

ラム・ディッケ領域にあるストロンチウム原子の無反跳分光

井戸 哲也*・香取 秀俊*,**

Recoil-Free Spectroscopy of Strontium Atoms Confined in the Lamb-Dicke Regime

Tetsuya IDO* and Hidetoshi KATORI*,**

Applying a light-shift cancellation technique, spectroscopy on the $^1S_0 - ^3P_1$ transition of ^{88}Sr atoms is demonstrated in a one-dimensional optical lattice. Photons elastically scattered by atoms confined in the Lamb-Dicke regime provide a Doppler as well as recoil free spectrum of 11 kHz. The developed scheme bears similarity to that of high resolution spectroscopy of a single ion trapped in the Paul trap, but allows observing significantly large number of quantum absorbers at the same time. We anticipate these optical lattice spectroscopy may offer an alternative approach for the realization of an atom-clock in optical frequencies.

Key words: high-resolution spectroscopy, frequency standard, Lamb-Dicke regime, optical lattice, alkaline-earth atoms, strontium

自由空間中で、共鳴周波数 ω_0 の原子が吸収する光の周波数 ω_L は、吸収過程の原子・光子の（非相対論的な）エネルギー保存則と運動量保存則から、

$$\omega_L = \omega_0 + \vec{k}_L \cdot \vec{v} + \frac{\hbar |\vec{k}_L|^2}{2m} \quad (1)$$

と表せる。ここで \vec{k}_L , \vec{v} , m はそれぞれ、吸収光子の波数ベクトル、原子の速度、質量である。この式における第2項がドップラーシフトを表し、第3項が反跳シフトとよばれ、その大きさは光子の反跳運動量によって原子が得る運動エネルギーに等しい。このような原子の自由運動に起因する吸収スペクトルは、原子に強い閉じ込めを施すことによって一変する。反跳シフトは、巨視的なトラップへの束縛によって、原子の実効的な質量が大きくなるために消失する。一方、この束縛による \vec{k}_L 方向の原子運動の振幅を δx とするとき、原子が観測する光電場は変調指数 $|\vec{k}_L| \delta x$ の位相変調スペクトルに等しくなるから、 $|\vec{k}_L| \delta x \ll 1$ のときには、スペクトルの大部分を搬送周波数に集中させることができる。この条件、つまり運動の振幅が遷移波長よりも十分小さくなるラム・ディッケ領域（Lamb-Dicke regime）に原子を束縛することで¹⁾、ドップラーシフトや反跳シフトを除去した、原子固有の吸収スペクトルを得ることがで

きる。

このようなラム・ディッケの閉じ込めは、単一トラップイオンを対象とする可視遷移周波数の精密計測の標準的な手法になっている²⁾。イオントラップでは、(1) ローレンツ力によるラム・ディッケ領域への強い閉じ込めによって、ドッブラー広がりの除去が可能で、しかも(2) この閉じ込めによるエネルギー変化はイオンの上下の電子状態でほぼ同一となるために、分光測定ではその寄与が相殺される、という2点がこの精密分光の鍵を握っている。

中性原子の場合にも、光定在波を利用した光双極子トラップによって、イオントラップ同様の波長オーダーの急峻な閉じ込めが実現できるものの、この光シフト量は原子の電子状態に依存し、遷移の上下状態でそのポテンシャル形状は一般に異なる。この結果、光トラップ中の原子の分光は外場による摂動を強く反映するために、これまで精密分光の対象とは考えられなかった。筆者らは、光双極子トラップの波長および偏光を巧妙に選ぶことによって、ストロンチウム原子のスピン禁制遷移 $^1S_0 - ^3P_1$ の上下状態のトラップポテンシャルを一致させられることを見いたした³⁾。この手法を用いれば、イオントラップの場合と同様に、トラップポテンシャルによる摂動を相殺した原子固有

*科学技術振興事業団 ERATO 協同励起プロジェクト (〒213-0012 川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP D-842)

**東京大学工学部総合研究機構 (〒113-8656 東京都文京区弥生 2-11-16) **E-mail: katori@amo.t.u-tokyo.ac.jp

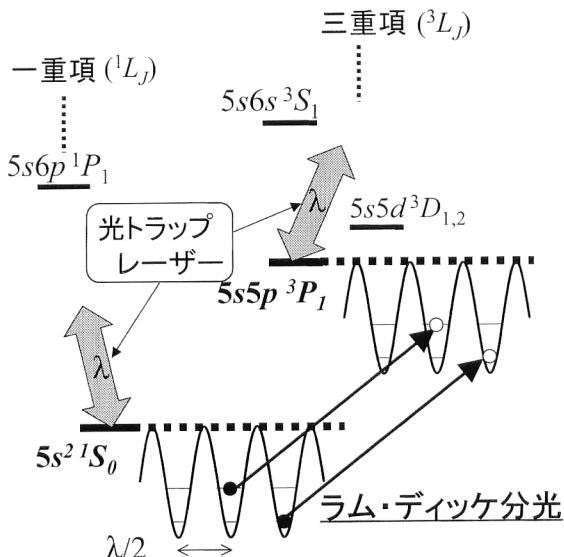


図1 ストロンチウム原子のエネルギー図。電子状態はスピン一重項と三重項状態からなり、分光遷移の 1S_0 , 3P_1 状態をトラップ光によってそれぞれ同一のスピン状態と結合する。このとき光シフトのトラップ波長依存性を利用してすることで、両者の光シフトが一致する波長が見いだされる。この波長の光定在波により一次元光格子を作り、ラム・ディッケ領域への原子閉じ込めを行う。

の吸収スペクトルを得ることが可能になる。本稿では、一次元光格子トラップ中に束縛した原子の無反跳分光を報告する。これは、中性原子集団に対する、新たなドップラーフリー分光手法を提示し、可視光周波数標準のための基礎技術となる可能性を秘めている⁴⁾。

1. ストロンチウム原子の光シフト制御

アルカリ土類金属では最外殻に2個の価電子をもち、このスピンの組み合わせにより一重項と三重項の電子状態をとる。この間の異重項結合線 ${}^1S_0-{}^3P_1$ は、超高分解能分光実現の格好のターゲットとして、これまでにも多くの分光研究がなされてきた。図1にストロンチウム原子の準位図を示す。近赤外光による光トラップを行うとき、 1S_0 状態は一重項の最初の励起状態 $5s5p\ ^1P_1$ （共鳴波長461 nm）と最も強く結合し、一方、分光遷移の上準位 3P_1 はスピン三重項の励起状態、とくに、 $5s5d\ ^3D_{1,2}$ （2.7 μm）、 $5s6s\ ^3S_1$ （688 nm）状態と強く結合する。これらの光シフト量を文献5)にまとめてある複数の遷移強度の実験値から計算すると、840~950 nmの間の特定の波長で 1S_0 の光シフトと一致することが予測される。

2. 一次元光格子

実験では閉じ込めポテンシャルとして定在波による一次元光格子を用いた。光強度300~500 mWのトラップ光を、磁気光学トラップした極低温ストロンチウム原子雲にビームウェ斯特が一致するよう対物レンズで絞り、これをさ

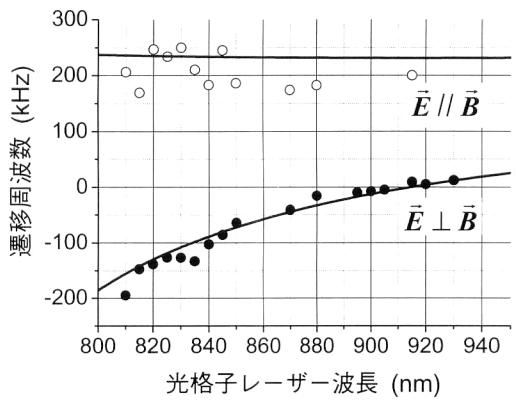


図2 ${}^1S_0-{}^3P_1$ ($m_J=0$) 遷移周波数の光格子波長依存性。バイアス磁場と偏光が垂直な状態では915 nm付近で上下状態の光シフトが揃っている。実線は、実験結果をフィットする光シフトの計算値。この計算から得られた遷移強度は、文献5)の値のばらつきの範囲内で一致している。

らに凹面鏡で反射して定在波を形成することで、光軸方向に半波長周期の強い閉じ込めを実現した。典型的なトラップ光の1/eビーム直径は45 μmで、ポテンシャルの深さは15~24 μK程度であった。トラップ領域では0.5 G（ゼーマンシフト1 MHzに対応）のバイアス磁場をかけることで量子化軸を定義し、このゼーマンシフトによって、磁気副準位間のトラップ光によるラマン結合の影響を排除した。この定在波の波面に垂直にプローブ光を導入し、原子からの共鳴蛍光を光電子増倍管で観測した。

光トラップ内原子の共鳴周波数の、光トラップ波長依存性を図2に示す。ここで、トラップ光の偏光(\vec{E})は、バイアス磁場(\vec{B})に対して垂直な場合と平行な場合について測定した。 $\vec{E} \perp \vec{B}$ の偏光配置では、910~920 nm近辺で 1S_0 と 3P_1 の光シフトが一致する波長が存在する。さらに精度よくこの波長を確定するため900~930 nmにおいて遷移周波数の光強度依存性を測定し、その結果光強度依存性を最も低減できる(10 Hz/(kW/cm²)以下)、すなわち光シフトが一致するトラップ光波長が914±2 nmであることがわかった。なお、現在この測定精度はプローブレーザーの周波数と光トラップ偏光の安定度によって制限されている。

光シフトを一致させたときの、光格子中の原子のレーザー誘起蛍光スペクトルを図3(a)に示す。ラム・ディッケ束縛によって、ドップラー広がりが抑圧され、プローブ光の飽和広がりだけで決まる半値全幅11 kHzのスペクトルが得られている。このラム・ディッケ束縛の有用性は、原子を光格子から開放することによって得られる図3(b)のスペクトルによって確認できる。自由空間中の原子では、式(1)の第2項に対応して、光格子中での振動エネルギー

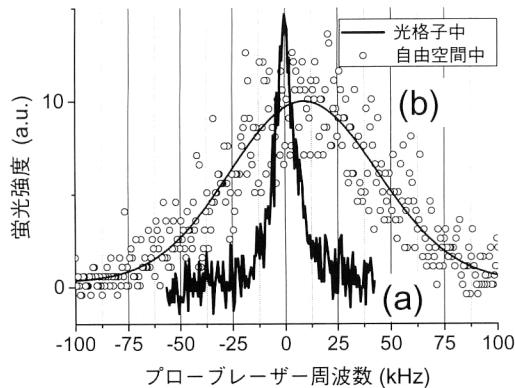


図3 一次元光格子に閉じ込められた原子(a), 光格子から開放直後の原子(b)に対するレーザー誘起蛍光スペクトル。光格子の閉じ込めによって100 kHzのドップラー広がりが抑制されて、飽和強度のみで制限された半値全幅11 kHzのスペクトルが得られている。両者のスペクトルの中心周波数のずれはリコイル周波数 $(\hbar k_L)^2/2m = \hbar \times 5 \text{ kHz}$ に起因する。

を反映する半値全幅100 kHzのドップラー広がりを生じている。さらに、このスペクトル中心は、第3項の反跳シフト(5 kHz)に対応した高エネルギー側へのシフトを生じていることから、自由空間中の原子の共鳴周波数 ω_0 が、光格子中の共鳴周波数と一致していること、つまり、光シフトの一致によって、束縛ポテンシャルの影響が相殺されていることがわかる。

ここで紹介した中性原子での無反跳分光は、可視域での周波数標準実現のスキームを考える上で、新しい可能性を提示している。同様の手法を、三次元の光格子に拡張し、原子を各マイクロトラップに1個ずつ閉じ込めれば、原子間衝突を排除しつつ 10^6 個にも及ぶ原子の同時観測が可能になる。また、このときストロンチウム原子の奇数同位体を使って、超微細混合で生じる ${}^1S_0 - {}^3P_0$ 間の光学遷移を観

測すれば、テンソルシャトルクシフトの問題も回避することができ、測定精度の大幅な向上が期待できる⁴⁾。

最近のラム・ディッケ領域の単一水銀イオンの分光では、紫外域の電気四重極遷移を6.7 Hzのスペクトル幅で測定し、測定粒子数 $N=1$ で決まるショット・ノイズ限界に迫る安定度を実現している⁶⁾。これに対して、本稿の光格子中の中性原子を用いる手法では、 $N(\gg 1)$ 個の原子に対して同時に分光を行うことができるため、同程度のスペクトル幅をもつ単一イオンの場合と比べてショット・ノイズ限界を $1/\sqrt{N}$ にできるのが最大のメリットであり、高分解能分光や光周波数標準の実現手法として興味深い研究対象となっている。

文 献

- 1) R. H. Dicke: "The effect of collisions upon the Doppler width of spectral lines," Phys. Rev., **89** (1953) 472-473.
- 2) J. C. Bergquist, W. M. Itano and D. J. Wineland: "Recoilless optical absorption and Doppler sidebands of a single trapped ion," Phys. Rev. A, **36** (1987) R428-R430.
- 3) H. Katori, T. Ido and M. Kuwata-Gonokami: "Optimal design of dipole potentials for efficient loading of Sr atoms," J. Phys. Soc. Jpn., **68** (1999) 2479-2482.
- 4) H. Katori: "Spectroscopy of strontium atoms in the Lamb-Dicke confinement," Proceedings of the 6th Symposium on Frequency Standards and Metrology (World Scientific Publishing Co., Singapore, 2002) pp. 323-330.
- 5) H. G. C. Werij, C. H. Greenwalt, C. E. Theodosiou and A. Gallagher: "Oscillator strengths and radiative branching ratios in atomic Sr," Phys. Rev. A, **46** (1992) 1248-1260.
- 6) S. A. Diddams, Th. Udem, J. C. Bergquist, E. A. Curtis, R. E. Drullinger, L. Hollberg, W. M. Itano, W. D. Lee, C. W. Oates, K. R. Vogel and D. J. Wineland: "An optical clock based on a single trapped ${}^{199}\text{Hg}^+$ ion," Science, **293** (2001) 825-828.

(2002年7月26日受理)