

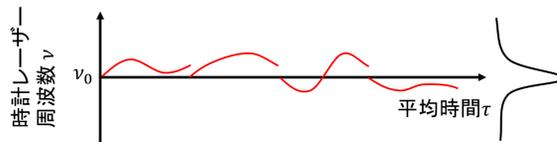
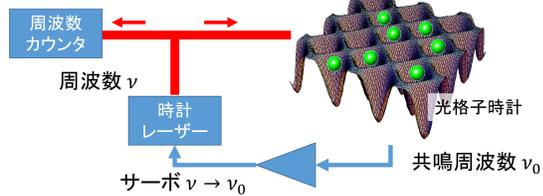
光科学・量子情報・量子計測 香取・牛島研究室

「光格子時計で見る歪んだ時空」

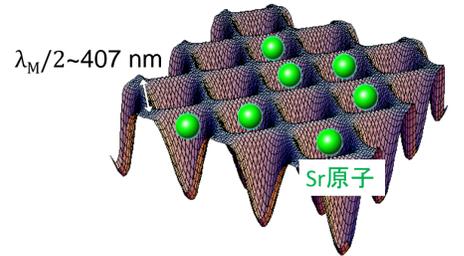
光格子時計の高精度化とその科学的・工学的応用

光格子時計: レーザー光を用いて極低温まで冷却された原子気体を、光格子(定在波)で捕獲。魔法波長 λ_M の光格子を用いることで原子の共鳴遷移を精密に計測する。 H. Katori et al. PRL, 91, 173005 (2003)

光格子時計(原子時計)の動作



サーボによって、時々刻々と揺らぐ時計レーザーの周波数 ν を原子の共鳴周波数 ν_0 に安定化する。



光格子時計の概念図

香取研究室で提案・実現された光格子時計は周波数精度18桁を実現

I. Ushijima et al. Nat. Phot., 9 185 (2015)

- 次世代の時間標準として「秒の再定義」に期待
- 従来の時計の概念を超える計測ツールとしての応用や新たな物理の探求

相対論的測地

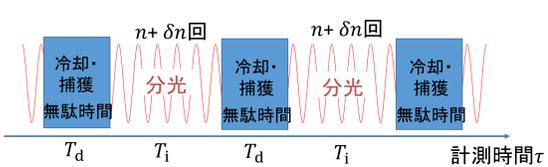
高い(重力ポテンシャルが大きい)所にある時計周波数 $\nu = \nu_0(1 + g\Delta h/c^2)$ 、 $\frac{g\Delta h}{c^2} \approx 1.1 \times 10^{-18} \Delta h/\text{cm}$ R. V. Pound et al. PRL 4, 337-341 (1960)

光格子でラムディック束縛された多数の極低温原子($\sim \mu\text{K}$)を同時に分光
 ・ドップラー広がり抑制
 ・量子射影雑音(QPN)の低減

連続動作光格子時計の開発

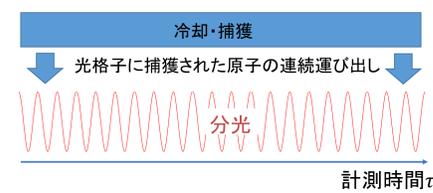
今までの光格子時計における周波数計測:

- 原子のレーザー冷却(A,B)・光格子に捕獲
- 時計周波数 ν_0 の計測(分光)
- 観測された分光情報をもとに周波数を積算



開発中の連続動作光格子時計:

空間的に1.冷却と2.分光の領域を分けて同時進行



同じ位置で冷却・捕獲および分光を行うので、分光を行えない無駄時間が生じる。

異なる位置で冷却・捕獲および分光を行うので、常に分光が可能。

周波数計測は、観測時間 T_i の間の波の数 n を数えることに相当($\nu_0 = n/T_i$)。この時の数え間違い δn は、高々 ± 1 。これを m 回積算した時、周波数計測の精度(偏差) σ_A は、

$$\sigma_A = \frac{\sqrt{\sum_j^m \delta n_j^2}}{m \cdot n} = \frac{1}{\sqrt{m} \cdot n} = \frac{1}{\sqrt{m}} \frac{1}{\nu_0 T_i} = \frac{1}{\nu_0} \frac{1}{T_i \sqrt{m}}$$

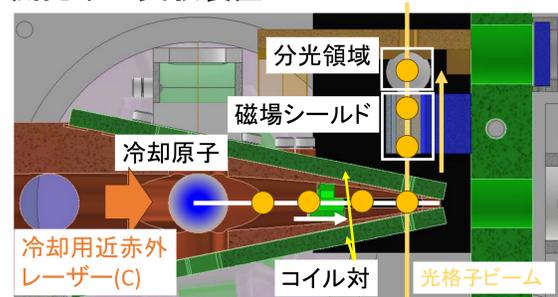
この時の周波数計測の精度(偏差) σ_B は、 $\nu_0 \tau$ 回分の数え間違い δn が高々 ± 1 なので、

$$\sigma_B = \frac{\sqrt{\delta n^2}}{\nu_0 \tau} = \frac{1}{\nu_0 \tau}$$

連続動作により、光格子時計の周波数計測の精度改善が早くなる。

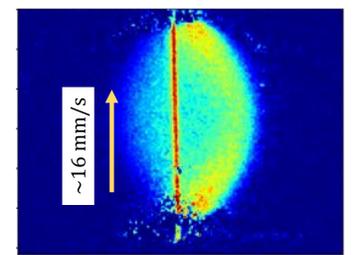
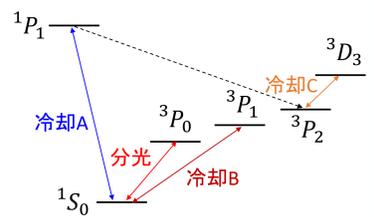
(フーリエ限界) →リアルタイムの相対論的測地などの応用へ

開発中の実験装置



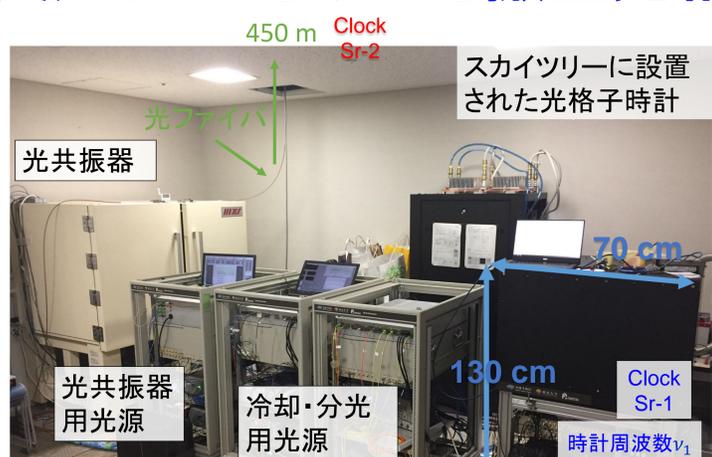
- 冷却Aの遷移で原子を1 mK程度に冷却、トラップ。
- 上記の原子の一部が漏れ出して、光格子ビームの位置まで移動。
- 冷却Cの遷移により10 μK 程度に冷却され、移動する光格子ビーム(ポテンシャル深さ $\sim 100 \mu\text{K}$)にトラップされる。
- 磁場シールド内で原子と分光レーザーが相互作用し、分光領域で原子の励起率が測定される。
- 励起率から分光レーザーの周波数ズレを測定、補正する。

これらが連続(同時)に行われる



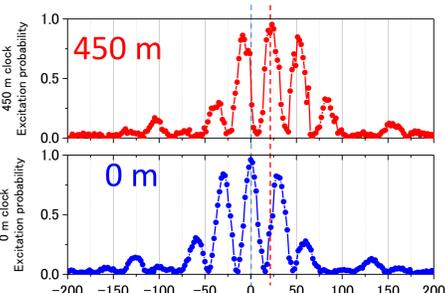
移動する光格子ビームで連続的に引き出された分光領域の原子蛍光

実用化に向けた可搬型光格子時計



重力赤方偏移(相対論)の検証
 $(\nu_2 - \nu_1)/\nu_1 = (1 + \alpha)g\Delta h/c^2$, $\alpha = 0?$

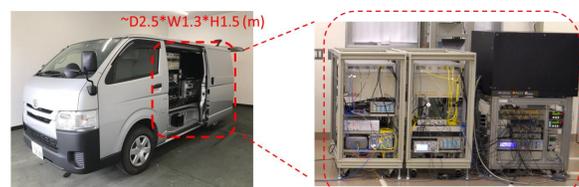
光格子時計による相対論的測地



$\Delta h = 450 \text{ m}$
 $\Delta \nu = 21 \text{ Hz}$

天望台では1日当たり、4ナノ秒早く進んでいる。

・車載型光格子時計による輸送



・Aisin AW CO., LTD (Hiace, Toyota Mortor Corp.)

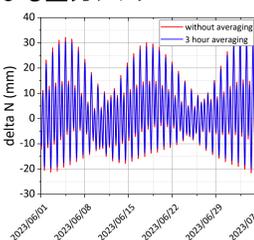
社会実装に向けた実験(潮汐効果、国際比較)

・理研一水沢の時計比較

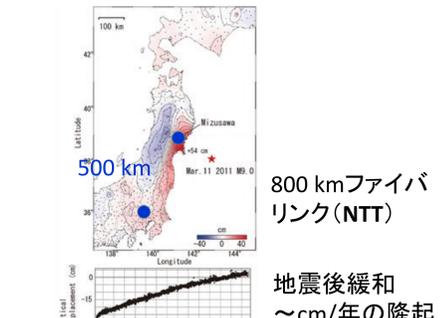
ref. Y. Tanaka and H. Katori, J. Geodesy 95, 93 (2021)



潮汐による重力シフト



潮汐効果による周波数変動
 $\sim \text{cm}/6\text{時間}$



800 kmファイバリンク(NTT)

地震後緩和
 $\sim \text{cm}/\text{年}$ の隆起

今後:
 ・自由空間リンク(西オーストラリア大)
 ・重力加速度 g 測定

・欧州での国際比較: 秒の再定義

