

文章编号: 1007 - 4627(2002) 增刊 - 0151 - 03

激光辅助的快质子对氢原子的碰撞电离^y

李书民, 陈 激, 周子舫, 张声涛

(中国科学技术大学近代物理系选键化学开放实验室, 安徽 合肥 230027)

摘要: 在质心参考系中研究了激光场中 1 MeV 质子对基态氢原子的碰撞电离过程。靶原子的缀饰波函数由含时间微扰论给出, 末道出射电子态用双中心 Coulomb-Volkov 波函数描述。计算表明辐射场使出射电子的双重微分截面变小。敲出电子的能量越高, 截面减小越明显, 但截面中 CTC 峰的位置基本不受辐射场的影响。

关键词: 激光场; 快质子; 氢原子; 碰撞电离

中图分类号: O562.5 文献标识码: A

随着激光技术的发展, 激光场中的碰撞过程受到人们越来越多的关注。它在等离子体物理、天体物理和激光化学等领域有着广泛应用。本文研究在激光环境下快质子对氢原子的碰撞电离过程。计算采用原子单位制 $\hbar = e = m = 1$ 。激光场用一个单模、均匀, 且偏振平行于质子入射方向的经典电磁场 $\mathcal{E}(t) = \mathcal{E}_0 \sin \omega t$ 描述。

在质心参考系中, 激光辅助的碰撞电离过程 $p + H \rightarrow p + p + e$ 的 S 矩阵元为

$$S = -i \int_{-\infty}^{\infty} dt \langle x_{k_i}(\mathbf{r}_0, t) x_{k_e}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_{10}, t) \cdot | -\frac{1}{r_{10}} | x_{k_i}(\mathbf{r}_0, t) \phi_0^H(\mathbf{r}_1, t) \rangle, \quad (1)$$

其中 $x_{k_i}(\mathbf{r}_0, t)$ 和 $x_{k_e}(\mathbf{r}_1, t)$ 分别为质子的入射态和出射态的波函数。因质子较重, 辐射场对其状态的影响可忽略, 因而它们可用平面波来描述:

$$x_{\mathbf{k}}(\mathbf{r}_0, t) = (2\pi)^{-3/2} \exp[i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}_0 - Et)], \quad (2)$$

其中 $E = k^2/(2\mu)$ 为相对运动能量 (μ 为折合质量)。在(1)式中 $\phi_0^H(\mathbf{r}_1, t)$ 为激光场中氢原子的缀饰波函数^[1]:

$$\phi_0^H(\mathbf{r}_1, t) = \left| 1 - \frac{i}{\omega} \mathbf{\epsilon}_0 \cdot \mathbf{r}_1 \cos \omega t \right| \phi_0^H(\mathbf{r}_1) \cdot \exp \left| -iW_0^H t - \frac{i}{2c^2} \int_{-\infty}^{\infty} A^2(t') dt' \right|, \quad (3)$$

其中 $A(t) = (c/\omega) \mathbf{\epsilon}_0 \cos \omega t$ 为激光场矢势, $\phi_0^H(\mathbf{r}_1) \equiv (1/\sqrt{\pi}) e^{-|\mathbf{r}_1|^2/2}$ 为“裸”氢原子的基态波函数。

$x_{k_e}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_{10}, t)$ 为末道出射电子同时被激光场及靶核与入射质子的库仑场扭曲的波函数^[2]:

$$x_{k_e}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_{10}, t) = (2\pi)^{-3/2} e^{iV(2k_e)} \Gamma \left| 1 + \frac{i}{k_e} \right| \cdot F \left| -\frac{i}{k_e}, 1, -i(k_e r_1 + \mathbf{k}_e \cdot \mathbf{r}_1) \right| \cdot e^{iV(2k_{ef})} \Gamma \left| 1 + \frac{i}{k_{ef}} \right| F \left| -\frac{i}{k_{ef}}, 1, -i(k_{ef} r_{10} + \mathbf{k}_{ef} \cdot \mathbf{r}_{10}) \right| \times \exp \left| i[\mathbf{k}_e \cdot \mathbf{r}_1 - E_e t - \frac{1}{\omega^2} \mathbf{k}_e \cdot \mathbf{\epsilon}_0 \sin \omega t - \frac{1}{2c^2} \int_{-\infty}^{\infty} dt' A^2(t')] \right|, \quad (4)$$

这里 \mathbf{k}_e 为电子在质心系中的动量, $\mathbf{k}_{ef} = \mathbf{k}_e m_p / (m_p + 1) - \mathbf{k}_f \{ 1 - m_p^2 / [(m_p + 1)(m_p + 1)] \} \approx \mathbf{k}_e - 2\mathbf{k}_f / m_p$ 为电子相对于出射质子的动量^[3]。将以上波函数代入散射矩阵(1)式得

$$S = -i \sum_{l=-\infty}^{\infty} f_l \delta(E_f + E_e - E_i - W_0^H + l\omega), \quad (5)$$

$$\text{其中 } f_l = J_l \left| \mathbf{k}_e \cdot \frac{\mathbf{\epsilon}_0}{\omega^2} \right| e^{i(\xi_l - \eta_l)/2} \Gamma(1 - i\xi_l) \cdot \Gamma(1 - i\eta_l) \frac{(q_0^2 - 2\mathbf{q}_0 \cdot \mathbf{k}_{ef})^{-i\eta_l}}{q_0^{2(1-i\eta_l)}} \cdot \left| 1 + \frac{l\omega}{\mathbf{k}_e \cdot \mathbf{\epsilon}_0} \mathbf{\epsilon}_0 \cdot \frac{\partial}{\partial \mathbf{q}_0} \right| \frac{\partial}{\partial \lambda} \frac{[q_0^2 + (\lambda - ik_e)^2]^{-i\xi_l}}{[(\mathbf{q}_0 + \mathbf{k}_e)^2 + \lambda^2]^{1-i\xi_l}}, \quad (6)$$

^y 收稿日期: 2002-03-07; 修改日期: 2002-05-31

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10074060, 10075043)

作者简介: 李书民(1963—), 男(汉族), 河南长垣人, 副教授, 从事原子分子理论研究。

式中 $\mathbf{q}_0 = \mathbf{k}_f - \mathbf{k}_i$ 为质子的动量转移. 这里用到了 Bessel 函数的公式^[4]

$$e^{iy\sin u} = \sum_{l=-\infty}^{\infty} J_l(y) e^{ilu} \quad (7)$$

$$\text{和 } J_{l+1}(y) + J_{l-1}(y) = \frac{2l}{y} J_l(y), \quad (8)$$

及积分公式^[5, 6]

$$\begin{aligned} \int dr \frac{e^{i(p-k)\cdot r - ar}}{r} F(i\beta, 1, i(pr - p \cdot r)) \\ = 4\pi \frac{[k^2 + (a - ip)^2]^{-i\beta}}{[(p - k)^2 + a^2]^{1-i\beta}}. \end{aligned} \quad (9)$$

对应于散射系统与激光背景交换 l 个光子的多光子过程分波的双重微分截面(DDCS)为

$$\frac{d^2\sigma}{dE_{ed}\Omega_e} = (2\pi)^4 \mu^2 \int \frac{k_f k_e}{k_i} |f_l|^2 d\Omega_f, \quad (10)$$

其中 Ω_f 和 Ω_e 分别为散射质子与敲出电子的立体角. 对全部多光子过程求和得碰撞电离过程的总双重微分截面为

$$\frac{d^2\sigma}{dE_{ed}\Omega_e} = \sum_{l=-\infty}^{+\infty} \frac{d^2\sigma}{dE_{ed}\Omega_e}. \quad (11)$$

图 1 给出了当激光振幅为 10^8 V/cm、频率为 1.17 eV、入射质子能量为 1 MeV、敲出电子能量为 100 eV 和电子出射角为 60° 时, 各分波的双重微分截面值. 计算结果显示: 辐射场对截面的修正

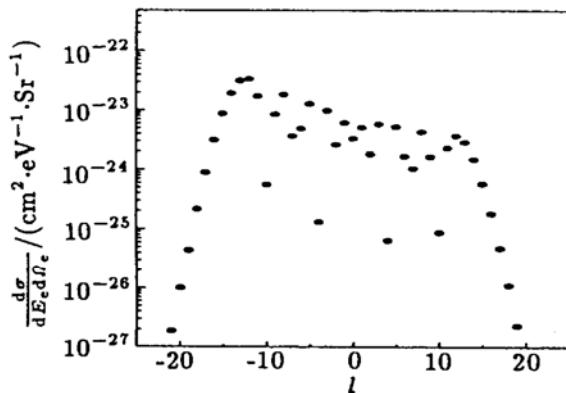


图 1 入射质子能量为 1 MeV, 敲出电子能量为 100 eV 时, 各分波的双重微分截面对交换光子数的分布

激光振幅 $\epsilon_0 = 10^8$ V/cm, 频率 $\hbar\omega = 1.17$ eV, 偏振方向沿入射质子方向.

主要来源于 $l < 0$ 的分波, 即光子吸收过程占主导地位, 因为在碰撞电离过程中, 电子较容易从辐射场吸收能量, 摆脱靶核库仑场的束缚, 从靶原子中

释放出来.

图 2 给出了敲出电子能量在 20, 100 和 500 eV 的总双重微分截面. 可以看出, 加上激光场后, 截面明显降低了. 这是因为, 激光的缀饰效应使靶原子变得松散, 从而使快速入射质子“命中”电子的几率变小. 对低能出射电子, 截面在小角受辐射场影响不明显; 对高能出射电子, 截面在所有角度降低都较为明显, 因为高能电子相应于以较大的能量和动量转移, 电子能量转移的一部分来自于辐射场.

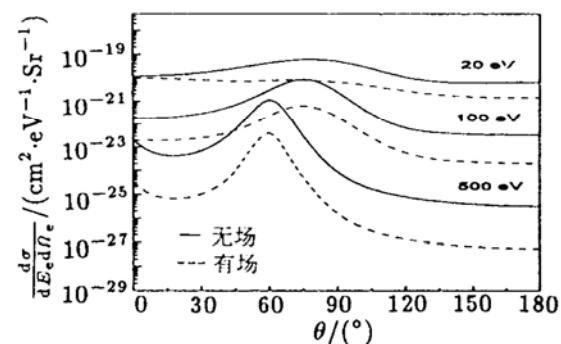


图 2 能量分别为 20, 100 和 500 eV 的敲出电子的双重微分截面

入射质子能量和激光参数同图 1.

图 3 给出了电子在 0° , 3° 和 10° 出射角时, 双重微分截面随电子能量的变化趋势. 0° 角截面中尖锐的峰称为 CTC 峰, 因为当初它曾被认为是由电子交换到围绕入射粒子的连续态引起的^[7]. 随着电子出射角度的增加, 此峰逐渐变得平缓, 乃至消失. 我们发现此峰的位置并没有因加上辐射场而明显改变, 但截面的值却大大降低了, 且电子能量越高, 截面降低的越明显. 这是由于在 CTC 峰附近, 电子的速度接近入射质子速度, 最容易被质子俘获或电离. 随着电子能量增高, 电子被敲出后和靶的库仑场作用时间缩短, 激光场的影响也相对增强.

本文系统研究了激光场中快质子对氢原子电离过程. 发现它与较低速度质子入射的情况^[2]的不同之处在于激光修正截面始终在无场截面以下. 这是因为质子速度太快, 激光使质子对松散原子中电子的命中率进一步降低的缘故. 另一方面, 和低速碰撞情形一样, 在一定的电子能量范围内, 双重微分截面基本保持了无场时的形状, 其最大值的位置和 CTC 峰的位置也基本没有改变, 这主要是由激光场对自由电子态的效应引起的.

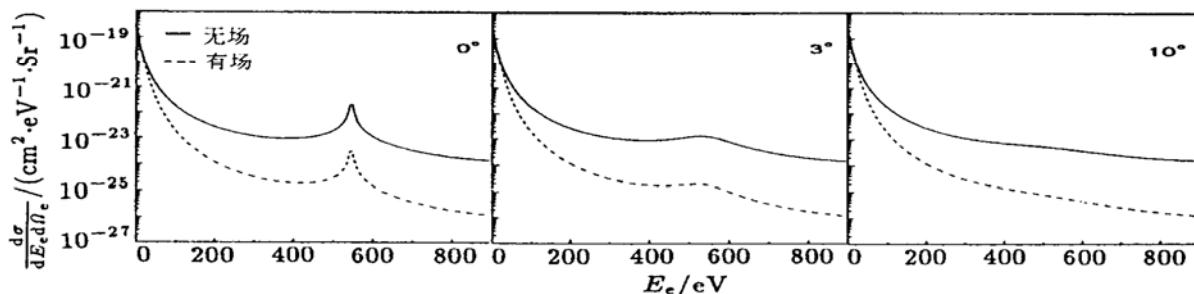


图 3 0° , 3° 和 10° 角出射电子的双重微分截面随其能量的变化
入射质子能量和激光参数同图 1.

参 考 文 献:

- [1] Li S M, Chen J, Wang Q Q. Laser Influence on Positron-antiproton Radiative Capture Collision [J]. Eur Phys J D, 1999, **7**: 39.
- [2] Li S M, Chen J, Zhou Z F. Ionization of Atomic Hydrogen by Proton in the Presence of a Laser Field [J]. J Phys, 2002, **B35**: 557.
- [3] Garibotti C R, Miraglia J E. Ionization and Electron Capture to the Continuum in the H^+ -hydrogen atom Collision [J]. Phys Rev, 1980, **A21**: 572.
- [4] 王竹溪, 郭敦仁. 特殊函数概论[M]. 北京: 北京大学出版社, 2000, 341, 351.
- [5] Akhiezer A I, Merenkov N P. The Theory of Lepton Bound-state Production [J]. J Phys, 1996, **B29**: 2 135.
- [6] Akhiezer A I, Berestetsky V B. Quantum Electrodynamics [M]. Moscow: Nauka, 1969, 431.
- [7] Macek J. Theory of the Forward Peak in the Angular Distribution of Electron Ejected by Fast Proton [J]. Phys Rev, 1970, **A1**: 235.

Laser-assisted Collisional Ionization of Atomic Hydrogen by Fast Proton^{*}

LI Shumin, CHEN Ji, ZHOU Zifang, ZHANG Shengtao

(Open Laboratory of Bond Selective Chemistry, Department of Modern Physics,
University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: The laser-assisted collisional ionization of atomic hydrogen by 1 MeV fast proton is studied in the center-of-mass system. The dressed wavefunction of target is obtained by the time-dependent perturbation theory, and the state of ejected electron is described by a two-center Coulomb-Volkov wavefunction. It is shown that the double differential cross section (DDCS) is lowered in the presence of a laser background. The higher the electron energy, the more the cross section is lowered. However, the position of CTC peak in the cross section remains unchanged.

Key words: laser field; fast proton; atomic hydrogen; collisional ionization

* Foundation item: National Natural Science Foundation of China(10074060, 10075043)