

極端紫外領域における多価イオンの電荷交換分光

中村信行研究室 1233001 相田裕也

1 背景・目的

我々の研究室では多価イオンについて研究を行っている。多価イオンとは、中性原子から電子を2個以上電離させた正の高電離イオンの事である。多価イオンは、クーロンポテンシャルから成る膨大な内部エネルギーを持っており、他の物質との相互作用が大きいことが特徴である。多価イオンは地球のような低温環境では自然に存在しないが、太陽コロナなどの高温プラズマ中には多く存在している。この事から、天文プラズマの詳細な理解には多価イオンの知見が不可欠とされている。

1990年、ドイツで打ち上げられたROSAT衛星はX線による全天探査を行い、精密な全天地図を作製した[1]。これにより、特定のX線放出天体などが全くない場所からも強い強度でX線が観測されていることが判明した。その当時、この謎のX線強度変化の起源を突き止めることはできなかった。

後にこの問題を解明するための糸口が意外な所から発見された。彗星からのX線放射の発見である。1996年、百武彗星を観測したチャンドラ衛星が彗星の太陽を向いた方向から発光強度が非常に強いX線が放出されていることを初めて観測した[2]。一般的にX線は温度が100万度以上の高温ガスから放射されるので、塵と氷から構成されている彗星自らX線を放射することはあり得ないと考えられている。しかし、百武彗星に始まり、次々と彗星からのX線放射が発見され、X線放射は多くの彗星に共通し

て見られる現象であることが判明した[3]。それに伴いX線放射メカニズムに関する研究が進み、「彗星からのX線は太陽風に含まれるイオンと彗星の中性物質との電荷交換反応により放射されている」ことが判明した。太陽風は主に電子及び、 H^+ 、 He^{2+} 、 C^{4+} 、 N^{q+} 、 O^{q+} のようなイオンで構成されている。それぞれの多価イオンの価数 q は、ほとんど水素様イオンや裸イオンである。正電荷のうち約90[%]が H^+ であり、約5[%]が He^{2+} であり、その他のイオンが残りの約5[%]と考えられている。電荷交換反応では多価イオンが中性気体と衝突することで電子が励起状態に捕獲され、光を放射することで脱励起する。以上のことからX線天文学における電荷交換反応の重要性は増しており、詳細な解析を行うためにも実験室に天体で起きている太陽風電荷交換反応を再現することが求められている。

首都大学東京では天体で起きている電荷交換反応を実験室内に再現し、シリコンドリフト型X線検出器(Silicon Drift Detector: SDD)を用いて発光の観測が行われている[4]。この首都大学東京のSDDによって得られた軟X線発光スペクトルを図1に示す。

図1は水素と炭素の裸イオンの電荷交換反応により観測された軟X線スペクトルである。このように、シリコン検出器の分解能では、各主量子数からのK線を分解できていない。本研究では、それらを分解する分光器を製作し、高分解能分光実験を行う

事が目的である。また、多価イオンの電荷交換反応によって最初に生成される励起状態は、価数が高いほど主量子数の大きな状態に電子捕獲される。そのため、基底状態への軟 X 線放射の他、励起状態間遷移より放射される極端紫外線も観測されると考えられる。したがって、本研究で製作する分光器では、軟 X 線から極端紫外におよぶ領域、具体的にはおおよそ 1~20nm の発光に有用な分光器である必要がある。

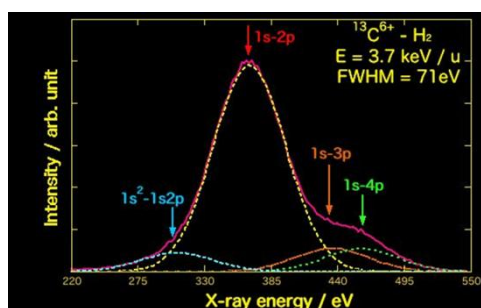


図 1：首都大学東京で得られた軟 X 線スペクトル[5]

2 分光器の製作

本研究では、首都大学東京で行われている太陽風多価イオンの高分解電荷交換分光実験に用いるための分光器の製作及び評価を行った。図 2 に製作した分光器の概略図を示す。

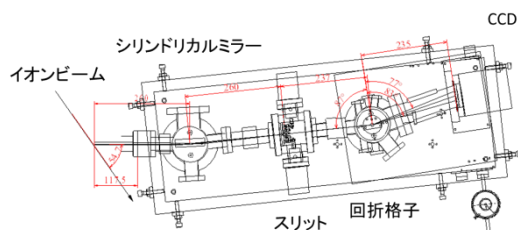


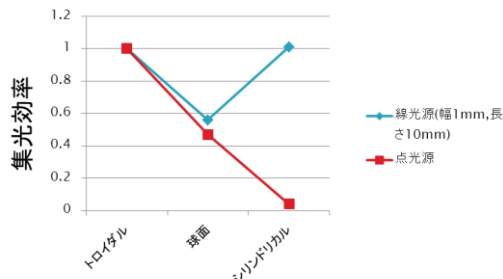
図 2：分光器の概略図

本研究の対象としている観測波長領域は約 1~20 nm の軟 X 線から極端紫外領域である。これらの波長領域では空気による吸収を避けるために、光学系を全て真空容器

の中に収める必要がある。また、分光器の仕様としては、多価イオンからの微弱な発光をシリンダリカルミラーによってスリット位置に集光し、平面結像型凹面回折格子により波長分別を行い、電子冷却式背面照射型 CCD で検出となっている。回折格子には中心部溝本数が 1200 本/mm, 2400 本/mm のものを波長領域(5~20nm、1~6nm)により使い分ける。

2・1 ミラー

分光器を製作するにあたり、ミラー形状の検討を行った。ミラーの形状を検討するにあたり、放射光で広く使用されているシミュレーションソフト SHADOW を用いて、シリンダリカル、トロイダル、球面形状について光線追跡計算を行った(図 3)。図 3 より、点光源の場合、トロイダルミラーの集光効率が一番高く、他のミラーの効率は低くなる。しかし、実際に首都大で実験を行う際には、数 10 mm 程度の長さを持ったガスセル内標的に数 mm 程度の多価イオンビームが横から衝突し発光するため、そのような横長の線状光源についてもシミュレーションを行った。その結果によれば、シリンダリカルミラーの効率はトロイダルミラーと同等であることが分かる。そこで、トロイダルに比べ製作が容易で安価であるシリンダリカルを選択した。また、ミラーは XYZ 軸フラットステンレスステージ、 θ 軸粗微動ステンレスステージ、 α 軸小型ステンレスゴニオステージによる 5 軸調整が可能となっている。



ミラー形状による集光効率の比較(計算)

図 3：ミラー形状による集光効率比較。
トロイダルの効率を 1 として比較。

2・2 回折格子

本研究で用いた回折格子は島津製作所社製の平面結像型凹面不等間隔回折格子[6]である。これは、ラミナー形状による高次光の少なさ、ホログラフィック法による迷光の少なさ、さらに、非球面波露光法による収差補正機能での高分解能を備えた回折格子である。また、回折格子の溝が不等間隔になっており、CCD 検出器面上に平面結像をする仕組みとなっている。回折格子の光学配置,マウントパラメータを図 4, 表 1 にそれぞれ示す。本研究では 2 つの回折格子を用意した。これらは表 1 に示されているように r , r_i' のパラメータが等しくなっているため、目的の波長に応じて簡単に交換可能となっている。しかし α の値が異なるため入射角度の調整のみ必要となる。この入射角度調整を可能にするために、今回製作した分光器には回折格子を中心に回転する回転プレートが備え付けてある。

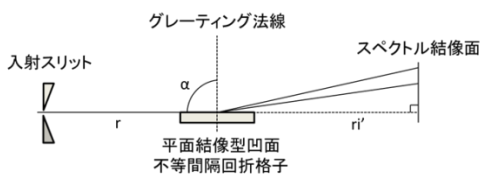


図 4：回折格子の光学配置

表 1：回折格子の主なマウントパラメータ

中心部溝本数 [本/mm]	波長範囲 λ [nm]	r [mm]	α [deg]	r_i' [mm]
2400	1~6	237.0	88.65	235.0
1200	5~20	237.0	87.0	235.0

2・3 スリット

製作した分光器に用いられているスリットには直線導入が取り付けられており、スリット幅を 1 目盛 5 [μm] で調整が可能となっている。一般的にこのタイプの分光器では、スリットの幅で波長分解能が決定し、幅が狭いほど分解能は高くなる。

2・4 検出器

本研究で製作した分光器の検出器としては、Princeton Instruments 社の電子冷却型の背面照射 CCD を用いた。これは電子冷却により $-70[^\circ\text{C}]$ まで冷却することによって暗電流を落とし、微弱光を検出する。典型的な暗電流の値は $-75[^\circ\text{C}]$ で $0.001 [e^-/p/\text{sec}]$ となっている。尚、本研究では $-70 [^\circ\text{C}]$ で使用した。1 ピクセルのサイズは $20[\mu\text{m}]$ であり、縦 $400 \times$ 横 1340 となっている。また、本研究で用いた CCD はリニアステージ上に設置されており、結像面で可動である。

3 分光器評価実験

まず電通大で分光器の性能評価実験を行い、光線追跡計算結果と比較することで十分な性能を確認した後、首都大へ分光器の移設を行った。移設後、同じく首都大にて行った分解能評価実験について記述する。

本実験で分解能評価実験に用いた装置配置を図 5 に示す。ECR イオン源によって生

成された O^{6+} の多価イオンをビームとして引き出し、価数分析磁石により O^{6+} を価数選別し、振り分け磁石で衝突部まで多価イオンビームを誘導する。誘導されてきた O^{6+} は衝突チャンバー内の全長 50 [mm] のガスセル内に入り、今回の標的ガスである H_2 と衝突する。このようにガスセル内で電荷交換反応が起こり、それに伴い放射される極端紫外光を電通大で製作した分光器で観測した。最終的に多価イオンビーム強度はファラデーカップにより確認可能である。本実験の分解能評価及び波長較正には $O^{6+} + H_2$ の電荷交換反応により得られた発光スペクトルを用いた。得られた適当なラインに対して正規分布関数によるフィッティングにより線幅を算出しつつ、分光器のスリット位置、スリット幅、回折格子への入射角度の最適化を行った。

また、最終的に得られた波長分解能に対してシミュレーションソフト SHADOW による光線追跡計算結果と比較を行った。

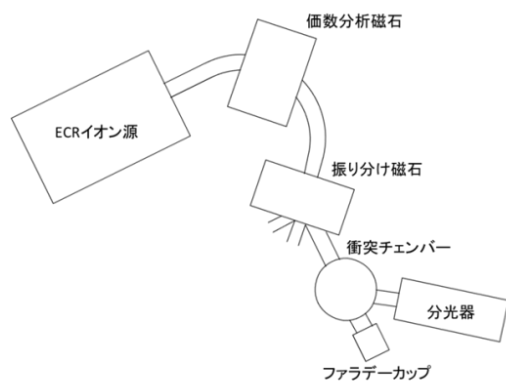


図 5 : 分解能評価実験の配置

まず初めに、スリット位置の調整を行った。その結果を図 6 に示す。図 6 の結果よりスリット位置による依存性はないとし、スリット位置は初期位置とした。

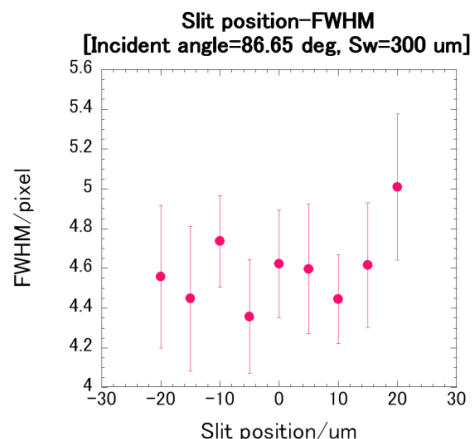


図 6 : 線幅のスリット位置依存性

次に回折格子への入射角度の調整を行った。その結果を図 7 に示す。図 7 の結果に対して二次関数によるフィッティングを行った。フィッティング結果より、入射角度は 87.1° で最も線幅の値が低くなり、分解能が高くなった。

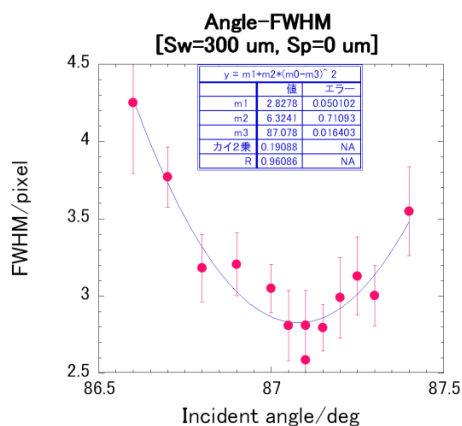


図 7 : 線幅の入射角度依存性

最後にスリット幅の調整を行った。その結果を図 8 に示す。図 8 の結果よりスリット幅を $500[\mu\text{m}]$ から狭めていくと、およそ $200[\mu\text{m}]$ までは線幅が小さくなるが、 $200[\mu\text{m}]$ 以下ではほぼ一定であった。 $200[\mu\text{m}]$ 以下では分光器内のミラーや回折格子のミスアライメント、回折格子自体の分解能などによる分解能の限界であると考えられる。

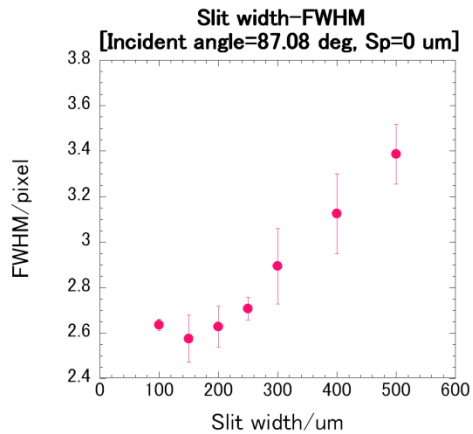


図 8 : 線幅のスリット幅依存性

最終的にスリット幅 200 [μm]で実験により得られた分解能は $\Delta \lambda = 0.037$ [nm]となった。この結果に対し、シミュレーションによる光線追跡計算結果は $\Delta \lambda = 0.034$ [nm]となった。これらの結果を比較すると、スリット幅 200 [μm]での実験及びシミュレーション結果は同程度の値となっている。したがって、実験結果は妥当であると判断した。また、1章の図 1 に示される首都大の SDD によって得られた軟 X 線発光スペクトルを分解することが当初の目的である。図 1 より隣接する 1s-3p 及び 1s-4p 遷移から成る発光ライン間隔が 0.15 [nm]であるため、実験的に確認した波長分解能は電荷交換分光実験で必要とされている波長分解能 0.15 [nm]を 1 桁上回っていることから、目的を十分達成できていると判断した。

4 電荷交換分光

多価イオンの電荷交換反応によって主量子数の高い高励起状態に捕獲された電子は、カスケード過程を経て基底状態に落ちると考えられる。この励起状態間遷移過程の理解を深めるために、実験的に観測された発光スペクトル強度比を理論計算により求め

られた強度比と比較する。電荷交換反応による状態を選別した初期捕獲断面積の計算と実験結果を比較することで、計算精度の検証と実験結果の定量的理解を行うことが目的である。

電荷交換分光実験を行った際の装置配置は 3 章で分解能評価を行った時と同じである(図 5)。本研究で使用した ECR イオン源によって生成された $^{16}\text{O}^{4+}$ を引き出し電圧 $V_{\text{EX}}=10$ [kV]で多価イオンビームとして引き出す。その後、様々な価数の多価イオンを価数選別用電磁石によって目的の価数の多価イオンのみ選別する。価数選別電磁石により価数選別されたイオンは切り替え用電磁石によって、衝突チャンバーの方向に誘導する。イオンビームは全長 50 [mm]のガスセルの中に入り、標的ガスと衝突する。標的ガスとしては H_2 , He , CH_4 ガスを用いることで、主量子数 $n=3$ から $n=2$ への遷移から得られるスペクトル強度に対する O^{6+} の標的ガス依存性を調べた。本研究で $\text{O}^{6+} + \text{H}_2$ の電荷交換反応によって観測された発光スペクトルを一例として図 9 に示す。

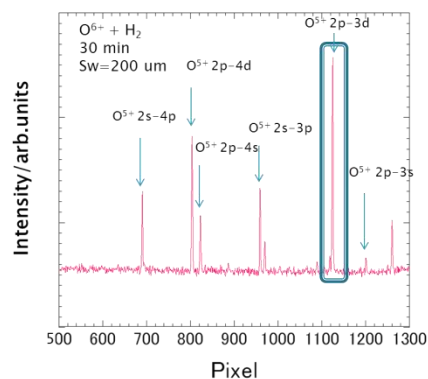


図 9 : 観測された発光スペクトル

O^{6+} と各標的ガスとの電荷交換反応によって得られた発光スペクトルの内、 $n=3$ から $n=2$ への遷移に対する 3 つのライン強度

比を図 10 に示す。尚、強度比とは各ライン強度を 3 つのライン強度の和で割った値である。図 10 の結果より、標的依存性はあまり見られなかった。

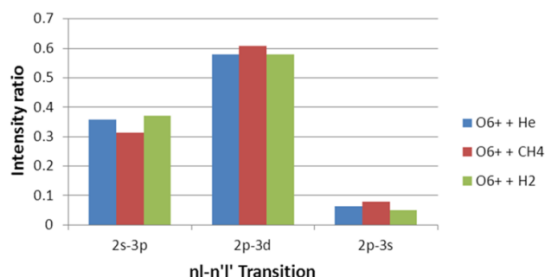


図 10 : n=3 から n=2 遷移の標的依存性

次に、実験的に O⁶⁺と H₂の電荷交換反応によって得られたライン強度比と計算により算出したライン強度比を図 11 に示す。

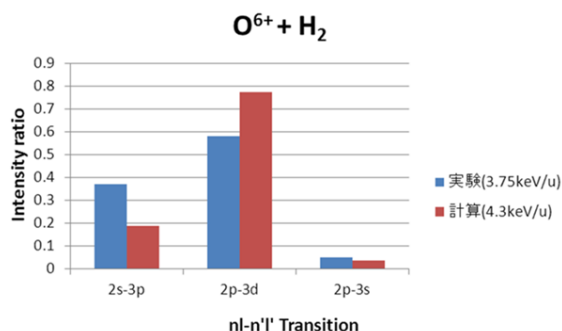


図 11 : ライン強度比の実験及び計算結果

標的 H₂に対する計算結果は実験結果を再現できていない。今回の実験は 1 度しか行っていないため、再現性の確認をする必要がある。また、CCD 感度や回折格子の反射効率等を考慮していないため、今後感度補正を行った実験結果と比較していかねばならない。これらの要因を考慮し、計算結果と一致しないようなら理論計算をして頂いた共同研究者である応用物理、計算数学研究所(北京)の L.Liu 教授と話し合い、理論計算精度の改善を行っていく必要がある。

5 まとめ

本研究では軟 X 線から極端紫外線を対象とした高分解能分光器の製作及び評価を行った。電通大で分光器評価を終えた後、首都大へ分光器の移設を行った。首都大で行われた分解能評価実験では、最終的にスリット幅 200 [um]で線幅 0.037 [nm]という結果が得られた。この結果はシミュレーション結果とよく一致しており、分光器の性能は引き出せていると判断した。

分光器の性能評価が終わるに伴い、実際に太陽風多価イオンの電荷交換分光実験を行った。実験結果より、O⁶⁺と CH₄, H₂, He 標的の電荷交換反応による主量子数 n=3 から n=2 への遷移スペクトルの強度比に依存性はほぼないことが分かった。さらに、この実験結果と計算結果の比較により、計算結果と実験結果に差異が見られた。今回の実験では、CCD 感度や回折格子の反射効率等を考慮していないため、感度補正を行った実験結果と比較する必要がある。今後はより高価数な O^{7,8+}と CH₄, H₂, He ガスの電荷交換反応によるデータの蓄積、C⁶⁺ + H₂の電荷交換反応により得られる軟 X 線発光スペクトルの高分解分光実験を考えている。

参考文献

- [1] S. L. Snowden et al., ApJ 424 714 (1994).
- [2] C. M. Lisse et al., Science 296 1042 (2002).
- [3] <http://www.isas.jaxa.jp/j/forefront/2007/fujimoto/index.shtml>
- [4] 石田氏修士論文 首都大学東京
- [5] 島谷宏史, 日本物理学会第 68 回年次大会, 28pDH-3
- [6] <http://www.shimadzu.co.jp/products/opt/products/grating/rr01.html>