

激光核物理：激光、原子核与核外电子

王 旭

中国工程物理研究院 研究生院

激光核物理 = 激光 + 原子核物理

原子物理



1960
激光

激光核物理 = 激光 + 原子核物理

原子物理

非线性光学 (Nobel 1981)

激光冷却原子 (Nobel 1997、2001)

量子光学 (Nobel 2005、2012、2022)

强场原子物理、阿秒脉冲 (Nobel 2018、2023)

原子光钟 (Nobel ?)

1960

激光

激光核物理 = 激光 + 原子核物理

原 子 核 物 理



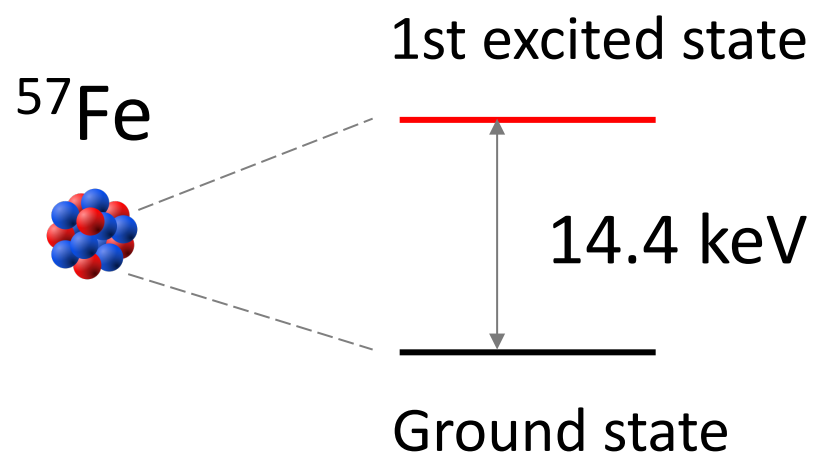
激光核物理 = 激光 + 原子核物理

原子核物理

原子核量子光学
原子核光钟
原子核激光
原子核电池

2010s
拍瓦级红外强激光
同步辐射光源
X射线自由电子激光

量子光学 → 原子核量子光学



14.4 keV: 同步辐射、XFEL

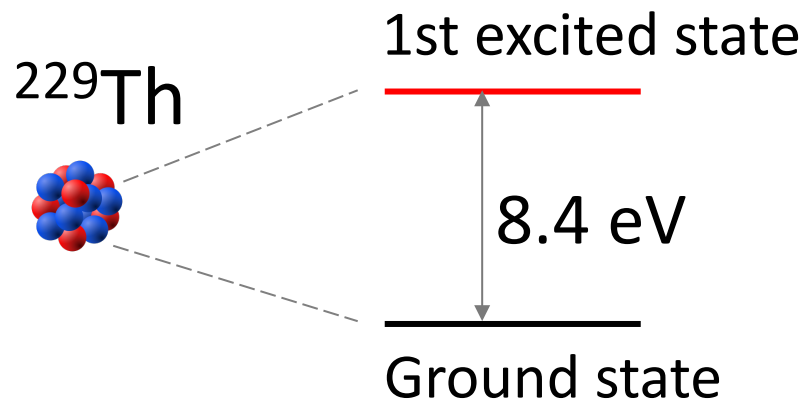
原子核版本的量子光学

10 keV能量尺度的量子光学

量子光学 →→ 原子核量子光学

超辐射与集体兰姆移位：	R. Röhlsberger et al., Science 328, 1248 (2010)
电磁诱导透明：	R. Röhlsberger et al., Nature 482, 199 (2012)
相干调控X光波形：	F. Vagizov et al., Nature 508, 80 (2014)
慢光：	K. P. Heeg et al., Phys. Rev. Lett. 114, 203601 (2015)
拉比振荡：	J. Haber et al., Nat. Photon. 11, 720 (2017)

原子钟→→ 原子核钟



已知能级最低的核激发态

寿命 $\sim 10^3$ s

$\delta E \sim 10^{-4}$ Hz

$\delta E/E \sim 10^{-19}$

基于原子核跃迁的光钟提案：

E. Peik and C. Tamm, Europhys. Lett. 61, 181 (2003)

原子钟→→ 原子核钟

测到内转换电子信号： L. von der Wense et al., Nature 533, 47 (2016)

激光超精细谱： J. Thielking et al., Nature 556, 321 (2018)

间接光激发： T. Masuda et al., Nature 573, 238 (2019)

观测到同核异能态自发辐射信号： S. Kraemer et al., Nature 617, 706 (2023)

直接光激发：
J. Tiedau et al., Phys. Rev. Lett. 132, 182501 (2024)
E. Elwell et al., Phys. Rev. Lett. 133, 013201 (2024)
C. Zhang et al., Nature 633, 63 (2024)

激光核物理的研究目标

- 利用激光高效激发、操控原子核
- 为原子核物理研究提供新手段，发现新的原子核物理
- 解锁基于原子核的新技术应用

原子核钟

原子核电池

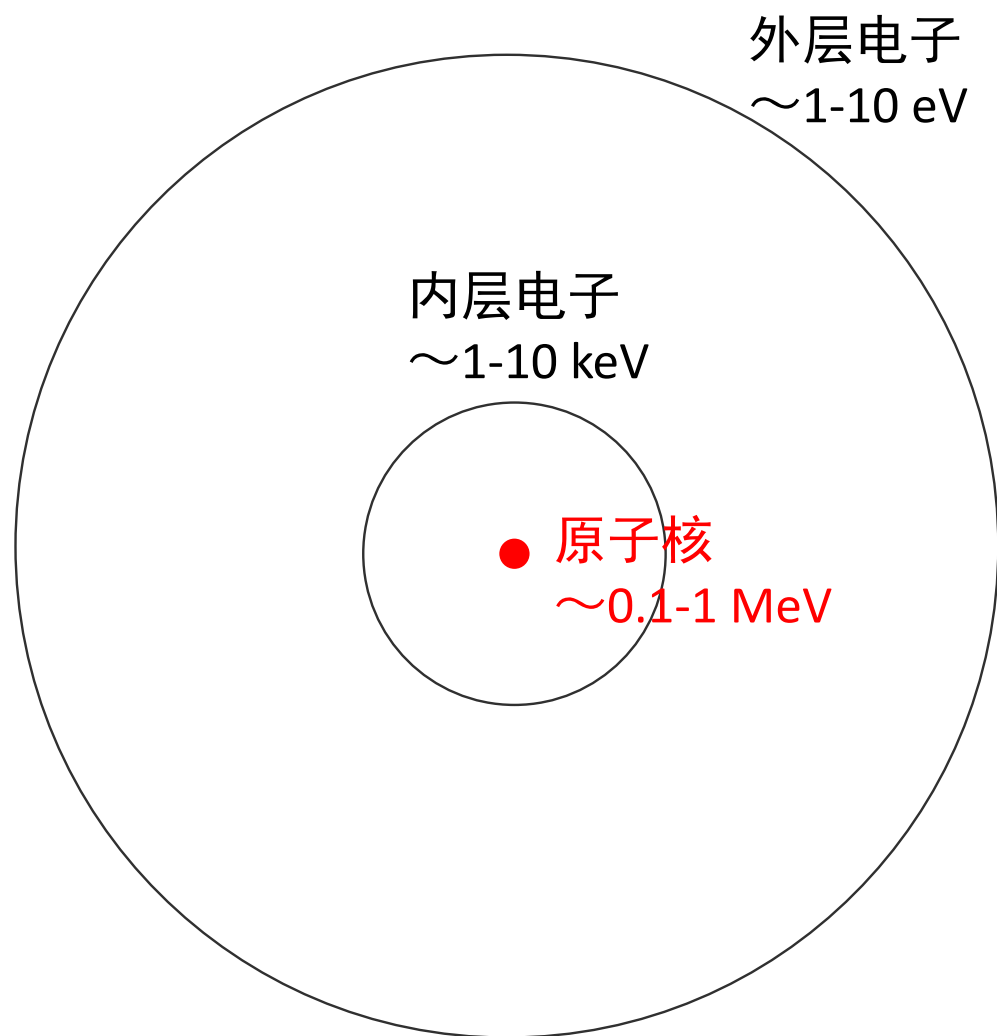
原子核激光

核医学同位素

核废料处理

激光核物理：具有重要基础研究和战略应用价值

“激光核物理” vs “光核物理”



传统光核物理：
 γ 光，弱，非相干
(韧致辐射、原子核 γ 退激等)

电子不响应

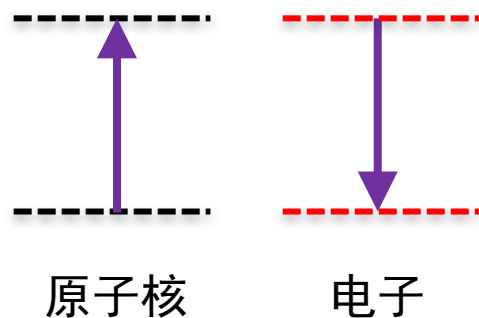
激光核物理：
红外光，X光，强，相干
(各类先进光源)

电子响应

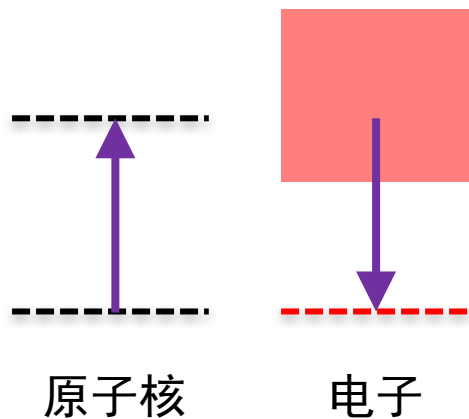
需要理解核外电子的角色和作用
激光—原子核—核外电子三方系统

电子与原子核相互作用过程

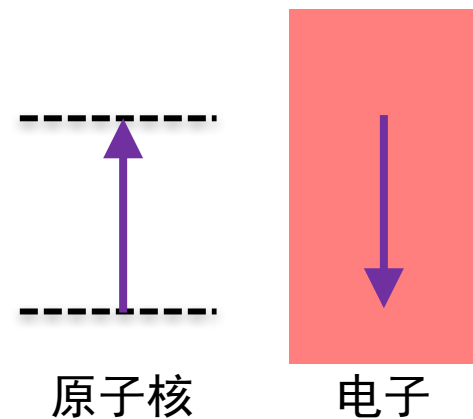
电子跃迁致核激发
(NEET)



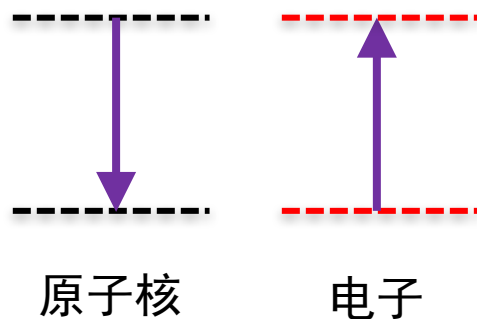
电子俘获致核激发
(NEEC)



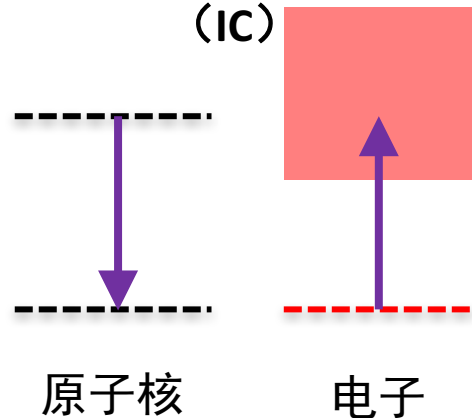
电子非弹散射致核激发
(NEIES)



束缚态内转换
(BIC)

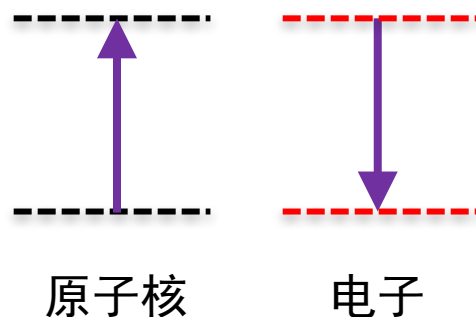


内转换
(IC)

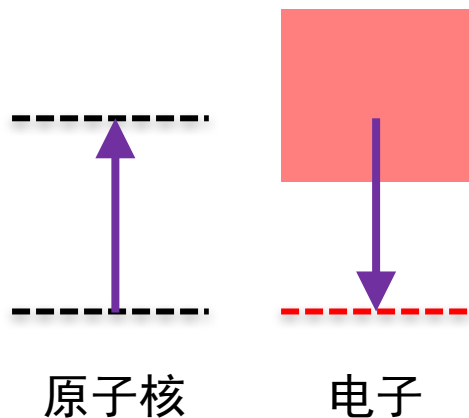


电子与原子核相互作用过程

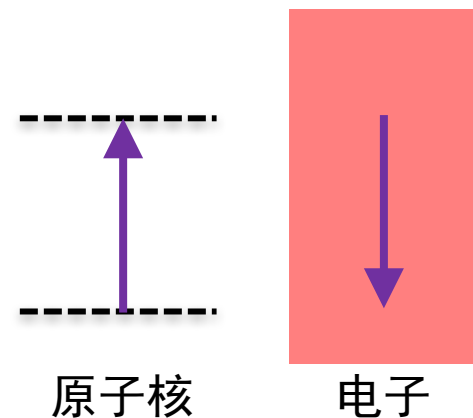
电子跃迁致核激发
(NEET)



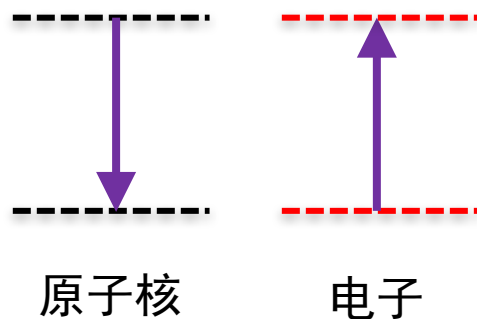
电子俘获致核激发
(NEEC)



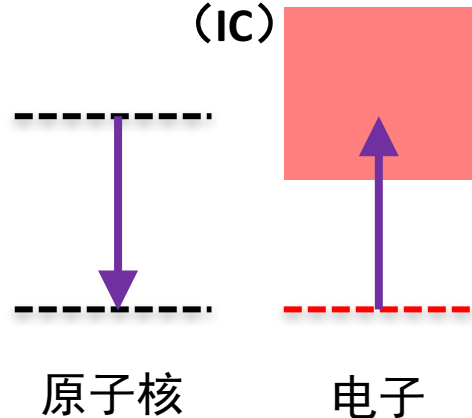
电子非弹散射致核激发
(NEIES)



束缚态内转换
(BIC)

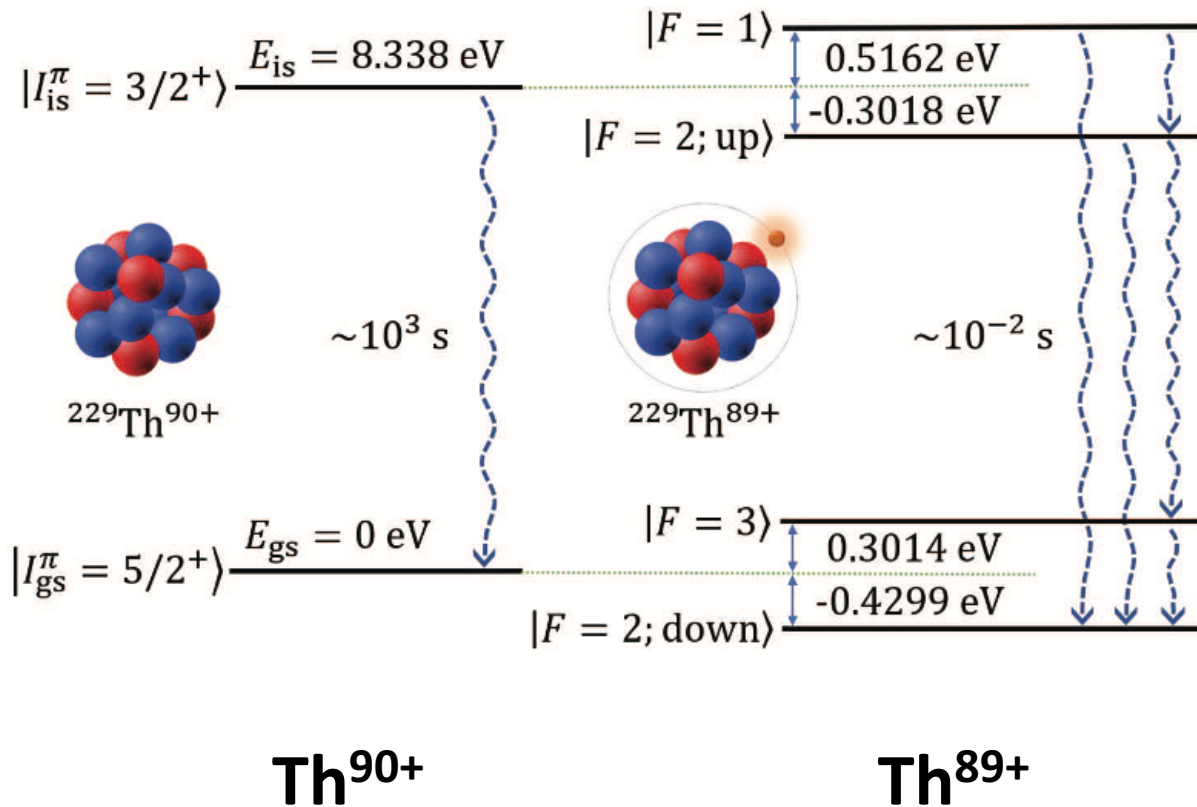


内转换
(IC)

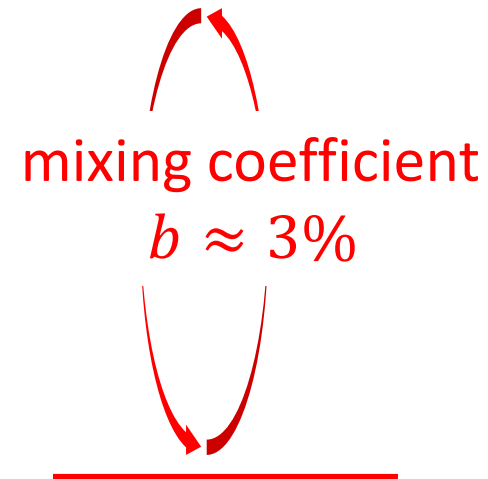


激光驱动情况下又
展现出丰富的变化

超精细混合效应 (Nuclear Hyperfine Mixing, NHM) : 钍-229



level mixing



mixing coefficient
 $b \approx 3\%$

核激发态寿命

$10^3 \text{ s} \rightarrow 10^{-2} \text{ s}$

超精细混合效应：钍-229

多电子情况：电子总角动量 $\leftrightarrow$ 原子核角动量

Th⁸⁸⁺: 无NHM

Th⁸⁷⁺: 有NHM

Th⁸⁶⁺: 无NHM

◦
◦
◦

Th³⁺: 有NHM



总体趋势：
电子离核越远，NHM效应越弱

王武et al.: 利用量子光学方法高效操控Th3+离子超精细混合能级

PHYSICAL REVIEW LETTERS **133**, 223001 (2024)

Isomeric Population Transfer of the ^{229}Th Nucleus via Hyperfine Electronic Bridge

Wu Wang¹, Fen Zou¹, Stephan Fritzsche^{2,3,4,*} and Yong Li^{1,†}

¹*Center for Theoretical Physics & School of Physics and Optoelectronic Engineering, Hainan University, Haikou 570228, China*

²*Helmholtz-Institut Jena, Fröbelstieg 3, D-07743 Jena, Germany*

³*GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH, Planckstrasse 1, D-64291 Darmstadt, Germany*

⁴*Theoretisch-Physikalisches Institut, Friedrich-Schiller-Universität Jena, Max-Wien-Platz 1, D-07743 Jena, Germany*

Th³⁺离子超精细混合效应

- 开启新的、更高效的E1核激发通道

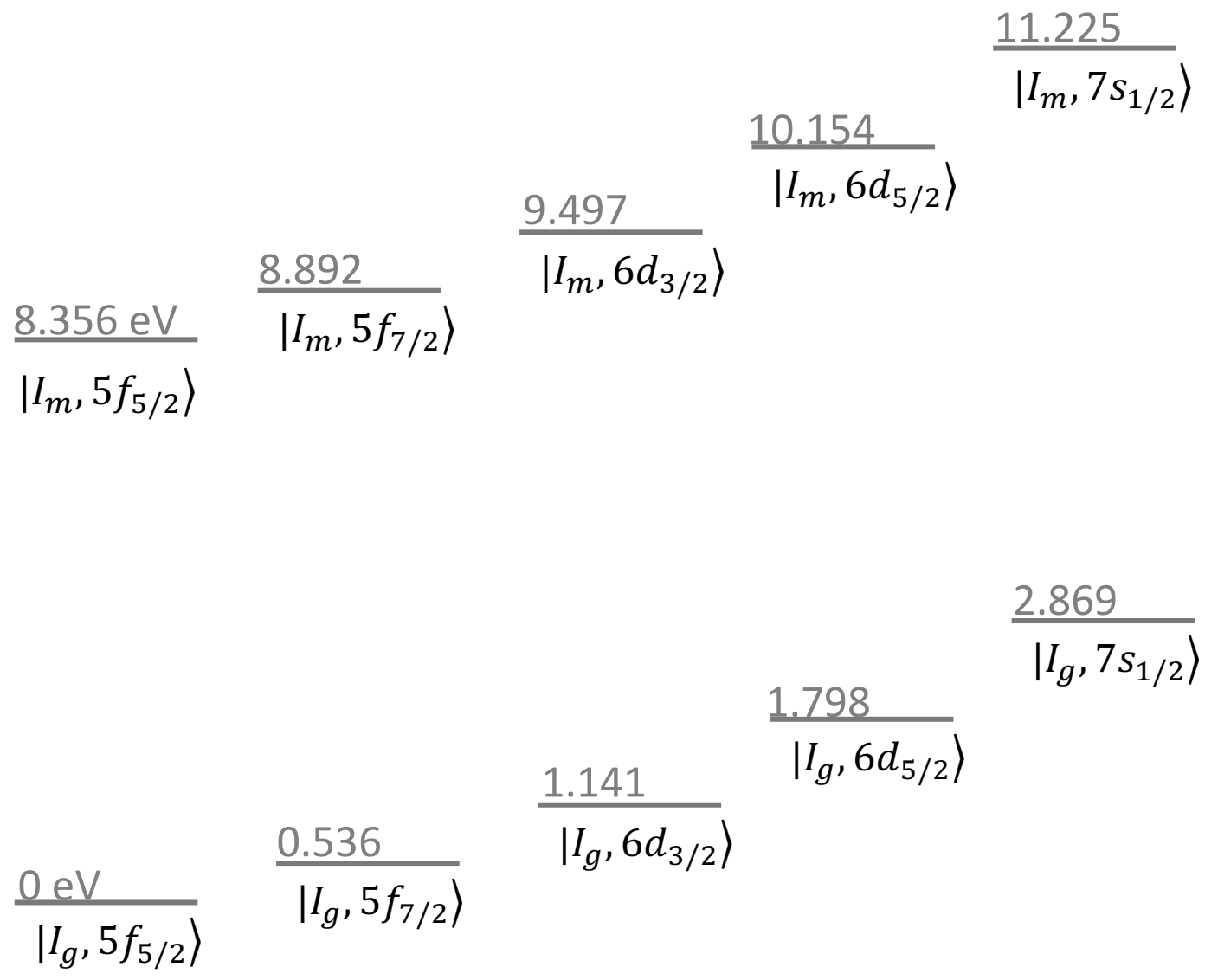
$$131 \text{ nm, E1, } |I_g, 5f_{5/2}\rangle_+ \rightarrow |I_m, 6d_{3/2}\rangle_+$$

比 148 nm 的M1核激发通道激发效率高2个数量级

- 开启新的E1核退激通道

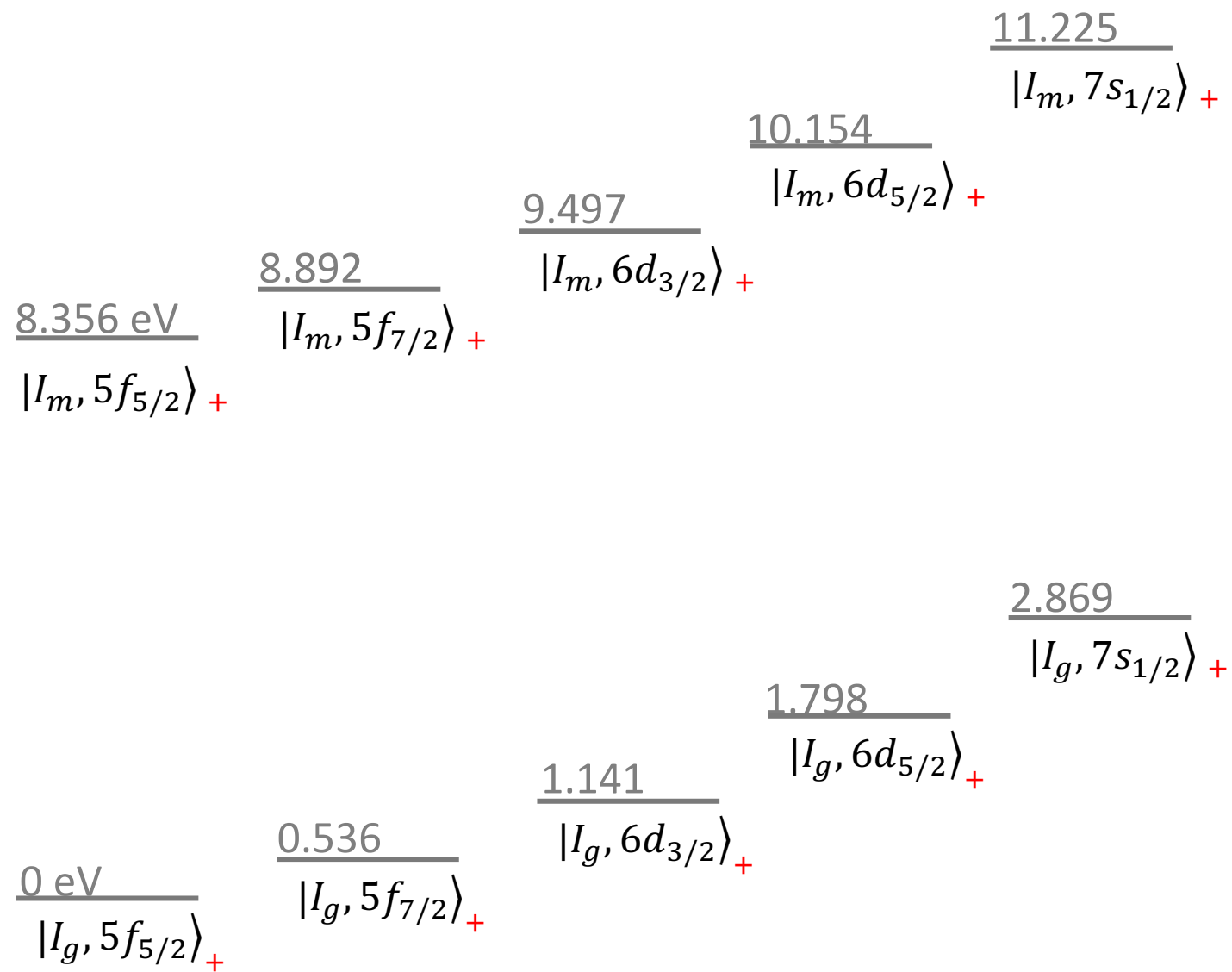
同核异能态寿命缩减 1%—7%

能量 ↑ Th^{3+}

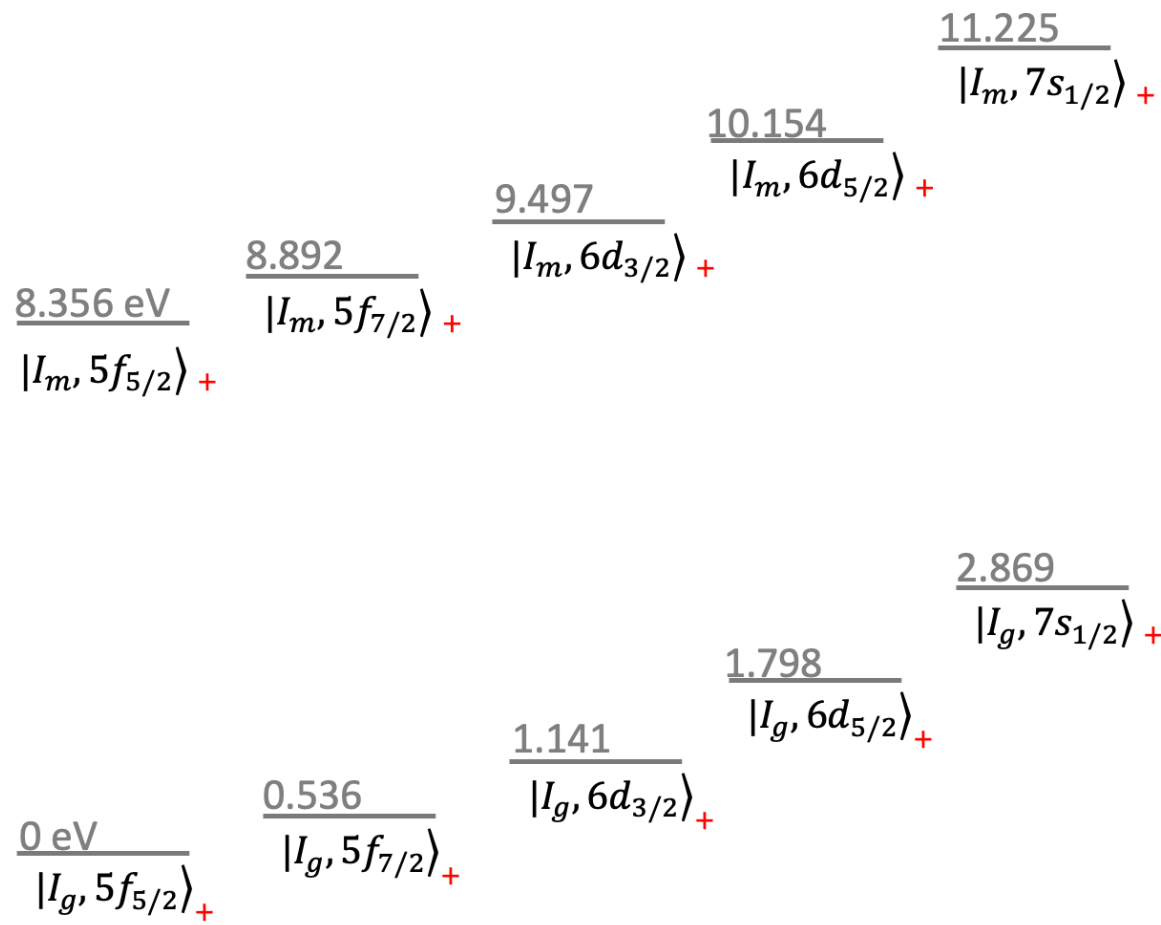


能量↑

Th³⁺



能量 ↑ Th³⁺

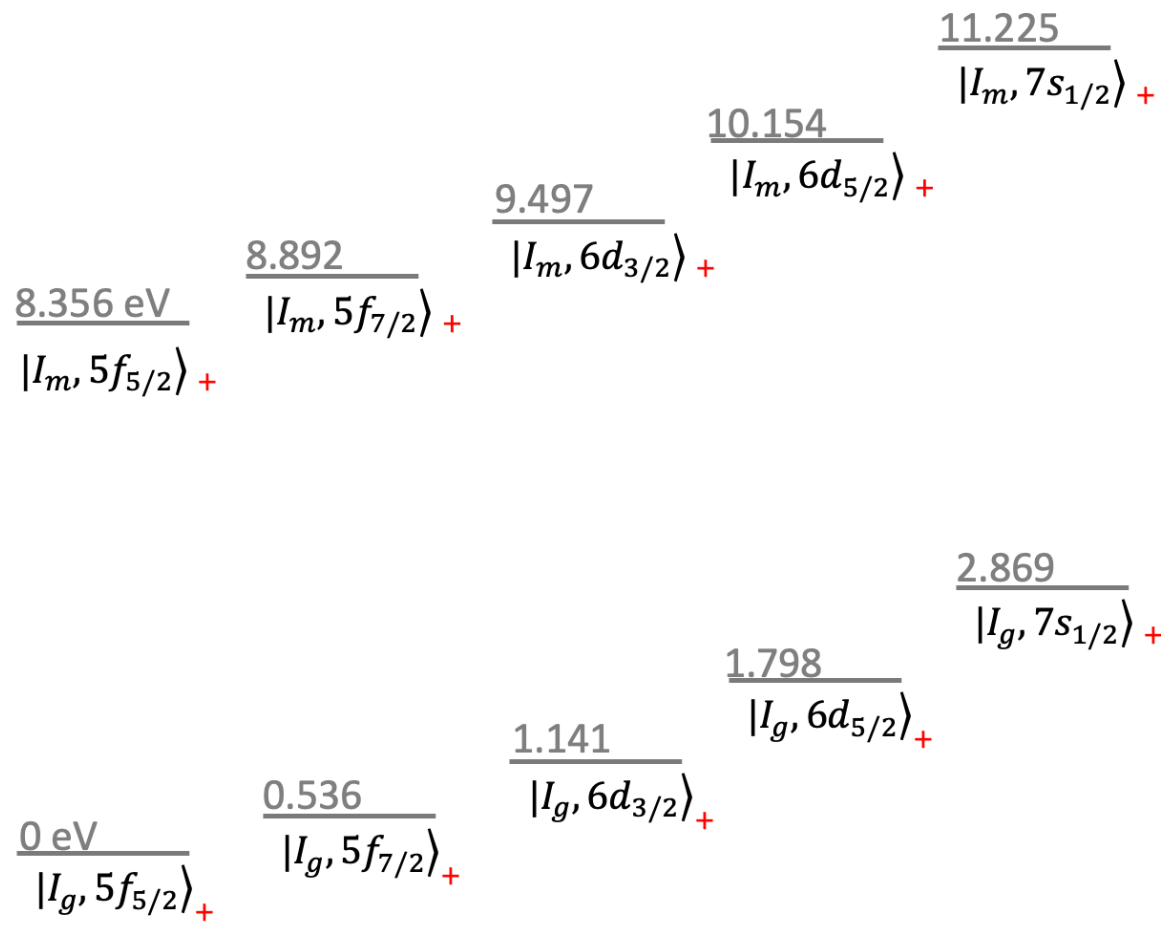


$$\begin{aligned} b_1 &= 1.9 \times 10^{-6} \\ b_2 &= 7.0 \times 10^{-8} \\ b_3 &= -2.1 \times 10^{-7} \\ \beta_1 &= -1.2 \times 10^{-5} \\ \beta_2 &= -2.9 \times 10^{-7} \\ \beta_3 &= -8.6 \times 10^{-8} \end{aligned}$$

$$|I_g, 5f_{5/2}\rangle_+ = |I_g, 5f_{5/2}\rangle + b_1 |I_g, 5f_{7/2}\rangle + b_2 |I_g, 6f_{5/2}\rangle + b_3 |I_m, 5f_{5/2}\rangle + \dots$$

$$|I_m, 6d_{3/2}\rangle_+ = |I_m, 6d_{3/2}\rangle + \beta_1 |I_m, 6d_{5/2}\rangle + \beta_2 |I_m, 7d_{5/2}\rangle + \beta_3 |I_g, 6d_{5/2}\rangle + \dots$$

能量 ↑ Th³⁺

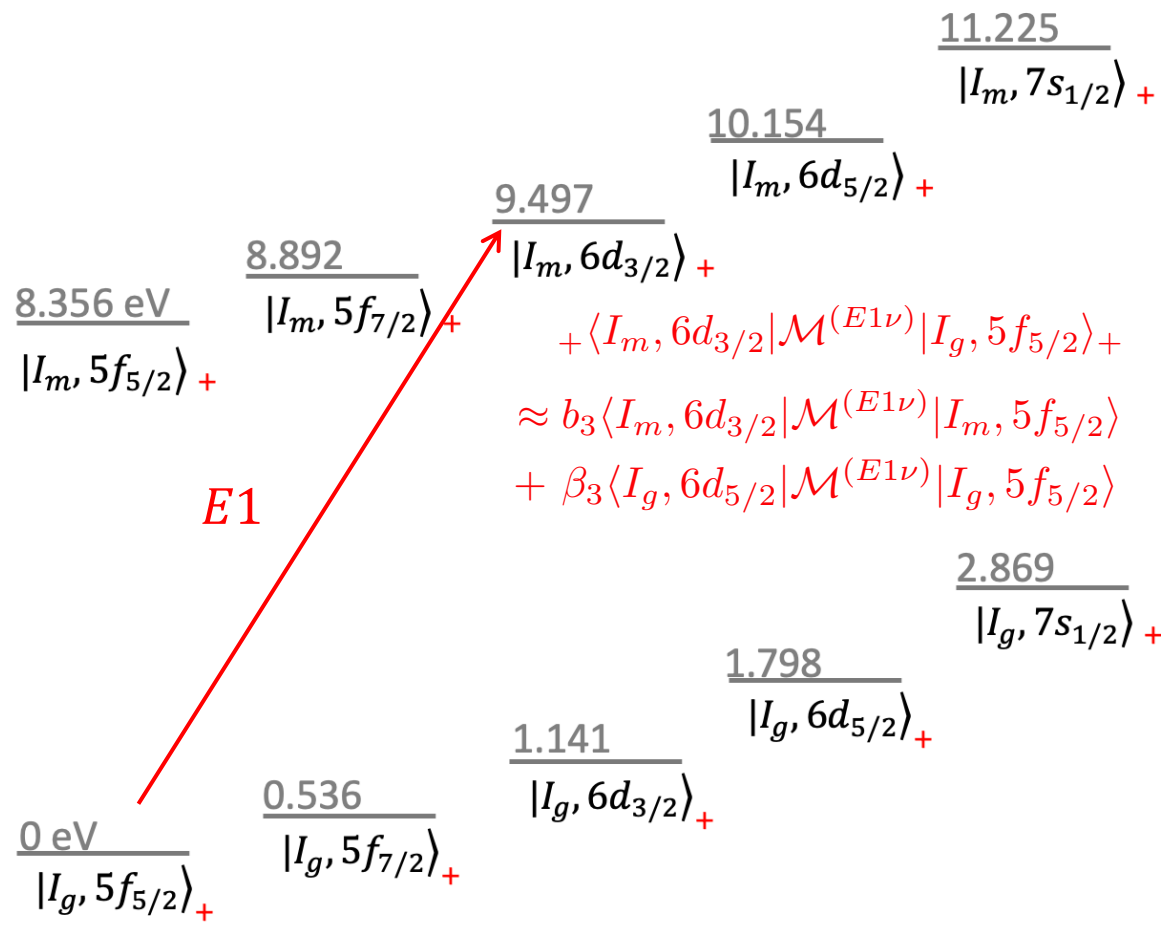


$$\begin{aligned} b_1 &= 1.9 \times 10^{-6} \\ b_2 &= 7.0 \times 10^{-8} \\ b_3 &= -2.1 \times 10^{-7} \\ \beta_1 &= -1.2 \times 10^{-5} \\ \beta_2 &= -2.9 \times 10^{-7} \\ \beta_3 &= -8.6 \times 10^{-8} \end{aligned}$$

$$|I_g, 5f_{5/2}\rangle_+ = |I_g, 5f_{5/2}\rangle + b_1 |I_g, 5f_{7/2}\rangle + b_2 |I_g, 6f_{5/2}\rangle + b_3 |I_m, 5f_{5/2}\rangle + \dots$$

$$|I_m, 6d_{3/2}\rangle_+ = |I_m, 6d_{3/2}\rangle + \beta_1 |I_m, 6d_{5/2}\rangle + \beta_2 |I_m, 7d_{5/2}\rangle + \beta_3 |I_g, 6d_{5/2}\rangle + \dots$$

能量 ↑ Th³⁺

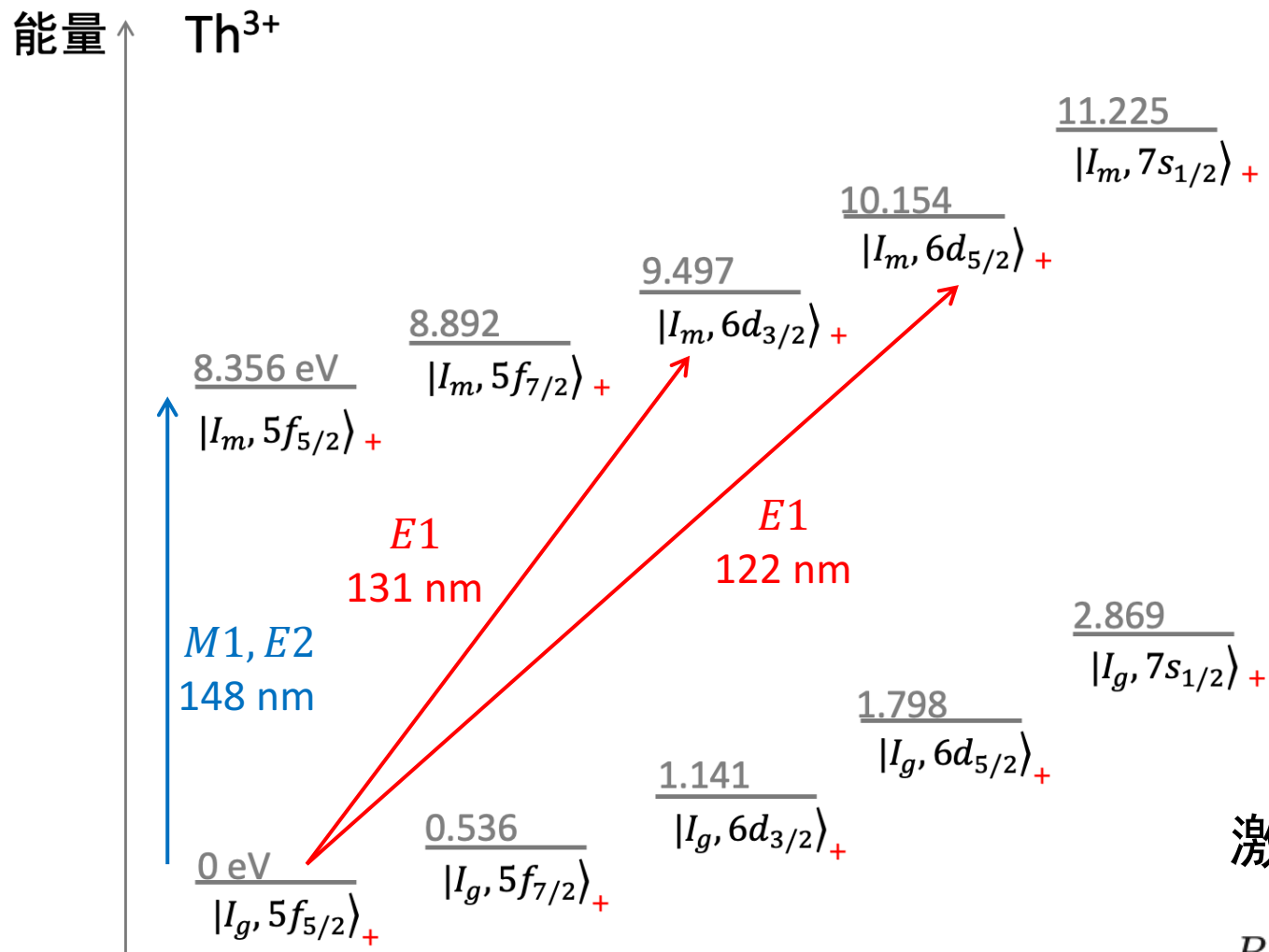


$$\begin{aligned}
 &+ \langle I_m, 6d_{3/2} | \mathcal{M}^{(E1\nu)} | I_g, 5f_{5/2} \rangle + \\
 &\approx b_3 \langle I_m, 6d_{3/2} | \mathcal{M}^{(E1\nu)} | I_m, 5f_{5/2} \rangle \\
 &+ \beta_3 \langle I_g, 6d_{5/2} | \mathcal{M}^{(E1\nu)} | I_g, 5f_{5/2} \rangle
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 b_1 &= 1.9 \times 10^{-6} \\
 b_2 &= 7.0 \times 10^{-8} \\
 b_3 &= -2.1 \times 10^{-7} \\
 \beta_1 &= -1.2 \times 10^{-5} \\
 \beta_2 &= -2.9 \times 10^{-7} \\
 \beta_3 &= -8.6 \times 10^{-8}
 \end{aligned}$$

$$|I_g, 5f_{5/2}\rangle_+ = |I_g, 5f_{5/2}\rangle + b_1 |I_g, 5f_{7/2}\rangle + b_2 |I_g, 6f_{5/2}\rangle + \textcolor{red}{b_3 |I_m, 5f_{5/2}\rangle} + \dots$$

$$|I_m, 6d_{3/2}\rangle_+ = |I_m, 6d_{3/2}\rangle + \beta_1 |I_m, 6d_{5/2}\rangle + \beta_2 |I_m, 7d_{5/2}\rangle + \textcolor{red}{\beta_3 |I_g, 6d_{5/2}\rangle} + \dots$$



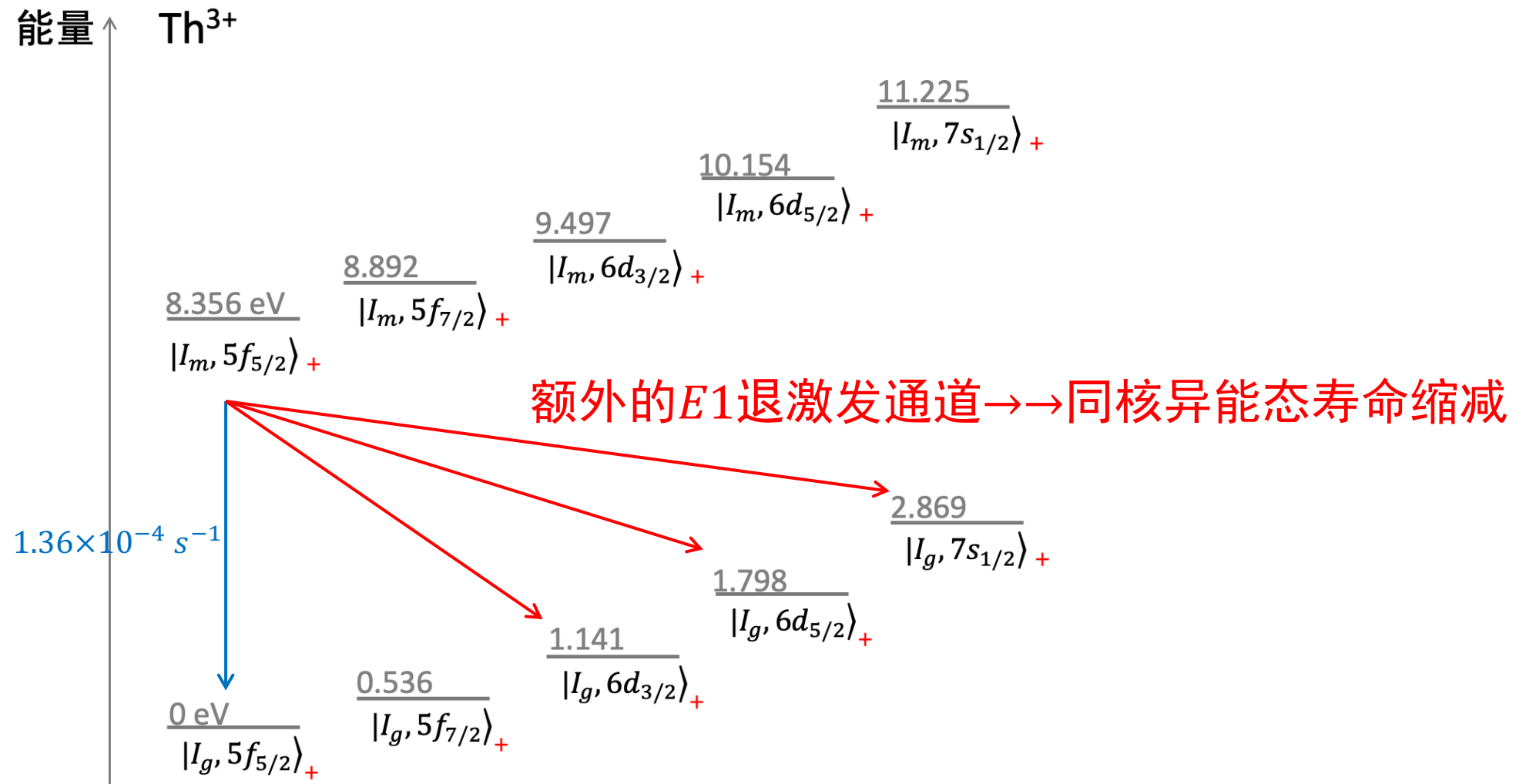
激发概率:

$$P_{\text{exc}}(t) \approx \frac{|\langle f | \mathcal{M}^{(\tau 1)} | i \rangle_+|^2}{3(2F_i + 1)} I t^2$$

$$+\langle I_m, 6d_{3/2} || E1 || I_g, 5f_{5/2} \rangle_+ = 6.22 \times 10^{-8} \text{ a.u.}$$

$$+\langle I_m, 5f_{5/2} || M1 || I_g, 5f_{5/2} \rangle_+ = 3.73 \times 10^{-9} \text{ a.u.}$$

激发概率2个数量级提升!

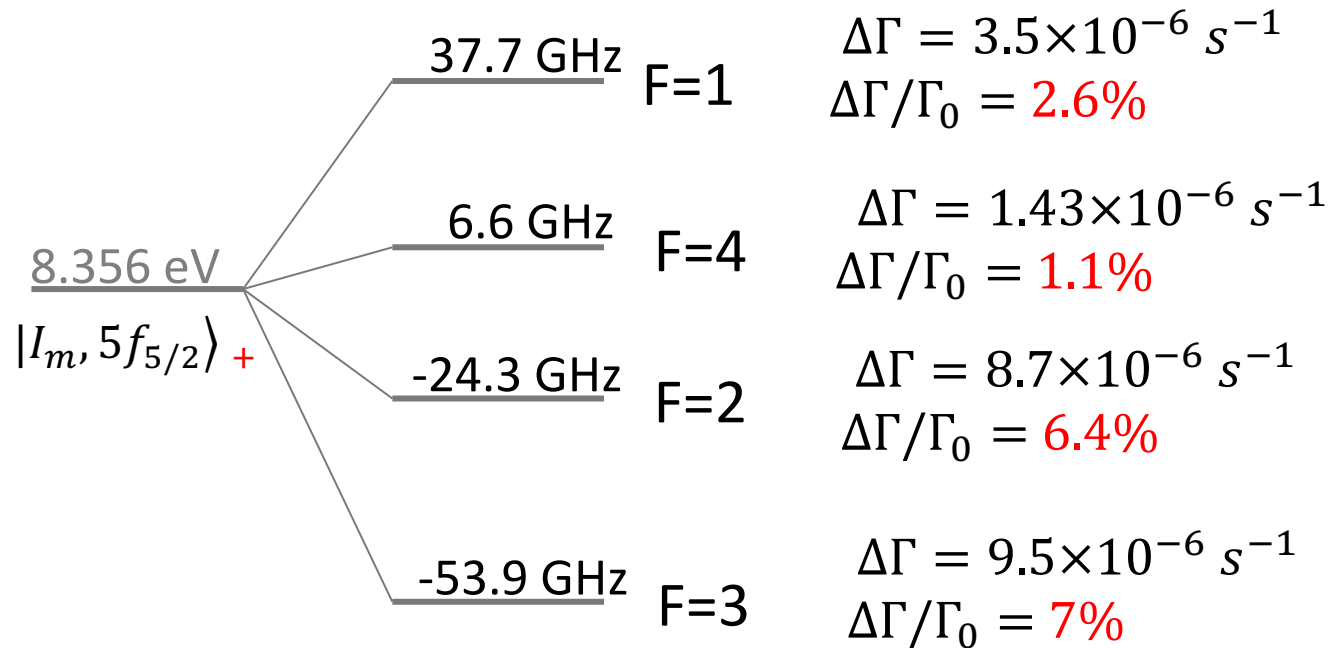


$$\Gamma = \Gamma_0 + \Delta\Gamma$$

$$\Gamma_0 = 1.36 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$$

$$B(M1) = 0.0076 \text{ W.u.}$$

超精细混合效应导致核激发态寿命缩减



$$\Gamma = \Gamma_0 + \Delta\Gamma$$
$$\Gamma_0 = 1.36 \times 10^{-4} s^{-1}$$

$$\Delta\Gamma = 3.5 \times 10^{-6} s^{-1}$$
$$\Delta\Gamma/\Gamma_0 = 2.6\%$$

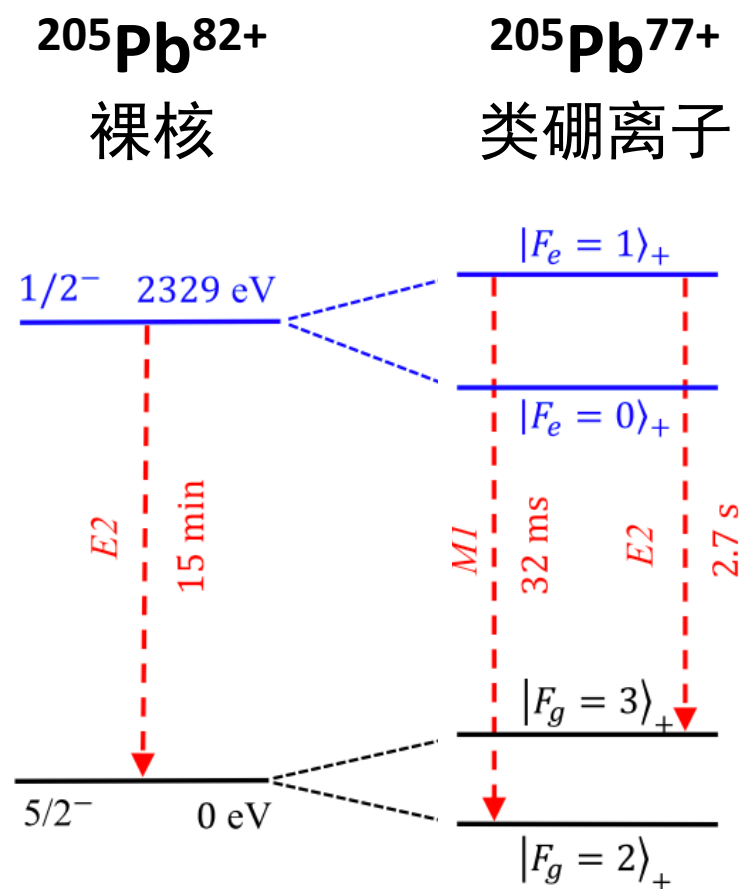
$$\Delta\Gamma = 1.43 \times 10^{-6} s^{-1}$$
$$\Delta\Gamma/\Gamma_0 = 1.1\%$$

$$\Delta\Gamma = 8.7 \times 10^{-6} s^{-1}$$
$$\Delta\Gamma/\Gamma_0 = 6.4\%$$

$$\Delta\Gamma = 9.5 \times 10^{-6} s^{-1}$$
$$\Delta\Gamma/\Gamma_0 = 7\%$$

不同的超精细能级寿命不同

超精细混合效应：铅-205



核激发态寿命：

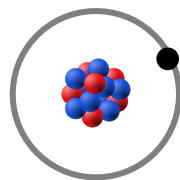
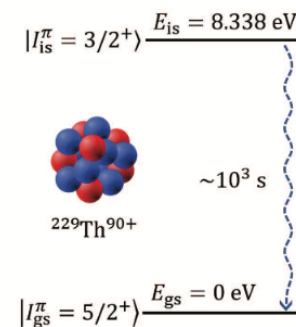
15 min $\rightarrow$ 32 ms

首次发现超精细混合效应导致
新的跃迁类型： $E2 \rightarrow M1$

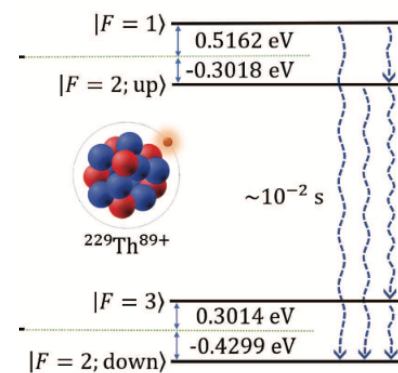
高阶非线性光核相互作用



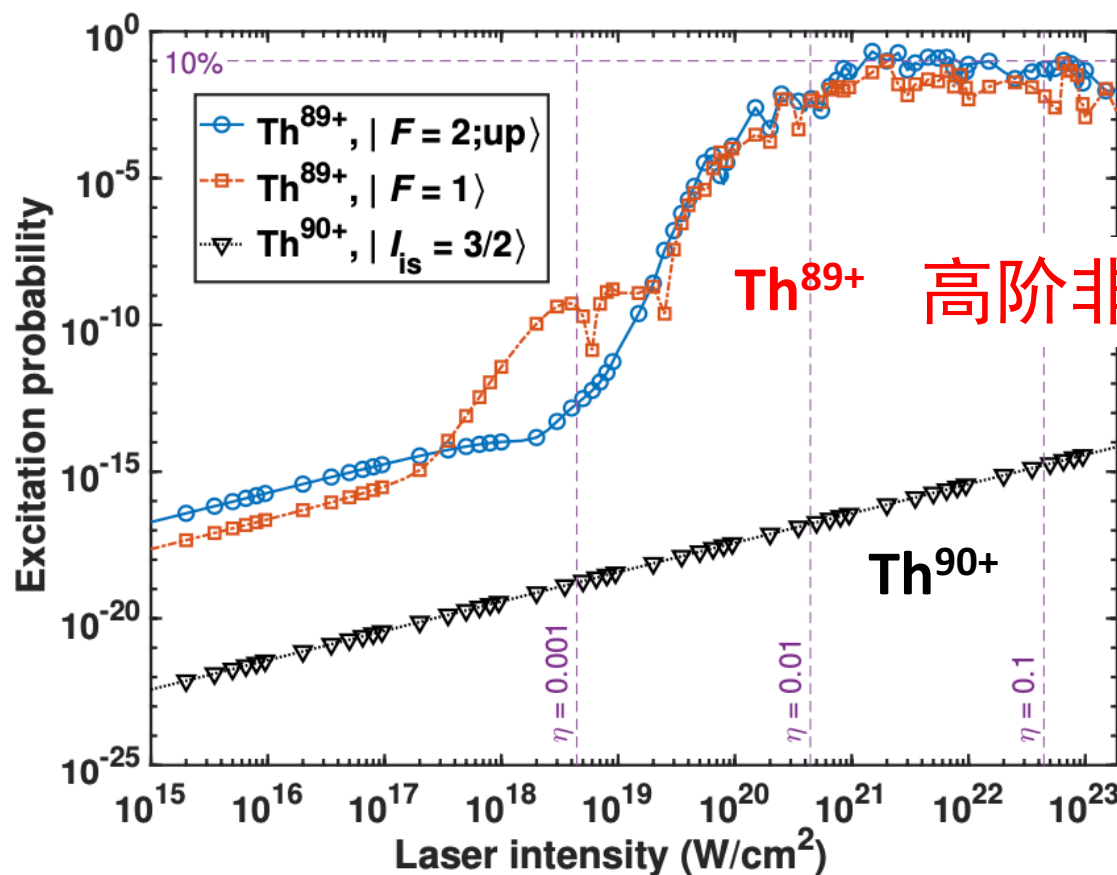
$^{229}\text{Th}^{90+}$
裸核



$^{229}\text{Th}^{89+}$
类氢离子



原子核激发概率



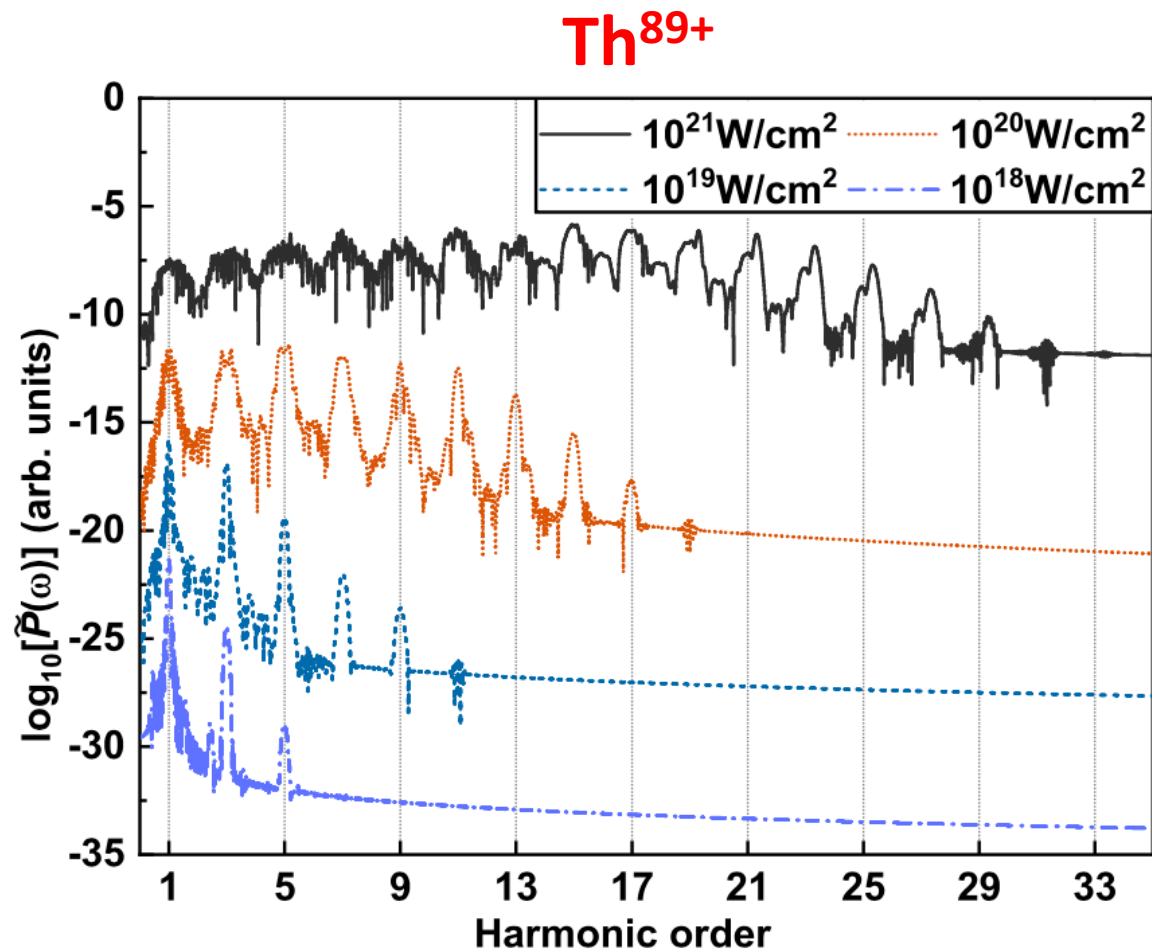
~10%

单核单脉冲激发概率

Th^{89+} 高阶非线性光核相互作用

H. Zhang, T. Li, and X. Wang, Phys. Rev. Lett. 133, 152503 (2024)

基于原子核跃迁的高次谐波和阿秒脉冲



平台结构：阿秒脉冲串

基于束缚态能级跃迁

谐波谱中隐藏核跃迁信息

H. Zhang, T. Li, and X. Wang, Phys. Rev. Lett. 133, 152503 (2024)

The Nobel Prize in Physics 2023



© Nobel Prize Outreach. Photo:
Clément Morin

Pierre Agostini

Prize share: 1/3



© Nobel Prize Outreach. Photo:
Clément Morin

Ferenc Krausz

Prize share: 1/3



© Nobel Prize Outreach. Photo:
Clément Morin

Anne L'Huillier

Prize share: 1/3

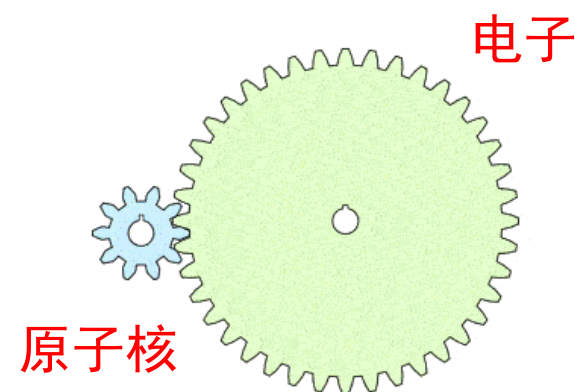
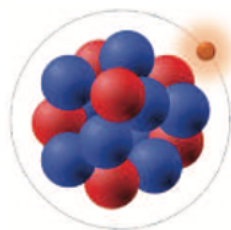
The Nobel Prize in Physics 2023 was awarded to
Pierre Agostini, Ferenc Krausz and Anne L'Huillier
"for experimental methods that generate
attosecond pulses of light for the study of electron
dynamics in matter"

超精细混合效应：提升光核耦合效率

裸核



类氢离子



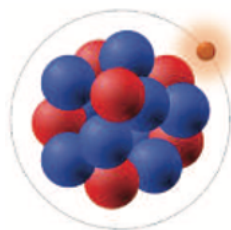
电子极大增强光核耦合
光场的能量、角动量更高效传递给原子核

超精细混合效应：提升光核耦合效率

裸核

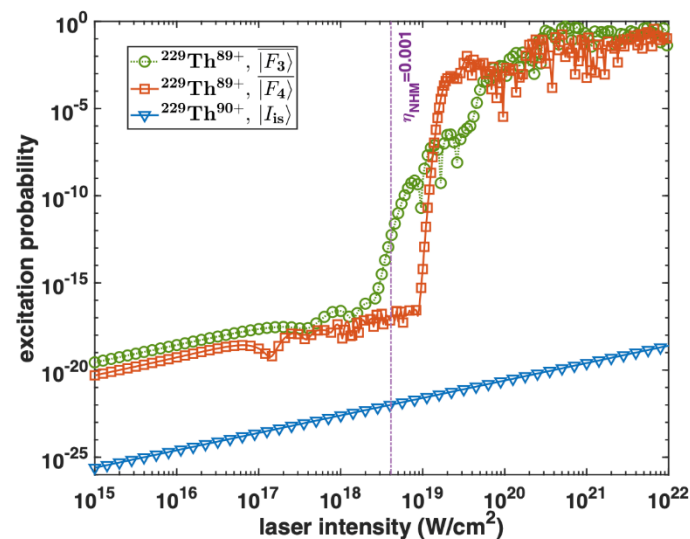


类氢离子



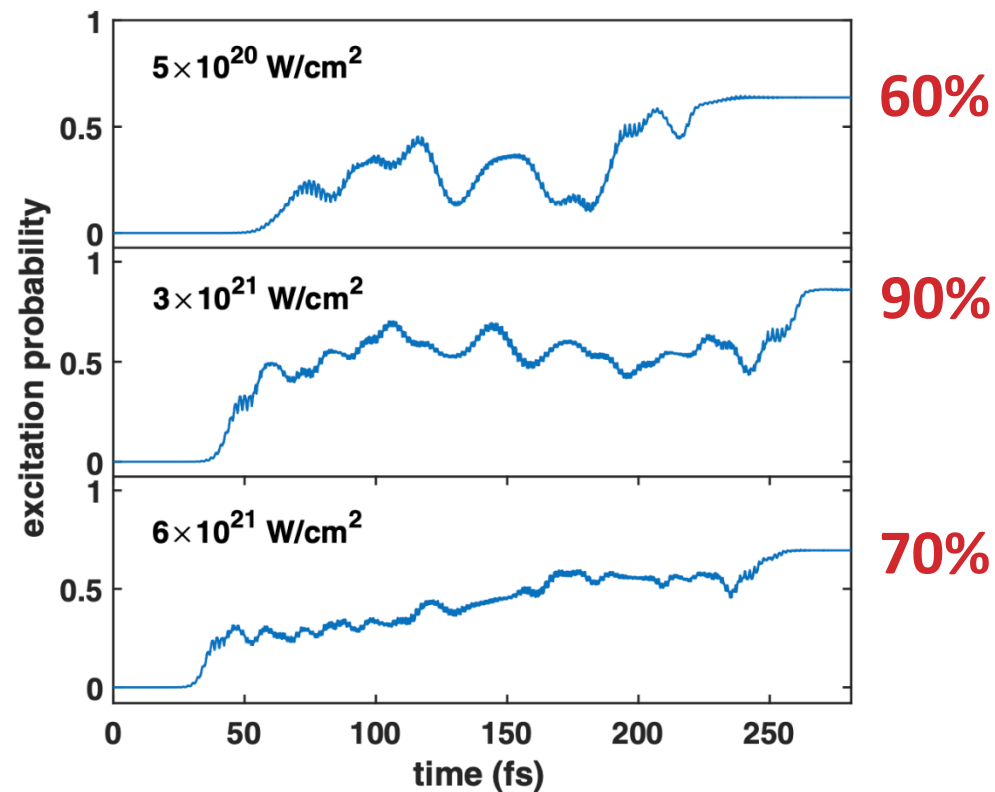
电子极大增强光核耦合
光场的能量、角动量更高效传递给原子核

~100% 单核单脉冲激发概率



1053 nm, 100 fs

单原子核量子操控?

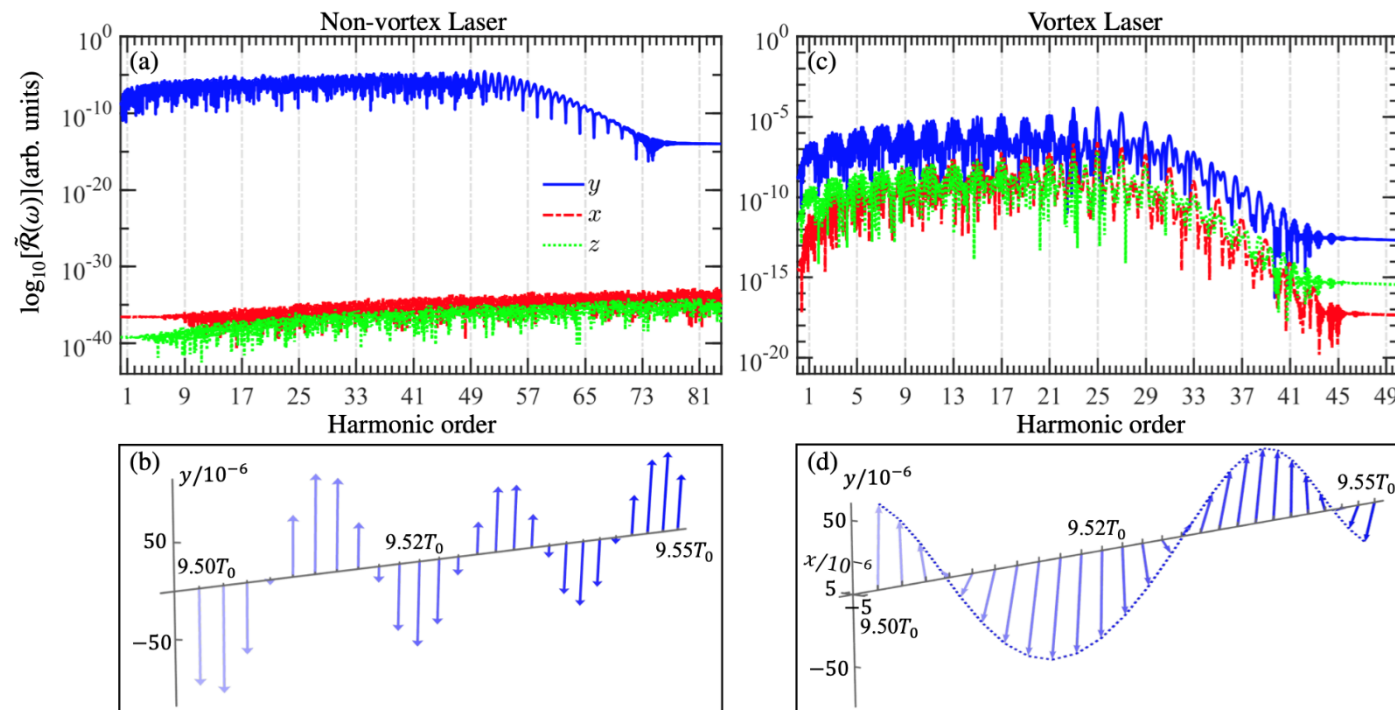
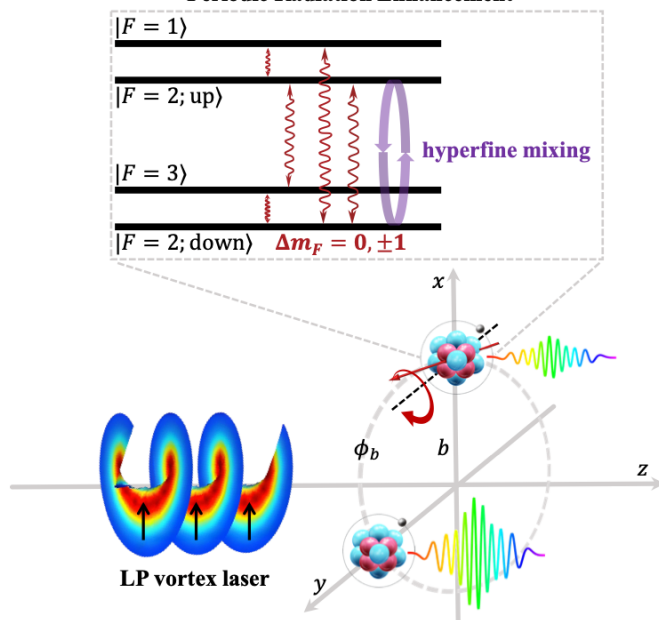


H. Zhang, T. Li, and X. Wang, Phys. Rev. C 111, 044614 (2025)

利用涡旋光操控 $^{229}\text{Th}^{89+}$

(a) New Phenomena in Nuclear Control

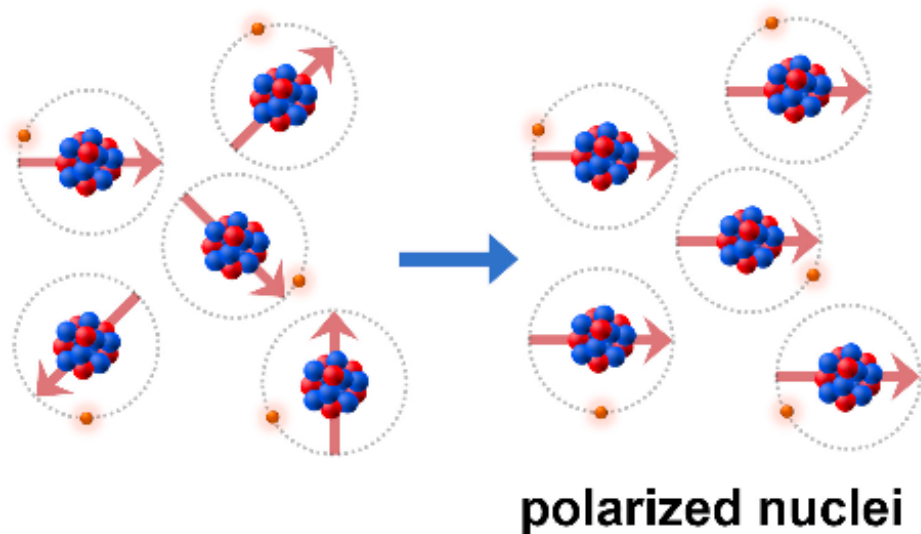
- Nuclear Magnetic Moment Rotation
- Periodic Radiation Enhancement



涡旋光诱导的原子核磁矩旋转

与西安交大栗建兴教授课题组合作 Z.-W. Lu et al., arXiv: 2503.12812

原子核极化



基础物理：

检验核力理论

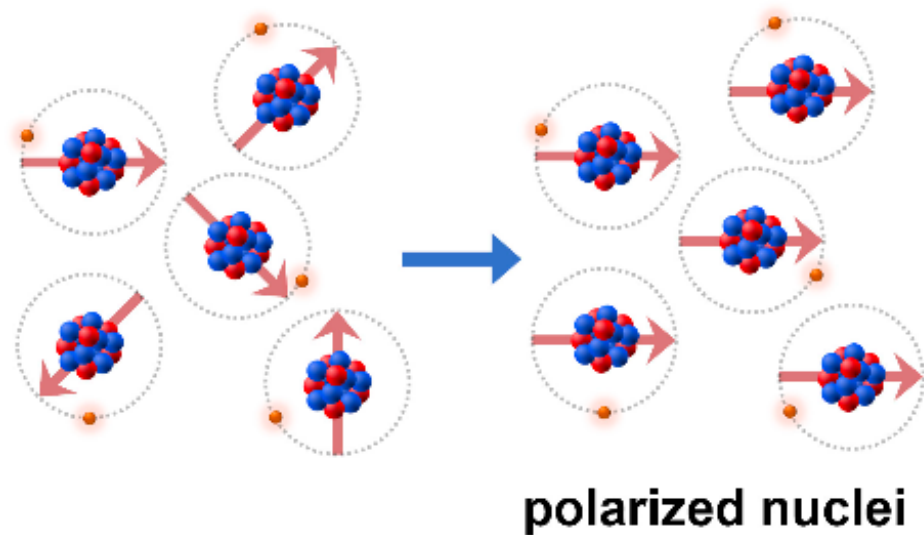
检验基础物理常数的变化

技术应用：

提升核磁共振灵敏度

化学、生物学、量子信息等领域

原子核极化



现有方法：

optical pumping

spin-exchange collision

局限性：

很难应用于重核

极化过程较长

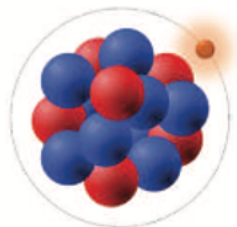
强激光与高价离子相互作用超快极化重原子核

$^{205}\text{Pb}^{82+}$

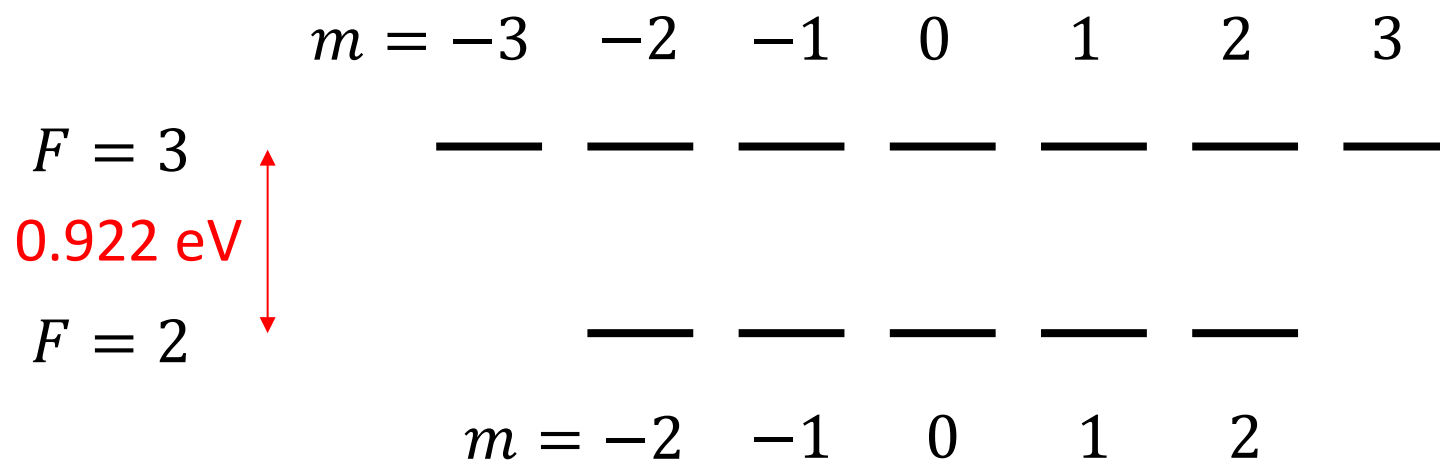


核基态
 $I = 5/2$

$^{205}\text{Pb}^{81+}$



1s电子
 $J = 1/2$
 $F = 2, 3$



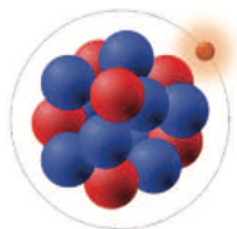
强激光与高价离子相互作用超快极化重原子核

$^{205}\text{Pb}^{82+}$



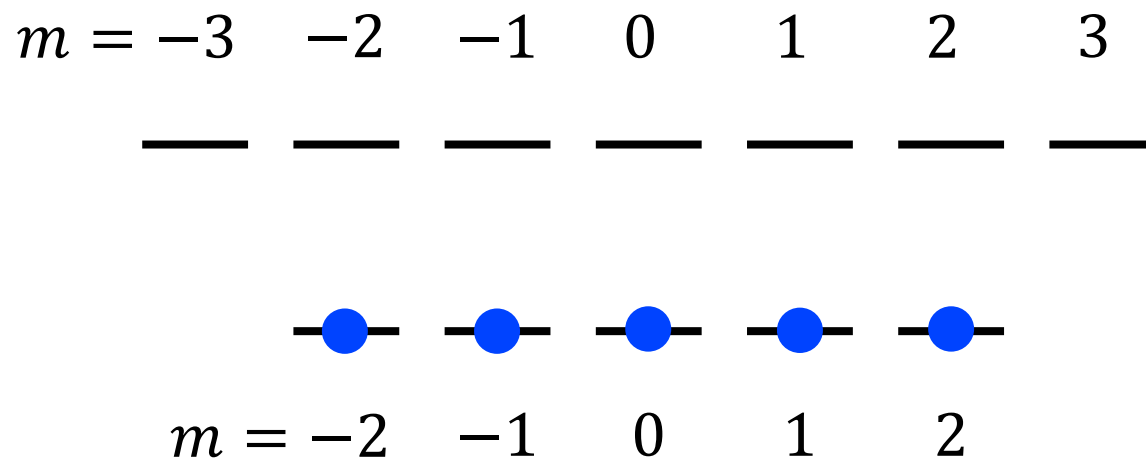
核基态
 $I = 5/2$

$^{205}\text{Pb}^{81+}$



1s电子
 $J = 1/2$
 $F = 2, 3$

$F = 3$
0.922 eV
 $F = 2$



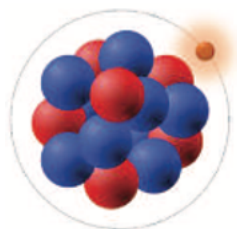
强激光与高价离子相互作用超快极化重原子核

$^{205}\text{Pb}^{82+}$



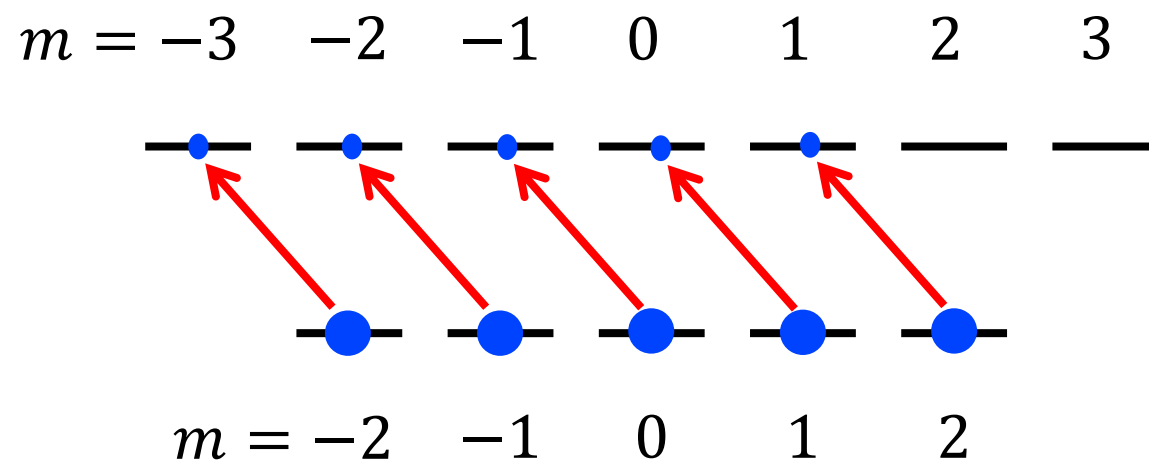
核基态
 $I = 5/2$

$^{205}\text{Pb}^{81+}$



1s电子
 $J = 1/2$
 $F = 2, 3$

$F = 3$
0.922 eV
 $F = 2$



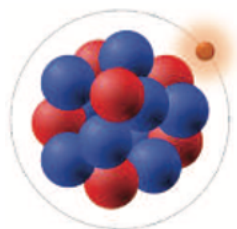
强激光与高价离子相互作用超快极化重原子核

$^{205}\text{Pb}^{82+}$



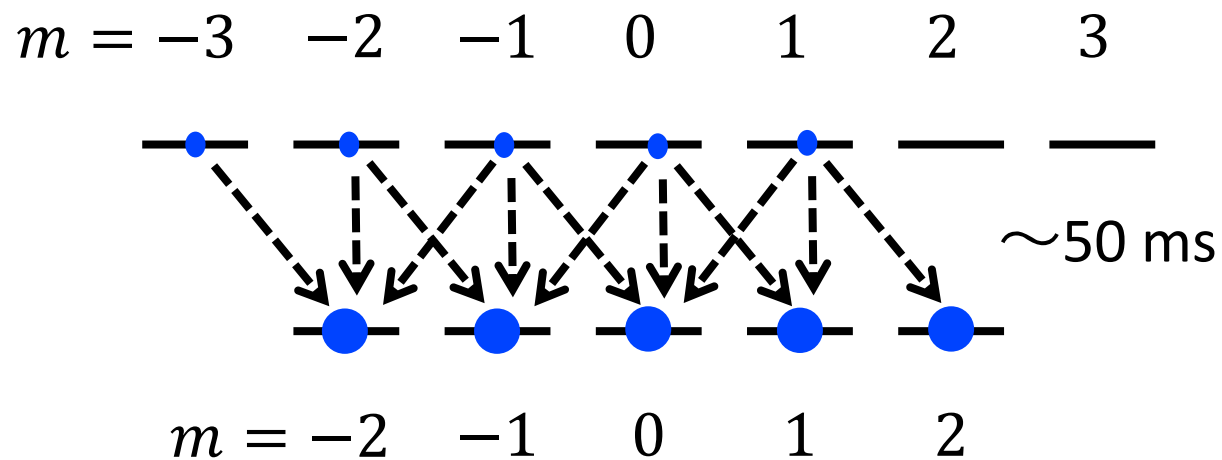
核基态
 $I = 5/2$

$^{205}\text{Pb}^{81+}$



1s电子
 $J = 1/2$
 $F = 2, 3$

$F = 3$
 0.922 eV
 $F = 2$



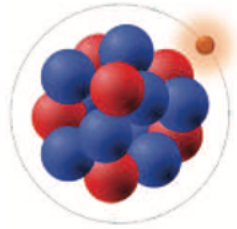
强激光与高价离子相互作用超快极化重原子核

$^{205}\text{Pb}^{82+}$



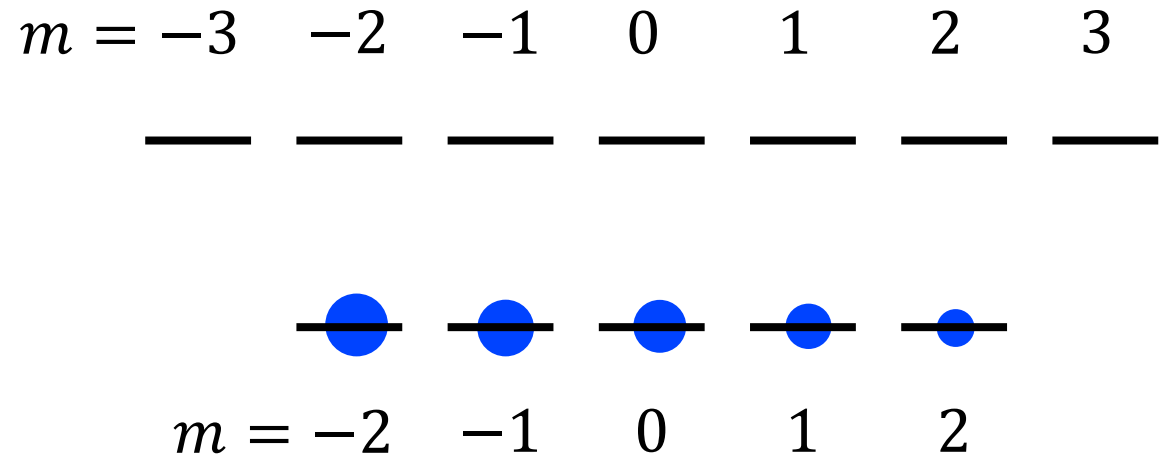
核基态
 $I = 5/2$

$^{205}\text{Pb}^{81+}$



1s电子
 $J = 1/2$
 $F = 2, 3$

$F = 3$
0.922 eV
 $F = 2$



极化度 $\mathcal{P} = \left| \frac{\sum_m p_m m}{F} \right|$

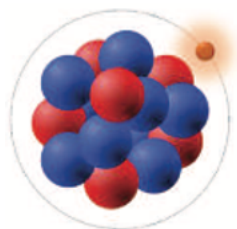
强激光与高价离子相互作用超快极化重原子核

$^{205}\text{Pb}^{82+}$



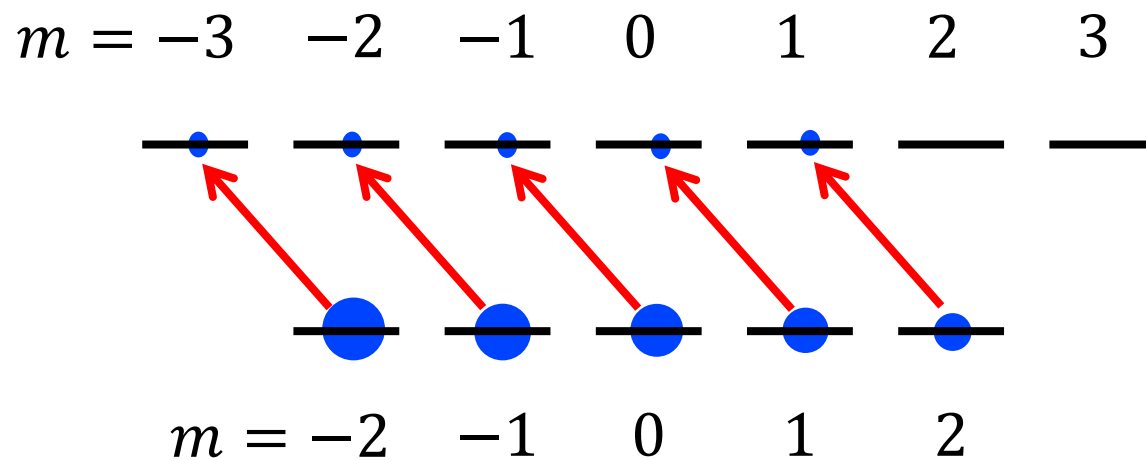
核基态
 $I = 5/2$

$^{205}\text{Pb}^{81+}$



1s电子
 $J = 1/2$
 $F = 2, 3$

$F = 3$
0.922 eV
 $F = 2$



极化度 $\mathcal{P} = \left| \frac{\sum_m p_m m}{F} \right|$

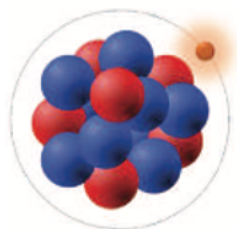
强激光与高价离子相互作用超快极化重原子核

$^{205}\text{Pb}^{82+}$



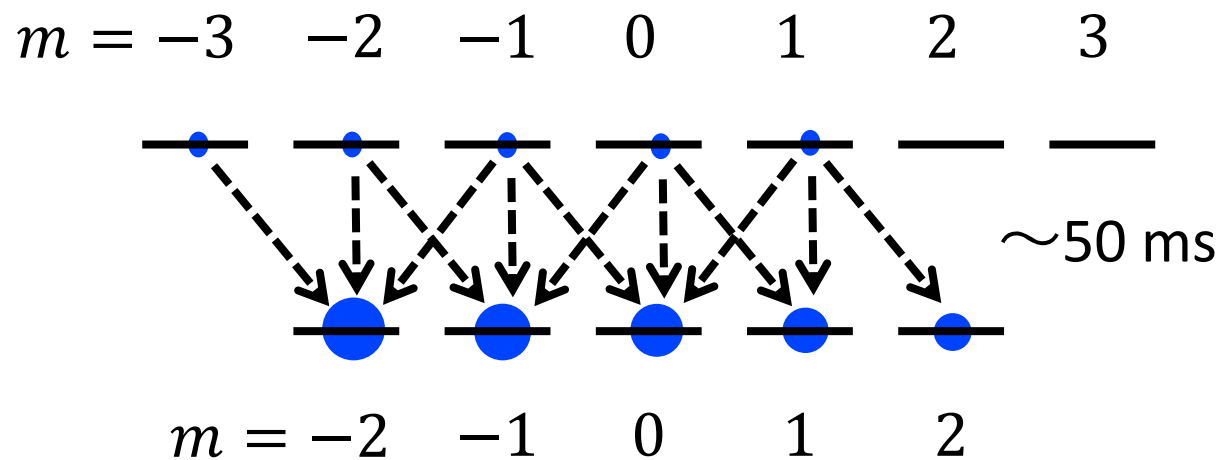
核基态
 $I = 5/2$

$^{205}\text{Pb}^{81+}$



1s电子
 $J = 1/2$
 $F = 2, 3$

$F = 3$
0.922 eV
 $F = 2$



极化度 $\mathcal{P} = \left| \frac{\sum_m p_m m}{F} \right|$

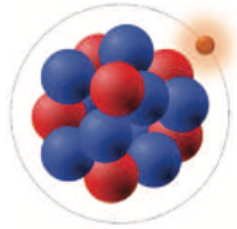
强激光与高价离子相互作用超快极化重原子核

$^{205}\text{Pb}^{82+}$



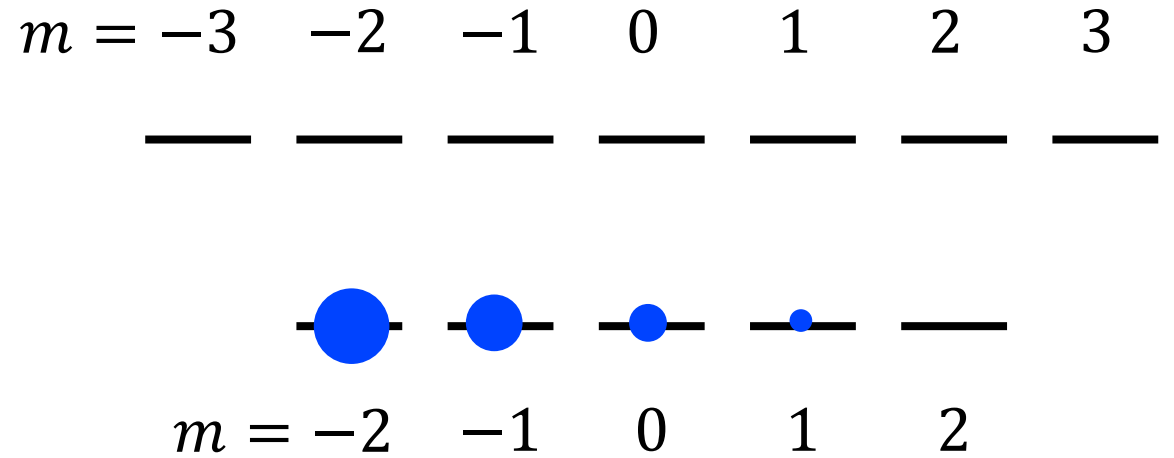
核基态
 $I = 5/2$

$^{205}\text{Pb}^{81+}$



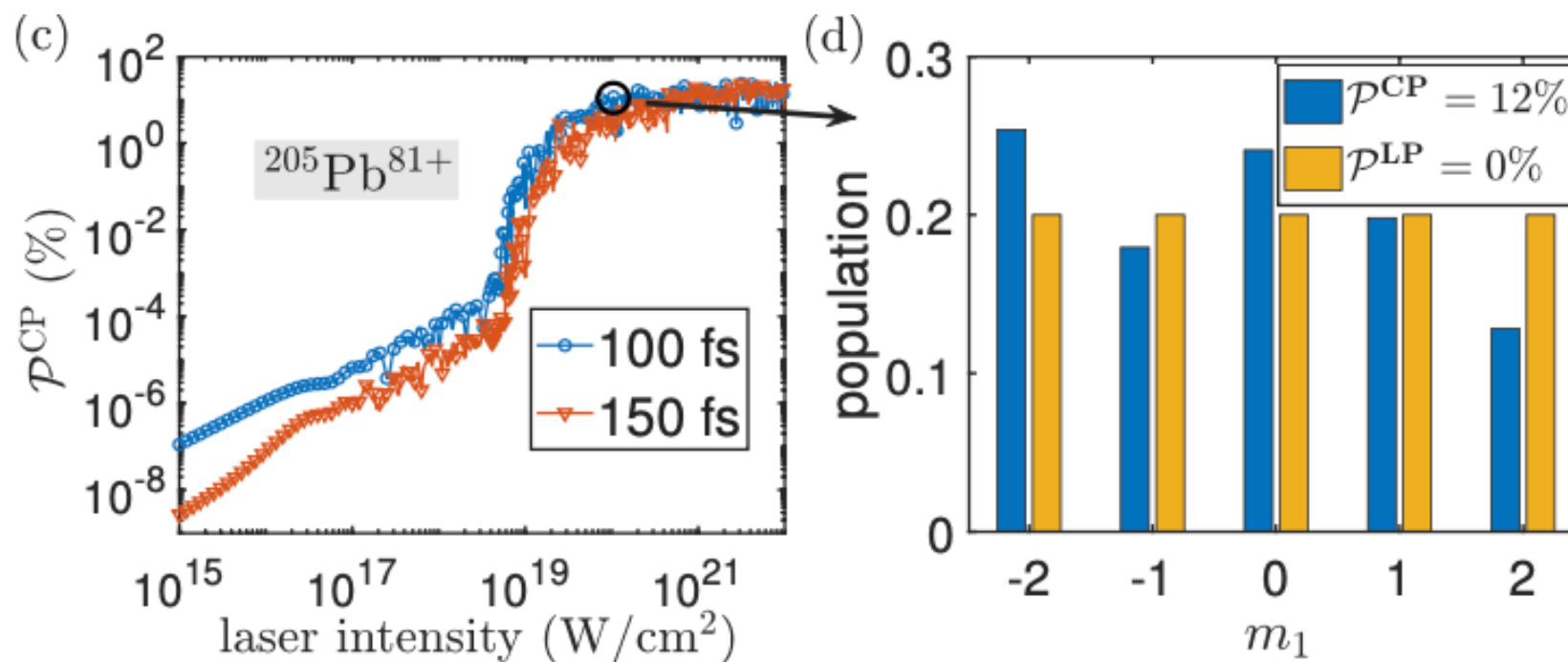
1s电子
 $J = 1/2$
 $F = 2, 3$

$F = 3$
0.922 eV
 $F = 2$



极化度 $\mathcal{P} = \left| \frac{\sum_m p_m m}{F} \right|$

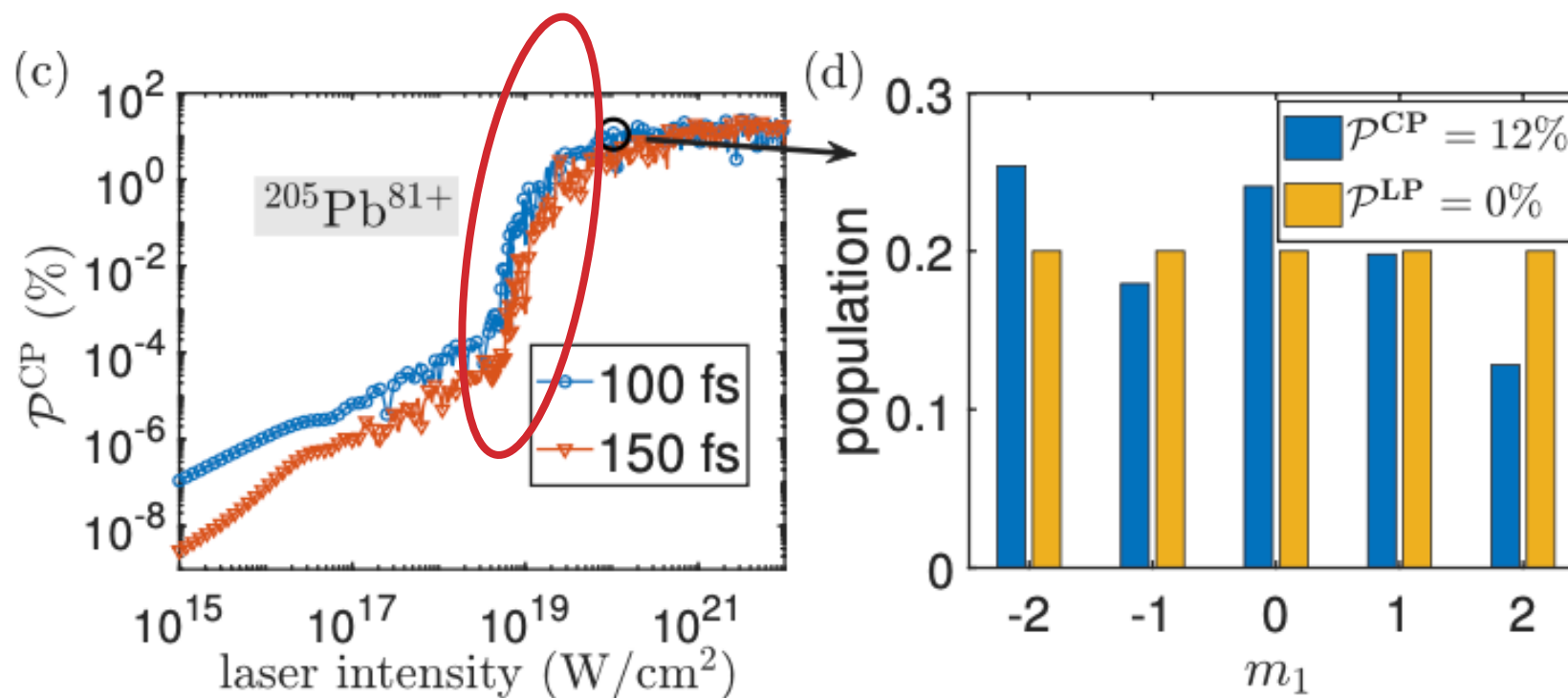
铅-205: 单发脉冲极化度



H. Zhang, T. Li, and X. Wang, under review

铅-205: 单发脉冲极化度

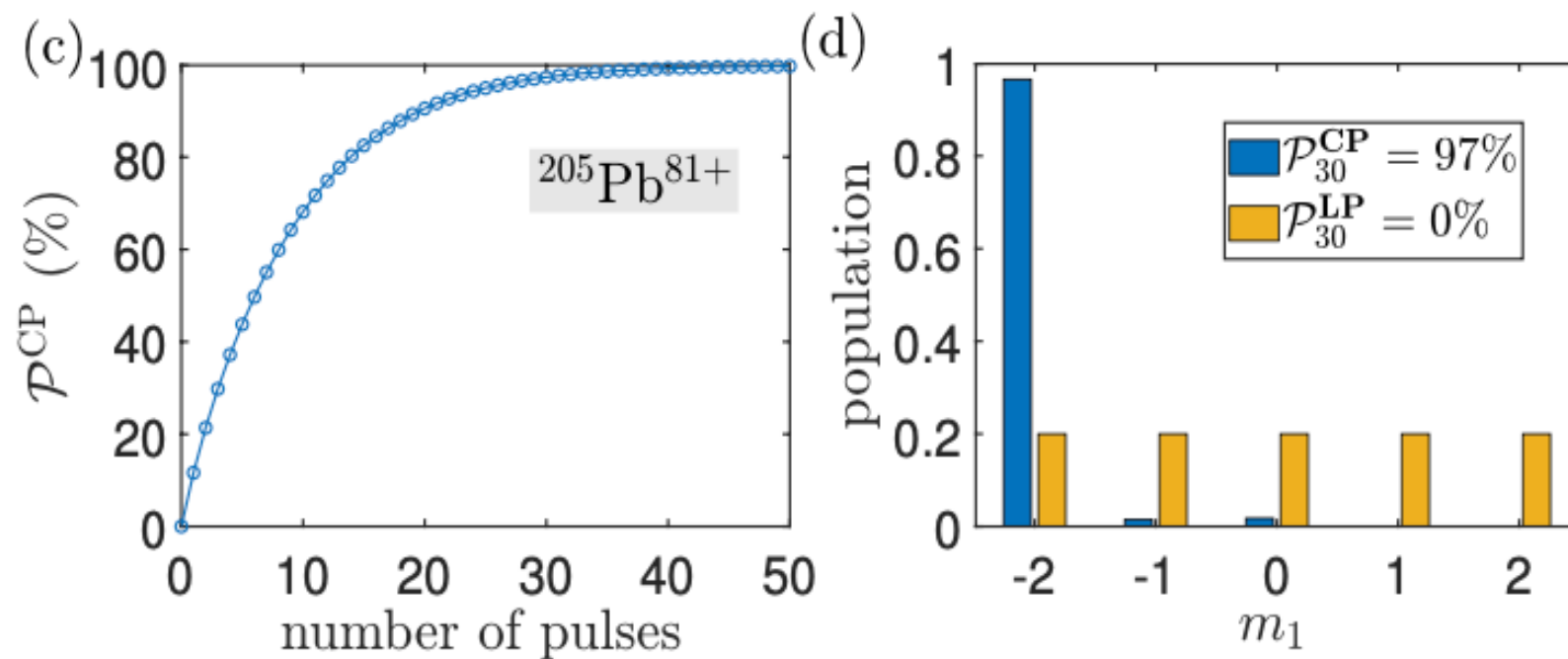
高阶非线性光核相互作用



H. Zhang, T. Li, and X. Wang, under review

铅-205: 极化度vs脉冲个数

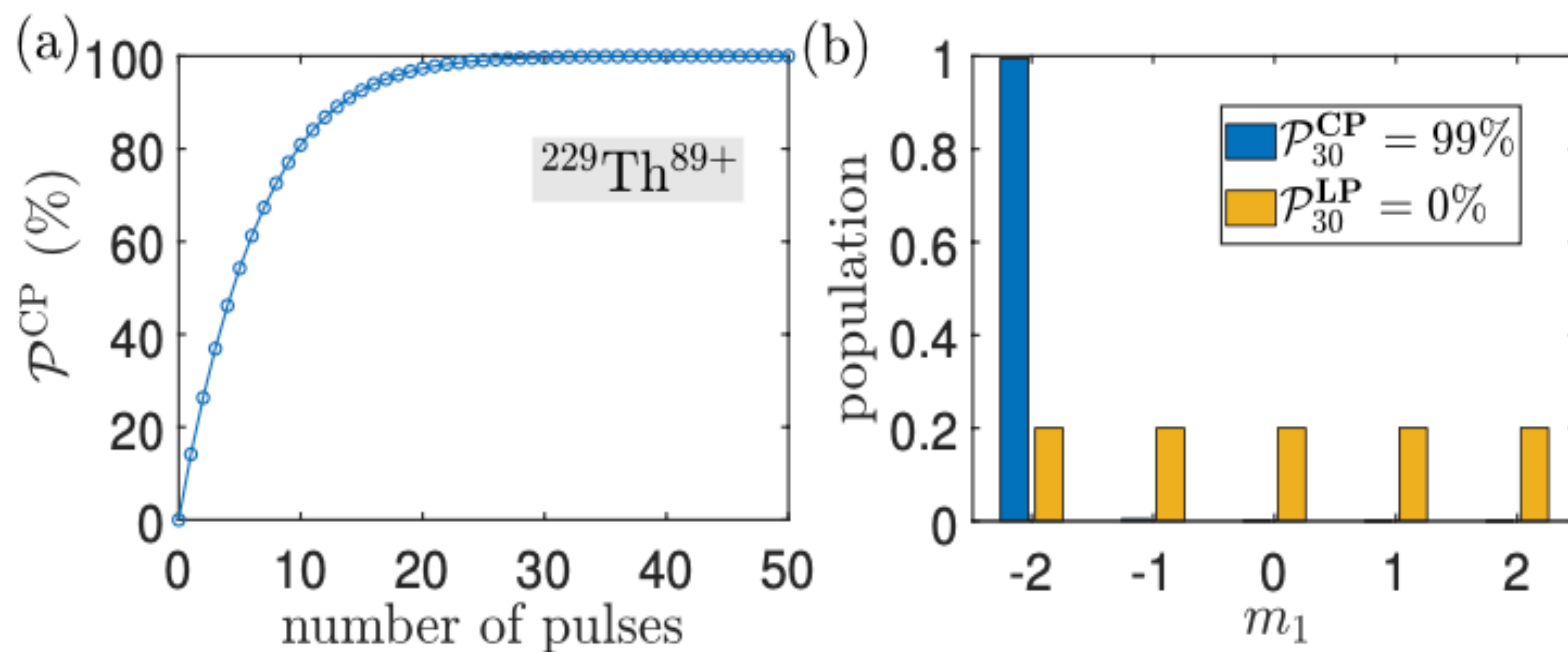
30发脉冲后极化度



H. Zhang, T. Li, and X. Wang, under review

钍-229: 极化度vs脉冲个数

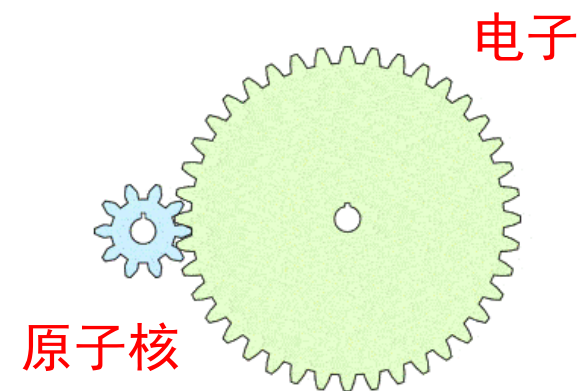
30发脉冲后极化度



H. Zhang, T. Li, and X. Wang, under review

总结

- 激光核物理：先进激光光源遇到原子核物理
- 激光—原子核—电子三方系统
- 利用超精细相互作用实现：
 1. 原子核高效激发， $\sim 100\%$ 核激发
 2. 原子核高效极化， $\sim 100\%$ 核极化



总结

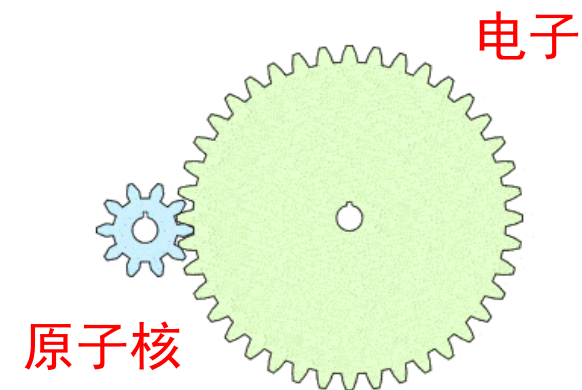
- 高价态重离子 + 先进光源:

GSI 的 PHELIX 装置 (红外强激光+储存环)

FLASH-EBIT装置 (XFEL+EBIT)

HILITE装置 (红外强激光+Penning阱)

国内暂无类似装置



致谢

激光核物理课题组



王武



感谢基金委、中物院对激光核物理研究的资助！