

論文の内容の要旨

論文題目

Coherent Manipulation of Light and Matter Waves
with Superradiant Raman Scattering

(超放射ラマン散乱を用いた光と物質波のコヒーレント制御)

氏名

吉川 豊

本研究では、レーザー冷却及びトラップ技術により冷却された極低温原子気体を用いて、レーザー光の非共鳴ラマン散乱過程における超放射 (Superradiant Raman scattering: SRAMS) に関する実験的研究を行った。また、この現象を原子波及び光のコヒーレント制御に応用した。

超放射とは、R. H. Dickeが1954年に提唱した多粒子系における集団的な緩和現象の総称で、現在まで主に原子分子系からの自然放出過程において実験が進められてきた。本研究の主題であるSRAMSは、この従来までの超放射と異なり、励起光 (Pump光) を照射している間しか系が時間発展しない。そのため、この制御性を用いることで、原子集団のコヒーレンス時間測定やコヒーレンス-光間の任意変換など、様々な応用が可能となる。

図1は気体原子ボース凝縮体 (BEC) を用いたSRAMSの実験概要図である。図1(a)-(b)にあるように、初期状態 $|1\rangle \equiv |5S_{1/2}; F=2, m_F=2\rangle$ にいる葉巻状の形をした ^{87}Rb のBECは π 偏光のPump光によって状態 $|3\rangle \equiv |5P_{1/2}; F=2, m_F=2\rangle$ へ (非共鳴的に) 励起され、状態 $|2\rangle \equiv |5S_{1/2}; F=1, m_F=1\rangle$ へラマン散乱を起こす。このとき、ある閾値以上のPump光強度ではSRAMSが誘起され、ラマン散乱光がBECの長軸方向にのみ強く放出される (この放射モードはend-fire mode: EFMと呼ばれる)。その結果、図1(b)のように光を散乱した原子はPump光に対して斜め45度方向に反跳運動量を受け取り、図1(c)-(d)に示したような原子集団の吸収イメージ上で離散的なピークとして観測される。SRAMSでは一度光を散乱した原子は状態 $|2\rangle$ に遷移してPump光

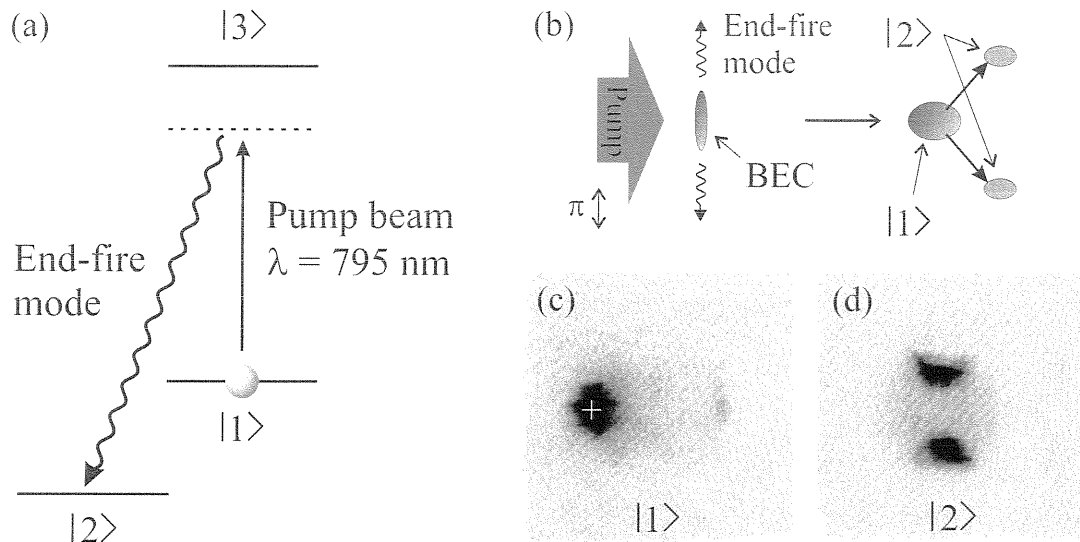


図 1: (a) ^{87}Rb 原子のエネルギー準位図, (b) 気体原子ボース凝縮体 (BEC) における超放射ラマン散乱の概略図, 及び, (c)-(d) 超放射ラマン散乱後の状態 |1> 及び |2> の原子集団の吸収イメージ (原子集団の運動量分布を表す).

との相互作用が切り離されるため, それ以降は Pump 光を散乱することがない. このため, SRAMS は多重散乱などの問題がある従来の超放射と比べて非常にクリーンな系となっている.

物理的な SRAMS の起源は EFM への光散乱に関する原子の不可別性である. すなわち, どの原子が光を散乱したのか「原理的に」区別できないことから, 媒質中の個々の原子間に長距離コヒーレンスが生じ EFM への光散乱が増強される. そのため, SRAMS はサンプルが BEC でなくとも起こりえる. 非凝縮原子の温度を T とすると一般に Pump 光の閾値強度は \sqrt{T} に比例する. これは状態 |1> - |2> 間のデコヒーレンスレートが原子集団の最確速度 $v_0 \propto \sqrt{T}$ で決まり, これに打ち勝つために必要な Pump 光強度が変わるためである. 図 2 に SRAMS によるポンプ-プローブ分光法によって測定された原子集団のコヒーレンス時間 (デコヒーレンスレートの逆数) の温度依存性を示す. 黒丸で示したデータが非凝縮成分に対する測定値で, 理論通り温度の下降に伴ってコヒーレンス時間が徐々に長くなっていく様子が分かる. 一方で白丸で示したデータが BEC 成分に対する測定値で, 相転移温度 T_c 以下では非凝縮成分のそれよりもはるかに長寿命な集団コヒーレンスが BEC 中に生成・保存されていることを示している. これは BEC が SRAMS の本質ではないものの, Pump 光の閾値強度が劇的に下がるということを意味している.

BEC が持つ長いコヒーレンス時間は, 量子情報処理の分野で重要となる光-原子コヒーレンス間の量子媒体変換を行う上で非常に有利である. 本研究で

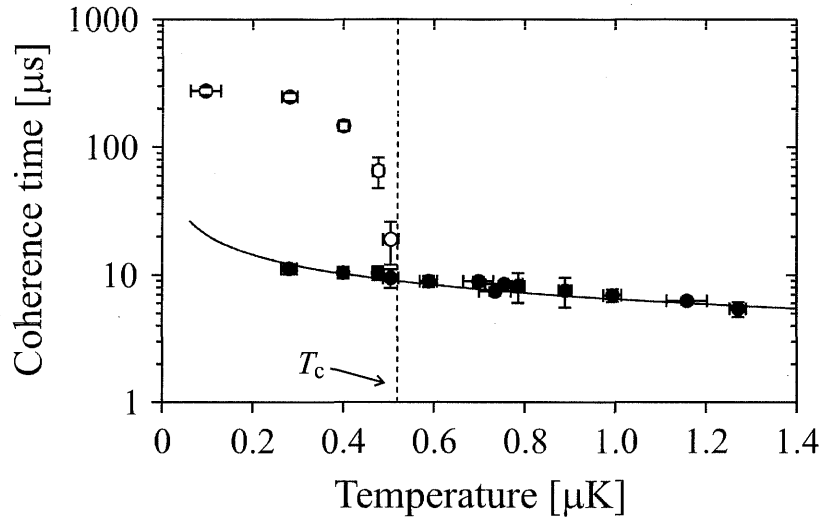


図 2: コヒーレンス時間の原子温度依存性. 黒丸は非凝縮成分, 白丸は BEC 成分に対する測定値を表す. 実線は原子集団の最確速度で決まるコヒーレンス時間の理論曲線. 点線はボース凝縮の転移温度 T_c を表す.

はこの応用の一例として, 双方向性 SRAMS を用いた集団コヒーレンスの多モード保存・読み出しの原理検証実験を行った. 図 3(a)-(b) に実験の概要図を示す. まず先程と同様に, 状態 $|1\rangle$ にいる BEC に Write 光と呼ばれる非共鳴光を照射し, 状態 $|2\rangle$ への anti-Stokes SRAMS を誘起する. このとき EFM へのラマン散乱光を光電子増倍管で検出すると指数関数的に立ち上がる超放射特有のパルス波形が観測できる [図 3(c)-(e)]. この超放射の途中で Write 光を切ると, 状態 $|1\rangle - |2\rangle$ 間に反跳運動量の波数ベクトルを持つ集団コヒーレンスが生成・保存される. 次に, Write 光と対向する別の非共鳴光 (Read 光) を照射すると, 内部状態を $|2\rangle \rightarrow |4\rangle \equiv |5P_{1/2}; F = 1, m_F = 1\rangle \rightarrow |1\rangle$ と経由する Stokes SRAMS により, この集団コヒーレンスが位相共役光に変換される [図 3(c)]. 一方, 図 3(d) のように Read 光と Write 光が非対向の場合には, Stokes SRAMS の位相整合条件が満たされないため変換が起こらない. そのため, 対向した Write 光と Read 光のペアを複数用いることで, 一つの BEC 中に複数の異なるモードの (異なる波数ベクトルを持つ) 集団コヒーレンスを生成し, 且つ, それらを独立に光に変換することが可能になる [図 3(e)].

本研究では Write 光による散乱光子数は 10^4 程度と古典的な領域で実験を行っていた. しかし, Write 光の強度を SRAMS の閾値以下まで下げることで容易に散乱光子数を一光子レベルにまで下げることができる. これによって単一光子の多重生成や保存した量子状態の演算など量子情報処理分野における様々な応用が可能となる.

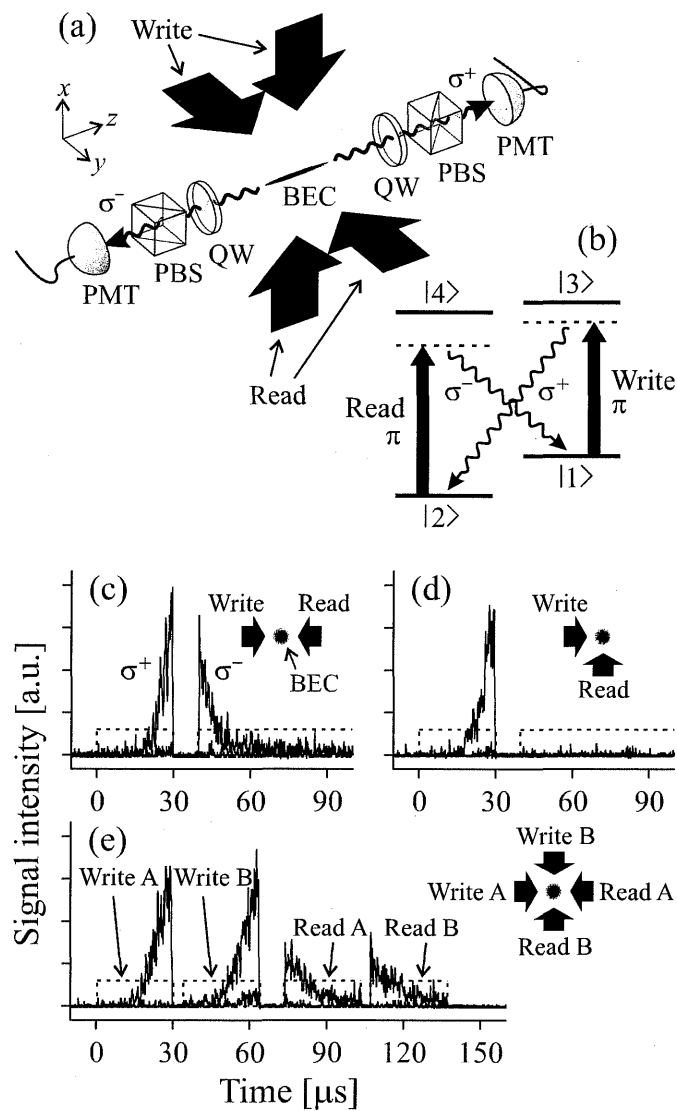


図 3: (a) 集団コヒーレンスの多重保存に用いる実験配置. PBS, QW, PMT はそれぞれ偏光ビームスプリッタ, 1/4 波長板, 光電子増倍管を表す. (b) 実験に使用するエネルギー準位. (c)-(e) 光電子増倍管で検出されたラマン散乱光の時間波形. 点線は Write 光及び Read 光の照射タイミングを表す.