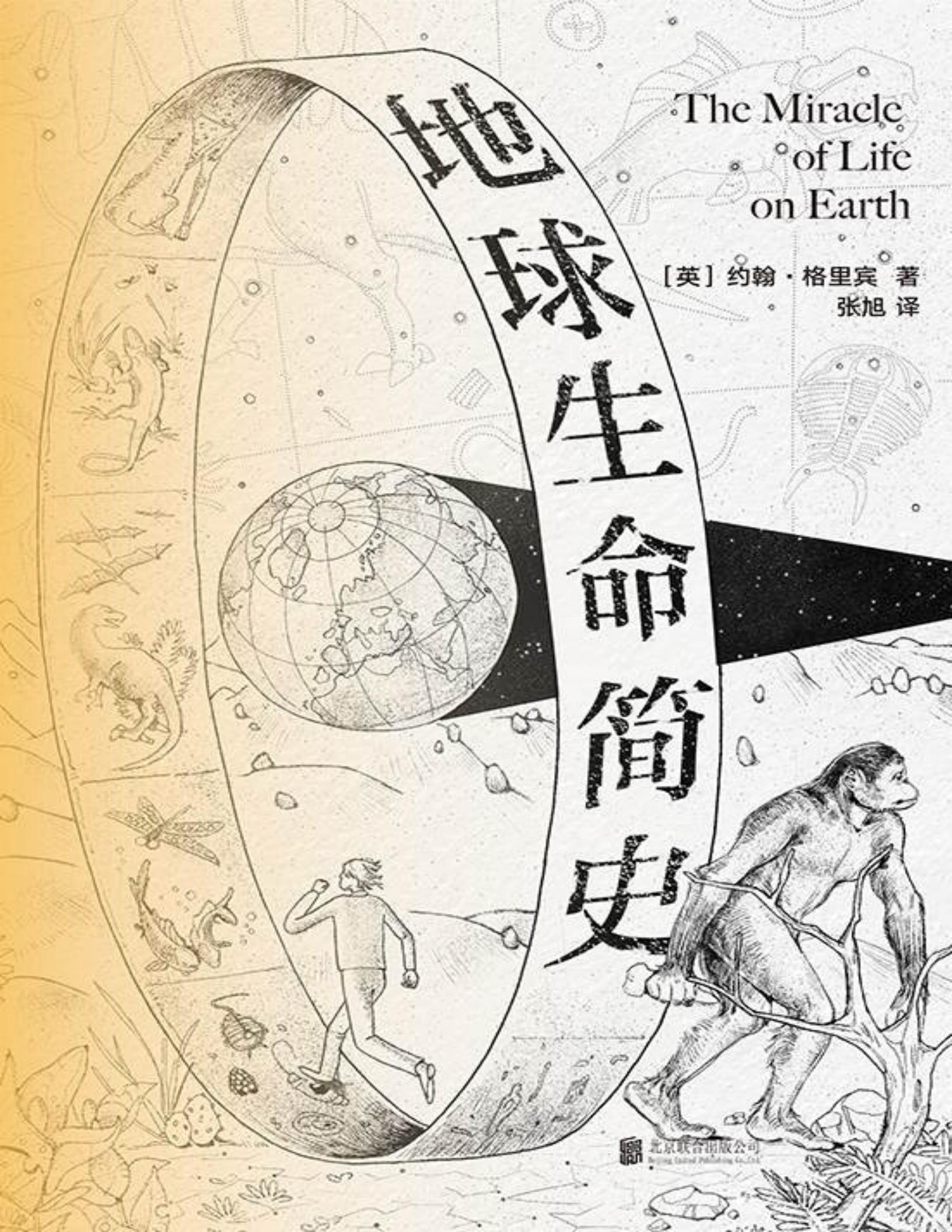


The Miracle  
of Life  
on Earth

[英] 约翰·格里宾 著  
张旭 译

地球生命简史



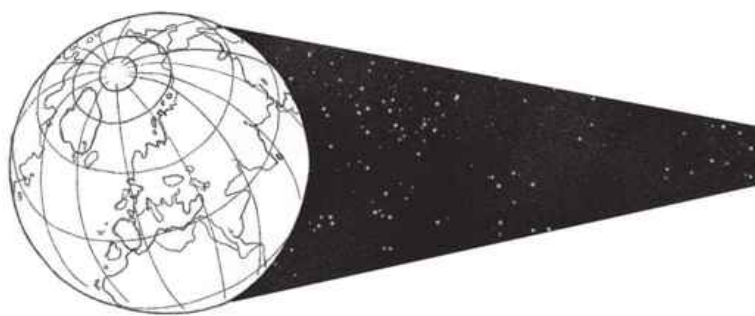
北京联合出版公司  
Beijing United Publishing Co., Ltd.

# 地球生命简史

The Miracle  
of Life  
on Earth

【英】约翰·格里宾 著

张旭 译



 北京联合出版公司  
Beijing United Publishing Co., Ltd.

## 图书在版编目（CIP）数据

地球生命简史 / （英）约翰·格里宾著；张旭译．—北京：北京联合出版公司，2021.5

ISBN 978-7-5596-5194-5

I. ①地… II. ①约…②张… III. ①生命科学—普及读物  
IV. ①Q1-0

中国版本图书馆CIP数据核字（2021）第058950号

北京市版权局著作权合同登记 图字：01-2021-2443号

First published in Great Britain in the English language by  
Penguin Book Ltd.

Copies of this translated edition sold without a Penguin  
sticker on the cover are unauthorized and illegal.

Simplified Chinese translation copyright © 2021 by Beijing  
Xiron Culture Group Co., Ltd.

ALL RIGHTS RESERVED

## 地球生命简史

作 者：〔英〕约翰·格里宾

译 者：张 旭

出 品 人：赵红仕

责任编辑：夏应鹏

---

北京联合出版公司出版

（北京市西城区德外大街83号楼9层 100088）

三河市冀华印务有限公司印刷 新华书店经销

字数158千字 880毫米×1230毫米 1/32 印张8

2021年5月第1版 2021年5月第1次印刷

ISBN 978-7-5596-5194-5

定价：49.00元

---

版权所有，侵权必究

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书部分或全部内容

如发现图书质量问题，可联系调换。质量投诉电话：010-82069336

我们的银河系就像一个大仓库，生命必需的零件散落在各处。

——詹姆斯·洛夫拉克，英国皇家学会院士

献给西蒙·古德温

感谢你没有先把这本书写出来！

# 致谢

感谢西蒙·古德温、道格拉斯·林、查理·兰伟尔、吉姆·拉夫洛克、迈克·劳、约瑟夫·特里格-罗德里格兹，以及萨塞克斯大学的天文学家们，他们针对这个故事的很多方面进行了讨论，也提出了建议。最近几年与伯纳德·佩吉尔共处一室办公，让我意外地对星球的化学成分及其随着时间推移的变化规律有了深刻的理解。玛丽·格里宾也一如既往地帮我把语句修改得更直白，阿尔弗雷德·C. 穆格尔基金会也还是为我们的出行及其他活动提供了经费支持。



# 前言

## 唯一一颗智慧星球

我们的存在要归功于6亿年前，一颗“超级彗星”与金星的碰撞吗？

在本世纪初，这个想法似乎还很可笑。但是现在我们知道，太阳系边缘有相当于冥王星大小的冰体在围绕太阳运动，我们知道月球是相当于火星大小的天体碰撞地球后产生的，我们通过混沌理论知道，围绕太阳运行的轨道都不稳定，最关键的是，我们还知道金星跟地球几乎同时发生过灾难性事件，就在地球上的生命大爆发之前——我们也正来源于这次大爆发。是巧合吗？也许吧。但这些事件即便是巧合，也是导致地球产生智慧生命的一系列巧合中，最至关重要的那几环。而这些环环相扣的巧合中，有太多薄弱的环节，甚至有可能意味着宇宙那么多的星球中，我们可能是独一无二的智慧生命。

我们的银河系中有7000亿颗恒星。保守估计，7000亿颗恒星中，有几十亿颗周围的行星有条件支持生命存在。银河系中适宜生命存在的星球，可能比地球上的总人口还多。但“适宜生命存在”并不意味着“有生命存在”。

本书旨在说明只有地球上存在智慧文明。这与约6亿年前，影响到金星和地球的一系列事件有关。但地球之所以如此特别，甚至独一无二，这一系列事件也只占了其中一部分原因。

自哥白尼时代起，科学不断进步，人类对自己的认识也从宇宙的中心逐渐走了下来。到了20世纪末，我们对自己的普遍认知是：在一个平平无奇的星系边缘，一颗普普通通的恒星周围，一颗平凡的行星



上的一种普通的动物。但人类和地球在宇宙中，也许没有这么无关紧要。

本书挑战了这种观点，认为人类还是特殊的——是一系列非同寻常的巧合催生的，在银河系，乃至全宇宙都是独一无二的物种。有个“金发姑娘效应”<sup>(1)</sup>理论认为，整个宇宙都有一点奇怪，但我的结论不会考虑这类理论，无论宇宙是否奇怪，地球这颗有生命的星球在宇宙中都是有一点儿独特的。

地球是一颗“活着的行星”——盖娅假说<sup>(2)</sup>对此作了最透彻的诠释——这个想法囊括了众多人的想象，已经成为广为接受的科学理论。

我们都习惯性地认为，我们的家园地球是一个环环相扣的生态系统，也都意识到了人类的活动很可能真的导致“盖娅”的死亡。吉姆·拉夫洛克近期<sup>(3)</sup>的几本书就讨论了这些观点。他展现出来的画面，如果只站在地球生命的角度看，还是很糟糕的。但在浩瀚的宇宙中，一颗星球真的那么举足轻重吗？

近期，科学家们发现了附近一颗恒星周围，有着一颗质量几倍于地球的行星。过去几年，有200余颗类似木星的巨大行星被我们发现，这激发了人们在宇宙中寻找地外生命的兴趣。很多人希望其他“太阳系”的发现，意味着其中会有其他的“地球”——而有了其他的“地球”，肯定会有其他的“人类”吧？

这个想法是错误的。首先，类似地球的行星很稀有。但就算这样的行星很多，我依然认为生命也许很普遍，但地球上诞生的智慧、高科技文明可能是独一无二的，至少在我们的银河系里是这样。

我同意拉夫洛克的观点，“盖娅”在宇宙中也许很常见。但我认为，我们这样的智慧生命极其稀有，甚至可能只有地球上存在。宇宙

发展到当下的阶段，只有地球上智慧生命——套用盖娅理论，可以说地球是唯一一颗智慧的星球，至少在银河系中是这样。

不管你是否认为其中有上帝的参与，这个事实都意味着我们是宇宙中科技最发达的文明，也是唯一能够见证、理解宇宙起源和本质的存在。如果人类和“盖娅”能渡过当下的危机，整个银河系都可能成为我们的家园。如果没能度过，那么“盖娅”之死对整个宇宙也是影响深远的。

我将讨论范围局限在银河系，不仅仅因为天文学领域里，银河系就像我们的后花园，而且从我们的时间维度看，外面的领域是永远无法触及的；更因为银河系之外的宇宙可能是无限的。

在无限的宇宙中，一切皆有可能。但值得关注的事件离我们的距离可能是无穷远。银河系有几十亿颗恒星，但应该只有一个智慧文明。

这样说来，我们的文明是孤独的，也是特别的。本书将为你阐述其中的原因。

---

[\(1\)](#) 金发姑娘效应来自一则英国童话，讲的是一位金发姑娘不小心进入了三只熊居住的屋子，她把三只熊喜欢的食物都吃掉了，还在三张床上都睡了一会儿，然后发现不冷不热的食物最好吃，不大不小的床睡起来最舒服。——译者注

[\(2\)](#) 盖娅是希腊神话中的大地女神，众神之母，宙斯的祖母。——译者注

[\(3\)](#) 本书中的“近期”“最近”均为针对2011年原书出版时而言。——译者注

[\(1\)](#) 如今可观测的宇宙直径已达到930亿光年。

# 目 录

[致谢](#)

[前言 唯一一颗智慧星球](#)

[序章 见识一下万亿分之一](#)

[横跨银河系](#)

[“火热的木星”](#)

[众多行星](#)

[灰蒙蒙的开端](#)

[宇宙化学](#)

[“盖娅”的生命](#)

[寻找其他“盖娅”](#)

[第一章 两个悖论和一个方程](#)

[宇宙彩票和德雷克方程](#)

[检验悖论和哥白尼原理](#)

[泛种论和费米悖论](#)

[探测答案](#)

[第二章 我们在银河系中有什么特别的](#)

[制造星系](#)

[制造金属](#)

[在银河系中混合金属](#)

[我们在银河系中的地位](#)

[银河系宜居带](#)

[毁灭性的彗星](#)

[第三章 太阳有什么特别的](#)

[窄窄的生命区](#)

[太阳不是一般的恒星](#)

[不断捣乱的伴侣](#)

[过去的冲击](#)

[太阳的金属度之谜](#)

[直到太阳消亡](#)

[推迟末日](#)

#### [第四章 太阳系有什么特别的](#)

[热情过头的主人](#)

[太阳系内部构造](#)

[制造行星](#)

[制造太阳系](#)

[制造地球](#)

[特别的我们](#)

#### [第五章 地球有什么特别的](#)

[像空中的钻石](#)

[行星拼图](#)

[制造大陆](#)

[防御力场](#)

[金星和火星](#)

[行星稳定器](#)

[板块重构和生命](#)

#### [第六章 寒武纪生命大爆发有什么特别的（一）：偶然与趋同](#)

[寒武纪生命大爆发](#)

[伯吉斯页岩](#)

[偶然](#)

[趋同](#)

[第三条道路](#)

#### [第七章 寒武纪生命大爆发有什么特别的（二）：温室金星与冰雪地球](#)

[极度深寒之后](#)

[倾斜天平](#)

[由内还是由外](#)

[典型的撞击](#)

[宇宙云团与彗星尘埃](#)

钻石尘与“换脸”女神

第八章 我们有什么特别的

偶然、必然和十进制

分子时钟

改变的诱因

人类进化的节拍器

科技文明的命运

地球的命运

时不再来

# 序章

## 见识一下万亿分之一

宇宙很大。我们所在的空间像一个不断膨胀的泡泡，从一个非常热、密度非常大的状态——137亿年前的大爆炸之中诞生。而这个泡泡只有137亿年的历史，因此我们能观测到的极限距离——无论朝哪个方向——理论上最多也只是光用137亿年前进的距离。自然，这段距离就是137亿光年，因为光年就是光用一年时间前进的距离。

1光年约为 $9.5 \times 10^{15}$ 米。因此可观测的宇宙就是一个以地球为中心的泡泡，直径为27.4亿光年<sup>(1)</sup>——每年还会增加2光年。

但这并不意味着我们处在宇宙的中心，就像看不见陆地的水手也不会在大海的中心一样；水手只是处在自己视野的中心。大海上其他地方的水手也都处在自己那个“可观测世界”的中心，周围就是自己的视野。

宇宙的范围自然远不止我们能观测到的范围，就像大海也远不止目力所及的范围，而宇宙（和大海不同）很可能还是无限的。但可观测的宇宙之外有什么，我不打算在本书中讨论。

在可观测宇宙这个泡泡之中，跟太阳类似的明亮恒星会聚集成一个个“岛屿”，也就是星系。根据哈勃望远镜等设备的观测结果，可观测宇宙内可能有数千亿甚至数万亿个星系。

我们肉眼可见的所有恒星都是这众多星系的一部分，我们所在的星系叫银河系，也可以简称“银河”。但我们还远无法观测到银河系的真实面貌。粗略估计一下，银河系中恒星的数目，与可观测宇宙中星系的数目大约在一个数量级。

我在20世纪60年代刚接触天文学时，人们还常说银河系中约有一千亿颗恒星；随着时间的推移和观测水平的提升，这个数字变成了一两千亿，然后变成了“几”千亿。

我们的望远镜越造越好，观测成果也越来越多，粗略地说银河系中有一万亿颗恒星，应该问题也不大。这意味着太阳是万亿分之一，我们的银河系也是万亿分之一。而据我们的观察，太阳是颗很普通的恒星（当然还有些细微的地方很特别，后面会讲到）。

## 横跨银河系

这个由一万亿颗恒星组成的岛屿，既充当了智慧生命诞生在地球上这个故事的背景，又是宇宙中是否还有其他智慧生命这个问题的背景。以当下我们对宇宙的认知和理解，在探索智慧生命如何诞生这个问题时，唯一合理的思路就是回溯银河系的历史和形态，并尝试理解智慧生命是为什么、怎么样在地球上诞生的，以及我们在银河系中其他“地球”上找到智慧生命的概率究竟多大。

如果宇宙中的恒星和行星足够多，那一定还有类似地球的行星；但在我们自己的后花园（银河系）里，会有其他文明诞生在类似地球的行星上吗？

按照这个条件，虽然银河系包罗万象，但我们的关注点应该只在类似太阳的恒星周围、类似地球的行星上。太阳，以及太阳系内的行星，是至少45亿年前，由一团气体和尘埃坍缩形成的，那时宇宙的年龄还只有现在的三分之二。

太阳系在宇宙诞生之后那么久才成形，也不完全是巧合。有非常充足的证据表明，大爆炸之后大量产生的元素只有氢和氦。更重的元素都是之后在恒星中，通过恒星核聚变过程形成的，恒星消亡之后这



些元素也散落在太空中。因此需要经历几代恒星的诞生和消亡，太空中才能有足够的硅、氧、碳、氮等元素，形成地球这样的行星。

太阳这样的恒星之所以能发光，是因为经历了核聚变过程中的部分步骤。在太阳的核心处，极高的温度和压力让氢原子核聚合在一起，产生了氦原子核，同时还会释放能量。其他恒星在不同的生命阶段中，氢原子核也会聚合形成碳、氧等元素的原子核。

这整个过程都发生在一个由恒星、气体、尘埃等组成的圆盘中，直径大约10万光年。天文学家们尽力观测银河系内这些物质的扩散轨迹，并结合我们对其他星系的观测结果，发现银河系呈螺旋状结构，明亮的早期恒星组成一条条的结构（旋臂），从盘状星系的中心旋转发散出来。过去我们认为银河系的螺旋结构非常清晰，共有4条大的旋臂，还有一些小的弧状结构；但最近的观测结果显示，银河系的结构要更混乱一些，有的大旋臂会伸出小的分支，有的旋臂分成了几段，甚至还有一条横跨整个银河系的旋臂带。

没人知道螺旋状结构是如何产生的，但很多星系都是这个形态。最合理的推测是银河系是一团密度波，恒星和气团围绕着中心旋转，并在某些地方聚集起来，就像高速上遇到行驶缓慢的路段时，车辆也会聚集起来。气团遇到物质聚集的区域会被压缩，有些就会坍缩形成新的恒星，凸显出螺旋状的结构。但单个恒星的体积比气团小得多，围绕中心旋转时即使穿过密度波，也几乎不受影响。

粗略地说，银河系分为四个部分。绝大多数恒星，包括太阳，都集中在一个薄薄的盘状结构中，厚度大约1000光年。盘状结构的中心还有凸起，就像背靠背贴在一起的煎蛋。这个盘状结构和中心的凸起包含了银河系中约90%的恒星。这个薄薄的盘状结构还嵌在一个更厚但恒星更稀薄的盘状结构中，笼罩在一个直径至少30万光年的球状光晕中，光晕内部还零星散落着几十个恒星聚集区。跟发光的恒星有关的部分只有这些。不过还有其他两个部分，我们只能根据它们对发光部

分产生的引力效应推断出它们的存在。这两个部分都很奇妙，但跟寻找类似地球的行星没有什么关系。

银河系正中心的巨型黑洞，直径是地月距离的20多倍，质量是太阳的数百万倍。这些数字看起来很了不得，但这个黑洞的质量只有银河系全部恒星质量的百万分之几。在另一个极端，银河系中所有发光的物质都嵌在一团暗物质中，正是这团暗物质的引力维持了银河系的形态。这些暗物质组成了一个球状结构，直径约有几十万光年。从原子层面看，这些暗物质就是一大团微小的粒子。但这些粒子的总质量足有银河系全部恒星质量的十倍。

我们对太阳之外其他行星的搜寻，目前也只局限在薄薄的盘状结构之中。截至20世纪末，我们的科技水平刚好够寻找附近的恒星周围是否有行星，而我们的搜寻工作（当然，在各个方向上的进展是不一致的）也只延伸到了几百光年之外——大约是盘状结构直径的千分之一。但好消息是，无论朝哪个方向观测，我们都能发现行星。因此，我们肉眼可见的恒星中，至少有一半都有行星环绕。

## “火热的木星”

目前为止，太阳系外存在其他行星的证据大部分都是间接的。我们基本无法直接观测到或是拍摄行星的照片，只有少数几个例外，但这几颗行星在照片里也只是模糊的球状物；我们是通过行星对母星的影响探测到其存在的。

行星围绕恒星运转时，两者之间的引力会使恒星产生微小的扰动，而通过观测恒星的光谱，可以探测到这种扰动的存在。恒星在朝我们运动时，光谱会向着蓝端移动；恒星在远离我们运动时，光谱会向着红端移动。这就是多普勒效应，天文学中最有用的理论工具之

一；用这种方法测出的恒星扰动的速度——虽然恒星离我们有几十光年——跟奥运会短跑运动员奔跑的速度差不多。

对母星影响最大的行星，即体积很大、离母星又很近的行星，用这种方法最容易探测出来。目前我们发现的行星体积都很大，离恒星都很近，这也是理所当然的。不过随着时间的推移，更小的行星，以及离恒星更远的行星，也在被我们慢慢发现。

刚好，我们发现的第一批“日外”行星都很不寻常，它们也都配得上这个位子。它们围绕的恒星跟太阳一点儿也不一样，是一颗中子星，有着一个无趣的名字：PSR B1257+12。PSR代表脉冲星（pulsar），后面的数字代表了这颗中子星在天空中的坐标——相当于在太空这张地图上给它定了位。

比太阳大很多的恒星接近生命的终点时，就会形成脉冲星。恒星的外壳通过一次超新星爆炸全部散去，内部则坍缩成了一个由中子组成的球体（因此称为中子星），直径大约只有10千米，但质量和太阳差不多（地球质量的33万倍）。

中子星的密度与原子核的密度一样。中子星刚形成时会飞速旋转，周围的磁场也非常强。这就形成了一股无线电波，向灯塔一样在太空中来回扫射；这股电波如果刚好扫过地球，我们的射电望远镜就能探测到扰动。脉冲星也正因这股无线电的“脉冲”而得名。有些“扰动”每隔几毫秒就发生一次，PSR B1257+12就是这样。

1992年，宾夕法尼亚州立大学的亚历山大·沃兹贞和戴尔·弗雷尔首次观测到了这颗中子星脉冲频率中的异常，并认为原因在于这颗濒死的恒星周围，环绕着两颗行星。

几年后，他们探测到了第三颗行星。这些行星的质量分别是地球的4.3倍、3.9倍和0.02倍，环绕恒星的周期分别是67天、98天和25天。

2005年，沃兹贞和同事马切·科纳奇宣布发现了第四颗行星，质量只有冥王星（质量相当于地球的万分之四）的十分之一，每1250天环绕脉冲星一周。目前至少还有一颗脉冲星——PSR B1620-26有着至少一颗行星。

形成脉冲星的那次超新星爆炸，这些行星是不可能撑得过去的。恒星原来的行星一定都在爆炸中毁灭了。因此这些行星只能是爆炸后中子星周围的残骸形成的，没有其他可能，比如，两颗恒星的碰撞或是近距离接触的情况。恒星之间的近距离接触非常罕见，恒星又都是由太空中的物质坍缩形成，因此很多恒星应该都有行星环绕。很快，更多的观测结果就证实了这一点。

我们第一次发现类似太阳的恒星周围有行星环绕，是在1995年。那颗恒星叫作飞马座51号，是两位瑞士科学家迈克尔·梅耶和迪迪耶·盖洛兹通过多普勒现象发现的。这次发现容易得让人出乎意料。之所以会这样，是因为发现的行星很大，离母星也很近，因此产生的“多普勒信号”很强。

在太阳系中，有四颗很小的岩石态行星在太阳附近环绕，还有四颗很大的气态行星在远处环绕。太阳系中的距离用天文单位（AU）来衡量，即地球和太阳之间的平均距离；质量则以地球为基准衡量。离太阳最近的行星——水星，距太阳0.39个天文单位，质量是地球的5%，但太阳系中最大的行星——木星，质量是地球的300多倍，约是太阳质量的千分之一，距太阳5.1个天文单位。

飞马座51号的行星质量超过了木星的一半（相当于水星质量的3000倍），但距恒星的距离只有0.05个天文单位（只相当于水星和太阳之间距离的0.1倍多）。

这些“火热的木星”的发现出乎大家的意料，也很快有了更多人知道。因为巨大的气态行星无法在母星附近形成，所以这些行星一定是在诞生后逐渐移动到现在的位置的。这为在宇宙中搜寻智慧生命提

供了强有力的线索；不过这个发现——以及紧随其后的诸多类似发现——最重要的意义，就是告诉我们行星很常见。

第一次发现太阳系外的行星时，新闻媒体都非常激动，每次新发现都能单独成为一篇论文，很快发表在很有威望的学术刊物上，如《自然》周刊，也经常登上媒体的头条。不过十几年后，在本书创作时<sup>(1)</sup>，我们已经发现了近400颗太阳系外的行星，每年也都能发现十几颗“新”的行星。但这些发现连科学杂志的头条都很难见到了，更不用说大众媒体了，除非发现了很特别的行星——尤其是跟地球很像，或者围绕母星的轨道跟地球很像时。而太阳系外的行星或地外行星多种多样，单独看这一颗颗的行星可是不够的。

这个故事有一部分是关于发现其他恒星周围的行星时，使用的不同方法。除了久经考验的多普勒效应，我们还可以靠行星对恒星亮度的影响发现新的行星。行星挡在恒星前面时会产生日食这样的现象，叫作“凌日”（这里非特指发生在太阳上的天文现象）。还有一些行星是通过其对恒星周围圆盘状尘埃的引力效应发现的，这些发现也再次证实了我们对于行星起源的推断。还有寥寥数颗行星是通过红外望远镜直接拍摄到的，在照片中只有很小的一点儿。此外还有其他方法。不过这些发现基本有一个共同点——都是使用地面望远镜发现的。但现在已经有了专为搜寻地外行星的太空天文台——包括2009年发射的开普勒号，它们离开了地球表面阻碍视线的大气层后，类似的发现急剧增加。因此，我们刚好可以审视一下观测地外行星的第一阶段。

## 众多行星

搜寻地外行星的初期，我们会观测到很多离恒星很近的巨大行星，但从寻找类地行星的角度来看，我们能发现20多个不只有一颗行星的地外天体系统——都是普通的恒星，行星共有近百颗，这件事还

是很鼓舞人的。虽然我们观测到的绝大多数还是大型行星，但这也意味着这样的行星不是单独出现的，至少部分这样的行星旁边还有更小的岩石态行星，这像我们所在的太阳系一样。

目前发现的绝大多数行星，都是围绕着类似太阳的恒星（出于历史原因，这一类恒星被称为F型、G型或K型主序星——按这个分类方法，太阳是G2V黄矮星）运转。其中一部分原因是参与搜寻的天文学家们很自然地对这样的恒星最感兴趣。我们还有理由认为——我在后面也会讨论这点——在比太阳大得多或是小得多的恒星周围，都很难有条件形成类似地球的行星。虽然目前发现的绝大多数行星都至少有地球的10倍大，甚至有的比木星还大，但还是存在质量只有地球几倍大的行星——虽然发现的过程困难重重——这意味着岩石态的行星其实也很常见。

不幸的是，许多跟地球差不多大的行星离母星都非常近，像热木星那样。对此合理的解释，就是这些行星其实是热木星经历了恒星的炙烤后，外层物质蒸发残留下来的岩石态内核。COROT-7b就是一个比较典型的例子，这颗行星环绕在离母星约250万千米的位置，周期只有20小时多一点！对应的恒星COROT-7，是一颗黄矮星，大约只有15亿年的寿命，跟太阳类似，但比太阳小一点，温度也要低一些；COROT-7b的直径接近地球的两倍，密度与地球相近。但是这颗行星离恒星太近，表面温度很可能超过2000摄氏度，已经足够熔化岩石了。而且，由于它的轨道不是理想的圆形，离恒星又太近，潮汐引力在不断地挤压着恒星，加热着内核，行星表面应该不断有火山喷发。这样的环境不太可能有生命存在。计算机模拟COROT-7b诞生时，显示它是一颗巨大的气态行星，质量和土星相近（大约是地球的100倍），运转轨道的半径比现在远一半。

我们在搜寻的初期意外且轻松地发现了这些热木星后，又发现绝大多数“木星”（代指所有巨大的气态行星，“地球”代指所有小的

岩石态行星）围绕母星运行的轨道都要远得多，而包含一两颗“木星”、运转轨道的半径与木星或是土星的公转轨道半径类似的天体系统，其实并不少见。也许这样的天体系统里还有其他的“地球”；通过计算机模拟行星诞生在恒星附近的情况，我们发现巨大的行星总是伴随着更小的岩石态行星出现。现在有些天文学家认为每颗类似太阳的恒星，都至少有一颗类似地球的行星——虽然按他们的标准，金星和火星也算，不是一定要跟地球非常接近——在恒星周围的“宜居区”，即可以存在液态水的区域。不过有一点很不相同，跟太阳系中的木星等行星相比，类似木星的地外行星运转的轨道要更椭圆一点，而不是更圆。

此外，还有两个发现进一步激发了我们对地外生命可能性的思索。一个是我们发现了一颗只比地球大一点的行星，不过对应的恒星比太阳要暗许多。那颗恒星是一颗暗红矮星，编号为格雷斯581，质量只有太阳的三分之一，在天秤座方向上，离我们20多光年。这颗行星只有地球的1.9倍大，每3.15天绕红矮星一圈，距离太近，表面无法存在液态水。但同一个天体系统中还有一颗行星，质量是地球的7倍，轨道更远，每66.8天环绕红矮星一圈。这颗行星刚好处在红矮星周围的宜居区内，温度处在0到40摄氏度之间，表面可能覆盖着液态水。我们周围有很多红矮星，它们也都像格雷斯581一样，周围有更大的“地球”，而不是其他“木星”。因此这些红矮星虽然比太阳小很多，却也是寻找地外行星的理想目标。

另一个发现的核心就是水。2007年，一个天文学家团队宣布，他们在一颗热木星的大气层中探测到了水。之所以能探测到，是因为这颗之前发现的行星挡在了母星HD 189733的前面，这颗恒星离我们64光年，在狐狸座的方向。那时，恒星发出的光先穿过了行星的大气层，然后才被斯皮策太空望远镜的红外波段探测到。而红外线探测结果中，行星大气层中的水对光的折射作用很明显。



好像这些还不够刺激，2008年，多伦多大学的科研人员通过夏威夷的双子天文台拍摄到了第一张行星环绕类日恒星的照片。

把这些成果总结一下，我们知道了行星很普遍；岩石态行星出现在恒星周围的宜居区；其他恒星的行星上有水。银河系中约有一万亿颗恒星，保守估计也有十亿颗（只占总数的千分之一）恒星周围有“湿润的地球”。在这样的行星上，生命要如何存活呢？

## 灰蒙蒙的开端

我们对行星诞生的所有了解，都指向了一个事实：湿润的地球成形时，生命几乎是必然的副产品。恒星——还有行星——都是由太空中的气团坍缩形成的。银河系中，气团类物质非常多，但要形成星球还需要一个引子——某种挤压力——然后才能开始坍缩。但是尘埃，也是形成类地行星的必需物质，则只有很少一点。恒星之间的气团中，98%是气体，是大爆炸后残留的氢气和氦气，其他物质只占了剩下的2%。我们也在一些气团中观测到了刚诞生的恒星，比如在直径25光年、离我们1400光年的猎户座星云中。这片星云包含了数千颗早期恒星，其中有数百颗恒星甚至还没进入像现在的太阳一样的成熟、稳定状态。所有有恒星诞生的区域中，猎户座星云是离地球最近的，其中有些天体我们还可以深入研究。而在星云中的早期恒星周围，我们发现了尘埃组成的150多个盘状物，有的还留下了照片。我们附近的其他早期恒星周围也发现了类似的盘状物。

这些盘状物就是行星成形的地方。有些盘状物中探测到了行星，因为行星的引力扭曲了盘状物，或是吸走了某些区域的尘埃。我们知道了这些盘状物跟行星有关，就给它们取名原行星盘，简称PPD<sup>(2)</sup>。原行星盘的许多信息是我们通过研究红外波段获得的，因为星盘比恒星的温度低很多——低温物体能量辐射的波长比高温物体的要长很多。星盘被母星辐射的能量——波长要短一点儿——加热，再重新以

红外线的形式辐射出去。我们进行红外辐射分析后发现，形成行星的尘埃颗粒都很小——直径最多只有10微米，即1米的1/100000，和细菌的尺寸差不多。但星盘中也不全是尘埃，因为原来气团中没坍塌形成恒星的气体，还会被新恒星的辐射吹出来。

绘架座β及其行星离我们53光年，是我们研究得较为透彻的一个天体系统，其中的星盘包含了质量为地球数百倍的尘埃。对其进行光学和红外分析后发现，星盘内还有密度更大的尘埃组成的圆环，也许就是行星诞生的地方。我们现在看到的尘埃，很大一部分可能都是星盘内部早期岩石态星体——微行星——形成初期互相碰撞的产物，不断地碰撞就能够产生更大的行星。这样看来，绘架座β，虽然可能只诞生了几千万年，所在的天体系统也算比较老了。更年轻的恒星金牛座HL周围也有星盘，质量约为太阳的十分之一——相当于太阳系所有行星质量之和的10倍——直径超过2000天文单位。这些应该是原始的宇宙尘埃，而不是绘架座β周围的新生尘埃。诞生未满4亿年的恒星中，约有60%的周围有尘埃组成的星盘，但寿命超过4亿年的星球中，只有9%有这样的星盘。我们发现的证据表明，只有尘埃形成了行星，星盘才会消失，而这个过程的时间跨度——几亿年，与太阳系形成过程的时间跨度高度吻合，太阳系的形成过程是通过一系列研究推断出来的（后面会详述）。

但尘埃中都包含什么呢？最重要的成分之一就是水，不过是以冰的形态存在。宇宙中最常见的元素是氢，质量占比约73%。第二常见的元素是氦，约占25%。这两种元素都是大爆炸时生成的，但氦没有化学活性，所以对生命的诞生没有贡献。第三常见的元素是氧，质量占比约0.73%，之后是占0.29%的碳。按质量算，下面的元素应该是铁；但如果按原子数算，第五常见的元素则是氮。天文学家们这次在化学方面不拘小节了一次，把除氢、氦的所有元素都归到了“金属”类。但无论怎么归类，氧都排在氢的后面，是含量第二多的活性元素，而氢、氧剧烈反应的产物就是水。因此，太空中以及原行星盘中，必然

包含了许多水，这些以冰的形态存在的水会裹住碳等元素的固态颗粒（石墨等），在外面形成一层硬壳。

这些颗粒跟香烟冒出的烟雾颗粒一样大。由于太空中的冰都是直接从水蒸气状态凝固的，没有经历液态水的状态，这些颗粒的外形更像雪花，而不是冰块。“雪花”之间相互碰撞后还容易粘在一起，形成更大的颗粒。大颗粒也能维持住形态，因为水分子一端带正电，另一端带负电，产生的电磁力就像磁铁一样把颗粒固定在一起。这样，即使从天文学的尺度看，原行星盘中的颗粒也大到能通过引力互相吸引了，行星的诞生过程开始了。

这类颗粒表面可以形成的分子非常复杂。我们通过对恒星之间的气团进行无线电波段的光谱观测，才知道太空中也存在着如此复杂的分子。每个元素的原子都会在可见光谱上产生独一无二的特征，像条形码一样。因此，这些复杂的分子每个都在无线电波光谱上留下了属于自己的特征。我们用这种方法已经在太空中发现了140多种分子。从最简单、最常见的物质，比如氢气分子（ $H_2$ ）和水分子（ $H_2O$ ），一直到包含十几个原子的分子，比如丁腈（ $CH_3(CH_2)_2CN$ ）和甲酸乙酯（ $C_2H_5OCHO$ ）。像前面这两种分子一样，宇宙中很多复杂的分子是由碳、氢、氧和氮原子组成的。一方面，这一点也不稀奇，因为前面提到过，按原子数计算，这四种元素是宇宙中最常见的活性元素；另一方面，这一现象又意义非凡，因为这四种元素是生命诞生过程中最重要的元素。显然，这与生命必须依靠已有的物质存活有关。同样重要的是碳元素的独特化学性质。

## 宇宙化学

碳原子有一种不寻常的能力，就是可以同时跟四个原子紧密结合，包括其他碳原子。最简单的理解方法，就是想象碳原子带有四个钩子，每个钩子都可以钩住其他原子，形成化学键。举个最简单的例

子，甲烷分子是由一个碳原子跟四个氢原子组成的，碳、氢之间通过化学键连接——写作 $\text{CH}_4$ 。但碳原子也会首尾相连，组成链条，每个碳原子都跟其他两个碳原子相连，空出两个位置连接其他原子，链条两端的碳原子会空出三个位置。碳原子链条还可以形成封闭的环，环上每个碳原子都空出两个位置。即使是碳元素组成的复杂分子，包括环和链条，也都可以和其他碳链或是环相连。正是碳原子在化学上丰富的可能性，让复杂的生命成为可能。的确，化学家们刚开始研究生命的复杂性，并且意识到其与碳元素之间的密切联系时，“有机化学”就成了“碳化学”的同义词。

有两种物质对生命化学至关重要。对非生物学家来说，最熟悉的生命分子是DNA，或者说脱氧核糖核酸。生物，包括我们自己，细胞中包含的就是这种分子，其中携带着遗传编码。遗传编码中包含了指令，像配方一样，指导受精卵发育、成长为一个成年人。但其中还包含了让每个细胞各司其职、维持器官功能的指令，比如，肝细胞该如何工作或者肺细胞该如何吸收氧气。细胞发挥自己的功能时还牵涉到另一类分子——核糖核酸，或者叫RNA。从名字就能看出，脱氧核糖核酸跟核糖核酸差不多，只不过脱去了氧原子。

核糖核酸RNA中的“R”来自单词“ribose（核糖）”。核糖（ $\text{C}_5\text{H}_{10}\text{O}_5$ ）是一种单糖，但却是DNA和RNA的核心。每个核糖分子都有一个由四个碳原子和一个氧原子组成的五边形核心。五边形上的碳原子都空出了两个化学键位，可以跟其他原子或是分子相连。在核糖分子中，五边形外面连着氢原子、氧原子，以及一个碳原子——一共五个碳原子，外面的碳原子也连着氢原子和氧原子；但外面的每个原子都可以被取代，换成其他连接着链或是环的复杂根。在DNA和RNA中，每个核糖分子的环都连着磷酸根，磷酸根本身又连着另一个核糖环。因此两种生命分子的基本结构都是一根脊柱状的链条，上面是交替出现的核糖分子和磷酸根，链条上还会产生奇妙的分支。生命的编码就存储在这些奇妙的分支里，我们用包含四个字母的编码系统表达其中

的信息，这四个字母每一个都对应了不同的化学基团。但这里我们不深入研究这个故事；从宇宙化学的角度来看，组成DNA的基本构件——核糖，才是最重要的。

目前，太空中还没有发现过核糖。但天文学家在光谱上发现了更简单的糖——乙醇醛的记号。乙醇醛分子包含两个碳原子、两个氧原子和四个氢原子（一般写作 $\text{H}_2\text{COHCHO}$ ，这也反映了分子的结构），自然而然地也被称作“二碳糖”。乙醇醛在模拟太空中气团的条件，能与三碳糖融合，形成五碳糖——核糖。我们还没在太空中发现DNA的基本构件，但我们发现了基本构件的基本构件。

另一类“生命分子”是蛋白质。蛋白质组成了人体的结构；其中一定包含碳、氢、氧和氮原子，还经常含有硫原子，有些还含有磷原子。头发、肌肉等都是由长链蛋白质构成的，这种长链跟DNA、RNA分子中糖和磷酸根组成的长链很像；血液中携带氧气的血红蛋白就是由卷曲成球状的蛋白质链构成的。其他典型的球状蛋白质还有酶——可以催化生命所需的某些化学反应，或抑制某些对生命有害的化学反应。蛋白质的种类多种多样，因为构成蛋白质的单元——氨基酸就多种多样。

氨基酸的分子质量通常在100左右，作为参考，碳原子的原子质量是12，但蛋白质的分子质量可能是几千到几百万不等，这样你对蛋白质内含有多少氨基酸也有了大致的了解。不妨看下这个数字：地球上所有生物的总质量，有一半都是以氨基酸的形式存在的。但即使一个蛋白质分子可能包含几万甚至几十万个氨基酸分子，构成地球上所有生命的氨基酸一共也只有20种。类似的，英语中的单词成千上万，但构成单词的只有字母表中的26个字母。氨基酸还有其他种类，但对构成我们所知的生命都没有贡献。

化学家在实验室合成氨基酸，还是很方便快捷的，可以用甲醛（ $\text{HCHO}$ ）、甲醇（ $\text{CH}_3\text{OH}$ ）和甲酰胺（ $\text{HCONH}_2$ ）等在化学实验室很常见

的化合物。有了这些材料，要是再从最基本的物质——水、氮气和二氧化碳做起就有点不理智了。但这些物质也不只出现在化学实验室里。我们对分子云的观测结果中，最不可思议的发现就是其中有实验室里经常用来合成氨基酸的化合物，包括上面提到的三种以及甲酸乙酯（ $\text{C}_2\text{H}_5\text{OCHO}$ ）和丁腈（ $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_2\text{CN}$ ）。从这个角度来看，这些分子云也算是材料充足的化学实验室了，复杂的分子不是一个一个原子合成的，而是简单的化合物合成的。

还有人宣称在太空中发现了最简单的氨基酸——甘氨酸（ $\text{H}_2\text{NH}_2\text{CCOOH}$ ）。这么复杂的分子是很难在光谱上分辨出来的，更不要说比这个还复杂的氨基酸了，因此天文学家们并没有一致认可这类发现，即便之前已经在太阳系形成过程中残留的岩石上发现了氨基酸——这些岩石偶尔会以陨石的形式来到地球。不过，最近又有人在太空中发现了氨基乙腈（ $\text{NH}_2\text{CH}_2\text{CN}$ ），这种物质在化学上通常被视为甘氨酸的前身。但即使我们抛开发现者的言论，很小心地审视观测结果，这依然意味着我们虽然没有在太空中发现蛋白质的基本构件，却发现了基本构件的基本构件，就像我们虽然没有在太空中发现DNA，却发现了甲醛、甲醇和甲酰胺一样。

复杂的有机物分子只能在分子云中合成，因为分子云中不仅有尘埃，还有气体。如果分子云中的所有物质都是气态，即使其中神奇地生成了 $\text{NH}_2\text{CH}_2\text{CN}$ （氨基乙腈）这种复杂的分子，这些分子又怎么累积、增长呢？你也许会以为氨基乙腈分子跟氧气分子碰撞后，可以捕获氧原子形成甘氨酸 $\text{H}_2\text{NH}_2\text{CCOOH}$ 。但事实是跟氧气分子碰撞后，氨基乙腈更可能被拆解，而不是与之结合。但小小的固态颗粒，加上外面的一层冰壳（其实不只含有固态水，还有固态甲烷、氨气等），可以吸附住分子，让分子之间有充足的时间发生必要的化学反应。

衰老的恒星在行将就木时会剧烈膨胀，并向太空中释放物质。光谱分析发现释放的物质中包括固态的碳、硅以及碳化硅（ $\text{SiC}$ ）颗粒，

我们已经证实，这些都是恒星周围的尘埃中常见的固态物质，虽然光谱中还有很多特征没有完全识别出来。科研人员也在实验室中模拟了太空中这样的固态颗粒，并确信这些颗粒可以为生成太空中探测到的复杂有机物分子提供反应场所。有些研究还发现，这些颗粒也许不仅为化学反应提供了场所，颗粒表面与吸附的分子之间可能也存在着化学键连接。这就能解释为什么分子会在颗粒表面停留那么久，让化学反应充分进行，哪怕是在分子云中温度比较高的区域。只要分子能吸附住，化学反应就有足够的时间进行，因为分子云在坍缩形成一系列新的星球之前，可能已经在银河系中飘荡了几百万甚至几十亿年。如果有新的恒星形成，其释放的热量会加热颗粒，把复杂的分子释放出去。这些分子散布在分子云里，就能被我们的射电望远镜探测到了。

在这个背景下，2008年我们在一颗热木星的大气层中发现了最简单的有机物分子——甲烷。这几乎给我们泼了一盆冷水，虽然这个发现依然很重要。甲烷的发现一点儿也不意外，因为它正是热木星大气层的重要成分，但这依然被认为是一个里程碑。这颗行星是恒星HD 189733的行星，正是之前发现了水的那颗行星。天文学家们还用斯皮策天文望远镜在新生恒星周围的星盘中，发现了大量的氰化氢、乙炔、二氧化碳和水蒸气。卡耐基研究所的一个科学家团队用哈勃太空望远镜分析了恒星HR 4796A发出的光——这颗恒星在人马座方向，离我们270光年——发现恒星周围的尘埃星盘之所以呈红色，是因为含有有机物托林。托林是巨大、复杂的有机物分子，是由更简单的物质分子——比如甲烷、氨气和水蒸气——经紫外线照射生成的。在实验室里也可以合成托林，但大自然中没有这种物质，因为托林很容易跟空气中的氧气反应。但托林的存在解释了土星的卫星泰坦为什么会有红棕色光晕，彗星和陨石上也都发现过托林，早期的地球上很可能也有。大家普遍认为托林是地球上出现生命的前兆，因此在HR 4796A附近发现托林，也是炙手可热的新闻。



不过，这和在行星表面发现托林还不是一回事。地球这样的行星是由一团团岩石不断聚积形成的，岩石撞击释放的能量还会使温度升高。岩石态行星诞生初期，都是寸草不生、热火朝天的状态，表面的温度足以摧毁任何之前存在的有机物分子。我们在太空中发现的众多有机物，最重要的意义在于等到行星的温度低到允许复杂分子存在时，周围有足够的有机物可以落在行星表面。在每一颗新生的星球上，生命不一定要使用水、二氧化碳和氮气“从头”被创造出来，就像化学家不需要用水、二氧化碳和氮气来合成氨基酸一样。

## “盖娅”的生命

詹姆斯·洛夫拉克是盖娅理论的创始人，他对自然和生命意义的思考比绝大多数人都深刻。用他的话说，我们的银河系就像一个大仓库，生命必需的零件散落在各处。在介绍生命有多么容易在地球这样的星球上出现之前，最好还是简单了解下洛夫拉克的宏大理论——盖娅理论，因为寻找其他“地球”基本等同于寻找其他“盖娅”，美国航空航天局探索类地行星的计划，也很大程度上依赖对洛夫拉克基于盖娅理论提出的生命和宇宙之间关系的理解。

讽刺的是，洛夫拉克刚提出盖娅理论的核心概念时，这个理论在美国航空航天局是很不受欢迎的，洛夫拉克当时还是美国航空航天局的顾问。1965年，他在美国航空航天局协助设计实验，以在火星上寻找生命存在的证据。当时计划发射一颗无人探测器，但发射前项目被取消了。他的同事们还在努力构思实验，探测类似地球上的生命是否存在，洛夫拉克则被一个新点子吸引，就是从行星层面设计更通用的实验，寻找生命存在的证据。他认为生命的一个关键特征，就是自身和周围的环境能维持在一个完全无法达到化学平衡的状态。从个人的角度看，人的体温是高于环境温度的。从全球的角度看，最明显的证据就是空气中大量存在的氧气。氧气很容易发生化学反应，如果没有

生命存在，氧气会很快反应生成水、二氧化碳、氮氧化物等。正是一部分生命利用了太阳的能量，启动了生命所需的化学反应，向空气中释放着氧气，避免氧气消耗殆尽。

那是1965年的春天，没人知道火星的大气成分。洛夫拉克提出了一个更方便的搜寻生命的方法，不需要发射探测器那么麻烦，只要建造一台望远镜，用红外线扫描火星的光谱，探测出大气的构成就行。如果都是惰性气体，比如二氧化碳，那么无论火星的过去如何，现在都是没有生命的。

1965年9月，法国的一个天文学家团队还没听过洛夫拉克的想法，他们扫描了火星大气的红外光谱，发现其中有二氧化碳，且处在化学平衡状态。这个发现的含义很明显了，至少洛夫拉克是这么想的。火星上没有生命，放出仪器去寻找也是徒劳的。当然，火星上可能还有其他值得研究的内容，但放出探测生命用的仪器就是在浪费宝贵的资源。对于投身设计相关仪器的科学家们来说，这个消息可不太好接受，甚至四十多年后，美国航空航天局还在向火星发射仪器，探测生命的存在。

后来我们发现，金星的大气层主要成分也是二氧化碳，洛夫拉克就开始思考地球为何如此特别。用洛夫拉克的话说：“我们呼吸的空气只可能是后天的产物，本来远远无法达成化学平衡的状态，是通过生物维持着稳定。”他总结说，生物一直在调节着大气的成分，不仅仅是当下，而是贯穿地球历史的足足几十亿年。

这就解决了当时天文学家们面临的一个谜题——“早期太阳黯淡悖论”。20世纪60年代的天文学家们已经通过计算恒星的运行状态，以及对其他恒星的研究，知道了太阳年轻时的温度约比现在低25%。如果其他条件不变，那时的地球就会完全结冰。这个谜题的答案就是地球诞生初期，表面含有大量的二氧化碳，强烈的温室效应维持了地球的温度。但新的谜题又来了，等太阳温度升高后，为什么没有发生更

加剧烈的温室效应，像金星那样灼烧地球的表面？洛夫拉克认为答案就在于生命调节了大气的成分，随着太阳温度的升高，逐渐减少了二氧化碳的含量，让地球上的温度始终适宜生命存在。

洛夫拉克在这个理解的基础上，花许多年构建了一个完整的理论，阐述地球上生命和无生命的部分是如何通过反应和反馈，维持着适宜生命存在的环境——不喜欢“盖娅”这个词的科学家将其称为“地球系统科学”。但整个过程是无意识的，就像你也不会意识到身体为了维持体温而进行了诸多反馈流程。

后面我们会细说盖娅理论。我这里想表达的是洛夫拉克的理念给了我们探索地外生命的工具，也就是无意间证明了火星上没有生命的法国天文学家们用的方法。最有意思的讽刺就是，现在美国航空航天局的科学家们都全力支持洛夫拉克，因为能否用盖娅理论寻找到地外生命，成了影响他们职业生涯的头等大事。

## 寻找其他“盖娅”

要在太阳系外的行星上寻找生命，还需要将这个方法的规模放大许多倍。部分原因是观测红外光谱，因为二氧化碳、水蒸气、臭氧等有意义的分子在这个波段最明显。不幸的是，波长处在红外范围的辐射都被地球大气和太阳系内部的尘埃吸收了，残余的辐射太弱，很难分辨。要在红外波段观测火星，用法国山区里比较先进的天文望远镜就够了，因为山峰本身就在最影响信号的地表大气之上。但要研究太阳系外跟地球体积相仿的行星的大气成分，就需要非常复杂的太空望远镜，还要在木星的轨道上，远离太阳系内侧的重重干扰。在法国天文学家们的那个发现之后将近50年，我们终于开发出了相关的技术，现在只需要投入资金、用好技术了。

20世纪90年代，欧洲航天局和美国航空航天局迎合当时大规模探索地外行星的潮流，分别提出了打造专用望远镜的详细计划。欧洲航天局的计划叫作达尔文，美国航空航天局的计划则叫作类地行星发现者（Terrestrial Planet Finder，简称TPF）。他们的计划非常相似，如果真的落到实处，那么很有可能会变成双方根据共同的目标和准则联合推进的新合作计划。望远镜专注于扫描红外波段，因为类地行星发出的光线多在这个波段——行星吸收母星的辐射后，会以更长的波长辐射出来，因为行星的温度比母星低。要在探索类地行星上取得成果，望远镜要尽可能大，不过好在有干涉测量法，可以联合数个较小的望远镜，获得类似一个更大的望远镜的效果。干涉法需要我们将小型望远镜收到的光波叠加或者相互抵消。天文学家们欣然采用了这个方法，并总结了一个小技巧，把处在视野中心的物体发出的光线全部抵消，相当于让这颗恒星消失，以更清楚地观察周围更暗的行星。

这个计划起初涉及六台红外望远镜，每台的口径都约有1.5米，在空中组成一个六边形。六边形中心有一艘无人飞船，望远镜和飞船之间与望远镜之间直接使用激光束通信，以维持六边形的稳定，同时由无人飞船将数据传输回地球。望远镜之间的距离是100米，但这个距离的误差不能超过1毫米，同时六台望远镜还要在离地球6亿千米的地方围绕太阳运行。后来科学家们将望远镜减少到了4台，口径都增加到了6米左右，但贯穿始终的基本原则没有变。

令人吃惊的是，专家们信誓旦旦地保证，几年内这个计划就能启动。只是后面的观测过程会很痛苦，要经过许多步骤才能在银河系中找到其他“地球”。

第一步就是寻找类地行星。即体积跟地球、金星、火星差不多的行星，轨道半径也要跟地球、金星、火星相近——类似水星的行星太小，离母星又太近，这种方法很难探测到。天文学家们罗列了地球附

近50光年内，可能存在天体系统的200颗恒星。要探测一个天体系统内有没有类地行星，那几台望远镜需要观察几十个小时。因此查完全部恒星，再排除没有行星的恒星，需要几年的时间。之后的事就有意思了。

下一阶段就是寻找有大气层的行星，最容易探测到信号的气体就是二氧化碳——既容易吸收也容易释放红外辐射，所以才成了主要的温室气体。要在一颗行星的光谱中识别出二氧化碳的信号，需要观测约200小时，因此之后的几年时间里，天文学家们会观察最有希望的80颗行星。运气好的话，还有可能在部分行星的大气层中发现水蒸气。

这时洛夫拉克的测试才终于有机会登场。如果行星大气中存在大量活性气体，比如氧气，即可说明其并不处于化学平衡状态，很可能存在生命。就像在地球上一样，如果任何围绕类日恒星的类地行星大气中存在氧气，恒星发出的紫外线就会将部分氧气（ $O_2$ ）转化为臭氧（ $O_3$ ），臭氧的红外特征非常明显，但跟二氧化碳比起来还是微弱了许多。之后的几年，望远镜还要花800小时左右的时间，轮流观测之前认为最有希望的20颗行星，寻找臭氧的存在。

把这几个步骤连起来之后，天文学家们自信满满地宣称，如果资金能迅速到位，让这个计划马上启动的话，那么20年内，我们就能确定50光年范围内是否存在有生命的行星——其他“盖娅”。20年看起来遥遥无期，但我创作文字的时候，恰逢人类登月40周年<sup>(3)</sup>。发现其他“地球”需要的时间，只有40年的一半，因此我这辈子还是有机会见证的。考虑到我们当下对恒星和行星的理解，这次搜寻不太可能一无所获。即使没有达尔文或是TPF计划的数据，我也可以确定地说，还存在其他“盖娅”。

但寻找生命只是计划的一部分。是否存在其他智慧生命？这才是本书准备解答的问题。目前，我们只知道一个智慧文明的存在——我们自己。地球上出现智慧生命，经历了很长的时间。尽管概率非常

小，但如果智慧生命都是这样的，那生命最好在行星诞生初期就安家。那么地球上的生命是如何出现的？根据这段历史，我们在其他地方发现智慧生命的概率又有多大？我们的太阳系真的是万亿分之一吗？还是说有“其他人”存在，等着我们去联系？

---

[\(1\)](#) 2010年左右。——译者注

[\(2\)](#) proto-planetary disc的缩写。——译者注

[\(3\)](#) 第一次登月在1969年7月。——译者注

# 第一章

## 两个悖论和一个方程

生命在地球上落脚得非常迅速，甚至有点不择手段。地球诞生初期，经历过太阳系成形后剩余残骸的轰炸，环境极其恶劣，生命无法存活。这些残骸也轰炸过月球。关于月球表面陨石坑等事物的研究告诉我们，这次轰炸大约发生在39亿年前，在太阳系成形之后约6亿年。还有证据表明，轰炸结束之后，生命就诞生了。

最古老的证据还不是生命本身，而是生命留下的独特印记。碳原子有许多种，称为同位素，化学性质完全相同，但重量不同。最常见的稳定态碳原子是碳-12，但还有一种更重的稳定态原子碳-13。生命倾向于从环境中吸收碳-12，因此产生的碳-12的含量会比环境产生的高一点。格陵兰岛上远古时期的岩石，寿命约有38亿年，其中就含有生命的这种特征——碳-12。这意味着轰炸结束后，地球上立刻就有了生物活动，最可能的原因就是轰炸地球的残骸上携带着生命的种子，这些种子在形成恒星的气团、尘埃中就诞生了。

除了通过光谱分析发现的这些生命前兆，陨石以及陨石落入大气留下的轨迹中，都发现了氨基酸和糖。美国航空航天局通过实验模拟太空中稠密的气团，成功合成了这类复杂有机分子，包括甘氨酸、丙氨酸和丝氨酸，它们都是蛋白质的基础组成部分。2009年，美国航空航天局的一支科学家团队宣布，“星尘号”太空探测器带回了维尔特2号彗星上的甘氨酸。这是我们第一次真正在太空中发现氨基酸。那次轰炸结束前，这类物质一定铺天盖地地落入了早期的地球；用“星尘号”团队发言人的话说，“我们的发现支持了生命的必需物质起源于太空且在很久以前通过陨石和彗星的撞击进入地球这一理论”。



即使这样，说到生命，大多数人还是希望看到直接证据——化石。目前已知最早的化石是含有微生物残骸的叠层石。这些化石位于寿命达36亿年的岩石中，那时太阳系成形还不到10亿年，轰炸结束不到3亿年。叠层石不仅证明了早期生命的存在，还证明了当时已经存在复杂的生态系统，各种微生物一起生存、相互作用。显然，根据我们发现的碳同位素证据，生命诞生的时间不止36亿年。

但是叠层石也凸显了地球上生命最重要的特征之一。生命所需的化学反应需要在特别的环境下进行，远离外界的干扰。这个特别的环境就是细胞，小小的一包液态物质，包含了生命必需的一切。细胞内，DNA和RNA可以繁殖，进行自我复制，并指导合成蛋白质分子。这就是生命必需的化学反应，但这需要在安全的环境内进行。

想理解细胞的重要性，最好的办法就是看一下酶——促进生命必需化学反应的蛋白质。酶分子并不怎么牢固，太热或太凉都会解体。如果环境的酸性或是碱性过强，也会解体。解体的酶就失去了作用，生命也会终止。因此酶一定要在“高墙”的保护下发挥作用。这道“高墙”既能允许指定的分子进入，还能拦下指定的分子。这种墙就是半透膜，也就是细胞外部的膜。生命的一个关键特征，也许是最关键的特征——细胞内发生的反应跟外界环境并不处于化学平衡状态。进入化学平衡意味着死亡。生命在非平衡状态下才能维持。美国生物学家琳恩·马古利斯将这个特征总结为“生命是一个自洽的系统”。

这对我们理解地球上的生命起源意义重大。现在大家普遍认为，那次大轰炸末期的彗星和陨石雨带来了生命必需的组成部分。我们对非生命物质如何转化为生物的大部分推断，都首先涉及生命分子的合成，包括DNA、RNA和蛋白质，然后才是细胞的“发明”。对此，较为流行的解释是复杂的化合物聚集在薄薄的一层材料上，可能是在一层黏土内，或是分布在表面，然后化学反应就发生了。还有一个解释是关键的反应发生在很热、化学物质很丰富的环境内，比如我们最

近在深海中发现的热泉，那里的热水像火山爆发一样喷出来。围绕这点的猜测还有很多，但都跟查尔斯·达尔文的一个猜想有关，他在1871年给约瑟夫·胡克的一封信里提到了这个猜想：可以猜想到，如果某个温热的小池塘里满是氨、磷酸盐，还有光照、热量、电流等，蛋白质就可能在里面形成，并且可以发生更复杂的反应。

但这样生成的蛋白质会怎么样？更可能被冲走或是毁掉，而不是跟其他复杂的分子反应，得到有意思的结果。能带来生命的“有意思”的结果只可能发生在受保护的环境内。还有比细胞内更理想的地方吗？在我看来，细胞很可能最先出现，以半透膜泡泡的形式存在，然后被生命占据。这个论点也有强力的证据支撑。

20世纪末，美国航空航天局艾姆斯研究中心的科研人员进行了一系列实验，把鞋盒大小的真空密闭容器冷却到10开氏度，即-263摄氏度。容器内有片状铝和二氧化铯，水、甲烷、氨气和二氧化碳等物质可以在上面凝固，以此来模拟太空中气团内的颗粒周围形成冰壳的过程。然后，容器中的物质要接受紫外线辐射，模拟早期恒星产生的辐射。结果不出意外，容器内出现了大量有机物分子，包括酒精、酮类、乙醛，甚至是含有40个碳键的大分子。这条消息很快吸引了加州大学圣克鲁斯分校的科研人员大卫·迪莫。在此之前的20世纪80年代，迪莫对1969年落入澳大利亚的默奇森陨石进行的研究震惊了天体生物学界。迪莫在陨石上寻找有机物存在的迹象时，取了一些陨石样本研磨成了粉末，并用水反复冲洗，清除已有的有机分子。意外的是，他在显微镜下观察到了一个浮在水上的微型球体，像气球一样，而且每个球体都有两层“表皮”。他从艾姆斯研究中心的实验中取了一些凝固的物质，放入温水里。迪莫又发现了一样的气球或泡泡，即囊泡。这些囊泡直径从10微米到40微米不等，与红细胞差不多大，跟默奇森陨石上发现的几乎一模一样。这些囊泡就像一个个细胞，只不过没有进行生化反应。

进一步的研究揭示了囊泡的形成过程。无论是在实验室里还是在太空中，紫外线照射在冰颗粒上产生的复杂分子都包括脂质，这类分子形态独特，像蝌蚪一样有“头”有“尾”。分子的头部亲水，尾部则疏水。放入水中后，自然会形成两层，头部向外，尾部向内。这道双层的“墙”还会蜷曲成球状。早期地球上温热的水中，一定发生过这样的反应。产生的囊泡还包住了氨基酸、糖等物质，这个密闭的环境也给生命的化学反应创造了条件。更妙的是，只要有足够的脂质，这样的囊泡还会增长，新的脂质分子会插入已有的囊泡表面，体积达到一定程度后，还会分裂成两个球体。

虽然这不一定是地球上生命的起源，但囊泡甚至有可能存在于彗星内部，这样，那次轰炸末期，彗星带到地球上的就不只是生命的前兆，而是生命本身了。美国航空航天局艾姆斯实验中心的一组科研人员（马克思·伯恩斯坦、斯科特·山德福和路易斯·阿拉曼多拉）在1999年7月的《科学美国人》上讨论过类似的观点。

这个可能很有意思，彗星内部有机物的产生，注定要成为生命进程的一部分。哈雷这样的周期彗星每次经过太阳都会被加热，有充足的时间生成大量复杂的有机物。我们甚至可以想象，有的大彗星上可能短暂地存在过液态水……彗星在生命起源中发挥了积极作用，这个推断是很合理的。

这个观点最极端的延伸，是由弗雷德·霍伊尔和钱德拉·维克拉姆在20世纪70年代和80年代提出的。他们认为地球从太空中得到了生命的种子。无论这些推断是否正确，我想强调的是，现在被普遍接受的保守观点认为，地球在早期得到了复杂的有机分子，离诞生生命只差一步。地球上的生命不一定非要起源于一系列简单分子，比如，二氧化碳、水和甲烷。

即使有了囊泡的保护，从非生命跨越到生命的这一步依然不一定能迈出。不过地球诞生初期肯定产生了几千亿个囊泡，只要其中一个

有生命就够了。正如达尔文在《物种起源》一书末尾部分所说：地球上所有有机生物也许都来自同一个地方，最原初的生命诞生的地方。

后面针对不同生物的基因，即DNA研究，以及对细胞工作原理的研究也证实了这个观点，所有生物进行的化学反应（比如获取能量）都是相同的。有趣的是，这些证据还能证明“原初细胞”是一个喜热的细菌细胞，可能出现在水下热泉附近。既然地球诞生初期有很多水，地理活动也十分频繁，这个发现也不算意外，与生命诞生于太空中一个囊泡这个观点也不冲突，它只是告诉了我们生命诞生时，那个囊泡在哪里。

## 宇宙彩票和德雷克方程

这对推测宇宙其他地方是否存在生命有什么启示呢？既然我们的参照物只有地球，你可能会想宇宙其他地方是否存在生命，这个问题是没法下定论的。也许生命很容易出现，所有类地行星上都有生命；或者生命很难出现，地球是唯一有生命的星球。这两个观点，以及其他折中的观点，都不与地球上存在生命这个事实冲突——统计学家们会说，孤例无法得出普遍性结论。但也许我们可以。有些天文学家——最有名的就是澳大利亚国立大学的查尔斯·兰伟尔，认为生命在地球上诞生的速度也是生命能存在的关键因素之一。

太阳系成形约1亿年后，一颗火星大小的天体和地球发生了碰撞，月球由此诞生，绝大部分天文学家都认可这个观点。碰撞的能量烧熔了地球的表层，让生命无法生存，给生命的诞生提供了一块“白板”。碰撞之后约6亿年里，地球都一直在遭受来自太空的轰炸，但是强度在逐渐减弱，轰炸结束之前，生命很可能数次诞生，但又数次被毁灭。有证据表明——不过很有争议——轰炸结束前，还有一次终极的灾难，叫作“晚期大轰炸”，但兰伟尔并未找到直接的证据支持，而且这次灾难是否真实存在，对后续的争论都没有影响。无论如何，

轰炸结束后，生命就诞生了。一个常识是如果宇宙中的生命很罕见，那么“生物起源不太可能像在地球上这么迅速”，兰伟尔为这个观点找到了科学依据。

他以彩票为例，说明了背后的统计学原理。如果有人连续三天买了彩票，前两天没中奖，但是第三天中奖了，统计学家会认为彩票中奖的概率不是接近1，也不是接近1/100，而是接近1/3。如果很多人都来买彩票，连续买了12天，这时我们随机抽取一个人，如果他前三天买的彩票至少中了一次奖，我们就可以认为中奖的概率不低。统计学家可以通过“置信度”计算出具体概率。如果置信度是95%，就意味着他们的20次结论中有19次是正确的，因为5%就是1/20。95%的置信度是很高的水平了。在这个例子中，统计学得出的结果是任一张彩票中奖的概率至少有0.12，置信度是95%。这意味着每买10张彩票，就能有1张多一点儿中奖。如果奖金比彩票售价的10倍高，那这张彩票就是值得买的。

在生物起源问题上，银河系中所有类地行星都像是买彩票的人，地球则是我们抽取的那个人，很早就中奖了。生命诞生在轰炸结束之后的6亿年之内，甚至可能比这还早。用统计学知识计算可以得出结论，在95%的置信度下，所有寿命在10亿年以上的类地行星上，至少13%存在着生命，而且有极高概率存在生命，或者用通俗的话说，宇宙中的生命很普遍。

生命是起源于地球，还是来自坠入地球的陨石？是起源于其他星球，附着在宇宙中的残骸上来到地球（泛种论），还是由外星人有意散播在宇宙中的（定向泛种论）？这些问题有类似的结论。无论地球上的生命如何产生，其过程都非常迅速，其他行星也很可能发生类似的过程。有些人认为这个结论非常重要，可以成为天文学家弗兰克·德雷克提出的计算发现宇宙中其他智慧生命概率的方程中一个重要的

参数。我对德雷克方程的实用性存疑；但这个方程至少能简明地计算出，我们对这个问题究竟有多无知。

德雷克方程诞生于20世纪50年代，是第一颗人造卫星上天后，民众对太空的狂热催生的。那时，弗兰克·德雷克在西弗吉尼亚州的格林班克射电天文台工作，他当时不仅对其他智慧文明存在的可能性感兴趣，还希望能通过射电望远镜跟他们取得联系。一开始，几个对这个想法非常感兴趣的天文学家提出了“联络地外智慧生命”这个说法。1974年，他们通过波多黎各阿雷西博的巨型射电望远镜向太空中发射了信号，希望某天“外面”的存在可能探测到，并做出回应。

“某天”可能要等很久——不知为何，他们选择的目标是M13星云，在武仙座方向。这个星云离我们25000光年，而无线电信号前进的速度是光速，即使真的有外星人探测到了信号，并马上做出回应，我们也要50000年后才能收到！但对许多人来说，这个时间甚至还有点早。我们有望真的跟外星人交流，这件事让许多地方警觉起来，尤其是在美国，无论是政客还是民众都认为外星人可能是有敌意的，于是这个计划被迫改了名字，叫作“搜索地外智慧生命”。现在还有射电天文学家在等待外星人的信号，但他们不会向外发出信息。如果其他的文明都爱这么妄想，都是只监听不发出的话，那就太糟糕了。

不过德雷克于1961年在格林班克组织第一届讨论联络地外智慧生命可能性的研讨会时，计划还没有改名。那次研讨会的目的就是让大家意识到计划的可行性，并宣传计划、寻找资金支持，德雷克非常成功地达到了这个目的，提出了以他名字命名的方程作为讨论的前提。

这个方程是基于两件事同时发生的概率等于两件事独立发生的概率之积这个原理构建起来的。比如，因为骰子有6个面，掷骰子掷出3点的概率是 $1/6$ ，掷另一个骰子掷出3点的概率也是 $1/6$ ，那么掷两个骰子同时得到3点的概率是 $1/6 \times 1/6$ ，也就是 $1/36$ ，很简单。如果要计算一系列事件同时发生的概率，这个原则也同样适用。

德雷克试图把银河系中诞生一个能与外太空通信的科技文明涉及的所有因素整合起来。第一个因素就是银河系中恒星的总数，称为 $N^*$ 。第二个因素是其中类似太阳的恒星比例， $f_s$ 。我们还需要估计这部分恒星中含有行星的比例， $f_p$ 。这部分行星中，处在宜居带的比例是 $n_e$ 。下一个因素需要用到兰伟尔的计算，即生命诞生在这些行星上的概率， $f_i$ 。下一个因素，即我们这样的智慧生命出现的概率，就只能估计了。最后，德雷克还加入了一个很不确定的数字，即有能力实施外太空通信的智慧生命存在的时间与行星总寿命的比值， $f_l$ 。

把所有因素整合起来，假设 $N$ 代表目前银河系中我们能联络到的地外文明数，那么：

$$N = N^* \times f_s \times f_p \times n_e \times f_i \times f_c \times f_l$$

这就是德雷克方程。

好消息是，我们选取的基数非常大—— $N^*$ 至少有几千亿。更好的消息是，1961年还没发现过地外行星，而现在我们知道天体系统很常见，虽然还不能确定类地行星是否常见，但如果直接套用兰伟尔计算出的概率， $f_l$ 极可能比0.13大，甚至可能接近1。坏消息是，哪怕等号右边有一个数字等于0，那么 $N$ 都等于0，无论其他数字有多大。

还有个几乎同样不理想的消息，就是我们还无法马上将其中的某些系数量化，虽然我会尽量在后面的章节尝试这样做。最坏的消息是，德雷克做了一个大的简化，只用一个变量代表类似我们的智慧文明能诞生在行星上的概率， $f_c$ 。这种简化以我们在1961年的科学水平衡量是情有可原的，但现在已经不适用了。这个变量应该理解为导致地球生命诞生的一系列事件的概率之积，而且，我后面也会讲到，这一系列事件中有的概率非常接近0，导致得出的 $f_c$ 以及 $N$ 都非常小。

不过，人们还是充满热情地使用德雷克方程或其变种，套用自己认为合适的系数计算 $N$ 。他们得出的“答案”从0至几亿不等，这也说明这个方法目前还是徒劳的。德雷克方程并不适合用来真正计算银河系中具体有多少个科技文明，而是适合用来提醒我们在计算其他地方发现智慧生命的概率时，都需要考虑哪些因素。

## 检验悖论和哥白尼原理

德雷克方程中最关键的系数之一就是 $f_l$ ，即科技文明的寿命。而这个参数取多少，很大程度上取决于你对我们这个文明的命运有多乐观。但即使是那时的英国皇家学会会长马丁·里斯这样的权威科学家，对这个问题也不是很乐观，他认为我们这个文明的寿命可能还剩不到100年了；但乐观的人还是有的（很多都是科幻作家），他们相信人类能克服当下所有的难题，并且开发太阳系中的资源，延续几百万，甚至几千万年。概率论能给这些猜测提供支持，让我们对人类文明的寿命有个大概的估计。赶公共汽车时用到的统计数据，能让我们更好地理解过去。

我们都有过等公共汽车等了好久，结果一次来了两辆甚至三辆的经历。绝大多数时候，你都会发现自己的等待时间超过了平均发车间隔时间的一半。为什么呢？长期来看肯定是平均的吧，没准第二天等待的时间就短一点儿，隔几天等待的时间再久一点儿。但仔细思考一下，你会发现，等待公共汽车的平均时间的确超过了“平均水平”。

事情是这样的。首先假设你等的公共汽车在始发站每隔10分钟发一辆车。有时公共汽车会堵在半路上，但发车间隔依然是10分钟——如果有辆车在路上耽误了2分钟，那这辆车跟前一辆车的间隔就变成了12分钟，跟后一辆车的间隔是8分钟，因此平均间隔还是10分钟。如果你在公共汽车站待一整天，记录每辆车到达的时间，得到的还会是这个结果——间隔时间虽然不固定，但平均值还是10分钟。但赶公共汽



车时可不是这样的。你到达公共汽车站的时间是随机的，并且看到要乘的公共汽车就会上车。如果公共汽车进站的间隔固定，你的平均等待时间就是5分钟——发车间隔的一半。但是公共汽车的实际到达时间不固定，你到达公共汽车站时，更可能赶上长一点儿的间隔。如果一辆公交到站之后20分钟第二辆才到站，但是1分钟之后第三辆就到站了，你赶上长间隔的概率就是短间隔的20倍。你的等待时间就很可能超过公共汽车的平均间隔。上面的描述是更符合常识的说法；概率论学者可以将这种现象量化，并取名为“检验悖论”。

检验悖论也能解释为什么莎士比亚时代有那么多人长寿，即使那时的平均寿命普遍很短。平均寿命短的原因之一就是婴儿经常夭折。如果平安步入成年，那么还是很有可能长寿的。即使是平均寿命只有20年的地方，还是有人能活到70岁，甚至更久。无论你有多老，你都能再活一段时间，而无论你几岁，你的期望寿命都比总人口的平均寿命长。每个人的期望寿命都高于平均值——这又是检验悖论在现实中的例子。每个健康的人读到这一段，知道自己的期望寿命高于平均值，也就能安心了。同样的原因，我们的文明还“活着”，意味着人类文明的期望寿命必定高于银河系中存在过的其他文明的平均寿命。数学家阿米尔·亚克赛尔参考了地球上生物的生命，而不仅仅是人类文明的生命后，这样讨论了这个问题：“我们能够审视自己，正是因为我们地球上存活了很久，而且我们存在的时间比其他文明存在的时间要长的条件概率很高。”同时，他还提到：“即使银河系存在其他文明，我们也很可能第一个发展到当下的科技水平。”

但这只能告诉我们过去。人类文明的未来如何呢？

1993年，普林斯顿大学的理查德·高特在科学杂志《自然》上发表了一篇论文，用上面提到的统计学知识估算了人类文明的总寿命，在学界引起了激烈的讨论。他发现在95%的置信度下，智人在地球上存

在的时间应该在20万~800万年。如果取下限，意味着我们明天可能会灭绝；而即使是取上限，放在宇宙中看也不是很久。

高特的计算过程中，只有一处用了估计值，即我们只是宇宙中存在过的、有观测能力的智慧文明中普通的一员。他将这个观点称为“哥白尼原理”，即我们在宇宙中并不特别——虽然哥白尼只说过，我们并不是宇宙的中心，但也有许多人将他的话延伸，认为我们并不特别。这个原理还有个更普通的名字，“地球平庸原理”——我们生活在一个平平无奇的星系中、一颗普普通通的恒星周围、一颗平凡的星球上。

在说明这个假设引出的推论之前，高特用自己生活中的两个例子阐述了这个方法的作用。这个观点的核心就是，如果你随机进行观测，并且第一次观测到了某个对象，那你有95%的概率观测到该对象中间95%部分的寿命，而只有2.5%的概率能观测到起点前后，也只有2.5%的概率观测到终点前后。如果你第一次观测时就知道观测对象的历史，就可以用这些数字估计该对象未来的寿命——用类似公共汽车“悖论”里的统计学公式计算，观测对象未来的寿命介于目前寿命的1/39和39倍，置信度为95%。

1969年，高特去了欧洲，第一次见到巨石阵和柏林墙。巨石阵约有3700年历史，而当时的柏林墙只有8年的历史。套用他的计算，巨石阵的寿命至少还有100年，而柏林墙未来的寿命（从1969年起）最多也只有几百年。柏林墙1990年倒塌，而巨石阵还健在，符合他的估算。

高特用类似的方法估算人类的寿命，他首先基于化石估算智人存在了约20万年。这意味着我们至少还能继续存在5000年，但不会超过800万年。高特指出哺乳动物物种的平均存在时间约为200万年，我们的直系祖先——直立人，存在的时间大约不到150万年，因此他的计算与我们根据化石得出的结论也吻合。也许我们的后代会进化成完全不

同的物种，跟我们的差异就像我们跟直立人的差异一样大，但他们依然是一个科技文明。然而，高特进一步的计算结果就要悲观许多了。

目前生活在地球上的人们，也适用同样的统计学方法，只要将已经出生的人口数跟尚未出生的人口数比较。这时，你是一位从过去、现在和将来的所有人中随机选出的“观察者”。概率方程告诉我们有50%的概率，这样的“观察者”出生时的总人口数大于最大人口数的一半。2010年时，地球上总人口接近70亿，而地球最多能容纳约120亿人，那现在的我们也就不会感到惊奇了。我们也是过去、现在和将来的所有智慧生命中，随机选出的一位智慧观察者，像上面的例子那样。1993年，高特套用了之前计算时间尺度的方法，计算出未来地球上还将诞生至少18亿人，并预测20世纪第一个十年就能达到这个数字。这样下去的话，人口迟早会锐减，文明会崩塌。其他的文明也许不那么适用这个方法；但是高特为“搜索地外智慧生命”计划的支持者们准备了更多的坏消息。

“搜索地外智慧生命”计划的支持者们依然将主要的希望寄托在无线电通信上。2004年，“搜索地外智慧生命”计划最有名的支持者之一、微软联合创始人保罗·艾伦在之前累计1150万美元捐赠的基础上，又追加了1350万美元，建造专门用于这项计划的射电望远镜“艾伦阵列”。但他的钱可能打了水漂（不过幸运的是，“艾伦阵列”也可以用在传统射电天文学领域）。我们的文明使用无线电的历史只有约120年，通过概率计算可以知道，我们未来继续使用无线电的时间可能在3年至5000年。这当然不意味着我们的文明会崩塌——我们的后代可能开发了比无线电通信更高级的技术，就像我们之前抛弃烽火台一样。但这可能对我们跟外星人取得联系造成了很大的限制。

高特假设我们是典型的无线电文明，把数字代入自己改良的德雷克方程，得出银河系目前存在无线电文明的数量不会超过121个。但他们处在我们附近的概率实在太小，如果高特的计算正确，任何使用无

线电的“搜索地外智慧生命”计划都可能徒劳无功。当然，这样的项目总是这样，因为他的论点中，最薄弱的一环就是哥白尼原理。我们也许并不是典型的观察者。这也许能解释最有名的外星人悖论，这个悖论由物理学家恩里克·费米明确阐述，并冠上了他的名字，虽然他并不是第一个思考这个悖论的人。

## 泛种论和费米悖论

费米是20世纪最重要的物理学家之一。他预测了中微子的存在，并在1938年因自己对辐射和核反应的研究获得诺贝尔奖。那时欧洲战事不断，在斯德哥尔摩领完奖后，费米一家人并没有回到意大利，而是直接去了美国。之后费米在芝加哥大学带领团队造出了第一个核反应堆——“原子堆”。

费米最擅长抓住问题的核心，以及用简单的语言表达复杂的想法。他是对复杂问题进行粗略估计，即数量级计算的大师，他也是这样发现的费米悖论。他在这方面的思考非常有名，类似的问题后来都被称作“费米问题”。举个很简单的例子：一个容量1升的广口瓶中，能放下多少麦芽糖棒？这个问题的关键不在于得到准确的数字，而在于合理的推断。麦芽糖棒可近似为圆柱体，2厘米长，直径1.5厘米（半径0.75厘米）。圆柱体的体积等于 $\pi$ 乘半径的平方再乘高，如果将 $\pi$ 粗略取为22/7，算出来糖棒的体积就是25/7立方厘米。但是糖棒在瓶子里不是紧紧挨在一起的，因此我们可以估算瓶子中约20%的体积是空气。一升等于1000立方厘米，因此瓶子里约有800立方厘米被糖棒占据，糖棒的总数就是800除以25/7，约等于220（计算结果是224，但这样的估算并不需要准确的“答案”）。天文学家正是用这种计算方法，不用一颗颗数下来也能估算出银河系中的恒星数量，费米也用这种方法得出了有名的悖论。

1954年，年仅53岁的费米英年早逝。他虽然没留下一篇记录自己发现悖论的回忆录，但物理学家埃里克·琼斯基于对费米同时代人的采访，将当时的细节记录在1985年《今日物理学》刊发的一篇文章上。当时是1950年夏天，费米在洛斯阿拉莫斯实验室——几年前研究出原子弹的地方。那时因为有人目击到了秘密飞行器，公众对飞碟（UFO）十分狂热。恰好当时纽约街头的垃圾桶又经常神秘消失，《纽约客》杂志便发表了一幅漫画，认为垃圾桶都是外星人偷的。费米和同事去吃午饭的路上被漫画逗笑了，然后就开始讨论起超光速旅行的可能性。到了吃午饭时，他们的话题又变了，然后费米突然大声问：“大家都去哪儿了？”他的同事们意识到他问的是地外智慧生命，而费米本人问出的问题，大家都十分重视。他飞快地进行了一系列数量级计算，发现即使光速严格不可超越，外星人也早就能殖民整个银河系，并且应该造访地球许多次了。对费米悖论最高度的概括就在这个问题里：如果有外星人，他们为什么没有来这里？换句话说，如果存在地外文明，他们为什么还没拜访我们？

这个问题当时没人注意到，最多只是作为茶余饭后的谈资。直到1975年，就像连续到站的两辆公共汽车一样，有两篇论文同时发表，引发了更大规模的讨论。大卫·乌英在《英国星际学会杂志》上发表了文章，重新阐述了这个谜题，并将功劳都归于费米。同年，迈克尔·哈特在《英国皇家天文学会季刊》上也发表了文章，用稍有不同的语言表述了这个问题：为什么还没有其他星球的智慧生命来访问地球？不过跟乌英不同的是，哈特还提出了四个可能的解释：

1. 他们还没有办法过来；
2. 他们来过，但是没有联系我们的意愿；
3. 他们的确存在，但还没来得及拜访我们；
4. 他们来过，但没留下痕迹，而且已经离开了。

还有一种可能，不过也可以归结到第四种情况——我们就是外星人。如前文所述，这是从泛种论角度看问题得出的结论。虽然对本书主要的观点没有影响，这个角度还是很引人入胜，甚至还让我们对生命在银河系中的扩散有多容易——尤其是考虑到银河系百亿年级的寿命——有了很深刻的认识。

泛种论（panspermia）的字面意思就是“哪里都有生命”，对这个可能性的思索可以追溯到远古时期。不过泛种论的科学论证是在1871年，由后来的开尔文男爵威廉·汤姆森在英国科学促进会宣读会长报告时首次提出的。汤姆森跟进了19世纪60年代路易·巴斯德的研究成果——巴斯德证明了非生物不会自发地变为生物，比如蛆并不是肉腐烂产生的，而是由苍蝇的卵孵出来的。汤姆森认为生命只能来自生命——一切生物都有祖先。用他的话说，“没有生命的物质在没受到有生命的物质影响之前，不能产生生命。在我看来这就像引力法则一样明显”。现在我们认为，至少很久很久以前，有那么一个生物分子从非生物之中产生了，但这对汤姆森接下来的重要论点没有影响。

汤姆森将生命出现的过程跟新形成的火山岛做了类比。“我们自然而然地认为种子是随风飘过去的，或是从海上漂流过去的，而不是从没有生命的岩石上自发产生的。”他说，“地球也是同样的情况。”

我们都自信地认为，从没有记载的远古时代到现在，除了我们一定还有很多存在生命的世界，我们还认为太空中非常有可能飘着很多携带生命的陨石。即使当下地球上没有生命，这样的陨石落在地球上后应该也有了，我们盲目地将此称为自然原因，认为地球上因此充满了植被。

不过汤姆森的同事中，少有人认真考虑过他的这个观点。但有一位瑞典化学家斯万特·阿伦尼乌斯考虑过。1903年，他因对电解质的

研究获得了诺贝尔奖，他还率先研究了大气层的“温室效应”。他的孙子古斯塔夫·阿伦尼乌斯刚好还寻找过地球上早期生命留下的同位素证据。

斯万特没有考虑陨石内部携带生命种子的可能性，而是推测细菌这样的微生物可能飘到很高的地方，然后逃离地球，再在太阳辐射的影响下四处漂泊。这样的微生物可能长期处于休眠状态，甚至等它们飘到另一颗类地行星才会苏醒。阿伦尼乌斯估算，这样的生命种子从地球出发，大约20天能到达火星，80天到木星，9000年能到达半人马座阿尔法，即离太阳最近的恒星。既然细菌可以飘出去，为什么不能飘过来呢？换句话说，地球上的生命种子为什么不能是来自太空的微生物呢？

泛种论在太空生物学中向来不是主流，但自从汤姆森和阿伦尼乌斯发表了各自的观点后，大家讨论各种问题时，总会时不时地回到这个理论，并且让这个理论在没有强有力证据的情况下更科学可信了。有人继承了阿伦尼乌斯的观点，并且考虑到了生命穿越太空可能经历的环境因素。太阳这样的恒星会产生大量紫外线辐射，这对太空中的微生物是致命的。但是华盛顿州立大学的杰夫·赛克和加拿大滑铁卢大学的保罗·维森、詹姆斯·乐帕克一起，通过计算推测了微生物被锁在冰或尘埃颗粒中会发生的情况。颗粒还是无法阻止紫外线对微生物的伤害。但是恒星进入生命晚期，会膨胀成为红巨星，产生的辐射足够将微生物推进太空，又不会产生致命的紫外线。赛克等人计算出生命种子在太空中每100万年可以前进20光年。离太阳20光年的距离内有几十颗恒星，因此生命可以在天体系统之间轻松穿梭，甚至可以用几十亿年的时间穿越银河系，遍撒生命的种子。

当然，保护得越好，微生物存活得就越久。亚利桑那大学的杰·梅洛什展示过微生物在大块岩石中，如何存活几百万年。再考虑到太阳系内的情况，这就很有意思了，因为剧烈的冲击能够把这样的岩石

推至太空。而且我们已经通过同位素探测发现，地球上有些陨石是来自火星的。其中一块陨石的编号是ALH 84001，我们在其内部发现了微观的管状结构，像变成了化石的细菌一样，之后我们又极其细致地研究了这块陨石。支持这个观点的证据寥寥无几。但ALH 84001这样的陨石能出现在地球上，就说明火星上如果有生命，就可能以这种方式来到地球：先经过撞击脱离火星表面，然后在太阳系游荡几百万年。地球上的生命想通过这种方式到达火星，或是其他星球，会稍微难一点儿，因为地球的引力更强一点儿。而且很可惜，大块岩石是很难彻底脱离太阳系，带着生命的种子进入其他天体系统的。

当然，如果生命的种子是被人定向送到适宜生存的星球上，这个过程就简单多了。这个观点叫作直接泛种论，是由DNA的发现者之一弗朗西斯·克里克和另一位分子生物学家莱斯利·奥格提出的。我们的科技水平只要再进步一点，就能用探测器装载着蓝绿水藻——地球上生命力极强的生物——发射到值得研究的天体系统中，这样就容易多了。如果你觉得蓝绿水藻可以代表地球上的生命，这样也算是飞快地“殖民”了整个银河系。那我们算是“殖民者”吗？地球上最原始的生命细胞是来自其他文明的礼物吗？我们是代表“他们”来到这里的吗？理论上当然是说得通的。但最关键的问题是，为什么会有智慧生命这样做？克里克和奥格也没能很好地回答这个问题，克里克还在自己的书《生命本身》中承认：“（直接泛种论）作为一个理论，还有些不成熟。”奥格也很谦虚。他曾经说过：“我认为我们完全没法了解宇宙中存在生命的可能性。可能哪里都有生命，也可能只有我们。”

我同意克里克的结论，但我还想着直接泛种论的观点，因为这个观点让人不禁联想，可能有外星文明，甚至许多外星文明，出于未知的动机，发射探测器拜访其他天体系统。我认为这个可能性提供了费米悖论的终极解答。不过在终极解答之前，还是先看看其他可能的“答案”，了解下其中的逻辑。



费米悖论有许多“答案”，开放大学的物理学家史蒂芬·韦伯用最易懂的方式整理汇编成了《大家都去哪了？》这本书。如果看了本书中提到的几个例子，你还想深入了解，可以读下这本书，虽然有些“答案”过于古怪，但它们反而给我的观点提供了支持。

当然，很多人相信外星人来过这里，甚至还相信存在喜欢开着飞碟绑架人类的外星人。但这些事都没有可信的证据，而且即使有些地方把不明飞行物（UFO）跟“飞碟”画上等号，大众对UFO的热情还是无法自洽，因为“不明”不代表来自外星。如果有辆车从我身边飞速开过，我没认出型号，这不意味着这辆车就是什么机密的原型火箭车。符合逻辑的说法应该是如果我仔细看一下，就能认出型号。很多声称目击了UFO的事件，其中的“UFO”其实都不是“不明”飞行物，而是大气层的某些现象、气象探测气球、飞机等——甚至还有金星——这样，即使还有一小部分未能证实或证伪，对其最简单的解释还是：大多是自然现象，只是我们掌握的信息不足，无法定性，就像飞速驶过的车让人看不清型号一样。

有个理论跟飞碟联系很紧密，就是我们生活的宇宙像一个动物园，或者是一片原野，而许多我们这样的早期生物都可以自由发展。这其实还暗示了这样一件事，等我们的科技水平到了一定程度（或者我们成熟到了不再内斗），就会进入银河系的高等文明俱乐部，虽然一开始只是初级会员。许多科幻作品都继承了这个观点，包括《星际迷航》系列电影。有很多人反对这个观点，其中一种说法是：最初的几十亿年，地球上只有单细胞生物，高等文明俱乐部为什么不来占领地球呢？他们是在几百万年前，灵长类动物的智慧逐渐发达时才发现我们的吗？而且为什么银河系的其他恒星上完全没有他们的踪迹？

还有个观点走向了高等文明俱乐部的另一个极端，即所有外星文明都闭关锁国了，因为他们对太空旅行没有兴趣（前面我半开玩笑地提及过类似的观点，即大家都在收听，但没人发送信号）。如果只考

考虑一个外星文明的话，这个说法似乎说得通。但如果你认为银河系中文明很普遍，就只能认为他们都不愿意探索周围，这是因为银河系中很容易留下痕迹，后面我会详细解释。也许很快我们也会这样，只要我们能活过这个世纪，证明马丁·里斯的悲观预测是错误的。

对于“如果有外星人，那他们应该来过地球”这个观点，最严肃的反驳就是星际旅行太乏味、太困难了——虽然费米悖论的核心就是他通过数量级运算意识到了，以人类文明为时间尺度的话，星际旅行还是很快、很容易的，更不用说以地球的生命史为时间尺度了。人类历史上还有类似的事例，能说明这个观点。

向恒星航行的难点在于人类的寿命，往返恒星则是难上加难。当然还存在这种可能性，即其他生命形式远比我们长寿，几百年的旅行时间对他们来说，就像我们飞越大西洋一样，一点儿也不乏味；或者存在高度发达的文明，可以在广义相对论允许的范围内抄时空的近路，抑或是从真空中汲取量子能量驱动飞船。这两种可能性都意味着外星人更有可能殖民银河系。但我们这样的生物，有了比现在先进一点儿的科技，也可以做到。我们可以用核电火箭、聚变火箭、星际冲压发动机，我最喜欢的是用星球上的激光发射器推动的“星航”电动火箭作为推进装置。物理学家、“星航”的主要支持者之一罗伯特·富沃德和乔尔·戴维斯在他们的《镜物质》中对这些可用的科技做了一个简洁但有点落伍的概述，我在这里就不一一详述了。关键在于无论用什么样的推进装置，只要慢一点前进，就能轻松到达最近的恒星。在这些恒星周围的行星上建立殖民地后，那里的人又可以轻松到达离他们最近但是离我们更远的其他恒星。

殖民银河系的关键，在于不要回头。人类有历史之初就有这样的典型例子，波利尼西亚人在太平洋上一个岛一个岛地扩张，最终一路到达了新西兰，甚至到了离最近的陆地1800千米的孤岛——复活节岛上。他们到了新的岛屿后没有回头，而是在上面安家，再以新的岛屿

为基地，派人去更远的岛上。这些都不是计划好的。他们没有殖民太平洋的宏伟蓝图，他们只是出于人口压力，或是对远方的好奇心才这样做的。

类似地，虽然我们的祖先从东非进化而来，他们的后代却遍布全球。他们甚至跨越了西伯利亚和阿拉斯加之间的大陆桥，一路深入到了南美。像波利尼西亚人一样，他们也没有计划。只不过每代人或者每几代人中都有几个人搬到了远一些的地方，也许为了寻找食物和水，也许是为了看看山那头有什么，甚至只是为了远离人群。这个过程花了大约三万年。斯坦福大学的澳大利亚射电天文学家罗纳德·布莱斯维尔总结了这个过程，还指出人类从非洲一步步走到南美的过程，比南美地区独立进化出人类这样的智慧生命要快得多。这段旅程的最后一段是从现在的加拿大到巴塔哥尼亚，共约13000千米，按照每年迁徙13千米的速度，也只要1000年就够了。他认为智慧生命更可能从第一颗“智慧星球”出发，在整个宇宙留下了足迹，而不是等每颗星球都进化出自己的智慧生命。

布莱斯维尔的结论，是基于迈克尔·哈特在1975年《英国皇家天文学会季刊》上发表的论文中的计算过程得出的。哈特在文中提到了我们从地球出发殖民银河系的可能性。他对物理法则允许的推进系统提出了几个可行的假设，还假设“我们最终会派人前往离我们最近的100颗恒星”，这些恒星离太阳的距离都不到20光年。“每个殖民地都有可能派出自己的人，殖民其他星球，如此往复。”如果各段旅程之间不间断，“人类太空探索的极限会以约0.1倍光速的速度扩张。以这个速度，65万年后我们差不多就可以踏遍银河系了。”当然，旅程之间不间断还是太过乐观了，但只要间隔的时间和旅行的时间处在一个数量级，殖民银河系的时间也只要翻一番，达到130万年。这甚至还不到银河系寿命的1/8000。而考虑到正式建立殖民地的时间，还有人做了更加不乐观的估算，结果从几百万年到5亿年不等——跟银河系的寿命比起来还是很短。而且费米提过，具体的数字不重要，有大概的数

量级就行。如果我们能做到，外星人也能做到。那么——他们为什么还没来到地球？

而意识到星际旅行虽然乏味又有风险，但不一定要生物亲自经历之后，这个观点就更有力了。

## 探测答案

银河系中其他科技发达的文明为什么还没来到地球？最有力的解释来自两位为计算机科学做出过重大贡献的数学天才。阿兰·图灵最有名的身份是密码学家。第二次世界大战时，他带领英国白金汉郡布莱切利园的团队破解了德军的密码。但早在1936年，他就发表过一篇论文《论可计算数字》，为机器计算定下了基本原则。图灵证明了理论上，我们可以打造一台机器——现在我们称其为通用图灵机，解决任何机器语言能描述的问题。对伴随着电脑成长的一代人来说，这似乎再明显不过了，但正是图灵证明这样的机器可以造出来之后，科学和技术才向着现代计算机的方向发展。用图灵的话说，只要有了合适的程序，通用计算机“可以完成任何专用机器能做的工作，或者说完成任何计算”。他们在布莱切利园打造的计算机，为破译密码出了不少力，那就是一台专用机器，只能做一件事。不过很快，在匈牙利裔科学家约翰·冯·诺依曼的帮助下，通用计算机就被开发了出来。诺依曼曾为制造出第一颗原子弹的曼哈顿计划工作。

冯·诺依曼对能解决任何问题的计算机很有兴趣，这让他开始思考智慧和生命的本质。智慧生物也可以算是通用图灵机，因为他们能解决很多问题，而且还有繁殖的能力。那有没有可能造出非生物、又能自我繁殖的图灵机呢？冯·诺依曼证明这是有可能的。过程也很简单。首先，计算机内存储的程序指示机器复制程序，并存储在某种介质中（今天，我们可以理解为存在移动硬盘里）。然后程序指示机器复制一个空白的自己。最后，再将空白机器的复制品存入新机器。

冯·诺依曼在1948年就指出，生物细胞在繁殖时也是同样的步骤，现在我们可以将核糖核酸理解为“程序”，将蛋白质理解为细胞的“机械构造”。首先复制DNA，然后细胞分裂成两个，复制出的DNA进入新细胞。

今天，我们将非生物的自动化自我繁殖机器称为“冯·诺依曼机”。图灵和诺依曼都没能看到各自的设想变成现实。1954年，在忍受了当局对他的多年骚扰、折磨后——只因他是同性恋——图灵自杀了，年仅41岁；冯·诺依曼在1957年因癌症去世，享年53岁。后来罗兰德·布莱斯维尔提出可以派出探测器探索银河系，美国物理学家弗兰克·蒂普勒完善了整个理论，向大家展示了冯·诺依曼机怎么走遍银河系每颗有价值的星球。

这个论点的核心，就是要通过代理殖民整个银河系，这样科技文明造出一两颗探测器就够了。这样的探测器要内置程序，收集、利用天体系统中的小行星和碎石，以及恒星的能量复制自己，再将自己的复制品送出，探索其他天体系统。只要从地球发射一两颗探测器到火星和木星之间的小行星带就够了，探测器利用那里的原材料制造出一模一样的自己，再出发探索附近的恒星，并通过无线电与地球联系。每到达一个新的天体系统，除了汇报新的发现以外，探测器会马上开始复制自己，如此往复。即使很保守地假设探测器以1/40光速前进，寻找带有行星的恒星，从打造第一颗探测器到走遍银河系内每颗有价值的星球，也只要1000万年（银河系有100亿年的历史）。我们付出的代价只有打造一颗或备用的几颗最初的探测器。

即便以现在的科技水平，我们也能将一颗很大的探测器送往最近的恒星。只要在木星靠近时发射一颗探测器，利用木星的引力弹弓加速，前往太阳，再利用太阳的引力弹弓进一步加速，以约0.02倍光速脱离太阳系。探测器抵达目标恒星时，可以再利用那颗恒星的引力减速。探测器可能要数千年才能抵达目的地，但只要地球上还有文明，

人类还有兴趣，就可以通过无线电让探测器复制许多个自己，甚至还可以进行改进、提速（假设地球上的科技水平几千年来确实进步了）。第一颗探测器可能要过几千年才能返回有意义的消息；但探测器自我复制和扩张的速度越来越快，很快它们返回的信息就会接连不断、蜂拥而至。

这种可能离我们的科技水平并不遥远，甚至可以确定最多在几十年之后（假设我们的文明不会崩塌），我们就能开始造探测器了。这里的“我们”也并不一定是美国航空航天局那样完全由政府支持的机构。保罗·艾伦这样的个人已经出资打造望远镜寻找外星人了；下一代的保罗·艾伦也很有可能出资探索，至少是启动探索银河系中的每一颗星球。这样的人可能更在意有生之年能不能得到附近天体系统的消息，而不是关心几百万年后发生什么。但既然探索附近的天体系统和探索银河系的代价差不多，谁能抵抗得了银河系的诱惑呢？

因此，冯·诺依曼探测器的可行性恰好证明了我们在银河系是独一无二的。所有认为“他们”（外星人）存在，但是不知为何避免和我们接触的论点，都意味着其他科技文明联合起来掩盖自己的踪迹。但不需要一个文明，只要有一个人耐不住寂寞，发射了探测器，过几百万年他所在的文明就能走遍所有星球。

费米问：“如果有外星人，为什么没有来这里？”答案就是：没有外星人。但这就带来了更重要的问题。不是“我们是独一无二的”而是“我们为什么独一无二”。如果没有外星人，我们为什么在地球上？我们在宇宙、时空中的位置有多特别，才能诞生出银河系唯一的科技文明？地球为什么是唯一的智慧星球？本书余下的章节就将讨论这些问题——我们为什么会存在？为什么会问这些问题？

## 第二章

# 我们在银河系中有什么特别的

银河系中为什么有智慧生命？我们的存在与银河系的构造、太阳在银河系中的位置密切相关。虽然本章不讨论其他星系存在生命的可能，但要了解我们所在的银河系，就要了解星系通常是如何形成的，以及如何随着时间变化。天文学家对这些都有一个大致的了解，因为望远镜就像时间机器一样。假设有个物体在100光年之外，那么光线就要100年才能来到我们这里，因此我们现在看到的那个物体，其实是它100年前的样子。这个现象叫作“时光回看”。有的天文望远镜精度非常高，可以看到很远很远的星系在宇宙诞生的那次大爆炸之后，即130亿年前的样子。因此我们能观察到刚刚成形的星系。当然，还有离我们更近的、更成熟的星系。我们还无法观测单个星系随着时间的演变，但我们能看到处在不同阶段的星系，将这些信息与我们对物理学、计算机模拟的理解结合起来，我们就能研究出银河系是如何演变成今天的样子的。类似地，生物学家也不需要观察一颗橡子是如何变成参天大树的；他们只需要研究森林中不同年龄的橡树，并根据观察结果推断出橡树的一生。

暗物质——我们最近通过亮恒星和星系受到的引力作用推断出了它的存在——对宇宙早期星系的形成至关重要。暗物质不像组成我们的原子和分子，我们只能通过引力作用判断它的存在。研究暗物质的性质，是当下天文学家的一大课题，但就目前我们讨论的范畴而言，知道暗物质的存在、没有暗物质就没有银河系这样的星系就够了。一团团的暗物质通过引力吸引了一股股的原子，就像雨水流进路上的坑洞里一样。这一股股的原子包括大爆炸产生的氢和氦，但不包括对我们的存在至关重要的、重一些的原子。这样就产生了大大的气团，在

自身质量作用下——当然也有暗物质的影响——坍缩，并且温度升高，就像打过许多次气的打气筒一样。等到气体向外的挤压力和内部的引力平衡，气团的坍缩就停止了，而对于氢和氦组成的气团来说，坍缩停止时气团的体积还很大，因为气团还很难向太空中辐射能量。现在的宇宙中，形成恒星的气团就小多了，因为有了碳等更重的元素，热量可以更有效地散发出去，气团也能进一步缩小。但经过模拟发现，大爆炸后形成的第一批恒星质量都有太阳的数百倍，表面温度高达10000开尔文<sup>(1)</sup>，发出的辐射即使在今天也能通过太空红外望远镜探测到。

恒星之所以能持续发光，是因为核心内部的核聚变将轻的元素变成重的元素，同时释放能量。恒星越重，为了维持自身所进行的核反应就越剧烈，因此重的恒星往往寿命很短。大爆炸后约2.5亿年，第一批恒星就差不多耗尽了燃料，发生爆炸，把外层的物质（包括部分重元素）扩散出去，穿过附近的气团。爆炸的冲击波会导致更多气团坍缩，但有了更重的元素，发出的辐射就更多，气团可以坍缩得更小。气团在坍缩的过程中，会分成更小的区块。这样形成的恒星，跟现在银河系中存在的恒星很像。的确，我们在银河系中观测到的恒星，有的可能是银河系成形初期留下来的。银河系中最古老的恒星只含有一点点重元素，约形成于大爆炸之后5亿年。这样只含有少量重元素（从天文学的角度来说，就是缺少“金属”）的恒星，考虑到它们出现的时间，它们被称为第二星族星。

但第二星族恒星形成时的环境，跟第一批恒星形成时已经大不相同了，那时宇宙中还没有出现金属元素。恒星的质量如果大于太阳的250倍，那在消亡时，虽然外层的物质会被爆炸推出去，但绝大部分物质都会坍缩成黑洞，质量会超过太阳的100倍。既然最初的恒星都是由当时最致密的物质坍缩形成的，黑洞之间的距离大都很近，还会融合形成更大的黑洞。现在有充分的证据表明，银河系以及类似的星系，中心都有一个巨大的黑洞<sup>(2)</sup>。我们无法得知这些黑洞是如何形成的，



很有可能是大爆炸之后几亿年，第一批恒星消亡形成的黑洞互相融合的产物。

## 制造星系

130亿年前的天体，或者说130亿光年之外的天体，如果不是特别明亮，是很难观测到的，但我们对其中明亮的天体（类星体）进行观测后发现，在宇宙诞生不到10亿年时，就已经有了质量至少是太阳10亿倍的黑洞，周围环绕着一团团原子，恒星可能在其中诞生。当时肯定还有类似的，但是更小的天体，只不过光线太弱，离得那么远，很难看到；我们通过模拟发现黑洞可以成为星系的中心，通过引力吸住一团团的原子，逐渐扩大星系的规模。哈勃太空望远镜发现了部分早期星系——比银河系小，但是呈蓝色，因为其中有很多高温的早期恒星。但不要以为是先有黑洞，然后周围才出现了星系；星系的成长更像一个共同演变的过程，黑洞和周围的星系从一团原始物质中一起成长。黑洞和周围星系的质量都取决于最初的气团中有多少物质。

计算表明，只要中心的黑洞质量超过太阳的100万倍，经过几十亿年的时间，这个过程就能产生银河系那么大的物体。对银河系中心地带的观测结果显示，该区域的恒星在飞速围绕着看不见的物体运动。通过对恒星运动速度的观测，可以计算得出中心的物体质量约有太阳的300万倍，但半径不大于770万千米，只有地月距离的20倍。这个物体只可能是黑洞。一切都说得通了。不过，虽然黑洞对于星系的诞生至关重要，但对于生命来说，关键在于离黑洞很远的外围区域发生了什么。

这就解释了银河系中心的凸起（像煎蛋的蛋黄一样），以及其他星系中类似的凸起是如何形成的。这还解释了星系中一个很小的分支——椭圆星系是如何产生的，椭圆星系外形像其他星系的中心，但是没有周围的盘状结构（像煎蛋没有蛋白）。所有的原初星系——除了

形状不规则的、由小部分恒星组成的星系，星系的字名字也很没有想象力，叫作不规则星系——似乎都是从椭圆形的核心发展出来的，但不是每个星系都发展出了盘状结构。这应该取决于附近是否有足够的物质供中心部分吸引。

这个过程也不是一蹴而就的。银河系这样的盘状星系似乎是由物质一点点聚集在中心周围而形成的。通过观察银河系盘状结构中恒星的运动，我们获得了直接证据。天文学家发现，虽然盘状结构中，绝大多数恒星都在一起以类似的规律运动，像围着田径场跑步的运动员一样，还是有部分恒星独自组成了细细的一队，这些恒星的成分与其他恒星稍有不同，彼此之间运动规律类似，但与其他恒星的运动方向成一个固定的角度。目前我们发现了几十队这样的恒星组。队伍的总质量从太阳的几千倍到几亿倍不等，长度从2万~100万光年不等。这些都是之前因为离银河系太近被引力拉过来的小型星系。星系被打散后，其中的恒星就融入了银河系，与附近的恒星打成一片。这意味着银河系是通过一系列的弱肉强食，吞并了附近更小的星系之后变成今天的样子的；我们在附近盘状星系中观测到了一模一样的过程。这就解释了为什么银河系只有100亿年历史，却包含诞生130亿年的恒星——更老的恒星是在银河系成长过程中被吞并的。

银河系，以及其他类似银河系的星系，是在大爆炸后三四十亿年，即约100亿年前出现的。虽然它们通过弱肉强食不断成长着（现在也是这样），但中心凸起的盘状结构早已成形，盘状结构中还不不断诞生着富含金属的恒星，即第一星族星。随着时间的推移，一代又一代恒星的更替，盘状结构中的气体内有了越来越多的重元素，等到约50亿年前，银河系寿命约为现在的一半时，即太阳诞生时，银河系中已经有了足够的“金属”形成行星，并且至少在一颗行星上孕育了人类。

故事还没结束。巨大的椭圆星系，有的甚至比银河系大许多倍，似乎也是由盘状星系融合而来的，盘状结构在融合过程中毁掉了。我们的银河系或许也是同样的命运，因为银河系正向着仙女座星云方向、离我们很近的M31星云运动，并即将发生碰撞。当然这是几十亿年后的事，对于我们为何出现在地球上这个问题也没有直接的贡献。但这个故事能告诉我们，恒星是如何将氢与氦转化成更重的元素，并散布到太空中，形成未来的恒星和天体系统的。

## 制造金属

即使是太阳这样诞生于大爆炸后100亿年的恒星中，也只含有一点点重元素。太阳的总质量中，氢占了约71%、氦占了约27%，余下的所有物质占了不到2%。观察太阳表面的波动，可以了解其内部结构，就像研究地震波可以知晓地球内部的结构一样。天文学家还通过物理学法则、太阳的体积及其亮度，计算出了太阳核心的样子。这两种方法组合起来，我们就知道太阳总质量的一半都压缩在了1/4的半径之中，体积只占太阳总体积的1.5%。太阳的直径约是地球的108倍，体积约是地球的100万倍，质量则约是地球的33万倍。因此，165000倍地球质量的物质，都挤压在了25倍地球半径的区域内。

这部分核心中，电子完全脱离了原子，只留下原子核，电子和原子核被压缩起来，密度有铅的12倍<sup>(3)</sup>。太阳核心的温度约有1500万开尔文，核心边缘温度约有1300万开尔文。将氢转化为氦的一系列核反应就是在这样极端的环境中发生的。四个氢原子核（质子）经过许多步反应，形成一个氦原子核（阿尔法粒子），包含两个质子和两个中子。最关键的地方在于，根据爱因斯坦著名的质能方程，每发生一次这样的反应，初始的四个质子质量的0.7%就会以能量的形式辐射出去。太阳正是因此才不断发光，我们也是因此才在地球上努力开发核聚变反应堆，模仿太阳核心发生的反应，为地球提供清洁能源。

即使在太阳核心那样的环境里，这个过程也极少发生。以目前的聚变速率，消耗掉太阳核心内所有的氢需要1000亿年，但这一天永远不会到来，因为核心内部还会积累氦的“灰烬”。太阳内部的质子太多了，即使只有很小一部分转化成氦原子核，太阳每秒依然有500万吨物质转化为能量。太阳核心在一秒钟内能将7亿吨氢转化为6.95亿吨氦。自太阳系成形开始，这个过程已经进行了差不多45亿年，但只用掉了4%的质子的能量。

太阳这样持续、稳定地将氢转化为氦的恒星，被我们归为“主序星”。恒星能维持多久“主序星”的状态，取决于其质量。小的恒星更暗，物质消耗得也慢；大的恒星更明亮，物质消耗得更快。这显然也与我们的存在有关，因为地球用了40亿年才进化出了智慧生命，而如果太阳几十亿年前就耗尽了燃料，生命显然也不会存在了。但太阳在主序星中属于中等水平，也差不多度过了一半的主序星状态。通过计算机模拟以及与其他恒星比较，我们发现太阳内部将氢转化成氦的过程还能稳定地进行四五十亿年。之后由于氦的累积，太阳核心会转化形态，这对太阳、对我下一章要讲的地球生命都有着深远的影响。

太阳在生命的下一个阶段，会“燃烧”氦，形成碳和氧。对太阳来说，生命几乎到了尽头，等到所有氦燃尽，太阳会变成一颗冷冷的、由灰烬构成的球体，大小跟地球差不多，变成白矮星。但是更大的恒星可以将核聚变更进一步，因为大恒星核心的密度和温度都更高。这些恒星可以一直发生核聚变，合成铁、镍这样更重的元素，并不断释放能量。到了生命的末期，恒星会急剧膨胀，将内部的物质推到太空，形成天文学上的奇观，当然更重要的是将恒星内部合成的元素送入太空，以“回收利用”，形成新的恒星和天体系统。

但更大的恒星会产生更壮观的景象。这些恒星会爆炸，这个过程中会产生比铁还重的元素。

从氢元素到铁元素，轻的原子核合成为重的原子核都是可以释放能量的，当然后续的反应跟氢合成氦相比，平均每个粒子释放的能量会出现边际递减效应，越来越少。到铁元素就停止了，因为再聚变成更重的元素，就需要消耗能量了。这时想获取能量，就只能通过分裂原子核——核裂变。这就是裂变反应堆的基本原理，很重的元素，比如铀和钚，原子核都很不稳定，很容易分裂成更轻的元素，同时释放能量。这些重元素只是存在于宇宙中，也只能释放能量，因为这些元素合成时已经吸收了来自恒星消亡前的巨大爆炸释放的能量，这些恒星的质量有太阳的8到10倍。这样的爆炸被称为超新星，而释放的能量来自引力能。

超新星其实分两类，不过第一类——I类超新星，不会产生比铁重的元素。即便这样，I类超新星依然很值得研究，因为我们能了解超级巨大的恒星消亡时会发生什么。太阳这样的恒星最终的命运是变成白矮星，一团致密、死气沉沉的物质，内部的氢、氦、氧、碳等元素依然界限分明，虽然彼此都紧紧地挤在一起。但印度天文学家苏布拉马尼扬·钱德拉塞卡在20世纪30年代通过计算发现，如果这样的白矮星质量超过了太阳的1.4倍，引力就会将其进一步压缩，原子核都被压缩成为中子，直径只有几千米。

我们来更直观地看一下：原子绝大部分的质量——超过99%，都集中在中心部位，即由质子和中子构成的原子核。质子和中子之间的唯一区别就在于质子带正电，中子不带电。原子核周围是带负电的电子云（电子的数量与原子核中质子的数量相等）。粗略地说，原子核与原子的体积之比，就像一粒沙子跟整个卡耐基音乐厅之比。因此超新星才能导致恒星发生如此剧烈的结构变化。

白矮星的临界质量被称为钱德拉塞卡极限。当白矮星的质量非常接近，但是仍然小于钱德拉塞卡极限时，会形成I类超新星，从外部吸

收物质。这类超新星较为常见，因为很多恒星都形成了双星系统，而双星系统中的白矮星会从另一颗恒星吸收物质，因为它的引力更强。

白矮星的质量达到钱德拉塞卡极限时，会突然坍缩，从地球般大小缩至一座山的体积。在此过程中，恒星内部的物质会发生一系列核反应，将碳和氧合成为铁。这个过程会释放巨大的能量，将约一半恒星质量的元素转化为铁，以及少量的硫、硅等其他元素，并通过爆炸散入太空。制造菜刀用的铁就是这样形成的。剩下的物质会变成一团中子，质子全部消失，因为质子和电子挤压后会形成中子，也就是说恒星变成一座山那么大，但密度与原子核相同。I类超新星爆炸释放的能量，绝大部分来自碳和氧生成铁的反应，但II类超新星爆炸的能量则绝大部分来自引力能。

初始质量有太阳8~10倍的恒星，即使在生命过程中消耗了物质，质量也不会低于钱德拉塞卡极限。它们消耗核燃料的速度比太阳快，因为需要在斥力作用下将更多的物质维持在一起，发生的核聚变也更彻底，可以合成到铁。而质量是太阳15~20倍的恒星内部，进行到最终状态的核反应将发生在核心的最外层，这时核心的质量可能与太阳相当，但体积只跟地球相当，几乎全部由铁构成。这时核心就像一颗白矮星，但外层物质的质量可能达到太阳的10倍，只靠最后的一点核反应维持着。然后恒星的燃料耗尽，核反应停止。核心外部的物质全部向内挤压，核心在0.1秒内坍缩成中子星（还有可能形成黑洞），恒星的外层现在空空如也。

铁核心坍缩后释放的引力势能为超新星爆炸提供了能量。恒星的外层开始塌陷时，会被能量及粒子击中，碰撞非常激烈，甚至可以产生比铁还重的元素，并将这部分物质散入太空，与其他物质混合，形成新一代的恒星、行星。一颗II类超新星爆炸释放的能量，是太阳毕生释放能量的100倍还多；爆炸后的几周时间里，II类超新星的亮度跟

所在星系中所有恒星加起来差不多。超新星是我们存在的重要原因之一。而且超新星在银河系中的位置不同，影响也不同。

## 在银河系中混合金属

显然，恒星中重元素的比重——“金属度”，会一代代地增加。而地球这样的行星都是由这些元素构成的，因此恒星的金属度可以为我们寻找类地行星提供指导。恒星的金属度有许多种计算方法，但最普遍的方法是取恒星中铁元素与氢元素质量的比值。

巧的是，天文学可以很直接地得出恒星中不同元素的比重。元素的原子在高温下，会释放出指定波段（颜色）的光波，即光谱线。光谱线对应着特定波长的光。举个例子，钠会释放橙色-黄色区域内两种波长的光，因此含有钠元素的路灯才有特定的颜色。元素跟光谱线是严格一一对应的，就像商品的条形码一样，因此可以通过比较恒星的光谱线和实验室中加热指定元素得到的光谱线，确定其中的元素。类似地，包含所有颜色的白光通过含有不同原子的气体后，气体中的原子会吸收与光谱线相同波长的光，在光谱中留下特定的暗线。无论用哪种方法，只要比较光谱线的强度——比如铁和氢，就可以不用靠近恒星或是太空中的气团，也能确定其中的元素，以及各元素之间的比例。

金属度通常是跟太阳比较得出，即比较恒星跟太阳中铁、氢元素的比值。这种方法很方便，也非常理想，只是有点误导人，因为我们会下意识地认为太阳是颗完全正常、典型的恒星。我在下一章会讨论，太阳并没有那么正常或典型。有时，我们的认知是由观察得出的。常识告诉我们，重元素越多的恒星，行星的数量可能就越多，而我们通过观测也确实发现，银河系中巨大行星的“母星”，金属度通常比附近恒星的平均金属度要高。而且，与太阳相比，金属度小于40%的所有恒星，周围都没有巨大的行星。在真正观测到大量与地球体积

相近的行星之前，我们还没法确定更高的金属度跟更多的类地行星有关，但所有证据都指向这一结论。

不过，金属度太高也可能是坏事。我们在金属度最高的恒星周围发现了巨大的行星，甚至比木星还大，其轨道半径却和地球围绕太阳的半径差不多，甚至更小。这颗行星是在现在的轨道上形成的，还是形成在更远的轨道上，之后向内迁移了，我们还无法确定。不过无论如何，如此巨大的行星都会影响附近类地行星的轨道，让其远离或靠近，最终毁灭。恒星的金属度更高或更低，似乎都很难出现在类似地球的轨道上运行着的类地行星。

银河系会将各种物质混合，因此恒星诞生的时间和地点对其金属度有重要影响。我喜欢将这个过程比作一锅炖着的蔬菜汤。每个来喝汤的人都会往锅里加点食材，因此锅里的汤会越来越浓稠，里面的蔬菜种类也越来越多。地球，以及太阳系，都是45亿年前诞生的，我们的故乡有很多特点，其中之一就是有一颗很大的铁核心，后面我们也会讲到，这对维持地球上宜居的环境至关重要，不仅仅因为铁核心会产生磁场，保护我们免受太空中的辐射伤害。诞生时间更早的天体系统，其铁元素的比重会更低一点儿，因此无法形成跟地球一样的行星。同样地，现在，即地球诞生之后45亿年形成的天体系统，其铁元素的比重会更高一点儿。对生命来说这是好还是坏，我还没法下定论，但这些行星肯定跟地球不同。有些行星核心中的放射性元素比重可能更低，而地球的核心之所以是熔融的，正是因为辐射产生的热。

这些都告诉我们，要理解我们为什么存在，以及银河系为什么还没被更高级的文明统治，我们就要考虑一下自己在银河系以及太空中所处的时代和位置。我们所在的位置本身就很重要。对于地球这样的行星，以及我们这样的生命形态来说至关重要的、混合金属的过程，只能在银河系中很窄很窄的一片区域才能发生。



传统方法只将恒星分为两类——古老的、金属含量低的第二星族星，以及新生的、金属含量高的第一星族星。但最近有研究表明，银河系以及其他盘状星系中的恒星可以更好地分为四个大类。我们的银河系中，不同年龄、不同化学构成的恒星分布在四个不同的区域。肉眼可见的银河系最外层是一圈稀疏的、非常古老的恒星，年龄至少有太阳的两倍。至少，外层的光晕是在100亿年前，产生银河系的气团坍缩时形成的，不过内层的光晕中，恒星的年龄更年轻一点儿，可能是稍后诞生的。这个球形的光晕直径约30万光年，但包含的恒星非常少。如果这些恒星的行星上有过生命，他们在地球诞生之前还有50亿年的时间可以进化。我们的祖先还是单细胞细菌时，这些生命也许就已经达到了我们今天的科技水平——这也是费米悖论的一个夸张描述。但既然光晕中少有恒星的金属度能达到太阳的10%，更不要说达到能诞生行星的40%了，其中还是不太可能诞生类地行星和类似我们的生命。

与恒星稀少的光晕形成鲜明对比的，是恒星最密集的银河系中心的凸起部分，盘状结构也是围绕着这部分成长起来的。中心部分的恒星很难深入研究，因为盘状结构中的尘埃会阻挡可见光传播，但红外望远镜可以探测尘埃背后的情况。中心部分有许多恒星与光晕中的恒星类似，很古老，金属含量很低。但这部分恒星的金属度分布很广泛，虽然极少有恒星的年龄或是金属度跟太阳相近。乍一看，这片区域中诞生生命的可能性也许只比光晕高一点。但另一方面，中心部分的恒星彼此距离非常近，活动也非常频繁（包括银河系中心质量高达太阳300万倍的黑洞偶尔引起的辐射爆发），宇宙辐射水平非常高，生命很难存活。一颗名为“整数”的无人探测器发现距银河系中心350光年处，有一团平平无奇的氢气发出了高强度的X射线；最可能的原因就是350年前，中心的黑洞发生了一次爆发，强度比我们今天观测到的高100万倍，350年后，爆发的能量抵达那团氢气，刺激其发出荧光。当然，这一切发生在约27000年前，因为那部分X射线用了这么久才抵达

我们的观测器。无论如何，这都可以直接证明中心区域不适合生命存活。

盘状结构由两部分组成。其中有一个厚的盘状结构，直径约10万光年，厚度约4000光年，里面全是古老的、金属含量少的恒星。厚盘中还有一层薄得多的盘状结构，直径也有10万光年，但厚度不超过1000光年——不到直径的0.5%。如果薄盘的直径是1米，那厚度最多只有5毫米。这片薄薄的盘状结构包含了尘埃、气体、太阳和年轻的恒星；这是目前银河系中唯一还在诞生恒星的区域，金属也被逐渐混合，成为越来越浓的“汤”。

厚盘和薄盘之间的区别很好解释。旋转的气团坍缩时，只能形成一个薄薄的盘状结构。向一个方向坍缩的气体原子、分子与另一个方向的原子、分子碰撞，在不断碰撞的过程中，随机运动彼此抵消，整团气体形成了一个盘状结构。由气团坍缩成的盘状结构都是这样形成的，但恒星不同。穿过气体薄盘的恒星都过于巨大，几乎不会受盘状结构影响，恒星之间的距离又那么远，因此很难发生碰撞，最多是“擦肩而过”。恒星会穿过薄盘，然后薄盘中的物质产生的引力会将恒星拉回，再次穿过夹在银河系中间的薄盘。恒星可以如此往复，不过引力会阻止恒星飞得太远。因此厚盘中古老的、金属含量低的恒星是在银河系吞噬更小的星系时捕获的。但过程中吸收的任何气体、尘埃，都进入了薄盘。所以，厚盘和光晕类似，其中的恒星很古老、金属含量很低，也很难孕育生命，剩下的就是薄盘了。

## 我们在银河系中的地位

银河系盘状结构的旋臂中会形成新的恒星。普通相机拍摄的照片，尤其是用蓝光拍摄的照片中，旋臂非常明亮，初看会以为银河系绝大部分的恒星都在旋臂中。但用红光拍摄的照片中，旋臂就没那么耀眼了，而且虽然旋臂上的恒星密度的确稍大，银河系的盘状结构中

也均匀分布着恒星，但密度自中心向外围逐渐降低。旋臂很明亮，是因为含有大量的明亮恒星，也就是年轻的恒星。

最明亮的恒星远比太阳大，呈蓝白色。但体积这么大的恒星都“活”不长，1000万年左右就会耗尽燃料。旋臂中的蓝白色恒星肯定很年轻，因为这样的恒星都短命。它们诞生后没有足够的时间移动很远，有些还会发生超新星爆炸，让恒星“汤”更浓稠。

更小的恒星没有这么明亮，与明亮的恒星类似，也都诞生自一团气体和尘埃的坍缩，但蓝白色恒星消失后很久，这些小恒星依然在银河系中静静游荡。我们的太阳就是银河系中一颗这样的恒星，运动速度约为每秒250千米，围绕银河系中心转一圈约需要2.25亿年，太阳及其行星自45亿年前诞生以来，已经围绕银河系转了约20圈了。而如果太阳是颗巨大的蓝白色恒星，那还没有走完一圈的5%就已经爆炸了。目前我们在旋臂内缘的猎户座旋臂，或者叫本地旋臂附近。

但是银河系这样的盘状星系不会一直存在旋臂结构的。旋臂是由能诞生恒星的气体 and 尘埃构成的，由银河系内部的扰动和外部的不时干扰产生，比如附近星系的引力作用，或银河系吞并小的星系时产生的干扰。银河系在旋转，结构的任何扰动都会呈螺旋状扩散开，就像边搅拌边往黑咖啡中倒奶油或是牛奶一样，倒入的一团白色液体很快呈螺旋状散开。螺旋几乎一出现，就会不断旋转散开，最后完全融入咖啡。盘状星系受到扰动后也会发生同样的事。扰动以螺旋状扩散开，然后逐渐变淡、消失。只不过星系中的这一过程可能要花上几亿甚至几十亿年，而咖啡中的牛奶只要几秒钟就能散开。我们之所以觉得旋臂很长久，是因为我们的生命很短；我们看到的旋臂就像给咖啡中的螺旋拍下的照片。

不过有些情况下，旋臂结构会随着时间的推移不断更新。如果持续有外部“刺激”，就可能发生这样的情况。如果银河系中心的凸起不是完美的球形，就可能对盘状结构产生引力作用，让其无法完全稳

定。这个过程可能产生一波高密度的气体——螺旋状的密度波——横扫银河系，并不断刺激新恒星诞生。

恒星诞生的过程开始后，也会不断产生不那么规则的扰动，波及整个星系。银河系中似乎经常发生这样的事。恒星诞生很频繁的区域，高温的早期恒星会向周围辐射大量的紫外线，表面还会释放出“一股股”的物质。这些都会挤压附近的气体 and 尘埃，使其坍缩，触发新一拨的恒星诞生。结果就是有那么一条区域里面，恒星频繁诞生，又由于银河系的旋转而呈旋臂状。这个过程能产生一系列恒星，还能自我延续，对于混合银河系薄盘中的金属元素很有作用。

螺旋状的密度波中可以诞生恒星，听上去虽然很有趣，但是密度波本身的旋转速度与恒星环绕银河系的速度并不相等，只不过刚好沿着一个方向运动。密度波的速度更小，因此恒星以及诞生恒星的一团团气体和尘埃在围绕银河系旋转时，会不断地穿过旋臂，就像我们马上也要穿过猎户座旋臂一样。有个很形象的例子，打开厨房的水龙头，但不要堵上水槽，让水自然流下。自来水接触水槽表面时，会形成薄薄的一层，向各个方向散开。但离落水点一段距离（取决于水的流速）之处，累积的水会逐渐变深，这个现象叫作水跃。虽然水一直在流动，但这部分水的形态不会变。围绕银河系旋转的气团遇到旋转的密度波时，会像发生水跃一样累积起来，气团受到挤压时还会形成恒星。但之前通过这个过程诞生的恒星，比如太阳，在经过密度波时就几乎不会被注意到其存在。

不过，这些恒星还是会受到密度波和旋臂的影响。毕竟，旋臂中会发生超新星爆炸。如果太阳系附近发生超新星爆炸，剧烈的辐射会覆盖整个太阳系，渗透地球，消灭许多生物。这样的辐射还会损坏大气层，很可能会毁灭掉保护我们免受紫外线辐射的臭氧层，也一定会改变气候，无论变好变坏，都对已经适应了之前环境的生物不利。距太阳系30光年范围内的超新星爆炸，几乎可以毁掉地球上的生命。

太阳系穿过旋臂中的气团和尘埃团还有另一个坏处，只不过影响没那么大。极端条件下，太阳发出的光和热会被这些物质阻挡，使地球进入冰川期。当然，太阳系穿过银河系中这样的“车流”，还会有很多其他不利影响。

太阳系上次穿过旋臂，大约是2.5亿年前，或者说一个周期之前了，那时太阳系比现在（围着银河系）少转了一圈。当然，上次穿过的旋臂不是猎户座旋臂，因为旋臂也会随着时间移动；但太阳在轨道上的位置和现在差不多。巧合的是，古生代那时刚好结束，地球上的生命遭受了有史以来最严重的打击。一系列灾难让95%的海洋生命（不仅仅是个体，而是整个物种）消失了。古生代开始于约5.7亿年前，持续了近3.5亿年。正是在这个阶段，海洋中有了鱼类，陆地上有了生命，爬行动物也开始进化。但也正是古生代末期众多生物的灭绝，为幸存下来的生物繁衍生息、演化为新的物种（最有名的是恐龙）打下了基础。

地球上的生命在古生代末期遭受打击，原因之一就是大陆漂移使陆地板块重新排列，引发了冰川期。但如此彻底的物种灭绝也需要有一个极端的原因。虽然过去了太久，我们无法确定，但即使没有直接证据，所有间接证据也都指向了那次与旋臂的遭遇。我们的太阳系不经常遭遇旋臂是好事。但为什么不经常遭遇呢？

太阳系之所以这么久都没有穿越过旋臂，部分原因是我们离银河系中心适中，让我们刚好在旋臂之间；还有一部分原因是太阳围绕银河系中心的轨道非常接近圆形，这点很不寻常。太阳处在旋臂之间空当的位置很久，是因为虽然太阳每2.5亿年绕银河系一圈，但旋臂要花上两倍的时间才能绕一圈。太阳转完一圈时，旋臂转了半圈，因此太阳追上旋臂花的时间更久，生命就有了足够的时间进化。离银河系中心更近的天体系统，即便运转轨道是圆形，也会更频繁地遭遇旋臂，因为旋臂在靠近中心的位置会拧在一起。比我们离中心更远的天体系

统遭遇旋臂的频率比我们低；但我们有充足的理由相信，更远的地方几乎没有天体系统。

## 银河系宜居带

既然银河系盘状结构的直径约为10万光年，那从中心到盘状边缘的距离就是约5万光年。太阳距中心约2.7万光年，在中间偏外的位置。光谱分析发现，离银河系中心更近的恒星，金属含量大多更高，中心的凸起内还有很多非常古老的恒星。盘状星系大都是这个情况，这也能进一步证实星系是从中间逐渐成长起来的。虽然薄盘中，恒星在有条不紊地诞生着，但银河系似乎还有另一波恒星诞生的潮流，在从中心向外扩散，100亿~80亿年前抵达了太阳系诞生的位置，然后继续向外扩散。但即使有了这波潮流，银河系还是要花点时间，经历几代恒星，才能在我们所在的位置积累足够的金属度，形成太阳这样的恒星。在更远的地方，50亿年前的金属度都没达到这个水平。因为恒星的金属度跟产生行星的可能性密切相关，这就催生了“银河系宜居带”（Galactic Habitable Zone，简称GHZ）这个概念，即薄盘中最有可能出现太阳这样的天体系统以及地球这样的行星区域。对银河系中其他可能存在的智慧生命来说，最关键的信息是宜居带在缓缓扩大。根据计算，宜居带还会向薄盘的外侧移动；但查尔斯·兰伟尔和同事对宜居带的最新研究表明，宜居带出现在约80亿年前，以外半径2.6万光年的一个圆环为中心扩张，目前已经发展成了内径2.3万光年、外径2.9万光年的圆环。太阳很接近银河系宜居带的中心，但还有一点儿距离。50亿年前太阳系诞生时，这片区域的金属含量已经高到可以产生类地行星了。

无论在银河系中的什么位置，气团——新恒星和天体系统诞生的地方——的金属度都还在逐渐增加。但银河系外缘的气体很稀少，诞生的恒星也很少，因此即便是现在，外缘区域的金属度增加得也没有

靠内的部分快。既然计算金属度时需要除以太阳的金属含量，那太阳的金属度就应该定义为1。的确是这样。但离中心越远，金属度降低的速度就越快，因此天文学家喜欢取对数，在很大的范围内比较数值时很有用。1的对数是0，因此太阳的金属度就定义为了0，天文学家还给对数加了个单位——“十幂”。我们不需要关注术语，只需要知道金属度为负意味着恒星的金属含量比太阳低，而不是金属含量小于0。

目前，从太阳所在的位置出发，每向外移动1000光年，金属度就会下降5%多一点儿。取对数后，就是每1000光年下降0.02个十幂。其他盘状星系的金属度也有类似的趋势。后面我会详细说明为何金属度过高的恒星无法产生类地行星。不过银河系宜居带的位置还要取决于可能诞生生命的星球围绕银河系旋转时，遭遇灾害的种类和频率。超新星等产生的辐射我已经讲过了。银河系中超新星爆发最频繁的区域，似乎是距离中心约为太阳公转半径2/3的地方。但不只有超新星会释放危险的辐射，银河系的中心也会，中心的黑洞虽然近来很平静，但有迹象表明其不久之前还很活跃。中心的黑洞质量有太阳的300万倍，直径却只有地月距离的20倍。通过对其他星系中黑洞的研究，加上我们在物理学上对黑洞的理解，我们知道黑洞在吞噬物质时——恒星或是气团离得太近就会发生——被挤入中心的物质运动速度非常快，会释放大量电磁辐射，比如X射线，同时黑洞还会发出带电荷的粒子。这对在中心附近运转的恒星已经很糟糕了；这些恒星的轨道还经常是椭圆形的，会携带着整个天体系统逼近黑洞。

类似银河系的星系中，还会发生远比超新星剧烈但更罕见的爆炸，这样的爆炸更容易发生在星系中心、恒星密度最高的地方。比如，爆炸剧烈但短暂的伽马射线爆发。这样的爆发究竟为何产生仍然是个谜，但伽马射线爆发就是目前宇宙中威力最强的爆炸了，几秒钟内释放的能量比太阳毕生释放的能量都多。这些爆炸可能发生在宇宙的另一端，统计数据显示，银河系这样的星系大约每1000亿年才能发生一次这样的爆炸。即使银河系另一端发生了伽马射线爆发，产生的

辐射对地球上的生命都是致命的，还会毁灭臭氧层。一次剧烈的伽马射线爆发，应该可以毁灭整个星系的生命。不过乐观的消息是，这样的爆发持续时间不会超过1分钟，而且只有正对着的星球（伽马射线爆发且有方向性）会受影响。爆发背后的星球，虽然也会受到影响，但上面的生命可以延续。地球上的智慧生命之所以花了这么久才出现，是因为星系诞生初期更容易发生伽马射线爆发，而直到最近几十亿年，生命才有机会逐步进化，产生至少一个科技文明。

兰伟尔和同事将所有证据拼起来，认为处在银河系宜居带中的恒星不足总数的10%。但宜居带内部还有其他危险存在。

## 毁灭性的彗星

跟释放剧烈辐射的黑洞相比，彗星似乎不算什么威胁。对行星来说是这样，但对生命来说就不是了。彗星的撞击，比如，6500万年前导致恐龙灭绝的那次，可以一下毁灭地球上所有复杂的生命。如果彗星几亿年才撞击一次，生命还可以应对，长期来看，生命甚至还可能受益。但如果撞击过于频繁，生物经常灭绝，生命就没有机会进化成智慧生命。

彗星都是太阳系诞生后残留下的冰块或是岩石块。我们熟悉的发光彗星，后面拖着长长的尾巴，来自围绕太阳系运转的彗星群，像包裹着蛋白的蛋壳一样，差不多处在太阳和最近的恒星之间，这些彗星其实很少进入太阳系的内部。这片彗星被称作奥尔特星云，名字来自一位研究彗星的天文学家简·奥尔特，他计算出了彗星外壳的性质。彗星在靠近太阳时产生的尾巴，其实是太阳的热量蒸发了彗星上的冰，释放出的气体和尘埃；彗星上的“冰”也不只含有水，还有固态的甲烷和氨。



但地球上生命面临的威胁与彗星的成分无关。一块一吨的冰和一吨的岩石撞过来，造成的损害是一样的。10千米直径的一块冰和岩石，以50千米/秒的速度撞向地球，释放的能量都相当于100万吨TNT——比第二次世界大战时轰炸广岛的原子弹威力大了50亿倍。这就可以很好地解释恐龙灭绝后，为何出现了剧烈的环境变化。天文学家通过研究地球及其他行星上的陨石坑，结合我们对彗星和陨石轨道的了解，估计出这样的彗星撞击大约每1亿年发生一次。想想恐龙的命运，我们就能意识到这对地球上的生命进化有多严重的影响，虽然这样的灾难也可以让幸存者有机会扩张、变得多元化，我们的存在就是证据。不过，如果撞击发生得更频繁，生命可能根本来不及进化出智慧。而离银河系中心更近的恒星及其行星，也更可能遭遇这样的撞击。

之所以会这样，是因为太阳系围绕银河系运转时，遇到的恒星或是气团都会对奥尔特彗星云产生引力作用，将彗星“打散”，落入太阳系内部，对地球上的生命造成威胁。我们对太阳系诞生过程的理解告诉我们，奥尔特彗星云这类彗星群会经常伴随太阳系这样的天体系统出现，因此这些天体系统都会面临这样的风险。那么风险有多大呢？很大。据估计，奥尔特彗星云包含几万亿颗彗星，虽然其总质量也只有地球的几十倍。而离银河系更近的地方，恒星分布得更密，彗星云更可能靠近其他天体，被引力作用打散；而旋臂中的气团呈水跃状分布，天体系统穿越旋臂时也可能发生类似的情况。

银河系宜居带并没有明确的界限，但我们可以明确的是，银河系内侧含有很多金属，却对生命很不友好，薄盘的外侧虽然更安全，金属含量却很低，很难产生类地行星。中间是“金发姑娘”区，即银河系宜居带，刚好适宜生命生存。太阳系距离银河系宜居带的中心很近。我们生活在银河系中的理想区域，我们也生活在银河系历史上一个理想的时代。直到50亿年前，即便不考虑金属稀缺的问题，恒星的诞生以及毁灭时产生的超新星等事件也会让生命无法存活。地球花了

差不多整整50亿年进化出智慧生命，而如果这种情况很普遍，无须考虑其他情况，我们也是银河系中最早的一批，甚至是第一个智慧文明。我们在银河系所处的时代和地位的确有点特殊。

巧合的是，银河系宜居带的存在进一步支持了费米悖论。如果“他们”在银河系中，那就一定在这个区域。他们如果想探索银河系，寻找其他有生命的星球，就会选择探索银河系宜居带，而不是整个银河系。具备太空航行能力的文明必然很熟悉恒星，也会明白这一点。因此地外生命探测器的任务又简单了一些，时间也缩短了一些。

虽然本书的讨论范围集中在银河系内，但还是有必要说一下，其他星系中存在我们这样生命的希望更加渺茫。宇宙中离我们比较近、可以用望远镜仔细研究的区域中，4/5的恒星所在的星系都比银河系暗淡许多。星系的暗淡意味着恒星诞生、死亡这类能丰富化学元素的活动更稀少，星系的金属度也比银河系低。银河系属于约占总数20%的少数适宜生命存在的星系；而银河系宜居带中包含了银河系中少量的，至多10%的恒星。这些恒星里，又有多少颗行星上有可能产生生命呢？跟附近的恒星相比，太阳算特别的吗？

---

[\(1\)](#) 摄氏温度=开氏温度-273.15。10000开尔文约为9717摄氏度，此处可以理解为10000摄氏度。——译者注

[\(2\)](#) 2019年4月10日，事件视界望远镜组织发布了银河系中心黑洞的照片。——译者注

[\(3\)](#) 约相当于136倍水的密度。——译者注

## 第三章

# 太阳有什么特别的

就像银河系中存在宜居带一样，太阳这样的恒星附近也有一条宜居带。这样的恒星（或太阳）宜居带，简称SHZ（Stellar/Solar Habitable Zone），必须具备的条件是液态水可以存在——不能太冷以至于让水结冰，也不能太热以至于让水沸腾。这个条件似乎过于严格，科幻小说作家就设想过在液态甲烷海洋中生存的生命，甚至还有更奇怪的。但水有一些独特的性质，使其成为生命进化的理想载体。

水之所以对生命至关重要，主要是因为生命需要溶剂——可以溶解化学物质，发生化学反应。水是最适合这个目的的液体，氨以很大的劣势排在第二，因为缺少水的其他特性。

水另一个对生命非常重要的性质，是每个水分子都有极性。换句话说，水分子的一端像是一个很弱的磁北极，另一端像是很弱的磁南极。具有这个特性的分子几乎是独一无二的。水分子的极性使得水分子，以及溶解在水中的其他分子以特定的形式排列，生命必需的氨基酸分子形状如何，就与水的极性有关。

水的第三个关键性质，虽然一句话就能说清，但说起来很奇怪，就是冰能浮在水上。换句话说，固态水的密度比液态水低。这是因为水结冰时，分子会形成很开放的晶体结构，彼此的距离比液态时更远。其他物质在固态时，分子的距离都更近了，密度也比液态时大。水这一奇怪性质的物理和化学原因，我们都已经研究透彻了，不过在这里并不重要。重要的是冰川期时，高纬度地区的海洋上会形成一层冰壳，为下面的水隔热。如果冰块不能浮在水上，那么最上层的水会重新结冰，如此往复，直到海洋彻底冻结。

总之，我们可以有理有据地说“我们所知的生命”需要水的存在。这对恒星宜居带的位置又有什么样的限制呢？

## 窄窄的生命区

有人认为，将恒星宜居带的温度限制在0~100摄氏度过于宽泛，我们应该只关注0~50摄氏度的区域。他们的论据是我们这样的复杂生命形态在50摄氏度以上的环境无法生存。对于地球表面的动物来说的确是这样；但是最近（自20世纪70年代末起），我们在深海底发现深海热泉——海底的间歇泉——中存在许多种生命，依靠热泉释放的热量和化学物质存活。这些热泉在海下几千米深，阳光无法照亮，其中却存在温度超过80摄氏度的管道，其中有着完整的生态系统，包括无眼虾和“庞贝虫”（因庞贝火山得名）。看来即使是复杂的生命形态，也能应对远超50摄氏度的环境，只要有液态水供应。因此恒星周围的宜居区温度最好定义在0到100摄氏度——这个条件依然很苛刻，可以进一步说明我们在宇宙中的地位很特别。

现在的太阳系中，地球几乎刚好处在恒星宜居带正中央。离太阳更近一点儿的金星表面温度太高，液态水无法存在；离太阳稍远一点儿的火星又太冷。但宜居带的位置并不固定。根据我们对恒星发热过程的理解，再加上与其他恒星的比较，我们知道太阳刚诞生时温度更低，之后温度逐渐升高。粗略地说，40亿年前太阳的温度比现在低上25%~30%。因此过去40亿年间，太阳周围的宜居带在逐渐外移。起初，宜居带的外沿（温度低的那端）在今天区域内沿（温度高的那端）的位置，之前宜居带最热的区域，包括金星的轨道，现在那里的温度则太高，无法存在生命。这就引出了另一个概念，持续宜居带，简称CHZ（Continuously Habitable Zone），即太阳周围温度始终处在0~100摄氏度的区域。这片区域有时也称为“金发姑娘区”，因为这里像故事中熊宝宝的粥一样，温度刚好。持续宜居带覆盖的范围很

窄，最远端只比地球的公转半径远1%，最近端比地球的公转半径近5%。

对于智慧生命的进化来说，地球的公转轨道似乎是太阳系中一片特别幸运的区域。但初看时，情况其实没这么明了。地球上的生命会产生温室效应，参与调节地球的温度。二氧化碳等气体会留住散发的热量，维持地球表面温度。虽然地球和月球离太阳的距离差不多，但自然的温室效应让现在的地球表面比没有大气的月球表面热了33摄氏度。地球刚诞生时，大气中含有更多的温室气体，虽然那时的太阳温度更低，地球却没有结冰。随着太阳的温度升高，地球上的生命逐渐繁衍，生物吸收了大气中的二氧化碳，并以碳酸盐等形式将其固化，缓解了温室效应。生物通过回馈过程，改变了大气中的二氧化碳含量，在太阳温度低时维持地球的温度，在太阳温度高时防止地球过热。这正是詹姆斯·洛夫拉克提出盖娅理论的基础，后面会讨论这个理论。

还有个例子凸显了回馈过程对持续宜居带位置的重要性。岩石的风化是一个化学过程，会吸收空气中的二氧化碳。地球温度更高时，海洋会蒸发更多的水分形成雨，对流导致的天气现象更剧烈，风化现象也更广泛。这又会导致空气中的二氧化碳减少，减弱了温室效应，让地球降温。但地球温度更低时，风化现象减少，因此二氧化碳（由火山释放）会在大气中累积，加强温室效应，让地球升温。

这些现象都会让太阳周围持续宜居带的区域变广，当然并没有扩大多少。持续宜居带的内沿几乎没有变，还是比我们的公转半径近5%。但是外沿却因此扩展到了比我们的公转半径远15%的地方。以地球公转半径的天文单位（AU）计算的话，持续宜居带的范围就是0.95～1.15AU；因此，持续宜居带的宽度约是地球公转半径的20%。而地球的公转轨道近似圆形，这就锦上添花了；事实上，地球的公转轨道只比完美的圆形扁1.7%。如果地球的公转轨道像冥王星那样是很扁的椭圆

形，那有时地球就会处在比持续宜居带更近的位置，有时又会处在持续宜居带外面。椭圆形轨道很不适合生命存在——后面我也会讲到这点。但根据上面的数字，即使地球的轨道非常接近圆形，生命在上面存活的时间也很有限。持续宜居带只要再向外移动5%——估计在几十亿年之后——地球就会像金星一样，温度太高，生命无法存活。地球上适宜生命存在的时间跨度约有60亿年。这跟其他恒星的持续宜居带相比如何呢？

## 太阳不是一般的恒星

太阳经常被我们称为“一颗平凡的恒星”。这只在非常狭义的情况下是正确的。太阳这样的恒星在核心内部将氢转化为氦，不断释放能量，属于赫罗图上的“主序星”，天文学家用赫罗图来表示恒星的温度和质量之间的关系。太阳属于主序星，因此我们认为它很普通。但普通不代表平凡。太阳比95%的恒星都大，而且由于亮度跟恒星的质量有关，这些恒星也都没有太阳亮。这样看来，太阳一点也不平凡，而且是更大、更明亮的恒星，比跟太阳质量相仿的恒星更罕见，虽然巨大的恒星也很常见。

从另一个角度看，太阳也许就不普通了。有证据表明，太阳跟其他质量相仿、化学成分相似的恒星比起来，亮度的变化幅度更小。这个说法很难量化，我们也没法确定太阳是一直这样，还是只有最近，或者说过去几百万年来，经历了这样一个阶段。但这至少说明太阳的稳定性超出一般水平，让地球上的生命有机会进化。

从宏观角度看，太阳再亮一点或是暗一点，对持续宜居带都有很大的影响。银河系中95%的恒星都比太阳小、比太阳暗。我们附近的恒星中，有3/4都是红矮星，即M型主序星，质量只有太阳的1/10左右。红矮星的寿命比太阳这样的恒星（橙黄色G型主序星，这里的字母无实

际意义) 更长, 智慧生命会有更充足的时间进化。不过不幸的是, 红矮星的行星很难发展出科技文明。

最大的问题就是红矮星周围的宜居带很窄, 也离红矮星很近。行星要有液态水, 就得在恒星周围5000万千米范围内运转, 这个距离只有日地距离的1/30。太阳系最内侧的行星——水星, 与太阳的距离也从未低于4600万千米。恒星周围5000万千米范围内行星能否诞生, 又能否维持稳定的运行轨道, 还都无法确定。就像潮汐力锁住了月球, 让月球的一面永远朝向地球一样, 红矮星周围宜居带的恒星也会被锁住, 有一面永远朝向恒星。行星的一面是无尽的光明, 另一面则是无尽的黑暗, 也许还有一条很窄的黄昏带。行星上要么太热, 要么太冷。最可能出现的结果就是大气产生对流, 从热的区域流向冷的区域, 开始冷却。行星被锁定之前如果有大气层, 等锁定后就会全部流向暗面, 冷却冻结。

另一个问题, 就是红矮星比太阳活跃得多。它们会经常出现耀斑, 释放大量的紫外线、X射线和粒子。离得近的行星受到的伤害尤其大。除了对生命的影响外, 这些射线还会夺走行星周围的大气。总的来说, 可以认为红矮星所在的天体系统无法诞生文明。我们已经发现银河系宜居带中只有银河系10%的恒星, 现在又排除了这10%中的75%。这样就只需要考虑2.5%的恒星了, 而我们甚至还没开始梳理我们出现在地球上的原因。

这2.5%的恒星中, 只有一小部分比太阳更大、更明亮, 只从宜居带角度考虑的话, 这些恒星也没比红矮星强多少, 不太可能孕育科技文明。更明亮的恒星宜居带更宽, 但恒星的寿命更短, 宜居带移动的速度也比太阳更快。质量达太阳30倍的恒星消耗核燃料的速度非常快, 释放的能量有太阳的10000倍, 也只能维持主序星的状态几千万年。这样的恒星还会释放大量紫外线辐射, 对可能出现的类地行星上

的生命和大气产生致命打击。主序星中最明亮的两类，即O型和B型，只占全部恒星的千分之一不到，因此排除掉它们影响也不大。

A型主序星更小、温度更低，能够给宜居带的行星提供约10亿年的稳定环境，考虑到生命在地球上的飞速出现和发展，10亿年足够让行星孕育生命了，但不一定能发展出我们这样的文明。即使是质量只有太阳1.5倍的恒星，几十亿年之后也会脱离主序星状态。但还有其他恒星——F型主序星，只比太阳大一点，能维持约40亿年的主序星状态，而且也不会产生太多的紫外线辐射。

将这些整合到一起，足够大、足够持久的宜居带，可能出现在银河系宜居带中类似太阳（G型），或稍微大一点（F型）以及稍微小一点（K型）的恒星周围。即使大胆地估计，这样的恒星也不超过银河系总数的2%。这样算来，太阳已经是很特别的了。但即使在这2%的恒星中，太阳也一点不一般，因为很多恒星都有伴侣——处在双星甚至三星系统中。

## 不断捣乱的伴侣

造一颗恒星其实很难。银河系薄盘结构中的气团和尘埃团（也称为分子云，因为体积很大，还含有分子）会旋转，这会阻止它们坍缩，此外还有磁场作用，帮它们对抗内拉的引力。一颗跟太阳质量相同的恒星如果诞生自太空中缓慢旋转的气团，那等气团坍缩至太阳大小时，这颗恒星的旋转速度会非常快，表面的速度能达到光速的80%。这是因为气团坍缩或扩张时，角动量是守恒的。质量相同时，角动量相同，体积（半径）更小的物体转得更快。正是因为角动量守恒，花样滑冰选手才能通过伸出或收回手臂控制旋转速度。正在坍缩的气团想要缩小体积，就要解决角动量的问题。如果同一个气团诞生了两颗或更多的恒星，很大一部分角动量就转化到了恒星彼此环绕的运动中，而不是恒星的自转中。



一团一般的分子云直径约65光年，总质量约是太阳的33万倍。分子云经过旋臂中的密度阶梯时，会被压缩，如果附近有超新星爆炸，产生的冲击波也会穿透分子云。这样，外部作用会干扰分子云，让部分区域的密度增加，如此产生的引力作用就会导致部分区域开始坍缩，形成恒星。我们通过赫歇尔等无人天文台，用红外线拍摄到了辐射穿过分子云中的尘埃——宇宙“育婴”的过程，进一步确认了天文学家根据物理学推断出的恒星诞生过程。

扰动似乎会产生“恒星原核”，用引力吸引更多物质，逐渐成长为恒星。一颗典型的原核直径在1/5光年左右，质量约为太阳的70%。这样的原核只有最中心的部位才会坍缩、升温，发生核聚变并释放能量，形成一颗小小的原始恒星，质量只有太阳的1%，甚至只有1‰；这部分核心成长到太阳的1/5质量时，核反应就正式开始了。最终形成的恒星质量与原核的大小无关——原核刚成形时，质量都差不多。决定恒星质量的是原核周围有多少物质，以及在其他恒星或是未成形的伴星发出辐射，打散分子云之前，原核能吸引多少物质。太阳这样的恒星中，99%的物质都是这样累积起来的。但这个过程效率很低。虽然分子云中约一半的物质能形成恒星，但如果分子云经过了旋臂，那就只有百分之几的物质能形成恒星了。

由于前面提到的角动量问题，恒星很难单独成形，而观测我们附近的宇宙后发现，至少70%的类日恒星存在一颗或一颗以上的伴星，但三颗以上恒星组成的系统极其罕见。我们通过计算机模拟了同一天体系统的恒星之间如何作用，以及与附近的天体系统如何作用，知道了为什么有这么多双星、三星系统，以及为什么还是有些恒星像太阳一样没有伴星。

三颗恒星彼此围绕旋转时，轨迹非常复杂，其中的一颗恒星也很容易积累许多动能，脱离系统，携带角动量离开，余下的两颗恒星则会靠得更近一点。双星系统更为稳定，除非靠近其他恒星，被引力作

用拆散，留下一颗孤星，不过离开的恒星还有可能被其他系统捕捉。我们通过计算机模拟发现，如果100个多星系统中，40个是三星系统，60个是双星系统，让这些系统靠近，像银河系中恒星频繁诞生的区域那样，那等到这些多星系统分别散开、稳定下来后，会剩下25个三星系统、65个双星系统和35颗孤立的恒星。一开始的240颗恒星均匀分散开，只有不到20%没有伴星，与我们的观测结果大致相符。

双星和三星系统对生命很不利，对可能出现的科技文明更是如此。行星可以有稳定的运转轨道，要么两颗恒星非常近，近到日地距离的1/5左右，行星围绕两颗恒星运动；要么两颗恒星非常远，远到日地距离的50倍以上，行星绕着其中一颗运动。但行星的轨道即便稳定下来，也不会像地球围绕太阳的轨道一样是漂亮的近似圆形，行星也会受到两颗恒星的光和热影响，很难出现长期的宜居带。根据地球上生命进化的地理记录，恒星向行星辐射的热量哪怕有10%的变化，也会引发严重的问题。我们可以粗略地认为太阳辐射的热量改变1%，地球表面的温度就会相应变化1摄氏度，而现在我们正在担忧的是，地球温度升高4~5摄氏度的全球变暖可能会导致文明的崩塌。

综合考虑这些问题，双星系统不像单颗恒星一样，亮度稳定增加，周围有界限明确的宜居带逐渐向外移动，而是两颗恒星都在变亮，速度却不一致，这样问题就复杂了起来。宜居带可能数量不一，移动速度更快，规律也更不明显。对于自太阳系诞生以来就几乎一直在地球上的单细胞生物来说，也许这不算坏事，但科技文明需要长期稳定的环境，双星系统则无法提供这样的环境。

多星系统除了很难出现稳定的宜居带，周围也很难诞生行星，因为可能产生恒星的尘埃盘会被两颗恒星复杂的潮汐力作用打散。

这样，银河系那2%的恒星中只有30%既处在宜居带，又跟太阳类似。这样的恒星只占银河系总数的0.6%。如果行星只能诞生在完全孤

立的恒星周围，这个数字还要减少许多，但具体数字未知。可是太阳的特别之处我们还没说完呢。

## 过去的冲击

天文学家对太阳诞生时的恶劣环境十分了解，因为那时的活动都会在太阳系中以放射性元素的形式留下痕迹。除了氢和最原始的氦，这些元素跟其他元素类似，都诞生自恒星内部，在恒星死亡时也会被炸飞，准备形成新的恒星和行星。但放射性元素不能一直存在，而且只能诞生于大型恒星爆炸时。因此我们可以确定放射性元素诞生的时间，以及究竟是诞生在爆炸的恒星内部还是太阳诞生地附近。

放射性元素都会衰变为稳定的元素，有时要经过许多步，这段时间被称为半衰期。每种元素的半衰期都不同。严格来说，每种同位素的半衰期都不同，因为同种元素的同位素虽然化学性质相同，但重量不同。这个过程产生的稳定元素被称为衰变产物，比如，放射性的铀衰变后会产生铅。比较样本中放射性元素及其衰变产物的含量，我们就能计算出放射性元素衰变了多少，也就能知道放射性元素产生的时间。

恒星濒死前会产生两种同位素，铁-60和铝-26。铁-60的半衰期很短，很快就会衰变为镍-60，但铝-26的衰变速度要慢许多。如果这两种元素同时诞生于一颗爆炸的恒星，再以残骸的形式进入太阳系，那太阳系最古老的碎片里应该含有一定比例的镍-60和铝-26。但哥本哈根大学的科研人员研究地球上最古老的岩石，以及被认为是地球诞生时的陨石样本时，发现陨石年代越久远，含有的镍-60就越多。较为合理的解释是一颗巨大的恒星，质量或许有太阳的30倍，将含有许多铝-26的外层物质炸飞，又过了100万年左右，恒星余下的核心才爆炸。第一次爆炸就足以使分子云坍缩，形成太阳系。约100万年之后，

恒星彻底爆炸，产生的残骸——包括核心深处的铁-60——席卷了四周，包括正在成形的太阳系。

要产生这个效果，刚诞生200万年不到、还在成形的太阳系与超新星爆炸之间的距离不能大于1/10光年。没有其他超新星在离太阳这么近的地方爆炸过。如果真的有，地球上的生命就会全部灭绝。这么偶然的事件发生在太阳系成形过程中，肯定不是巧合，可靠的解释就是太阳和超新星来自同一个气团，还同属于一个星团，爆炸后就各奔东西了。

还有很多这样的星团。最有名的一个就是R136，位于银河系的卫星星系大麦哲伦星云中。大麦哲伦星云约有10000颗恒星，寿命都不超过几亿年。显然，这些恒星都诞生自同一个巨大的气体和尘埃团。因为巨型恒星很罕见，所以我们可以确定诞生太阳的星团有多大。粗略估计，小型恒星与大型恒星（质量约为太阳的30倍）之间的数量比为1500：1，因此太阳系诞生时，所在星团中至少要有1500颗恒星。另一方面，大的星团要花一段时间才能进入稳定、致密的状态，才可能有超新星离刚诞生的太阳那么近，而质量有太阳30倍的恒星寿命通常只有几百万年。荷兰天文学家西蒙·兹瓦特计算出，如果依据上文的假设，诞生太阳系的星团中不会超过3500颗恒星。这样的星团已经小到极致了，而且内部的引力作用不够强，很难不受外界扰动、潮汐力或其他天体的影响。2.5亿年之内星团就会彻底瓦解，这时星团才围绕银河系转了一圈。

但其中有那么一小段时间，太阳系诞生了，星团内恒星的距离又很近，有些恒星离太阳的距离可能比冥王星还近。这对太阳周围诞生的行星可不是好事。后面我们会谈到这个问题；不过先来看看另一个谜题，有关太阳的化学成分，它让我们在宇宙中如此特殊。

## 太阳的金属度之谜

有两种方法可以推测出太阳的金属度。第一种就是用光谱法分析太阳表面各种元素的比重。前面讲过，每种元素在光谱上都有独特的颜色，而光的强弱反映了元素的含量多少。另一种方法是用日震学探测太阳的内部。从名字可以看出，这种方法就像地质学家用地震学探测地球的内部一样。太阳内部产生的声波会让表面振动，精密仪器可以测量这种振动。天文学家可以通过振动波形推测太阳内部的密度，以及太阳内部不同位置的波速。这些属性都与太阳的化学成分息息相关。

直到最近，我们才通过两种方法发现，跟同一轨道（与银河系中心距离相同）上其他恒星的平均水平相比，太阳的金属度异常高。这个现象尤为诡异，尤其是兹瓦特的计算发现，诞生太阳的星团形成于离银河系中心更远的位置。比较明显的原因就是让太阳系中充满了铁-60的超新星爆炸，也给太阳带去了不少重元素。这样跟其他没靠近过超新星爆炸的恒星比起来，太阳周围就更容易形成岩石态的行星。

不过，我们最近的光谱分析结果显示，太阳的金属度似乎没有过去观测的那么高。这些结果暂时无法证实，但无论是真是伪，都对日震学的分析结果没有影响，太阳内部的金属度还是比表面高。这是怎么回事呢？

通过研究附近体积、年龄都与太阳相仿的恒星，即“孪生太阳”，我们也许可以得到答案。与这些恒星相比，太阳表面不易蒸发或凝结的元素比例更低，这些元素称为“难熔元素”，比如钙和铝。不过，这些元素在陨石以及太阳系内侧的岩石态行星中含量更高。如果这些难熔元素在早期被太阳蒸发，并参与形成了类似地球的岩石态行星，这个现象就很好解释了。我们通过对“孪生太阳”的研究，找到了支持这个观点的证据。如果有大型行星环绕在孪生太阳近处——这样的大型行星会阻碍类地行星的诞生——那么难熔元素的含量就与太阳有差异。但有些“孪生太阳”周围没有大型行星，难熔元素的成

分跟太阳很相似。这时似乎可以说，这些恒星像太阳一样，周围有岩石态行星了。表面缺乏难熔元素，似乎就代表周围有类地行星。好消息是，这意味着还有很多看起来很像地球的行星。

但还有坏消息。只有约10%的“孪生太阳”符合这个特征。如果只有这样的“孪生太阳”才能有类地行星，那可能存在科技文明的地方又少了许多。之前的范围只包含银河系中0.6%的恒星，现在这个数字变成了0.06%。这意味着10000颗恒星中只有6颗恒星符合要求。我就不进一步缩小范围了，但我希望大家知道，随着分析的不断深入，这个范围还会不断减小。我们的太阳系还有其他特别之处。但是我们先不深入讨论，前面我们提到太阳的诞生，不讲完太阳的一生似乎有些遗憾，即便这对寻找银河系中其他智慧生命没有帮助。

## 直到太阳消亡

经常有人说，有些教科书中这么写：太阳会逐渐膨胀成为红巨星，吞没包括地球在内的其他行星。这个描述也算正确，但太阳完整的一生比这更加微妙，也更加有趣。

太阳这样的恒星，通过核心内部将氢转为氦的聚变反应不断输出能量。氦则在内部像灰烬一样堆积起来，因此核心会逐渐变大，氢元素则在氢与氦混合的核心上“燃烧”。因此前面的45亿年里，太阳释放的热量才不断增加，让宜居带逐渐外移。但总有一天，核心中的氢元素会短缺，聚变反应无法维持，核心也会因此坍缩。起初，太阳的氦含量是30%；现在太阳的核心中，已经是65%的氦和35%的氢了。再过大约50亿年，核心中的氢元素就会耗尽，核心就会坍缩。这个过程将引力势能转化为热能，导致核心温度升高。这时核心进入“简并”态，可以将其想象成一个固态的氦元素球。同时，外部的氢元素落至核心周围，开始“燃烧”。最终的结果就是太阳释放出了更多的热，

外壳急剧膨胀，成为红巨星。到了这个阶段的恒星，自然就进入了赫罗图中的红巨星序列。但恒星的这个状态不会长久。

随着核心周围的氢元素继续燃烧，核心上也堆积了更多的氦“灰烬”。由于质量增加，核心进一步坍缩，坍缩又会使得核心放热。最终氦原子核都挤在了一起，开始形成碳元素。简并态核心更像固体，因此氦燃烧产生的热会迅速扩散，引发一连串反应，即氦闪。核心在几秒中内爆炸，释放出的能量将恒星的部分外层大气推至太空中，降低了内部压力，之后核心不再处于简并态。这一切都让核心再次稳定下来，但温度比之前的氢聚变状态更高。恒星再次进入一个稳定的致密状态，燃烧核心中的氦，也燃烧着核心周围的氢。但氦燃烧释放的能量并没有氢燃烧释放得多，因此对于太阳这么重的恒星，氦燃料会在约1.5亿年内耗尽。

对于质量跟太阳相仿的恒星来说，燃烧氦已经是最后一步了。核心在氦耗尽之后，会再次坍缩，形成一个简并态的碳核，周围是燃烧的氦和氢。恒星的外壳再次膨胀，但核心的状态已经无法再触发核反应。等到所有氢和氦都耗尽，恒星就会变成一颗固态的球体，质量约有目前太阳质量的一半，体积跟地球相仿。然后恒星会降温，稀薄的外壳也会稳定下来，恒星成为一颗白矮星。

对于地球上的生命来说，只要关心太阳两次膨胀时会变得多大，以及会损失多少质量就够了。如果认为质量不损失，我们会通过计算得出，太阳第一次膨胀成红巨星之后会吞没内侧的水星和金星，第二次膨胀时则会吞没地球和火星。换句话说，与太阳同等质量的红巨星半径，比火星的公转半径还大。所以有些书才会告诉你，地球总有一天会被太阳吞没。

但是太阳的质量会损失，这个问题就复杂起来，也有趣起来了。英国萨塞克斯大学的天文学家们详细计算出了这时的情形。太阳这样的恒星在成为红巨星之前，已经损失20%的质量了，对大气的引力也变

弱了，因此这时的太阳会膨胀得更多一点儿，半径可达1.68亿千米，而地球目前的公转半径只有1.5亿千米。不过那时，由于太阳的引力减弱，地球会向远离方向移动，公转半径也会增加至1.85亿千米！而太阳第二次膨胀，体积达到最大时，即第一次成为红巨星之后约1亿年，太阳会损失很多质量，约相当于今天质量的30%，半径最大只能到1.72亿千米，地球的公转半径则已经增加到了2.2亿千米。这与目前火星的公转轨道很接近。

如果那时地球还存在，可能会飘得更远。不幸的是，我们还要考虑其他因素——拉力、潮汐力。随着太阳的膨胀，其最外层大气会将地球包住，虽然色球层这部分区域很脆弱，但还是足以吸引地球，让地球缓缓地靠近太阳。同时，地球在围绕着膨胀的太阳公转时，也会对太阳有引力作用，在太阳表面造成潮汐现象，消耗地球的动能，让地球速度减缓、公转半径变短。这一系列现象的结果就是大约76亿年后，地球确实会被太阳吞没。那时距太阳第一次膨胀为红巨星还有约50万年，距太阳成为一颗冷冷的白矮星还有很久很久。

## 推迟末日

不过对于地球上的生命来说，这些其实也无关紧要。太阳自诞生以来，亮度一直在逐渐增加，而地球表面的温度几乎没有变化，也一直处在液态水可以存在的区域。背后的原因就是大气中的温室气体，尤其是二氧化碳，含量在逐渐降低，逐渐减弱的温室效应抵消了来自太阳的更多热量。吉姆·拉夫洛克等科研人员指出，温室气体几乎已经减少到极限了——如果没有人类的影响，很快地球的大气中就不会有二氧化碳了。拉夫洛克还计算出，随着太阳释放的能量增加，地球的温度也在增加，用不了1亿年，地球上的生命就会体验前所未有的极端炎热状态。即使是最保守的估计，地球在10亿年内就不适宜生命生



存了。真实的情况远比这要糟糕，因为目前我们还在排放二氧化碳等温室气体，让地球加速升温；不过目前我们先不考虑这个。

从天文学的时间尺度考虑，地球升温后的第一个后果就是海洋蒸发的水分变多。水蒸气也是温室气体，会让地球加速升温，直到海洋蒸发干。但这是几十亿年之后的事了。如果我们的科技文明能延续，或者银河系中其他地方也有科技文明面临着同样的问题，那么我们还有充足的时间，可以用科技解决这个问题。有一个可行的解决方案，非常简单，也只需要比我们现在先进一点的科技水平。这个方案就是随着太阳的升温，我们推动地球逐渐远离太阳。

这个方案的关键在于从路过的陨石那里吸取能量，再赋予地球——不是一次，而是反反复复地，间隔约6000年。当然，陨石的尺寸和轨道都必须严格符合要求，这时就需要科技登场了。我们将太空探测器送入大型行星外侧的柯伊伯带，那里满是冰块和岩石。探测器可以推动某块陨石前进约100千米，帮助其进入合适的轨道，能够跟地球擦肩而过。而在擦肩而过时，陨石会推动地球，让地球的轨道稍微外移一点。陨石会损失动能，轨道半径减小，但这并不重要。

重要的是这件事情必须每6000年做一次，持续数亿年。我们有可能发现合适的小行星，让其经过地球、经过太阳后，再次回到大型行星附近，恢复损失的动能，以确保可以再次被送向地球。或者我们可以向柯伊伯带发射一台冯·诺依曼机，每6000年工作一次。这就能够保证即便地球上的文明崩溃灭绝，地球还是会不断向外移动。但我们需要的陨石，直径比当初灭绝恐龙的还要大5倍，而且每6000年就要以15000千米不到的距离跟地球擦肩而过。这个操作的容错空间很小。要执行好这样一个长期任务，我们得对那台冯·诺依曼机很有信心才行。

因此，理论上来说，地球上生命可以存在的时间又变久了，也许可以延续60亿年，直到太阳毁灭。但这个解决方案带来的风险，刚好

凸显了我们的另一个特别之处。如果不考虑灭绝恐龙的那次灾难，我们的太阳系似乎非常有秩序，行星有条不紊地在圆形轨道上运转，之前的碎块和残骸基本在柯伊伯带，或是火星与木星之间的小行星带中。天体系统都会这样吗？应该不会，但我们的太阳系能如此有序，也许正是我们存在的原因之一。

## 第四章

# 太阳系有什么特别的

太阳系的第一个特别之处，具体地说，就是存在类似地球的岩石态行星。行星，尤其是岩石态行星，是天文学家研究过最复杂，也是最有趣的对象。宇宙中比行星还复杂的就只有生物了，而且天文学家的研究重心也在转向天体生物学，研究生命。比人类小得多的物体，比如原子和简单物质（氧气、水等）的分子，能发生的反应也很有限，因为结构过于简单。而生物则要复杂得多，也可以与环境产生大量互动，因为生物是由复杂的分子，比如DNA和蛋白质构成的。

一颗有生命的星球，比如地球，还要更复杂，要为一系列复杂的天文、地理、化学和生物反应创造环境，整个生态系统的维持也要靠这些反应；这就是詹姆斯·洛夫拉克认为地球本身是生命体，或者说盖娅理论的基本论断。金星或火星这样的星球少有生物反应，但本身依然发生着天文、地理和化学反应。如果考虑恒星（或者像木星那么大的行星）那么大的天体，这些问题又简单了起来，因为这样的天体内部引力很大、温度很高，复杂的分子，甚至复杂的原子都会被摧毁，只剩下原子核与质子、中子、电子等粒子之间的反应。行星处在两个极端之间；从另一个角度看，这些行星也正好在中间。

最近，斯皮策太空望远镜在红外波段观测后发现，诞生太阳的星团，以及其他类似的星团，会对能诞生岩石态行星的尘埃状圆盘的存在构成风险。具体的风险还无法量化，但风险一定是存在的。

太阳系内几乎所有物质都朝着同一个方向旋转。太阳自转的周期是25天，周围的行星和小行星旋转的方向与太阳一致，行星的卫星也都朝着同一个方向旋转。这说明太阳、行星及其卫星都来自同一团物质，并延续了这团物质的旋转方向。随着这团物质的坍缩，其旋转速

度也在变快，就像花样滑冰选手收起双臂一样，维持角动量守恒。角动量与物体的质量、旋转的速度以及摊开程度（半径）有关。太阳要坍缩到目前的体积，一定要损失角动量。太阳系刚成形时，像喷灌器一样喷出的物质携带走了一部分角动量；但还有一部分角动量保存在了太阳周围不断扩散的尘埃盘里。这个尘埃盘就是行星诞生的地方。木星这样远离太阳的行星，即使质量远小于太阳，其拥有的角动量依然很大。太阳带走了绝大部分物质，但行星带走了绝大部分角动量。

但不是所有天体系统都是这么简洁明了的。许多含有热木星的天体系统中，行星公转的方向与母星自转方向相反，即所谓的逆行轨道。这可能是因为还有一颗遥远的伴星围绕母星旋转。伴星会将类木行星的轨道倾斜、拉长成为椭圆形，行星每次经过母星都会损失能量，因为母星会试图将行星拉向反方向的圆形轨道。绝大多数离母星很近的类木行星都可以用这一点来解释；而这个现象也会毁灭同一个天体系统中的类地行星。因此这类天体系统对我们探索自己的起源没有帮助，只能帮我们确认太阳这样的孤立恒星周围，更有可能产生我们这样的生命形态。

太阳系的尘埃盘是行星的诞生地，而有些年轻的恒星周围，也能看到类似的盘状结构，说明我们对太阳系诞生的理解是正确的。这些尘埃盘叫作原行星盘，简称PPD，有些原行星盘会延伸出去很远，达到日地距离的1000倍，比太阳系最遥远的行星海王星与太阳的距离还远30多倍。这些尘埃盘中的物质还在流失。很多这样的尘埃盘内部都会被正在诞生的行星扭曲。以天文学标准来看，这样的尘埃盘都太脆弱了，在行星——至少是类地行星——成形之前可能就被毁掉了。而一颗火热、巨大的恒星周围如果诞生了新的恒星——在诞生了太阳系的这类星团中很常见——问题就来了。

## 热情过头的主人

主序星中体积最大的O型主序星会释放大量紫外线辐射，加热附近的气体或是尘埃盘，将其吹散至太空。这个现象，加上O型主序星短暂的寿命，都让我们可以将这类恒星排除出寻找范围。但O型主序星的辐射太强了，甚至可以影响附近恒星周围的尘埃盘。虽然我们依然很难确定O型主序星辐射的影响范围。但斯皮策太空望远镜在玫瑰星云的麒麟座方向中的恒星周围发现了原行星盘，那里距我们5200光年，仍然有恒星在其中诞生。

在银河系中远离O型主序星的区域，质量处在太阳的0.1~5倍的年轻恒星中，近一半的周围都有尘埃盘。斯皮策太空望远镜的团队在玫瑰星云中，挑选了1000颗离O型主序星距离不等的恒星，在其周围寻找尘埃盘。在距O型主序星至少1.6光年的恒星中，也有近一半的周围存在尘埃盘。而距离更近的恒星则只有不到1/4的周围存在尘埃盘，而且距离越近，存在尘埃盘的概率就越低。作为比较，离太阳最近的恒星半人马座 $\alpha$ （比邻星），距我们4光年多。这说明离O型主序星太近的年轻恒星周围的尘埃盘很可能在10万年内被蒸发殆尽。这样类地行星就不可能诞生了。但如果像木星一样巨大的行星，或是某些恒星周围的“巨型木星”在靠近O型主序星之前就已经成形了，这些行星是不会被紫外线摧毁的。即使O型主序星燃烧殆尽，危险不复存在后，这些行星依然会存在。这也提醒着我们，巨型木星的发现不代表附近一定存在类地行星。

太阳能诞生在一个相对稀疏的小星团，不会与O型主序星近距离接触，还是很幸运的。那个星团究竟多小、多稀疏，看看太阳系中远至海王星甚至之外的行星和其他物体的轨道有多么圆，就能推断出来了。

目前，我们可以想当然地认为太阳系的行星都来自尘埃盘，轨道几乎是完美的圆形——我们很快会讲到它们是怎么成形的。行星诞生初期，星团中的年轻恒星彼此距离都很近，很容易以比海王星还近的

距离擦肩而过。星团中某些天体系统诞生时一定经历了类似的事，彻底打乱了行星的公转轨道。的确，太阳系中，离太阳的距离是日地距离50倍，即50个天文单位以上的彗星里，许多轨道都是明显的椭圆形，而且与行星所在的平面成一定的角度。这些彗星都受到了干扰。它们离太阳的距离太远，很难受到行星的引力影响，因此一定是靠近恒星后受到了影响，而这颗恒星又刚好影响不到行星的运行轨道。这说明这颗恒星与太阳的距离在1000个天文单位左右，但行星的公转轨道又是圆形，这就说明太阳系自诞生以来，100个天文单位之内的范围没有出现过恒星。

考虑到太阳诞生时，星团内部恒星遭遇的频率——这与星团的恒星密度有关，再考虑到星团完全散开所需要的时间，我们可以估算出星团直径不足3光年，恒星密度也较低。根据上一章提到的辐射性同位素证据，太阳系的星团中约有3500颗恒星。再考虑到附近爆炸的O型主序星，以及与其他恒星的近距离接触概率，更大、恒星更多的星团内部都很难诞生太阳系这样规矩的天体系统。这进一步突出了我们在银河系中的特殊地位。不过要知道太阳系究竟有多特殊，我们就要先了解一下太阳系内的行星和天体分布。

## 太阳系内部构造

抛开太阳来看，太阳系其实是由四部分构成的：地球这样的岩石态行星、小型岩石块（小行星）、巨大的气态行星、冰块状天体——包括冥王星这样的矮行星以及彗星的前身。

离太阳最近的水星，公转半径只有0.39个天文单位，但水星的轨道是椭圆形的，离太阳最近处只有4600万千米，最远处达7000万千米。水星的公转周期是88个地球日，但自转周期长达58.6个地球日，水星被太阳的引力锁定，自转周期永远是公转周期的2/3。因为水星离太阳很近，向日的一面温度超过450摄氏度；但水星没有大气，无法传

递表面的热量，水星的背日面温度低至-180摄氏度，且永不见天日。水星直径仅4880千米，比月球大50%，表面也像月球一样遍布坑洞，这说明太阳系年轻时，水星也经历过陨石的轰炸。最大的陨石坑卡洛里盆地直径达1340千米，应该是由一颗直径约150千米的天体撞击产生的。水星这样的行星上显然没有科技文明。

很久以来，我们都认为离太阳第二近的金星上可能存在生命。金星与地球非常相似，直径12100千米，只比地球少650千米。金星表面有厚厚的云层，光学望远镜无法观测到表面，我们也因此推测云层下面是像地球一样的海洋和大陆，甚至还可能有热带生命。但这种浪漫的愿景没有持续多久，探测器在金星表面着陆后，发现大气中富含二氧化碳，气压相当于90倍标准大气压<sup>(1)</sup>，这也导致了严重的温室效应，使表面温度超过500摄氏度。探测器对金星表面进行雷达扫描后发现，金星也有高地和低洼处，但全是岩石，没有水或生命的迹象。

金星的公转轨道没什么奇怪的，几乎是完美的圆形，半径是0.72个天文单位（1.08亿千米），因此金星每225个地球日围绕太阳一圈。但金星的自转有些奇怪——太阳系中唯一一颗自东向西旋转的行星，与地球的自转方向刚好相反。金星的自转周期非常长，有243个地球日。最可能的解释是金星曾遭遇过撞击，逆转了太阳系诞生时延续下来的自转方向。金星上没有生命，这次撞击对地球上的生命也产生了很大的影响，下文我们会讲到。

地球的公转半径自然就是1个天文单位（149597870千米），周期是365.242199天。地球表面平均温度约为15摄氏度，液态水刚好可以存在，大气中也有很多氧气，这对我们这类需要耗能的生命形式至关重要。

再远一点儿的火星，也非常有可能诞生我们这样的生命。火星离太阳的距离约比我们远50%，轨道呈椭圆形，离太阳最近1.38个天文单位，最远1.67个天文单位。火星的体积只有地球的一半多，直径6790

千米，质量也只有地球的1/10多一些。由于质量过小，火星只能留住一层稀薄的大气，其主要成分是二氧化碳；火星表面的气压约等于地球海平面上35千米处的气压。

巧合的是，火星上的一天和地球上的一天长度几乎相同。火星上一天是24小时37分钟，地球则是23小时56分钟。但火星要687个地球日才能绕太阳一周。目前火星表面的温度是-26摄氏度至-110摄氏度，太冷，无法存在液态水；但有证据表明，火星确实存在过流动的液态水，在表面形成了河道。这应该是因为火星年轻时还有着浓密的大气层，产生了足够强的温室效应，即使离太阳更远也能将表面温度维持在零摄氏度以上。而研究火星的大气层为什么变得稀疏，也能为研究银河系中的科技文明为何如此稀少提供一条重要线索。大气层并不仅仅是因为火星的引力太弱才变稀薄的。火星没有强力的磁场，因此无法抵御太阳发出的带电粒子流——太阳风，所以几十亿年来大气就逐渐被吹散了。而地球能长期保持宜居的条件，让智慧生命得以进化，有强磁场是主要原因之一。

火星的轨道之外，是一片充满了行星残余的区域。这些残骸与碎石形成了一个薄盘结构，称为小行星带，从距太阳1.7个天文单位的地方延伸至约4个天文单位的地方。小行星带中包含超过100万颗直径1千米以上的小行星，还有无数更小，甚至只有沙粒大小的碎石颗粒。但直径超过250千米的小行星只有10颗。最大的是谷神星，直径933千米，占小行星带总质量的1/4以上；谷神星每4.6年绕太阳一周，距太阳2.8个天文单位。谷神星与第二、第三大小行星，灶神星和智神星，也许可以代表构成行星的基石。有一小部分小石块以椭圆形轨道围绕太阳，有时离太阳的距离比地球还近，还会穿过地球的轨道。如果刚好遇见地球，这些石块就会以高速落入大气层。小的石块会在大气层中燃烧殆尽，成为流星；大的石块会落在地上，成为陨石。



小行星带的所有物质加起来，还不够造出一颗水星那么大的行星，但其中以陨石形态落入地球的碎石告诉我们，在太阳系诞生初期，这些石块曾经来自一个或数个更大的天体，四颗岩石态行星诞生时，这颗天体又被打碎了。这为研究行星诞生的过程提供了重要线索。另一个重要线索来自小行星带的位置，因为这要由下一颗行星——巨型气态行星木星的引力作用决定。

木星的体积太大，对整个太阳系的构造都产生了影响，对于理解我们为什么存在也至关重要。木星的质量是太阳的0.1%，以恒星的标准看微不足道，但却是地球质量的317倍，比太阳系其他所有行星质量之和的两倍还多。木星的直径是地球的11倍，体积是地球的1300多倍。木星每11.86年绕太阳一周，离太阳5.2个天文单位，与地球的距离最近为5.9亿千米。

木星绝大部分质量来自氢气，以及含量第二多的氦气，因此其成分更像一颗没成熟的恒星，而不是地球这样的岩石态行星。木星还有一点很像太阳——引力作用很强，周围有一队天体围绕，像太阳系的诸多行星一样。400年前，伽利略发现了木星的第四大卫星，而这些卫星围绕木星而不是地球旋转，也让人们开始相信地球不是宇宙的中心。

木星之外还有三颗巨大的行星，每颗都独具特色，但对地球上诞生生命的贡献微乎其微。土星以周围绚丽的光环闻名，每29.46年绕太阳一周，距太阳9.5个天文单位，直径120536千米，比地球的9倍多一点，质量是地球的95倍。再外面是天王星，轨道稍呈椭圆形，离太阳最近18.3个天文单位，最远20.1个天文单位。天王星公转一周要84年，质量是地球的8.7倍，直径只有地球的4倍，算是很小的巨型气态行星了。有些天文学家喜欢将天王星称为“冰巨星”。太阳系最后一颗大型行星——海王星，公转轨道半径是30个天文单位，公转周期是

165年，直径是地球的3.8倍，与天王星接近，但质量是地球的17倍，也相当于天王星的2倍。

海王星之外，还有一片与小行星带类似的冰块带，即柯伊伯带，从距太阳30个天文单位的位置延伸至50个天文单位的位置。柯伊伯带中的物质也是太阳系诞生后的残余，而且因为离太阳过远，绝大多数物质都由冰块构成——不仅仅是水结成的冰，还有固态氨气、甲烷等。对柯伊伯带天体（KBO）的公转轨道进行观测、分析后发现，至少有70000颗天体的直径超过1千米，其中一半天体的直径超过100千米。体积比较大的一些天体被称为矮行星，其中就包含了直径2300千米的冥王星，过去我们将冥王星算作大行星，但后来发现柯伊伯带中还有更大的天体。柯伊伯带天体的总质量约为地球的40倍，比土星质量的一半略少。

在柯伊伯带之外，就是太阳系的边缘了。我们对彗星的轨道分析发现，许多彗星都来自很远的地方，而根据观测结果推测，距太阳50000~100000个天文单位（即0.75~1.5光年）远的地方一定还有球形的外壳，或是一团云。这一团物质的质量与柯伊伯带差不多，可能包含上万亿颗天体，之间距离可能有几千万千米，以圆形的轨道围绕太阳孤独地运转。这就是奥尔特彗星云。奥尔特彗星云中的天体离我们的距离大约是到比邻星距离的1/3，而且奥尔特彗星云虽然处在太阳引力作用范围的边缘，偶尔路过的恒星或是气团还是能将其中的部分冰块送入太阳系，使其受热升温，释放出一条气态的尾巴，成为彗星。

## 制造行星

对太阳系的构造有了了解后，我们就可以尝试理解行星诞生的过程，以及太阳系为何如此特别了。我们要从奥尔特彗星云逐渐向内看，关键在于理解巨型行星如何诞生，以及木星的具体作用。

巨型气态（或冰块）行星不是一块块粘起来的。一块质量是地球数倍的岩石，在比木星还远的地方运转，的确可以从太阳诞生的气团中吸引物质，达到巨型行星的体积，但按这种方法，天王星和海王星也许到现在都还没成形，因为离太阳那么远的地方没有什么气体可吸引。唯一的可能是四颗巨型行星都诞生在比土星近但比木星远的地方，那里气体充足，温度又足够低，冰块能存在。四颗行星诞生时一定离得很近，在同一个满是冰块、岩石等微行星的气团中。四颗恒星如此密集地诞生只是巧合。虽然一定有一颗比其他三颗都大，通过引力影响着整个系统的运动，但木星比其他行星加起来都大许多，似乎并没有必然的证据；这只是太阳系与其他天体系统相比的又一个特别之处。

我们通过计算机模拟发现，最大的行星木星诞生后轨道会逐渐向内移动，其他三颗略小的行星（土星、天王星、海王星）会逐渐向外移动，维持角动量守恒。一开始，这个过程还很流畅。但太阳系诞生约7亿年后会经历“共振”现象，即土星的公转周期刚好为木星的两倍。这时木星和土星会对外侧行星造成强力而有规律的影响。模拟结果显示，天王星和海王星都会突然向外移动，海王星的轨道半径翻倍，并且进入早期更加宽广的柯伊伯带。这次干扰也会影响太阳系外侧其他小型天体，让许多天体朝太阳冲去，有的撞向了内侧的行星，也有不少天体冲入了无尽的太空，还有的天体被巨型行星捕获，成为卫星。这次干扰过后，巨型行星才逐渐稳定下来，进入今天的公转轨道，虽然我们后来发现，太阳系中没有哪条轨道是稳定的。

我们还通过计算机模拟发现，像太阳系这样规规矩矩的天体系统很罕见。美国西北大学的科研人员使用计算机模拟了类日恒星周围的尘埃盘是如何形成数颗行星的，十几次模拟下来，他们发现绝大多数情况下，结果都是“很暴力、很夸张”的，热木星经常出现，行星也总是处在不稳定的椭圆轨道上。“这些天体系统一点儿也不像太阳

系……太阳系这类天体系统要出现，条件必须得刚刚好。”他们说，绝大多数天体系统都与我们的太阳系大相径庭。

不过，在我们的太阳系中，巨型行星进入新的轨道期间，太阳系内部发生的陨石轰炸就标志了岩石态行星成形的尾声，包括地球。太阳诞生后余下的一团物质会逐渐稳定，在太阳周围形成盘状结构，岩石态行星便由此开始诞生。那一团物质的成分和太阳类似，绝大多数都是氢和氦。但其中还有不超过2%的尘埃，像烟雾的颗粒一样大。新生太阳的热量将大部分气体吹散，但那一团物质还在旋转，尘埃便会在太阳周围形成盘状结构——我们今天在年轻恒星周围观测到的那种原行星盘。

原行星盘中，所有粒子都朝着同一方向围绕太阳运转，像体育场里的长跑运动员一样。这意味着即使粒子之间发生碰撞，也不会很剧烈，粒子有机会彼此粘连。而粒子之间的摩擦还会产生电磁力，让粒子进一步贴在一起，就像在毛衣上摩擦过的气球可以贴在天花板上一样。还有一个很重要的因素，就是气体受到的扰动会产生旋涡状结构，让物质逐渐聚集，并有机会发生反应。计算机模拟发现，这样的过程可以生成谷神星那么大的天体，前提是粒子可以粘连在一起。

粒子能粘连在一起，还有其他的帮手——这是太阳系特有的。我们通过对陨石的研究发现，年轻太阳周围的尘埃盘含有球粒结构，即球粒陨石，这些球粒是在1200~1600摄氏度的温度下熔融后形成的。熔融或半熔融状态的球珠黏性更强，更容易聚集尘埃盘中的其他物质。但这么高的温度是怎么来的呢？最有可能的原因就是附近存在一颗濒死的恒星，恒星中的放射性元素向这个气团释放了能量。有可能诞生太阳的气团附近发生了超新星爆炸，然后太阳就诞生了；而形成太阳和太阳系的那次坍缩，甚至有可能就是超新星爆炸触发的。我们通过测量不同陨石中的同位素丰度，得到了支持这个观点的证据。太阳系似乎刚诞生时就存在放射性铝-26，但是约100万年后才得到了一

批铁-60。这与我们对质量在太阳的30倍以上的大型恒星的了解也吻合。这样的恒星到了生命末期，会先将大部分外壳炸飞，其中含有较多的铝-26，这次爆炸的冲击也很容易导致附近的气团坍缩。到了生命真正的尽头，恒星才会完全爆炸，将铁-60等元素推向附近。

巴塞罗那的何塞普·崔戈-罗德里格兹还有一个同样有力的观点，认为这些放射性元素来自太阳系成形过程中，跟太阳近距离接触的一颗小恒星。要得到那么多放射性元素，只需要一颗质量是太阳6倍的恒星在生命尽头发生一次爆炸。但这颗恒星要离太阳非常近，不能超过10光年，因此从统计学上来讲，概率不大。

关键是，这两种情况发生的概率都不大，但要形成岩石态行星，一定要发生类似的事件。这就意味着其他天体系统可能满是巨型行星和岩石碎块构成的小行星带，我们这样的天体系统可能很罕见，只有几颗巨型行星，还有几颗地球大小的行星。

不过，好消息是一旦产生了直径1千米左右的天体——太阳系形成的那10万年间就是——行星诞生之后的步骤，虽然很混乱，却也很好解释了。

## 制造太阳系

加州大学圣克鲁兹分校的林潮教授深入研究了太阳这类恒星在年轻时，周围尘埃盘中的固体颗粒物都去哪儿了。他通过计算得出的关键结论，就是固体与气体之间的互动，在行星诞生初期的尘埃盘中依然存在。在压力、引力或是旋转的作用下，各个区域围绕恒星旋转的气体都会比粒子或固体旋转得慢一点。因此，粒子会超越气体。用林教授的话说，粒子“撞上了一股风，速度减慢，旋转的轨道也逐渐靠近恒星”。只要1000年，一颗直径1米的天体就能通过这种效应，将自己的公转半径减半，而且天体越大，向内移动的速度越快。

但也有极限。这个极限被形象地称为“雪线”。雪线的含义是恒星周围，冰、固态氨气以及其他挥发性物质可以蒸发的区域；对于太阳来说，雪线是2~4个天文单位的一片环形区域，在火星与木星之间。因此太阳系中的冰块及岩石块才会处在现在的位置。

雪线区域内，冰颗粒蒸发产生的水蒸气会改变附近的气体成分，使其旋转的速度超过固体颗粒，使颗粒的轨道向外移动。因此雪线区域内的颗粒会聚集成大颗粒，物质开始堆积。太阳诞生后100万年内，许多颗粒的直径都能达到1千米，雪线区域内也几乎没有了零星的尘埃。随着颗粒体积的增加，以及尘埃盘内部的气体被太阳的热量驱散，这些已经成为微行星的颗粒已经几乎不受气体的影响，许多微行星也开始逐渐向内移动，进入现在岩石态行星运转的区域。微行星能移动到哪里、岩石态行星又出现在什么位置，取决于很多因素，包括尘埃盘不同区域的温度、行星的体积，但我们通过计算机模拟，已经能掌握大概的情况了。

微行星通过引力作用吸引余下的尘埃，彼此再碰撞、融合，留下的微行星会以近似圆形的轨道运转，附近的碎块也几乎消失了。碰撞产生的碎片今天依然存在，部分即落入地球的陨石。由于离太阳更远的地方有更多的尘埃，越靠外的行星成长得越大。根据林教授的计算，距离太阳1个天文单位的初生行星（“胚胎”）可以在10万年的时间内达到地球1/10的质量，这时附近已经没有尘埃可吸引了；到了5天文单位的距离，尘埃更多，胚胎还可以继续成长几百万年，达到约4倍的地球质量。但这还没完。有趣的是，林教授还指出，现在的太阳系已经没有空间诞生行星了——各行星在彼此复杂的引力作用下，已经靠得不能再近了。太阳系诞生初期可能还形成了更多行星，但多余的行星会被推至不稳定的轨道，然后我们才进入今天的稳定状态。

太阳系最大的行星——木星，刚好处在雪线外侧，绝对不是巧合；但天文学家们依然无法解释木星这么大的行星为何会在那里的稳

定轨道上运行。即使离太阳那么远，太阳系外侧的行星胚胎与盘状结构中气体的反应依然很强烈，这就可以解释为什么木星的胚胎会落在雪线外侧，还聚集了许多气体。但木星为什么没有像今天发现的许多“热木星”一样，落在很靠内的轨道上呢？如果木星落在了内侧，就会把所有岩石态行星都推向太阳。

木星成形后，阻止了盘状结构的物质向内移动，还干扰了许多微行星的轨道，使其向外移动，帮助了其他巨型行星的诞生。阻止物质向内移动协助了第二颗巨型气态行星——土星的诞生；干扰微行星的轨道则导致足够多的冰块聚集成冰巨星天王星和海王星的核心。这一切都发生在太阳诞生后、巨型行星进入现有轨道并干扰柯伊伯带之前，总共只花了约1000万年。但地球诞生的过程更久一些。

## 制造地球

我们通过计算机模拟发现，形成太阳系的气团坍缩后100万年内，在太阳和现在火星的轨道之间可能存在着二三十个天体，体积从月球一般大（约为现在地球直径的27%）到火星一般大（约为现在地球直径的53%）。此外还有大量的微行星，这些微行星会通过一系列碰撞被更大的天体吸收，更大的天体则彼此碰撞、融合，直到只剩下几个天体，即今天的水星、金星、地球和火星，还有至少一颗火星大小的天体。年轻太阳的热量会摧毁复杂的分子，让气体向外扩散，因此这几颗原行星的成分主要是铁和硅，以及稳定的碳的化合物。

不过，虽然水星和金星没有卫星，火星也只有两颗很小的卫星，都是火星的引力场从小行星带中捕获的不规则石块，地球却有着太阳系八大行星中，与母星体积之比最大的卫星。在天文学家看来，地球和月球的体积过于接近，完全可以视为双行星系统。这么不寻常的系统是怎么形成的呢？

最有可能的解释就是地球诞生时，与金星几乎一模一样，外面是一层厚厚的岩石，此时附近还有一颗火星那么大的天体也诞生了。这颗天体最可能出现的位置就是两个拉格朗日点之一。这两个点都在地球的轨道上，分别在地球超前和落后60度的位置。这两个点是太阳和地球引力作用的洼地，小的天体可以逐渐变大，并留在那个位置。今天，我们用拉格朗日点寻找卫星的停靠位置，比如赫歇尔红外望远镜就需要离开地球足够的距离，免受地球上自然或人为辐射的干扰。而没有刚好处在拉格朗日点的小物体会轻微晃动，像钟摆一样；拉格朗日点上的人造卫星就需要经常通过推进器调整位置。但如果一颗由碎石自然成长起来的天体靠近地球公转轨道上的拉格朗日点，晃动就会越来越剧烈，甚至导致这颗天体直接撞上地球。地球外壳刚成形后的5000万年之内，可能就发生了这样的事。

我们将这颗设想中的原行星称作忒亚，希腊神话中月亮女神塞勒涅的母亲。约46亿年前，忒亚与太阳系一同诞生。在质量超过临界点后，忒亚的轨道变得不稳定，并在约45.3亿年前与地球碰撞，形成了今天的地球-月球双星系统，那时大约是其他岩石态行星诞生之后3000万~5000万年。

这次碰撞可不像两块石头磕在一起，碰掉一点儿碎片就结束了。天文学家将这次碰撞称为“大撞击”，看到这个词，我们脑海中浮现的画面就可以准确再现当时的情况——一颗火星大小的天体从侧面撞上了年轻的地球。这次碰撞释放了大量的动能，袭来的天体被彻底摧毁了，地球的表面也全部熔融了。天体的外壳熔融之后与地球表层的外壳混在一起，剩余的部分都被抛出，在地球周围形成了一圈碎片。与此同时，天体致密的金属内核会融入地球表层，并进一步深入，被地核吞并。地球表层与天体中低密度的物质被抛入太空，总质量达到月球的10倍；绝大多数物质都脱离了地球的引力，以陨石的形态在独立的轨道上围绕太阳旋转，但还有一些被地球吸引，形成一条环围绕在地球周围。地球的表面逐渐冷却，形成了一层薄薄的壳，环形中的



物质像当初太阳系内的行星诞生一样，不断碰撞，但速度快得多，最终形成了月球。我们通过计算机模拟发现，忒亚中约2%的物质构成了地球周围的圆环，其中又有一半构成了月球。月球成形的时间总共只有一个月左右。

环形中的碎片还会形成其他天体，并且可能在拉格朗日点上运行了近1亿年，然后才被其他行星的引力拉出，许多天体也因此撞向了地球或是月球。

我们通过研究月球表面带回的岩石，找到了支持这个地月诞生假设的证据。岩石的成分与地球的外壳完全相同。而通过留在月球表面的仪器对内部震动（月震）的研究也发现，月球内部没有金属核心；月球核心的半径不到月球的25%，而地球核心的半径约为地球的50%。月球核心只占月球总质量的百分之几，而地球核心占了地球总质量的1/3。地球平均密度为 $5.5\text{g/cm}^3$ ，月球的密度则只有 $3.3\text{g/cm}^3$ 。[\(2\)](#)

月球上岩石的年龄，甚至可以告诉我们那次撞击发生的具体时间——44亿年前，太阳刚刚成形的时候。这个观点还有其他间接证据；撞击发生在侧面，这也可以解释为何地球每24小时就自转一圈，而没有卫星的金星每243个地球日才自转一圈。形成月球的这次撞击的确让地球的自转变快了，那时地球自转一圈只要5个小时左右，之后一直在逐渐减慢。这次侧面的撞击也让地球产生了倾斜，因此我们才有了一年四季，不过月球的引力也一直在帮助地球以稳定的角度倾斜旋转。巧合的是，地球核心中还有过量的铁，再加上地球快速的自转，地球上就有了强磁场。后文我们就会讲到，这些因素对地球上科技文明的诞生有多么重要。

太阳系年轻时发生的这次碰撞，还有其他有力证据支持。经过水星的太空探测器通过测量水星引力的强度，发现水星虽然体积很小，但密度相对较高。月球像是没有核心的地球，水星则像是没有外壳的地球核心。合理的解释是起初水星的轨道上有一颗更大的天体，但在

太阳系很年轻时就遭遇了另一颗原行星的正面撞击，而不是侧面，所有低密度的物质都被炸向了太空，只留下高密度的核心。

这个撞击模型也解释了为什么太阳系的八颗行星中，只有一颗有体积接近母星的卫星；这也意味着这样的双行星系统很罕见。

## 特别的我们

总体来说，太阳系似乎是独特的，至少是很稀有的，因为行星的轨道都非常接近圆形，彼此距离又足够远，不会产生很大的影响。我们所知的绝大多数天体系统中，巨型行星的轨道都更接近椭圆形，这并不是因为椭圆形轨道更容易被我们观测到，统计学上也是椭圆形轨道居多。这样的系统也更容易充满变数；我们很容易解释行星为何在椭圆形轨道上运行，却很难解释为何有行星在圆形轨道上运行。目前还无人知道为什么有些天体系统，包括太阳系，能够进入很规则、稳定的状态。也许只是小概率事件：如果某种状态是可能出现的，而天体系统的基数又足够多，那这种状态总会出现。或许这也跟年轻太阳周围的盘状结构中，气体不断吸引着成长的行星有关，而这个现象又与太阳系诞生时的环境，以及附近的超新星或巨型恒星放出的物质有关。无论如何，天文学家发现的天体系统越是多样，太阳系似乎就越特别。

我们最新发现的一类天体系统，更加凸显了太阳系的特别。这样的天体系统有几颗行星，周围有比地球大、比海王星小的行星，而且与恒星的距离非常近，只要几周就能公转一圈，这里显然不会出现类地行星。但天文学家还有希望寻找到类似太阳系的天体系统；天秤座23这颗恒星周围，有一颗质量接近木星的行星，在接近圆形的轨道上运行，约14年公转一圈，只比木星的公转周期长一点。也许那里还有几颗岩石态行星，只不过太小，我们暂时无法发现。

即使在接近圆形的轨道上，木星对岩石态行星的诞生也会产生消极的影响。小行星带就是一颗未能成形的行星，其中的物质或是被木星吞并，或是被木星的引力彻底推出那片区域。离小行星带最近的岩石态行星——火星，体积只有地球的一半大，质量大约只有地球的1/10。如果火星跟地球一样大，也许就有了足够强的引力，也足够维持一层厚一些的大气，通过温室效应使表面变暖。而在地球另一端、离木星更远的金星，无论是体积还是质量都与地球接近，只是温室效应过于强烈。如果没有木星，火星也可能成长到跟地球一般大；如果小行星带的那颗“行星”真的能成形，大概也能长到和地球差不多的体积，这样太阳系中就有了三颗类地行星，离太阳的距离都刚刚好，可以存在液态水——前提是没有木星的存在，这样的行星也能诞生，只是这个假设有点缥缈。另一方面，如果木星的体积再大一些，或是地球诞生的位置离木星再近一些，地球也会受到类似火星的限制，无法达到今天的体积。

但无论有多少类地行星，没有了木星对太阳系整体的影响，这些行星的轨道还能够稳定吗？我们手里的证据告诉我们，不会。由于行星彼此之间的作用过于复杂，我们是无法精确计算每颗行星的轨道长期以来的变化的。如果太阳只有一颗行星，其轨道一定是简单的椭圆形，计算起来也很方便。但再加入一颗行星，就构成了“三体问题”，我们无法精确解出答案。唯一的解法是一点点地计算轨道，让一颗行星移动一点，计算另一颗行星受到的影响，再让这颗行星也移动一点，计算之前这颗行星受到的影响，依此类推。

当代计算机的算力足够强大，已经可以用这种方法计算几十亿年来，太阳系八颗行星的轨道是如何演变的。但计算结果显示，内侧行星的轨道受到的影响十分混乱。这意味着有时初始条件发生一点儿变化，计算出的轨道演变结果就会发生很大的变化。这个例子就是“蝴蝶效应”，即巴西雨林一只蝴蝶扇动一下翅膀，理论上就可能在加勒比地区引发飓风。

而到了太阳系这里，计算结果显示四颗巨型行星的轨道很稳定，并不会出现混乱，但也处在混乱的边缘——如果木星或土星的质量再多一点点或彼此距离再近一点点，或者太阳系外侧再出现一颗差不多大的巨型气态行星，那就出现混乱了。更糟的是，将初始参数稍做调整，再对内侧行星的轨道进行几千次模拟后发现，平均100次模拟都会出现一次混乱。受其他行星，尤其是木星的影响，最小的岩石态行星水星的轨道会被拉伸，导致其与金星擦肩而过，甚至发生碰撞，对太阳系内侧产生严重干扰，有时甚至会导致金星飞出轨道，撞向地球。既然模拟时有1%的概率发生混乱，那就意味着太阳消亡之前，我们的太阳系一定会发生类似的情况。这虽然不值得我们过于担心，但也告诉我们天体系统能稳定下来很不容易。的确，天文学家通过对仙女座  $\epsilon$  三颗行星奇怪的轨道进行研究，用计算倒推其历史，推断出这个天体系统内曾有四颗行星，由于发生了混乱，其中一颗被彻底推出系统。

由此得出的推论，像以前一样，还是太阳系这种行星轨道较稳定的天体系统，并不典型，比较罕见。不过究竟有多罕见，我们还没法下定论。

但我们能够确定的是，在太阳系整体稳定的前提下，木星对地球环境的影响还是积极的。岩石态行星诞生后不久，木星就使太阳系外侧的行星重新归位，并使得内侧行星遭受了那一轮轰炸。这轮轰炸中，有许多石块的直径都超过了100千米，任意一块都会导致目前地球上所有的生命灭绝。但那轮轰炸后期消耗掉了行星诞生后残余的大部分碎块，让未来发生类似碰撞的可能性降低，也将绝大部分未参与轰炸的碎块固定在小行星带、柯伊伯带和奥尔特彗星云中。虽然这几片区域中还是会有碎块脱离控制，冲向太阳，但那轮轰炸过后，木星就成为了内侧行星的护卫，阻止这些碎块进一步深入。许多冲向太阳的碎块都被木星的引力影响，改变轨道，不再穿过小行星带，甚至直接

被木星吞并。比如，1994年7月解体并撞向木星的苏梅克-列维9号彗星，这是我们第一次直接观测到太阳系内的天体发生这样的碰撞。

我们通过地理学研究发现，地球诞生后绝大部分时间内，平均每1亿年就会被一颗直径10千米以上的陨石撞击。正是一颗这样大的陨石导致了6500万年前“恐龙的灭绝”。但如果没有木星清理掉绝大部分碎块，并且保护我们免受苏梅克-列维9号彗星这样的天体冲击，我们可能每10000年就会遭遇一次这样的撞击，而不是1亿年。在这样的环境下，动物很难完成进化，更不要说演变成智慧生物、发展出科技文明了。

不过，地球早期经受的频繁撞击，也许对我们的存在是至关重要的。一颗曾经处于熔融态（如果我们对月球起源的假设是对的，地球就曾两次处于熔融态）的行星，是怎么留住足够多的水，构成汪洋大海的？答案是没有留住：水是后面才降临的。那么水是从哪里来的呢？

诞生行星的尘埃盘中，水是如何以液态或气态的形式留存下来的，这个谜题我们最近才解开。年轻恒星释放的紫外线辐射可以拆开水分子，就像现在太阳的紫外线辐射也能拆开大气中的氧分子一样。但当时的尘埃盘里一定存在水，否则我们今天也不会看到水；21世纪第一个十年里，我们在许多年轻恒星周围的尘埃盘中，通过光谱观测到了水，以及羟自由基（ $\cdot\text{OH}$ ，剥离了一个氢原子的水分子）。我们甚至还间接观测到了一些类似彗星的冰块。2009年，密歇根大学的几位科研人员解释了水为何能留存下来。他们发现水蒸气可以保护自身免受紫外线辐射影响，因为辐射会被外侧（靠近恒星的那侧）的水分子吸收。而水分子刚被辐射分解为氢原子和 $\cdot\text{OH}$ ，就马上发生化学反应，再次重组为水分子，可以再次吸收辐射、被辐射分解。

由于恒星诞生的气团中存在大量氢气，所有可用的氧气都转化为了水。气团中富含水的部分被保护起来了，就像现在地球表面被大气

中的臭氧层保护着一样。在地球的平流层中，氧气分子不断吸收紫外线，变为臭氧分子，但臭氧刚形成，就会马上转化为氧气。结果就是地球上空形成了永久的臭氧层，太阳的紫外线辐射也几乎被吸收。原行星诞生的物质团中，也存在类似的保护效应，紫外线辐射很难穿透外层。复杂的分子也因此得以存在，甚至还可以相互反应，变为更复杂的分子，形成大量有机物，即使离母星几个天文单位远的行星也能对其加以利用。

但水分子，以及复杂的有机物分子，在地球足够冷却，液态水可以存在之后，是如何到达地球上的呢？其实原行星中就含有这些分子，而且由于体积小，表面温度永远不会导致水沸腾。作为对比，今天的地球含有不到1%的水，以及不到0.1%的碳，但小行星带中的天体含有20%的水和不到5%的碳。如果地球的成分与火星外侧那些小行星类似，那我们的海洋就会有几百千米深，大气中也会有一层厚厚的二氧化碳，通过温室效应使地球温度升高，让水全部蒸发殆尽，水蒸气又会进一步加重温室效应，让生命无法存活。如果地球上的水量翻番，地表也会几乎被水覆盖，只留下微乎其微的陆地供我们这样的生命生存进化。对科技文明的发展来说，水太多或太少都不是件好事。这又说明地球恰好处在两个极端之间完美的平衡点。

木星除了为地球提供前面提到的诸多帮助，还刚好处在一个合适的位置，可以向年轻的地球输送富含水的天体。不仅有来自那次仿似灭顶之灾的大轰炸的陨石，还有太阳系外侧的冰块，即富含水和有机物分子的彗星类天体。我们通过对地幔中氮和氙的同位素的研究，找到了支持这个观点的证据。同位素的含量与陨石样本吻合，进一步确认了地球在成形后期，通过撞击获得了许多不稳定的化学物质。甚至“水带”中一颗中等体积的天体含有的水，含量都足够和地球上所有水的含量相当。最近我们在月球岩石内部发现水的情况也与这个理论吻合。

我们通过计算机模拟发现，如果木星诞生的位置再靠外一些，地球这么大的行星还是可以诞生，但与太阳的距离会达到5个天文单位左右。这样的行星上面还是有水，但都已经结成了冰。如果没有木星，太阳系内依然会有很多水，但都被锁在小行星内部，无法形成地球这么大的行星。

不过，在我们这个特别的太阳系里，地球还是诞生了，还有一颗很大的卫星，以及液态水构成的海洋。这就足够孕育生命了。但生命离进化出智慧、发展出科技文明，还有很多路要走。

---

[\(1\)](#) 地球海平面处的平均气压为1个标准大气压。——译者注

[\(2\)](#) 作为对比，液态水的密度是 $1\text{g/cm}^3$ 。——译者注

## 第五章

# 地球有什么特别的

地球是一颗岩石态行星。在太阳系内似乎很普通——八大行星中有四颗都是岩石态的。但放眼全宇宙，岩石态行星就要稀有得多了。岩石态行星的多少，完全取决于诞生行星的尘埃盘中，碳元素和氧元素的比例。

### 像空中的钻石

岩石的主要成分是硅酸盐，即硅原子与氧原子结合的化合物，可以认为是硅的氧化产物，不过有时还含有其他元素。如果行星诞生的区域富含氧气，那几乎所有硅元素都会以硅酸盐的形态存在，最后也会形成岩石态行星。但如果没有多余的氧气，就不会有硅酸盐，也不会形成岩石态行星。富含碳元素也会有类似的效果，因为恒星核聚变产生的碳和氧几乎是平衡的，有的恒星、星云中碳多一些，有的则氧多一些。而银河系中，氧元素的含量差不多是碳元素的2倍，碳元素的含量则约是硅元素的10倍，但有些恒星周围，碳元素要比氧元素多许多。碳和氧之间很容易发生化学反应。诞生天体系统的物质团中，无论碳和氧哪个多，最终都会充分反应，以一氧化碳或二氧化碳的形式存在，剩余的元素才会与其他元素发生化学反应。

这个设想不仅仅停留在理论阶段。我们通过红外观测，发现许多恒星到了生命晚期，周围都会包着一团被炸飞的物质，包括富含碳化合物的尘埃颗粒；其中最常见的就是碳化硅，还有其他更复杂的碳化合物。而这些物质被推向太空后，可能在未来的某个时间遇见合适的



行星，为生命的诞生做出重大贡献。不过更能说明问题的是，目前已知所有携带行星的恒星中，绝大多数的碳-氧元素比都超过了太阳。

与硅酸盐构成的岩石等相比，地球上其实没有多少碳元素。在太阳系内侧，岩石态行星诞生的地方，绝大多数碳元素似乎都形成了一氧化碳，并在太阳年轻时被吹散至太阳系外侧，留在了小行星和彗星中。碳元素像水一样，都是地球冷却后，跟随其他天体造访地球的。

但是碳元素比氧元素多很多的天体系统中，就不会发生这样的情况。固态碳化合物，比如碳化硅，甚至以石墨颗粒形态存在的固态碳单质，都可以构成行星，行星的轨道甚至可能像地球一样。这样形成的一颗地球大小的行星会有一层石墨外壳，但再深入下去，随着压力的增加，会出现碳化硅，甚至钻石，天上的星星真的“一闪一闪亮晶晶”了。这样一颗行星的表面，仅存的氧元素都会形成一氧化碳，余下的碳元素以甲烷等碳氢化合物的形式存在。有时，这样的行星表面还会有沥青构成的湖泊、大海。

这对发现类地行星的概率有多少影响还无法确定，不过对于支持“搜索地外智慧生命”计划的人们来说，这显然是个坏消息。地球适宜生命生存，本身就是由很多因素决定的，时间和地点都是其中之一。银河系中重元素即金属含量较高的区域，碳-氧元素比也更高。这意味着更靠近银河系中心的区域里，是很难出现地球这样的岩石态行星的，更不用说那片区域根本不适合我们这样的生命生存，以及“碳化”的风会逐渐向外席卷银河系。这些因素的影响都还无法量化，但显然都让类似地球这样的世界存在的概率进一步降低了。即使在太阳系之内，地球的硅酸盐外壳似乎也是独一无二的，而且对我们这样的生命诞生至关重要。

## 行星拼图

地球的外壳可以分为“几大块”和“几小块”，像拼图一样拼成了一个球体。但跟拼图不一样的是，这些板块一直在移动，产生所谓的大陆漂移，不过今天我们更喜欢称之为板块重构。20世纪下半叶，我们将对海底的磁力勘测、地震学研究，以及从太空中直接观测大陆的移动等诸多证据拼在一起，形成了我们目前对板块重构的理解。板块重构可以解释火山、地震如何产生与为何产生，以及为何地球有时会进入冰川期、有时又没有冰，甚至物种为何会产生多样性和灭绝等诸多问题。

我们对板块重构的理解，核心在于海底扩张的发现。海底有裂缝，其中大西洋底部一条南北向的长裂缝最为明显，地壳下面的熔融物质岩浆在缝中聚集起来，再从裂缝的某一侧喷出，进而冷却。这就形成了一条海底传送带，将海洋逐渐地、稳定地分成两半。北大西洋底的这条裂缝，使得欧洲与美国之间的距离每年增加几厘米——和指甲生长的速度差不多。我们也通过卫星上的仪器测量到了这一变化。

如果板块重构只是这样，地球就会一点点长大，因为海底一直在堆积着冷却的岩浆。但海底物质堆积的速度，和原结构瓦解的速度一样快。海底陆地被推至大陆下方时，就会瓦解，并落入海沟这种裂缝，回到地球内部。海底并不是一遭遇大陆，就会瓦解——比如大西洋的边缘就不会这样。海底瓦解最典型的例子是大西洋西面，海底被推至欧亚大陆底部。这片区域包括日本，那里地震、火山活动多发并不是巧合。大西洋缩小的速度与大西洋扩张的速度几乎一致，海底瓦解的过程也很激烈。当然，新海底结构成形的过程也很激烈；但这个过程多在大海中央，引发的地震或是海底火山喷发对我们也没什么大影响。冰岛是个例外，它是大西洋中脊的一部分被推出了海面形成的。

整个过程其实只是简单的热对流。地球内部温度很高的液态物质涌出、摊开并冷却，然后再回到内部，很简单。当然，复杂的情况依

然存在。地表下方温度较高的地方可能会在大陆上产生裂缝，形成新的海洋，现在东非似乎就发生着这样的事。有时大陆还会碰撞，将夹在中间的海底陆地部分彻底瓦解并挤压形成新的山脉，比如喜马拉雅山脉。其中的规则很明确。此外，这个过程只能发生在地球这样表面有层薄薄的固态物质壳，内部还有一层液态物质的行星上。

不过，地壳的厚度也不均匀。大陆地壳的厚度为35~70千米不等，而海洋地壳的厚度则更平均，约为7千米。作为对比，地球的直径接近13000千米。因此地壳对于地球来说，就像是苹果上的果皮。

即便这样，海洋地壳与大陆地壳之间的厚度差异也很重要，甚至可以说“性命攸关”。大陆地壳不但比海洋地壳更厚，密度也更低。海洋地壳的密度约为 $3\text{g/cm}^3$ ，大陆地壳的密度则约为 $2.7\text{g/cm}^3$ 。部分原因是海洋地壳是完整的一片，而大陆地壳由许多块组成，在板块重构的作用下挤在一起。这还解释了在碰撞时，为什么是海洋地壳而不是大陆地壳被瓦解，重回地球内部。低密度物质自然会处在高密度物质上方，向下施加着压力。不过这个过程还有一个“推手”——水。

在大陆边缘，海洋地壳在海沟中瓦解的区域叫作隐没带，有时一片海洋地壳还会滑入另一片海洋地壳下方，不过这个细节可以忽略。进入隐没带的海洋地壳会受到水的渗透和侵蚀，渗入的水又会被加热至沸腾，引发一连串的化学反应，改变岩石地壳的成分。大陆边缘的岩石上还覆盖着一层被冲刷来的沉积物，富含有机生物的残骸。这部分物质到达大陆地壳下方时，温度会升高，还会承受极大的压力——地下50千米深的地方，压强是地表大气压的15000倍，温度也会达到100摄氏度。这样的环境会将水从岩石中挤进周围的物质。这些物质会促进岩石的熔化，就像把盐撒在冰上一样。沉没的地壳下方会有岩浆累积，而液态岩浆的密度小于固态岩浆，因此这些岩浆会逐渐上升，穿透地壳。这样，在海洋地壳瓦解的区域就会出现一系列的火山活动。如果没有水，这一系列反应都不会发生，也不会有板块重构。

这对生命的存在至关重要，尤其是我们这样的生命。原因很明显：这个过程中，岩浆里会产生气泡，这些气泡会上浮至火山口，冲破表面。这些气体中，最重要的就是水蒸气、二氧化碳和氮气。大部分氮气都来自岩石层中有机生物的遗骸构成的沉积物。这些气体对地表的生物至关重要，因此地球上的生命与没有生命的岩石参与的循环息息相关。这个现象最重要的作用之一，就是生物、非生物共同参与维持了大气中温室气体尤其是二氧化碳的平衡，像一个全球温控器一样，调节着地球的温度，使其适宜生命生存。

这样的火山活动，还在其他方面对科技文明的诞生有着至关重要的影响。熔融态的岩石冒出地壳时会冷却，有些甚至在冒出的过程中就凝固了。我们可以通过测量不同岩石中石英的含量，确定有多少岩浆凝固了。石英就是二氧化硅，岩石中普遍存在。目前，海洋地壳最主要的成分就是火山活动形成的玄武岩。按质量计算，海洋地壳中约50%是石英，但大陆地壳中则含有60%的石英，这也是大陆地壳密度低于海洋地壳的原因之一。当然，有些岩石的石英含量超出平均水平。比如，花岗岩中就有约75%的石英。大陆地壳中的石英含量之所以比玄武岩多，是因为岩浆从隐没带冒出的过程中，还吸收了其他物质。其中有从岩浆中结晶析出的石英和其他矿物质，增加了玄武岩中的二氧化硅含量，还有在更接近表面的位置凝固的化合物，其中富含铁、铜、银和金等金属元素。因此，南美洲年轻的山脉中才会发现贵金属，引来西班牙征服者寻找黄金城，而发现的财富也帮助西班牙帝国兴盛一时。很久以前，大陆分布还和现在大相径庭，当时发生的这个过程使得欧洲地下有了丰富的铜、铁等金属，为工业革命打下了基础。不考虑智慧生命是如何进化出来的，正是这薄薄一层的地壳和水，让地球上发展出了科技。如果只有智慧，没有足够的金属元素，是无法发展出能向恒星发射信号，甚至能航行的科技文明的。但这个过程发生的地方、我们的科技文明发展的地方——大陆，又是怎么造出来的呢？

## 制造大陆

板块重构给我们提供的一条关键信息，就是大洋底是地球表面的临时构造，但大陆虽然会缓缓地拆解再重构，却是永久构造。大陆还会成长。随着时间的推移，海洋的面积会逐渐减小。在大陆边缘，因隐没带引发的火山活动会让大陆累积新的物质，在大陆地壳与海洋地壳碰撞时，这部分物质还会被推起来，形成山脉的一部分。当然，大陆也不断地被风雨侵蚀着，沉积物也不断被冲刷至海底。但大陆上新物质累积的速度远远超过了侵蚀的速度。如果上溯到足够久远的时期，地球上甚至不存在大陆。

想想地球是怎么诞生的，这点就变得很显而易见了。经历过月球诞生的那次撞击后，我们的地球以一团熔融态物质的形式稳定了下来，外形接近球体（只是“接近”，因为自转会使赤道部分稍微向外扩张）。地球本来可以成为一颗理想的光滑球体的。如果地球变成这样的球体，海洋里的水足够形成一层浅海，覆盖整个表面。海洋的平均深度是3800米，比大陆平均高度的4倍还多，还覆盖了地球2/3以上的面积；因此如果地球的表面变得光滑，表面覆盖的水深也有近3000米。

如果这些水都以雨的形态，落在年轻、冷却又没有干扰的地球表面，地球可能就成了水世界，但依然可能孕育生命和科技。不过大部分水，甚至全部的水，都来自太空，通过撞击来到了地球，现在我们认为地球后期遭受的撞击，促进了大陆的成长，引发了板块重构。

即使是地球年轻时，内部岩浆的累积依然会在海底产生裂缝。大陆板块的雏形被热对流效应推动，同时彼此碰撞，有些板块被推到其他板块下面，产生一条“迷你隐没带”，又挤出了第一批火山岛。一片板块被推到另一片下面时，会被刮掉一层，掉下来的岩石未来也会对“迷你大陆”的成长做出贡献。不过有证据表明，目前超过一半的

大陆板块在25亿年前就成形了，这意味着地球早期，大陆板块的成长速度惊人，远不是小板块互相碰撞能够产生的。这似乎是因为约38亿年前，即大轰炸尾声时期，以及约25亿年前，地球遭受过一系列冲击。结果就是70万年内，地球上出现了一半以上，甚至高达2/3的大陆地壳，这段时间还不及大陆地壳寿命的1/5。

那些撞击的证据都很明了。远古岩石中发现的地质结构——克拉通，就是这些撞击的直接证据。最吸引我们注意的克拉通在非洲东南部和澳大利亚西北部。这两个地区的克拉通还非常相似，显然曾经来自同一块大陆。月球凹凸不平的表面上也能找到间接证据，天文学家可以通过月球表面的陨石坑估计不同时间段内，地球和月球分别遭受了多少次、什么样的撞击。他们的结论是38亿年前至25亿年前，地球可能被直径20~50千米的天体撞击过9次或10次。

作为对比，6500万年前灭绝了恐龙的那颗陨石，直径只有10千米。而直径超过20千米，袭来的速度在20千米/秒左右的天体，几乎不会受到地球表面那层深3千米的水的影响。当时的景象绝不是向大海里扔一颗石子，而是向小水坑里扔一块板砖。这样的陨石会直接撞入地壳，产生大量的热，然后在周围形成一个直径约500千米的液态岩石湖。

但陨石撞击对大陆重构有什么贡献呢？澳大利亚国立大学的安德鲁·克里克森提出了一个合理的解释。对于如此久远的事件，任何解释都要包含一定的推测成分；但克里克森的解释让各块拼图完美地结合在了一起，还有普渡大学杰·梅洛什对撞击的计算作为数据支持。最早的时候，只有很薄的一层地壳参与板块重构，过程也比较安静，高温熔融态物质涌出，将薄薄的地壳推开，然后扩散出来并冷却，再沉入地球内部。但如果陨石击中了一片涌出的熔融态物质，产生的液态岩石湖温度更高，原来涌出的物质会受到影响。液态岩石湖会覆盖年轻的大陆板块，并且扩散至板块边缘下方。这点很重要。这样的

话，原来涌出的物质没法再从裂缝中涌出，而是像柱子一样顶在大陆板块下方。这会导致剧烈的火山活动，熔融的岩石会冲破地壳，在上方形成火山，增加地壳的厚度，并且引发了远比今天剧烈的板块重构。根据撞击具体位置的不同，熔融态物质形成的“柱子”还可能产生小的分支，在另一处冲破冷却了的液态岩石湖，形成一系列新的火山岛。

这番景象虽然很引人入胜，但我们却没法确定在早期的地球上，究竟是不是这样的事件大大加速了板块重构和造陆运动。我们能确定的是，要想发生板块重构，就一定要有一层薄薄的地壳，还要有许多水。薄薄的地壳是产生月球的那次撞击留下的，那次撞击还让地球的核心变得致密且富含铁元素，这也对我们这样的文明发展起到了至关重要的作用。

## 防御力场

某些科幻小说中会描写飞船甚至人周围有一层保护自己的“力场”。这个想法不错，只不过在人或飞船周围很难实现，即使这种力场真的存在。因为要产生这样的力场需要非常多的能量。但是地球，尤其是地球表面的生物，的确有一层这样的力场保护着，这层力场由地心深处熔融态的金属旋转产生，保护我们免受太空中的危险侵害。这层力场就是地球的磁场，或叫磁层。虽然这层磁场没法抵御来袭的陨石，却可以挡住太空中危险的粒子束，即宇宙辐射。

跟探索恒星的成分相比，知道我们脚下都有什么物质似乎更难一些。恒星虽然很远，我们却可以通过分析光谱判断是什么原子在发光。不过，地震学家还是通过研究地震波的扩散规律，对地球内部结构有了较深刻的了解。地震波在不同的岩石中传播速度不同，有些地震波还会进入很深的地方，在被我们探测到之前已经穿越了一次地球。地震波还会发生折射、反射，就像光线穿过玻璃时一样。只要观

测数据足够多，我们可以建立起地球整个内部结构的影像，就像X光片可以建立起人体内部结构的影像一样。

从地表向下看，大陆地壳、海洋地壳的体积其实只占了地球总体积的0.6%，质量只占总质量的0.4%。地壳下面是地幔，一直延伸至2900千米深的地方，占了地球总体积的82%。地幔分为两层，上地幔和下地幔，性质稍有不同，但对地球的磁场并没有实质性影响。更深的地方，即地球的核心，也是这样。内地核是一个固态的球体，成分应该主要是铁和镍，直径约2400千米。因此内地核最外层已经到了地下5200千米的位置。但我们感兴趣的活动都发生在外地核，一层富含铁、镍的液态物质，从内地核最外层延伸至地幔最底部，跨越2300千米的范围。地球的核心占了地球总体积的17.4%，与火星的体积差不多，但由于上层物质的挤压，密度非常大，所以质量占了地球总质量的1/3。

我们通过地震学研究发现外地核呈液态，实验结果显示，在外地核所处位置的壓力作用下，铁、镍混合物会在5000摄氏度左右熔化。因此外地核中，那层不断旋转、产生地磁场的液态物质，温度一定在5000摄氏度左右，也就是仅仅比太阳表面温度低一些。

地球诞生四十多亿年了，内部温度为什么还那么高？部分原因是外层的物质起到了一定的隔离作用，像毛毯一样包住了热量。此外，核心中的放射性元素，比如铀和钍，长期以来衰变产生的热量也起到了一定的作用。核心中之所以含有放射性元素，是因为诞生太阳系的那团物质受到了附近的超新星或巨型行星影响，加入了新的物质。这又一次说明了我们这样的文明比较罕见，因为地球大小的行星很少有熔融态的核心，因此也缺少保护性的磁场。40亿年后，地球的核心会彻底凝固，地磁场也会消失。

外地核中的液态物质是导电的，这些物质旋转起来就像发电机一样，产生了电流，并且产生了磁场。地球上磁场作用的位置，即磁



层，其实是雨滴形的，因为一侧受到太阳释放的粒子束（太阳风）作用，另一侧又延伸到了太空中。在地球面向太阳的那侧，磁层与太阳风之间的分界线，即磁层顶，与地球表面的距离约为地球半径的10倍，即60000千米以上；而另一侧的磁层则延伸到了接近月球的位置，距离超过地球半径的60倍。太阳风中的带电粒子，比如质子等，速度一般为每秒几百千米，在太阳表面出现太阳风暴时，还会达到每秒1500千米。地球，乃至整个太阳系，都经受着深空中粒子的轰炸。

这些粒子与辐射或核爆时产生的粒子一样，如果到达地球表面，会对生命造成致命打击。但由于这些粒子都带着电荷，地球的磁场会将这些粒子导向两极，与大气顶部的气体分子反应，形成多彩的极光。

即便如此，太阳风暴期间产生的粒子束，还是足以干扰通信、影响磁场，甚至在加拿大等高纬度地区影响输电线路，造成大面积停电。太阳风中的粒子束如果足够强，还会让卫星失效，并对太空中的宇航员构成生命威胁。那么如果没有地磁场，结果会有多糟糕呢？我们其实知道答案，因为类似的情况发生过不止一次。

旋转的熔融态物质产生的磁场可能不稳定，地球的磁场正是如此。地磁场的强度会变，磁极的位置也会不断移动。地磁场的记录留在了不同时代的岩石里。熔融态的岩石凝固时，会把磁场留在里面，像一块化石一样，为我们展示那个时间点磁场的强度和方向。地理学家可以通过这类证据，重新构建过去的磁场，并与那时留下来的生物化石证据作比较。

不知为何，地磁场会逐渐消失、再逐渐增强，或与之前的磁场一模一样，或反转两极，让过去的北极变为南极，南极变为北极。化石记录显示，磁场消失时，地球上许多物种都会灭绝。显然这是因为在磁极反转时，陆地上的物种被来自太空的辐射杀死了。不过，具体为何灭绝并不重要。我们只要知道地球磁场的消失，与表面生物的死亡

有关。显然，磁层的保护作用对我们这样的物种在地球上进化至关重要。

磁极反转一般需要几千年的时间。新的磁场建立起来后，最短可以保持10万年，最长甚至可以维持数千万年。有时磁极反转还会爆发式出现，一百万年内发生四五次，这段时间也会发生更彻底的物种灭绝。如果你很担心这种事情发生，目前已经有证据表明，地球的磁场已经减弱了数千年；如果继续减弱下去，从地理学的时间尺度看，磁场很快就要消失了。

因此我们能在地球上生存的另一个原因，就是地球有强磁场，而强磁场来源于金属核心——产生月球那次撞击的结果。除了这点，我们还有很多要感谢月亮的。不过考虑月亮对维持地球宜居环境的功劳之前，还需要先看看没有地球这些地理特征的金星和火星都经历了什么。

## 金星和火星

前面讲过，金星与地球的体积几乎一致，也可能有着类似的地理活动。可事实完全不是这样。部分原因是金星富含二氧化碳的浓厚大气引发了强烈的温室效应，导致金星上没有水，带来的问题之一就是板块重构没有润滑剂。但这还没完，金星似乎从来没像地球一样发生过板块重构。我们通过环绕金星的探测器，对金星表面的地貌有了完整的了解，也可以“看到”地表的细节。虽然金星表面也有高低起伏，有内部的熔融态物质冲破外壳产生的火山活动痕迹，但没有横向移动，这也就意味着金星上没有大陆漂移。

有意思的是，金星的表面并不像月球、水星或火星一样，满是陨石坑。我们对其他天体，尤其是月球表面研究后，发现了大轰炸过后其他天体撞击的频率。我们的证据来自太阳系内部，水星到火星之间

的部分，因此金星一定也受到过类似的长期轰炸。但金星表面看不到大轰炸的痕迹，也看不到之后30亿年内任何大型撞击的痕迹，只有少数陨石坑反映着过去7亿年金星受到的撞击。目前我们能想到最合理的解释，就是约7亿年前，金星内部熔融的岩石突破了外壳，蔓延、覆盖了整颗星球，然后冷却，形成了一个相对光滑的表面，将过去撞击的痕迹全部抹去，让陨石可以重新留下自己的印记。

如果金星的地壳很厚，达到产生月球的那次撞击之前的地球地壳的厚度，这个解释就能成立。厚厚的地壳隔开了行星高温的内核，内部的辐射让温度不断升高，直到临界点，整个地壳破裂，岩浆遍布地表。内部的热量释放出来后，星球就会冷却，表面凝固，如此往复。自太阳系诞生以来，金星也许已经经历了好几次这样的循环。地球则没有经历过同样规模的表面重构，因为岩浆可以到达地表，稳定地释放出内部的热量。

支持这一观点的证据，来自一个似乎不相关的事实——金星没有强磁场。因此金星没有巨大的、富含金属的核心。地球巨大的金属核心，以及薄薄的地壳，都是产生月球那次撞击的产物；金星没发生过这样的撞击，就只有一层厚厚的壳，没有金属内核。如果没有那次撞击和月球，地球可能会像金星一样，我们也不会存在。

火星也缺少类似的板块运动和强磁场，但原因不同。火星很小，跟地球的核心差不多，因此冷却得很快。火星的核心很小，内部的热量又很少，很难控制住一大团旋转着的熔融金属，无法产生强磁场，也无法驱动像地球一样的大陆漂移。火星仅存的一点儿热量都扩散到了表面，通过长期累积形成了火山口逃逸。火星表面有太阳系中最大的火山，奥林帕斯山，面积约有亚利桑那州那么大，高度达火星“海”平面，即高于表面平均高度26千米。这座火山和火星上另一座几乎一样宏伟的火山在内部残留热量的作用下，还在不断增长。

火星与金星不同，大气很稀薄。起初火星的大气可能很浓厚，甚至有证据表明火星表面有过海洋，但由于引力太小，以及没有强磁场，绝大多数气体都逃逸了，让火星进入冰冻状态。没有强磁场，太阳风中的粒子就可以穿透大气，逐渐将大气吹散，火星很弱的引力也无法留住大气。金星的大气也在被逐渐吹散，但金星的大气足够厚，自身引力也足够强。

地球的大气没有金星那样浓厚，如果没有强磁场，就会被太阳风吹散；但这并不重要，因为除非月球不存在，地球才不会有强磁场，变得更像金星。下面我们看看巨大的卫星还有什么好处吧。

## 行星稳定器

月球的直径比地球的1/4多一点。质量约是地球的1/8不到，但跟太阳系其他几大行星相比，月球与地球的质量比遥遥领先。结果就是，月球对地球的引力一直起着至关重要的作用。再加上月球诞生对板块重构的贡献，月球对地球的三大主要影响可以概括为三个“T”——倾斜（tilt）、潮汐（tides）和板块（tectonics）。前两个影响都要归功于月球引力，第三个影响也与月球有关。

倾斜指的是地球自转轴与公转轴之间的角度。地球南北极的连线并不是竖直的，而是与公转轨道所在平面呈一定的角度，比垂线偏离了约23.5度。地球自转轴总是指向同一个方向，因此会有一个半球向太阳倾斜，处于夏季，另一个半球处于冬季；6个月之后，情况又会完全逆转。地球的倾斜还与冰川期有关，后文会讲到。

虽然经过几万年，地球的倾斜角度还是会变，但有月球的引力稳住地球，变化的角度会很小。如果我们没有一颗这么大的卫星，或是月球离地球再远一点儿，太阳和木星或其他行星的引力会让地球在太空中乱撞，可能突然（天文学尺度上的“突然”，不少于10万年）从

竖直状态变为平卧状态。这会引发数学意义上的混乱，即影响地球的因素即使发生很小的变化，也会导致巨大、不可预知的后果。火星就经历过这样的混乱，由于没有巨大的卫星，倾斜角度突然改变了45度以上，或是一点点地改变了60度。但至少这一年来，地球的倾斜角度基本没有变，很久之后可能也不会变。

如果地球一下子躺平，比如说北极直指着太阳，那我们不需要多丰富的想象力，也能猜到这对诞生初期的文明意味着什么。赤道周围的海洋和陆地会结冰，南北半球的高纬度地区是一个酷暑接着一个寒冬。即使赤道部分正对着太阳，那片区域的冰雪也不会消融，因为阳光和热量都被闪亮的表面反射掉了。热带地区孕育了地球上绝大多数物种，在这种情况下也基本会灭绝。似乎类地行星经常经历混乱的自转轴倾斜，光这一点就对“刚好”有一颗巨大卫星的行星上的科技文明，或者任何复杂物种的诞生有着至关重要的影响。

月球在逐渐远离地球，提供的稳定效应也在逐渐减弱，因此科技文明的诞生也有时间限制。月球刚诞生时，与地球的距离要近得多，而月球的动能逐渐消耗，转为地球上一次次的潮汐，月球本身也在不断外移。目前月球每年约向外移动4厘米，用不了20亿年，月球就没法再稳定地球的自转轴了。这与天文学等科学领域内最有意思的一个巧合密切相关，这个巧合似乎无法解释，也让科学家们摸不着头脑。目前，月球的大小是太阳的1/400，而日地距离刚好又是地月距离的400倍，因此太阳和月亮在我们看起来是一样大的。当下这个阶段，日食时月球可以刚好遮住太阳。过去，月球看起来要比太阳大得多，日食时也会完全盖住太阳；未来，月球在我们眼中会变小，日食时也会露出周围的一圈光环。没人能想明白为什么这个巧合发生的时候，地球上刚好出现了智慧生命，刚好观察到了这个巧合。我有些担忧，但大家似乎都觉得稀松平常。

潮汐就没那么让人担忧了，因为我们研究得很透彻。而且对于生命在大海中诞生，以及迁移至陆地的这个过程，潮汐也至关重要。潮汐由太阳和月球的引力引起，原则上其他行星也有贡献，但影响太小，我们观测不到。太阳和月亮都会吸引自己这侧的海洋和陆地向上凸起，可以理解为地球的一侧被拉长了。凸起的两端之间就是低潮。现在，月球对潮汐的影响约是太阳的两倍。但每个月，太阳和月亮引起的潮汐都会时而互相累加，时而互相抵消。新月或是满月时，月球、地球和太阳呈一条直线，潮汐会互相累加。这时的潮水会非常高，称作大潮或朔望潮。半月时，月球、地球和太阳呈直角，太阳的潮汐作用会抵消掉月球潮汐作用的一半，潮水会低很多，称作小潮。各地海岸线形状的不同，具体的时间和潮水大小都会不同，但总体来说，随着地球在月球和太阳之间位置的变换，地球上的每个地方每天都有两次高潮和两次低潮。

现在的潮汐现象已经很壮观了，但更厉害的是，“固态”的地球每天也会波动20厘米。我们脚下的大地每天都会波动两次，幅度是20厘米，但我们注意不到，因为我们也在随之波动。只要地球维持现有的轨道，太阳的潮汐影响就一直存在。但之前月球距离更近时，引起的潮汐现象更显著，无论是海洋还是陆地。

我们对月球的诞生过程进行模拟后发现，月球当初是地球周围一圈碎石结合后的产物，那一圈碎石距地球不超过2.5万千米，而今天，地月距离是38.4万千米多。当初的地月距离不足现在的1/10。那时如果有海洋，会产生滔天巨浪，而陆地在幅度超过1千米的不断拉伸与挤压中，也会产生足够的热量，让地表在一段时间内都处于熔融状态。但月球释放了这么多的能量，远离我们的速度也会更快，地壳也有机会在100万年之内冷却定型或重新定型。即便这样，月球的潮汐作用在地球内部产生的热量依然很可观，可以与辐射产生的热量一起，推动地球上的板块重构。

在产生月球的那次撞击过后，地球的旋转速度也变快了，这是那次撞击的直接后果。随着月球逐渐远离我们，潮汐力也让地球逐渐慢了下来。月球刚诞生时，地球上的一天只有5个小时。那时的潮水会有几千米高，每隔两个半小时变化一次，而现在的潮水只是每隔12小时涨落2米左右。不过那么高的潮水没有持续多久。陆地上第一种略复杂的植物，是5亿年前从海里登陆的。巧合的是，4亿年前，地球上的一年大约有400天；因此海洋中的复杂生物诞生时，潮汐现象与今天并没有很大的不同。植物以及后来的动物迁移至陆地时，应该是借助了潮水的力量。这些生物先是进化出了在每天两次低潮时，离开水也能生存的能力，然后部分生物还进化出了彻底离开海水生存的能力。而能扩散至没有天敌的区域，也是生物的一大进化优势。当然，天敌很快也跟了过来！但没有月球引起的大潮，这些现象还会那么容易发生吗？

我们的研究越深入，似乎就越能了解月球对我们的存在有多重要。因此，我们需要换个角度，再看一下板块重构，记住产生月球的那次撞击和月球对地球内部保持高温、引起热对流等的贡献。

## 板块重构和生命

彼得·沃德和唐纳德·布朗利将板块重构称为“地球上生命诞生的核心条件”，不仅仅因为“这能让星球上有充足的水”。板块重构的第一个产物就是陆地，水世界变成了海洋和大陆的世界。没有大陆，就没有能观察星空的陆地生命、能利用矿产资源的科技文明，就没法思考宇宙中其他地方存在生命的可能性。板块重构让地球上有了充足的水，也保持了地球上的温度，让液态水可以存在，还让水在海陆之间循环起来。

行星表面的温度取决于其从母星处获得的热量，以及反射掉了多少热量，又通过大气（温室效应）留下了多少热量。如果没有大气，

只有前两个因素作用，地球的温度会怎样呢？这个问题很容易解答，看看月球就行了。月球与地表的物质构成相同，与太阳的距离也和地球接近，还没有大气。月球表面的平均温度是零下18摄氏度，但地球表面的平均温度是15摄氏度。地球大气的温室效应产生了33摄氏度的温差。温室效应的强弱取决于二氧化碳、甲烷以及水蒸气等的浓度（地球大气的主要成分，氮气，并不能维持热量，因此对“全球温控器”并没有贡献）。而温室气体的浓度很大程度上由板块重构调节着——或者说过去是这样，直到后来人类影响了自然的循环。

任何足够大、内部温度足够高的岩石态行星，都会通过火山活动释放温室气体，尤其是二氧化碳和水蒸气。这些气体来自岩石中的化合物。金星这样的行星没有板块重构，也没有液态水，这些气体无处可去，就累积在大气中，让温室效应越来越强。但地球这样的行星上有板块重构，也有液态水，情况就更复杂了。二氧化碳溶于水，还会和岩石中的矿物质，尤其是硅酸盐反应，产生碳酸钙，即石灰石。在水深不足4米的浅海区域，这些化学反应尤为显著；金星与地球体积几乎相同，而金星大气中的二氧化碳，与地球上所有被锁在岩石中的二氧化碳含量几乎相同，这绝对不是巧合。

这还没完。水的温度越高，岩石风化得越快。如果地球变暖一点，大气中的二氧化碳就会多被岩石吸收一点，温室效应因此减弱，地球会降温。随着温度的降低，风化作用又会变慢，大气中的二氧化碳会多一点，让地球再升温。这就是负面反馈的绝佳例子：无论温度如何变化，自然总能将其调整回去，维持长期的稳定。这个现象与板块重构的关系，在于风化产生的物质会进入大海，变成海底的沉积物。海底的传送带还会将其运至隐没带，塞入地壳下方，与熔融的物质混合在一起。这个过程会释放一部分二氧化碳，释放的二氧化碳再通过隐没带的火山活动回到大气中。但这个过程造出的山脉会促进降水和风化，在陆地上形成碳酸岩，再将其带回大海。板块重构的效果就是加速了整个反馈循环，让其能够快速调整温度，避免出现极端气



候。这个过程非常有效率，如果地球逐渐移至火星的轨道，大气中二氧化碳的浓度会达到现在的12000倍，通过极强的温室效应维持地球的温度，让液态水和生命都能存在。

不过这一切的前提，都是地球表面要有薄薄的一层水，让陆地能够从水中升起。即便地球表面全是深海，我们这样的生命形态进化的舞台——陆地，还是会出现。考虑到太阳系诞生不久后，地球就受到了撞击，有了“天外”来的水，这一点很有可能。不过没有了浅海，陆地上的物质就没法通过一系列化学反应产生大量的碳酸岩。随着太阳温度的升高，地球会不断升温，直至海水蒸发殆尽。不过如果海水减少很多，陆地面积增加很多，温度又会剧烈波动，因为陆地升温、降温的速度比大海快。而陆地上的风化现象又会大量吸收二氧化碳，让地球冷却，产生大量冰川。

在现实中，生物也加入了这个过程，因为生物能促进陆地上的风化作用，还有许多水生生物利用碳酸盐形成自己的外壳，死后又回到海底；与其他白垩悬崖一样，英国多佛著名的白崖就是由无数贝壳的残骸构成的。詹姆斯·洛夫拉克对有生命的行星上这一系列过程之间的作用研究得非常透彻，他在自己的书里进行了详细的阐述。不过，关键在于即便加入了其他因素，地球如果没有板块重构，也还是无法在几十亿年间维持适宜的温度，让液态水一直存在，让我们这样的生物充分进化。地球有可能变成炎热的沙漠星球金星，也有可能变成月亮一样的冰冻星球。

板块重构对维持地球的稳定至关重要，上面的事例都是绝佳的例子。但对于生命而言，板块重构还有一个重要的角色，就是促进改变。想象一下地球这么大的星球，既有海洋又有大陆，但大陆不会漂移、山脉不会诞生、气候不会变，会怎么样呢？地球会被锁定在这种状态。生命有可能出现，但每个物种都只能适应特定的生态环境，因为不需要改变或进化，只需要越来越适应当下的状态。地球上的生命

存在了很久很久，地球也的确有过类似的状态。但各个大陆板块碰撞过，产生了新的山脉，改变了降水的规律，让生活在不同大陆的、相当于在不同世界的物种接触、竞争。陆地也曾分裂过，产生了不同的生态环境，让同一物种演变出两条进化道路，分别适应各自的条件。

查尔斯·达尔文通过仔细观察加拉帕戈斯群岛上，相似的鸟类物种如何以不同的生活方式适应不同的条件，对进化论有了深刻的理解——自然选择。如果所有岛屿的环境都一样，鸟类就会适应同一种生活方式，达尔文也不会观察到任何区别。

深海是受板块重构影响最小的区域，同时也是物种最单一的区域，这并不是巧合。我在后文会详细阐述，我们能在大陆漂移不断改变着地球气候的时代，从非洲进化、再通过板块重构迁移至各个大陆，这也不是巧合。

总之，我们可以认为，地球如此特殊，板块重构是最重要的一个因素。加州理工的大卫·史蒂文森也认为，行星上的“板块重构既不是必然发生的，也并不常见”。但地球有板块重构，其中最重要的因素就是月球，月球的诞生给地球留下了薄薄的地壳，潮汐力作用使地球内部升温，在地球早期就启动了板块重构。月球同时也是行星稳定器，防止地球过度倾斜，甚至还帮我们挡住了部分来袭的陨石，因此地球上之所以能进化出科技文明，最关键的因素就是月球。而月球这样的卫星很罕见。太阳诞生后3亿~5亿年，产生了月球的那次撞击一定在太阳系中扬起了不少尘埃。但天文学家们通过斯皮策红外太空望远镜观测与月球诞生时的太阳年龄差不多的恒星时却发现，400颗最有希望的恒星中，只有一颗周围出现了类似的尘埃，而且如此剧烈的撞击不一定能产生巨大的卫星，寻找生命的希望就更加渺茫了。考虑到地球-月球系统的罕见程度，我们在银河系中找到其他文明的可能性进一步缩小了，可是导致人类存在的诸多特殊因素，我们还远没有讲完。

## 第六章

# 寒武纪生命大爆发有什么特别的

### （一）：偶然与趋同

地球上生命的故事，也是一个死亡的故事。不仅仅是个体的死亡，更有物种的消亡。这是自然选择下进化的关键特征。充分适应了环境的个体会繁衍兴旺，留下许多后代；而未充分适应的个体则会很早死亡，留下很少的后代。如果这就是进化的全部，地球这样的行星上只会有寥寥几个物种，各自适应了自己的生存环境，而这样看来，进化又可以说是停滞了。但进化还不只这些。环境会变，旧的条件会消失，新的条件会出现。有时，没“犯错”的物种也会灭绝，比如在巨大的陨石撞击地球时。但有些物种眼里的灾难，在另一些物种眼里却是机会，物种因此变得多样，灭绝物种的空当也会被填上。这个现象的具体过程及其长期影响，专家们还一直在争论。哈佛大学的史蒂芬·杰·古德为一个极端理论频频发声，而剑桥大学的西蒙·康威·莫里斯则从另一个极端予以回应。在外人看来，真相应该吸收、融合双方理论中的关键点，处在两个极端之间。

## 寒武纪生命大爆发

这场争论的背景，是我们从化石中发现，约5.7亿年前，复杂有机体、现代多细胞生物的爆发式增长。多细胞生物的这次爆发增长意义非凡，已经被地理学家们作为地质记录上的里程碑，即地理学中最重要“时间戳”。这次事件标志着寒武纪的开始，而寒武纪约结束于4.85亿年前。寒武纪是古生代的开始，古生代一直持续至约2.25亿年前，之后是持续至6500万年前的中生代，以及一直延续到现在的新生

代。地球上动植物群体发生的明显变化，就是各时代之间的分界点。但寒武纪生命大爆发之前，整整35亿年的时间，在地理学上只属于一个纪元——前寒武纪元，那段时间生命形态没有发生明显变化，大海中全是单细胞生物。

地球上有了生命之后至少30亿年才发生寒武纪生命大爆发，这似乎让我们在银河系寻找其他智慧生命的希望变得渺茫了。即使不看38亿年前就存在生命的间接证据，我们发现的细胞化石也有36亿年历史了。这些单细胞生物还生活在地球上，形态几乎没有改变，可以说是地球生命史上最成功的物种了。至少22亿年（如果考虑间接证据就是24亿年）以来，地球上的所有生命都是这样的单细胞形态，即原核生物，一个个细胞包裹住生命的化学物质，比如，DNA和蛋白质，它没有细胞核及其他结构，不像我们这样的真核生物。

真核生物的细胞比原核生物更大，除了有包裹住DNA的细胞核，还有其他结构，比如植物细胞中进行光合作用的叶绿体，还有通过一系列化学反应给细胞供能的线粒体。马萨诸塞大学阿默斯特分校的琳恩·马古利斯认为，真核生物细胞中的各个结构，其实是由一个大细胞中共生的众多原核生物演变而来的。这个系统一定有其进化上的优势，不然也不会进化出能讨论这个问题的我们。真核细胞的化石记录最早只能追溯到14亿年前。但在那时，我们这样的生物体也不是一下子就出现的。

我们在地层中发现了两种多细胞生命存在的证据，在前寒武纪晚期到寒武纪早期，约在寒武纪生命大爆发之前1亿年。这些生命丝毫不像现代的动物。一种生命叫作埃迪卡拉，似乎是扁平的软体动物，身体像被子或床垫一样，分成一块块的结构。古德认为这样的有机体无法进化出复杂的内部结构，如果埃迪卡拉统治了地球，那“动物就会屈服在床单和薄饼的淫威下，这大概是有自我意识的生物中最弱的形态了”。

壳类生物存在的证据，最早可追溯至寒武纪早期；但这些生物也不像现代生物的祖先，与埃迪卡拉也不是同一个物种。这类生物被称为寒武纪最早期生物，古生物学家将其定义为“小小的壳类动物”。寒武纪生命大爆发后，埃迪卡拉和寒武纪最早期生物都消失了，取而代之的是化石记录中的各种新生物，包括最大的动物分类——动物门。因此进化的道路领着我们开启了寒武纪生命大爆发。那我们是怎么一路走来的呢？

## 伯吉斯页岩

我们对寒武纪早期动物的了解，大多来自加拿大洛基山脉上伯吉斯页岩中发现的化石。这些动物的残骸是约5.3亿年前，由热带浅海冲刷至悬崖底部的沉积物，1亿年之后动物才会迁移至陆地上，1.5亿年之后脊椎动物才会迁移至陆地上。伯吉斯页岩不仅含有容易形成化石的壳类生物，还保留了软体动物的残骸，因此尤为重要。其他年代类似的地层中发现过的化石，伯吉斯页岩中也有，比例也相近，但其他地层中没有软体动物化石。软体动物的“硬”化石只占伯吉斯页岩中所有动物化石的5%，这也从侧面说明，如果只有骨骼、外壳化石，古生物学家的研究就会受到很大的限制。这些页岩似乎很好地留存了当时动物的“快照”。康威·莫里斯强调，伯吉斯页岩中发现的骨骼化石，虽然比例略低，但与其他位置同年龄地层中发现的骨骼化石相同，说明伯吉斯页岩中的动物并不是独自变异出来的，而是寒武纪主流生物的一部分。史蒂芬·杰·古德基于剑桥大学西蒙·康威·诺里斯及其同事对当时动物的重构，创作了《精彩生命》一书，让这类动物被大众知晓，不过古德和康威·莫里斯对于这些证据在进化论层面的意义的理解大相径庭。

证据本身很明确。寒武纪早期的生物形态多种多样，结构也千奇百怪，与寒武纪之前或之后的生物残骸几乎没有共同点。我们发现了

超过70000个物种，这里只举几个例子：内克虾，像是长了壳的脊椎动物或是长了鳍的甲壳动物；一种很奇怪的生物，康威·莫里斯为其取名怪诞虫，身体很长，七对足像高跷一样，一端较大，应该是头部，背部伸出七根长长的触须，应该是尾部的位置还有六根短触须，前端没有触须的部分向上弯起；欧巴宾海蝎，长了五只眼睛，躯干最前端是一根爪子，长相太过怪异，以至于古生物学家哈利·威丁顿在牛津的学术会议上放出示意图时，听众都笑了起来。

不过，理解了我们为何存在之后，你会发现寒武纪生命大爆发进行的速度，比当时物种的多样性更重要。早在19世纪，地理学家就知道寒武纪早期发生了奇怪的事，这也是为什么他们把之前所有的历史都归为前寒武纪。起初，地理学家没有发现任何前寒武纪生命的痕迹，这让查尔斯·达尔文等人非常担忧。他在《物种起源》中谈到了这个谜题，并承认寒武纪早期突然出现的复杂生物体，是反对物种进化论的最有力证据。但我们现在已经可以一路追溯到最初的原核生物，达尔文的担忧也就不复存在了。我们面对的谜题是，简单生物是如何飞快地进化为复杂生物的一一当然不是在一夜之间或几周之内。在古生物学家眼里，“爆发”意味着几百万年内，生物多样性的数量增加。在澳大利亚弗林德斯山脉的峡谷中，有一片区域的地层受到地质作用产生了倾斜，地层不再是垂直叠加，而是水平裂开，康威·莫里斯借助这片区域解释了生命爆发的可能性。在峡谷中前进，就像是进入了时间的长河。首先经过的就是含有埃迪卡拉化石的岩层，之后埃迪卡拉消失，它被更重要的化石骨骼取代。这就是对寒武纪生命大爆发的最佳展现。

接下来是对寒武纪生命大爆发的戏剧性展示。伯吉斯页岩最重要的特征，就是既含有骨骼又含有软体动物残骸，这让我们有理由认为后来地层中出现的多种骨骼残骸，正是动物进化大趋势的体现。寒武纪生命大爆发是一次大进化，更是化石记录中最显著的一次进化，用康威·莫里斯的话说，“是结构、生态和神经上发生的显著变化留下

的有力证据”。下一章我们会讲到这次生命大爆发可能的诱因；不过还是先看看寒武纪多种多样的生命形态是如何进化成了今天的状态，又如何产生了科技文明。

## 偶然

有张很多人熟悉的图片，描述了地球上的生物是如何从单个细胞进化出众多种类的，物种像树干上伸出的树枝一样不断分叉，最后形成一片壮丽的树冠。考虑到最初的几十亿年里，地球上只有一种生命形态——漂浮在海上或是海洋中的单细胞生物，这棵树的“树干”应该占据很大的比例；但大概的样子你应该能想象得到。简化一下，这张图片就像一个倒立的锥形，从一个点延伸出上面众多的生命。同一物种扩张至不同的环境中并适应了环境，多样性便由此产生，而且会随着时间推移越来越多样。

但这个观点也有反对意见，最有名的就是史蒂芬·杰·古德在自己那本很有影响力的书《精彩生命》中提出的观点。有影响力不一定就正确，但古德的观点还是有很多人知道，因此我们最好也了解一下，并看看这个观点究竟错在何处。

古德将上面提到的图片完全倒置，成为一个正立的锥形，越向上越窄。他认为将物种进化的过程比为下宽上窄的锥形更合适。在他描绘的图片里，锥形底部代表着伯吉斯页岩中记载的、寒武纪初期极其多样的物种，而物种多样性在减少，说明早期“实验”的多种形态、生存形式都消失了。这并不意味着物种的数量减少了。古生物学家认为物种数量依然在不断增长，但是否有一大批物种都可以归为同一类，有着同一种身体构造（比如，哺乳动物）呢？古德认为，身体构造的种类也正在减少。

如果把古德的理论也描绘成一棵树，那应该是圣诞树，底部的树干是前寒武纪时期单一的单细胞生命，然后进入寒武纪，多样性暴增，随后一点点地变窄。无论寒武纪初期多细胞生物出现的原因是什么，那时丰富多样的物种都像是一次次进化上的实验，现在只剩下了些许踪迹——用古德的话说，是“物种刚变得多样，就把所有可能的身体构造都尝试了一遍”。这些实验逐渐消失，生物开始定居生存，但只剩下寥寥几类。古德认为，从“门”这个动物界之下最大的分支的数量就可以看出这点。目前，动物界约有35个门。但古德认为，伯吉斯页岩中发现的许多动物都无法归入现在的任何门中。他的书中有这样一段关键的话：“如果根据不同的身体构造划分，伯吉斯页岩中有15~20个独特的门。我们必须充分理解这个事实……”古德还认为，这15~20个门并没有后代活到今天，即原本动物界约有55个门，其中20个，即接近一半都消失了。

这个声明充满争议，不过我们先把它放在一边。古德又进了一步，他说这么多门之所以消失，绝不可能是因为简单的“达尔文式”进化，即对所在环境适应得最好的物种存活下来，其他的都会灭绝。古德认为运气也占了一定的比重，或者用他的话说，“偶然性”决定了哪些门的物种能存活下来、哪些又会灭绝。换句话说，一个门的物种因为基因缺陷灭绝的概率和因为运气不好而灭绝的概率并没有实质性差别。导致它们灭绝的厄运可能是陨石撞击，或是大陆漂移引发的气候变化。用古德的话说，“鱼儿对水里的环境适应得再好，等池塘干了它们也都会死”。

正是对偶然性的认可，让古德在他的书里提出了最有冲击力的观点。如果将地球上的生命史“重放”一遍，从伯吉斯页岩中的生物刚出现时开始，重新开始整个进化过程，世界还会变成今天这样子吗？我们这样的生物和类似的动植物还能一同生活在地球上吗？还是说我们的祖先会意外灭绝，世界被许多古德认为已经灭绝的物种占据？他的回答十分肯定：“每次重放，物种进化的过程都会与实际路线大相



径庭……在早期做任何改动，即使在当时没有明显的后果，之后的进化路线也会大不相同。”

古德由此得出结论：人类自寒武纪生命大爆发以来的进化过程，其实是极小概率事件。他还用当代的例子说明，猿类并不一定能进化出智慧。

很多人对哺乳动物有这样的认识：在地球的生命史中，恐龙主宰了几亿年，那段时间哺乳动物只能藏在树丛中或是地下，甚至昼伏夜出，只为了避开恐龙。直到6500万年前恐龙灭绝后，哺乳动物才有机会扩张、演变，占据了恐龙留下来的生态环境，随后出现了猿类必然的“崛起”，以及我们人类的登场。不过古德指出，如果5000万年前有外星生命观察地球，他们绝对无法预测到哺乳动物的崛起。那时，恐龙的近亲食肉鸟类在欧洲和北美洲徘徊。有些鸟类甚至有两米高，头部巨大，喙部有力，爪子十分锋利，但翅膀却发育不良。这些鸟更像迷你版霸王龙，而不是当代的鸟类。哺乳动物和鸟类为了继承恐龙的地位而竞争，但我们不知道哺乳动物为何胜出，鸟类为何失败。古德认为原因就是运气，即他认为的偶然性，而不是哺乳动物具备任何进化上的优势，他还用南美洲举例，支持自己的论点。

5000万年前，南美洲还是一个巨大的孤岛，再过几千万年才会和北美洲连通。那时食肉鸟类统治着南美洲，但后来哺乳动物通过巴拿马海峡南下，这些鸟类基本灭绝了。但既然鸟类统治了一片大陆，哺乳动物统治着另一片大陆，古德就有理由认为这都是运气使然，而非进化上的优势。

不过南美洲的食肉鸟类还有个特征，可以让我们从另一个角度理解进化。这些鸟类虽然与徘徊在欧洲、北美洲的迷你霸王龙鸟关系不大，但还是有近三米高，头部很大，脖子粗壮，翅膀发育不良，爪子也很锋利。这就是趋同进化的例子。物种受到的进化压力相同，因此在欧洲、北美洲具有优势的身体结构，在南美洲也有优势。在古德看

来，趋同进化只是偶然事件，并不重要。但在康威·莫里斯看来，今天的我们之所以存在，核心因素正是趋同进化。

## 趋同

古德的论据，很大程度上来自他认为伯吉斯页岩中的物种全都没有延续到今天。古德并没有亲自分析过伯吉斯页岩。他也承认过，自己的解读是基于西蒙·康威·莫里斯与同事对当时生物的重构。但少有人知道的是，古德的解读也是基于康威·莫里斯等人早期的研究工作的。古德在创作《精彩生命》时，是20世纪80年代后期，康威·莫里斯等人还在努力分析、解读发现的化石。古德的书出版后，伯吉斯页岩又有了新的发现，包括对页岩中的典型生物怪诞虫的新认识。在中国、格陵兰岛及其他地区同一年代的地层中也发现了类似的生物。这些都让康威·莫里斯决心创作自己的书《造物的熔炉》，这本书于20世纪末出版。他对这些证据又是如何解读的呢？

康威·莫里斯认为，目前我们得到的证据并不支持古德提出的“正立锥形”的比喻。虽然伯吉斯页岩中的许多动物初看起来无法归类，但剑桥大学的学者们仔细研究后，发现这些奇异的生物并不属于已经灭绝了的门，反而可以让我们看到现在的各个门是如何进化的。用康威·莫里斯不喜欢的说法，这些生物是进化树上“缺失的环节”，而非单独的枝干。他甚至为埃迪卡拉在这个体系中找到了位置，他将其归在了刺胞动物门下，和现在的水母一起。

之前我们对于生物多样性的两种认识，即倒立的锥形和正立的锥形，康威·莫里斯都不同意。他之前还认为在寒武纪初期，物种没有出现过爆发式增长，但后来又动摇了。他现在认为寒武纪初期，动物确实十分多样，之后很长一段时间内，生物多样性几乎没有变化，偶尔会出现增长，当然没有寒武纪初期幅度那么大，即“进化的路上偶尔会有创新，产生的结果在生物圈内扩散开来，引起了剧变”。小幅

度的多样性爆发经常与地球环境的变化有关，与大陆漂移引起的地理变化有关，或是与陨石撞击等有关；这为我们研究寒武纪生命大爆发的起因提供了重要线索，下文我们会讲到。

康威·莫里斯的核心论点之一，就是地球生命的连续性与普遍联系性对人类起源的启示。从最基本的生化角度看，人类身体的所有细胞以及地球上所有其他活着的细胞与“原始”的细菌细胞工作原理是相同的，这有力地说明了地球上所有生命都来源于同一个祖先。人类最显著的特征——大脑，虽然体积很大、功能很强，但基本构造与原始鱼类大脑并无区别，这说明大脑的构造至少5亿年前就出现了。而在格陵兰岛上3.7亿年前的鱼类化石中，也发现了类似我们手指、脚趾的构造。

从这些例子可以看出，即便只有一种身体构造，进化也能发展出众多可能。举一个离人类较远的例子，花园里的蜗牛，还有帽贝、牡蛎甚至自由游荡或是用底部行走的章鱼，都属于软体动物门，都是从同一种软体动物进化而来的。章鱼这个物种尤为有趣，它们进化出了高级大脑，还有“相机”似的眼睛，但进化路线与人类又大相径庭。康威·莫里斯用进化学的术语说，“事情并没有无限多的解决方案。生物虽然众多，形态却寥寥无几”。趋同进化理论就应运而生了，认为我们这类智慧生命的出现，光有运气是远远不够的。

前面已经提过了趋同进化的例子，即南美洲、欧洲和北美洲的食肉鸟类，几乎同时进化出了类似的身体结构，适应相近的生存环境。还有许多发生在不同时段例子。有种叫作鱼龙的古生物，在2.45亿年前至9000万年前生活在海里，在侏罗纪（2亿年前至1.45亿年前），鱼龙种族尤为兴盛。它们的祖先是呼吸空气的陆地生物，进化后又回到了海洋。鱼龙的体长可达两三米，繁衍的方式甚至还是胎生，而非卵生。鱼龙的样子很像现代的海豚，我们甚至可以推断出它们的生活

习性。进化的压力让鱼龙这样的身体构造在侏罗纪适应得很好，也让海豚在当代，即第四纪，适应得很好。

康威·莫里斯还提到了其他例子。南美洲有一种长着剑齿的大型动物，很像大家熟悉的剑齿虎。它虽然外观像猫科动物，却是从有袋动物进化来的，与袋鼠的关系更近。而袋鼠的故乡澳大利亚，也是袋鼯的故乡。袋鼯像鼯鼠一样，前肢有力，方便挖掘，但由于长期生活在地下，视力不佳。他用这个事例和《生命的解答》中提到的其他事例强调了：我们一次又一次地看到，生物形态的进化殊途同归。如果生命的进化史真的从寒武纪生命大爆发开始重放，即便“鲸鱼的形态与其他形态同样有可能出现，但海洋中更可能，甚至是必然会出现通过过滤海水获取食物，而且能飞速游动的生物”。约翰·梅纳德·史密斯，一位曾做过航天工程师的进化生物学家，曾经对我说过类似的理论，他认为有种“工程设计图纸”限制了生命形态的种类，因此“相机眼”才不止出现了一次，而是至少有六次。进化的可能性是有限的，而进化问题的答案也总能在许多种生物中找出。这就有力地证明了生命的确是通过适应所在环境而进化的。

但是能开采金属矿、建造射电天文望远镜和宇宙飞船的智慧生命，是进化道路上的必然还是只是一种可能？康威·莫里斯进一步延伸了趋同进化理论，认为自寒武纪生命大爆发后，智慧生命就必然会出现。这与古德的观点正好相反，他认为智慧是很难进化出来的。但对于希望联系外星人的人们来说，康威·莫里斯的观点并没有什么帮助，因为他认为生命本身“就是一个极其偶然的結果”，因地球早期的某件事而注定。在他看来，只要有了生命，智慧就是必然结果；但地球可能是唯一有生命的星球。在我看来，地球上生命的历程，以及人类的出现，是偶然和趋同共同作用的结果。但这对外星人爱好者来说，可不怎么乐观了。

### 第三条道路

现实世界中，科技文明的诞生既需要偶然，也需要趋同。典型的偶然性事件就是“恐龙之死”，这件事目前普遍被认为是6500万年前一颗直径10~12千米的陨石撞击地球导致。后文会详细讲述这件事；最关键的是，到灭绝时，恐龙已经作为统治地球的大型生物存在了1亿多年，而这期间哺乳动物的数量寥寥无几。正是恐龙之死给了哺乳动物机会，虽然鸟类也分享了一些这个机会。至于趋同进化，鱼龙和海豚的例子再清晰不过了。

但恐龙之死、当时许多其他物种的灭绝和“白垩纪灭绝事件”这个标志着一个纪元结束的事件，三者并不是孤立的。化石记录显示，寒武纪之后出现了好多次不知原因为何的大规模物种灭绝事件。最严重的物种灭绝事件被归为“五大生物集群灭绝事件”，白垩纪灭绝事件是离我们最近的一次，但不是最严重的一次。

五大生物集群灭绝事件中，海洋动物物种至少灭绝了65%。之所以选择海洋动物，是因为它们的化石比陆地动物保存得好。但门似乎比物种更容易留存下来。灭绝发生之前，一个门可能包含许多种；灭绝事件之后，无论有多少种消失了，只要还有一个存在，门就依然存在。五大灭绝事件中，最严重的一次发生在约2.25亿年前，标志着二叠纪的结束，那时95%的海洋动物物种都消失了。复杂的多细胞生物几乎退出了进化的赛道，也正是这次灭绝，为恐龙后来的主导地位打下了基础。五大灭绝事件还包括4.4亿年前标志着奥陶纪结束的灭绝事件，3.65亿年前标志着泥盆纪结束的灭绝事件，那时我们的祖先脊椎动物还没有登陆，以及2.1亿年前标志着三叠纪结束的灭绝事件。

虽然白垩纪灭绝事件与陨石撞击直接相关，但灭绝事件的发生并没有明显的规律。不过以前发生过的事，一定还有可能再发生，而智人，或是其他星球上刚刚诞生的文明，也都像恐龙一样，无法避开这样的灾难。而且，科技文明要发展到可以星际旅行，甚至只是星际通信的程度，还有其他限制因素。

对于五大灭绝事件，以及化石记录中其他规模更小的灭绝事件的原因，最合理的推测就是因大陆漂移引起的气候变化。比如，二叠纪灭绝事件发生时，地球上所有大陆都连在一起，即泛古陆，从南极一直延伸至北极。地球上可供海洋生物生存的浅海非常少，远离大海的陆地内侧也十分干旱。

古生物学家史蒂芬·斯坦利专门研究物种灭绝，他认为全球降温可能是灭绝的主要原因，因为“全球温度变化导致诸多物种灭绝，已经有了先例”。在冰川期，生物在高纬度地区完全无法生存，栖息地逐渐缩小至赤道附近。如果目前的热带地区不再有热带气候，很多物种都会灭绝。用古人类学家理查德·利基的话说，进化“无法预测未来”。他还将大规模物种灭绝描述为“改变生命形态的主要创造力……大规模物种灭绝不仅仅重置了进化的时钟，将其拨回了一点儿，还换了表盘，创造了生命的模式”。

生命模式最大的改变出现在寒武纪初期。现在我们知道，寒武纪之前的海洋里遍布着生物，从地球诞生到现在，85%的时间里它们都生活在地球上。如果环境没有改变，动物的形态也很难发生大的变化。不过非凡的事件自然有非凡的原因。寒武纪生命大爆发是化石记录中非凡的事件，显然也有着非凡的原因。考虑到斯坦利的观点，我们的目光自然就转向了极端气候变化。

1989年，古德在书中将生命史最大的两个谜题总结为：

（1）多细胞生物为什么出现得这么晚？

（2）前寒武纪的化石记录中，为什么找不到复杂生物的直接祖先？

10年后，康威·莫里斯从稍有差异的角度说：“我们可以很确定地说，埃迪卡拉纪<sup>(1)</sup>之前的动物都很小，体长仅几毫米……而究竟是

什么让它们演变成了埃迪卡拉那样的动物形态，还引发了寒武纪生命大爆发，依然无法下定论。”再过10年，我们就发现是6亿年前，地球上一系列剧烈的环境变化，对这些事件有了些许的贡献；我认为这些事件都可以与当时太阳系内部的变化联系起来。我们能存在的原因之一也许就在金星的表面。

---

[\(1\)](#) 约为6.35亿至5.41亿年前，其后就是寒武纪。——译者注

## 第七章

# 寒武纪生命大爆发有什么特别的

### (二)：温室金星与冰雪地球

地球上出现生命之后，两个意义最重大的事件就是约2.5亿年前真核细胞的出现，以及约6亿年前多细胞生命形态的爆发导致众多动物的出现。有强力证据表明，这两件事都是月球诞生之后由地球上最剧烈的两次环境变化引起的，就是当时让热带都结冰的冰川期。一次也许还是巧合，但如果进化史上两个最重大的事件都在最剧烈的环境变化之后发生，显然说明其中存在着因果关系。用布拉克内尔夫人的句式就是：一次冰川期后，物种进化有了大的飞跃还可以认为是巧合；两次都这样，似乎就有规律了<sup>(1)</sup>。虽然我们不知道环境剧变是如何引发进化飞跃的，但我们在最近几亿年中规模更小的物种灭绝事件里也能观察到其中的联系。

### 极度深寒之后

这两次“冰雪地球”事件，都通过冰川在远古时期的岩石上留下了印记，而且这两次事件使整个陆地都结冰了，还有证据表明绝大部分海洋也都被冰覆盖。这是很危险的状态，也威胁着地球上的生命。整个地球结冰之后，会将大部分太阳的热量反射出去，冰雪非常难融化。如果冰川覆盖了陆地，即使不考虑低温，可供生命栖息的区域也非常有限；如果冰川覆盖了大海，阳光就无法射入海面，光合作用或是其他需要耗能的反应就无法进行。生命在散落各处的水坑、泥潭里挣扎，适应着各自的小环境，也进化出了多样性。真核细胞很可能只



在泥潭里“发明”出来了一次，然后等冰川融化后散播到了地球各处。

但这样一颗“雪球”如何融化呢？唯一的可能性似乎就是温室气体，尤其是二氧化碳的积累，将太阳的热量留住，使表面温度升高至冰雪可以融化的程度。超过了这个临界值，冰雪不断融化，反射掉的热量越来越少，地球也进入一个良性循环，结束了雪球的状态。

就我们的了解，今天地球也是这样调节温度的。二氧化碳等温室气体从火山中释放出来，进入大气层。但二氧化碳溶于水，流过岩石表面的水会引发风化作用，将部分二氧化碳以石灰石的形态固化在岩石中，包括石灰岩溶洞里的钟乳石和石笋中。有些生物会将空气中的二氧化碳固化在外壳中。地球的温度升高一些，风化作用就加速一些，空气中的二氧化碳就少一些，温室效应也削弱一些，让地球降温。地球的温度降低一些，风化作用就减弱一些，空气中的二氧化碳就多一些，让地球升温。目前，至少在人类活动干预气候之前，这些负面反馈循环可以在较小的范围内调节地球的温度。但在雪球状态下，火山会继续释放二氧化碳，风化作用几乎不存在，温室效应会一直加强，直到冰雪开始融化。随着气温升高，冰雪减少，反射至太空的太阳热量也减少，温度会继续升高，可供生物栖息的区域也增加了，从原来星星点点的区域剧增至整个地球。整个融化过程需要几百万年，甚至可能达到两千万年。

冰川融化的这段时间，生命在海洋中扩散开。大气中的二氧化碳十分充足，恢复的降水也会将陆地上的养分带入大海，光合作用会急剧增加，让大海中的有机生物剧增，就像覆盖池塘的绿藻一样，还会向大气中释放大量氧气。25亿年前这次氧气剧增的直接后果，可以在世界各地的岩石中找到，这些岩石中都含有大量氧化铁，是含铁化合物与空气中的氧气反应生成的。这可以认为是雪球状态结束后，整个世界都“生锈”了。空气中第一次有了如此充足的氧气，相关的进化

也随之而来。有些生物无法适应，就灭绝了，其他生物逐渐适应，学会了利用氧气，就活了下来。不过在我们看来，第一次雪球状态的关键作用是让真核生物崛起了。没有当初的那颗大雪球，我们就不会在这儿。

但25亿年前地球为什么会结冰？简短的回答是，我们不知道。这个事件太过久远，我们很难发现起因的证据。还有个不全面的解释，就是板块重构的影响。地球还年轻时，陆地很少，而没有陆地，雪就无法累积成冰层。雪一落在陆地上，就会反射太阳的热量；而雪一落入大海就会融化，除非大海也结冰。而大海结冰的温度，要比能产生降雪的温度低许多。但这只能解释雪球状态为什么没有更早出现。25亿年前究竟是什么导致了地球变成雪球，依然是个谜。

不过，第一次雪球状态之后的地球上，板块重构起了很重要的作用，这是毋庸置疑的。两次雪球状态之间，生命之所以能繁衍兴旺，原因之一就是地球上的陆地面积逐渐接近了今天的水平。当时虽然陆地上还没有生命；但大陆的周围环绕着浅海，而阳光可以洒遍浅海，引发光合作用，陆地上的营养成分也被冲刷进入海中，因此浅海非常适宜生命生存，伯吉斯页岩可以作证。但由于我们缺少那个时代的数据，专家们还无法确定第二次全球范围的冰川期到来时，大陆究竟是什么状态，不过这次冰川期——地理学家将其称为斯图尔特冰川期——的时间我们已经可以确定了，在7亿多年之前。

斯图尔特冰川期持续了至少500万年，结冰的区域一直延伸到赤道。但既然有真核生物挺了过来，那地球一定没有彻底冻结。地面上一定还有零星的池塘、泥潭，还能照到阳光，而这次的冰川融化之后，第一批动物出现了。

佛罗里达大学的约瑟夫·米尔特和奥斯陆大学的特隆德·托斯维克梳理了一下有限的的数据，发现8亿~7亿年前，地球上绝大多数的陆地似乎都集中在低纬度地区。这个状态可能会导致地球降温。当时的

陆地上还没有植被，光秃秃的岩石比海水对太阳光的反射效应更强，因此低纬度地区的陆地确实会让地球降温。但地球会一直降温到全部冻结吗？似乎不太可能，因为陆地如果都集中在赤道附近，两极地区就经常有低纬度地区的暖流流过，即使冬天海水也很难结冰。不过，如果陆地被冰雪覆盖，绝大部分太阳的热量都被反射出去，地球应该可以降到足够低的温度，再次进入雪球状态。计算机模拟发现，赤道南北30度以内的范围结冰后，冰川会向高纬度地区扩散，进而覆盖全球。虽然有些不符合直觉，但冰川确实是由低纬度地区<sup>(2)</sup>开始扩散的。这时只需要一个引子，只要能降低赤道地区的温度，达到产生降雪的程度就行了。听起来似乎不太可能，但当时一定发生了什么，而由于没有确凿的证据，大家纷纷进行了推测。我只提两个推测，一个是最早出现的，还有一个是我最喜欢的。

## 倾斜天平

第一个推测是雪球状态期间，地球的倾斜角更大。20世纪70年代就有人认为这是斯图尔特冰川期出现的原因，那时我们还没发现地球曾经整个被冰川覆盖。

地球自转轴的倾斜角增大至55度，对于热带降温非常有帮助。这种情况下，两极接收到的热量比赤道多，如果两极地区有陆地，夏季的温度甚至可能让水沸腾。又一个问题出现了：即便那时热带结冰，冰川又是如何扩散到两极的呢？自转轴倾斜可以解释热带结冰，但让地球变成雪球似乎说不通。我们先不看这个问题，因为这个模型本身还有其他问题。

比如，7亿年前，地球的倾角为什么会变化？后来又怎么变了回来？毕竟有月球将地球稳定在现在的倾斜角——23.5度，可以避免倾斜角发生大的变化。我前文还提到月球的稳定作用对我们的出现和生存至关重要。但这还没完。如果产生月球的那次撞击让地球的倾角处

在60度~90度，那即便后面有了月球的作用，地球还是可能在这个范围内剧烈晃动。因此，如果斯图尔特冰川期是倾角过大引起的，那大约6亿年前，地球还要一下子变回现在的倾角，让月球能够继续产生稳定作用。

地球为什么会这样还是个谜。有人认为地球倾角很大时，绝大多数大陆都会漂移至南极或北极中的一处，让地球的质量分布不均，在几千万年的时间里将其拉回现在的位置。不过，虽然前寒武纪末期，南极附近确实聚集了许多陆地，这个解释却突出了倾斜角导致地球冻结这个理论最大的瑕疵。倾斜角的改变很缓慢，但两次雪球状态结束得都很突然。这就引出了寒武纪生命大爆发之前，地球是如何进入雪球状态的解释。这个解释也有瑕疵，但比起其他解释要更完善一些。作为对比，我们先来看看导致白垩纪结束的那次陨石撞击，以及陨石撞击对生命构成了多大的风险。

## 由内还是由外

白垩纪由陨石撞击终结，这个推论的证据在20世纪80年代初期开始涌现，路易斯和沃特·阿尔瓦雷斯在世界各地的地层中，都发现了6500万年前的一层薄薄的铱。铱元素在地表非常罕见，但在某些陨石中很常见。他们通过计算得出，全球各地发现的这层铱，可能来自一颗直径约10千米的陨石撞击地球后掀起的覆盖整个地球的尘埃。这个观点一开始饱受质疑，但地理学家们在寻找这个理论的相关证据时，发现了更多恐龙灭绝时期留下来的陨石碎片。对绝大多数人来说，最关键的证据是20世纪90年代初，有人确认了墨西哥尤卡坦半岛希克苏鲁伯的一处地质特征其实是陨石坑，而且无论位置还是年龄都与理论假设吻合。

还有一点存疑。地下没有铱元素，是火山喷发将铱带到了地表。一次超大规模、覆盖全球的火山喷发似乎也能在地层中产生同样的一

层铍，而且这样的火山喷发自然会危及绝大多数生物。那时还真的有一次喷发符合条件，喷出的岩浆覆盖了印度中西部地区，产生了德干地盾。这是地球上最大的火山地质特征之一，厚度超过2000米，覆盖面积超过100万平方千米。但德干地盾并不是独一无二的。2.5亿年前，地球上发生了寒武纪以来最大的一次火山喷发之一，形成了西伯利亚地盾，并形成了二叠纪和三叠纪之间的界线。这与二叠纪生物灭绝事件刚好吻合，那时约90%的物种都灭绝了；而且我们几乎可以确定，正是形成西伯利亚地盾的火山喷发导致了那次灭绝。

因此我们可以合理地推断，德干地盾的形成与白垩纪末期生物大规模灭绝有关，类似的事件也都对地球的生命史产生了影响，科技文明的诞生之路上又多了一个障碍。而且白垩纪末期的陨石撞击时，地球上的生物似乎已经承受了德干地盾形成导致的环境变化压力。2010年，41位地理学家、古生物学家及其他领域的科学家召开会议，梳理了所有数据，并将结论发表在了《科学》杂志上，呼吁大家在接下来的20年里对这些可能性进行研究。他们发现那时的火山活动持续了150万年，远比岩石中那层铍所代表的时间长，而且白垩纪物种灭绝前50万年，火山就喷发了。那段环境并没有剧变，直到希克苏鲁伯陨石撞击发生。综合考虑所有数据信息，那次参会的科学家们认为，6500万年前一颗大型陨石撞击墨西哥才是大规模物种灭绝的主要原因。发表在《科学》杂志上那篇论文的作者之一，伦敦帝国理工学院的乔安娜·摩根是这样描述的：我们现在可以很自信地宣布，（白垩纪物种灭绝的）原因就是陨石撞击。这次撞击引发了大规模的火灾、超过里氏10级的地震，还导致了大陆滑移，产生了海啸。不过，让恐龙彻底灭绝的原因，还是陨石撞击后激起的漫天尘埃。地球因此不见天日，进入了全面的冬季，很多不能适应的物种都灭绝了。

虽然上面这段话用词很夸张，但几乎没有提到生物在陨石撞击之后面对的环境。既然这对我们的存在至关重要，我们还是来详细地看看吧。

## 典型的撞击

现在的尤卡坦半岛所在的浅海，刚好能让撞击的破坏最大化。那里的沉积物中含有碳酸钙，还有一层厚厚的、富含硫元素的硬石膏。因此撞击后会产生大量的二氧化碳和二氧化硫，其中二氧化硫在高温下与水反应生成硫酸，并以小液滴的形式进入平流层。撞击之后，硫酸还没发挥作用时，生物面临的最大威胁就是产生的热量和火灾；而跟生物即将面临的灾难相比，撞击引发的地震和海啸几乎不值一提。撞击掀起的高温物质会扩散至全球，以大约 $10\text{kW}/\text{m}^2$ 的功率加热着整个地球，持续几个小时，美国科学家杰·梅洛什将其形象地比喻为“像是把家里的烤箱调到了‘全面烤’”。这些热量足够让整个地球燃起大火，烧光所有植被，留下一层炭灰——紧挨着地层中发现的那层铱。这一层炭灰约含有700亿吨的碳元素，意味着那时地球上25%的有机生物都化为了灰烬。

大火释放的烟还会遮天蔽日，而且平流层中的硫酸可以反射掉太阳大部分的热量。地球上的光合作用几乎被完全遏制，导致很多植物死亡。而在“全面烤”之后，地球又会像乔安娜·摩根说的那样，整个进入寒冬。随着浓烟散去，大气中的硫酸全部落到地面，地球又开始升温；不过这时大气中还有大量的二氧化碳，地球会因严重的温室效应而过热。同时，地表的所有生物都会被酸雨腐蚀，尤其是大海中菊石等动物的外壳。撞击后的一系列异常还会损坏臭氧层，让太阳光中有害的紫外线到达地表。有科学家推测，撞击点对面一侧火山频频喷发，原因可能就是撞击产生的冲击波被地球表面的弧度聚焦，在对面产生了影响。

那次撞击之所以如此致命，正是因为带来了多种多样的环境影响。这个理论出现之前，科学家们还需要解释其他事情，比如一次灾难为何能同时影响恐龙和菊石两种大相径庭的生物，而鳄鱼等生物却毫发无损或只是稍有损伤。答案是陨石撞击引发了一系列灾难。陆地

上，植被的消失导致食草恐龙及其天敌食肉恐龙大量减少；海洋中，壳类生物被酸雨大量侵蚀。存活下来的生物大多体积很小，比如我们的祖先，可以躲避灾难，消耗的食物不多，或是足够幸运，生活在不大受影响的区域，灾难过后还可以扩散出去。地球上70%的物种灭绝了；但这也意味着剩下的30%有了探索的机会。但这些灾难跟变成雪球的地球相比，还是小巫见大巫。陨石撞击无法引发全球冻结。根据恐龙灭绝前后的事件看，这次撞击更可能导致全球变暖，而非冻结。但是地球以外的情况就是另一回事了。

## 宇宙云团与彗星尘埃

不计算的话，很难想象太阳系穿过宇宙中一片厚厚的云团是什么情况，云团中的物质会挡住太阳部分的热量，让地球降温，进入冻结状态。但即使是很致密的云团，每立方厘米中也只有大约100万个原子、分子，其中绝大多数是氢气分子。以地球上的标准衡量，这个密度接近于真空。而宇宙云团中只有约1%的物质是固态颗粒，直径大约0.1毫米。这样的物质几乎遮蔽不了多少阳光，没法影响地球的气候。

但有一个漏洞——如果太阳经过的致密云团，刚好是附近的超新星爆发产生的，那么大气顶端的尘埃的确可以反射足够多的热量，让地球进入雪球状态，但这也会在相应年代的地层中留下一层放射性物质，我们至今仍未发现这样的物质。

不过，太阳系穿过一片普通的宇宙云团，还是有可能导致地球进入冰川期，只不过不是彻底冻结。云团中的氢气被地球捕获，并进入上层大气。氢气分子会被拆开，跟氧气分子发生反应，生成许多种化合物，包括水蒸气。有科学家考虑过这一系列反应对平流层的影响——破坏了抵御紫外线的臭氧层；但最重大的影响，还是在高空产生了一层致密的水滴和冰晶，反射了太阳绝大部分的能量，让地球表面降温。可是，这样稀薄的云团最多只能让地球降下1摄氏度，只能起到

锦上添花的作用。宇宙中的云团无法让地球进入雪球状态；那么太阳系中的云团呢？

一颗直径10千米的陨石已经可以引发白垩纪生物大灭绝。这么大的天体很常见，但只有轨道和地球交叉的天体才有机会和地球发生撞击。这些天体分为两类：阿波罗型小行星——得名自第一颗归为此类的小行星——绝大多数时间都比我们离太阳更远，但靠近太阳时就会穿过地球的轨道；阿登型小行星——也得名自第一颗归为此类的小行星——绝大多数时间都比我们离太阳更近，但远离太阳时会穿过地球的轨道。还有第三类天体，阿莫尔型小行星，会从外侧接近地球的轨道，但不会和地球交叉。目前已知的有几十颗阿波罗型小行星，并且这个数量还在不断增加；阿登型小行星几乎一样多；阿莫尔型小行星有1000多颗，因为离我们不远，所以很容易发现。阿波罗型和阿登型小行星只有在靠近我们时才能被观测到，从已有的数据推算出直径超过1千米的这两类天体，也会有数千颗。

而这样与地球轨道交叉的天体，最大能有多大呢？爱神星是一颗形状像板砖的小行星，长35千米，宽11千米，高11千米。想想这样的天体撞击地球会是什么样吧。爱神星正是典型的阿莫尔型小行星，轨道在逐渐移动，而计算机模拟发现200万年内，爱神星的轨道就会与地球的轨道交叉。虽然太阳系内侧有许多小行星，木星也会挡掉许多外部的天体，但还是有更远处的天体——在最远的行星之外——能进入太阳系内侧。这些天体包括彗星，以及奥尔特彗星云中的冰块岩石混合天体。虽然还没得到确切证实，但许多轨道与地球轨道交叉的天体应该都是早期彗星进入太阳系后残余的岩石块，其中的冰早已蒸发或升华殆尽。如果爱神星只是一片碎片，那么会来自什么样的天体呢？

这个问题可以从两个角度解答。首先，我们可以看下现在太阳系外侧的冰块有多大。我们最远只能观测到奥尔特彗星云中这么大的天体，但在柯伊伯带中就可以观测到类似的冰块。我们现在普遍认为冥



王星不是行星，而是柯伊伯带中的天体；冥王星直径约2300千米，在柯伊伯带中都不是最大的天体。可能存在这么大的彗星吗？另一个角度是尝试用计算机模型重建不久之前在太阳系内解体的大型天体。最佳的例子就是恩克彗星留下的一条碎石带，这颗彗星得名自约翰·恩克，第一位计算出其轨道的天文学家。恩克彗星与太阳的距离在0.34~4.08个天文单位之间，最远时几乎跟木星并肩，每3.3年环绕太阳一周。这意味着恩克彗星是唯一活跃的阿波罗型小行星，经常穿越地球的轨道。20世纪，牛津大学的维克多·克鲁伯和爱丁堡皇家天文台的比尔·纳皮尔合作得出了恩克彗星与太阳周围一圈碎石之间的联系。

濒死的彗星进入这样的轨道时，每次经过太阳都会损失一部分冰，这部分冰会化为一团蒸汽消失。这样，原本由冰固定的固态物质就会逐渐释放，体积大到如小行星一般，小到同一粒沙子一样。地球经过这样一条碎石带时，大体积的石块如果不发生碰撞，沙粒一般大小的天体就会进入大气，燃烧发光，变成流星。我们每年都会穿过类似的一条碎石带，因此总有那么一晚，或是几个晚上，夜空中会出现流星雨。我们根据目测处在流星雨源头的星座为其命名。比如金牛座流星雨是因为流星看起来像是从金牛座落下来的，在每年11月初都会出现；而地球转至太阳的另一头，即每年的六月底，还会穿过同一圈碎石带，产生金牛座 $\beta$ 流星雨。从这个例子我们大概能了解碎石带有多分散，以及其中有多少物质。

1940年，当时彗星研究方面的先锋弗雷德·惠普通过计算得出，金牛座流星群的运行轨道与恩克彗星运行的轨道形状相同，只不过位置平移了一点。他发现原来的彗星是受了木星的引力作用，留下了一长串碎石，而且要达到今天的状态，至少已经过了1000年。克鲁伯和纳皮尔进一步计算后，发现最大的阿波罗型小行星中，至少有七颗与金牛座流星群有关，从其中最大的一颗，直径约10千米的火神星的运转轨道可以看出，这颗小行星是至少20000年前从恩克彗星上脱离的。他们估计与金牛座流星群和恩克彗星相关的碎石中，直径超过1千米的

至少有150块。他们在合著的《宇宙寒冬》中写道：这些碎石应该都是从一颗巨型天体上掉落的。

克鲁伯和纳皮尔将流星群中的天体全部累加起来，估计最初的天体直径至少有100千米。这与凯龙星的体积相当。凯龙星是一颗冰冻状态的天体，轨道在木星和天王星之间，与土星的轨道交叉。我们知道太阳系中有许多这样的天体，有的直径达数百千米，而且恩克彗星与金牛座流星群之间的联系说明这样的天体可以闯入太阳系内部。那这样的天体到了地球这里，会造成多大的影响呢？

## 钻石尘与“换脸”女神<sup>(3)</sup>

克鲁伯与纳皮尔对有史以来这样的彗星闯入太阳系内部后对地球的影响尤为感兴趣。他们研究了这样的天体产生的尘埃在太阳周围扩散并反射太阳光形成的黄道光现象，几千年来，黄道光的强度一直在变。他们认为这也对地球的气候产生了影响，并认为凯龙星这样的天体落入恩克彗星运转的轨道后会导致冰川期。要真的进入冰川期其实很难，但以横向思维闻名而且思考方向经常正确的天文学家弗雷德·霍伊尔提出了一种可能性，即这样的事件甚至可能导致极端的冰川期，远比克鲁伯和纳皮尔研究的结果要严重。

霍伊尔观点的核心是目前地球的气候处于微妙的平衡状态，只要稍有倾斜，就会引发一系列反馈，造成无法挽回的后果。他将气候比作一台“天气机器”，由太阳的热量驱动。海洋吸收了太阳的热量，产生了水蒸气，这些水蒸气再凝结为水滴，落在其他地方，释放当初吸收的热量。因此水蒸气可以从热带向高纬度地区传递热量。水蒸气还可以进入高层大气，到达离地面约15千米高的对流层。对流层的温度最低可达-20摄氏度，但水蒸气不会全部结冰，因为只有附着在尘埃之类的微小“种子”上，水蒸气才能结成冰晶。没有可供凝结的核心，水会一直以超冷却的蒸汽状态存在，直到温度降到-40摄氏度以

下，这时微小的水滴会突然结成冰晶，并作为凝结的核心，供其他水滴附着、结冰，形成一大片反射性极强的微小颗粒，南极地区的探险者们看到这样的颗粒后，为其取名为“钻石尘”。这种冰晶的反射能力非常强，即使在地球表面包上一层0.01毫米厚的水，并将其全部转化为直径约1微米（0.001毫米）的钻石尘，这层物质也几乎能够反射掉太阳照射过来的全部能量。将大气层中0.1%的水蒸气转化为钻石尘，就足够让地球进入雪球状态了——虽然霍伊尔得出这个结论时，地理学家还没发现雪球状态存在过的证据。

霍伊尔想找到触发普通冰川期的事件，而非雪球状态的事件。他为此建立了一个复杂的模型，假设陨石撞击地球后，让高层大气中布满了尘埃，使温度降低到足以触发雪球状态的程度。这样的撞击规模一定很巨大，也一定会留下很醒目的陨石坑。但如果被撞击的不是地球呢？

虽然地球上的生物经历过许多次灭绝，但目前我们仅证实了其中两次与陨石撞击有关，即白垩纪末期和三叠纪末期这两次。这算不上什么好消息，毕竟陨石撞击至少引发了两次最严重的灾难。要评估风险，我们可以看看金星的表面，金星由于没有板块重构，所有陨石坑都留存了下来。我们可以通过金星的表面计算一定时间内，指定规模的撞击发生的频率。而且地球与金星体积相近，距离也很近，都在太阳系内部，通过金星计算出的频率也适用于地球。我们利用环绕金星的探测器对表面进行雷达探测，目前对金星表面已经有了很细致的了解。不过，我之前也提过，金星的表面有些不对劲。与月球和水星表面相比，金星表面的陨石坑密度很低。考虑到金星的体积和年龄，上面的陨石坑太少了。

我们通过对月球、水星和火星的研究，发现金星应该每隔70万年就会受到一次大型撞击，留下的陨石坑能被探测器的雷达探测到。金星表面随机分布着约900个这样的陨石坑，因此表面的年龄约有6亿~7

亿年。这只相当于金星年龄的15%。但是太阳系的年龄超过40亿年，金星应该也是。我们还在金星表面观测到了火山活动留下的痕迹，最近的约在几百万年前，但这依然无法解释金星表面为何如此光滑。行星天文学家们给出的解释，是约7亿年前（前后5000万年以内），金星上发生了灾难性的火山爆发，表面裂开，岩浆喷涌而出，将以前的陨石坑都填满，让金星表面焕然一新，陨石可以重新留下新的印记。从地理学的角度看，这次“换脸”是灾难性的，其持续时间可能长达一亿年。

而金星的地壳非常厚，不像地球一样会发生板块重构，这与上面的假设也吻合。我们通常认为金星厚厚的地壳阻隔了大量辐射释放的热量，这些热量会不断积累，直到足够让表面裂开。这样说来，40亿年的时间里，金星可能已经“换”了几次“脸”了。

但金星还有其他奇怪的地方。金星的自转方向“错了”。假如你站在“高高”的地方“俯视”太阳系，你会发现行星都是逆时针旋转的。只有天王星几乎是平躺着旋转的，还有金星是顺时针旋转的。因此金星上的太阳从西边升起，东边落下。不过金星的日升日落相隔很久。金星的自转非常缓慢，一圈要243个地球日。这甚至比金星上的一年（225个地球日）还要久，但金星围绕着太阳旋转，一天的时间，即两个正午之间的间隔，是117个地球日。因此金星的一年只有两个金星日。行星大多逆时针方向旋转，目前公认的解释是因为诞生行星的物质团是这样旋转的。天王星和金星起初应该也朝着同样的方向旋转，因为物理法则不允许其他可能性。但如果这两颗行星都遭受过巨大天体的撞击，它们异常的自转状态就能解释了。

没人能确定金星什么时候遭受的撞击，只知道至少在7亿年以前，否则我们一定能看到那次撞击的痕迹。而且，这样的撞击可以熔化金星的地壳，释放大量岩浆覆盖表面，抹去一切痕迹。宾夕法尼亚州立大学的詹姆斯·卡斯汀指出，谷神星的直径超过1000千米，灶神星和

智神星直径都在500千米左右。他认为这样的天体如果撞击地球，“很可能将海洋全部蒸发，产生一层厚厚的水蒸气，就像早期金星上失控的温室气体一样……（这层水蒸气）可能灭绝地球上所有的生物。”但他没有问过，如果这样的撞击发生在金星上呢？

虽然只有间接证据，但我们还是很希望得出最明显的结论，除非你相信极其巧合的事。如果一颗体积跟柯伊伯带相仿的天体或很大的陨石，在约7亿年前落入太阳系内侧，然后解体，其中大的碎片都撞向了金星，就能解释金星的自转方向为何相反，那时的金星为何会“换脸”，以及地球为何有段时间像颗钻石一样反射了大部分太阳光，导致表面结冰了。一颗巨大的彗星可以解释三个谜题。那时温室金星和雪球状态的地球的命运紧紧联系在了一起，并为寒武纪生命大爆发搭好了舞台。而这次撞击的罕见程度，凸显了寒武纪生命大爆发有多特别，以及我们的存在有多幸运。

那么，我们这个物种有什么特别的呢？

---

[\(1\)](#) 布拉克内尔夫人是奥斯卡·王尔德笔下的角色，最有名的一句台词就是“失去一位病人也许是不幸，失去两位就像是粗心大意了”。——译者注

[\(2\)](#) 即当今的热带地区。——译者注

[\(3\)](#) 金星得名自希腊女神维纳斯。——译者注

## 第八章

# 我们有什么特别的

我们的特别之处显然是智慧。当然，海豚和其他生物也有智慧，但我们的智慧更加独特，虽然怎么定义智慧有些困难。智慧不仅仅是大脑尺寸的问题，我们可以认为海豚有智慧，海豚的大脑占身体的比例的确更高，比黑猩猩、大猩猩都要高。的确，直到约150万年前，海豚都是大脑占身体比例最高的生物，应该也是最有智慧的。之后直立人的大脑才逐渐发育，占比超过了海豚。但科学技术都是人类发现、发明的，而不是海豚，当然这与海豚在海里也有点关系。

智慧是什么呢？如果没人问我，我很清楚。但有人问我，我又很茫然。我们只知道人类的智慧似乎是地球上独一无二的进化产物。但似乎又有证据表明，如果时机合适，类似的智慧还可能更早出现。从我们的角度看，这是偶然与趋同互相作用的最好示例，或者用获得诺贝尔奖的法国生物学家雅克·莫诺德更优雅的说法，偶然与必然。

### 偶然、必然和十进制

按这个说法，在白垩纪生物大灭绝之类的灾难发生后，决定哪些物种能存活的是偶然，而幸存下来的物种如何进化、适应环境，关键又在必然性。如果在今天的环境下，有智慧、立体视觉和灵活双手的直立两足动物有很大的进化优势，那在恐龙统治地球的1.5亿多年时间里，自然选择的压力为什么没有产生出聪明直立的恐龙呢？

原因之一是过去的几个纪元里，进化的压力从各方面来讲都比后来小。那时的环境总体来说很稳定。具体来说，由于各块大陆之间的位置关系，地球上没有发生过大规模的冰川期，消灭大部分物种，并

筛选出有智慧、适应性强的物种。一会儿我们会讲到这点。还有一个原因，虽然进化的车轮转得很缓慢，但依然在转，白垩纪晚期的确出现了一种很独特的恐龙。

恐龙并不是头脑简单、四肢发达的大块头。“恐龙”这个词就像今天的“哺乳动物”一样，覆盖了很多种生物。恐龙有食肉恐龙，像今天的狮子、老虎一样；还有食草恐龙，像今天的鹿和山羊一样，甚至还有水生的恐龙和会飞的近亲，严格来说，会飞的不属于恐龙。恐龙下面有一科生物，对我们为什么会出现有着独特的启示。这一科生物中，最典型的的就是啮齿龙，包括啮齿龙科和啮齿龙属。过去我们将啮齿龙称为细爪龙，它是似鸟龙的近亲；不过对于非专业人士来说，现在这三个名词指的是同一种动物，我在下文将其称为啮齿龙。

啮齿龙体形较小，头尾两到三米，双足直立，有两条前臂，各分出三根手指，其中一根像我们的拇指一样，指向与其他手指不同<sup>(1)</sup>。啮齿龙体重50~60千克，眼睛很大（有专家认为这意味着啮齿龙是夜行动物），双眼均处在头部正前方，因此应该具有立体视觉。从牙齿看，啮齿龙应该是杂食动物，但食物以肉类居多。啮齿龙是轻盈敏捷的猎手，视力良好，还有抓力较强的手；其猎物应该不仅有小型爬行动物，还有小型哺乳动物，包括我们那时的祖先。更重要的是，啮齿龙大脑占身体的比例是所有恐龙中最高的，几乎达到了现在狒狒的水平。这些都表明啮齿龙很有希望进化出我们这样的智慧。但不幸的是，啮齿龙刚好出现在白垩纪末期。

白垩纪生物大灭绝之后，陆地上任何体重超过40千克的动物都消失了，包括啮齿龙及啮齿龙科下的所有生物。但如果没有这次灭绝会怎么样？许多科学家都觉得这个假设很诱人，有几位进行了深入研究，其中最著名的就是古生物学家戴尔·拉塞尔和天文学家卡尔·萨根，他们研究了如果没有白垩纪生物大灭绝，啮齿龙会朝哪个方向进化。拉塞尔与同事罗恩·赛金甚至还做了一个“实物”模型，他们将



其称为“恐龙人”，大脑很大、双足直立的爬行动物，眼睛很大，手上有三根手指，其中一根是智人指。

拉塞尔计算出以白垩纪晚期进化的速度，要进化出体重和大脑都与现代人类相近的生物，大约需要2500万年，也就是在4000万年前。这种有智慧的恐龙人很可能会开发出计数体系，但会是六进制的，与我们开发出十进制的理由逻辑类似，虽然我们的理由是主观的。在之后的4000万年里，这种生物又会进化成什么呢？萨根做了保守的估计（这段话写在我们发现白垩纪生物大灭绝之前）：如果6500万年前，恐龙没有神秘消失，似鸟龙会继续进化为更有智慧的物种吗？他们能学会集体狩猎更大的哺乳动物，甚至阻止中生代结束后哺乳动物的大规模扩张吗？如果恐龙没有灭绝，主宰着地球、能读书写字，甚至还会推测如果哺乳动物胜出会怎样的，会是似鸟龙的后代吗？

“搜索地外智慧生命”计划的狂热支持者则认为，如果啮齿龙很久之前就几乎可以进化出智慧，那在银河系其他地方发现智慧生物的可能性就增加了。但费米悖论还是卷土重来了，因为我们现在面临的问题，不仅仅是为何其他星球上的文明没有在太阳系留下记号，还有其他具备太空航行能力的文明为何没有在地球、月球，甚至火星的轨道上留下痕迹。悲观地看待这个问题，恐龙花了1.5亿年才有机会进化出智慧，然后就发生了大灾难。考虑到地球上生命遭受灾难的频率，智慧生命怎么来得及进化出来？而对于人类来说，是多变的气候让进化的步伐加快了。

## 分子时钟

我们通过化石和分子证据，知道了哺乳动物中的似鸟龙花了多久进化成智人。DNA“指纹”技术目前在法医学领域有了成熟的应用。在其他手段无法识别身份时，我们经常用亲人，比如，兄弟姐妹的DNA，确认受害者的身份。兄弟、姐妹、父母、子女的DNA都很相似。表兄弟



的DNA比亲兄弟的差别大一点。亲缘关系越远，DNA差异就越大。面对一群不同年龄、彼此有亲属关系的人，只用DNA就可以建立所有人的关系树，甚至还能确定大家共同的一位祖先。类似的方法也适用于物种。我们通过分析生物的DNA，可以确认与其亲缘最近的物种（兄弟姐妹），还有亲缘较近的物种（表亲），等等。向上追溯，就会发现兄弟物种同样的祖先（父母），表亲物种则要追溯得更远（祖父母），以此类推。

我们正是通过这样的分析确定了大熊猫是熊的一种——DNA鉴定技术出现之前，动物学家无法确定大熊猫究竟属于熊还是浣熊。我们还用类似的方法确定了狗的祖先，结束了学界多年来的争论。DNA鉴定技术出现之前，专家们分为两派。一派认为早期的狗就是由狼驯化而来；另一派则认为狗的祖先还包括了豺狼或郊狼。DNA证据表明，狗的祖先只有狼。这项技术解决了许多只通过解剖无法确认的问题。那我们人类呢？

我们的基因与黑猩猩的相似度高达99%，这句话被人复述了太多遍，不过准确性不容置疑。更准确地说，我们与黑猩猩之间有98.6%的基因是相同的，但人类和黑猩猩的外观差异依然十分显著。黑猩猩也分为两种，普通黑猩猩和侏儒黑猩猩。DNA证据已经能够表明，我们与侏儒黑猩猩之间的亲缘更近，与普通黑猩猩则稍远。但两者的差异十分微小。根据生物学的一般规则，我们也可以归为黑猩猩类，即智慧黑猩猩——我们只是想当然地认为自己很独特，所以才单独分出了人类这一物种。除黑猩猩之外，与我们亲缘最近的物种你应该也猜到了，是大猩猩与红毛猩猩。但如果这两种猩猩算是我们的表亲，那我们人类、黑猩猩、大猩猩、红毛猩猩共同的祖父母是什么物种？它们又生活在哪里？换一种问法，分子时钟转动的速度有多快？

首先要说明，对于我们感兴趣的物种，尤其是我们自己、黑猩猩和大猩猩，分子时钟转动的速度都是一样的。同一个祖先分化为两个

物种，并通过DNA变异不断积累着变化，而我们不可能假设不同物种发生变异的速率都相同，无论这个结论看起来多么合理。分子时钟（除DNA外的其他分子也可以用作时钟）要先测试准确程度，并根据化石等证据校准时间，然后才能用来研究生物的亲缘关系。

实际操作中，这个过程很漫长，需要深入调查许多物种的分子和其他证据。我们暂时不用关注太多细节，只用一个例子来看看这项技术的工作原理。猿（包括我们人类）、狒狒和松鼠猴都是自同一个祖先进化而来。这个祖先有多久远，对我们的讨论暂时无关紧要。我们和松鼠猴的分子差距是15%，而松鼠猴和狒狒，以及其他猿类之间的差距也是15%。因此经过了同样多的时间，这几个物种都累积了同样数量的变化。这说明这些物种自分化出来后，分子时钟的转速相同。类似地，狒狒与所有猿类之间的差距也一样。因此我们可以认为，人类、猿类和松鼠猴从同一个祖先分化出来后，分子时钟的转速是相同的。这进一步证明了光从进化的角度看，人类走过的路其实没什么特别的；我们只是非洲猿类的一种，像其他猿一样进化着。

虽然我们还没发现能证明人类与其他猿类分化时间点的化石证据，但还有其他化石能证明更早的分化，我们也可以用这些证据来校准时钟。读者需要知道的就是已有的化石和分子证据告诉我们，不足400万年前人类与黑猩猩分化了，而就在这次分化之前，大猩猩与人类和黑猩猩也分化了。

这就带来了一个问题，物种为什么会分化？生活在丛林的猿类为何会分成几条线？虽然大多还生活在非洲丛林，但为何有一条线不断演变成了主宰地球的物种，能建造射电天文望远镜和太空探测器，还会思索宇宙其他地方是否存在智慧生命？我们通过化石证据知道了分化发生的地点——东非大裂谷；我们还知道分化的时间；甚至还找到了一个非常理想的原因，解释为什么会分化，以及与白垩纪末期其他生物的进化速度相比，那次分化为什么那么快。

## 改变的诱因

我们与其他非洲猿类有什么不同？适应性和智慧。那400万年前，生活在非洲丛林的猿类有了适应性和智慧，能占据什么优势呢？那时非洲丛林受到了环境变化的严重影响，而这些环境变化的起因正是大陆漂移。

大约500万年前，地球的环境发生了较大的变化，地理学家认为可以将其定义为一个世代——第三纪中新世的终结，以及新纪元——第三纪上新世的开始。真正意义上的猿人，以及第一个可以归为人类的物种正是出现在第三纪上新世。那时地球的南部几乎没有地理上的变化，除了大洋洲和南美洲正在逐渐远离南极洲。而那时的南极洲已经覆盖了南极。这就使得南极洲周围产生了很强的洋流，其他地区的暖流无法影响到南极洲，因此约600万年前，南极洲就十分寒冷，而且那时南极洲的冰比现在还要多。那时结冰的海水更多，海平面比今天的海平面低了50米。这个原因，加上其他因素的作用，使得地中海盆地完全干涸。而且随着南极洲冰量的变化，地中海盆地也曾数次干涸。

这样，地球南部基本稳定了下来，波动很小，北半球地理上的变化就成了我们起源的主要原因。随着大陆北移、聚集在北极地区，陆地上的环境也改变了。原因有两点，第一点是越靠北的地方，降雪越容易累积形成冰盖或冰川。第二点是在北极的北冰洋越来越封闭，周围的大陆挡住了热带暖流，导致温度下降。最终，北冰洋表面出现了冰盖——而冰盖一出现，就会反射掉太阳的能量，维持低温的状态。据我们所知，北极是一圈陆地围起来的海洋，南极是一片永远覆盖冰川的大陆，这种情形之前几十亿年从来没在地球上出现过，像我们一样独一无二。

大陆向北极漂移的第一个影响，就是产生了更加多样的气候。所有大陆都分布在赤道周围时，陆地上几乎只有热带气候。这种情况持

续了数千万年，对适应了热带气候的物种来说非常理想，但缺乏变化，不太能刺激出进化。地中海一次次干涸的时候，北极的气候一直很凉爽、温和，针叶林一直覆盖到大陆最北端。虽然北部的高纬度地区会有季节性降雪，但能从南方带来温暖海水的墨西哥湾流在逐渐增强，降雪无法累积成冰川。这些发生在500万~300万年前，那时南北美洲之间的距离在逐渐缩小，洋流很难进入太平洋。但北边也逐渐被格陵兰岛阻隔，洋流只能向东，让欧洲西北部比现在的纽芬兰岛还温暖，北冰洋也最终结冰。约530万年前，由于板块重构，伊比利亚半岛与非洲之间的距离稍微扩大了，水流从直布罗陀海峡以300千米/时的速度涌入，只用两年的时间就让地中海盆地最后一次被水灌满。海平面每天甚至会上涨10米。

有了更多样的气候，动植物生存的环境也更加多样。陆地主要被热带雨林覆盖时，热带生物的生存环境很理想，其他生物则不然。而出现了热带、温带和其他气候之后，很多热带生物就遭殃了，至少生活在热带雨林边缘的生物是这样，因为它们不得不为了日益减少的资源互相竞争；但对于能迁出丛林，适应其他生活方式的物种来说，这是好消息。因此约600万年前，地球上的生物多样性增加了。现代狗的祖先就在那时出现，很快现代熊、骆驼、猪，以及其他生物的祖先也都出现了。而我们知道，那时东非的猿类分成了三条线，其中一条线最终演变成了智人。

## 人类进化的节拍器

约500万年前，由于特殊的地理条件，东非地区对当时地球上的气候变化尤其敏感。就在非洲猿分化为三条线的时候，那里的板块重构正将地壳掀起，产生碰撞，形成了东非大裂谷。大裂谷区域并没有被雨林覆盖，常年湿热，而是变得干燥，丛林也不断减少。与当时全球

范围的趋势类似，那里的气候也有了季节变化，草原和稀疏的林地将仅存的一片片热带雨林包围了起来。

不过，即使是地球北部结上了一层冰盖，东非地区的温度也只是略有下降。对那里的动植物来说，最关键的变化是裂谷对降水的影响。地球降温时，海洋中蒸发的水分变少，因此空气湿度会降低，降水量也减少了。而随着冰盖面积的扩大，海平面也会下降，露出更多的大陆架，因此降水天气系统与东非大裂谷这类地区的距离也变远了，降水系统在移动过程中也会损失掉大部分水分。对我们祖先的进化过程来说，最关键的问题就是高纬度地区进入冰川期，导致东非出现了干旱期。而干旱对雨林很不利。

到了300万年前，北极的温度与现在差不多。虽然冰雪没有延伸很远，但我们通过各种地质证据发现，赤道地区还是有了显著的降温，也干旱了不少。到了约250万年前，欧洲大陆和加州的山脉上都出现了冰。现在，冰覆盖了地球表面约1500万平方千米的面积；但约200万年前，冰覆盖的面积达到了4500万平方千米，根据那时海平面降低的程度推断，被冰盖住的水足有5.6万亿立方米。巧合的是（我并不相信这是巧合），当时的人类第一次离开了东非，开始在非洲各地乃至欧洲、亚洲扩散。那时的人类还属于直立人，颈部以下与现在的人类相同，脑容量约有900立方厘米，后来逐渐进化至1100立方厘米；现代人的脑容量是1360立方厘米。显然，更大的大脑及其带来的好处是智慧和适应能力，这对直立人及后来其他人种的成功至关重要。原因很简单，从那时气候出现的规律性变化中就能看出来。

虽然气候的规律性变化很复杂，涉及许多因素的循环，但我们通过地质学研究发现，最主要的规律就是每次冰川期都会持续约10万年，冰川期之间温度更高的阶段——间冰期，会持续约1万年。我们现在就生活在间冰期，这次间冰期约在1万多年前开始；整个人类文明的

历史都在最近的一次冰川-间冰期交替中。当然，“下一次”冰川期可能不会按时到来，因为科技文明也对地球的气候产生了冲击。

这方面我们理解得很透彻。气候变化的规律与地球在月球的稳定作用下，轻微的倾斜和抖动有关，地球轨道在其他行星，尤其是木星的作用下，从圆形变为略显椭圆形，再变回去。我们将由此引发的气候变化命名为米兰科维奇模型，因为塞尔维亚天文学家米卢丁·米兰科维奇计算出了相关的细节。地球其实有三个主要的米兰科维奇循环，持续时间分别约为10万年、4.3万年和2.3万年。最核心的问题是虽然地球每年从太阳接收的热量几乎不变，但不同季节热量的分布不同。而过去几百万年，地球大陆独特的布局使得南极洲永远冰封，却也让北半球对气候变化极其敏感。这种情况在地球的历史上独一无二，也对我们的存在至关重要。

有时，北半球的冬天很冷，夏天很热；有时，冬天又没那么严酷，夏天也凉爽（当然，南半球的冬夏与北半球相反）。现在，北半球高纬度地区冻结的海洋周围有这么多陆地，地球应该很快进入全面的冰川期。根据米兰科维奇模型，地球摆脱冰川期后，只要过几千年，北半球的夏天就会非常炎热，让绝大部分冰川都融化。只要夏天还炎热，冰只需要融化一点，这个过程就会不断加速，因为露出的大陆是深色的，会从太阳那里吸收更多的热量。但如果夏天的温度降低了，而冬天又无论如何总会降雪，上面的过程就逆转了，地球就会进入全面的冰川期。地质记录也与我们的预测相符。

而在很靠南的地方，我们祖先生存的丛林则会经受交替的旱灾与涝灾。南极上覆盖了永久的冰盖后，南半球可用的水分就很少了，丛林也对米兰科维奇循环的变化更敏感。气候很严酷，导致丛林面积缩减时，那里的人猿面临着两个选择——是撤回丛林的中心地带，与其他树生动物争夺有限的资源，进化为更适应丛林的猿类，还是尝试在

丛林边缘生存，适应新的生活方式，再向平原进发？被逼到丛林边缘、不适应就会灭绝的，是之前生存得没那么好的树生人猿。

如果干旱继续，这些人猿可能会全部灭绝。当时也的确有不少人猿消失了。但过了约10万年，降雨回归了，丛林面积扩大，生存的难度也降低了。筛选后幸存的人猿都是最顽强、适应能力最好的，或者从进化的角度说，最适应新生活方式的。在干旱回归、条件又一次变得严苛之前，人猿数量应该会暴增，不断散播让自己成功幸存的基因。几百万年来，这样的循环一次次上演，每筛选出一批更有智慧、适应性更强的人猿，气候就会变得温和一点儿，让幸存者能够繁衍生息。难怪我们的祖先比啮齿龙进化得快呢。

冰川期的节奏也是人类进化的节奏。如果三四百万年前，冰川全部覆盖地球，并且从未融化，东非就会变成大片的沙漠，只有最适应丛林生活的人猿在仅存的丛林里生活。而如果条件刚好相反，干旱从未发生，那也不会有进化的压力筛选出我们这样的智慧生物——以南美洲为例，那里的热带雨林保留了下来，树生的灵长类动物依然适应得很好。正是因为有了不寻常的气候变化，我们的祖先才幸存了下来，并持续进化，我们才能够出现。但我们的祖先也只是幸存了下来——DNA证据告诉我们，西非地区一个黑猩猩群体内的基因差异，比地球上任意两个人的基因差异都大；我们推测，追溯现在地球上所有人的祖先，得到的结果应该是一群不超过1000人的早期人类。因此，地球即使经历了早期的重重磨难，也还是险些与科技文明失之交臂。但我们的祖先一旦有了一定程度的智慧和适应能力，就能够在间冰期发展出文明，资源充裕时人口爆发式增长、农业蓬勃发展，这些都不是巧合。那我们的未来呢？

## 科技文明的命运

无论德雷克方程的粉丝们有多狂热，我们都不可能将人类存在之前的每一个关键环节都量化。但显然大多数，甚至绝大多数环节发生的概率都很低。行星很常见，但类地行星不常见。类地行星上的海洋很可能诞生生命，但这样的生命又很难进化成复杂的多细胞生物。以此类推。读者可能会觉得我有些悲观。但无论进化出啮齿龙或南美猿猴的概率多么乐观，还是有这样的最后一环，让银河系中出现我们这类智慧生物，也就是从猿猴变为人的希望变得十分渺茫。要完成这最后一环，需要南北极同时被冰川覆盖，出现不同的气候带，能产生东非大裂谷的地质变化，还需要行星轻微地抖动，刚好能产生米兰科维奇的冰川期循环。我们的确是很幸运的物种。

这应该让我们有些责任感。可惜并没有。洛夫拉克将地球看作一个完整的生态系统——“盖娅”，能够解释为何适宜复杂生命生活的环境可以维持这么久，但也提醒着我们，对于科技文明可能带来的突然冲击，地球的生态系统也很脆弱。在气候方面，现在我们最担心的是人类活动引发的全球变暖。我们最怕21世纪中期或晚期，地球的平均温度会缓缓地上升2或3摄氏度。但地质记录显示，只要达到了临界点，地球的温度就会突然变化，可以升高也可以降低。要想象这个情形，看看北冰洋的冰盖就行了。北冰洋全部被冰覆盖时，会反射掉太阳的热量，即使温度升高，速度也十分缓慢。但一旦冰面开始融化，深色的海洋就会吸收非常多的热量，导致温度急剧上升。而到达地球表面的能量减少时，这个反馈循环还会反向作用，海洋会慢慢降温，达到冰点后，温度再骤降。洛夫拉克通过计算得出，如果本世纪中叶地球的温度达到临界点，在反馈系统和地球上生物、非生物的共同作用下，温度会突然升高4~6摄氏度。从地理学的角度看，即使地球在10000年内升温4~6摄氏度也很突然，会导致生物大规模灭绝；而在我们的影响下，一个人一生之内就可能见证这样的变化。生命可以延续；但科技文明能否幸存还有待讨论。



人类活动积累的二氧化碳等物质，不只会产生全球变暖一个威胁。还有个威胁——我们才刚开始意识到它的严重性——就是空气中的二氧化碳溶于海水后形成碳酸导致的海洋酸化。海洋酸化最明显的危害就是溶解了珊瑚礁，但酸性的海水还会侵蚀许多海洋生物的外壳，包括食物链最底端的浮游生物。极端的酸化会导致海洋的“荒漠化”，对地球上其他区域的生物有着难以估量的影响，海洋生物大规模死去还会大量释放二氧化碳，让温度飙升。

即使达不到灭绝恐龙那次的规模，陨石撞击也会对我们产生很大的危害，更不要说达到触发雪球状态的规模。而这样规模的撞击并不罕见。问题主要在于小行星带的天体并不会安分地待在火星和木星之间。我们目前发现了数千颗小行星，也通过计算得出了它们过去和未来的轨道，天文学家们发现导致白垩纪生物大灭绝的那次撞击，源头是1亿年之前两颗大型小行星发生的碰撞。这两颗碰撞的小行星直径分别为170千米和60千米，以11000千米/秒的速度迎面撞上，产生了约15万块碎片，这些碎片进入了新的轨道，并在木星的引力作用下像霰弹枪的弹片一样袭击了太阳系内侧，几颗行星和月球都受到了影响，恐龙被全部灭绝，还在早期的月球上留下了第谷陨石坑。

视线放近一点，在110多年前，1908年的夏天，一颗陨石进入了地球的大气层，燃烧发光后，在西伯利亚地区的通古斯上空爆炸。这次爆炸影响了约2000平方千米的区域，让8000万棵树像火柴棍一样倒下，树冠指向爆炸中心外侧。科学家通过计算估计出陨石的撞击速度约为15千米/秒（超过50000千米/时），温度达到了25000摄氏度，然后在约10千米的高空解体。释放出的能量相当于1000万吨TNT。但这颗陨石的直径只有30米。而且这次爆炸刚好发生在地球上最荒凉、几乎无人居住的区域。如果通古斯陨石再晚几个小时到，地球会多自转一会儿，爆炸就差不多会发生在圣彼得堡正上方，让城市及其居民全部毁灭。

在两次极端事件——通古斯大爆炸和恐龙灭绝之间，即大约13000年前，哺乳动物也经历了一次灾难。那时，地球部分区域的温度在短时间内降低了15摄氏度，至少35种哺乳动物，包括猛犸象，都灭绝了。这次灾难也影响到了人类：北美洲的克洛维斯人也随着猛犸象一起灭绝了。这次灾难最可能的起因就是一颗比通古斯陨石大得多的天体在北美洲上方的大气层爆炸，碎片撞击了下方的大陆，引起了火灾，因此释放的烟雾也覆盖了地球，让地球降温，原理与白垩纪晚期那次撞击相同，只不过规模小了很多。专家在北美洲及欧洲的地层中发现了用显微镜几乎都看不清的微小钻石，并认为这是那次撞击的有力证据。这些“纳米钻石”只有在陨石撞击那样的极高温、高压状态下才可能产生。引发这次灾难的彗星直径应该约有5千米，但在撞击地球之前应该已经解体了，就像1994年的苏梅克-列维彗星一样，在撞击木星之前就解体了。

已经有证据表明陨石撞击很常见，而且迟早会再发生，我们唯一的希望是大规模的撞击会晚一点，而且已经在努力打造天文望远镜，识别、监测成千上万颗有可能离地球过近的天体（即近地天体，简称NEO）。美国航空航天局于2009年末发射了WISE卫星（Wide-field Infrared Survey Explorer，广域红外线巡天探测卫星），三个月内，每天都能发现数百颗“新的”陨石，包括5颗NEO。但识别NEO是一回事，尝试阻止其撞向地球则是另一回事。我们通过计算得出的正式结果是50年内，地球有1%的概率会受到一颗直径140米的陨石撞击，这次撞击足以给美国全境，或是欧洲西海岸造成重创。而以目前的状态，我们根本无力阻止。来自太空的撞击是文明面临的最大自然威胁，也能合理地解释我们为什么如此孤单，因为类似的撞击应该也会在其他天体系统内发生。

火山喷发的危害虽然无法用定量的方法衡量，却一样切实存在。以地理学的时间尺度衡量，最近就发生过数次超级火山喷发，包括约7万年前印度尼西亚多巴湖的那次。那是过去2500万年来已知规模最大

的火山喷发。整片印度尼西亚大陆上都覆盖了约15厘米厚的火山灰，由此可见那次喷发的规模。有科研人员认为，这次火山喷发对环境造成的影响，几乎让中东亚及印度地区的人类灭绝。现在，我们已经确定美国黄石公园下方的整片区域都属于一座超级火山，目前虽然还在休眠，但随时会没有任何先兆地喷发。而把时间尺度再放大，产生了德干地盾那样的火山喷发一定还会再发生。无论怎么看，我们这个文明都被内外夹击，注定灭亡，而最实际的问题就是什么时候会灭亡。地球上有过一段没有灾难的时间，让科技文明萌芽发展，但没人能保证银河系其他地方也会发生类似的情况。即便是地球，也可能只是刚好有这么一段时间适宜生命生存。

## 地球的命运

地球最终的命运，就是在太阳寿命将尽，膨胀为红巨星时，被燃烧为灰烬。末日究竟什么时候会到来，还要靠一些猜测的成分。太阳在老化过程中，会向太空中释放物质，因此太阳的引力作用会减弱，地球以及太阳系其他行星的轨道都会变远，可以一定程度上推迟末日的到来。但太阳老化后，大气层也会扩张，稀薄的大气可能会通过摩擦力拉住地球，甚至让地球向内运动，导致末日提前到来。不过无论是哪种情况，约50亿年后，地球都会走向终结，因为现在太阳已经在主序星的路上走了一半。

对于想在银河系其他地方找到科技文明的人来说，这似乎是好消息。地球上似乎有机会第二次出现这样的文明，即便是从零开始进化发展，因此其他类日恒星周围的类地行星应该也会这样。出现我们这样科技文明的概率似乎翻倍了。但是再想想，即使地球上的复杂生物明天全部灭亡，地球的大环境也与前寒武纪时期不同了。地球很可能会损失大部分大气和水，在被太阳吞没之前成为一颗火热的沙漠星球。顶层的大气不断在流失，但只有达到第二宇宙速度（逃离地球的

速度，约11千米/秒）才会真的离开地球。现在很少有气体分子能获得这样的速度；但还是会有星星点点的氢原子——由顶层大气中的水分子分解产生——能够逃离。再过10亿年，就会有大量的氢原子逃离，因为太阳在老化过程中，每10亿年亮度都会增加10%。更明亮的太阳会让地球升温，蒸发掉更多的海水，让顶层大气有更多的水分子，也能够释放更多的氢原子。30亿年后，地球上所有的水都会消失。

但这是从天文学层面进行的计算，并未考虑到地球上环境的变化，否则地球生命灭绝的那一天可能会来得更早一点。太阳在老化过程中会逐渐升温，因此太阳的年龄越小，温度越低。除此之外，年轻的地球在大气中二氧化碳等气体产生的温室效应作用下，温度刚好允许液态水存在。但随着太阳的升温，盖娅机制会减少大气中的温室气体，好将地球的温度继续维持在液态水可以存在的范围内。洛夫拉克指出，这一机制很快就无法发挥效用了，因为现在的大气中二氧化碳含量已经很低了。即使我们忽略人类活动造成的影响——假设我们这个科技文明从未出现，地球还是会温度过高，失去所有水分，只不过是在几亿年内，而不是几十亿年内。

不过，几亿年也很久了，比恐龙灭绝至今的时间还要久。就算我们这个文明消亡了，其他文明也有足够的时间发展。但不幸的是，100万年后，地球很可能就不适宜生命存在了。

芝加哥大学的大卫·劳普在他的书《灭绝》里，对地球历史上数次大规模生物灭绝事件进行了研究。他的研究成果之一就是，我们可以将不同规模灭绝事件发生的频率量化，并借此计算下一次指定规模的灭绝事件会在什么时候发生。劳普出于好奇心，还将自己的计算方法推到了极致，计算了一下足以毁灭所有地球生命的事件多久后会发生。他对自己得出的结果似乎还很乐观。

我试过在计算生物灭绝的频率时，将参数取到极限值，即“地球上所有生物灭绝事件的频率是多少”，我得出的结果并不一定准确，

但至少足够让我们宽心。能导致所有生物灭绝的事件，至少每20亿年才会发生一次。

宽心了吗？如果20亿年是从现在算起，那还算不错。但要知道，地球上的生命已经存在了近40亿年。这样算来，我们的末日早该到来了。

有句话说得好，“有的话是谎言，有的是该死的谎言，还有的是统计数据”。大家似乎都没太在意劳普的计算结果。而2010年，值得我们注意的数据还是出现了。

俄罗斯圣彼得堡普尔科夫天文台的瓦蒂姆·鲍比列夫在分析欧盟依巴谷卫星传回的数据时，发现附近的一颗恒星——格利泽710的轨道会与太阳系发生碰撞。格利泽710的质量约为太阳的一半，目前在巨蛇座方向，离我们63光年。这颗恒星正以约50000千米/时的速度朝我们飞来，在150万年之内一定会穿过太阳系边缘的奥尔特彗星云，甚至可能到达柯伊伯带这样靠内的地方。这颗恒星对奥尔特彗星云产生的扰动，会将彗星云中的天体送入太阳系内侧，引发自晚期大轰炸后规模最大的陨石撞击。而且格利泽710很可能还有自己的彗星云，这样陨石撞击只会更剧烈。这毫无疑问会毁灭地球上的所有生物，让地球回到月球刚刚诞生的状态。地球的确险些与科技文明失之交臂，进化了40亿年后，再过100万年就会消亡。

不过，我们还是有100万年的时间。虽然我们的文明可能会消亡，其他物种可能也来不及进化，但如果有人类幸存下来，一定能够再建立一个新的科技文明吧？不幸的是，幸存的人类也许有足够的时间，但不会有足够的资源。

## 时不再来

从地球上的生命来看，科技文明的大规模发展，与地壳中大量的化石燃料有着很大的关系。我们的文明最初发展起来，是在一片地表很容易发现煤，还能用鹿角做的镐头轻松挖出铁和铜等金属矿的地区，这并不是巧合。但这些矿藏是几十亿年的板块重构累积下来的，还要再扰动地层让矿藏上升至接近地表的位置，最后等待地表被侵蚀，矿藏才会逐渐露出来。即使是我们的文明赖以生存的煤矿资源，也几乎都是在2.8亿~3.6亿年前凉爽、多沼泽的石炭纪形成的。如果这样的环境条件没有维持几千万年，地球上还会出现科技文明吗？石炭纪后期，地球还积累了重要的石油矿藏。20世纪飞速发展的科技，完全是由易开采的石油驱动的。

但这些资源都被我们大量消耗掉了。我们现在还可以大量开采矿石、煤和石油，但要依靠科技以及金属和化石燃料。北海或墨西哥湾近海的钻井平台就是最好的例子。如果有灾难让人类一夜回到石器时代，或者人类被全部灭绝，而其他物种进化出了智慧，即使这些矿藏依然存在，新生的文明也无法造出开采矿藏的机器，没法得到驱动机器的燃料了。

在地球这样的行星上，生物发展出科技只有一次机会——我们已经用光了容易得到的原材料，如果人类全部灭亡，接下来出现的智慧生物（如果有的话），是没法得到科技起步必需的原材料的。这次机会失去就不会再来。这也是解答费米悖论的最后一块拼图。外星人没有来到这里，因为没有外星人。我们能生活在地球上，是一系列概率极低的机缘巧合作用下的结果，根据这些概率，银河系其他地方存在科技文明的概率微乎其微。我们是唯一的智慧生命，这个结论我们要好好熟悉一下。

---

[\(1\)](#) 这被称为“智人指”。——译者注