

氏名 小 湊 健 太 郎  
 学位の種類 博 士 (理 学)  
 学位記番号 理 博 第 2743 号  
 学位授与の日付 平成 16 年 3 月 23 日  
 学位授与の要件 学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当  
 研究科・専攻 理 学 研 究 科 物 理 学 ・ 宇 宙 物 理 学 専 攻  
 学位論文題目 Multilevel avoided crossings in high Rydberg states of  $^{85}\text{Rb}$   
 (ルビジウム85の高励起リドベルグ状態における多準位反発交差)

論文調査委員 (主 査)  
 教 授 松 木 征 史 教 授 今 井 憲 一 教 授 谷 森 達

### 論 文 内 容 の 要 旨

外場の変化に対応してエネルギー準位が反発交差する現象は、固体物理から素粒子物理まで多くの物理に登場するもので、従来多くの研究がなされてきた。特に2準位系の場合には、ランダウ・ツェナー公式で扱うことが出来て、ほぼ現象を正しく再現出来ることが分かっている。一般に電場中でエネルギー準位が反発交差する非水素原子のリドベルグ状態においても、比較的低い励起準位について多くの2準位系の研究があり、ランダウ・ツェナー公式や、外場の変化の非線形性を取り入れたその拡張などで説明がなされている。

一方、多くの準位が関与する多準位系の反発交差は、最近の量子ドットやボーズ・アインシュタイン凝縮の研究の進展などにも関連して、理論的にも実験的にも関心の対象となってきた。中でも、電磁場中で多くの準位に分岐し、準位間隔が狭くなる高励起リドベルグ原子においては、多準位反発交差を必然的に考慮せざるを得ない状況にある。しかし、高励起リドベルグ原子においては、多準位反発交差の効果を実験的に検出する手段が従来明らかでなく、十分な研究が今までなされていなかったのが現状である。

申請者は、アルカリ原子ルビジウムの高励起リドベルグ状態のうち、ゼロ電場でも量子欠損により他の準位とエネルギー分離している113s状態が、電場中で他の電位と多重反発交差する場合に注目して研究を行った。すなわち、電場を増加させた際に、113s状態が隣接するマニフォールド状態と最初に反発交差する点での多準位への遷移の振る舞いを、電場の変化の速さ(スルーレイトと呼ばれる)や電場の到達値などを変化させて、調べることを行った。この際重要なことは、如何にして多準位反発交差の効果を実験的に明らかにするかであり、申請者はこの問題を、フィールドイオン化におけるトンネリングイオン化過程を通して調べる方法を開発することにより、解決した。具体的には、交差する以前の低い電場値で113s状態をレーザーにより励起した後、一定のスルーレイトで、決められた到達値まで電場を増加させる。その後パルス電場を急速に増大させて、フィールドイオン化により原子をイオン化して検出する。この時、イオン化する為のパルス電場(縦電場)を印加する際に、一定の横電場を加えることにより、電場の増大に伴って電場を回転させる。この電場回転効果により、自発イオン化過程よりもトンネリングイオン化の過程が大幅に増加し、断熱過程の経路による遷移と、非断熱過程を経由する遷移が、十分識別できることになる。自発イオン化の過程においては、高励起リドベルグ原子の隣接する2準位間のイオン化しきい値には差がほとんど無く、トンネリング過程に拠らない限り、識別は困難である。この方法は、従来適用されていなかった新しい方法である。

申請者は、以上の方法で、スルーレイトと到達する電場値を変化させて、多準位反発交差遷移を測定し、次のような結果を得た。

1) スルーレイトの小さい場合には、113s状態は電場で分裂したマニフォールド状態の内の、最もエネルギー準位の低い状態(最赤値状態)に遷移し、スルーレイトが増大するにつれて、分裂したマニフォールド状態のうちより高いエネルギー状態に遷移していく。スルーレイトを大きくした極限では、全ての反発交差において非断熱過程を経由する道筋を通る。

2) 以上のような遷移のスルーレイト依存性は、到達電場値により大きく変化し、到達電場値が高くなると、断熱過程を経由する道筋から、より非断熱過程を経由する道筋へと変化を起こすのに、より高いスルーレイトを必要とするようになる。必要なスルーレイトの到達電場依存性は、急速に増大した後、漸近的に一定値に近付き、飽和する。

申請者は、このような到達電場値依存性を、シュタルクシフトを用いて極めて正確に電場を求めることにより、測定した。この為に、直接ハミルトニアンを対角化し、準位の主要な角運動量成分を求める方法で、種々のリドベルグ状態のシュタルク準位を正確に計算すると共に、テルル分子の飽和吸収実験装置を建設・利用するなどの工夫により、シュタルク準位励起エネルギーの精密測定を行っている。

申請者は、以上のような実験に加えて、量子論に基づく電場中での113s状態の時間発展を数値計算して、実験結果と比較することを行った。この理論計算では、113s状態の関係する磁気量子数が1/2のみとする近似を用いているが、遷移のスルーレイト依存性については、その詳細において、わずかな不一致が見られるものの、到達電場値依存性については、実験結果をよく再現することが分かった。このことは、上記の近似における仮定が大筋において正しいことを示している。

申請者はさらに、以上の実験と理論結果に基づき、113s状態の多準位反発交差における遷移が、高励起リドベルグ原子のフィールドイオン化における準位の選択的識別に極めて有効に利用できることを議論している。この選択的フィールドイオン化法では、マニフォールド状態の上下に位置するsとp状態を2準位に選び、それぞれをマニフォールド状態の最赤値状態と、最青値状態に遷移させる。その後、早いスルーレイトでフィールドイオン化させることにより、トンネリングイオン化過程による上記2準位のイオン化しきい値の大幅な差を利用して、極めて厳密な識別が可能となる。この方法の適用には、申請者が行った多準位反発交差の遷移に関する結果が、その主量子数依存性などを考慮した上で、基本的に利用される。

#### 論文審査の結果の要旨

一般に電場中でエネルギー準位が反発交差する非水素原子のリドベルグ状態の中でも、多くの準位に分裂し準位間隔が狭い高励起状態（主量子数が100を越える状態）の場合には、多準位反発交差を取り扱う必要がある。しかし、高励起リドベルグ原子においては、自発イオン化法による選択的フィールドイオン化が十分機能しないので、多準位反発交差の効果を実験的に検出する手段が従来明らかでなく、十分な研究が今までなされていなかった。

申請者は、この為の実験的な手段を開発することにより、アルカリ原子ルビジウムの高励起リドベルグ状態のうち、113s状態が電場中で他の準位と多重反発交差する場合に注目して研究を行った。すなわち、電場を増加させた際に、s状態が隣接するマニフォールド状態と最初に反発交差する点での多準位への遷移の振る舞いを、電場の変化の速さ（スルーレイト）や電場の到達値などを変化させて、調べることを行った。具体的には、最初に交差する以前の低い電場値でs状態を励起した後、一定のスルーレイトで、決められた到達値まで電場を増加させる。その後パルス電場を急速に増大させて、フィールドイオン化により原子をイオン化して検出する。この時、イオン化する為のパルス電場（縦電場）を印加する際に、電場の増大に伴って電場を回転させるのが、申請者が取った新しい手法である。この電場回転効果により、自発イオン化過程よりもトンネリングイオン化の過程が大幅に増加し、断熱過程の経路による遷移と、非断熱過程を経由する遷移が、十分識別できることになった。この方法による遷移の道筋の識別は、従来に無いものであり、申請者の研究の独自な点として第一に高く評価される場所である。

申請者は、このような新しい方法を用いて、スルーレイトと到達する電場値の変化に伴う多準位反発交差遷移を測定し、主として次のような結果を得ている。

1) スルーレイトの増大につれて、s状態は電場で分裂したマニフォールド状態の内の、最もエネルギー準位の低い状態（最赤値状態）への遷移から、分裂したマニフォールド状態のうちより高いエネルギー状態へと遷移の道筋を変えて行く。スルーレイトを大きくした極限では、全ての反発交差において非断熱過程を経由する道筋を通る。

2) 多準位反発交差における遷移のスルーレイト依存性は、到達電場値により大きく変化する。到達電場値が高くなると、断熱過程を経由する道筋から、より非断熱過程を経由する道筋へと変化を起こすのに、より高いスルーレイトを必要とする。必要なスルーレイトは、到達電場値の増加と共に、急速に増大した後、漸近的に一定値に近付き、飽和する。

申請者は、以上のような実験に加えて、量子論に基づく電場中でのs状態の時間発展を数値計算により求め、実験結果と

比較することも行っている。この理論計算では、s状態の関係する磁気量子数が $1/2$ のみとする近似を用いているが、遷移のスレーイト依存性については、その詳細において、わずかな不一致が見られるものの、到達電場値依存性については、実験結果をよく再現することが分かった。このことは、上記の近似における仮定が大筋において正しいことを示している。申請者はまた、わずかに生成される自発イオン化仮定の多準位反発交差の遷移結果に与える効果も、実験結果と共に議論しており、今後の研究に示唆を与えるものとして、重要である。

以上の結果は、高励起リドベルグ原子における多準位反発交差の振る舞いを、実験的および理論的に精度良く明らかにしたものであり、大きな成果であると言える。特に、遷移の到達電場依存性を精度良く求めて、理論との比較を行ったのは、従来に無い成果であり、高く評価される。これらの研究において、実験と理論計算を駆使してシュタルク電場を精密に求めることは、正確な最終測定結果を得るのに重要な役割を果たすものであり、申請者の力量を示している。

申請者はさらに、以上の実験と理論結果に基づき、s状態の多準位反発交差における遷移が、高励起リドベルグ原子のフィールドイオン化における準位の選択的識別に極めて有効に利用できることを議論している。この選択的フィールドイオン化法は、高励起リドベルグ原子を、多くの基礎研究に応用する際に必須の手段であり、申請者の研究は、その為の基礎的データを与えるものとしても、十分評価されるべきものである。

申請者は、以上のように高励起リドベルグ原子の多準位反発交差について、実験と理論検討を共に行い、独自の新しい結果を示すと同時に、高励起リドベルグ原子を今後の基礎研究への応用に供する為の有益なデータと示唆を与える成果を上げた。よって、申請論文は博士（理学）の学位論文として価値あるものと認める。

なお、論文内容とそれに関連した口頭試問を行った結果、合格と認めた。