

科学研究費助成事業 (科学研究費補助金) 研究成果報告書

平成24年 6月 4日現在

機関番号 : 14301

研究種目 : 基盤研究 (B)

研究期間 : 2009 ~ 2011

課題番号 : 21340056

研究課題名 (和文) 暗黒共鳴超放射の発見と加速機構の検証

研究課題名 (英文) Discovery of dark-state superradiance and validation of acceleration mechanism

研究代表者

南條 創 (NANJO HAJIME)

京都大学・大学院理学研究科・助教

研究者番号 : 40419445

研究成果の概要 (和文) : 暗黒共鳴超放射という、新現象を提案した。超放射とは、多原子間のコヒーレンスにより、放射強度が原子数の自乗に比例するが、原子集団内のコヒーレンスは、放射とともに増大するので、超放射に達するまでに遅れ時間が存在する。一方、暗黒共鳴という原子の2準位間のコヒーレンスを保持した原子集団からの超放射では、遅れ時間なく超放射を起こすことが出来ると予想した。暗黒共鳴超放射の発見に向け、バリウム標的及びレーザーの準備を行った。岡山大学と共同で、2準位間のコヒーレンスを用いた超放射による遷移に成功し、暗黒共鳴超放射の糸口となった。

研究成果の概要 (英文) : I proposed a new phenomena, "Dark-State Superradiance", which was a superradiance from the dark state. The radiation strength from the superradiance is proportional to the square of the number of atoms with a delay time in developing the coherence between the group of atoms. On the other hand, the dark-state superradiance was expected to have no delay time due to the original coherence between the two states in the atoms. For the discovery of the dark-state superradiance, the barium target and lasers were prepared. A transition with superradiance to utilize the coherence of the two states was succeeded, which was the step to realize the dark-state superradiance.

交付決定額

(金額単位 : 円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	3,100,000	930,000	4,030,000
2010年度	7,800,000	2,340,000	10,140,000
2011年度	1,400,000	420,000	1,820,000
年度			
年度			
総計	12,300,000	3,690,000	15,990,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：素粒子（実験）

1. 研究開始当初の背景

(1) 原子ニュートリノによる質量分光

素粒子物理学に於いて、ニュートリノは未だ未解明の粒子である。非常に小さな質量をもつが、その値は不明である（ 2 eV 以下）。この質量探索は、原子核のベータ崩壊を用い行われてきた。この手法では、ベータ崩壊で解放されるエネルギーが、探索しようとしているニュートリノ質量の 1000 万倍以上の為、精度向上が難しい。このブレークスルーとして、原子の励起準位からの脱励起に伴い放出されるニュートリノ、原子ニュートリノを利用することを考案した。こちらの手法では、ニュートリノ質量に近いエネルギー準位差を利用することで、精度を向上出来る。また、近年急速に発展してきた原子物理のレーザー技術を用いることが出来、レーザーの波長掃引をすることで質量分光が可能になる。一方、準位差が小さくなると、遷移が起こりにくくなるため、プロセスの加速機構が必要であり、この確立が最大の焦点となっていた。

(2) 超放射とマクロコヒーランス増幅

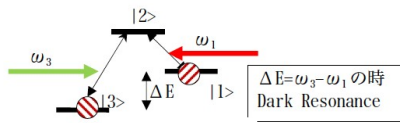
この加速機構に、超放射というプロセスを使用する。これは、原子 1 個についての、励起状態から基底状態の遷移速度が、 N 個の原子集団についてコヒーレンスがある場合、遷移速度が N 自乗倍速くなる現象である。通常の超放射の場合は、コヒーレントな原子集団は、放射の波長サイズに限られる。これに対して、励起状態からの 2 光子放出や、ニュートリノ対+光子放出などの、多粒子放出についての超放射の場合は、波長サイズの制約がなくなり、莫大な領域の原子集団に対しコヒーレンスを獲得可能になるという、

マクロコヒーランス増幅という理論が連携研究者の吉村氏により考案された。この原理検証が重要であった。我々のグループでも、超放射自体を実験で実現した。この次のステップとして、バリウム原子の準安定励起状態からの 2 光子放出過程で、超放射を実現し、マクロコヒーランス増幅機構の検証を行うことを目標としていた。

(3) 暗黒共鳴超放射

超放射の性質として、原子の励起状態の集団が、 1 電子ずつ脱励起をしていきながら、コヒーレンスが発展していく為、励起から超放射までの間に、遅れ時間が存在する。これは、超放射と競合する別のプロセスがある場合、遅れ時間の間に超放射を阻害することになりかねない。そこで、最初からコヒーレンスをもつ状態を準備出来れば、この遅れ時間のない超放射が実現出来るのではないかと考えた。それが、暗黒共鳴状態である。これは下図のような 3 準位系について、エネルギー差が $1-3$ 間のエネルギー差に対応する 2 本のレーザーを照射すると、準位 1 、 3 の線形結合状態を作ることが出来、準位 1 と 3 のコヒーレンスを作ることができる。準位 2 に電子がないので、ここからの蛍光が観測されず、dark state、dark resonanceなどと呼ばれる。この状態はすでに、準位間でのコヒーレンスを持ち、dark resonanceを原子集団に対して生成すると、遅れ時間のない超放射を起こせることを予測した。これは、過去報告例のない現象であり、学術的にも興味深いものであり、また、原子を用

いたニュートリノ質量分光に向けても、有用なツールになると考えられた。

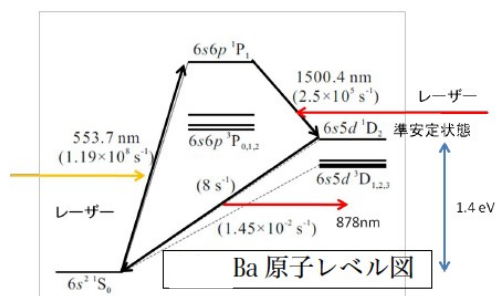


2. 研究の目的

暗黒共鳴超放射自体の発見と、そのメカニズムの理解が目的である。本現象は未発見の現象であり、新現象の発見を目指す。また原子準位間のコヒーレンスを持つ、原子集団という、コヒーレンスが2重にかかる現象である為、どちらのコヒーレンスがどの程度の割合で関与するのかの理解が重要である。

3. 研究の方法

下図に Ba 原子のレベル図を載せる。



S,P,D の3準位について、D準位は ~ 0.1 秒の長寿命であり、準安定である。この点から、Ba 原子を使うことを決めた。これを蒸気の状態で封入して実験を行う。まず、基底状態にある電子に対して、554nm と1500nm の両方のレーザーを照射する。この時、レーザーパワーを選ぶことで、短期間にコヒーレンスの高い暗黒共鳴状態を作成する。ここからの波長 878nm の蛍光を観測することで、暗黒共鳴の生成及び超放射を同定する。

4. 研究成果

(1) まず、バリウム標的の準備を行った。当初、ガラスセル中にバリウム蒸気を封入す

る方法を探ったが、ガラスが黒変するという状況になり、断念した。代わりにヒートパイプセルという、以下の方法を採用した。真空管中央部にバリウム固体を設置し、外部から加熱することで、蒸気を得る。この際、真空管端部では蒸気が冷却され、液体となったバリウムが真空管内壁に施された金属メッシュを通して、中央部に戻ってくる。真空管端部からはバッファガスを導入し、この圧力の平衡で、蒸気領域、蒸気圧をコントロールする。この準備を行い、動作を確認した。

(2) 次に、1500nm のレーザーを準備し、この評価を行った。

(3) さらに、554nm のレーザーについては、対応するレーザーが市販品が高額であり、自作を行った。1108nm のレーザーダイオードを用い、外部共振器つきレーザーを製作した。これと非線形光学結晶を用い、倍波を作り、554nm を作る計画であった。この点が、成功せず、この方向はまだ研究中である。

(4) 岡山大学にて、市販レーザーによる554nm 発振が出来ており、こちらと共同で実験を行った。こちらでは、554nm レーザーと1500nm レーザーを同時に用い、D準位の準安定状態までの超放射を用いた遷移に成功した。これも、2準位間のコヒーレンスを利用したプロセスであり、暗黒共鳴超放射実現へのステップとなっている。さらに、この準安定準位からの、2光子放出の兆候を得つつあり、最終目的のマクロコヒーレンス増幅についても、糸口をつかみつつある。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計0件)

〔学会発表〕（計4件）

①大饗千彰、笹尾登、南條創、他、バリウム原子準安定状態を用いた対超放射探索実験、日本物理学会第67回年次大会、2012年3月27日、関西学院大学西宮上ヶ原キャンパス

②大饗千彰、笹尾登、南條創、他、マクロコヒーランス増幅機構を用いたニュートリノ質量分光（XI） Ba 対超放射探索実験、日本物理学会2011年秋期大会、2011年9月18日、弘前大学文京町キャンパス

③大饗千彰、笹尾登、南條創、他、マクロコヒーランス増幅機構を用いたニュートリノ質量分光（IX） - 超放射を用いたバリウム準安定状態の生成実験 -、日本物理学会第65回年次大会、2010年3月23日、岡山大学津島キャンパス

④大饗千彰、笹尾登、南條創、他、マクロコヒーランス増幅機構を用いたニュートリノ質量分光（VII） - ラマン超放射を用いたバリウム準安定状態の生成 -、日本物理学会2009年秋期大会、2009年9月10日、甲南大学岡本キャンパス

〔図書〕（計0件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計0件）

○取得状況（計0件）

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

南條 創（NANJO HAJIME）

京都大学・大学院理学研究科・助教

研究者番号： 40419445

(2) 研究分担者

笹尾 登（SASAO NOBORU）

岡山大学・教育研究プログラム戦略本部
極限量子研究コア・教授

研究者番号： 10115850