

实体书电子版系列·之二

经典行星的故事

(太阳系三部曲·之二)

卢昌海

Copyright © 2025 by Changhai Lu

版权所有，侵权必究。

All rights reserved. No part of this book may be reproduced in any form or by any means, electronic, mechanical, now known or hereafter invented, without written permission from the author, except in the case of brief quotations embodied in critical articles and reviews.

For information, please email
lu_changhai@yahoo.com.

10 9 8 7 6 5 4 3 2 1



《经典行星的故事》

（实体书封面）

目录

电子版序	I
1. 给天文学家出难题的行星——水星	1
一. 水星的公转与自转	1
二. 水星“一日游”	13
三. 水星的结构与起源	25
2. 堕入地狱的姊妹——金星	35
一. 天堂般的想象	35
二. 地狱般的现实	47
3. 天堂是怎样炼成的——地球	66
一. 从到处存在到适度存在	66
二. 稀有地球假设	71
三. 稀有地球之争	86
4. 探寻生命的踪迹——火星	102
一. “血”与“火”的行星	102

二. 我们是火星星人吗?	109
三. 我们能成为火星星人吗?	123
5. 太阳系行星的老大哥——木星	137
一. 并非气态的气态巨行星	137
二. 狂暴的木星大气	145
6. 最美丽的行星——土星	158
一. 能“浮”在水上的行星	158
二. 土星的光环和卫星	170
实体书后记	188
参考文献	196

电子版序

本书是同名实体书《经典行星的故事》(科学出版社, 2016年)的电子版,系自制电子书,隶属于“实体书电子版系列”¹。本书所对应的实体书写作缘起可参阅本书末尾的“实体书后记”。本书与实体书的差别如下:

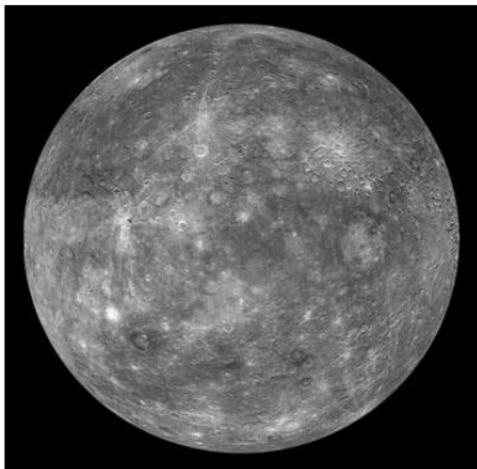
1. 增添了“电子版序”(即本序)。
2. 增添了若干脚注并订正了个别笔误。
3. 增添了若干插图。
4. 恢复了被实体书编辑改掉的若干原文。

2025年2月3日

¹ 关于“实体书电子版系列”的来龙去脉,可参阅该系列的第一本(同时也是本书所隶属的“太阳系三部曲”的第一本)——《太阳的故事》——篇首的“‘实体书电子版系列’序”(已包含在该书样章里,可[预览](#))。

1. 给天文学家出难题的行星——水星

一. 水星的公转与自转



水星（Mercury）是离太阳最近的行星——这“近”当然是天文学意义上的“近”：水星在近日点（perihelion）和远日点（aphelion）离太阳的距离分别约为 4,600 万公里和 7,000 万公里——或约为 0.31 天文单位和 0.47 天文

单位²。水星不仅离太阳近，离地球也不远，最近和最远距离分别约为 7,700 万公里和 2.2 亿公里，以最近距离而论是离地球第三近的行星（仅次于金星和火星）。

初看起来，离太阳近意味着能反射较多的阳光，对于行星这种自身不发光的天体来说意味着绝对亮度较大；离地球近则锦上添花，不仅意味着表观亮度较大，而且也便于行星探测器前去探测。照说这样的行星该是比较容易观测和探测，从而也了解得较多的，事实却恰好相反：水星是一颗在各方面都给天文学家们出难题的行星，我们对它的了解则在太阳系行星中即便不是最少，也是较少的，甚至一度比对遥远的天王星和海王星的了解还少。

而且不无戏剧性的是，水星给天文学家们出的第一

² 这两个距离的相对差别之大在太阳系行星里是创纪录的，它所对应的轨道偏心率（eccentricity）约为 0.21，仅次于曾经是行星、后来遭“降级”的冥王星。

个难题恰恰就是因为离太阳近——太近。

由于离太阳太近，对于地球上的观测者来说，水星多数时候都会被太阳的光芒所干扰——甚至彻底淹没，每年只有几个星期的时间适合观测。而且即便在那段时间里，观测也大都只能在黎明或黄昏，在水星比太阳早升起或晚落下的一小段时间里进行，而不像多数其他天文观测那样能以黑暗夜空为背景进行³。这样的观测不仅会因明暗对比的不够显著而增加难度，而且还会因视线以接近地平线的角度穿越较长距离的大气层，而容易受大气的扰动与折射，及地平线附近的地形或建筑物的影响。这些都使得对水星的观测相当困难——虽然以最大表观亮度而论，水星其实是全天排名第六的最明亮天体，仅次于太阳、月亮、金星、火星和木星。

³ 不过在最最有利的条件下，水星也有一小段时间能在黑暗或很接近黑暗夜空的背景下被观测。可惜这种“最最有利的条件”只有某些特殊纬度的观测者在特殊时段里才有机会享受。感兴趣的读者不妨想一想，地球、水星、太阳处于什么样的相对位置才能产生出这种“最最有利的条件”？

为这种困难雪上加霜的是：水星的公转与自转周期，以及地球的公转周期之间存在着混杂了必然与巧合的微妙关系，长时间误导了天文学家们。

具体地说，水星的公转周期约为 88 天（更精确的数值约为 87.969 天），自转周期约为 59 天（更精确的数值约为 58.646 天），两者之比正好是 3:2。这种存在于公转与自转周期间的简单比例关系是天体力学中形形色色的共振现象的一种，被称为“轨旋共振”（spin-orbit resonance）。水星的轨旋共振是太阳对像水星这样离得较近，且轨道偏心率（eccentricity）较大的行星的巨大潮汐作用造成的，具有一定的必然性。巧合的部分则是：水星与地球的所谓“会合周期”（synodic period）约为 116 天，不仅很接近水星自转周期的两倍（即 $116 \approx 59 \times 2$ ），同时也接近地球公转周期的 $1/3$ ——即 $1/3$ 年（即 $116 \approx 365/3$ ）。

什么是水星与地球的会合周期呢？它是水星、地球与太阳三者连续两次回到——或近似回到——同一组相对位置的时间间隔⁴。这种“相对位置”的一个最简单的例子是水星与地球在太阳同侧且与太阳联成一线，这时地球与水星的距离最近（“会合”）；一个稍复杂的例子则是水星处于所谓的东大距（greatest eastern elongation）或西大距（greatest western elongation），这时从地球上看到的水星相对于太阳的分离角度——即所谓距角（elongation）——最大。由于观测水星的一个主要困难就是太阳光芒的干扰，而距角越大干扰越少，因此水星处于东大距或西大距是有利于观测的。不过还有一个因素也很重要，那就是水星视运动轨迹与地平线的夹角，因为在同样的距角下，视运动轨迹与地平线的夹角越大，

⁴ 假如水星与地球的公转轨道是同一平面上的同心圆，则会合周期的计算是相当容易的（感兴趣的读者可利用水星公转周期约为 88 天，地球公转周期约为 365 天这两个数据自行计算一下）。不过，由于水星与地球——尤其是水星——的公转轨道并非圆形，更不是“同一平面上的同心圆”，116 天实际上只是一种平均，水星与地球的会合周期会在 105 天到 129 天之间变化。

则水星比太阳早升起或晚落下的幅度——即离地平线的最大高度——就越显著（好比立在地上的一根杆，与地面的夹角越大，顶端离地面的高度就越大），从而越有利于观测。进一步分析表明，由于这第二个因素的存在，每三次东大距或西大距中才有一次是最有利于观测的，它们彼此间隔三个会合周期——确切地说最有利于观测的机会共有两组，一组是东大距，对应于水星比太阳晚落下的情形；另一组是西大距，对应于水星比太阳早升起的情形。（同组之内）连续两次最有利于观测的机会通常间隔三个会合周期。

将这一结果跟水星与地球的会合周期“很接近水星自转周期的两倍，同时也接近地球公转周期的 $1/3$ ——即 $1/3$ 年”这一巧合，以及水星公转与自转周期之间 3:2 的轨旋共振联系起来，不难看到，（同组之内）连续两次最有利于观测水星的机会之间通常间隔 1 年——即地球公转 1 圈，或水星自转 6 圈，或水星公转 4 圈。由于这

些都恰好是整数，因此在这个时间间隔之内水星与地球的公转与自转都几乎恰好转回到同一方位。由此得出的直接推论是：水星会以同一面朝向地球。或者完整地说：（同组之内）连续两次最有利于观测水星的机会几乎总是会观测到水星的同一面。由于很多天文学家正是选择最有利于观测水星的机会来观测的，因此他们每次看到的水星表面往往是相同的。

这种微妙关系把天文学家们误导到了一个比真实情形更简单、然而却是错误的猜测上，即猜测水星永远以同一面朝向太阳。因为若如此，则在任何一个东大距或西大距时，水星都自动会以同一面朝向地球，从而无需依赖水星与地球的会合周期“很接近水星自转周期的两倍”这一早期天文学家并不知道巧合，就可以解释每次看到的水星表面往往是相同的这一现象。1882 – 1890年间，意大利天文学家夏帕雷利（Giovanni Schiaparelli）通过对水星的认真观测“证实”了这一猜测。1924 – 1929

年间，希腊天文学家安东尼艾迪（Eugenios Antoniadis）基于长期观测所绘制的水星地图也大体“证实”了这一猜测。不仅如此，这一猜测所对应的是水星公转与自转周期之比为 1:1 的情形，它作为轨旋共振中最简单的特例，被称为“潮汐锁定”（tidal locking），本身也是天体力学中很常见的共振形态（比如月球的公转与自转就是一个例子）。因此，这是一种在观测和理论上都说得通的猜测。这样的猜测长期误导了天文学家，使他们直到 20 世纪 60 年代初还以为水星总是以同一面朝向太阳⁵。

天文学家们发现这一猜测有问题，是因为它的一个

⁵ 当然，这一误导所影响的主要是对水星自转周期的确定（因为公转周期是很容易测定的）。在那段被误导的时期内，天文学家们普遍认为水星自转周期与公转周期一样，约为 88 天。另外值得说明的是，由于像水星与地球的会合周期很接近水星自转周期的两倍那样的巧合只是近似成立，因此只要连续观测足够长时间，哪怕每次选择的都是最有利于观测的机会，原则上也仍可以看到水星表面的其他部分，从而发现“水星总是以同一面朝向太阳”这一假设的错误的（因为按这一假设，但凡在最有利于观测水星的机会观测，就只能看到水星的同一面）。不过也许是观测水星本身就很难之故，再加上先入之见的影响，虽有人发现过蛛丝马迹，却都未敢确认，从而使历史并未沿这一途径前行。

推论——别小看推论，在科学这样具有严密逻辑的体系中，对推论进行检验是发现问题的重要途径之一。

那是一个什么推论呢？很简单：假如水星总是以同一面朝向太阳，那么这一面就永远是白天，另一面则永远是黑夜。而一个永远是黑夜的地方有个基本特征就是冷。因此，假如水星总是以同一面朝向太阳，那么这个离太阳最近的行星很可能悖论般地拥有太阳系行星上最寒冷的地方，这就是推论。但是 1962 年，天文学家们通过微波研究发现了水星背着太阳那一面并没有如想象中那样的寒冷，而是能发射与那样的寒冷不相称的热辐射。这显示那一面很可能并不是永远背着太阳，而是残留着白天的余温。这样一来，“水星总是以同一面朝向太阳”这个初看起来颇为合理的猜测就被动摇了。1965 年，通过直接向水星发射雷达波并观测反射波所显示的体现水星表面运动的多普勒效应（Doppler effect），天文学家们直接测定了水星的自转周期，结果发现约为 59 天，只有

公转周期的 $2/3$ 左右。这一结果后来得到了反复验证，彻底推翻了“水星总是以同一面朝向太阳”这一猜测，并确立了水星公转与自转周期之间 $3:2$ 的轨旋共振。

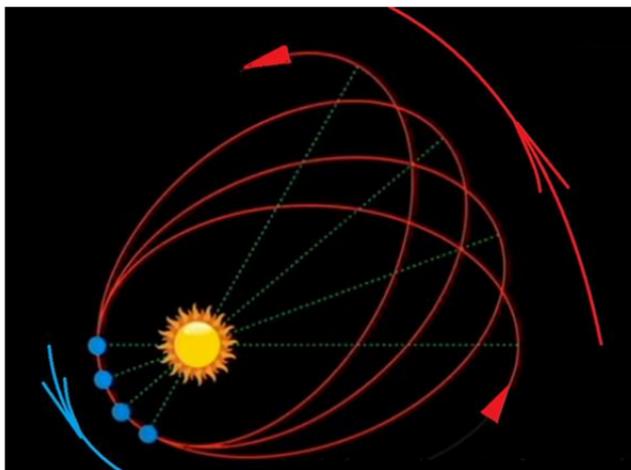
测定自转周期并确立 $3:2$ 的轨旋共振并不是水星运动带给天文学家的唯一难题。一个远比它更出名的难题是所谓的水星“近日点进动”（perihelion precession）之谜。这个难题很早就被注意到了，因为限于设备，早期天文学家们所能从事的天文研究种类很有限，其中很大一类就是观测行星的轨道，并与当时公认的牛顿万有引力定律的计算相比较。这类工作是颇有成效的，不仅在多数情况下能以很高的精度验证理论，而且哪怕在观测与理论一度出现偏差时，也曾有过辉煌——甚至更辉煌——的成就，即海王星的发现⁶。

⁶ 有关海王星发现的详细历史，可参阅拙作《那颗星星不在星图上：寻找太阳系的疆界》（清华大学出版社，2013年）。【电子版注：《那颗星星不在星图上：寻找太阳系的疆界》即将于本书之后制作为电子书《寻找太阳系的疆界》，成为“太阳系三部曲”的第三部，敬请期待——后文将不再重注这点。】

但可恶的水星却给这类研究也出了一个难题。

观测显示，水星的椭圆形轨道相对于背景星空是缓慢旋转着的。这种被称为近日点进动的现象本身并不新奇，是所有行星和卫星的轨道在不同程度上共有的。麻烦出在哪里呢？出在具体数值上——就如西谚所云：魔鬼存在于细节之中（The Devil is in the detail）。精密的观测及计算表明，水星近日点进动的观测数据与理论计算之间存在一个虽然微小但很确凿的偏差。在理论上，造成水星近日点进动的主要因素是其他行星的引力摄动（gravitational perturbation）及太阳的扁度（oblateness）等。但把所有这些因素都考虑进去之后，虽然 99% 以上的观测值都得到了解释，那剩余的略小于 1% 的观测值却仍是个谜。这部分有多大呢？约为每 100 年 43 角秒（arcsecond）——相当于圆周的十万分之三。每 100 年才相差圆周的十万分之三，这几乎是一种难以察觉的细

微，但在天文学家们的细致观测下不仅被注意到了，而且远远大于了观测和理论计算的误差，从而构成了一道确凿的难题。



水星近日点的进动

这道难题早在 19 世纪中叶就被注意到了⁷，却直到

⁷ 这方面的一位先驱人物正是预言海王星位置的两位天文学家之一的法国天文学家勒维耶 (Urbain Le Verrier)，他于 1859 年报告了这一当时以为是每 100 年 38 角秒的偏差。不过勒维耶猜测这种偏差是一颗比水星离太阳更近的行星造成的，这后来被证实为是错误猜测——关于这一猜测及观测努力，可参阅拙作《那颗星星不在星图上：寻找太阳系的疆界》(清华大学出版社，2013 年)。

1915 年才由爱因斯坦（Albert Einstein）的广义相对论所解决，成为广义相对论的三大经典验证之一。

二. 水星“一日游”

介绍完了有关水星的“运动学”信息，接下来让我们假想性地到水星上去作一个“一日游”吧。

我们前面提到过，以最近距离而论水星是离地球第三近的行星，但与这个排名很不相称的是，哪怕在航天科技已有半个多世纪历史的今天，到水星上去仍不是一件容易的事情。追根溯源，这其实也是水星离太阳太近带来的难题。由于离太阳太近，水星绕太阳公转的平均速度高达每秒 48 公里左右，比每秒 30 公里左右的地球绕太阳的公转速度快得多，这使得飞往水星的探测器必须具有很高的速度，而探测器如果想要环绕水星甚至登陆水星的话，还得解决另一个难题，那就是在接近水星

时减速到能被水星引力俘获的低速度。由于这些难题的困扰，从距离上讲是“邻居”的水星实际上却是最少被行星探测器访问的行星之一。事实上，在 2004 年之前，人类只向水星发射过一个行星探测器，那就是 1973 年 11 月 3 日发射的“水手 10 号”（Mariner 10）。但“水手 10 号”因为没有能力减速，只对水星进行了掠过式（fly-by）探测。直到 2011 年，人类发射的第二个水星探测器“信使号”（Messenger）在升空六年半之后，才终于进入了一个环绕水星运动的长椭圆轨道。而登陆水星的探测器，则尚不在目前的行星探测时间表上⁸。

因此不仅目前，甚至在未来若干年内，水星“一日游”都只能是假想性的。

⁸ 2015 年 4 月 30 日美国东部夏令时（EDT）下午 3 时 26 分（北京时间 2015 年 5 月 1 日凌晨 3 时 26 分），“信使号”水星探测器成功地撞击了水星，以在水星上产生出第一个“人造陨石坑”的戏剧性方式结束了自己的水星探测使命。据估计，“信使号”撞击水星的速度约为每小时 14,000 公里，撞击产生的“人造陨石坑”直径约为十几米。这是迄今人类航天器与水星的唯一一次“亲密接触”，不过很难称得上是“登陆”。

与地球相比，水星的 59 天左右的自转周期是很慢的，相对于它自己的 88 天左右的公转周期来说就更是如此。对地球来说，当她自转完一圈后，其在公转轨道上转过的角度还不到 1° ，从而太阳表观方位的变化也几乎就是一圈。这意味着以太阳方位为标识的地球上的一天——或所谓“平均太阳日”（mean solar day）——几乎就等于地球自转一圈的时间。但对于像水星这样自转缓慢的行星来说，情形就完全不同了，因为当水星自转完一圈时，它在公转轨道上也转过了大半圈，大大抵消了太阳表观方位的变化。具体地说，由于公转与自转周期之间存在 3:2 的轨旋共振，当水星自转完一圈时，其在公转轨道上已转过了 $2/3$ 圈，从而太阳表观方位的变化只有 $1/3$ 圈。这说明，水星要自转三圈——或公转两圈，即两“年”——才能使太阳的表观方位改变一圈，这才是以太阳方位为标识的水星上的一“天”。因此，水星上的一“天”等于两“年”，用我们地球上的“天”来衡量的话，则相当于 176 天！

由此可见，水星“一日游”是一场旷日持久的旅游。

那么，水星上的环境又如何呢？很遗憾地告诉大家：糟透了。

天文学家们早就知道，水星是没有大气层的⁹。这是不难理解的，因为水星离太阳太近，大气层会因太阳烘烤产生的高温而散失得较快，而水星的质量——如后文将会介绍的——则较小，只有地球质量的 5.5% 左右，从而对大气分子的引力束缚能力较弱。另外，水星磁场的强度只有地球磁场强度的 1% 左右，无法有效地阻止比地球附近强劲得多的太阳风（solar wind）将大气层“吹走”。这些因素共同造成了水星没有大气层的结果。

没有大气层的一个直接后果是天总是黑的。我们在

⁹ 当然，说是没有大气层，其实也并非绝对没有，只是微乎其微而已。水星有一个极稀薄的大气层，由原子或离子状态的氢(H)、氦(He)、氧(O)、钠(Na)、钙(Ca)、钾(K)等成分组成。

地球上习以为常的“蓝天”是由阳光在大气层中的散射造成的，在没有大气层的水星上，哪怕是“白天”，哪怕比地球上大得多、亮得多、热得多的大太阳高悬头顶，天依然是黑的，依然可以看到满天的星星。这是地球上没有的奇景。水星上的这种特殊景观给科幻作家提供了很好的素材。比如 1956 年，著名美国科幻作家阿西莫夫（Isaac Asimov）写过一篇题为《幸运之星与水星的大太阳》（*Lucky Starr and the Big Sun of Mercury*）的科幻小说，其中给人印象很深的一个场景就是在水星黑夜与白天的交界线附近远望地平线上巨大而壮丽的日冕（corona）。日冕在地球上是在日全食期间才看得见的景象，在水星上却可以轻易看到，并且由于水星离太阳很近，看到的日冕也大得多¹⁰。

¹⁰ 阿西莫夫这篇小说是一个被称为“幸运之星系列”（*Lucky Starr series*）的系列科幻中的一篇。这个系列科幻我们在后面还会提到，它名为“幸运之星”（这译名其实是小说主人公名字的意译），实则很不幸地处在行星探索取得大进展的前夕，结果是小说问世不久，其所描述的很多行星环境就被证实为是大谬不然。相对而言，关于水星这篇还算过得去的，毕竟水星没有大气这一特点是正确的，不过当时人们还普遍以为水星总是以同一面朝向太阳，阿西莫夫的故事也有赖于这一点。

没有大气层的另一个后果，是没有了大气层对温度的调节作用。这一点，加上“日”和“夜”的极为漫长，使得水星上一“天”之中的温差是太阳系中最悬殊的。与之相比，像新疆这种地球上温差较大的地方的“早穿棉袄午穿纱，围着火炉吃西瓜”的温差简直不值一提。

具体地说，水星上白天的最高温度与水星离太阳的距离有关，但哪怕在远日点时也高达约 280 摄氏度（ 280°C ），在近日点时更是高达约 430 摄氏度（ 430°C ）以上，足以熔化某些熔点较低的金属——比如熔点不到 330 摄氏度（ 330°C ）的铅。而到了晚上，温度则走向另一个极端：降到零下 180 摄氏度（ -180°C ）左右。

更具体地说，水星上典型的一“天”是这样的：拂晓时的温度是全天最冷的零下 180 摄氏度（ -180°C ）左右，这是“黎明前的黑暗”，长夜由此而尽，温度开始攀升；至“早晨八九点钟”，温度升至堪称舒适的 20 摄氏

度（ 20°C ）左右；但这种舒适是不能持久的，随着“日头”升高，温度继续上升，在“艳阳高照”的正午时分升至绝对不舒适的 400°C 左右；下午两点来钟时，则进一步攀升至全天最炎热的 430°C 以上。中国古代有个传说叫做“后羿射日”，说天上曾有 10 个太阳，这当然是无稽之谈，不过拿来形容水星上的太阳倒是颇为合适，因为在近日点附近时，高挂在水星天空上的太阳的表观面积几乎恰好是地球上太阳表观面积的 10 倍左右！只不过，“后羿射日”的传说中后羿射掉了 10 个太阳中的 9 个，而在现实的水星上，唯一能做的就是等待日落。在日落时分，温度会降至勉强能忍受的零下 20°C 左右；午夜时分则进一步降至约零下 170°C ¹¹。

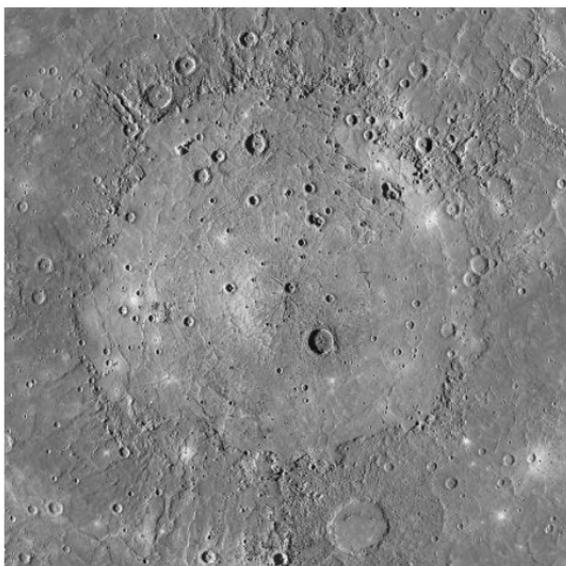
¹¹ 当然，这里的时间概念全都对应于将水星上的“天”类比成地球上的天（因此每个“小时”约相当于地球上的一星期）。这里还假定了温度最高时水星恰好运动到近日点附近，并且阳光是直射的（否则的话，温度将会有所不同，因为温度是与具体位置有关的）。另外可以顺便提醒的是，水星上太阳的升落并不像地球上那样规律，而是存在某些有趣的复杂性，比如在近日点附近，水星的公转角速度可以超过自转角速度，从而在水星上某些地方可以看见太阳的逆行。

很明显，没有足够封闭而隔温的设备，我们是万万不能在水星上逗留的。如此大起大落的温度及没有大气层的环境显然也排除了这颗中文名字带“水”的行星上存在液态水的可能性。不过，在某些特殊区域里有可能存在所谓的“水冰”(water ice)——即通常所说的冰¹²。比如以中国元代书法家赵孟頫的名字命名的直径约 167 公里的“赵孟頫陨石坑”(Chao Meng-Fu crater)被认为约有 40% 的区域是终日不见阳光的，那里的温度很可能始终维持在零下 170 摄氏度(-170°C)以下。一般认为，在那样的区域里很可能存在亘古不化的“水冰”，这一点在很大程度上受到了雷达回波观测的支持（因为对雷达回波极化状态的研究显示出它很可能是被“水冰”所反射的）。据估计，水星上“水冰”总量有可能高达 1,000 – 10,000 亿吨，相当于地球南极区域所储数量的万分之

¹² 之所以用“水冰”这样古怪的名称，是因为当我们离开熟悉的地球环境来讨论其他天体上的“冰”时，在地球上通常只以液态或气态存在的物质——比如通常只以气态存在的二氧化碳——也能加入“冰”的行列，从而有必要加以界定。

一左右。

水星上的一“天”如此漫长，“一日游”若不四处活动一下将会是极度乏味的。那么，水星上的活动空间有多大呢？还真不小。虽然自冥王星被降级之后，水星已是太阳系中最小的行星，但它的直径——如后文将会介绍的——仍有约 4,879 公里，表面积几乎达到地球陆地面积的一半左右，或相当于亚洲与非洲的面积之和。漫步水星表面，最显著的景观就是陨石坑。由于没有大气层，大大小小的陨石都能撞击到水星表面，而不会像在地球上那样，较小的陨石在穿越大气层时被摩擦产生的高温烧毁。在水星表面的陨石坑中，最大的一个被称为卡洛里盆地（Caloris Basin），直径达 1,550 公里左右，面积比中国的新疆还大，形成于约 38 – 39 亿年前。据推算，形成卡洛里盆地的“肇事者”是一颗直径在 100 公里以上的巨型陨石。它的撞击不仅造成了巨大的卡洛里盆地，而且产生了几乎能飞散到水星各个角落的碎片，



“信使号”水星探测器拍摄的卡洛里盆地

撞击造成的“地震波”甚至在与撞击点遥遥相对的水星表面另一侧的所谓的“对跖点”（antipode）处汇聚，对那里的地貌造成了巨大破坏¹³。这种巨大撞击对天体表面“对跖点”附近地貌造成破坏的现象被称为“对跖点效应”（antipode effect），并非水星所独有。这种效应的

¹³ 也有一种猜测是撞击产生的碎片直接砸到了“对极点”上。

存在，意味着在真正巨大的陨石撞击下，最远离撞击点，从而貌似最安全的“对跖点”具有特殊的不安全性。当然，对于我们这些脆弱的地球生物来说，远比那小得多的陨石撞击就足以对生物圈造成毁灭性打击，那种意义上的不安全性也就谈不上。

在没有大气和液态水的环境里，陨石坑不会像地球上的地貌一样受到风化等效应的侵蚀，从而忠实地记录了水星在悠长岁月里——尤其在早期——所遭受的猛烈的陨石撞击。这种记录的忠实程度甚至使天文学家们能够用陨石坑的密度来粗略地估计水星表面很多地貌的年龄：陨石坑密度较低的地貌相对年轻，陨石坑密度较高的地貌则相对古老。这种方法被称为“撞击坑计数”（Crater counting），它对于估计像水星这样尚未被探测器登陆过，从而没有岩石样本可以研究的天体的地貌年龄是很重要的。不过，也正是由于没有岩石样本可以研究，从而无法进行可靠的校正，这种估计的误差也比较

大。比如次级陨石坑（即由真正的陨石撞击所产生的碎片撞击出的陨石坑）就会对这种方法产生干扰。此外，这种方法在很大程度上依赖于水星与月球的相似性，以月球作为校正基准，但处于太阳系不同区域的水星与月球虽有一定的相似性，比如都没有空气，在陨石撞击方面究竟有多大的可比性还是一个未知数。

除陨石坑外，水星表面还有很多其他地貌，比如有高原、平原之分，还存在皱脊（*wrinkle ridge*）、峭壁、山谷，以及早期岩浆活动的痕迹等等。不过跟绚丽多姿的地球相比，水星是很乏味的，连色调都是灰暗的，灰暗的表面、黑暗的天空，酷寒的长夜，外加一挂就是几个月之久的恐怖的大太阳，这基本上就是水星“一日游”的核心内容了。不过，对普通游客虽然乏味，但像水星这种在漫长时间里地貌未受风化等效应侵蚀的行星如同巨型的化石，对研究整个太阳系的形成都有重要价值，这对天文学家们来说是很有吸引力的。

三. 水星的结构与起源

接下来再谈点比较物理的东西——先从简单的谈起。

当我们越出行星本身的范围，用更广的视角来看，一个行星最简单、但也算得上最重要的物理性质乃是质量。说它“重要”，是因为行星对外显示的力量主要是引力，而质量是引力的源泉。说它“简单”，则是因为质量是一个总量，不像地貌那样琐碎；而且数值稳定，不像温度那样多变；更主要的是，质量通常是很容易确定的，比如地球的质量是中學生都能推算的——当然，前提是万有引力常数的数值已知¹⁴。

不过这种“简单”到了擅出难题的水星这里也变成了难题，因为测算行星质量的基本思路是利用行星的引

¹⁴ 对推算地球（以及太阳）质量感兴趣的读者，可参阅电子书《太阳的故事》（2025年）。

力，具体方法则是观测在行星引力作用下物体——比如卫星——的运动。不幸的是，水星却是一位“光杆司令”，连一颗卫星都没有。因此，本该很容易确定的质量在水星这里变成了难题。

当然，这难题绝非无解。比如 1841 年，德国天文学家恩克（Johann Franz Encke）率先通过分析一颗经过水星附近天区的彗星所受的引力摄动，对水星质量进行了粗略测算¹⁵。又比如 1968 年，小行星伊卡洛斯（1566 Icarus）从距离水星 1,600 万公里处掠过，天文学家们通过对它所受水星引力摄动的分析，也对水星质量进行了测算。测算水星质量的其它手段还包括利用其对离它最近的行星——金星——的引力摄动，以及利用其对“水手 10 号”（Mariner 10）行星探测器的引力摄动等。但最

¹⁵ 读过拙作《那颗星星不在星图上：寻找太阳系的疆界》（清华大学出版社，2013 年）的读者也许记得，海王星是在德国的柏林天文台被发现的，当时的台长名叫恩克。这世界很小，学术圈——尤其是当年的学术圈——更小，那位恩克与这里提到的恩克正是同一人。

精确的测算，则是利用一度成为水星“人造卫星”的“信使号”水星探测器。经过一系列测算，水星的质量被确定为 33,000 亿亿 (3.3×10^{20}) 吨左右，仅相当于地球质量的 5.5% 左右，在太阳系行星之中是最小的。

另一方面，水星的大小早在公元 5 世纪就被一位印度天文学家以不可思议的运气估算到了 99% 的精度，此后经“水手 10 号”探测器等的测定，被确定为了直径约 4,879 公里。由于自转缓慢，水星几乎不存在因自转造成的形变，从而总体形状非常接近球形。由质量和直径不难计算出水星的表面重力加速度约为 3.7 米/秒²，相当于地球表面重力加速度的 40% 左右。这意味着，一个 120 斤重的人在水星上的的体重仅为 45 斤左右，会有“身轻如燕”的感觉。

由质量和直径还可计算出水星的平均密度约为 5.4 克/立方厘米。这是一个非同小可的密度，在太阳系行星

中仅次于地球的约 5.5 克/立方厘米。但是，地球由于质量比水星大得多，其密度在一定程度上是被巨大的“自重”压出来的，若把这一因素剔除，地球物质的所谓“非压缩密度”(uncompressed density) 其实只有 4.4 克/立方厘米左右，甚至更低。相比之下，水星由于质量小，其密度显得更“货真价实”，哪怕剔除掉“自重”造成的压缩作用，也仍高达 5.0 克/立方厘米以上。因此，从单纯的物质组成来讲，水星其实是一个密度比地球更大的行星，也是太阳系中密度最大的行星。

密度这么大的一个直接推论就是水星上含有超高比例的重元素，尤其是铁或铁的化合物——因为铁是太阳系中最常见、数量最多的重元素。在重力影响下，经过几十亿年的漫长时光，水星上的重元素大都沉入内部，构成了一个富含重元素的核心 (core)。从水星的密度可以推知，它的这一核心约占总质量的 75–80% 左右，远高于地核占地球总质量的 32.5% 的比例。相应地，水星

的类似地幔和地壳的部分在总质量中所占的比例则比地球及其它类地行星（Earth-like planet）小得多，堪称是一种“皮薄馅厚”的奇特结构。

水星为什么会有超高比例的重元素及“皮薄馅厚”的奇特结构呢？这是它给天文学家们出的又一道难题——一道侧重物理的难题。初看起来，这题目似乎并非真的很难，因为太阳系形成之初，离原始太阳这一“光明的源泉”越近的区域温度越高，从而使得行星盘中较轻的、易挥发的物质倾向于被驱离到远处，留下来的则富集了不易挥发的重元素。这个特点在定性上与太阳系中固态的类地行星离太阳近，气态的巨行星（gas giant）离太阳远的大格局基本一致。按照这个特点，离太阳最近的水星理应有最高比例的重元素。

不过，定性上虽能说通，定量上却还差点。计算表明，由上述因素所产生的“非压缩密度”只能达到 4.5 克

/立方厘米左右，与 5.0 克/立方厘米以上的实际值尚有不小的偏差。为了解释这一偏差，一些天文学家做出了一个大胆的猜测：猜测水星原本是一个比现在大得多的行星，只是在演化的早期不幸遭遇了一次超级撞击，撞击的双方分别为质量约为目前水星质量两倍的“原水星”（proto-Mercury）和一个质量约为目前水星质量 1/5 的“大陨石”。这种比形成“卡洛里盆地”的撞击还要恐怖无数倍的超级撞击的后果可就不是什么陨石坑，或“对跖点效应”了，它不仅使“原水星”的成长中途“夭折”，而且还对整个外层造成了毁灭性破坏，大部分物质惨遭剥离，使原本正常大小的核心相对于残存的外层来说变得异乎寻常的大。

这种猜测可靠吗？实在很难说。在太阳系形成的早期，超级碰撞的发生本身当然不是不可思议的，但对于这种发生在几十亿年前的灾变型事件，想寻找确凿证据却是极其困难的。而这种事件的规模之剧烈，不定因素

之众多，又使得理论计算注定只能是粗略的。如果一定要对这种难以精密验证的猜测进行评价的话，也许只能耍滑地说上一句“希望与挑战并存”：这种猜测能定性地解释诸如超高比例的重元素、“皮薄馅厚”的奇特结构那样的特征，从而是有希望的；但它也面临一些挑战，比如按这种猜测，水星外层最易被剥离的挥发性物质的含量应该微乎其微，但“信使号”水星探测器却在水星外层发现了数量较多的挥发性物质。看来，关于水星的这道侧重物理的难题还有待进一步探索。

水星给天文学家们出的另一道侧重物理的难题则是我们前面提到过的水星的磁场。那磁场的强度只有地球磁场强度的1%左右，但强度虽小，它出现在像水星这样“小块头”的行星上却仍然是出乎意料的。水星的磁场是如何产生的呢？这也是一道难题。

关于天体磁场的产生，目前最流行的机制是所谓的

“发电机机制”（dynamo mechanism），它要求天体内部存在旋转或对流的导电流体。这对于像地球这样“大块头”的行星或像太阳那样的恒星来说是轻而易举就能实现的要求，但对水星来说却有点麻烦。因为水星的质量实在太小了一点，是被假设有可能存在发电机机制的质量最小的天体。质量小为什么有麻烦呢？这是因为天体内部导电流体的存在需要一个能熔化内部物质的高温环境，而后者的产生又通常有赖于天体“自重”带来的巨大压强。因此，发电机机制对天体质量有一定的要求，而像水星这样质量较小的行星似乎难以满足要求，从而有点麻烦。

为了解决麻烦，天文学家们提出了一些假设，比如假设水星内部存在较多的放射性物质（它们衰变产生的能量有助于实现高温环境），或假设存在特殊的隔热物质防止热量散失（从而有助于维持高温环境）。造就高温环境的另一种可能的幕后推手是水星所受太阳引力的潮汐

作用，这种作用对于像水星这样离太阳近，而且轨道偏心率大的行星是比较显著的，它会使水星因形变而产生能量。

除了造就高温环境外，降低水星内部物质的熔点也有助于导电流体的存在。这方面的一种假设是认为水星内部某些区域的铁与其他物质（比如硫）组成了熔点较低——从而更容易成为流体——的化合物，比如硫化铁——它的熔点比铁低 300 多度。这种假设有一个额外的好处，就是水星的密度虽然很高，却也没有高到铁的程度，假设一部分铁与像硫那样密度较低的元素组成化合物，从密度角度讲也有一定的合理性。

当然，上述假设并非互相排斥，而是有可能共同起着作用。除发电机机制外，也有天文学家猜测目前的水星磁场乃是过去曾经有过的磁场的残余。这种猜测的好处是不必假设水星内部目前仍存在导电流体，从而不必

煞费苦心地为这种存在寻找理由。缺点则是水星的磁场虽然微弱，作为残余磁场却似乎又太强了。

真正的答案是什么呢？目前还无法知晓。我们确切知晓的是：所有这些有关水星磁场的假设或猜测都有赖于水星内部的物质分布，而后者又有赖于对水星更详细的观测来间接推算。在目前这种观测数据比较匮乏的情形下，推算不出唯一的模型，确立不了模型的可靠性，都是不足为奇的。

关于水星我们就介绍到这里，没有空气、酷热、严寒……是水星环境的主要标志，这样的环境无疑是“糟透了”，但在行星大世界里，它远不是最糟糕的——事实上，跟它的邻居、离太阳次近的金星相比，水星的环境已经算不错的了。

实体书后记

这是一本早就想写的书，这是一本意外才写的书；这是一本进度滞后的书，这是一本提前交稿的书⁷⁴。

我从小喜爱天文。在吸引我喜爱天文的美丽星空中，恒星的美对于小时候的我是抽象的——无非是“光点”或“火球”，行星却具体得多，不仅跟地球一样有地貌，而且还能想象有朝一日登陆其上。因此，行星是我从小就喜爱的。

后来到美国念书，大约自 1995 年起，一度迷上了一个名叫“猎户座之王”（Master of Orions）的电脑游戏。

⁷⁴ 电子版注：这个效仿狄更斯（Charles Dickens）小说《双城记》（*A Tale of Two Cities*）开篇的句子在实体书中被编辑改为了“这是一本早就想写却意外才写的书；这是一本进度滞后却提前交稿的书。”——这是我印象较深的改动，电子版恢复了原文。实体书编辑对本书的改动当不止于此，时隔多年，多数已不再记得。但本书作为自制电子书，是基于主页版制作的，故所有改动——无论记得与否——均已恢复原文。

那是一个所谓的星际策略游戏（space strategy game），玩家从拥有一颗行星和一艘飞船开始，逐渐向外探索，逐渐移民并建设其他行星——当然，免不了跟其他玩家发生争战。那游戏中有段小动画我印象很深，那是每次登陆新行星时，宇航员把旗帜插在行星上的动画，时间仅区区数秒，画质也粗糙，但对于喜爱天文的我来说，却足以勾起无限遐想，仿佛自己变成了那位宇航员，站在神秘的新行星上。

从某种意义上讲，对行星的这种喜爱早早就播下了写作行星故事的种子。

但真正想将那种子付诸“培育”则是在2009年底应清华大学出版社之约写《太阳的故事》时。当时的设想是在《太阳的故事》之后再写两本行星故事，一本就叫《行星的故事》，介绍太阳系的行星；另一本叫做《太阳系以外的行星世界》，介绍太阳系以外的行星。不过，《太

阳的故事》一写就是近两年，不仅“透支”了我对天文题材的写作兴趣，也让我觉察出了写行星故事的风险，那就是我的写作速度太慢，而行星故事的信息量太大，信息量的增加又太快——不仅几乎天天有太阳系以外的新行星被发现，就连太阳系行星的探索也是新闻不断。硬写的话，有可能一出版就已陈旧，甚至有可能写到后面前面就已陈旧。

这些因素将设想中的行星故事打入了冷宫。

如此又隔了数年，2014年6月，科学出版社发来约稿信，想让我写一本“教你数星星”之类的少儿科普。我对那样的题材兴趣不大，不过科学出版社是我从小就印象深刻的两个出版社之一（另一个是高等教育出版社），我早年喜爱的书有相当部份是科学出版社出版的，他们来信约稿，虽题材不合兴趣，我心里还是高兴的，不愿把话说死，便转而提议了曾经设想过的行星故事。不过

当时我对天文题材的写作兴趣并未复苏，故在提议的同时特意强调了该书的写作约需两年时间。按以往的经验，出版社主动约稿时往往希望短期内有稿，因此这两年之期有很大的可能性是形同婉拒。

但出乎我意料的是，科学出版社很快同意了我的提议及两年之期，从而成就了这本早就想写却意外才写的书。

这本书的交稿期限被定为 2016 年 10 月 1 日——那是依我的两年之期确定的。不过我实际上直到 2015 年 1 月才收到合同，而等处理完其他约稿，正式动笔——实为动键盘——时，已是 2015 年 4 月，可谓一开工就已进度滞后。

自那时起进度滞后就一直没离开过本书。

刚开始撰写时，我对本书的内容规划是将曾经设想过的《行星的故事》和《太阳系以外的行星世界》适度压缩、合而为一，使这本行星故事名副其实地涵盖所有类型的行星——无论是太阳系内还是太阳系外的。

但这个如意算盘破灭了，因为才写到土星，时间就已过去了一年多，离交稿时间只差了5个月。照这样的进度，后面的天王星、海王星、太阳系以外的行星等内容绝无可能在交稿期限之内完成。而且就算交稿期限不是问题，照这样的进度，原先担忧过的一出版就已陈旧，甚至写到后面前面就已陈旧的问题也将无可避免。

不过另一方面，已完成的从水星到土星这六大行星的部分在篇幅上却大大违背了适度压缩的规划，而显著“超标”了，这使我萌生了一个新想法，那就是将这六大行星的故事单独成书，称为《经典行星的故事》——因为这六大行星恰好是人类用肉眼发现的、从而自远古

时期就知道的所谓经典行星（虽然其中的地球是很晚才被公认为行星的）。令我高兴的是，科学出版社同意我的新想法。于是在撰写了后记——即本文——之后，我于2016年6月1日交了稿，反而比原定的交稿期限提前了4个月，使本书成为了一本进度滞后却提前交稿的书。

以上是本书的由来，接下来略谈几句本书的风格。

本书由于不像《太阳的故事》那样以一整本书的篇幅写一个天体，而是每个行星只占一章，故在选材上不得不有严苛得多的取舍——尤其是对像地球和火星那样资料超级富裕的行星。从某种意义上讲，我觉得本书可算作一本“行星随笔”——即为每颗经典行星写一篇随笔。相应地，我对本书的期望则是一方面像随笔一样不追求面面俱到，另一方面也像随笔一样每篇都写出点独到和出彩的地方。行星是一个很大众化、甚至已在一定程度上被写滥的题材，但我依然期望，哪怕是对行星已

有一定了解的读者，也能在本书中读到一些其他行星科普中不太读得到的东西，而且能享受到新的阅读愉悦。

本书作为“行星随笔”的风格也为将本书调整为《经典行星的故事》提供了一种额外理由。因为从“行星随笔”的角度讲，天王星和海王星这两颗“非经典行星”最值得写的乃是它们的发现史，但我却已在《寻找太阳系的疆界》一书中详细写过了。因此，本书的调整不仅解决了进度滞后的问题，同时也避免了与我其他作品的重叠。而且更巧的是，调整为《经典行星的故事》的本书正好向内衔接《太阳的故事》，向外衔接《寻找太阳系的疆界》，与那两者共同构成了一个覆盖面基本完整的“太阳系三部曲”。这个“太阳系三部曲”曾有编辑跟我提议过，因起初设想的《行星的故事》涵盖面超出太阳系，我曾不以为然，岂料最终无巧不成书地应了那个提议。

希望大家喜爱本书，也希望已读过《太阳的故事》和《寻找太阳系的疆界》的读者喜爱这个“太阳系三部曲”⁷⁵。

2016年5月26日

⁷⁵ 电子版注：不过如我在“‘实体书电子版系列’序”（收录于电子书《太阳的故事》，2025年）中所言，这个“太阳系三部曲”对实体书而言虽概念上一目了然，实际却因三本书分属两个出版社，而无法标注为“三部曲”，亦无法在装帧等方面取得统一，只有在这个“实体书电子版系列”中，才终于让概念变为现实。

卢昌海电子书·之三十二

■■■ 作者的其他电子书 ■■■

31. 《太阳的故事》

□□□ 更多电子书可查阅 □□□

<https://www.changhai.org/articles/introduction/ebooks.php>