

論文の内容の要旨

論文題目 エルミート及びラゲールガウスビームによる冷却原子の運動制御

氏名 清水祐公子

§ 1. はじめに

本研究はエルミートガウスあるいはラゲールガウスモードの光ビームのように、よく定義された関数で記述できる空間強度分布をもった光が原子におよぼす力を半古典論で解析し、その結果を冷却原子の運動を制御する実験によって検証したこと、また強結合状態の光-原子相互作用によっておこる物理現象を観測、解析したことにに関するものである。論文は次の2部からなる。

(1) 原子を電気双極子モーメントで表し、これにはたらく電場・磁場の力を考える第一原理から出発し、種々のモードで力の表式を求めた。これを光子の概念を用いた力の説明と対応させて、古典論と量子論の間の力の解釈の異同を明らかにした。ラゲールガウスビームをつくり光ビームだけで冷却された原子をトラップし、そのトラップ寿命を測定した。先に得られた結果を使い、トラップ寿命が、光のトラップ力とビームの中で働く散乱力とのバランスで決まることを明らかにした。また MOT から原子噴泉によって打ち上げられた原子を共振器内で捕獲するための光パワーの計算をし、可能性を明らかにした。

(2) 高フィネス共振器の中で強結合条件のもとに相互作用する原子の数を随意に制御する実験を行なった。共振器の基準モードの分裂が原子数の平方根に比例する効果を用いることで、共振器内で実効的に相互作用している原子数を見積もることに成功した。原子数がわずか十数個の場合にサブ/スーパーミナル光伝播の観測に成功し、単一原子で量子ゲートや光-原子の絡み合い状態をつくる可能性に道を開いた。

近年レーザー光によって原子を冷却し、トラップし、搬送するような実験が盛んに行われるようになった。この技術は原子物理学の研究に有効な手段を与えるだけでなく、レーザー加工などの応用分野でも注目されている。効果的に原子の運動を制御するためには、最適な光ビームの設計が必要である。レーザー共振器内の共振モードやレーザー出力光の伝搬モードはエルミートガウスモードやラグールガウスモードでよく近似されることが明らかにされている。したがってこれらのモード構造のなかで、原子に働く力を具体的に把握しておくことは大切である。またそれが明らかにされた段階で、原子を有効に制御する光ビームのシステムを構成できれば有益である。

§ 2. 光が原子に及ぼす力の半古典論による解析

光の力の起源についての量子論的説明と古典論的説明との間には見かけ上かなりの開きが感じられる。前者で通常散乱力、双極子力（分散力）といわれるものはそれぞれ光子のもつ運動量の授受、光の中での原子のポテンシャルエネルギーの空間依存性から説明される。後者では運動する双極子モーメントに、それぞれ電場、磁場がおよぼすクーロン力、ローレンツ力から出発する。ことに興味があるのは磁場の役目である。量子論では光と相互作用するのは（第一近似では）電気双極子モーメントだけで磁場はあからさまには現れない。古典論ではマクスウエル方程式を満足させるためにも、ローレンツ力を考えるうえでも常に磁場をあからさまに扱わなければならない。

原子を運動する双極子モーメント μ でおきかえて力は

$$\begin{aligned} \mathbf{F} &= (\boldsymbol{\mu} \cdot \nabla) \mathbf{E} + \dot{\boldsymbol{\mu}} \times \mathbf{B} + \dot{\mathbf{R}} \times (\boldsymbol{\mu} \cdot \nabla) \mathbf{B} \\ &= \mathbf{F}_{\text{inhomo}} + \mathbf{F}_{\text{Lorentz}} + \mathbf{F}_{\text{inhomo}}^{\text{moving}} \end{aligned} \quad (1)$$

とかけるところから出発する。この式で第1項は電場の強度に空間分布があるために生じる力、第2項は振動する双極子に磁場から働くローレンツ力、第3項は動く双極子に不均一な磁場から働く力である。解析の結果マクスウエルの方程式を満足する光ビーム（近軸光）の電場・磁場の式を以下のように求めた。

$$\hat{\mathbf{E}} = \left(\hat{E}_0 u \exp(-ikz), 0, -i\hat{E}_0 \frac{1}{k} \frac{\partial u}{\partial x} \exp(-ikz) \right) \quad (2)$$

$$\hat{\mathbf{B}} = \left(0, \hat{B}_0 u \exp(-ikz), -i\hat{B}_0 \frac{1}{k} \frac{\partial u}{\partial x} \exp(-ikz) \right) \quad (3)$$

ここで関数 u はヘルムホルツ方程式の解で、直交座標系ではエルミートガウス関数、円筒座標

系ではラゲールガウス関数でかくことができる。このときの力を (1) から計算すると

$$\bar{F}_x = \frac{1}{2} \text{Re} \left[(\alpha \hat{E}_0 u)^* \hat{E}_0 \frac{\partial u}{\partial x} \right] = \frac{\partial \alpha' |E|^2}{\partial x} \quad (4)$$

$$\bar{F}_y^{\text{Lorentz}} = \frac{1}{2} \text{Re} \left[(-i\omega \alpha \hat{E}_0 u)^* \left(-i \frac{\hat{B}_0}{k} \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] = \frac{\partial \alpha' |E|^2}{\partial y} \quad (5)$$

$$\bar{F}_z^{\text{Lorentz}} = \frac{1}{2} \text{Re} \left[(i\omega \alpha \hat{E}_0 u)^* \hat{B}_0 u \right] = k \frac{\alpha'' |E|^2}{2} \quad (6)$$

が得られた。ここで α' 、 α'' は分極率の同位相成分、直交位相成分であるがこれらは量子論で計算される。これらの式からは見かけ上磁場は消去されている。(4) (5) は双極子力、(6) は散乱力に相当する。これらの式を使って相互作用の半サイクル (ラビ周波数の半周期) の間に光から原子に移されるエネルギーと運動量を計算すると $\hbar\omega, \hbar k$ となり、光子像の説明と一致する。

§ 3. トラップ力の計算例

前節で求めた力の式を用いて、具体的な例について計算を行なった。

§ 3-1 ラゲールガウスビームによる冷却原子のトラップ

空間を形をくずさずに伝搬する直径 1.5 mm のラゲールガウスモードの光ビームをつくり、その中空の軸上に 10 μ K の Rb 原子を 10⁸ 個トラップすることに成功した。1 本の光ビームだけでトラップ (2 次元トラップ) したときのトラップ寿命は約 50 ms、光ビームの上流と下流をほかの 2 本の光ビームの光ポテンシャルでふさいだ 3 次元トラップでは寿命は 173 ms になった。

寿命をきめる原因を種々検討した結果、両者の寿命の差は式 (6) からくる前方への散乱力を考慮した計算とよく一致する事が分かった。実際に上流の光ビームは寿命に影響しないことも実験的に明らかにされた。光ビームを原子に作用させると、式 (4) (5) で表されるトラップ力と同時に、式 (6) で表される散乱力も同時に働くことが実証されたことになる。量子論ではこれは自然放出による加熱効果に相当する。

§ 3-2 打ち上げられた原子を共振器内に補足する可能性

次節で述べる共振器 QED の実験において、MOT、PGC 効果で冷却した原子を下方からの光ビームの輻射圧で打ち上げると、その初速度は 6.3 m/s と測定された。上方 35 mm にある共振器内の負に離調 (低周波数側に離調) した TEM₀₁ モードの光で減速補足するために必要な光パワーを、§ 2 で求めたモード関数および双極子力の式から計算すると 366 μ W となる。これは十分実現可能な数値である。これができると量子ゲート、量子ビットなど原子で光を制御する素子の開発

に役立つと考えられる。

§ 4. 共振器モード場と原子が強く結合した系

フィネスが高くかつ体積が極めて小さい共振器の中では、光のエネルギーは低くても実効的な電場は大きくなり、従って光に共鳴する原子との結合定数（ラビ周波数）を大きくすることができる。ここで興味をもたれることは、光子 1 個に相当する程度に低いエネルギーで励起されている共振器内で原子にどのような力が働き、これによって原子を減速、トラップし、また運動を制御できるか、ということである。また原子の存在によって原子数に依存してモードのスペクトル構造が大きく変化する。これを解明することは、運動の制御の設計に必要なばかりでなく、共振器 QED の問題としても物理的に興味がある。

製作した光共振器は鏡の直径 3 mm、鏡間距離 70 μm 、フィネス 2×10^5 である。共振器の下方 35 mm で磁気光学トラップにより Rb 原子をトラップ、冷却し、下方ビームの輻射圧によって共振器に向かって打ち上げる。これらの条件では 1 光子の結合定数（真空ラビ周波数） g_0 が自然放出レート γ 、共振器のエネルギー減衰定数 κ より大きくなる、いわゆる強結合条件が成立し、原子・光相互作用を観測でき、さらに原子の運動を制御する可能性が生じる。

§ 4-1 冷却原子の共振器透過信号の観測

強い電場のもとでは原子は大きなラビ分裂をおこす。モード関数の空間構造がある共振器内を通過していく原子のスペクトル線の形は時間の関数として変化する。それにしたがって光の透過信号も変化する。これはまた共振器に入る原子数によっても変る。打ち上げ初速度、原子数、離調などの関数として原子の通過信号を観測した。相互作用の結果は光のモード関数と原子との相互作用から計算される結果とコンシステントであった。

§ 4-2 共振器内における原子の協力的相互作用

共振器内に原子があると、共振器の基準モードは原子のスペクトルのラビ分裂に相当して分裂をおこす。その際“同じ”光の場にある原子数を N とすると、分裂の大きさは \sqrt{N} に比例する。これは N 個の原子が Dicke 状態にあるためである。ラビ分裂は離調の関数として § 4-1 の透過光強度を観測すれば測定できる。MOT のロード時間を変えることで、共振器に入る原子数を制御する。測定されたラビ分裂の大きさを \sqrt{N} の関数としてプロットするとききれいな直線が得られた。これによって原子の協力的相互作用が確認されたと同時に、この関係式は共振器内の原子数を見積もるために有効に使われる。

§ 4-3 光パルスのサブミナル、スーパールミナル伝播の観測

媒質中に屈折率の異常分散があると、その周波数領域では光パルスの伝播速度が真空中の光速を超えたり、あるいは極端に遅くなったりすることは早くから指摘されていた。最近になってボーズ凝縮体でサブミナル伝播、気体セルでスーパールミナル伝播の観測が相次いで報告された。これらはいずれも 10^6 個以上の原子による効果であるが、我々は高フィネス光微小共振器の中で強結合した原子を使ってわずか 16 個程度の原子でこれらの効果を実現することに成功した。さらに実験方法の改善により、単一原子でこれらの効果を実現できる可能性を示した。

原子1個で光パルスを制御できるということは、量子ゲートなどの応用につながる。

MOT から打ち上げられた原子が、ちょうど共振器を通過するときにガウスパルスを送る。光は共振器の中でフィネス(2×10^6)に相当する回数だけ原子と相互作用する。光パルスの周波数離調がサブミナル領域のときに470 nsの伝播時間の遅れ、離調がスーパーミナル領域のときには370 ns進みの観測に成功した。共振器の分裂した基準モードからこれらの効果を計算したところ、非常によい一致をみせた。

光から原子に働く力のいろいろな様子を古典的な解釈と量子論的な解釈とを対応させ明らかにした。これを利用した原子の運動制御の実験を行ない、理論との比較を行なった。高フィネス共振器内で、強結合条件にある原子の数を随意に制御した実験を行ない、原子集団が光と協力的に相互作用することを明確に示すことができた。さらにわずか16個程度の原子で光パルスのサブ/スーパーミナル伝播を実現することに成功した。