

京都大学	博士（工学）	氏名	松隈 啓
------	--------	----	------

論文題目	低速原子衝突による偏極緩和過程の時間分解偏光分光研究
------	----------------------------

（論文内容の要旨）

本論文は、レーザー誘起蛍光の時間分解偏光分光計測法を用いて、励起希ガス原子の低速原子衝突による偏極緩和過程の理解を目的として行った研究をまとめたものであり、7章から構成されている。

第1章は序論である。まず、原子衝突実験の歴史と理論の概要を紹介し、化学反応や天体物理、核融合など様々な研究分野で原子衝突に関する理解が必要とされていることを述べた後、原子衝突過程と原子間ポテンシャルとの関連について説明している。次に原子衝突による磁気副準位間の励起移行過程において、原子間ポテンシャルのみならずその異方性が重要であることを説明した後、磁気副準位間のポピュレーションの偏りである原子の偏極および量子化軸に対して対称、非対称な偏極（それぞれアライメント、オリエンテーション）について説明し、偏極緩和の観測により励起移行過程の観測が可能であることを述べている。最後に1960年代後半以降に行われてきた励起希ガス原子の偏極緩和観測実験と偏極緩和に関する理論研究について複数のグループの得た知見を紹介し、本研究の目的について述べている。

第2章は、本論文を読み進める上で必要となる基礎事項についてまとめた章である。2.1節では衝突断面積と緩和速度係数の関連について述べている。2.2節では原子からの光の放射についてKastlerダイアグラムを与え、各偏光成分の放射強度の角度依存性について記述している。2.3節では原子の密度行列を用いたポピュレーションと偏極の記述方法および光子の密度行列を用いた偏光の取り扱いについて述べている。2.4節はふく射再吸収がポピュレーション緩和と偏極緩和に与える影響について述べている。

第3章では、 $2p_5$ ,  $2p_{10}$  準位の励起ネオン原子のヘリウム原子衝突によるアライメント緩和観測に関して述べている。3.1節では直線偏光パルスレーザーによりアライメント偏極させた原子集団からの蛍光を直線偏光分離して測定する実験方法について述べている。3.2節では実験で得られたレーザー誘起蛍光の各偏光成分の時間発展の解析から、ポピュレーション緩和速度とアライメント緩和速度を得ている。3.3節では自己吸収法を用いてふく射再吸収の効果を定量化し、実験で得られたアライメント緩和速度からふく射再吸収による効果を差し引くことで、ヘリウム原子衝突によるアライメント緩和速度係数を77~294 Kの範囲で決定した。その結果、 $2p_5$ ,  $2p_{10}$  準位の励起ネオン原子のアライメント緩和速度係数がそれぞれ温度の0.35乗、2.2乗のべきに従うことを明らかにした。

第4章では、 $2p_2$  準位の励起アルゴン原子のヘリウム、ネオン、アルゴン原子衝突によるアライメント緩和観測について述べている。第3章と同様の実験方法で、アライメント緩和速度係数を77~295 Kの範囲で決定した。各温度において、入射原子の分極率が大きいほど、アライメント緩和速度係数が大きくなることを明らかにした。

第5章では  $2p_5$ ,  $2p_{10}$  準位の励起ネオン原子のヘリウム原子衝突によるオリエンテーション緩和観測について述べている。5.1節では円偏光パルスレーザーによりオリエンテーション偏

京都大学	博士（工学）	氏名	松隈 啓
<p>極させた原子集団からの蛍光を円偏光分離して測定する実験方法について述べている．5.2 節では実験で得られたレーザー誘起蛍光の各偏光成分の時間発展の解析からポピュレーション緩和速度，アライメント緩和速度，オリエンテーション緩和速度を得ている．5.3 節では自己吸収法を用いてふく射再吸収の効果を評価し，ヘリウム原子衝突によるアライメント緩和速度係数，オリエンテーション緩和速度係数を 77 ~ 294 K の範囲で決定した．本測定では放電管中心に 3.3 または 2.0 mT の磁場が印加されているが，ここで決定したアライメント緩和速度係数について，第 3 章で得た磁場をかけていない場合の値と比較し，磁場の影響が無視できることを確認した．オリエンテーション緩和速度係数がそれぞれ温度の 0.28 乗，2.1 乗のべきに従うことを明らかにした．</p> <p>第 6 章では，第 3，4，5 章で得られたアライメント，オリエンテーション緩和速度係数に関して考察を行っている．6.1 節では <math>2p_5</math>，<math>2p_{10}</math> 準位の励起ネオン原子の緩和速度係数の温度依存性について，これまでに発表されている Bahrim および Omont, Wang らの理論との比較を行った．Bahrim らの理論はネオンの最外殻電子とネオンイオン，ヘリウム原子の 3 体問題としてモデルポテンシャルを導入しつつ，原子間ポテンシャルを推定したもので，緊密結合計算によって断面積を得ている．この計算と実験を比較した結果，アライメント緩和速度係数，オリエンテーション緩和速度係数ともに，<math>2p_5</math> 準位については理論と実験は極めてよく一致した．<math>2p_{10}</math> 準位については，294 K のアライメント緩和速度係数，180 ~ 294 K のオリエンテーション緩和速度係数で比較的良く一致したが，低温になるにつれて，実験値と理論値の乖離が大きくなった．一方，Omont, Wang らの理論は，原子間距離の -6 乗に従う van der Waals 原子間ポテンシャルを仮定して偏極緩和速度係数が温度の <math>3/10</math> 乗のべき依存性をもつことを予想しており，<math>2p_5</math> 準位ではこの温度依存性に良く一致したが，<math>2p_{10}</math> 準位では一致しなかった．6.2 節では励起ネオン原子の偏極緩和について，オリエンテーション緩和速度係数のアライメント緩和速度係数に対する比（以下 O/A 比とする）の考察を行っている．実験で得られた <math>2p_5</math> 準位の O/A 比は 1.6 程度で温度に有意に依存しなかった．この傾向は Bahrim らや Omont, Wang らの理論と誤差の範囲内で一致した．一方，<math>2p_{10}</math> 準位の O/A 比は 294 K の 1 程度から温度の減少とともに 2 程度まで増大し，Bahrim らや Omont, Wang らの理論で再現できないことを明らかにした．6.3 節では，<math>2p_2</math> 準位の励起アルゴン原子のアライメント緩和に関して，入射原子依存性と温度依存性について考察している．ネオン原子衝突，アルゴン原子衝突によるアライメント緩和平均断面積のアルゴン原子衝突によるアライメント緩和平均断面積に対する比を，Wang らの理論値と比較し，Omont, Wang らの理論値は比較的良くこの比を再現したが，実験では温度に対しても依存性があることを明らかにした．これらのことより，Omont, Wang らの仮定した単純な van der Waals ポテンシャルのみでは偏極緩和を再現できず，Bahrim らがモデルポテンシャルで示したように，より原子間距離が小さい領域でのポテンシャルの寄与が無視できないことを明らかにした．また，実験では Bahrim らの理論が示す低衝突エネルギーで偏極緩和断面積が散乱長へ収束する傾向が見られず，このことは Bahrim らの理論計算が低衝突エネルギー領域で原子間ポテンシャルの非等方性を過大評価していることを示唆している．</p> <p>第 7 章は，総括であり，本論文で得られた知見についてまとめている．</p>			

## (論文審査の結果の要旨)

原子の衝突過程の観測は原子間ポテンシャルの評価に有効であり、さらに原子衝突による磁気副準位間の遷移の観測、すなわち偏極緩和過程の観測は、ポテンシャルの非等方性の評価をも可能にすることが期待されている。また、原子の偏極は原子の発する光の偏光と密接に関連しており、その定量的理解は核融合、宇宙から各種プロセスにおけるプラズマ分光診断においても重要である。本研究はネオンやアルゴンの希ガス励起原子の原子衝突による偏極緩和を、レーザー誘起蛍光の時間分解偏光分離分光法により計測し、さらにその結果と既に報告されている理論研究の結果を比較することで、偏極緩和とその温度依存性の定量化を行うとともに、理論の適用範囲について知見を深めている。主な内容は以下の通りである。

(1)  $2p_5$ ,  $2p_{10}$  準位の励起ネオン原子の軸対称な偏極 (アライメント) について、77 ~ 294 K の温度範囲のグロー放電セルを用いたヘリウム原子衝突による緩和計測、およびふく射再吸収の効果の定量評価により、緩和速度係数を決定し、それぞれ温度の 0.35 乗、2.2 乗のべきに従うことを明らかにした。

(2)  $2p_5$ ,  $2p_{10}$  準位の励起ネオン原子の軸に非対称な偏極 (オリエンテーション) について、(1) の手法に磁場中の原子のラーマー運動を利用した計測を行うことで、緩和速度係数を決定し、それぞれ温度の 0.28 乗、2.1 乗のべきに従うことを明らかにした。さらに、印加した磁場が偏極緩和に有意な影響を与えないことを明らかにした。

(3)  $2p_2$  準位の励起アルゴン原子のヘリウム、ネオン、アルゴン原子衝突によるアライメント緩和を計測し、その速度係数を 77 ~ 295 K の範囲で決定した。入射原子の分極率が大きくなるにつれて、速度係数が増大することを明らかにした。

(4) Omont, Wang らの van der Waals ポテンシャルを用いた理論、Bahrim らのモデルポテンシャルを用いた理論と実験結果との比較より、計測した温度範囲では単純な van der Waals ポテンシャルでは実験を十分に再現できず、モデルポテンシャルのように近距離でのポテンシャルを考慮する必要があること、Bahrim らの理論では低衝突エネルギー領域でポテンシャルの非等方性を過大評価していることを明らかにした。

これらの成果は、原子間ポテンシャル、特にその非等方性の評価に重要となる諸現象を実験的・解析的に明らかにしている。さらに、本研究で開発された実験・解析手法は偏光を用いたプラズマ分光診断にも有用であり、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士 (工学) の学位論文として価値あるものと認める。また、平成 25 年 1 月 23 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行い、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。