

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 3 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2012

課題番号：21540407

研究課題名（和文） 周期一次元量子気体生成法の開拓

研究課題名（英文） Study of Generation of Periodic 1D Quantum Gas

研究代表者

森永 実（MORINAGA MAKOTO）

電気通信大学・レーザー新世代研究センター・助教

研究者番号：60230140

研究成果の概要（和文）：

周期一次元量子気体を生成するための実験的・理論的研究を行ない次の成果を得た：

- (1) リング状磁気光学トラップを設計・製作しその中にナトリウム原子を直接レーザー冷却トラップした。トラップされた原子は冷却光を切ることによりそのままリング状磁気トラップに移すことができる。
- (2) 磁気トラップと比べより小さい半径でより強い閉じ込めが見込まれるリング状動的電場トラップについて検討を行ないそのプロトタイプを製作した。

研究成果の概要（英文）：

We performed study on the generation of periodic 1D quantum gas and obtained the following results:

- (1) We designed and made a circular magneto-optical trap and trapped sodium atoms directly into this trap. The trapped atoms can be transferred to the circular magnetic trap just by turning off the cooling light.
- (2) We investigated a circular dynamical electric trap that could give higher confinement with small circle diameter and made a prototype of such trap.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
2012年度	600,000	180,000	780,000
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：物理学

科研費の分科・細目：原子・分子・量子エレクトロニクス

キーワード：レーザー冷却・原子光学・量子気体

1. 研究開始当初の背景

1995年に希薄原子気体によるボース凝縮体（BEC）の生成が成功して以降 BEC を用いた一通りの実験が行なわれたのち冷却原子の分野ではフェルミオンの冷却、フェルミオン対⇒分子の生成⇒分子の BEC、またフェ

ルミオン対の実空間での生成⇔クーパー対の生成（BEC-BCS クロスオーバー）、さらに極性分子の生成へ、というように量子気体を構成する粒子の種類・質を広げるといのが一つの大きな流れであった。一方、低次元のトラップや光格子を用いるなどして様々

なジオメトリーのポテンシャル中での量子気体の振る舞いを調べるといのがもう一つの流れとして存在していた。

2. 研究の目的

この中で本研究は 2 次元的に閉じ込められた 1 次元極低温気体の振る舞いを実験的に調べる手段を開拓することを目的とするものである。1 次元量子気体は光ポテンシャルを用いた直線形のトラップで既にある程度調べられているが、直線形の場合トラップの両端付近では実験的にポテンシャルがどうしても持ち上がってしまい純粋な 2 次元閉じ込めとならない。そこで端点がないリング型トラップを用いようというのが本研究の出発点である。

また 1 次元気体の研究はこのような純学術的観点からだけでなく連続 BEC 生成の実現のためにも重要視されている。連続的な BEC の生成は連続発振レーザーの原子版とも言えこの分野の研究者であれば誰もがその実現方法を考えてみたことがあるものであるが、現在実現が有力視されているシナリオは、ある程度減速・冷却した原子気体を直線の 1 次元トラップに入射、トラップを通過する間に蒸発冷却を行ない出てくる時には量子縮退状態になっている、というものである。このシナリオに基づいて実験を進めているグループは世界で 3 箇所ほどあるが必ずしも順調に進んでいるとは言い難い。実際の直線状トラップは長さが 3-5m もあり蒸発冷却に必要な密度になかなか到達しないという技術的困難のほか、そもそも 1 次元系で冷却を行なったときに何が起こるかということについて若干の数値シミュレーションがある以外はよくわかっていないという問題がある。このことを調べるための系としても本研究の方法は好適であると考えられる。

3. 研究の方法

まず中性原子のリング状磁気光学トラップを作り、それから冷却光を切ることによりリング状磁気トラップに移行する。この磁気トラップは其中で蒸発冷却を行なうことによりぐりつながつた 1 次元量子気体を生成するための容器となる。リング状の四重極磁場を与えるコイルは最初水冷式の空芯のものでスタートするが蒸発冷却を行なうためには磁場勾配が不足すると考えられるのでフェライトコアを用いた設計のコイルに置き換えることを検討する。

磁気トラップはスケール則から小さい径のリング状トラップを作ることが難しい。一方で量子現象の発現は小さいトラップを用いたほうが容易になるので、磁気トラップの代わりに AC 電場による動的な双極子トラップを使うことの検討も行なう。動的な双極子トラ

ップは従来点状のトラップしか研究されていなかったがリング状のトラップも可能であることがわかってきた。このトラップは電場の 2 次のシュタルク効果による力を使ったものでありポテンシャルの深さ自体は浅いから磁気トラップと違って発熱がほとんどなく非常に小さいものを作るため、その場合十分なポテンシャル勾配が比較的低い電極間電圧で得られると考えられる。

4. 研究成果

[リング状磁気光学・磁気トラップの研究]
直径 1cm 程度の円に沿って磁場が 0 となるよ



うな特殊な四重極磁場を作りそこにナトリウム原子を磁気光学的にトラップした。

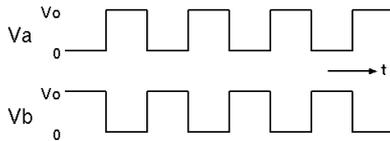
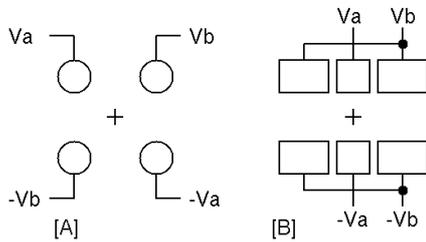


磁気光学トラップ法で従来の点状のトラップとはトポロジカルに異なった形状のトラップを実現したのはこれが初めてである。このトラップで用いた空芯コイルが発生できる磁場勾配は最大で 5G/cm 程度と磁気ポテンシャルとしては重力を支えるのがやっとである。フェライトコアを用いたコイルに替えることにより磁場勾配を上げる計画だったが、それを用いてもなお量子気体がフラグメンテーションを起こさないために必要なリングの半径が 0.1mm 程度以下という条件下では十分な磁場勾配が得られないと判断し次の動的電場トラップに切り替えることにした。

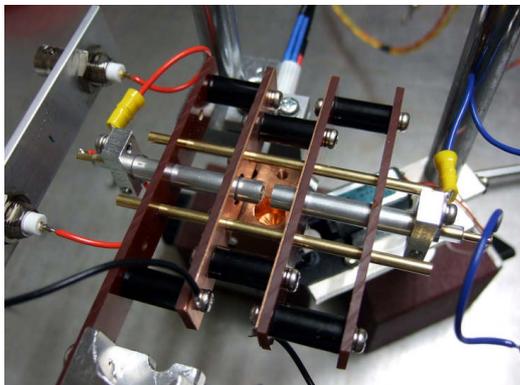
[電場トラップのプロトタイプ製作]

プロトタイプということで大気中での動作確認を可能とするために強誘電体微粒子（チタン酸バリウム粉末等）をトラップするター

ゲットして想定している。2次元方向の閉じ込めを実現する電場トラップとしては下図(断面図)の[A]、[B]のタイプがあり得る(± V_a 、± V_b は各電極の電位、“+”は粒子のトラップ位置を示す)。



[A]はトラップ中心での電場の向きが時間的に変化するが、極性分子と違い微粒子の場合は分極の向きが電場に追従するか定かではないので安全をとって[B]の方式を採用した。強誘電体の微粒子を用いるのは動作電圧を低くするためであるが強誘電体は通常表面電荷が内部分極を遮蔽してしまっている。これを避けるために微粒子をオープンで転移温度以上に加熱し、トラップ領域まで飛んでくる間に冷えて強誘電体に転移するという仕組みになっている。



[双極子間相互作用についての考察]

光-原子系では当たり前のように使われている電気双極子相互作用について今一度基礎からの再考察を行なった。原子(双極子)と電磁場の系についての標準形のHamiltonianから双極子遷移を与える電場×双極子モーメントという形の双極子相互作用Hamiltonianを得るにはCoulombゲージの(量子化された)電磁場からスタートしこれにGöppert-Mayer(ゲージ)変換を施すが、通常この変換は古典的に行われる。今回この変換に現れるベクトルポテンシャルを演算子として扱い変換を行なった。すると変換後

のHamiltonianには古典的に扱った場合にも得られる双極子と電場の相互作用項に加え双極子間の静的な相互作用(双極子-双極子相互作用)項が現れた。変換前後では真空状態も変化するがその差分の(仮想)光子がちょうど双極子間力を与えている。電荷間に働く静的な力(Coulomb力)を量子論的に説明するには従来場の理論の手法により仮想光子を計算しそれによる力を計算していたが今回より簡単かつ初等的に導くことができた。また通常行われている静的な場を古典量として導入することの概念的理解(正当化)を与えるものでもある。

arXiv:1302.0920 [quant-ph] 2013

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6件)

- (1) Ramachandrarao Yalla, Fam Le Kien, M. Morinaga, and K. Hakuta, Efficient Channeling of Fluorescence Photons from Single Quantum Dots into Guided Modes of Optical Nanofiber, Phys. Rev. Lett. (査読有), 109, 063602, 2012
DOI: 10.1103/PhysRevLett.109.063602
- (2) Dmitrii Kouznetsov, Makoto Morinaga, "Guiding of Waves between Absorbing Walls", Journal of Modern Physics (査読有), 3(7), 553-560, 2012
DOI: 10.4236/jmp.2012.37076
- (3) 森永 実, "ラジアル偏光モードで発振するレーザーの開発", 天田財団研究概要報告書 24, 215-220, 2012
http://www.amada-f.or.jp/r_report/kkr/24/AF-2008213.pdf
- (4) 森永 実, "冷却原子と相関計測", 素粒子論研究, 118, D187-196, 2011
<http://ci.nii.ac.jp/naid/11000846061>
- (5) Manoj Das, A. Shirasaki, K. P. Nayak, M. Morinaga, Fam Le Kien, and K. Hakuta, "Measurement of fluorescence emission spectrum of few strongly driven atoms using an optical nanofiber", Optics Express (査読有), 18, 17154-17164, 2010
DOI: 10.1364/OE.18.017154
- (6) Makoto Morinaga, Tetsuo Kishimoto, "Planar Electric Trap for Neutral Particles", Jpn. J. Appl. Phys. (査読有), 48(9), 096505, 2009
DOI: 10.1143/JJAP.31.L1721

[学会発表] (計3件)

- (1) 森永実, "ピンホール列による光のガイ

- ド”，日本物理学会第 68 回年次大会、
27pEE8, 2013 年 3 月，広島大学
- (2) 森永 実, “不透明マスク列によるビーム
の横モード操作”, 電気学会光・量子デバ
イス研究会資料, OQD-10, 46-54(15-18),
2010 年 12 月，大阪市立大学
- (3) 森永実, “冷却原子と相関計測” (レビュー
講演), 基研研究会「熱場の量子論とその応
用」, 2010 年 08 月，京都大学湯川記念館

[その他]

ホームページ

<http://m.ils.uec.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

森永 実 (MORINAGA MAKOTO)

電気通信大学・レーザー新世代研究セン
ター・助教

研究者番号：60230140