

# 浙大学者提出早期太阳系巨行星轨道演化新模型

## 太阳系的童年是怎么样的?

本报记者 何冬健 通讯员 柯溢能



太阳系 图源视觉中国



刘倍贝(左一)指导学生天文理论 卢绍庆 摄

太阳系是如何诞生的?  
如果要追问这个问题,那就得跨过人类文明、地球生命,一路追溯到太阳、地球、各个行星、小行星、彗星……  
浙江大学物理学院刘倍贝研究员与法国波尔多大学雷蒙德教授、美国密歇根州立大学雅格布森教授通过研究太阳系行星家族中的大兄长——木星、土星、海王星、天王星等巨行星,从它们的动力学变迁求索太阳系的演化历程、理解太阳系成长和行星生命的孕育。  
4月27日晚,国际顶级期刊《自然》刊载了他们共同提出的早期太阳系巨行星轨道演化的新模型,以简洁优美的语句和图示,阐释了我们的太阳系是如何一步步成为今天模样的。  
借助科学家的辽阔视野,让我们一起走进一场波澜壮阔的星际穿梭之旅。

### 今与昔 巨行星轨道有何不同?

“谓我是方朔,人间落岁星”,一千多年前,太白居士举杯对月,在漫天繁星中精准地找到了这颗太阳系中体积最大的行星——岁星。  
古人口中的岁星,取其绕行“天球”一周约为12年,与地支相同之故。到了西汉时期,史学家司马迁在实际观测发现岁星呈青色,在《史记·天官书》中,他将其与五行学说联系在一起,于是“木星”便成了它的另一称谓。  
在刘倍贝位于浙江大学玉泉校区的办公室里,挂着一张简洁的太阳系行星图,这位青年学者每天都要站在这张图前,观摩思考一番。水星、金星、地球、火星、木星、土星、天王星、海王星,太阳系的八颗行星在各自的轨道上周而复始地自转与公转。如此奇妙的现象是怎么形成的?仅是这么一个疑惑,便困扰了人类千百年之久。

“今天我们所见太阳系的行星轨道,与它的‘童年’时期有很大不同。”与刘倍贝初见面,他便开门见山,切入正题。  
尽管科学家也无法时间旅行,回到太阳系原初状态看个究竟,但宇宙之大,处于不同演化阶段的恒星系一个都不少——通过观测,学界普遍认为,大约在距今46亿年前,我们的太阳系还是一片随机的气体和尘埃,它们像星云一样漂浮着。当它坍缩后,中心气体形成原初太阳,残余物质绕中心旋转形成一个扁平的圆盘。该圆盘被称为原行星盘,是孕育行星的摇篮。

刘倍贝要推演的历史,便处于这段时期,即童年期的太阳系,又叫“气体盘”时期。行星生长在行星盘内,与盘中气体相互作用,轨道逐渐变得像一个圆圈,并向内迁移。木星、土星、天王星、海王星等太阳系四大巨行星通过迁移进入轨道共振态,具体表现为相邻行星的公转周期呈现出一个整数比。  
然而他发现,现今四大行星的轨道分布更为开阔,如木星距离太阳5.2个天文单位(指地球与太阳的平均距离,约1.5亿公里),海王星则有30.1个天文单位这么远。四大行星之间周期比远大于常见整数比,这就意味着当前巨行星已脱离了原有的共振态。

“想象一座车辆正常流通的高架桥,如果有车辆发生碰撞追尾,整个行车的秩序就会被打乱。”刘倍贝认为巨行星的轨道演化成今天的模样,可能经历了动力学剧变的缘故。  
他告诉记者,当两颗行星距离相对较远时,由于它们只受到微小的引力扰动,轨道处于稳定状态;如果轨道很近甚至交汇时,强大的引力扰动极有可能打破了行星之间的引力平衡,造成动力学不稳定现象,使其脱离原有的共振态。

### 早或晚 巨行星轨道何时迁移?

一个刚形成的行星,就像海洋中的一个救生筏,可以远远漂离其起点。一旦一颗行星增长到足够大,它的引力效应就可以通过周围的盘传播,激发起螺旋波,而螺旋波本身的引力效应作用于行星和盘,会产生强有力的反馈作用。相应地,动量和能量会发生交换,促使年轻的行星在其出生的原行星盘中开始一段史诗般的旅程。

这是尼斯模型——当前描述太阳系行星演化最流行的理论之中的猜想,因模型创立者来自于法国尼斯的蔚蓝海岸天文台而得名。模型认为,轨道不稳定发生在太阳系诞生数亿年之后,那时,原行星盘气体耗散,巨行星与外部的星子盘(由直径为数公里到上百公里的星子组成)相互作用不断交换轨道能量,最终使得行星摆脱共振束缚并引发动力学不稳定。  
因为巨行星与遥远星子交换能量的过程十分缓慢,尼斯模型认为轨道不稳定一般发生在太阳系诞生数亿年之后。因此它能较好地解释为什么小行星频繁撞击没有发生在太阳系诞生早期。

在此研究的基础上,刘倍贝指出,前人的研究忽略了气体盘耗散过程行星受到气体的作用力反向,“好比是打羽毛球,球体接触到网面,会因为反作用力弹回,随着拍面一起向外运动,太阳系行星轨道的形成过程也是如此。”

在他和团队的模型中,气体盘演化的晚期,太阳辐射的高能光子直射行星盘,形成的强劲光压首先吹散了靠近太阳的气体,行星盘内部出现了中空的结构。后续光压由内向外逐步驱散盘中剩余气体,行星盘质量伴随着盘内边界向外扩张而

减小。这个过程太阳就好比一个巨型吹风机,不断“吹”走盘中的气体,使其中空结构不断变大。

研究发现,巨行星与气体相互作用首先向内迁移至盘内边界。由于内边界处气体的快速耗散,行星受到向外的气体作用力,与行星在一般盘情况下受到向内的力不同。当气体盘内边界由太阳这个“吹风机”不断向外扩张,行星可以随之共同向外迁移。因为太阳系巨行星质量的不同,它们向外迁移速率不同,从而可以打破原轨道共振态并引发系统动力学不稳定。

通过计算,团队还推测在星际空间深处的某个地方,在远离太阳的无尽黑暗之中,有一颗孤独的行星正在银河系中流浪。质量与海王星相当,拥有大气,富含冰,这颗自由运行的行星不受制于任何一颗恒星,漂泊在永恒的黑夜之中。

“太阳系中可能曾经有过第五颗巨行星,原初四大巨星与另一颗冰巨星共同运动。在气体盘耗散时,它们经历了大幅度轨道动荡,冰巨星与木星的近碰后被甩出了太阳系。”刘倍贝说,这样达到稳定的四大巨行星最终的轨道分布才会与现今观测吻合。

“我们的研究表明,巨行星轨道的迁移往往紧随着气体盘耗散,在太阳系诞生后约五百万到一千万年间发生,比尼斯模型推测发生的时间要更早。”他说。

早期太阳系的塑造,影响了小天体和行星的形成。

刘倍贝团队认为:在太阳系诞生之际,原行星盘内的固体颗粒物分布呈现较为明显的两极化,靠近太阳的位置内盘以非炭质固体颗粒为主;远离太阳的外盘以炭质为主。在外盘的固体颗粒

### 月球和地球 来自太阳系其他天体的证据

巨行星轨道演化对包括地球在内的其他行星、卫星和小天体的演化,地球生命的起源、宜居特性等多方面影响深远。刘倍贝团队提出的新模型推演太阳系的“童年”,最明显的就是其动力学不稳定发生的时间非常早,这就需要在宇宙中寻找它的蛛丝马迹。

“我们能从月球陨坑坑的年龄找到新的佐证。”刘倍贝介绍,巨行星动力学不稳定会打破太阳系原有的平静,它们强大的引力扰动迫使周围小天体不断撞向其他行星和卫星,并在星体表面留下陨坑。月球没有大气和频繁的地质活动,自其诞生以来一直保留着原始陨石的撞击。我们从月球陨坑坑的年龄、大小、密度可以反演发生在月球上的小行星撞击事件。“月球陨坑坑有着广泛的年龄分布,小行星撞击事件随时间自然衰减,这也与我们团队提出的早期不稳定模型研究更自治。”他说。

此外,类地行星的轨道也支持刘倍贝团队的新模型。根据观测,原始地球形成于原行星盘阶段,在太阳系诞生后3000万至1亿年间最终长成。如果不稳定发生在地球完全形成之前,巨行星轨道动荡有概率触发大碰撞事件,诱发原始地球与一个火星大小的天体相撞,逐渐形成现今的地月系统。“早期动力学不稳定更符合来自太阳系其他天体关于小行星撞击时间的记录。新模型也可以更好地解释后续形成的类地行星的质量和轨道构型,这些均为其有别于尼斯模型的优点。”刘倍贝说。

刘倍贝表示,未来团队会进一步探究巨行星轨道演化对类地行星的影响,如量化类地行星的形成概率,小天体撞击对地球水起源等问题。记者了解到,浙大物理学院目前有多名和他一样的天文方向的教师,学校未来也计划大力发展天文学科,筹建天文系。



月球表面 图源视觉中国

流入内盘之前,内盘非炭质(包括月球陨石,普通球粒陨石和顽火辉石球粒陨石)的母体们靠吸积耐火物质而形成;与此同时,外盘的炭质球粒陨石母体吸积炭质颗粒逐渐长大。在约两至三百万年之后,炭质颗粒最终迁移进入内盘。

### 科学地平线

## 揭示病菌毒素入侵人体的新“大门”

记者 何冬健 通讯员 俞熙娜 张弛



细菌 图源视觉中国

一种在全球范围内造成医院和社区感染腹泻及肠炎的重要病原体——“艰难梭菌”,被西湖大学科学家发现其入侵人体的新“大门”,这为开发新的治疗手段提供了启示。相关论文已发表在国际知名期刊《细胞》上。

艰难梭菌的II型分支由于其强致病性,又被称为“超毒力分支”。而毒素B(TcdB)是其致病的关键“武器”。西湖大学生命科学学院特聘研究员陶亮团队与施一公团队合作,利用冷冻电镜单颗粒三维重构技术,首次揭示了超毒力分支艰难梭菌毒素B的肠道上皮受体——TFPI蛋白。

“我们之前已经发现了毒素B的部分家族成员,可以通过一种叫做FZD蛋白的‘大门’进入人体。”陶亮说。毒素对“门”的选择很挑剔,家族中另外两位“兄弟”TcdB2和TcdB4就不识别FZD这扇“门”。

不知道“大门”在哪里,这两种毒素变体又是如何入侵人体细胞的?陶亮团队猜测,一定存在“另一扇大门”——即某种未知受体介导了变体的毒素B入侵细胞。

通过排查出一系列相关的候选因子,即“怀疑对象”,团队最终锁定了一个名为组织因子途径抑制因子(TFPI)的蛋白,认为这个存在于细胞表面的蛋白“涉案”可能性最大,很可能就是这两种毒素B变体进入细胞的“另一扇大门”。

陶亮团队与施一公团队合作捕捉到了该毒素B变体“开门”瞬间的重要影像,解析了分辨率为3.1埃(长度单位,表示 $10^{-10}$ 米)的毒素-受体复合物的三维结构。

研究发现,含有TFPI部分关键区域的可溶性蛋白,可以作为“诱饵”,迷惑并诱捕毒素分子。无论是在细胞水平还是小鼠模型中,这类“诱饵”都可以有效阻止超毒力分支艰难梭菌的毒素B的破坏,起到了显著的保护作用。

“这不仅进一步证实TFPI是超毒力艰难梭菌的TcdB在肠道上皮中的受体,更预示了可溶性TFPI作为中和蛋白在防治超毒力艰难梭菌感染中的潜在应用价值。”陶亮说,艰难梭菌的特性使其在抗生素治疗时效果较差且复发严重,相比之下,中和抗体这样的新策略理论上说靶点更加精准,对人体和环境带来的负面影响也更小。



超毒力艰难梭菌如何导致疾病发生?

## 发现癌细胞转移定植的“搬运工”

记者 林婧 通讯员 张弛

西湖大学生命科学学院蔡尚课题组日前在国际知名期刊《细胞》在线发表重要成果,首次证实乳腺癌组织中存在多种独特的细菌,并揭示它们在肿瘤转移定植过程中所起的关键作用。

肿瘤内部也存在着少量的细菌,只不过由于其极低的生物量而被忽视了许多年。这些细菌被称为“胞内菌”,它们是否具有功能,在肿瘤发病进程中又扮演了什么角色?沿着这一方向,蔡尚团队进行了探讨并建立了一套清除肿瘤内细菌的系统。

蔡尚团队首先通过高分辨率的电镜清晰地看到了细菌存在于细胞质内。实验发现,清除肿瘤菌群之后,肿瘤重量没有受到影响,但肺转移显著下降。同时,研究团队观察到,在肿瘤转移的过程中,经过血液系统时,肿瘤细胞依旧携带着细菌。他们还发现,当给携带不转移类型的肿瘤实验小鼠注入这类胞内菌后,肿瘤出现了转移。

基于此,研究团队提出假设:肿瘤组织中的多种独特的细菌会和肿瘤细胞一起迁移到达远端器官并影响转移。进一步的实验发现,胞内菌的入侵重塑了肿瘤细胞的细胞骨架,使其具有更高活性,也更加强大,因此可以抵抗血液中的液流压力,大大提高了生存能力。“这就是细菌赋予肿瘤细胞的能力。”蔡尚说,“这也解释了为什么同一种类型的肿瘤会产生不同类型的预后。”

临床上,医生一般通过肿瘤的标志物,也就是依赖于肿瘤细胞内部的基因信息来指证肿瘤的类型、治疗方式等等。蔡尚团队的发现则证实了除了肿瘤细胞内部的基因信息以外,这些胞内菌的信息也发挥了重要作用。换句话说,如果我们调控这些细菌,有可能阻断肿瘤转移的进程或者转移的能力,也就可能找到一个阻断癌症进展的新治疗方式。

“我们的这个研究只是在肿瘤菌群领域打开了一扇窗户。接下来,我们需要进一步收集来自病患身上的相关证据来证明这一结论。”蔡尚说。