

2016年10月7日(金) 量子科学技術委員会(第6回) 文部科学省

資料2-3
科学技術・学術審議会 先端研究基盤部会
量子科学技術委員会(第6回)
平成28年10月7日

冷却原子を用いた原子干渉計(AI)慣性センサーの 最近の研究動向

電気通信大学レーザー新世代研究センター 中川賢一

- ・はじめに 研究の背景
- ・原子干渉計を用いた慣性センサー
- ・今までの主な研究
- ・海外における最近の研究動向
- ・今後の研究の方向
- ・日本における研究推進の課題



原子干渉計(AI)慣性センサーの研究の背景

1980 ~ 1990年 原子のレーザー冷却・捕捉

W. Phillips, S. Chu, C. CohenTannoudji

1991年 原子によるヤングの二重スリットの実験

J. Mlynek (He*) F. Shimizu (Ne*, 1992)
光ラムゼー分光によるサニャック効果の検出

F. Riehle

1992年 光パルス型原子干渉計を用いた重力加速度計

M. Kasevich, S. Chu

1995年 原子のボースアインシュタイン凝縮(BEC)

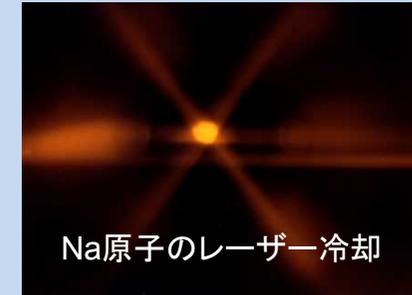
E. Cornell, C. Wieman, W. Ketterle

1997年 原子干渉計によるジャイロスコープ

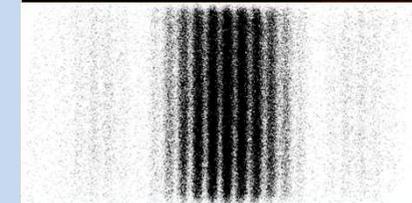
T. Gustavson, P. Bouyer, M. Kasevich

1999年 原子干渉計による絶対重力加速度計

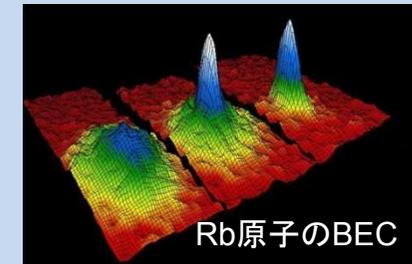
A. Peters, S. Chu $\Delta g/g < 3 \times 10^{-9}$



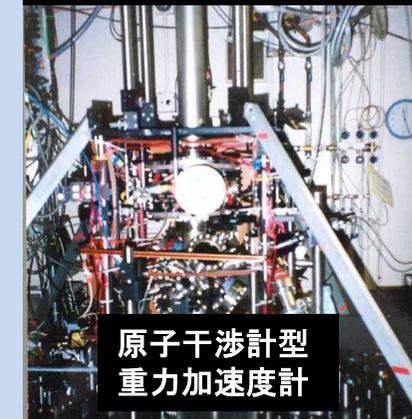
Na原子のレーザー冷却



ヤングの二重スリット実験



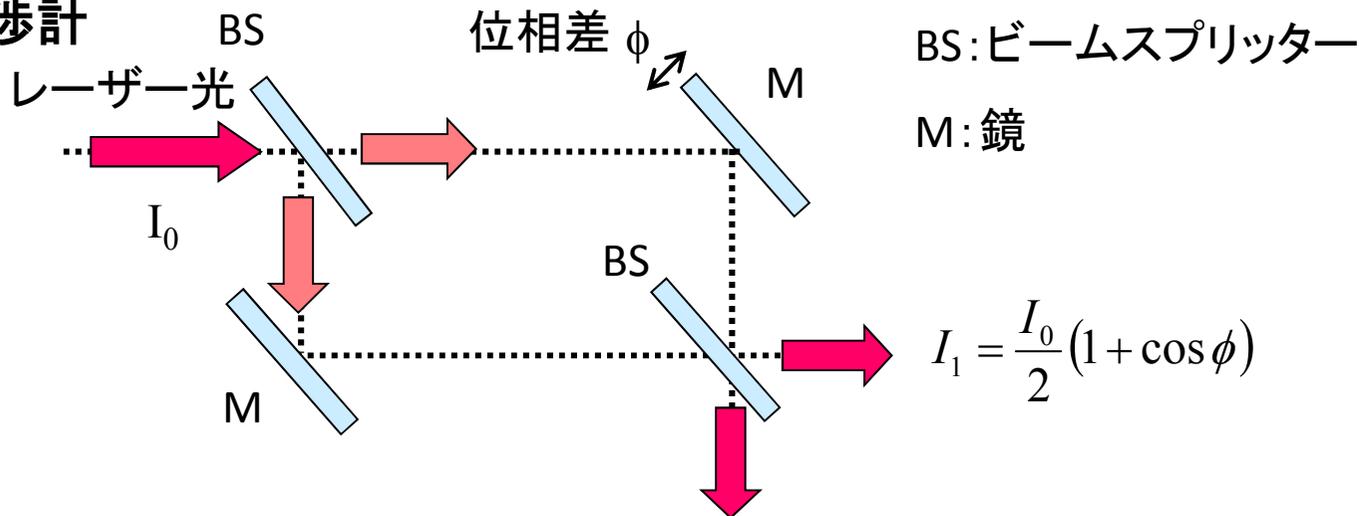
Rb原子のBEC



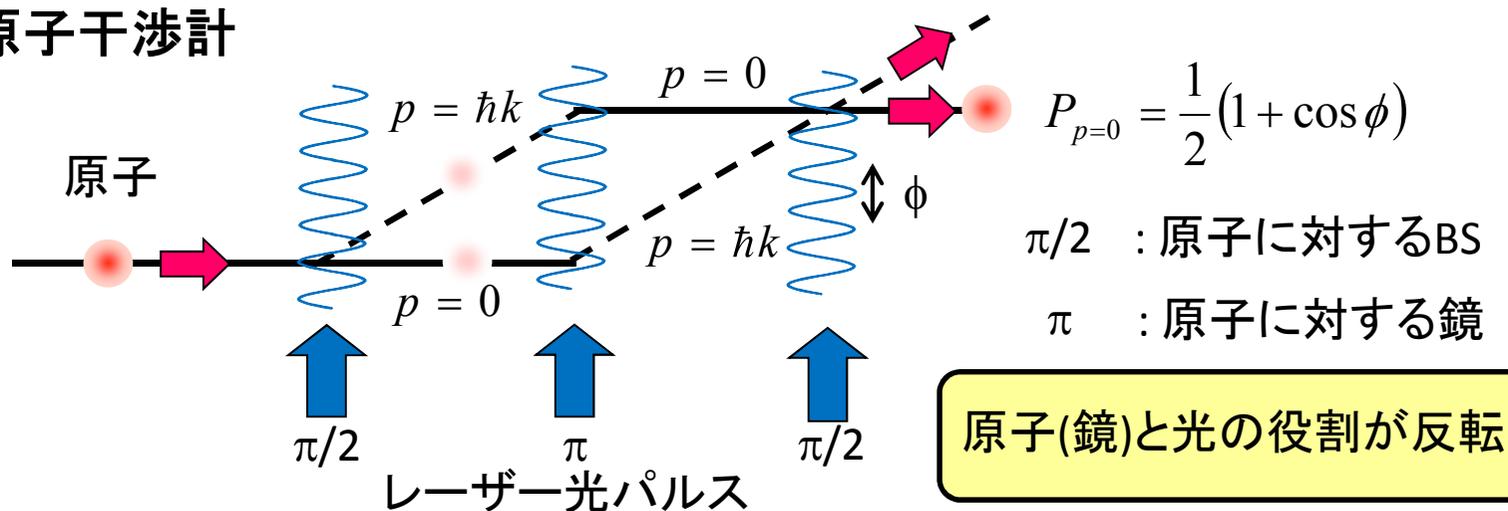
原子干渉計型
重力加速度計

光パルスを用いた原子干渉計 (Light-pulse atom Interferometry)

光学干渉計

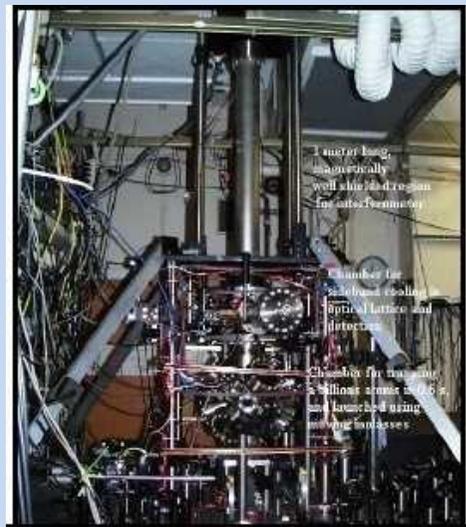
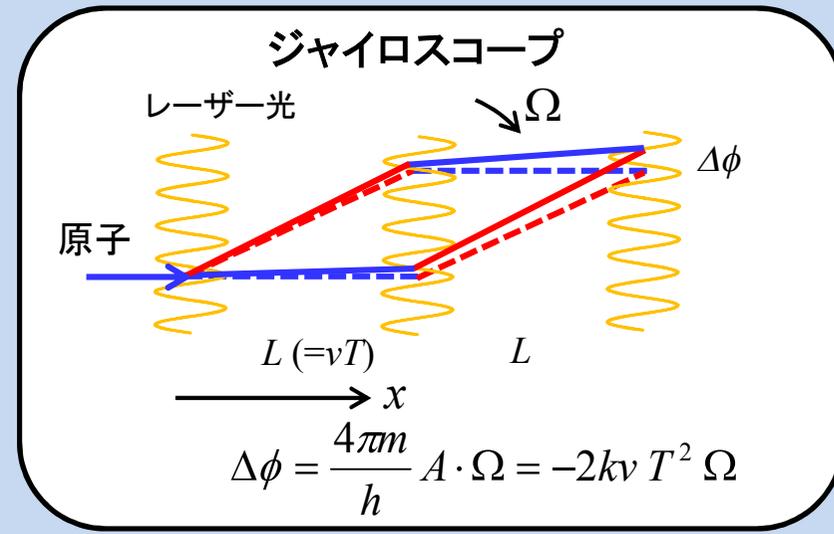
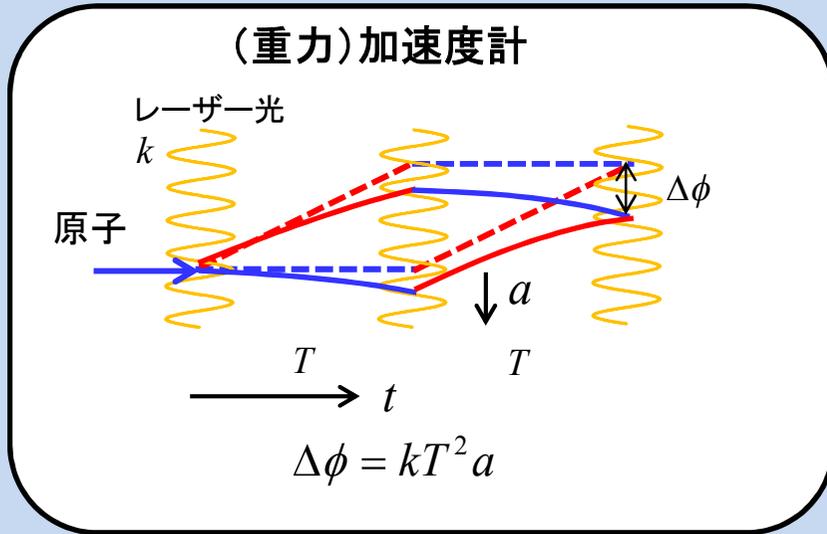


原子干渉計



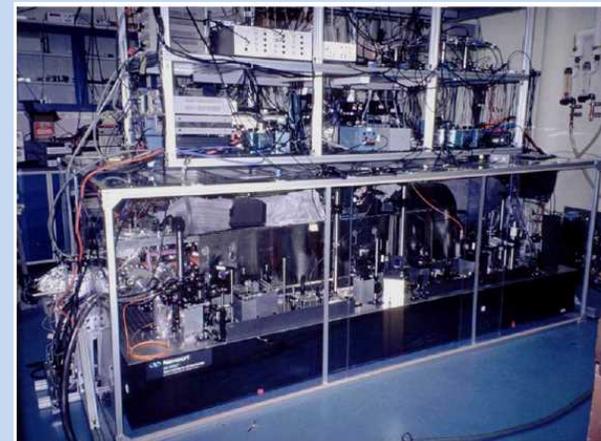
物質波の干渉を得るためレーザー冷却極低温原子を用いる

冷却原子を用いた原子干渉計(AI)慣性センサー



Stanford S.Chu

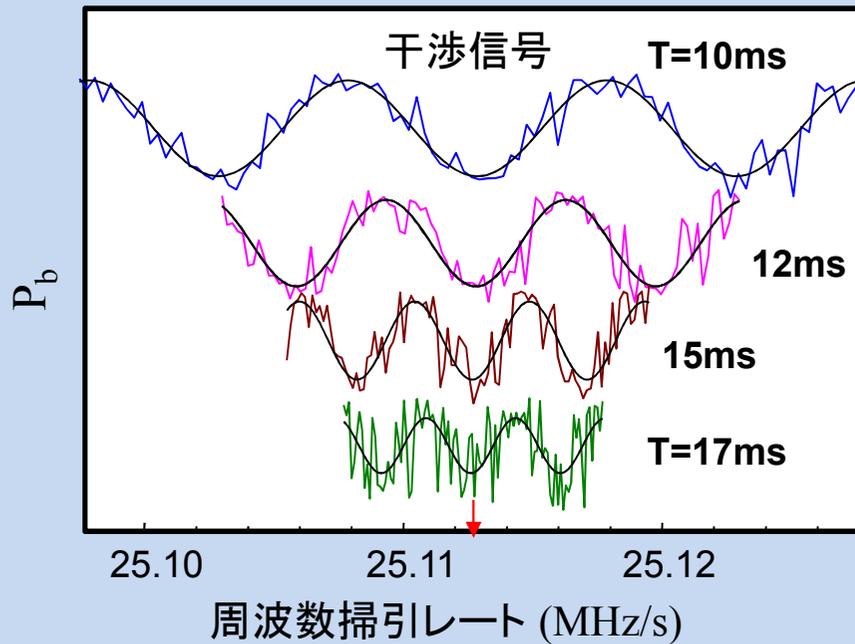
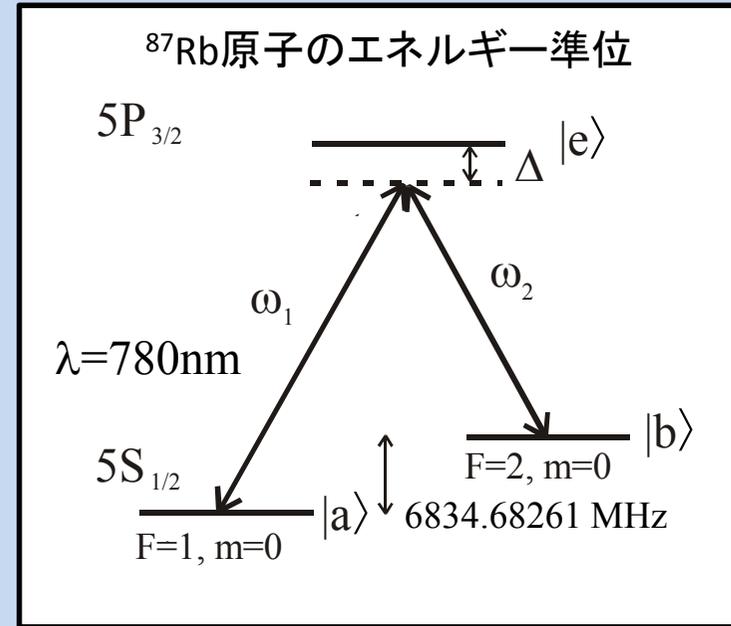
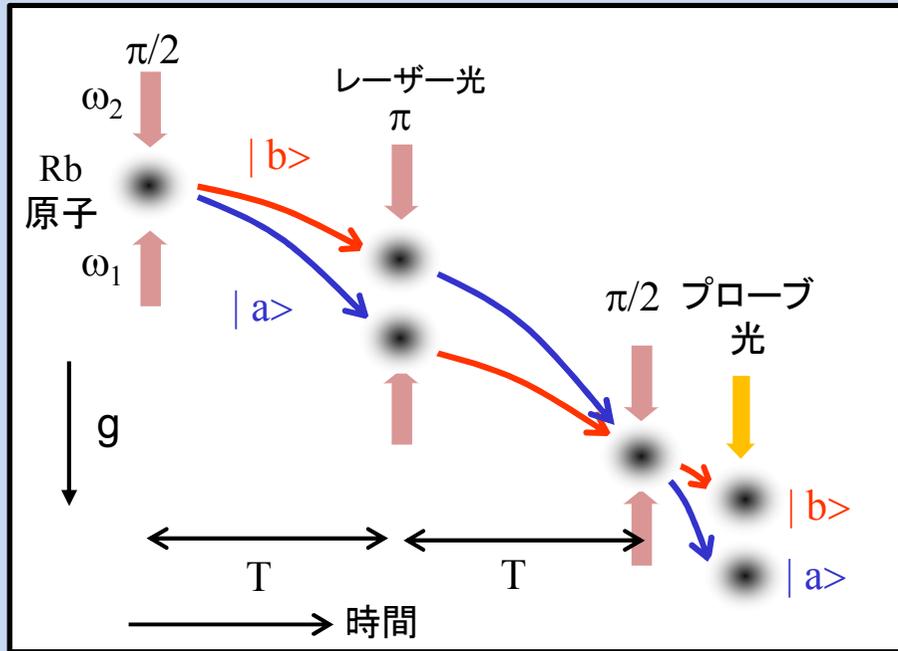
測定精度 $\Delta g/g \sim 3 \times 10^{-9}$ (3 μ Gal)



Stanford/Yale M. Kasevich

回転検出感度 3 μ deg/hr^{1/2}
 バイアス安定度 < 60 μ deg/hr

AI重力加速度計



原子の終状態が $|b\rangle$ である確率

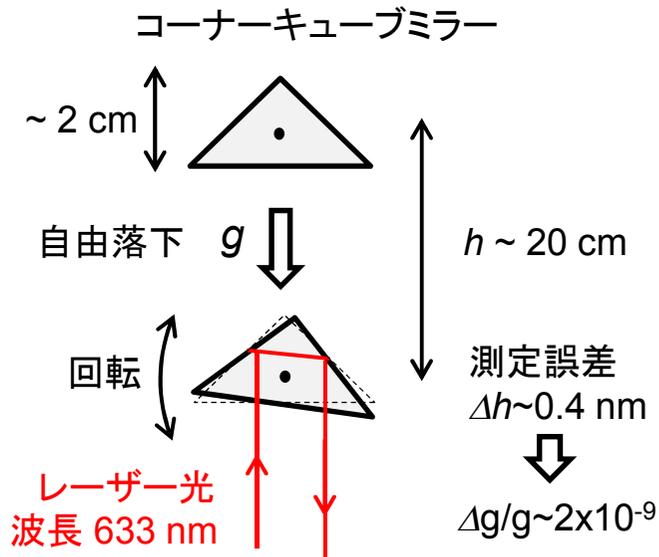
$$P_b = \frac{1}{2} [1 - \cos(\Delta\phi)]$$

$$\Delta\phi = k_{\text{eff}} g T^2 \quad g: \text{重力加速度}$$

$$k_{\text{eff}} = \mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2 = (\omega_1 + \omega_2)/c$$

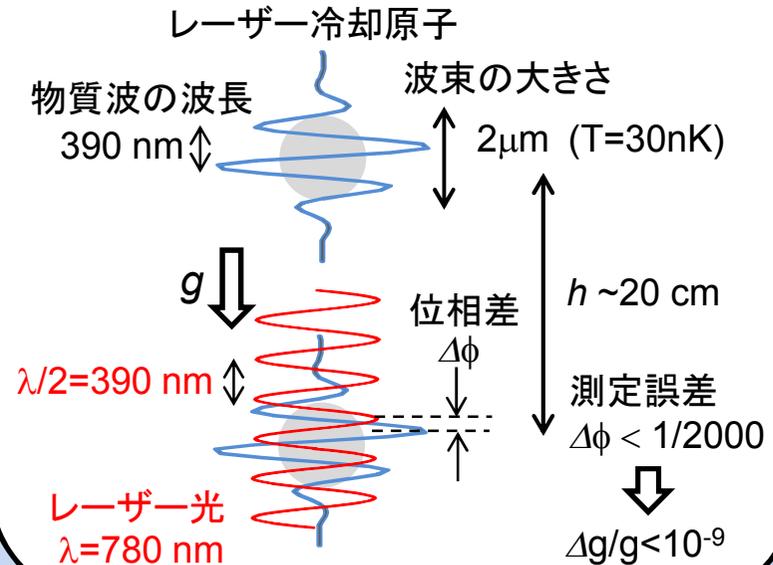
古典的な技術から量子技術へのパラダイムシフト

レーザー干渉計型重力計



- ・ミラーの落下距離をレーザー干渉計を用いて測定
- ・測定確度 $\Delta g/g \sim 2 \times 10^{-9}$
- ・ミラーの回転等によりこれ以上の性能向上は難しい
- ・マクロな大きさのセンサーを用いた古典的な技術の限界

原子干渉計型重力計



- ・原子の落下距離を物質波とレーザー光の位相差より測定
- ・極低温の原子をセンサーとして用いる事により高い測定確度が期待
 $\Delta g/g < 10^{-9}$
- ・原子1個がセンサーであるため、装置ごとの系統誤差が非常に小さい

従来の重力加速度計の問題点

・レーザー干渉計型絶対重力計 測定精度 $\Delta g/g \sim 2 \times 10^{-9}$
ミラーの上下運動による部品の摩耗 定期的な部品交換 長期連続運転が困難

・超伝導(相対)重力計 測定感度 $\Delta g/g \sim 10^{-12}$ 相対値測定
短期の感度は高いが長期的なドリフトがあり絶対重力計による定期的な校正が必要



レーザー干渉計型絶対重力計
FG-5 (Micro-g LaCoste社)



超伝導重力計
(GWR社)

地球物理 数mm/年程度の地面の隆起が測定可能になることが目標
標高差3mmのgの変化 $\Delta g/g \sim 10^{-9}$
大きな地震の前後のgの変化 $\Delta g/g \sim 10^{-9}$

測定精度 $\Delta g/g < 10^{-9}$ の長期連続運転可能な絶対重力加速度計が必要

AI慣性センサーの応用と最近の研究動向

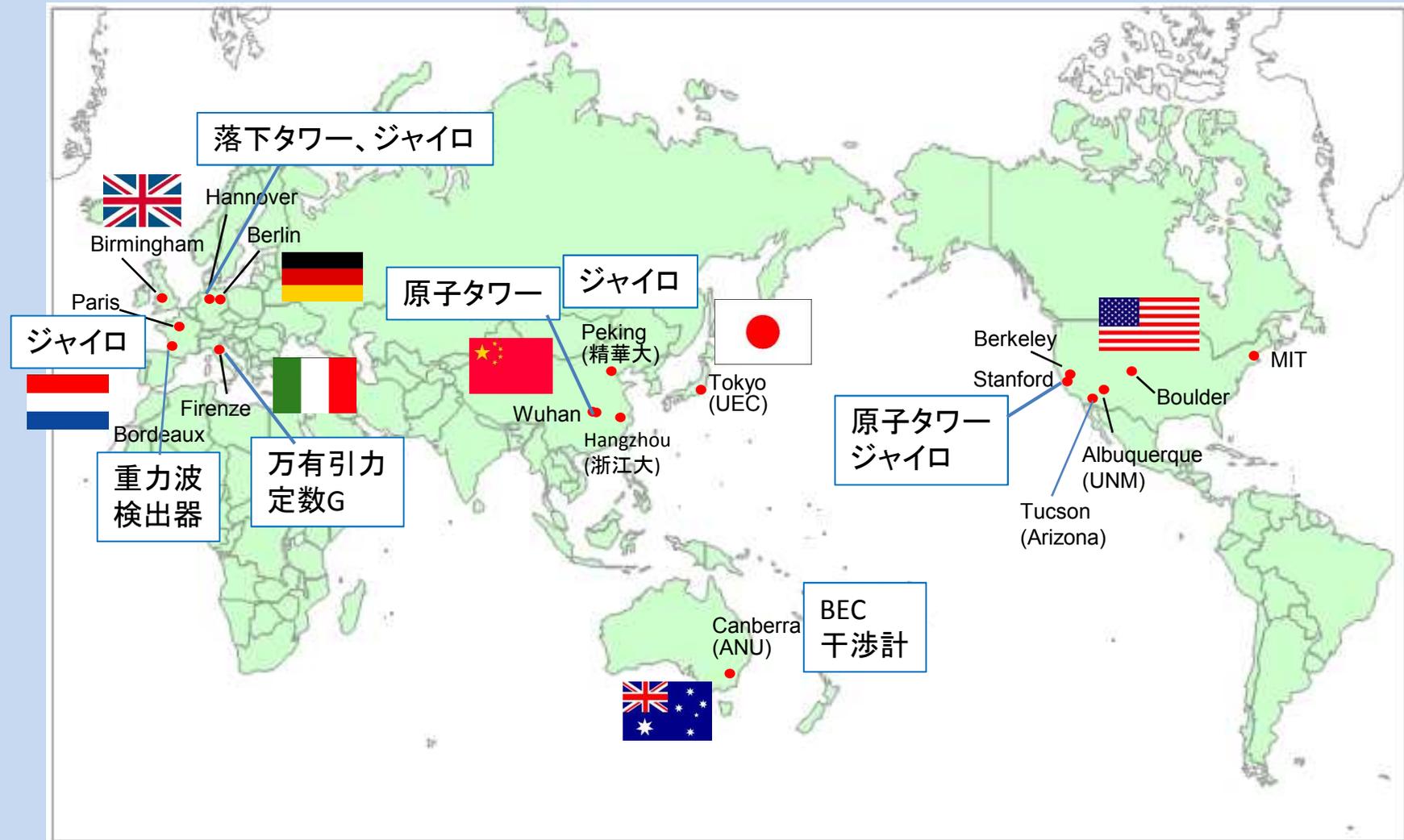
AI重力加速度計

- ・測地学、地球物理、資源探査のための可搬型重力加速度計の開発
用途 重力ポテンシャルマップ、地殻変動のモニター
- ・基礎物理定数 万有引力定数Gの精密測定
ワット・バランス法 kg原器に代わる質量標準
- ・基礎物理 一般相対論 等価原理の検証
重力波検出 宇宙空間 低周波(<1Hz)

AIジャイロスコープ

- ・慣性航法 ジャイロスコープ、加速度計を用いた位置決め
航空機、潜水艦、ミサイル
GPSが使えない環境下でGPSと同等の位置決め精度の実現が目標
AIジャイロはドリフトが非常に小さい

AI慣性センサーの各国の研究開発状況



AI慣性センサーの基礎物理への応用

一般相対性理論の弱い等価原理の検証

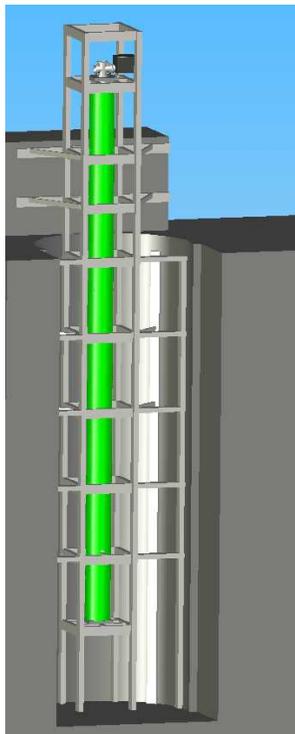
AI重力加速度計で異なる原子種で重力加速度 g の差異を測定 $\Delta g = g_A - g_B = 0?$

Stanford大
原子落下タワー

10m $T \sim 1s$

$^{85}\text{Rb} - ^{87}\text{Rb}$

$\Delta g < 10^{-15} g$ (目標)

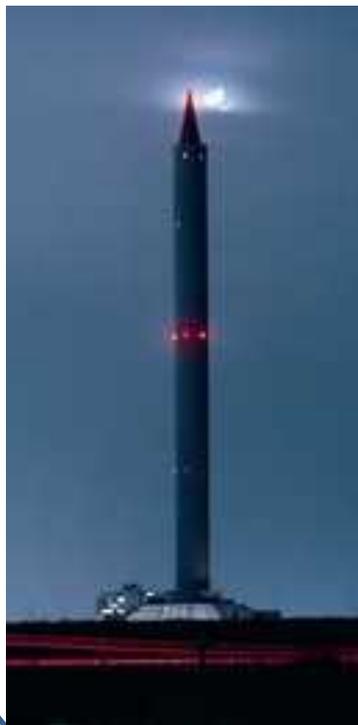


QUANTUS (Hannover大)

落下タワー (Bremen)

100 m $T \sim 5 s$

実験装置ごと自由落下



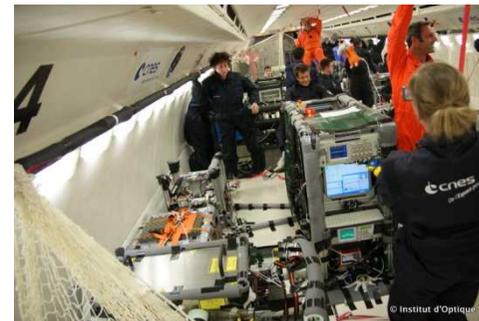
落下カプセル



ICE (Institut d'Optique)

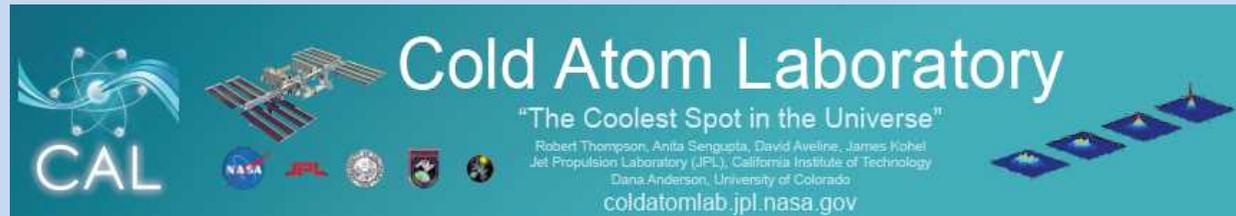
放物飛行 $T \sim 20 s$

$^{87}\text{Rb} - ^{39}\text{K}$



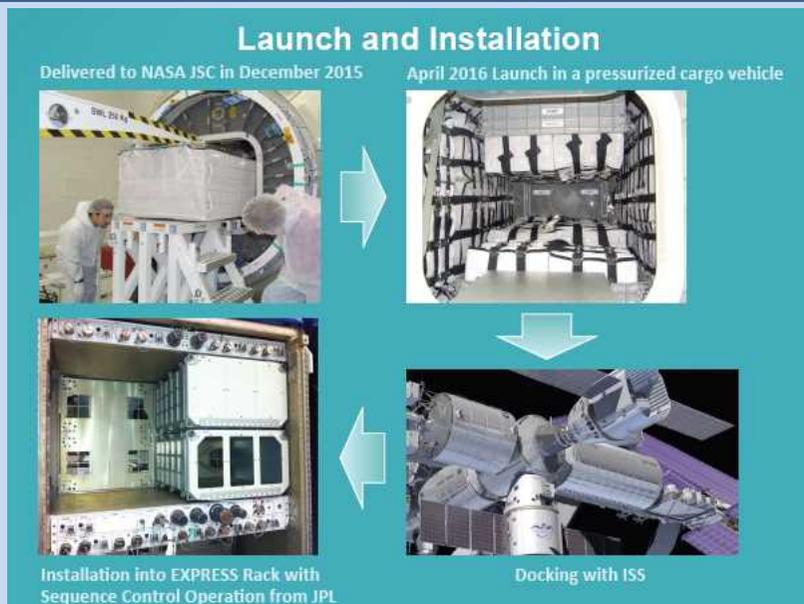
宇宙空間における微小重力下での原子干渉計実験

NASAの宇宙冷却原子実験室プロジェクト



CAL(Cold Atom Laboratory)の目標

- ・地上では重力の影響で実現が難しい1nK以下の極低温を国際宇宙ステーション(ISS)の微小重力下で実現して様々な物理の基礎実験を行う
- ・微小重力下でのBEC(Rb)やフェルミ縮退ガス(K) 温度<100pK 自由膨張時間>5s
- ・微小重力下での原子干渉計 相互作用時間>5s 等価原理の検証、ダークマターの検出



スケジュール

- 2012-2017/4 装置の開発
- 2017/8 装置の打ち上げ
- 2017-2020 宇宙実験

ヨーロッパでも同様の実験計画

QWEP (ISS), STE-QUEST (人工衛星)
中国でも自国の宇宙ステーションでの実験を計画(北京大学)

<http://coldatomlab.jpl.nasa.gov/>

AI慣性センサーの実用化

ベンチャー企業による可搬型実用機の開発

AOSense, Inc.
Stanford 大



Laser system/
sensor head

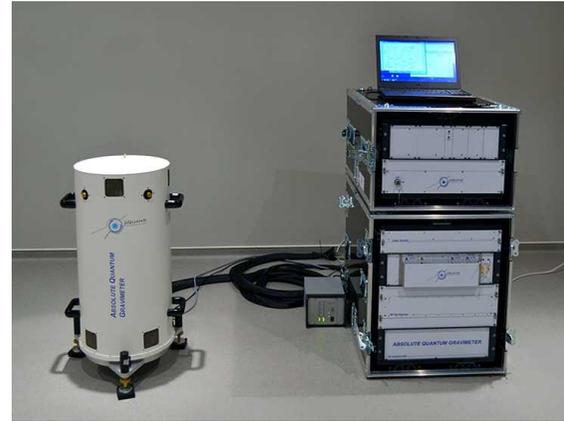
Control electronics Magnetic shield
(Φ4"×13")

AI重力加速度計

最初の商業AI重力加速度計
測地学、地球物理、資源探査用

DARPAのプログラムで高性能慣性
誘導システム用のAIジャイロの開発
も行っているが詳細は不明

Muquans
パリ天文台 SYRTE, Institut d'Optique



AI重力加速度計

小型可搬型実用機
性能はレーザー干渉計型とほぼ同程度
高繰り返し測定(2-3 Hz) 測定時間短縮
可動部無し 装置の維持管理が容易
長期連続測定(~1年)が可能

AI慣性センサーの今後の研究の方向

AI慣性センサーの潜在的に高い性能はまだ実現されていない

AI重力加速度計

・検出感度の向上 位相感度 $\Delta\phi = k_{\text{eff}} T^2 g$

等価原理の検証 検出感度の限界の追求 $\Delta g/g < 10^{-12}$

長い相互作用時間 $T=0.2\text{s}$ (原子泉) $\rightarrow 1\text{s}$ (原子タワー10m) $\rightarrow >10\text{s}$ (微小重力下)

可搬型実用機 小型(<1m)で高感度の実現 $\Delta g/g < 10^{-9}$

大きな運動量移行 $\Delta p = 2\hbar k \rightarrow n\hbar k$ $n=100$

量子射影雑音低減 $\Delta\phi_{\text{SN}} = 1/\sqrt{N}$ (N :原子数) $\rightarrow 1/N$ 少ない原子数で感度が維持

・確度の向上(系統誤差の低減)

現在の確度は従来のレーザー干渉計型と同程度 $\Delta g/g = 3 \times 10^{-9} \rightarrow 1 \sim 3 \times 10^{-9}$ (目標)

誤差の主な要因 レーザー光の波面収差、低コヒーレンス原子源

極低温原子源 温度<10 nK、点原子源

AIジャイロスコープ

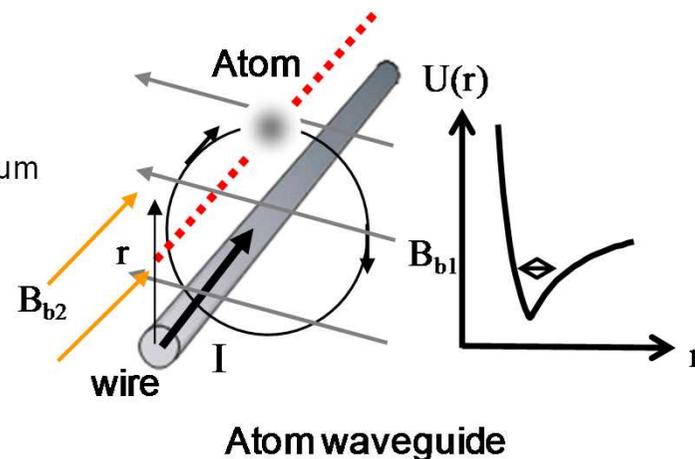
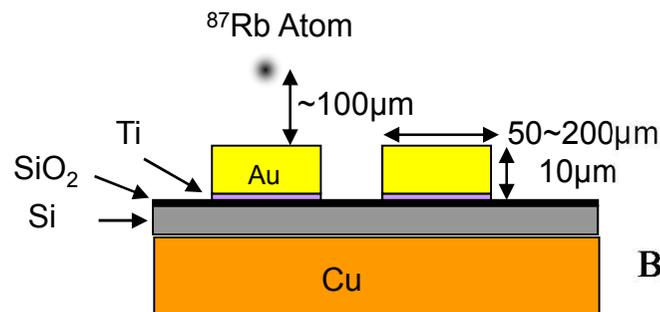
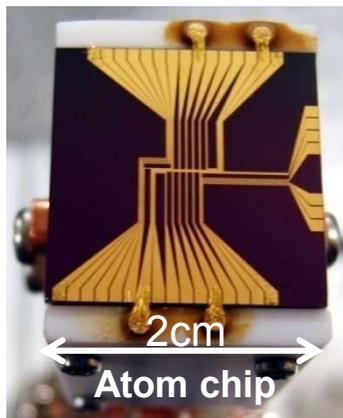
慣性航法のためのジャイロとして利用するには小型化が必須

検出感度 $\Delta\phi = (4\pi m/h) \cdot A \cdot \Omega = -2kv T^2 \Omega$ A : 干渉計が囲む面積

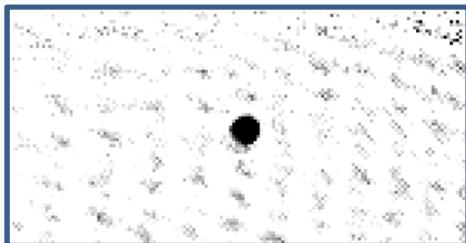
原子線(2m, $A=20\text{mm}^2$) \rightarrow 3D MOT ($\sim 20\text{cm}$, $A=30\text{mm}^2$)

\rightarrow アトムチップ上の原子導波路 (<1cm) ?

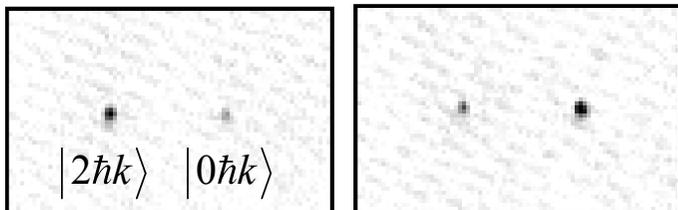
アトムチップを用いた原子導波路



原子導波路中のBEC原子

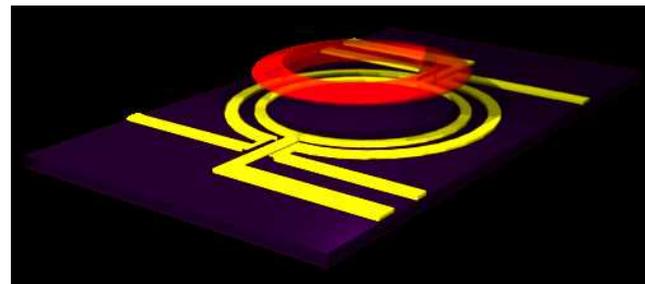


アトムチップ上のBEC原子干渉計



長い相互作用時間 $T = 0.5 \sim 0.1 \text{ s}$

原子導波路を用いたAIジャイロスコープ(提案)



パリ天文台SYRTEのWebより
<https://syrtte.obspm.fr/spip/science/iaci/>

日本における研究推進の課題

- ・早い時期に研究がスタートするが、多くが原理実証で終わる
原子波干渉(1992)、BEC干渉計(2000)、重力加速度計(2005)
- ・研究プロジェクトからの継続的な研究支援が必要
科研費重点領域(重力波(2001-2006))、JST/CREST(量子情報(2003-2008))

- ・国の研究支援のもとでの戦略的な研究開発が早急に必要
アメリカ(DARPA, NASA)、イギリス(Quantum Technologies Programme)
- ・実用化に向けて小型・高性能化のための周辺技術を含むさらなる
ブレークスルーが必要 企業等との協力が不可欠
- ・国内でAI慣性センサーを研究するグループが少ない 現在は電通大のみ
若手の研究者の育成 国立研究所(産総研、NICT)や企業との連携
- ・日本は冷却原子の研究者の数は多いが、応用技術への関心が低い
一方、原子時計に関しては多くの研究実績があり、AI慣性センサーの研究と
共通する要素が多く、連携して研究する事により大きな発展が期待できる

・AIジャイロなどの慣性センサー技術は海外では軍事技術として非公開で研究開発が進む可能性があり、後に民生用や基礎科学にこの技術を利用することが困難になる。このため自前で基礎研究を行い、その後の展開を企業等と連携して行う事が考えられる。

例) 重力波検出器に必要な反射率99.99%以上の高性能ミラーはレーザージャイロ用として米国で開発された技術であったため、以前は日本ではこのミラーの製造ができず、米国から購入するしかなかった。

まとめ

- ・AI慣性センサーは量子技術の中で実用化が期待される重要な技術で、中でもAI重力加速度計は多くの応用およびニーズがあり、早急に本格的な研究開発をスタートする必要がある。
- ・AIジャイロスコープは慣性航法において重要な技術となりうるため、産官学で連携してこれから研究開発を行う必要がある。
- ・この分野の研究を活発にするためには若手の研究者の育成が必要不可欠で、これにはある程度継続的な研究支援が求められる。