

## 在宇宙中搜寻外星文明的技术印迹

(中国科学院国家天文台 邓舒夏、苟利军 编译自 David Appell. *Physics World*, 2021, (10): 32)

1802年,年轻的德国数学家高斯(Carl Friedrich Gauss)提出了一种让未来火星人类知道我们地球人类存在的方法:在西伯利亚森林中开垦一大片土地,种上小麦,然后创造出一种类似毕达哥拉斯定理(译者注:即勾股定理)的图案。大约80年后,Lowell Observatory天文台的创始人,天文学家Percival Lowell支持在火星上发现了运河的观点,他建议在撒哈拉沙漠挖掘我们自己的运河,在运河里装满石油并点燃它们,从而吸引火星居民的关注。

虽然这两个想法都没有付诸实践,但它们都是“技术印迹”的例子:作为过去或现在技术活动存在的迹象,指出了先进行星文明的存在。这样的搜寻听起来像是科幻小说,但在过去的几年里,天文学家一直在制定技术印迹搜寻的计划,这些印迹可能会被下一代太空望远镜看到,比如被即将于12月发射的詹姆斯·韦布太空望远镜(James Webb Space Telescope, JWST)看到。

### 搜寻天空

过去的60年中,射电天文学家一直在将他们越来越精密的望远镜对准天空,寻找可能来自外星智慧生命的信号。虽然到目前为止还没有捕捉到明确的技术印迹,但多年来我们已经捕捉到了一些有趣的信号。其中包括著名的72 s长的“WOW!”信号,它是1977年8月15日由美国俄亥俄州立大学的大耳朵射电望远镜(Big Ear radio telescope)探测到的。在加州大学伯克

利分校地外文明搜寻研究中心,突破倾听项目(Breakthrough Listen)在2019年4月和5月观测到了“突破倾听候选体1”(BLC1)的无线电信号。虽然“WOW!”信号带有许多预期的外星起源的特征,但是之后它再也没有被观测到。BLC1的信号则是来自距离我们最近的比邻星方向,它的数据正在被分析中。

近几十年来,该领域的另一个巨变是系外行星探测所带来的变革。自从1992年发现最早的两颗系外行星以来,天文学家已经利用开普勒太空望远镜和其他望远镜令人惊叹地确认了4400多颗围绕遥远恒星运转的系外行星,还有大约同样数目的候选行星等待被更深入地研究。系外行星有许多不同的大小和类型,从地外岩石世界到超级地球、类似海王星的系外行星,再到热木星等等。平均而言,每颗恒星都有一行星,但许多恒星拥有一个类似于我们太阳系的家族。

随着这些系外行星的发现,天体生物学家一直在研究“生命印迹”。类似于技术印迹,它们是外星世界的生命迹象,无论是智慧的还是非智慧的。通过分析系外行星凌星时所产生的电磁吸收光谱,在光谱中寻找氧气、甲烷、水蒸气和臭氧(氧的替代品)等气体的存在,从而寻找生命印迹。人们已经用这种方式搜索过一些木星大小的系外行星的大气层,未来JWST应该可以用类似的方式搜索尺寸更小的、类似地球的系外行星。

随着生物印迹科学研究的进步,天文学家意识到也可以在不同波段进行类似的对于技术印迹的搜寻。不一定是专门的搜索,他们可以利用与搜索生物印迹(所谓的共生观测)相同的数据,甚至可以利用几十年前的天文归档数据。美国NASA行星科学家Ravi Kopparapu说:“在这部分科学中,数据为王。”美国航天局和美国国家科学基金会首次资助了至少三个技术印迹领域的项目,并发放了两笔额外基金,用于组织两个不同的研讨会。

### 谁在那里,我们怎么发现它?

当我们寻找智慧生命的迹象时,真的有人在那里吗?今天,我们知道22%的类太阳恒星在它们的“宜居区”中拥有一颗地球大小的行星,那里的表面温度允许液态水的存在。考虑到银河系有1000到4000亿颗恒星,所以在整个银河系中会存在数百亿颗类地球行星,在它们上面,生命或许已经出现并且演化。

但我们能发现它们吗?意大利罗马第二大学的理论天体物理学家和天体生物学家Amedeo Balbi假设,任何可探测到的技术印迹都必须存在于我们过去的“光锥”(来自任何单个事件的光穿过时空的路径)的范围内,因此他也得出了一些简单但强有力的结论。为了能够接收到信号,那个文明就必须在我们的过去已经建立,这样从那个文明发出的光有时间传到我们这里。在银河系的历史上,只要对于系外文明的出现时间没有偏好选择(即它们在

银河系的历史上均匀随机出现)的话, Balbi认为, 要想探测到来自这种文明的信号的一个关键因素是, 技术印迹必须存在尽可能长久——最好是在1亿到10亿年的尺度上。

在 TechnoClimes 2020 在线研讨会上, Balbi说: “我们不应该从文明或物种长寿的角度来思考, 而应该从技术印迹的持久性来考虑。”至于观察策略, 他说, 最好把搜索重点放在几个长期存在的技术印迹上, 而不是大量短暂的技术印迹上。

多年来, 有很多关于我们从地球上看到的可能的技术印迹建议。例如城市夜景灯光、大气工业污染、硅基光伏阵列的太阳能收集器等, 它们会在行星的反射光上留下印迹。我们可能也会发现人造的表面成分, 密集的轨道卫星星座, 戴森球等巨型结构产生的废热, 当它们从恒星前面经过时, 会观察到奇特的或变暗的物体。另一种极端的可能性是“恒星工程”, 在这种情况下, 先进的文明可能会以其他令人费解的方式改变恒星和其他天体的外观。

其他指标包括无线电波或激光脉冲等电磁信标, 甚至是先进文明发射的、朝着我们太阳系前进的太空探测器。我们自己已经完成了发射类似太空探测器, 它们是先驱者10号和11号以及旅行者1号和旅行者2号探测器, 而旅行者1号和2号目前都已经进入星际空间。这些所谓的人造地外文明是技术印迹领域的合法部分, 尽管有时候会被一些荒谬的说法所滥用, 比如在火星上发现了一张脸, 然而实际上它只是一块岩石。

另一种可能性是, 在我们的太阳系内外, 或者在柯伊伯带或奥尔特云中, 可能会存在人造物体, 我们可以通过它们反射的光线来识别

它们。一个移动的天然物体反射的阳光会按照  $1/r^4$  的方式变暗, 其中  $r$  是物体到我们的距离, 而一个移动的人工照明的光源只会按照  $1/r^2$  的方式变暗, 这是一个可以检验的差异。

技术文明可以产生相当数量的人工照明, 而外星人或许生活在类似于我们城市地区的密集环境中。所以有人提出了一种有趣的技术印迹, 那就是当行星在其恒星周围运动时, 用日冕仪遮挡恒星的图像, 寻找处于夜晚一侧行星的城市灯光。假设在银河系近邻的恒星周围存在着类似于地球的行星, 并且它的上面存在着地球上商用的高功率灯光时, 亚利桑那大学的天文学家 Thomas Beatty 研究了通过直接成像的方式探测到这种灯光的可能性。据悉, 在距离太阳不到10秒差距的范围内, 大约有十几颗潜在的类似宜居类地行星。

Beatty指出, 地球上只有0.05%的地区可以被认为是“高度”城市化的(纽约或东京等城市的夜间高峰期照明), 他计算发现, 就像美国航天局在即将发布的天文和天体物理学十年规划(Astro2020)中所讲的那样, 两台即将被资助的太空望远镜可以探测到附近M矮星(红矮星, 比太阳更冷, 因此更暗)周围行星所发出的这种光, 这两个望远镜分别是大型紫外光红外巡天器(LUVOIR)和宜居系外行星成像任务(HabEx)望远镜, 后者包括一个日冕仪和一个遮星板飞行器, 从而可以直接对类地行星进行成像。

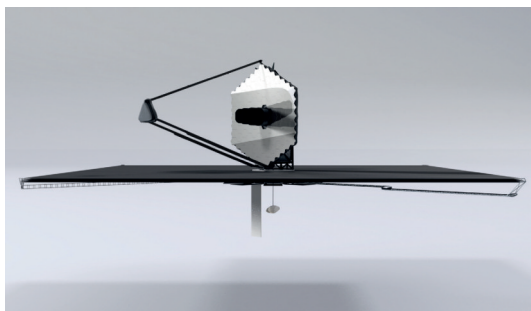
Beatty发现, 通过使用日冕仪, 如果一个行星表面城市化水平达

到0.4%(8倍的地球城市化水平)至3%的话, 可以用100小时的观测时间探测到这些光。如果要探测到类太阳恒星周围的行星上所发出的夜间光(因为类太阳恒星更亮, 使得探测更加困难), 城市化程度要达到10%或更高。Beatty还考虑了“生态城市”(ecumenopolis)的概念, 即一个全球性的城市。假设拥有典型的类似于地球的云层覆盖, 从太空看到的大部分光线都是被混凝土和道路所反射, 他发现可以通过上面提到的两台望远镜在大约50颗临近恒星的周围探测到类似的行星。

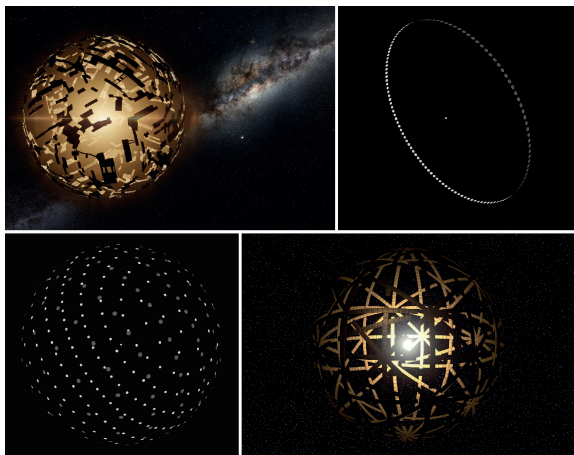
### 可能的信号?

2015年, 行星猎人计划的科学家注意到一颗F型主序恒星的光曲线出现了奇怪的波动, 这颗恒星距离地球约450秒差距。它引起了专业天文学家的注意, 其中包括耶鲁大学的 Tabetha Boyajian, 他探测到这颗恒星的亮度不规则地变暗了, 最高可达22%。对这颗现在被称为“塔比星”(Tabby's star)的意想不到的观测引发了许多猜测, 从行星残骸到地外巨型结构, 再到自由的外星卫星, 最后得出最有可能的原因是空间尘埃。

尽管最终的解释很平常, 但这



系外行星探测器。大型紫外/光学/红外探测器(LUVOIR)是美国航天局提出的一个多波长空间天文台, 可能是发现技术印迹的理想设备。这是美国航天局的天文和天体物理学十年规划(Astro2020)正在考虑的项目之一



能量收集设备。经典的戴森球体是一个完全包围恒星的“壳层”(左上)。这在机械上是不稳定的,但其他的戴森巨型结构更有可能工作,包括环形(右上)、气泡状(左下)和蜂群状(右下)

起事件促使 NASA 的天文学家 Ann Marie Cody 研究苔丝卫星 (TESS) 的数据, 该卫星自 2018 年以来一直在以 30 分钟的时间尺度监测数千万颗恒星的亮度变化。Cody 目前正致力于自动搜索 TESS 的光变曲线, 期待发现一些罕见的事件, 如显著变暗或变亮。

通过使用 100 多种不同的统计方法, 她希望区分普通的异常现象 (比如食双星系统) 和罕见的异常现象。后者包括恒星周围的掩星物质、系外行星表面的太阳能电池板、正在收集能量的绕转的巨型结构, 或者其他未知的技术印迹。这类异常最终将被提交给地面望远镜以进行更专门的搜索, 包括射电波段的地外文明搜索。

### 发现污染成分

另一个技术印迹可能是污染物, 这是外星生物在技术发展的早期阶段向他们居住星球的大气所排放的。事实上, 通过观察光谱数据, 可以用与氧气和甲烷等生物印迹相同的方式来识别大气中的化学污染物。

2014 年, 哈佛大学的天文学家

Henry Lin 和他的同事们在地球大气层中发现了某些化学污染物, 如氯氟烃, 它们在 JWST 望远镜覆盖的光谱范围内具有明显的吸收特征。如果在围绕白矮星运动的类地行星的大气层中存在着这些化学物质, 并且它们的浓度是地球大气含量的 10 倍, 那么在大约一天半的观测时间内, 通过望远镜就可以探测到。

另一种被认为具有技术印迹的污染物是  $\text{NO}_2$ , 它是车辆和化石燃料发电厂燃烧的副产品。在今年发表的一项研究中, Koppapu 和他的同事们检查了是否可以在 10 秒差距的距离内从系外行星的大气层中检测到  $\text{NO}_2$ 。如果行星无云遮挡, 那么使用拟议的 LUVUOIR 望远镜观测大约 400 小时就可以在红外线波段探测到类地球的  $\text{NO}_2$  水平。

美国航天局于 2020 年 6 月向纽约罗切斯特大学的 Adam Frank 授予了第一笔非无线电技术印迹搜索基金, 用于建立一个名为“表征大气技术特征”(CATS) 的在线光谱数据库, 其中一半用于表征  $\text{NO}_2$  和氯氟烃的印迹, 另外一半用于表征外星表面太阳能电池板中矿物反射光线在光谱中留下的印迹。

### 外星巨型结构

一个值得注意的技术印迹是探测到戴森球——这是一种假想的巨型结构, 由弗里曼·戴森于 1960 年在 *Science* 上首次提出。最初构想先进的外星文明可能会围绕其宿主恒星建造一个中空的壳层, 球体将捕获所有恒星的能量——在我们太阳

系的情形下, 获取的太阳能量将是落在地球上层大气能量的 20 亿倍。

一个真正的壳层, 也许是由一个系统的行星和小行星组成的, 在机械上是不稳定的 (戴森也知道这一点), 但其巨型结构, 如球形的“笼子”、“蜂群”、“气泡”或“环”都可以工作。这些结构中的恒星能量收集器可以通过微波辐射的方式把能量传输到行星表面, 不过这可能会极大地改变恒星的光谱, 产生一个峰值在红外的黑体光谱。以我们的太阳为例, 它是一颗 G 型主序星, 在地球轨道距离处的壳层会因为余热产生一个温度大约为 300 K 的黑体光谱, 辐射的峰值波长为  $10 \mu\text{m}$ 。研究人员还发现, 在我们银河系中, 10 千秒差距的范围内, 环绕恒星级质量黑洞的热戴森球体在紫外、光学、近红外和中红外波段都可以探测到, 这使得目前的仪器, 如哈勃太空望远镜上的 WFC3 相机就可以发现它。

从 1983 年发射的红外天文卫星 (IAS) 开始, 我们在银河系内外进行了几次戴森结构的搜索, 不过还没有任何戴森球存在的迹象。

最终, 如果外星生物没有造访我们的话, 寻找地外生命的证据将来自于所收集的大量关于技术印迹和生物印迹的数据。卡尔·萨根在 1982 年给 *Science* 的一份“请愿书”中写道: “我们一致认为, 对外星智慧存在的唯一重大检验应该来自于实验。”他还写道: “关于这个问题的先验论点不具有任何说服力, 同时也不应该被用来替代任何的观测计划。”他敦促进行“协调性的、全球范围的和系统的搜索”。希望在本世纪接下来的时间里, 萨根探测外星文明迹象的设想能够实现。