

micro workshop on Quantum detection of (dark) waves

22 April 2025
Yukawa Institute

冷却原子基礎と応用



京都大学 高橋義朗

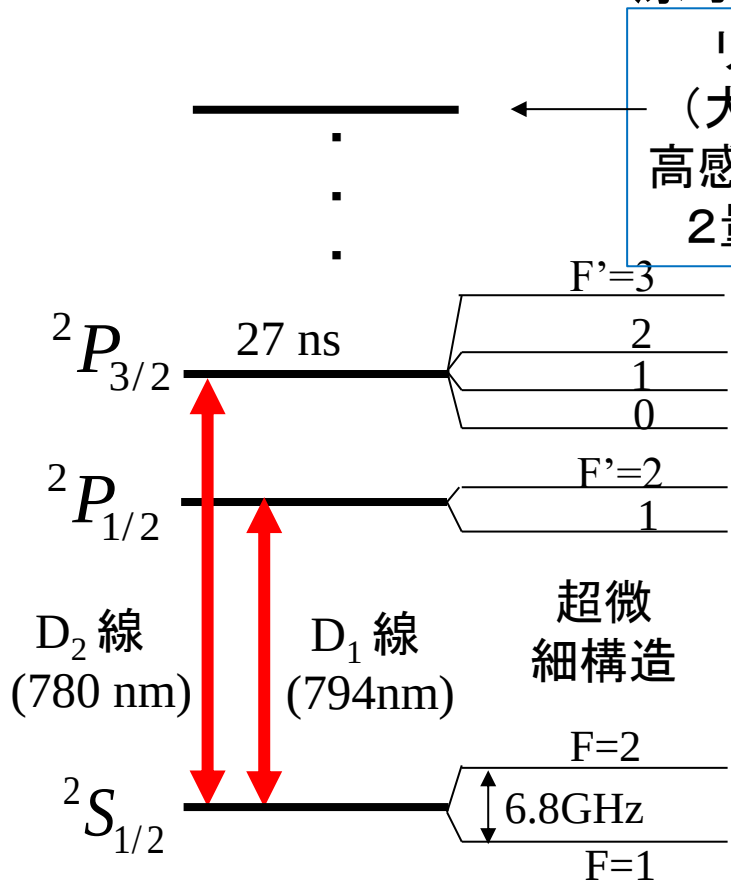
京都大学大学院 理学研究科 量子光学研究室



Prof. M. Tanaka(Osaka), Dr. Y. Yamamoto(KEK), Dr. A. Sunaga(Hungary)
Prof. A. Vutha (Toronto), ...

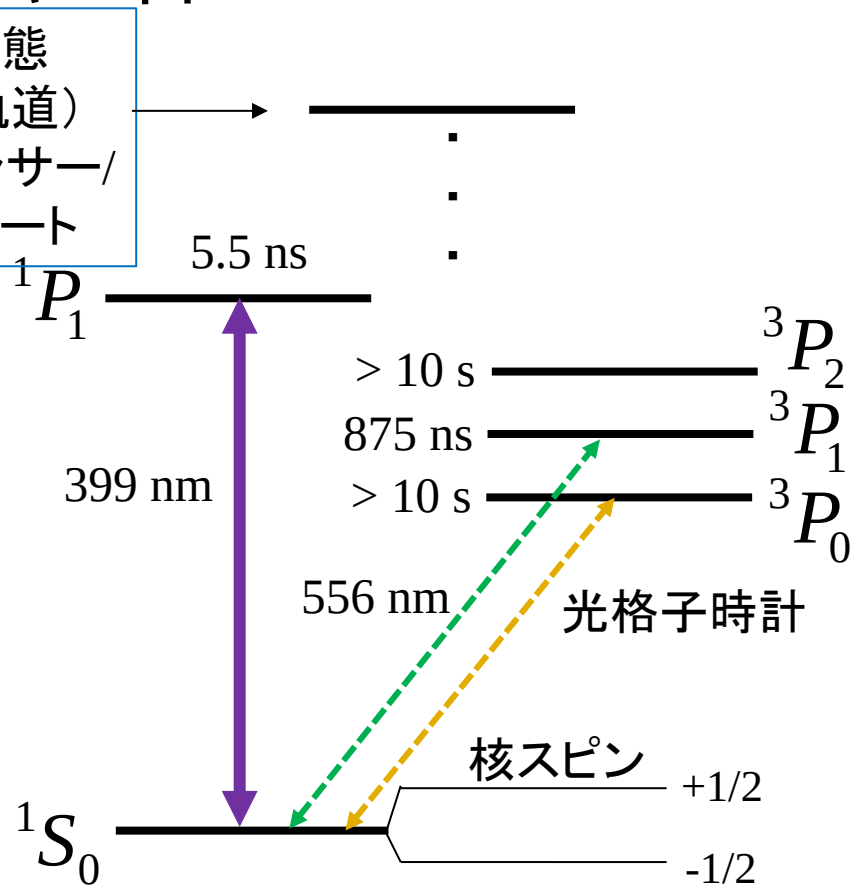
レーザー冷却・トラップ

原子のエネルギー準位



アルカリ原子(^{87}Rb)

→ “標準的”な原子

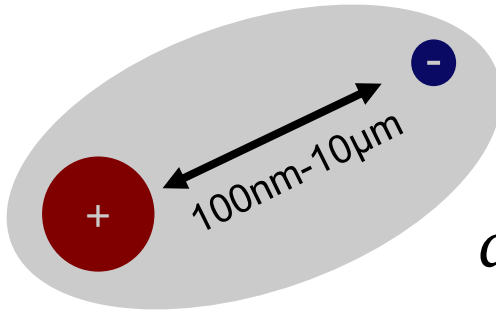


アルカリ土類(様)原子(^{171}Yb)

→ 様々な量子技術に利用

冷却原子のリドベルグ状態の利用

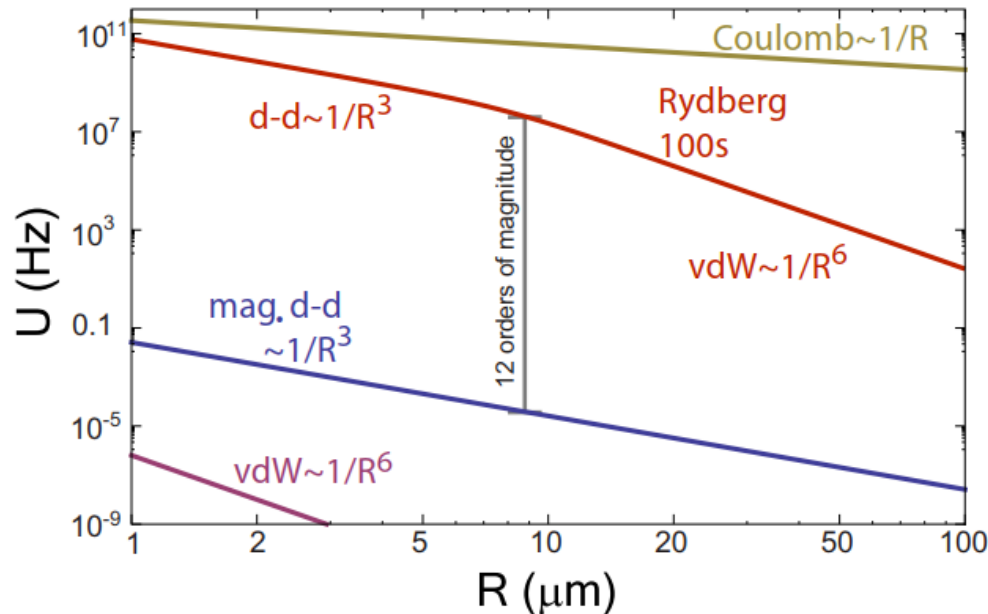
: 高感度量子センサー



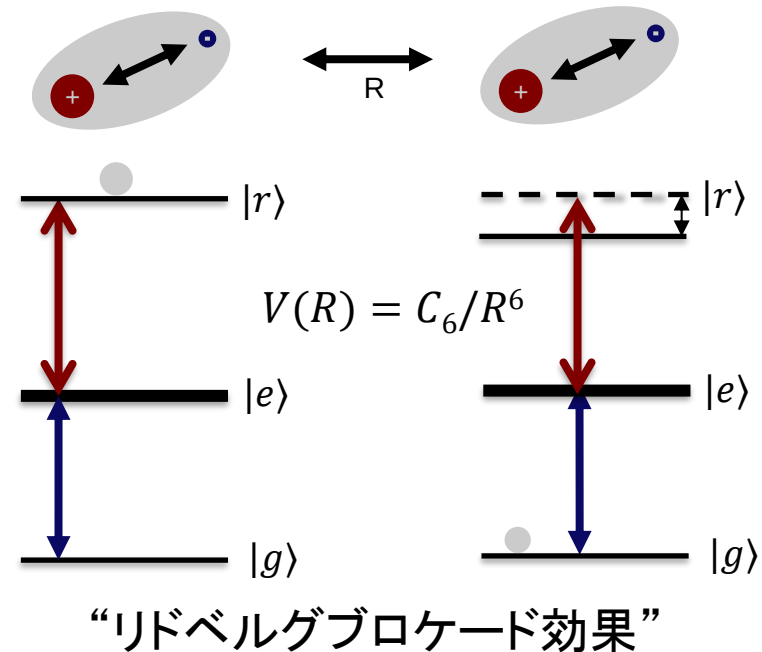
巨大な
電気双極子モーメント
 $d = er \sim a_B n^2$

数GHz～
数100GHz帯
(CARRACK,...)

: 2量子ビットゲート

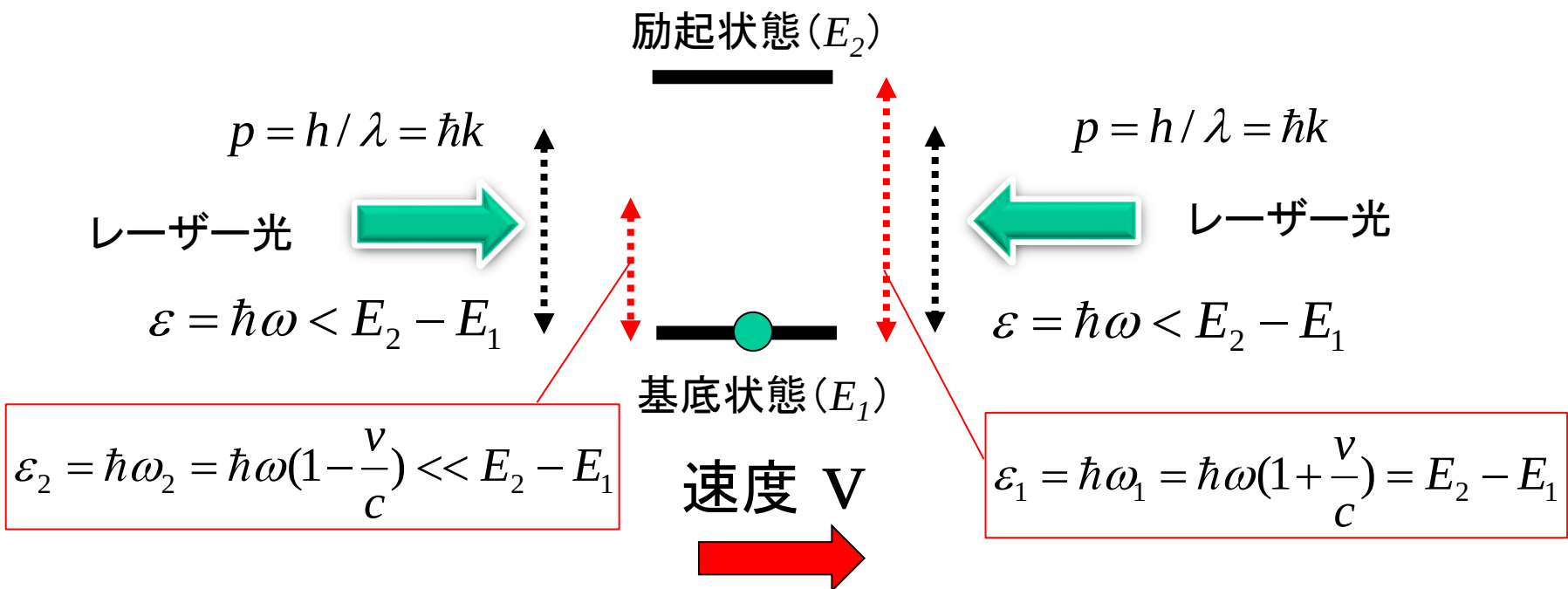


RMP, 82, 2313 (2010)



レーザー冷却・トラップ

—— ドップラー冷却 ——



ドップラー限界温度:
(励起状態の自然放出寿命: T_1)

$$k_B T_D = \frac{\hbar}{2T_1}$$

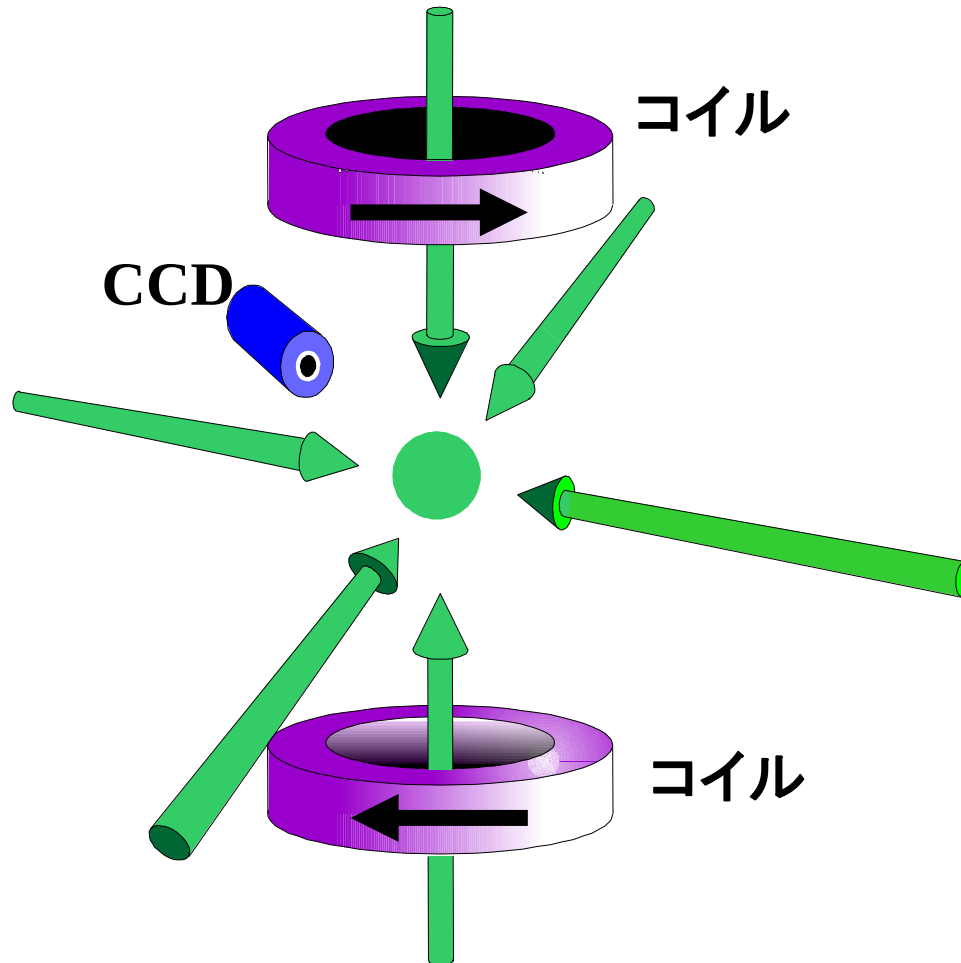
例: ^{23}Na の D 線 ($T_1 = 17 \text{ ns}$)
 $T_D = 240 \text{ } \mu\text{K}$
 ^{171}Yb の $^3\text{P}_1$ ($T_1 = 875 \text{ ns}$)
 $T_D = 4.4 \text{ } \mu\text{K}$

レーザー冷却・トラップ

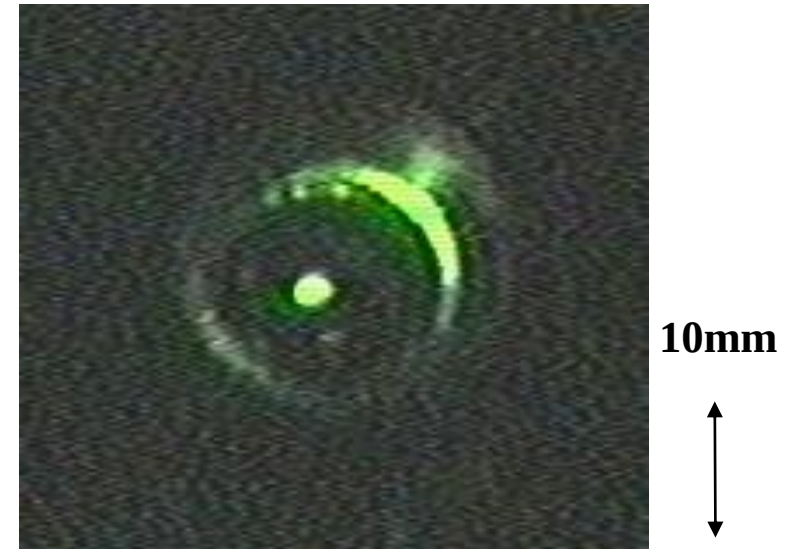
—— 磁気光学トラップ (Magneto-Optical Trap: MOT) ——

3次元的な不均一(=空間的に変化する)磁場によるゼーマン効果を利用

——→ 空間のある領域に閉じ込める(=トラップ)することが可能



Yb原子のMOT



原子数 = 10^8

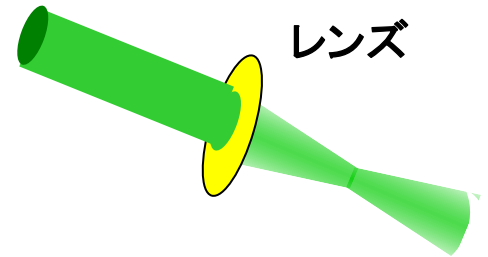
温度 $T = 12\mu\text{K}$

レーザー冷却・トラップ

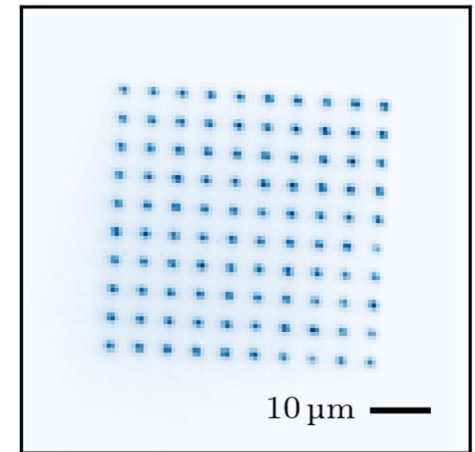
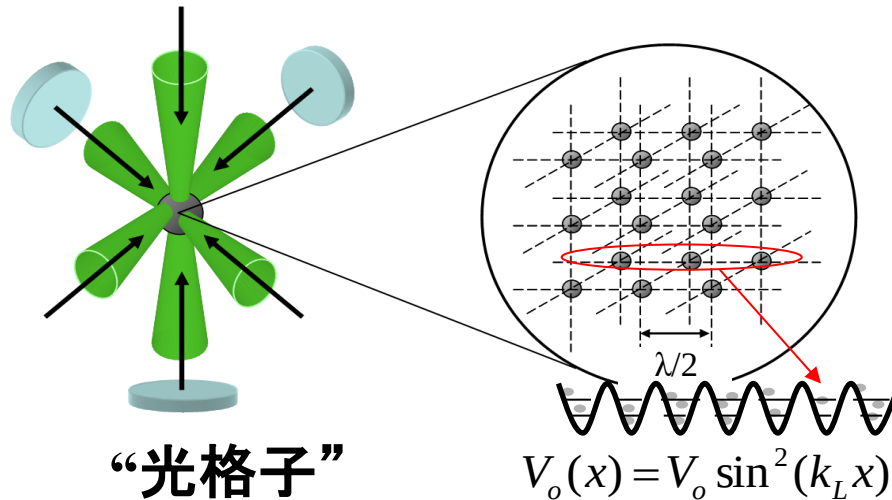
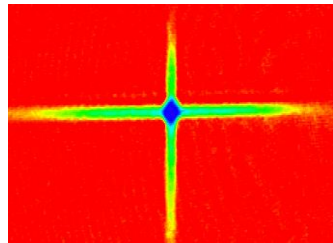
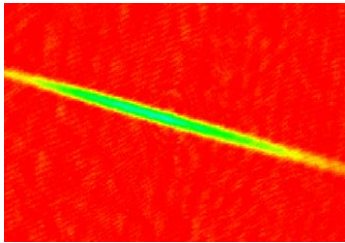
—— 光トラップポテンシャル(光シフト、ACシュタルクシフト) ——

α : 分極率 $E(r)$: レーザー光電場

$$U_{pot}(r) = -\frac{\alpha}{4} E(r)^2$$



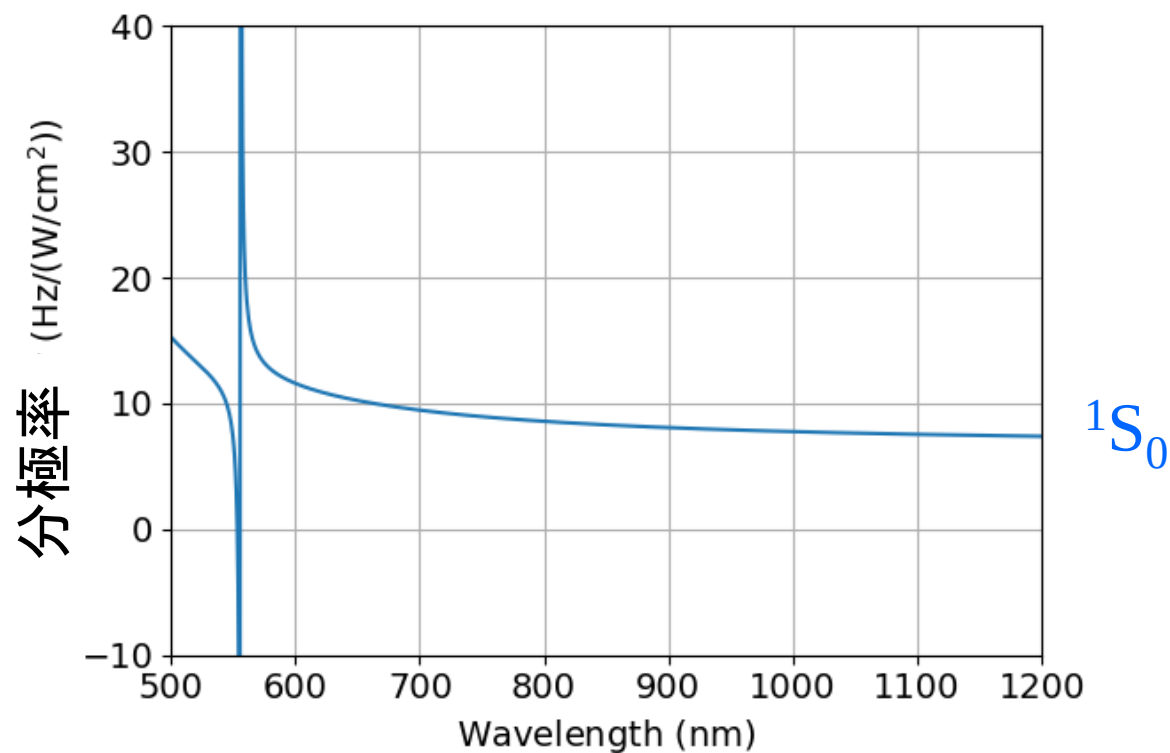
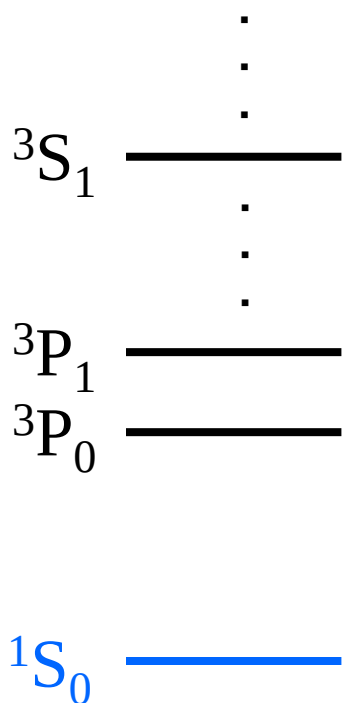
→ 強度が空間的に極大または極小を持つ
ようなレーザービームを用いることで、トラップすることが可能



光ピンセットアレー

レーザー冷却・トラップ

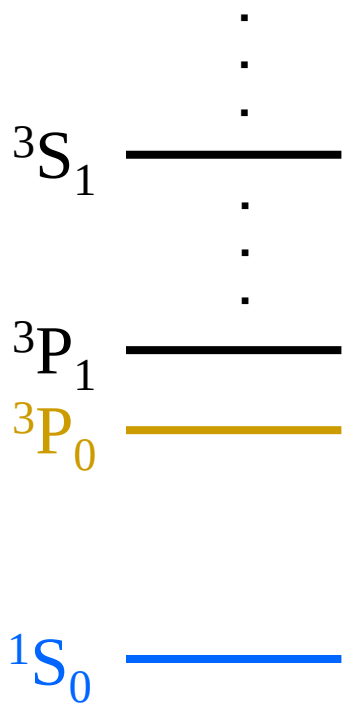
—— 光トラップポテンシャル(光シフト、ACシュタルクシフト) ——



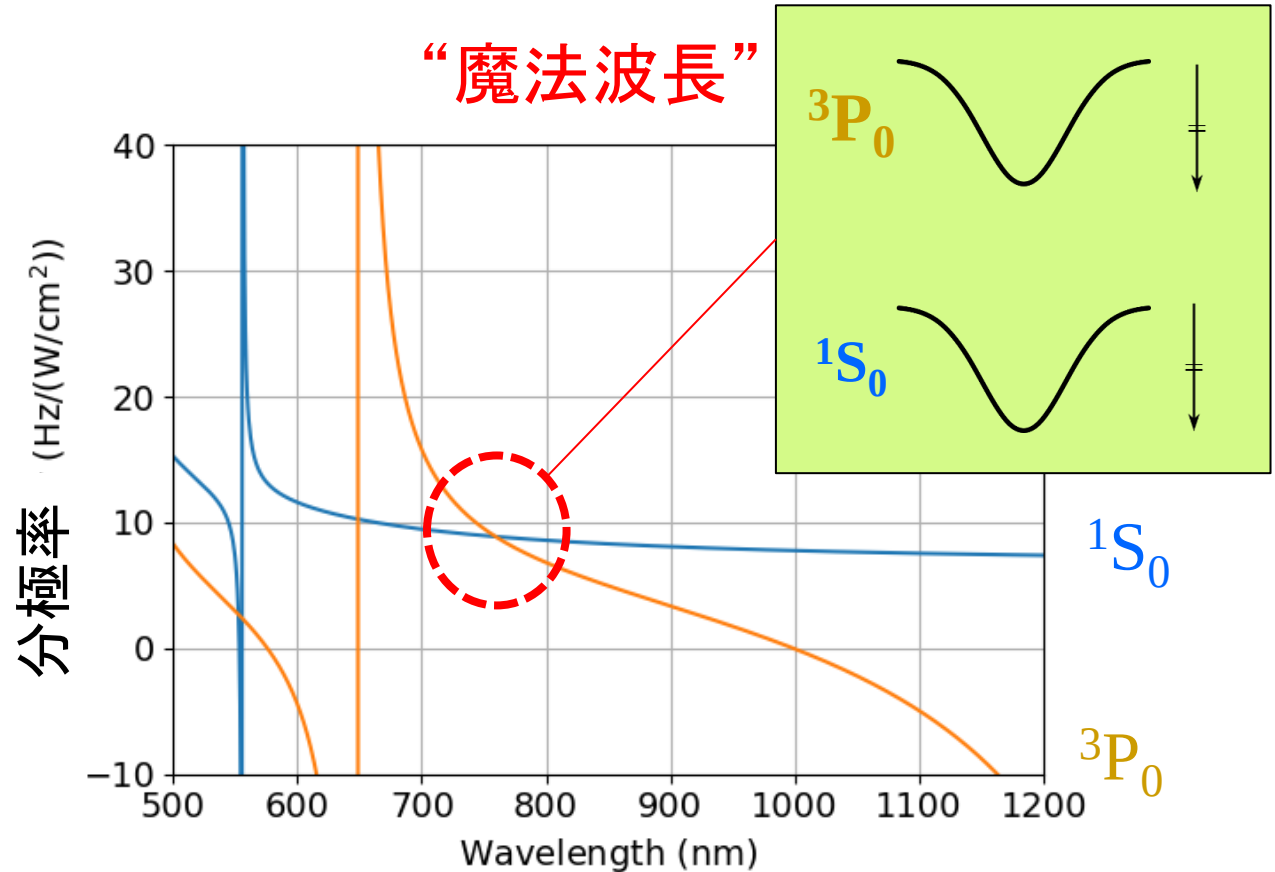
例: Yb原子

レーザー冷却・トラップ

—— 光トラップポテンシャル(光シフト、ACシュタルクシフト) ——



例: Yb原子

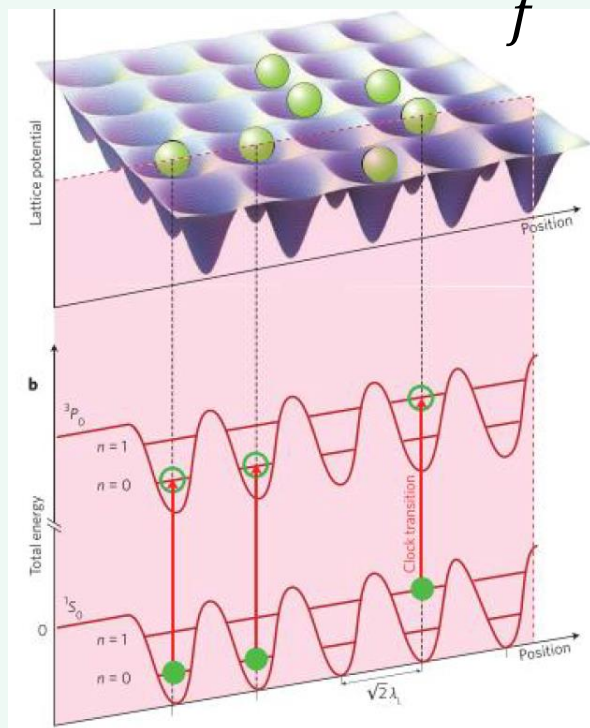


レーザー冷却・トラップ

—— 光トラップポテンシャル(光シフト、ACシュタルクシフト) ——

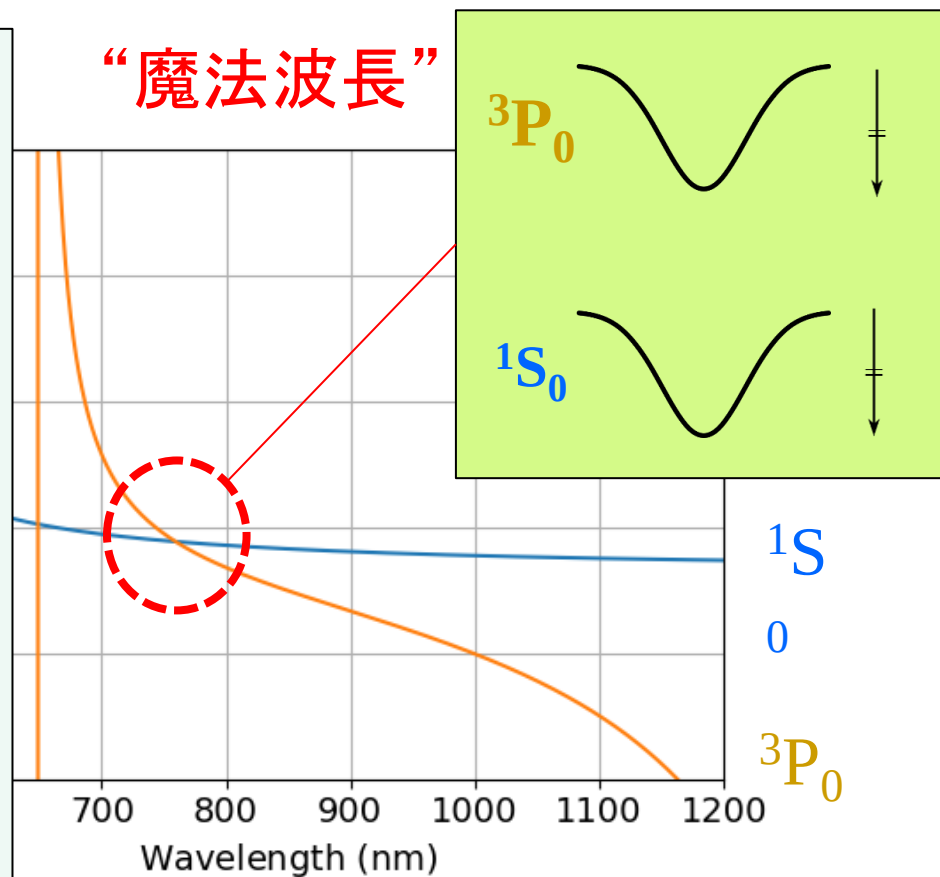
光格子時計

$$\frac{\Delta f}{f} \sim 10^{-18}$$



[H. Katori, Nature Photon. 5203 (2011)]

“魔法波長”



みんながって みんないい

Atomic Properties

Frequency	For the most accurate
1 second = 9 192 631 770 cycles of the radiation corresponding to the transition between the two hyperfine levels of the ground state of the cesium-133 atom	
speed of light in vacuum	$c = 299\,792\,458\text{ m s}^{-1}$
Planck constant	$h = 6.626\,069\,57 \times 10^{-34}\text{ J s}$
elementary charge	$e = 1.602\,176\,634 \times 10^{-19}\text{ C}$
electron mass	$m_e = 9.109\,381\,88 \times 10^{-31}\text{ kg}$
proton mass	$m_p = 1.672\,621\,627 \times 10^{-27}\text{ kg}$
fine-structure constant	$\alpha = 1/137.035\,999\,074$
Rydberg constant	$R_\infty = 10\,973\,731.762\,181\text{ m}^{-1}$
Boltzmann constant	$k = 1.380\,650\,4 \times 10^{-23}\text{ J K}^{-1}$

States
Liquids
Gases
Artificially Prepared

NIST

National Institute of Standards and Technology
Physics Laboratory

Standard Reference Data Group
www.nist.gov/srd

Group	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Period	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	H 1.00794 $1s$	He 4.002602 $1s^2$																
2	Li 6.941 $1s^2 2s$	Be 9.012182 $1s^2 2s^2$																
3	Na 22.98977 $[Ne]3s$	Mg 24.3050 $[Ne]3s^2$																
4	K 39.0983 $[Ar]4s$	Ca 40.078 $[Ar]4s^2$	Sc 44.95591 $[Ar]3d^1 4s^2$	Ti 47.867 $[Ar]3d^2 4s^2$	V 50.9415 $[Ar]3d^3 4s^2$	Cr 51.9961 $[Ar]3d^5 4s$	Mn 54.938049 $[Ar]3d^5 4s^2$	Fe 55.845 $[Ar]3d^6 4s^2$	Co 58.933200 $[Ar]3d^7 4s^2$	Ni 58.6934 $[Ar]3d^8 4s^2$	Cu 63.546 $[Ar]3d^{10} 4s$	Zn 65.409 $[Ar]3d^{10} 4s^2$	Ga 69.723 $[Ar]3d^{10} 4s^2 4p^1$	Ge 72.64 $[Ar]3d^{10} 4s^2 4p^2$	As 74.92160 $[Ar]3d^{10} 4s^2 4p^3$	Se 78.96 $[Ar]3d^{10} 4s^2 4p^4$	Br 79.904 $[Ar]3d^{10} 4s^2 4p^5$	Kr 83.798 $[Ar]3d^{10} 4s^2 4p^6$
5	Rb 85.4678 $[Kr]5s$	Sr 87.62 $[Kr]5s^2$	Y 88.90585 $[Kr]4d^1 5s^2$	Zr 91.224 $[Kr]4d^2 5s^2$	Nb 92.90638 $[Kr]4d^4 5s$	Mo 95.94 $[Kr]4d^5 5s$	Tc 98.90625 $[Kr]4d^5 5s^2$	Ru 101.07 $[Kr]4d^6 5s$	Rh 102.90550 $[Kr]4d^7 5s$	Pd 106.42 $[Kr]4d^8 5s$	Ag 107.8682 $[Kr]4d^{10} 5s$	Cd 112.411 $[Kr]4d^{10} 5s^2$	In 114.818 $[Kr]4d^{10} 5s^2 5p^1$	Sn 118.710 $[Kr]4d^{10} 5s^2 5p^2$	Sb 121.760 $[Kr]4d^{10} 5s^2 5p^3$	Te 127.60 $[Kr]4d^{10} 5s^2 5p^4$	I 126.90447 $[Kr]4d^{10} 5s^2 5p^5$	Xe 131.293 $[Kr]4d^{10} 5s^2 5p^6$
6	Cs 132.90545 $[Xe]6s$	Ba 137.327 $[Xe]6s^2$	La 138.90547 $[Xe]5d^1 6s^2$	Hf 178.49 $[Xe]4f^{14} 5d^2 6s^2$	Ta 180.9479 $[Xe]4f^{14} 5d^3 6s^2$	W 183.84 $[Xe]4f^{14} 5d^4 6s$	Re 186.207 $[Xe]4f^{14} 5d^5 6s$	Os 190.23 $[Xe]4f^{14} 5d^6 6s$	Ir 192.217 $[Xe]4f^{14} 5d^7 6s$	Pt 195.078 $[Xe]4f^{14} 5d^9 6s$	Au 196.96657 $[Xe]4f^{14} 5d^{10} 6s$	Hg 200.59 $[Xe]4f^{14} 5d^{10} 6s^2$	Tl 204.3833 $[Hg]6p^1$	Pb 207.2 $[Hg]6p^2$	Bi 208.98038 $[Hg]6p^3$	Po (209) $[Hg]6p^4$	At (210) $[Hg]6p^5$	Rn (222) $[Hg]6p^6$
7	Fr (223) $[Rn]7s$	Ra (226) $[Rn]7s^2$	Ac (227) $[Rn]5f^1 6d^1 7s^2$	Rf (261) $[Rn]5f^{14} 6d^2 7s^2$	Db (262) $[Rn]5f^{14} 6d^3 7s^2$	Sg (266) $[Rn]5f^{14} 6d^4 7s^2$	Bh (264) $[Rn]5f^{14} 6d^5 7s^2$	Hs (277) $[Rn]5f^{14} 6d^6 7s^2$	Mt (268) $[Rn]5f^{14} 6d^7 7s^2$	Uun (281) $[Rn]5f^{14} 6d^8 7s^2$	Uuu (272) $[Rn]5f^{14} 6d^9 7s^2$	Uub (285) $[Rn]5f^{14} 6d^{10} 7s^2$	Uuq (289) $[Rn]5f^{14} 6d^{11} 7s^2$	Uuh (292) $[Rn]5f^{14} 6d^{12} 7s^2$				
			La 138.90547 $[Xe]5d^1 6s^2$	Ce 140.116 $[Xe]4f^1 5d^1 6s^2$	Pr 140.90765 $[Xe]4f^3 6s^2$	Nd 144.24 $[Xe]4f^4 6s^2$	Pm (145) $[Xe]4f^5 6s^2$	Sm 150.36 $[Xe]4f^6 6s^2$	Eu 151.964 $[Xe]4f^7 6s^2$	Gd 157.25 $[Xe]4f^7 5d^1 6s^2$	Tb 158.92534 $[Xe]4f^9 6s^2$	Dy 162.500 $[Xe]4f^{10} 6s^2$	Ho 164.93033 $[Xe]4f^{11} 6s^2$	Er 167.259 $[Xe]4f^{12} 6s^2$	Tm 168.93421 $[Xe]4f^{13} 6s^2$	Yb 173.04 $[Xe]4f^{14} 6s^2$	Lu 174.967 $[Xe]4f^{14} 5d^1 6s^2$	
			Ac (227) $[Rn]6d^1 7s^2$	Th 232.0381 $[Rn]6d^2 7s^2$	Pa 231.03588 $[Rn]5f^2 6d^1 7s^2$	U 238.02891 $[Rn]5f^3 6d^1 7s^2$	Np (237) $[Rn]5f^4 6d^1 7s^2$	Pu 244 $[Rn]5f^6 7s^2$	Am 243 $[Rn]5f^7 7s^2$	Cm (247) $[Rn]5f^7 6d^1 7s^2$	Bk (247) $[Rn]5f^7 7s^2$	Cf (251) $[Rn]5f^9 7s^2$	Es (252) $[Rn]5f^{10} 7s^2$	Fm (257) $[Rn]5f^{11} 7s^2$	Md (268) $[Rn]5f^{12} 7s^2$	No (289) $[Rn]5f^{14} 7s^2$	Lr (260) $[Rn]5f^{14} 7p^1$	

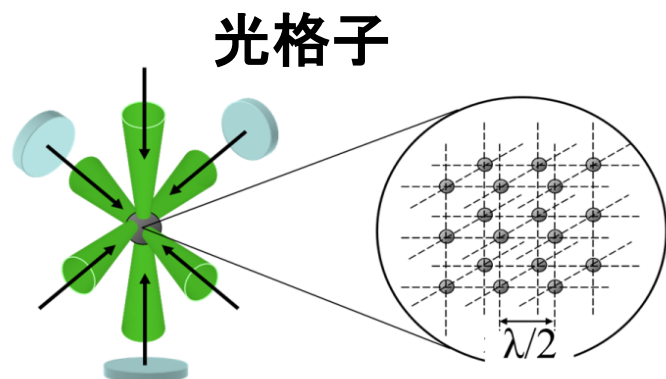
京大G

[†]Based upon ¹²C. () indicates the mass number of the most stable isotope.

For a description of the data, visit physics.nist.gov/data

NIST SP 966 (September 2003)

冷却原子集団のコヒーレント量子系

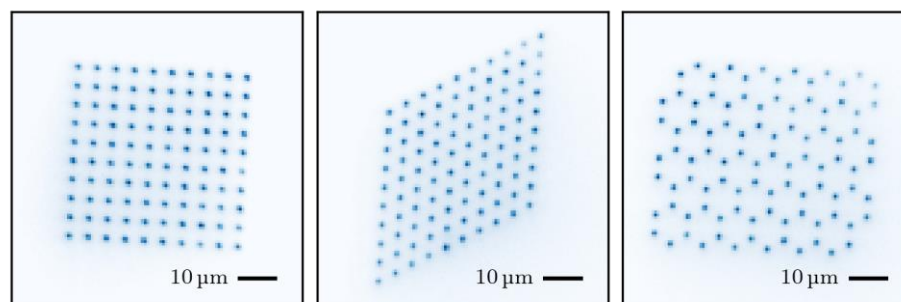


量子シミュレーター: ハバード模型

光格子時計: $\delta f/f < 10^{-18}$

...

光ピンセットアレー



量子計算機: >6000 量子ビット, $F_{2\text{QB}} > 99.7\%$

量子シミュレーター: イジング模型

光ピンセット時計: >1 s コヒーレンス

核心とする量子技術:

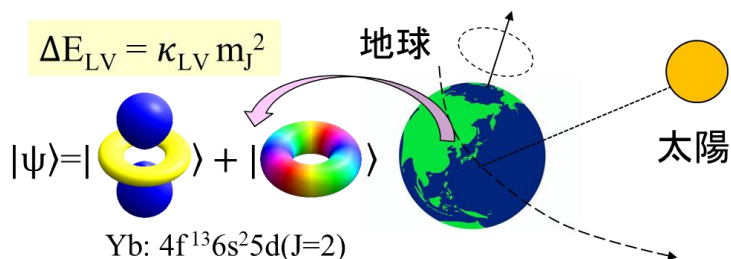
「冷却原子の超精密量子計測技術の開発」

融合

量子技術の
基礎物理学への展開

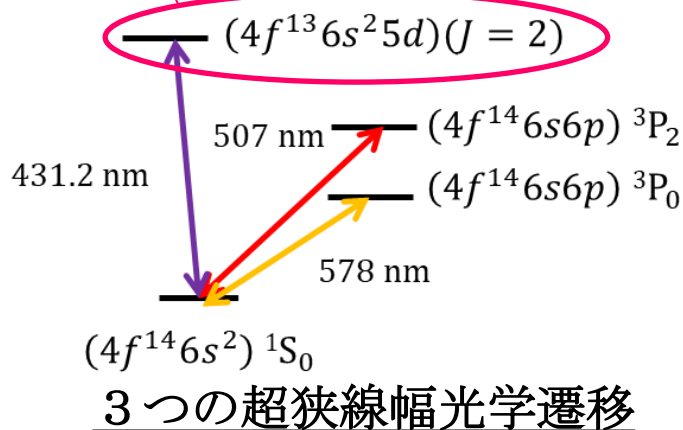
「素粒子物理の標準模型を超えた物理の探索」

冷却原子技術の基礎物理学への展開

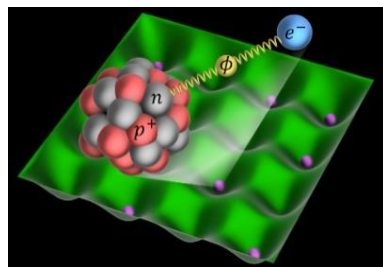


A1: 局所ローレンツ不変性の検証

⇔ 拡張標準模型 (量子重力)



A2: 中性子と電子の間の力を媒介する新粒子の探索



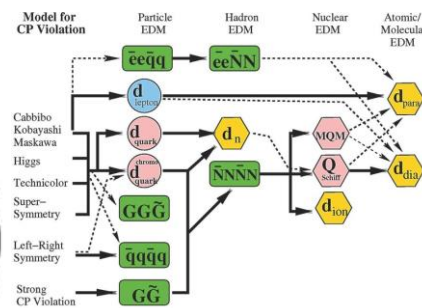
イッテルビウム

豊富な同位体

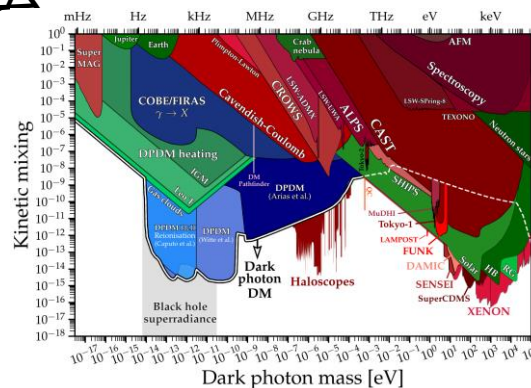
168Yb	170Yb	171Yb	172Yb	173Yb	174Yb	176Yb
(0.13%)	(3.05%)	(14.3%)	(21.9%)	(16.2%)	(31.8%)	(12.7%)

A3: 核磁気四重極モーメント(MQM)測定

⇔ CP非保存



B: ダークマター(フォトン) 探索

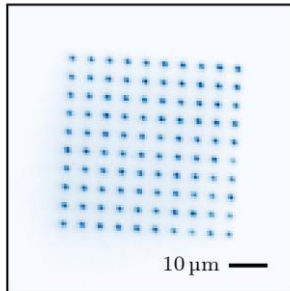


⇔宇宙・素粒子

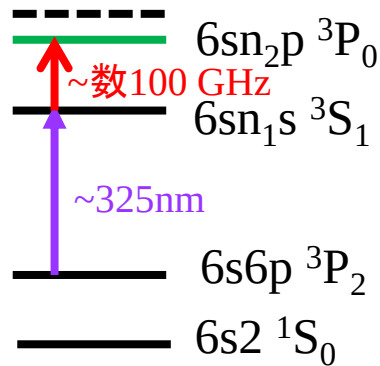
研究項目(B)

「高感度マイクロ波量子検出によるダークフォトン探索」

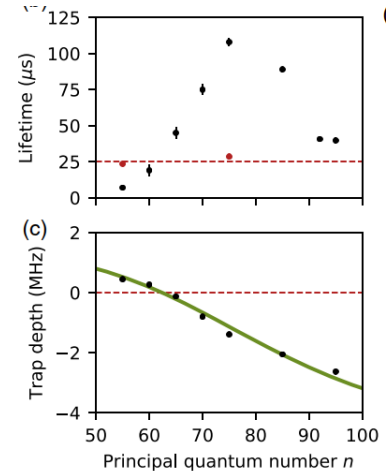
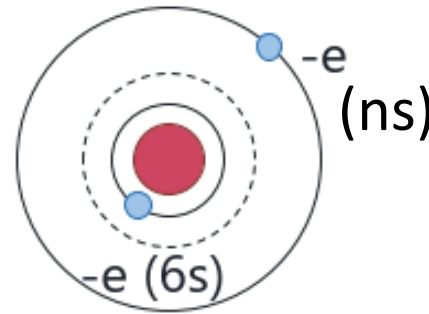
Yb原子アレー
($N > 10^4$)



電場によるイオン化検出

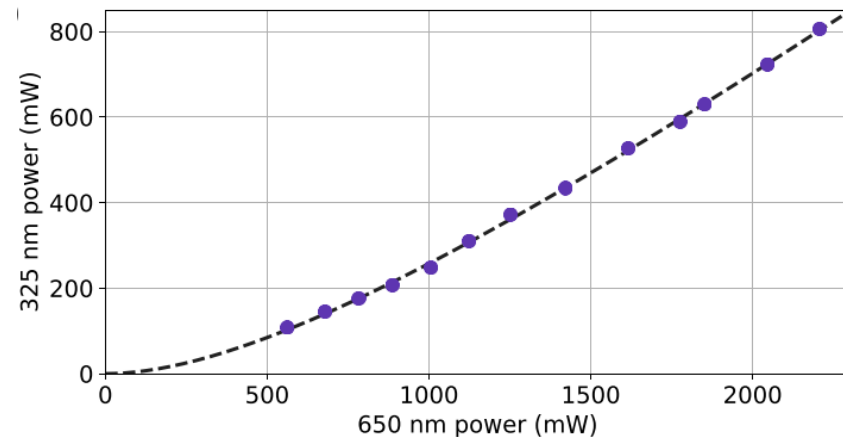


リドベルグ状態
が光トラップ可能！



リドベルグ励起用光源の開発

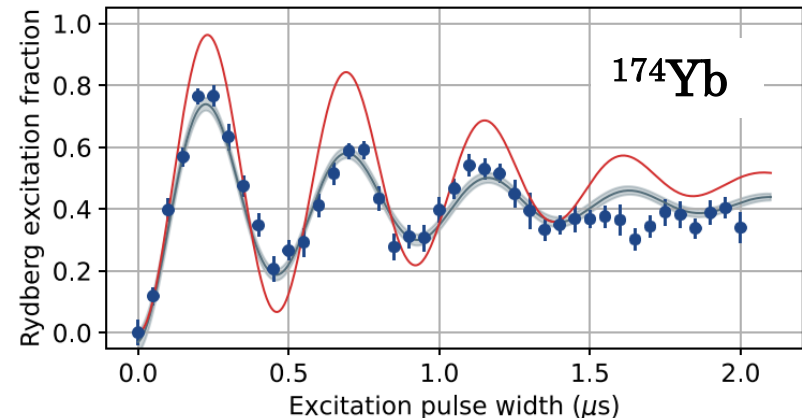
$P > 800 \text{ mW @ } 325 \text{ nm}$



リドベルグ状態生成

$(6s6p) \ ^3P_2 \leftrightarrow (6s71s) \ ^3S_1$ 遷移

高速ラビ振動の観測: 2.13 MHz

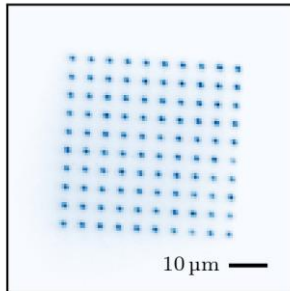


[Y. Nakamura *et al.*, JPSJ(2024)]

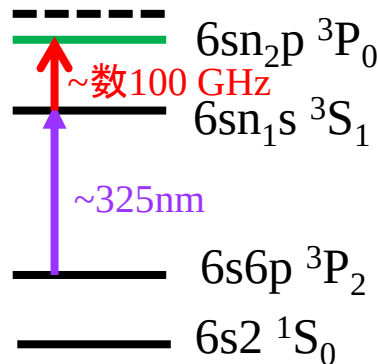
研究項目(B)

「高感度マイクロ波量子検出によるダークフォトン探索」

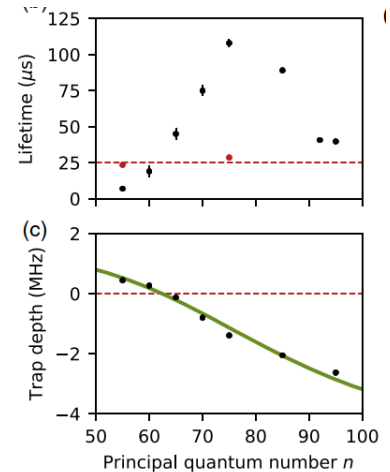
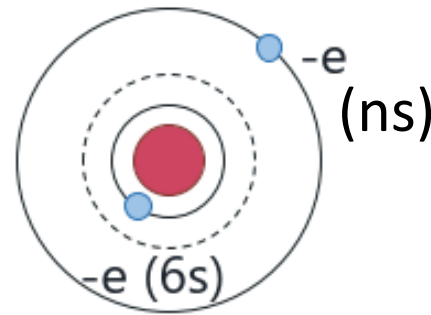
Yb原子アレー
($N > 10^4$)



電場によるイオン化検出



リドベルグ状態
が光トラップ可能！



Zeeman効果、Stark効果を利用して共鳴周波数可変
BBRノイズ

詳細を検討中(中山先生、諸井先生、..)

先端量子技術の応用の可能性

PHYSICAL REVIEW A 111, 012601 (2025)

Quantum metrology algorithms for dark matter searches with clocks

M. H. Zaheer^{1,*}, N. J. Matjelo², D. B. Hume³, M. S. Safronova⁴, and D. R. Leibbrandt^{3,5,6,†}

¹Department of Physics and Astronomy, University of Delaware, Delaware 19716, USA

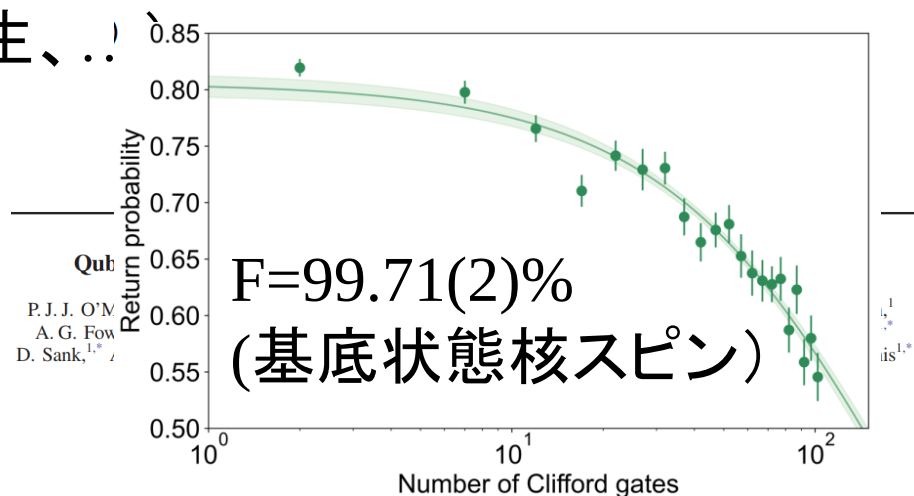
²Department of Physics and Electronics, National University of Lesotho, Roma 180, Lesotho

³Time and Frequency Division, National Institute of Standards and Technology, Boulder, Colorado 80302, USA

⁴Joint Quantum Institute, NIST and the University of Maryland, College Park, Maryland 20742, USA

⁵Department of Physics and Astronomy, University of California, Los Angeles, California 90095, USA

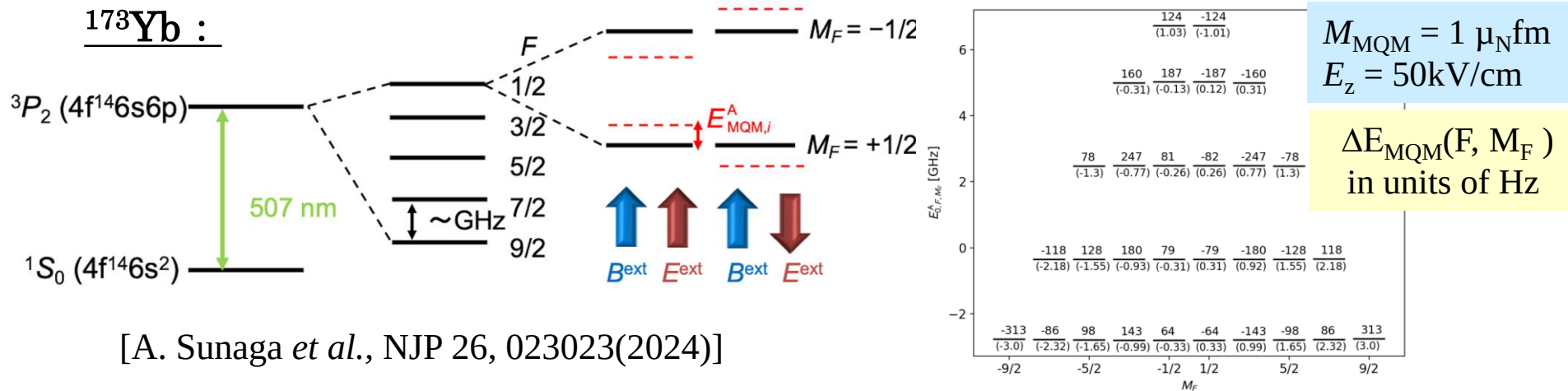
⁶Department of Physics, University of Colorado, Boulder, Colorado 80309, USA



P. J. J. O'M
A. G. Fow
D. Sank,^{1,2,*}

研究項目(A3)

「大規模光トラップアレーを用いた核磁気四重極モーメント測定」



$$\hat{H}_{\text{MQM}} = - \sum_{i,j} \frac{1}{6} M_{ij} (\nabla \mathbf{B})_{ij}$$

$$= - \frac{1}{6} \frac{\textcircled{M}}{I(2I+1)} [3M_I^2 - I(I+1)] (\nabla \mathbf{B})_{zz}$$

核磁気四重極モーメント(MQM)

研究項目(A3)

「大規模光トラップアレーを用いた核磁気四重極モーメント測定」

Why MQM of $^{173}\text{Yb}(I=5/2)$?

PRL **113**, 103003 (2014)

PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending
5 SEPTEMBER 2014

Time-Reversal Symmetry Violation in Molecules Induced by Nuclear Magnetic Quadrupole Moments

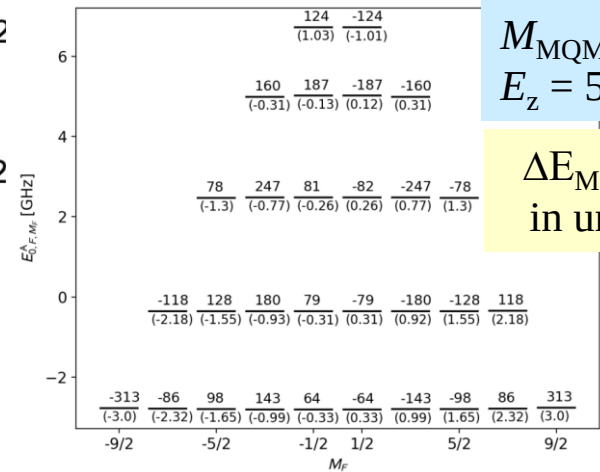
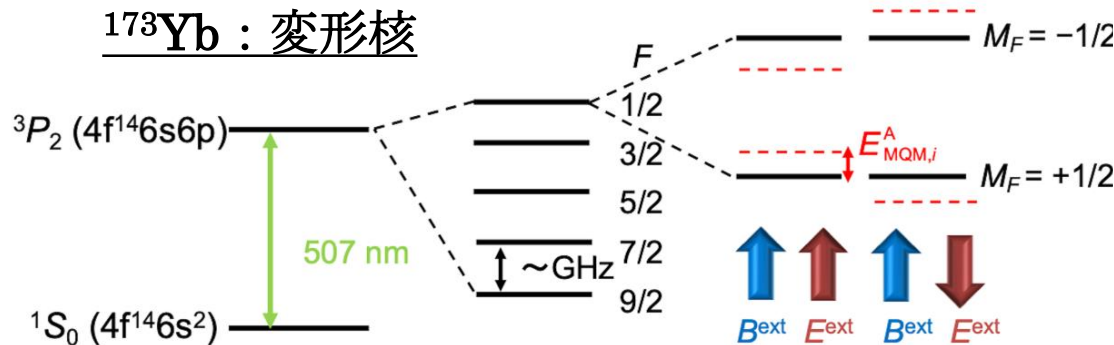
V. V. Flambaum,¹ D. DeMille,² and M. G. Kozlov^{3,4}

CP-violating parameter (x)	$\partial S(^{199}\text{Hg})/\partial x$	$\partial S(^{205}\text{Tl})/\partial x$	$\partial M_0^p/\partial x$	$\partial M_0^n/\partial x$	$\partial M(^{173}\text{Yb})/\partial x$
Isoscalar πNN coupling ($\bar{g}_0$)	0.32 e fm ³	1.77 e fm ³	-0.08 e fm ²	-0.09 e fm ²	-3.4 e fm ²
Isovector πNN coupling ($\bar{g}_1$)	-0.10 e fm ³	-0.05 e fm ³	0.41 e fm ²	0.44 e fm ²	17 e fm ²
Isotensor πNN coupling ($\bar{g}_2$)	0.39 e fm ³	-3.67 e fm ³	0.16 e fm ²	0.18 e fm ²	6.88 e fm ²
QCD θ -term ($\tilde{\theta}$)	0.005 e fm ³	0.027 e fm ³	0.002 e fm ²	0.003 e fm ²	0.09 e fm ²
Proton EDM (d_p (e fm))	0.06 fm ²	0.4 fm ²	0.25 fm	0	3.5 fm
Neutron EDM (d_n (e fm))	0.6 fm ²	0	0	0.25 fm	6.4 fm
u -quark chromo-EDM ($\tilde{d}_u$ (fm))	0	9 e fm ²	12 e fm	13 e fm	506 e fm
d -quark chromo-EDM ($\tilde{d}_d$ (fm))	5 e fm ²	12 e fm ²	-12 e fm	-13 e fm	-506 e fm

研究項目(A3)

「大規模光トラップアレーを用いた核磁気四重極モーメント測定」

^{173}Yb : 変形核



$M_{\text{MQM}} = 1 \mu_{\text{N}}\text{fm}$
 $E_z = 50\text{kV/cm}$

$\Delta E_{\text{MQM}}(F, M_F)$
 in units of Hz

[A. Sunaga *et al.*, NJP 26, 023023(2024)]

原子数: $N = 10^3$ コヒーレンス時間: $\tau = 1 \text{ s}$

総測定時間:

$T = 2.6 \times 10^6$ (30days)

$$\delta f = 1/\sqrt{N\tau T} = 2.0 \times 10^{-5} \text{ Hz}$$

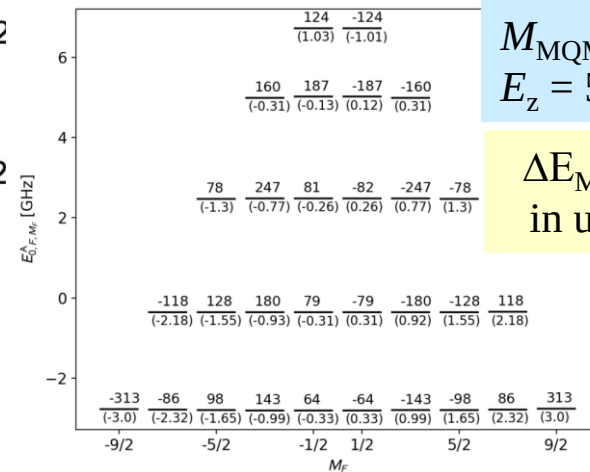
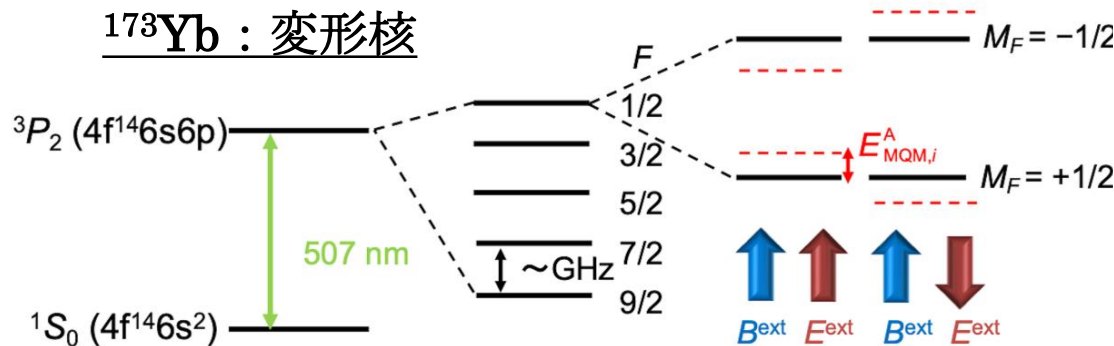
$$\delta \mathcal{M} = \frac{\delta f}{\Delta E_{\text{MQM}}} = 5.2 \times 10^{-8} \mu_{\text{N}}\text{fm} \quad [M_{\text{Cs}} = 1.6 \times 10^{-6} \mu_{\text{N}}\text{fm}]$$

$E = 50 \text{ kV/cm}$ $|F=3/2, m_F=1/2\rangle \leftrightarrow |F=3/2, m_F=-1/2\rangle$

研究項目(A3)

「大規模光トラップアレーを用いた核磁気四重極モーメント測定」

^{173}Yb : 変形核

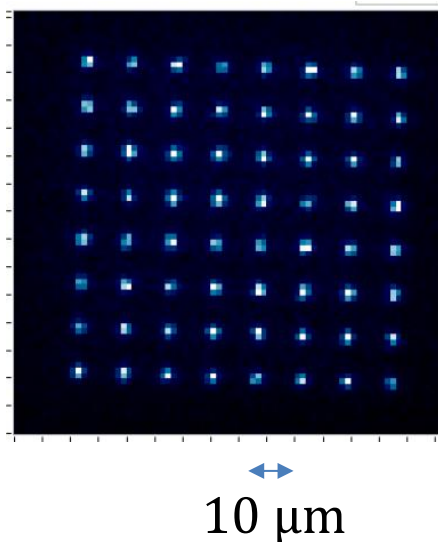


$M_{\text{MQM}} = 1 \mu_{\text{N}}\text{fm}$
 $E_z = 50\text{kV/cm}$

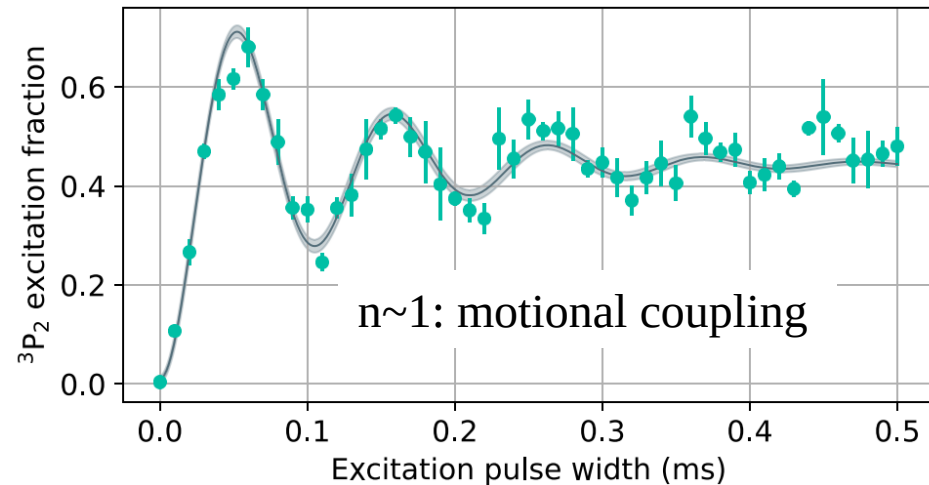
$\Delta E_{\text{MQM}}(F, M_F)$
 in units of Hz

[A. Sunaga *et al.*, NJP 26, 023023(2024)]

^{173}Yb 光トラップアレー



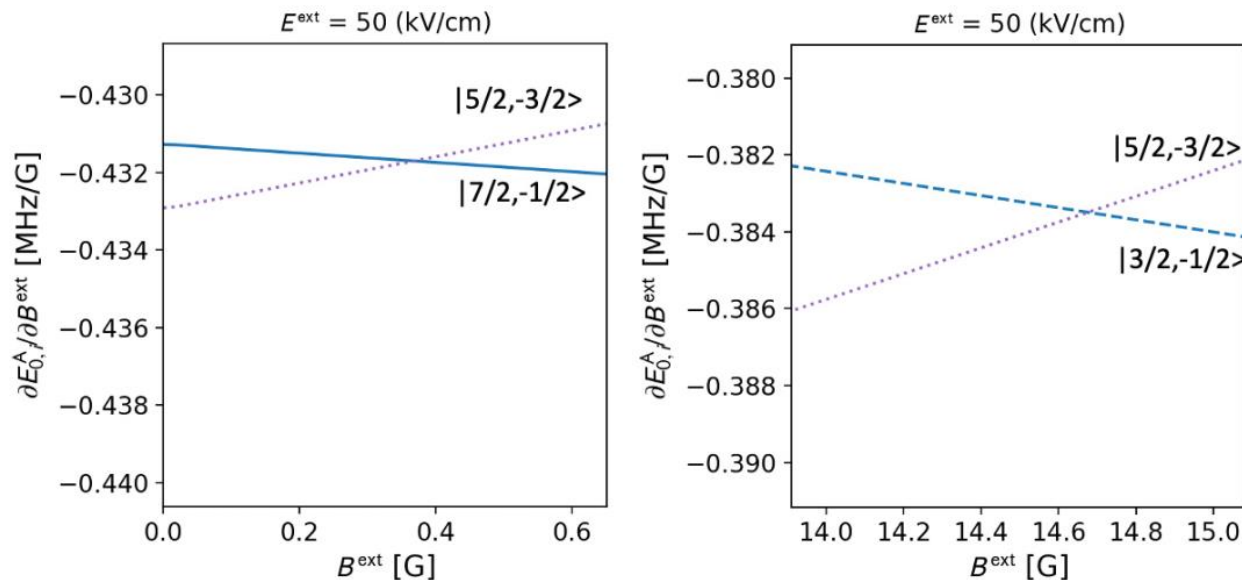
$1S_0 \Leftrightarrow 3P_2$ 遷移のコヒーレント励起
 ラビ振動 : 9.5(2) kHz



研究項目(A3)

「大規模光トラップアレーを用いた核磁気四重極モーメント測定」

Magnetic field insensitive transition @ “magic” magnetic field



“decoherence-free-subspace” due to Hyperfine Interaction

Oscillating MQM with ULDM?

High Sensitivity by using GHZ state ??(Y. Matsuzaki)

研究項目(A2)

「光格子を用いた中性子と電子の間の力を媒介する新粒子の探索」

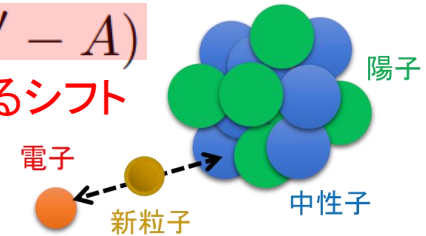
同位体 (A', A) の光学遷移 λ に対する同位体シフト:

$$\nu_{\lambda}^{A'} - \nu_{\lambda}^A = \nu_{\lambda}^{A'A}$$

$$\nu_{\lambda}^{A'A} = K_{\lambda} \delta\mu^{A'A} + F_{\lambda} \delta\langle r^2 \rangle^{A'A} + H_{\lambda} \delta\eta^{A'A} + \alpha_{NP} X_{\lambda} (A' - A)$$

質量シフト フィールドシフト 高次項 新粒子によるシフト

✓ 原子核の質量の差: $\delta\mu^{A'A} = 1/m_{A'} - 1/m_A$ ✓ 原子核の電荷分布の差: $\delta\langle r^2 \rangle^{A'A} = \langle r^2 \rangle^{A'} - \langle r^2 \rangle^A$



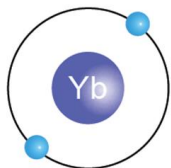
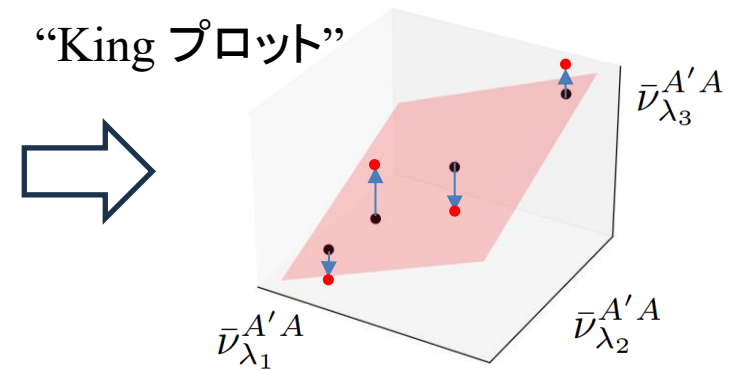
King の線形性: [W. H. King, *J. Opt. Soc. Am* **53** (1963), K. Mikami *et al.*, *Eur. Phys. J. C* (2017)]

3つの光学遷移 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ の同位体シフト:

$$\begin{cases} \nu_{\lambda_1}^{A'A} = K_{\lambda_1} \delta\mu^{A'A} + F_{\lambda_1} \delta\langle r^2 \rangle^{A'A} + H_{\lambda_1} \delta\eta^{A'A} \\ \nu_{\lambda_2}^{A'A} = K_{\lambda_2} \delta\mu^{A'A} + F_{\lambda_2} \delta\langle r^2 \rangle^{A'A} + H_{\lambda_2} \delta\eta^{A'A} \\ \nu_{\lambda_3}^{A'A} = K_{\lambda_3} \delta\mu^{A'A} + F_{\lambda_3} \delta\langle r^2 \rangle^{A'A} + H_{\lambda_3} \delta\eta^{A'A} \end{cases}$$

➡ $\nu_{\lambda_3}^{A'A} = f_{\lambda_1} \nu_{\lambda_1}^{A'A} + f_{\lambda_2} \nu_{\lambda_2}^{A'A} + k_{\mu} \delta\mu^{A'A}$

“King プロット”



3つの超狭線幅光学遷移
578nm, 507nm, 431nm

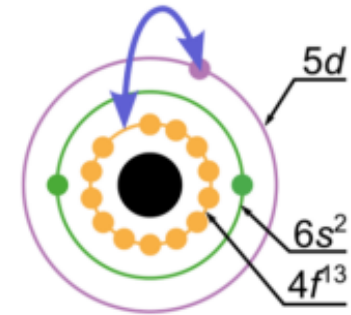
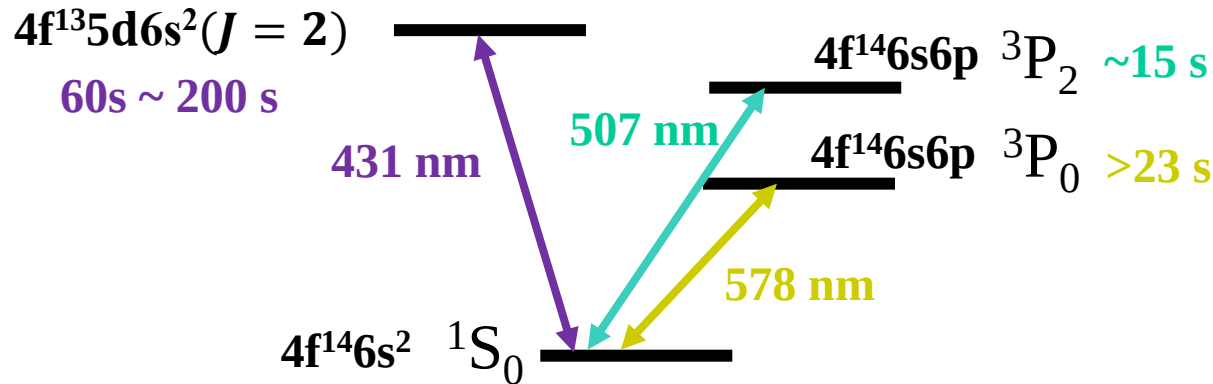
豊富な同位体

168Yb (0.13%)	170Yb (3.05%)	171Yb (14.3%)	172Yb (21.9%)	173Yb (16.2%)	174Yb (31.8%)	176Yb (12.7%)
------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------

研究項目(A2)

「光格子を用いた中性子と電子の間の力を媒介する新粒子の探索」

超狭線幅光学遷移

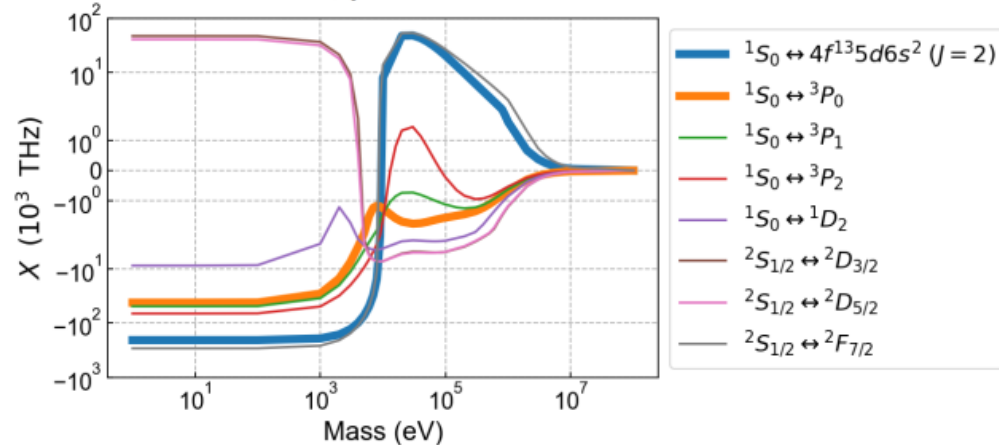


✓ 電子と中性子の間の力を媒介する
新粒子 [A. Sunaga, unpublished]

✓ 局所ローレンツ不変性の破れ
[R. Shaniv, *et al.*, PRL 120 103202 (2018)]

✓ 微細構造定数 α の時間変化
[M. S. Safronova *et al.*, PRL 120 173001 (2018),
V. A. Dzuba *et al.*, PRA 98 022501 (2018)]

$$X_\lambda = \frac{c}{2\pi} \int_0^\infty dr \delta\rho_\lambda(r) \frac{e^{-\frac{mcr}{\hbar}}}{r} \quad (\text{EOM-CC and CI})$$



[A. Sunaga, *et al.*, unpublished]

研究項目(A2)

「光格子を用いた中性子と電子の間の力を媒介する新粒子の探索」

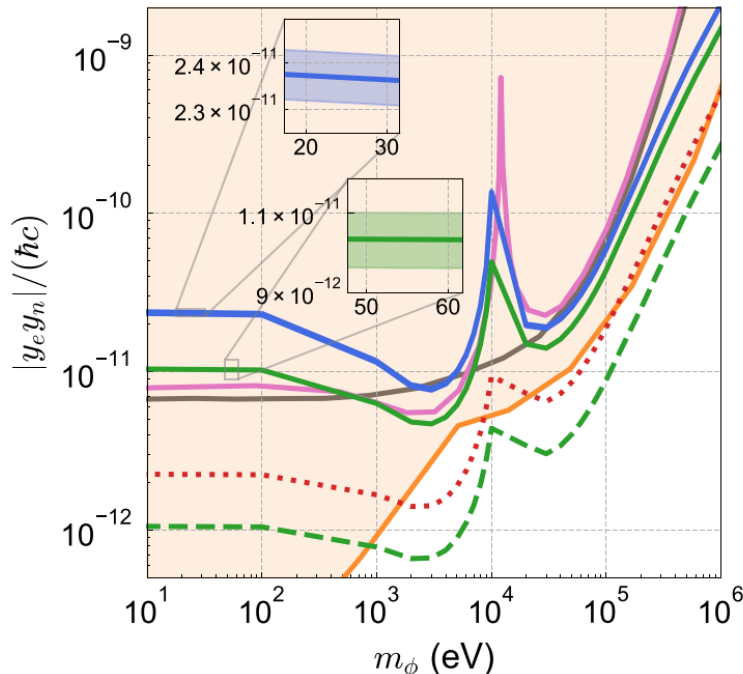
■ 同位体シフトの決定

10 Hz (<10 ppb) 以下の精度

$$\chi^2_{\min} = 7182 \text{ (dof = 1)}$$

非線形性 85 σ

■ 新粒子結合定数への制限



(A', A)	Isotope shift $\delta\nu_{431}^{A'A}$ (Hz)		
(168, 174)	-4 564 600 618.9 (1.7) _{stat}	(6.5) _{sys}	(6.7) _{tot}
(170, 174)	-2 810 665 685.1 (1.2) _{stat}	(7.9) _{sys}	(8.0) _{tot}
(172, 174)	-1 180 617 657.6 (0.7) _{stat}	(5.1) _{sys}	(5.2) _{tot}
(176, 174)	1 115 770 095.3 (1.0) _{stat}	(5.7) _{sys}	(5.8) _{tot}

$$V(r) = (-1)^{s+1} y_e y_n \exp(-mcr/\hbar) / (4\pi r)$$

— Favored region of new particle

— Subtracted IS approach

--- projected sensitivity using ^{166}Yb

$$\overline{\delta\nu_{\lambda_i}^{A'A}} = \delta\nu_{\lambda_i}^{A'A} - \frac{G_{\lambda_i}^{(2)}}{G_{\lambda_0}^{(2)}} \delta\nu_{\lambda_0}^{A'A}$$

(i=1,2,3)

研究項目(A2)

「光格子を用いた中性子と電子の間の力を媒介する新粒子の探索」

$$\nu_{\lambda}^{A'A} = \underbrace{K_{\lambda} \delta\mu^{A'A}}_{\text{質量シフト}} + \underbrace{F_{\lambda} \delta\langle r^2 \rangle^{A'A}}_{\text{フィールドシフト}} + \underbrace{H_{\lambda} \delta\eta^{A'A}}_{\text{高次項}} + \alpha_{\text{NP}} X_{\lambda} (A' - A) \quad \text{新粒子によるシフト}$$

✓ 原子核の質量の差: ✓ 原子核の電荷分布の差:

$$\delta\mu^{AA'} = 1/m_{A'} - 1/m_A \quad \delta\langle r^2 \rangle^{AA'} = \langle r^2 \rangle^{A'} - \langle r^2 \rangle^A$$

Question : A. Vutha

Seltzer Moment展開でいいのか？

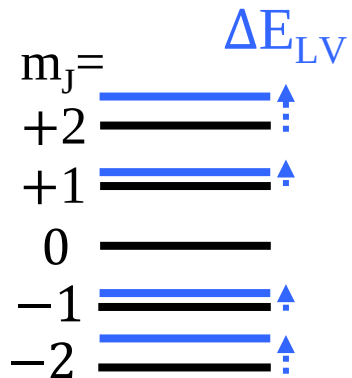
Woods-Saxon modelとの関係は？

Question :

中性子と電子の間の力を媒介する新粒子に
理論的な根拠は？

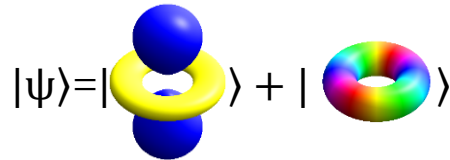
研究項目(A1)

「光格子/光ピンセットアレーを用いた局所ローレンツ不変性の検証」



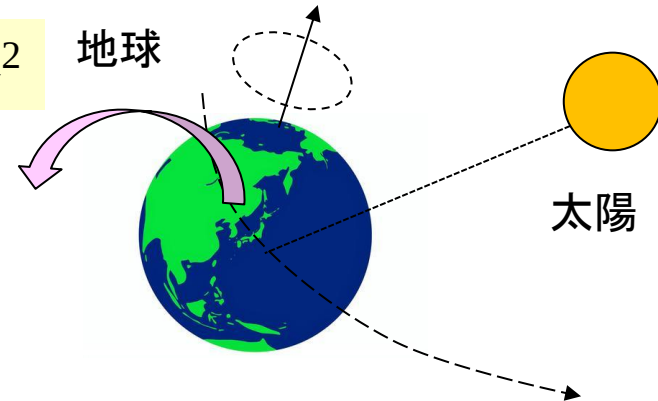
$$H_{LV} \propto p^2 - 3p_z^2$$

$$\Delta E_{LV} = \kappa_{LV} m_J^2$$



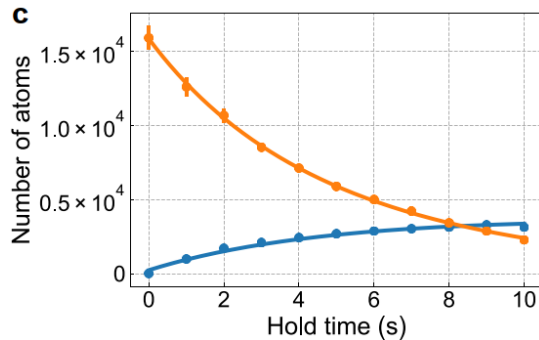
$\text{Yb: } 4f^{13}6s^25d(J=2)$

[R. Shaniv et al., PRL(2018)]



■ 内殻励起準安定状態 ($J=2$)のトラップ寿命測定

$$\tau_e > 66 \text{ s} \quad (\tau_g > 17 \text{ s})$$

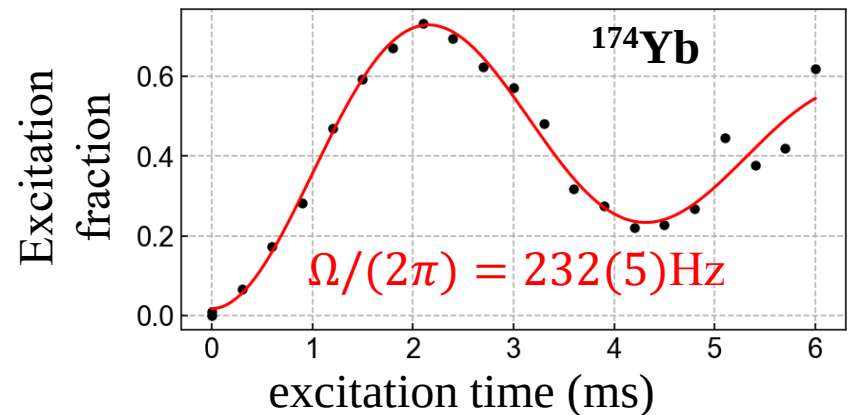


^{174}Yb

■ コヒーレントラビ振動の観測

$$^1S_0 \leftrightarrow 4f^{13}5d6s^2 (J=2, m_J=0)$$

> 70% excitation at π -pulse



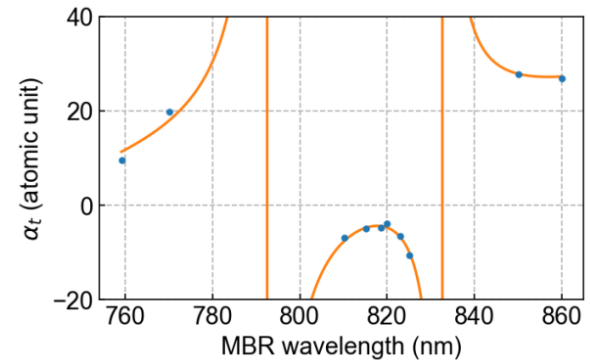
$$\lambda_{\text{magic}} = 797.206(2) \text{ nm}$$

研究項目(A1)

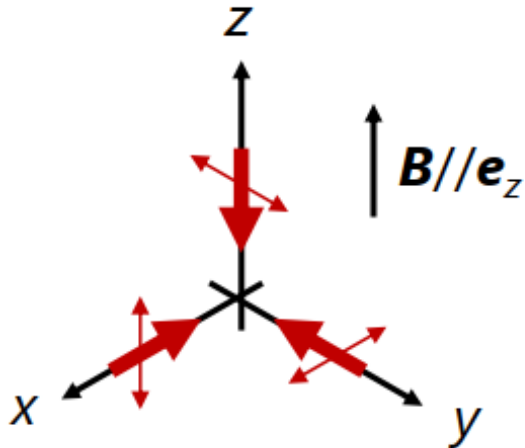
「光格子/光ピンセットアレーを用いた局所ローレンツ不変性の検証」

テンソルライトシフト:

$$\alpha(\omega) = \alpha_s(\omega) + \frac{3 \cos^2 \theta - 1}{2} \frac{3m^2 - J(J+1)}{J(2J-1)} \alpha_t(\omega)$$



テンソルライトシフトの3軸の寄与を互いにキャンセル!(K.Ono)



$$\alpha = \begin{cases} \alpha_s + \frac{m_J^2 - 2}{2} \alpha_t & (\theta = 0) \\ \alpha_s - \frac{m_J^2 - 2}{4} \alpha_t & (\theta = \frac{\pi}{2}) \end{cases}$$

$B // E_{x\text{-lattice}}$

$B \perp E_{y\text{-lattice}}$

$B \perp E_{z\text{-lattice}}$

$$\delta I_{\text{lat}} / I_{\text{lat}} < 1 \times 10^{-3} \quad \text{for } \delta \kappa / \kappa < 0.1$$

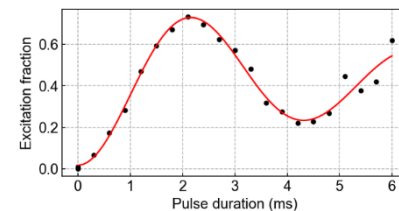
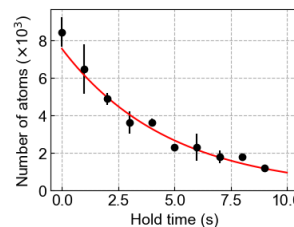
Question :

理論的な裏付け? Kostecky Groupのみ?

まとめ

A1: 局所ローレンツ不変性の検証:

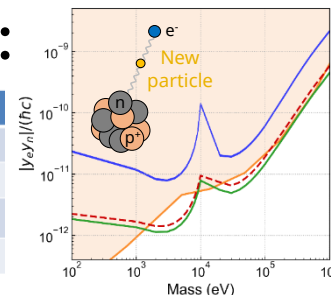
寿命測定($\sim 5\text{s}$)、コヒーレント励起
テンソルシフト対策



A2: 中性子と電子の間の力を媒介する新粒子の探索:

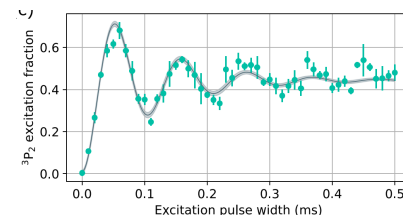
10Hz以下の同位体シフト測定
新粒子制限
原子核物理へのベンチマーク

Isotope pair (A' , A)	Isotope Shift	$\nu^{A'A}$ (Hz)
(176,174)	1 115 770 095.3 (5.8) _{tot} (1.0) _{stat} (5.7) _{sys}	
(174,172)	1 180 617 657.6 (5.2) _{tot} (0.7) _{stat} (5.1) _{sys}	
(174,170)	2 810 665 685.1 (8.0) _{tot} (1.2) _{stat} (7.9) _{sys}	
(174,168)	4 564 600 618.9 (6.7) _{tot} (1.7) _{stat} (6.5) _{sys}	



A3: 核磁気四重極モーメント(MQM)測定:

^{173}Yb トラップアレー、 $^3\text{P}_2$ 状態コヒーレント励起



B: 高感度マイクロ波量子検出による ダークマター探索:

高出力リドベルグ光源開発、高速ラビ振動観測

