

光电子谱的峰开关效应

姚 关 华 徐 至 展¹⁾

(中国科学院上海光学精密机械研究所)

1988年8月30日收到

在文献[12]的基础上研究了强激光场作用下自电离原子的光电子谱,发现了与强场多光子电离中相类似的峰开关效应,从而进一步证实了强场下二阶离化过程和光电子谱中高阶峰的重要作用。本文结果对已有的强场自电离理论作了重要修正。

一、引 言

近年来,强激光场作用下原子的多光子电离研究取得了重大进展,发现了显著的离化限之上的离化现象^[1]和光电子谱的峰开关效应^[2-4]。这些发现无疑对实现X射线激光有重要意义^[5]。

光电子谱的峰开关效应是与传统的微扰论相违背的一种强场效应。根据传统的微扰理论^[6],非共振多光子电离中,光电子谱的低阶峰强度最大,高阶峰强度则随电离级增大而明显减弱,然而,实验表明^[2,3],在强激光($\approx 10^{14}$ W/cm²)场作用下,光电子谱的低阶峰会随光强的提高显著减弱,而高阶峰则显著增强,当光强超过一定阈值时,低阶峰甚至会完全消失,高阶峰反而占主导地位。这表明,在强场下,激光强度对光电子谱中的峰起着某种开关作用^[4,7]。(所谓的峰开关。)这种开关作用表明^[4,7]:在强场下,连续态向连续态的跃迁^[1,4]起着极为重要的作用。

在已有的大多数激光诱导自电离(LIA)理论^[8,9]中,都未考虑ATI跃迁以及光电子谱的高阶峰。然而,与多光子电离类似,LIA中同样存在高阶离化现象,而且在强场下这类离化现象也具有重要作用。Andryushin等人^[10]讨论了这种ATI跃迁对LIA中自电离态的稳定性的影响,但仍未涉及光电子谱的高阶峰。赵力耕等人^[11]利用一个简单模型求出了高阶峰的解析解,但未就此作进一步讨论。在文献[12]中,我们进一步考虑了两种主要的ATI跃迁,导出了更一般的光电子谱解析解,并初步讨论了ATI跃迁的影响。本文在上述工作的基础上,详细计算了强激光诱导自电离中的光电子谱。发现在强场LIA中,同样存在着与强场多光子电离中相类似的峰开关效应。此外,结果还表明,与低阶峰一样,光电子谱的高阶峰也具有明显不等高的双峰结构。

二、LIA中光电子谱的解析解

最简单的LIA模型是Fano模型^[13]。Fano曾用微扰理论研究了弱场下的自电离问

1) 中国高等科学技术中心(世界实验室)凝聚态和辐射物理分中心。

题。近年来, LIA 研究开始讨论强场情形。1981 年, Lambropoulos 等人^[8]和 Rzazewski 等人^[9]分别利用 Fano 模型讨论了强场下的 LIA。然而, Fano 模型没有包括 ATI 跃迁。正如最新的多光子电离实验^[2,3]所表明的, ATI 跃迁在强场下十分重要, 因此, 更合理的 LIA 模型应该包括 ATI 跃迁。图 1 中的 $a-c_2$ 和 c_1-c_2 跃迁就是大部分 LIA 理论所忽略, 然而却始终存在的两种 ATI 跃迁。其中 $|b\rangle$ 是基态, $|a\rangle$ 是自电离态, $|c_1\rangle, |c_2\rangle$ 是能量相隔约一个光子能量 ω_0 、且宇称相反的两组连续态, V_{ac_1} 是组态相互作用, 所有其它跃迁都由同一激光场诱导。

在文献 [12] 中, 我们曾就如图 1 所示的强场 LIA 模型求出了任意时刻光电子谱的解析解。不失一般性, 以下仅讨论 c_1-c_2 跃迁可忽略的情况。在这种情况下, 稳态光电子谱可写成^[12]

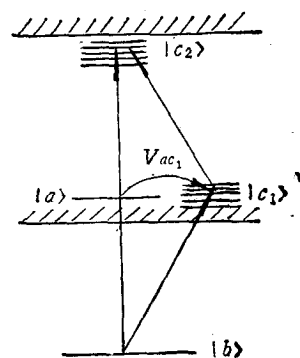


图 1 强场 LIA 的能级和跃迁图
阴影部分表示第一和第二电离限

$$W_1(\varepsilon) = I \frac{(\varepsilon + q)^2 + \gamma^2}{|P(\varepsilon)|^2}, \quad (1)$$

$$W_2(\varepsilon') = \frac{\gamma I (q^2 + 1)}{|P(\varepsilon')|^2}, \quad (2)$$

式中 $P(\varepsilon)$ 是由下式表示的二次函数:

$$P(\varepsilon) = \varepsilon^2 + \varepsilon[\delta + i(1 + I + \gamma)] + i[2qI + (1 + \gamma)\delta] - (q^2 + \gamma)I. \quad (3)$$

而 $\varepsilon, \varepsilon'$ 分别表示处于 $|c_1\rangle, |c_2\rangle$ 态附近的光电子定标能量, $I = D_{ac_1}^2/V_{ac_1}^2$ 是无量纲光强¹⁾, $\alpha = D_{ac_1}^2/D_{ac_1}^2$ 是数量级为 1 的原子参数²⁾, $\gamma = \alpha I$ 是二阶电离速率, δ 是失谐量, $q = q$ 是 Fano 参量^[13]。

(1), (2) 式表明, 一般情况下, 光电子谱由能量间隔为 ω_0 的两部分 $W_1(\varepsilon)$ 和 $W_2(\varepsilon')$ 组成, 其中, $W_1(\varepsilon)$ 是 $|c_1\rangle$ 附近的光电子能量分布, 而 $W_2(\varepsilon')$ 是 $|c_2\rangle$ 附近的光电子能量分布。以下从 (1), (2) 式出发对强激光诱导自电离中的光电子谱作详细计算。

三、忽略 ATI 跃迁时的光电子谱

为了与已有结果比较, 现先讨论 $\alpha = 0$ 这一特例。根据上节中 α 的定义, $\alpha = 0$ 意味着 $D_{ac_1} = 0$, 相当于在图 1 中忽略 ATI 跃迁。用 $\alpha = 0$ 代入 (1)–(3) 式可知, $W_2(\varepsilon') = 0$, 而 $W_1(\varepsilon)$ 过渡到文献 [9] 的结果, 光电子谱仅由 $W_1(\varepsilon)$ 组成。图 2 中就这一特例计算了弱反对称情况 (取 $q = 10$) 下的光电子谱。从中可以看出三个明显的强场效应: 1) 光电子谱呈不对称双峰结构; 2) 显著的 Autler-Townes 效应; 3) 线形窄化效应^[9]。即随光强提高, 窄峰的峰值增大, 峰宽变窄, 自电离态有稳定现象。

1) I 相当于文献 [9] 中的参量 Ω 。

2) 在文献 [10] 中 α 用 ξ 表示, 并对其数量级作了详细说明。

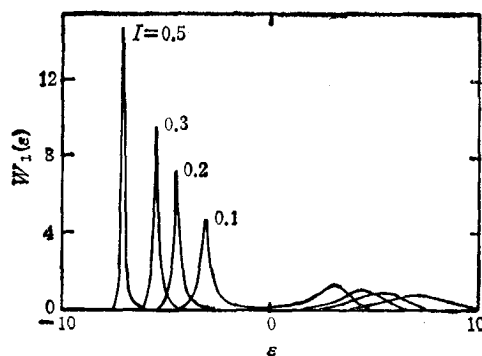


图2 略去 ATI 跃迁 ($\alpha=0$) 时的光电子谱 $q=10$; $\delta=0$

四、LIA 中光电子谱的峰开关效应

正如多光子电离实验所表明的,在强场下 ATI 跃迁极为重要^[2,3,7].在以下讨论中,计入 ATI 跃迁,相当于取非零的 α 值.

图3中根据(1)–(3)式计算了各种光强下的光电子谱.考虑到 α 是数量级为1的

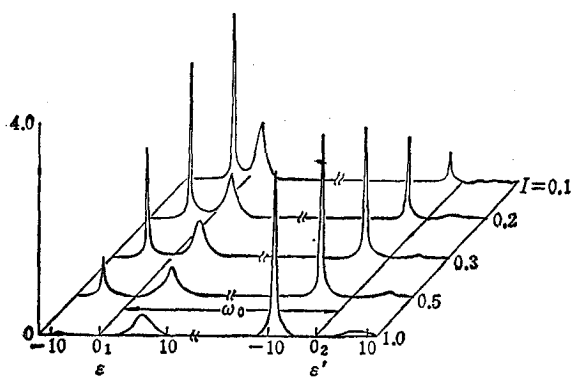


图3 计入 ATI 跃迁时的光电子谱 表明了光电子谱的峰开关效应,除 $\alpha=0.8$ 外,其它参数同图2

原子参数^[10],图3中取 $\alpha=0.8$.其它参数同图2,都取强场 LIA 中的典型值^[9].另外, $0_1, 0_2$ 分别是低阶峰和高阶峰的中心(即 ε 和 ε' 的原点),它们相距一个光子能量 ω_0 .

图3的计算结果清楚地表明,强场 LIA 中的光电子谱具有显著的峰开关效应.比较不同光强下的高阶和低阶峰可知,随着激光强度的提高,低阶峰(左双峰)强度迅速减弱,在 $I=0.1$ 时,其中的窄峰甚至会基本消失(关).与此同时,高

阶峰(右双峰)由弱变强(开),在 I 约大于 0.3 时,高阶峰反而占主导地位.显然,这是一种与多光子电离中相类似的强场效应,所不同的是,在强场作用下的非共振多光子电离中,光电子谱是由多个能量间隔均为 ω_0 的单峰组成^[2-4,7].而在强场 LIA 中,光电子谱是由多个(在本文讨论中,略去了更高阶的跃迁及其高阶峰)反对称双峰组成.这些双峰反映了自电离态 $|a\rangle$ 在强场下的动力 Stark 分裂^[9].

图3所示光电子谱的峰开关效应的另一显著特征是:随着光强的提高,左双峰中宽峰的消弱远不如窄峰显著,右双峰中宽峰随光强的增强也远没有窄峰明显.

此外,将图3与图2进行比较,还可更清楚地看出 ATI 跃迁的重要影响.当忽略 ATI 跃迁时^[9](图2),在所取光强范围内,窄峰不断变窄,峰值明显增大.而当计入 ATI 跃迁后(图3),窄峰无明显变窄,而且其峰值随光强的提高出现相反的变化.可见,

只有在弱光场下(例如图 3 中 $I = 0.1$ 的情况), ATI 的影响才不很显著, 简单的 Fano 模型才适用。而在强激光诱导自电离中, ATI 跃迁起着重要作用, 它对光电子谱有重要影响。

图 3 还表明, 光电子谱在整体上具有两个双峰的结构, 而且每个双峰都是不等宽和不等高的。这不同于 Rzazewski 等人^[9]预言的单个双峰结构(图 2), 也不同于赵力耕等人^[11]的结果。

五、峰开关效应的物理解释

考察图 1 中各种电离过程之间的竞争, 便不难理解强场 LIA 中光电子谱的峰开关效应。图 1 表明, 自电离态 $|a\rangle$ 有两种电离通道, 一种是通过组态相互作用 V_{ac_1} 向 $|c_1\rangle$ 连续态的自电离, 另一种则是在激光场作用下向更高连续态 $|c_2\rangle$ 的光电离。前者的电离速率为 $\gamma_0 = \pi |V_{ac_1}|^2$, 而后者的电离速率为 $\gamma_s = \pi |D_{ac_2}|^2$ 。 $|c_1\rangle$ 和 $|c_2\rangle$ 连续态附近的光电子分布取决于这两种电离速率的相对快慢。由于自电离速率 γ_0 为常数, 而自电离态的光电离速率 $\gamma_s = \alpha I \gamma_0$ 正比于光强, 因此, $|c_1\rangle$ 、 $|c_2\rangle$ 附近的光电子相对数目与光强有关。在 $I \ll 1$ 时(弱场情形), $\gamma_s \ll \gamma_0$, 因此, 绝大部分原子向 $|c_1\rangle$ 离化, 使得 $|c_1\rangle$ 附近的光电子分布(低阶峰)占主导地位, 而 $|c_2\rangle$ 附近的光电子分布(高阶峰)可忽略。随着光强 I 的提高, 光电离速率 γ_s 越来越大, 使得向 $|c_2\rangle$ 电离的粒子数不断增多, 从而光电子谱的高阶峰强度不断增大。此外, 由于稳态时所有原子均被电离, 处于 $|c_1\rangle$ 、 $|c_2\rangle$ 态附近的光电子总数不变, 这样, 高能光电子数目的增多, 必然导致 $|c_1\rangle$ 附近光电子数的减少。由此可见, 光强越大, 高阶峰增强, 低阶峰减弱, 在足够强的光强下 ($I \approx 1$), 快速的高阶离化使得绝大部分原子向 $|c_2\rangle$ 离化, 以致于低阶峰微乎其微, 而高阶峰占主导地位。这就是图 3 所示的峰开关效应。

综上所述, 我们详细计算了强激光诱导自电离中的光电子谱, 讨论了 ATI 跃迁的存在对光电子谱的影响。发现与强场多光子电离相类似, 在强场 LIA 中, 同样存在着光电子谱的峰开关效应。这表明, 强场下 ATI 跃迁以及光电子谱的高阶峰占重要地位, 已有的强场 LIA 理论需作重要修正。

- [1] P. Agostini *et al.*, Multiphoton Ionization of Atoms, eds. S. L. Chin and P. Lambropoulos, Academic Press Canada, (1984), p. 133.
- [2] P. Kruit *et al.*, *Phys. Rev.*, **A28**(1983), 248.
- [3] L. A. Lompre *et al.*, *J. Opt. Soc. Am.*, **B2**(1985), 1906.
- [4] W. Becker *et al.*, *J. Phys. B*, **19**(1986), L785.
- [5] C. W. Clark *et al.*, *J. Opt. Soc. Am.*, **B3**(1987), 371.
- [6] Y. Gontier and M. Trahin, *J. Phys. B*, **13**(1980), 4383.
- [7] Z. Deng and J. H. Eberly, *J. Opt. Soc. Am.*, **B2**(1985), 486.
- [8] P. Lambropoulos and P. Zoller, *Phys. Rev.*, **A24**(1981), 379.
- [9] K. Rzazewski and J. H. Eberly, *Phys. Rev. Lett.*, **47**(1981), 408.
- [10] Andryushin *et al.*, *Opt. Commun.*, **49**(1984), 120.
- [11] 赵力耕、徐至展, 物理学报, **36**, (1987), 467.
- [12] 姚关华、徐至展, 物理学报, **37**, (1988) 1760.
- [13] U. Fano, *Phys. Rev.*, **124**(1961), 1866.

PEAK-SWITCHING OF THE PHOTOELECTRON SPECTRUM

YAO GUAN-HUA XU ZHI-ZHAN

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

ABSTRACT

The photoelectron spectrum from autoionizing atoms in strong laser field is investigated on the basis of ref [12]. Peak-switching similar to the corresponding effect in strong field multiphoton ionization is found, implying that the second-order ionization processes and high-order photoelectron peaks play essential roles in strong laser-field induced autoionization. These results show that many of previous results need to be revised.