

团簇冲击核聚变研究现状

林森浩 沈文庆

(中国科学院上海原子核研究所 上海 201800)

摘要 本文简要介绍了团簇冲击核聚变研究的发展和现状,同时也介绍了各种理论解释模型.

关键词 团簇, 核聚变, 团簇冲击核聚变.

1 前言

自从1919年阿斯顿(F. W. Aston)在测量 ${}^4\text{He}$ 的原子质量和 ${}^1\text{H}$ 原子质量时,从实验中发现聚变以来,人类就设想了许多方法来利用由核聚变反应所释放出来的能量.因为只有在极高温下,原子核以极高速度作无轨运动,连续地相互碰撞,才能发生聚变反应.据计算,发生聚变的温度要高达 $T=10^{10}\text{K}$.这对实验条件提出了十分苛刻的要求.近年来,高温等离子体的研究取得了许多进展.

1989年,美国Brookhaven国家实验室的Beuhler等提出了团簇冲击核聚变(Cluster Impact Fusion).他们利用加速器将含有氘核的分子团簇离子,如 $(\text{D}_2\text{O})_n^+$ 和 $(\text{D}_2)_n^+$ 等加速到200~325keV的能量,然后冲击含有氘核的靶材料,如 $(\text{C}_2\text{D}_4)_n$ 、TiD或ZrD_{1.65}等,测量到 $\text{D}+\text{D}\rightarrow\text{T}+\text{p}$ 及 $\text{D}+\text{D}\rightarrow{}^3\text{He}+\text{n}$ 典型的聚变反应所产生的3MeV质子、1MeV的氚及0.82MeV的 ${}^3\text{He}$ 粒子.不久,Stanford Research Institute在不同的加速器条件下也证实了BNL的结果.由于实验结果非常可信,一些理论物理学家很快提出了许多模型,探讨了它们的机制.同时,法国Lyon核物理研究所也作了一些相类似的实验,但没有观察到明显的核聚变反应.本文就团簇冲击核聚变的发现及研究现状作一个简单介绍.

2 团簇冲击核聚变的实验结果

2.1 BFF实验

美国Brookhaven国家实验室的Beuhler, Friedlander和Friedmar^[1-5]作了一系列实验(以下简称BFF实验).他们将氘化过的水分子 D_2O 和He气在离子源中电离,经过292kHz低频四极矩质谱计质量分析后,离子束在Cockroft-Walton中聚焦并加速.加速电压为200~325keV.然后,轰击到TiD, $(\text{C}_2\text{D}_4)_n$ (氘化的聚乙烯)和ZrD_{1.65}靶上.用一个与束流方向成 15° 的Si(Au)探测器测量靶所产生的质子、T和X射线.由多道分析器等所组成的测量系统实验前用 ${}^{241}\text{Am}$ ($E_\alpha=5.48\text{MeV}$)和 ${}^{148}\text{Gd}$ ($E_\alpha=3.18\text{MeV}$)产生的 α 粒子很仔细地进行刻度.最大计数率为 $\sim 10^5/\text{s}$.测得的能谱如图1所示.图1的能标为8keV/道.图1(上)中前30道是X射线产生的脉冲堆积,而90~140道的1MeV峰估计是氚,350~400道的3MeV峰估计是质子.由于经过探测器表面的 $500\mu\text{g}/\text{cm}^2$ Al箔层的阻止, ${}^3\text{He}$ 粒子能量降低了约0.75MeV.所以没有观察到 $\text{D}+\text{D}\rightarrow{}^3\text{He}+\text{n}$ 反应所产生的 ${}^3\text{He}$ 粒子(0.82MeV).为了证实所观察到的确是p和 ${}^3\text{H}$ 峰,BFF在靶和探测器之间放置一厚度为 $4.8\text{mg}/\text{cm}^2$ 的Al吸收片(图1下),结果p峰左移0.3MeV,而 ${}^3\text{H}$ 峰左移到X射线的本底范围.这正是和预期估计的完全一致.更进一步,BFF用 $(\text{D}_2\text{O})_n^+$ 团簇冲击氢化钛而不是氘化钛靶时,就观察不到3MeV的质子峰.故而证明确实是由于 $(\text{D}_2\text{O})_n^+$ 团簇冲击靶上的D核引起的DD聚变反应产生的p和 ${}^3\text{H}$ 峰.

在相同能量下，研究团簇大小对聚变反应产额的关系，例如，加速电压为 300keV， $n=20\sim 1300$ 的 $(D_2O)_n^+$ 的反应产额形成一个包，极端情况 $(D_2O)_{25}$ 和 $(D_2O)_{1300}$ 都很小，分别为最大值的 $(D_2O)_{50}$ 的 1/5 和 1/10；300keV 时， $n=100\sim 500$ 的 $(D_2O)_n^+$ 的团簇的聚变率为 $\sim 0.05s^{-1} \cdot nA^{-1}$ 。 $(D_2O)_{100}^+$ 冲击 TiD 靶时，每次冲击的质子产额为 6.5×10^{-11} 个。

仍然观察到 DD 聚变，但产额只有 $(D_2O)_n^+$ 团簇冲击时的 $\sim 5\%$ 。这个结果与 DD 聚变反应的机制不相容。

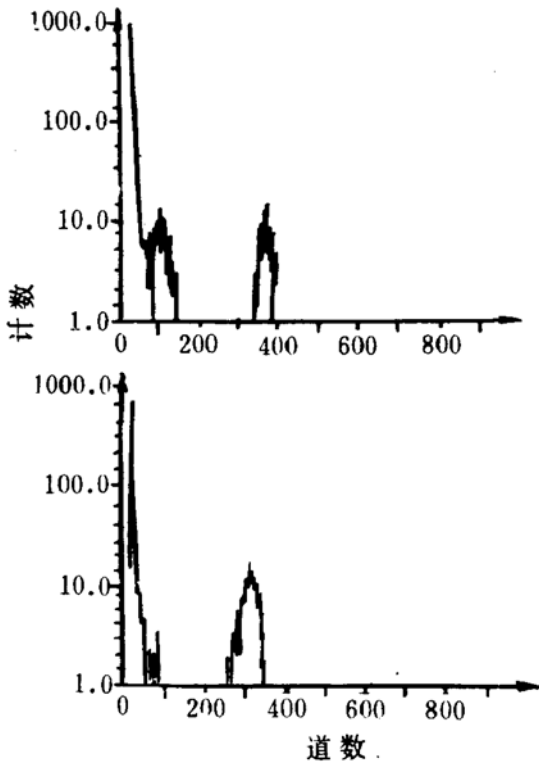


图 1 $(D_2O)_n^+$ 团簇轰击 TiD 靶的能谱图。上：探测器仅有一层 $500\mu g/cm^2$ 的 Al 箔时，观察到对应于 $\sim 3MeV$ 和 $\sim 1MeV$ 的两个峰。下：在靶与探测器之间加入 $4.8mg/cm^2$ Al 的吸收片后，1MeV 的峰左移到 X 射线的本底处，而 3MeV 的峰左移了约 3keV

一般 DD 聚变反应的截面为 $\sim 10^{-30}cm^2$ ，而对 $n=100$ 的 $(D_2O)_n^+$ 团簇在 300keV 所观察到的截面要比计算值大 25 个数量级。图 2 表示 $(D_2O)_{100}$ 团簇冲击三种不同靶材料时，能量与产额的关系。由图可见，每次团簇冲击中产生聚变反应的几率大约为 10^{-10} 数量级。当能量从 200keV 提高到 300keV，产额几乎增加一个数量级。

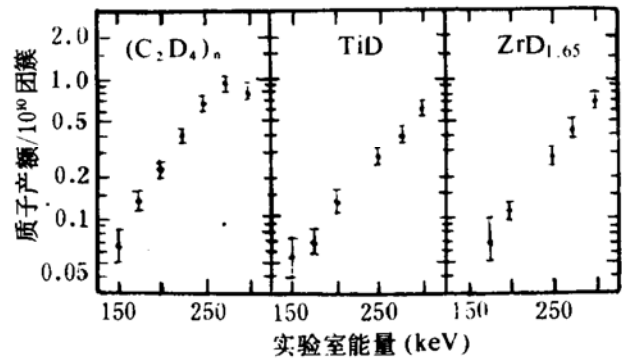


图 2 $(D_2O)_{100}$ 团簇冲击三种不同的靶材料时，DD 聚变反应的质子产额的激发曲线

2.2 SRI 的研究结果^[9,10]

美国 Stanford Research Institute (SRI) 的小组用完全不同的加速器重复了 BFF 的实验。他们分别用 $(D_2O)_n$ 和 $(H_2O)_n$ 团簇 ($n=1\sim 150$) 冲击 $(C_2D_4)_n$ 靶，能量范围为 135~225keV。 $(D_2O)_{115}$ 冲击时，质子产额与能量的关系与 BFF 得到的结果完全一致。当团簇尺寸较小 ($n < 10$)，能量为 225keV 时产额与 Carraro 提出来的“热核模型”相一致；当 $n > 10$ 时，产额增加很快，在 225keV 能量范围，符合“敲打模型”。但 $n=4\sim 50$ 范围内，未观察到质子峰，直到 $n=115$ 时，产生了激烈的聚变反应。奇怪的是用 $(H_2O)_{115}$ 团簇冲击 $(C_2D_4)_n$ 靶，也观察到了质子峰。并且， $(H_2O)_{115}$ 和 $(D_2O)_{115}$ 两者的聚变率比为 $(5 \pm 2)\%$ ，与 BFF 的结果非常一致。

有人认为，BFF 所观察到的 3MeV 质子峰可能是由其它小离子诸如 D^+ 、 D_2O^+ 或 D_3O^+ 的贡献，它们沾污了 $(D_2O)_n^+$ 团簇并被夹带在束流中加速到高能。然而，在 SRI 的实验中，扇形偏转磁铁使离子源与加速管分开，而且先质量分析，后进行加速，故而不可能在 $(D_2O)_n^+$ 束流中夹入其它中性的或较小的团簇粒子。同时，扇形磁铁的质量分辨率为 $FWHM=5\%$ ，没有向质量数小的方向的长尾巴，不会带进其它的团簇粒子。

同时也发现，由 $(D_2O)_n^+$ 团簇冲击 TiD 靶时，

这与 BFF 实验中的四极矩质量过滤器完全不同. 所以, SRI 的实验结果更进一步验证了团簇冲击核聚变的存在.

2.3 Lyon 的实验

法国 Lyon 核物理研究所的 Fallavier 等人^[7,10,11]于 1990 年发表了他们在 Cockroft-Walton 加速器上用 Cryogenic 离子源进行团簇冲击 DD 聚变反应的实验结果. 实验装置如图 3 所示. A 束流管道为 500keV 的 N_{16}^+ 团簇束; B 束流管道为 100~150keV 的 D_n^+ ($n=200\sim300$) 团簇束. 经过改装, 1993 年初将最高能量提高到 600keV, 可以加速 $(D_2O)_n^+$, 甚至 $(C_2D_4)_n^+$. Lyon 和 BNL 的系统真空度都是 10^{-4} Pa, 两家的差别在于 Lyon 是先加速后质量分析. 对于质量数较小的团簇 $n=1\sim5$, 中等能量时, 采用孔径 $\phi 4$ 的准直孔, 质量分辨率可达 $\Delta M/M=6\%$; 对于较大质量数的团簇 $n=100$ 或 $n=145$, 采用孔径 $\phi 14$ 的准直孔, 质量分辨率可达 $\Delta M/M=23\%$. 实验中用 520keV 的 $(CD_4)_{110}^+$ 或 $(CD_4)_{145}^+$, 或者用能量为 100 和 150keV 的 $(D_2)_{100}^+$ 冲击氘化的聚乙烯靶 $(C_2D_4)_n$. 在测量系统的能量为 2.8 到 3.2MeV 之间开个窗口, 专门探测聚变反应所产生的质子. 实验结果如下: (1) 用较小的团簇 $(CD_4)_n^+$, $n=1\sim5$ 和 10 冲击时, 能量为 >10 keV/u, 即对应于每个 D 核的能量在 3.5 到

52keV 之间. 虽然, 探测到较高的计数率, 但未观察到 DD 聚变反应所产生的 3MeV 质子. (2) 对 $(CD_4)_{145}^+$ 团簇使用较低的能量, 发现由 CD_4^+ 离子的存在, 会导致质子计数的激剧增加, 达 $7 \times 10^{-5} s^{-1}$, 大约为 DD 聚变质子计数的 6 倍, 故而未明确观测到 DD 聚变所产生的质子. (3) 用 520keV $(CD_4)_{110}^+$ 和 $(CD_4)_{145}^+$ 冲击 $(C_2D_4)_n$ 时, 每个团簇的质子产额都在 10^{-13} 量级, 比 BFF 的实验低 2 个数量级. 对探测器的灵敏度来讲, 这是十分困难的.

因此, 三组实验的结果都没有观察到 DD 核聚变反应.

3 团簇冲击核聚变的理论探索

3.1 EMR 模型

Echenique, Manson 和 Ritchie^[12] 提出“热柱 (hot spike) 模型”(简称 EMR 模型). 他们认为当一束高能团簇离子冲击靶时, 靶表面的冲击区域内形成了热圆柱锥孔. 由于冲击而温度激剧增高, 孔内的许多原子发生碰撞, 甚至出现了一些速度比入射团簇更大的离子. 当这些高速的氘核相互碰撞时, 就会发生 DD 聚变.

EMR 假定 D 核的相对速度的分布服从 Maxwell-Boltzman 分布, 于是, 每个 D 的聚变率 R 可表示为

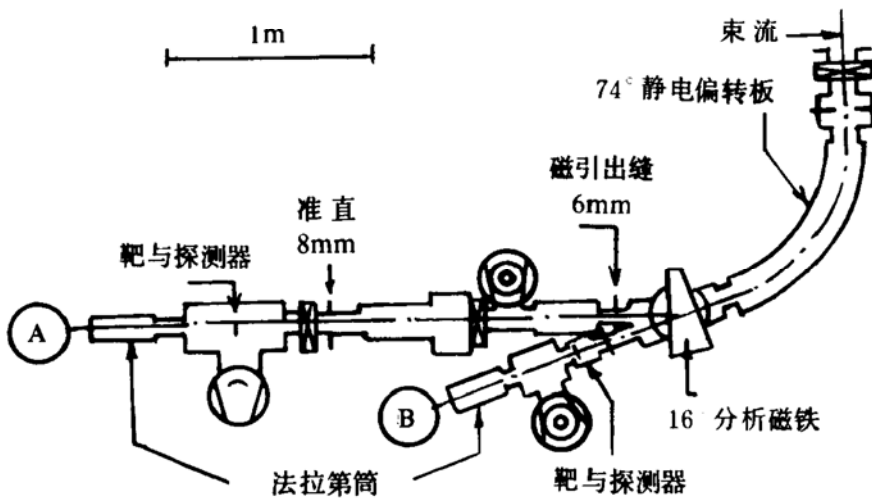


图 3 Lyon 研究所团簇冲击的实验装置示意图. (A) D_n^+ 束; (B) N_n^+ 束

$$R = \eta \frac{S(2/M)^{1/2}}{E_0^{3/2} \cdot \Gamma(3/2)} \int_0^\infty dE \cdot e^{-E/E_0} \cdot e^{-A/\sqrt{E}}$$

式中, η 是 D 核在热圆锥体中的密度, E_0 是热圆锥的温度, M 是 D 核的质量, $S = 5.5 \times 10^{-23} \text{ cm}^2 \cdot \text{keV}$ 和 $A = 31.28 \text{ keV}^{1/2}$.

假定, $\eta = 1.3 \times 10^{23} \text{ D/cm}^3$, 300 keV 的 $(\text{D}_2\text{O})_{100}^+$ 分配到 ~ 1000 个粒子, 于是根据上式得到 $R \sim 0.08 \text{ s}^{-1}$. 由 BFF 的实验, 假定限制时间为 10^{-3} s 时, 反应速率为 0.1 s^{-1} . 理论计算与实验结果符合的很好.

3.2 产额曲线^[13]

Carraro 等人利用核物理中的各种碰撞模型, 计算了团簇冲击核聚变的产额曲线.

3.2.1 厚靶产额(Thick-target yield)

当团簇冲击到靶表面时, 产生 DD 聚变反应. 由于厚靶的阻止本领, 入射团簇便在靶核中失去能量, 减慢速度, 最后停止在靶中. 计算得到, 每个团簇的厚靶聚变产额为

$$y_{\text{TT}} = 4.6 \times 10^{-6} \cdot N \cdot \exp(-140 \sqrt{N/E_{\text{tot}}})$$

式中, N 为团簇中分子数 (如 $(\text{D}_2\text{O})_{100}^+$ 中 $N=100$), E_{tot} 为总能量. 当团簇的入射能量为 $E_{\text{tot}} = 300 \text{ keV}$ 时, 上式可简化为

$$y_{\text{TT}} = 4.6 \times 10^{-6} \cdot N \cdot \exp(-8.077 \sqrt{N})$$

聚变产额对团簇的大小具有显著的依赖关系.

3.2.2 氘核敲打模型(Deuteron knock-on)

设想入射团簇与静止的 TiD 晶格中的 D 核产生弹性散射, 交换了能量 u . 于是, 获得能量的 D 核可能产生聚变反应, 其产额可表示为

$$y_{10} = 7.5 \times 10^{-10} \cdot E_{\text{tot}}^{5/6} \cdot N^{1/6}$$

$$\cdot \exp(-78.7 \sqrt{N/E_{\text{tot}}})$$

3.2.3 多重敲打模型(Multiple knock-on)

假定靶中的 D 核被入射的团簇冲击后, 可能被加速而与另外的 (也可能是同一个) 入射的团簇碰撞, 此时 D 核的能量远远大于前面讨论的单次敲打模型, 可表示为

$$y_{\text{MkO}} = 2.3 \times 10^{-6} \cdot N \cdot \exp(-2.86 \sqrt{N})$$

3.2.4 热核模型(Thermonuclear Model)

假定团簇入射到 TiD 靶中, 由于高速碰撞而热化, 并且产生一种热的原子气体. 这种气体会逐渐膨胀, 直到在 TiD 固体靶中包入更多的

原子后才冷却. 此时, 产额为

$$y_{\text{TN}} = 1.4 \times 10^{-5} \cdot E_{\text{tot}}^{-5/6} \cdot N^{12/6} \cdot \exp[-36.7 (\frac{N}{E_{\text{tot}}})^{1/3}]$$

3.2.5 热圆锥模型(Thermal-spike model)

假定入射团簇的能量沉积到固体靶的一个小圆柱锥体内. 该圆锥体与团簇入射路径方向是同轴的, 而且深入到靶内, 称为热圆锥. 由于此模型强调了能量在固体靶中第一原子层处的沉积, 故对 N 的依赖关系非常微弱. 根据此模型, 聚变反应的产额为

$$y_{\text{TS}} = 1.6 \times 10^{-5} \cdot E_{\text{tot}}^{1/4} \cdot N^{-5/12}$$

$$\cdot \exp(-68.9 \cdot N^{1/18} \cdot E_{\text{tot}}^{-1/6})$$

3.3 冲击波模型(Shock-wave mechanism)

Kim 等人^[8,14,15]提出了冲击波模型. 他们认为当 $(\text{D}_2\text{O})_n^+$ 、 $(\text{H}_2\text{O})_n^+$ 或 $(\text{D}_2)_n^+$ 等分子团簇冲击氧化的靶时, 由于团簇的速度为 $\sim 10^7 \text{ cm/s}$, 冲击的时间非常短 $\Delta t \approx 10^{-14} \text{ s}$, 而且团簇的直径又非常小 $\sim 10 \text{ \AA}$, 于是这些团簇在接触到氧化靶的一瞬间就会形成一个冲击波, 在靶表面产生一个直径与团簇的尺寸差不多的陷坑. 团簇冲击靶表面时形成的冲击波的过程及其与时间的关系如图 4 所示.

Kim 等人认为每个团簇的聚变产额应由 $y_{(1)}$ 和 $y_{(2)}$ 两部分组成, 即 $y = y_{(1)} + y_{(2)}$, $y_{(1)}$ 是非冲击波的贡献, $y_{(2)}$ 是冲击波的贡献. 因为在 $n > 10$ 时, $y_{(1)} \ll y_{(2)}$, 所以 $y_{(1)}$ 就可以忽略不计, 而认为 $y \approx y_{(2)}$. 产额曲线为

$$y_{(2)}(n, E_i) = 2n g v(n, E_i) \cdot I(k, T_e)$$

对于三维 Maxwell-Boltzman 速度分布, 上式中的参数分别为

$$T_e = \tau(n, E_i) T_2$$

$$V_e = \int v f(v) d^3v$$

$$I(k, T_e) = n_b^2 \left(\frac{8}{3\pi}\right)^{1/2} \int_0^\infty dE$$

$$\cdot \frac{S(E_{\text{cm}})(1 + E/kT_e)}{E_{\text{cm}} |dE/dx|} e^{-(E/kT_e + \sqrt{E_0}/\sqrt{E})}$$

根据冲击波模型, $(\text{D}_2\text{O})_{100}^+$ 团簇冲击 C_2D_4 靶时的质子产额与团簇能量关系的实验数据与计算结果的比较如图 5 所示, 由曲线可见, 两者符

合得非常好.

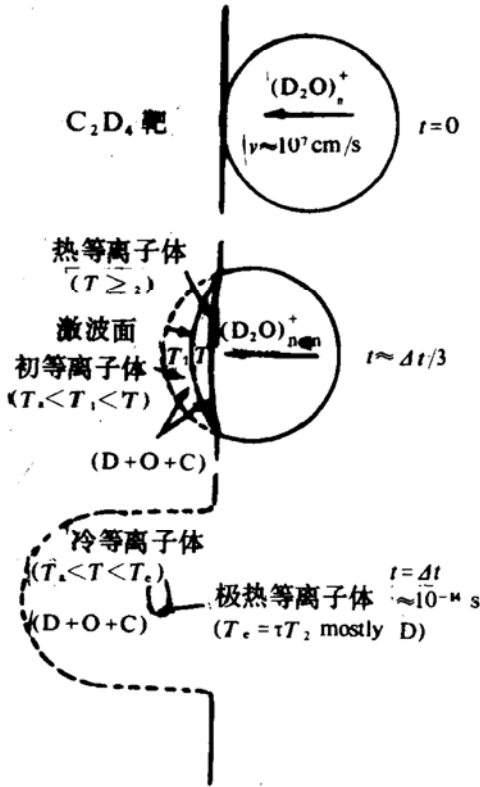


图 4 团簇冲击靶表面时形成的冲击波与时间的关系示意图

固体靶, 以实现核聚变反应. 但是, 由于能够发生聚变反应的几率很小而无法实现. 近年来, 随着团簇束的研究不断深入, R. J. Beuhler 等人用加速 $(D_2O)^+$ 团簇 (200~325keV) 轰击氘化靶的方法观察到比理论预示高得多的聚变反应几率, 受到了世界范围的一些权威性的实验室的广泛重视, 许多现象得到了重复. 同时, 用冲击波模型给出了很好的理论解释. 虽然, 法国核物理研究所的结果与 BNL 有所差异, 这是科学探索前进道路中的正常现象. 由于实验现象的复杂性, 实验仪器的精密程度各不相同, 要得出确切的定论, 还需要保持谨慎的态度. 也还需要进行大量的实验研究和理论分析.

科学家们在团簇束与靶物质的相互作用的研究中取得了令人瞩目的结果. 例如, 高速团簇束在靶材料表面的能量沉积和冲击波压缩, 含氘固体中许多诱发核反应的可能性, 以及高速离子束导致靶材料中的原子的重新组合等等. 这些结果有助于了解物质在极高的压力、密度或温度情况下的物理性质和星球内部的物理现象. 同时, 对于核聚变能的实际应用也是一个十分重要的启迪.

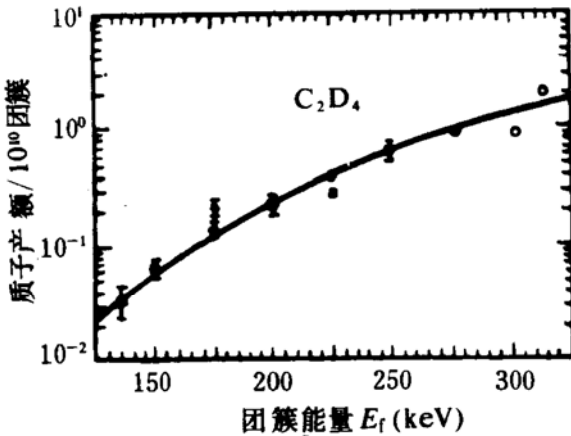


图 5 $(D_2O)^+$ 团簇冲击 C_2D_4 靶时的质子产额与团簇能量关系的实验与计算比较. 其中 \circ 实验结果取自文献 2; \blacksquare 取自文献 6; 曲线是根据冲击波模型计算

参 考 文 献

- 1 Beuhler R J, et al. Phys. Rev. Lett., 1989,63 : 1292
- 2 Beuhler R J, et al. J. Phys. Chem., 1990,94 : 7665
- 3 Beuhler R J, et al. Phys. Rev. Lett., 1991,67 : 473
- 4 Beuhler R J, et al. Phys. Rev. Lett., 1992,68 : 2018(E)
- 5 Beuhler R J, et al. in Towards a Unified Picture of Nuclear Dynamics, edited by J. Abe, et al. AIP Conf. Proc. No. 250 (AIP, New York, 1992), P283
- 6 Bae Y K, et al. ibid P310
- 7 Fallavier M, et al. ibid P294
- 8 Kim Y E, et al. ibid P321
- 9 Bae Y K, et al. Phys. Rev., 1991, A44 : R4091
- 10 Fallavier M, et al. Phys. Rev. Lett., 1990,65 : 621
- 11 Fallavier M, et al. Phys. Rev. Lett., 1993,70 : 1022
- 12 Echenique P M, et al. Phys. Rev. Lett., 1990,64 : 1413
- 13 Carraro C, et al. Phys. Rev., 1990,A42 : 1379
- 14 Kim Y E, et al. Mod. Phys. Lett. 1991,B5 : 427
- 15 Kim Y E, et al. Mod. Phys. Lett., 1991,B45 : 941

(下转 20 页)

4 结束语

虽然, 很早以前就有人提出利用加速器将氘核加速到足够高的能量, 再去轰击含有氘的

Energy-dependent Barrier in Heavy-ion Induced Fusion Reaction

Liu Guoxing Zheng Jiwen Chen Keliang

(*Institute of Modern Physics, Academia Sinica, Lanzhou 730000*)

Abstract The complete fusion excitation function for several systems formed by ^{12}C , ^{14}N , ^{16}O , ^{32}S , ^{35}Cl and ^{40}Ar ion with some targets have been analysed by an energy-dependent barrier penetration model. The potential parameters E_1 , V_1 , E_2 , V_2 , R_0 and $\hbar\omega$ have been extracted from the experimental data. It shows that the energy-dependent barrier penetration model can describe satisfactorily the behaviour of the change of the fusion cross section with the bombarding energy.

Key Words macroscopic model of nuclear shape evolution, energy-dependent barrier, complete fusion reaction.

(上接 16 页)

Trends in Cluster Impact Fusion

Lin Senhao Shen Wenqing

(*Shanghai Institute of Nuclear Research, Academia Sinica, Shanghai 201800*)

Abstract A brief introduction of latest development of cluster impact fusion (CIF) was presented. Beuhler, Friedler and Friedman from BNL reported to have observed (d,d) fusion when deuterated solid target of TiD , $(\text{C}_2\text{D})_n$ or $\text{ZrD}_{1.65}$ were bombarded by $(\text{D}_2\text{O})_n^+$ cluster with n values between 20 and 1000, accelerated to energies of 220~325 keV. The observed fusion rates correspond to cross sections some 25 orders of magnitude larger than the theoretical estimation. A group in Stanford Research Institute experimentally gave a confirmation on the credibility of CIF with different apparatus. In addition, the experiment results were explained theoretically by EMR model and shock-wave mechanism, respectively. However, Fallavier from Lyon reported that they observed no (d,d) fusion evidence under the conditions of 100keV $(\text{D})_{200}^- \rightarrow \text{TiD}$ or $>10\text{keV/u}$ $(\text{CD}_4)_{145}^+ \rightarrow (\text{C}_2\text{D}_4)_n$.

It is expecting that the CIF will be strongly confirmed by experimental results and theoretical explanation with more accurate facilities in the near future.

Key Words cluster, fusion, cluster impact fusion.