

氏 名	きし もと やす ひろ 岸 本 康 宏
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学 位 記 番 号	理 博 第 2434 号
学位授与の日付	平 成 14 年 3 月 25 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	Stark structure and field ionization characteristics of highly excited Rydberg atoms

論文調査委員 (主 査) 助教授 松 木 征 史 教 授 今 井 憲 一 教 授 西 川 公 一 郎

論 文 内 容 の 要 旨

イオン化限界近くまで励起された原子、いわゆるリドベルグ原子は、大きな原子半径を持ち、電磁場との相互作用が大きく、外場に影響されやすい。このことからリドベルグ原子は空洞内量子電気力学などの多くの基礎物理研究に利用されてきた。最近では、量子測定、量子コンピューターへの応用などが議論されている。これらの従来の研究や応用は、しかし、主量子数が60程度までの状態に限られていて、より高い励起状態に関する詳細な研究は皆無に近い状態であった。このような事情は、より高い励起状態になると、励起準位が多数になり準位構造が複雑になること、またある特定の準位を他と識別して検出することがより困難となることから、実験的な研究が進んでいないことによる。より高い励起状態のリドベルグ原子の特性を理解することは、より長波長のマイクロ波光子領域への応用を広げる為には必須のことであり、その展開が期待されていたものである。

申請者は、主量子数が110から140におよぶ高励起リドベルグ状態の電場中での準位構造、すなわちシュタルク構造と、パルス電場中でリドベルグ原子がイオン化する現象であるフィールドイオン化の特性を、実験と理論両面から詳しく調べて、その特性を明らかにした。申請者が行った実験は、レーザーによる2段励起でRbの高励起リドベルグ原子を生成し、パルス電場を印加して、イオン化する電場値を測定するものである。電場中ではリドベルグ原子は多くの準位に分裂しており、各準位は反発交差する。パルス電場の印加の早さをスルーレイトと呼ぶが、スルーレイトの大きさによって、この反発交差をどのように遷移するかが決まる。多くの反発交差を経由しながら、最終的にリドベルグ原子はイオン化される。パルス電場のスルーレイトの大きさを変えながら、フィールドイオン化する電場値を測定したところ、広い範囲のスルーレイトにわたって、イオン化電場値にピークが二つ現れることが分かった。これらのうち、低い電場値ピークは、一つの主量子数内で電場により分裂している準位(マニフォールドと呼ぶ)を最初レーザーで励起した場合、ほぼ一定の値を示すのに対して、高い電場値のピークでは、マニフォールド内でエネルギーの高い準位ほど高い電場値を示すことが分かった。この現象は、従来詳しく調べられてきた低い主量子数のリドベルグ原子では見られなかったものであり、特に高い電場値ピークが新しく生じていることが明らかにされた。

申請者は、この現象に注目し、どのような機構によってイオン化に二つのピークが現れるかを、理論的に解析した。一般にリドベルグ原子のフィールドイオン化の機構として考えられるものには二つある。一つは、水素原子の場合に生じる機構で、印加電場により発生するポテンシャル障壁を越えてイオン化するトンネリング機構であり、他の一つは、非水素原子に特有の機構で、上位の主量子数状態に属する連続状態との相互作用により準位の混合を起こしてイオン化する機構(準位混合イオン化機構、または自発イオン化機構と呼ばれる)である。申請者は、これら二つの機構によるイオン化の寿命をRb原子に対して理論的に計算し、それをもとにイオン化電場値を求めた。その結果、低い電場値ピークは準位混合によるイオン化であり、一方高い電場値ピークは、トンネリング機構によるものであるとすると、理論予想と実験結果が良い一致を示すことを明らかにした。実験結果はまた、高い主量子数を持つ準位のイオン化においては、トンネリング機構が主要な機構

となることも示しており、この点でも理論予想と一致する。

以上のような理論計算においては、その基礎としてまずシュタルク構造、すなわち電場中でのエネルギー準位構造を、ハミルトニアンを直接直交化する方法で数値計算により求め、エネルギー固有値、固有関数を得ることを行っている。次にこれらの固有関数を用いて、準位混合の確率を求め、イオン化寿命の値を得るわけで、申請者はこのような数値計算を高励起リドベルグ原子に対して初めて行っている。

このような理論計算の妥当性を実験的に検証する方法として、極めて有効なものがある。それは、s状態またはp状態をまず励起し、これらの状態が印加電場の増加にともなってマニフォールド準位と反発交差する際の電場値や、スルーレイトによって反発交差準位を遷移する確率がどのように変化するかを見ることである。申請者は、これらの電場値、スルーレイトも理論的に計算し、実験と比較することを行っている。その結果、予測値は実験結果と良い一致を示し、申請者が新たに定式化した多準位反発交差における時間発展の理論計算と、その基礎となるシュタルク準位計算が妥当であることが示された。

さらに、従来行われていなかったパルス電場によるイオン化の方法として、申請者は一旦はゼロ電場近くに原子を導き、次に再び電場を増加させてイオン化する、逆電場誘起のイオン化を調べることを行っている。この場合は、最初励起されたマニフォールド内の準位は、マニフォールドの中心エネルギー準位に対して対称的に折り返した準位に移行する。この場合についても、実験と理論的な予測とは良い一致を示した。

申請者は以上のような高励起リドベルグ原子のシュタルク構造とフィールドイオン化の特性に関する実験と理論にわたる研究結果を示すと共に、これらの結果が、主量子数が100を越えるリドベルグ状態をパルス電場を用いて選択的にイオン化する為の基礎を与えるものであることを議論しており、この点に沿って今後種々の応用が開けることを示唆している。

論文審査の結果の要旨

リドベルグ原子は空洞内量子電気力学などの多くの基礎物理研究に利用されてきたが、これらの従来の研究や応用は、主量子数が60程度までの状態に限られていて、より高い励起状態に関する詳細な研究は皆無に近い状態であった。この事情は、理論面では、より高い励起状態になると、励起準位が多数になり準位構造が複雑になること、従って多くの準位を考慮した数値計算が求められて、計算に要する時間も多大にかかること、一方実験的には、ある特定の準位を他と識別して検出すること（選択的フィールドイオン化）がより困難となることから、研究が進んでいないことによる。より高い励起状態のリドベルグ原子の特性を理解することは、より長波長のマイクロ波光子領域への応用を広げる為には必須のことであり、その展開が期待されていたものである。

申請者は、主量子数が110から140におよぶ高励起リドベルグ状態の電場中での準位構造、すなわちシュタルク構造と、パルス電場中でリドベルグ原子がイオン化する現象であるフィールドイオン化の特性を、実験と理論両面から詳しく調べて、その特性を明らかにした。申請者が行った実験は、レーザーによる2段励起でRbの高励起リドベルグ原子を生成し、パルス電場を印加して、イオン化する電場値を測定するものである。電場中ではリドベルグ原子は多くの準位に分裂しており、各準位は反発交差する。パルス電場の印加の早さをスルーレイトと呼ぶが、スルーレイトの大きさによって、この反発交差をどのように遷移するかが決まる。多くの反発交差を経由しながら、最終的にリドベルグ原子はイオン化される。パルス電場のスルーレイトの大きさを変えながら、フィールドイオン化する電場値を測定したところ、広い範囲のスルーレイトにわたって、イオン化電場値にピークが二つ現れることが分かった。これらのうち、低い電場値ピークは、一つの主量子数内で電場により分裂している準位（マニフォールドと呼ぶ）を最初レーザーで励起した場合、ほぼ一定の値を示すのに対して、高い電場値のピークでは、マニフォールド内でエネルギーの高い準位ほど高い電場値を示すことが分かった。この現象は、従来詳しく調べられてきた低い主量子数のリドベルグ原子では見られなかったものであり、特に高い電場値ピークが新しく生じていることを明らかにした点で、高励起リドベルグ原子の研究に新たな頁を開いたものとして高く評価出来る。

申請者は、さらにこの現象に注目し、どのような機構によってイオン化に二つのピークが現れるかを、理論的に解析した。一般にリドベルグ原子のフィールドイオン化の機構として考えられるものには二つある。一つは、水素原子の場合に生じる機構で、印加電場により発生するポテンシャル障壁を越えてイオン化するトンネリング機構であり、他の一つは、非水素原

子に特有の機構で、上位の主量子数状態に属する連続状態との相互作用により準位の混合を起こしてイオン化する機構（準位混合イオン化機構、または自発イオン化機構と呼ばれる）である。申請者は、これら二つの機構によるイオン化の寿命を Rb 原子に対して理論的に計算し、それをもとにイオン化電場値を求めた。その結果、低い電場値ピークは準位混合によるイオン化であり、一方高い電場値ピークは、トンネリング機構によるものであるとすると、理論予想と実験結果が良い一致を示すことを明らかにした。実験結果はまた、高い主量子数を持つ準位のイオン化においては、トンネリング機構が主要な機構となることも示しており、この点でも理論予想と一致する。これらの実験と理論両面にわたる研究結果は、従来の低い主量子数状態で得られていた結果を延長するだけでは得られないものであり、重要な研究成果であると言える。

以上のような理論計算においては、その基礎としてまずシュタルク構造、すなわち電場中でのエネルギー準位構造を、ハミルトニアンを直接直交化する方法で数値計算により求め、エネルギー固有値、固有関数を得ることを行っている。次にこれらの固有関数を用いて、準位混合の確率を求め、イオン化寿命の値を得るわけで、申請者はこのような数値計算を高励起リドベルグ原子に対して初めて行った。さらに、このような理論計算の妥当性を実験的に検証する方法として、s 状態または p 状態をまず励起し、これらの状態が印加電場の増加にともなってマニフォールド準位と反発交差する際の電場値や、スルーレイトによって反発交差準位を遷移する確率がどのように変化するかを調べた。申請者は、これらの電場値、スルーレイトも理論的に計算し、実験と比較することを行った結果、予測値は実験結果と良い一致を示し、申請者が新たに定式化した多準位反発交差における時間発展の理論計算と、その基礎となるシュタルク準位計算が妥当であることが示された。この多準位反発公差の理論的定式化は、今後多くのより複雑な系における時間発展の計算に応用可能なものであり、重要な価値がある。

従来行われていなかったパルス電場によるイオン化の方法として、申請者は一旦はゼロ電場近くに原子を導き、次に再び電場を増加させてイオン化する、逆電場誘起のイオン化を調べることも行ったが、この方法は、選択的フィールドイオン化に新たな手段を提供するもので、高い評価を与えられる成果である。

申請者は以上のように高励起リドベルグ原子のシュタルク構造とフィールドイオン化の特性に関する実験と理論にわたる優れた研究結果を示し、今後の高励起リドベルグ原子の応用に道を開く端緒となる成果を挙げたということが出来、申請論文は学位論文として十分な価値があるものと認める。

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。