



一个了解宇宙的新窗口

——分子天体物理学进展介绍

· 李守中

天文分子大家族

进入 70 年代后,陆续建成了一批性能优异的射电望远镜。空间天文技术也达到较高水平。第一个装载有紫外望远镜的火箭在 1970 年上天,它找到了期待已久的氢分子 H_2 谱线。以后,轨道天

文台(OAO)、红外天文卫星(IRAS)、哥白尼卫星(OAO-3)也接连投入观测。这样,新的天文分子品种和新的分子源(即大量分子组成的星云或星周物质)便源源不断地出现在天文学家的眼前。其中,美国国家射电天文台基特峰的 11 米直径毫米波望远镜和日本国立天文台野边山射电观测所的 45 米直径毫米波望远镜以及那些空间观测器尤其出色,为发现大批天文分子立下汗马功劳。

到 1990 年底,已发现并证认出近 100 种天文分子。其中有些还观测到相应的同位素分子。每种分子往往不止测到一条谱线,并且有不止一个源。人马座 A 和人马座 B2 是著名的分子源,大部分已发现的天文分子品种都能在其中找到。天文分子能够以相当大的丰度持久地存在于看来非常不利于它们形成和生存的环境中,这似乎令人难以置信,现在却变成了事实。分子源分布在宇宙中各种物理环境不同的区域并和各种类型的天体相联系(表 1)。这使得它能够为我们提供

二次大战中发展起来的雷达及微波技术推动了微波波谱学及射电天文的发展。1944 年荷兰的范德胡斯特首先考虑了用射电望远镜检测广泛存在于星云之中的氢原子 21 厘米微波谱线(它来自氢基态超精细结构能级间的跃迁)的可能性。这个想法在 1951 年实现。于是天文谱线的研究由光学波段扩展到射电波段。氢 21 厘米谱线的观测取得了丰硕成果并积累了用微波谱线观测星际气体的经验。天文学家认识到微波特别适合于研究低温的星云,这种星云不辐射可见光并且阻碍可见光透过,而微波谱线却能携带着星云深处的各种信息投向地球。

1949 年苏联天文学家什克洛夫斯基曾建议在暗云中寻找羟基(OH)、次甲基(CH)和氢化硅(SiH)等分子的微波谱线并估算了谱线频率。进入 50 年代后,在微波波谱学方面造诣很深的美国物理学家汤斯也把兴趣转向天文学。他再次建议寻找星际 OH,并列举了 17 种星际分子的候选者及它们的微波频率。汤斯的学生巴瑞特曾于 1956 年尝试在银心,反银心和仙后座 A 射电源等方向寻找星际 OH 微波谱线。但因对频率了解不精确而告失败。为此,汤斯等于 1959 年在实验室中制备了足够多的 OH,精确测定了 OH 的频率。按照这个频率值 1963 年 10 月 15 日威因雷伯和巴瑞特把自制的高灵敏度谱线接收机装在密尔斯通山天文台的 25 米直径射电望远镜上,再次指向著名的强射电源仙后座 A,终于一举成功,当天便找到了 OH 的 1667 兆赫兹和 1665 兆赫兹两条主线。这项成就被誉为 60 年代天文学四大发现之一。

1968 年琼和汤斯等在 1.3 厘米波长附近又接连找到星际的水(H_2O)和氨(NH_3)。 H_2O 谱线之强使他们不仅觉得意外而且深感遗憾。因为从接收技术上讲——人们事后回顾——本来更早些“用一个二极管和一个耳机”便可检测到它们。可惜以前竟没有人想到去尝试一下。1969 年斯耐德又观测到四原子分子甲醛($HCHO$),这是个地道的有机分子。这几个分子的发现引起了真正的轰动,激发了人们进一步寻找和研究天文分子的巨大兴趣,并且给毫米波射电天文技术带来了强烈的推动力。一批高水平的巨型射电望远镜陆续建成,加入搜寻天文分子的队伍。分子天体物理学在 70 年代出现了突飞猛进。这扇认识宇宙的新窗口就此被打开了。

表 1 与天文分子有关的天体

(表中列出各种主要的天体种类。g 表示其中观测到气体天文分子。s 表示观测或分析过固体样品)

天体种类	观测到气体天文分子 (g)	观测或分析过固体样品 (s)
太阳系	太阳(黑子 ^g) 行星(大气 ^g),小行星,彗星 ^g 卫星(月球 ^g ,其它行星的卫星 ^g) 流星体(陨石) ^g , 行星际物质	
银河系	银心 ^g ,旋臂结构 ^g 星际物质,星云(气体+尘粒) ^g 恒星形成区及原恒星 恒星(主序星) 红巨星(星周包层 ^g),年青行星状星云 ^g ,新星,超新星遗迹 ^g ,白矮星,中子星,黑洞	电离氢区 ^g 中性氢区 ^g 暗星云 ^g 球状体 ^g BN 天体 赫比格-阿罗天体 ^g 天体脉泽 ^g 红外星 ^g
河外星系	(星际气体 ^g),星际空间物质 ^g ,活动星系核 ^g ,类星体 ^g	
宇宙线,宇宙背景辐射		

广泛多样的信息。值得强调的是天文分子谱线对研究恒星演化的极早期阶段(即由星云演化为原恒星以至红外星的阶段)和晚期阶段(包括红巨星的包层、年青行星状星云和超新星遗迹等)有特殊的价值。1975年以来,在河外星系中也检测到 H_2O , CO 和 NH_3 等分子。甚至星系际物质和类星体中也找到天文分子的踪迹。

表2按化学性质分类列出已发现的90余种天文分子(未包括同位素分子)。这是一张远远超过60年代以前最富于想象力的分子天体物理学先驱者们意料的表;也是一张会使化学家感到吃惊和惶惑的表。表中分子大多是由氢(H)、氧(O)、碳(C)、氮(N)、硫(S)、硅(Si)组成的有机分子。这前五种元素加上磷(P)就是所谓“生命元素”。其它元素有氯(Cl)、钠(Na)、钾(K)和铝(Al),不过它们目前还只出现在晚型星的星周物质中。

表中既有常见的简单分子,又有由十几个原子组成的有机分子。最大的 $HC_{11}N$ 由13个原子构成,分子量为147。天文环境中出现有机分子曾使天文学家大为兴奋。因为过去一直以为只有在地球这样得天独厚的环境中才能大批地产生有机分子。1970年找到甲醇(CH_3OH)之后,他们曾为能否在星云中找到乙醇(酒精, CH_3CH_2OH)而打赌。结果1974年竟然在人马座中发现总量比人类有史以来酿造的全部酒精还要多的酒精分子。现在在天文分子的大家族中,已经拥有醛、酮、醇、酸、酰胺、酯、醚、腈、烯、炔等各类有机分子和一大批不稳定的分子离子及自由基。很长一段时间中,发现的天文分子都是线型结构。直到1985年才首次证实了一个环形的分子 C_3H_2 。近年来又陆续检测到环形的 C_3H 和 SiC_2 分子。它们在星际空间形成的机制是天体化学家很感兴趣的问题。

天文分子的证认和微波波谱学的发展

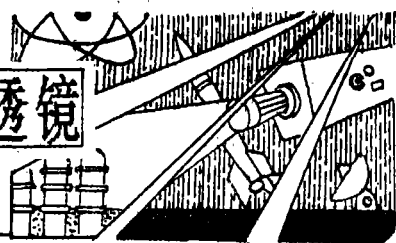
天文观测得到的是电磁波的谱线。将谱线的参数(主要是频率值)与实验室的数据对比,可以确定它来自何种分子。这和传统的天文原子(离子)光谱的识别原理并无二致。微波谱线频率测量的精度很高。由于40年代发展起来的实验室微波波谱学已经积累了数以万计的分子微波谱线频率数据,而且我们可以排除其中绝大部分估计在星际空间不具有足够丰度的品种。因此,对那些稳定的并且在室温下具有较高蒸气压力的分子,证认工作并不太困难。对于某些分子,只要有一条精确测定的天文谱线就足以可靠地辨认出来。在有怀疑的情况下,特别是在尚未排除谱线的多普勒位移情况下,进一步观测同一分子的另一一些谱线一般便可做出肯定的证认。谱线的超精细结构或同位素分子的相似谱线也是有力的佐证。不过天体中分子不一定处于热平衡状态,各谱线之间的强度比往

表2 已证认的天文分子

简单分子	腈	离子
氢化物		
H_2	HCN	CH^+
HCl	HNC	HN^+
H_2O	H_3CCN	HCO^+
氧化物	H_3CNC	$HOCO^+$
CO	$H_3C-C\equiv C-CN$	HCS^+
SiO	$H_3C-(C\equiv C)_2$	$HCNH^+$
SO_2	-CN(?)	$SO^+(?)$
OCS	H_3C-CH_2-CN	$H_3O^+(?)$
HNO	$H_2C=CH-CN$	$HGC^+(?)$
硫化物		$H_2D^+(?)$
CS		自由基
SiS	醇	OH
H_2S		CH
卤化物	H_2COH	C_2H
$NaCl^*$	H_3C-CH_2-OH	C_2H_2, C_2H_3, C_2H_4
$AlCl^*$	H_2CSH	C_2H
KCl^*		C_2H
AlF^*		C_2H
其它	醛	CN
NH_3		C_2N
SiH_4^*	$H_2C=O$	H_2OCN
CC	$H_2C=S$	HCO
CH_4^*	$H_3C-CH=O$	NO
PN	$HC\equiv CCHO$	SO
碳链分子	酮	
CCC^*		CP^*
$CCCC^*$	$H_2C=C=O$	C_2S
$CCO(?)$	$(CH_2)_2CO(?)$	NS
CCCCO		SiC^*
$CCCCCO(?)$		$H_2C(?)$
CCCS	醚	H_2CCC, C_2H_2
C_3Si^*		H_2CCCC
炔衍生物	$H_3C-O-CH=O$	(?) 已宣布但未确认
$HC\equiv C-CN$	醚	(*) 只在拱星包层中发现
$H(C\equiv C)_2-CN$	$H_3C-O-CH_2$	
$H(C\equiv C)_3-CN$		
$H(C\equiv C)_4-CN$		
$H(C\equiv C)_5-CN$		
$HC\equiv CH$	酰胺	以下9种是过去曾宣布过,但近年认为尚不能确认的分子
$H_3C-C\equiv CH$	$NH_2-CH=O$	NaOH
$H_3C-(C\equiv C)_2-H$	H_2CNH	O_2
	H_3CNH_2	HOCN
烯	H_2NCN	SiH
$H_2C=CH_2^*$	环状分子	CO^+
酸		H_2S^+
	C_2H_2	S_2
$HN=C=O$	SiC_2^*	PS
$HN=C=S$	$C-C_3H$	HSiCC
$HO-CH=O$		

X 光学的重要突破——谈 X 光透镜

· 颜一鸣



自从 1895 年德国科学家伦琴发现 X 射线,迄今已近百年。在此期间,人们不仅认识到 X 射线是短波长 ($10^{-2} \sim 10^4 \text{ \AA}$) 的电磁波,它是怎样产生的,而且深入研究了它和物质的各种相互作用。在 X 射线物理发展的同时, X 射线得到了广泛的应用。我们无需查阅那些浩如烟海的文献库,就能说出 X 射线的若干应用: X 光诊断、X 光治疗、X 光分析、X 光探伤……。

本世纪 70 年代以前, X 光设备有一个明显的弱点,就是 X 光束无法调控,我们不能改变 X 光束的传播方向,不能会聚 X 光,也得不到平行的 X 光束。由于没有 X 光透镜,也就不能象在红外光和可见光波段那样,设计和制造 X 光望远镜、X 光显微镜等等复杂的光学仪器和光学系统。因此, X 光的应用受到很大限制。

近二十几年以来, X 光学得到了迅速的复苏和发展,制造出了多种 X 光仪器设备,如旋转二次曲面掠射镜,多层膜 X 射线反射镜, X 光波带片、衍射光栅等衍射器件和干涉器件。利用这些 X 光学器件,在微观的物质结构分析领域和天文学观测方面取得了惊人的成就。但 X 光望远镜等所用的掠射镜只利用了一到两次

散射, X 光收集角非常小,功率密度很低;衍射器件和干涉器件的光谱选择性很强,无法调节宽波段的 X 光束。此外,所有上述器件都只能在软 X 光波段使用,硬 X 射线束的调控手段还未能解决。

80 年代末,苏联库马霍夫提出了一种新的利用多次反射的 X 光聚束方法。利用这种原理制作的 X 光器件称为 X 光聚束器(又常称为 X 光透镜,尽管它只是用来聚束而未用于成象)。它可以在大角度范围内对宽波段的 X 光聚束。

一种应用多次反射聚束的方法是空心 X 光导管聚束。X 光导管内壁产生多次全反射,从而由光导管的一端传播到另一端并随导管的弯曲而改变传播方向。这样,导管的弯角可以大大超过全反射的临界角 θ_{cr} 。例如设 θ_{cr} 为 1.00° , 如果 X 光在导管

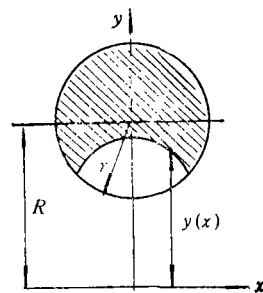


图 1 弯曲导管在 $\gamma < 1$ 时捕获 X 光的截面

往和地球实验室的测量结果不同。

早期的观测工作多数是根据实验室已知的分子频率设计谱线接收机,来找寻理想中的天文分子。现代望远镜还常用宽频带的谱线接收机在各个频率同时进行搜索。在巡天普查中,发现了不少实验室数据中不存在的“U 谱线”(未证认谱线)。这常常预示着发现了一种地球上不能稳定存在的“奇异分子”。不过这种谱线很难证认它的归属。为了证认 U 谱线需要多种学科的密切合作。

U-89 谱线的证认可作为这种合作的典型例子。1970 年后,在许多分子源中观测到两条频率约为 90 京赫兹的地球上从未见过的强谱线。当时只好仿照 hydrogen (氢)暂取名为 X-ogen, 和 Y-ogen。从这些分子云的化学元素丰度、云中已发现的分子品种以及可能的气相化学反应等天体化学诸因素及微波波谱学转动谱线频率的一般规律来考虑,人们有理由猜测频率为 89.2 京赫兹的一条 U 谱线可能来自地球环境中不能稳定存在的 HCO^+ (甲酰离子)。根据量子化学理论使用超级计算机算出的频率值支持这种猜测。

后来又在这些源中找到同位素分子 H^{13}CO^+ (^{13}C 没有核磁矩而 ^{12}C 有核磁矩,它们的谱线超精细结构不同),更有把握认为 X-ogen 就是 H^{13}CO^+ 。不过,决定性的裁决最终要靠在实验室直接测定 HCO^+ 频率。70 年代分子天体物理学的进展推动了微波波谱学家测量不稳定分子的兴趣,导致一种新的波谱技术——反应式分子微波谱仪——的出现。它能即时测定通过化学反应产生出来的不稳定分子的微波谱线。1975 年终于在实验室中测到了 H^{12}CO^+ 和 H^{13}CO^+ 的 89.2 京赫兹谱线。彻底完成了证认工作。后来 Y-ogen 也被证实为 HNC 。

目前国际上天文观测,天体物理、化学理论分析,实验室波谱学测定和量子化学计算之间的合作已经成为常规。天文台、大学、实验室等各机构为找寻和证认各种未知的分子谱线发挥各自的作用。

尽管如此,由于复杂分子越来越多,它们的谱线十分稠密,证认的不确定性随之增加,所以目前还是有几百条 U 谱线没有找到归属。这是摆在量子化学和微波波谱学面前的一项艰难的课题。 (待续)