

論文の内容の要旨

論文題目

ラム・ディック束縛されたストロンチウム原子の連続生成に関する研究

氏 名 高橋 忠宏

1. 研究の背景及び概要

高精度な原子時計は一般相対論的效果によって「重力ポテンシャル計」として機能するため、相対論的な測地論[1]や重力を介した基礎物理学の検証への応用[2]が期待される。なかでも光格子時計は、18桁の周波数精度を持つ光周波数帯域(400 THz)の標準信号が生成可能な原子時計であり、既に実験室外の実験においても、100,000秒の積算時間で相対不確かさ 10^{-18} の安定度に達している。

原子時計は、原子の分光スペクトルから得られる共鳴周波数に、レーザーの発振周波数を負帰還制御によって安定化させることで標準信号を生成する。その信号の安定度は、光格子時計の周波数安定化が間欠的であることで制限される。従来の光格子時計では、参照である冷却原子を生成する時間が測定の不感時間となっているため、レーザーの発振周波数の連続的な安定化が実現していない。このような「間欠的」な周波数安定化回路では、連続的な位相同期回路によって実現する光格子時計と比べて発振器の周波数安定度が損なわれることが知られており、これをディック効果と呼ぶ[3]。

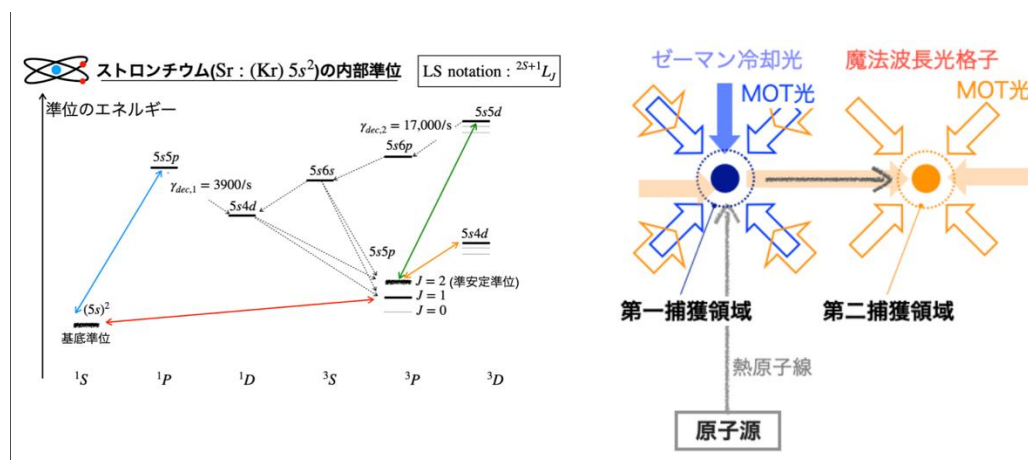
連続的に生成された原子を基に光格子時計を開発し、発振器が原子スペクトルを連

継続的に参照できるようになれば、発振器の原子スペクトルに対する安定化回路を位相同期回路として構成できる。これにより、光格子時計の安定度は向上し、従来100,000秒かけて相対不確かさ 10^{-18} の安定度に到達していた光格子時計は、同等の分解能に到達するためには必要な時間が従来の平方根である300秒になる。

我々の研究室は、「『不感時間無し』運転が可能な光格子時計」のアイデアを新たに提案し[4]、本研究では、それを実現するための装置の設計と開発を行なった。本装置では(1)準安定準位における原子冷却、(2)原子を二箇所への捕獲領域間を移動させることによる冷却機構の連続化、(3)光格子への冷却原子の連続注入の三つの手法を実現する要素技術をそれぞれ開発し、実用的な小型な超高真空装置に実装した。(1)で述べた準安定準位における原子冷却は、2010年によって橋口らによって実現している[5]。また、(2)で述べた空間的な原子の移動を駆使した複数冷却機構の連続化は、2019年にSchreckらが実現しており、その際の捕獲領域間は42cmであった[6]。本研究では(1)で述べた手法を(2)に援用することで、捕獲領域間を38mmとし、光格子時計を実現できる大きさでの冷却原子の連続生成装置を開発した。

2. 準安定準位を用いた連続的な原子冷却

光格子に原子を注入するためには、原子の温度(根二乗平均速度)を室温(数 100K)から光格子のポテンシャル深さ(数 μ K)まで冷却(減速)する必要がある。原子の冷却は、図1(左)に示される原子の内部準位間の遷移を利用することで実現する。一回の遷移に要する時間が、遷移の寿命よりも十分短い遷移を「閉遷移」と呼び、原子は、この閉遷移上での状態遷移を行う過程で、光子との間での運動量の授受を幾度も繰り返す。光子を運動量の方向が揃ったレーザー光から供給することで、原子は速度を失っていく。本研究では複数遷移での原子冷却を組み合わせることで、連続的な原子の冷却が実現できることを示した。本研究での連続原子生成スキームを図1(右)に示す。



本研究では、超高真空装置内に二箇所の冷却原子の捕獲領域を設け、それぞれを基底準位上、準安定準位上の閉遷移によって原子の冷却と捕獲を行う装置を設計した。第二

捕獲領域における原子冷却を準安定準位上で行うことで、光格子のポテンシャル深さまでの連続的な原子の冷却と、光格子への原子の連続注入が可能な設計を実現した。

3. 準安定準位を利用した磁気光学トラップの実現

本設計を具体化すべく、以下の二つの実験を行なった。一つ目の実験については、Physical Review A 誌に掲載された。

3. 1. 熱原子線を準安定準位上で直接捕獲する手法の具体化

2. で述べた設計を実現するためには、基底準位上にある熱原子線を連続的に準安定準位上の冷却遷移で捕獲できなければならない。本研究では、ポンピングビームを使用することで、準安定準位上での原子の捕獲能力を評価した。実験結果より、熱原子線の原子を準安定状態で原子を捕獲する場合、基底状態で捕獲する場合に比べて、1/3の原子数を捕獲できることを確かめた(図2)。

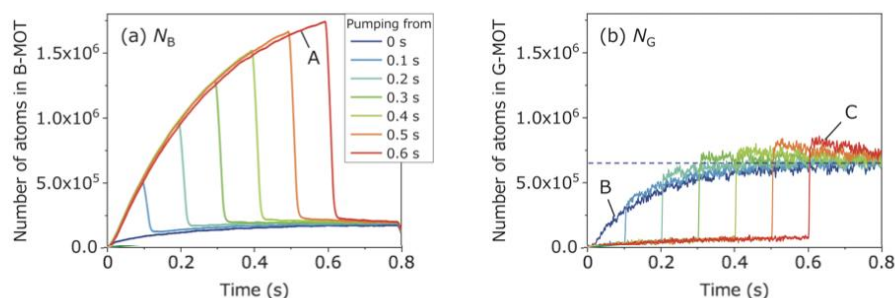


図2. (左)基底準位上で捕獲された原子数の時間依存性。(右)準安定準位上で捕獲された原子数の時間依存性。ポンピングビームが照射されたタイミングで原子が準安定準位に移行していることがわかる。

3. 2. 超高真空装置中での第一捕獲領域から第二捕獲領域への原子の輸送

3. 1で捕獲された原子の第二捕獲領域への輸送の実現性を評価するため、新たに装置を設計することで実験的に評価した。ポンピングビームをcore-shell型に配置することで、基底準位上の狭線幅遷移を用いて、第二捕獲領域での原子の捕獲に成功した。Time of Flight法によって原子の温度を測定したところ、原子の温度が $2\mu\text{K}$ まで冷却されていることが分かった。

4. 「『不感時間無し』運転が可能な光格子時計」装置の開発

これまでの実験を踏まえ、本研究での最終的な目的である「『不感時間無し』光格子時計」装置の開発を行なった。本装置では、3. で述べた連続的な原子冷却機構である

- ・ 熱原子線の減速器
- ・ 冷却原子の二箇所捕獲領域

に加え、同一の超高真空装置内に、

- ・ 長距離移動光格子用光共振器
- ・ 時計遷移分光装置

の二つが CF152 チャンバに実装できるよう、装置の設計と開発を行なった。

従来の光格子時計での上記 4 つの機能は、原子冷却に必要な磁場形状やレーザー強度を時間的に切り替えることで実装されていた。しかし、これらの機能を 4 つ同時に同居させる本研究において、逐次的な切り替えは禁止されており、特に磁場形状においては従来の手法では同居させることが不可能であった。そこで本研究では高透磁率の磁性体による解決を提案し、三次元有限要素法を取り入れたシミュレーションを行うことで、必要な磁場形状を実現することに成功した (図 3)。

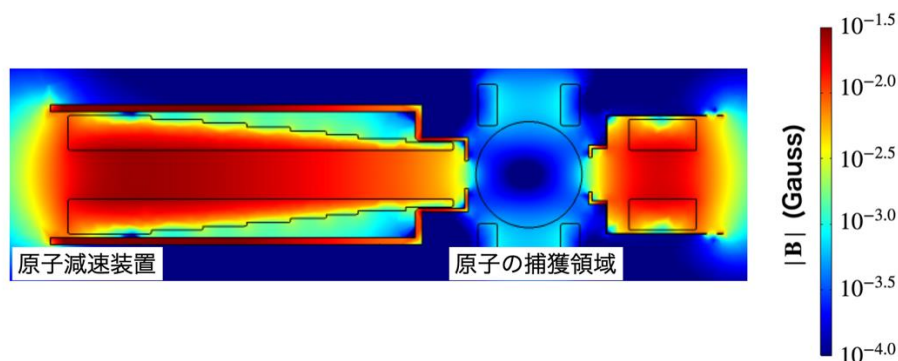


図3: 本研究で設計した磁気回路と開発された装置における磁場強度分布

5. まとめと今後の展望

本研究では「準安定準位を利用した磁気光学トラップ」の特性についてまとめ、ラム・ディック束縛されたストロンチウム原子の連続生成についての道筋を得た。開発過程において、「準安定準位上での原子冷却」と「高透磁率物質を用いた磁気回路の実装」の設計と実装についての知見を得た。これにより、「不感時間なし光格子時計」の具体化の手法を導き出し、全体設計を行い、装置を完成させた。

- [1] M. Takamoto *et al.*, Nature Photonics **14**, 441(2020)
- [2] Y. V. Stadnik, Physical Review D **102**, 115016(2020)
- [3] G. Santarelli *et al.*, IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control **45**, 887 (1998)
- [4] H. Katori, Applied Physics Express **14**, 072006 (2021)
- [5] 橋口幸治, 東京大学工学系研究科物理工学専攻 修士論文(平成 22 年)
- [6] C-C. Chen *et al.*, Physical Review Applied **12**, 044014(2019)