

氏名	大饗 千彰
授与した学位	博士
専攻分野の名称	理学
学位授与番号	博甲第4951号
学位授与の日付	平成26年 3月25日
学位授与の要件	自然科学研究科 先端基礎科学専攻 (学位規則第5条第1項該当)
学位論文の題目	超放射過程を用いたバリウム原子準安定状態の生成
論文審査委員	准教授 植竹智 教授 野原実 教授 吉村浩司 准教授 吉見彰洋

学位論文内容の要旨

従来から研究されてきたコヒーラントな原子集団からの1光子放出過程である超放射では、その放射レートはコヒーラントな原子数の2乗に比例して増幅される。近年、コヒーラントな原子集団からの複数粒子が放出される過程超放射に比べて非常に大きな放射レートの増幅が期待されるマクロコヒーラント増幅機構が提唱された。2光子放出にマクロコヒーラント増幅機構を適用したPSRを発見することで増幅機構の検証及び究明が可能となる。本研究ではPSR発見に向けて以下に示す基礎開発研究を行った。

[1] 超放射によるPSR標的生成 本研究ではPSR標的として気体バリウム原子の準安定状態 $6s5d\ ^1D_2$ を選んだ。関連するバリウム原子準位は低エネルギー側から $6s^2\ ^1S_0$ 、 $6s5d\ ^1D_2$ 、 $6s6p\ ^1P_1$ (以下では 1S_0 、 1D_2 、 1P_1 と書く)の3準位で構成され、 $^1S_0-^1D_2$ 準位間の遷移に伴いPSRが放出される。PSR観測には高密度で長い標的を短時間で効率よく励起する必要がある。本研究ではポンプレーザーによる $^1S_0-^1P_1$ 準位間の遷移後に起こる、超放射による $^1P_1-^1D_2$ 準位間の脱励起を用いて標的生成した。その結果、観測された $^1P_1-^1D_2$ 準位間の遷移に伴う放射波形にピークパワーが標的密度の2乗に比例するなどの超放射の持つ特徴がみられ、超放射観測及び標的生成に成功した。標的生成時間及び効率は数ナノ秒及び30[%]程度で、標的密度及び長さは $2\times 10^{22}[\text{m}^{-3}]$ 及び15[cm]を達成した。また、超放射シミュレーションを行うことで観測結果を再現に成功した。この結果からPSRと類似の現象である超放射機構を究明できたとと言える。

[2] ストークスレーザーを照射した超放射観測 PSR観測にはPSRと同じ波長のレーザー(トリガーレーザー)の照射が不可欠である。本研究では超放射で同様の役割を持つストークスレーザー(超放射と同じ波長)を照射して超放射を観測し、ストークスレーザー動作機構を究明する。超放射初期の成長においてコヒーランスは自然放出によって成長し、それを種にして超放射が成長する。十分な強度のストークスレーザー照射はコヒーランス成長を促進し、自然放出によるコヒーランス成長を上回った場合、遅延時間(励起から超放射が起こるまでの時間)の短縮が予想される。遅延時間短縮の観測に成功し、短縮の起こるストークスレーザー強度の閾値が理論で予想される結果と一致した。また、ストークスレーザーによって複数の超放射モードの内、1モードが選ばれ、角分布の先鋭化が起こると予想される。照射した場合としない場合で放射角が1/27倍となる角分布先鋭化が観測され、さらにこの実験結果は理論予想と一致した。以上のようにストークスレーザーによるコヒーランス成長促進機構を究明できた。

[3] コヒーランスの測定と改善 PSR観測には原子集団に $^1S_0-^1D_2$ 準位間の大きなコヒーランスが存在することも必要である。コヒーラント反ストークスラマン散乱(CARS)という手法を用いてコヒーランスを測定した結果、超放射で生成されるコヒーランスは 5×10^5 と小さな値となった。3準位系の超放射シミュレーションプログラムを開発し、これを用いてコヒーランスの評価し、計算結果から原子ごとにポンプレーザーラビ振動数が変化していることがコヒーランスの小さな原因であることが明らかとなった。シミュレーションの結果から誘導ラマン散乱を用いて標的生成することで、コヒーランスが改善されることが示唆された。誘導ラマン散乱による標的生成によってコヒーランス0.01を達成し、超放射の200倍改善された。以上のようにPSR観測に必要な標的密度及び長さは達成することに成功したが、PSR観測にはコヒーランスをさらに大きくすることが必要である。

論文審査結果の要旨

大饗氏はマクロコヒーレント増幅機構の実験的実証へ向けた基礎開発研究を行った。マクロコヒーレント増幅機構とは、励起状態にある原子からの複数粒子放出レートを原子間のコヒーレンスを使って増幅し、稀にしか起こらないイベントの発生レートを観測可能なレベルまで増幅するものである。マクロコヒーレント増幅機構の応用として、原子から光子を伴ってニュートリノ対を生成する過程を起こし、ニュートリノの未確定なパラメータ（質量絶対値や質量タイプなど）を決定することが期待されており、マクロコヒーレント増幅を実験的に実証する意義は非常に大きい。しかしながらこれは最近理論的に提案された概念であり、実験的な実証は行われていない。そこで大饗氏はマクロコヒーレント増幅の発現による二光子対超放射 (Paired Super-Radiance, PSR) の観測を目指し、バリウム原子気体を用い以下の基礎開発研究を行った。

[1] 超放射による PSR 標的生成

PSR 始状態となる準安定 1D_2 状態にあるバリウム原子集団を高効率 (>30%), 短時間(数 ns) で生成することに成功した。 1D_2 状態の原子密度は $2 \times 10^{22} \text{ m}^{-3}$, 長さは 15 cm を達成した。また、シミュレーションにより観測結果の再現にも成功した。

[2] 波長 1.5 μm のストークスレーザー照射による超放射観測

PSR 観測には PSR を誘起するトリガーレーザー照射が不可欠である。超放射において同様の役割を果たすストークスレーザーを照射して超放射を観測し、これによるコヒーレンス成長促進機構を解明した。

[3] コヒーレンスの測定と誘導ラマン過程によるコヒーレンス改善

PSR 観測には始状態 1D_2 と終状態 1S_0 の間に大きなコヒーレンス(最大値 0.5)が存在することが重要である。このコヒーレンスをコヒーレント反ストークスラマン散乱(CARS)により測定した。その結果超放射により生成した 1D_2 原子集団のコヒーレンスは 5×10^{-5} と非常に小さな値であることがわかった。三準位系のシミュレーションプログラムを開発し、コヒーレンスが小さい原因を明らかにし、その結果を元に誘導ラマン散乱過程を使って 1D_2 原子集団を生成し、コヒーレンスを 0.01 まで高めることに成功した。

これらの結果は、マクロコヒーレント増幅機構の実証およびそのニュートリノ質量分光への応用へ寄与する成果を報告していると言える。よって博士(理学)の学位に値する内容であると判定する。