

门起动,到逐渐加大油门行驶,到最后关闭油门,停止运动,或者从其他任一实际的运动来说,都存在着变加速运动的问题。因此,要更准确、细致地描写机械运动就少不了要引入 j 这一物理量。当然,一般地说, j 也是变的,也就是说,原则上还可以引入比 j 更高阶的位移对时间的高阶导数。但是一个新物理量的引入主要是在于它有无实际意义,而并不在于描写它的数学符号的早已存在。 j 之所以被引入正说明了这一点,至于今后人们对 j 的兴趣的增减,当然也主要取决于它能解决多少实际问题。不过,作为基础理论工作者也应该关心这类问题的进展。

参 考 文 献

[1] S. H. Schot, *Am. J. Phys.*, 46(1978), 1090.

- [2] F. Freudenstein and G. N. Sandor, *Mechanical Design and Systems Handbook*, Ed. by H. A. Rothbart, McGraw-Hill, New York, (1964), Sec. 4, 13.
- [3] V. M. Faires, *Design of Machine Elements*, (1965, 4th ed.), Macmillan, New York, 528.
- [4] J. H. Bickford, *Mechanisms for Intermittent Motion*, (1972), Industrial, New York, 24.
- [5] F. G. Royal-Dawson, *Elements of Curve Design for Road, Railway, and Racing Track on Natural Transition Principles*, (1932), Spon, London.
- [6] A. Transon, *J. Math. Pures. Appl.*, 10(1845), 320.
- [7] P. Melchior, *Z. Ver. Dtsch. Ing.*, 72(1928), 1842.
- [8] V. M. Faires, *Kinematics*, McGraw-Hill, New York, (1959), 9.
- [9] J. P. DenHartog, *Mechanics*, Dover, New York, (1961), 161.

快速分子离子束技术的发展动态

毛 孝 田

(复 旦 大 学)

随着天体物理、等离子体物理和固体物理等学科的发展,对分子离子的研究日益引起人们的重视。近年来,由于现代加速器的技术成就,人们在研究中广泛采用了各种束流技术,其中包括新发展起来的快速分子离子束技术。这一技术是采用快速分子离子(离子速度一般可达 10^8 厘米/秒)轰击箔靶,由箔靶诱导分子离子离解,通过研究离解后所产生的碎片,来了解分子离子与物质相互作用的新现象。在不少情况下可得到以前不知道的分子离子结构的新知识。因为这一技术具有直观、计算简便、适用范围广等优点,且具有某种几何放大作用,所以国外开展这方面研究的加速器逐渐增多,也取得了一些重要成果。现就这方面的发展情况作一概略介绍。

物理

一、基本原理

到目前为止,快速分子离子束技术所研究的分子离子主要是 ${}^4\text{HeH}^+$, ${}^3\text{HeH}^+$, H_2^+ , H_3^+ , OH^+ , CO_2^+ , N_2O^+ 等。这些分子离子一般由双等离子体离子源产生。双等离子体离子源的特点是在电离区中存在着强烈的磁约束。如将氢气和氦气通入离子源的电离区,使之电离,由于磁约束存在,在电离区内可形成 ${}^4\text{HeH}^+$, H_2^+ , H_3^+ 等各种分子离子。由引出电极可得到包含多种分子离子的束流。该离子束首先经过能量为几个 MeV 的静电加速器加速,然后由磁分析器选择所需的分子离子束,再经过严格准直,打到厚度为 100 \AA 左右的固体薄靶上。以后的

作用过程大致如下：设想一个速度为 v 的分子离子，入靶以后，在开头几个 \AA 的距离内，其轨道速度小于 v 的价电子被靶剥离，分子离子中的化学键被破坏，结果形成一簇离子集团。接着，集团中的离子由于库仑排斥作用，互相分开，经历所谓“库仑爆炸”过程。离子集团在靶内的停留时间约为 10^{-15} 秒。离靶以后，离子集团在真空中飞行，继续经历“库仑爆炸”过程。最后离子集团离解，向前抛出各种碎片。这些碎片集中分布在以束流方向为轴，顶角为十分之几度的圆锥内。高分辨地研究这些碎片的能量分布和角分布，就可以得到分子离子的一些性质。

二、“尾流效应”和“尾流势”理论

1975 年美国阿贡实验室格默尔 (D. S. Gemmell) 小组用能量为 4MeV 的 ${}^4\text{HeH}^+$ 轰击厚度为 535\AA 的金箔靶 (111)，测量分裂碎片 He^{++} 的角分布，发现单用“库仑爆炸”过程不能完

地解释实验结果^[4,7]。经过分析，他们认为，在快速分子离子束和固体物质相互作用中存在一种新的效应，他们称之为“尾流效应”。“尾流”这个概念最初是玻尔在 1948 年提出来的^[5]。玻尔指出，类似于船在水中快速行驶时，在船后会产生“尾流”一样，当一带正电的粒子在固体物质中快速运动时，粒子好像在电子的海洋中行驶，其后面的电子密度增高，这些电子会按等离子体频率进行振荡。但只有在粒子后几个 \AA 的距离内，电子的密度最高，“尾流”才明显。当离子集团在靶内飞行时，离子间的距离仅几个 \AA ，后一个离子就要受到前一个离子的“尾流”作用，运动状态发生变化，这就是“尾流效应”。为了从实验上证实这一效应，他们进一步作了大量的实验，获得了大量的资料，得到了令人满意的结果^[4,9]。

下面我们介绍一下格默尔小组的一个典型实验。用能量为 2MeV 的 ${}^4\text{HeH}^+$ 分子离子束轰击厚度为 85\AA 的碳靶。实验装置见图 1，图中略去了加速器等前面几级设备。

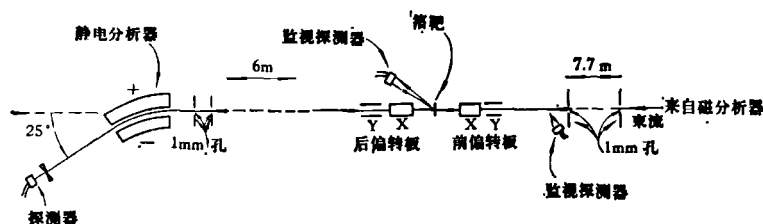


图 1 快速分子离子束技术实验装置示意图^[4]

实验时，将双等离子体离子源产生的含有 ${}^4\text{HeH}^+$ 等多种离子的束流，通入一台 4MeV 高频并激高压加速器，加速后由磁分析器选择，得到能量为 2MeV 的 ${}^4\text{HeH}^+$ 快速分子离子束。该束流经间距为 7.7m ，孔径仅为 1mm 的两孔严格准直，调节“前偏转板”上的电压，使束流入射到靶上。束流在靶位的最大角散度不超过 $\pm 0.005^\circ$ 。调节“后偏转板”上的电压，就可选择所要研究的分裂碎片进入静电分析器。分析器的接受角为 $\pm 0.006^\circ$ ，相对能量分辨率为 6×10^{-4} 。分裂碎片的角分布可由“前、后偏转板”上的电压参数算得，能量分布由静电分析器的电压参数获得，碎片的计数根据束流大小由

各种计数器来测量。整个装置由一台专用计算机 PDP-11/45 作在线操作。数据主要由一台计算机 IBM-370 处理。

实验测定了分裂碎片 H^+ 的能量分布和角分布，由计算机给出 H^+ 的能量和角度的二维分布谱图。图 2 (a) 简单给出 H^+ 的 0° 角的能谱，亦即出射角为 0° 时 H^+ 的能量分布；图 2 (b) 给出了 H^+ 的能量零偏离的角分布谱 ($E = 400\text{keV}$)^[5]。为了分析这个结果，格默尔小组同时以“库仑爆炸”过程为基础，用电子计算机作模拟计算，得到了和图 2 不同的谱图。最明显的差异是，从计算得到的 H^+ 0° 角能谱，低能峰和高能峰是对称的，而实验测得的 H^+

0°角能谱,低能峰的峰值大大高于高能峰的峰值,有着明显的不对称性。

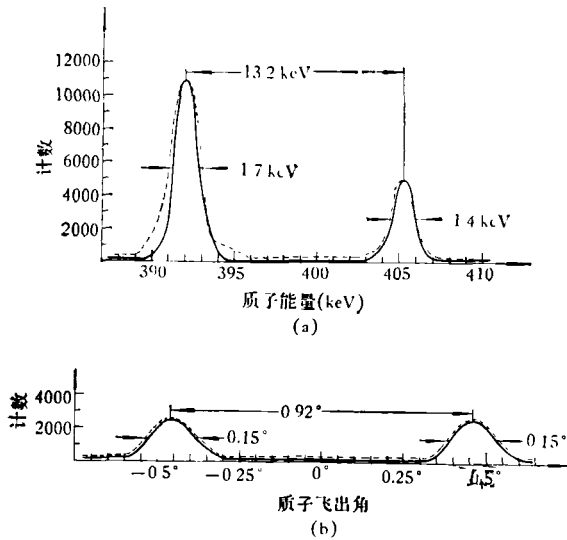


图2 (a) 0°角的能谱; (b) 能量零偏差的角分布谱
——为实验测得的 H⁺ 的谱图;
----为“尾流势”计算的 H⁺ 的谱图

如何解释这一差别呢?用“库仑爆炸”过程容易得到能谱对称性的结果。由于静电分析器的接受角很小,要在0°角上探测到H⁺,入射分子离子⁴HeH⁺必须符合一定的要求,即⁴HeH⁺中的He⁺⁺和H⁺的连线必须处在束流方向上。否则,由于H⁺受到He⁺⁺的离开束流方向的斥力而发生偏离,不可能在0°角被探测到(见图3)。

谱图中的低能峰相当于H⁺离子在He⁺⁺后面的情况,H⁺受到He⁺⁺的向后的斥力而减速。高能峰相当于H⁺在He⁺⁺的前面的情况,这时H⁺由于受到He⁺⁺的向前斥力而被加速。因为H⁺处在He⁺⁺的前面或后面的几率是相同的,并且不论H⁺处在He⁺⁺的前面还是后面,H⁺所受的斥力的大小也相等,所以造成了高能峰和低能峰相对称的情况。至于实验测得的能峰的不对称性,格默尔小组认为这只能用“尾流效应”来解释^[2]。在箔靶内,当H⁺处在He⁺⁺的后面时,H⁺由于受到He⁺⁺的“尾流”作用,被拉向入射方向,这样就增加了H⁺的计数。而当H⁺处在He⁺⁺的前面时,就不发生上述情景。这样就造成了0°角能谱中能峰的不对称性。

物理

对称性。格默尔小组还测量了各种分子离子束的各种碎片的0°角的能谱,都发现有类似的不

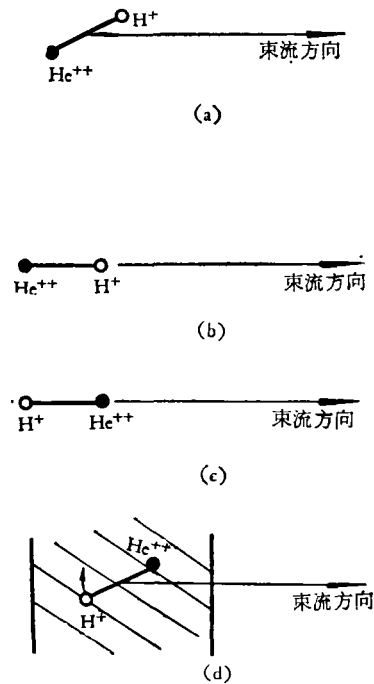


图3 H⁺碎片0°角能谱原理示意图

- (a) H⁺在0°角上不能被探测到; (b) 高能峰情况;
(c) 低能峰情况; (d) 在靶内“尾流”使低能峰增高

对称情况,进一步证实了“尾流效应”的存在^[5]。近年来,有人也得到了同样的结果^[6]。

在实验的基础上,瓦格尔(Z. Vager)和格默尔等人提出了“尾流势”理论^[7]。实验已经证实,这个理论是相当成功的^[5,7]。这个理论认为,正电荷在固体物质中产生的“尾流”,可以完全等价于在正电荷后面有一个负的线电荷,“尾流”的作用等价于这个负线电荷的电势。这个电势就是所谓的“尾流势”。图4就是“尾流势”的示意图。

瓦格尔和格默尔等人应用“尾流势”理论,对2MeV的⁴HeH⁺轰击85Å碳靶的实验作了模拟计算,由计算机画出相应的谱图,如图2中虚线所示。

比较图2中虚线和实线,可以看出“尾流势”理论与实验符合得相当好。此后格默尔小组继续努力,从理论和实验两个方面,研究了⁴HeH⁺, ³HeH⁺, H₂⁺, H₃⁺等分子离子所产生的H⁰, H⁺, He⁺, He⁺⁺等多种碎片的能量分布

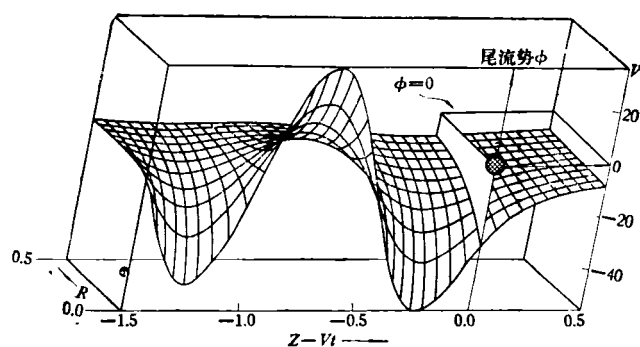


图4 带电粒子在固体中产生的“尾流势”示意图^[1]

和角分布,同时,他们还通过改变靶厚和束流的能量等有关参量,来探讨“尾流势”理论的极限,发现在很大范围内“尾流势”理论都能基本上符合实验结果^[5]。

三、探索“骑尾流”效应

1976年,美国纽约大学的布朗特和英国剑桥大学的里奇等人提出,快速带电粒子在固体物质中运动时,其后面产生的“尾流势”在一定条件下可束缚另一个带电粒子,形成所谓“骑尾流”效应^[8,9]。他们用这种效应解释了快速分子离子束实验中出现的极少量的分子离子或原子穿透箔靶的现象^[10]。目前正在进行大量的实验来探索“骑尾流”效应。如格默尔小组研究了 H_2^+ , H_3^+ , HeH^+ 等分子离子离解后生成的离子集团,都发现离子集团中的质子可以束缚固体中原子的一个电子,形成一种确定的状态^[11-14]。这似乎证实了“骑尾流”效应的存在。但在重离子轰击固体靶的实验中,有人研究随同重离子一起冲出靶的电子的性质时,得到了不同于“骑尾流”效应所预言的结果^[15]。这些现象引起了许多物理学家的注意,促使他们用种种不同的方法来研究“骑尾流”效应。总之,利用快速分子离子束技术研究分子离子和固体物质相互作用性质的工作刚刚开始,还有许多问题值得进一步研究。

四、测定分子离子的结构

测定分子离子的结构,在等离子体物理和

天体物理的研究中是很重要的。例如,用射电望远镜已经观察到宇宙空间存在着许多分子离子的谱线,而只有弄清楚了分子离子的结构,才能确定这些谱线来自何种分子离子。测定分子结构的传统方法是波谱分析法^[16]。即以紫外、可见、红外和微波辐射等照射气态分子为对象,分析气态分子的各种吸收或发射波谱,从而获得关于分子结构的一些参量。用这种方法已经测定了成千上万种分子结构,并且测得的键长精度很高,可达 0.001 \AA 。但是这种方法一般适用于中性分子,而不太适用于分子离子。这是因为,一则难于制得足够密度的分子离子气体,而密度不够,就往往观察不到所需的谱线。二则分子离子的状态和它的制备方法有关,用不同离子源和不同的方式制得的分子离子可以处于不同的状态,从而增加了谱线的复杂程度。尽管有人采用这一方法,作了种种努力,但只测得八种分子离子的结构(双原子分子离子除外)^[17]。而利用分子离子束技术来测定分子离子结构,可以弥补这方面的不足。

例如对于 H_3^+ 的结构^[5,18],过去多数人认为它具有等边三角形的稳定态结构^[19],也有人认为它具有共线结构的稳定态。由于波谱分析法的困难,这两种假设一直未能从实验上加以验证。直到1976年,人们采用了快速分子离子束技术,用三种不同的方法,分别证实了 H_3^+ 的稳定态是等边三角形的结构^[18]。

第一种方法是采用核乳胶来记录 H_3^+ 分裂后的三个质子,所拍的照片显示出 H_3^+ 具有等边三角形的结构,最可几键长为 $1.2 \pm 0.2 \text{ \AA}$ ^[18]。

第二种方法是采用一个可移动的硅半导体探测器来测定 H_3^+ 离解后产生的质子对的角分布, 结果表明 H_3^+ 不可能具有共线结构^[18], 算得的最可几键长为 $0.95 \pm 0.06 \text{ \AA}$. 最后就是格默尔小组在阿贡实验室所采用的方法^[18,21]. 实验装置如图 1 所示. 他们用 2.1 MeV 的 H_3^+ 离子束轰击 $2.3 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 的碳箔, 测量了由 H_3^+ 离解产生的 H^+ 的能量零偏离 ($E = 700 \text{ keV}$) 的角分布和 0° 角的能谱. 测量结果见图 5.

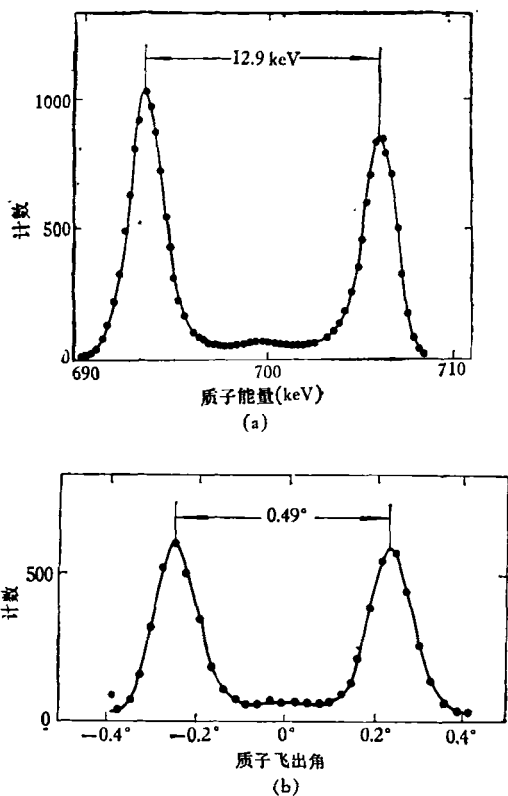


图 5 2.1 MeV H_3^+ 轰击 $2.3 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 碳靶产生的 H^+ 图谱
(a) 0° 角的能谱; (b) 能量零偏离的角分布谱

每张谱图上只有两个峰, 由此可以断定, H_3^+ 只能是等边三角形的结构^[20], 算得的最可几键长为 $0.97 \pm 0.03 \text{ \AA}$. 目前格默尔小组在继续改善仪器的分辨率, 并采用符合测量技术等方法来提高精度. 他们在研究了 CO_2^+ , N_2O^+ 的结构之后^[20], 开始研究未知的 CH_3^+ , $C_2H_3^+$, OH_2^+ ($n = 1-4$) 的分子离子的结构^[27].

用快速分子离子束技术来测定分子离子的结构, 可以不考虑分子离子互相排斥所带来的

影响, 但对仪器设备要求较高, 精度也远低于波谱分析法. 由于两种方法各有所长, 目前格默尔小组与善长波谱分析法的伍德 (C. Woods) 小组相互配合, 研究怎样更好地测定分子离子的结构.

总之, 在分子离子的研究中, 由于采用了快速分子离子束技术, 人们加深了对分子离子同固体物质相互作用的认识, 找到了测定分子离子结构的新方法. 这必将对天体物理、等离子体物理和固体物理等学科产生一定的影响. 目前快速分子离子束技术正在迅速发展着, 由于采用了计算机技术和精度更高的探测仪器, 有希望在分子离子的研究中得到新的成果.

参 考 文 献

- [1] D. S. Gemmell et al., *Phys. Rev. Lett.*, **34**(1975), 1420.
- [2] D. S. Gemmell et al., *Nucl. Instrum. Methods*, **132**(1976), 61.
- [3] N. Bohr, Kgl. Danske Videnskab Selskab, *Mat.-Fys. Medd.*, **18-8**(1948), 93.
- [4] Z. Vager, D. S. Gemmell and B. J. Zabransky, *Phys. Rev. A*, **14**(1976), 638.
- [5] D. S. Gemmell et al., Proc. of the 7th International Conference on Atomic Collisions in Solids, Moscow Univ, Sept, (1977), 19-23.
- [6] A. Breskin et al., *Phys. Rev. Lett.*, **42**(1979), 369.
- [7] Z. Vager and D. S. Gemmell, *Phys. Rev. Lett.*, **37**(1976), 1352.
- [8] Werner, Brandt, R. H. Ritchie, *Nucl. Instrum. Methods.*, **132**(1976), 43.
- [9] W. Brandt, R. Laubert and A. J. Ratkowski, *Nucl. Instrum. Methods*, **132**(1976), 57.
- [10] J.-C. Poizat, J. Remillieux, *Phys. Lett.*, **34A**(1971), 53.
- [11] M. J. Gaillard et al., *Phys. Rev. A*, **16**(1977), 2323.
- [12] M. J. Gaillard et al., *Phys. Rev. Lett.*, **41**(1978), 159.
- [13] M. J. Gaillard et al., *Phys. Rev. Lett.*, **42**(1979), 959.
- [14] R. Laubert et al., *Phys. Rev. Lett.*, **40**(1978), 174.
- [15] R. Laubert et al., *Phys. Rev. Lett.*, **41**(1978), 712.
- [16] 徐光宪, 物质结构, 人民教育出版社, (1959), 448.
- [17] GBL, *Phys. today.*, **32-5**(1979), 17.
- [18] M. J. Gaillard et al., *Phys. Rev. A*, **17**(1978), 1797.
- [19] L. Salmon and R. D. Poshusta, *J. Chem. Phys.*, **59**(1973), 3497.
- [20] D. S. Gemmell, E. P. Kanter and W. J. Pietsch, *Chem. Phys. Lett.*, **55**(1978), 331.