

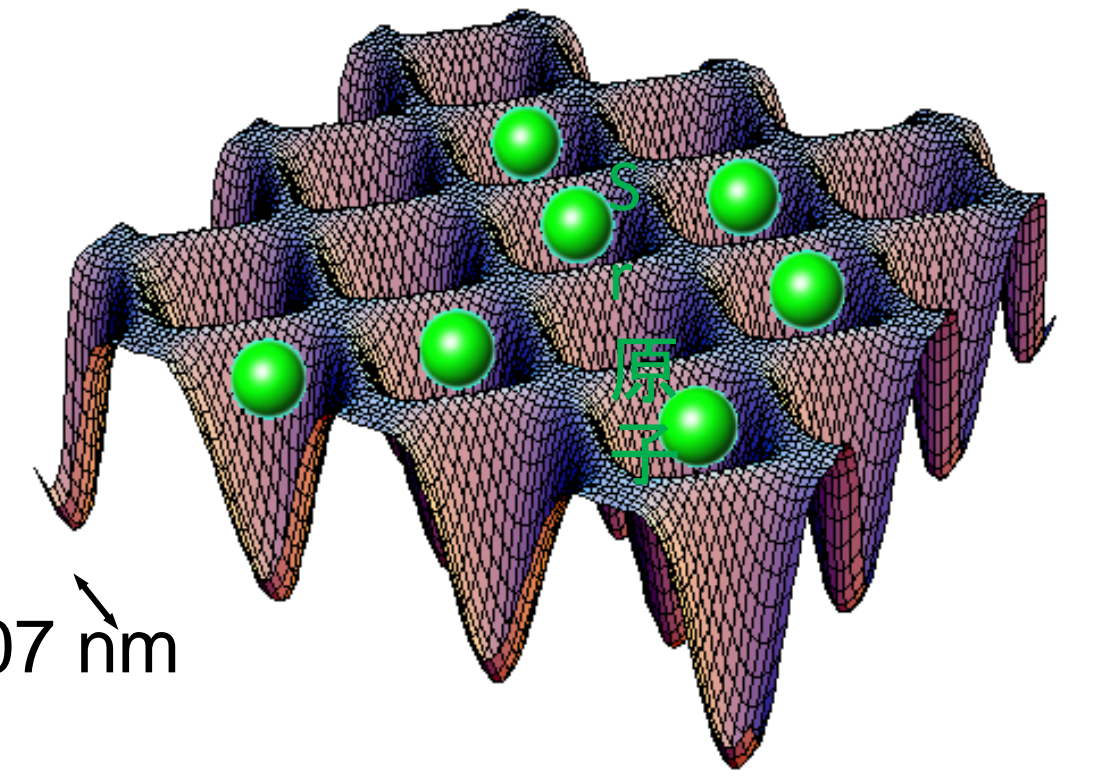
光科学・量子情報・量子計測 香取・牛島研究室 「光格子時計で見る歪んだ時空」

光格子時計の高精度化とその科学的・工学的応用

H. Katori et al. PRL, 91, 173005 (2003)
I. Ushijima et al. Nat. Phot., 9 185 (2015)

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

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。



$\lambda_M/2 \sim 407 \text{ nm}$

光格子時計の概念図
 μK まで冷却された原子を光格子に捕獲

- ・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

物理定数の恒常性 微細構造定数: $\alpha = e^2/4\pi\epsilon_0\hbar c \approx 1/137$

原子のエネルギー準位、ディラック理論: $E_{n,j} = -\frac{Z^2 Ry}{n^2} \left[1 + \frac{\alpha^2 Z^2}{4n^2} \left(\frac{4n}{j+1/2} - 3 \right) + O(\alpha^4 Z^4) \right]$

核電荷 Z の大きな原子ほど、相対論補正が大きい。 Z が異なる異種(A,B)原子時計の遷移周波数の比 E^A/E^B は、時間、空間的に一定か?
→微細構造定数 α は時間・空間的に一定か?

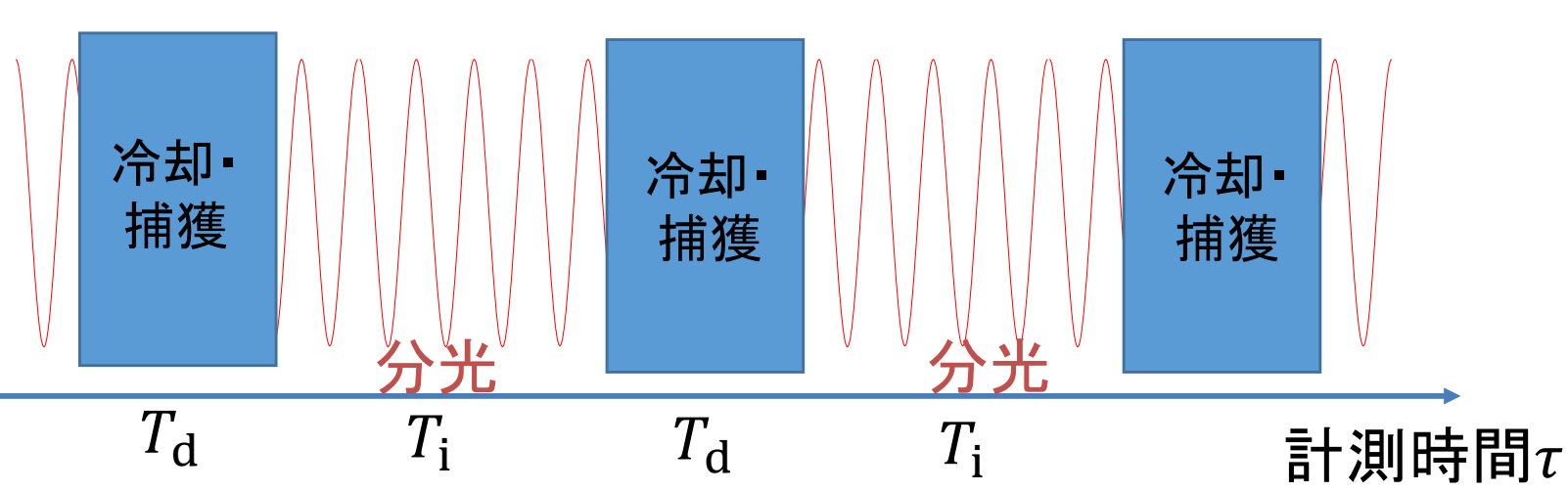
相対論的測地

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)

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:

1. 原子のレーザー冷却・光格子に捕獲
2. 時計周波数 ν_0 の計測(分光)
3. 観測された分光情報をもとに周波数を平均



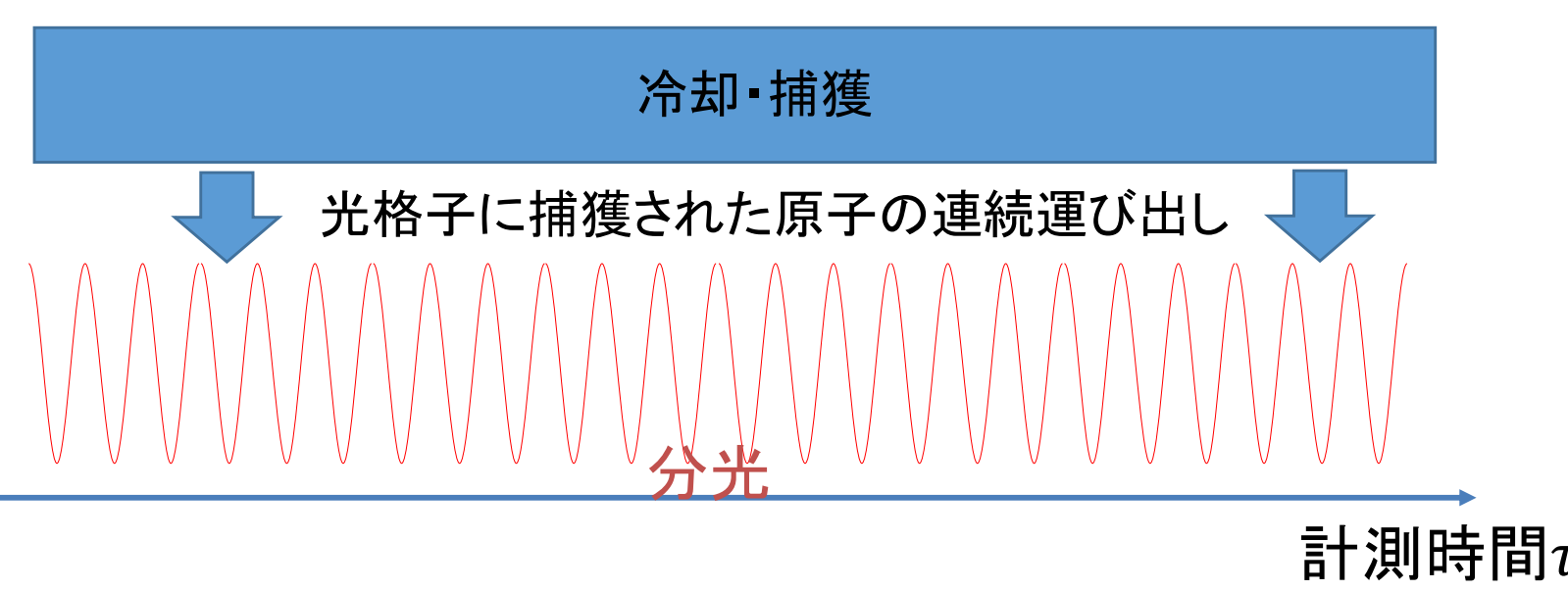
同じ位置で冷却・捕獲および分光を行うので、分光が断続的になる。

観測時間 T_i で達成できる周波数計測の不確かさは、 $\delta\nu \cdot T_i \sim 1$ より、 $\delta\nu \sim 1/T_i$ 。(フーリエ限界)
原子を準備する時間も含めて、1回の測定時間は $T_i + T_d$ 。
全測定時間 τ での測定回数は、 $m = \tau/(T_i + T_d)$
 m 回測定後の、周波数計測の相対的不確かさは

$$\frac{\Delta\nu}{\nu_0} = \left(\frac{\delta\nu}{\nu_0} \right) / \sqrt{m} = \frac{1}{\nu_0} \frac{\sqrt{T_i + T_d}}{T_i} \frac{1}{\sqrt{\tau}}$$

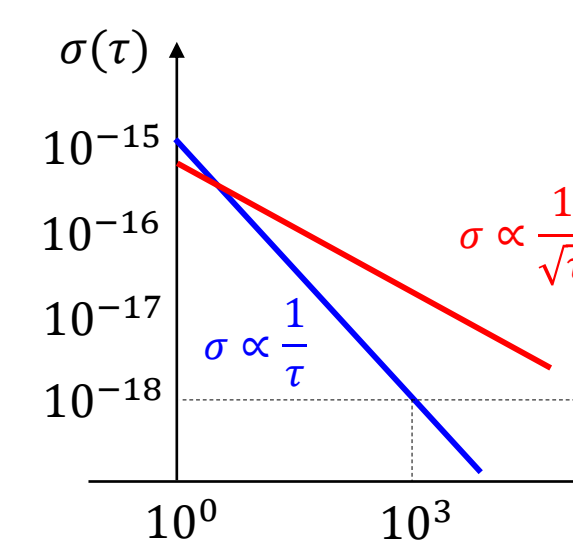
現在開発中の連続動作光格子時計:

空間的に1.冷却と2.分光の領域を分けて同時進行



異なる位置で冷却・捕獲および分光を行うので、連続的に分光が可能。

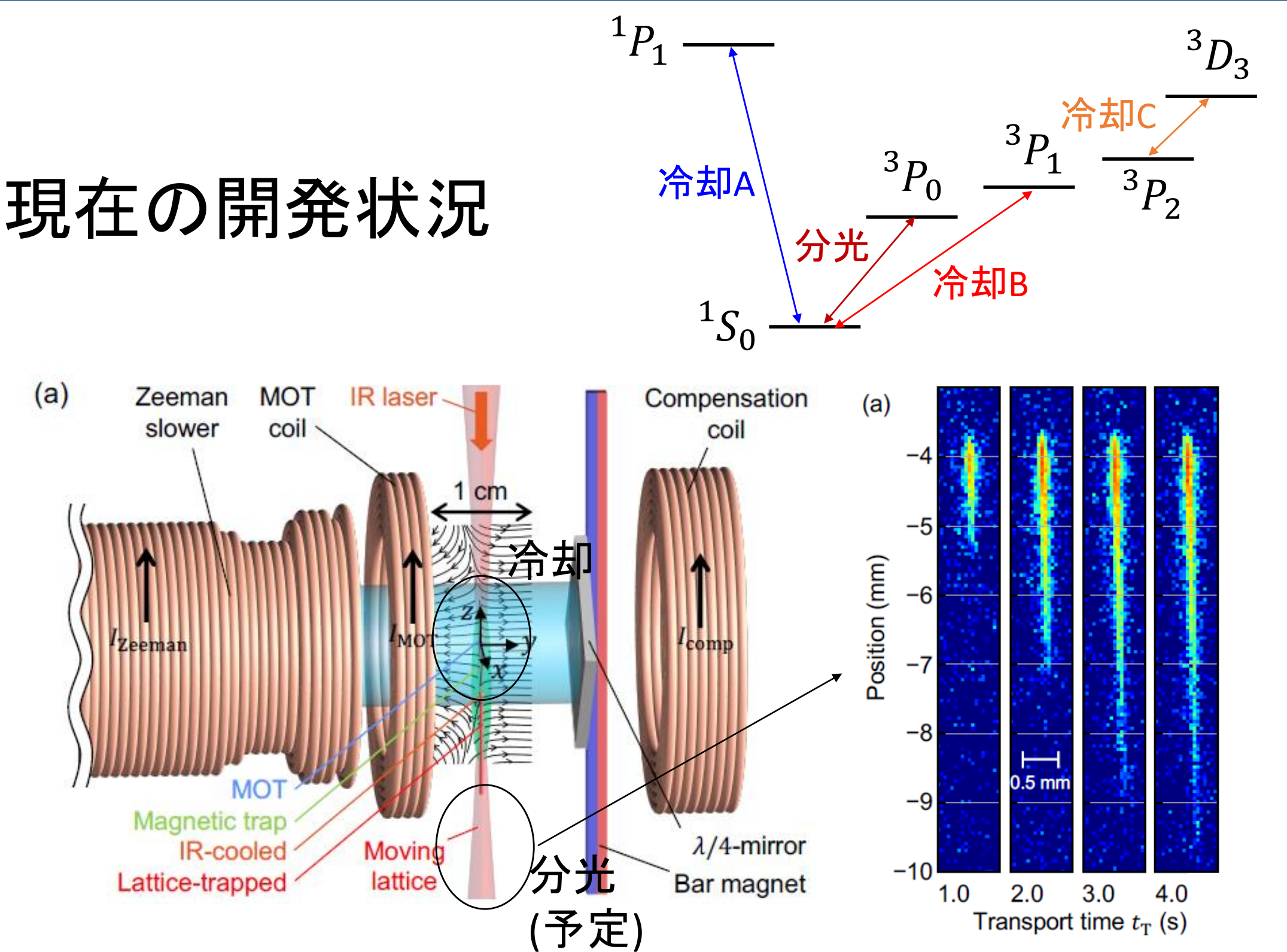
観測に応じて時計レーザー周波数を調整しながら τ 時間測定を続けられれば、周波数計測の不確かさは、 $\delta\nu \sim 1/\tau$ で向上。(最終的には、光格子時計の量子限界 10^{-19} がこのスケールを制限)



$$\frac{\Delta\nu}{\nu_0} = \frac{\delta\nu}{\nu_0} = \frac{1}{\nu_0 \tau}$$

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。
→リアルタイムの相対論的測地などの応用へ

現在の開発状況



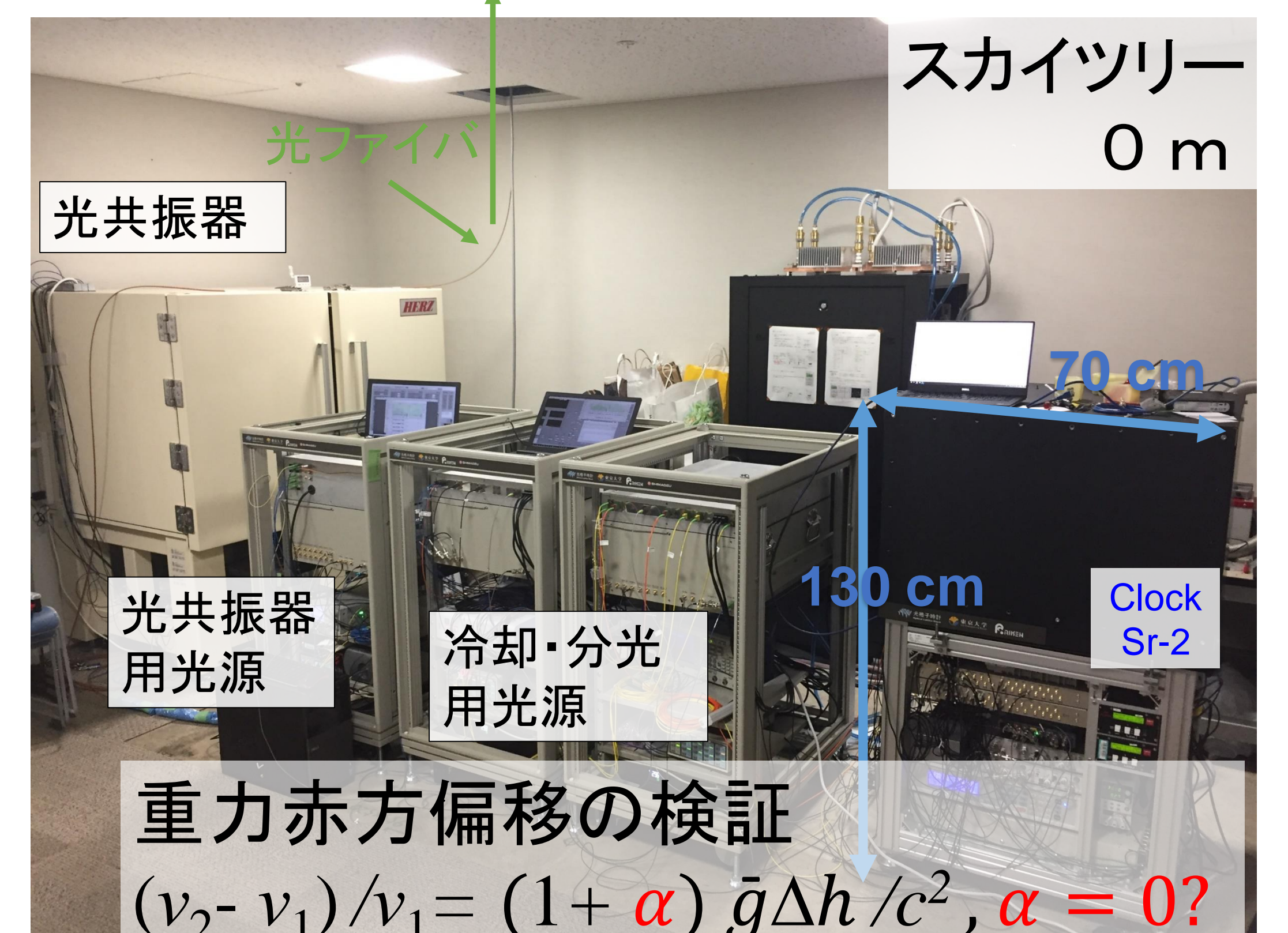
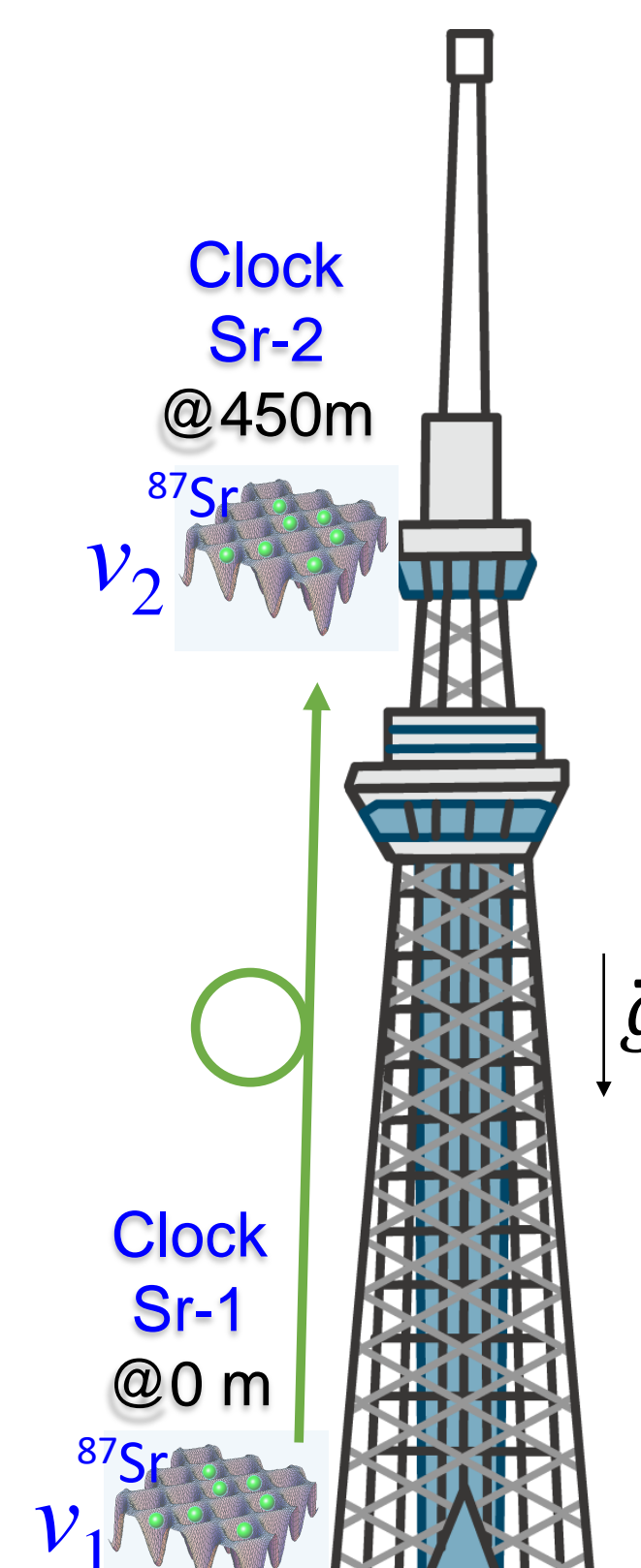
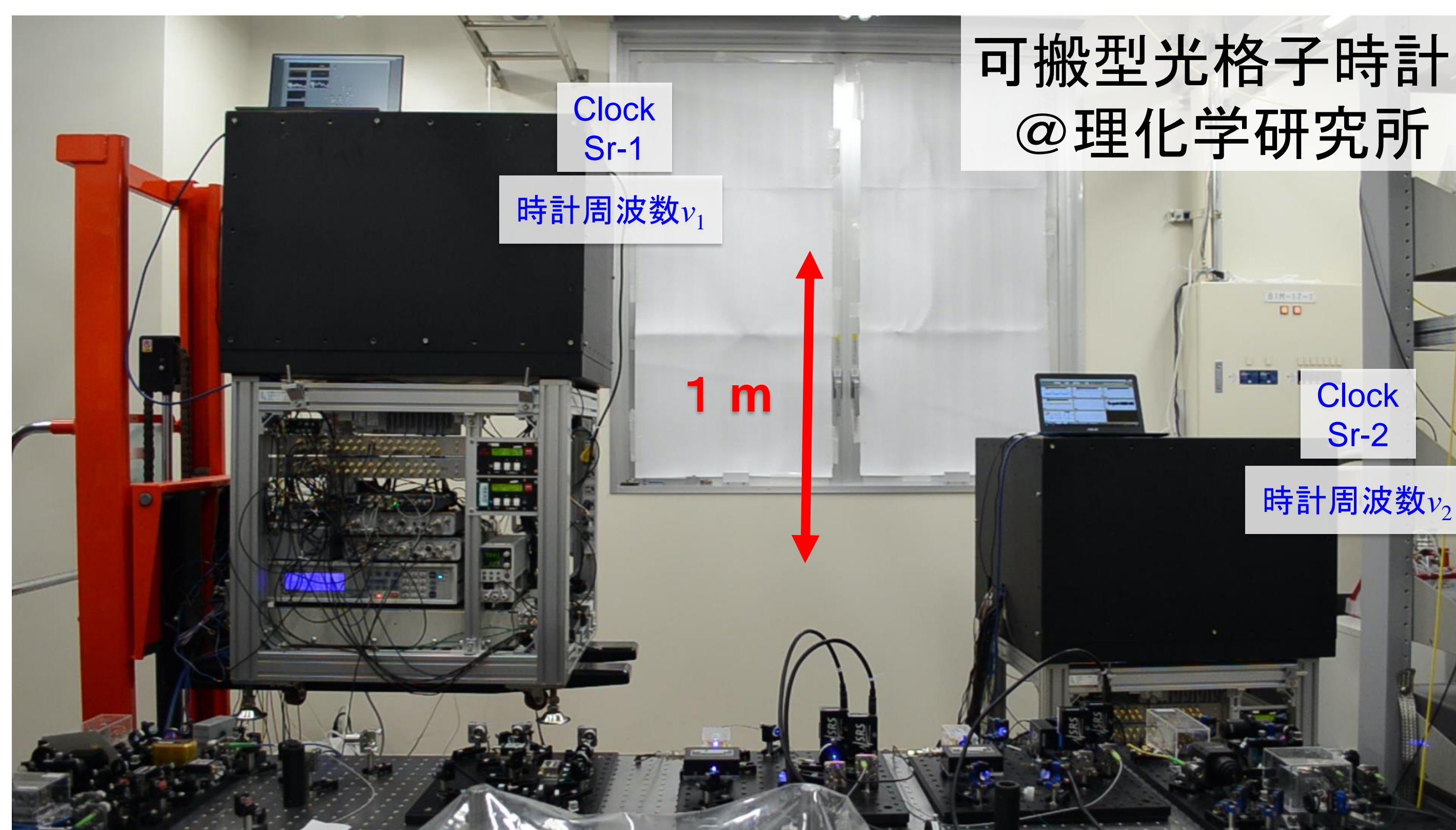
冷却遷移C (IR laser)を用いて、連続的に光格子にトラップされ取り出された原子

R. Takeuchi et al. APEX(2023) accepted

この取り出された原子に対して、縦励起ラムゼー分光法を適用することで、連続運転光格子時計の実現を目指す。

H. Katori. APEX. 14, 072006 (2021)

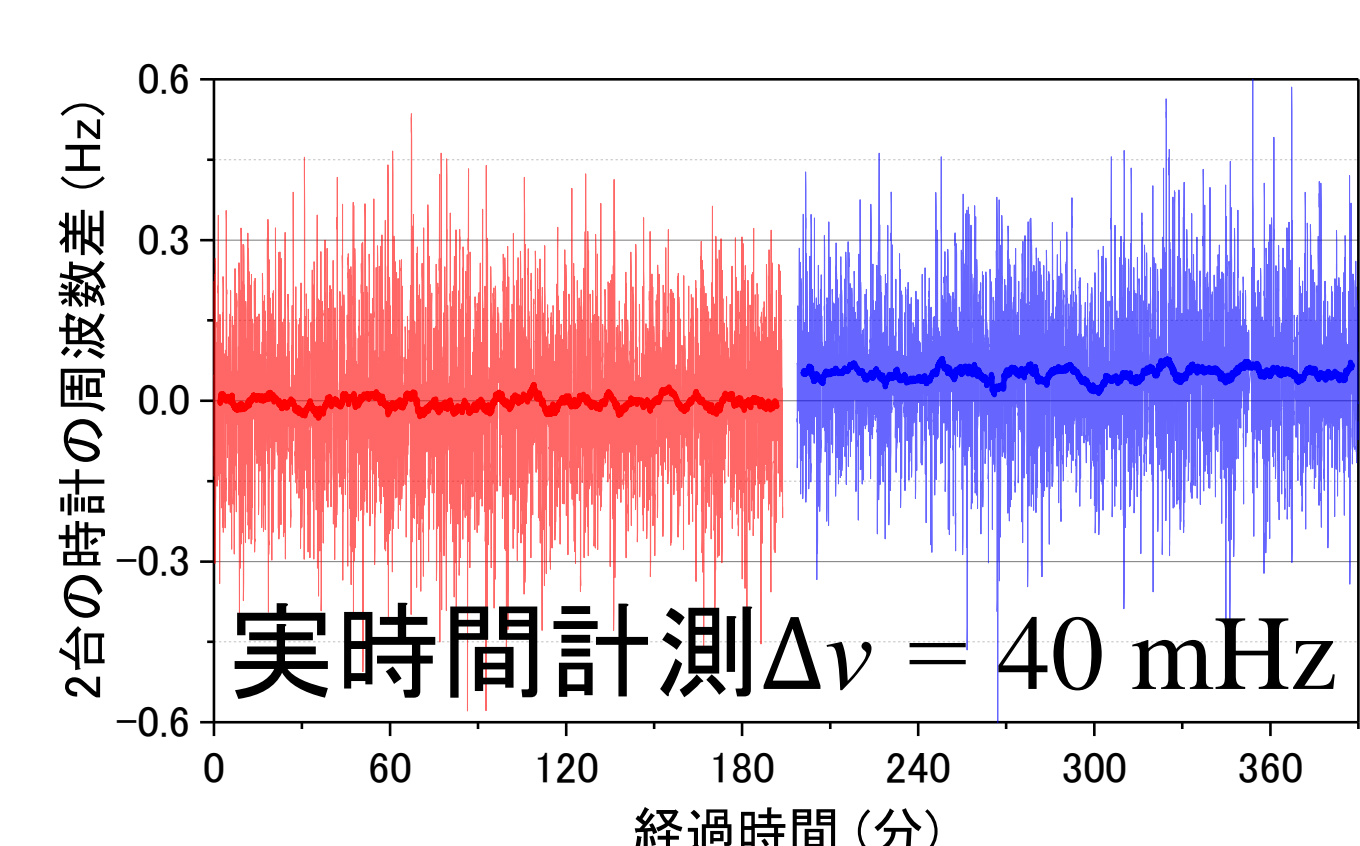
実用化に向けた可搬型光格子時計(プロトタイプ)



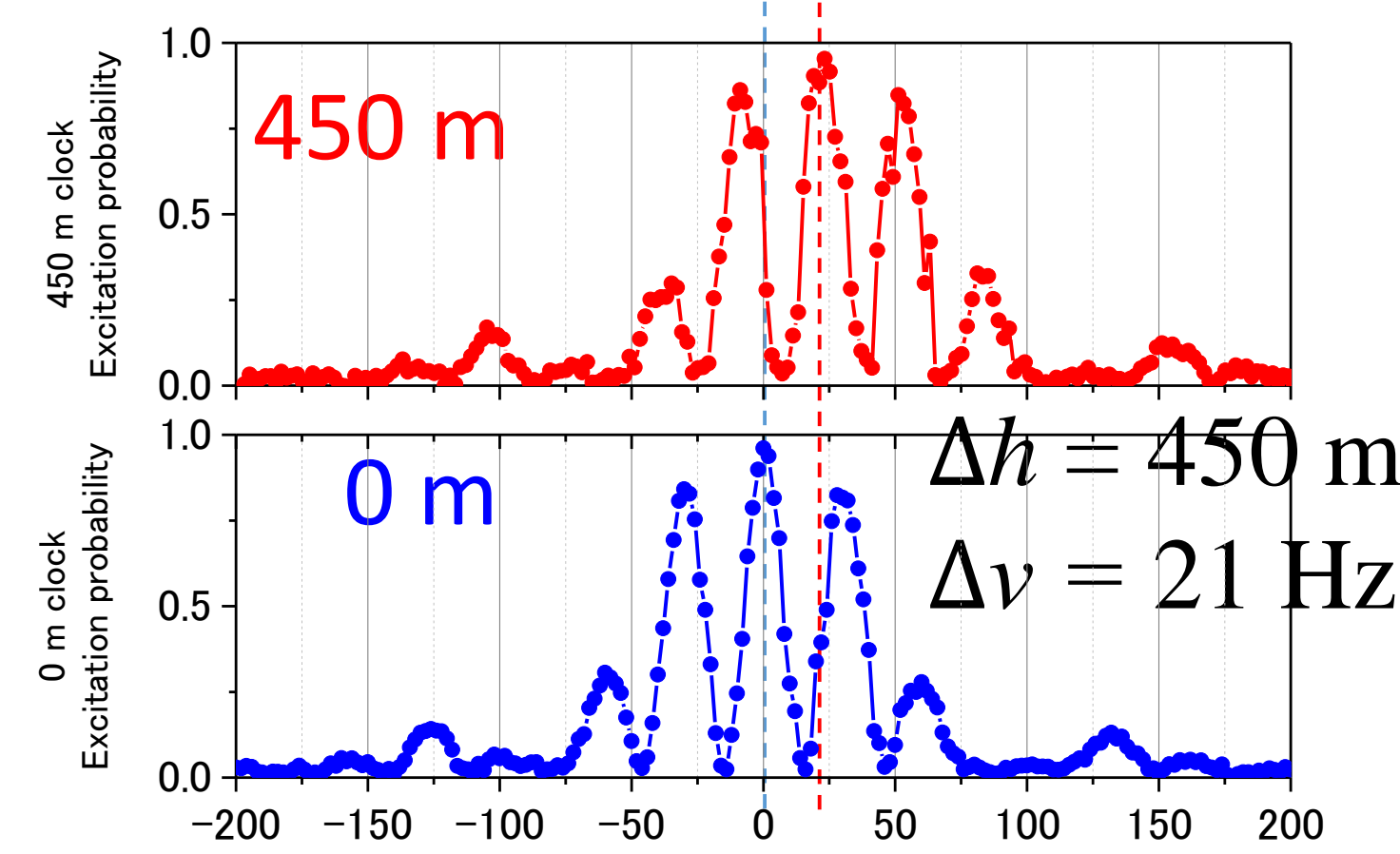
重力赤方偏移の検証
 $(\nu_2 - \nu_1)/\nu_1 = (1 + \alpha) \bar{g}\Delta h/c^2$, $\alpha = 0?$

可搬型光格子時計による相対論的測地

社会実装に向けた実験(潮汐効果、国際比較)



1 mリフトアップ前後の周波数差
赤・青線は4分の隣接平均



450, 0 mの時計分光



車載型光格子時計の輸送
和光市(理研)の時計と比較

