

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 1 日現在

機関番号： 14401

研究種目：若手研究（A）

研究期間：2009～2011

課題番号：21684034

研究課題名（和文） レーザー生成 keV 黒体光源で探る光電離・非熱平衡プラズマ現象

研究課題名（英文） Study of non-LTE photoionized plasma generated by laser-produced keV blackbody radiator

研究代表者

藤岡 慎介 (FUJIOKA SHINSUKE)

大阪大学・レーザーエネルギー学研究センター・准教授

研究者番号：40372635

研究成果の概要（和文）：高輝度 X 線で満たされた環境中に低温なガスやプラズマが存在する場合、光電離プラズマが生成される。天体観測では、白鳥座 X-3 や帆座 X-1 など、ブラックホール又は中性子星と伴星が対になった、連星系において光電離プラズマが観測されている。本研究ではレーザー爆縮法を用いて、500 eV に達する高輝度黒体 X 線放射源を生成し、この X 線を低温・低密度のシリコン又はマグネシウムプラズマに照射することで、実験室中で光電離・非熱平衡プラズマを生成した。光電離・非熱平衡プラズマからの X 線発光スペクトル及び吸収スペクトルを観測し、天体観測だけでは分からなかった発光線の起源やプラズマ中のイオンの価数分布を明らかにすることが出来た。

研究成果の概要（英文）：Photoionized plasmas are encountered in astrophysics wherever low temperature gas/plasma is bathed in a strong radiation field. X-ray line emissions in the several keV spectral range were observed from accreting clouds of binary systems, such as CYGNUS X-3 and VELA X-1, in which high-intensity x-ray continua from compact objects (neutron stars, black holes or white dwarfs) irradiate the cold and rarefied clouds. X-ray continuum-induced line emission accurately describes the accreting clouds, but experimental verification of this photoionized plasma model is scarce. Here we report the generation of photoionized plasmas in the laboratory under wellcharacterized conditions using a high-power laser. A blackbody radiator at a temperature of 500 eV, corresponding to a compact object, was created by means of a laser-driven implosion. Atomic kinetic calculations imply the importance of direct K-shell photoionization by incoming hard x-rays.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	11,500,000	3,450,000	14,950,000
2010 年度	8,000,000	2,400,000	10,400,000
2011 年度	1,700,000	510,000	2,210,000
年度			
年度			
総計	21,200,000	6,360,000	27,560,000

研究分野：プラズマ科学

科研費の分科・細目：プラズマ科学

キーワード：光電離プラズマ、黒体放射光源、高出力レーザー、レーザー生成プラズマ、実験室宇宙物理、X 線天文学

## 1. 研究開始当初の背景

本研究では光電離プラズマの X 線分光研究を実施した。低温・低密度のプラズマを高

輝度 X 線で励起すると光電離プラズマが生成出来る。本研究以前で用いられた高輝度 X 線のプランク放射温度は 100 eV 程度であり、

光電離されるプラズマの温度と同程度であった。そのため、プラズマの温度と X 線放射の非熱平衡性が再現されず、実験室で宇宙環境を模擬したとは言い難い状況であった。

本研究では、500 eV に達する高いプランク放射温度を有する X 線源を生成する手法を發明し、この手法を用いて宇宙で観測されている非熱平衡光電離プラズマを実験室で生成し、その分光特性を詳細に調べることに成功した。

## 2. 研究の目的

実験室天文学とは、オパシティー、状態方程式、エネルギー輸送などの天体プラズマの基礎特性、流体現象及び粒子加速などのダイナミックな天文学的現象を大規模パルスレーザー装置で実験的に検証する新しい学問分野である。天体観測及びモデル予測と天文学実験の結果との定量的な比較を通じて天文学の理解を深めることで天文学に貢献する、従来とは異なるアプローチの新しい天文学手法として期待される。

大質量コンパクト天体、例えばブラックホール、と伴星で形成されている連星では、ブラックホール周辺に降着する物質が円盤を形成している (図 1 (a))。降着した物質は円盤中で重力エネルギーを熱エネルギーに変えながら温度を上昇させる。極めて高温に達した円盤は高輝度な X 線を放射するため、ブラックホール周囲は宇宙で最も明るい X 線源の一つである。ブラックホール周囲に存在する降着中の物質や伴星はこの高輝度な X 線に曝されてプラズマ化し蛍光 X 線を放射している。この過程を光電離と呼び、光電離プラズマの X 線分光診断は X 線天文学において、ブラックホールの進化を研究する上で重要な手段となっている。

光電離プラズマの X 線スペクトルからブラックホール周囲の環境、更にはブラックホールの進化を探るには、測定結果をモデル又はシミュレーションを用いて解析し、その特性を決定する物理量 (温度・密度など) を導き出さねばならない。ところで、モデル及びシミュレーションは実験結果と比較されて初めて、その妥当性・精度が保証される。ブラックホール周囲での X 線環境を実験室で作出すことは今日まで極めて困難であったため、光電離プラズマに関わるモデル及びシミュレーションはその正しさを十分に担保されないまま利用され、研究が行われてきた。

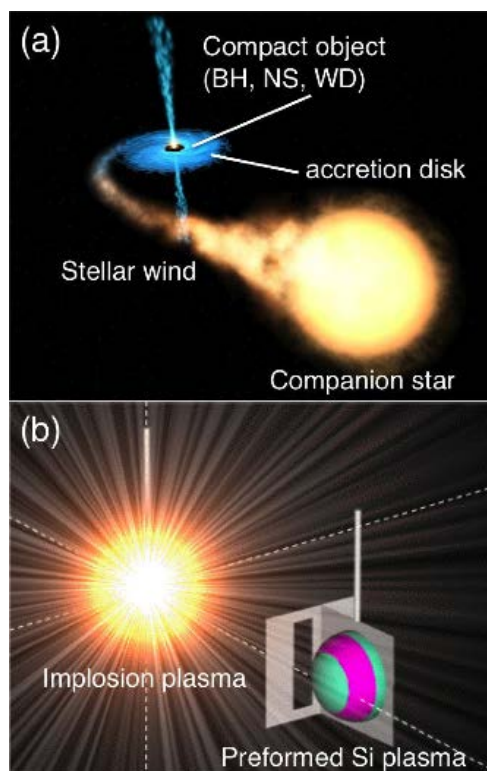


図 1 (a)コンパクト星を中心を持つ連星の模式図。(b) 実験室における連星系の模擬実験

## 3. 研究の方法

レーザーを使えば、空間的に限られた領域にわずかな時間で大量のエネルギーを物質に注入出来る。レーザーによって生成されたプラズマは、他の方法では到底実現し得ない高いエネルギー密度を有している。本研究では、高出力レーザーで駆動される爆縮を利用して、更に高温で高密度なプラズマを生成した。爆縮プラズマを keV (一千万度) の超高温を有する黒体光源として利用し、ブラックホール周囲の X 線環境を再現する。実験配置の模式図を図 1 (b)に示す。

実験では直径 500  $\mu\text{m}$ 、壁厚 7  $\mu\text{m}$  で中空のプラスチック球殻に球対称に配置された GXII レーザービーム (エネルギー 4 kJ、波長 0.53  $\mu\text{m}$ 、パルス幅 1.2 ns) を照射した。プラスチック球殻は直径 50  $\mu\text{m}$  にまで圧縮され爆縮コアを形成する。このコアプラズマから放射された X 線のスペクトルを分光器で計測し、0.5 keV (500 万度) の黒体放射体となっていることを明らかにした (図 2)。このような高温黒体放射体に匹敵する X 線源は、まさにブラックホール周囲に形成された降着円盤ぐらいである。

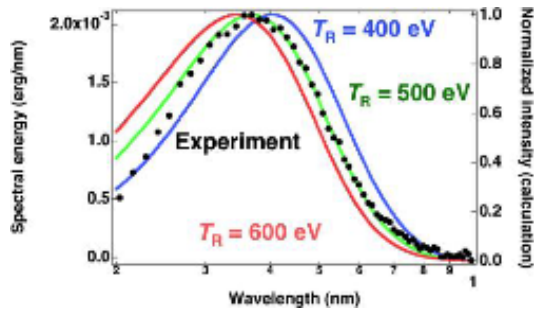


図 2 爆縮コアプラズマから放射された X 線スペクトル。温度 0.5 keV の黒体光源の計算結果と最も良く一致している。

実験室に生成した模擬ブラックホール（黒体光源）から 1.2 mm 離れた位置に低温で低密度のシリコンプラズマを生成した。このシリコンプラズマが降着流や伴星表面の物質を模擬している。シリコンは天体で比較的豊富に存在する元素であり、本研究で実現できる X 線輝度、計測機器感度等を考慮して、光電離される物質としてシリコンを選択した。

#### 4. 研究成果

##### 4.1 X 線スペクトルの観測

X 線源である爆縮コアプラズマと光電離プラズマ源であるシリコンプラズマを同時に生成し、光電離シリコンプラズマから放射される X 線スペクトルを分光器で取得した。実験室で得られたスペクトルとブラックホール候補星を中心に持つ白鳥座 X-3 や中性子星を中心に持つ帆座 X-1 から観測衛星で観測されている X 線スペクトルと比較した（図 3）。互いに非常に良く似た形状を示しており、ブラックホール周囲の環境がまさに実験室内に模擬出来たと言える。

実験で生成された光電離プラズマの場合、励起に使われた X 線の輝度、光電離プラズマの温度・密度等々が計測誤差の範囲内で明らかになっており、シミュレーションに入力するパラメーターに計測誤差以外の不確定が無い。これは従来の天文観測と大きく異なる点であり、実験室宇宙物理学が天文物理学の検証にとって強力な武器となる所以である。

##### 4.2 X 線スペクトルの解析

実験室で得られたスペクトルを詳細な原子過程を組み込んだシミュレーションと比較検討した。

実験的に計測したシリコンプラズマの温度及び密度を有するプラズマに、実験的に測定した輝度とプランク放射温度を有する X 線を照射した場合の、温度及び密度の

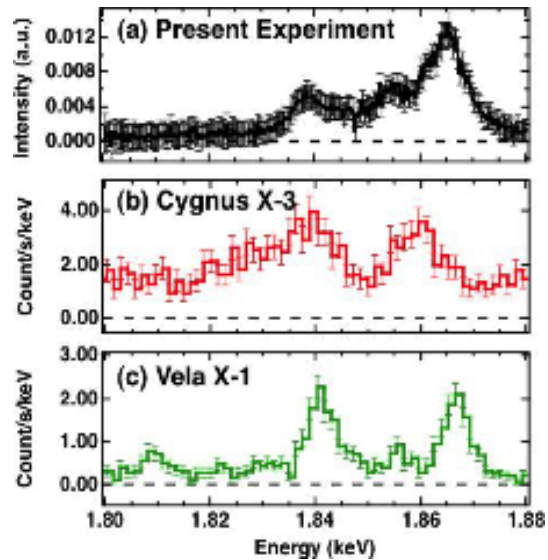


図 3 (a) 実験室で生成した光電離シリコンプラズマから放射された X 線スペクトル。(b)白鳥座 X-3 及び(c) 帆座 X-1 で観測されている X 線スペクトル

時間変化を 1 次元の輻射流体シミュレーションコード (HELIOS-CR) で計算した。次に、シミュレーションで得られたプラズマの温度及び密度と、実験的に測定した X 線強度の時間変化を、時間依存の原子過程コードである FLYCHK 及び Prism SPECT に入力し、X 線スペクトルを出力させた。

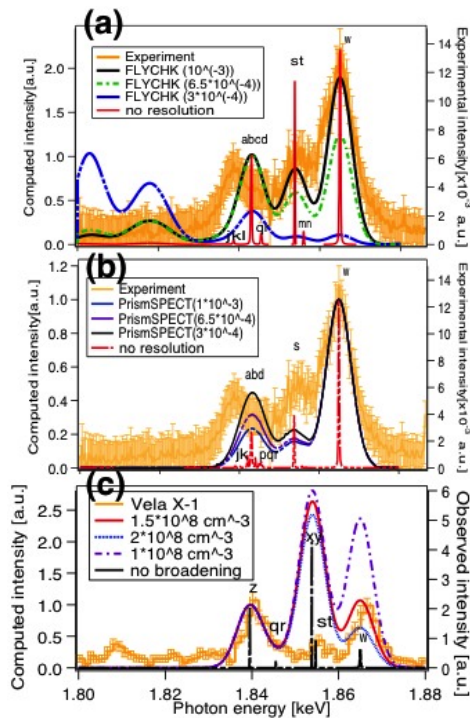
両者の比較の結果、実験室で得られたスペクトルは、天文学で受け入れられている発光起源では説明出来ないことが明らかになった。不一致の一つは、1.84 keV 近傍の発光線の起源である。天文学ではヘリウム様シリコンの禁制線 ( $1s^{21}S_0 - 1s2s^3S_1$ ) と同定されているが、解析の結果ベリリウム様のシリコンイオンが光電離されて発生する内殻励起されたリチウム様サテライト線 ( $1s^2nl-1s2pnl$ ) である可能性が高いことが示された。

FLYCHK (図 4 (a)) では比較的良く実験結果を再現出来ている一方で、Prism SPECT (図 4 (b)) では 1.85 keV の X 線発光が再現出来ていないことが明らかになった。この差異は、2 重励起状態によるサテライト線発光の取扱にコード間で差があるためと考えられる。

このようにプラズマ実験で非常に良く使われている原子過程コードですら、実験との間に差があり、ベンチマークが重要であることが明らかになった。この結果を見ても、天文分野で使われているコードにおけるベンチマークも重要性は明かである。

実験結果を比較的良く再現した FLYCHK





コードを用いて、現在推定されている温度

図4 (a) 実験結果と FLYCHK コードを用いた計算結果の比較 (b) 実験結果と Prism SPECT コードを用いた計算結果の比較 (c) 帆座 X-1 で観測されている X 線スペクトルと FLYCHK コードを用いた計算結

果を比較している。密度条件で、VELA X-1 で観測された X 線スペクトルを計算した結果を図 4 (c) に示す。1.85 keV の X 線発光が観測と大きく異なるという大変興味深い結果が得られた。

本研究成果をベースに天体観測の解析に使われているコードのベンチマークが進展すれば、既に同定されている天体プラズマの温度・密度が大きく変わるかもしれない。

#### 4.3 X 線吸収スペクトルの観測

光電離プラズマの吸収分光特性は、光電離を行う X 線の輝度や温度によって大きく変化する。この変化が実験室でも再現できるかどうかを、光電離プラズマの爆縮プラズマからの黒体放射 X 線をバックライト光源として使い、マグネシウムの光電離プラズマのオパシティー計測を実施した。

実験で計測されたマグネシウムの光電離プラズマの吸収スペクトルは、特に 5–8 nm の波長域で計算結果との差が大きいが明らかになった。これは、この波長域の光を吸収する低価数のマグネシウムイオンの存在比を、計算では大目に評価している

ことを示唆している。

また、光電離を行う X 線強度が強くなるに従って、3.5–5 nm の波長域で透過率に変化が見られた。この変化は X 線の輝度が大きくなるにつれて、光電離によりシリコンイオンが高価数に電離され、この波長域での光の吸収が増加したためと考えられる。

このようにオパシティー計測により、従来の発光分光だけでは分からなかった、プラズマ中での電離度の変化を推察することが出来るようになった。

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 10 件)

① Charge-exchange EUV spectroscopy in collision of Xe q 7 9 with rare gases, H. Tanuma, H. Ohashi, N. Yamamoto, D. Kato, I. Murakami, S. Fujioka, H. Nishimura, K. Nishihara, *Physical Review A*, Vol. 84, p. 042713 (2011).

② Two-Facing Irradiation of Laser Pulses to Suppress Position Shift of Expanded Tin Microsphere for Extreme Ultraviolet Light Source, Yuji Matsuoka, Shinsuke Fujioka, Hiroaki Nishimura, *Applied Physics Express*, Vol. 4, 056201 (2011).

③ レーザー爆縮法による keV 黒体放射場の形成と天体模擬光電離プラズマの生成, 山本則正, 藤岡慎介, 西村博明, SALZMANN David W., WANG Feilu, LI Yutong, WANG Shoujun, ZHANG Yi, RHEE Yong-Joo, LEE Yong-Woo, ZHANG Jie, 村上泉, 加藤太治, 三間國興, 高部英明, *プラズマ核融合学会誌*, Vol. 87, No. 2, pp. 112–117 (2010).

④ Characteristic measurements of silicon dioxide aerogel plasmas generated in a Planckian radiation environment, Q-L Dong, S-J Wang, Y-T Li, Y. Zhang, J. Zhao, H-G Wei, J-R Shi, G. Zhao, J-Y Zhang, Y-Q Gu, Y-K Ding, T-S Wen, W-H Zhang, X. Hu, S-Y Liu, L. Zhang, Y-J Tang, B-H. Zhang, Z-J Zheng, H. Nishimura, S. Fujioka, F-L Wang, H. Takabe, and J. Zhang, *Physics of Plasmas*, Vol.17, pp.012701-1~7, (2010).

⑤ Time-dependant simulation of photoionized plasma created by laboratory blackbody radiator., F. L. Wang, D. Salzmänn, G. Zhao, H. Takabe, S. Fujioka, N. Yamamoto, H. Nishimura, J. Zhang, *Astrophysical Journal*, Vol. 706, pp. 592-598, (2010).

⑥ Radiation Temperature Measurement of an Imploded X-Ray Source with a Filtered-Multi-Channel Pinhole Camera, Shou-Jun Wang, Quan-Li Dong, Yi Zhang, Yu-Ton Lig, Lei Zhang, Shinsuke Fujioka, Norimasa Yamamoto, Hiroaki Nishimura, Jie Zhang, Chinese Physics. Lett. 27., No. 12 125202 (2010).

⑦ Monochromatic x-ray radiography for areal-density measurement of inertial fusion energy fuel in fast ignition experiment, S. Fujioka, T. Fujiwara, M. Tanabe, H. Nishimura, H. Nagatomo, S. Ohira, Y. Inubushi, H. Shiraga, H. Azechi, Review of Scientific Instruments, Vol. 81, No. 10, p. 10E529-1 (2010).

⑧ レーザー爆縮で生成したミニ・コンパクト星によるX線天文学, 高部英明、藤岡慎介, 天文月報, Vol. 102, No.7 (2009).

⑨ Laboratory spectroscopy of silicon plasmas photoionized by mimic astrophysical compact objects, S. Fujioka, N. Yamamoto, D. Salzm ann, F. Wang, Y. Li, Q. Dong, S. Wang, Y. Zhang, Y-J. Rhee, Y-W. Lee, J-M. Han, D-H. Kwon, J. Zhong, G. Zhao, M. Tanabe, T. Fujiwara, Y. Nakabayashi, J. Zhang, H. Nishimura, H. Takabe, K. Mima, Plasma Physics and Controlled Fusion, Vol. 51, p. 124032 (2009).

⑩ X-ray astronomy in the laboratory with a miniature compact object produced by laser-driven implosion, S. Fujioka, H. Takabe, N. Yamamoto, D. Salzm ann, F. Wang, H. Nishimura, Y. Li, Q. Dong, S. Wang, Y. Zhang, Y-J. Rhee, Y-W. Lee, J-M. Han, M. Tanabe, T. Fujiwara, Y. Nakabayashi, G. Zhao, J. Zhang, K. Mima, Nature Physics, Vol. 5, pp. 821 – 825 (2009).

[学会発表] (計 11 件)

① Opacity of photoionized plasmas generated by lasere-produced blackbody radiator, 2011 年 11 月 22 日, 藤井雄太、藤岡慎介、他 8 名, Plasma Conference 2011, 2011 年 11 月 22 日, 石川県金沢市

② レーザー生成光電離シリコンプラズマの発光スペクトルの広帯域計測及びオパシティー計測、藤岡慎介他、レーザー学会第 31 回学術講演会、2011 年 1 月 19 日、東京都調布市

③ 高出力レーザーを用いた光電離プラズマのX線分光計測、藤岡慎介他、三学会合同ブ

ラズマ宇宙物理、2010年5月26日、千葉県千葉市

④ Monochromatic X-Ray Backlighting for Areal Density Measurement of Inertial Fusion Energy Fuel, 藤岡慎介他、18<sup>th</sup> High Temperature Plasma Diagnostics、2010 年 5 月 10 日、Wildwood, New Jersey, USA

⑤ keV 黒体光源による疑似ブラックホール生成、藤岡慎介、山本則正、David Salzm ann, Feilu Wang, et al., レーザー学会学術講演会 第30回年次大会、2010年2月4日、レーザー学会学術講演会 第30回年次大会、2010年2月4日、千里ライフサイエンスセンター・大阪

⑥ レーザー爆縮法を用いた模擬ブラックホールの生成、藤岡慎介、山本則正、David Salzm ann, 西村博明、高部英明、他、高速度撮影とフォトニクスに関する総合シンポジウム、2009年12月11日、大阪大学

⑦ X-ray astrophysics with high-power laser facility, 藤岡慎介、山本則正、D. Salzm ann, F. Wang, Y. Li, 他, The 19th International Toki Conference, 2009年12月9日, Ceratopia Toki-City, Gifu

⑧ LASER-PRODUCED PLASMA AS A UNIQUE X-RAY SOURCE FOR INDUSTRY AND ASTROPHYSICS, S. Fujioka, H. Nishimura, A. Sunahara\*, N. Yamamoto, et al., The 6th International conference on inertial Fusion Science and Applications, 2009年9月11日、San Francisco, CA, USA

⑨ レーザー生成プラズマX線源 ～産業から宇宙分野に広がる応用～、藤岡慎介、プラズマ科学のフロンティア 2009 研究会、2010 年 9 月 2 日、核融合科学研究所

⑩ Laboratory spectroscopy of silicon plasmas photo-ionized by mimic astrophysical compact object, S. Fujioka, N. Yamamoto, D. Salzm ann, F. Wang, et al., 36th European Physical Society on Plasma Physics, 2009 年 6 月 29 日, ソフィア、ブルガリア

⑪ 高強度レーザーが作る高エネルギー密度状態の科学にとっての放射光の魅力、藤岡慎介、SPRING-8 次期計画 2019 シンポジウム～光科学の明日～、2009 年 6 月 29 日、東京ステーションコンファレンス

6. 研究組織

(1)研究代表者

藤岡 慎介 (FUJIOKA SHINSUKE)

大阪大学・レーザーエネルギー学研究セン  
ター・准教授

研究者番号：40372635