

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 4 日現在

機関番号：63902

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23740412

研究課題名(和文) 磁場閉じ込め高温プラズマを利用した高Z多価イオンの極端紫外スペクトルの研究

研究課題名(英文) Studies on EUV spectra from highly charged high Z ions using magnetically confined high temperature plasmas

研究代表者

鈴木 千尋 (SUZUKI, CHIHIRO)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教

研究者番号：30321615

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円、(間接経費) 930,000円

研究成果の概要(和文)：短波長光源開発への応用や、核融合プラズマ中の不純物挙動の理解を念頭に、核融合科学研究所の大型ヘリカル装置(LHD)で生成される光学的に薄い高温プラズマを光源として、ランタノイド系元素、タンゲステン、ビスマスとその周辺の高原子番号(高Z)元素多価イオンからの極端紫外スペクトルを観測した。電子温度を変化させることで、イオンの価数分布が変化し、スペクトルの様相が大きく変化することが確認された。広範囲のZに及ぶ実験データベースが系統的に整備されるとともに、離散的なスペクトル線の同定や、理論計算との比較検討を通じて、スペクトルの発光機構や原子番号・電子温度依存性の理解が進展した。

研究成果の概要(英文)：In terms of the development of short wavelength light source and the understanding of impurity behaviors in fusion plasmas, we have observed extreme ultraviolet spectra from highly charged high Z ions of lanthanides, tungsten, bismuth, etc. in optically thin, high temperature plasmas produced in the Large Helical Device (LHD). Spectral feature has drastically changed depending on the electron temperature because of the change in ion abundance. Experimental database has been systematically developed in a wide range of Z. The emission mechanism as well as the dependences on Z and electron temperature has been well understood through the identifications of discrete spectral lines and the comparative analyses with theoretical calculations.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：プラズマ科学

キーワード：プラズマ・核融合 原子・分子物理 光源技術 国際情報交換(アイルランド)

1. 研究開始当初の背景

原子番号の高い(高 Z)元素の多価イオンを含むプラズマからの極端紫外(EUV)領域の発光スペクトルは、基礎的な原子物理学上の興味にとどまらず、半導体リソグラフィや「水の窓」領域用の短波長光源開発、および核融合プラズマ中の不純物挙動の理解といった、応用の面からも重要である。そのため、近年世界的に研究が盛んになっているが、原子データや分光モデルがまだ十分に整備されていないのが現状である。

一方、磁場閉じ込め核融合プラズマ実験装置で生成されるプラズマは、数keV程度の高温かつレーザー生成プラズマ等と比較して希薄である。すなわち、光学的に薄いプラズマ中の高 Z ・高価数イオンからのEUVスペクトルが高輝度で観測できるという特徴を持った光源であるといえる。核融合科学研究所の磁場閉じ込めプラズマ実験装置である大型ヘリカル装置(LHD)には、ペレット入射装置やEUV領域の分光器がすでに設置されており、任意の固体状元素の導入とそのスペクトルの観測が可能である。さらに、電子温度・密度分布を高い精度で計測できるレーザートムソン散乱計測装置をはじめ、信頼性の高い各種計測器が整備されているため、EUVスペクトルの実験データベースのソースとして適していると考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、上述の背景をふまえ、高 Z 元素のEUVスペクトルデータベースの充実に寄与するために、LHDで生成される光学的に薄い高温プラズマを光源として活用し、高 Z 元素を不純物として導入してEUVスペクトルを観測する。次世代の短波長EUVリソグラフィ技術への応用が期待されるランタノイド系元素や、水の窓光源への応用が検討されているビスマス、および国際熱核融合実験炉ITERにおけるダイバータ材料として採用されるタングステンといった応用上重要な元素を中心として、それらの周辺の元素についても、 Z 依存性を系統的に調べる観点から、可能な限りデータを蓄積する。

理論計算から予想されるスペクトルとLHDにおける実験データの比較検討を通じて、EUVスペクトルの発光機構の総合的・相補的な理解や原子番号・電子温度依存性の理解を深めることを目的とする。

3. 研究の方法

LHDにすでに設置されているペレット入射装置を用いて、固体状の各種高 Z 元素をLHDプラズマ中に入射し、既設の斜入射型真空紫外分光器を用いてEUVスペクトルの観測実験を行う。事前にこれらの実験装置の整備を行うとともに、対象となる材料を購入し、ペレットの製作を行う。過去のレーザープラズマ

による実験や理論計算を参照し、EUV領域の主要な放射が予想される波長付近のスペクトルを計測し、LHDで観測されるスペクトルの原子番号・電子温度依存性の傾向を把握する。計測対象として、できるだけ広範囲の Z の異なる元素を、応用上の観点もふまえて必要に応じて追加する。プラズマ加熱パワーも変化させて電子温度をスキャンしながら実験を行う。

過去の論文や基礎実験装置によるデータを参照し、LHDで得られたスペクトル線の価数や遷移の詳細な同定と検証を行う。一方で、海外研究協力者であるO'Sullivan教授のグループの協力を得て、擬似相対論的ハートリー・フォック法により原子構造計算を行うCowanコードを用いて、ランタノイド系元素を中心としたエネルギー準位の計算を行う。計算されたスペクトルと、実験結果との比較・検討を行い、その結果を国内学会および国際会議において発表するとともに、論文としてまとめて学術論文誌に投稿する。

4. 研究成果

研究開始当初は、応用上特に重要であるタングステン(W)・ガドリニウム(Gd)・ネオジム(Nd)の3種類の元素を対象とした。これらの元素をペレット入射装置を用いてLHDプラズマ中に入射し、EUVスペクトルを観測した。過去のデータを参照し、観測波長域は、タングステンについては5nm付近と18nm付近、ガドリニウム・ネオジムについては7-8nm付近に設定した。加熱パワーを制御して放電中に電子温度を変化させることで、イオンの価数分布が変化し、スペクトルの様相が大きく変化することが確認された。1keV程度の電子温度では、4p-4d遷移による疑似連続的なスペクトルが観測され、 Z の増加とともに短波長側に移動する傾向が確認された。ランタノイド系元素では、中空型のプラズマが生成されて、電子温度が300eV程度以下まで低下した場合に、疑似連続スペクトルがさらに狭帯域化する現象が観測された。一方、電子温度が2keV程度以上とさらに高い場合には、疑似連続的な発光は弱まり、離散的なスペクトルに変化した。これらはプラズマ中の価数分布の変化で定性的に説明される。

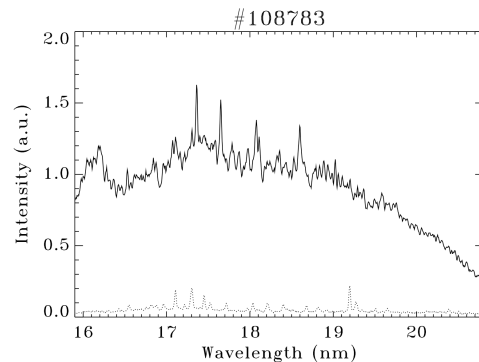


図1: 18 nm 付近で観測されるタングステンの疑似連続スペクトル。

タングステンについては、電子温度 1 keV 以下において、5 nm 付近に加えて 18 nm 付近にも疑似連続的なスペクトルが観測された。その一例を図 1 に示す。海外研究協力者による Cowan コード計算結果と比較し、比較的low価数のイオンからの $n=5-5$ 遷移による発光であると解釈された。この結果は第 17 回プラズマ中の原子過程に関する国際会議にて口頭発表するとともに、J. Phys. B 誌に投稿論文として発表した。

さらに、ガドリニウム周辺のランタノイド系元素として、新たにテルビウム (Tb)・ジスプロシウム (Dy) を、また水の窓光源関連でビスマス (Bi) を LHD プラズマ中に入射し、EUV スペクトルを観測した。観測波長域は、テルビウム・ジスプロシウムについては、6-7 nm 付近、ビスマスについては 2-4 nm 付近とした。前者については、ガドリニウムやネオジム同様に、放電中の電子温度の変化にともなうスペクトルの様相の変化が確認されたが、後者についてはほとんど変化が見られず、疑似連続的なスペクトルのみが観測された。電子温度が 300 eV 程度以下の中空型のプラズマおよび 2 keV 程度の高温プラズマ中で観測される、Gd, Tb, Dy からのスペクトルをそれぞれ図 2, 3 にまとめて示す。

ガドリニウム・ネオジムからの EUV スペクトルの電子温度依存性の解析を進め、電子温度が高い場合に観測される離散的なスペクトル線をニッケル様・銅様イオンのラインと同定するとともに、中空型のプラズマが生成された場合に観測されるスペクトルから、銀様・パラジウム様イオンのラインを同定した。これらの解析結果を J. Phys. B 誌に投稿論文として発表するとともに、これまでのタングステンに関する解析結果と合わせてまとめ、第 4 回プラズマ中の原子分子過程に関する

日中セミナー、および第 22 回国際土岐コンファレンスにて発表した。

パラメータの異なるプラズマからのスペクトルと比較するため、海外研究協力者との共同によるレーザー生成プラズマ実験結果との比較・検討も行い、第 17 回多価イオンの物理に関する国際会議にて発表した。

EUV スペクトルの原子番号依存性の詳細な理解を念頭に置き、さらに Z の範囲を広げて、高 Z 元素の入射・EUV スペクトルの観測実験を実施した。リソグラフィ用光源開発関連では、新たにサマリウム (Sm)、エルビウム (Er)、イッテルビウム (Yb)、ルテニウム (Ru) を入射し、 $Z = 60$ から 71 に至る系統的なデータを取得することができ、GRASP コードによる理論計算との比較検討を進めた。また、水の窓光源開発関連では、ビスマスに加えて金 (Au)、鉛 (Pb) のデータも取得し、Cowan コードによる理論計算や、レーザー生成プラズマにおけるスペクトルとの比較検討を進めた。図 4 に、3-5 nm 付近で観測される Au, Pb, Bi の疑似連続スペクトルを示す。これらの元素については、LHD において可能な範囲で電子温度を上昇させても、離散的なスペクトルへの変化は見られなかった。ランタノイド系元素に比べて Z がさらに大きいため、離散的なスペクトルを得るためにはより高い電子温度が必要なためであると考えられる。

これらの研究成果は、Physica Scripta 誌の論文としてまとめるとともに、「天体・実験プラズマの原子スペクトルに関する国際会議」において招待講演として発表し、また「EUV・軟エックス線光源に関する国際ワークショップ」における口頭講演としても発表した。

以上のように、3 年間の本研究によって、光学的に薄いプラズマからの高 Z 元素多価イオンの EUV スペクトルに関する実験データベースの整備は大きく進展した。スペクトルの電子温度依存性や Z 依存性が明らかになり、EUV 光源開発や核融合プラズマ中の不純物挙動の解明に有用な知見が得られた。理論計算との比較検討についても、今後のさらなる進展が期待される。

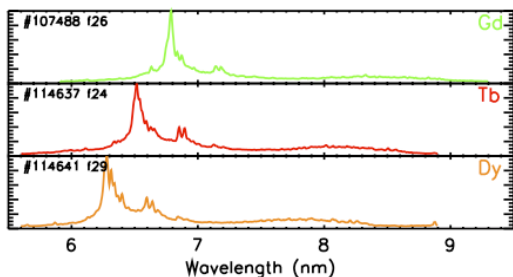


図 2: 中空型のプラズマで観測される Gd, Tb, Dy からの EUV スペクトル。

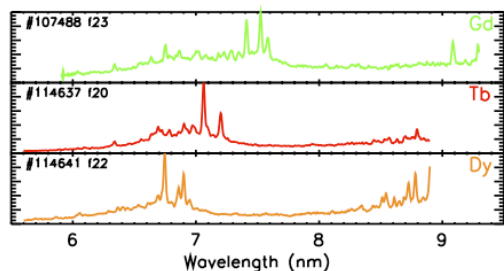


図 3: 高温のプラズマで観測される Gd, Tb, Dy からの EUV スペクトル。

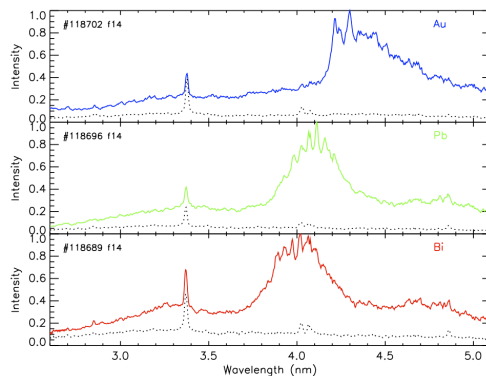


図 4: 3-5 nm 付近で観測される Au, Pb, Bi の疑似連続スペクトル。

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3件)

- ① C. Suzuki, F. Koike, I. Murakami, N. Tamura, S. Sudo, C. O’Gorman, B. Li, C. S. Harte, T. Donnelly and G. O’Sullivan: “Extreme ultraviolet spectra from highly charged gadolinium and neodymium ions in the Large Helical Device and laser produced plasmas, *Physica Scripta*, Vol. T156 (2013) pp. 014078-1-3. (査読有)
DOI: 10.1088/0031-8949/2013/T156/014078
- ② C. Suzuki, F. Koike, I. Murakami, N. Tamura, S. Sudo: “Observation of EUV spectra from gadolinium and neodymium ions in the Large Helical Device”, *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, Vol.45 (2012) pp.135002-1-6. (査読有)
DOI: 10.1088/0953-4075/45/13/135002
- ③ C. Suzuki, C. S. Harte, D. Kilbane, T. Kato, H. A. Sakaue, I. Murakami, (他8名、1番目): “Interpretation of spectral emission around 20 nm region from tungsten ions observed in fusion device plasmas”, *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, Vol.44 (2011) pp.175004-1-7. (査読有)
DOI: 10.1088/0953-4075/44/17/175004

[学会発表] (計6件)

- ① C. Suzuki, F. Koike, I. Murakami, N. Tamura, S. Sudo, T. Higashiguchi and G. O’Sullivan: “Observations of EUV spectra from highly charged heavy ions in optically thin plasmas for benchmarking of models”, 2013 International Workshop on EUV and Soft X-Ray Sources, November 3-7, 2013, Dublin
- ② C. Suzuki, F. Koike, I. Murakami, N. Tamura, S. Sudo, H. A. Sakaue, N. Nakamura, S. Morita, M. Goto, D. Kato, T. Nakano, T. Higashiguchi, C. S. Harte and G. O’Sullivan: “EUV spectroscopy of highly charged high Z ions in the Large Helical Device plasmas”, 11th International Colloquium on Atomic Spectra and Oscillator Strengths for Astrophysical and Laboratory Plasmas, August 5-9, 2013, Mons
- ③ C. Suzuki, F. Koike, I. Murakami, N.

Tamura, S. Sudo, C. S. Harte, G. O’Sullivan: “Interpretation of EUV spectra from tungsten and lanthanide ions observed in the Large Helical Device”, 22nd International Toki Conference on Cross-Validation of Experiment and Modeling for Fusion and Astrophysical Plasmas, November 19-22, 2012, Toki

- ④ C. Suzuki, F. Koike, I. Murakami, N. Tamura, S. Sudo, C. O’Gorman, B. Li, C. S. Harte, T. Donnelly and G. O’Sullivan: “EUV spectra from highly charged gadolinium and neodymium ions in LHD and laser produced plasmas”, 16th International Conference on the Physics of Highly Charged Ions, September 2-7, 2012, Heidelberg
- ⑤ C. Suzuki, F. Koike, I. Murakami, T. Kato, M. Goto, T. Nakano, N. Tamura, S. Sudo, C. S. Harte and G. O’Sullivan: “Observations of EUV spectra from tungsten and lanthanide ions in LHD”, The 4th China-Japan Joint Seminar on Atomic and Molecular Processes in Plasma, July 30-Aug 4, 2012, Lanzhou
- ⑥ C. Suzuki, C. S. Harte, D. Kilbane, T. Kato, H. A. Sakaue, I. Murakami, (他8名、1番目): “Interpretation of spectral emission around 20 nm region from tungsten ions observed in fusion device plasmas”, The 17th International Conference on Atomic Processes in Plasmas, July 20, 2011, Belfast

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鈴木 千尋 (SUZUKI, Chihiro)
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教
研究者番号: 30321615

(2) 研究協力者

Gerard O’SULLIVAN
University College Dublin, School of Physics, Professor