

研究论文

快分子离子通过碳膜产生负离子的研究*

师勉恭 杨百方 蒋增学 郝士琢 雷晓兰

(四川大学原子核科学技术研究所)

本文介绍快分子离子在固体膜内的碰撞机制和负离子的产生,测量了不同能量的分子离子 H_2^+ 、 D_2^+ 通过碳膜产生的负离子并与原子离子产生的负离子作了比较,对结果进行了定性分析和讨论。

关键词: 快分子离子 碰撞机制 负离子

一、引言

快分子离子与固体相互作用的实验研究涉及到原子分子物理和固体物理的许多方面。用快分子离子束研究原子在固体中的碰撞是一种非常重要的工具。实验采用MeV量级的快分子离子轰击固体薄靶,测量各种产物的有关物理量,从而研究相互作用产生的各种产物、效应、分子离子的结构、固体介质的特性并从理论上提出各种模型,解释实验现象^[1]。

我所从1980年开始,建立了一套高分辨多功能原子碰撞装置,先后开展了多方面的工作。

为了研究分子离子在固体膜内的电荷交换、双电子俘获以及产生负离子的机制、提供原子分子碰撞的实验数据,本文列出氢及其同位素氘分子离子(H_2^+ 、 D_2^+)通过碳膜产生负离子的实验结果并进行分析讨论。其中, D_2^+ 产生的负离子是我们首次测量的。

二、碰撞机制和负离子的产生

对分子离子通过固体膜生成各种产物的机制,N. Cuc等人提出的模型^[2]认为:快分子离子以MeV量级的能量入射到固体膜前表层零点几毫微米内时,由于电子损失截面($\sigma_i \sim 10^{-16} \text{ cm}^2$)比俘获截面($\sigma_c \sim 10^{-20} \text{ cm}^2$)大几个数量级^[3,4],因而分子离子很快被剥掉全部或大部束缚电子。分子离子被剥掉电子后立即变为带正电的裸核或半裸核团。由于裸核团的核间库仑排斥,迅速使裸核爆炸式地分开,核间距也迅速增大。这就是所谓的“仓库爆炸”。这种爆炸的时间约为 10^{-15} s ,相当于能量为1MeV的分子离子 H_2^+ 从进入到离开10nm($\sim 2 \mu\text{g}/\text{cm}^2$)厚的碳靶所用的时间(即停留时间)。因而一般爆炸是在膜内完成的。爆炸后产生的碎片在膜内受到多次散射,发生尾流效应、能损、能损歧离及电荷态变化等物理过程。MeV量级的分子离子在膜中的能损和能损歧离是很小的,尾流效应及多次散射的影响可在测量库仑爆炸生成的产物能谱中观察到^[5]。

碎片通过膜的后表层时,可产生各种离子。如氘分子离子 D_2^+ 入射到碳膜中经库仑爆炸,其碎片氘原子离子 D^+ 在膜后表层俘获一个电子生成 D^0 ,俘获两个电子生成 D^- ,未俘获电子则是 D^+ 。其中生成的 D^+ 是大量的,而 D^0 、 D^- 均很少。 D^- 约占入射离子的 10^{-7} — 10^{-9} 。另一方面,当分子离子处于激发态或核间距较大时,束缚电子被表层剥离后裸核团未经受强烈的库仑爆炸,可能在膜后表层俘获一个电子而重新形成 D_2^+ 。这种情况称为分子离子的透射。

三、实验方法

负离子的测量方法如图1所示。分子离子束 H_2^+ 或 D_2^+ 由2.5MeV质子静电加速器提供。分子离子由加速器的高频离子源产生。通过调节离子源的进气量、吸极电压、放电管等离子

* 中国科学院基金资助的课题

源参数, 可得到 $2-10\mu\text{A}$ 的离子束, 还可选择离子类别。如降低离子源氢气罐内的质子比, 可供出 H^+ 、 H_2^+ 、 H_3^+ 离子束。束流经进出口缝(C_1 、 C_2)为 1mm 的 90° 磁分析器偏转聚焦后进入实验装置的管道内。为得到更好的平行束, 从 90° 磁分析器出口缝到靶之间约七米内未加四极透镜聚焦。前静电偏转器可除去七米路径上离子束与管道残余气体碰撞生成的杂质离子, 如 H_2^+ 束产生的 H^+ 、 H^0 。

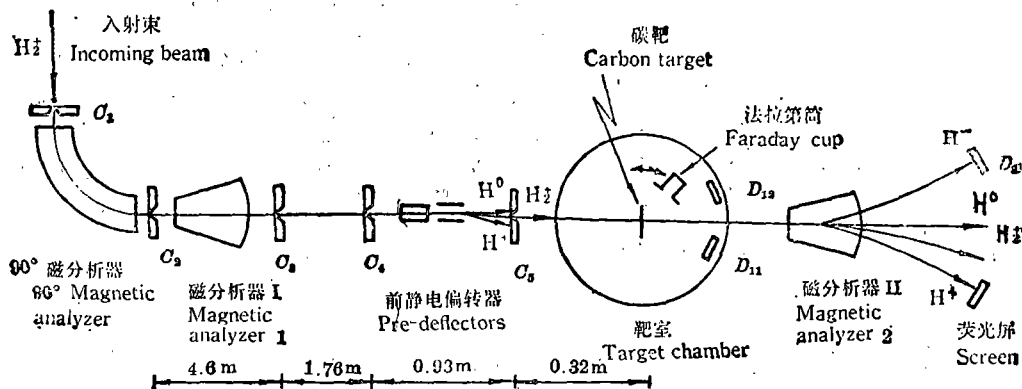


图1 负离子测量示意图
Fig. 1 Schematic diagram of measurement negative ion

加速器引出的分子离子束, 经碰撞装置的光阑 C_3 、 C_4 、 C_5 、前静电偏转器及磁分析器I的微小偏转, 使束流准直后成为强度 $10^{-10}-10^{-9}\text{A}$ 、束斑大小 0.25mm^2 左右的干净平行细束。准直的束流打在碳膜上, 从膜出射的是正负离子、中性粒子和透射离子(如 H^+ 、 H^- 、 H^0 和 H_2^+)。由磁分析器II的偏转, 使正负离子分开并偏到收集离子的金硅面垒探测器 D_3 正中(从靶点到 D_3 的路径是 2.33m)。金硅面垒探测器对 MeV 量级离子的探测效率为 100% 。探测器收集的信号经前置放大器、主放大器、单道、定标器及微机进行测量和记录。以Apple-II微机为主的“在线”数据获取系统^[6]可同时获取三个探头或法拉第筒来的信号。将已获取的结果及实验条件自动存贮、显示、读出、打印。获取的数据能立即进行“离线”处理。此外, 定标器、双线示波器(或多道)和束流积分仪还随时显示探测器 D_{11} 、 D_{12} 及 D_3 的记录情况。

为确定分子离子在膜中的停留时间 t_D , 在膜后靶室内壁边水平并对称于管道中轴线安放两个金硅面垒探测器 D_{11} 、 D_{12} , 它们与中轴线夹角是 15.45° 。在靶室盖的中轴线上安有水平旋转的法拉第筒 F_c , 经束流积分仪能监视和测量束流大小及稳定情况。利用卢瑟福散射的方法, 由探测器 D_{11} 、 D_{12} 和 F_c 的计数及入射离子的能量 E 可求得束流通过靶点的膜厚 t_e 和分子离子在膜内的停留时间 t_D ^[7]。

因负离子束较弱, 不易用荧光物质发光观察到。为测准负离子, 利用原始束流经磁铁偏转确定探测器 D_3 的高低位置。然后将经碳膜产生的正离子束落在与 D_3 所在管道相对称的另一管道正中(由荧光屏观察), 此时负离子则在 D_3 管道正中。微调偏转磁铁电流, 使负离子束横向移动, 由 D_3 的计数来确定负离子束的宽度和是否落在 D_3 正中。

在测量过程中, 系统须维持较高的真空。真空度低于 1.33mPa , 负离子因残余气体碰撞而损失, 靶后产生的正离子和中性粒子还会与残余气体发生电荷交换形成新的负离子。

四、实验结果和讨论

实验用几种能量的分子离子束 H_2^+ 、 D_2^+ , 对通过各种厚度($4-28\mu\text{g}/\text{cm}^2$)的自支撑碳膜

产生的负离子进行测量。 H_2^+ 和 D_2^+ 的能量分别是0.8、1.2、1.5、1.6、1.8 MeV和1.5、1.8 MeV。由微机对相应的计数进行获取并对结果作处理,得到负离子的产额 ϕ_H^M 、 ϕ_D^M 和相应的 t_D 。这里用崩裂碎块(原子离子)俘获两个电子形成负离子的几率 ϕ^M 来表示某一能量下一种分子离子通过碳膜产生负离子的产额。列出不同能量的产额 ϕ_H^M 、 ϕ_D^M 和相应的 t_D (见表),并作出产额

表 D_2^+ 、 H_2^+ 通过碳膜产生的负离子产额 ϕ^M

Table The yield ϕ^M of negative ions by D_2^+ , H_2^+ passing through carbon foils

D_2^+	1.5 MeV	t_D (fs)	4.33	5.15	5.83	6.95	7.91	8.52	9.11	15.80	15.98	16.27	17.56	19.80
		$\phi^M(10^{-7})$	1.56	1.44	1.49	1.46	1.90	1.79	2.16	3.96	4.32	3.79	4.33	3.49
	1.8 MeV	t_D (fs)	3.01	3.28	4.75	5.62	5.91	6.67	7.83	13.08	13.48	14.15	15.91	
		$\phi^M(10^{-8})$	5.26	4.56	5.97	5.50	5.88	7.35	8.55	17.48	17.76	19.09	16.50	
H_2^+	0.8 MeV	t_D (fs)	2.94	3.88	5.16	5.65	6.63	9.01	9.54	10.11	14.50	19.48		
		$\phi^M(10^{-8})$	7.25	8.01	9.21	9.79	11.66	16.5	17.13	17.88	17.38	16.38		
	1.2 MeV	t_D (fs)	3.60	3.94	4.39	5.47	6.17	6.38	7.13	8.16	13.66	14.00		
		$\phi^M(10^{-8})$	1.26	1.18	1.19	1.38	1.69	1.81	2.17	2.34	3.09	3.06		
	1.5 MeV	t_D (fs)	2.12	2.79	3.16	4.71	9.55	10.82	10.93					
		$\phi^M(10^{-9})$	4.28	4.45	5.45	7.38	17.40	14.73	17.08					
	1.6 MeV	t_D (fs)	1.9	2.3	3.0	4.0	9.3							
		$\phi^M(10^{-9})$	2.79	3.39	4.09	4.95	8.53							
	1.8 MeV	t_D (fs)	1.89	2.29	2.79	3.47	4.53	9.13	9.48	10.81				
		$\phi^M(10^{-9})$	1.75	1.63	2.13	2.29	2.97	6.41	6.71	6.02				

ϕ^M 随 t_D 变化的曲线(图2)。从图2的曲线可以看出:

1. 分子离子通过碳膜时,俘获两个电子产生负离子的产额很低,约为 10^{-7} — 10^{-9} 。如1.8 MeV的氘分子离子的产额 $\phi_D^M \leq 1.9 \times 10^{-7}$, 1.8 MeV的氢分子离子的产额 $\phi_H^M \leq 6.7 \times 10^{-9}$ 。

2. 分子离子通过碳膜的负离子产额 ϕ^M 随 t_D 增加而增大。对较长的 t_D , ϕ^M 逐渐趋于定值。

3. 负离子的产额 ϕ^M 与核子的速度有关:核子速度高(能量大),负离子产额低;反之,核子速度低,负离子产额高。

在固体中由于 $\sigma_c \ll \sigma_i$,正离子俘获一个电子形成中性离子或透射离子的几率在 10^{-8} 以下^[2],而同时俘获两个电子形成负离子的几率则更小。实验测得的曲线证实了俘获两个电子形成负离子的几率是很小的。图3是我们测量的原子离子通过碳膜生成的负离子 ϕ^A 与停留时间 t_D 的关系。其中三条虚线是法国里昂大学作的^[3]。从图3可以看出:原子离子生成负离子的几率也很低,这与分子离子类似。

用BS理论的方法^[2]计算俘获一个

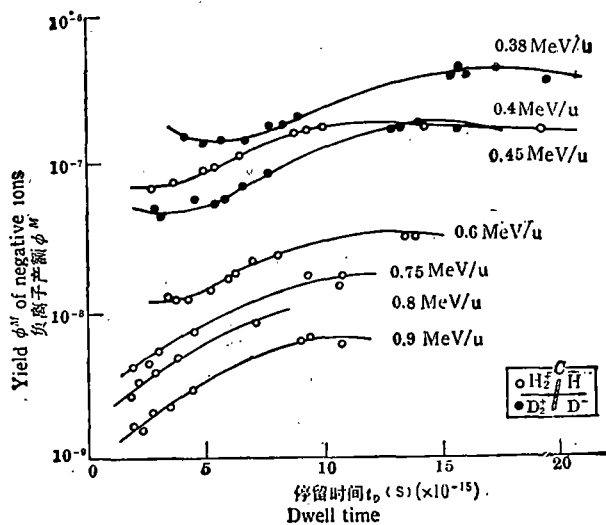


图2 分子离子的 ϕ^M 与 t_D 的关系

Fig. 2 Relationship of ϕ^M of molecular ion with t_D

电子生成中性原子和透射的几率在 10^{-3} 以下^[3]。我们用它计算了 H^+ 和 D^+ 俘获两个电子的几率, 结果比实验值大很多(100 倍左右)。这表明理论计算的仅仅是离子在膜后层俘获两个电

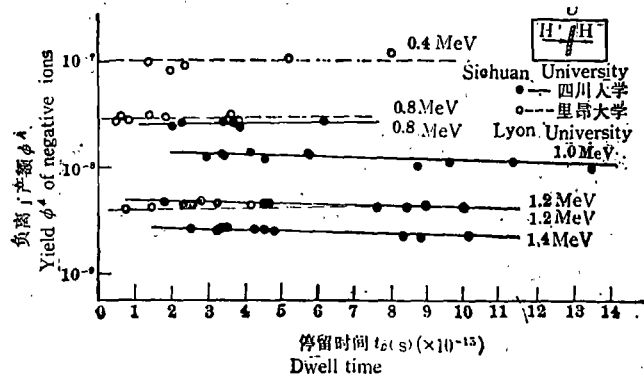


图3 原子离子的 ϕ^+ 与 t_D 的关系

Fig. 3 Relationship of ϕ^+ of atomic ion with t_D

贡献。原子离子在后表层的电子俘获截面只与入射离子的速度有关, 同膜的厚度无关。因停留时间 t_D 与膜厚成正比, 故在同一能量下原子离子的负离子产额 ϕ^+ 与 t_D 无关。在不同能量下 ϕ^+ 不同, 同种离子中能量(速度)高的, 负离子产额 ϕ^+ 低。这是由于能量增加使电子俘获截面减小更甚于使损失截面减小的缘故。当碳膜比较厚($\geq 20 \mu\text{g}/\text{cm}^2$)时, 离子在膜内受多次散射的影响, 少数负离子在探测器的张角外不能被收集。因而在同一能量下 ϕ^+ 有较小的下降。在图3中, 1.0、1.2和1.4 MeV的三条直线随 t_D 有很小的下倾。随着能量的增加, 直线更接近于水平。这是由于多次散射随入射离子能量的增大而减小。对于分子离子, 由于分子团内的核间距 R 和核子间的相对速度 $\dot{R}$ 都是 t_D 的函数, 因此膜厚不同到达膜后表层时 $R(t_D)$ 和 $\dot{R}(t_D)$ 均不同。在后表层内分子离子的电子俘获截面是分子轨道态的有效电荷 $Z_{g..}$ 的五次方与相同速度下原子离子俘获截面 $\sigma_c^A(v)$ 的乘积:

$$\sigma_c^{g..} = Z_{g..}^5(R) \sigma_c^A(v)$$

有效电荷 $Z_{g..}$ 与分子轨道态、核间距 R 和相对速度有关, 因而 ϕ^M 与 t_D 有关且随 t_D 的增加而增大。当 t_D 较长时, 由于分子团效应逐渐消失, 负离子产额 ϕ^M 趋于定值。实际上曲线的长停留时间一端也有下降趋势(0.8 MeV/u 的曲线因缺较厚的碳膜而看不出此趋势)。其原因与原子离子的相同。

图2中有四条曲线, 其低停留时间一端有从高降低后再开始上升的过程。这是因为在厚度 $1-3 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 的膜内, 爆炸碎片的正离子(如 H^+)和已俘获一个电子的中性原子(如 H^0) 在俘获电子生成负离子方面有很大差别: 正离子俘获双电子的几率是随着膜厚增加而先类似指数曲线地下降(一小段), 然后再缓慢上升; 对于中性原子虽然一开始随膜厚增加而上升, 但上升较慢。因而在膜薄的部分正离子产生负离子占优势, 故曲线在这里是从高往下降的趋势。随着膜厚增加, 正离子产生负离子下降的趋势大大减缓, 而中性原子产生的负离子增多, 使负离子总的趋势呈现上升。因实验中缺 $1-3 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 的超薄碳膜(60—180 原子层厚), 故曲线在这段还下降得不够明显。当入射能量增加时, 在上述较薄的碳膜($\geq 3 \mu\text{g}/\text{cm}^2$)俘获一个电子的几率增大, 而正离子俘获双电子下降的趋势减缓。故曲线在这段只有上升的趋势。如有 $1-3 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 的超薄碳膜应当有下降后再上升的趋势出现。从图2和图3还可以看出: 随着入射离子能量的增加, 分子(原子)离子通过碳膜产生的负离子产额 $\phi^M(\phi^A)$ 与停留时间 t_D 的关系曲线

的几率, 最终能脱离后表层且是负离子的要少得多。因而在膜后层形成的负离子出射, 不仅要考虑膜后层的电子俘获与损失, 还必须考虑集团内的电荷交换竞争才能正确解释实验所得的结果。

由于 $\sigma_c \ll \sigma_l$, 在固体膜内不可能产生有束缚电子的快原子及负离子。仅在快要离开固体而又俘获到电子, 但还来不及损失的情况下离开固体膜的双电子俘获, 才对负离子的产额有

(直线)往短停留时间移动。由于 $t_D \sim t_c \sqrt{M/E}$, 故能量不同的同种离子穿过厚度(t_c)相同的膜时, t_D 减小即曲线(直线)往短停留时间移动。

因俘获电子的截面与入射离子速度有关, 则无论原子或分子离子的产额都随入射离子能量而改变: 能量高(速度快)时俘获截面小, 负离子产额小; 反之能量低时, 负离子产额高。

图2中的曲线有一段无实验点, 这是因为缺15—18 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 厚的碳膜。

真空度 $\sim 0.67\text{mPa}$ 时, 测量过 $1 \times 10^{-10}\text{A}$ 的 $\text{H}_2^+(E=1\text{MeV})$ 束流通过 $6\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 的碳靶产生 H^- 的计数是2300个/100s, 无靶时 H^- 的本底计数是90个/100s, 则残余气体带来的误差小于4%。真空在1.33mPa时, 误差为10%左右。在本实验中, 真空度保持在0.13—0.67mPa(加上液氮冷却后可达0.065—0.117mPa), 故管道残余气体造成负离子的损失比较小, 可忽略。

参 考 文 献

- [1] D. S. Gemmell, *Nucl. Instr. Meth.*, 170 (1930), 41.
- [2] N. Cue *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, 45 (1980), 613.
- [3] M. J. Garllard *et al.*, *Phys. Rev.*, A16 (1977), 2323.
- [4] L. H. Toburen *et al.*, *Phys. Rev.*, 114 (1963), 171.
- [5] 缪竞威等, 四川大学学报(自然科学版), 1985, 1:60.
- [6] 郝士琢等, 原子与分子物理学报, 2(1985), 2:80.
- [7] 缪竞威等, 快分子离子在超薄膜中的停留时间测量, 第五次全国核物理会议资料, 1982年.
- [8] N. Cue *et al.*, *Phys. Rev.*, A22 (1980), 388.

Studies on the negative ions produced by fast molecular ions through carbon foils

Shi Miangong Yang Baifang

Jiang Zengxue Hao Shizhuo Lei Xiaolan

(Institute of Nuclear Science and Technology, Sichuan University)

Abstract

In this paper, the collision mechanism and the production of negative ions by fast molecular ions traversing solid foils are described. The experimental results of the production of negative ions by molecular ions H_2^+ , D_2^+ of various energy traversing thin carbon foils are presented. And the production of negative ions by molecular ions is compared with that by atomic ions. The results are discussed and analysed qualitatively.

Keywords: fast molecular ions collision mechanism negative ions

(1987年3月5日收到)