

太阳系的最大行星——木星

◎胡中为

木星是太阳系中的最大“巨新星”。现已发现木星有 67 颗卫星和众多暗尘组成的环系,俨然是一个小规模太阳系。

我国古代称木星为岁星,周天分为 12 星次,用它每年行经所在星次进行“岁星纪年”。西方社会用罗马主神名“尤皮特(Jupiter,也称 Jove)”称呼它。木星是太阳系的行星,其质量约为太阳质量的千分之一,是太阳系其他行星质量总和的 2.5 倍。它的主要成分是氢氦气体,是“气体巨行星”的典型代表。然而,由于浓厚大气和云层遮掩,木星照片常见“表面”只是它的高云层特征,人们对它的很多重要情况不甚了解。进入航天时代以来,先后有多个飞船探访木星,揭示了这颗“巨行星”及围绕它运行的卫星和环系的奥秘。

木星的运动特性和物理性质

木星绕太阳公转轨道的半长径为 5.20336 天文单位(AU, 1AU=149597870700 米);轨道偏心率为 0.04839;近日距和远日距分别为 5.036 天文单位和 5.366 天文单位;公转周期(木星年)为 11.8565(地球)年;轨道面对黄道面的倾角为 1.305°。

木星存在三种自转周期系统:从木星的云运动得出,赤道区自转最快,向两极区减慢,赤道区的自转周期为 9 时 50 分 30.003 秒(系统 I);高纬区为 9 时 55 分 40.632 秒(系统 II);从木星的射电变化得到内部自转周期为 9 时 55 分 29.710 秒(系统 III)。木星赤道面对其公转轨道面倾角为 3.12°。

由于木星是流体表面,并且自转快,木星照片的视形状呈椭球形,其赤道半径为 71495 公里(是地球半径的 11.209 倍),极半径 66845 公里,扁率为 0.0649,木星的体积是地球体积的 1321 倍。木星的质量(M_J)为

1.8987×10^{27} 千克,是地球质量的 317.8 倍,所以常用“木星质量” M_J 来表述其他天体(尤其是环绕其他恒星的行星)的质量,例如行星 HD 209458 b 的质量为 $0.69M_J$ 。木星的热辐射是它吸收太阳辐射的 1.67 倍,这说明木星有内部热源,但其能量来源问题还未完全解决,可能来自其演化所释放的引力势能。木星的平均密度为 1.33 克/厘米³,比类地行星的密度小很多,说明木星主要由轻的元素(氢、氦等)组成。木星赤道表面的重力加速度为 23.12 米/秒²,逃逸速度为 59.5 米/秒。

木星的大气和云

多数观测只见木星的外层大气和云层,飞船近距离观测木星揭示了更多细节。从彗星撞击木星、尤其是探测器穿入木星大气层,人们才较好地了解到木星的大气层和云层。

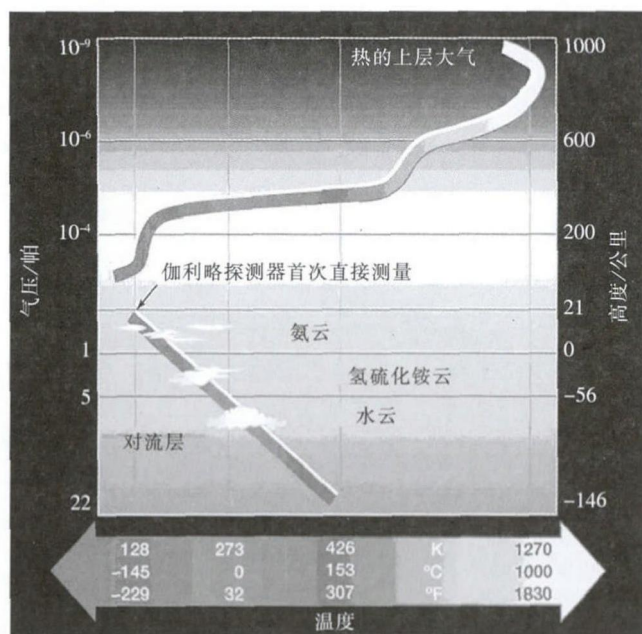
木星大气的主要成分(体积比率)是分子氢(H_2 , 89.8±2%),其次是氦(He , 10.2±2%);次要成分有甲烷(CH_4 , 0.3%)、氨(NH_3 , 2.6×10^{-4})、乙烷(C_2H_6 , 6×10^{-6})、水(H_2O , 4×10^{-5} 随气压变化)、氰化氢(HCN , 3×10^{-5});微量成分有硫化氢(H_2S)、氖(Ne)、乙炔(C_2H_2)、磷化氢(PH_3)、一氧化碳(CO)。木星与太阳的元素丰度基本一样,但也有跟化学反应相关的差别,尤其是木星存在氖。此外,还有结晶微粒的氨、氢硫化氨(NH_4HS)和水冰及“烟雾”。来自外空的冰颗粒撞击木星也带来一些一氧化碳、二氧化碳和水。伽利略探测器在其降落过程中测定了木星的大气成分随高度的变化。

木星大气浓厚,延展 5000 公里以上。由于木星大气缺乏明显的底层界限,且逐渐过渡到内部的流体外层,而没有类地行星那样的固态表面,常以气压表示高度,取 10^5 帕的作为起算高度。按温度随高度增加的情况,木星大气层分为对流层、平流层、热层和外大气层。

胡中为:教授,南京大学天文与空间科学院,南京 210046。

Hu Zhongwei: Professor, School of Astronomy & Space Science, Nanjing University, Nanjing 210046.

应当指出,在木星对流层以上,温度的垂直分布还随纬度和经度不同而有所差别。由于木星的引力场很强,轻的氢原子也不易逃逸到行星际,因而保存广延富氢大气。



木星大气温度的垂直分布

木星对流层内主要有三个云形成区:最高的是氨冰晶云层,白色,云顶温度约 120 开;往下是氢硫化氨冰晶云层,因含其他氨-硫化合物而呈黄褐色,温度约 200 开;原先预料有更低的水冰晶云层和水滴云层,然而伽利略探测器却没有发现水云。

木星“表面”显示纬度分布相当稳定的高云层带纹,亮带(zone)常呈白色或淡黄色,是低温的高云,反气旋式运动,也有上升运动;暗的带纹(belt)常呈褐色,是温度较高但较低的云,气旋式运动,也有下降运动。

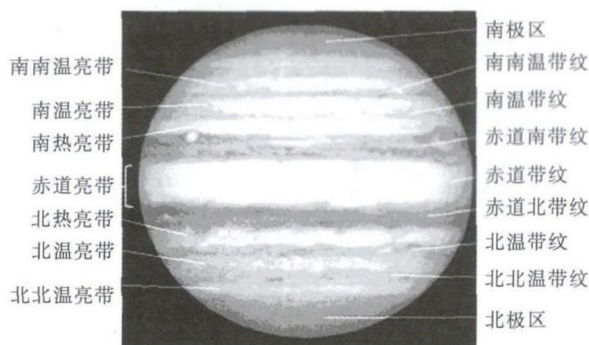
木星大气动力学的一个重要特征是交替向东和向西的风流(纬向环流),风速(相对于自转系统Ⅲ)大于零的相应于从西向东吹的风,风速小于零的对应于从东向西吹的风。木星的南、北两半球各有五六对纬向环流,维持长久,甚至 80 年不改变相对位置。纬向环流的平均风速为 50 米/秒,最大值约 130 米/秒。另一方面,木星大气中的南北向风则很弱。木星的云带纹分布跟纬度环流之间有一定的对应关系,但是云带纹特征有短时间(几年)变化,而远不如纬度环流持久。

木星大气中还有很多涡流,小涡流的寿命仅 1~2 天,大涡流(卵形斑)的寿命可达几年甚至更久。极区的气流是湍动的,涡流更多。为什么木星大气的纬向环流和大涡流能够长久维持,迄今仍是未解之谜。木星大气的能量收支问题则更为复杂。

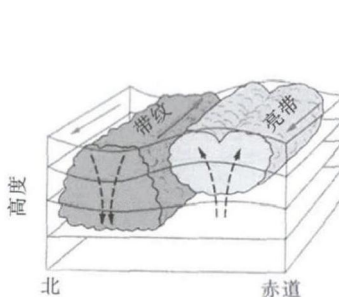
木星的最显著特征是椭圆形的“大红斑”,它位于南纬 23°左右,东西向长达 26 000 公里,南北向宽达 14 000 公里。自 1664 年发现以来,它已持久地存在 350 多年,仅颜色、大小或结构发生些变化。它高于周围云顶 15~25 公里,是温度较低的巨大反气旋,逆时针方向转动、周期约 6 天。其颜色可以归因于存在复杂有机分子、红磷或其他硫化物。

旅行者飞船也记录了大红斑与同纬度风流中运动的众多较小扰动之间相互作用。大红斑内部相当稳定,没有预期的物质从较低深度上涌(或发散)的明显证据。推测大红斑可能深达主云层,但云层中仍未观测到大红斑的下部,关于它长久持续存在的原因仍是未解之谜。

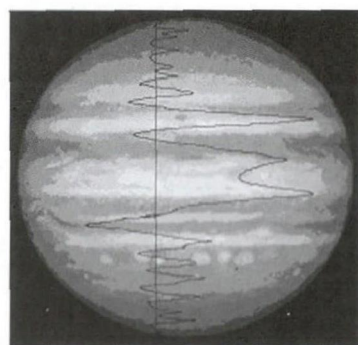
在大红斑之南的纬度有 3 个白色卵形斑,它们是风暴,已维持 40 年,较大的两个斑于 1998 年初合并,2000 年第三个也被合并,2005 年观测到其颜色改变,到 2006 年成为与地球大小相当的“小红斑”或“BA 卵形斑”。哈勃空间望远镜观测到其风速增强到与大红斑一样。观测小红斑的光谱等演变,有助于揭开大红斑之



木星云的亮带和带纹



木星云的亮带和带纹的运动(左)及风速(右)



谜,包括云成分和变红的化学机理。近年来还观测到木星大气的某些大规模变化。

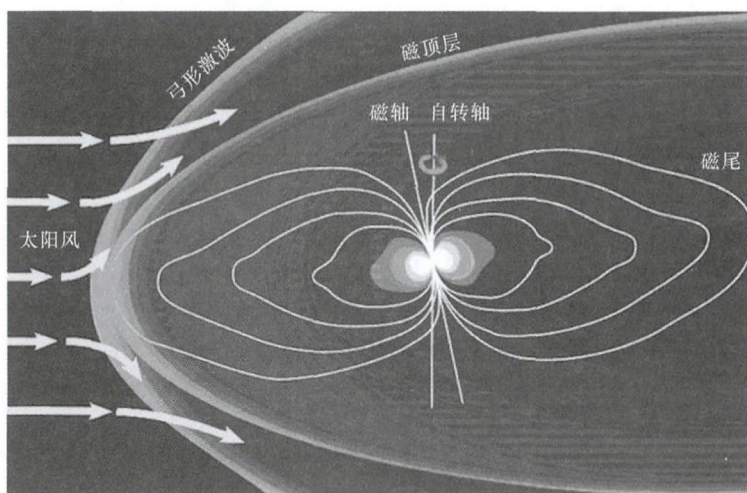
木星赤道附近的白色羽云头部有暗区,已测出温度高达 300 开。它们是无云区,因而可以看到更深处和测出高的温度——显示蓝色(来自太阳光的瑞利散射),且有微红物质的薄雾霾覆盖。在北纬 18° 附近有些独特的暗褐云,它们显然是从几乎遍存的黄褐云层的空洞处所见的较深部。赤道区还有些蓝灰色或紫色的云,在红外像上显示很亮的热斑,显然它们来自云洞区的热辐射。

木星的内部结构

虽然木星大气浓厚,但其质量仅占木星总质量的很小部分。由于直接观测到的只是木星大气,为了确定木星内部的成分和结构,可以利用已取得的资料和合理的理论来导出某些间接的结论。木星大气的主要成分是分子氢,大气深处由于绝热压缩而压强增大和温度升高,气态分子氢变为液态,气态与液态没有严格分界线。到云顶下 20 000 公里,压强达 2×10^{11} 帕,温度达 10 000 开,分子氢发生“相变”而成为液体金属态——“金属氢”,即电子不再束缚于原子核而自由流动,如同金属的性质。根据木星的密度,推断它还有岩石及冰的星核。

一般说,木星的内部结构常分为三个圈层:星核、中间层和外层。木星内部中央是岩石物质(硅、氧、金属等重元素的化合物)和冰组成的星核,由重力测量等资料,推算出木星核占总质量的 3%~15%,约为地球质量的 12~45 倍,估计星核外边界的温度为 36 000 开,压力为 4.5×10^{12} 帕。中间层为液态金属氢,延续到约 $0.78 R_J$ (木星半径)处,类似雨滴的氨和氦经中间层下降。外层主要由液态分子氢(H_2)组成,并逐渐过渡到木星大气。氢在其临界温度 33 开时,没有明显的液相和气相,即呈超临界流体状态,物理上没有清楚的分界,为方便起见,把云层下面约 1000 公里深度以下作为液态,而其上面作为气态。研究者得出的木星内部结构模型大多分为这三个圈层,只是各层大小和物理条件有所不同,存在相当大的不确定性。

木星有很强的磁场,主要部分是偶极磁场,其赤道磁场强度为 4.28×10^{-4} 特,是地球磁场的 10 倍;其磁矩为 1.58×10^{26} 特·厘米³,是地球磁矩的 18 000 倍;其偶极磁轴与自转轴交角约 10° ,跟地球偶极轴类似,但其南北极性与地球磁场相反。在液态金属氢的中间层,因为



木星的磁层

涡流而由“磁流体发电机”机制产生很强的内部偶极磁场。木星的非偶极磁场主要在 10 倍木星半径以外范围,由磁层的电流产生。

被太阳风包围的木星磁场控制区域称作“木星磁层”。类似于地球磁层的结构,木星磁层有弓形激波面、磁层顶、磁尾等部分,但更广延和复杂。在朝太阳一侧,太阳风流遇到木星磁场阻挡而形成形如船头前面的弓形(船首)激波面,它离木星约 $80 \sim 130 R_J$,其外空间完全由太阳风控制。木星磁场完全控制区域的外边界——磁层顶离木星 $45 \sim 100 R_J$ (随太阳风变化而变化)。弓形激波与磁层顶之间的过渡区域称为“磁鞘”。在背太阳一侧,磁层顶呈扁筒状,成为延展很远(几乎到土星轨道)的“磁尾”。

木卫一的火山活动喷发大量二氧化硫气体,沿其轨道形成轮胎状气体环,气体在木星磁场中发生电离,生成硫离子和氧离子,它们与来自木星大气的氢离子一起形成赤道面的等离子体片。由于磁场作用,这些等离子体跟木星共转,比木卫一的轨道运动快,因而形成木卫一轨道附近的轮胎状等离子云环,导致偶极磁场变形为磁盘。等离子体片内的电子产生 0.6~30 兆赫的射电。

木星磁场俘获来自太阳和宇宙线的带电粒子,来自木星大气以及木星环和卫星的带电粒子,在离木星约 $10 R_J$ 形成木星的辐射带,其最大辐射是地球辐射带的 5000~10 000 倍。

类似于地球的极光,高能带电粒子易从磁极区沿磁力线进入木星的极区大气,使木星大气的分子和原子被激发或电离,产生极光。不同于只是瞬变的地球极光,木星的极光是永久性的,虽然它们的强度每天都在

变化。木星极光包含三个主要部分：明亮且狭窄的长圆形主体（宽度不超过 1000 公里），位置大约距离磁极 16° ；卫星的极光斑，对应于它们连接到电离层的磁力线留在木星电离层的脚印；还有在长圆形主体内侧的瞬变极性发射。极光的发射几乎在所有的电磁频谱上都能观测到，从无线电到 X 射线（高达 3000 电子伏），在中红外（波长 3~4 微米 和 7~14 微米）、远紫外光谱区（波长 80~180 纳米）最为明亮。旅行者和伽利略飞船都在木星夜半球的大气中观测到很多闪电，比地球大气中的闪电强得多。

木星的卫星和环系

木星有 67 颗自然卫星。其中 4 颗最大的（木卫一到木卫四）是伽利略用自制望远镜发现的，因而称为“伽利略卫星”。

木卫三是木星的、也是太阳系的最大卫星，我国战国时期的天文学家甘德早在公元前 346 年就曾发现它，其直径（5262 公里）大于水星，但其质量（ 1.48×10^{23} 千克）小于水星。它的平均密度（1.94 克/厘米³）小，且其表面反照率较高，这说明水可能占总质量的 30%~50%。它几乎没有大气，表面似如月球，主要有亮和暗两种地貌，大致各占一半。这跟月球表面亮区（高地）是古老的多陨击坑、暗区（月海）是较年轻的少陨击坑不同，木卫三表面的暗区是古老的多陨击坑地貌，而亮区则较年轻且多沟脊或山谷。这些差别可由月球有岩石外壳，而木卫三有冰壳来解释。

木卫四是木星的第二大卫星，直径 4821 公里，平均密度小（1.8 克/厘米³），意味着水占一半以上。它没有大气，其表面的陨击严重，陨击坑几乎达到饱和程度，没有像暗的月海那样的平坦平原；另一方面，它表面缺少带亮辐射纹的年轻陨击坑，又缺少构造活动证据来推断其表面很古老（至少像月海那么古老，因为在后来的漫长年代中很少或没有经历内部物质上涌等地质活动的改造，而因陨星尘积累使冰表面变暗）。

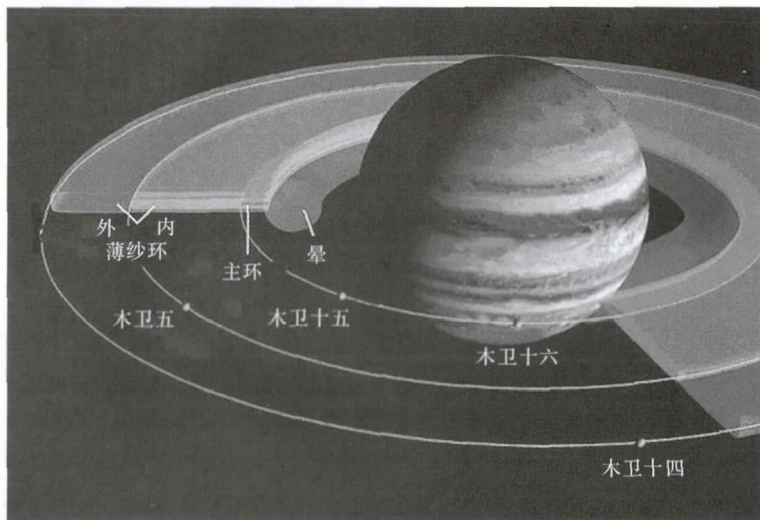
木卫二的直径（31221 公里）和质量（ 4.80×10^{22} 千克）比木卫三和木卫四小，而平均密度（2.97 克/厘米³）比它们大，这表明木卫二主要由岩石物质组成，仅含约 10% H₂O 冰。木卫二的表面亮，其光谱表明表面成分是较纯 H₂O 冰，还有痕量的硫、硫化物、过氧化氢和有机物。这种情况说明，木卫二表面在地质上是年轻的，有从下面出来的新鲜冰更新其表面，且有陨击

改造了表面。

木卫一的直径（3643 公里）和质量（ 8.4×10^{22} 千克）及平均密度（3.57 克/厘米³）跟木卫二及月球相当，这说明它们的物质总组成相似，是少水的岩石质天体。但是，与其他卫星大不一样，木卫一的表面以活火山和不断改变的表面而成为最奇特的和最年轻的地质外貌。伽利略飞船近距探测表明，在特定时间有多到 300 个火山是活动的，从火山口出来的硅酸盐岩浆温度很高（约 1900 开），几千年就可以完全更新其表面。火山活动原因可能是木卫一受到木星及木卫二、木卫三的很大潮汐作用。估算木卫一的潮汐功率约 10^8 兆瓦，这相当于地球上人类总耗能的 10 倍。另一原因可能是木卫一与木星之间有上百万安培的电流作用。

木星各卫星的轨道、大小和质量等特性有很大差别，可以分为三群：第一群是“规则卫星”，包括伽利略卫星等八个较内卫星，它们的轨道偏心率和对木星赤道面倾角小、轨道半径符合提丢斯-波得定则，也都是质量较大的，它们很可能是随木星形成的；第二群是“不规则卫星”，它们离木星远、轨道偏心率和倾角大，质量较小，又可以按轨道偏心率和倾角及轨道半径再分为几个群，它们可能是俘获的小行星或其碎块；第三群是“牧羊卫星”，它们是在木星环系之内或附近的小卫星，或提供给环系物质，或其引力控制环系的结构。

1974 年，先驱者 10 号飞船接近木星时，探测到离木星中心约 $1.7 \sim 1.8 R_J$ 处带电粒子密度突然减少，推测该处有颗卫星或有尘埃环。1979 年，旅行者 1 号和 2 号飞船都对此区摄像，寻到了赤道附近的很暗环系。在 1996—1997 年伽利略飞船拍摄的像上，木星环系显示



木星的环系

出复杂的结构,由四部分组成:(1)主环,从木卫十五和木卫十六轨道(约 $1.79 R_J$)处向内到 $1.72 R_J$ 处,宽约 6000 公里,厚度约 30 公里,其亮度大致均匀,仅中部稍亮些,其外边界恰在最内卫星(木卫十六)轨道处;(2)晕,从主环向内变得更弥漫和更厚,大致到 $1.287 R_J$ 处,厚度达 20000 公里;(3)内薄纱(gossamer)环,从主环的外边界向外延展到木卫五轨道($2.53 R_J$)处;(4)外薄纱环,向外延展到约 $3 R_J$ (木卫十四轨道外),非常暗,其亮度随远离木星距离成正比地减弱,仅在木星同步轨道处($2.24 R_J$)略亮些。

不同于其他的行星环系,在木星环系动力学中,电磁和等离子体作用更重要。据推算,个别颗粒仅约千年,这说明需不断补充尘粒,其来源可能是流星体(彗星碎块)碰撞木卫十六或十四和环内未见的小“母”卫星,以及木卫一的火山尘。有些细颗粒是带电的,受木星磁场的约束而随木星转动。

彗星撞击木星

1993 年 3 月 24 日,休梅克(C. Shoemaker)夫妇和利维(D. Levy)发现一颗好似“压碎了的彗星”,这是他们发现的第九颗彗星,命名为 Shoemaker-Levy 9 (SL9),实际上是一串约 1 公里左右的彗星碎块,各有朦胧的彗发和彗尾(以下称子彗星)。经不断追踪观测,最初辨别出 11 块,后增多至 21 块,它们分离的间距越来越大。从观测资料推算出它绕太阳公转的轨道。马斯登(B. G. Marsden)等计算表明,它变为沿扁长椭圆轨道绕木星运行,可能是在 1992 年 7 月经过近木星点时,受到木星强大引潮力而撕裂为多块,并将会撞击木星。

果然,在 1994 年 7 月 16~22 日,各个子彗星基本如推算预期的,撞击在木星南纬 44° 左右、背面离边缘经度 $4^\circ\sim 9^\circ$ 。虽然地球上不能直接观测到撞击情况,但伽利略飞船记录到了撞击实况。子彗星高速(达 60 公里/秒)闯入木星大气,产生类似于地球上火流星现象,在轨迹后阶段的短暂瞬间完全爆裂粉碎,相当于大炸弹空中爆炸,规模比火流星大得多,估计能量相当于 25 亿~250 万吨 TNT 炸药。

大多数的子彗星撞击都在红外波段观测到羽状物和“饼状物”,它在红外波段长波比短波衰退得快。在光学和紫外波段,所有撞击都在木星上留下伤疤,甚至小望远镜都看到木星被撞击后出现显著的大暗斑,大的有 3 万公里,有的暗斑还呈现类似陨击坑的环状结构,且有从撞击点向外扩张迹象。可能是因为子彗星是倾斜撞入木星大气的缘故,撞击伤疤相当不对称。有些撞击伤疤留存一个月以上,五个月后逐渐消失。光谱观测

到,大气中保留氨和二硫化碳至少到持续撞击后 14 个月。撞击产生的另一惊奇现象是极光。在大的子彗星撞击后 45 分钟,不是在它撞击的木星南半球,而是在北半球中纬处看到极光弧。这是木星的强磁场把撞击抛出的带电质点转移到北半球而产生的极光活动。伦琴卫星所摄木星的 X 射线像显示,撞击后北极区扰动最亮。这场彗星撞击木星的大事件虽然没有直接影响地球,但给地球人类一次生动的天文灾难演示,人们因此更加重视地球被外来天体撞击的危害问题。

这次撞击现象更为研究木星大气提供了宝贵资料。从光谱研究揭示,撞击产生了很多化学物质,诸如水、氰化氢(HCN)、一氧化碳(CO)和木星上存在的微量物质。在撞击事件几年后,仍在木星的高层大气探测到过剩的一氧化碳和氰化氢。

SL9 不是唯一被俘获到木星轨道的,已知有五颗彗星也暂时被俘获到不稳定的木星轨道,大质量的木星频繁地俘获彗星,但像 SL9 这么大的却少有。1997 年,考察历史上的天文画得出,天文学家卡西尼可能记录了 1690 年木星被撞击的伤疤;考察还确定了另 8 次候选撞击的可能性不大。然而,确有几次肯定的撞击木星事件。1979 年 3 月,旅行者 1 号飞船拍摄到木星上的“火流星”。2009 年 7 月 20 日,发现一个在自转系统 II 经度近于 216° 的撞击在木星大气留下的黑斑,大小相似于“BA 卵形斑”,在红外显示为亮斑。它可能是一颗未知的小行星撞击而加热了木星南极附近区较低层大气引起的。2010 年 7 月 3 日,两位天文爱好者拍到木星上的“火流星”,随后在哈勃空间望远镜上显示出撞击伤疤的演变,估计是 13 米大的小行星撞击所致。2012 年 9 月 10 日又一次拍到木星上的“火流星”,可能是 5~10 米的小行星撞击引起的。

三十多年来,先驱者 10 号和 11 号、旅行者 1 号和 2 号、卡西尼(Cassini)和新视野(New Horizon)飞船从木星近旁飞越,尤其伽利略飞船环绕木星并投放探测器进入木星大气,这些探测取得了很多重要信息和研究结果,大大增进了对木星及其卫星和环系的了解。为了更深入探测木星,美国国家航空与航天局在 2011 年 8 月发射了“尤诺(Juno)”号飞船,预计 2016 年到达木星,它每年约绕木星 32 圈,探测其内部结构,测定其大气成分,研究大气对流以及磁场起源和磁层,以期了解木星的形成、演化及其卫星。尤诺号飞船的任务将于 2017 年 10 月结束。欧洲空间局计划在 2022 年发射木星冰月探测器(JUICE)。

关键词:木星 大气 内部结构 磁场和磁层 卫星 环系 彗星撞击