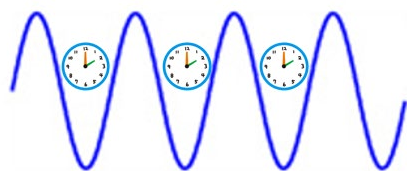




O-LEAP 人材育成プログラム
量子技術教育のためのオンラインコース・サマースクール開発プログラム

Hamiltonian



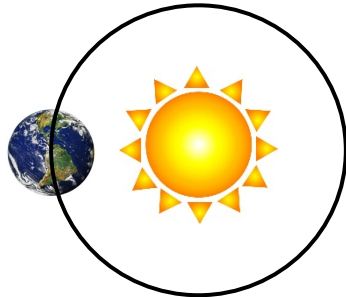
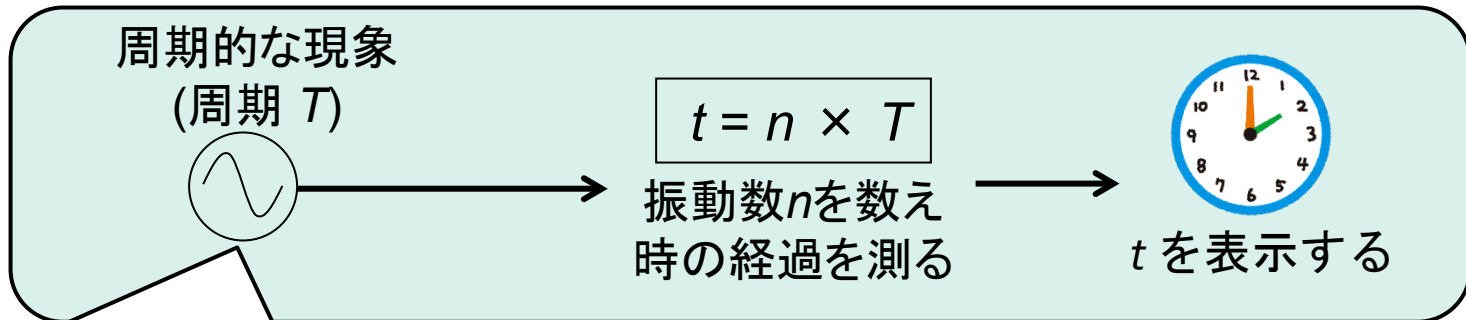
光格子時計 PART I

理化学研究所
山口 敦史

$|0\rangle + |1\rangle$

1. 導入

時計とは何か？



地球の公転
(周期1年 $T = 3.2 \times 10^7$ 秒)



地球の自転
(周期1日 $T = 8.6 \times 10^4$ 秒)

⋮

周期が長い

他の惑星や潮汐の影響を受けて
周期(周波数)がゆらぐ

1. 導入



振り子時計

精度 $\delta f/f$

10^{-5}

1秒/日

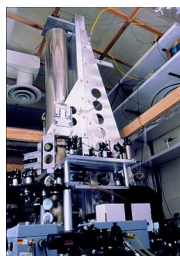


水晶振動子
(クォーツ時計)

10^{-8}

10^{-3} 秒/日

原子時計へ



セシウム時計
(1秒の定義, 1967年~)

10^{-15}

10^{-9} 秒/日

マイクロ波から光へ

光原子時計
(光格子時計、イオン時計...)

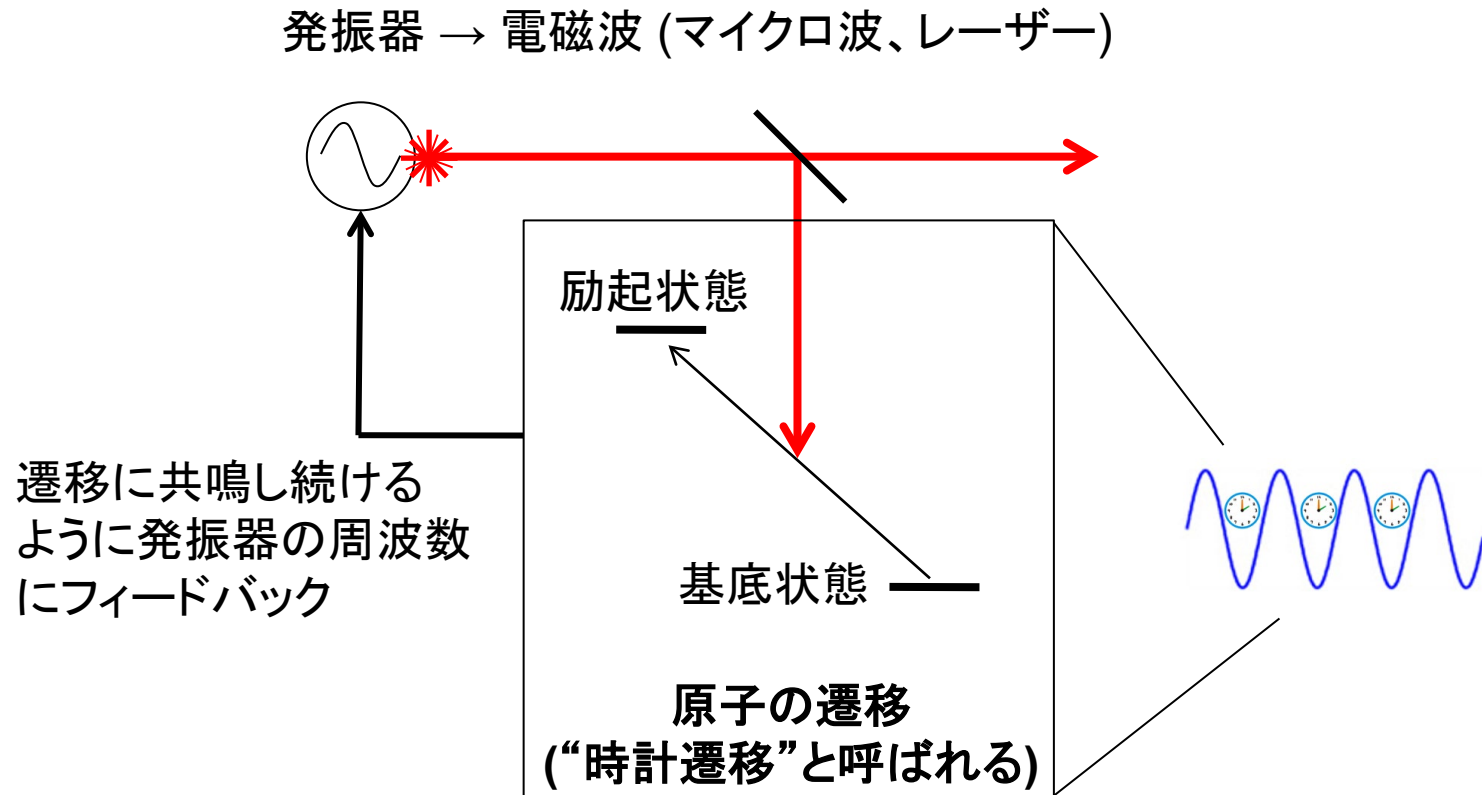
10^{-18}

10^{-13} 秒/日

宇宙年齢138億年で0.5秒のずれ

1. 導入(量子系)

原子時計とは何か？



原子遷移の共鳴周波数を基準とした時計

2. 制御方法

不確かさの指標

(この値が小さければ小さいほどよい時計)

$$\frac{\delta f}{f_0}$$

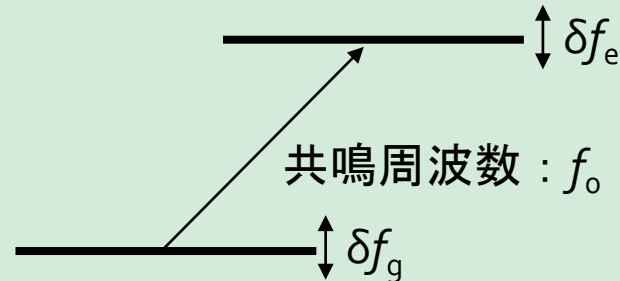
f_0 : 中心周波数(遷移の共鳴周波数)

δf : 中心周波数のゆらぎ

精度の良い時計を作る($\delta f/f_0$ を小さくする)ためにはどうすればよいか？

① δf を小さくする

② f_0 を大きくする



δf が f_0 に無関係ならば、 f_0 を大きくすればするほど良い時計になる。

➡ マイクロ波遷移 ($f_0 \sim 10^{10}$ Hz) から 光学遷移へ ($f_0 \sim 10^{15}$ Hz)

例外

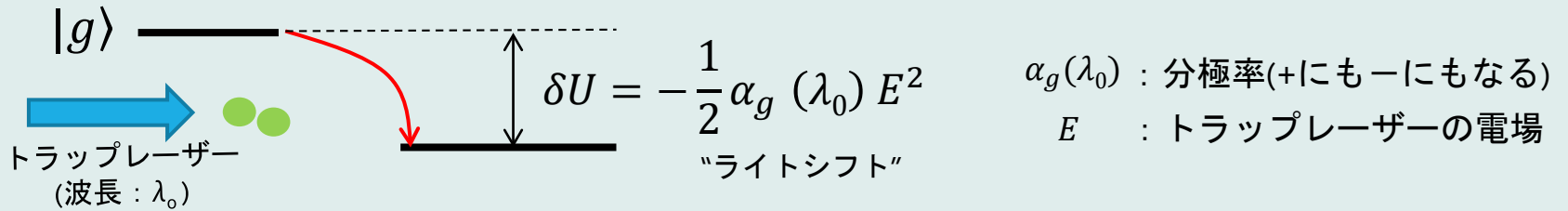
ドップラーシフト : $|\delta f_{\text{Doppler}}| = \left(\frac{v}{c}\right) f_0$ (v: 原子の速度、c: 光速)

反跳シフト : $\delta f_{\text{recoil}} = \left(\frac{h}{2mc^2}\right) f_0^2$

➔ 光格子ポテンシャルによる空間的な閉じ込め (トラップ)

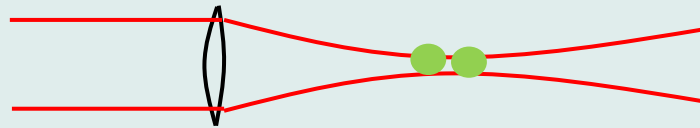
2. 制御方法

原子の光トラップとは？ R. Grimm et al., Adv. At. Mol. Opt. Phys. 42, 95 (2000).

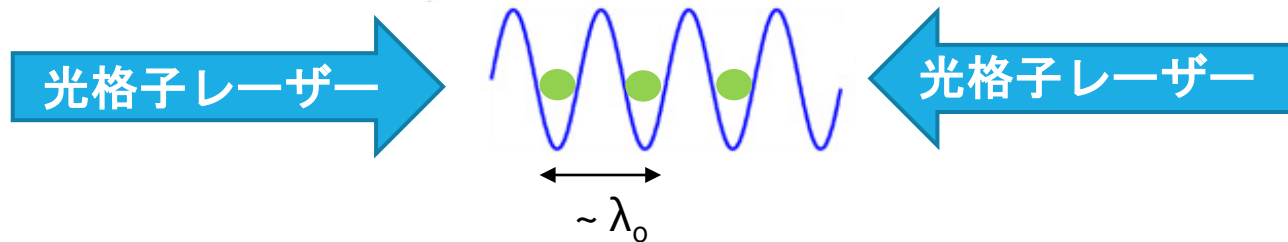


分極率が正の場合、光が強ければ強いほど、その場所では準位のエネルギーが下がる

→ トラップレーザーの、強度が強い場所にトラップできる (光トラップ)



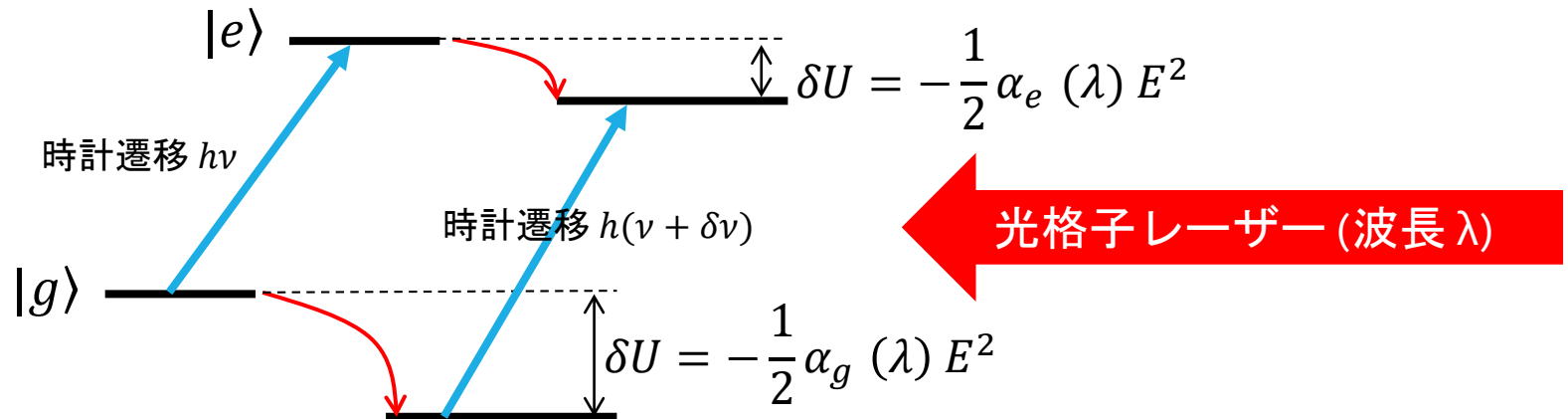
光格子



波長オーダー ($\sim \lambda_0$, 数百nm) の空間領域に、原子を閉じ込めることができる
→ ドップラーシフト、反跳シフトの抑制

2. 制御方法

しかし。。。



$$\delta\nu = -\frac{1}{2h} [\alpha_e(\lambda) - \alpha_g(\lambda)] E^2$$

光格子レーザーのライトシフトにより時計遷移の共鳴周波数が $\delta\nu$ シフトする

→ 時計の基準として使えない。。。

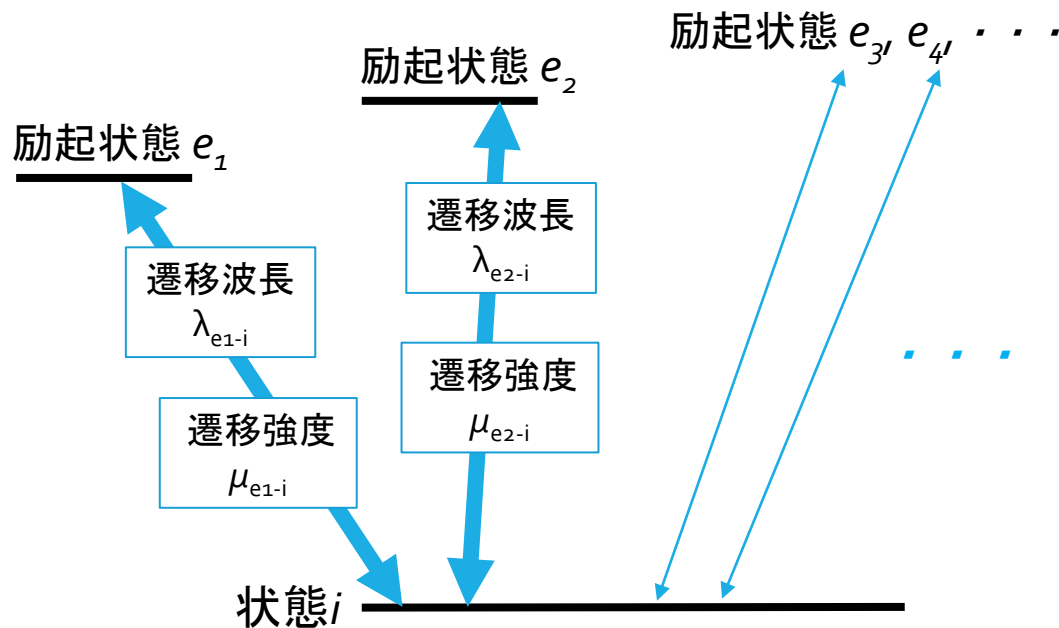
2. 制御方法

分極率 α とは何か？

(入射レーザー波長 λ が、共鳴から十分離れている場合)

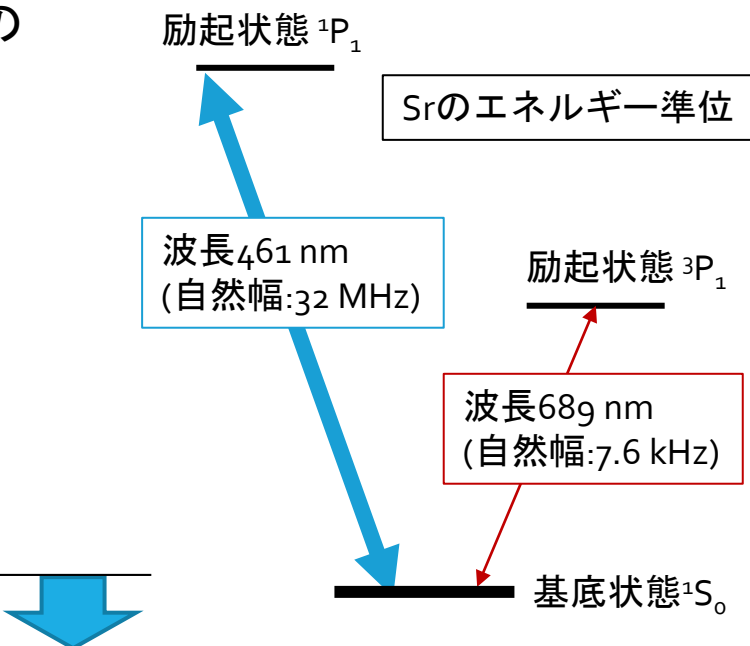
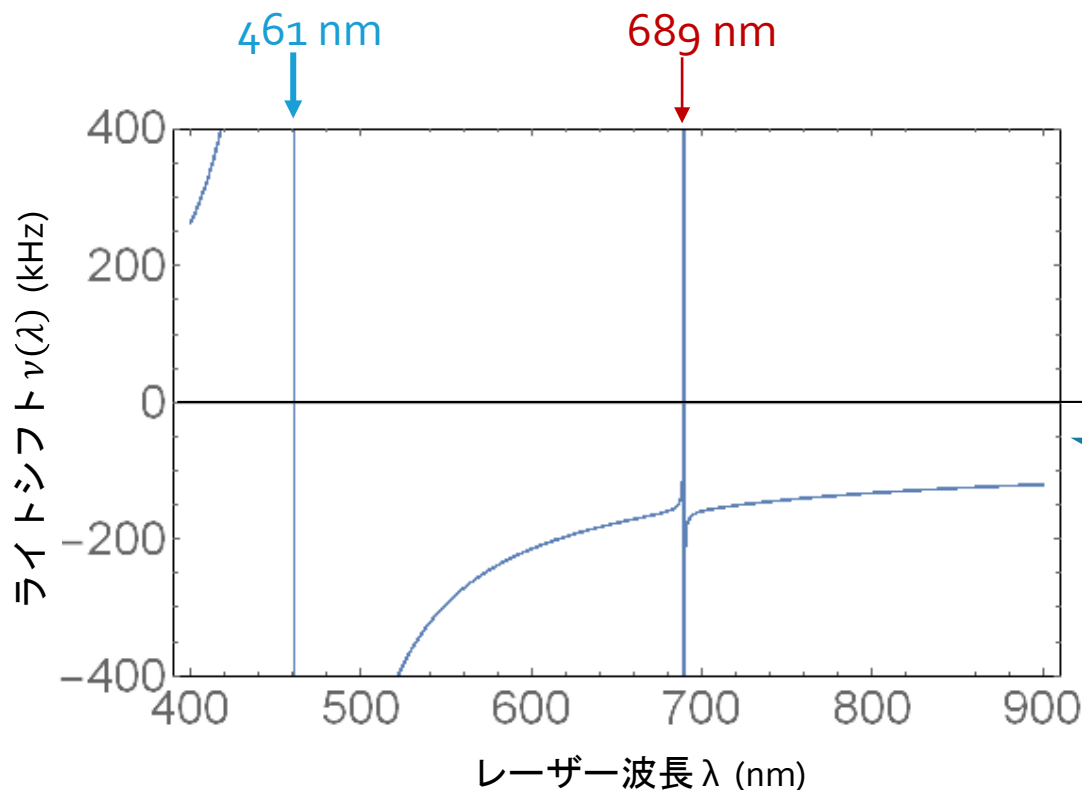
準位 i の分極率 $\alpha_i(\lambda) = \frac{2\lambda^2}{hc} \sum_k \left(\frac{\lambda_{ki}}{\lambda^2 - \lambda_{ki}^2} \right) \mu_{ki}^2$

遷移($i \rightarrow k$) 波長 遷移($i \rightarrow k$) の強さ



2. 制御方法

(例) 中性ストロンチウム(Sr)の基底状態 $1S_0$ の
ライトシフト



光の強いところで
原子をトラップで
きる

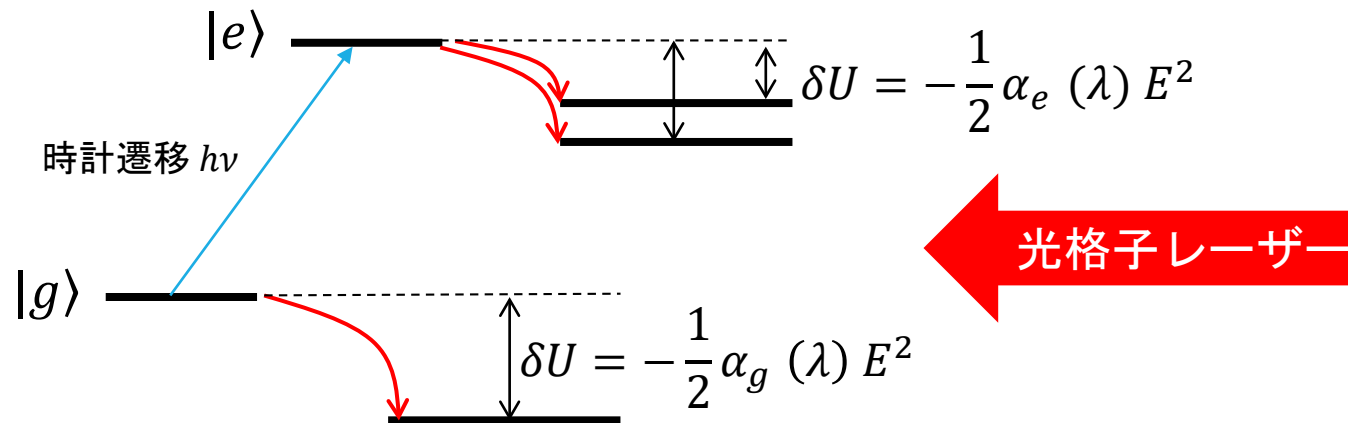
$$\alpha_i(\lambda) = \frac{2\lambda^2}{hc} \sum_k \left(\frac{\lambda_{ki}}{\lambda^2 - \lambda_{ki}^2} \right) \mu_{ki}^2$$

ライトシフト $\nu(\lambda) = -\left(\frac{I^2}{2h}\right) \alpha_g(\lambda)$
 $I = 10 \text{ kW/cm}^2$ を仮定

入射レーザー波長 λ が、共鳴から十分離れている場合

2. 制御方法

光格子時計のキーアイデア：魔法波長



光格子レーザーのライトシフトにより
時計遷移の共鳴周波数が $\delta\nu$ シフトする
→ 時計の基準として使えない。。。

$$\delta\nu = -\frac{1}{2h} [\alpha_e(\lambda) - \alpha_g(\lambda)] E^2$$

→ 0 @ 魔法波長

$\alpha_e(\lambda) = \alpha_g(\lambda)$ となる特別な波長がある！
そこでは、 $\Delta\nu = 0$

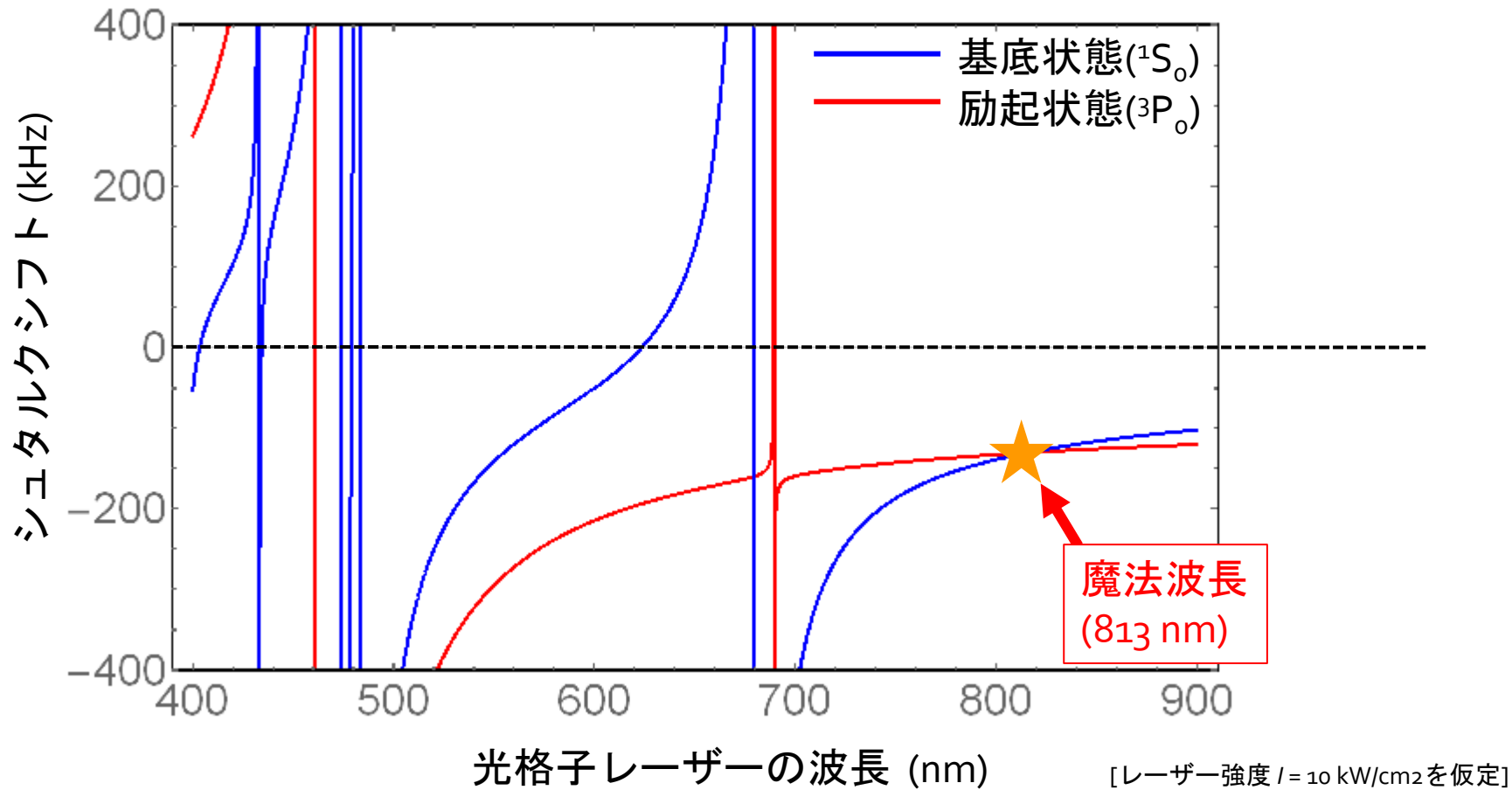
原子をトラップしてドップラー効果を
消せて、かつ時計遷移の共鳴周波数は
全く変わらない

→ 魔法波長

H. Katori *et al.*, Phys. Rev. Lett. **91**, 173005 (2003).

2. 制御方法

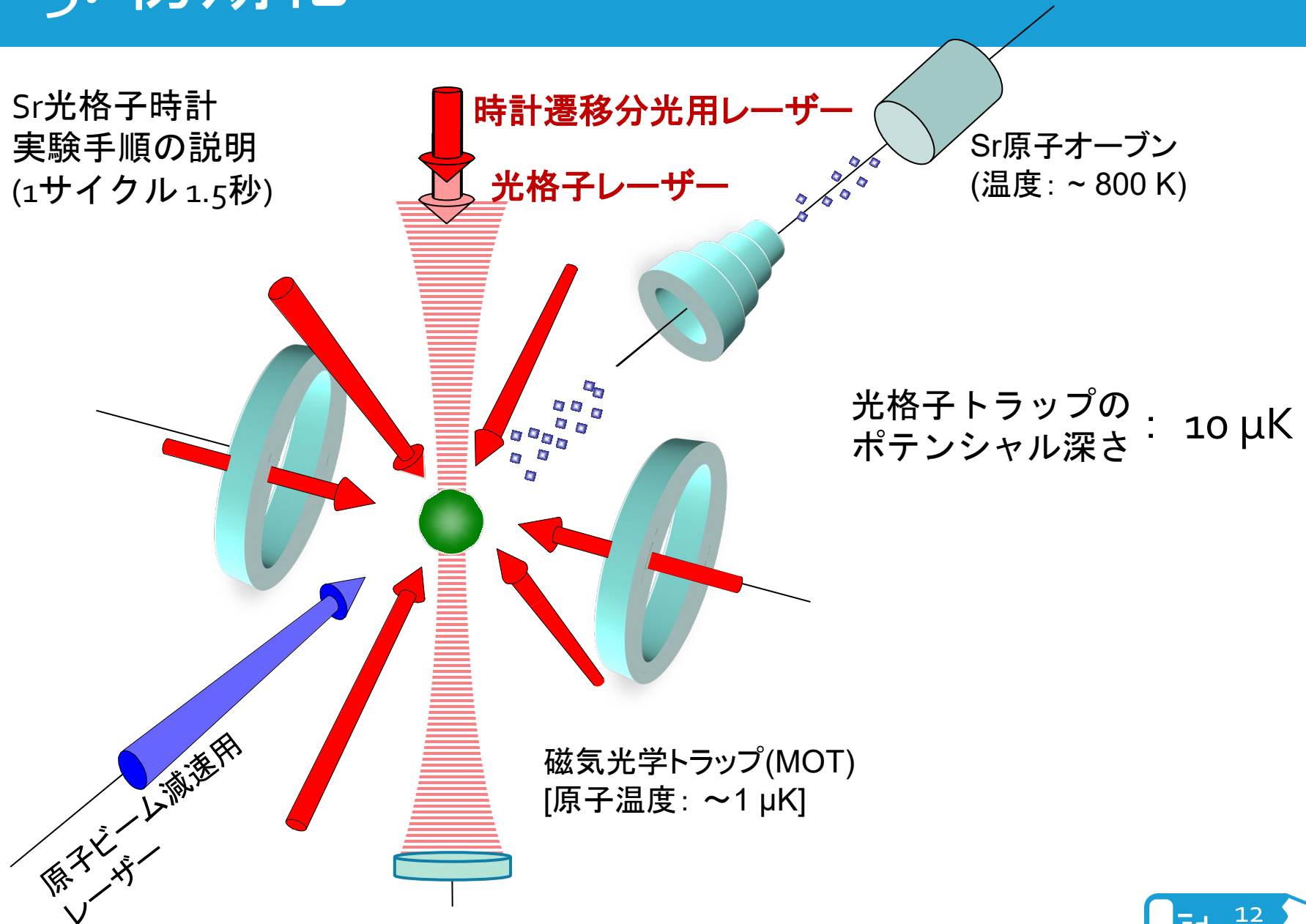
ストロンチウムの魔法波長 H. Katori *et al.*, Phys. Rev. Lett. **91**, 173005 (2003).



魔法波長リスト : Yb = 759 nm, Hg = 363 nm, Mg = 468 nm, Cd = 420 nm

3. 初期化

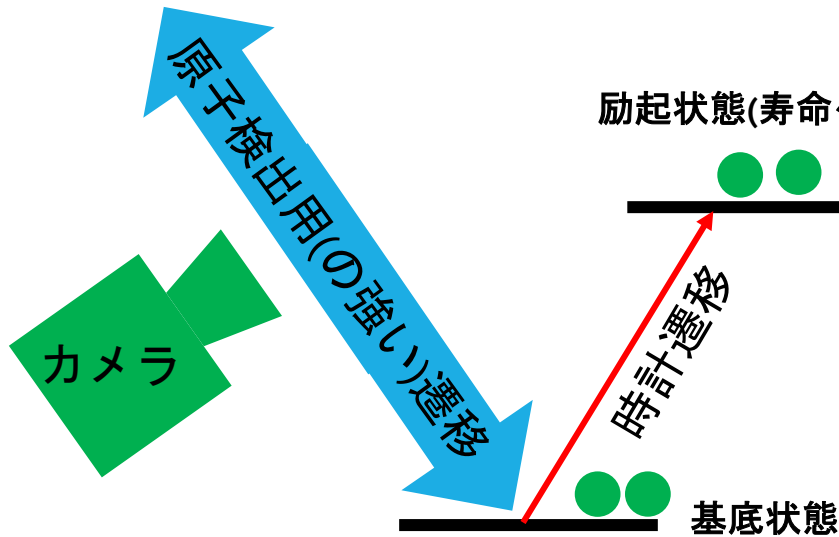
Sr光格子時計
実験手順の説明
(1サイクル 1.5秒)



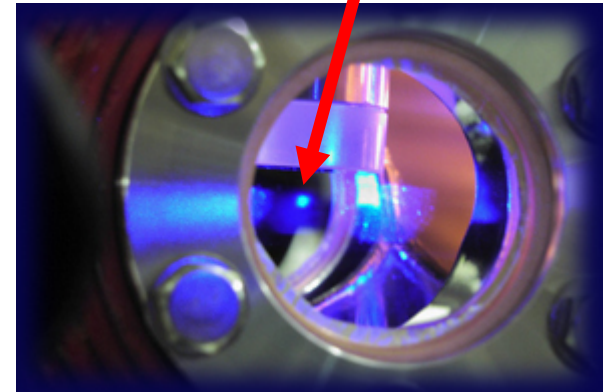
4. 測定 (原子の検出)

電子棚上げ法 Electron shelving (W. Nagourney *et al.*, Phys. Rev. Lett. 56, 2797 (1986).)

励起状態 (寿命 $\sim 10^{-9}$ 秒)



(例) 光っている 10^6 個ぐらいのストロンチウム原子

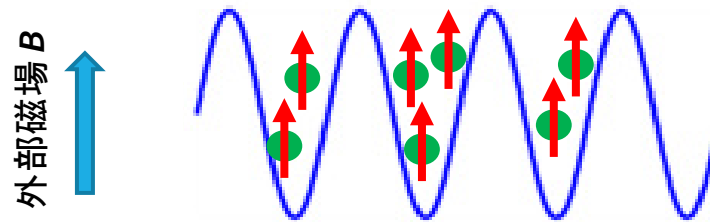


基底状態 : 強い遷移の発光でよく光る
励起状態 : 光らない

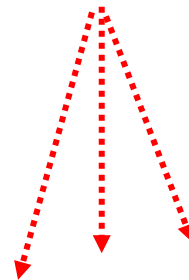
1 原子の状態を効率ほぼ100%で検出できる

6. 量子ビット間の相互作用

光格子時計にとっては、量子ビット(原子)間の相互作用(衝突シフト)は、精度を劣化させる原因 → 抑制したい



原子(フェルミオン同位体)をスピン偏極(同じ m_F にする)し、パウリの排他律より原子同士が衝突しない(相互作用しない)ようにする



7. 精度

ストロンチウム光格子時計@理化学研究所のエラーバジェット

周波数シフト要因	補正值 (10^{-18})	不確かさ (10^{-18})
Quadratic Zeeman shift	117.0	0.9
Blackbody radiation shift	54.2	0.9
Lattice light shift	0	4.0
Travelling wave contamination	0	2.3
Clock light shift	0.047	0.023
First-order Doppler shift	0	0.5
AOM chirp and switching	0	<0.2
Servo error	0	3.5
Density shift	0.9	4.2
Systematic total	172.3	7.2

I. Ushijima *et al.*, Nature Photonics 9, 185 (2015)