

氏 名	柴 田 政 宏
学 位 の 種 類	博 士 (理 学)
学 位 記 番 号	理 博 第 2744 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	Microwave Single-Photon Detection with Rydberg Atoms at Low Temperature (低温におけるリドベルグ原子を用いたマイクロ波単一光子検出)
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

マイクロ波の高感度・高効率検出は、多くの基礎研究を推進するのに重要な役割を果たしてきた。これらの検出法の大部分は、マイクロ波を低雑音増幅器で増幅し、ヘテロダイン法などにより周波数分解・検波して検出するものである。これに対して、マイクロ波光子を個々に検出する単一光子検出法として、リドベルグ原子を用いる方法が20年程前に提案されている。高励起リドベルグ状態には、隣り合う準位間の遷移周波数がマイクロ波領域に属するものがあり、高い効率でマイクロ波を吸収して上位の準位に移る。高い励起準位は寿命が長く、比較的長い時間その準位に留まっているので、小さい電場をかけて選択的にイオン化することで、励起された準位のみを検出して、マイクロ波の検出に使うことが出来る。この方法で、すでに従来の方法と同じか、またはより良い感度得られているが、格段に優れた検出感度を得る為には、装置系を極低温にまで冷却して、黒体輻射雑音を大幅に低減する必要がある。しかし従来は常温と14Kでその感度が調べられているのみで、1K以下の極低温で感度を上げ、また実際に基礎研究に使える装置として開発された例は今まで無かった。

申請者は、アルカリ原子リビジウムのリドベルグ状態によるマイクロ波検出器を基礎研究に実際に応用する事を念頭において、10mK領域にまで冷却された共振空洞中にリドベルグ原子を導入し、高感度・高効率に10cm波のマイクロ波単一光子を個々に検出する装置を建設した。リドベルグ原子生成の為に原子ビームとレーザーは、常温外部より導入し、空洞中で2段階のレーザー励起により、リドベルグ原子を生成する。共振空洞とその周波数駆動系、フィールドイオン化検出装置は、希釈冷凍機を用いて冷却し、全体は低温用のクライオスタット内に納められている。希釈冷凍機を用いてそれらの装置系を冷却し、マイクロ波を実際に検出するには、希釈冷凍機の冷却能力が大きくないことから、多くの工夫が必要である。第一に、この点に関連して特に申請者が新たに開発したものは、フィールドイオン化の装置系である。イオン化で生じた電子は、電子増倍管で検出されるが、増倍管は大きい熱を発生するので、直接希釈冷凍機の混合室付近に置くことは出来ない。この為、申請者はフィールドイオン化電極は混合室支持板に設置し、イオン化されて発生した電子を収束作用のあるリング状の電極により生成された電場中を輸送して、比較的高温部(1K)にまで導き、そこで電子増倍管で検出する装置を製作した。電子増倍管は、安定して長時間作動が可能のように、ヒーターにより20K以上に保温されている。この処理により、10mK領域まで冷却された空洞中での単一光子検出が可能となった。フィールドイオン化・電子輸送系の性能は、常温で他の電子増倍管を比較用に行われ、ほぼ100%の検出効率を持っていることを確かめている。これらの輸送系の建設に先立ち、申請者は正確なシミュレーション計算を行って装置を設計し、実際に製作した装置の性能を設計計算値と比較することも行っている。第二に、空洞中に挿入した2本の金属銅棒を動径方向に移動させて、共振空洞の共振周波数を調整するが、その際に常温外部より冷却部への熱流入が起らないように、伸長性の小さい、断熱性の良い釣り糸を用いて外部よりの駆動力を伝えるなどの多くの工夫がなされている。申請者は、これら以外にも細心の注意を払った装置の製作で、定常的に15mKの冷却到達温度を得ている。空洞の共振周波数の調整は、中心周波数の約20%の範囲で可能である。

申請者は、以上の実用的なマイクロ波検出装置を製作した上で、幾つかの温度で10cm波マイクロ波(2.6, 3.6GHz)の

検出を行った。このマイクロ波の検出の際に重要なのは、主量子数が100を越える高励起リドベルグ原子を用いたことで、このような高励起原子の選択的フィールドイオン化では、従来のシュタルク電場中での全断熱過程を用いたイオン化法では選別が十分ではない。この為申請者は、形状を独自に整えたパルス電場を用いて、電場中でのエネルギー準位の変化を制御し、トンネリング型のイオン化により下位と上位の2準位のイオン化電場が大きく異なる方法を用いている。申請者は、このような方法で光子を検出することにより、外部より導入した極めて微弱なマイクロ波を測定した。空洞中の浮遊電場による周波数変移はあるが、外部導入マイクロ波の周波数に対応した共振を確認し、空洞温度60mKでの測定から、雑音等価マイクロ波電力として 10^{-23} 乗の桁の値を得た。これは、従来の方法による測定と較べて6桁以上小さく、格段に優れたものである。申請者は、この検出感度を決定している要因を分析し、より低音でさらに検出感度を向上する方法を述べている。

以上の装置は、具体的にはダークマター候補素粒子アクシオンの検出に用いることを念頭において建設されたものである。アクシオンの検出には、共振空洞に強磁場を印加してアクシオンを光子に転換し、転換光子はリドベルグ原子マイクロ波単一光子検出器を用いて検出する。空洞内の光子検出部とフィールドイオン化検出器は、磁場遮蔽された状態で使われる。建設された装置には、これらの関連装置系も導入されており、申請者は、アクシオン検出にこの装置を用いる場合に必要な機能や性能も議論しており、さらにアクシオン検出効率についても検討している。

論文審査の結果の要旨

マイクロ波光子を個々に検出する単一光子検出法としては、パラメトリック混合を用いる方法やマイクロ波・光二重共鳴法などがあるが、いずれも感度の点で劣るところがあり、新しい検出方法の開発が望まれていた。リドベルグ原子を用いたマイクロ波検出法は、上記の方法の欠陥を補う要素を持っているもので、マイクロ波のエネルギー（数GHz）をイオン化した電子の運動エネルギーにまでエネルギー増幅し、結果として単一光子の検出を可能にするものである。イオン化された電子を検出する電子増倍管の検出効率は85%から100%であり、この方式の検出効率は高い。リドベルグ原子マイクロ波検出法は、20年程前に提案され、14Kまでの温度でその感度が測定されていたが、極限近くまで雑音を低減し、検出感度を上げて、実際のマイクロ波検出に適用された例は無かった。

申請者は、アルカリ原子ルビジウムのリドベルグ状態を用いたマイクロ波検出器を、ダークマターアクシオンの探索という基礎研究に実際に応用する事を念頭において開発した。具体的には、10mK領域にまで冷却された共振空洞中にリドベルグ原子を導入し、主量子数100を越えるリドベルグ状態を用いて、10cm波のマイクロ波単一光子を個々に検出する装置を建設した。リドベルグ原子の生成は、常温外部より導入した原子ビームにレーザーを照射し、空洞中で2段階のレーザー励起により行う。検出器系全体は低温用のクライオスタット内に納められ、共振空洞とその周波数駆動系、フィールドイオン化電極部は、希釈冷凍機を用いて冷却される。希釈冷凍機の冷却能力の限界を考慮して、これらの装置系全体を冷却するには、多くの工夫が必要である。この点に関連して特に申請者が独自に開発したものは、フィールドイオン化の装置系である。イオン化で生じた電子は、電子増倍管で検出されるが、増倍管は大きい熱を発生するので、直接希釈冷凍機の混合室付近に置くことは出来ない。この為、申請者はフィールドイオン化電極は混合室支持板に設置し、イオン化されて発生した電子を収束作用のあるリング状の電極により生成された電場中を輸送して、比較的高温部（1K）にまで導き、そこで電子増倍管で検出する装置を製作した。電子増倍管は、安定して長時間作動が可能なように、ヒーターにより20K以上に保温されている。この装置系の開発は、全く独自に行われたものであり、初めての成果である点で、高く評価される。この装置により、10mK領域まで冷却された空洞中での単一光子検出が初めて可能となった。

申請者は、フィールドイオン化・電子輸送系の性能を、常温で他の電子増倍管を比較用に用いて行い、ほぼ100%の検出効率を持っていることを確かめている。これらの輸送系の建設に先立ち、申請者は正確なシミュレーション計算を行って装置を設計し、実際に製作した装置の性能を設計計算値と比較することも行っている。これらの厳密な取り扱い、装置の有用性を立証するものであり、大きな成果となっている。また、申請者は、空洞中に挿入した2本の金属銅棒を動径方向に移動させて、共振空洞の共振周波数を調整する駆動系を製作し、20%以上の変調周波数範囲を持つ性能を得ている。その際に常温外部より冷却部への熱流入が起こらないように、伸長性の小さい、断熱性の良い釣り糸を用いて外部よりの駆動力を伝

えるなどの多くの工夫を行っている。申請者は、これら以外にも細心の注意を払った装置の製作で、定常的に15mKの冷却到達温度を得ているのは、高く評価できる成果である。

申請者は、以上の実用的なマイクロ波検出装置を製作した上で、幾つかの温度で10cm波マイクロ波（2.6, 3.6GHz）の検出を行った。このマイクロ波の検出の際に重要なのは、主量子数が100を越える高励起リドベルグ原子のフィールドイオン化を選択的に行うことであるが、申請者は、形状を独自に整えたパルス電場を用いて、電場中でのエネルギー準位の変化を制御し、トンネリング型のイオン化により下位と上位の2準位のイオン化電場が大きく異なる方法を用いて、この問題を解決した。申請者は、この装置系の性能を評価する一方法として、外部より導入した極めて微弱なマイクロ波を測定した。その結果、外部導入マイクロ波の周波数に対応した共振を確認し、空洞温度60mKでの測定から、雑音等価マイクロ波電力として10の -23 乗の桁の値を得ている。これは、従来の方法による測定と較べて6桁以上小さく、格段に優れたものである。申請者は、さらにこの検出感度を決定している要因を分析し、より低音でさらに検出感度を向上する方法を述べている。

以上の装置は、具体的にはダークマター候補素粒子アクシオンの検出に用いることを念頭において建設されたものである。建設された装置には、これらの関連装置系も導入されており、申請者は、アクシオン検出にこの装置を用いる場合に必要な機能や性能も議論しており、さらにアクシオン検出効率についても検討している。

以上のように、申請者はリドベルグ原子を用いたマイクロ波単一光子検出装置系を開発・建設し、実際に外部より導入した極微弱マイクロ波を検出して、従来にない格段の高感度を持つことを確かめている。これらの結果は、マイクロ波検出に、新しい、極めて優れた性能を持つ方法をもたらすものであり、申請論文は、博士（理学）の学位論文として価値のあるものと認める。

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。