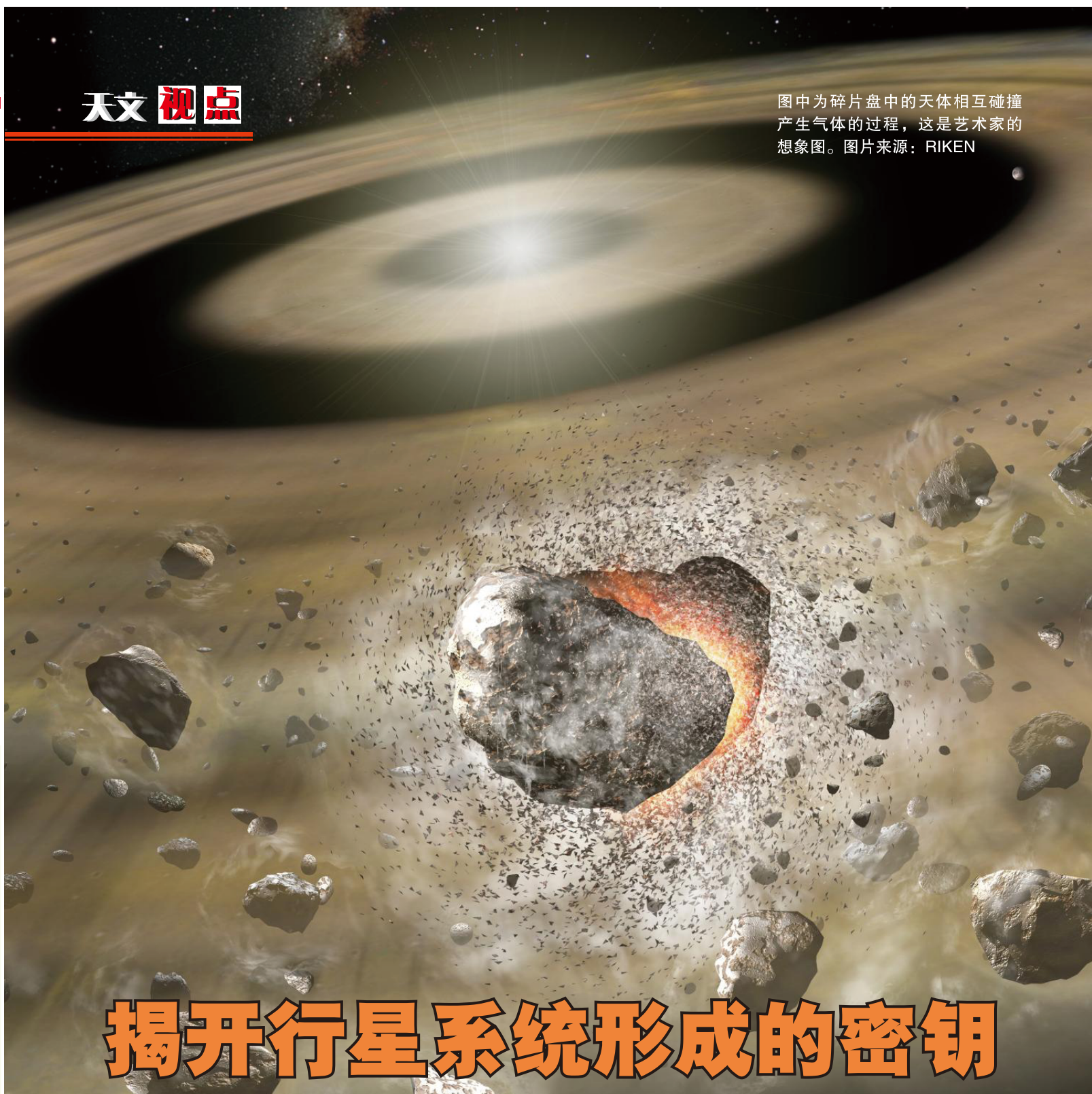




图中为碎片盘中的天体相互碰撞产生气体的过程，这是艺术家的想象图。图片来源：RIKEN



## 揭开行星系统形成的密钥

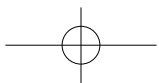
□ 文 何锐思 (Richard de Grijs) / 译 程思森



何锐思  
(Richard de Grijs)

北京大学科维理天文与天体物理研究所 (KIAA) 教授，国际天文学联合会天文发展办公室东亚分站负责人。

在新生恒星的周围，一般会有一个由气体和尘埃组成的物质盘。行星形成之初，最先出现的是一个由岩石和冰屑（即“星子”）组成的环。这些环中的尘埃黏到一起，就形成不断长大的物质块。当它们足够大，就可以凭引力相互吸引。





天文学家认为，这一行星形成、同时也是扫清物质盘的过程，会持续约一千万年。不过，这一过程仍留给我们许多未解之谜，譬如：尘埃一般不倾向于相互粘连；相撞的物质块也是更容易碎成几块，而不是相互结合。

与我们太阳系的柯伊伯带和奥尔特云相类似，系外行星形成之后残留的碎片盘也可以被观测到。对它们的研究有助于我们理解行星系统形成的过程。最近，天文学家对附近的一个行星系统“室女座61” (61 Vir) 和它的碎片盘进行了观测。室女座61是一颗年龄在46亿岁、大小跟太阳差不多的恒星，距我们大约28光年。至少有3颗行星围绕它公转，它们的质量分别是地

球的5倍、18倍和23倍。这个系统最引人注目的地方在于它有一个碎片盘，从距母恒星30天文单位向外延伸到至少100天文单位。

英国剑桥大学塞巴斯蒂安·马里诺 (Sebastian Marino) 领导的一个天文学家团队使用位于智利的阿塔卡马大型毫米[亚毫米]波阵 (ALMA) 对室女座61的碎片盘进行了观测。这些观测得到了来自“亚毫米波普通用户辐射热计阵列2” (SCUBA2, Submillimetre Common User Bolometer Array 2) 的数据补充。SCUBA2是安装在位于夏威夷莫纳克亚的麦克斯韦望远镜 (JCMT, James Clerk Maxwell Telescope) 上的一个终端。

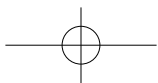
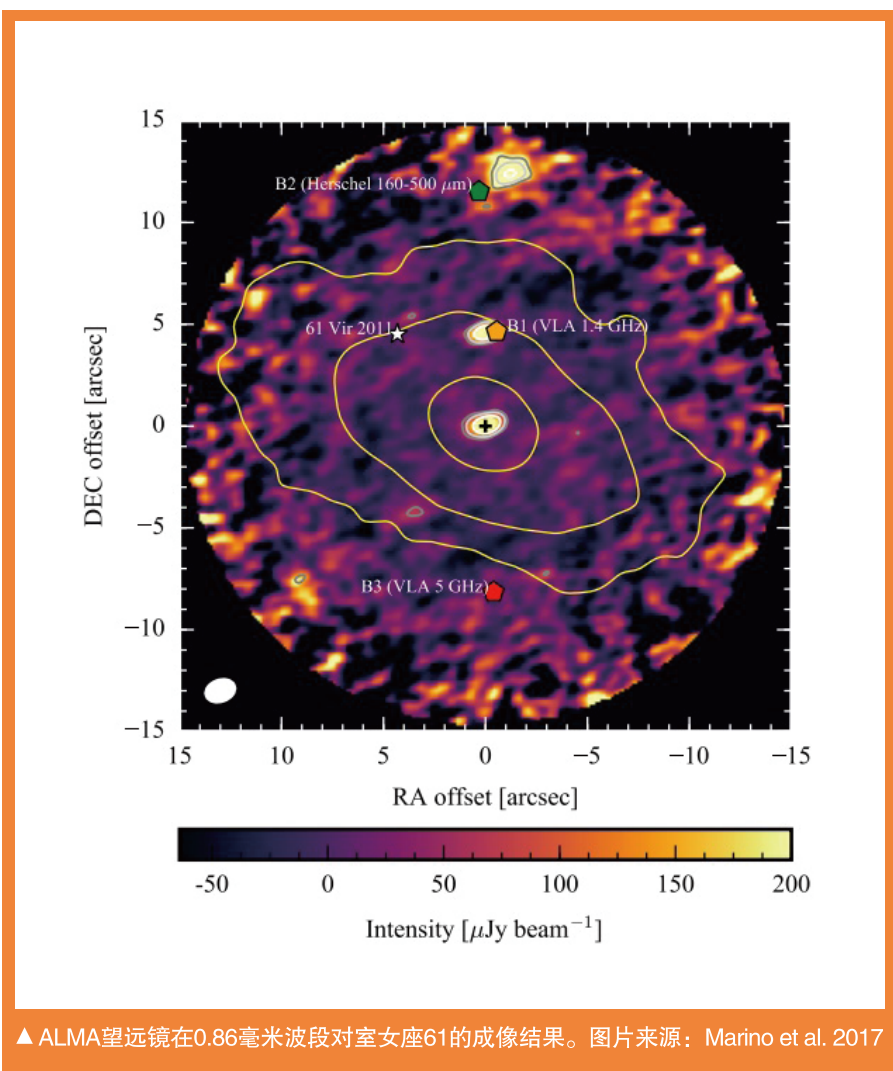
“在这篇论文中，我们给出了

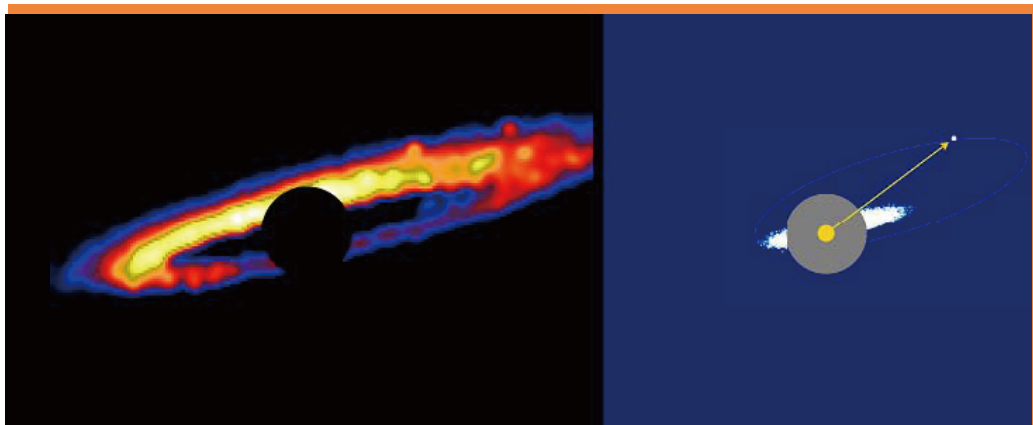
ALMA在0.86毫米波长下对室女座61的首个观测结果。我们希望对它的碎片盘进行研究，以揭示其母星子的位置，并且通过盘面中物质的分布，确定在碎片盘的那些大裂缝中是否有行星存在（因为行星可以塑造碎片盘的物质分布）。……为了尽可能准确地确定盘面的形状，我们综合考虑了ALMA的最新观测和SCUBA2在0.85毫米波段的最新数据，因此，我们能够同时对大、小两种尺度的结构进行分析。”研究者写道。

这项新研究表明，室女座61的碎片盘比预想的要大。马里诺的团队发现，它从距母恒星30天文单位延伸到至少150天文单位。另外，研究者假设，在室女座61d (0.5天文单位) 到碎片盘的内缘之间，还隐藏着尚未发现的第四颗行星。他们分析说，如果碎片盘在150天文单位处受到一颗行星的扰动，这颗未知新行星的质量至少要有地球的10倍，距母恒星10到20天文单位。

“我们发现，为了对远在150天文单位的物质产生扰动，这颗行星必须超过10倍地球质量，轨道半长径在10到20天文单位之间。（出于对轨道的另一些合理的假设，）也可能质量稍小些，轨道半长径在4到20天文单位之间。”该研究团队得出这样的结论。

事实上，确定行星的引力如何影响一个物质盘的结构，这是另一个重要的研究领域。而本次研究主要集中在一个问题上：位于碎片盘内缘之内的行星如何影响盘面的形状——这是从地球能够直接观测到的盘面结构。而卡内基研究所 (Carnegie Institution) 的艾丽卡·奈斯瓦特 (Erika Nesvold) 最近研究的内容则是：一颗位于物质盘外





▲ 艾丽卡·奈斯瓦特与她的团队模拟HD 106906系统的两幅图像。左图突出显示了环绕恒星的、由行星形成剩下的物质组成的、岩石与冰质的环（恒星被黑色圆圈遮住）。不同颜色代表了盘中物质的不同亮度（黄色为最亮，蓝色为最暗）。右图显示了这个模拟的系统在更大视野下的样子。恒星被黄色圆圈遮住，箭头指向行星HD 106906b。环绕恒星的白色和蓝色点表示碎片盘。奈斯瓦特的团队展示了系外行星如何对碎片盘的结构产生影响。图片来源：Erika Nesvold

缘之外的行星将对盘面产生怎样的影响。她的研究表明，通过盘面的形状，我们能够知道，这颗行星是一开始就诞生在盘面外面，还是本来位于盘面的里侧，后来慢慢迁移出去的。

恒星HD 106906是研究这一现象的完美对象。它拥有一颗巨行星HD 106906b，质量大约是木星的11倍，在至少650天文单位的超远轨道上绕母恒星公转——这比恒星周围的碎片盘远了10倍。

奈斯瓦特与她的同事们对HD 106906系统进行了模拟，希望能够对系外行星如何影响碎片盘的结构有更清楚地理解。

“我们没有向系统中添加任何新行星，就模拟出了现在观测到的HD 106906碎片盘的形状。虽然有些人曾认为这是不可能的。”奈斯瓦尔说。

远处这颗唯一的巨行星，它的引力对内侧的碎片所产生的影响，刚好就是使它们形成一个扁平且非圆形的环；而且，观测到的碎片盘的轮廓和其他特征，也正好可以得到解释。另外，奈斯瓦特的模型还

能帮助她和她的团队进一步认识这颗行星HD 106906b的轨道和可能的形成历史。他们的结果表明，这颗行星很可能是在盘面之外形成的。如果它是在盘面里侧形成之后迁移

到外面的，碎片盘的形状应当与目前观测到的有所不同。

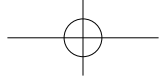
“其他在远方巨行星影响下成形的碎片盘情况大概也差不多，”奈斯瓦特说，“我的建模工具能够重建盘面各种特征形成的过程，并将其可视化，帮助我们更好地理解行星系统的演化。”

近来，精细系外行星探索与星子盘研究两个领域开始出现交叉，天文学家因此能够探究行星系统的演化与发展以及它们与物质盘的相互作用。

对尘埃盘的直接成像一直受到很多限制，之前也主要用于探查位于行星系统之外的物质盘。同时，大部分已知的系外行星都离它们的母恒星很近，有的甚至比从水星到太阳还要近。

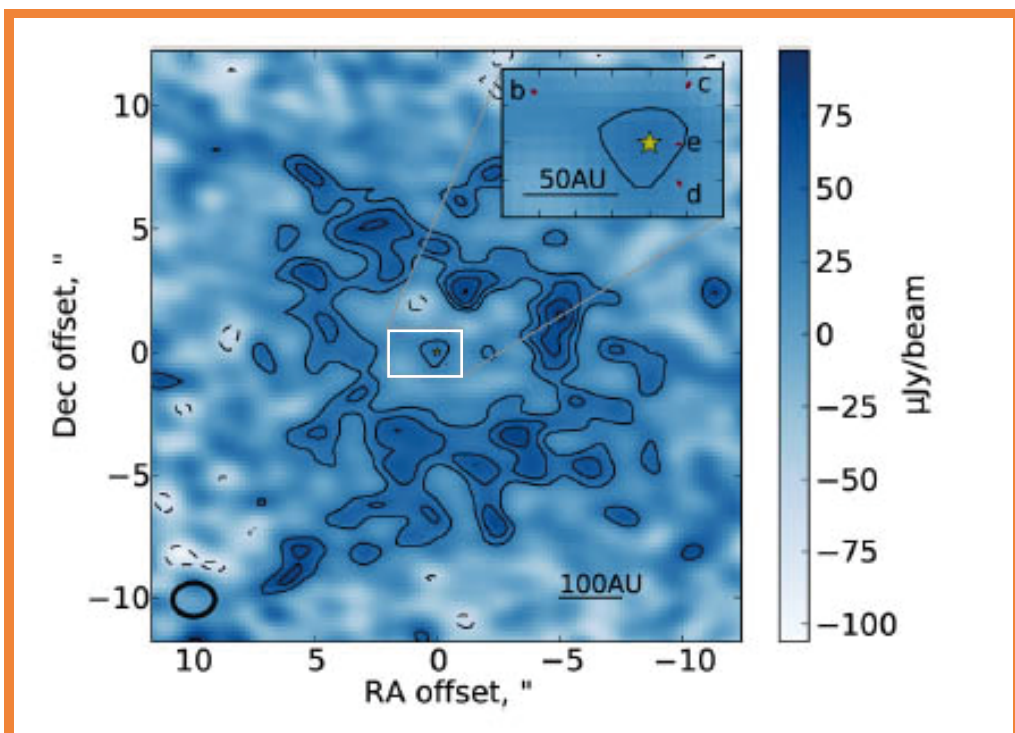


▲ 由欧洲南方天文台的行星发现工具SPHERE拍摄的HD 106906真实图像。恒星本体用黑色圆圈遮住（以防止其强光损伤仪器），在左下方可以看到碎片盘。右上远处的是系外行星HD 106906b。艾丽卡·奈斯瓦特与她团队的模拟精确地再现了碎片盘的观测特征：它在东（左）边比较亮，而且指向从行星开始顺时针20度的方向。图片来源：ESO and A. M. Lagrange, Université Grenoble Alpes



而最近对恒星HR8799的直接成像，则揭示出了它的多行星系统。早在几十年前，人们就知道它周围存在一个物质盘，并且为之建立了一个分成三个区域的模型：内侧的部分类似于小行星带；在100到430天文单位之间的星子带；以及延伸到超过1500天文单位的晕区。哈佛-史密松天体物理中心（CfA）的天文学家丹尼斯·巴卡茨（Denis Barkats）与他的团队使用ALMA对HR8799周围的物质盘进行了成像观测，空间分辨率达到32天文单位，足以探测到物质盘的内侧部分。该团队确认了星子带的内缘实际上位于145天文单位左右，并且向外延伸到430天文单位。

系统中已知的四颗系外行星的轨道都在这个内缘之内。其中最远的一颗，即行星“b”，拥有一条混沌的轨道，也就是说，它最终会

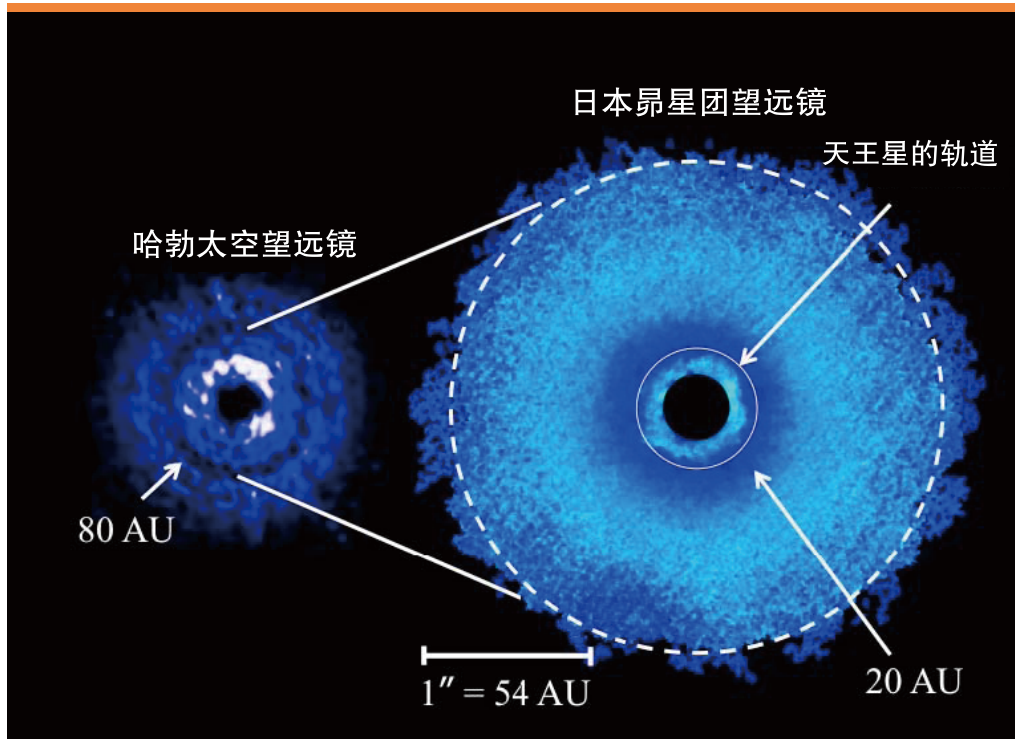


▲ HR8799周围星子盘在亚毫米波段的图像。这是第一次对包含四颗系外行星及其尘埃盘的系统进行直接成像。内嵌图显示了系统的中心区域和四颗系外行星的位置。图片来源：ALMA; Booth et al.

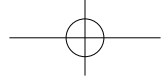
飞出星子带内缘之外，这就带来了稳定性的问题。对此，天文学家给出了

两种有趣的选择：或者是行星b的轨道随时间的变化比想象的还要大（因此不一定如现在所计算的那样最终是混沌的）；或者是还有第五颗尚未发现的行星，它的个头比较小，但在一个较大的轨道上公转，它的引力为行星b提供了稳定性。

目前，对碎片盘进行直接成像的领域非常热门，而这一发展主要归功于ALMA天文台。最近，日本的研究者检查了两个年轻恒星系统——鲸鱼座49（49 Cet）和绘架座β（beta Pic）——的原子碳谱线，发现了位于它们物质盘中的原子碳。这是人们第一次在亚毫米波段观测到这样的现象，它暗示着碎片盘中的气体并不是原生的，而是后来通过碎片盘中发生的碰撞事件才形成的。通过射电观测，人们早已在很多碎片盘中发现了气体，但并不清楚它们为什么会出现在那里。当时的猜想大致有两种：或者是这些气体是原生的，即，它们来



▲ 长蛇座TW（TW Hya）周围的原始行星盘。左边是哈勃太空望远镜拍摄的近红外图像，显示出80天文单位处环状的裂缝。右图为日本昴星团望远镜（Subaru）拍摄的图像，“哈勃”观测到裂缝80天文单位的半径用虚线标出。作为参考，天王星的轨道半径用细实线标出。中心的黑色圆圈半径为11天文单位。可以看到，新发现的环状裂缝距中心恒星约20天文单位。图片来源：NAOJ



自形成母恒星的气体云；或者，它们是后来通过盘中天体的相互碰撞形成的。

为了解决这一问题，一支来自日本理化学研究所（RIKEN）“坂井恒星与行星形成研究室”的团队把目光投向了碳的发射线。碳谱线能够提供这些气体来源的线索，因此非常重要。正常情况下，碳主要是以分子，即一氧化碳（CO）的形式存在。中心恒星所发出的紫外线可以使分子解体，产生出游离的原子碳。而一种由氢中介的化学反应又可以使碳重新结合成一氧化碳。但是，如果某一区域缺乏氢，这种化学反应无法进行，碳就会一直保持原子状态。

樋口绫（坂井研究室合作研究员）和她的团队使用位于智利、10米口径的阿塔卡马亚毫米波实验望远镜（ASTE），检查了来自两颗拥有碎片盘的恒星——鲸鱼座49和绘架座β——的原子碳发射线，并把它与ALMA亚毫米望远镜阵得到的一氧化碳数据进行了比较。

“我们很惊讶，”她说，“在物质盘发现了原子碳。这是第一次在亚毫米波段观测到这种现象。而更让我们惊讶的是它的含量。我们发现，在这些物质盘中，原子碳的含量几乎与一氧化碳一样多。”

这表明，至少在这两个恒星系统中，能够使碳转化回一氧化碳的氢含量非常低。而氢构成了原始行星云（恒星及其行星系统从其中形成的气体云）气体的绝大部分。因此，这就意味着，两个碎片盘中的气体不是原生的，而是后来在其中发生的某些过程的产物。到目前为止，在其他一些恒星的碎片盘中也发现了气体，但不是全部。

樋口表示：“如果能对其他年

轻的恒星也进行类似的观测，碎片盘中这些气体的起源将得到进一步澄清。我们目前的数据倾向于认为它们是次生的。”

展望未来时，她继续说道：“这项工作——澄清碎片盘中气体的起源——还将帮助我们理解原始行星盘是如何演化成碎片盘的。”

不过，较为年老，尤其是年龄超过五百万年的恒星，则缺乏拥有这种碎片盘的证据。这意味着，在这样的年龄上，盘中的大部分物质都已经转化为行星或其他稍小的天体、坠入恒星，或者从系统中逃逸出去了。所谓的“过渡盘”

（transition disks）将这一时期与碎片盘的演化连接起来。这些“过渡盘”还没有完全消失，经过中央恒星的加热，它们可以在红外或毫米波段观测到。通过其红外辐射，我们可以了解它们的各种性质。它们的内部通常有尘埃空区，就像土星光环的环缝。天文学家有时会把这看作行星存在的证据，因为行星会扫清自己轨道周围的尘埃。

但是，行星-盘相互作用的模型表明，尘埃空区只是行星“扫

除”的间接结果。实际情况更可能是：行星在气体中扫出一条裂缝，于是，（环缝中的）小尘埃颗粒就会“陷”进分布在环缝外缘的气体中，这就产生了一个（常常是不对称的）尘埃环。

另一位来自哈佛-史密松天体物理中心的天文学家锡安·安德鲁斯（Sean Andrews）与他的同事使用ALMA对我们附近四颗年轻恒星的过渡盘进行了研究。威力强大的ALMA在这次的观测中，对尘埃颗粒和温暖气体的空间分辨率都达到了24天文单位。科学家对这四个过渡盘的气体分布进行了建模。他们发现，气体空区比尘埃空区要小足足3倍，而且空区内的气体密度比起盘表面的密度至少下降了1000倍。这些结果有力地表明，空区确实是由行星造成的。

在这一领域中，仍有许多问题有待解决，但现在每个月都有新的观测结果不断涌现。ALMA已经开始产出它高质量的数据（ALMA于2013年投入运行）。这真是一个激动人心的时代。■

（责任编辑 冯翀）

恒星LkCa15周围过渡盘的伪彩色图像，数据来自亚毫米波段的观测。一项新的研究发现，对过渡盘内部裂缝最有可能的解释是：它起源于附近一颗或几颗巨行星的影响。图片来源：S.Andrews ▶

