

## 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

### X-ray spectroscopy of photoionized plasmas generated with high-power laser

藤岡 慎介<sup>1\*</sup>, 山本則正<sup>1</sup>, 藤井雄太<sup>1</sup>, 西村博明<sup>1</sup>, 高部英明<sup>1</sup>, SALZMANN David<sup>2</sup>,  
WANG Feilu<sup>3</sup>

Shinsuke Fujioka<sup>1\*</sup>, Norimasa Yamamoto<sup>1</sup>, Yuta Fujii<sup>1</sup>, Hiroaki Nishimura<sup>1</sup>, Hideaki Takabe<sup>1</sup>,  
David Salzmänn<sup>2</sup>, Feilu Wang<sup>3</sup>

<sup>1</sup>大阪大学レーザーエネルギー学研究センター, <sup>2</sup>Weizmann Institute of Science, <sup>3</sup>中国国家天文台

<sup>1</sup>Inst. Laser. Eng., Osaka University, <sup>2</sup>Weizmann Institute of Science, <sup>3</sup>NAO, Chinese academy of Science

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。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り出すことは今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。

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）の超高温度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。実験では直径500 $\mu$ m、壁厚7 $\mu$ 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 $\mu$ 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 $\mu$ 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。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。

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。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。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学の検証にとって強力な武器となる所以である。

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( $1s21S0 \rightarrow 1s2s3S1$ )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( $1s2nl-1s2pnl$ )である可能性が高いことが示された。もう一つの不一致は1.855 keV近傍のラインの起源である。天文学ではヘリウム様シリコンの異重項間遷移( $1s21S0 \rightarrow 1s2s3P1$ )と同定されているが、実験データの解析の結果では異重項間遷移で発光する確率は小さく、他の発光起源でも実験結果を再現出来ていない。つまり発光起源そのものが謎のままである。これは原子物理学の専門家にとっても大変興味深い結果であり、現在この発光線の起源を明らかにする取り組みが行われている。上記の詳細について講演する。