

# 飞秒激光氙团簇库仑爆炸引发核聚变的机理研究\*

安伟科<sup>1)2)</sup>† 邱锡钧<sup>1)</sup> 朱志远<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> 上海大学理学院物理系, 上海 200436)

<sup>2)</sup> 岳阳师范学院物理系, 岳阳 414000)

<sup>3)</sup> 中国科学院上海原子核研究所, 上海 201800)

(2003 年 6 月 6 日收到, 2003 年 9 月 24 日收到修改稿)

在超强飞秒激光与氙团簇的相互作用中, 利用库仑爆炸模型, 分析了可以引发核聚变的高能氙核产生的机理, 提出了氙离子团簇膨胀尺寸与时间的关系式, 计算了多种尺寸的氙团簇库仑爆炸时氙核的动能以及氙团簇的解体时间.

关键词: 飞秒强激光, 氙团簇, 库仑爆炸, 核聚变

PACC: 5250J, 5240M, 3640, 2588

## 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新领域, 其中激光与团簇相互作用的研究非常活跃<sup>[1-5]</sup>. 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<sup>[6]</sup>和 MeV 的离子<sup>[1]</sup>, 达到了核物理能量范围. 这为核聚变提供了产生高能氙核的途径. 1999 年, Ditmire 等人利用一种台式激光装置产生的飞秒激光 ( $I \approx 10^{16}$  W/cm<sup>2</sup>, 脉冲宽度为 45fs) 照射直径约 5nm 的氙原子团簇, 实现了聚变反应<sup>[9]</sup>. 这引起了人们的关注<sup>[10,11]</sup>. 本文分析氙团簇与强激光相互作用时被离化的过程, 阐述产生高能氙核的机理, 给出氙离子团簇膨胀尺寸随时间变化的表达式, 并计算氙团簇库仑爆炸时氙核的动能以及氙离子团簇解体时间, 为选取合理的激光脉冲宽度参数提供参考.

## 2. 氙团簇库仑爆炸后氙核的动能及 DD 核聚变

团簇束的平均原子密度较低, 与气体密度 ( $10^{19}$  cm<sup>-3</sup>) 相近, 但团簇本身原子密度近于固体密度

( $10^{22}$  cm<sup>-3</sup>), 团簇对激光能量的吸收率特别高, 可达 95% 以上<sup>[10]</sup>. 在飞秒强激光作用下, 团簇中的原子在强激光场中发生电离, 产生高能“种子”电子<sup>[12]</sup>, “种子”电子在激光场的驱动下与具有固体密度的团簇中的原子和电子发生碰撞, 在几个飞秒内<sup>[13]</sup>产生高离化的离子. 团簇等离子体通过逆韧致吸收、共振吸收和其他吸收机理吸收激光能量, 从而产生高温高密度等离子体<sup>[14]</sup>. 由于氢原子核作用于第一玻尔轨道电子的场强为  $5.14 \times 10^9$  V/cm, 所对应的光强为  $3.4 \times 10^{16}$  W/cm<sup>2</sup>, 那么用来场电离氙原子团簇的飞秒激光, 其强度只需  $10^{16}$  W/cm<sup>2</sup> 量级就可能足够. 数值模拟表明, 不同尺寸氙团簇的电离随激光强度增大到一定值都会达到饱和<sup>[11]</sup>.

设氙团簇为半径  $R$  的球形, 氙原子均匀体密度  $\rho$ , 被强激光完全电离后, 球内 ( $r \leq R$ ) 某处电势为

$$V = \frac{\rho e}{6\epsilon_0}(3R^2 - r^2), \quad r \leq R, \quad (1)$$

因而在该处的某个氙核的电势能则为

$$U = \frac{\rho e^2}{6\epsilon_0}(3R^2 - r^2), \quad r \leq R$$

或

$$U = \frac{2\pi}{3} B_1 \rho (3R^2 - r^2), \quad r \leq R, \quad (2)$$

其中  $B = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} = 1.44$  eV·nm, 各量的量纲为  $U$  (eV),

\* 中国科学院知识创新工程重要方向项目(批准号: KJ951-A1-02)资助的课题.

† E-mail: anweike@citiz.net

( $\alpha$  nm<sup>-3</sup>),  $R$ (nm),  $r$ (nm). 团簇中各氙核在静电斥力的作用下发生库仑爆炸. 团簇膨胀时, 氙核的动能由电势能转化而来. 显然氙核的动能可由下式给出:

$$T = U = \frac{2\pi}{3} B_0 (\alpha (3R^2 - r^2)), \quad r \leq R. \quad (3)$$

(3) 式表明氙核的动能不仅与团簇的尺寸有关, 而且与氙核在团簇内的位置有关. 特别是在团簇边缘,  $r = R$  处, 氙核动能

$$T_{\min} = \frac{4\pi}{3} B_0 R^2, \quad (4)$$

在团簇中心,  $r = 0$  处, 氙核动能

$$T_{\max} = 2\pi B_0 R^2. \quad (5)$$

一般地, 当  $0 \leq r \leq R$  时, 有  $T_{\min} \leq T \leq T_{\max}$ . 取  $\rho = 30 \text{ nm}^{-3}$  [10], 各种尺寸团簇中氙核动能的最小值和最大值列于表 1.

表 1 氙核动能 (keV) 随团簇尺寸的变化

$R/\text{nm}$	2.5	5	10	20	40	80
$T_{\min}/\text{keV} (r=R)$	1.13	4.52	18.07	72.33	289.4	1158
$T_{\max}/\text{keV} (r=0)$	1.70	6.78	27.1	108.5	434.1	1736

另一方面, 两个氙核要聚合在一起, 必须克服库仑斥力, 其势垒高度为

$$E_c = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r_0}, \quad (6)$$

其中  $r_0$  为两个氙核的中心间距, 可把  $r_0$  作为氙核的有效直径, 取  $r_0 = 5 \text{ fm}$ , 则  $E_c = 288 \text{ keV}$ . 克服库仑势垒所需的能量来自于参加反应的氙核的动能, 两个氙核必须具有  $288 \text{ keV}$  的相对动能才能足够接近, 使核力发生作用. 实际上, 根据量子理论的隧道效应, 当两个原子核聚合, 在它们的相对动能明显低于库仑势垒  $E_c$  时, 仍有一定的聚变反应概率. 理论上可以将两个原子核聚变反应的截面作为它们相对能量  $\omega$  的函数, 近似地表示成 [15]

$$\sigma(\omega) \approx \frac{C_0}{\omega} \exp\left[-\frac{2^{3/2} \pi^2 M^{1/2} Z_1 Z_2 \left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0}\right)}{h\omega^{1/2}}\right], \quad (7)$$

其中  $C_0$  为由实验决定的常数,  $h$  为普朗克常数,  $M$  为两个相互作用原子核的折合质量,  $Z_1, Z_2$  为原子序数, 对于氙核  $Z_1 = Z_2 = 1$ . 根据 (7) 式, 即使氙核的相对能量非常低时, 聚变反应的概率也存在, 且反应截面  $\sigma$  随相对能量  $w$  的增加而迅速增加. 最近, Last 等人 [11] 也指出, 相对运动的能量  $T_r \geq 3 \text{ keV}$  的氙核可以引发 DD 聚变反应. 因而我们认为, 在 Ditmire 等人 [9] 的实验中, 半径约  $2.5 \text{ nm}$  的氙原子团簇束, 受到

飞秒强激光 ( $I \approx 10^{16} \text{ W/cm}^2$ , 脉冲宽度为  $45 \text{ fs}$ ) 照射, 在几个飞秒内 [13] 完全电离, 形成氙离子团簇. 在静电斥力作用下产生库仑爆炸, 从一个团簇中出射的高能氙核与另一个团簇飞出的氙核发生碰撞 [9]. 考虑到质量分别为  $m_1$  和  $m_2$ 、速度分别为  $v_1$  和  $v_2$  的两体碰撞, 设  $M$  为折合质量,  $V_r$  为相对速度, 则相对运动的能量  $T_r$  可表为

$$T_r = \frac{1}{2} M V_r^2 = \frac{1}{2} \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} (v_1 - v_2)^2. \quad (8)$$

在对心碰撞 ( $v_1$  与  $v_2$  方向相反) 情况下, 则有

$$\begin{aligned} T_r &= \frac{1}{2} \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} (v_1 + v_2)^2 \\ &= \frac{1}{m_1 + m_2} (\sqrt{m_2 T_1} + \sqrt{m_1 T_2})^2, \end{aligned} \quad (9)$$

其中  $T_1$  和  $T_2$  分别为两粒子的动能. 若  $m_1 = m_2$ , 即质量相同的两体对心碰撞的相对运动能量为

$$T_r = \frac{1}{2} (\sqrt{T_1} + \sqrt{T_2})^2. \quad (10)$$

特别地, 当  $T_1 = T_2 = T$  时, 有  $T_r = 2T$ . 根据 (10) 式, 由表 1 的数据不难估算, 有部分发生对心碰撞的氙核之间的相对运动能量会大于  $3 \text{ keV}$ , 足以穿透库仑势垒  $E_c$  发生  $D + D \rightarrow {}^3\text{He} + n$  聚变反应, 出现文献 [9] 所报道的实验结果.

### 3. 氙离子团簇的解体时间

Last 等人 [16] 曾对  $\text{Xe}_n$  ( $n = 2, 3, 6, 13$ ) 团簇的库仑爆炸动力学进行了研究. 类似地, 本文在动力学上研究氙团簇库仑爆炸经历的时间, 设氙核位于氙团簇的边缘, 初始位置  $R$ , 团簇膨胀后 (各向同性) 该氙核的位置  $r$  ( $r > R$ ), 其间所经历的时间

$$\tau(r) = \int_R^r dr/v = \int_R^r (m/2\mathcal{K}(r))^2 dr, \quad r \geq R \quad (11)$$

其中  $v$  为速度,  $m$  为氙核质量,  $\mathcal{K}(r)$  为氙核飞行动能, 它等于在  $r$  处的势能改变,

$$\mathcal{K}(r) = \frac{\rho e^2}{3\epsilon_0} R^3 \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{r}\right), \quad (12)$$

$\rho$  为初始离子密度. 积分后, 得

$$\tau = t_0 F(\xi), \quad (13)$$

其中

$$t_0 = 1.905 \times (3m/4\pi\rho), \quad (14)$$

且

$$F(\xi) = \frac{\sqrt{1-\xi}}{\xi} + \frac{1}{2} \ln \frac{1+\sqrt{1-\xi}}{1-\sqrt{1-\xi}},$$

$$\xi = R/r \leq 1. \quad (15)$$

(12)–(14) 式中各物理量的量纲分别为  $t_0$  (fs),  $R$  (nm),  $r$  (nm),  $m$  (AM) 以及  $\rho$  ( $\text{nm}^{-3}$ ), 取  $\rho = 30\text{nm}^{-3}$ ,  $m = 2$ , 代入 (14) 式得

$$t_0 = 7.6\text{fs}.$$

表 2 列出氙离子团簇库仑爆炸时, 团簇半径随时间的变化.

表 2 库仑爆炸时, 氙离子团簇半径随时间的变化

$\xi$	$\frac{1}{1.1}$	$\frac{1}{1.2}$	$\frac{1}{1.3}$	$\frac{1}{1.4}$	$\frac{1}{1.5}$	$\frac{1}{1.6}$	$\frac{1}{1.7}$	$\frac{1}{1.8}$	$\frac{1}{1.9}$	$\frac{1}{2.0}$
$\tau/\text{fs}$	4.89	7.02	8.72	10.22	11.58	12.86	14.07	15.24	16.36	17.45

Zweiback 等人最近研究氙离子团簇膨胀时, 针对半径增大一倍的过程所经历的时间曾提出近似公式<sup>[10]</sup>

$$t_{\text{dis}} \approx 0.8 \sqrt{\frac{4\pi\epsilon_0 m_D}{n_D e^2}}, \quad (16)$$

$n_D$  为初始氙离子密度 ( $\approx 3 \times 10^{22} \text{cm}^{-3}$ ), 可以求得  $t_{\text{dis}} \approx 20\text{fs}$ , 与表 2 中的数据 17.45fs 基本相符.

## 4. 结 论

氙离子团簇爆炸后, 氙核的动能与团簇初始半径  $R^2$  成正比. 当团簇半径达到几十纳米时, 会产生 100keV, 甚至 MeV 量级的高能氙核, 从而引发 DD 核聚变.

氙核的动能还与氙核在团簇的初始位置有关, 对于同一个氙离子团簇, 氙核的初始位置距球心越近, 它获得的动能越大.

照射氙团簇的激光脉冲宽度应采用几十飞秒为宜, 且脉冲上升时间应小于氙团簇膨胀至半径增大一倍所需的时间<sup>[10]</sup>, 即 17.45fs, 否则团簇膨胀解体后不能有效地吸收激光能量.

[1] Ditmire T *et al* 1997 *Phys. Rev. Lett.* **78** 2732

[2] Köller L *et al* 1999 *Phys. Rev. Lett.* **82** 3783

[3] Leziw M *et al* 1998 *Phys. Rev. Lett.* **80** 261

[4] Schlipper R *et al* 1998 *Phys. Rev. Lett.* **80** 1194

[5] Liu J S *et al* 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 1121 [in Chinese] 刘建胜等 2001 物理学报 **50** 1121 ]

[6] Lin J Q *et al* 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 457 [in Chinese] 林景全等 2001 物理学报 **50** 457 ]

[7] Li S H *et al* 2003 *Chin. Phys.* **12** 856

[8] Shao Y L, Ditmire T, Tisch J W G, Springate E, Marangos J P and Hutchinson M H R 1996 *Phys. Rev. Lett.* **77** 3343

[9] Ditmire T *et al* 1999 *Nature* **398** 489

[10] Zweiback J *et al* 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 2634

[11] Last I and Jortner J 2001 *Phys. Rev. Lett.* **87** 33401

[12] Ditmire T *et al* 1996 *Phys. Rev. A* **53** 3379

[13] Last I and Jortner J 2000 *Phys. Rev. A* **62** 13201

[14] Lei A L *et al* 2000 *Physics* **29** 300 [in Chinese] 雷安乐等 2000 物理 **29** 300 ]

[15] Chang T Q *et al* 1991 *The Interaction of Laser-Plasma and Laser fusion* (Changsha: Human Science and Technology Publishing House) (in Chinese) 39 [常铁强等 1991 激光等离子体相互作用与激光聚变 (长沙: 湖南科学技术出版社) 第 39 页 ]

[16] Last I *et al* 1997 *J. Chem. Phys.* **107** 6685

# Theoretical study on the nuclear fusion mechanism of deuterium clusters aroused by Coulomb explosions with femtosecond intense laser \*

An Wei-Ke<sup>1,2)</sup> Qiu Xi-Jun<sup>1)</sup> Zhu Zhi-Yuan<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> Department of Physics, School of Science, Shanghai University, Shanghai 200436, China )

<sup>2)</sup> Department of Physics, Yueyang Normal College, Yueyang 414000, China )

<sup>3)</sup> Shanghai Institute of Nuclear Research, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China )

( Received 6 June 2003 ; revised manuscript received 24 September 2003 )

## Abstract

Considering the Coulomb explosion induced by the interaction of a deuterium cluster target with an ultra-intense femtosecond laser, the mechanism which generates energetic deuterium nuclei for the fusion has been analyzed. The formulas for expansions of deuterium ion clusters, which are driven by Coulomb explosion, are proposed; and hence the kinetic energies of deuterium nuclei and the expansion time of deuterium ion clusters have been estimated.

**Keywords** : femtosecond intense laser, deuterium cluster, Coulomb explosion, nuclear fusion

**PACC** : 5250J, 5240M, 3640, 2588

---

\* Project supported by the Major Project of Knowledge Innovation Program of Chinese Academy of Sciences ( Grant No. KJCX2-SW-N02 ).