

原子干渉計を用いた重力加速度計の開発 ～誘導ラマン遷移とその π パルス幅の決定～

先進理工学科 中川研究室 山本真稔

1 研究背景・目的

干渉計は、光の波動性の検証に始まり、物理学において重要な実験手法として大きな業績を残してきた。最初は光が用いられた干渉計だが、物質波の概念の登場により、電子や中性子を使った干渉計が開発され、近年では原子波を用いた干渉計の研究が行われている [1]。

我々の研究室では、原子波の干渉を利用して高感度・高精度に重力加速度 g を測定することを目指している。高感度・高精度な重力加速度測定は、地下資源の探査や等価原理の検証に応用できる。さらに、ここで実現した原理は万有引力定数 G の測定や重力波の検出に利用できる。

今回の研究では、原子干渉計に用いる誘導ラマン遷移を行い、その π パルス幅を決定した。

2 原理

2.1 原子干渉計

原子干渉計では、図 1 のように $\pi/2 - \pi - \pi/2$ パルスを一定間隔で照射することにより、原子波のマッハ・ツェンダー干渉計を構成している。

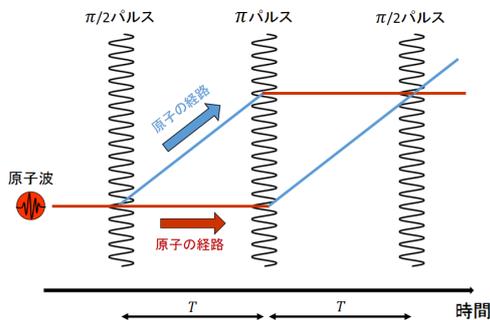


図 1 マッハ・ツェンダー型原子干渉計

初期状態を基底状態に揃えると、最初の $\pi/2$ パルスで原子は基底状態と励起状態の重ね合わせ状態と

なる。次の π パルスで、全ての原子の状態を反転させる。そして、最後の $\pi/2$ パルスで、それぞれの経路を通った原子波を再び重ね合わせる。その後、プローブ光で励起状態の原子の割合を測定し、重力加速度を算出する。

まず、原子波の最終的な位相差 $\Delta\phi_{\text{tot}}$ は、式 (1) のように 3 つの位相シフトで表せる。

$$\Delta\phi_{\text{tot}} = \Delta\phi_{\text{path}} + \Delta\phi_g - \Delta\phi_{\text{sweep}} \quad (1)$$

ここで、古典的な経路による位相差 $\Delta\phi_{\text{tot}} = 0$ であり、落下している原子と光の相互作用による位相差 $\Delta\phi_g$ とラマンパルスの周波数掃引によって生じる位相差 $\Delta\phi_{\text{sweep}}$ は、式 (2),(3) のように表せる。

$$\Delta\phi_g = k_{\text{eff}} g T^2 \quad (2)$$

$$\Delta\phi_{\text{sweep}} = 2\pi\beta T^2 \quad (3)$$

この掃引レート β を調整することによって、 $\Delta\phi_{\text{tot}}$ が 0 になったときが、 $\Delta\phi_g$ と $\Delta\phi_{\text{sweep}}$ が釣り合っているときである。このときの β の値から重力加速度 g を式 (4) のように決定することができる。

$$g = \frac{2\pi\beta}{k_{\text{eff}}} \quad (4)$$

また、全体の位相差 $\Delta\phi_{\text{tot}}$ 自体は、式 (5) から原子が励起状態に存在する確率 P_e を観測することで求まる。

$$P_e = \frac{1}{2} [1 - \cos(\Delta\phi_{\text{tot}})] \quad (5)$$

このように掃引レート β を変調させることで干渉計全体の位相シフト $\Delta\phi_{\text{tot}}$ を変化させ、 β に対する全原子中の励起状態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。これが原子干渉計の原理である。

2.2 誘導ラマン遷移

原子干渉計では、光を当てたときの原子の2準位間の遷移を利用している。そのため、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、寿命の長い基底状態の超微細構造間での誘導ラマン遷移を用いる(図2)。

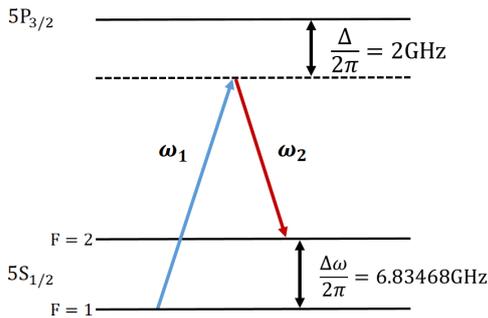


図2 ^{87}Rb の超微細構造間での誘導ラマン遷移

これは、2台のレーザーの差周波数が遷移させる準位間の共鳴周波数と一致しているときに起きる現象である。本研究では、 ^{87}Rb 原子の5S 1/2のF=1とF=2間の超微細構造を用いている。

3 実験装置

3.1 磁気光学トラップシステム

原子干渉計では、原子を集めるために磁気光学トラップ(MOT)を行っている。これには冷却サイクルを閉じるために、クーリング光とリパンプ光の2種類のレーザーが必要である(図3, 4)。

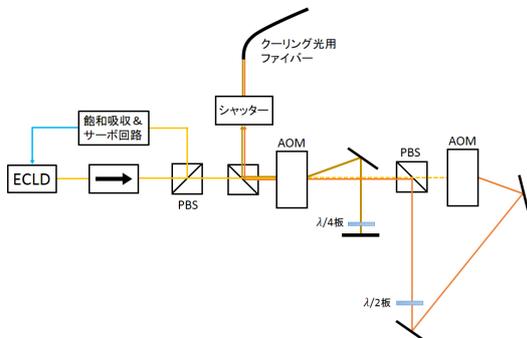


図3 クーリング光光学系

クーリング光は、偏光勾配冷却(PGC)時には変調をかけて利用され、終状態の観測時にも利用される。

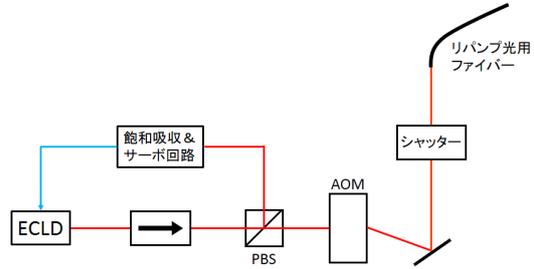


図4 リパンプ光光学系

これらのクーリング光とリパンプ光の周波数は、飽和吸収分光によって得られた吸収線にサーボ回路を介してロックしており、図5のようにチャンバーに入射し、MOTを行っている。x, y方向はミラーで折り返し、z方向はBSで分けた光を対向させている。

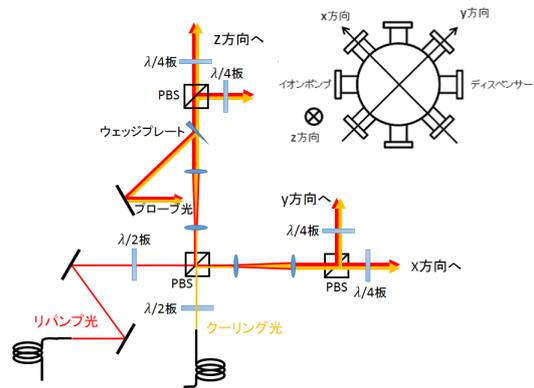


図5 MOT用光学系

3.2 誘導ラマンパルスレーザーシステム

ラマンパルスを生成するための光学系の概略図が図6である。2台のレーザーの差周波数を ^{87}Rb の基底状態の超微細構造間の共鳴周波数(6.834682610...GHz)にロックして位相も一致させている。これをAOMに通し、0次光はアイリスで遮り、1次光のみがチャンバーに入射するようにした。このAOMをON/OFFすることで、ラマンパルスを生成している。

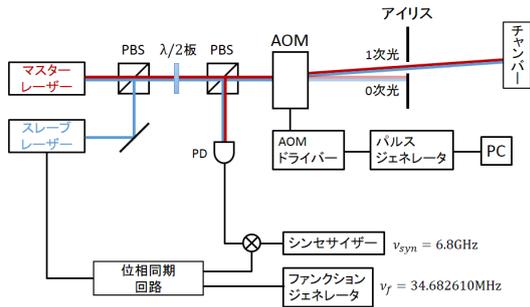


図6 誘導ラマンパルス光学系

また、高速で AOM を ON/OFF するためのドライバーが図7である。

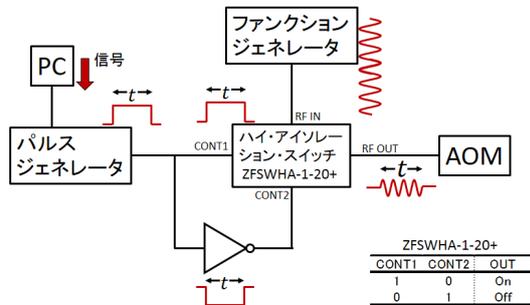


図7 誘導ラマンパルス用 AOM ドライバー

高速応答が可能なハイ・アイソレーション・スイッチ ZFSWHA-1-20+ を用いた。まず、PC から信号が送られるとパルスジェネレータが設定した幅のパルスを出す。このパルス間だけスイッチが ON になることで、ファンクションジェネレータから常に出力している信号をパルス幅の時間だけ切り出して AOM へ送る仕組みである。

4 実験結果

4.1 ラマンパルスの生成

図8~10は、ラマンパルスの生成結果である。図6のアイリス後にフォトディテクターを入れて、測定している。

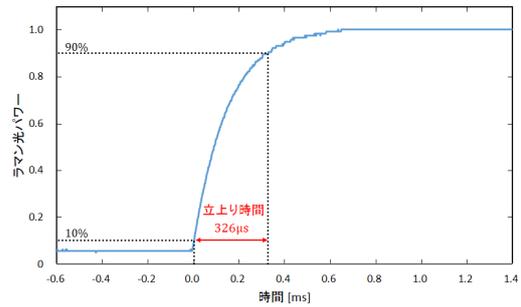


図8 誘導ラマンパルスの立ち上がり (改良前)

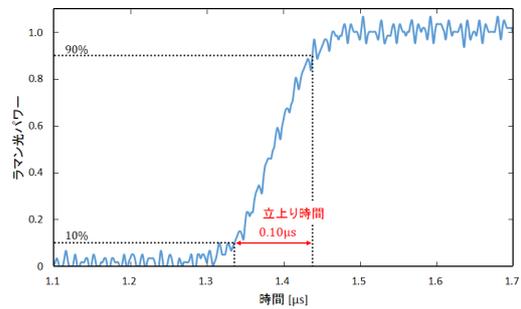


図9 誘導ラマンパルスの立ち上がり (改良後)

図8では市販の AOM ドライバーを用いており、図9は AOM ドライバーを図7のものに置き換えた後の測定結果である。AOM ドライバーの改良により、立ち上がり時間・立ち下がり時間を大幅に短縮できた。

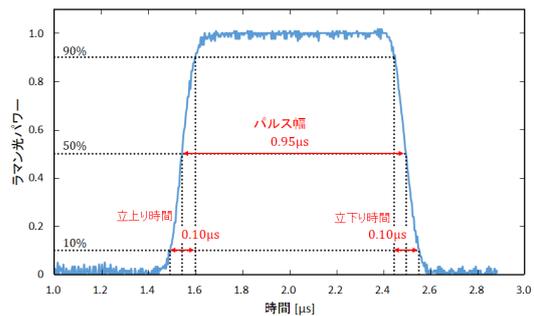


図10 誘導ラマンパルスの観測

図10は、本研究で用いる予定の最短のパルス幅 $1\mu\text{s}$ を出力したときの結果である。短いパルスでもしっかり出力できたことが分かる。

4.2 ラマン遷移のラビ振動

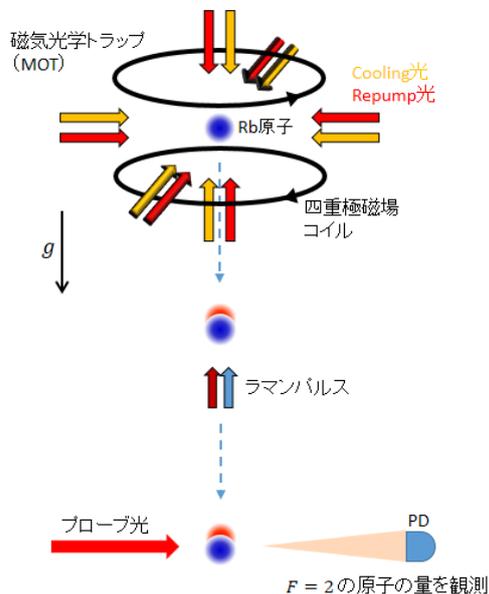


図 11 実験の流れ

図 11 は、チャンバー内の実験の流れを模式図で表したものである。まず、MOT により原子を冷却しつつ、チャンバー上部に集めた (10^8 個)。次に PGC を行い、原子を $6\mu\text{K}$ まで冷却して、自由落下させた。落下中の原子にラマンパルス照射し、原子の状態を変化させた。最後に、チャンバー下部でプローブ光を当てて、Time Of Flight 法 (TOF 法) により $F=2$ の原子の量を測定した。このとき、当てるラマンパルスのパルス幅を変化させることで、図 12 のような TOF 信号の変化が見られた。

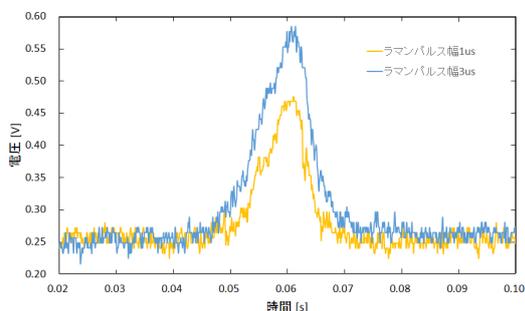


図 12 ラマンパルス幅による TOF 信号の変化

図 12 の TOF 信号を個数に変換し、パルス幅の変化による $F=2$ の原子の量の変化をグラフ化したものが図 13 である。

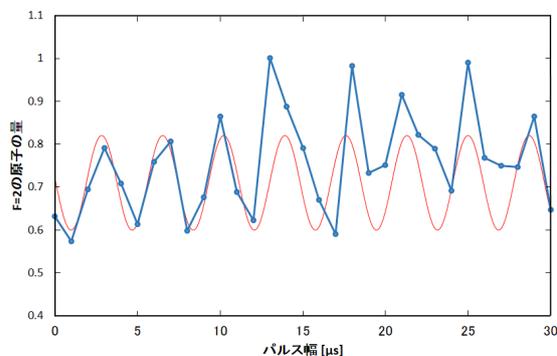


図 13 誘導ラマン遷移のラビ振動

これより、誘導ラマン遷移のラビ振動が観測できた。このときのラビ振動の π パルス幅の見積もりは $2.7\mu\text{s}$ であったが [2]、実験から分かる π パルス幅は $3.7\mu\text{s}$ であった。この差はビーム強度等の測定の誤差からきたものだと考えられる。

5 まとめと今後の予定

我々は、本研究で $1\mu\text{s}$ 刻みの誘導ラマンパルスの生成を行った。これを用いて超微細構造間でのラビ振動を観測し、その π パルス幅を決定した。

今後は、求められたラマン π パルスを用いて速度・状態選択を行う。さらに対向させてのラマン遷移を行い、最終的に重力加速度の測定を目指す予定である。

参考文献

- [1] M.Kasevich and S.Chu *et al.*, *Appl. Phys.* **B54**, 321 (1992)
- [2] M.Schmidt, Humboldt-University. July. *Gyroscopy and Navigation.* **2**, No.3. (2011): 170 ~177