

文章编号: 1007-4627(2004)02-0180-03

强激光场中氦团簇双重膨胀引发核聚变*

安伟科^{1,2}, 邱锡钧¹, 蒋 懿¹, 朱志远³

(1 上海大学理学院物理系, 上海 200436;

2 湖南理工学院物理系, 湖南岳阳 414000;

3 中国科学院上海原子核研究所, 上海 201800)

摘 要: 在超强 fs 激光与氦团簇的相互作用中, 分析了可以引发核聚变的高能氦核产生的原因, 提出了团簇双重膨胀的机制, 计算了氦核动能及团簇解体的时间, 为选取合适的激光脉冲宽度参数提供参考.

关键词: fs 强激光; 氦团簇; 双重膨胀; 核聚变

中图分类号: O532+.24 **文献标识码:** A

1 引言

随着高强度、短脉冲激光技术的迅猛发展, 人们开辟了许多物理研究的新领域, 其中激光与团簇相互作用的研究非常活跃^[1-5]. 许多实验表明, 在强激光照射下, 团簇迅速离化, 伴随着发生库仑爆炸, 并观察到释放出 keV 的电子^[6] 和 MeV 的离子^[1], 达到了核物理能量范围, 为核聚变提供了产生高能氦核的途径. 1999 年, Ditmire 等^[7] 最近的研究向实现台式激光核聚变迈进了一大步. 他们利用一台基于啁啾脉冲放大技术的桌面激光器产生了脉宽为 35 fs、波长为 820 nm、输出能量为 120 mJ 的激光脉冲, 该激光束被聚焦在氦气喷流的出射口处. 喷射氦气被低温冷却到 -170 °C, 通过绝热膨胀产生了大的氦团簇. 用瑞利散射测量技术估计平均团簇的直径大约为 50 Å. 为了确定激光能量对氦团簇的耦合系数, 他们测量了激光脉冲在氦气喷流内的吸收系数. 结果表明, 当气体最初被冷却到 -170 °C, 背气压超过 3 039 750 Pa 时, 激光能量的 90% 被淀积在等离子体中. 而在纯氦气时(在 20 °C 形成喷射的情况, 此时无团簇形成), 激光能量中只有很小部分(<5%) 被等离子体所吸收. 这充分地说明了在加热氦等离子体过程中, 激光与团簇相互作用的重要性. 他们还测量了离子能量. 结果说明, 平均氦离子能量至少是 2.5 keV. 具有

这样能量的离子足以驱动核聚变 $D + D \rightarrow {}^3\text{He} + n$ 事件的发生, 从而获得能量为 2.45 MeV 的高能中子. 在本文中, 我们分析氦团簇与强激光相互作用时被离化的过程, 提出了团簇双重膨胀的机制, 即团簇依次发生流体动力学膨胀和库仑爆炸, 解释了产生高能氦核的原因, 并计算了氦团簇库仑爆炸时氦核的速度以及氦离子团簇解体时间, 为选取合理的激光脉冲宽度参数提供参考.

2 团簇离化与膨胀

当氦原子团簇($R = 25 \text{ \AA}$) 被强激光脉冲($I = 2 \times 10^{16} \text{ W/cm}^2$, $\lambda = 820 \text{ nm}$, $\tau = 35 \text{ fs}$) 照射时, 根据 August 等^[8] 提出的一维准经典库仑势垒压制电离理论, 电离所需的临界激光强度 I_{cr} 可由下式确定

$$I_{cr} = 4.0 \times 10^9 \frac{E_i^4}{Z^2}, \quad (1)$$

其中 E_i (eV) 为原子(离子)的离化能, Z 为离子电荷数. 把 $E_i = 13.6 \text{ eV}$ 代入式(1), 显然 $I \gg I_{cr}$, 那么团簇内所有氦原子在极短时间($\sim 0.7 \text{ fs}$) 内, 被激光场电离. 进而, 摆脱原子束缚的每个自由电子获得了激光的有质动力势

$$U_{\text{pond}}(\text{eV}) = \frac{e^2 E_0^2 (1 + \alpha^2)}{4m_e \omega^2} \\ = 9.33 \times 10^{-14} (1 + \alpha^2) I \lambda^2 \quad (2)$$

收稿日期: 2003 - 12 - 08

* 基金项目: 中国科学院知识创新工程重要基金资助项目(KJ CX2-SW-No2)

作者简介: 安伟科(1956-), 男(汉族), 湖南新化人, 副教授, 在读博士, 从事强激光与团簇相互作用理论研究.

成为热电子. 用 $I = 2 \times 10^{16} \text{ W/cm}^2$, $\lambda = 820 \text{ nm}$, $\alpha = 1$ (圆偏振光) 代入式 (2), 得 $U_{\text{pond}} = 2.51 \text{ keV}$. 这意味着团簇内的热电子具有 $K_e = 2.51 \text{ keV}$ 的平均动能. 团簇内部形成等离子体. 热电子虽然摆脱了各自原子的束缚, 但要想逃离团簇, 它必须有足够大的自由程 λ_e ($\lambda_e > 2R$), 且它的动能 k_e 大到可以克服所有氘离子对它的库仑吸引力. 用 Spitzer 公式^[9]

$$\lambda_e = \frac{(k_B T_e)^2}{4\pi n_e (Z+1) e^4 \ln \Lambda} \quad (3)$$

不难估算, 热电子的平均自由程 λ_e 比氘团簇直径 (50 \AA) 大 3 个数量级, 这里, 我们取 $K_B T_e = 2.5 \text{ keV}$ 、电子密度 $n_e = 3 \times 10^{22} \text{ electrons/cm}^3$ 、库仑对数 $\ln \Lambda = 20$. 对于均匀分布的氘离子团簇 (假设为球形), 其表面处电荷 (电量为 e) 的库仑势能为^[10]

$$U_C = \frac{4\pi}{3} B n_i R^2, \quad (4)$$

上式中, n_i 为离子密度, $B = 14.4 \text{ eV} \cdot \text{\AA}$. 以 $R = 25 \text{ \AA}$, $n_i = 3 \times 10^{-2} \text{ ions/\AA}^3$ 代入, 我们有 $U_C = 1.13 \text{ keV}$, 即 $k_e > U_C$. 在强激光 ($\sim 2 \times 10^{16} \text{ W/cm}^2$) 脉冲作用下, 热电子可以逃离团簇表面, 直至无穷远处. 在热电子向外运动期间, 热电子扩散, 并且拉动冷离子随它们运动. 这样团簇发生流体动力学膨胀, 其膨胀速度为离子的声速^[11]:

$$C_s = \sqrt{\frac{\gamma k_B T_e}{m_i}}, \quad (5)$$

其中, m_i 为离子质量, γ 为气体热容常数. 团簇中的声能密度为

$$\epsilon = \frac{p^2}{\rho_0 C_s^2}, \quad (6)$$

式中, ρ 为团簇质量密度, $p = n_i k_B T_e$ 为声压. 由式 (5) 和 (6) 可以得到每个离子的声能表达式

$$E_s = \frac{k_B T_e}{\gamma}. \quad (7)$$

由于热电子逃离出团簇的时间 ($\sim 0.16 \text{ fs}$) 非常短, 以至于可忽略团簇膨胀的尺寸 (半径增大约 2%) 和时间, 但流体动力学膨胀使每个氘离子获得的能量是惊人的. 例如, 取 $K_B T_e = 2.5 \text{ keV}$, $\gamma = 5/3$ 时, 有 $E_s = 1.5 \text{ keV}$. 当电子逃逸以后, 团簇出现正电荷的积累, 进而原子团簇变成离子团簇, 团簇表面处离子的库仑势能 U_C 由式 (4) 表示, 结合式 (6), 我们可以得到该离子的总能量为

$$E_{\text{ion}} = E_s + U_C. \quad (8)$$

在文献 [7] 的实验情况下, 由式 (4), (6) 和 (7) 可以估算 $E_{\text{ion}} = 2.6 \text{ keV}$, 这很接近文献 [7] 的实验数据 (2.5 keV), 具有 keV 量级能量的氘核相互碰撞, 会引发 DD 核聚变事件发生.

氘离子团簇在静电斥力作用下, 产生库仑爆炸. 爆炸时间和速度分别等同于团簇表面处离子喷射的时间和速度. 具有初始动能 E_s 的离子从初半径 R 运动到 r ($r > R$) 处的时间可表示为

$$\tau_c(r) = \int_R^r \frac{dr}{v} = \int_R^r \left\{ \frac{m_i}{2} [E_s + U_C(r)] \right\}^{1/2} dr, \quad (9)$$

其中 v 为氘离子的速度, $U_C(r)$ 是库仑势能的改变量, 即

$$U_C = \frac{\rho e^2}{3\epsilon_0} R^3 \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{r} \right). \quad (10)$$

我们取 $n_i = 3 \times 10^{-2} \text{ ions/\AA}^3$, $R = 25 \text{ \AA}$, $I = 2 \times 10^{16} \text{ W/cm}^2$, $\lambda = 820 \text{ nm}$, 计算了团簇库仑爆炸的时间演化和速度变化, 其结果给予表 1 中.

Last 等^[12] 定义库仑爆炸的时间是团簇半径增大到二倍初始值时所经历的时间. 因此, 我们认为, 照射团簇的 fs 激光脉冲的上升沿时间应小于库仑爆炸时间, 否则团簇解体后, 不能有效地吸收激光能量.

表 1 库仑爆炸的速度 v 、时间演化 τ_c 随团簇半径的变化

| r | 1.0R | 1.1R | 1.2R | 1.4R | 1.6R | 1.8R | 2.0R |
|---|------|------|------|------|------|------|------|
| τ_c / fs | 0 | 0.62 | 1.25 | 2.47 | 3.65 | 4.80 | 5.92 |
| $V / (\text{\AA} \cdot \text{fs}^{-1})$ | 3.81 | 3.93 | 4.04 | 4.19 | 4.31 | 4.39 | 4.46 |

5 结论

氘团簇在 fs 强激光脉冲照射下, 团簇依次发生流体动力学膨胀和库仑爆炸这样的双重膨胀, 流体动力学膨胀的时间和尺寸虽极小, 但为库仑爆炸提

供了初始动能, 使库仑爆炸更加猛烈. 为了提高氘离子的动能, 我们既可以采用增大团簇半径 R (增大 U_C) 的办法, 也可以用提高激光强度 I (增大 E_s) 的方式, 以便更有效地引发 DD 核聚变.

参 考 文 献

- [1] Ditmire T, Tisch J W G, Springate E, *et al.* Phys Rev Lett, 1997, **78**: 2 732.
- [2] Köller L, Chumacher M, Köhn J, *et al.* Phys Rev Lett, 1999, **82**: 3 783.
- [3] Leziw M, Dobosz S, Normand D, *et al.* Phys Rev Lett, 1998, **80**: 261.
- [4] Schlipper R, Kusche R, Issendorff B V, *et al.* Phys Rev Lett, 1998, **80**: 1 194.
- [5] 刘建胜, 李儒新, 朱频频等. 物理学报, 2001, **50**: 1 121.
- [6] Shao Y L, Ditmire T, Tisch J W G, *et al.* Phys Rev Lett, 1996, **77**: 3 343.
- [7] Ditmire T, Zweiback J, Yanovsky V P, *et al.* Nature (London), 1999, **398**: 489.
- [8] Augst S, Strukland D, Meyerhofer D D, *et al.* Phys Rev Lett, 1989, **63**: 2 212.
- [9] Spitzer L. Physics of Fully Ionized Gases. New York: Interscience, 1967.
- [10] 安伟科, 邱锡钧, 朱志远等. 物理学报, (待发表).
- [11] Morse P M, Ingard K U. Mc Graw-Hill, 1968.
- [12] Isidore Last, Israel Shek, Joshua Jortner, *et al.* J Chem Phys, 1997, **107**: 6 685.

Nuclear Fusion Induced by Dual Explosion of Deuterium Cluster in Strong Laser Field*

AN Wei-ke^{1,2}, QIU Xi-jun¹, JIANG Yi¹, ZHU Zhi-yuan³

(1 Department of Physics, School of Science, Shanghai University, Shanghai 200436, China;

2 Department of Physics, Hunan Institute of Science and Technology, Yueyang 414000, Hunan, China;

3 Shanghai Institute of Nuclear Research, Chinese Academy of Science, Shanghai 201800, China)

Abstract: Considering the Coulomb explosion induced by the interaction of a deuterium cluster target with ultra-intensity femtosecond laser, the causation which generate energetic deuterium nuclei for the fusion has been analyzed. The mechanism for the dual explosion of deuterium cluster is proposed, and hence the velocity of deuterium nuclei and the expansion time of deuterium ion clusters have been estimated.

Key words: femtosecond intense laser; deuterium cluster; dual explosion; nuclear fusion

* Foundation Item: Knowledge Innovation Project of Chinese Academy of Sciences(KJCX2-SW-No2)