

中空ファイバー導波路内における超放射現象の挙動を解明

—超小型・超放射レーザー実現の基盤技術を確立—

1. 発表者： 香取 秀俊（東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻 教授
／理化学研究所 光量子工学研究センター 時空間エンジニアリン
グ研究チーム チームリーダー
理化学研究所 開拓研究本部 香取量子計測研究室 主任研究員）
岡場 翔一（東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻 特任研究員）

2. 発表のポイント：

- ◆中空ファイバー導波路内に導入した原子集団の超放射を観測し、その理論的な解析と組み合わせることで、導波路内の超放射の挙動を明らかにしました。
- ◆魔法波長・光格子の手法を適用し、原子の運動や閉じ込めに起因するスペクトルの変化を抑制することで、極めて理想的な条件下で導波路中での超放射を観測しました。
- ◆これらは、非常に狭いスペクトルをもつ「超放射レーザー」の実現の重要な基盤技術です。この光源は、光格子時計の小型化への途を拓き、相対論的測地などへの応用が期待されます。

3. 発表概要：

超放射(注 1)は、原子集団内の原子が自発的に位相を揃えて光を放射する現象で、1954年のDickeの研究以来、量子光学や量子情報などの分野で活発に研究されています。特に導波路(注 2)中においては、その光軸方向に長い形状を利用して、多数の原子を準備することが容易になるため、より効率良く超放射光を観測できるようになります。東京大学工学系研究科の岡場特任研究員、香取教授らからなる国際共同研究グループは、中空ファイバー(注 3)導波路を用いて超放射の実験的、理論的な研究を行いました。

実験では、この中空ファイバーの中に、特別な波長でつくる光格子(注 4)に極低温ストロンチウム原子集団を導入することで、ドップラー効果の影響を受けない原子集団を用意し、超放射の観測に理想的な状態を実現しています。このような実験系で得られた結果と理論解析を組み合わせ、導波路中の超放射の挙動を明らかにしました。また、超放射の周波数は、励起レーザーの周波数に依存しないことを観測しました。

ここで用いられた手法や研究結果は、非常に狭いスペクトルをもつ「超放射レーザー(注 5)」の実現の重要な基盤技術です。この超放射を光源として用いる超放射レーザーは、光格子時計の小型化への途を拓き、相対論測地(注 6)などへの利用も期待されます。

※国際共同研究グループ

東京大学大学院 工学系研究科 物理工学専攻

教授 香取 秀俊 (かとり ひでとし)

(理化学研究所 光量子工学研究センター 時空間エンジニアリング研究チーム

チームリーダー

理化学研究所 開拓研究本部 香取量子計測研究室 主任研究員)

特任研究員 岡場 翔一 (おかば しょういち)

元特任研究員 デシュイ・ユウ (Deshui Yu)

モデナ・レッジョ・エミリア大学

教授 ルカ・ヴィンチェッティ (Luca Vincetti)
フランス国立科学研究センター
教授 フェター・ベナビッド (Fetah Benabid)
(西オーストラリア大学 教授)

※研究支援

本研究は、科学技術振興機構 (JST) 戦略的創造研究推進事業 ERATO「香取創造時空間 (研究総括: 香取秀俊)」、日本学術振興会 (JSPS) 科学研究費補助金特別推進研究「超高精度光格子時計による新たな工学・基礎物理学的応用の開拓 (研究代表者: 香取秀俊)」、文部科学省光・量子科学研究拠点形成に向けた基盤技術開発「最先端の光の創成を目指したネットワーク研究拠点プログラム」拠点名「先端光量子科学アライアンス」(拠点責任者: 五神真 (東京大学 総長))、フランス国立研究機構による支援を受けて行われました。

4. 発表内容:

(1) 研究の背景

超放射(注 1)は、原子集団内の原子が自発的に位相を揃えて光を放射する現象で、1954 年の Dicke の研究以来、量子光学や量子情報などの分野での重要性から活発に研究されています。その放射光のピーク強度が原子数の 2 乗に比例し、原子集団の空間分布の長手方向に集中的に光が放射される、また、原子集団自身がその放射光の周波数を決めているという特徴から、安定した周波数の光を十分な強度の光で放射できる超放射レーザー(注 5)への応用が期待されています。また、量子情報分野においては、量子メモリー、単一光子源の実現など様々な分野で用いられており、その性質を解き明かすことは量子物理の分野において重要な意味を持っています。

また、超放射においては、協力パラメータと呼ばれる原子の分布形状などで決まるパラメータ η を用いると、原子数が N の時、全放射光の内、超放射へ寄与する割合(収集効率)が $\eta N / (1 + \eta N)$ となり、 η が 1 よりはるかに小さい場合でも N が十分大きければ、これが 1 に近づきます。そのため、多数の原子を用意することが超放射にとって重要になります。

そこで、本研究グループが注目したのが、導波路(注 2)を利用した超放射です。特に光の導波部分が中空である導波路内においては、その導波路中にわたって多数の原子を導入することが容易になります。

(2) 研究内容

本研究では、図 1 のような中空のコアを持つフォトニック結晶ファイバー(中空ファイバー(注 3))導波路中に導入された原子の超放射の実験的、理論的な研究を行いました。

実験においては、この中空ファイバーの中に極低温ストロンチウム原子集団を導入し、その超放射を観測しました。その実験の概要図を図 2 に示します。極低温に冷却された原子は、中空ファイバー中を伝播する光で作られた光格子(注 4)によって閉じ込められ、原子の熱運動や原子とファイバー壁との衝突によって生じる擾乱を抑制しています。また、この定在波は魔法波長と呼ばれる特別な波長と偏光で構成することで、原子の遷移周波数のシフト、線幅の増大を抑制しています。この原子に対して、励起光を照射することで励起状態にし、その後、原子が基底状態に戻るときに放射される光のうち、中空ファイバーを導波するものだけを検出器で測定します。

図3に、この実験系で得られた超放射光の様子を示します。黄色で示した励起光を照射した後、4つの放射強度ピーク(バースト)が観測されています。このバーストの繰り返し(リングング)は原子集団の放射光を再びその原子集団が吸収・再放出しているためであり、超放射の特徴を表しています。また、この中空ファイバー内の超放射において、その放射光の特性を測定した結果を図4に示します。まず、図4(a)は励起光の離調(励起光の周波数と原子の共鳴周波数との差)に対する放射光の周波数シフトの結果です。原子数密度 ρ の増大によって、負の周波数シフトが生じていますが、励起光の離調にはほとんど影響を受けていません。これは、原子集団が放射する光の周波数は励起光ではなく、原子集団自身によって決まっていることを示しています。次に、図4(b)の黒点は、全放射光パワーのうち、中空ファイバーを通して検出器に到達した光パワーの割合が、原子数 N の変化によって変わる様子を観測しています。原子数 N が20万を超えると、結合効率がほぼ1、つまりほぼ全量の放射光が中空ファイバーで導波されていることを示しています。また、黒曲線は実験結果から抽出した協力パラメータ $\eta = 4.1 \times 10^{-5}$ の時の $\eta N / (1 + \eta N)$ の曲線であり、実験結果をよく一致しています。

さらに、この実験を理論計算でシミュレートすることで、中空ファイバー中の超放射の特徴を明らかにしました。図5はそのシミュレーション結果を示しています。上のグラフは中空ファイバーの固有モード(ファイバーの中でその形状を変えずに導波できる特別な形状)のうち、代表的な3つ LP_{01} 、 LP_{02} 、 LP_{03} の重率が超放射中にどのように変化しているかを表しており、その重率の変化によって変化している各時刻のビーム形状を表しているのが下の5つの図です。これによると、図3におけるバーストの節に相当する時刻で支配的な固有モードが入れ替わり、モード間を行き来しながら超放射を維持している様子が分かります。また、図4の周波数や結合効率もこのシミュレーションで計算しています。実験結果と矛盾しない結果が得られており、シミュレーションの妥当性の傍証ともなっています。

(3) 社会的意義・今後の予定

本研究では、ファイバー導波路中における、極低温原子の放射光の特性を実験的、理論的に解明しました。将来的には、よりスペクトル線幅の狭い原子遷移を使うことにより、原子由来の安定な周波数をその放射光から直接得られる超放射レーザーの実現が可能となります。この超放射レーザーを光格子時計の光源とすることで、高精度な周波数リファレンスとして利用することにより、微小な周波数変化を重力ポテンシャル計として測地に応用する相対論測地(注6)などへの利用も期待されます。

5. 発表雑誌:

雑誌名: 「Communications Physics」

(オンライン版: 10月31日 Vol.2 Article number 136 (2019))

論文タイトル: Superradiance from Lattice-Confined Atoms inside Hollow Core Fibre

著者: Shoichi Okaba, Deshui Yu, Luca Vincetti, Fetah Benabid & Hidetoshi Katori*

DOI番号: 10.1038/s42005-019-0237-2

<https://www.nature.com/articles/s42005-019-0237-2>

6. 問い合わせ先:

<発表者>

理工学専攻

教授 香取秀俊
特任研究員 岡場翔一
<機関窓口>
東京大学大学院 工学系研究科 広報室

理化学研究所 広報室 報道担当

7. 用語解説：

(注 1) 超放射

光を吸収した原子集団がその光を外部に放射する際、多数の原子が位相を揃えて光を放出する現象。位相が揃っているため、放射光の電場は干渉によって原子数 N に比例するようになり、電場の 2 乗である放射光のパワーは N^2 に比例して増幅されるようになる。

(注 2) 導波路

電磁波の伝送路。光ファイバーもこの一種。

(注 3) 中空ファイバー

コア部分が中空である光ファイバー。中空のため、コア部分に原子などを導入できる。今回用いている中空ファイバーでは、特別なコア(原子を導入する中空の中心部)・クラッド(コアの外周部)の構造を作り、コアを導波する光がクラッドへ漏出することを抑えることで光を導波させている。

(注 4) 光格子

対向するレーザー光によって作られる光の定在波では、振幅がゼロの「節」と最大の「腹」が交互に現れる。この光の周波数が原子の共鳴周波数より低い時には、光の強い「腹」の位置で原子のエネルギーが極小になる結果、原子が捕獲される。このような光の定在波に周期的に捕獲された原子は光格子と呼ばれる。

(注 5) 超放射レーザー

超放射によって放射された光を直接利用するレーザー。
通常のレーザーは、原子や半導体などが放射した光を共振器(合わせ鏡)内に閉じ込めて、共振器長(2枚の鏡の距離)で決まる特定の周波数の光のみを増幅させる。そのため、振動などによって共振器長が変動すると、放射される光の周波数が変動してしまう。これに対し、超放射レーザーは、放射される周波数が原子集団によって決められるので、原理的に振動の影響を受けにくい特徴をもつ。

(注 6) 相対論的測地

高い周波数精度をもつ光原子時計を用いて、重力赤方偏移から標高を測定する手法。アインシュタインの一般相対性理論から導かれる、「重力の強い場所(地球中心により近いが低い場所)では、時間の進み方が遅くなる」という効果を利用している。

8. 添付資料：

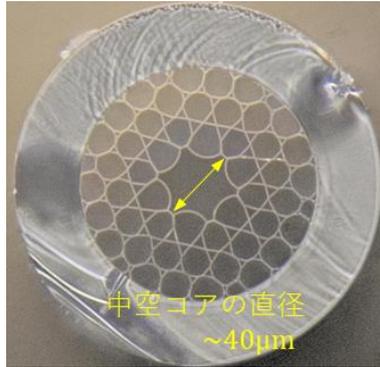


図 1:中空ファイバーの断面図

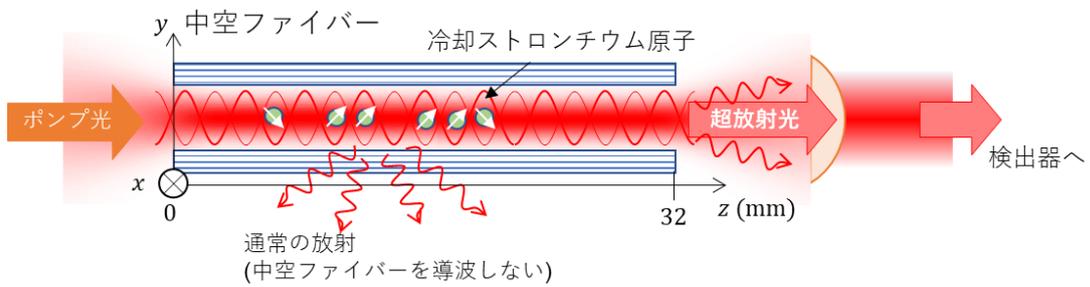


図 2:実験系の概要

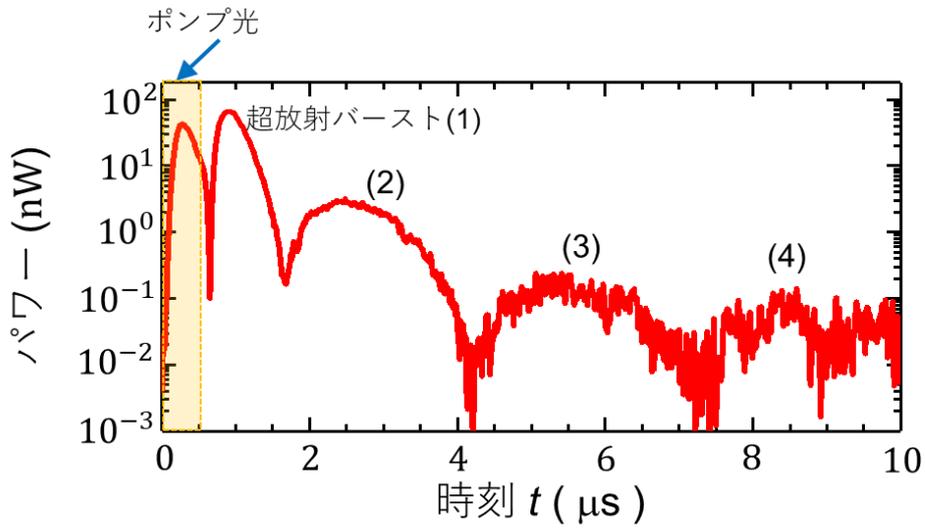


図 3:超放射光のリングング

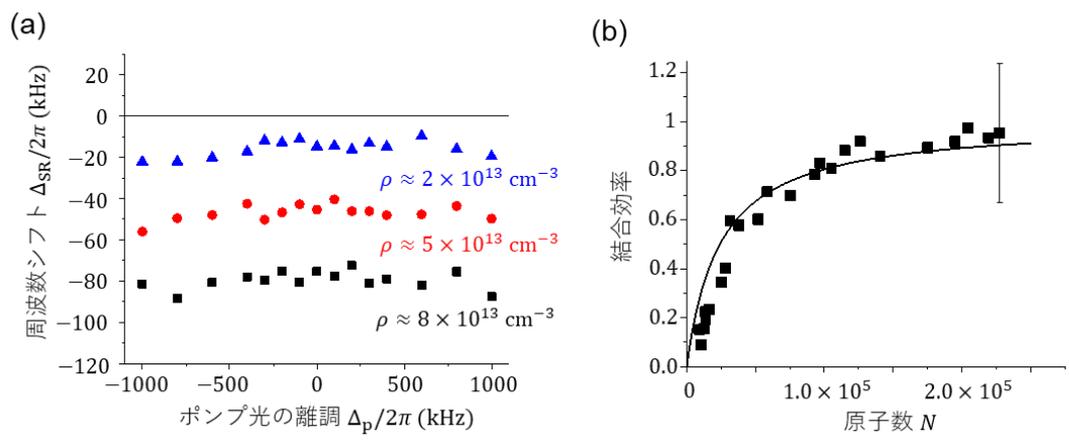


図 4: 超放射光の特性。(a) 超放射光周波数のポンプ光の離調に対する依存性。(b) 超放射光の中空ファイバーへの結合効率。

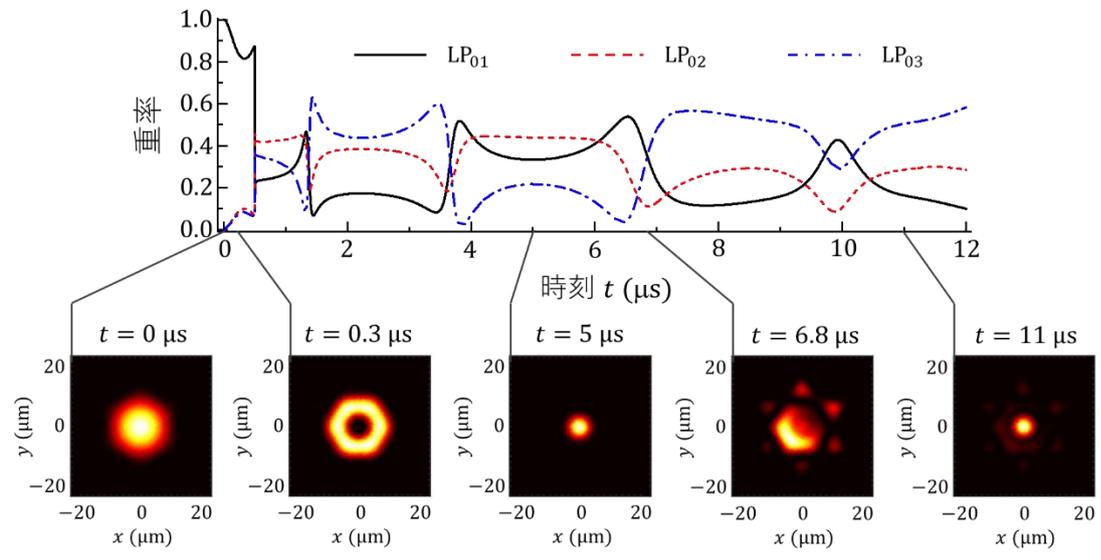


図 5: 中空ファイバー中の超放射のシミュレーション