

原子核与激光的相互作用(2)* ——激光增强的核共振中子宽度

霍裕昆 潘正瑛
(复旦大学物理二系, 上海)

摘 要

本文研究强激光对中子-核辐射俘获反应过程的影响。已往有关这一问题的理论和实验研究中曾出现过巨大的分歧。从爱因斯坦有关光发射与吸收的一般理论出发,推导了计算激光增强的核共振中子宽度的普遍公式,其特点是用与模型无关的可测量表示。对已发表的实验进行了理论分析,计算值与实验结果不矛盾。讨论了进一步观测激光-核反应效应的可能前景。

强激光引起的核反应过程是一个有趣的研究方向。课题之一是关于激光增强的共振中子宽度,其物理概念如下:设核素的中子结合能附近有一对 p 波和 s 波中子共振能级,分别用 λ' 和 λ 表示,如图 1 所示。由于离心势垒的存在, λ' 能级的中子宽度通常非常小,很难通过低能中子核反应激发。如果 λ' 与 λ 的能量间距与激光光子同一数量级,则可以考虑强激光场中 λ' 能级的两步激发过程,即 s 波入射中子在 λ 能级的共振吸收(设截面为 σ_{λ}),和激光引起的核素从 λ 到 λ' 的共振跃迁(设单位时间的跃迁几率为 $W_{\lambda\lambda'}$)。

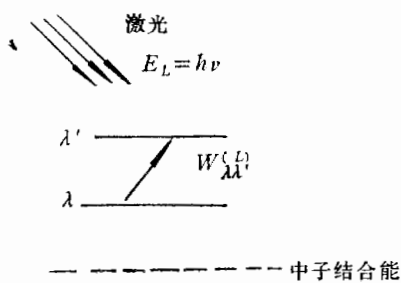


图 1 激光引起的原子核非束缚态的跃迁

在已发表的有关这一问题的理论^[1-3]和实验^[4-6]研究中,曾出现过巨大的分歧。Zaretskii-Lomonosov (简称 Z-L)^[1,2]曾错误地计算了跃迁矩阵元^[3]。在他们过于乐观的计算的引导下,进行了一系列实验^[4-6],其结果与理论的预期完全不相符。在我们早先的计算中^[8],虽然改正了 Z-L 的错误,但是计算是建立在单粒子模型基础上,有待于推广以给出更为普遍的表达式;此外需要应用改进的理论与实验进行具体的比较,这正是本文的目的。

由于强激光的线宽通常为 10MHz, 对应 10^{-7} eV, 远远小于中子结合能附近共振能级的宽度,因此激光束可以看作是单能的,设其能量为 E_L , 则从爱因斯坦关于光的发射与吸收的一般理论,得到

$$W_{\lambda\lambda'}(E_L = E_{\lambda'}) = \frac{g_{\lambda'}}{g_{\lambda}} \frac{\pi^2 k_{\lambda'}^3}{c \hbar} \frac{\Gamma_{\lambda'\lambda}}{\Gamma} P, \quad (1)$$

* 自然科学基金资助项目,上海自然科学基金资助项目。
本文于 1988 年 6 月 1 日收到。

式中, g_λ 、 E_λ 和 Γ_λ 分别是能级 λ 的权重因子、共振能量和总宽度, $E_{\lambda'\lambda} = |E_{\lambda'} - E_\lambda|$, $\Gamma = \Gamma_\lambda + \Gamma_{\lambda'}$, $k_{\lambda'\lambda} = \frac{E_{\lambda'\lambda}}{\hbar c}$, $\Gamma_{\lambda'\lambda}$ 是能级 λ' 与 λ 之间的自发跃迁分辐射宽度, P 是激光能流通量.

当 E_L 与 $E_{\lambda'\lambda}$ 不完全重合时, 可以用 Breit-Wigner 公式型的能量分母来描写受激的共振特性, 得到^[7]

$$W_{\lambda'\lambda}^{(L)} = \frac{g_{\lambda'}}{g_\lambda} \frac{\pi^2 k_{\lambda'\lambda}^3}{4\hbar c} \frac{\Gamma_{\lambda'\lambda}\Gamma}{(E_L - E_{\lambda'\lambda})^2 + \Gamma^2/4} P. \quad (2)$$

与共振能级的自然中子宽度 $\Gamma_{n\lambda'}$ 相对应, 针对上述的两步过程, 可以引入激光引起的共振中子宽度

$$\Gamma_{n\lambda'}^{(L)} = \frac{\pi^2}{4c} k_{\lambda'\lambda}^3 \frac{\Gamma_{n\lambda}\Gamma_{\lambda'\lambda}}{(E - E_\lambda)^2 + \Gamma_\lambda^2/4} P, \quad (3)$$

式中 E 是中子入射能量, c 是光速. 公式(3)的特点是将 $\Gamma_{n\lambda'}^{(L)}$ 用与模型无关的可观测量如 $\Gamma_{\lambda'\lambda}$ 表示. 对于后者, 既可利用各种模型波函数进行计算, 并注意到模型所带来的近似; 又可以采用编评的实验数据进行数量级估算, 以保证结果的可靠性.

在单粒子近似下, λ 和 λ' 的波函数 ϕ_λ 和 $\phi_{\lambda'}$ 只考虑其中子入射道分量, 它们都有相类似的形式:

$$\phi_\lambda = A_\lambda \frac{1}{r} \frac{v_{li}(r)}{v_{li}(R)} \Phi_{li}^{JM}, \quad (4)$$

$$A_\lambda = \left[\frac{\mu}{\hbar^2} \frac{\sqrt{E_\lambda(\text{eV})}}{k_\lambda} \Gamma_{n\lambda}^I \right]^{1/2}, \quad (5)$$

式中, μ 是中子约化质量, $\Gamma_{n\lambda}^I$ 是共振中子约化宽度, $v_{li}(r)$ 是光学势阱径向波函数, $k_\lambda = \sqrt{2\mu E_\lambda}/\hbar$, Φ_{li}^{JM} 表示角动量为 (li) 的入射中子与自旋为 I 的靶核耦合成总角动量为 JM 的道波函数.

利用等式^[8]

$$\langle \Phi_{l'i'}^{J'M'} | Y_{1\mu} | \Phi_{li}^{JM} \rangle = C_{JM1\mu}^{J'M'} (-1)^{l-\frac{1}{2}-l-j} \left(\frac{3}{4\pi} \right)^{1/2} C_{l0l0}^{l'0} \\ \cdot \sqrt{(2l+1)(2i+1)(2i'+1)(2J+1)} W \left(lj'l'i', \frac{1}{2} 1 \right) W(ij'j'J', I1), \quad (6)$$

其中 C_i' 是角动量耦合系数, W_i' 是 Racah 系数, 得到

$$\Gamma_{\lambda'\lambda} = \frac{4}{3} k_{\lambda'\lambda}^3 (2l+1)(2i+1)(2i'+1)(2J'+1) \left[C_{l0l0}^{l'0} W \left(lj'l'i', \frac{1}{2} 1 \right) \right. \\ \left. \cdot W(ij'j'J', I1) \right]^2 A_\lambda^2 A_{\lambda'}^2 e_i^2 \left| \int_0^R \frac{v_{li}(r)}{v_{li}(R)} \frac{v_{l'i'}(r)}{v_{l'i'}(R)} r dr \right|^2, \quad (7)$$

e_i 是有效电荷. 用文献[8]定义的光学模型散射波函数 $N_{li}(r)$ 代替(7)式中的 $v_{li}(r)$, 得到单粒子近似下的激光增强的共振中子宽度

$$\Gamma_{n\lambda'}^{(L)} = \frac{2\pi}{3c} e_i^2 A_\lambda A_{\lambda'} (2l+1)(2i+1)(2i'+1)(2J'+1)$$

$$\cdot \left[C_{l_0 l_0}^{l_0} W \left(l_0 l_0', \frac{1}{2} 1 \right) W(j_0 j_0', l_0) \right]^2 \cdot \left| \int_0^R \frac{N_{li}(r)}{N_{li}(R)} \frac{N_{l'r'}(r)}{N_{l'r'}(R)} r dr \right|^2 \frac{\Gamma_{n\lambda}}{(E - E_\lambda)^2 + \Gamma_\lambda^2/4} P. \quad (8)$$

(8)式与作者在文献[3]中(50)式的结果是一致的。

如果在所研究的 p 波共振能级附近没有 s 波共振能级, 例如以下将讨论的 ^{99}Mo 和 ^{127}I 的情形, 则激光的效应可以看作是当入射 s 波中子在核势散射时吸收光子而发生跃迁的过程, 此时只需将(8)式中相应的共振复弹性散射波函数 $\frac{1}{2} \frac{\Gamma_{n\lambda}}{E_\lambda - E - \frac{i}{2} \Gamma_\lambda} N_{li}(r)$ 用

表1 激光引起的中子辐射俘获实验

1	文献号	[4]	[4]	[5]	[6]
2	靶核 共振能级	^{99}Mo $p-12.1\text{eV}$ -----	^{127}I $p-10.7\text{eV}$ -----	^{139}La $p-0.734\text{eV}$ ----- 中子结合能 $s-37.5\text{eV}$	
3	激光器 光子能量 激光强度 (V/cm)	Nd^{3+} 1.165eV 2170	Nd^{3+} 1.165eV 1890	CO_2 0.117eV 270	Nd^{3+} 1.165eV 8700
4	测量结果	$M = -0.006 \pm 0.048$ $M = -0.002 \pm 0.02$		$\sigma_{nr}^{(L)\lambda} < 7\text{b}$ $\sigma_{nr}^{(L)\lambda} = (0.25 \pm 0.51)\text{b}$	
5	本文计算结果	$< 10^{-11}$	$< 10^{-10}$	$< 10^{-11}\text{b}$	$< 10^{-8}\text{b}$
6	Z-L 计算结果	0.41	0.12	500b	6.5b

势散射波函数 $\text{Re}\langle u_{l_r}^{j'}(r) \rangle$ 代替即可。

表1列出了目前已发表的有关激光-中子辐射俘获反应实验的条件、测量结果以及与理论计算的比较。表中第二行给出在中子结合能附近的共振能级结构, 其中仅靶核为 ^{139}La 的实验对应入射道有 s 波共振的情形。第四行是测量结果, 其中 $M = \Gamma_{n\lambda}^{(L)}/\Gamma_{n\lambda}$ 可以看作是激光引起的增强因子, 由 $M = 1$ 所确定的激光强度可以定义为激光-核反应效应的阈值。后两个实验给出的是激光增强的辐射俘获截面

$$\sigma_{nr}^{(L)\lambda} = \frac{\pi}{k^2} g_{\lambda'} \frac{\Gamma_{n\lambda'}^{(L)} \Gamma_{\lambda' r}}{(E - E_{\lambda'})^2 + \Gamma_{\lambda'}^2/4}. \quad (9)$$

表中所列的数据表明: 没有任何激光引起的核跃迁效应被观察到。表中第五行给出本文的计算结果, 其中 $\Gamma_{\lambda' r}$ 是用 $E1$ 跃迁的 Weisskopf 单位估算的。计算结果表明, 激光效应远远低于实验可能分辨的水平, 这与实验结果相一致。作为参考, 表中的最后一行列出了 Z-R 的计算结果。

实际上,还有一些其它重要的因素在以上计算中未考虑到,例如: $E1$ 跃迁的巨共振效应,核外电子壳层对激光电场的屏蔽效应等。这些因素都使得激光-核效应更难被观测到。我们的初步结论是:除非有其它的作用机制,否则仅仅依靠激光的相干电场要想影响原子核线度以内的跃迁过程看来是很困难的。从以下非常简单的定性分析亦可看到这一困难所在:考虑中等质量核素 $A \sim 100$, $Z \sim 40$, 则核表面的自身电场强度约为 $\frac{Ze}{R^2} \sim 10^{17} \text{V/cm}$, 远远高于任何目前的激光器所能产生的相干电场强度。

参 考 文 献

- [1] D. F. Zaretskij and V. V. Lomonosov, *JETP Lett.*, 30(1980), 508; *Sov. Phys., JETP* 54(1981), 229; 57(1983), 1136; *Sov. J. Nucl. Phys.*, 41(1985), 417.
- [2] A. Ya. Dzyublik, *Sov. J. JETP.*, 55(1982), 573.
- [3] Yukun Huo, F. C. Khanna and M. A. Lone, *Nucl. Phys.*, A440(1985), 189; AIP Conf. Proc. No. 125, Edited by S. Raman, Sept. 1984 Knoxville, p. 904.
- [4] F. Becvar et al., *Sov. J. Nucl. Phys.*, 36(1982), 791.
- [5] V. P. Vertebnyf et al., *Sov. J. Nucl. Phys.*, 36(1982), 1.
- [6] S. M. Mirinov et al., *Sov. J. Nucl. Phys.*, 40(1984), 885.
- [7] 霍裕昆、潘正英,原子核与激光相互作用(一),高能物理与核物理,待发表.
- [8] Yukun Huo and A. M. Lone, *Nucl. Phys.*, A406(1983), 1.

INTERACTIONS OF NUCLEI AND LASER (2) — LASER ENHANCED EFFECTIVE NEUTRON WIDTH FOR NUCLEAR RESONANCE

HUO YUKUN PAN ZHENGYING

(Nuclear Science Department, Fudan University, Shanghai)

ABSTRACT

This paper investigates laser-induced neutron radiative capture reaction. There exist great discrepancies between the existing theoretical and experimental studies on this subject. From Einstein's general theory about emission and absorption of photon, a formula to calculate the laser enhanced neutron width for nuclear resonance has been given with a feature that the width is expressed in terms of model-independent measurable parameters. The measured widths have been analysed and compared with the calculated. The possibility to observe the effect in the near future has also been discussed.