



一个了解宇宙的新窗口

——分子天体物理学进展介绍

· 李守中

星际化学的兴起和宇宙生命起源

50 年以前,人们对太阳系以外的化合物几乎一无所知。那时的天体化学主要是通过中性或电离的原子光谱来了解宇宙中元素的成分、比例及分布并根据核物理知识研究元素的演化。著名的天文学家爱丁顿在 1977 年曾提出星云中相当大部分的物质可能是以分子形式存在。但同时他说:“我在写到分子时是很胆怯的,因为我还没有摆脱‘原子是物理而分子是化学’这种传统。”

幸好现在的科学家已经懂得不能拘泥于化学、物理学和天文学之间的传统界限。大量天文分子的发现告诉人们,化合物(包括有机分子)并非是地球这类天体的专利,而且,早在恒星诞生以前原始星云中就已存在着多种分子,这些事实推动科学家去研究星际分子形成机理。在星云这样特殊的、甚至是苛刻的环境中,原子怎样能结合成品种繁多,数量巨大的复杂有机分子?它和星云中的物理、化学条件有怎样的关系?于是,天体化学中一个非常活跃的新部门——星际分子化学——从 60 年代末期起成长起来了。

星际分子化学所研究的是星际物质中分子形成和破坏的物理、化学过程。这种星际物质由占星云主要

成份的气体氢原子和氢分子,丰度很低的杂质元素如碳、氧等及固态的星际尘粒组成。它们处于温度、密度在相当大范围内变化的各种星际条件下,并受到紫外线、宇宙线、X 射线照射和星际激波(Shock)之类的动力学现象的影响。

星际分子形成的途径分为气相化学反应和尘粒表面上的化学反应。

尘粒在一般星云的化学反应中起着核心的作用。首先它屏蔽星云内部的分子免受各种辐射而解离;其次,星云中氢分子的出现对各种分子的形成是关键性的因素而星云中最初的氢分子大多是靠氢原子在尘粒表面上的结合而形成的;再者,尘粒表面还促进其它分子的形成然后把这些分子释放到星际气体中去;最后,它会粘住许多星云中的气体原子、分子而形成一层覆盖在尘粒表面上的膜,在考虑云中各种分子的含量时必须把这一部分也考虑进去。

分子在尘粒上存在的观测证据是一些特殊的红外辐射。如 $3.08\mu\text{m}$ 的吸收线被认为来自冰晶,而 $4.675\mu\text{m}$ 线被认为是来自固态的 CO 。最近有人认为在很多天体包括河外星系中观测到的 $3.28, 6.2, 7.7, 8.7$ 及 11.3 微米的中红外发射谱可能来自某些多环芳香烃如 $(\text{C}_{18}\text{H}_{12})$ 、 $(\text{C}_{16}\text{H}_{10})$ 和 $(\text{C}_{24}\text{H}_{12})$ 。

尘粒表面反应过程相当复杂,不易定量计算。因此,星际分子化学中发展比较快的是气相反应理论。乍看起来,星际气体的环境对分子的形成是极为不利的,可是分子似乎有很顽强的生命力。它能够在稀薄的星

表 3 主要的两体缔合和解离过程

| 缔合或离解过程 | 例 | 注 |
|--|---|------------------------------|
| 辐射缔合 $(X + Y \rightarrow XY + h\nu)$ | 1) $\text{H} + \text{H}^+ \rightarrow \text{H}_2^+ + h\nu$ 2) $\text{CH}_3^+ + \text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_5^+ + h\nu$ | 例 1 可出现于宇宙早期 |
| 辐射附着继以缔合脱离 $(X + e \rightarrow X^- + h\nu) \rightleftharpoons (X^- + Y \rightarrow XY + e)$ | 1) $(\text{S} + e \rightarrow \text{S}^- + h\nu) \rightleftharpoons (\text{S}^- + \text{CO} \rightarrow \text{OCS} + e)$; 2) $(\text{H} + e \rightarrow \text{H}^- + h\nu) \rightleftharpoons (\text{H} + \text{H}^- \rightarrow \text{H}_2 + e)$ | 例 2 是气相形成 H_2 的主要途径 |
| 光解离 $(XY + h\nu \rightarrow X + Y)$ 光电离 $(XY + h\nu \rightarrow XY^+ + e)$ 解离光电离 $(XY + h\nu \rightarrow X + Y^+ + e)$ | $\text{OH} + h\nu \rightarrow \text{O} + \text{H}$ | |
| 碰撞解离 $(X + YZ \rightarrow X + Y + Z)$ | 1) $\text{H} + \text{H}_2 \rightarrow \text{H} + \text{H} + \text{H}$ 2) $\text{He} + \text{H}_2 \rightarrow \text{He} + \text{H} + \text{H}$ | 主要发生于几千度高温的云中 |
| 解离复合 $(XY^+ + e \rightarrow X + Y)$ 或 $(XY^+ + e \rightarrow X + Y + h\nu)$ | 1) $\text{H}_3^+ + e \rightarrow \text{H}_2 + \text{H} + h\nu$ 2) $\text{CH}^+ + e \rightarrow \text{C} + \text{H}$ 3) $\text{CH}_3^+ + \text{HO}_2 + e \rightarrow \text{CH}_3\text{OH} + \text{H}$ | |
| 电荷转移 $(X + Y^+ \rightarrow X^+ + Y)$ | 1) $\text{H}^+ + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H} + \text{H}_3\text{O}^+$ 2) $\text{H}^+ + \text{O} \rightarrow \text{H} + \text{O}^+$ | |
| 化学反应 $(XY + Z \rightarrow X + YZ)$ | $\text{O} + \text{OH} \rightarrow \text{O}_2 + \text{H}$ | |

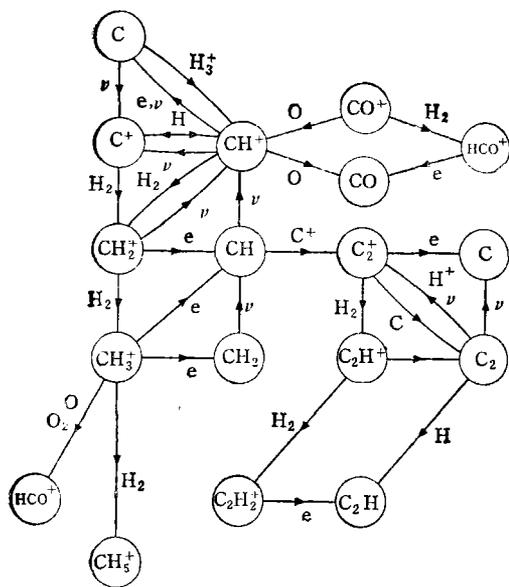
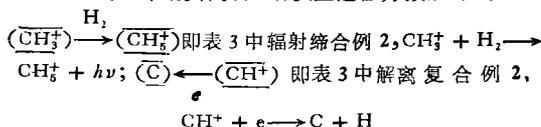


图6 星云中的碳化学反应图

图中每一个箭头代表一种反应过程,例如图中的



云中通过包括光子和电子的作用在内的气相反应产生出来.如果是在低密度条件下,则可以忽略三个粒子同时相碰的几率,而只考虑两体缔合过程.表3中列出几种主要反应过程及其实例.每种过程都必须同时满足各种守恒律.过程的发生速率须通过实验测量或理论计算得出.实际上各种过程在星云中是同时或相继发生的,所以常用反应图来表示.图6是一张碳化学的反应图.综合考虑各种过程经过计算可得出不同条件、不同的演化阶段星云中各种分子的丰度比.目前,这种图中某些过程的反应率和反应产物仍有不少不确定性.尽管如此,它还是为我们描画出一个星云化学演化的图像.一般情况下,理论的预言和天文观测的一致性是一致的.考虑到星际分子化学只有二十年的历史,并且地球实验室中很难获得诸如自由基或尘粒表面反应的各种数据,应该说这是一项了不起的成就.它的一些失败或薄弱环节正是推动进一步理论或实验研究的巨大动力.现今已经很难说究竟是天文学家在推动实验室的和理论的物理、化学研究,(如U谱线的证认)还是星际分子化学家在指引着天文观测的方向(如新分子的寻找).

星际有机分子的发现给宇宙生命起源问题提供了重要的线索.任何一种生命起源学说都不能不以此事实作为前提.1969年曾在落在澳大利亚默奇森的陨石中找到右旋氨基酸 $\text{NH}_2\text{CH}(\text{CH}_3)\text{COOH}$.氨基酸是组成蛋白质的基元,它是含有氨基(NH_2)和羧基($-\text{COOH}$)的化合物.从表2中可看出有些星际分子

有可能成为氨基酸的组成部分.1978年已有人在实验室中测定了甘氨酸($\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH}$)的谱线频率并使用三台著名的射电望远镜在9个分子云中搜索.尽管因讯号太弱未被确认,但这方面的努力无疑对研究宇宙中生命的早期演化有深远的意义.有一位波兰天文学家提出:原始生命(或其前身)可能产生于星云之中,经过彗星之类的合适媒介“播种”到某个条件合适的土壤上(如地球的海洋中),最终演化为智慧生物.当然,地外文明是一个探索已久的迷人的课题,在找到最终答案之前还须作艰难的探索.但不论怎样,分子天体物理学和星际化学将为宇宙生命起源的研究提供最原始、最基本的信息.

前景展望

30年来分子天体物理学在它蓬勃前进的同时,带动了许多相关学科的发展.那么,应该怎样估计它的现状和前景呢?应该说,发展的势头仍然迅猛.这个学科仍然处在它的鼎盛时期.

分子谱线是造物赐给我们的一个极丰富的天文资源.这个资源的潜力远远没有用尽.亚毫米、远红外和远紫外望远镜已经投入使用,这些刚刚开发的电磁波段必将带来源源不断的新的宇宙信息.人们还期待着分辨率更高的甚长基线干涉仪来弄清小尺度天体的种种细节.解开天体脉泽、双极喷流中的那些疑团.

星际云中的化学演化向量子化学、分子束化学反应动力学提出了一大堆理论和实验的难题.包括确定各种分子的光解离速率和不稳定分子的反应速率等很难测量的参数.

SiC的发现启发人们考虑能否用类似办法在实验室制备并在天体中寻找那些以难于产生著称的双原子金属碳化物如FeC、MgC、CaC和AlC.

还有一件值得一提的事是1978年2月出现的超新星SN1987A,它爆发后的变化是以月甚至天来计算的.1987年尾便出现了星云相.同期红外天文卫星观测到CO分子谱线出现.爆发后约500天便出现尘埃.这颗超新星不仅为天文学家提供了一个几百年不遇的罕见的宇宙实验室,也为星际化学提供了一个检验理论的绝佳机会.例如,A.戴加倍、尤峻汉等已计算出辐射缔合反应($\text{C}^+ + \text{O} \longrightarrow \text{CO}^+ + h\nu$)及相继的电荷转移反应($\text{CO}^+ + \text{O} \longrightarrow \text{CO} + \text{O}^+$)的速率不足以产生出观测到的CO丰度.因而利浦(S. Lepp)等推测对CO形成起主要作用的是 $\text{C} + \text{O} \longrightarrow \text{CO} + h\nu$ 反应.

上述这些远非问题的全部,只是想说明我们不能指望在这样一个粗线条的介绍中描绘出分子天体物理学的全貌.更不能认为分子天体物理学已经是成熟的学科.许多难题尚有待探索;许多重要的因素很可能还没有被我们意识到.但可以预期的是,在未来的十年中它一定会有更多的突破并带给人们许多前所未闻的知识.(续完)