

平成 21 年 6 月 2 日現在

研究種目：若手研究（A）
 研究期間：2006～2008
 課題番号：18684008
 研究課題名（和文）
 光圧縮原理の検証実験
 研究課題名（英文）
 Verification experiment for the principle of the photon irradiated compression
 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：

レーザーによる原子核過程のプロセス加速機構のアイデアを基に、レーザーを用いた原子過程のプロセス加速機構について、超放射現象に注目し、この観点で実際に超放射を実現した。これは原子過程を用いてニュートリノ物理解明を行う基礎となるものである。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	19,100,000	5,730,000	24,830,000
2007年度	3,900,000	1,170,000	5,070,000
2008年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	23,600,000	7,080,000	30,680,000

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：光圧縮原理、レーザー

1. 研究開始当初の背景

素粒子物理学においては、ニュートリノに質量があることが示されたが、依然として絶対値については測定されていず、重要な未解決の課題である。また、ニュートリノについては、粒子反粒子の区別のない、マヨラナ型と呼ばれる、他の粒子では見られないタイプである可能性が示唆されているが、全く検証されていない。これが明らかになると、宇宙進化についても大きな影響を及ぼす。

一方、近年レーザー技術や原子物理の目覚ましい進展があり、こういった技術を利用して素粒子物理へのアプローチを考える下地が出来てきていた。そのような中、吉村氏に

より以下で述べる光圧縮原理が提案された。光圧縮原理とは、レーザー光を用い、原子中の軌道電子を制御し、稀なプロセスを加速することが出来ることを示すものであり、あたかも原子核近傍の電子密度を増加させるような効果である。これを利用し、ニュートリノが関与する稀なプロセスを加速することで、前述の重要な問題にアプローチすることが考えられた。

この検証方法の一つに原子核の電子捕獲崩壊の利用がある。これについては、過去にいくつか電子捕獲崩壊の加速に関連する研究がおこなわれている。

(1) 1 つは内部制動放射電子捕獲過程と名づ

けられた、電子捕獲過程にガンマ線放射を伴う過程の理論的研究である。通常では運動学的に許されない電子捕獲過程を可能にする。この原理を利用した、ニュートリノ質量測定実験が行われ、225eV という上限値が得られている。

(2) 次に、光子誘導電子捕獲過程と名づけられた、軌道電子に数keVの光子を当てることで、反応に必要なエネルギーを補い、電子捕獲過程を誘導する理論的研究である。これは前出の内部制動放射電子捕獲過程の類似であるが、計算された反応断面積が非常に小さく、実験に応用されることは無かった。

(3) 周囲に存在する原子や、圧力などの環境が、電子捕獲過程の速度に与える影響について、主に⁷Beを用いて研究されている。最近の研究では、フラーレン(C₆₀)中で、通常より電子捕獲過程の速度が0.83%増加するという結果が得られている。この結果はC₆₀の中に入った⁷Beの電子状態が変化した為と解釈されている。

これら過去の研究について、(1)は実際に軌道電子と光子が絡む電子捕獲崩壊過程が、起こりうることを示し、(2)の光子誘導電子捕獲崩壊のヒントになっている点で意義深い。(2)はより積極的に電子捕獲過程の制御を目指したものであるが、1光子過程のみに注目しており、小さな生成断面積にしか達していない。本研究では、レーザーを用いることで、コヒーレントな複数光子状態を作り出すことにより、非常に大きな電子捕獲崩壊の増加が期待され、実際に実験で検証できる点が、大きな特徴である。(3)では電子状態の変化により、実際に電子捕獲崩壊過程の速度が変化することが示唆されているが、このような手法では今のところ1%を超える変化は観測されていない。本研究では、レーザーを用い、より直接的に電子状態を変化させることで、電子捕獲崩壊過程の大きな増加が期待でき、これら過去の研究と比較し、飛躍的な進展をもたらすと考えられた。

2. 研究の目的

本研究の目的は光圧縮原理の実験的検証であった。この稀プロセス加速機構の原理検証は、これを利用したニュートリノ物理探索の鍵となるものである。

この研究の契機となったのは、レーザー光を用いた原子核過程のプロセス加速機構である。これを発展させた、レーザーを用いた原子過程に対するプロセス加速機構の検証についても本研究の重要なターゲットである。

3. 研究の方法

本研究の途上で、レーザー光を用いた原子

過程に対するプロセス加速機構が大きく注目されるようになった。これは軌道電子の原子レベル間遷移に伴うニュートリノ放出を利用できると、ニュートリノ物理の課題解明に繋がることから、私も含めたグループの中で発見されたからである。さらにレーザーに限らず、マイクロ波の利用についても検討を行った。この流れを踏まえ、以下のステップにより研究を進めた。

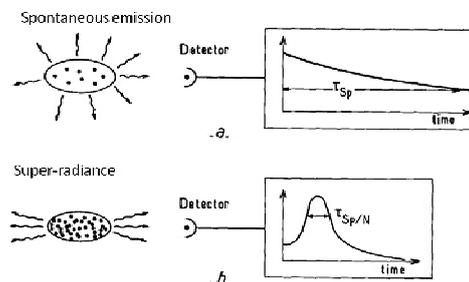
(1) 原子核の電子捕獲崩壊加速

(2) 原子過程の加速

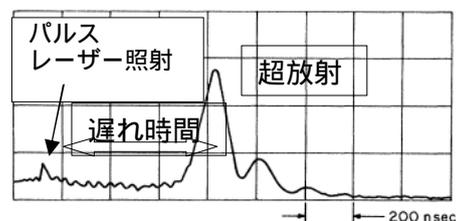
電子捕獲崩壊ターゲット作成の準備や、マイクロ波利用についての検討及び実験など広範に渡るが、本研究の成果と関連する(2)について説明する。

(1)を進めている中で、原子過程のプロセス加速が重要であることがわかった。そこで、超放射という現象に着目した。

まず、超放射について説明する。励起された原子集団からの放射を考える。通常、励起原子数 N に比例する放射レートで、指数関数時間依存性で、自発崩壊をする。ところが、原

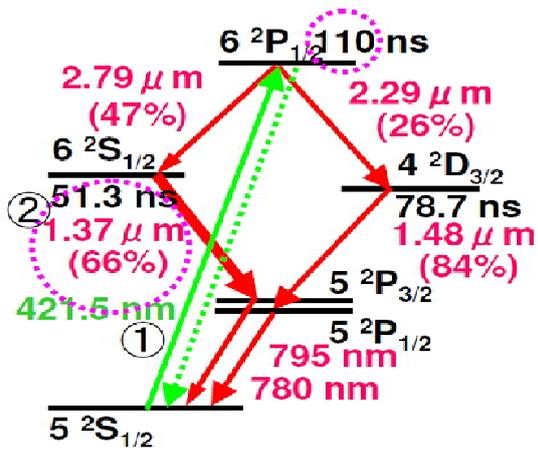


子数密度が大きい場合、 N^2 に比例するレートで崩壊する、超放射と呼ばれる現象が起こることが知られている(下図)。この原因は、放射された光子について、その波長程度のサイズに存在する原子、いずれからの放射か区別できないことにある。このコヒーレンスは、自発崩壊をしていく中で増大していくため、超放射状態になるまでの遅れ時間が存在す



る。このため、下図のように、原子励起を行うパルスレーザー照射から遅れて、超放射パルスが出現する。このことも超放射現象の特徴である。

これについて、Rb ガスセルを用いて、実際に超放射を起こし、この研究を行った。次にBa ガスセルに対し、原子レベル間の2光子放出を伴う遷移に対し、超放射状態を実現する研究を行った。

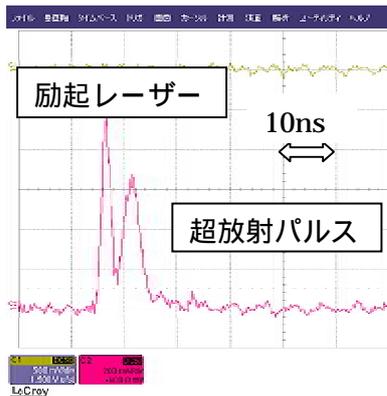


4. 研究成果

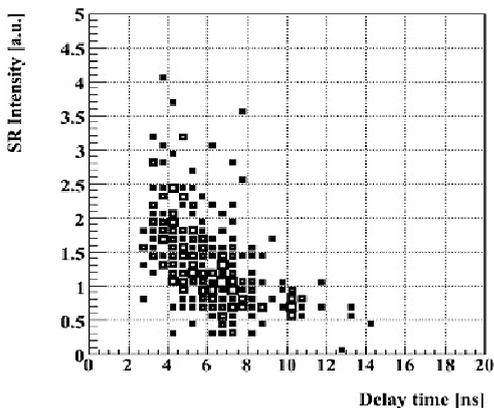
(1) 超放射現象による加速の確認

Rb ガスセルを用い、パルスレーザーにより、実際に超放射を起こし、この性質を研究した。これに利用した Rb の原子レベルは以下のようになっている。まず、421.5nm のパルスレーザーを用い、2S から 2P へ励起する (図中)。この後、図にあるように 2 つの経路を辿り、3 段階で基底状態まで脱励起する。この図の 1.37 μm の波長の脱励起光を観測し、超放射現象の観測を行った。

この観測の 1 例が下図になる。図のように励起レーザーから遅れて、超放射パルスが観測されている。この超放射パルスの遅れ時間



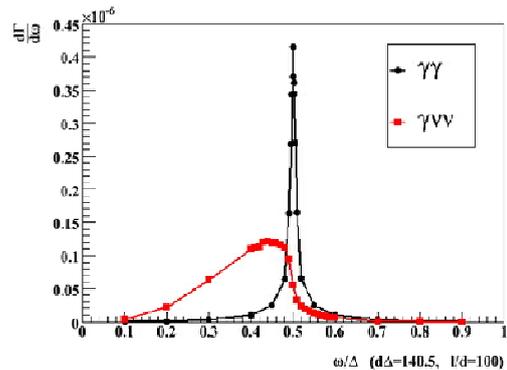
と、超放射パルスの強度の相関をとると、下図のようになる。



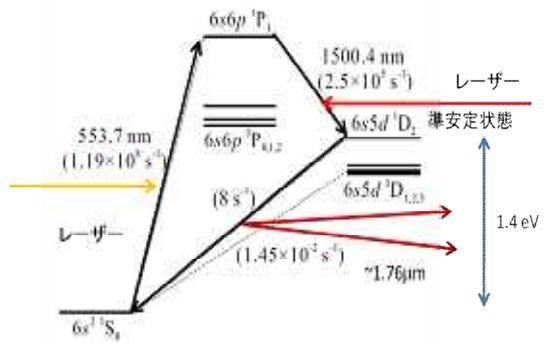
この相関は、理論から予想される超放射の特徴をよく反映している。また、超放射の光が、レーザー軸方向に極在していることも測定し、以上のことから、確実に超放射現象をとらえていると結論付けた。これはレーザーにより、励起電子集団に対するコヒーレンスを通して、軌道電子遷移を加速したことになり、ひとつの加速機構の実現である。

(2) 2 光子超放射の検討

原子レベル間遷移には、2 光子放出を伴う遷移も存在する。このプロセスについても、超放射過程が存在すると考えられる。この性質について計算を行った。この結果、レベル間のエネルギーの半分を持つ 2 光子が放出され



やすいことがわかった (下図黒線)。また方向は、正反対の方向に放出される確率が高いという結果となった。この検証のために、下図のような、Ba の原子レベルを用いることが出来ることを示した。554nm のレーザーを用い、S-P 遷移を引き起こす。さらに 1500nm レーザーを用い、P-D 遷移を誘導する。この D 準位から基底状態への、1 光子遷移は強く禁止されている。また 2 光子遷移の確率も比較的高いため、Ba を用いて 2 光子超放射の実現を目指し、準備を進めている。



(3) まとめ

これまで、ニュートリノに関わる稀な反応を、これまで述べたような手法で、プロセス加速し、重大な物理課題にアプローチするという

ことは提案されることはなかった。本研究の進展のなかで、この手法が創出された。また、そういった観点から、超放射現象を見直し、実際に実験を行った。これは今後の進展の基礎となる重要な成果であった。

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)

[学会発表](計 1件)

南條創、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(II)-気体セルを用いた超放射基礎研究、日本物理学会、2008年9月23日、山形大学

[その他]

ホームページ等

<http://www-he.scphys.kyoto-u.ac.jp/members/nanjo/pukiwiki/>

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