真空紫外域多価イオン発光線の時間発展計測

中村信行研究室 細谷 征由

1 序論

1.1 太陽コロナとプラズマ

太陽系の中心である太陽は多くの研究が なされているが、現在でも解明されていな い事象などが多く存在する。その1つにコ ロナ加熱という事象がある。これは太陽コ ロナが太陽表面などよりも超高温になるメ カニズムが解明できていないということで ある。そのメカニズムの解明に向けて、太 陽コロナの電子密度と温度の関係が研究さ れている。太陽は中心から外側に向けて電 子密度が小さくなっている。特に、太陽の 表面では大きな電子密度の境界が存在する。 つまり太陽内部や表面は高密度のプラズマ で構成されており、太陽コロナは低密度の プラズマで構成されている。しかし、これ らの領域の温度に着目すると太陽内部や表 面の温度よりも太陽コロナの温度の方が極 めて高い温度になっている。そのメカニズ ムは未だ解明されていない。

これらのような太陽の研究を進めるために、 国立天文台は様々な太陽観測衛星を打ち上 げている。今現在開発が行われている次世 代太陽観測衛星 Solar-C EUVST[1] は現在稼 働している太陽観測衛星「ひので」の分光装 置より広い波長領域の分光観測が可能にな るとされている。この衛星に搭載される予定 の分光器での観測可能領域は 17nm-21.5nm 及び 46nm-122nm の極端真空紫外域である。 この Solar-C EUVST はこれらの観測機器か ら得られたデータを用いてコロナ加熱やフ レアについての研究に貢献するとされてい る。

しかし、この Solar-C EUVST の観測した データを用いて太陽についての理解を深め るためには、実験室で得られた多価イオン に関するデータが必要である。太陽観測衛 星等で観測されたデータを用いてプラズマ を診断する際には、観測データと多くの理 論計算が併せて用いられている。しかし、こ れらの理論計算は実験的な評価を受けてい ない場合がある。そのため、これらの理論値 や理論モデルを実験的に評価することはプ ラズマ診断の精度をより高めるためには重 要な要素だといえる。よって、Solar-C EU-VST の観測データをより有益なものとする ためには、太陽観測衛星の観測データを用 いてプラズマを診断する際に活用される理 論値や理論モデルを実験的に評価できる実 験データを十分に集めることも必要である。

1.2 目的

本研究の目的は、Solar-C EUVST が観測 する予定の波長領域に存在する多価イオン 発光線について、時間発展計測を行いイオ ン化断面積を算出し、理論計算と比較評価 を行うことである。

先に述べた Solar-C EUVST はこれまでの太 陽観測衛星よりも広範囲の領域に対して分 光を可能としている。しかし、これまで本 研究室の実験装置で観測可能な極端紫外の 波長領域は 1-30nm であり、今後次世代太陽 観測衛星 Solar-C EUVST が観測する領域に 対応できていなかった。そこで新たな分光 器が立ち上げられた [2]。この分光器により 観測可能な波長が 124nm まで拡大された。 この波長域の実験データは少なく、Solar-C EUVST に有用なデータとして実験データの 収集が必要不可欠である。そのため新規分 光器を用いた観測を行うことが本研究の目 的といえる。

イオン化断面積は太陽コロナといったプラ ズマの価数分布などを理解するために非常 に有用である。先行研究[3]では、電子ビー ムイオントラップ(2.1参照)を用いて多価イ オン発光線の時間発展計測を行い断面積を 導出している。しかし、その方法に対する評 価は十分に行われていない。そのため、本研 究でも同様に多価イオンの発光線の時間発 展計測からイオン化断面積を導出し、理論 計算から得られたイオン化断面積と比較検 討を行う。これによりEBITを用いたイオン 化断面積の導出法を確立することも本研究 の目的である。

2 実験

2.1 電子ビームイオントラップ

電子ビームイオントラップ (Electron Beam Ion Trap:EBIT) とは、装置内に導入 した元素の任意価数の多価イオンを生成す ることができる装置である。EBIT は電子 銃、電子コレクター、超伝導コイル、3つ のドリフトチューブ (DT) で構成される。 電子銃から放出された電子はアノードとカ ソードの電位差によって加速される。更に、 この加速された電子はヘルムホルツ型超伝 導コイルの磁場によって圧縮され、装置内 に導入された元素と衝突する。ここで電子 の持つエネルギーにより元素の持つ電子が 1つずつ剥ぎ取られる逐次電離が起こる。 そのため、電子ビームのエネルギーを調整 することによって剥ぎ取られる電子の個数 を調整し任意価数の多価イオンが生成でき

る。元素に衝突した後、電子ビームは電子 コレクターで回収される。生成された多価 イオンをトラップするために、3 つの DT の中で DT2 の電位を DT1,DT3 より低い値 に設定することで軸方向に対して井戸型ポ テンシャルを作り出す。更に径方向には電 子ビームの空間電荷ポテンシャルによって トラップされる。そのようにトラップされ たイオンが逐次電離により多価イオンとな る。電気通信大学レーザー新世代研究セン ターには大型 EBIT の Tokyo-EBIT と小型 EBIT の CoBIT が設置されている。本研究 では観測したい多価イオンの価数が比較的 低いため、低い価数の多価イオンを生成す るのに適した CoBIT を用いた。

2.2 実験方法「時間発展計測」

本研究では Solar-C EUVST が観測予定の Ne⁶⁺ の発光線に注目し、Ne⁶⁺ と Ne⁷⁺ を観 測対象として、Ne⁶⁺ のイオン化断面積の導 出を目的とした。観測した発光線を表 2.1 に 示す。

表 2.1: 観測対象の発光線

イオン	波長/nm	終状態	始状態
Ne VII	46.5221	$1s^2 2s^2 {}^1 S_0$ (i)	$1s^2 2s 2p \ ^1P_1$ (ii)
Ne VIII	77.0409	$1s^2 2s \ ^2S_{\frac{1}{2}}$ (iii)	$1s^2 2s \ ^2P_{\frac{3}{2}}$ (iv)
Ne VIII	78.0324	$1s^2 2s^2 S_{\frac{1}{2}}$ (iii)	$1s^2 2p \ ^2P_{\frac{1}{2}}$ (v)

この3つの発光線を観測する。表のよう に各遷移の始状態と終状態には括弧書きで 番号をつけた。同じ終状態を持つ Ne⁷⁺ の2 つの遷移を用いることで同じイオン化断面 積を2種類の遷移から導出できる。そのた め理論値との比較だけではなく2種類の遷 移から求めたイオン化断面積も互いに比較 することができる。これらの発光線の準位 を図 2.1 に示す。



図 2.1: 観測する発光線のエネルギー準位図

ここで示した $C_{\text{VII}}, C_{\text{VIII}}, C_{\text{VIII'}}$ は各イオン における電子衝突励起速度係数を表してい る。 σ_{6+} は Ne⁶⁺ から Ne⁷⁺ へのイオン化断 面積を表している。

実験では、CoBIT 内に気体の Neを導入して 観測を行った。CoBIT の電子ビームエネル ギーは生成したいイオンの生成エネルギー に合わせる必要がある。本研究の時間発展 計測ではこの電子ビームのエネルギーを変 化させることで発光線強度の時間変化を観 測する。電子ビームのエネルギーの設定を 図 2.2 に示す。



図 2.2: 電子ビームエネルギーの変化

ここでは 230eV が Ne⁶⁺ を生成するエネ ルギーで、260eV が Ne⁷⁺ を生成するエネル ギーである。エネルギーを変化させる時間 間隔は4秒に設定した。これは電子ビーム エネルギーを変化させてから CoBIT 内の励 起や電離などが平衡状態になるまで待つ必 要があり、その時間を4秒とした。観測対象 とした3つの発光線は VUV 分光器の観測帯 域の兼ね合いから全てを同時に観測するこ とができない。そのため Ne VII の 46.5nm の発光線は二次光を観測した。そのため観 測時の波長は 93nm と観測される。

3 結果と考察

3.1 観測結果

時間発展計測で得られたスペクトルとそ の二次元画像を図 3.1 に示す。



図 3.1:時間発展計測の結果。上は二次元の スペクトル結果、下は時間変化を考慮して いないスペクトル結果。赤丸は本文を参照

下部にあるスペクトルから正しく発光線 が観測できていることがわかる。加えて、上 部の二次元画像を見ても、時間に依存して 発光線の強度が変化していることがわかる。 この観測結果から発光線強度の時間変化を 求め以下に示す。



図 3.2: 各発光線の時間依存性

この時間変化のグラフを用いてイオン化 断面積を以下のように導出する。

3.2 イオン化断面積の導出

Ne⁷⁺ の発光線強度の時間発展から求める Ne⁶⁺ イオン化断面積の式は

$$\sigma_{6+} = \frac{1}{n_e v_e} \frac{\sigma_{\rm VII}^{\rm ex}}{\sigma_{\rm VIII}^{\rm ex}} \frac{dI_{\rm VIII}/dt}{I_{\rm VII}}$$
(3.1)

となる [4]。

まず、実験結果から $\frac{dI_{VIII}/dt}{I_{VII}}$ を求める。 dI_{VIII}/dt は図 3.2 の Ne⁷⁺ の時間変化のグラ フを指数関数にフィッティングし、t = 0での 微分係数で求められる。 I_{VII} は図 3.2 の Ne⁶⁺ の t = 0 での強度である。次に σ_{VII}^{ex} , σ_{VIII}^{ex} を求める。これらは各遷移の励起断面積で ある。これは実験から直接観測できないた め、理論計算によって求められた値を用い る。ここで用いる理論計算コードが Flexible Atomic Code(FAC)[5] である。このコード は M.F.Gu によって開発された非相対論的 な Hartree-Fock 法によってプラズマ中の原 子過程に関するエネルギー準位や遷移確率、 励起断面積、イオン化断面積などが計算可 能な原子コードである。このFACを使って、 3つの遷移の励起断面積を計算した結果。 Ne⁶⁺ における ${}^{1}S_{0} \rightarrow {}^{1}P_{1}$ の励起断面積

$$\sigma_{\rm VII}^{\rm ex} = 1468 \times 10^{-20} \ {\rm cm}^2$$

Ne⁷⁺ における ${}^{2}S_{\frac{1}{2}} \rightarrow {}^{2}P_{\frac{3}{2}}$ の励起断面積 $\sigma_{\text{VIII}}^{\text{ex}} = 785.3 \times 10^{-20} \text{ cm}^{2}$

Ne⁷⁺ における ${}^2S_{\frac{1}{2}} \rightarrow {}^2P_{\frac{1}{2}}$ の励起断面積

 $\sigma_{\rm VIII}^{\rm ex} = 393.6 \times 10^{-20} \ {\rm cm}^2$

と求められた。

また、電子密度 n_e と電子速度 v_e について は、一般的な CoBIT 内の電子密度の値と電 子ビームエネルギーを運動エネルギーとし て変換した電子の速度を用いた。用いた実 際の値は

$$n_e = 2.0 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$$

$$w_e = 9.56 \times 10^8 \text{ cm/s}$$

である。

よって、77nm の発光線を用いて求めたイオ ン化断面積は

$$\sigma_{6+} = (3.09 \pm 0.08) \times 10^{-19} \text{ cm}^2$$

78nm の発光線を用いて求められたイオン化 断面積は

$$\sigma_{6+} = (2.95 \pm 0.07) \times 10^{-19} \text{ cm}^2$$

と求められた。

3.3 理論計算との比較

Ne⁶⁺ から Ne⁷⁺ へのイオン化断面積を FAC を用いて求めた結果を図 3.3 に示す。



図 3.3: FAC によるイオン化断面積のグラフ

本研究の実験時の電子ビームエネルギー 260eV におけるイオン化断面積の値は

$$\sigma_{6+} = 2.96 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$$

となった。

ここで 77nm と 78nm の遷移から求めたイ オン化断面積とこの理論計算から求めたイ オン化断面積を比較すると表 3.1 になる。 78nmの遷移から求めたイオン化断面積は理 論計算と極めて近い値であり、その誤差を 含めると理論計算と一致したといえる。一 方、77nmの遷移から求めたイオン化断面積 は理論計算より僅かに大きい値となった。し かし、こちらの遷移を用いた場合も非常に 理論値に近い値が求められたといえる。 表に記した不確かさは式(3.1)を各変数につ いて偏微分をしたものとその変数の値が持つ 誤差との積を2乗するという計算を式(3.1) の全ての変数に関して行い、その計算によっ て得られた数の総和の正の平方根とした。こ れ以外の不確かさを生じる要素について考

察する。

ここでは2つの面から考察する。

1つ目に考えられるのは実験条件の問題であ る。特に大きい作用をすると考えられるの は CoBIT 内の価数分布である。二次元画像 図 3.1 の電子ビームエネルギーが 230eV の 領域に弱いながらも Ne⁷⁺ 発光線が出ている 部分に赤線で丸をつけた。Ne⁷⁺が230eVで もわずかに存在することがわかる。そのた め、イオン化断面積の導出で用いた強度の 立ち上がりの傾きの値も影響を受ける可能 性がある。改善点としては、電子ビームエ ネルギーを変化させる際にエネルギーの低 い状態では Ne⁷⁺ が生成されない条件にする 必要がある。そのためには電子ビームエネ ルギーを下げること以外にも元素導入量の 調整なども慎重に行う必要がある。CoBIT 内の価数分布をより正確に制御することで、 発光線の時間発展を精度良く観測しイオン 化断面積の導出精度を高めることが必要だ と考えられる。

2つ目の理由は考慮していない遷移がある ことである。本研究ではイオン化断面積に 大きな影響がないとしていたが、Ne⁶⁺の基 底状態 (i) から Ne⁷⁺の励起状態 (iv), (v) へ の直接的な電離も起きているはずである (図 3.4 中の点線部分)。これらの遷移が CoBIT 内でどの程度起きているのかが確認できて いない。この遷移が起こっている場合には、 状態 (i) から状態 (iv) や状態 (v) に遷移し、 その後脱励起をすることでも発光が起こる が、本研究ではその影響を考慮していない。 この過程の影響の検討が今後の精度や評価 に必要な要素である。

表 3.1: イオン化断面積の比較

	77nm の遷移	78nm の遷移	理論計算
イオン化断面積 ×10 ⁻¹⁹ /cm ²	3.09 ± 0.08	2.95 ± 0.07	2.96



図 3.4: エネルギー準位についての考察

4 結論

新規分光器のVUV分光器を用いてこれま で研究室では測定出来なかった波長域の観測 を行うことができた。これにより今後 Sola-C EUVST が観測する領域の多価イオンを観 測できることが示された。

また、発光線の時間発展計測からイオン化 断面積の算出を行うことができた。2つの遷 移からイオン化断面積を導出したが、どち らのイオン化断面積も理論計算から求めた イオン化断面積と近い値になった。この実 験方法によるイオン化断面積の導出は有用 であると考えられる。しかし、より精度を 上げるために CoBIT 内の価数分布の制御や 考慮する過程を増やすことなどが必要であ る。本研究で行ったイオン化断面積の導出 は他の元素の他の価数でも行うことができ る。特に、太陽コロナに存在しているとさ れている鉄や炭素などについても同様の実 験を行うことが望まれる。

参考文献

- [1] 国立天文台 Solar-C プロジェクトホーム ページ (https://solar-c.nao.ac.jp)
- [2] Nobuyuki Nakamura J.Phys.Soc.Jpn A Wide Vacuum Ultraviolet Range Spectrometer for Use with an Electron Beam Ion Trap
- [3] 物部将士 修士論文 電気通信大学 (2019)
- [4] 佐々木康 修士論文 九州大学 (2020)
- [5] Atomic Molecular Data Services website (https://wwwamdis.iaea.org/FAC/)