

クリプトンイオンの可視領域発光線の観測

中村信行研究室 堅田 龍之介

・背景と目的

近年、中性子星合体が重元素の起源であるという説が有力視されつつある [1]。その検討の為にシミュレーションに際し、各元素に対する分光データが必要とされているが、それらのデータは不足しており、補う必要がある。本研究は過去に観測例がない 4 価までのクリプトンイオンを対象に可視領域での分光実験を行い、その中でも主要な発光線の波長決定、遷移の同定をすることを目的とした。

・原理と実験装置

我々の研究室には、世界でも有数の高エネルギー電子ビームイオントラップ (electron beam ion trap: EBIT) である Tokyo-EBIT と、小型の EBIT である CoBIT [2] が存在する。Tokyo-EBIT は高価数のイオン、CoBIT は低・中価数のイオンを生成するのに用いられている。本研究では、低価数イオンを対象としているので、CoBIT を用いて実験を行った。CoBIT は主に電子銃、3 つの円筒電極からなるドリフトチューブ (DT)、電子コレクター、ヘルムホルツ型の超伝導コイルで構成されている。CoBIT の概略図を図 1 に示す。CoBIT の性能として、最大電子ビームエネルギーは 2.5 keV、最大電子ビーム電流は 20 mA、中央磁場最大値は 0.2 T となっており、超伝導コイルは高温超伝導線材を採用しているため冷媒は液体窒素である。

イオン生成の流れとしては、電子銃から放出された電子ビームが DT 内のガスと反応しそのガスのイオンを生成する。なお測定では、生成されたイオンをトラップ空間にトラップしておく必要がある。EBIT は、電子ビームが持つ空間電荷ポテンシャルで径方向に、3 つの DT に印加した電圧の差による井戸型ポテンシャルで軸方向にトラップすることによって 3 次的にトラップするこ

とができる。

実験系を図 2 に示す。測定の流れとして、ガス導入管より導入したクリプトンガスをイオン化し、イオンからの発光を Czerny-Turner 型の可視分光器に入射させる。可視分光器内で発光はコリメート凹面鏡 (Mirror1) により平行光にされ、回折格子にて回折される。回折された発光は結像凹面鏡 (Mirror2) によって背面照射型の CCD カメラに入射し、記録される。使用できる回折格子は溝本数 300g/mm のものと 1200g/mm のものがあり、前者を用いると比較的広範囲 (約 290 nm の幅) を観測することができ、後者を用いると比較的絞られた範囲 (約 65 nm の幅) を観測することができる。CCD カメラはペルチェ素子によって摂氏-70 度に冷やすことができ、それによって熱雑音を低く抑えることが可能である。

・実験

クリプトンイオンの分光測定のために、CoBIT にガス導入管でクリプトンガスを導入し、分光実験を行った。クリプトンイオンの測定条件は表 1 と 2 に示す通りである。電子ビームエネルギーはクリプトンのイオン化エネルギーの表 [3] を参考に決定した。なお、波長較正は各標準ランプを用いて行った。

・結果

溝本数 300g/mm の回折格子を使った実験で得られたスペクトルを図 3 に、溝本数 1200g/mm の回折格子を使った実験で得られたスペクトルを図 4 に示す。図 3 においては多数の発光線を観測することができたが、今回は未観測であり、特に興味を引いた図 3 中に a,b,c,d と記した発光線について詳細に考察した。

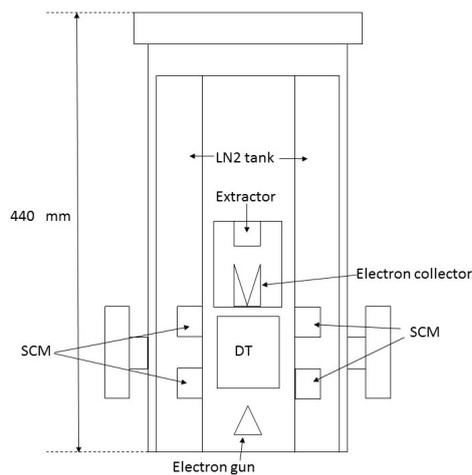


図1 CoBITの概略図

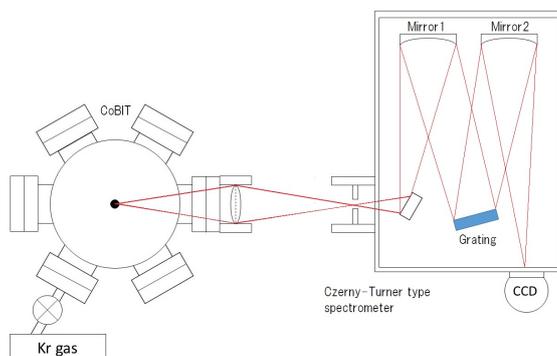


図2 実験系の概略図

表1 溝本数 300g/mm の回折格子におけるクリプトン多価イオンの観測条件

測定時間 [mins]	電子ビーム電流 [mA]	電子ビームエネルギー [eV]	備考
20	1	30	不純物測定
20	1	30	
20	2	43	
20	2	55	
20	2	70	

表2 溝本数 1200g/mm の回折格子におけるクリプトン多価イオンの観測条件

測定時間 [mins]	電子ビーム電流 [mA]	電子ビームエネルギー [eV]	備考
40	2	43	574 nm~639 nm の測定
40	2	43	665 nm~727 nm の測定

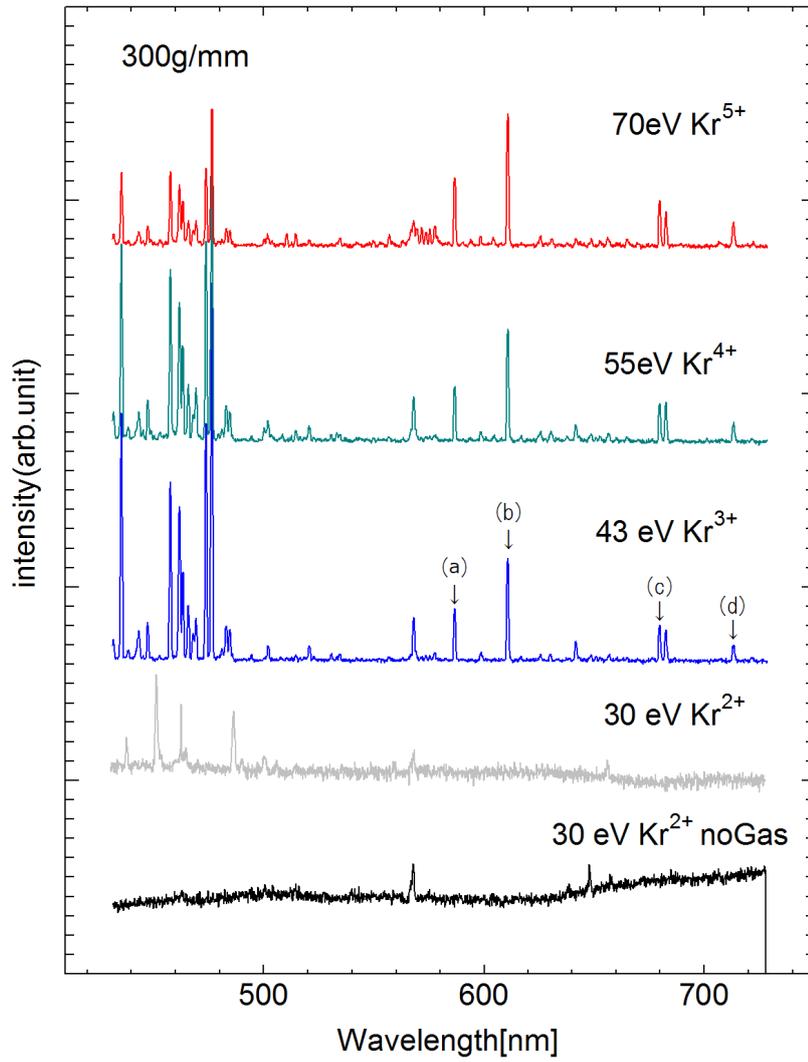


図3 300g/mmの回折格子を使った実験の結果

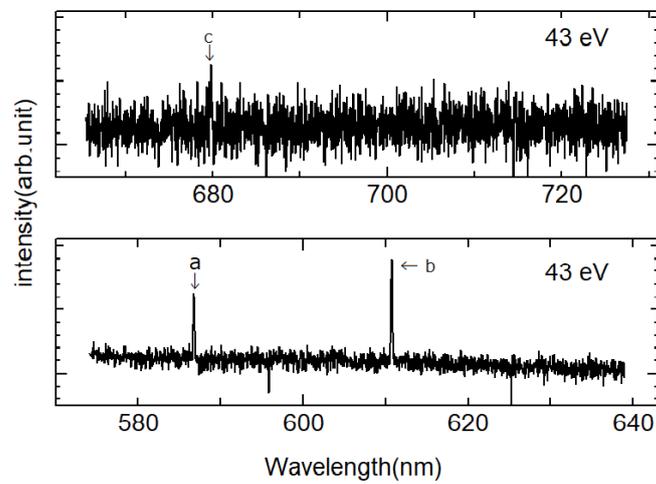


図4 1200g/mmの回折格子を使った実験の結果

・ 発光線 a,b,c,d の遷移の同定

発光線 a,b,c,d について、電子ビームエネルギー依存性より、3 価の発光線であるということが分かった。そこで、NIST のデータベース [4] よりクリプトン 3 価イオンの準位図を作成した。CoBIT 内のプラズマはコロナプラズマであり、基底準位付近の発光が起こりやすいので、基底状態付近の準位について考える遷移においてエネルギー差から想定される波長を計算し、発光線 a,b,c,d の実験値と比較すると、表 3 に示すような遷移でよい波長の一致を示したのでそれらを a,b,c,d の遷移とした。

・ まとめと今後の展望

本実験では、クリプトン低価数イオンの分光を行い、1 ~ 4 価の多数の発光線を観測した。その中でも、3 価の複数の発光線について、波長決定と遷移の同定をすることができた。今後は波長決定の精度をより高めるために、a,b,c,d の発光線をより統計良く観測することや、他のクリプトンに起因する発光線、他の元素の発光線についても観測してみたい。

表 3 発光線 a,b,c,d における波長の文献値と実験値

発光線	文献値 [nm]	実験値 [nm]	同定された遷移
a	586.77	586.74	$^2D_{\frac{3}{2}} \rightarrow ^4S_{\frac{3}{2}}$
b	610.78	610.78	$^2P_{\frac{3}{2}} \rightarrow ^2D_{\frac{3}{2}}$
c	679.82	679.85	$^2P_{\frac{3}{2}} \rightarrow ^2D_{\frac{5}{2}}$
d	713.13	713.3	$^2P_{\frac{1}{2}} \rightarrow ^2D_{\frac{3}{2}}$

参考文献

[1]Tanaka et al.

“Kilonova from post-merger ejecta as an optical and near-Infrared counterpart of GW170817”
Publ.Astro.Soc.Japan 69, 102 2017

[2]Nobuyuki Nakamura, Hiroyuki Kikuchi, Hiroyuki A. Sakaue, and Tetsuya Watanabe
“Compact electron beam ion trap for spectroscopy of moderate charge state ions”
REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS 79, 2008

[3]J. Scofield, Ionization Energies, Internal report, LLNL, Livermore, USA

[4]NIST Atomic Spectra Database

< <http://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/linesform.html> >