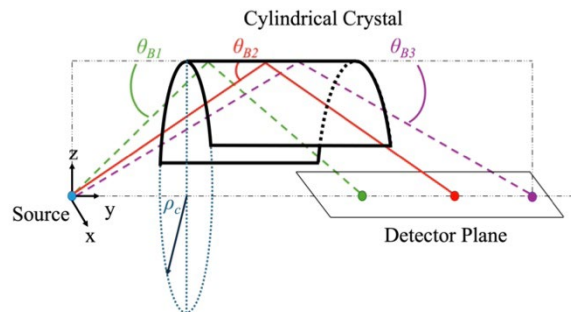


Figure 2: von Hamos geometry.

最後に、エネルギー分解能の観点から比較を行う。HPGe 検出器の分解能は、Mn の K $_{\alpha}$ -X 線 (5.895 keV) に対して 135 eV である。この分解能では、特性 X 線のサテライト構造を分離することは厳しく、特性 X 線のエネルギーシフトとして観測される。また、K 殻の 2 つの内殻電子のイオン化に対応するハイパーサテライト X 線は観測可能な分解能であると言える。

一方で、一般的な結晶分光器の分解能は、数十 eV と優れているため、X 線スペクトルにおけるサテライト構造まで分解することが可能となる。したがって、結晶分光器は本研究における検出器として検討の余地があると言える。

4. まとめと今後の計画

レーザー駆動イオン加速器による時空間的に収束したイオンビームの照射効果は、局所的に極端環境を形成するため非常に興味深いものと言えるが、まだ詳しく解

明されていない。そこで、本研究ではレーザー駆動イオンビームを物質に照射した際に放出される特性 X 線に着目し、検出器の検討を行っている。

収量の観点から見ると、HPGe 検出器を使用することは可能であることがわかった。分解能の観点から見ると、HPGe 検出器ではエネルギーシフトやハイパーサテライト X 線を見ることはできるが、サテライト構造の分離は困難である。この点において、結晶分光器は一般的に優れた分解能を有しているため、検討を行う余地がある。それに伴い、結晶分光器の収量の見積りを行う必要がある。分光結晶の種類や大きさ、位置検出器など、結晶分光器の最適なセットアップを検討し、最終的に HPGe 検出器の収量および分解能と比較することで、本研究における検出器の決定を行う。

謝辞

本研究は、JST、未来社会創造事業、JPMJMI17A1 の支援を受けて実施された。

参考文献

- [1] M. Barbetio, S. Veltri, M. Sció and P. Antici, “Laser-Accelerated Proton Beams as Diagnostics for Cultural Heritage”, *Scientific Reports*, 7:40415 (2017).
- [2] S. A. E. Johansson and J. L. Campbell, “PIXE A Novel Technique for Elemental Analysis”, John Wiley & Sons Ltd. (1988).
- [3] E. L. Clark *et al.*, “Measurements of energetic proton transport through magnetized plasma from intense laser interactions with solids”, *Phys. Rev. Lett.* 85, 1654, (2000).
- [4] R. A. Snavely *et al.*, “Intense high-energy proton beams from Petawatt-Laser irradiation of solids”, *Phys. Rev. Lett.* 85, 2945 (2000).
- [5] I. Sakakura, “PIXE 法の医学への応用”, 奈良女子大学大学院, 修士論文 (2006).
- [6] L. von Hamos, *Naturwissenschaften*, 20, 705 (1932).
- [7] L. von Hamos, *Ann. Phys. (Leipzig)* 17, 716 (1933).