

图源【1】

寻觅地球2.0

武延庆（多伦多大学）

导读：当地球上的大多数人们正在为气候变暖，塑料泛滥，猪肉价格，橘发小丑，英国脱欧，儿女教育等各种各样的麻烦，打破脑筋一筹莫展的时候，一小群人悄悄地把目光对准了深邃的太空。他们致力于回答一个与现实毫不搭噶的问题：在这个宇宙里，地球是否孤独？

从远古起，我们的祖先夜夜凝望天空，早就熟悉了星星和太阳绕着地球，日升夜降的作息。可是五百年前哥白尼跟我们说，不对，不是太阳绕着地球转，而是地球绕着太阳转。这之后，地球的神圣位置一降再降。天文学家发现太阳只不过是伟大的银河星系里，一个平凡得不能再平凡的恒星，而银河系又只是宇宙里一个平凡得不能再平凡的星系。这让我们人类怀疑，自己在这个宇宙中是否独特。地球上的生命和智慧，我们引以为傲的技术和进展，是不是在这个宇宙中，只是一件寻常事情？外星智慧也许跟我们只有一河之隔？

这样的想法只是一个设想。目前不仅外星智慧尚无影无踪，就连著名的估算星际文明的德雷克公式（Drake equation）里，我们也只对前两项有所了解：银河系内恒星的数目，和恒星中拥有行星的比例。迄今为止，我们对第三项，拥有宜居区内的

类地行星的比例(所谓的 $\eta_{\text{地球}}$)，了无所知，因为我们只知道太阳系里的地球。德雷克公式后面的几项，都跟生命有关，我们更无从谈起。

本文要说的是，以现在的技术，我们可以在几年内找到地球2.0并测量 $\eta_{\text{地球}}$ 。更让人兴奋的是，中国的空间技术，将帮助人类找到这个答案。

● 地球2.0与生命的偶然？

生命在地球上之起源，然后之产生智慧，说起来好像顺理成章。可是用哲学的名词刷一刷：存在是合理的，但不一定是必然的。现在的科学研究让我们认识到，地球生命的产生，或许只是一些偶然事件的积累。

先讲地球的轨道。地球离太阳的距离，不远不近，正好在我们所说的恒星宜居带里面（图1）。假若地球离太阳近一点，地表温度略高，温室效应强烈到大气里的水汽会越聚越多，温度继续升高，我们会走上金星的不归路。又假设地球离太阳稍远一点，表面温度将会下降到零度以下。水汽凝结成冰，冰封大地，太阳光都被反射回外空，地球会变得像火星那样，一年四季冰洋不化。

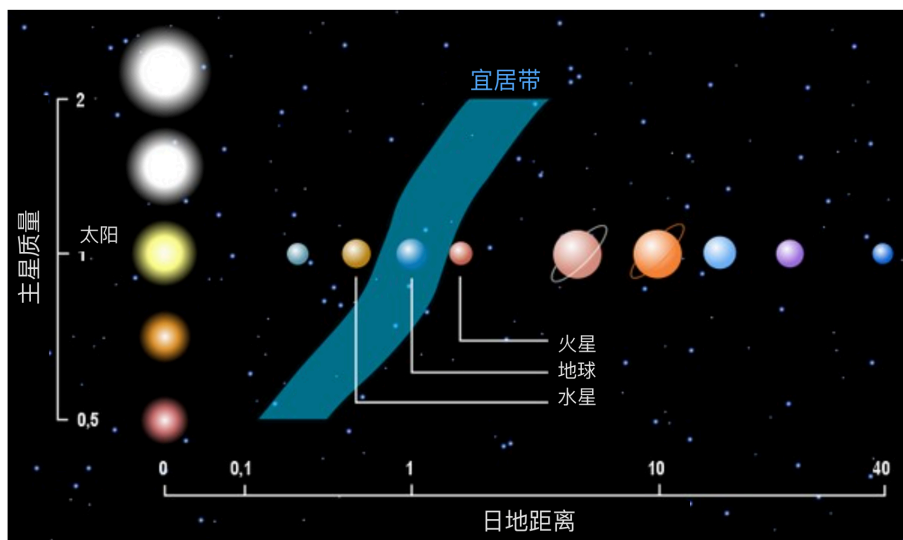


图1：地球轨道正处于太阳类恒星的宜居带里（蓝色）。这里，温度合适，行星表面可以有液态水存在。宜居带随恒星大小而迁移：恒星越小，宜居带就越靠主星。目前，受技术限制，不少天文项目都只在质量较

低的恒星周围寻找宜居带行星（如NASA的TESS任务）。但是，这些行星可能由于自旋同步，恒星耀斑等原因，环境太恶劣而不适合生命起源。生命可能偏爱太阳类恒星的宜居带。图源：【3】

再讲地球的质量呢，也不大不小，恰到好处。假设地球质量再大一点，重力增大，我们的化学火箭不足以发射卫星。除非有原子能，航空航天无从而来。天文学也只能停留在地表。假设地球的质量小了一点，重力减小了，大气里的水分子却又容易被太阳风刮走。我们的大气日渐稀薄，环境会变得像火星一样恶劣。

地球的大气层和海洋，也是调节得非常完美。大气里的二氧化碳浓度太高了，全球会变暖得比阿拉伯酋长国的沙漠还热；浓度如果太低了，地球又会变成一个冰封万里的白色星球；地球的大气，如果不是由透明的氮气和氧气组成，太阳光穿越不到地表，也就不会有光合作用。海洋占地球表面的70%面积。生命在海洋里顺利演化成功，才登上陆地。可如果海洋太大，没有了陆地，也就没有了生火做饭的炉头，人类智力的进化会迟滞许多，当然也就没有了蒸汽机及集成电路。。。

缔造出人类智慧的这些偶然事件，在系外行星上是否会再次出现？没有人知道。但是如果我们能找到第二个地球，科学验证就成为可能。

受现在的技术限制，我们不可能找到与地球一模一样的行星。所以我们退一步而寻找所谓的地球2.0，这些是与地球大小相似，轨道相似，主星相似的行星。在所有的系外行星中，它们的环境最有可能孕育生命。

● 开普勒计划（2009-2013）

就算粗了天文的读者也可能知道，寻找系外行星不是一件新鲜事。我们现在已确知了4千多个系外行星。可是，这里面，居然没有一个长得像地球！

这个故事应该从1995年开始讲。这一年，两位瑞士人（Mayor & Queloz）用法国南部的一个2米小望远镜探测到了第一个系外行星，这个发现立即被美国人Marcy & Butler确认。2019年，前面两位荣获诺贝尔物理奖，而Marcy却因性骚扰指控缠身，被UC Berkeley辞退。

这20多年来，地面望远镜已找到近千个行星，这些大多也是通过径向速度法（走Mayor&Queloz的老路），也就是观测恒星在隐形行星的引力下来回摇摆。这样找到的行星大部分与木星一样质量庞大，离我们要找的地球2.0相差甚远。

幸好，这不是人类唯一的魔法。早在1984年，当我们对地外行星还一无所知时，William Borucki，时任NASA工程师的一个传奇人物，就已经先知先觉地在筹划另一种寻找办法了。他的想法很简单。每当金星凌日（太阳-金星-地球三体连线），金星把太阳的极小一部分挡住，太阳就变得暗了点。一个位置合适（而且足够聪明）的外星人也可以通过观测地球凌太阳，来发现我们的地球。当然，凌星事件发生的概率较小，要找到地球2.0，必要观测大量的恒星，并且要不眨眼地凝视很长的时间（几年）。更且我们的测光仪器要足够精确：地球凌太阳时，只遮住了太阳光盘的万分之一（图2）。

所以虽然这个办法很浅显，NASA（美国航空航天局）却不买账。从1992年Boroucki第一次提议，这个项目接连五次都被NASA用技术不够成熟的理由绊倒。幸亏William Borucki这个人不仅先知先觉，更有超于凡人的毅力。他不泄气，耐着性子在地面上发展探测器和探测技术，把技术难关一个个克服，最后终于说服NASA，2009年得以成功升天 — 这就是NASA的开普勒（Kepler）计划。

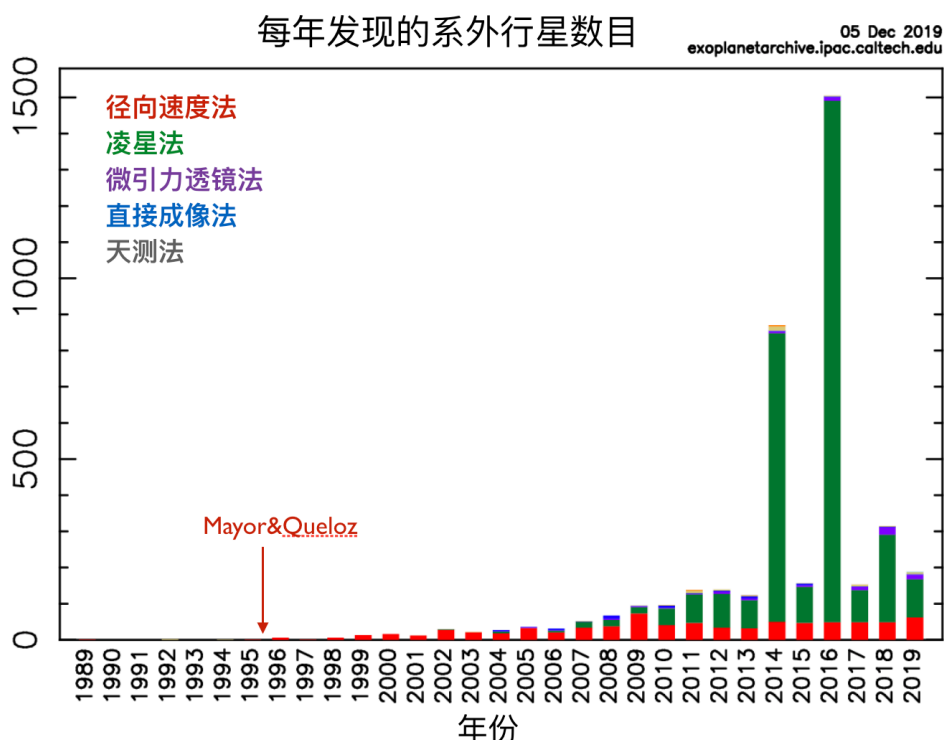


图2: 自从1995年的第一纪录至今，每年发现并证实的系外行星数目。开普勒卫星的入场(2009年)，使凌星法（绿色）主导了近十年来的发现空间。外星世界的丰富性正在我们眼前快速展开。图源【6】

开普勒卫星打开了观察宇宙的一个大窗口，几年之内它单枪匹马地发现了近三千个系外行星（图2），不仅让人类所知的地外行星数增长了好几倍，更重要的是，开

普勒的行星使人类大开眼界，颠覆了我们对系外行星世界的认识。传统的径向速度法告知我们的大都是些巨型行星（类似于木星和土星，但也有些例外），而开普勒揭示了宇宙内一类前所未知但又极其普遍的行星种群（超级地球和亚海王星，见图3）。这些小型行星绕着银河系中大约三分之一的恒星近距离运转。它们比巨行星更为常见三倍，也比后者更令人兴奋：它们的大小，与地球相差不远了。

开普勒计划成就了整个行星科学领域辉煌的十年（也让不少人成功拿到教授职位）。可是辉煌中，又有一个未言的遗憾。开普勒计划的初衷，是寻找像地球一样的行星。可是它找到的几千个行星里，居然没有一个长得像地球！

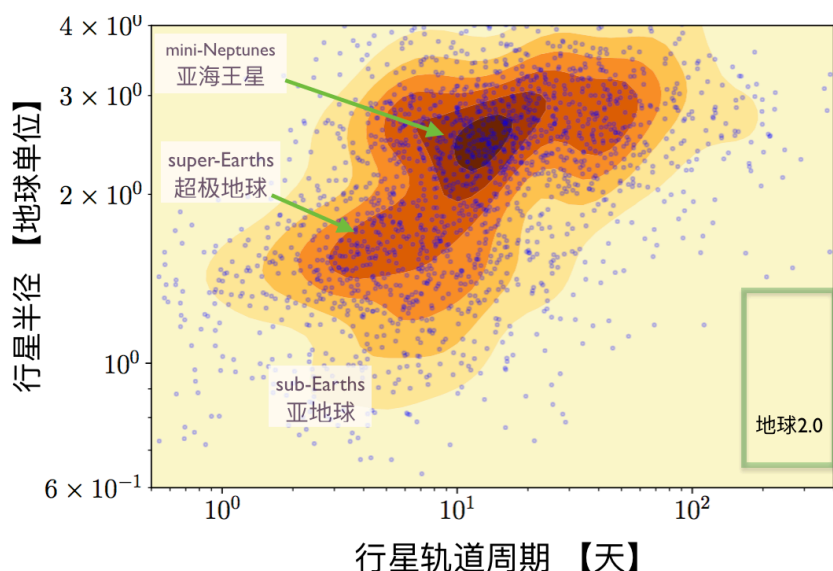


图3：开普勒任务发现的小型行星在半径和轨道周期的分布。绝大多数这些行星属于所谓的“超级地球”或“亚海王星”，它们在日地距离以内围绕主恒星运行，其大小为1到4个地球半径。现在普遍认为它们代表了一代行星。开普勒没有找到地球2.0（绿色框），但是找到了一些不在宜居带的类地行星，并且逼近绿色的宜居区域。图源【9】。

有人问，你怎么知道那些行星长得像还是不像地球？

不管是径向速度技术探测到的巨型行星，还是开普勒任务发现的亚海王星，它们都可被称为“一代行星”（太阳系的土，木，天王和海王星就是例子）。它们的表面笼罩着厚厚的氢气，表明它们是在恒星生命早期的时候形成的。这时，恒星周围还环绕着一个氢气盘，是造星工程的废弃材料。就连那种叫做超级地球的，虽然它们拥有固体的地表，现在理论认为它们其实也是亚海王星，只不过因为太靠近主星，被恒星强烈的X射线剥掉了其与生俱来的氢气大气，留下一个裸露的核。相比之下，地球和它的小伙伴行星应该被称作“二代行星”。它们可能是氢气盘消失后，不知道哪来的残渣碎片碰撞聚拢而成。

一代行星不太可能孕育生命。假设你运气不好，出生在这样一个行星上头，你会慢慢地随风飘落（厚厚的氢气）到一个软塌塌的地面——氢气的温室效应将使行星温度保持在几千度之高，足以融化钢铁；就算那些裸露的行星（超级地球）也好不到哪。这些超级地球离主星这么近，它们的岩石地表，就算没有热得变成熔浆，也离这个温度不远了。反而，正如我们在地球上见证的那样，二代行星的环境对生命形成和演化更友好些。它们的地下和大气可能包含生命所需的化学元素（碳，氧，氮等），它们的大气层可能相对较薄，产生恰当的温室效应。

不幸的是，开普勒不仅没有找到地球2.0，连二代行星好像都没有找到几个。难道是太阳系里出了什么意外，才产生地球这种异物？

开普勒的失败，一个可能的解释是因为在宇宙里，地球真的是孤独的。但是，现在还不是放弃搜索的时候。开普勒的失败还有另外几个原因，足以让我们坚持找下去。

第一，恒星不‘恒’。恒星表面气候复杂多变，它们的亮度也不停变化。开普勒上天后，收到了一个令人不悦的礼物：恒星的闪烁不定，比我们的预想糟糕多了。在这嘈杂的背景下，开普勒没法听到一个万分之一的微弱信号。

第二，厂家质量把关不够。开普勒运行4年之后，两个反作用转动轮连续失灵，整艘耗资6亿美元的飞船就因为这些价值20万美元的陀螺仪发生故障而报废，从此变成了游荡太阳系的孤魂野鬼。

但是，在开普勒所凌视的几万颗恒星里，很可能地球已经开始现了踪迹。只不过因为它们的声音太小，被埋藏在恒星的噪音里，无法解读。而开普勒的英年早逝，又使它功亏一篑，与地球失之交臂。开普勒的这个遗憾，人类能否弥补？

● 地球2.0与中国空间计划

2019年12月3日，一场答辩会正在中国空间中心紧张地进行中。上海天文台和南京紫金山天文台各提出了一个寻找地球2.0的空间计划，评委们正在听取报告，频频发问，裁断孰胜孰负。

上海台的计划，简称为ET (EarthTwo)，由7个中等大小的广角望远镜组成(图4)。这个卫星准备瞄准开普勒及其附近的几个天区，持续4年监测二十多万个亮星，以捕抓到行星凌星时的微弱信号。目前猜测每十个太阳中大约有一个有地球2.0(也就是前文所说的 $\eta_{\text{地球}} \sim 10\%$)。如果对话，ET就能在4年内找到十几个地球。除此之外，ET还能找到近千个宜居带外的类地行星，对这些二代行星进行第一次“人口普查”。

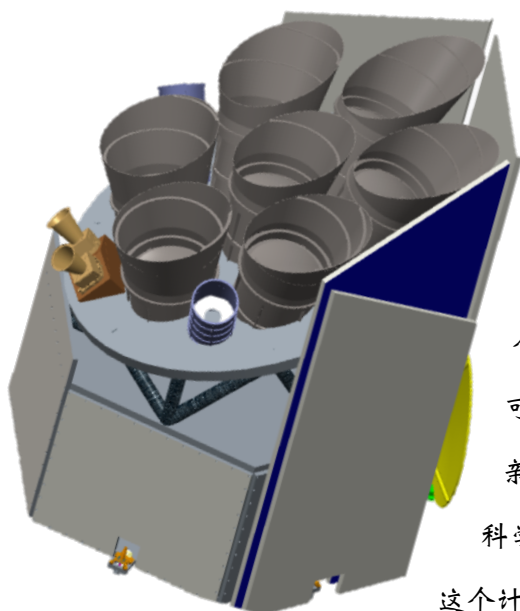


图4: 上海天文台提出的ET卫星计划。七个广角望远镜分别凝视着开普勒已观察过的天区及其邻居区域，通过仔细测量二十多万个恒星四年中每刻的光度，捕抓到小型行星凌星时的微弱信号。即使每十个太阳中只有一个有地球，ET也能在4年内找到十几个地球。除此之外，ET可以找到成千上万个不同种类的系外行星，包括地球的远亲近戚。ET虽然比开普勒卫星体积小，造价低，但是它的科学产出预计会与开普勒媲美。中国的天文学家们还相信，这个计划甚至比欧空局正在建造的PLATO飞船更有把握成功。

在四年内，一个比开普勒更小的卫星怎么就能完成开普勒未尽的业绩？除开这十年来的技术进步外，还可以这么解释。设想你在一个嘈杂的酒吧里跟人聊天，你的声音太小，对方听不见，你得说多几次才有效果。我们要寻找的地球，其实可能已经在开普勒繁浩的数据里有了踪迹，我们只需要再认真听几次，就可以把它们捕抓到。开普勒留下的其实不是遗憾，而是一个淘金窟。

紫金山台的卫星计划，更是独辟蹊径。这个大胆的计划力主发展另外一种寻找行星的办法，叫做‘天测’。观测恒星在行星引力的作用下，在星空上的微妙舞步。要探

测到地球，这个技术需要达到一个前所未有的精度：毫角秒 — 这相当于分辨出两根并排放在月亮上的牙签。但是，确实值得静下心来，下大力气攻关。

寻觅地球2.0的过程最大地挑战了人类的创造力。而上海台和紫台的两个计划互补互助，从不同方向，用不同步骤冲刺。地球是否孤独的命题，很有可能是由中国空间科学骄傲地解答出来的。

● 世外桃源

找到地球2.0，可不是指望移民到那儿。这些充满异星情调的世界，动辄离我们几十光年。不过，地球人类正在建设各项空间和地面的巨大望远镜，准备耐心地盯着这些小星球（特别是那些凌星的地球），远距离地勘测它们是否孕育生命。下一场的好戏将更加精彩！

找到地球2.0，整个人类就像一个从封闭山沟里突然蹦到大城市的小孩，他的眼界突然开阔丰富了许多。“视野决定成就”，我们身边的一些难题，是不是也会迎刃而解？

作者简介：武延庆，多伦多大学天文系教授。本科就读于中国科技大学地空系，后获加州理工学院天体物理博士，并在伦敦大学和多伦多大学做博士后研究。目前主要研究方向是行星结构和形成，行星盘及其他。她参与ET计划的科学设计。

参考文献

1. <https://www.nasa.gov/ames/kepler/earths-bigger-older-cousin-artistic-concept>
2. 德雷克公式: <https://baike.baidu.com/item/德雷克公式>
3. 宜居带: https://en.wikipedia.org/wiki/Circumstellar_habitable_zone
4. 寻找系外行星的现有技术: https://en.wikipedia.org/wiki/Methods_of_detecting_exoplanets
5. 2019年诺贝尔物理学奖: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2019/advanced-information/>
6. 系外行星数据库: <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu>
7. William Boroucki的故事: <https://www.nasa.gov/feature/keplers-borucki-retires-after->

[five-decades-at-nasa](#)

8. 开普勒反作用轮故障: <https://www.nature.com/news/the-wheels-come-off-kepler-1.13032>
9. 恒星闪烁对开普勒的影响: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2011ApJS..197....6G/abstract>
10. 30% 的恒星有小型行星: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2018ApJ...860..101Z/abstract>
11. 超级地球和亚海王星的血缘关系: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2017ApJ...847...29O/abstract>
12. 系外行星的研究未来 (欧空局): <https://sci.esa.int/web/exoplanets/-/60657-the-future-of-exoplanet-research>
13. 系外行星的研究未来 (NASA): https://nightsky.jpl.nasa.gov/news-display.cfm?News_ID=692