

天体物理学讲座

第三讲 恒星形成:从星际分子云到原始行星系统*

杨 戟¹⁾

(中国科学院紫金山天文台 南京 210008)

摘 要 对行星系统起源问题的研究在近年来已经取得很大进展.一方面是星际分子云与恒星形成的天文研究取得了令人瞩目的成就.研究表明,包括太阳在内的恒星是由冷暗的星际分子云收缩形成的.在形成恒星的过程中,普遍伴随出现围绕恒星的盘状的原始行星系统.在这种原始行星系统中间,尘埃颗粒逐渐生长,并凝聚成行星、彗星等.从分子云到原始行星系统大约经历百万年,而木星这样的大行星有可能在恒星收缩阶段同时形成,并且在行星系统的发展过程中逐渐发展.行星系统起源的另一方面进展来自包括彗星、太阳系行星际探测,从而对太阳系这样的行星系统的组成和性质,对行星大气等有了更精确的了解,以此为参考,能够测定那些远离太阳系的其他新近发现的行星系统的物理化学性质,从而提供了一系列互相联系和对比的样本.通过上述进展,现代天文学正逐渐揭开行星系统形成之谜.

关键词 星际分子云,恒星形成,原恒星,行星系统

STAR FORMATION: FROM INTERSTELLAR MOLECULAR CLOUDS TO PROTOPLANETARY SYSTEMS

YANG Ji

(Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract Significant progress has been achieved over the past years on the origin of planetary systems. Major improvement has been made in the studies of interstellar molecular clouds and star formation. It has been shown that stars, including our own solar system, are formed by contraction of cold and dark interstellar clouds. Disk-like protoplanetary systems are commonly formed during the process. Dust grains grow rapidly in the disks and gradually condense into planets, comets, and so on. This lasts over millions of years, from molecular clouds to protoplanetary systems. Giant planets like Jupiter can be formed during the contracting phase of molecular clouds and grow during the build-up process of planetary system. Other research on the origin of planetary systems has progressed due to improved understanding of the solar system through studies on comets, planets and their atmosphere in the solar system, which has led to more accurate measurements of the composition of our unique planetary system. Referring to such detailed measurements, comparative studies have been made on newly discovered distant planetary systems with regard to their physical and chemical properties. The mystery of the origin of planetary systems is beginning to be unveiled.

Key words interstellar molecular clouds, star formation, protostars, planetary systems

1 引言

从哥白尼日心学说确立以后,人们对太阳系的结构和组成有了一定的了解.一个显然的问题是要说明它是如何起源的.早在18世纪,康德和拉普拉

斯提出了星云假说,用以解释我们太阳系的起源.太阳是一颗小质量的恒星,年龄约为45亿年.

* 国家自然科学基金(批准号:19625307)资助项目
2000-12-25收到初稿,2001-01-09修回

1) Email: jiyang@pmo.ac.cn

而在银河系的平面 - 银道面附近到处可以见到蓝色的大质量恒星.与银河系的年龄相比,大质量恒星寿命很短,只能存活几百万年甚至更短.人们今天之所以能够看到这些恒星,说明它们是在先前一个不算遥远的过去形成的,也因此说明了我们的银河系正经历恒星的形成.1942年, Joy 发现另外一批颜色偏红的暗星,它们的光谱中出现类似太阳色球的发射线.这些暗星呈现不规则的光变,并且与暗星云或亮星云成协^[1].这些暗星是与太阳质量相当的年轻恒星.然而,年轻恒星从何处以及如何形成的问题直到20世纪60年代后期发现星际分子云及深埋于这些分子云中的红外源后才开始得到答案^[2].而关于行星系统的起源问题的研究更是到80年代才开始有了一系列重大的突破.

2 星际分子云

从1963年在射电源 Cas A 方向发现羟基(OH)分子^[3]开始,继1968年发现星际氨(NH₃)分子^[4]、1970年发现星际一氧化碳(CO)分子^[5]之后,星际分子的发现成为天文学在20世纪60年代的四大发现之一,开创了毫米波射电天文新领域.通过探测星际分子的电磁辐射,人们发现在银河系特别是银盘附近普遍存在着星际分子云.观测表明,在星际分子云中,氢分子占绝大多数,而其他分子含量低微.次丰富的CO分子也只有氢分子数密度的万分之一.星际分子云的气体密度很低,只有每立方厘米约100个分子.分子云的温度极低,只有绝对温度十至几十度,但是,分子云的尺度却达到几十秒差距(秒差距是天文学中计量距离的一种实用单位,1秒差距约等于300 000 亿千米),质量达到太阳质量的10—100万倍,因此,它们是银河系内温度最低但是质量却最大的天体.在银河系中,分子云分布在银道面附近标高为100秒差距的范围.大尺度的分子云与年轻的OB星和电离氢区(亮星云)成协,通常被称为分子云复合体^[6].对比光学消光的分布后也发现,光学暗星云实际上是浓密的分子云.这些暗星云之所以产生消光是由于混杂于分子气体中的尘埃颗粒吸收和散射背景恒星的星光引起.所以,星际气体中混杂着尘埃物质,它们包含了大部分的重元素.

尽管氢分子占星际分子数量的绝大多数,但是由于它不发射低频电磁波,因此对冷且稀薄的星际分子云我们不能直接观测到它.丰度仅次于氢分子的是CO.它在气体总密度超过100个分子/cm³以上

时就能够发射短毫米波辐射从而被探测到.这一密度与分子云能够自我屏蔽宇宙线的离解而稳定存在的临界密度相接近.这种巧合使得我们能够通过CO分子的观测毫无遗漏地探测到星际空间存在的分子云.

迄今为止,从星际分子云中发现的分子和自由基共有119种,包括H₂, CO, H₂O, NH₃, CS, HCN, HCO⁺, H₂CO, CH₃OH等等^[7].这些分子结构的不同决定了它们可以用来探测分子云不同区域的物理量.观测发现,银河系中分子云的总质量约为10—30亿倍的太阳质量^[8].这一质量也只有银河系恒星质量的百分之一左右.即便是如此少的介质,也提供了恒星形成必不可少的原料,维持着整个银河系中恒星世界的生死循环.

在延展的分子云中时常发现,分子气体的分布在不同尺度上表现得极不规则.分析表明,投影分子云的面积A和周长P之间存在分数维的关系.如果用分数维数来表示,则维数=1.25—1.79,并且这一关系在4个量级的尺度单位上成立,表明分子云内部结构很复杂^[9].重要的是,上述关系与湍动大气的结构类似,暗示湍动决定着分子云的结构.分子云的周围也存在高度规则的大尺度磁场.无论是湍流还是磁场都将对行星系统的形成产生决定性的影响.实际中天文常用“分子云核”这一概念来表述星际分子云内部密度增强的那些团块区域.分子云的团块结构还表现在几乎任何一条分子谱线所探测的分子云其形状或边界都不同于另一条谱线.

从星际分子谱线观测得到线心速度和谱线宽度等测量值.观测发现,分子云的速度场包含规则的速度场和无规则速度场两种主要成分^[10].典型分子云的热温度为20K左右,而速度场是湍动的.这种超声速湍流运动普遍存在于星际分子云中.超声速湍流运动是强耗散运动.对典型的分子云和分子云复合体,耗散时标在十万到百万年之间.因此,在星际分子云中,湍流的热耗散提供了气体的一种主要的加热机制.通过观测分子云附近的年轻星发现,分子云的年龄远大于上述时标.因此,强耗散的湍流的存在要求不断地有能量来补充.

3 原恒星和它周围的气体盘的形成

万有引力是使致密的分子云核向内坍缩并最终导致形成恒星的作用力.分子云核微小的收缩会导致温度上升.低温的分子气体和尘埃对于自身的辐

射而言是高度透明的,因此,这种温度的增加很快就通过辐射冷却而降低,使得收缩可以继续进行^[11].抵抗引力收缩的力是热压力,它依赖于温度.因此,当一个分子云核超过 Jeans 临界质量以后,热压力不能抵御引力,分子云核的中心附近变得不稳定,坍缩就不可避免地经常发生.从观测到的星际条件分析,分子云中可以形成质量在百分之一到几十倍太阳质量的恒星.

坍缩一旦发生,气体就以近乎自由落体的方式掉向中心,时标约为 $3 \times 10^7 / \sqrt{n}$ 年, n 是气体的每立方厘米数密度.从一个具有初始密度梯度的分子云核开始的坍缩应当是“由里向外”进行^[12].当中心区域密度上升到一定程度时,气体开始变得不透明,温度急剧上升并能够抵抗坍缩,形成一个处于流体静力学状态的核心.这种高温高密的核心就是最初的原恒星.对实际的分子云核的密度,从致密的分子云核坍缩到一个中心呈流体静力核的过程在自由落体时间内完成,只有短暂的几万年时间.理论计算表明,中心原恒星起始的质量很小,绝大部分的物质需要经过几十万年间动态吸积过程逐渐到达原恒星^[13].

原恒星不断吸积包围着它的母体分子物质.被吸积的物质到达恒星附近时释放其引力能.这种引力能是原恒星的主要辐射源泉.虽然中心原恒星的自身温度在逐渐上升,但是它仍然被厚密的冷气体所包围.原恒星的辐射被厚密的冷气体吸收,再在远红外以及更长的波段辐射出来.从而在观测原恒星时,通过远红外和亚毫米波段的探测能够比较清楚地显现原恒星及其周围的结构^[14].

从分子云的观测结果我们知道,处于大尺度湍动状态的星际分子云在其局部存在角动量.除角动量以外,还存在贯穿整体的磁场.它们的存在必然影响原恒星坍缩的结构.无论是角动量还是磁场的存在都使得气体下落时逐渐偏离球对称^[15].在自由落体过程中,磁场也不能有效地传递角动量.流体力学计算模拟表明,任何小量的初始角动量都会导致原恒星周围形成一个旋转的盘,并且在初始自由下落结束,中心形成原恒星的瞬间,大部分物质都落在盘上.它们通过盘面的吸积逐渐进入原恒星^[16].

4 观测原恒星和其周围的吸积盘

寻找原恒星成为天文观测的一个主要目标.20世纪70年代观测寻找原恒星的工作曾从亮红外源

开始,着重寻找引力坍缩阶段物质下落的证据.所选择的年轻星或红外源多位于亮星云附近^[17].经过一段时间的尝试很快发现人们寻找的并非真正的原恒星.这些光度在太阳光度1000倍以上的红外源几乎都是高度演化了的年轻恒星,有些已经到达主星序(成年恒星的位置),释放出大量的紫外电离光子.由于大质量恒星演化的时标很短,观测上难以找到处于原恒星阶段的对应体.

观测原恒星坍缩过程中气体向内的运动或原恒星吸积流的运动,理所当然地是观测研究的最直接的企图,并且已经有过很多这样的尝试.在 B335 等天体的周围已经发现了坍缩气体运动的某些证据^[18].实际上,在目前的望远镜仪器条件下直接无误地观测原恒星的吸积流是件困难的事情.由于坍缩是由里向外进行的,处于初期自由落体的气体密度很高但尺度极小,目前望远镜的空间分辨本领还远不够,难以“聚焦”到这样小的尺度上.目前毫米波和亚毫米波分子谱线观测只能检测密度比较低的外层区域,所探测的实际上是远离流体静力核的外层物质而很少是中心的自由落体物质.此外,由于处在吸积状态的原恒星掩埋于母体分子云中,而母体分子云本身存在足够的湍流谱线加宽,使得在观测中无法分离出吸积流的成分.

尽管无法直接观测原恒星的吸积流,但原恒星辐射的能谱分布(也就是辐射能量随波长的分布)提供了证认的可能^[19].暗云核中的红外源的能谱分布显示原恒星绝大部分的辐射来自长于 $10\mu\text{m}$ 的波长区域.发射的峰值位于 $30\mu\text{m}$ 附近,对应的发射体的温度只有 40K.这种发射来源于原恒星周围尘埃的热发射^[20].

在拟合原恒星能谱分布的时候发现,球对称的吸积物质所产生的能谱分布在解释中红外波段的发射时,模型给出的流量达不到观测的值.而带有吸积盘的修正模型则能很好地解释包括中红外波段的能谱分布^[21].这一事实说明了吸积盘在原恒星结构中的重要性.具体他说,原恒星通过吸积盘向中心输送物质.这时,原恒星吸积盘本身具有很强的发射,从具体模型计算得到盘的光度占整个系统光度的一半.这个阶段的盘自身很活跃,甚至发出很强的 X 射线辐射.

通过具有角秒级分辨率的地面毫米波干涉阵设备可以获得很高的空间和速度分辨本领.这些设备在20世纪90年代中期开始获得对年轻恒星周围气体盘的全新的观测结果.在年轻星 HL Tau 的周围首

先观测到气体的分布接近扁平状的盘,盘的尺度大约为 2000 天文单位(天文单位是天文学中计量距离的另一实用单位,是地球和太阳间的平均距离;1 天文单位约等于 1.5 亿千米)。细致的观测发现盘的速度结构要复杂得多,既存在多普勒运动成分,同时也存在自由下落的速度。从许多同类型的观测确认了原恒星通过盘面吸积物质的事实(参阅 Sargent 和 Beckwith 于 1994 年发表的阶段性评述文章^[22])。

毫米波分子谱线观测到的盘本身并不处于力学平衡状态,气体通常是接近自由下落的,角动量的作用不显著^[23]。随着气体向内部进一步下落,角动量的作用越来越重要,最终气体将不再向内自由降落,而稳定在半径大约为 100 天文单位的一个平衡半径上。坍缩球的初始质量的大部分都集中在这个尺度的气体盘内。平衡半径实际已经接近于太阳系的尺度(约 50 天文单位)。这样一个尺度的盘加上中心的年轻恒星共同构成了原始行星系统。哈勃太空望远镜在邻近的恒星形成区拍摄到了很多这样的系统^[24]。大样本观测统计表明,几乎近一半的小质量恒星属于原始行星系统。

80 年代的毫米波天文观测令人惊异地发现,原恒星喷射出超声速的气体^[25]。从光学、红外以及射电观测都能发现这种喷流普遍存在^[26]。喷流从原恒星盘的两极发出,速度达到每秒几百公里,准直性很高^[27]。喷流的时标普遍说明它们几乎是与原恒星的坍缩同时发生的。喷流随着年龄的增长逐渐加宽,它们在向母体分子云输入能量,驱散原恒星周围的物质,包括盘内的轻气体。动力学时标的统计表明,这样的过程要持续十至百万年。通过向内的吸积和向外的喷流的联合作用,原恒星在上述时间内逐渐显现出来,成为光学上可以看到的恒星。

随着年轻星周围盘物质的演化,盘的吸积率逐渐下降,较轻的气体物质比例也逐渐减小。尘埃物质不断积累并成为主要的成分,尘埃颗粒逐渐变大,相互连接成行星籽物质。这些物质是形成行星、彗星、小行星等天体的原料。在年龄约百万年的恒星周围,原先以气体为主导的盘逐渐演变成为以尘埃为主导的盘。一个典型的例子是红外天文卫星 IRAS 发现的围绕恒星 β Pic 周围的尘埃盘^[28]。随着尘埃颗粒的变大,它们吸收和再发射长波辐射的能力也逐渐消失,观测者能更多地看到来自恒星本体的辐射。巡天统计表明,在 1 千万年至 4 亿年间,小颗粒的尘埃逐渐消失^[29]。理论也预测,尘埃盘在这个时间段内逐渐形成行星,内行星出现得比较早。

从普遍存在的原恒星盘到行星系统的形成在逻辑上并不是直截了当的。目前对这一过程的细节还了解得很少。观测上也还缺乏从拱星盘演化到行星的证据。1997 年,在恒星 55 Cancri 周围发现了一颗 1.9 倍木星质量的行星^[30]。更重要的是,ISO 天文卫星随后在它的周围同样发现了尘埃盘^[31]。这种尘埃盘与行星共存的年轻天体系统存在的例子表明,从原行星系统的尘埃盘到行星的形成这一学说的关键环节可能正开始得到具体的验证。预计今后对这种既存在盘又存在行星的系统的研究是我们研究行星系统起源的热点。

在现有的恒星形成理论中,对形成的天体所能达到的最小质量没有能够给出精确的限制^[32]。在形成恒星的同时,也可能形成很多质量远远小于恒星的天体。众所周知,恒星是通过内部核反应实现自身发光的天体。这种能够维持自身稳定的核反应的恒星其最小质量为 57 倍的木星质量。质量介于 13—57 倍木星质量的星体在引力收缩后能够进行局部核反应,主要是氢的同位素氘以及锂的燃烧。不过这一过程很短暂,也不能使星体的温度上升很多。这种天体称为褐矮星。90 年代中期开始发现这种褐矮星。第一个确定的例子是 1995 年发现的 Giese 229B,距离我们 5.7 秒差距^[33]。Giese 229B 的质量是木星质量的 30—55 倍,表面绝对温度只有 900K,它以 5 个天文单位的距离绕它的主星公转。它的大气的主要成分是 H_2 , H_2O , CH_4 和 N_2 等分子气体^[34]。在仅仅 6 年的时间里,发现的褐矮星就已经超过 50 颗,这个数量还在急剧增加。与褐矮星的普遍性一样,质量更小的行星也可能普遍存在。Mayor 和 Queloz 于 1995 年首次从 51 Peg(一颗位于飞马座的恒星)发现了围绕太阳系外的恒星公转的行星^[35]。从发现的褐矮星或行星来看,它们的质量大体介于 0.25—70 倍的木星质量之间。这些天体绕恒星公转的轨道半径在 0.04—1000 天文单位之间。可以认定,伴随众多恒星形成的同时也普遍形成绕这些恒星公转的褐矮星和大行星。

目前还几乎不能认定围绕年轻恒星的尘埃盘是形成行星的惟一方式,例如,是否存在孤独的褐矮星甚至是行星质量的天体? 回答可能是肯定的。2000 年 10 月份出版的美国 Science 杂志报道了在猎户星云里发现了一批年轻的、孤立的行星类天体^[36]。最小的天体的质量只有 5—10 倍的木星质量。这些发现虽然有待证实,但对大范围的搜寻起了引导作用。

5 未来展望

对恒星以及行星系统形成的天文研究可能还只是开始,很多基本问题没有得到解决^[32]。如同天文学其他领域的研究一样,研究行星系统的形成是人类对宇宙奥秘的知识渴求的一种满足。由于人类自身生存于行星环境中,使得行星系统的形成以及与这些行星上生命的起源相关连的知识更具有特殊的价值。至今为止,人类还处于一个知识的孤岛,一个没有(或者说不知道是否存在)邻居的独门独院。改变整个人类的生存和生活方式的一种突破在于找到我们的宇宙邻居,这是我们人类亘古绵延的遐想。

星际分子云、恒星以及行星系统形成的研究清楚地表明,新知识的获得是通过对观测极限的一次次挑战而获得的。揭示宇宙奥秘很强烈地依赖于建造和使用极限观测设备以及多波段的配合,而其中高技术的发展对现代天文观测和发现起着至关重要的推动作用。天文学也在这个过程中强烈地刺激着高技术,包括航天等技术的发展和运用。一个例子是超导接收机在射电天文望远镜中的应用。20世纪90年代以来,在毫米波频段上的超导接收机的噪声温度显著地接近于量子极限,为恒星和行星系统形成的观测提供了一种必不可少的重要手段^[37]。这样低的仪器噪声加上干燥的台址使得毫米波探测的灵敏度大大提高。多波束接收机的应用也从另一个方面提高了望远镜的探测效率。中国科学院紫金山天文台目前也能够在这一频段上建造和运行最灵敏的毫米波望远镜,用中国惟一的一架14m的毫米波望远镜正对银道面分子云进行大规模的巡天观测,描绘我们银河系内恒星形成区的整体分布和物理化学性质以及分子外流等,从事研究分子云内的速度结构和分子团块的质谱等工作。

需要看到,今后的观测重点将发展到亚毫米波和中远红外波段。高技术的应用和大型设备的投入将起到更为关键的作用。国际上接近完成的首台亚毫米波干涉望远镜阵列SMA和已经开工的南天超级大阵ALMA将为行星系统形成提供最强有力的观测设备。这些耗资巨大的跨国设备将通过国际合作共同建造完成。

国际空间计划的发展,包括未来的太空仪器SIRTF, FIRST, NGST等大型国际空间卫星项目所带

来的红外和亚毫米波段的新天图将有助于回答恒星和行星系统形成所面临的许多重要科学问题。在新的世纪里,我们也期望中国可以在这样一个人类共同关心的科学前沿作出一定的贡献。

参 考 文 献

- [1] Joy A H. Publ. Astron. Soc. Pacific, 1942, 54 :15
- [2] Becklin E E, Neugebauer G. Astrophys. J., 1967, 147 :799
- [3] Barrett A H. IEEE Trans., 1964, AP-12 :822
- [4] Cheung A C, Rank D M, Townes C H *et al.* Phys. Rev. Lett., 1968, 21 :1071
- [5] Wilson R W, Jefferts K B, Penzias A A. Astrophys. J., 1970, 161 :L43
- [6] Solomon P M, Sanders D B, Scoville N Z. In: Burton W B ed. IAU Symp 84, The Large Scale Characteristics of the Galaxy. Reidel: Dordrecht, 1979. 35
- [7] Irvine W M. Space Sci. Rev., 1999, 90 :203
- [8] Dame T M, Ungerechts H, Cohen R S *et al.* Astrophys. J., 1987, 322 :706
- [9] Elmegreen B G, Falgarone E. Astrophys. J., 1996, 471 :816
- [10] Larson R B. Mon. Not. Royal Astron. Soc., 1981, 194 :809
- [11] Davidson K, Harwit M. Astrophys. J., 1967, 148 :443
- [12] Shu F. Astrophys. J., 1977, 214 :488
- [13] Stahler S W, Shu F H, Taam R E. Astrophys. J., 1980, 241 :637
- [14] Beichman C A, Myers P C, Emerson J P *et al.* Astrophys. J., 1986, 307 :337
- [15] Mestel L, Quarterly J. Royal Astron. Soc., 1965, 6 :161
- [16] Terebey S, Shu F H, Cassen P. Astrophys. J., 1984, 284 :529
- [17] Wynr-Williams C G. Ann. Rev. Astron. Astrophys., 1982, 20 :587
- [18] Zhou S, Evans N J, Kompe C *et al.* Astrophys. J., 1993, 404 :232
- [19] Myers P C, Ladd E F. Astrophys. J., 1993, 413 :L47
- [20] Andre P, Ward Thompson D, Barsony M. Astrophys. J., 1993, 406 :122
- [21] Adams F C, Lada C J, Shu F H. Astrophys. J., 1987, 326 :825
- [22] Sargent A I, Beckwith S. Astrophys. Space Sci., 1994, 212 :181
- [23] Yang J, Ohashi N, Yan J *et al.* Astrophys. J., 1997, 475 :683
- [24] Ó Dell C R. Science, 1993, 259 :33
- [25] Snell R L, Loren R B, Plambeck R. Astrophys. J., 1980, 239 :L17
- [26] Lada C J. Ann. Rev. Astron. Astrophys., 1985, 23 :267
- [27] Mundt R, Fried J W. Astrophys. J., 1983, 274 :L83
- [28] Smith B A, Terrielle R J. Science, 1984, 226 :1421
- [29] Strom K, Strom S, Edwards S *et al.* Astron. J., 1989, 97 :1451
- [30] Butler R P, Marcy G W, Williams E *et al.* Astrophys. J., 1997, 474 :L115
- [31] Dominik C, Laureijs R J, Jourdain de Muizon M *et al.* Astron. Astrophys., 1998, 329 :L53
- [32] Shu F H, Adams F C, Lizano S. Ann. Rev. Astron. Astrophys., 1987, 25 :23
- [33] Nakajima T, Oppenheimer B R, Kulkarni S R *et al.* Nature, 1995, 378 :463
- [34] Kulkarni S R. Science, 1997, 276 :1350
- [35] Mayor M, Queloz D. Nature, 1995, 378 :355
- [36] Osorio M R, Bejar V J, Martín E L. Science, 2000, 290 :103
- [37] Noguchi T, Shi S. In: Seiber B ed. Handbook of Applied Superconductivity. IOP Publ., 1998. 1899—1912