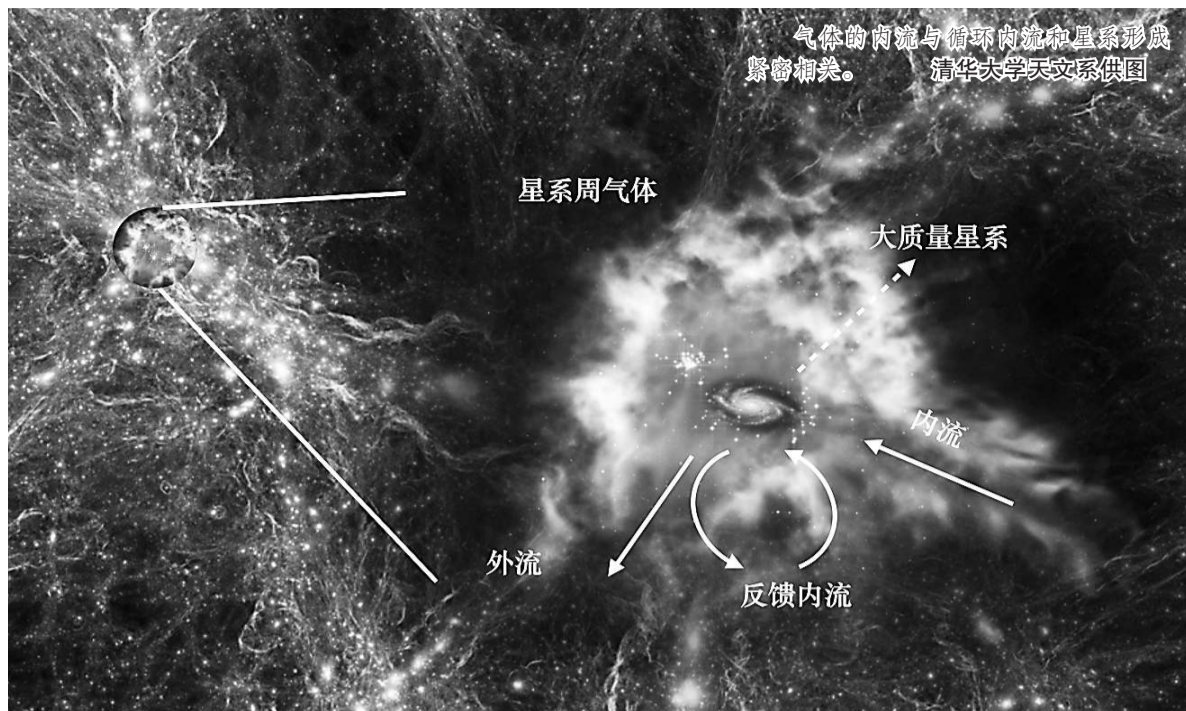


一方面,随着恒星形成和星系中央超大质量黑洞吸积物质,超新星爆发、活动星系核反馈活动等星系中的高能活动会将星系中的重元素物质抛射到大尺度环境系统中,形成星系外流。另一方面,在暗物质晕强大的引力作用下,星际空间的气体会源源不断地回流入星系内,也就是星系内流。因此在一系列相互作用下,星系、气体以及它们的暗物质晕共同组成了星系生态系统。



# 循环生态系统为新星诞生提供“粮食”

◎本报记者 华凌

在美国夏威夷海拔4200多米的莫纳克亚山顶,凯克望远镜一直“望”着浩瀚深邃的星空,不断探究宇宙的奥秘。

不久前,中国天文学家通过凯克望远镜上的宇宙网成像器,结合全波段观测,研究了宇宙早期形成的大质量星系“猛犸象1号”星云周围的气体动力学结构,进而模拟勾勒该星系的生态系统形成图景。相关发现刊登在最新一期的《科学》期刊上。

据悉,美国在其最新的天文学十年规划中,特别将“宇宙生态系统”,作为未来热点问题提出。其中一个重要的问题,是大质量星系形成演化的机制问题。

事实上,像银河系这样的大质量星系是如何形成并演化的,其中的大质量天体又是如何诞生的,科学界至今也没能作出很好的解释。此次最新研究能否推动对于“星系生态系统”及星系演化机制的理解?科技日报记者采访了参与这项研究的清华大学天文系团队核心成员。

## 星系生态系统的外流与内流

宇宙的基本单位是星系,星系是由数量巨大的恒星系及星际尘埃组成。例如银河系就是一个包含恒星、气体、宇宙尘埃和暗物质,并且受到重力束缚的大星系。

“在一系列相互作用下,星系与星系周围气体(星系周介质)以及它们的暗物质晕共同组成所谓的星系生态系统。其中,气体对星系的影响至关重要。”论文第一作者、清华大学博士生张世武指出。

张世武解释说,在目前的星系演化理论框架下,星系处于巨大的暗物质晕之中。早期宇宙中星系的典型直径约为几万光年,而暗物质晕的典型直径约为几十万光年。因此,暗物质晕的体积比星系体积大3个数量级。天文学家观测发现,星系与暗物质晕之间遍布以氢原子/离子、氦原子/离子为主的气体,这就是星系周介质。其中,氢元素质量占比约为70%,氦元素质量占比约为20%。这些气体(介质)是星系演化与星系中恒星形成的原料,质量超过星系中恒星质量的总和。

张世武进一步解释说,目前的观测实验结果及理论模型认为,在演化过程中,星系与其周围环境密不可分。一方面,随着恒星形成和星系中央超大质量黑洞吸积物质,超新星爆发、活动星系核反馈活动等星系中的

高能活动会将星系中的重元素物质抛射到大尺度环境中,形成星系外流。

另一方面,在暗物质晕强大的引力作用下,星际空间的气体会源源不断地回流入星系内,进一步促进其中的恒星形成或超大质量黑洞增长,也就是星系内流。因此在一系列相互作用下,星系、气体以及它们的暗物质晕共同组成了星系生态系统。一些生态系统只存在单一的中央星系,也有些生态系统中存在着由中央星系和卫星星系共同组成的星系群。

## 早期宇宙中富含重元素

天文学家普遍认为,大质量星系系统中的内流效率极低,不可能存在普遍较强的恒星形成活动。然而,对早期宇宙的观测发现,很多大质量星系系统的中央星系存在剧烈的恒星形成活动,传统理论很难解释这一观测现象,因此宇宙早期大质量星系系统为何存在剧烈的恒星形成过程仍然是一个谜。

“对这类大质量星系生态系统中的气体进行直接成像,可以帮助我们了解其中的气体运动过程,从而揭开这一谜题。也就是说,在宇宙生态系统中,如果可以直接观测到星系吸积气体、形成恒星的细节,将大大促进对整个生态系统结构形成的理解。但外流往往很容易观测到,而对内流的直接观测实属罕见。”此次研究的牵头人、文章通讯作者、清华大学副教授蔡峥指出,“这是因为星系周介质的面亮度很低,这就需要利用目前最大的望远镜加上最灵敏的光谱仪,才能对其进行观测。”

为了直接给星系“粮食”(星系周介质)进行直接成像,揭示早期宇宙的生态系统,蔡峥团队联合一个国际团队,利用凯克望远镜上的宇宙网成像器,结合从X射线、可见光、红外到射电的全波段观测,对110亿光年外、早期宇宙中的超大气体星云“猛犸象1号”进行了深入研究。

“我们成功探测到星系周围气体的氢元素以及多种重元素辐射,并进一步估计出重元素的大尺度空间分布。这意味着在宇宙早期,星系周围气体已经富含重元素。”蔡峥表示。

由于数据比较丰富,研究团队与国际上几十名理论学家展开了深入讨论,尝试解释观测到的数据。起初,因为观测到的气体富含重元素,不少同行认为,气体运动学显示气体正在从内部喷向外部。然而结合几个国际上流行的星系外流模型,并不能很好地拟合观测到的

数据点。

正当研究团队百思不得其解时,团队成员之一、清华大学副教授许丹丹提出,或许旋转的、带有角动量的气体吸积(内流)能够解释观测数据。

许丹丹表示,被重元素增丰的气体通常都会被认为是在星系内部喷出来的。然而,从数值模拟中科学家发现,重元素丰度高的气体的确被外流带人大尺度星系周介质中,但相当一部分气体在暗物质晕引力和环境角动量的共同影响下,如喷泉一样,以纤维网形式旋进回流星系。

因此,研究团队通过循环内流模型,很好地解释了多个观测问题:被重元素增丰的气体,可以通过重元素(碳元素等)复合辐射、禁戒跃迁辐射有效冷却,从而形成恒星。这种冷气体流,可以一定程度解释大质量星系恒星形成之谜。

## 反馈气体“滋养”新生恒星

“这是一幅在宇宙尺度上演进的‘落红不是无情物,化作春泥更护花’。”蔡峥说,这一过程以前只出现在宇宙学的数字模拟中,但并没有引起人们的注意。此次是研究团队首次为星系如何与大尺度环境进行物质交换提供了清晰的图景,表明“循环气流”是驱动早期宇宙大质量星系形成的重要机制。

蔡峥解释说,正是由于从星系中被推出又返回星系的气体中含有大量重元素物质,这些物质相较于轻元素更容易冷却,因此大大提升了星系内部的恒星形成效率。星系中心黑洞把被重元素增丰的气体推向暗物质晕,后者如泥土一样,又把那些“施肥”的气体反馈给星系,“滋养”出一颗颗新的恒星。

通过这样一个观测结果,可以使星系生态系统、星系形成和演化机制逐渐清晰。蔡峥指出,从数值模拟和观测出发,我们认为循环内流机制可能普遍存在于早期宇宙的大质量星系生态系统中。本次的观测结果为星系生态系统理论提供了新视角,可能会推动后续对循环内流过程更深入的观测和理论工作。此次研究结果意味着星系的内外流过程可能并非相互独立的,循环内流可能是描述星系与环境物质交换更准确的图像。

蔡峥表示,今后,我们将针对更多不同质量、不同环境的大质量星系进行成像,并详细探究星系如何演化至今。此项研究对于人们深入研究诸如暗物质、暗能量等宇宙学难题也将起到一定的推动作用。

## 精确测量原子核质量 从新角度揭示中子星性质

◎本报记者 顾满斌 通讯员 颜鑫亮 周旭 王猛

广袤的宇宙包罗万象,有极其绚烂绚丽的超新星爆发,能吞噬一切的黑洞,还有个头极小却“体重超标”的中子星……

自20世纪60年代科学家首次发现中子星以来,人们对这个密度惊人的神秘天体充满了好奇,通过多种手段进行了大量探索。而在一篇发表于《自然·物理》杂志上的论文中,科学家通过精确测量原子核的质量,从新的角度揭示了中子星的性质。

### “大胖子”和“小不点”

中子星,可以说是一种极其“拧巴”的天体。它是一个“大胖子”,质量约为太阳质量的2倍;可同时又是个“小不点”,直径只有20千米左右。除了黑洞和一些假设天体(如白洞、夸克星、奇异星等)外,中子星是目前已知的、最致密的天体。中子星每立方厘米的物质足有亿吨重。

中子星是怎么形成的?科学家认为,当恒星寿命结束时,经过引力坍缩,在其核心会形成残余物,而中子星就是残余物的一种。如果残余的质量超过一定极限,不足以支撑其形成中子星,它就会继续坍缩,形成黑洞。

一旦中子星形成,它就不再主动产生热量,并随着时间的推移而逐渐冷却。不过,中子星仍可能通过碰撞或吸积邻近天体的物质进一步演化。

中子星的表面还存在强大的磁场和猛烈的X射线。I型X射线暴发生在中子星与伴星(通常是一颗红巨星)组成的双星系统中,是目前已知的最频繁的天体热核爆发过程,也是太空望远镜所能观察到的最亮的天文现象之一。中子星强大的引力将伴星中富含氢和氦的燃料吸积到中子星的表面。当这些燃料的温度和密度达到一定程度时,热核反应会被点燃,在10—100秒时间内释放出大量能量,形成X射线暴。

### 从原子核到中子星

X射线在逃离中子星的过程中需要克服万有引力的影响,将一部分自身能量转换为重力势能。该过程会导致X射线的频率不断降低,在光谱中表现为颜色从蓝到红,被称为引力红移。引力红移效应的大小与中子星自身的致密性条件息息相关。因此,X射线暴为研究中子星性质提供了重要窗口。

科学家主要通过测量每秒在单位面积上沉积的X射线能量,即X射线光度曲线,来观测X射线暴。然而,由于中子星存在引力红移效应,在地球上观测到中子星的X射线光度曲线和其表面的光度曲线存在差异。如果能准确得到X射线暴在中子星表面的光度曲线,并将其与地球天文观测数据进行比较,就可以得到中子星与地球的距离信息。此外,科学家还可以通过提取引力红移系数的大小,得到中子星致密性的相关信息。

而想要得到这些信息,能否准确模拟中子星表面的热核反应过程是研究的关键。快速质子俘获过程是驱动X射线暴的主要热核反应之一,这一过程涉及到一系列远离稳定线的短寿命中子原子核。其中,锆-64等原子核扮演着非常重要的角色,被科学家称为“等待点核”。

锆-64就像是核过程路径上的一个“十字路口”,是核反应进行到中等质量核区时遇到的一个重要的“拥堵路段”。锆-64附近的原子核质量,尤其是砷-65、硒-66的质量,对核反应的走向和能量释放具有重大的影响,并进一步决定了X射线暴灰烬中的元素丰度,以及光度曲线的形状和持续时间等。因此,精确测量锆-64附近原子核的质量,对于深入理解X射线暴和确定中子星的性质非常重要。

### 从实验室到宇宙星空

原子核的质量虽然极其轻微,却在中子星性质的研究中发挥着重要作用。中国科学院近代物理研究所原子核质量测量团队与合作者基于兰州重离子加速器冷却储存环,利用国际首创的新型质谱术,精确测量了一批关键原子核的质量,研究了中子星表面的X射线暴,从新的角度约束了中子星的性质。

2011年,近代物理所原子核质量测量团队首次测量了短寿命原子核砷-65的质量,它是锆-64的质子俘获产物,为研究快速质子俘获过程中锆-64“等待点核”问题提供了关键数据。但要想彻底明确锆-64周围的核反应流,明确锆-64的双质子俘获产物硒-66及其他附近原子核的质量也非常重要。

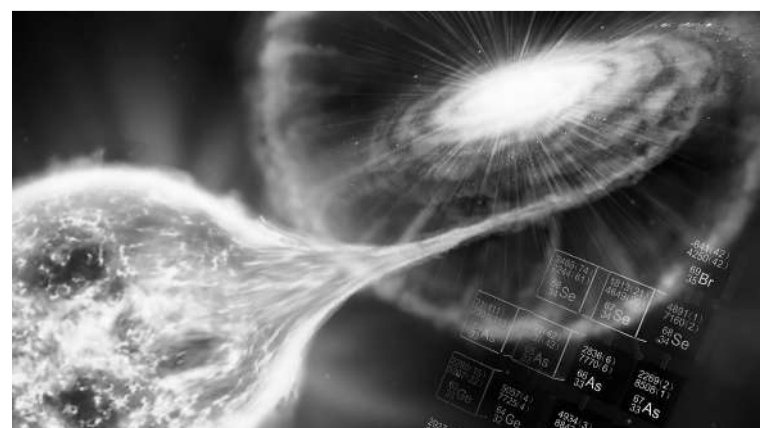
然而,这些原子核的产额极低、寿命很短,测量难度大,多年来相关研究一直未能所有突破。历经十余年努力,原子核质量测量团队研发了新一代等时性质谱术,团队将其命名为“磁刚度识别的等时性质谱术”。新型质谱术具有高精度、单离子灵敏、高效率、短测量时间、无背景污染等优点,是目前国际上最先进的短寿命、低产额原子核质量测量方法之一。

利用新型质谱术,近代物理所联合多家单位精确测量了砷-64、砷-65、硒-66、碲-67、锆-63等原子核的质量,从而在实验上首次确定了与“等待点核”锆-64相关的所有核反应能,更是国际上首次对砷-64和硒-66的质量进行测量,其他原子核的质量精度均得到提高。

通过研究新的原子核质量结果对X射线暴和中子星性质的影响,研究团队发现新的结果使快速质子俘获过程发生了变化,X射线光度曲线峰值增加、尾部持续时间延长。对比目前天文观测数据最丰富的、代号为GS 1826-24的中子星X射线暴观测光度曲线,研究团队发现该中子星与地球之间的距离比此前预计的要更远(需增加6.5%)、中子星表面引力红移系数也需要降低4.8%。

中子星表面引力红移系数的变化意味着中子星密度比预想的要低一些。另外,锆-64等原子核的质量变化导致快速质子俘获过程反应产物丰度分布发生变化,意味着X射线暴后中子星外壳的温度会比通常认为的更高。

中子星的性质研究是一个重要的前沿课题,可通过天文观测、重离子碰撞等不同方式进行研究。在此次研究中,科研团队通过精确测量原子核的质量,结合理论计算得到中子星表面更精确的X射线暴光度曲线,和天文观测比较,从新的角度约束了中子星的质量和半径的关系。



## 首个直接性原位探测证据支持 火星北部平原曾经存在过海洋

◎本报记者 吴纯新  
通讯员 王俊芳 梁睿华

由中国地质大学(武汉)地球科学学院教授肖龙领导的国际研究团队通过综合分析“祝融号”火星车搭载的多光谱相机获取的科学数据,首次在火星表面发现海洋沉积岩的岩石学证据,证明了火星北部曾经存在过海洋。

5月18日,相关研究成果以《乌托邦平原海洋沉积岩的证据:祝融号火星车

的观测》为题,在综合性期刊《国家科学评论》上发表。

### 全景图像记录海洋存在证据

目前的火星寒冷干燥,缺乏流水与生命痕迹,但数十亿年前的火星环境或许和今天大不相同。

过去的研究已证明,早期火星曾存在过大量的液态水。科学家通过地貌分析和数值模拟提出了火星古海洋假说,认为可能存在的古海洋区域形成了一个

特殊的海洋沉积地质单元,被称为北方荒原组。但该假说一直缺少原位探测数据的支持,因此火星北部平原是否存在过海洋一直在争议。

2021年,我国“天问一号”火星任务搭载的“祝融号”火星车成功着陆于火星北部平原东部的乌托邦平原南部边缘,位于前人提出的古海岸线附近的北方荒原组。

着陆以来,“祝融号”一直在向南北向潜在的海岸线区域,并对沿途裸露的北方荒原组地层展开观测。

“祝融号”行驶了约1900米,利用不同成像和分析系统对露头 and 地表岩石进行详细的就位观测。其中,“祝融号”的导航和地形相机已获得了106组全景图像,详细记录了“祝融号”行进路线附近许多岩石的表面形态与构造特征。

“我们查看‘祝融号’火星车车载相机传回的照片时,发现这些裸露的岩石发育层理构造,显著不同于火星表面常见的火山岩,也不同于风沙沉积形成的层理构造,这些层理知识指示的双向水流特点,与地球滨一浅海环境中的低能量潮汐一致。”肖龙介绍。

### 为重塑火星历史提供新启示

基于多光谱相机获取的岩石影像,肖龙研究团队详细分析了“祝融号”火星车巡视区内石块的表面构造。

因所观测的岩石均位于“祝融号”巡

视区内,研究团队将其代表的地质单元命名为祝融段。

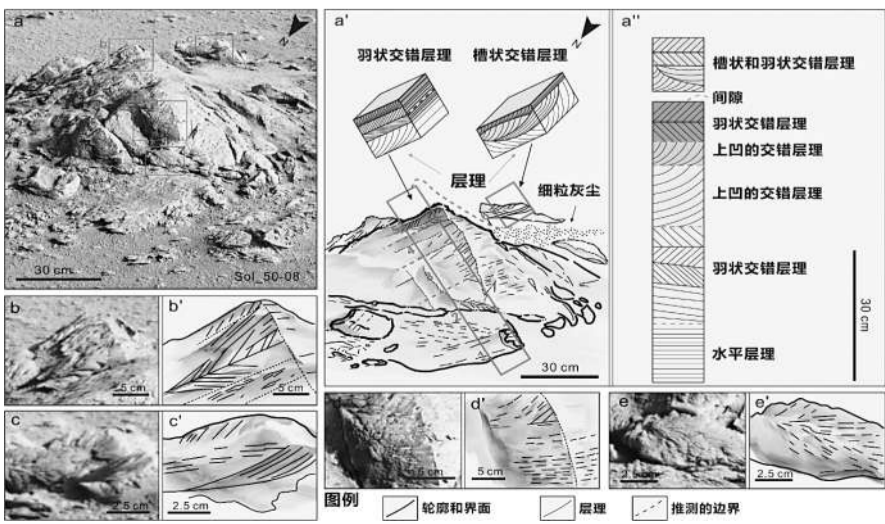
研究团队发现,祝融段内的岩石通常保留有局部呈透镜状的交错层理组,以多种小型交错层理为主,伴随少量透镜状压扁层理和小型水道结构的沉积构造。其中,组成交错层理的层系在两个相反的方向上存在强度差异。

肖龙介绍,这种双向水流模式通常由具有周期性流向变化的流体作用所形成,在风成环境及河流环境中并不常见,但在地球的滨一浅海环境中很常见。

相比地球而言,火星只有两颗小卫星,使得其表面具有低能量的潮汐系统,在这种潮汐环境中只能形成小规模层理构造。同时,研究中识别的底形和沉积构造具有支持其为流水沉积而非风成沉积的证据。

据悉,上述研究对祝融段岩石的观测结果,是迄今为止首个支持火星北部平原古海洋存在的直接性原位探测证据。“祝融号”着陆点位置表明,观察到的沉积构造可能形成于北部平原古海洋的海退过程中。

该研究在北方荒原组中发现的沉积构造为重塑火星历史提供了新启示。“未来‘祝融号’对该区域的深入探测和采样返回,将加深我们对火星宜居性和生命痕迹保存的认识。”肖龙说。



图为“祝融号”观测的岩石和沉积层理素描图。中国地质大学(武汉)供图