

平成 21 年 4 月 6 日現在

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2006-2008

課題番号：18540394

研究課題名（和文） ナトリウム原子による相関光子対の発生

研究課題名（英文） Generation of correlated photon pairs by sodium atoms

研究代表者

光永 正治 (MITSUNAGA MASA HARU)

熊本大学・大学院自然科学研究科・教授

研究者番号：90332882

研究成果の概要：ラムダ型 3 準位系を持つシステムであるナトリウム蒸気に、電磁誘導透過条件を満たすような強いカプリング光と弱い信号光（プローブ光）を入射することで、第 3 のアイドラー光（ストークス光）を発生させ、信号とアイドラーの相互結合に起因する、パラメトリックな増幅過程、強度相関、パルス伝搬の挙動等を理論的実験的に解析した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	1,800,000	0	1,800,000
2007 年度	700,000	210,000	910,000
2008 年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	420,000	3,620,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学、原子・分子・量子エレクトロニクス・プラズマ

キーワード：非線形光学、相関光子、電磁誘導透過、4 光波混合、低速パルス伝搬

1. 研究開始当初の背景

量子情報分野における非古典光の発生、特に、相関光子対の発生は、スクイズド光発生、もつれ状態の発生、量子暗号、量子テレポーテーション等の幅広い応用に直結する、極めて重要な要素であることは論を待たない。従来、相関光子対発生的手法としては、非線形固体結晶 (LiNbO₃, KTP、等) によるパラメトリック下方変換がもっぱら使われて来た。また、最近になって半導体結晶 (CuCl) を用いたもつれ光子対の生成が枝松らによって報告されている。(K. Edamatsu et al., Nature **431**, 167 (2004)) こういった光子対発生の研究の隆盛と並行して、最近、原子を用いた量子メモリーの研究が、ここ数年学界をにぎわすようになってきた。(M. D. Lukin et al., Phys.

Rev. Lett. **82**, 1847 (1999) ; C. H. van der Wal et al., Science **301**, 196 (2003)) これは、Rb, Na等のアルカリ金属のラムダ型 3 準位系の媒質をメモリー材料として用いるものである。基底状態の超微細分裂 2 準位は極めて寿命が長く、コヒーレンスの持続時間も長いため、EIT (電磁誘導透過) 等の技術を用いて、非古典情報を、光を用いて原子のサブレベルコヒーレンス上に書き込み、さらに読み出すことができる。このようなメモリー機能を持つデバイスが存在して初めて、量子情報分野は、計算 (量子計算)、通信 (量子暗号)、記録 (量子メモリー) が三者鼎立する完全な形となる。また、これにより、長距離にわたってもつれ状態を共有することのできる、DLCZ プロトコル (Duan et al., Nature **414**,

413 (2001)) 等も提案されている。このような背景の中、アルカリ蒸気を用いたパラメトリック機構の解明、増幅と発振のメカニズム、相関光子対の発生と制御、パルス伝搬の挙動等を詳細に解明することが緊急の重要課題となってきた。

2. 研究の目的

この研究は、ナトリウム蒸気に強い一方向あるいは対向ポンピング光を入射することで、それより超微細分裂周波数分だけ周波数がプラスとマイナスにシフトした1組の光子対(信号光とアイドラー光)を効率よく発生させ、その出力強度、相対強度相関、外部鏡を用いた発振の振る舞い、あるいはパルス伝搬の様子等を理論的実験的に解析するものである。具体的な興味ある目標としては、1. 対向ポンピングと1方向ポンピングの場合のパラメトリック発生の挙動の違い、2. パラメトリック増幅過程、あるいは相関光子対発生における線形吸収の影響、3. 1光子共鳴の場合と1光子非共鳴の場合の振る舞いの違い、4. 実験の細かなパラメーター、例えば、カプリング光の波長をどこに設定するか、バッファガスありのセルか無しのセルか、コリニアの配置か、ノンコリニアか、ノンコリニアとして角度を何度にとるか、2つの入射光の偏光を、同一円偏光、直交円偏光、同一直線偏光、直交直線偏光のいずれにするか、等で信号の振る舞いがどう変化するかを詳細に解析する。5. 理論的解析、及びナトリウムのパラメーターを代入した数値解析を同時並行して行う。等が挙げられる。

3. 研究の方法

我々の研究室では、すでに、2台の固体レーザー励起波長可変リング色素レーザーが稼働しており、しかも、ナトリウムD線のある589nm付近で高出力で作動している。また、2光子共鳴条件を満たす2周波数の光を準備するための音響光学変調器もそろっている。このような実験装置にさらに種々の光学部品、光ファイバー、磁気シールド、温度コントローラー等をそろえることにより、ナトリウム原子を用いたパラメトリック増幅、発振、パルス伝搬、強度相関の測定等は比較的容易に実現できるものである。

4. 研究成果

2006年度の成果

ナトリウム原子蒸気を含むガラスセルに、対向する方向から強い共鳴励起レーザー光を入射した場合に生じるパラメトリック蛍光、及びパラメトリック発振に関して、理論的実験的に解析した。このような蛍光は、off-axis 方向に出射され、Stokes-shift あるいは、anti-Stokes-shift しており、対角

線方向に出る4つの出射光は、電磁誘導回折により、強く結合している。そのため、エネルギー保存則、運動量保存則を満たす。すなわち、4つの出射光は、従来のパラメトリック理論、実験における信号光とアイドラー光の役目を果たし、一つの自然放出光から、同時に立ち上がっていることが推定され、我々はこれを4光波パラメトリック増幅(発振)と名づけた。ただし、系の軸対称性のため、パラメトリックゲインは軸対称に分配されるため、このままでは、発振に至らない。発振のためには、外部からシード光を入れるか、あるいは、励起光のビームプロファイルを楕円形にして軸対称性を崩すか、であるが、いずれの場合も発振が観測され、4光波は同じ閾値を持ち、しかも30%程度の高い効率で励起光から信号光に変換される。また、パラメトリック蛍光の段階においても、4光波のカオティックな時間波形は、強い相関を持っており、相関関数は、幅0.8マイクロ秒程度の相関時間で鋭いピークを持つ。この4光波が果たして量子力学的な相関を持っているのか、あるいは、例えば「4つ子の光子対」とも呼ぶ、光子レベルでの相関があるのか、そして、それが実現できたとして、それを用いた4光子Bell状態の実現は可能であるのか、等が今後の課題である。

2007年度の成果

前年度に引き続き、ナトリウム原子蒸気を用いたパラメトリック発振と増幅の問題を解析した。前年度は対向ポンピングによる4光波のパラメトリック発振を、シード光を入れた場合と、楕円ビームを用いた場合の2種類の方法により実現させたが、今年度は、一方向入射によるパラメトリック増幅の問題を取り上げた。この配置は、従来の電磁誘導透過の系であり、プローブ光は透明化はするものの、増幅には至らないという結論になっていた。しかし我々は実験のパラメーターを操作することにより、特に、原子密度を高くし、高いカプリング光強度を用いることで、プローブ光は大きく増幅され、また、それにつれてストークス光も同様のパワーで発生することが確かめられた。最大で30倍近いゲインが得られ、しかも線形吸収の極めて大きい周波数領域でも大きなゲインは観測される。これらの結果は、従来の電磁誘導透過が2モードしか考えていなかったのに対し、ストークス光も含めた3モードのリウビル方程式を解き、カプリング光は十分強く、定数であると仮定して、プローブ光とストークス光による結合伝搬方程式を解析することで理解することができた。また、カプリング光の周波数に関しては、吸収曲線の中心では、2つの非線形素過程が干渉を起し、ゼロになってしまうため、カプリング光は中心より、サブレベル周波数分だけブルーあるいはレッドシフトした

場合にパラメトリック増幅率が最大になることが判明し、実験的にも確かめられた。これらの結果をまとめて、Phys. Rev. Aに発表した。今後は、ストークス光に外部共振器をつけることで、パラメトリック発振を実現させる予定である。

2008年度の成果

ラムダ型3準位系を持つ原子においては、2光子共鳴条件を満たす2つの入射電磁波（強いカプリング光と弱いプローブ光）が存在すると、プローブ光の透明化が引き起こされ、それを電磁誘導透過（Electromagnetically Induced Transparency: EIT）と呼ぶ。我々は、媒質は透明になるのみならず、入射プローブ光を増幅するパラメトリック増幅（Parametric Amplification: PA）作用があることを理論的実験的に示してきた。このようなPAの状況においては、信号光（プローブ光）とアイドラー光（ストークス光）は、強度相関を持った相関光子対としてともに成長していく。今年度は、このようなPAの系に外部共振器をセットすることにより、予想通りパラメトリック発振が引き起こされることを実験的に観測し、Optics Lettersに発表した。（Opt. Lett. **34**, 698 (2009)）トータルの変換効率は39%と極めて大きく、外部共振器長をピエゾ素子で制御することにより、安定した発振を達成することができた。さらに、信号光とアイドラー光がパルスとしていかに伝搬するかを調べるため、信号光を gaussian パルスとアイドラーパルスのパルス伝搬の様子を調べた。電磁誘導透過に見られる鋭い透明窓のため、両パルスは光速度の1/500程度の超低速パルス伝搬をすることが観測され、両パルスは、お互い離れることができない matched pulses として伝搬していくことが観測された。このような増幅を伴う超低速伝搬の観測を Optics Letters に投稿し、また、Slow Light 2009 国際会議に投稿中である。

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5件）

1. J. Okuma, N. Hayashi, A. Fujisawa, M. Mitsunaga, and K. Harada, “Parametric oscillation in sodium vapor by using an external cavity”, Opt. Lett. **34**, 698-700 (2009). 査読有。
2. K. Harada, K. Mori, J. Okuma, N. Hayashi,

and M. Mitsunaga, “Parametric amplification in an electromagnetically-induced-transparency medium”, Phys. Rev. **A78**, 013809-1-6 (2008). 査読有。

3. K. Harada, H. Hayashi, K. Mori, and M. Mitsunaga, “Four-wave parametric oscillation: theory and observations”, J. Opt. Soc. Am. **B25**, 40-47 (2008). 査読有。

4. K. Harada, M. Ogata, and M. Mitsunaga, “Four-wave parametric oscillation in sodium vapor by electromagnetically induced diffraction”, Opt. Lett. **32**, 1111-1113 (2007). 査読有。

5. K. Harada, T. Kanbashi, M. Mitsunaga, and K. Motomura, “Competition between electromagnetically induced transparency and stimulated Raman scattering”, Phys. Rev. **A73**, 013807-1-6 (2006). 査読有。

〔学会発表〕（計16件）

1. 林暢仁、奥間惇治、竹下洋祐、枝元忠義、藤沢晃彦、光永正治、「パラメトリック増幅媒質における超低速パルス伝搬」28aSD-2 (2009年春物理学会) 2009年3月28日、立教大
2. N. Hayashi, J. Okuma, T. Edamoto, Y. Takeshita, A. Fujisawa, and M. Mitsunaga, “Parametric oscillation in sodium atoms with an external cavity”, International Symposium on Physics of Quantum Technology at Nara, TH-F8 (2008). 2008年11月26日、奈良
3. 徳永英司、岩井滋人、田中正規、光永正治、小林孝嘉、「希土類イオン禁制遷移の非線形吸収分光 III」21pYH-7 (2008年秋物理学会) 2008年9月21日、岩手大
4. 奥間惇治、林暢仁、枝元忠義、竹下洋祐、

藤沢晃彦、光永正治、「外部共振器を用いたナトリウム原子のパラメトリック発振」22aZA-8 (2008 年秋物理学会) 2008 年 9 月 22 日、岩手大

5. J. Okuma, K. Harada, K. Mori, N. Hayashi, and M. Mitsunaga, “Parametric amplification in electromagnetically induced transparency”, Conference on Lasers and Electro-optics, Quantum Electronics and Laser Science Conference (CLEO /QELS), JWA128 . 2008 年 5 月 7 日、San Jose, USA.

6. 奥間惇治、森研二、林暢仁、吉田啓之、枝元忠義、竹下洋祐、原田健一、光永正治、「EIT 媒質におけるパラメトリック増幅 II. 実験と観測」23pQD-2 (2008 年春物理学会) 2008 年 3 月 23 日、近畿大

7. 光永正治、森研二、林暢仁、吉田啓之、奥間惇治、竹下洋祐、枝元忠義、原田健一、「EIT 媒質におけるパラメトリック増幅 I. 理論的考察」23pQD-1 (2008 年春物理学会) 2008 年 3 月 23 日、近畿大

8. 吉田啓之、原田健一、林暢仁、森研二、野村博、石原直樹、光永正治、「ゼーマン EIT と超微細 EIT の比較」22pRH-7 (2007 年秋物理学会) 2007 年 9 月 22 日、北海道大

9. N. Hayashi, K. Harada, M. Ogata, K. Mori, H. Yoshida, and M. Mitsunaga, “Four-wave parametric oscillation in Na vapor”, Conference on Lasers and Electro-optics (CLEO/Pacific Rim), WP-087. 2007 年 8 月 29 日、Seoul, Korea.

10. 原田健一、緒方稔、林暢仁、森研二、吉田啓之、光永正治、「楕円ビームによる 4 光波パラメトリック発振」21pXK-1 (2007 年春理学会) 2007 年 3 月 21 日、鹿児島大

11. 岩井滋人、徳永英司、田中正規、光永正治、小林孝嘉、「希土類イオン禁制遷移の非

線形吸収分光」20pZC-13 (2007 年春物理学会) 2007 年 3 月 20 日、鹿児島大

12. 森研二、本村幸治、原田健一、緒方稔、吉田啓之、林暢仁、光永正治、「電磁誘導回折による 4 光波パラメトリック増幅 II: 実験と観測」26aRB-6 (2006 年秋物理学会) 2006 年 9 月 26 日、千葉大

13. 光永正治、本村幸治、原田健一、緒方稔、林暢仁、吉田啓之、森研二「電磁誘導回折による 4 光波パラメトリック増幅 I : 理論的考察」26aRB-5 (2006 年秋物理学会) 2006 年 9 月 26 日、千葉大

14. 岩井滋人、徳永英司、田中正規、光永正治、小林孝嘉、「希土類イオン Eu^{3+} ドープ結晶の非線形吸収分光」25aPS-48 (2006 年秋物理学会) 2006 年 9 月 25 日、千葉大

15. M. Mitsunaga, N. Hayashi, H. Yoshida, K. Harada, and K. Motomura, “Theory of four-field parametric amplification”, International Conference on Atomic Physics (ICAP), C.115. 2006 年 7 月 19 日、Innsbruck, Austria.

16. K. Harada, K. Motomura, M. Ogata, K. Mori, and M. Mitsunaga, “Observation of correlated emissions by electromagnetically induced diffraction”, International Conference on Atomic Physics (ICAP), C.99. 2006 年 7 月 19 日、Innsbruck, Austria.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

光永 正治 (MITSUNAGA MASAHARU)
熊本大学・大学院自然科学研究科・教授
研究者番号 : 90332882

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者