

氏名	た だ まさる 多 田 将
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学位記番号	理 博 第 2290 号
学位授与の日付	平 成 13 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	Coherent time evolution of highly excited Rydberg states in pulsed electric field: Opening a stringent way to selectively field-ionize the highly excited states (パルス電場下における高励起リドベルグ状態のコヒーレントな時間発展: 高励起状態の選択的フィールドイオン化を行う為の厳密な方法を開く)
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

高励起リドベルグ原子状態は、低い励起状態にはない特徴を持っており、特にマイクロ波領域の電磁場と強く結合する。この特徴を生かして、多くの基礎物理の研究に利用されてきた。しかし、これら従来の研究は、主量子数が80程度までのリドベルグ原子状態の利用に限られていた。比較的低い励起状態に研究範囲が限られていた理由は、高い励起状態では多くの準位が密に分布し、分離して検出することが困難なことにあった。このような実験的な困難さの故に、高励起リドベルグ原子状態の性質についての詳しい研究自体が十分行われていなかった。

申請者は、主量子数が98から150に至る Rb の高励起リドベルグ状態を2段階レーザー励起法を用いて生成し、パルス電場をかけるフィールドイオン化法により検出することを行い、特に早いパルス電場下におけるリドベルグ原子状態の時間発展を精密に調べて、以下のような、従来にない新しい結果を得た。1) 早い立ち上がり (スルーレイトと呼ぶ) のパルス電場下においては、単一の電場でフィールドイオン化が起こり、しかも、そのイオン化電場値は、スルーレイトに応じて離散的に変化する。2) スルーレイトをより大きくすると、イオン化電場値は、より小さい値の方に遷移する。3) 量子欠損の大きな、軌道角運動量の小さい状態 (s, p, d 状態) のイオン化電場の値は、p と s 状態で、大きく異なる。s と d 状態の電場値は同じである。4) 上記の振る舞いは、実験で調べた主量子数が98から150に至る広い範囲の状態について成り立ち、系統的な主量子数依存性が存在する。

以上の結果は、低い主量子数を持つ状態での従来の結果と大きく異なるものである。今までに研究されてきた比較的低い励起状態におけるフィールドイオン化は、一般に複数の電場値で生じ、幅広く分布することが多い。複数の電場値でイオン化が生じるのを特徴づける要素は、時間変化する電場中での反発交差の通過である。電場中ではシュタルク効果により準位が分裂し、多くのエネルギー準位が交差するが、非水素原子の場合は、実際には反発交差となる。変化する電場中で反発交差を通過する際のスルーレイトの大きさによって、断熱遷移と非断熱遷移が生じる。スルーレイトが高いほど、より非断熱遷移の確率が増すが、低い励起状態での従来の実験では、断熱遷移と非断熱遷移の両方が生じ、イオン化電場の値は比較的広く分布していた。

一方申請者による高励起状態での実験では、高いスルーレイトを用いており、非断熱遷移の確率が極めて大きい。従来の実験と大きく異なるほどのスルーレイトではない。このことを考慮すると、申請者が見出した高励起状態でのフィールドイオン化の振る舞いは、全く新しい様相を示しているものである。

申請者は、電場中でのリドベルグ状態の時間発展がどのように生じているかをモデル化してシミュレーションを行い、実験結果と比較して、結果の本質を理解することを試みた。まず時間発展において、コヒーレント効果を考慮しない (インコヒーレントモデル) のシミュレーションでは、比較的低い励起状態において生じている結果がほぼ再現されることが示されたが、申請者の行った高励起状態での実験結果は再現されることが分かった。すなわち、上記実験結果の特徴である単一

のイオン化電場値の実現、スルーレイトに依存した離散的な電場値の遷移、などはインコヒーレントな過程では説明できないことが示された。

次に申請者は、時間発展の過程でコヒーレントな効果を取り入れたらどうなるかを検討している。この検討には、Harminが行った単純化したモデル計算を比較の対象とした。このモデル計算では、単一のイオン化電場が実現し、かつスルーレイトに応じて電場値が離散的に変化するという結果は、定性的には再現される。しかし、スルーレイトを大きくした時に、イオン化電場値が小さい値の方に遷移する結果は説明できないことが分かった。Harminの計算は、ごく単純化されたモデルを用いており、現実が生じている結果を定量的に再現するだけの精度が無いことを示している。しかし、時間発展の過程で状態の位相が重要な役割を果たしていることは、この比較からも強く示唆される。

以上の実験結果と解析結果から、申請者は高励起状態のリドベルグ原子においては、パルス電場下でのコヒーレントな時間発展が大きな影響を与えていることを示唆している。

さらに申請者は、以上の結果から、高励起リドベルグ状態を基礎物理に適用する道が開けてきたことを議論している。一つの応用は、宇宙物理と素粒子物理における最重要な問題の一つである宇宙のダークマターの最有力候補であるアクシオンの探索装置への応用である。リドベルグ原子をマイクロ波の検出器として用いるこの装置では、遷移周波数が対象とするマイクロ波のそれに近い2準位系を選び、これら2準位を分離選択して検出することが要求されるが、早いパルス電場を用いればs状態とp状態が極めて精密に分離出来ることから、装置の性能を飛躍的に高めることが可能となった。また、連続発振するレーザーを用いてリドベルグ原子を励起・生成し、早いパルス電場をかけてイオン化する方法は、このような希少な現象の探索には検出効率を上げられる点で特に有効であることも指摘している。

論文審査の結果の要旨

高励起リドベルグ原子は、マイクロ波と強く結合する2準位系として理想的な物理系を構成することから、共振空洞中での空胴量子電気力学などの分野で従来多くの研究に利用され、重要な成果を挙げてきた。しかし、従来用いられてきたリドベルグ原子状態は、主量子数が80程度までであり、より高い励起状態のそれ自体の性質の詳しい研究や基礎物理研究への応用はなされていなかった。この事態が長らく続いていた理由は、高励起状態では、状態の密度が極めて大きく、特定の準位を選択的に検出することが容易ではなかったことによる。

本申請論文は、上記の現状を打破し、主量子数が98から150におよぶ広い範囲のリドベルグ原子について、早い立ち上がりのパルス電場下における時間発展を詳細に調べて、従来にない新しい結果が得られたことを報告したものである。パルス電場中でのリドベルグ原子は、シュタルク効果により準位分裂を起こし、異なる主量子数に由来する分裂準位が電場中で重なって、反発交差する。複雑な多数の準位反発交差を経た後、これらの準位はフィールドイオン化効果でイオン化されるが、申請論文は、早い立ち上がり（スルーレイト）でのフィールドイオン化の振る舞いは、広い範囲のリドベルグ状態について成り立つ系統的な様相を示し、比較的単純であることを見いだした。特に、イオン化は単一の電場で生じ、比較的鋭いピークとして観測されること、またイオン化電場値がスルーレイトにより離散的に変化すること、スルーレイトを大きくするとイオン化電場がより小さい方に遷移することを、初めて見出ししている。さらに、このイオン化の振る舞いは、s状態とp状態では大きく異なり、p状態は小さい電場で、sとd状態は大きな電場でイオン化されることが、系統的に生じていることが得られている。

これらの結果は、低い励起状態で一般的に得られている結果を延長することによって予想される様相とは大きく異なるものである。これらの予想では、高励起状態では反発交差での通過がより非断熱的になるが、完全に非断熱過程のみで推移することは起こらなくて、イオン化電場は広く分布することになる。このことは、高励起状態でのパルス電場中でのイオン化過程には、従来にない新しい様相が生じていることを示しており、従来にない結果と新しい研究の方向を示唆するものである。

以上の結果は、本申請論文で初めて明らかにされたものであり、高励起リドベルグ原子状態のシュタルク構造とその時間発展を理解する上で、重要な最初の結果として高く評価されるべき成果である。

申請論文では、これらの結果を、従来の比較的低い励起状態での知見と比較し、またインコヒーレントな時間発展過程を

考慮したモデル計算と比較することを行った。このモデル計算では、現実のリドベルグ原子 (Rb 原子) のシュタルク構造を正確に取り入れており、モンテカルロ計算により計算効率を上げて複雑な現象を扱っている。このモデル計算は、比較的低い (主量子数が ~ 60 以下) 励起状態でのイオン化過程の振る舞いはほぼ説明できるが、上記のような高い励起状態で得られた特徴は説明出来ないことが確かめられた。このモデル計算との比較はパルス電場下での時間発展について重要な示唆を与える。

さらに申請論文では、簡単なシュタルク構造のモデルを用いてコヒーレントな時間発展過程をシミュレーションした Harmin による計算結果と実験結果を比較することを行っており、略定的には実験結果の様相を再現するが、詳細には一致しないことを示している。このモデルは現実のシュタルク構造とは大きく異なる単純な構造を仮定しており、このことが詳細で実験結果と一致しない理由であろうと考えられる。インコヒーレントな過程の現実的な計算では実験結果が再現できないことや、位相を考慮したコヒーレント過程の計算で定性的な様相はほぼ説明出来ることから、申請論文は、高励起リドベルグ原子の時間発展ではコヒーレントな過程が重要な役割を果たしていることが強く示唆されると指摘している。この点も将来の研究の発展方向を示唆するものとして評価される結果である。

以上の、高励起リドベルグ原子そのものの特質、特にパルス電場下での時間発展の様相などの結果以外に、本論文は重要な基礎物理への応用について議論をおこなっている。特に、宇宙のダークマターの有力候補アクシオンの探索実験に、本実験で見いだされた成果を生かすことが出来ることを示している。適当な大きさのスルーレイトを持つパルス電場を適用すると、s 状態と p 状態ではイオン化電場が大きく異なるので、上位と下位の準位を精密に選択して分離・検出できる。また、連続発振するレーザーを用いて連続的にリドベルグ原子を生成し、マイクロ波検出の効率を上げる工夫も、本実験ではなされている。実際、最初 s 状態を下位準位として生成し、熱輻射光子を吸収して近くの p 状態に遷移した結果観測される p 状態も s 状態と同時に検出して、環境の温度変化による遷移確率の変化を調べる実験も行っており、期待通りの選択的イオン化が出来ていることを示している。希現象であるダークマターアクシオンの探索実験の検出効率を上げることは、宇宙物理・素粒子物理における重要な研究課題に大きな進展をもたらすものであり、高く評価出来る成果である。

本申請論文は、以上のように高励起リドベルグ原子シュタルク構造のパルス電場下における時間発展とその基礎物理への応用について新たな知見を与えたものであり、審査の結果、博士 (理学) の学位を授与するに十分値するものと判断する。

なお、申請論文に報告されている研究内容を中心とし、かつこれに関連した研究分野について口頭試問した (平成13年1月17日) 結果、合格と認めた。