

令和元年6月3日現在

機関番号：32682

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K05505

研究課題名(和文)協同現象を利用した振動子集団の制御理論

研究課題名(英文)Quantum control of many-body oscillators via cooperative effects

研究代表者

金本 理奈 (Kanamoto, Rina)

明治大学・理工学部・専任准教授

研究者番号：00382028

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：振動子の力学的性質を把握し、これを制御・測定につなげることは科学技術に於いて重要な課題である。本研究は、マイクロからナノスケールの振動子が多数連結されたときに重要となる量子性および集団効果を明らかにし、量子制御・従来の感度を上回る測定技術につなげることを目指した。本研究で得られた主な成果は次の4つにまとめられる：(1)エキシトン-ポラリトン凝縮体の回転同期の発見、(2)連結した量子非線形振動子の示す集団的な力学現象に於ける個数スケーリングの発見(3)ナノ粒子の重心運動におけるナノ球表面-冷却原子間の分散力ポテンシャルの重要性の指摘、(4)ボース凝縮した冷却原子集団の角運動量の準非破壊測定の提案。

研究成果の学術的意義や社会的意義

振動子の力学的性質を把握し、これを制御・測定につなげることは、科学技術に於いて重要な課題である。物質表面-原子間の相互作用(分散力)は、物理のみならず生命科学やソフトマター分野でも重要な役割を担うことが知られている。この力の第一原理的な計算や測定はこれまで非常に困難であったが、本研究のように光トラップした単一ナノ粒子の測定技術を用いることで、この相互作用に関する理論・実験双方からの研究を加速させられると考えられる。また極低温の原子気体や振動子集団におけるダイナミクスを理解や準非破壊測定法の提案は、量子物性科学および力学的性質を利用したデバイス開発等で利用できる。

研究成果の概要(英文)：Control and measurement of mechanical oscillators are important issues toward quantum science and technology. This work was aimed at uncovering quantum collective effects in coupled mechanical oscillators of micro- or nano-scale for quantum control and quantum-limited sensing. The main results of this work are summarized into four categories: (i) we found that exciton-polariton condensates undergo a synchronization transition of rotational motions, (ii) we found a finite-size scaling in the collective quantum dynamics of nonlinear oscillators under quantum noise, (iii) we introduced a new perspective of nanosphere-atom dispersion force that modifies the center-of-mass motion of the nanosphere, (iv) we proposed a quasi-non-destructive measurement scheme of angular momentum of atomic Bose-Einstein condensate via optomechanical interactions.

研究分野：量子エレクトロニクス

キーワード：共振器量子オプトメカニクス 量子光学 原子光学

1. 研究開始当初の背景

ホイヘンスは、支柱に掛かった複数の振り子時計が、時間が経過すると足並み揃えて振れるようになることを発見した。この現象は現代では同期現象あるいは位相・振動数ロックとして知られており、化学反応・生命系などにおいても普遍的に観測される協同現象である。同期現象を示す個々の振動子は自励振動子である。自励振動子とは、環境との相互作用や何らかの非線形性の存在によって、振動振幅が小さくなると振れ幅が増幅し、一方振幅が大きくなりすぎると振動が抑制され、結果的に外界からの摂動に対してロバストな軌道(リミットサイクル)を保つ力学系である。自励振動子が相互作用すると、その強度が弱くとも各振動子は互いに軌道を微調整して同期が観測される。

研究開始当初、実験が急発展を遂げているオプトメカニクス系やナノメカニクス系において、ホイヘンスの振り子時計と酷似した結合振動子系が実現されつつあった。これらの系は、電磁場と力学的な振動子がパラメトリックに弱非線形結合する開放量子系である。初期のメカニクス実験を構成する主要要素は、共振器内の単一モード電磁場と単一の振動子であったが、波長領域が全く異なる異種のメカニクス系を組み合わせたハイブリッド系や、振動数がほぼ均一の同種振動子が電磁場を通して弱く結合する状況も制御可能となってきたのである。特に後者の振動子集団は、同期現象をはじめとする非線形力学系のダイナミクスを示すであろうと予測できた。

しかし理論面では、複数の振動子を内包するメカニクス系の多体理論は未開拓であった。また、非線形力学系の研究は数百年もの歴史があるが、量子領域すなわち振幅(フォノン数)が小さく、量子揺らぎを無視できない低励起領域の力学系の量子論は、ごく近年になるまで十分に議論されていなかった。

2. 研究の目的

上記のような研究背景のもと、電磁場(フォトン)と、力学的に運動する機械振動子(フォノン)が共存する量子オプトメカニクス系・ナノメカニクス系において、各振動子の非線形性と複数の振動子間の相互作用に由来する協同現象を利用した弱結合振動子集団の制御法を理論的に提唱することを目的とした。従来の単一モード電磁場と単一振動子からなるメカニクス系の量子論を、本研究では複数振動子の場合へと発展させ、振動子のインコヒーレントな振動状態とコヒーレントな振動状態(位相または振動数がロックされた同期状態)の領域を明らかにする。更にコヒーレントな同期状態において、既存の冷却法とはメカニズムが全く異なる、振動子間の多体相互作用による協同効果を利用した集団振動子の冷却法の可能性を探求する。

3. 研究の方法

電磁場と相互作用する力学的な振動子を多数含むメカニクス系を対象として、まず振動子間にはたらく相互作用と、各振動子に生じる非線形性の起源を理論的に解析する。次にこれらを取り入れた量子模型を構築し、数値的・解析的に振動子量子状態の時間発展を解く。その際、個々の振動子の振動数分布・結合定数をパラメータとして、振動子集団の同期現象(位相あるいは振動数ロック)が生じる領域、及びロックの度合いを明らかにする。こうして明らかになった振動子集団が協同的にふるまう領域において、集団的な振動子冷却法、集団的非古典状態の発現可能性、集団モードの測定法を探るとともに、個別振動と集団振動状態でのノイズを比較する。

4. 研究成果

本研究で得られた主要な成果は、(1) エキシトン-ポラリトンボース凝縮体における回転運動同期の発見[論文]、(2) 量子 van der Pol (vdP) 振動子の振動崩壊の量子-古典対応[論文]、(3) ナノ球と中性冷却原子の分散力ポテンシャルによる散乱問題 [投稿準備中]、(4) 回転運動をするボース凝縮体(BEC)のオプトメカニカルセンシングの提唱 [投稿済・査読中]である。

(1) 半導体微小共振器におけるエキシトンと共振器光子との強結合によって生じるエキシトン-ポラリトンのボース凝縮体(BEC)は、準粒子間に非線形相互作用を有することが知られている。ポラリトン BEC はエネルギーの利得と散逸のある開放量子系である。一般にこのような開放系では、利得が閾値を超えると自励振動が生じると考えられている。本研究では、利得をもたらすポンプ光をガウシアンにすることにより、一様なポラリトン BEC に不安定性が誘起されて空間的に局在し、定常状態では自発的に回転対称性の破れた回転運動(自励回転)が生じることを見出した。更に二つのガウシアンでポンプしたときは、ガウシアンのピーク間距離に応じて、2つの局在 BEC の回転運動が同期することを示した。図1は、ピーク間距離が大きいときには、非同期(図1上図)であるが、距離が小さいときは反位相で同期する(図1下図)様子を示したものである。右下挿入図は、BEC の密度プロファイルであり、二つの原子雲が反対周りに回転している。

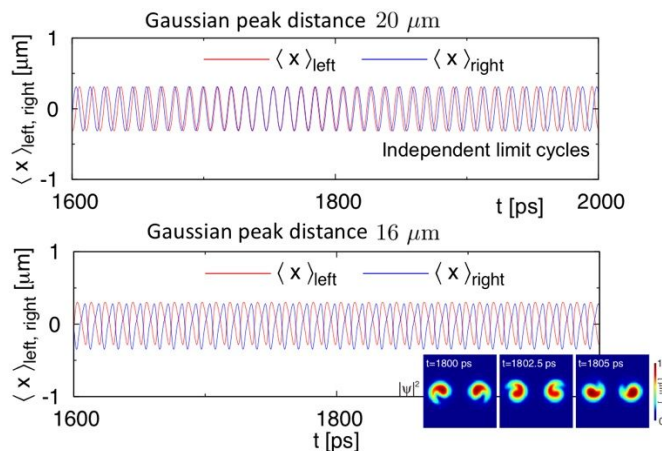


図1：エキシトン-ポラリトン回転子の同期 [論文]

(2) van der Pol (vdP) 模型は、自然界の多くの非線形現象を記述する古典模型として知られている。ファブリ-ペロー光共振器内の定在波の腹の部分に複数の薄膜振動子を配置すると、振動子は共振器フォトンを通じてグローバルに結合する。共振器の散逸レートが大きいとき、この系は複数モードの量子 vdP 模型となる。本研究では、複数モードを有する量子 vdP 模型において、複数の自励振動子間の相互作用に起因する特徴的な現象の一つである振動崩壊ダイナミクスに関する解析を行った。古典論では、vdP 振動子の固有振動数差(固有振動数分布)および相互作用定数が共にある閾値を超えたとき、全ての振動子の振動が崩壊し、基底状態(振動振幅がゼロの状態)となることが知られていたが、本研究では、この現象を量子力学的に解析し、古典模型との比較を行った。その結果、(i) 固有振動数の分布または振動子間相互作用に応じて、全振動子が基底状態近傍まで冷却できること(図2左)、振動-非振動のクロスオーバーを特徴づけるオーダーパラメータとして、Mandel Q パラメータが適切であること(図2右)、(ii)

量子系が本来有する揺らぎを熱的ノイズで模した古典模型と量子模型とを比較した結果、量子系の方がより基底状態に近づくこと、(iii) N個の多振動子系では、振動子数Nを増やすにつれて、協同効果によって定常状態の振幅はより減少すること、を明らかにした。図2は、二つの振動子の振動数差と結合定数をパラメータとして、振幅崩壊が生じる領域を、量子マスター方程式に基づいて明らかにしたものである。

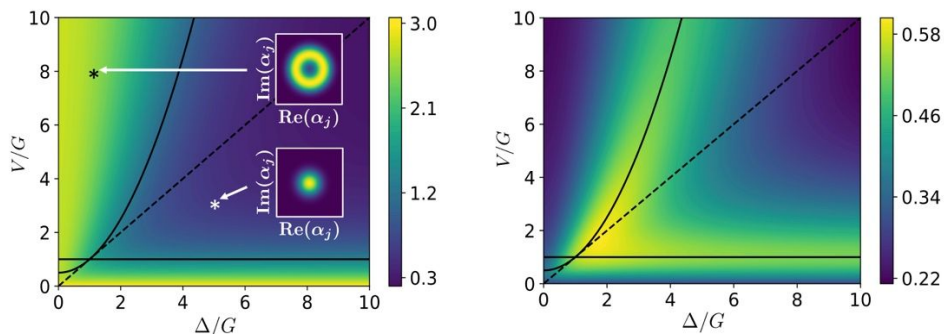


図2：二体量子 van der Pol 振動子の (左) 平均フォノン数と (右) Mandel Q パラメータ
[論文]

(3)光トラップされた微小球の重心運動を、光の放射圧や他の媒体との相互作用を利用して協同冷却しようとする実験的試みが世界各国でなされている。中でも中性原子気体では冷却技術が確立しており、尚かつ微小球と同時トラップが可能であるため、微小球の協同冷却に適していると期待される。冷却効率を求めるためには、原子気体と微小球の散乱レート、およびこの散乱を引き起こすポテンシャルを明らかにする必要がある。しかし微小球表面と冷却原子の主たる相互作用である分散力は測定が困難であり、不明な点が多い。本研究では実験検証可能性を考慮し、ナノサイズのシリカ誘電体微粒子と、極低温に冷却されたルビジウムまたはセシウム原子との相互作用ポテンシャルを理論的に計算した。特に誘電体微粒子の球形状を考慮して、van der Waals 係数および Casimir-Polder 係数を定量化し、各部分波毎の弾性・非弾性散乱断面積を明らかにした。ここで弾性散乱は、静止したナノ粒子に低エネルギー原子が入射したときに生じる量子反射の寄与を表す。その結果、弾性散乱断面積は、球を剛体球とみなしたときの散乱断面積の100倍程度大きくなることが明らかになった(図3)。このことは、低速原子が入射するとき、量子反射が引き起こされる“鏡”が球の周囲に形成され、標的球の半径が有効的に大きくなることを意味する。この原子の衝突イベントのたびに、球はわずかな反跳を受ける。すなわち散乱断面積の増加は、球の受ける衝突力の増加とみなすことができる。これは球面-冷却原子間の分散力ポテンシャルが引き起こす衝突が、球の重心運動に影響を与えることを示した重要な見解である。

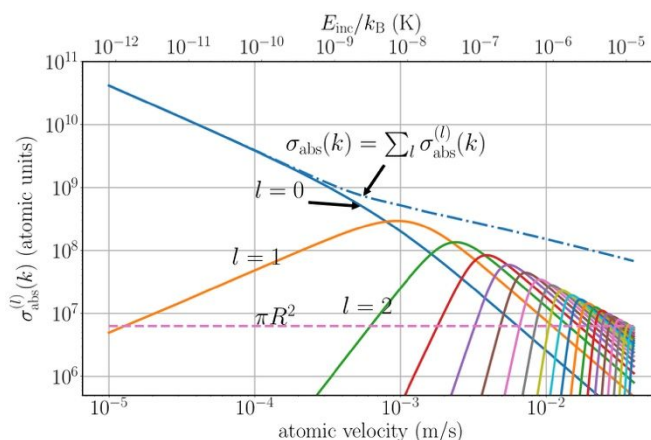


図3：ナノ球-冷却原子の弾性散乱断面積

(2)BEC に量子渦や永久流を生成する技術は確立している。一方で、リング上を流れる永久流の測定技術としては未だ破壊測定が主流である。本研究では、光共振器および角運動量を担う光を用いることにより、原子の重心運動と共振器光のオプトメカニクス型相互作用を利用し、リング上の BEC の角運動量を準非破壊的に測定する手法を提案した。ノイズスペクトルに於いて、第一サイドモードが十分な解像度で得られ、これらのサイドモードのピーク距離から BEC の角運動量を測定できる。更に従来の破壊的な測定と比較して、測定感度が3桁上がることを見出した。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計4件) 全て査読有り

Kenta Ishibashi and Rina Kanamoto,
“Oscillation collapse in coupled quantum van der Pol oscillators”
Physical Review E 96, 052210 (2017)
DOI: 10.1103/PhysRevE.96.052210

R. Morino, H. Tajima, H. Sonoda, H. Kobayashi, R. Kanamoto, H. Odashima, and M.Tachikawa,
“Mode-selective thermal radiation from a microsphere as a probe of optical properties of high-temperature materials” ,
Physical Review A 95, 063814 (2017)
DOI: 10.1103/PhysRevA.95.063814

Hiroki Saito and Rina Kanamoto,
“Self-rotation and synchronization in exciton-polariton condensates”
Physical Review B 94, 165306 (2016)
DOI: 10.1103/PhysRevB.94.165306

J. Sato, R. Kanamoto, E. Kaminishi, T. Deguchi,
“Quantum states of dark solitons in the 1D Bose gas”
New Journal of Physics 18, 075008 (2016)
doi:10.1088/1367-2630/18/7/075008

〔学会発表〕(計10件)

山口孝明, 金本理奈, 赤松大輔, 「誘電体ナノ球による冷却原子の量子反射」, 日本物理学会第74回年次大会(2019年)

赤松大輔, 山口孝明, 金本理奈, 「極低温原子集団とナノ粒子の混合系実現へ向けた真空中におけるナノ粒子の重心運動制御」, 日本物理学会2018年秋季大会

T. Yamaguchi, R. Kanamoto, D. Akamatsu, “Quantum reflection of ultracold atoms by a spherical surface” , International Conference on Atomic Physics (2018年)

Rina Kanamoto, Kenta Ishibashi, Hiroki Saito, “Collective amplitude and phase dynamics of nonlinear mechanical oscillators” , Gordon Conference -- Mechanical Systems in the Quantum Regime (2018年)

石橋健太, 金本理奈, 「低励起領域に於ける自律振動子集団の振幅ダイナミクス」, 日本物理学会2017年秋季大会

田島英樹, 森野遼, 井上和宏, 金本理奈, 小田島仁司, 立川真樹 「Mie 理論を用いた微粒子の熱放射スペクトルの解析」日本物理学会第72回年次大会(2017年)

齋藤弘樹, 金本理奈, 「励起子ポラリトン凝縮体における自励振動と同期」日本物理学会第72回年次大会 (2017年)

金本理奈, 「共振器オプトメカニクス系に於ける機械振動の量子制御」量子エレクトロニクス研究会 (2016年)

石橋健太, 濱崎雅哉, 金本理奈, 「マルチモード振動子の量子同期」日本物理学会 2016年 秋季大会

Kenta Ishibashi, Masaya Hamasaki, Rina Kanamoto, “Synchronization of mechanical oscillators in the quantum regime”, Quantum Dynamics: From Algorithms to Applications (2016年)

[その他]

ホームページ: <http://www.isc.meiji.ac.jp/~kanamoto/index.html>

解説記事「光子による機械振動子の制御: 量子オプトメカニクス」光アライアンス (日本工業出版) 2018年11月号 12~15頁 特集「光で迫る物質の新しい世界」

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名: 齋藤弘樹

ローマ字氏名: SAITO Hiroki

所属研究機関名: 電気通信大学

部局名: 大学院情報理工学研究科

職名: 教授

研究者番号 (8桁): 60334497

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。