

- New York.
- [19] *Highlights of Modern Astrophysics: Concepts and Controversies*, edited by S. L. Shapiro and S. A. Teukolsky, John Wiley and Sons, Inc., (1986).
- [20] B. E. J. Pagel, and M. G. Edmunds, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, 19(1981), 77.
- [21] V. Trimble, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, 25(1987), 425.
- [22] David J. Stevenson, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, 29 (1991), 163.
- [23] E. Anders and N. Grevesse, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 53(1989), 197.
- [24] J. N. Bahcall and R. K. Ulrich, *Rev. Mod. Phys.*, 60 (1988), 297.

稀有气体簇的光学性质

张 志 三

(中国科学院物理研究所, 北京 100080)

主要叙述稀有气体簇 (rare-gas clusters) 的光学性质, 其中包括它们的光谱线的分析, 光致电离的论述, 以及某些稀有气体簇两相共存的光谱证据。

Abstract

In this paper recent progress in the study of the optical properties of rare-gas clusters is described. The main topics include the spectroscopy and photoionization processes of rare-gas clusters, and the co-existence of their liquid and solid phases.

我们可以举出许多理由来说明为什么要研究含有 n 个原子的簇。其中之一自然是想了解簇的性质是如何随 n 来变的, n 可以看作表征簇的性质的一个参量。 n 的变化范围很广, 从 2 可以变到无限大。另一理由是想在原子和固体之间的间隙架起一座桥梁, 通过簇的研究来理解固体是如何形成的。但有人认为对于这个论点还应加一点注解: 当 n 变到无限大时, 并不必然显示出块状固体的性质, 很可能在过渡中会通过一个十分令人感兴趣的新领域, 即所谓介观凝聚物质物理。

簇的研究也提供了一个新途径来制备新材料。这类新材料可能具有特殊的物理与化学性质。簇具有不同的稳定结构, 例如有 55 个原子构成的 20 面体, 也有 60 个原子构成的类似足球的形状。不同的稳定结构凝聚成的固态, 其性能不同于我们现在已知的任何物态。于是, 材料学者希望能设计出一些新型材料, 使之能具有所希望的微电子学性质、机械性质、化学性

质等。

簇的种类很多, 任何元素及任何分子都可以形成簇。当前, 在原子簇的研究中, 研究得较多的为稀有气体簇。这类簇中的原子之间的相互作用势为成对的相加性, 而且是球对称的, 这就使得对它们进行模拟变得容易些了。例如, 对 19 个氩原子所形成的簇的模拟表明: 在一定的温度范围内, 固体簇与液体簇是共存的, 也就是说它具有不同的熔点与凝固点。光谱技术可以清楚地探测出这种两相共存的现象。

在实验技术方面, 由于超声束技术的发展及探测手段的改善, 产生出来的稀有气体簇可以包含 10^6 个原子。

簇的电子结构是决定其物理性质及化学性质的重要因素。光谱技术历来是研究物质的光学性质的方法之一, 其所提供的资料为了解电子结构是必须的。事实上, 簇物理已成为理论化学、固体物理及光谱学的综合研究领域了。

在纯范德瓦耳斯簇中, 例如稀有气体簇, 由

于没有电偶极矩,不能得到这类簇的吸收光谱. 为了补救这种不足,可以在这类簇中掺以红外活泼的分子,例如在氩簇中掺以 SF_6 . SF_6 分子受到相邻稀有气体原子的作用,它的光谱比起气相的相应光谱发生了很大变化,其中包括谱线的位移,谱线强度与形状的改变. 分析这种改变了的光谱特征,可以导出有关簇的动力学知识,诸如簇的碎裂,脱附过程等^[1,2].

另一种补救方法是利用荧光激发光谱技术. 这种技术在寻常激光光谱学中称为激光引发荧光(LIF)技术,是十分灵敏的光谱技术之一,广泛地应用于物理、化学、生物学及医学中. 近几年来,用之来研究稀有气体簇取得了许多前所未知的有关结构知识. 本文内容叙述了稀有气体簇的荧光激发谱,并对光致电离谱及两相共存的光谱证据作了介绍.

一、稀有气体簇的制备

超声束的技术为簇物理的研究提供了必要条件. 稀有气体通体超声喷嘴进行绝热膨胀,并通过成束板(skimmer)喷入真空. 在喷嘴处的气体的喷流中,气体原子互相撞击而集结成各种大小不同的簇. 喷向真空的簇束便包含着各种大小不同的簇. 簇的大小的分布范围取决于实验条件. 图1为实验设备的示意图^[3]. 稀有气体室的气压为停滞气压 P_0 ,一般为几个bar;室中的温度为停滞温度 T_0 ,一般低于室温;喷嘴可以制成锥形,喷口的直径由几十个

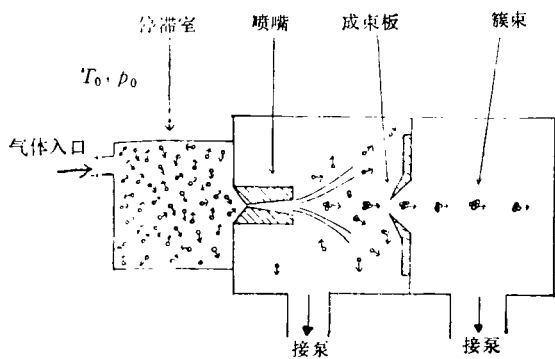


图1 制备中性簇束的装置示意图

μm 米到几百个 μm , 以 d 表示.

簇束中的簇的平均大小 \bar{N} (即每个簇的平均原子数目),同这些实验参量之间的关系已有了许多研究. 当前,描写中性簇束的物理性质(也就是簇的大小的分布)只能利用标度无关性法则(scaling rule)来处理. Hagena 对此作了尝试^[4]. 他导出了一个以实验参量为函数的无量纲量 Γ^* . 这个量可以由下式计算出来:

$$\Gamma^* = \frac{k d^{0.85} (\mu\text{m}) \cdot p_0 (\text{mbar})}{T_0^{3.29} (\text{K})}$$

其中 d 为喷嘴直径,以 μm 量度之; p_0 为停滞气压,以 mbar 量度之; T_0 为停滞温度,以绝对温度表示; k 依赖于每个原子在 0K 的升华热函 Δh_0 及范德瓦耳斯键长 $r_{ch} = (m/\rho)^{1/3}$; m 为原子质量; ρ 为有关固体的密度. 就 Ar 而言, $k = 1646$.

为了使 Γ^* 具有实用意义,还应该把 Γ^* 同簇束中的簇的平均大小 \bar{N} 联系起来. 因为光谱学研究不同于质谱学研究,在光谱学研究中,所应用的量为 \bar{N} . 虽然在实验中直接测量 \bar{N} 是十分困难的,但利用散射实验结果^[5]与电子衍射资料^[6],可以得出 Γ^* 与 \bar{N} 的经验关系,其中之一为 $\bar{N} = 1.29 \cdot 10^{-4} \cdot \Gamma^{*1.977}$ (参阅图2).

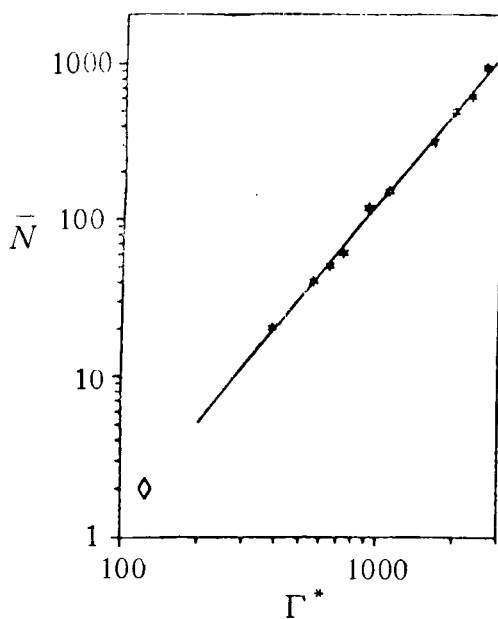


图2 氩簇的平均大小 \bar{N} 同 Γ^* 的经验关系

但这种关系不能看作是严格的。由于不同作者的处理方式不同,可以得出不同的关系式。但如处理得当,标度无关性法则仍是有用的一种间接测量 \bar{N} 的方法^[7,8]。关于选择单一质量的中性簇(即每个簇中的原子数目都相同)的技术,只是最近才出现^[9]。这种技术可能进一步推进中性簇性质的研究。

二、稀有气体簇的荧光激发光谱

近些年来,利用电子衍射技术研究稀有气体簇的结果表明,它们具有壳层结构^[10],而且它们所包含的原子(或分子)的大多数都位于表面上,例如在含有55个原子的氙簇中,至少有42个原子驻留在表面上。簇中的基态原子是由范德瓦耳斯力同其相邻原子连接在一起的。因为,这些原子为具有闭合壳层的稀有气体原子,所以簇的第一个激发态位于光谱的真空紫外(VUV)区域(50—150 μm)。因此,需要应用同步加速器或自由电子激光器的辐射作为激发光源。

对小的稀有气体簇(簇中的原子数从几到几百个)的光学性质的研究,虽然历史不长,但已积累了相当丰富的资料。由于稀有气体簇的暗弛豫通道效应可以略而不计,于是荧光激发光谱的轮廓大致符合其吸收光谱的轮廓。荧光激发谱便成为一种主要手段来研究稀有气体簇的电子激发态了。

稀有气体簇的光谱同稀有气体固体的光谱有相似之处。但稀有气体簇的光谱有其独特之处,还不能根据固体物理与分子物理的概念来描述稀有气体簇的特征。毕竟目前所研究的簇为居间物质,这种小系统同含有万亿个原子的大系统的性质差别很大。

稀有气体原子、二聚体与固体的吸收光谱主要为一些分立的谱线,它们组成不同的线系并逐渐向电离限收敛。原子与分子的能级分类为里德伯态,而固体的束缚态则形成所谓的激子带。不论里德伯态还是激子能态,都由主量子数 n 来描写。就里德伯态而言,Ar的主量子数

n 开始于4,Kr开始于5,Xe开始于6。就激子来说,主量子数从 $n=1$ 开始。原子激发与固体激发之间有一重要区别:原子激发总是有固定位置的,而固体中的自由激子具有波的性质,易于运动。

稀有气体簇的吸收谱(即荧光激发谱)与二者都不相同。首先簇的吸收谱随簇的大小而变,包括其光带位置与形状等,这是簇的光谱特有的现象,在稀有气体固体与分子中都未能观察到类似的现象。至于能级的分裂的演变(横向-纵向分裂,晶体场分裂等),是十分复杂的问题,眼下还不充分了解这些分裂的细节。当簇变得较大时,例如簇中包括几百个原子或更多时,簇的吸收带有的地方相似于固体的激子吸收带。图3表示氙簇的荧光激发光谱,是以簇的平均大小 \bar{N} 为函数的^[11]。光谱随 \bar{N} 的变化是显著的。在图3(a)中可以看到头两条细锐的氙原子共振线,它们的能量位置分别位于10.0324eV与10.6436eV。原子的电离阈为13.9996eV^[12]。当簇的 \bar{N} 为3000时,光谱出现了复杂结构。在图3(d)上部的一排短竖线表示固体氙中的各种吸收峰的能量位置: s 表示表面激子, l 表示纵激子, t 横激子(后面两种激子属于体积激子), E_g 为固体氙的带隙能^[13]。由于自旋-轨道相互作用,横激子有所分裂,出现了两个分量,并以 n 与 n' 表示^[14]。从图3(d)中可以看出,大簇的光谱同固体的光谱有对应之处。基于此,在讨论大簇的光谱时,往往假设它们同固体的激子吸收带是类似的。目前,对于簇的光谱理论尚未建立起来之际,这种假设似属于权宜之计。一则因为簇的几何结构同固体差别很大,前者内部比较空虚,大多数原子都位于表面层中,而固体具有充实的内部结构,其表面原子只占总原子数目的一个小分数。再则簇究竟应大到什么程度才能产生激子,到目前尚无一个明确的判据。此外,如假设簇的荧光激发谱(即吸收光谱)类似于固体的吸收谱,可以从氙簇的表面荧光强度同总的荧光强度之比

1) 其他类别的激子也都有分裂,但其理由至今不明。

三、稀有气体簇的光致电离

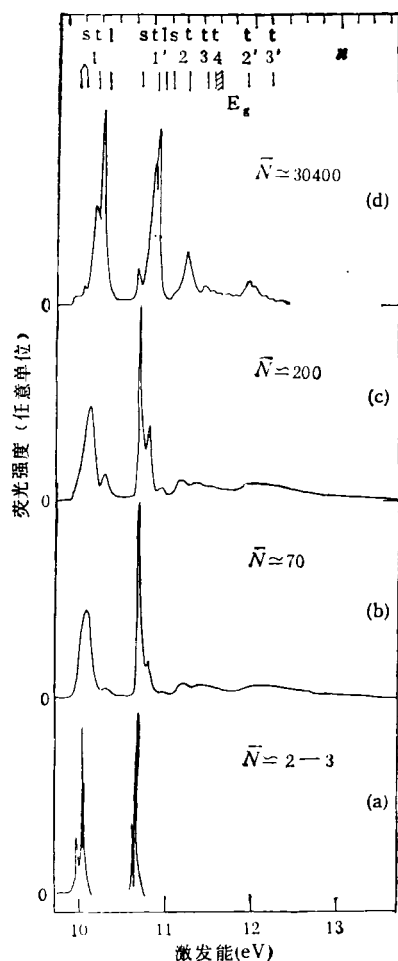


图3 Kr 簇的荧光激发谱

中, 估算出簇的表面原子数目同其内部原子数目之比^[14]。其结果同已经确立了的簇的几何结构并不一致。在氙簇的情况中, 当 $\bar{N} > 50$ 时, 根据现在对光谱线的指认, 表面激子的荧光强度变得很弱, 而体积激发直到 \bar{N} 为几百个原子时, 其荧光强度仍远大于表面激发的强度。这种实验现象, 从氙簇的壳层结构来说, 难以作出合乎逻辑的解释。从某些簇(包括氙簇在内)的熔点与凝固点为不同的温度这一反常情况来论, 在确定簇的能态方面, 簇的表面原子比起固体表面原子在确定固体的能态方面, 显得更为重要。由此看来, 从理论与实验上深一步地研究簇的光谱并对现有资料进行更为仔细的分析是需要的。

物理

中性簇在电离过程中会发生很大的变化: 簇离子的几何结构不同于中性簇, 其吸收光谱从真空紫外移到了可见光区域, 键的强度也有所增强; 离子簇已完全不同于其母体中性簇了, 因此, 簇的电离物理的研究很引人注目。研究的目的在于了解产生簇离子的机理。就稀有气体簇来说, 簇离子形成的模型一般认为: 中性簇在同电子或光子碰撞中, 抛出一个电子来, 由此在簇中出现的正电荷, 终于固定在簇的某一部分而形成分子离子, 作为簇离子的核心。由于离子簇的结合能大于 1.2eV , 远超过了中性簇的结合能, 因而引起簇的碎裂。此外, 离子化的簇由于蒸发作用失去了一些原子, 于是冷却下来了。这些过程便使得在质谱测量中, 某些离子簇显示出较大的丰度, 它们也就是最稳定的离子簇。许多实验与理论研究了稀有气体簇的碎裂的动力学, 并给出了这些概念的证据。其中决定性的实验为 Buck 等人的交叉束实验^[15]。在能量为 100eV 的电子的碰撞之后, 他们直接测量到簇的碎裂, 并且定量地证明了 95% 以上的 $\text{Ar}(n \leq 6)$ 碎裂成单体离子或者二聚体离子。但是关于簇内部的核心离子分子的本质, 仍然是一个有争议的问题。有的属于二聚体离子, 也有人认为正电荷的携带者为三聚体甚至是高聚体。

为了解中性簇电离的物理过程, 很需要中性簇的电离能阈的可靠资料。在这方面, 利用能量较大的电子显然不合适。近来, 采用了所谓阈光-电子光-离子符合 (threshold photoelectron photo-ion coincidence, TPEPICO) 技术测量了中性簇的电离能阈^[16,17]。这种技术的特点是在实验中能很好地控制注入中性簇中的光子能量。借助于调频技术可以使光子能量刚刚高于簇的电离能阈值。在光致电离过程中, 中性簇所抛出来的电子, 其能量基本上为零。在探测簇离子的同时, 便只是探测这种能量为零的电子, 其他能量较高的电子都被排除掉了。这

同簇离子的探测是相符合的。于是存储在电离了的簇中的能量便等于使簇电离的光子能量与簇的电离势之差。这个能量不足以引起电离了的簇发生碎裂。

实验装置主要包括真空系统以便有效地产生簇束；光学系统用于聚焦与控制真空紫外辐射；探测系统来探测离子与电子。

簇束产生的方法是使稀有气体通过 $100\mu\text{m}$ 的喷嘴向真空中膨胀，以一具有直径通口为 0.5mm 的成束板隔开喷流室与电离室。停滞气压在 $0.5\text{--}4\text{bar}$ 之间，停滞温度为室温或较低温度。这样的条件下所产生的簇的平均大小 \bar{N} ，从几个原子到几千个原子(见上节)。

真空紫外辐射 ($50\text{--}200\text{nm}$, $\Delta\lambda\sim 0.05\text{nm}$) 经单色化后聚焦在簇束上，并以一荧光体使真空紫外辐射转变成可见光以便控制真空紫外辐射的光子通量。

在探测簇离子与电子时，应保证所探测到的离子为发射能量为零的电子的对应物。离子与电子是分开来探测的。反复扫描有关波长范围，并经过适当的处理，最后可抽取出各种大小不同的簇的 TPEPICO 谱，从中可以确定出簇的电离阈，也就是簇的电离势。

图 4 给出 Ar_n 与 Kr_n 这样测得的电离

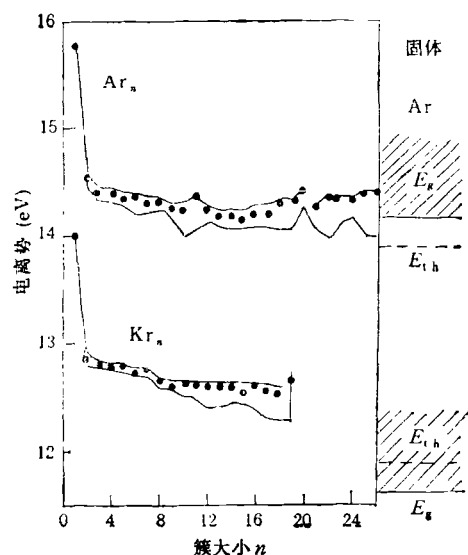


图 4 Ar_n 与 Kr_n 的电离势，并给出了原子的电离势与固体的带隙 E_g 以作比较 (E_g 为导带的下限；固体氩的 E_g 大于 $E_{i,h}$ ，而固体氪的 E_g 小于 $E_{i,h}$)

势^[6]。图 4 中细线之间的范围表示测量误差，而且不同作者给出的结果也有较大差别。从图 4 中可以看出，较大的簇的测量误差较大，并且它们的电离势同温度有关，也同结构中的异构体的数目有关。因此，簇的电离势不是一个意义明确的物理量。从图 4 中还可看出：不论氩簇还是氪簇中，作为簇大小的函数的电离势同相应的固体的 $E_{i,h}$ 相距甚远。在理论计算中，不论假设簇离子的核心为二聚体离子还是三聚体离子，所得结果只能部分地同实验值相符合^[18]，这可能意味着不同大小的簇的电离过程可能由不同的模型来描写。

理论和实验都证明：簇的碎裂对于电离过程的影响颇大。同时也证明稀有气体簇(以及金属簇与共价簇)在电离之后，由于簇离子中存有过剩的能量，会自发地碎裂的。碎裂的结果便构成了簇的质谱图。但如果注入中性簇的能量刚刚高于电离阈时，这种碎裂不应发生，因为中性簇具有一定的结合能。但稀有气体中性簇的结合能是很小的，能够保证不发生碎裂的光子能量范围也是很窄的，因而在实验中没有哪一个谱能先验地认为它不受碎裂的影响。因此，为了了解碎裂影响的相对重要性，需要系统地研究不同实验条件下簇的碎裂问题。为此，就需要知道中性簇与离子簇的结合能。图 5 表示出氩簇的一组数据^[16](原子的电离势为 15.76eV)。从图 5 可以看出：当注入簇中的光子能量为 14.76eV 时，光子足以使 Ar_{12} 电离，并且电离后的簇中残存的能量可以导致 Ar_7^+ 的出现。如果稍稍增加注入簇束中的光子能量，例如增加到 14.8eV (83nm)，则 Ar_7^+ 的信号明显增加，这足以证明较大的中性簇碎裂了，碎裂出 Ar_7^+ 来。这种过程最终大大地胜过了直接电离过程。在大的簇中，继碎裂之后，形成了一些较小的簇离子。在系统地研究氩簇与氪簇的 TPEPICO 谱中，所得结果是意想不到的复杂。分析其数据，解释其数据都仍在探索中。看来还需要有更多的实验资料。因此，这里只能作简短的叙述。图 6 给出八个氩簇的 TPEPICO 谱，每一个谱是在几个不同的平均簇的大小 \bar{N}

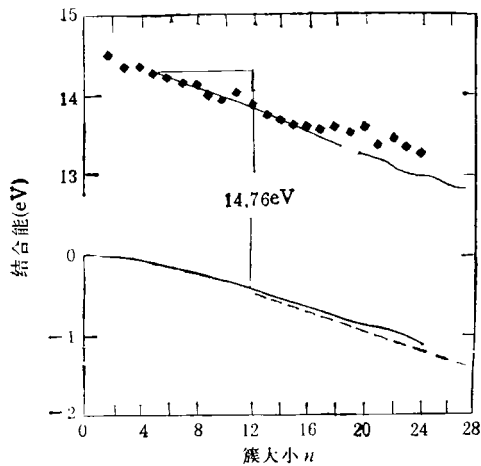


图5 氩中性簇与氩离子簇的结合能[下曲线为中性簇的理论值;上曲线为离子簇的结合能,实线为理论值,取三聚体为核心的理论模型,小实心菱形代表实验值;箭号标记的14.76eV为注入中性簇Ar₁₂的光子能(84nm),这足以引起Ar₁₂的电离,并可分裂出离子簇Ar₇⁺]^[16]

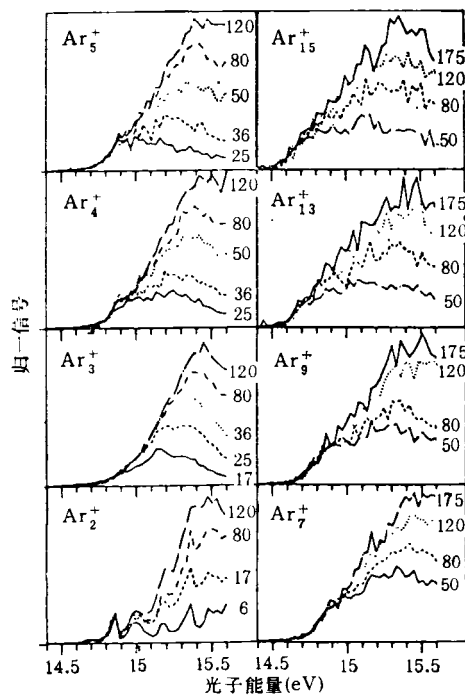


图6 不同氩簇离子的TPEPICO谱

之下作了测量。 \bar{N} 值标记在每一曲线的右边。光子能量在簇的阈与原子阈之间。图6显示出来的总趋势是当光子能量增加时,信号是增加的, \bar{N} 不同时,各曲线的形状也各异,同时信号的增加也呈显出某种限度。但目前尚无足够的根据来详细论述这些特点。粗略地说,Ar₇⁺在

物理

小的 \bar{N} 情况下,显示出一系列自电离结构,这种结构的性质已多次被人们作了分析。当 \bar{N} 为中等大小时,即 $\bar{N} \sim 100$,无结构的电离信号迅速增加,掩盖了自电离的一些峰。这种信号应来源于碎裂所产生的Ar₇⁺离子。当 \bar{N} 进一步增加时,自由离结构变得模糊不清了。

在Ar₇⁺情况中,没有观测到自电离信号,各曲线的形状相似,都出现一个宽的峰,其位置在15.5eV附近,并在低能方向有一小肩,随着 \bar{N} 的增加,由于碎裂过程小肩被掩盖了。

当氩簇离子大于Ar₇⁺时,它们的光致电离曲线变得很复杂,目前难以作出合理的解释。但有一点值得一提:当光子能量低于单体阈时,所有的谱都很相似于二聚体(Ar₂⁺)的TPEPICO谱。这可能表示在光致电离过程中,Ar₂⁺为初始的离子团,在大多数的谱中,离子信号急剧上升,似乎支持这一观点,但这种看法同理论家所持的论点并不一致。

在较轻的稀有气体氩簇的TPEPICO谱的分析中,认为Ne₂⁺为簇离子的核心更为可信些^[19],但作者并未认为其论证是充分的。

从热力学观点来研究稀有气体簇的稳定性中,得出的结论也是不同的:有人认为Ar₇⁺为大的氩簇离子的核心^[20];也有人认为Ar₂⁺,而不是Ar₇⁺为Ar₇⁺的结构核心^[21]。这种差异在目前是无法解释的。热力学的测量方法是相似的,但结论却各异,说明这个问题有一定的复杂性。因之,在研究方法上应有所改善。从目前所用的光学技术来看,以中性簇的平均大小 \bar{N} 为研究对象,显然是不得已的,含有不同数目原子的各种簇混在一起的情况下,所得研究结果只是平均性的,而不是表征各不同簇的自身特征。因此,在实验中研究单一大小的中性簇是自然的趋势。在不远的未来,发展出产生单一质量的中性簇束的技术似不难实现。

四、某些氩簇中固相与液相共存的光谱论证

某些小的原子簇和分子簇(从几个到几百

个原子或分子组成的簇) 在限定的温度范围内可以以固体与液体的形态共存于同一种簇中。液相簇的特征是以松散方式表示出原子的重排, 因而呈现为多种不规整的几何结构; 而固相簇则表现出某种劲变, 其几何结构为规整的, 并且这种簇具有明显不同的熔点与凝固点。代表性的例子为氩簇, 如 Ar_7 , Ar_{13} , Ar_{19} 等。但是, 并不是所有氩簇都有不同的熔点与凝固点, 例如在 Ar_6 , Ar_8 或 Ar_{17} 等簇中, 未观测到两相共存的现象。其他簇也有类似情况, 其中包括铜簇。对于已经研究过的簇来说, 两相共存的温度范围为 20 到 30K。簇越大, 两相共存的温度范围越窄。簇的熔点与凝固点分开来的现象为一怪事, 有悖于常情。簇的这种独特性质提供了极为有利的途径来研究它们的熔点与凝固点的奥秘。某些簇之能具有不同的熔点与凝固点可以势井概念或自由能概念作出解释^[22]。

在实验上来证明共存现象, 目前使用的方法为光谱技术。在每一个簇中加入一个杂质分子, 它同簇中所有其他原子或分子都不同。例如在已进行的实验中, 有的在氩簇中加入一个苯分子^[23], 有的加入一个咪唑分子^[24]。杂质分子作为一种探测工具。探测分子所吸收或发射的特征波长随其周围原子及探测分子本身的性质而变。因此, 嵌在固体簇中的探测分子的光谱不同于嵌在液体簇中的分子的光谱。具体方法是, 利用激光把探测分子激发到已知能级, 然后以第二台调频激光器的辐射来电离被激发的分子, 于是探测分子及携带它的簇便带有正电荷了。在电场作用下, 带正电荷的簇被加速从而偏离出混合体, 利用单个分子的检测方法便可估计这个簇离子的大小, 然后测量其光谱。在光谱中, 嵌在固体簇中的分子显示出细锐的光谱线, 而嵌在液体簇中的分子则具有宽阔的光谱带。这些光谱线(带)的位置与强度都不同于孤立的自由分子的光谱, 并且这些光谱参量同温度有关。拿加入苯 C_6D_6 的氩簇来说, 现有的实验资料可以证明, 两相共存的氩簇大小的范围 n 为 16—22。自由苯分子在 257.8 nm 附近有一细的吸收线, 但在共存的范围内, 在一

定的温度区域内, 氩簇光谱发生了很大变化。图 7 表示出 $n = 18$ 与 21 的氩簇的光谱测量结果, 同时对于这个结果作了光谱分解。分解出来的宽谱带属于液态簇, 而细谱线则相应于刚性簇。但这些结果是初步的, 有一些影响光

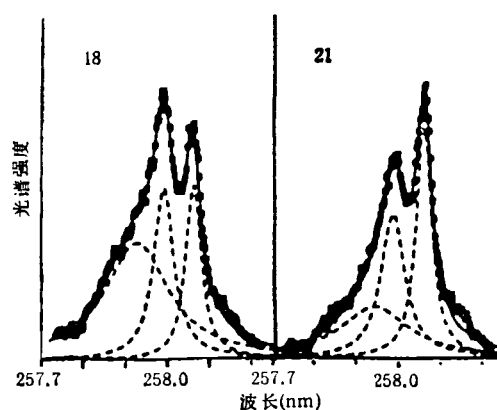


图 7 加苯的氩原子簇的光学吸收光谱^[23]

谱的因素尚不能肯定, 而且两相共存的 n 的范围随实验条件有所变化。但是, 这种实验对于了解簇的性质前进了一大步。理想的实验条件应是保持簇大小固定不变, 改变其温度来测量两相共存现象。但这种实验的精度要求是很高的, 目前尚未见诸文献。两相共存现象的研究可以揭示簇的刚体-液体的相变过程的细节, 并且有力地支持了簇熔化的量子统计理论。

当前簇科学的研究十分热烈, 从事这种研究的人员十分之多, 人们正以很大的兴趣期待着新的进展。

- [1] T. E. Gough et al., *Chem. Phys. Lett.*, 97(1983), 155.
- [2] *Science*, 240(1988), 447.
- [3] T. Möller and G. Zimmer, *J. Opt. Soc. Am.*, B6(1989), 1062.
- [4] O. F. Hagen, *Z. Phys.*, D4(1987), 291.
- [5] U. Buck, et al., *Phys. Rev. Lett.*, 52(1984), 109.
- [6] J. Farges et al., *J. Chem. Phys.*, 84(1986), 3491.
- [7] J. Krauss et al., *Z. Phys.*, D20(1991), 29.
- [8] J. Wörmer et al., *Chem. Phys. Lett.*, 159(1989), 321
- [9] W. Eberhardt et al., *Phys. Sci.*, 41(1990), 892.
- [10] O. Echt et al., *Phys. Rev. Lett.*, 47(1981), 1121; U. Buck et al., *ibid.*, 52(1984), 109.
- [11] T. Möller, *Z. Phys.*, D20(1991), 1.
- [12] S. Schokl et al., *Z. Phys.*, D21(1991), 25.
- [13] V. Saile et al., *Phys. Rev. Lett.*, 37(1976), 305; *Appl.*

- Opt.*, 19(1980), 4116.
- [14] J. Stepelfeld et al., *Phys. Rev. Lett.*, 62(1989), 98.
- [15] U. Buck and H. Meyer, *Phys. Rev. Lett.*, 52, 109. (1984), 109; *Surf. Sci.*, 156(1985), 275.
- [16] W. Kamke, et al., *Z. Phys.*, D14(1989), 339.
- [17] J. Krauss, et al., *Z. Phys.*, D20(1991), 29.
- [18] H. Böhmer et al., *Z. Phys.*, D11(1989), 239.
- [19] M. Feber et al., *Z. Phys.*, D20(1991), 21.
- [20] K. Hesaoha and T. Mari, *J. Chem. Phys.*, 92(1990), 4408.
- [21] M. T. Deluca and M. A. Johnson, *Chem. Phys. Lett.*, 162(1989), 445.
- [22] D. J. Walse and R. S. Berry, *J. Chem. Phys.*, 92 (1990), 4283, 4473.
- [23] Mee Y. Hahn and R. L. Whetten, *Phys. Rev. Lett.*, 61(1988), 1190.
- [24] J. Rosuger and S. Leutwyler, *Phys. Rev. Lett.*, 59 (1987), 1895.

光学显微镜的最新发展

宋葵 李增发 张光寅 颜彩繁

(南开大学物理系, 300071 天津)

光学显微镜技术近年已有革命性发展,应用最新测量技术和最新数据处理技术,已由普通的二维成像发展为三维立体成像。其横向和纵向分辨率有了很大提高。重点介绍了共焦扫描光学显微镜,近场扫描光学显微镜及微分扫描光学显微镜等典型的最新技术的原理,潜力及应用。

Abstract

The revolutionary achievement in optical microscopy has been made recently. Optical microscopy is rapidly developed beyond the traditional two-dimensional imagery into the reproduction of three-dimensional structures by using the latest measuring techniques and data processing technologies. The lateral and vertical resolutions of the observation system have been greatly improved. The principles and potentiality for applications related to the confocal laser scanning microscopy, near-field scanning optical microscopy and differential scanning optical microscopy are introduced in this paper.

光学显微镜的最新发展^[1],已由普通的二维成像发展为三维结构的立体成像。横向分辨率与纵向分辨率有了很大的提高。新的光学技术和日益发展的数字式成像信息处理系统为研究表面结构和立体结构提供了更加有效的方法。

光学显微技术的革命性发展开始于50年代末期共焦扫描原理出现,基于这一原理的共焦扫描光学显微镜已成为三维物体结构再现的有利工具。这种显微镜能消除非焦点结构的信息对成像的影响,实验证明对生物样品的研究具有特别的优越性。例如,用高速扫描共焦成像系统与普通显微镜联合使用来研究生物样品取得了很好的效果^[2]。

扫描隧道显微镜^[3]由于能对样品在原子水平上成像及进行信息处理而受到广泛重视。这一技术的光学模拟技术——近场光学显微镜也同时发展起来。这种显微镜打破了波长限度的分辨率限制,从而可得到更多的样品表面信息。

微分扫描光学显微镜的发展则别具特色与多样性。由于普通扫描显微镜在结构没有变化的情况下也会产生假信号,所以系统的潜在能力不能充分发挥出来。而微分扫描光学显微镜,只有在结构上相邻两点有结构的变化时才能有信号,这样使显微镜的技术指标得到了进一步提高。在这方面近年发展迅速,如微分相位光学显微镜,微分振幅光学显微镜,光导纤维扫描微分相位相干光学显微镜等竞相推出。