

真实脉冲激光作用下的原子超阈值离化

张文清 谭维翰

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

提 要

在文献[18]的基础上进一步讨论真实脉冲激光作用下的原子超阈值离化。在考虑了初始离化时刻的影响后, 结果清楚地表明, 随激光脉宽减小而产生峰红移, 以及同时出现的离化电子谱峰的增宽现象。

关键词 多光子电离, 超阈值离化, 激光与物质相互作用。

1 引 言

在强激光场与原子物质相互作用的多光子电离过程中, 原子可以吸收超过阈值数的光子而产生超阈值离化^[1~2]。由于它表现出很多不同于弱场下的新现象^[1~9], 使得人们对强激光场与原子的相互作用过程有了进一步的了解, 近年来一直受到人们的广泛重视。

由于参与相互作用过程的激光场很强, 对超阈值离化过程的理论处理已不能采用以往的微扰方法。在很多的非微扰理论中^[10~17], KFR模型^[10~12]以其对超阈值离化过程中很多实验现象的圆满解释而引人注目^[12]。然而, 由于它采用了无限大平面波近似描述入射激光场, 对超阈值离化过程中的许多与激光场的空间分布和时间分布相关的性质^[4~6]无能为力。本文作者曾在KFR模型的基础上, 研究了空间高斯型和时间正割型分布的激光场下的超阈值离化过程, 解释了随入射激光脉宽减小而出现的峰红移现象^[18], 但由于没有考虑到初始离化时刻的影响, 结果并不令人十分满意。本文考虑了初始离化时刻的影响后, 所得结果与实验一致的^[4~6]。

2 理 论 模 型

文献[18]已对所采用的模型有详细描述, 这里只简要说明一些主要结论以及相关参量的物理意义。

考虑入射光为圆偏振的空间高斯型时间正割分布的激光场, 其矢势为

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{A} &= \mathbf{A}_0 X \operatorname{sech}\{[t - (z/c)]/\tau\}, \\ \mathbf{A}_0 &= (a/\sqrt{2})(\cos \omega t \mathbf{i} + \sin \omega t \mathbf{j}), X = \exp[-(x^2 + y^2)/w_0^2], \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中 τ 为激光脉冲宽度, w_0 为光腰*。忽略原子库仑势对离化电子的作用, 由脉冲激光与原

收稿日期: 1992年1月3日

* 忽略了光束传输过程中的发散效应。

子中电子相互作用的薛定谔方程出发,求得离化电子的终态波函数为^[18]

$$\left. \begin{aligned} \psi_{Af} = \exp \left\{ i \frac{\mathbf{P} \cdot \mathbf{r}}{\hbar} - i \frac{P^2}{2m} \frac{t}{\hbar} + i \rho_c X \operatorname{sech} \left[\frac{t - (z/c)}{\tau} \right] \sin(\omega t - \varphi) \right. \\ \left. - i z_c \omega \tau X^2 \tanh \left[\frac{t - (z/c)}{\tau} \right] \right\}, \\ z_c = e^2 A_0^2 / 2mc^2 \hbar \omega, \quad \rho_c = e |\mathbf{A} \cdot \mathbf{P}| / mc \hbar \omega, \quad \varphi = \tan^{-1}(P_y / P_x). \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中 z_c 为表示入射激光场的强弱和有质动力势^[3,4] 大小的无量纲量. 假设原子初始时处于束缚初态 Φ_i , 其束缚能为 E_i , 应用 S 矩阵方法可得到从 Φ_i 向 ψ_{Af} 的跃迁矩阵元为^[12,18]

$$\begin{aligned} (S-1)_{fi} = -i \int dt (\psi_{Af}, V_A \Phi_i)_t = i \Phi_i(\mathbf{P}) \left[\frac{(P^2/2m) - E_i}{\hbar} \right] \sum_n e^{in\varphi} \cdot \int dt J_n \left(\rho_c \operatorname{sech} \frac{t}{\tau} \right) \\ \cdot \exp \left\{ i \left[\frac{P^2}{2m} - E_i - n \hbar \omega + z_c \omega \tau X^2 \frac{\tanh(t/\tau)}{t} \right] \frac{t}{\hbar} \right\}, \end{aligned} \quad (3)$$

各参量的意义及所采用的近似已在文献[8]中给出. 这里 X 已近似写成

$$X = \exp \left[-\frac{V_{e\perp}^2 (t - t_0)^2}{w_0^2} \right] = -\exp \left[-\frac{(t - t_0)^2}{\tau_e^2} \right], \quad (4)$$

式中 t_0 表示电子的初始离化时刻. $V_{e\perp}$ 表示电子沿垂直于激光传输方向的平均横向运动速度. $\tau_e = (w_0/V_{e\perp})$, 很明显, 它来自于激光束的空间分布, 表示离化电子穿过激光束即由 X 所表示的相互作用区域^[4] 所需要的时间. 这是一个很重要的参数. 若 $\tau > \tau_e$, 则意味着离化电子在离开相互作用区的过程中, 一直受到有质动力势的作用; 反之, 离化电子尚未感受到有质动力势的有效作用, 光强就已衰减为零. 前者相当于长脉冲机制, 后者相当于短脉冲机制^[4], 只有在后一种情况下才能表现出离化电子谱峰的红移^[4~6]. (3)式中包含着以上的物理内容^[18]. 另外, (3)式中的 n 表示原子离化所吸收的光子数, 对阈值离化有 $n_0 = [E_i/\hbar\omega] + 1$, 当 $n > n_0$ 时, 即为超阈值离化.

由(3)式出发, 得到单位立体角内的离化率为^[18]

$$\begin{aligned} \frac{dN}{d\Omega} \approx \frac{1}{2\pi} \left| \Phi_i(\mathbf{P}) \right|^2 \left\{ \frac{[(P^2/2m) - E_i]}{\hbar} \right\}^2 \sum_n \left| \int dt J_n [\rho_c \operatorname{sech}(t/\tau)] \right. \\ \left. \cdot \exp \left\{ i \left[\frac{P^2}{2m} - E_i - n \hbar \omega + z_c \hbar \omega \tau X^2 \frac{\tanh(t/\tau)}{t} \right] \frac{t}{\hbar} \right\} \right|^2, \end{aligned} \quad (5)$$

注意(5)式的离化率是电子初始离化时刻 t_0 的函数, 考虑到不同 t_0 时刻离化的电子将对最后的离化谱产生不同影响, 最后的离化率应通过(5)式对 t_0 求积分平均得到, 即

$$\frac{dN}{dt} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T dt_0 \left(\frac{dN}{dt} \right)_{t_0}. \quad (6)$$

本文正是按上式进行超阈值离化谱的数值模拟的.

3 数值结果和讨论

文献[18]中给出的是按(5)式求出的初始离化时刻 $t_0 = 0$ 时 H^- 离子的超阈值离化谱, 这时参与离化过程的激光光强 ($\propto \operatorname{sech}^2(t_0/\tau)$) 为最大. 从结果来看, 已经能够看出超阈值离化谱随入射激光强度变化的演化过程^[18]. 但是, 对于它随脉冲宽度变化而变化的情况, 通过比较 $\tau \gg \tau_e$ 和 $\tau \ll \tau_e$ 两种情况下的 $n=9$ 的谱峰位置, 可以看出峰红移, 但中间过程的

演化很不清晰^[18]. 这是由于没有考虑到不同时刻离化, 亦即电子初始离化时刻 t_0 的影响而产生的.

图 1 中给出了不同 t_0 时刻所对应的 $n=9$ 的超阈值离化谱峰结构. 这里 $z_0=0.875$ ($\lambda=10.6 \mu\text{m}$, $I=1.0 \times 10^{10} \text{ W/cm}^2$), 为节省运算时间, 取 $\tau_e=1 \text{ ps}$. 可以看出, 虽然 $\tau=400 \text{ fs} < \tau_e$ (短脉冲, 如图 1(A) 所示) 和 $\tau=1 \text{ ps} = \tau_e$ (长脉冲, 如图 1(B) 所示) 两种情况下的离化谱有所不同, 但很明显, 随着 t_0 的加大, 两种情况下红移量较大的谱分量都在逐渐减小. 这是由不同 t_0 时刻所感受到激光强度不同所造成的. t_0 越大, 参与离化过程的光强越小.

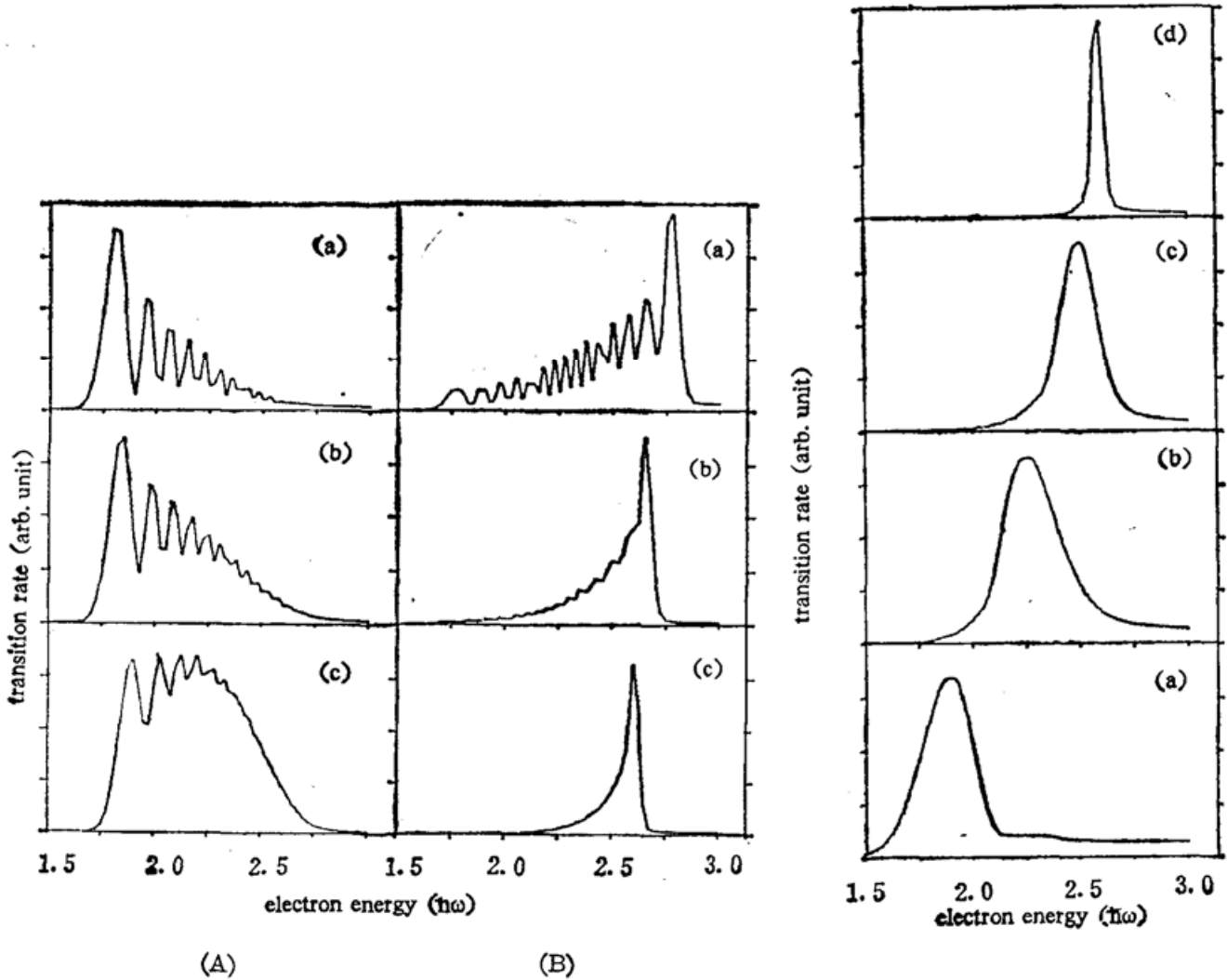


Fig. 1

Fig. 2

图 2 中给出的是按 (6) 式对初始离化时刻求积分平均后的 $n=9$ 的超阈值离化谱峰. 这时, 所有脉宽下的离化电子谱均表现为很光滑的结构. 很清楚, $n=9$ 的超阈值离化谱峰随激光脉宽的由大 ($\tau=1 \text{ ps}$) 变到小 ($\tau=100 \text{ fs}$), 从长脉冲下没有红移的 $E=2.60 \hbar\omega$ 位置 (如图 2(d) 所示) 逐渐变化到有红移 $E=1.90 \hbar\omega$ 位置 (如图 2(a) 所示), 而且红移量随脉宽的变小而逐渐增加. 有质动力势 ($z_0 \hbar\omega = 0.875 \hbar\omega$) 没有全部表现为谱的红移量, 是因为脉冲宽度 τ 还不足够小的缘故*.

从图 2 中还可以看出, 随激光脉宽的由大变小, 除出现红移外, 还伴随有离化电子谱峰的加宽现象, 这正是在短脉冲实验中所观察到的结果^[4~6].

* 如果它全部表现为红移, $n=9$ 的超阈值离化谱峰位置应出现 $E=9 \hbar\omega - E_i - z_0 \hbar\omega = 1.75 \hbar\omega$ 的位置上.

由以上的这些结果和讨论可以看出,正是由于超阈值离化过程中的激光束的有限空间(由 τ_e 表示)和有限时间(由 τ 表示)分布,才产生了在脉宽由长变短过程中离化电子谱峰的红移和加宽现象.

参 考 文 献

- [1] P. Agostini, F. Fabre, G. Mainfray *et al.*, Free-free transition following six-photon ionization of Xenon atoms. *Phys. Rev. Lett.*, 1979, **42**(17): 1127~1130
- [2] P. Kruit, J. Kimman, M. J. Van Der Wiel, Absorption of additional photons in the multiphoton ionization continuum of Xenon at 1064, 532 and 440 nm. *J. Phys.*, 1981, **B14**(19): L597~L602
- [3] T. J. McIlrath, P. H. Bucksbaum, R. R. Freeman *et al.*, Above-threshold ionization processes in Xenon and krypton. *Phys. Rev.*, 1987, **A35**(11): 4611~4623
- [4] R. R. Freeman, P. H. Bucksbaum, H. Milchberg *et al.*, Above-threshold ionization with subpicosecond laser pulses. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **59**(7): 1092~1095
- [5] H. G. Muller, H. B. Van Linden van den Heuvell, P. Agostini *et al.*, Multiphoton ionization of xenon with 100fs laser pulses. *Phys. Rev. Lett.*, 1988, **60**(7): 565~568
- [6] T. S. Luk, T. Graber, H. Jara *et al.*, Subpicosecond ultraviolet multiphoton electron spectroscopy of rare gases. *J. Opt. Soc. Am.*, 1987, **B4**(5): 847~851
- [7] M. D. Perry, A. Szoke, K. C. Kulander, Resonantly enhanced above-threshold ionization of Helium. *Phys. Rev-Lett.*, 1989, **63**(10): 1058~1061
- [8] E. Yablonovitch, Energy conservation in the picosecond and subpicosecond photoelectric effects. *Phys. Rev. Lett.*, 1988, **60**(9): 795~796
- [9] William M. Wood, Glenn Focht, M. C. Downer, Tight focusing and blue shifting of millijoule femtosecond pulses from a conical axicon amplifier. *Opt. Lett.*, 1988, **13**(11): 984~986
- [10] L. V. Keldysh, *Zh. Eksp. Theor.*, 1964, **47**(5): 1945~1957
[ionization in the field of a strong electromagnetic wave. *Sov. Phys.-JETP*, 1965, **20**: 1307]
- [11] F. H. M. Faisal, Multiple absorption of laser photons by atoms. *J. Phys.*, 1973, **B6**(4): L89~191.
- [12] H. R. Reiss, Effect of an intense electromagnetic field on a weakly bound system. *Phys. Rev.*, 1980, **A22**(5): 1786~1813
Spectrum of atomic electrons ionised by an intense field. *J. Phys.* 1987, **B20**(3): L79~L83
- [13] W. Becker, R. R. Schlicher, M. O. Scully *et al.*, Role of final-state effects in above-threshold ionization. *J. Opt. Soc. Am.*, 1987, **B4**(5): 743~750
- [14] A. Dulcic, Modulation theory of above-threshold ionization. *Phys. Rev.*, 1981, **A35**(4): 1673~1681
- [15] Z. Deng, J. H. Eberly, Multiphoton absorption above ionization threshold by atoms in strong laser fields. *J. Opt. Soc. Am.*, 1985, **B2**(3): 486~493
- [16] K. C. Kulander, Time-dependent theory of multiphoton ionization of Xenon. *Phys. Rev.*, 1988, **A38**(2): 778~787
- [17] X. Tang, H. Rudolph, P. Lambropoulos, Nonperturbative approach to atomic multiphoton processes under intense, short laser pulses. *Phys. Rev. Lett.*, 1990, **65**(26): 3269~3272
- [18] 张文清,谭维翰. 激光短脉冲作用下原子吸收的阈值离化. *物理学报*, 1991, **40**(11): 1155~1164

Above-threshold-ionization of atom under intense laser field with realistic pulse shape

ZHANG WENQING TAE WEIHAN

(*Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800*)

(Received 3 January 1992)

Abstract

Based on the results in previous paper, we further discussed the above-threshold ionization (ATI) of atom under intense laser field with realistic pulse shape. After considering the influence of initial ionization time, it is more clear that the red shift and broadening of ATI peaks appear as the laser pulse width changes from long to short regime.

Key words multiphoton ionization, above-threshold-ionization, interaction of laser with matter.