

ALMA-QUARKS项目首批成果发布——揭示大质量恒星形成区的精细结构

发布时间: 2024-12-05 | 【大】 【中】 【小】 | 【打印】 【关闭】



太阳只是银河系千亿恒星中最普通的一员，是“个头”比较小的矮星。银河系或者宇宙中存在比太阳个头大几十倍甚至上百倍的恒星。大质量恒星特指那些质量大于8个太阳质量的恒星，它们虽然稀少，但通过超新星爆发、电离氢区、强星风和紫外光子辐射等深刻影响着星系的结构和物质演化。目前天文学家观测到的最大质量恒星是位于大麦哲云系的BAT99-98和R136a1，质量可达200倍太阳质量。然而，大质量恒星是如何累积如此巨大的质量还是一个未解之谜。

大部分大质量恒星形成的区域分布在远离太阳系(>3260光年)的银盘上。这些区域消光严重，环境复杂，传统的光学观测无能为力。此外，相对太阳这样的矮星，大质量恒星形成时标要短的多，只有百万年，并倾向于“抱团形成”，这大大增加了观测的难度。只有超高分辨率和超高灵敏度的毫米波/亚毫米波望远镜干涉阵列(如: ALMA)才能够细致解析成大质量恒星场所的复杂气体结构及物理过程。然而，之前的高分辨率观测大多针对个别或者小样本的研究，而缺乏系统的大样本观测研究，这让天文学家无法全面的了解大质量恒星形成所涉及的复杂物理化学过程。

中国科学院上海天文台刘铁研究员领衔的国际团队，从2019年开始，利用世界上最先进的毫米波/亚毫米波干涉阵ALMA，开展了针对大质量恒星形成区的3毫米观测项目(ATOMS: ALMA Three-millimeter Observations of Massive Star-forming regions)，首次对140余活跃的恒星形成区进行了超高分辨率的观测，通过无偏的统计性研究系统研究了这些区域内部气体的分布及运动。然而ATOMS项目的角分辨率只有2角秒，尚不足以探测大质量原恒星周围的气体结构，如吸积盘。有鉴于此，从2021年起，该团队再次申请ALMA，在更短的1.3毫米波段，对同一目标开展了更高分辨率(0.3角秒)的观测，即QUARKS(Querying Underlying mechanisms of massive star formation with ALMA-Resolved gas Kinematics and Structures)项目。在2024年6月，QUARKS项目完成了全部数据采集工作。基于ATOMS和QUARKS数据的联合分析工作正在陆续展开，有望慢慢揭开大质量恒星形成的神秘面纱。

近期，该项目组在著名天文学期刊(RAA,ApJ Letter,ApJ)上连续发表了四篇学术论文，发布了QUARKS项目的首批重要成果：解析了大质量恒星形成区的气体结构和云核分布，刻画了大质量恒星形成中致密气体装载过程；新发现一例70倍太阳质量大小的无星云核及内部分裂；探测到丝状分子云内部异常纤细的纤维状结构。

1. 解析大质量恒星形成区的气体结构及云核分布

通过联合分析ATOMS和QUARKS数据，项目组系统揭示大质量恒星形成区的气体结构和致密气体云核的空间分布。ATOMS数据和QUARKS数据具有很强的互补性，联合分析这两组数据可以让我们更加全面的了解大质量恒星形成区内部不同性质的气体和尘埃(图1)。ATOMS项目的3毫米波段连续谱以及射电复合线可以很好的示踪电离氢区，而QUARKS项目的1.3毫米波段连续谱和分子谱线则可以更好的示踪更加年轻的致密气体云核。“致密云核是恒星形成的最小单元，高分辨率的QUARKS数据可以让我们在遥远的大质量恒星形成区中分离一个云的云核，并研究这些致密云核的空间分布规律及其内部的恒星形成活动。”论文1第一作者，QUARKS项目协调人上海天文台刘铁研究员说：“比如，我们在银河系恒星形成最活跃的SgrB2(M)不到20万日地距离的狭小区域就分离了约100个致密云核”。项目组基于QUARKS数据构建一个包含数千个云核的大样本，系统研究云核塌缩形成原恒星的机制。

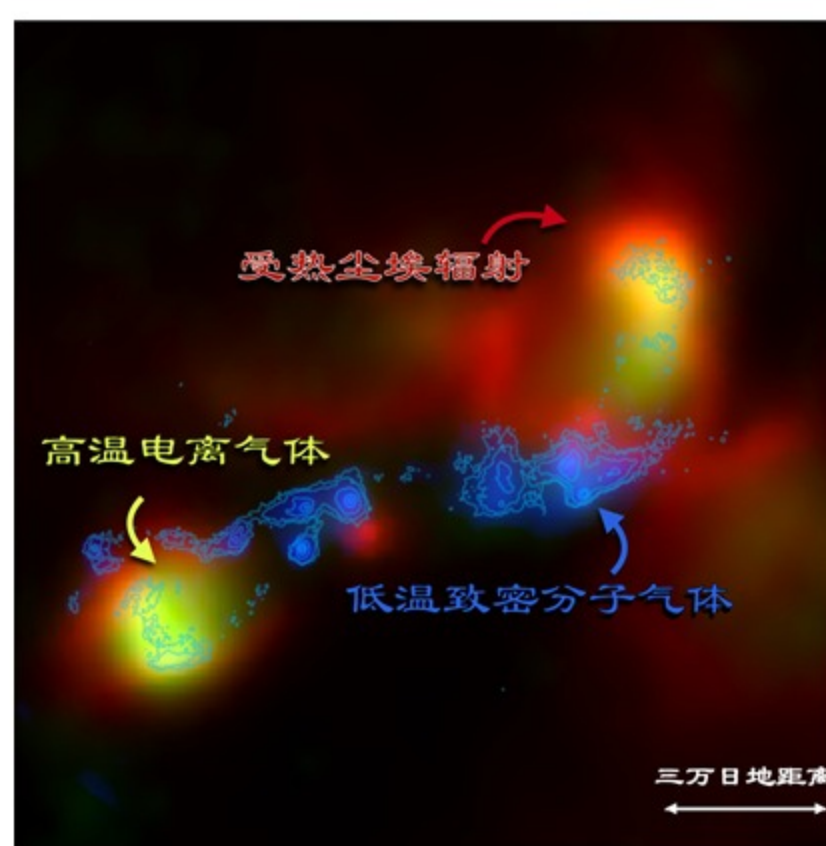


图1. ATOMS和QUARKS数据联合揭示大质量恒星形成区内部不同性质的气体及尘埃分布。

2. 刻画大质量恒星形成中致密气体装载过程

利用阿塔卡马致密阵(ACA)观测的优势——恢复大尺度的结构的同时获取更大的观测视场，QUARKS项目组对139个活跃的大质量恒星形成区进行了致密气体系统搜寻。在星际空间中，由于氢分子无电偶极矩因此没有转动跃迁发射，在冷气体中不可见，而尘埃相对于氢分子的丰度较为恒定，约为1/100，因此常用于示踪致密的气体发射。使用ACA位于1.3毫米灵敏度的连续谱观测，我们共解析了208个致密的尘埃发射团块。利用分子探针甲醛(H₂CO)的三条转动跃迁发射，我们模拟了局域的气体环境，其中气体温度约为20至140开尔文，并进一步计算分子气体质量。结合前人基于单天线对于大尺度结构的研究，我们构建了一个跨越0.01至10 pc尺度的多尺度样本，并发现大质量恒星形成区在1-10 pc应该主要由湍动主导，从而形成较为平坦的密度轮廓。而随着尺度减小，引力开始占据主导并超过湍流，产生自相似的密度结构和陡峭的密度轮廓。这种自相似的结构进一步被一致的致密气体气体比例(DGF)所证实，即我们发现不论致密结构多大，其占据母结构的质量比例约为6%。利用该样本包含跨越数个量级质量、光度，且位于不同演化阶段的优势，我们能够进一步解析DGF存在的较大的弥散。利用光度质量比(L/M)作为演化阶段的粗略指标，我们惊喜地发现DGF的弥散能够很好的被L/M解释，即随着L/M增加，致密气体的比率有着显著的增加(从1%提升至10%；图2)。“这一相关性从统计学显著的角度绘制出了大质量恒星形成区动态图景。”论文2第一作者，北京大学博士研究生说：“正是QUARKS项目大样本的优势使类似的统计性研究工作成为可能，这在以前的个别及小样本研究中是很难实现的。”

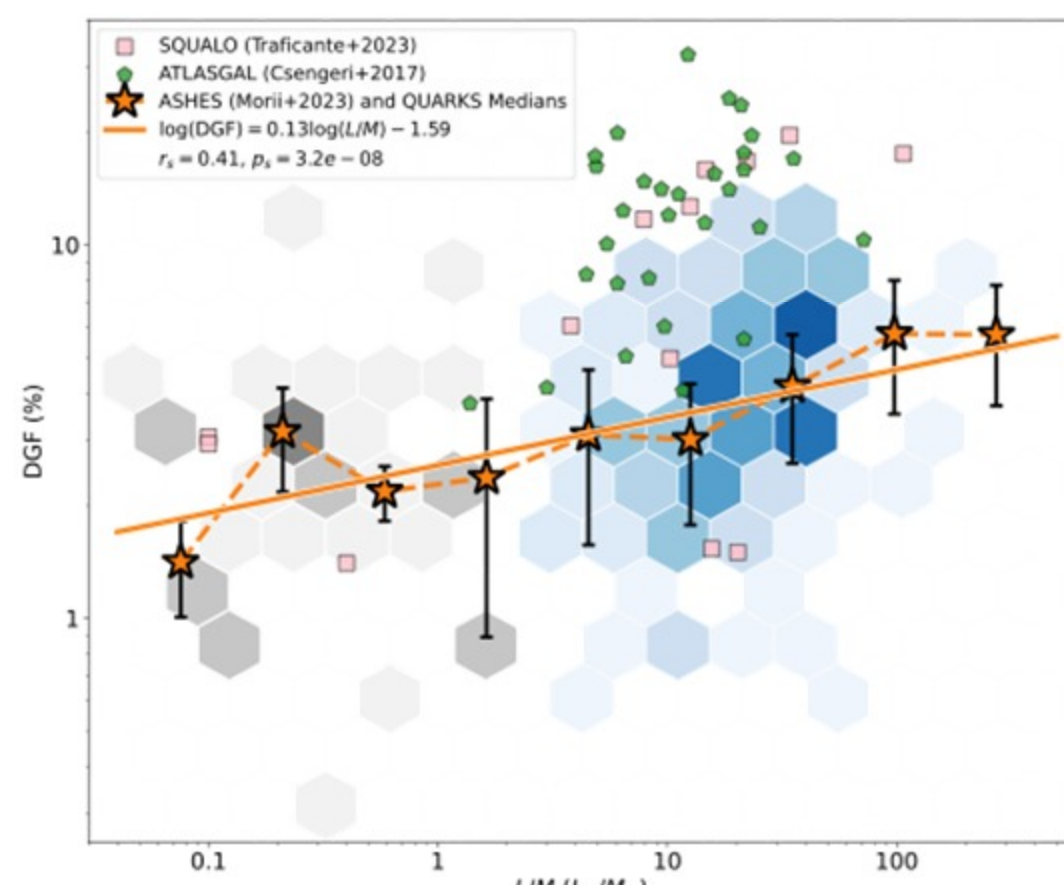


图2. 致密气体比率(DGF)与气体团块质光比(L/M)的关系。质光比越大，气体、团块演化阶段越晚，而DGF相应也越大。

3. 搜寻大质量星前云核

大质量恒星如何诞生仍然是天文学领域的一大争议。不同恒星形成理论的主要分歧在于，大质量恒星是否直接从一个巨大质量的星前云核快速塌缩形成，还是从较小的云核起步，通过不断吸积周围物质逐渐成长为大质量恒星。然而，大质量星前云核的搜寻工作一直存在巨大的瓶颈，主要是因为大质量星前云核也演化时标可能很短(几千年)，因此极为罕见。目前，仅有几例大质量星前云核后选体被报道，但都还没有得到最终确认。借助QUARKS巡天与先前的ATOMS巡天项目，以及射电甚长基线干涉技术的天体测量观测，项目组在IRAS 18507+0121这个源中发现了一个大质量无星云核。这个云核的总质量约为太阳质量的70倍，半径约为日地距离的4400倍。它的特殊之处在于发射谱线极少，表明内部尚未开始恒星形成活动，意味着它是一个大质量星前云核的有力候选体。更高分辨率的观测还揭示，这个云核已经开始碎裂，形成了两个极高密度的子结构，其密度高达每立方厘米约一亿个氢分子(10¹⁷/cm³)，即所谓的“恒星胚胎”(图3)。这表明该星前云核正在孕育一个大质量多星系统。“这是首次在一个大质量无星云核内部探测到恒星胚胎，并观测到胚胎的分裂”，论文3第一作者，上海天文台博士研究生袁晓枫说：“这项工作给了我们极大的鼓舞，利用QUARKS数据，将来我们可以系统地去搜寻大质量无星云核并进一步研究大质量恒星形成的初始条件。”

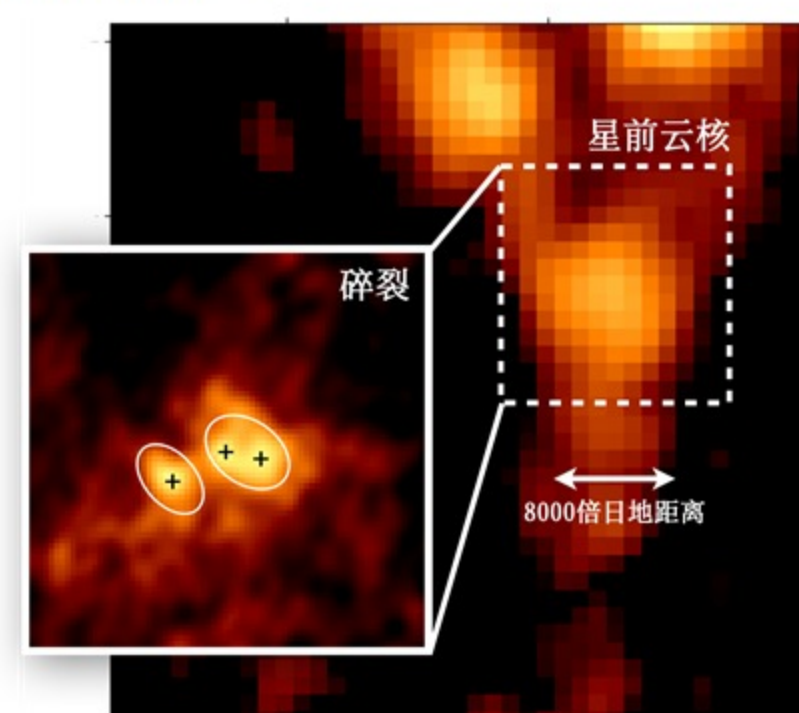


图3. QUARKS项目探测到的首个大质量无星云核及其分裂。该云核处于一个高密度的拥挤的环境中，只有QUARKS项目类似的分辨率才能将其与周围环境分开并解析其内部的结构。

4. 丝状分子云内部异常纤细的纤维状结构

之前赫歇尔空间望远镜(Herschel)在近邻分子云中无处不在的丝状气体结构，而且这些丝状结构具有典型的宽度，约为0.1 pc(约2万日地距离)。通过分析ATOMS(~2角秒)和QUARKS(~0.3角秒)项目的ALMA观测数据，我们解析了IRAS 08448-4343气体云(下称: IRS-17)的内部结构，探讨了小尺度纤维状结构在恒星形成过程中的作用(图4)。在IRS-17气体云中，ATOMS的3毫米连续谱图像揭示了一个亚秒差距长度(约0.26pc)的丝状结构(IRS-17丝状体)。利用更高分辨率的QUARKS数据，我们惊喜的发现IRS-17丝状体中，存在7条速度相干的纤维状结构和29个致密云核。这些纤维状结构异常纤细，它们长度约为4500日地距离，宽度约为1400日地距离，远远小于Herschel发现的丝状气体结构的宽度。其中，我们识别出四条已经形成至少三个致密云核的纤维状结构。这表明，这些致密云核的形成与纤维状结构之间有明确的关联。此外，在这些纤维状结构中，我们观察到致密云核的周期性分布，这与线性等温圆柱体碎裂模型相符。然而，在ATOMS项目观测到的较大尺度的IRS-17丝状体中，3mm云核并未展现出这种周期性分布的模式。这一现象反映出这些异常纤细的纤维状结构在丝状体碎裂成致密核的过程中扮演了至关重要的作用。换句话说，IRS-17丝状体可能经历了一个中间碎裂步骤，即先形成纤细的纤维状结构，再从纤维状结构中形成致密云核。“这些发现为我们理解恒星形成过程中丝状体的破裂与纤维状结构形成的机制提供了新的视角，并为恒星团形成和演化的研究提供了宝贵的线索。”论文4第一作者云南大学博士生杨东庭说：“未来我们将利用QUARKS数据，系统研究更大样本的丝状分子云，并解构其内部异常纤细的纤维状气体结构。”

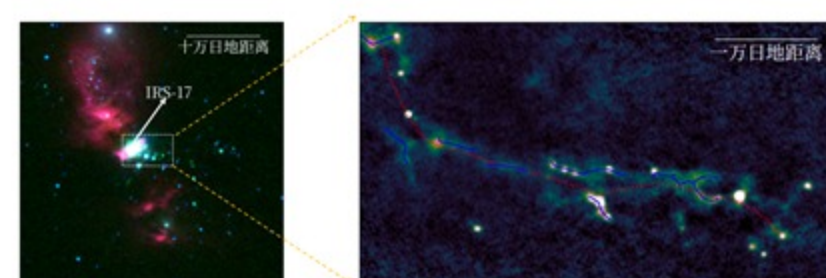


图4. 左: IRS-17分子云在红外波段的图像;右: ALMA观测的1.3毫米连续谱图,红色虚线是丝状分子云的骨架,蓝色是异常纤细的纤维状结构

刘铁总结到：“我们今年6月份才完成QUARKS项目的全部数据采集工作，数据处理及分析正在紧锣密鼓的进程中，我们探索大质量恒星形成奥秘的奇妙旅程才刚刚开始。利用ATOMS及QUARKS项目数据及更高分辨率的后随观测数据，我们有望在不远的将来建构大质量恒星形成的普遍理论”。

科研文章链接:

- 论文1: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1674-4527/ad0d5c>
- 论文2: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1674-4527/ad3dc3>
- 论文3: <https://iopscience.iop.org/article/10.3847/2041-8213/ad19c3>
- 论文4: <https://iopscience.iop.org/article/10.3847/1538-4357/ad8919>

科学联系人: 刘铁, 中国科学院上海天文台, liutie@shao.ac.cn

