

氏 名 山 本 則 正

学位（専攻分野） 博士(理学)

学 位 記 番 号 総研大甲第593号

学位授与の日付 平成14年3月22日

学位授与の要件 数物科学研究科 核融合科学専攻

学位規則第4条第1項該当

学 位 論 文 題 目 2電子励起状態を含んだ衝突輻射モデル

論 文 審 査 委 員

主 査 教授	須藤 滋
教授	加藤 隆子
教授	Er.リチャード・マイケル
助教授	佐藤 國憲
教授	藤本 孝 (京都大学)

プラズマからのスペクトル線解析及び実効的な電離、再結合、励起速度駆数を求める為に衝突輻射モデルが広く用いられている。衝突輻射モデルについては藤本[1]やGreenland等[2]によって調べられているが、主に1電子励起状態についてのモデルである。2電子励起状態から放射されるサテライト線は、プラズマの電子温度測定に用いられている。また2電子再結合の密度効果は、プラズマ中のイオン密度費に影響する。レーザー生成プラズマで発生するサテライト線に対しての簡単な衝突輻射モデルに関する議論はされているが[3]、2電子励起状態を含んだ衝突輻射モデルに対しては、まだ十分に調べられていない。

本論文では、高温高密度プラズマにおける2電子系イオンに対する2電子励起状態を含んだ衝突輻射モデルの構築を行い、構築したモデルを用いて体系化を試みた。体系化の一つとして、高密度プラズマで直接遷移の速度係数に対して重要になる実効的な速度係数の電子温度・密度依存性について調べた。実効的な速度係数は、高密度プラズマにおいて間接的な寄与が直接遷移よりも大きくなることで重要になる。実効的な速度係数は、藤本と加藤により2電子系イオンに対する2電子励起状態を含んだ衝突輻射モデルにより調べられた[4]。彼らは、 $1s-2s$ 励起/脱励起に対して2電子励起状態 $2snl$ を、 $1s-2p$ 励起/脱励起に対して $2pnl$ を取り入れた衝突輻射モデルを各々構築した。その結果、実効的な速度係数に対して、2電子性捕獲-梯子様励起・電離過程による間接的な寄与を示した。また彼らは、Griemの限界レベル(critical level)[5]を用いて実効的な速度係数の近似式を与え、衝突輻射モデルによる結果との一致を示した。

本論文では、2電子励起状態 $2snl$ 、 $2pnl$ と $3l'nl$ 状態、更に1電子励起状態 $1snl$ を取り入れた衝突輻射モデルの構築を行った。構築した衝突輻射モデルを用いて ref. [4]の実効的な速度係数の計算には取り入れられていない、 $1snl-2lnl'$ 遷移、 $2snl-2pnl$ 遷移や $3l'nl$ 状態の、 $1s-2l$ 励起/脱励起の実効的な速度係数への寄与について調べた。その他に $1s-3l$ 励起/脱励起や $2l-3l'$ 励起/脱励起、そして $1s^2-1s$ 、 $1s^2-2l$ と $1s^2-3l$ 電離/再結合の実効的な速度係数についても調べた。また、構築した衝突輻射モデルを用いて、最近 Rosmej 等によって GSI-Darmstadt で測定された、レーザー生成プラズマによる水素様 Mg イオンの $n=2, 3, 4$ からのサテライト線[6]の解析を行った。

本論文における衝突輻射モデルは、ヘリウム様準位の基底状態 $1s^2$ 、水素様準位の $1s$ 、 $2l$ ($2s$, $2p$) と $3l$ ($3s$, $3p$, $3d$) の他に1電子励起状態 $1snl$ と2電子励起状態 $2l'nl$ 、 $3l'nl$ ($n \leq 20$) の準位を考慮している。また原子過程としては電子衝突による励起/脱励起、電離・三体再結合、放射遷移、自動電離・2電子性捕獲、そして放射再結合を考慮している。上述のエネルギー準位と、準位間の遷移過程を取り入れている。ここで、2電子系の励起状態 ($1snl$, $2l'nl$ と $3l'nl$) の占有密度を $1s^2$ 、 $1s$ 、 $2l$ 、 $3l$ 状態からの寄与を独立に求め、 $1s^2$ 、 $1s$ 、 $2l$ 、 $3l$ 状態の占有密度の線形和として取り扱い、2電子系の励起状態の速度方程式を、準定常状態を仮定して解くことで求めた。 $1s^2$ 、 $1s$ 、 $2l$ と $3l$ 状態間の実効的な速度係数は、求めた2電子系の励起状態の占有密度を用いて定式化することが出来る。こうして定式化された実効的な速度係数に対して次の2つの性質を持つことが期待される。1つは粒子保存則から得られる速度係数和对する等式、もう1つは、直接遷移だけでなく間接

的な遷移に対しても、高密度プラズマで、詳細釣り合いが成立するということである。今回構築したモデルは、数値計算の結果、この2点の性質を満たす結果が得られ、計算機コードの信頼性が確かめられたといえる。

1s-2l に対する実効的な励起速度係数は、高密度で間接的な寄与が直接励起より重要になる。ref. [4]で、この間接的な寄与は、2電子性捕獲-梯子様励起・電離過程 $1s \rightarrow 2l'n'l \rightarrow 2l'n''l'' \rightarrow \dots \rightarrow 2l'$ に相当することが示されている。本論文で、1snl 状態を取り入れた衝突輻射モデルの構築により、2電子性捕獲-梯子様励起・電離が直接遷移を超える高密度領域では、 $1s \rightarrow 1snl \rightarrow 2l'n'l \rightarrow 2l'n''l'' \rightarrow \dots \rightarrow 2l'$ という間接的な遷移が重要になることが分かった。この寄与は、1s 状態から1電子励起状態 1snl への再結合した後、2電子励起状態へ励起し、梯子様-励起・電離が起こるためである。この間接的な寄与により実効的な速度係数は、高密度で密度増加に従い、電子密度に比例して増加する。2電子励起状態 3l'n'l の 1s-2l 励起に対する共鳴の寄与は、低中密度で直接励起の10%程度 ($Z=6$, $T_e=3.5 \times 10^5$ K) になり、高密度で梯子様励起・電離過程が、自動電離確率の高い低励起状態まで影響する為に減少することが確かめられた[7]。またこの減少は、1s-3l に対する実効的な励起速度係数の増加になることが確かめられた。

実効的な 2l-1s 脱励起速度係数は、ref. [4]から高密度で $2l' \rightarrow 2l'n'l \rightarrow 2l'n''l'' \rightarrow \dots \rightarrow 1s$ という間接的な寄与が重要になると考えられる。しかし、今回構築したモデルから、中高密度で1電子励起状態 1snl から1s 状態への電離が重要になることが分かった。また 2s-1s 脱励起に対しては、中間密度領域で 2snl-2pnl 間の l-changing 遷移も重要になることが分かった。即ち 2s-1s 脱励起に対する間接的な寄与は $2s-2snl-2pnl-1snl-1s$ 、 $2p-1s$ 脱励起に対する間接的な寄与は、 $2p-2pnl-1snl-1s$ である。3l-1s 脱励起への2電子励起状態 3l'n'l からの寄与は、低中密度で直接脱励起の30%程度 ($Z=6$, $T_e=3.5 \times 10^5$ K) である。特に、 $3l-3l'n'l-1snl-1s$ という2電子励起状態 3l'n'l を経由した1電子励起状態 1snl 殻の電離は、中間密度で直接脱励起と同等の間接的な寄与を与えることが分かった。実効的な再結合速度係数に対しては、2電子性再結合が重要となる温度領域では、2電子励起状態間の衝突よりも1電子励起状態間の衝突による密度効果がより影響することが分かった。

Rosmej 等[6]によるレーザー生成プラズマからのH様MgイオンのX線スペクトルには、2電子励起状態からのサテライト線が測定されている。本論文で構築した衝突輻射モデルを用いて、スペクトル線解析を行った。その結果 2l2l' 状態からのスペクトルは比較的一致の良い結果が得られた。電離平衡プラズマを仮定することにより、実験結果をよりよく再現できた。2l3l' と 2l4l' 状態からのスペクトルについては、更に詳しく調べる予定である。

衝突輻射モデルで高リドベルグ状態から連続状態へ遷移する領域のエネルギー準位の取り入れ方はまだ完全に解決していない。また固体密度に近い高密度領域では、圧力電離によるエネルギー準位の低下、高リドベルグ状態と連続状態との関係などが、上記で得られた実効的な速度係数へどのように影響するかが問題となる。今後これらの問題を解決する予定である。

論文の審査結果の要旨

本学位論文は、二電子励起状態を含んだ衝突輻射モデルに関するものである。衝突輻射モデルはプラズマ中原子・イオンの励起・イオン化・再結合などの過程を総合的に取り扱う方法であり、それはまた、プラズマ分光診断に必要な不可欠な理論的方法である。この方法により、すでにいくつかの重要な集団的現象が発見されているが、その一つは藤本・加藤により提唱された2電子励起状態を取り入れた実効的な励起・脱励起過程である。この過程はいままで考えられていなかった新しい励起・脱励起過程である。この藤本・加藤モデルが出された時点ではこの過程は「仮説」であり、二電子励起状態を含んだモデルの全体的な描像としては不十分なものであった。

現在計算機の性能がめざましく向上し、また、Hullac コードなどの汎用的な原子過程計算コードも整備されて、この面で大きな発展が可能となる段階に来ている。本申請者はその状況下で、従来の一電子励起状態のみを取り扱っていた衝突輻射モデルに二電子励起状態を系統的に組み入れ、一電子励起状態と同じように取り扱うという拡張を行った。具体的には一電子励起状態 $1snl$ に加えて、二電子励起状態 $2snl$, $2pnl$, $3snl$, $3pnl$, $3dnl$ ($n \leq 20$) を取り入れた衝突輻射モデルを構築した。準位構造としては、主量子数 n が7以下のレベルに対してはそのスピン、軌道角運動量の違いを取り入れ、全てのレベルに対して遷移確率、電子衝突断面積には現在考え得る限り最も信頼できる値を採用した。本申請者はこの計算機コードを作成した上で、粒子保存則から得られる速度係数和に対する等式及び詳細釣り合いの法則を満たしていることを確認し、作成した計算機コードの信頼性を確認した。この計算機コードにより一電子励起状態及び二電子励起状態での占有密度が計算できるとともに、プラズマ中の密度及び温度に依存する実効的励起速度係数、実効的電離速度係数、実効的再結合速度係数が得られるようになった。その結果、「藤本・加藤モデル」の精密化とともに、新たな励起・脱励起過程が存在することを見いだすなどの成果を得た。

具体的には $1s - 2l$ 励起の実効的速度係数に対して低密度領域では二電子励起状態 $3l'nl''$ から $2l$ への自動電離の寄与による間接的な寄与があり、高密度になると $2lnl - 2ln'n' - 2l$ の梯子様励起・電離の寄与があり、さらに高密度になると $1snl - 2lnl - 2ln'l' - 2l$ の過程があることが解った。最後の過程は藤本・加藤モデルでは言及されなかった新しい過程である。また $2l-1s$ 脱励起に対しても低密度では $2l-3l'nl''-1s$ と $2l-3l'nl''-2l''nl''-1s$ のような間接的な遷移、中間密度では $2l-3l'nl''-1snl''-1s$ が、高密度では $2s-2snl-2pnl-1snl-1s$ が重要な間接的な過程であることが解った。ここで低密度とは励起状態からの放射遷移確率が電子衝突による遷移の確率より大きい密度領域、高密度とは衝突過程が主要な密度領域、それよりもさらに高密度の領域とは高励起状態が局所熱平衡になっている密度領域である。

また実効的な再結合過程 ($1s \rightarrow 1s^2$) に対して二電子励起状態での衝突過程よりも一電子励起状態の衝突過程の方が影響が大きいと言う新しい知見が得られた。再結合過程での密度効果は磁場閉じ込めプラズマでも重要となる。プラズマ中の粒子バランスのモデルから決定される異なった電離段階のイオンの密度比がこの密度効果を考慮しない場合と異なってくる。

さらに、レーザー生成プラズマに対して最近行われた高分解X線スペクトルに本モデルを適用して二電子励起状態から放射されるサテライト線スペクトルの解析を行った。詳細なスペクトル線の同定から強度の比較まで行った。従来仮定されていた電離過程プラズマ成分のみではなく、電離平衡プラズマを仮定する事により実験結果をよりよく再現できた。またこの解析によりプラズマの温度及び密度の評価も行うことが出来た。

本論文は二電子励起状態が関与する過程をイオン種（元素）、密度、温度領域など非常に広い適用範囲を持つ衝突輻射モデルとして初めて構築し、一般的、総合的に研究したものである。このモデルによりレーザー生成プラズマのスペクトル解析に成功し、また磁場閉じ込めプラズマに対しても再結合過程での密度効果などについてあたらしい知見を得ている。

本審査委員会は、上記に述べたような新しい知見を得た成果と当該分野への貢献の程度から判断して、本論文が博士学位論文として十分な資格があると認めた。