

氏 名	やま だ さとる 山 田 悟
学位の種類	博 士 (理 学)
学位記番号	理 博 第 2753 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	Field Ionization Processes of Highly Excited Rydberg States under a Rotating Electric Field. (電場回転下での高励起リドベルグ原子のフィールドイオン化過程)
論文調査委員	(主 査) 教 授 今 井 憲 一 教 授 谷 森 達 教 授 松 木 征 史

論 文 内 容 の 要 旨

本申請論文は、回転する電場のもとでの高励起リドベルグ状態のイオン化特性を実験的および理論的に研究したものである。ある電場がリドベルグ原子にかかっているとき、この電場の方向を量子化軸にとると、量子化軸に対して垂直な方向の成分がかかってこないかぎり系の軸対称性は保持されるが、電場が回転する場合、この軸対称性が破れるため磁気量子数の異なる状態への遷移が起こる。磁気量子数はリドベルグ原子のイオン化と密接に結びついている。非水素型リドベルグ原子の2つのイオン化過程、tunneling process と autoionization-like process はイオン化閾値や、マニフォールド中の準位の位置に対するイオン化電場の依存性において大きく異なる性質を持っている。両者のうちどちらの過程が優勢になるかは、リドベルグ電子とイオン核との間の相互作用の強さで決まるが、これには強い磁気量子数依存性がある。磁気量子数が小さい場合は autoionization-like process が優勢となり、大きい場合は tunneling process が優勢となる。

実験においてはルビジウムを110度前後に加熱し、熱原子ビームとしてイオン化用電極で囲まれた領域に導入した。本研究で用いた主量子数112から137のリドベルグ状態は半導体レーザーと色素レーザーによる2段階励起で生成した。このとき選択則から初期のリドベルグ状態の磁気量子数はゼロ付近に限定される。リドベルグ原子をイオン化するために平行平板電極を用いてパルス電場を印加した。本研究では80mV/cm程度から-6V/cmへと180度反転するものを印加している。パルス電場に加えて、それに対して垂直な静電場を印加し、全体としての電場を回転させた。この電場回転下でのイオン化スペクトルを測定すると、垂直方向の電場を増大させる、すなわちより大きな電場の回転を引き起こした場合、イオン化スペクトルに占める tunneling process の割合がいちじるしく増大し、そのイオン化ピークの幅が大きくなる現象が測定された。

これらの現象の原因を探るために、実験と同様の電場回転の条件でのシミュレーション計算を行った。ここで、回転電場下でのリドベルグ原子の時間発展を2つの段階にわけて計算した。ひとつは電場がほぼ180度回転している段階で、異なる磁気量子数への遷移確率を計算した。もうひとつはパルス電場が支配的になった段階で、ここでは磁気量子数は保存するとみなすことができる。この段階では、それぞれの磁気量子数の状態について最終的なイオン化が autoionization-like process によって起こるのか tunneling process によって起こるのかを計算した。2つの段階での結果を組み合わせることにより、電場回転下で2種類のイオン化過程がどのような割合で起こるかを理解することができた。比較の結果、理論計算は実験結果と良く合っていることが分かった。

本研究で得られた結果は応用面においては、リドベルグ原子を用いたマイクロ波検出への貢献ということがある。このマイクロ波検出法では最初に用意されたs状態とマイクロ波を吸収したp状態とを tunneling process のイオン化ピークを用いて区別するというものであるが、回転電場によって全体のイオン化信号における tunneling process の割合を増加させ、マイクロ波検出の効率を上げることができることがあきらかになった。

論文審査の結果の要旨

本申請論文は、主量子数が100を超えるリドベルグ原子の回転電場のもとでのイオン化過程を実験的に調べ、理論計算と比較したものである。このような大きな量子数を持つリドベルグ量子の準位は電場下で磁気量子数などによってその縮退がとけて非常に多くの状態に分岐し、準位の交差がおこる。時間的に変化する電場のもとでどのように状態が変化するかは実験的にも理論的にもよくわかっていなかった。この研究は、はじめて回転電場のもとでのリドベルグ原子の状態変化とイオン化について研究したものとして評価することができる。

申請者はそのために、まずルビジウムの原子ビームをつくり、これに半導体および色素レーザーをあてて二段階過程で主量子数112から137のリドベルグ原子をつくることに成功し、これを回転電場でイオン化する実験を行った。回転電場はゼロ電位と交差するパルス電場と直交する静電場で構成されている。静電場の強さやパルス電場のスルーレートをかえてイオン化された数と発生時間の相関を測定してイオン化スペクトルを測定することに成功した。比較的低い電場でおこる autoionization-like process と高い電場でおこる tunneling process に対応するピークが観測されている。申請者はこのスペクトルを電場の強さやスルーレートの関数として求め、回転電場によって tunneling process が著しく増加することを見出した。これはリドベルグ原子でははじめての実験結果として重要な成果だと評価できる。

この回転電場による tunneling process によるイオン化の増加は、磁気量子数の大きな分岐準位への遷移によると予想された。申請者はこのリドベルグ原子のレーザーで生成された準位が電場中でどう遷移し時間発展するかを理論的に計算し、autoionization-like process と tunneling process の割合まで計算した。その結果は実験で得た結果をほぼ説明するものである。これらの数値計算は、はじめての大規模な計算でもあり結果的にも十分信頼できるものと考えられる。今後の研究に大きく寄与するであろう。このように申請者はリドベルグ原子のイオン化にはじめて回転電場というアイデアを持ち込み、実際にこれによりイオン化で tunneling process が増加することを測定して、かつ大規模な数値計算によりこれを理論的に明らかにした。この研究成果は博士論文として十分な研究業績であると判断する。

さらにこの成果は、ダークマターアクションという未発見粒子の探索に使われようとしている、超高感度のマイクロ波検出法にとって重要な成果となる。ここではわずかなマイクロ波を吸収した微量のリドベルグ原子の選択的イオン化が、その成否の鍵となる。申請者の見出した回転電場での tunneling process の著しい増大は、このリドベルグ原子の選択的イオン化の効率と対ノイズ特性に大きな改良をもたらすと期待される。申請者の仕事はその意味で応用上有益な成果としても評価できる。

なおこの申請論文は、京都大学理学部紀要に掲載することが決まっている。

よって、本申請論文は博士（理学）の学位論文に値するものと認める。

また主論文および参考論文に報告されている研究を中心として、これに関連した研究分野について口頭試問した結果、合格と認めた。