

原子干渉計を用いた高精度な重力加速度計の開発

電気通信大学大学院 電気通信学研究科 量子・物質工学専攻
中川研究室 0433021 小田悠介

1 序論

1.1 研究背景

原子の波動性を利用することで1991年に初めて中性原子を用いた物質波の干渉計が立証され、それ以来、原子干渉計の開発が次々と進められた。近年では原子干渉計による回転速度の測定や超微細構造定をはじめとする基礎物理定数の測定が行われるようになった。また、原子干渉計を用いることにより重力によって生じる重力加速度 g を 10^{-9} の精度で測定することができるようになった。重力加速度測定は万有引力定数のような基礎物理定数測定以外に、地球物理学や計測学へ応用が期待されており、石油や水のような自然資源の探索に役立つ道具としても非常に興味深い研究である。そこで我々中川研究室でも6年前から原子干渉計の研究をスタートした。そして2004年に自由落下中の原子干渉計による重力加速度測定の原理が確かめられたが、そのときの測定感度は $\Delta g/g = 6 \times 10^{-6}$ であり、いくつかの問題点があった。重力加速度計を用いた応用に発展するには8桁以上の感度と精度が必要である。最近ではコーナーキューブを自由落下させ、その位置を光学干渉計によって測定し、重力加速度を測定する方法によっておよそ 10^{-9} の精度で測定することが可能になった。しかし、原子干渉計による重力加速度計は重力を感じるセンサーの役割を果たすものが原子自身になるため、原子の状態を揃えることができさえすればいつでもどこでも同じ原子を用意することができる。従って、装置によるテクニカルな誤差が光学干渉計に比べて小さいと考えられている。

そこで私は万有引力定数 G の測定に向けた高精度な重力加速度計の開発を行った。

1.2 研究目的

高精度な重力加速度計を開発するにはまず、高感度な重力加速度計を開発する必要がある。そこで本研究の目的は大きく分けて2つある。一つ目は感度を向上する。それは相互作用時間を増やすことで解決できる。原子干渉計による重力加速度計の感度 $\Delta \phi_{tot}$ は重力との相互作用時間の二乗に比例するため(4式)、相互作用時間を長くすることにより感度を向上することができる。そこで、私は高感度な重力加速度計を実現するために、原子を噴水のように打ち上げて相互作用時間を稼ぐ「Atomic Fountain」システムを構築した。原子をトラップしている6本の光の周波数を独立に制御することでムービングモラセスの原理によって原子を打ちあげることができる。「Atomic Fountain」システムの構築と、それ

を用いた原子干渉計による重力加速度計を確立し、 10^{-8} の感度で重力加速度を測定することを目的としている。2つ目は精度向上である。そのために得られた干渉フリンジの系統誤差の原因を見つけ取り除くことで、精度よく重力加速度を決定することができる。

2 理論

2.1 誘導ラマン遷移

原子干渉計は原子の内部状態変化と外部状態変化を利用する。従って、自然放出によるデコヒーレンスは避けなければならない。そこで、原子干渉計を構成するには寿命の長い超微細構造の基底状態間での誘導ラマン遷移を用いる。また、誘導ラマン遷移を用いることで大きな反跳運動量を得ることができるので重力加速度を測定することができる。

我々は冷却 ^{87}Rb 原子を用いて干渉計を構成し、ビームスプリッターやミラーの役割を果たすものとして2つの超微細構造の基底状態間での誘導ラマン遷移を用いた。その基本的な過程を図1に示し、簡単に説明する。

右図のような3準位系の原子を考える。

(a) 原子に2つの基底状態間の差周波数に相当する対向したレーザーを照射する。このとき、実効的波数ベクトルは $k_{eff} = k_1 - k_2$ ($k_{eff} = |k_1| + |k_2|$)、実効的周波数は $\omega_{eff} = \omega_1 + \omega_2$ となる(図1(i))。したがって、レーザーを対向させることにより大きな反跳運動量を得ることになる。大きな k_{eff} を得ることは原子干渉計による重力加速度計の位相感度を高くすることになり、重力加速度測定を可能にする。また、2つのレーザーを同方向から照射した場合、実効的波数 $k_{eff} = |k_1| - |k_2|$ となり、原子の運動量変化はほとんど0である(図1(ii))。

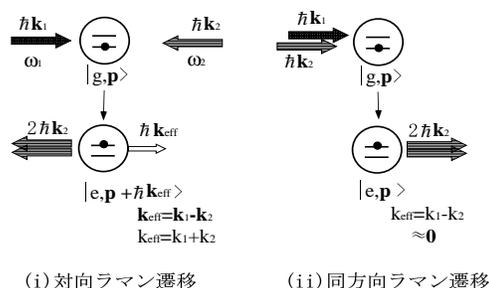
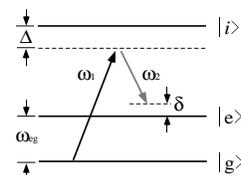


図 1: 誘導ラマン遷移

(b) ラマンパルスによって原子は光子を吸収・放出する際に $\hbar k_{eff}$ の運動量を得る。それと同時に内部状態が変化する。ラマンパルスの強度と時間によって遷移確率を調整することで、ビームスプリッター ($\pi/2$ パルス) やミラー (π パルス) として作用させる。

2.2 原子干渉計による重力加速度計の原理

図2のように基底状態に揃った原子に3つのラマンパルスを当てることによって、原子は反跳を受けて2つの状態に分割され、その後状態は反転して再び結合する。このとき最終的な原子の状態は path A と path B のトータルな位相差 $\Delta\phi_{tot}$ によって変化する。

これを原子干渉計と言う。直線の軌道は重力がない場合、曲線の軌道は重力がある場合を示す。図のような3パルス干渉計の場合、 $\delta \ll \Omega_{eg}$ という条件では $\pi/2 - \pi - \pi/2$ パルス後の励起状態の存在確率は以下ようになる。

$$|c_e(3 \text{ パルス})|^2 = \sin^2 \left(\frac{\Delta\phi_{tot}}{2} \right) \quad (1)$$

path A と path B のトータルな位相差 $\Delta\phi_{tot}$ は

$$\Delta\phi_{tot} = \Delta\phi_{path} + \Delta\phi_{atom/light} \quad (2)$$

のように、古典的な経路による位相発展の差 $\Delta\phi_{path}$ と、原子と光の相互作用による位相シフトの差 $\Delta\phi_{atom/light}$ の2つに分けられる。ただし、一様な重力場では常に $\Delta\phi_{path} = 0$ となる。

また、重力場における光との相互作用による位相シフトの差 $\Delta\phi_{atom/light}$ は原子の落下によって生じるドップラーシフトを補償するためにラマンパルスの差周波数を掃引レート $\beta[\text{Hz/s}]$ で掃引しているので

$$\Delta\phi_{atom/light} = \Delta\phi_g - \Delta\phi_{sweep} \quad (3)$$

のように、重力によって生じる位相シフトと干渉計パルスの周波数掃引によって生じる位相シフトの差になる。ここで、

$$\Delta\phi_g = k_{eff}gT^2, \quad \Delta\phi_{sweep} = 2\pi\beta T^2 \quad (4)$$

である。最終的な干渉計の位相シフト $\Delta\phi_{tot}$ は相互作用時間 T の2乗に比例することがわかる。 β を調節することによって $\Delta\phi_{tot}$ が消えれば $\Delta\phi_g$ と $\Delta\phi_{sweep}$ が釣り合っているときなので、そのときの β の値から以下のように g の値を求めることができる。

$$g = \frac{2\pi\beta}{k_{eff}} \quad (5)$$

このように掃引レート β を変調することで干渉計全体の位相 $\Delta\phi_{tot}$ が変化し、 β に対する励起状態の原子の割合の変化を干渉フリンジとして観測することができる。

また、 $\Delta\phi_{tot}$ は位相感度を意味しているので、相互作用時間 T はできるだけ長いほうが位相感度を高くすることができる。従って我々では、原子を打ち上げて相互作用時間を稼ぐための Atomic Fountain システムを構築し、それを用いた干渉計で重力加速度測定を行った。

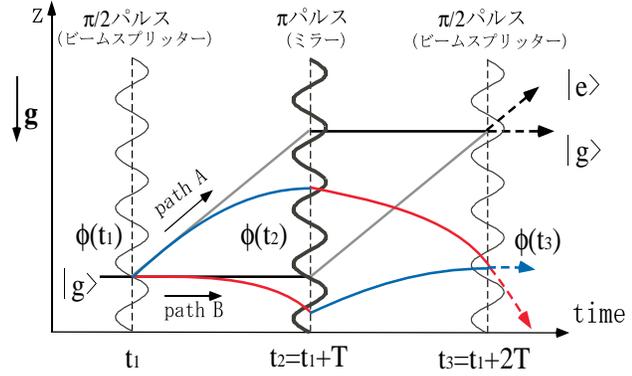


図 2: マハツェンダー型原子干渉計

3 実験装置

実験装置は主に2つの主要部に分けられる(図3)。

(1) 誘導ラマンパルスレーザーシステム:

干渉計ラマンパルスの周波数とタイミングを制御するための光位相同期レーザーシステムとその光学系。

(2) Atomic Fountain:

原子干渉計を用いた重力加速度測定における位相感度は相互作用時間 T の二乗に比例する。従って、高感度な干渉計を構成するにはできるだけ長い相互作用時間をとることが重要になる。そこで我々では原子を磁気光学トラップした後、ムービングモラセスの原理を用いて噴水のように打ち上げる「Atomic Fountain」システムを構築した。これは任意の速度で原子を打ち上げることができる。我々はトラップから打ち上げまで全て同じビーム配置で行っている。打ち上げてから再び戻ってくるまでの間にラマンパルスを照射して干渉計を構成し、重力加速度測定を行う。最終的な干渉計からの出力信号は原子の終状態を観測することで得る。

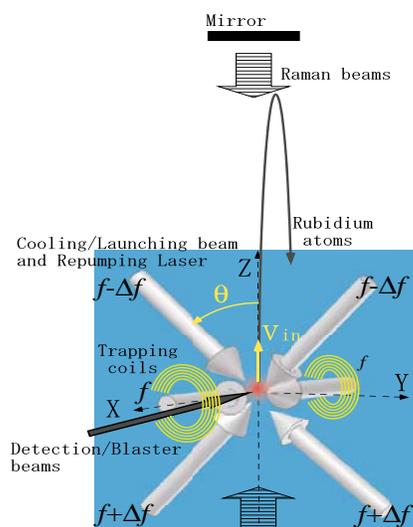


図 3: 実験装置

3.1 Atomic Fountain による原子の打ち上げ原理

原子の打ち上げにはムービングモラセスを用いる。光モラセスの状態では水平方向のレーザー光に対して、上向きレーザー光の周波数を Δf だけ高く、下向きレーザー光の周波数を Δf だけ低くシフトさせる(図3)。これによりビームと鉛直方向とがなす角を θ とすると、ドップラー効果で鉛直上向きに速度 $v = \lambda \cdot \Delta f / \sin \theta$ で動く座標系では6本すべてのレーザー光の周波数が等しく感じられ、静止系での光モラセスと同じになる。我々のビーム配置では $\theta = 45^\circ$ なので打ち上げ初速度 v_{in}

$$v_{in} = \sqrt{2} \cdot \lambda \cdot \Delta f \quad (6)$$

で原子を打ち上げることができる。

3.2 打ち上げの評価

打ち上げ直後の原子の対向ラマン共鳴線から原子の温度と速度を測定した。また、TOF (Time of Flight) による飛行時間の測定を行った。その結果をそれぞれ図4、5に示す。横

軸はどちらも打ち上げ時の水平方向のビームに対する上下方向のビームの周波数シフト量である。打ち上げ時の加熱はなく、(6)式で与えられる速度より少し大きい速度で打ちあがっているのがわかった。また最大飛行時間はおよそ300msである。

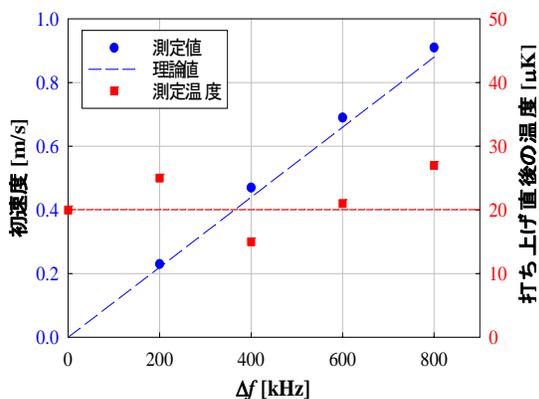


図 4: 打ち上げ初速度と温度

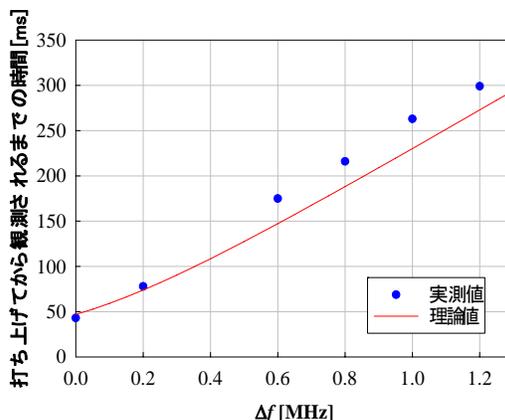


図 5: 飛行時間

4 実験結果

4.1 自由落下中の原子干渉計による重力加速度計

まず、Atomic Fountain を用いずに自由落下中の原子干渉計による重力加速度計の測定結果を示す。得られた干渉フリンジを図 6 に示す。横軸はラマンパルスの掃引レート [Hz/s]、縦軸は励起状態 $F=2$ の原子の割合 [%] であるがここではわかりやすさのためオフセットをつけて 1 つのグラフにまとめた。

(5) 式のように重力加速度 g に相当する掃引レートは相互作用時間 T によらず 1 つである。したがって、相互作用時間を変えても位相が動かない点 (掃引レート) がある。そのときの掃引レートが重力加速度を示す。相互作用時間が増すにつれて干渉フリンジの周期は細くなり (感度が増す)、重力加速度を示す掃引レートにどんどん近づいていく様子がよくわかる。相互作用時間 $T=17\text{ms}$ のときの干渉フリンジからフリンジの中心を決定すると

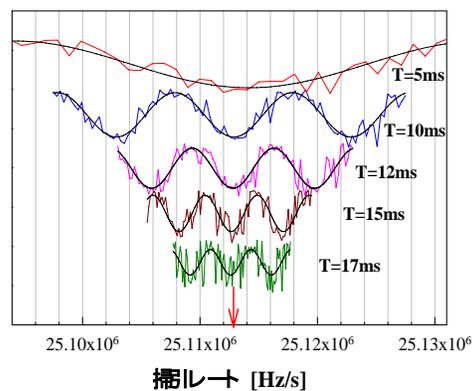


図 6: 相互作用時間と干渉フリンジ

$$\beta_g = 25,112,389 \pm 75 \text{ [Hz/s]} \quad (7)$$

これを用いて (5) 式より重力加速度を算出すると以下ようになる。

$$g = 9.79689 \pm 0.00003 \text{ [m/s}^2\text{]} \quad (8)$$

このときの最高測定感度は $\Delta g/g = 2 \times 10^{-6}$ @ $T = 15\text{ms}$ である。相互作用時間を増やすとともに SN 比が低下した。この原因はラマンパルス折り返しミラーによる振動ノイズであると考えている。SN 比低下にともないコントラストも低下した (図 8)。

4.2 Atomic Fountain を用いた原子干渉計による重力加速度計

Atomic Fountain を用いた原子干渉計による干渉フリンジを図 7 に示す。我々は相互作用時間 $T=13\text{ms}$ まで干渉フリンジを観測することができた。最高感度は $\Delta g/g = 5 \times 10^{-6}$ @ $T = 10\text{ms}$ である。また、相互作用時間とコントラストの関係を図 8 に示す。比較のため、自由落下中の原子干渉計による干渉フリンジのコントラストも一緒にプロットした。Atomic Fountain を用いた原子干渉計の方がコントラストが急激に低下していることがわかる。自由落下中の原子干渉計のコントラスト低下は相互作用時間に応じてフリンジの SN 比が悪くなっていることが原因だが、Atomic Fountain を用いた原子干渉計の場合、信号が出力される範囲が相互作用時間に応じて小さくなり、最終的に $T=13\text{ms}$ 以降はフリンジを観測することができなかった。このようなコントラスト低下は自由落下中の原子干渉計の場合と比べて様子が異なるため、原子を打ち上げることによって生じる問題であると考えている。しかし、現時点では具体的な原因はわかっていない。

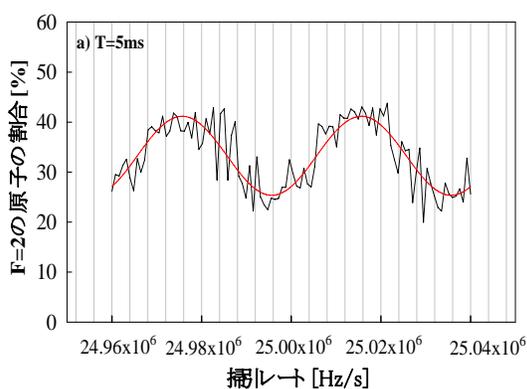


図 7: 干渉フリンジ ($T = 5\text{ms}$)

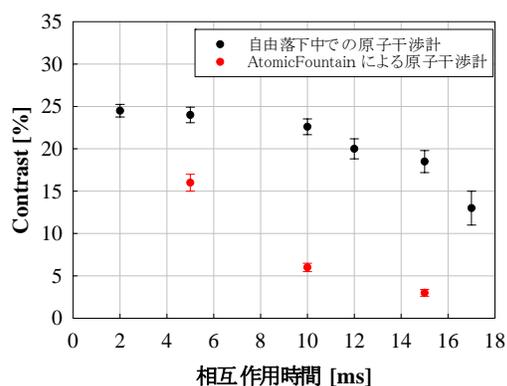


図 8: 相互作用時間とコントラスト

5 まとめ

私は本研究において自由落下中の原子干渉計による重力加速度測定の原理を確かめた。相互作用時間の増加とともに SN 比が低下、それに伴ってコントラストが低下してしまっただが、これは振動ノイズが原因と考えている。したがって、今後折り返しミラーの防振システムの構築が必要である。また、Atomic Fountain システムの構築とその評価をした後、それを用いた原子干渉計による重力加速度計の原理を確かめた。しかし、相互作用時間 13ms までしか干渉フリンジを観測することができなかった。この原因については現時点では明らかでない。SN 比低下と打ち上げによるコントラスト低下を解決できれば、8 桁の感度で重力加速度測定ができるかと期待できる。