

地外分子

有不少天文分子被称为“地外”分子。原因是在地球上找不到这种分子的天然样品，甚至化学实验室中也难以制备出来。但在星际空间或星周包层那种地球上不易模拟的超高真空（每立方厘米 10^2-10^7 个分子）、超低温（10—100K）、大尺度（天文时、空尺度）的特殊环境中，它们却能够以足够大的丰度产生和存在。

相当多的地外分子是化学上极不稳定的分子离子或自由基。除了前面提到的 HCO^+ 外，表2中所列的分子离子和自由基如早期发现的 N_2H^+ 、 CH^+ 和近年发现的 C_2H 、 C_3H 等均属此类。这些天文分子绝大多数都已得到肯定的证认。有趣的是，其中有些分子（如 N_2H^+ ）连化学家也不知道它们的名称。因为化学手册中根本没有这种东西。

大量的分子离子在星云中出现，表明在某些星际化学过程中，离子-分子反应起着重要的甚至是主要的作用。

还有一类地外分子在常温下蒸气压非常低，以致在地球上无法用微波波谱学方法测量气相的分子。（目前天文上测到的谱线大都是来自星云中的气体分子。必须用气体分子的实验室谱线来证认。）属于这种情况的有 HC_3N 、 SiC 等。

SiC 是简单的双原子分子。地球上并不缺少固体碳化硅，但从没有看到过气相的化合物。早在30年代，著名的分子物理学家、诺贝尔化学奖获得者赫兹堡就企图在实验室中找寻它的光学谱线。从那时起近60年过去，却没有人得到成功。

70年代陆续发现了由C、O、Si、S四种元素组合而成的星际双原子分子 CO (1970)、 CS (1971)、 SiO

完全不晓得我这种异乎寻常的举动。”

照样也没有回音。现在知道，1902年爱因斯坦在瑞士专利局找到了工作，开始是见习的三级技术员，接着晋升为二级技术员——工程师。正是在这个远离科学文献和大学物理系浓厚学术空气的地方，他抽出宝贵的时间作秘密的演算，当听到有脚步声走近时，他就象犯了罪似地把它往绘函桌里藏。1905年爱因斯坦完成了光的量子理论和空间时间统一的开创性工作。在这个时期他仍然没有获得哲学博士这个“珍贵”的头

(1971)、 SO (1973)、 SiS (1975)，又激起在宇宙中找寻 SiC 的热情。可是它却多次逃避了射电望远镜的寻觅。

80年代末期，射电天文学、量子化学和实验室波谱学密切配合，再次发动搜索。西班牙的IRAM30米射电望远镜在1989年初终于在富碳星 $\text{IRC}+10216$ 的星周包层中找到几条不敢肯定的 U 谱线。它们的频率

落在由量子化学从头计算法得出的 SiC 的 $J=4\rightarrow 3$ 及 $6\rightarrow 5$ 跃迁的频率附近。紧接着在实验室中，用一台改进的毫米波段反应型分子波谱仪看到两条与射电 U 谱线相符的谱线。这个实验是把 SiH_4 、 CO 和 C_2H_2 气体通到一个4米长的放电管中进行直流辉光放电。在合适的压力（10—20毫托）和温度（ $\sim 150\text{K}$ ）下，出现了十多条谱线。谱线有塞曼效应表明它们来自某种开壳层的分子；而去掉混合气体中的 SiH_4 后，这些谱线便消失，表明这种分子必是含硅分子。把实验测量和理论计算的各种分子谱线参数仔细地比较之后，终于肯定了这种开壳层的含硅分子只能是寻觅已久的 SiC 自由基。因为用放电管中的Si、C、O和H可能组成的所有各种开壳层的含Si分子中，没有一个分子能够像 SiC 那样具有如此合适的参数。特别是大的转动常数。这样，天文 SiC 分子便迅速得到肯定的证认。

天体物理学在历史上曾对物理学做出重要贡献（如氦的发现，热核聚变概念的提出）。现在，宇宙这个广阔无垠的实验室又将成为物理学家和化学家的天然研究基地。

天体微波激射源和双极喷流

1965年韦弗等在猎户座星云中偶然地发现一条非常强的1665兆赫兹的谱线。在热平衡条件下，OH的基态有四条频率分别为1667、1665、1720、1612兆赫

兹，我没有成为哲学博士，……这类闹剧让人厌烦”——在1905年爱因斯坦第二次试图获得这个学衔失败后曾这样写道。第三次终于成功了，但此时他已不再需要这个博士学位了，因为他已蜚声于科学界。

我比较详细地回顾这段历史的一个简单原因是，发展中国家的科学家们类似地存在着精神的苦闷和沮丧的情况。今天，即使在发达国家中，象爱因斯坦那样献身于科学的人们的自我感觉难道会更好一些吗？

[译自 *Горюха*, №1, 1981]



解宇宙的新窗口

分子天体物理学进展介绍（之三）

· 李守中 ·



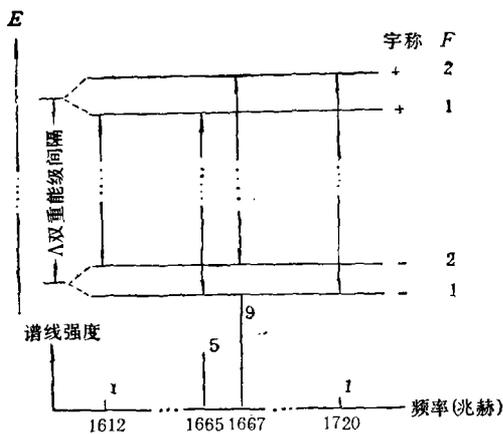


图1 OH的能级和谱线

兹的谱线，其强度之比应该是9:5:1:1(图1)。但韦弗等在同一源中却观测不到本应比1665兆赫兹谱线更强的1667兆赫兹谱线。以致人们在相当一段时间内，不敢断定观察到的谱线来自何种分子。

以后又陆续发现水蒸汽(H_2O , 1968), 氧化硅(SiO , 1974)和甲醇(CH_3CO , 1975)也有异常的辐射。这些分子源发射的谱线一般都具有下列反常特性: 小的分子源尺度(线度在 10^{13} — 10^{16} 厘米量级); 异常高的谱线强度(由强度和分子源大小算出源的亮温度竟达 10^9 — $10^{11}K$); 谱线的偏振度很高(有些是高达100%的线偏振或圆偏振); 谱线强度和特征在几天至几个月的时间尺度内就发生快速的变化; 各条谱线间的强度之比远离热平衡时的数值。观测发现, 这些谱线宽度往往很窄($\Delta\nu \sim 10^3$ — 10^5 赫兹), 对应的气体温度在几度到几十度开。远远低于亮温的值。这样小的天体, 在这样窄的频宽范围内, 竟然发射出这样强大的功率(有些水分子源发出的功率可以和太阳在整个电磁波谱范围内发出的总功率相比)。使科学家感到不可思议, 用热平衡条件下的自发发射机制根本无法解释。因为它会导致一连串自相矛盾或常识上不能接受的结论。

幸好当时在人类的知识中还有另外一种谱线发射机制。就是爱因斯坦在1917年提出并于50年代在实验室中实现的受激发射。天体物理学家很自然地相信, 这些奇异的辐射只能是天体发出的微波受激发射。并把这些天体称为天体微波激射源即天体脉泽(maser)。

受激发射机制可以说明谱线的高强度, 高偏振度以及非热平衡的强度比。产生受激发射的先决条件是“粒子布居反转”。这是一种非热平衡状态, 即上能级的分子数超过下能级的分子数。换言之, 人们必须设想出某种抽运模型来解释在分子云中是什么原因使分子的粒子布居反转。在地球实验室中, 反转是利用高技术破坏热平衡的结果。而星云中, 热平衡却往往似乎不是规律而是例外。一段时间中, 天体物理学家几乎把地球上曾使用过的各种抽运方式都套用到天体上

去。目前, 比较成功的是碰撞抽运模型和辐射抽运模型。辐射抽运是靠附近的辐射源(例如红外星)把分子激发到高能级, 然后在级联跃迁时产生某一对能级间的粒子数反转。碰撞抽运则是靠周围环境中其它粒子的碰撞, 把分子激发并形成反转。但不论哪种模型至今都还不能完美地解释问题的各个方面。高尔德瑞查在1974年曾这样概括人们对天体脉泽的了解: “不能否认天体脉泽载有大量的信息, 我们已经知道与恒星形成区成协的脉泽是很小的, 成批产生的, 是随时间变化的而且通常是强偏振的, 但我们不能肯定它们表现的(测到的)大小和它们真正的(物理的)大小之间的关系。我们不知道一批脉泽中的每一个是被同一颗星激发的还是分别被各自的星所激发。时变的原因仍不清楚。现有的偏振理论也没有一个是完全满意的”。十多年过去了, 观测和理论研究都有许多重大的进展。现在已经找到了一千多个天体脉泽源, 而且已经确认强的微波激射作用是新形成的大质量恒星和充分演化的主序后星的星周包层中的一种普遍现象(由于历史的原因前面一种与年青星成协的被称为星际脉泽, 而后面一种与晚型星成协的被称为星周包层脉泽)。在河外星系中也发现了十几个OH和六个 H_2O 超脉泽。后者的光度竟达到几百个甚至一千个太阳光度。但理论上仍有不少问题没有弄清楚。我们仍然解释不了—些 H_2O 脉泽为何能产生如此强大的辐射能量。对位于电离氢区的OH激射源来说, 观测事实已基本上排除了辐射抽运的可能性。因为显然辐射抽运要求抽运的光子数目大于受激发射的光子数目, 而在电离氢区各种可能的抽运波长的电磁波都达不到这个要求。对这种天体微波激射源似乎只剩下碰撞抽运的可能性。然而计算已经表明, 除非撤除细致平衡原理对碰撞过程的限制, 就无法解释天体微波激射源的这样高的亮温度。这就要求碰撞来自某种非热平衡状态的气体或束流。

与天体微波激射源密切相联的是70年代发现的喷流(jet)现象。多数恒星形成区的激射源都有大量高速气体向外喷射。从谱线的多卜勒频移可算出气体的喷射速度高达每秒几十甚至几百公里, 且通常都是双向喷射。天文学家认为这种剧烈的物质抛射是星云凝聚(塌缩)成恒星过程中最后阶段出现的现象。但是要用流体力学合理地解释喷流的形成和它的高速度也仍然是一个困难的课题。

恒星形成区发生的这些现象向物理学提出了一些挑战性的问题。严格地说, 天体微波激射源的奇异辐射是否真的全都来自受激发射。至今并没有得到最后的证实。之所以把它们称之为天体脉泽, 在一定程度上也许是因为除了爱因斯坦在74年前告诉我们的自发发射和受激发射外, 物理学家不知道还有什么其它的物理机制能够产生谱线发射。