

クリプトンイオンの磁気双極子遷移の観測

電気通信大学大学 情報理工学研究科 基盤理工学専攻
応用物理工学コース 中村信行研究室 近藤 丈洋

1 序論

重元素イオンの可視域スペクトルは、プラズマ診断に有用であり、特にクリプトンなどの希ガスは、ダイバータプラズマの冷却に用いられることからその周辺のプラズマの分光診断に必要とされている。また、鉄より重い元素の起源として中性子星合体が有力な説となってきたが[1][2]、その電磁波観測による検証のために広範囲にわたる元素の可視域分光データが求められている。そこで本研究では、希ガスである Kr に焦点を当てて低価数イオンの可視分光データの収集を目的とした。

これまで我々の研究室では、タンゲステンや鉄のイオンの分光データを収集していたが、その際に装置外部から標準ランプの光を導入して波長較正を行っていたことから、光源位置の違いによる系統的不確かさが懸念されていた。今回の観測では、目的とするクリプトンイオンの発光線と同時に、波長が精度よく知られている中性あるいは 1 価のクリプトンを CoBIT 内で励起し、その発光線を較正線として用いた。これにより、光源位置の違いや機器のドリフトによる系統的な不確かさを考慮する必要がなくなるので、精度の向上が期待できる。観測した発光線の波長から得た準安定準位のエネルギーを、過去の紫外域の分光[3]で得られているエネルギー値と比較する。

2 実験

2.1 電子ビームイオントラップ

今回の実験にて用いた装置は、低エネルギー帯における多価イオン生成を目的とした小型電子ビームイオントラップ (CoBIT) である。装置の概略図を図 1、仕様を表 1 に示す。

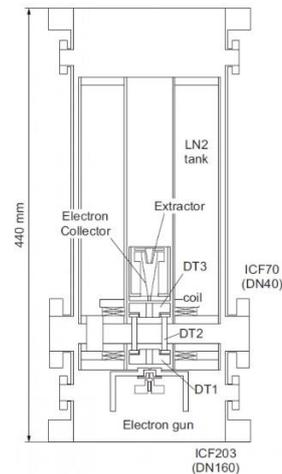


図 1 CoBIT 概略図[4]

表 1 CoBIT の仕様[4]

	CoBIT
装置の高さ	~0.5[m]
最大電子ビームエネルギー	2.5[keV]
最大電子ビーム電流	20[mA]
中央磁場最大値	0.2[T]
冷媒タンク容量	3[L]
超電導コイル線材	DI-BSCCO
冷媒	液体窒素
分光用窓規格	ICF70
イオントラップ領域の長さ	2[cm]

CoBIT は従来の電子ビームイオントラップに比べ電子エネルギー、電子電流を共に低い値にすることで小型化に成功し、また、超伝導磁石に住友電工製のビスマス系超電導線材を用いたことで冷媒に液体窒素を用いた運転が可能となり運転費用の削減も実現している。冷媒タンク容量はおよそ 3L で完全に補充してから 5-6 時間の稼働が可能である。[4]

2.2 可視分光器

今回の実験における可視領域スペクトルの分光には、Jobin Yvon 社製の HR320 を用いた。この分光器は、反射型平面回折格子を用いた Czerny-Turner 型配置の分光器である。装置の概略図を図 2 に示す。

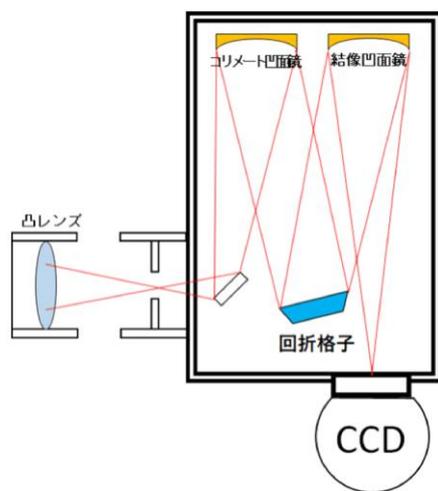


図 2. 可視分光器の概略図[5]

スリットから入射した光は、コリメート凹面鏡で平行光となり、反射型平面回折格子にて回折されて結像凹面鏡によって CCD カメラに集光される。回折格子を回転させることによって観測する波長領域を変化させることが可能である。また、回折格子の溝本数を変えることによって

検出できる波長の幅を変化させることもできる。CCD カメラは Andor 社の iDus416 を使用している。このカメラは今回観測を行う波長である 500-700nm にて 60%以上の量子効率を確保できている。また、室温で観測を行うと暗電流によるノイズが混入する為電子冷却を行って-70°C に冷却してから観測を行う。

2.3 測定方法

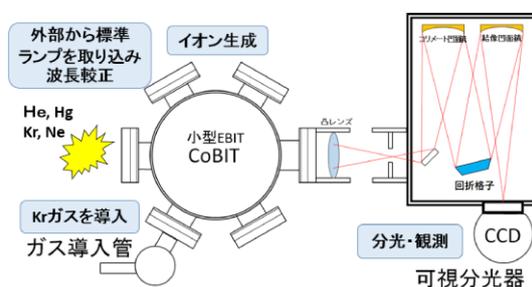


図 3 実験の装置構成

図 3 にて装置構成を示す。今回の観測では、 $Kr^{2+} \sim Kr^{4+}$ 程度の低価数イオンに焦点を当てて可視領域の分光観測を行った。始めに Kr 低価数イオンの発光線の有無を確かめるために 300g/mm の低分散回折格子を用いて観測を行った。最初の手順として、観測する波長域の決定のために、波長の良く知られている発光線を持つ標準ランプを用いて観測する波長域が 500~700nm を含むように設定した。スペクトル観測では Kr 発光線と不純物の発光線を混同しないようにするために、Kr ガスを導入する前に電子ビームを出しただけの状態では不純物発光線の観測を行った。その後、電子ビームエネルギーを低いエネルギーから順に高くして観測を行った。こうして観測したスペクトルに対して発光線の出現エネルギーと NIST データベー

ス[3]を参考として価数の同定を行った。価数の同定後には観測した発光線に対して1200g/mmの高分散回折格子を用いて詳細な観測を行い、発光線の波長の決定を行った。その後、過去の分光で良く知られている中性のKr発光線と近い波長にKr³⁺の発光線が確認できたことからこれら2本の同時観測を試みた。同時に観測した中性Krの発光線を較正線とすることをして高精度に波長を求め、NISTデータベース[3]に掲載されているエネルギー準位から予想される波長との比較を行った。

3 結果及び考察

3.1 過去に報告例の無い発光線の観測

可視光領域にて、Kr 低価数イオンの発光スペクトルがあるかを確認するために始めにKrガスを導入せずに30eVにて撮影を行って不純物の発光線の確認を行った後で、生成できる最大の価数が2価から順に変化するよう電子ビームエネルギーを変化させて観測を行った。電子ビームエネルギーの値は表2のイオン化エネルギーを参考にして生成できるKrの最大の価数が1価ずつ変化するように決定した。

表2 Krのイオン化エネルギーと電子ビームエネルギー[6]

イオン化エネルギー[eV]	電子ビームエネルギー
Kr ¹⁺ → Kr ²⁺ : 24	Kr ²⁺ : 24eV
Kr ²⁺ → Kr ³⁺ : 36	Kr ³⁺ : 43eV
Kr ³⁺ → Kr ⁴⁺ : 48	Kr ⁴⁺ : 55eV
Kr ⁴⁺ → Kr ⁵⁺ : 63	Kr ⁵⁺ : 70eV
Kr ⁵⁺ → Kr ⁶⁺ : 77	

観測したスペクトルを図4に示す。

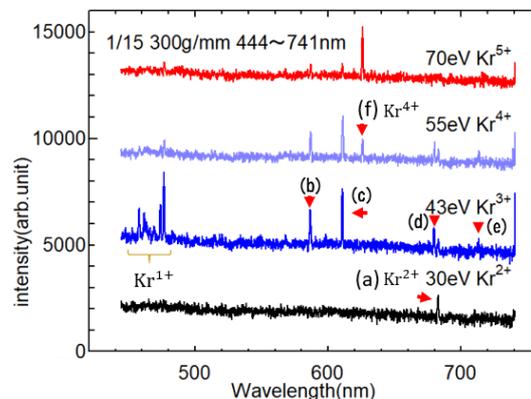


図4 Kr低価数イオンの発光スペクトル

図4の縦軸、横軸はそれぞれ発光線の強度と波長となっている。右上の数値は、CoBITの電子ビームエネルギー、Krイオンはその電子ビームエネルギーで作れるイオンの最大の価数を示している。次にKr発光線を1価から順にNISTデータベースと比較していく。

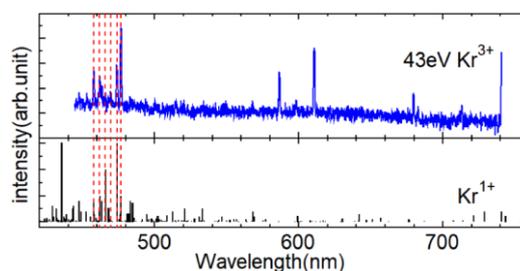


図5 Kr¹⁺の発光線の比較

図5は、上の図を観測結果、下の図はNISTデータベース[3]に掲載されているKr⁺の発光線のデータをそれぞれ横軸波長、縦軸強度で示したものである。赤い破線で示した部分で観測結果とNISTの発光線が強度比が異なるもの一致していることからこの部分の発光線はKr¹⁺の発光

線であると考えられる。これらの発光線は励起状態間の電気双極子遷移に相当する。2価以降の発光線では電気双極子遷移は確認できなかったが基底配置間の磁気双極子遷移に対応する発光線が確認できた。図6から図8にそれぞれ Kr^{2+} から Kr^{4+} のエネルギー準位と遷移したときの波長を示す。

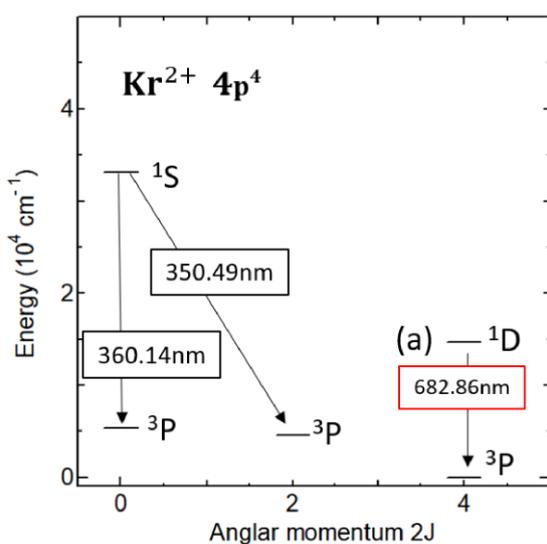


図6 Kr^{2+} の基底配置のエネルギー準位

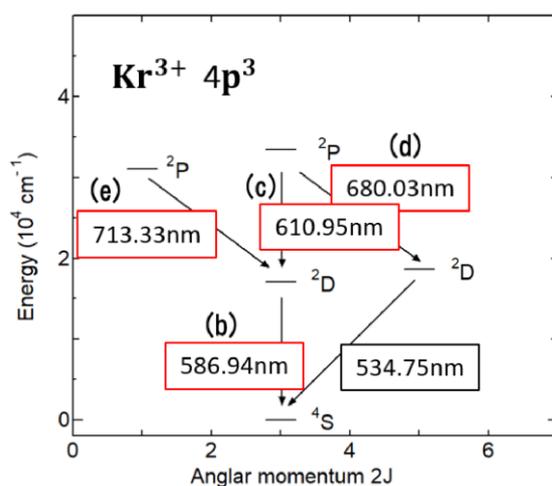


図7 Kr^{3+} の基底配置のエネルギー準位

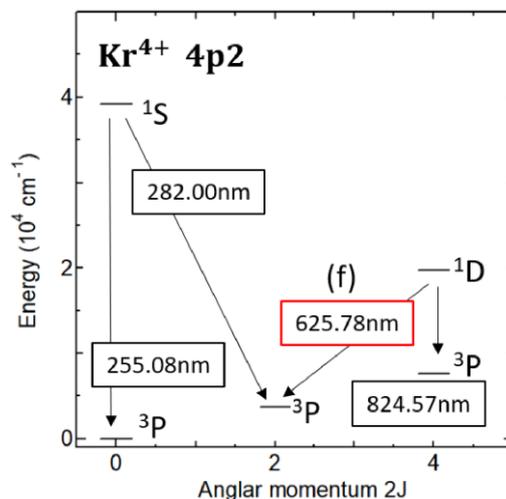


図8 Kr^{4+} の基底配置のエネルギー準位

図6, 7, 8のエネルギー準位は、より高いエネルギー準位からの極端紫外域遷移の観測から得られたものである。これらの図と比較すると、図4の赤い矢印で示した発光線(a)は図6の赤い枠で囲った遷移に、(b)から(e)は図7の赤い枠で囲った対応した記号の遷移に、(f)は図8の赤い枠で囲った遷移に相当する波長と一致していた。これらの発光線は過去に直接観測された例が無いことから発光線のデータベースには記録されてなかったと考えられる。次にこれらの発光線を高分散測定にてより詳細な観測を行った。観測した結果を図9, 10にて示す。

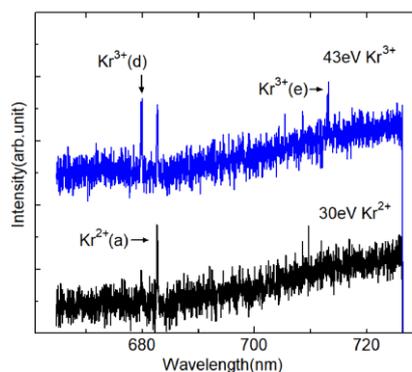


図9 Kr^{2+} , Kr^{3+} の詳細の観測

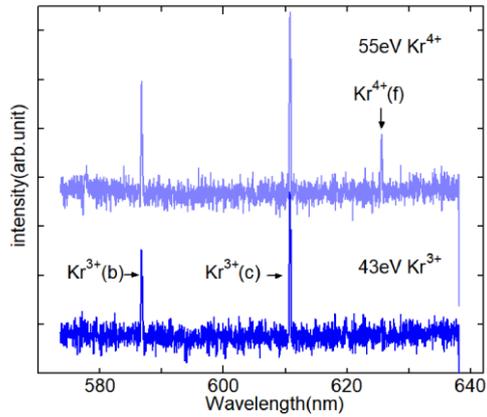


図 10 Kr^{3+} , Kr^{4+} の詳細の観測

図 9 では Kr^{2+} , Kr^{3+} に、図 10 では Kr^{3+} , Kr^{4+} に対して詳細な観測を行った。ここで (b) の発光線に注目する。

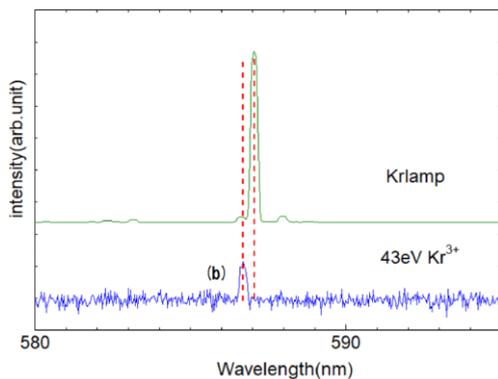


図 11 較正線近傍の Kr^{3+} 発光線

図 11 は、クリプトンランプによる較正線と CoBIT で観測された Kr^{3+} の発光線である。これら 2 本の発光線が CoBIT で同時観測できれば機器のドリフトと光源位置の違いによる系統的不確かさの無い詳細な波長の決定が行えるため、測定条件を変化させて 2 本の同時観測を試みた。

3.2 同時観測による波長決定

Kr ガスの導入量を変化させて荷電交換を誘発し、電子ビームエネルギーを通常

より高くして低価数イオンの生成と較正線の同時観測を行った。観測したスペクトルを図 12 に示す。

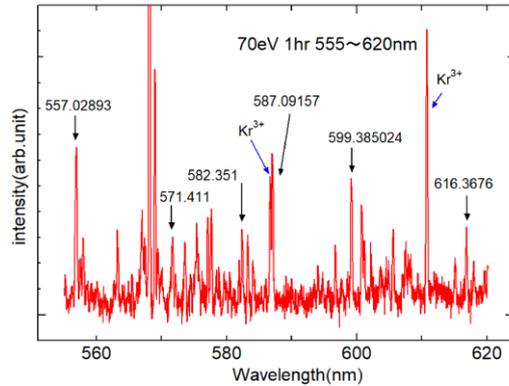


図 12 同時観測スペクトル

同時観測した発光線の他にも黒の矢印で示した中性の発光線が観測できたため、これらを用いて機器のドリフトを考慮しない波長較正が行えた。加えて較正線と隣り合った発光線に対しては CCD 上における位置と波長が線形の関係であると仮定し、3 価イオンの発光線の波長を導出した。図 13 は 2 本の発光線を拡大したスペクトルであり、2 本のピーク間のピクセル距離と、較正線に代入した波長を示す。

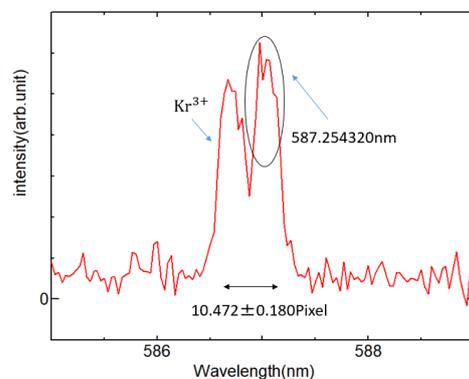


図 13 Kr^{3+} 発光線の詳細な検討。

較正線の発光線の波長はNISTデータベースに記録されている真空中の値587.09157nmを採用した。この位置における逆線分散を求めると $0.026246813\text{nm} \cdot \text{pixel}^{-1}$ となり、2本の発光線間の画素差である10.472ピクセルを掛け合わせることで2本の波長差は0.2749nm、 Kr^{3+} の発光線の波長は $586.9794 \pm 0.0077\text{nm}$ となった。この発光線は図7の(b)の遷移に対応することからエネルギーは 2D 準位のエネルギーに相当する。この値をNISTデータベースと外部光を取り込む従来の方法を用いて決定した波長を比較した。

表3 Kr^{3+} 発光線の比較[6]

	波長 nm	エネルギー cm^{-1}
NIST	586.94 ± 0.02	17037.6 ± 0.6
従来方法	586.93 ± 0.03	17036.5 ± 0.9
同時観測	586.9793 ± 0.0077	17036.37 ± 0.23

従来の波長較正の方法ではNISTデータベースよりも不確かさが大きくなっていったが、今回の方法を用いることで不確かさの小さい観測を行うことが出来た。

4 結論

今回Kr低価数イオンの可視領域に焦点を当てて分光観測を行い、 $\text{Kr}^{2+} \sim \text{Kr}^{4+}$ にて過去に直接観測例の無い基底配置内の磁気双極子遷移の観測が出来た。特に Kr^{3+} では、波長較正線と隣接する発光線があったことから2本の同時観測を行い、光源位置や機器のドリフトなどの系統的な不確かさを無視できる高精度な観測が行えた。その結果として、従来の方法よりも高精度に波長を求めることが出来た。

今後の課題としては、現在波長の不確かさとして支配的なのが2本の画素位置差の統計的不確かさであることから今後は観測の回数を重ねていく事でその不確かさを突き詰めていけたらと考えている。

5 参考文献

- [2] S Wanajo, et al. “PRODUCTION OF ALL THE r-PROCESS NUCLIDES IN THE DYNAMICAL EJECTA OF NEUTRON STAR MERGERS” *ApJL*, 789:L39(6pp), July 2014
- [3] Y Utsumi, et al. “J-GEM observations of an electromagnetic counterpart to the neutron star merger GW170817” *ASJ*, Vol. 69, No6, 101, October 2017
- [13] NIST Atomic Spectra Database, <http://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines_for_m.html> 2018年12月24日アクセス
- [14] N Nakamura, et al. “Compact electron beam ion trap for spectroscopy of moderate charge state ions” *Rev.Sci.Instrum.* 79, 063104, June 2008
- [10] 近藤丈洋 “2017年卒業論文”
- [11] J. Scofield, Ionization Energies, Internal report, LLNL, Livermore, USA