

平成 22 年 6 月 10 日現在

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2008～2009

課題番号：20760042

研究課題名（和文）

冷却原子ビーム打ち上げ方式による原子泉型一次周波数標準器の開発

研究課題名（英文）

Development of a primary frequency standard with a cold atomic beam fountain

研究代表者

高見澤 昭文 (TAKAMIZAWA AKIFUMI)

独立行政法人産業技術総合研究所・計測標準研究部門・研究員

研究者番号：50462833

研究成果の概要（和文）：冷却原子を生成し、打ち上げを試みるとともに、パルスビーム原子泉におけるマイクロ波との相互作用領域での原子密度および検出原子数を計算し、衝突シフトと周波数安定度の量子限界を理論的に見積もった。そして、打ち上げ速度を時間とともに徐々にスイープさせることにより、衝突シフトを増大させてしまう相互作用領域での原子の密度を抑制しつつ、信号対雑音比に関わる観測領域での原子の密度を高くできることを見出した。

研究成果の概要（英文）：Together with the generation of cold atoms and trial of launching them, we calculated the number of detected atoms and an atomic density in the interrogation region in an atomic pulse beam fountain. Then, we theoretically estimated a collisional shift and frequency stability limit due to quantum projection noise. We found that by sweeping the launching velocity of the atomic pulse beam, the atomic density in the detection region can increase for improvement of the signal-to-noise ratio while the atomic density in the interrogation region can be reduced for the suppression of the collisional shift.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	2,200,000	660,000	2,860,000
2009 年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎、応用光学・量子光工学

キーワード：時間周波数、原子泉、セシウム一次周波数標準器、冷却原子パルスビーム

## 1. 研究開始当初の背景

1 秒を正確に決定する原子泉型の一次周波数標準器の不確かさは  $10^{-16}$  台に達している。この不確かさを生む最大の要因の一つは、原子間の衝突による周波数シフト（衝突シフ

ト）である。ここで、衝突シフトは原子密度に比例する。従って、原子数を少なくすれば原子密度が小さくなり衝突シフトが減少する。しかしながら、同時に検出原子数も少なくなってしまうため、信号対雑音比が小さく

なり、周波数安定度が低下してしまう。

こうした衝突シフトと周波数安定度のトレードオフを解消するため、冷却原子の連続ビームを用いる方法や、一回の測定の間原子群を約 10 回打ち上げるジャグリングと呼ばれる方式が試みられている。しかしながら、例えば連続ビーム原子泉の場合には、冷却原子ビーム生成のためのレーザを照射し続ける必要があるため、マイクロ波との相互作用中に余分な光が照射されることによって生じる光シフトを引き起こすレーザからの散乱光を除去する必要がある。

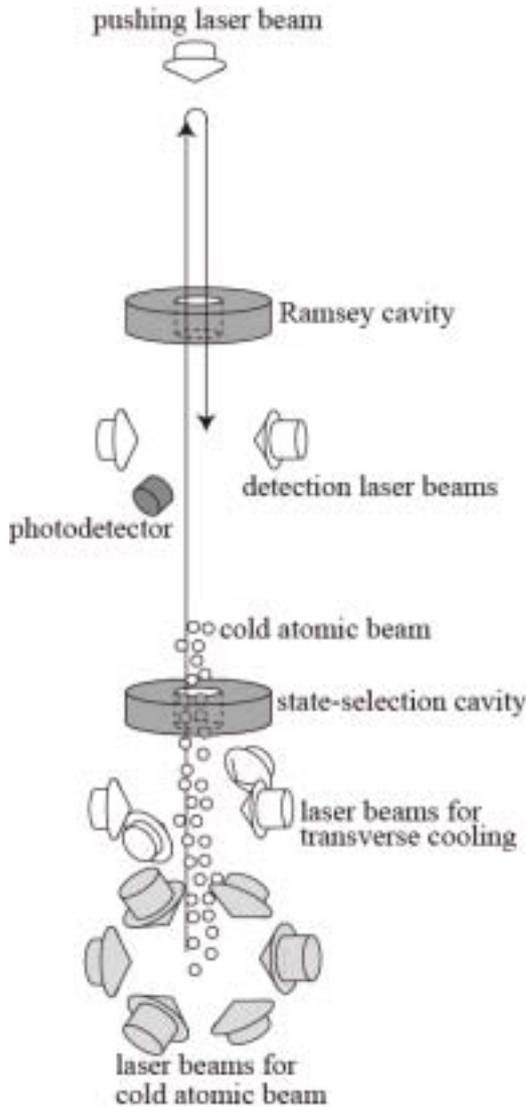


図 1 パルスビーム原子泉

そこで、衝突シフトの低減と周波数安定度の向上を両立させるための方法として、冷却原子ビームを打ち上げて、マイクロ波と相互作用する直前に冷却原子ビーム源をオフにするパルスビーム原子泉(図 1)を提案した。この方法では、まず、3 次元的に 6 方向から冷却用レーザを照射し、上向きのレーザの周波数を下向きのレーザの周波数よりも若干

大きくとることによって、原子を冷却するとともに上向きの力を与え、冷却セシウム原子ビームを打ち上げる。状態選択用共振器によって  $F = 4, m_F = 0$  のセシウム原子を  $F = 3, m_F = 0$  に遷移させる。そして、冷却原子ビームの先頭がラムゼー共鳴用のラムゼー共振器に入る前に、冷却用レーザを切って冷却原子ビーム源をオフにする。その直後、 $F = 4$  の原子を下方へ押し出すプッシュ光を照射することにより、ラムゼー共振器と状態選択共振器の間に  $F = 3, m_F = 0$  の原子が残る。

これは、ラムゼー共振器と状態選択共振器との間の距離を長さの上限とする細長い冷却原子群が生成されることに相当する。すなわち、原子数を減少させることなく、体積を大きくすることによって低密度化を実現し、衝突シフトを低減する。

残った  $F = 3, m_F = 0$  の原子は通常の原子泉と同様に上昇した後重力によって落下し、ラムゼー共振器のマイクロ波と 2 回相互作用する。これによって、ラムゼー共鳴による  $F = 4, m_F = 0$  への遷移が引き起こされる。共鳴光による蛍光観測によって状態選択的に原子を検出することにより、ラムゼー共鳴による原子の遷移確率を測定し、原子の共鳴周波数を精密に測定する。

また、この手法ではマイクロ波との相互作用の前に冷却用レーザをオフにするため、前述の光シフトの影響を容易に除去することができる。また、等速度で冷却原子ビームを打ち上げると落下後に検出される原子群の密度が小さくなってしまいが、パルスビーム原子泉の場合には、冷却原子ビームの速度を時間的に変化させることが可能なため、マイクロ波相互作用領域での原子密度を低く抑えたまま、検出領域での原子群の密度を高めることも可能となる。

## 2. 研究の目的

本研究では、パルスビーム原子泉を実現し、衝突シフトの低減と周波数安定度の向上を両立させることを目的とした。

## 3. 研究の方法

原子操作は超高真空装置内で行う必要があるため、まず、真空装置の製作から取りかかった。真空装置には、冷却原子ビーム生成用のレーザ冷却の要請のほかにも、真空内へのマイクロ波共振器の導入や、マイクロ波相互作用領域での磁気シールドの必要などを考慮し、丁寧に進めた。

また同時に、冷却原子ビームの生成などのために周波数制御されたレーザをアライメント調整を取りながら照射する必要があるため、そのための光学系を構築した。狭線幅

のレーザー光源、テーパアンプなどの光増幅器、音響光学変調器による周波数制御およびスイッチングなどを経て、真空装置内にレーザーを導入した。

そして、原子打ち上げなどの原子操作の実験に取り掛かり、原子を観察しながら実験を進めた。

また、実験を進めるにつれて、打ち上げ速度のスイーピングなど、新たなアイデアが生まれてきたので、それを理論的に考察する研究もおこなった。

#### 4. 研究成果

レーザ冷却用のチャンバー、検出用チャンバー、およびラムゼー共鳴用のマイクロ波との相互作用領域を有する真空装置を構築した。光学系に関しては、周波数制御された狭線幅のレーザーを用意し、レーザーパワーの不足を解消するため、半導体レーザーのインジェクションロックとテーパアンプによる光増幅システムを構築した。

3次元的に6方向から照射することによってレーザ冷却を行い、冷却セシウム原子の集団を生成した。図2は冷却原子群からの蛍光をcharge coupled device (CCD)でモニターしたものである。加えて、鉛直上方に出射する冷却原子ビームを邪魔しないように、鉛直方向の冷却用レーザーを用いない(011)系での原子の打ち上げを試みた。これは想定したよりも難しいが、そのためのノウハウを蓄積することができたため、今後の実験の進展に期待できるだろう。



図2 冷却原子群。(中心の輝点が冷却原子群からの蛍光である)

また、パルスビーム原子泉におけるマイクロ波との相互作用領域での原子密度および検出原子数を計算し、衝突シフトと周波数安定度の量子限界を理論的に見積もった。そして、打ち上げ速度を時間とともに徐々にスイープさせることにより、衝突シフトを増大さ

せてしまう相互作用領域での原子の密度を抑制しつつ、信号対雑音比に関わる観測領域での原子の密度を高くできることを見出した。図3に、冷却原子群の中心での原子密度の時間変化を示す。ただし、破線は等速度で打ち上げた場合を示す。実線および点線はそれぞれ打ち上げ速度を $-(1/2)gt$  および $-gt$  で滑らかに減速させた場合を示している(ただし、 $g$ :重力加速度、 $t$ :時間)。ここでマイクロ波との相互作用時間は $0.13\text{ s} < t < 0.77\text{ s}$  である。図3から、打ち上げ速度を $-(1/2)gt$  で減速させた場合において $t = 0.8\text{ s}$  で原子を検出すれば、相互作用時間における原子密度を抑制したまま、検出領域での密度を高めることができることが分かる。

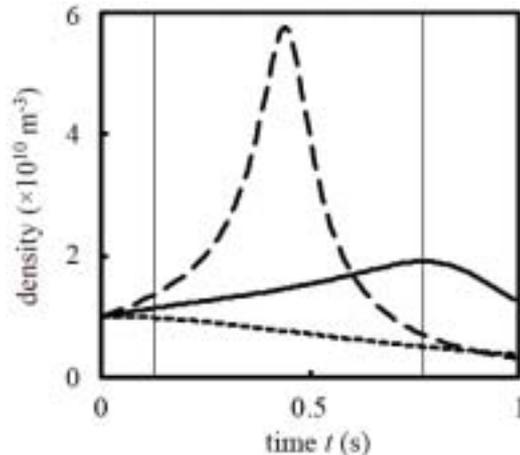


図3 原子密度の時間変化。

この手法により、衝突シフトを $2 \times 10^{-16}$ 程度に抑制しながら、周波数安定度の量子限界を $6.4 \times 10^{-14} \tau^{-1/2}$  ( $\tau$ : 測定時間(s))にできると見積もった。この結果は、同じ周波数安定度をもつ従来方法の原子泉よりも衝突シフトを1桁小さくできることを示している。これは世界中の時間標準の研究者にとって重要な成果である。

#### 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 0件)

[学会発表](計 2件)

高見澤昭文、白川祐介、柳町真也、池上健、衝突シフト低減のためのパルスビーム原子泉の開発、応用物理学会、2010年3月

A. Takamizawa, Y. Shirakawa, S. Yanagimachi, T. Ikegami, Cesium fountain clock with a cold atomic pulse beam, CLEO/Europe-EQEC 2009

〔図書〕(計 0件)  
〔産業財産権〕  
出願状況(計 0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

取得状況(計0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕  
ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

高見澤 昭文 (TAKAMIZAWA AKIFUMI)  
独立行政法人産業技術総合研究所・計測標準研究部門・研究員  
研究者番号：50462833

### (2) 研究分担者

なし ( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

なし