

# 强激光中原子过程的理论研究\*

陈宝振

(北京师范大学低能核物理所, 北京市辐射中心 北京 100875)

**摘 要** 从理论角度结合实际工作, 概要地介绍强激光中原子过程的特点、理论研究现状及其在激光核聚变中的可能作用.

**关键词** 激光核聚变 强激光中原子过程

**分类号** O437

## 1 引言

寻找干净经济安全的新能源, 是当代科学技术的一个重要的全球性战略目标. 激光核聚变是实现这一目标的重要途径之一, 由于激光核聚变与热核武器之间的相似性, 在禁试的条件下, 激光核聚变的研究对国家的安全也有特殊意义.

一些特殊的极端条件下的原子过程对激光核聚变的成败有决定性的作用. 这些特殊的极端条件下的原子过程同通常意义下的原子过程是不同的. 它们是在等离子体背景强烈影响下的原子过程, 是在光场强烈影响下的原子过程. 本文结合自己的实际工作, 对后者作概要介绍.

## 2 光场中的原子过程

光场中的原子过程是一个总称, 它包括很多具体过程, 如激发<sup>[1]</sup>、电离、散射<sup>[2]</sup>等. 现以光场中氢原子电离为例, 来对激光核聚变中涉及到的光场中原子过程的特点和理论研究现状作一简要说明.

从已发表的文献看, 激光核聚变实验多数是采用钕玻璃激光器的基频  $1.06 \mu\text{m}$  和它的倍频  $0.53 \mu\text{m}$  作为光源, 同时激光的功率密度可达到或超过  $10^{14} \text{ W/cm}^2$ . 按照一般的概念, 当激光的功率密度达到或超过  $3.5 \times 10^{16} \text{ W/cm}^2$  时, 微扰论的方法才不适用(电子

在这样强的激光中所感受到的电场和基态氢原子中的电子所感受到的电场是相等的). 如是这样, 那末就可用微扰论来放心地处理上述功率密度下激光核聚变中涉及到的光场中原子过程. 但是近来本课题的研究表明, 对于  $1.06 \mu\text{m}$  的激光当它的功率密度达到  $10^{13} \text{ W/cm}^2$  时, 微扰论的方法就不适用了<sup>[3~5]</sup>. 这是一个令人吃惊也是一个有重要实用价值的理论结果. 近年来大量的实验结果支持这个理论结果. 说它令人吃惊是因为它比传统概念小三个量级; 说它有实用价值是因为它表明在微扰论的基础上来理解激光核聚变可能行不通, 而当前激光核聚变中涉及到的由光场中原子过程确定的参数却是由微扰论提供的. 由此便可得到, 激光核聚变中涉及到的光场中原子过程的一个重要特点是它不能用现有的微扰论来处理.

由于光场中氢原子的薛定谔方程的严格解析解至今还未找到, 目前理论工作主要在两个方向上进行: 寻找近似的解析解; 寻找近似的数值解. 当然这里指的是非微扰解.

数值工作是对薛定谔方程的直接数值积分, 一般说来是可靠的, 同时也在理论研究中担当着重要的角色. 但是从纯数学的观点看, 高维数值积分的精度仍然是一个值得研究的问题. 数值工作的另一问题是需要相当长的 CPU 时间和而且不便于深入灵活地理解其内在的物理过程. 解析工作有能深入灵活地理解

\* 国家自然科学基金资助课题, 课题编号 19074010.

解内在的物理过程的长处,但由于所采用的各种各样尚未经过严格论证的近似处理,它的可靠程度便是一个尚不清楚的问题,这个问题又常常同辐射量子理论的一些基本问题联系在一起.这是解析工作方面主要的困难.目前实验工作多是在多电子的惰性气体上进行的.同时在高强度短脉冲激光的情况下,精确控制激光的强度和确切知道激光中原子过程发生的地点都是尚未很好解决的问题.这也一定程度上影响理论研究的进展.尽管如此,强激光中原子过程的理论研究仍是极为活跃的.进入 90 年代以来,已有多部专著陆续出版就是一个例证<sup>[6,7]</sup>.

由这些专著可知,数值方面的工作以美国 Lawrence Livermore National Laboratory 的 Kulander 小组和 Rochester 大学的 Eberly 小组的工作较有影响<sup>[6]</sup>.解析方面的工作以 KFR 理论较为出色<sup>[8,9]</sup>.作者认为这个理论的主要问题是:(1)未能很好处理光场和原子势之间的耦合作用;(2)它处理的原子势仅限于短程势.本课题组曾提出过对第一问题进行改进的方案并得到了较满意的结果.最近又在 A-规范中将理论扩展到库仑势也得到了较好的结果.概括起来,新的结果可简述如下:(1)新理论给出基态氢原子 N 光子微分几率电离为

$$\frac{dW^{(N)}}{d\Omega} \propto (E_f + |\tilde{E}_i|)^2 P |\tilde{\Phi}_i(\vec{P})|^2 \cdot J_N^2(\sqrt{z}\alpha, -z/2) \quad (1)$$

(1)式的最低阶近似严格地回到 KFR 理论,新理论拓宽了高频近似的适用范围,并能更好地描述实验事实<sup>[10~12]</sup>;(2)多光子吸收和隧道穿透被普遍认为是强光中原子电离的两个独立的机制.新理论则解析地证明(1)式可近似地表达为下面的形式

$$\frac{dW^{(N)}}{d\Omega} \propto \exp\left[-\frac{2|E_i|f(\gamma)}{\omega}\right]$$

$$f(\gamma) = \left(1 + \frac{1}{2\gamma^2}\right) \sin h^{-1}\gamma - \frac{\sqrt{1+\gamma^2}}{2\gamma}$$

$$\gamma = \frac{\sqrt{2|E_i|\omega}}{\epsilon} \quad (2)$$

由(2)式可直接得到多光子吸收和隧道穿透的表达式,因而证明了二者之间的内在联系<sup>[13~15]</sup>;(3)解决了在高低光强下 KFR 理论分别与数值结果、微扰结果不一致的问题,建立起一个高低光强都适用的统一理论(见表 1、表 2).

表 1 不同方法给出的基态氢原子光电截面

光频 $\omega$	光强	微扰论	KFR 理论	现理论
0.57	1.0(8)	4.4(-18)	1.5(-18)	4.4(-18)

表 2 不同方法给出的基态氢原子电离几率

光频 $\omega$	光强	数值结果	KFR 理论	现理论
0.20	4.38(13)	2.8(12)	8.3(10)	2.4(12)

此外,还开展了散射<sup>[2]</sup>和激发<sup>[1]</sup>过程的理论研究,取得了很好的结果.国内许多单位也开展了有关的工作,由于篇幅的限制,这里不再详述.

### 3 光场中基态氢原子电离过程理论研究的可能的应用

上面已简单地介绍了强激光中原子过程对于激光核聚变研究的意义和作用.由于激光核聚变的极端复杂性,在一篇短文中详细地说明这一问题显然是不可能的.这里在一个关于光场中基态氢原子电离过程理论研究结果的基础上,用一个例子作一具体说明.我国激光核聚变实验在较长的时间内是用钽玻璃激光的基频做的.所用的激光功率密度大约为  $10^{14}$  W/cm<sup>2</sup>.实验得到的中子产额比理论预估大约低 3~4 个量级.后来发现,如用二倍频做情况会有改善.我们曾得到一个阈值功率密度的公式  $I_t \propto \omega^4$  (达到或超过这个阈值功率密度微扰论就不适用了)<sup>[14]</sup>.这个公式表明高频光有更高的阈值功率密度.如上所述,在当前非微扰方法还不完善的情况下,用钽玻璃激光的基频做激光核聚变实验来研究打靶过程显然会遇到微扰论不适用带来的困

难,同样的功率密度选用二倍频就可避开这一问题<sup>[3]</sup>.因此,在当前非微扰方法还不完善的情况下,用二倍频是一个明智的选择.另外,过热电子的产生是影响激光核聚变的最重要的因素之一,在同样的功率密度下二倍频光产生的光电子谱比基频光产生的要软<sup>[10,11]</sup>.因此利用二倍频也有利于避免过多的高能电子产生.总而言之,光场中原子过程理论研究对激光频率、功率密度、波形的正确选择和靶丸的优化设计都是至关重要的.

最后值得指出的是,光场中原子过程的研究除对上述的激光核聚变有重要的意义和作用外,还有重要的学科意义.例如,强光中的原子是一个强耦合、不可分离变量及有经典对应的量子体系,它不仅是非线性科学的最好研究对象之一,而且是研究经典混沌量子含义的最合适的量子体系.

### 参 考 文 献

- 1 陈宝振. 光子-电子联合作用引起氢原子激发. 物理学报, 1988, 37: 566~572
- 2 Chen Baozhen. Electron Potential Scattering in Laser Field. *Commu Theo Phys*, 1984, 3: 135~138
- 3 陈宝振. 强光场中的基态氢原子. 物理学报, 1995, 44: 375~381
- 4 Chen Baozhen. Perturbation-variational Approach to H-atom in Strong Laser Fields. *Chin Phys Lett*, 1994, 11: 409~412
- 5 Chen Baozhen. A Criterion of Validity of Traditional Radiation Perturbation Thoery. *Commu Theo Phys*, 1995, 23: 129~132
- 6 Gavril M. *Atoms in Intense Laser Fields*, Boston: Academic Press, 1992, 247~300
- 7 Gavril M. *Atoms in Intense Laser Fields*, Boston: Academic Press, 1992, 301~333
- 8 Reiss H R. Effects of an Intense Electromagnetic Fisd on a Weakly Bound System. *Phys Rev*, 1980, A22: 1786~1813
- 9 Chen B, Faisal F, Jetzks et al. Above Threshold Electron Ejection Spectra. *Phys Rev*, 1987, A36: 4091~4094
- 10 陈宝振. 强光中原子过程的微扰迭代方法. 物理学报, 1991, 40: 1749~1754
- 11 陈宝振. 改进的 KFR 理论. 物理学报, 1993, 42: 237~243
- 12 陈宝振. 氢原子阈上电离角分布. 物理学报, 1990, 39: 40~45
- 13 Chen Baozhen. A New Derivation of Keldysh Formula. *Chin Phys Lett*, 1990, 7: 219~221
- 14 陈宝振. 强光场中隧道穿透. 科学通报, 1992, 11: 983~985
- 15 陈宝振. 改进的 Keldysh 公式. 量子电子学, 1991, 8: 461~466

## Theoretical Study of Atomic Processes in Intense Laser Fields

CHEN Baozhen

(*Institute of Low Energy Nuclear Physics, Beijing Normal University, Beijing 100875*)

**Abstract** A most important feature of atomic processes in laser-fusion is pointed out. The current situation of theoretical study of these processes is analyzed, then. The possible application of the theoretical study is described by a illustrative example. All of the above mentioned things are based on our practical work.

**Key Words** atomic processes in intense laser fields laser-fusion