

《与自然对话》中译版 2023

目 录

第一部分	2
Text 1a	3
Text 1b	6
Text 2	9
Text 3a	23
Text 3b	30
第二部分	34
Text 4	35
Text 5	47
Text 6	66
第三部分	75
Text 7	76
Text 8	86
Text 9	94
Text 10a	103
Text 10b	114
Text 11a	118
Text 11b	124

第一部分

人类探索物质宇宙

这是旅程的第一部分。我们将从柏拉图的《理想国》开始。在通常被称为洞穴寓言的摘录（文本 1a）中，柏拉图通过苏格拉底和格劳孔的对话，区分了感知和现实。这种区别奠定了西方科学的基本基调。

柏拉图认为，我们在“可见领域”中看到的是影子。只有在“可理解的领域”中，人们才能找到善的形式，它是真正真实的，是“一切事物中正确和美的原因”。这是那些寻求真正理解的人最终关心的问题。对现代科学家来说，自然法则也有一个“可理解的领域”。科学家最关心的并不是对自然现象的全面描述，而是对其基本规律的理解。大卫·林德伯格是研究中世纪和早期现代科学的著名历史学家。在他广受欢迎的教科书《西方科学的起源》的节选（文本 1b）中，他解释了柏拉图关于两个领域的概念及其与科学的关系。

第二个文本（文本 2）也摘自《西方科学的起源》。它介绍了亚里士多德物理学，并给出了中世纪科学家运动概念的后续发展的简明历史描述，这些科学家为牛顿物理学的出现奠定了基础。

课文 3a 节选自《新物理学的诞生》，这是由国际著名的牛顿学者伯纳德·科恩为普通读者写的。在这段摘录中，科恩阐述了牛顿物理学的背景和伟大作品《原理：自然哲学的数学原理》背后的主要思想，这本书一直被认为是人类历史上最重要的书籍之一。课文 3b 是这部伟大著作的前几页，牛顿在书中建立了一个世界的数学体系。读者会欣赏牛顿为质量、力和运动等抽象概念给出精确定义的努力，以及他在数学和哲学之间划清界限的尝试。

Text 1a

理想国

——柏拉图

苏格拉底继续叙述：

苏格拉底：接下来，比较一下受教育和不受教育对我们天性的影响，就像这样的经历。想象一下，人类住在一个地下洞穴般的住所里，有一个长长的入口，向光敞开，和洞穴本身一样宽。他们从小就在那里，脖子和腿都被铐着，所以他们被固定在同一个地方，只能看到他们前面的东西，因为他们的镣铐阻止他们回头。光是由在他们上方和后方燃烧的火提供的。在囚犯和大火之间，有一条高架道路延伸。想象一下，沿着这条路建了一堵矮墙——就像木偶师在人们面前提提供的屏幕一样，他们在上面展示他们的木偶。

格 劳 孔：我在想象。

苏格拉底：那么，也想象一下，有人在墙边拿着各种各样的人工制品，从上面伸出来，有人的雕像和其他动物的雕像，由石头、木头和各种材料制成。正如你所料，有些拿着东西的人在说话，有些则保持沉默。

格 劳 孔：你描述的是一个奇怪的形象，还有奇怪的囚犯。

苏格拉底：他们和我们一样。我的意思是，首先，你认为这些囚犯除了在他们面前的洞穴墙上投下火光的影子外，还见过他们自己和彼此的任何东西吗？

格 劳 孔：如果它们一生都必须保持头部不动，它们怎么能做到呢？

苏格拉底：那沿着墙壁搬运的东西呢？他们不也一样吗？

格 劳 孔：当然。

苏格拉底：如果他们可以彼此讨论，你不认为他们会认为他们使用的词语适用于他们看到的在他们面前经过的事物吗？

格 劳 孔：他们必须这样做。

苏格拉底：如果他们的监狱对面的墙上也有回声呢？当一个搬运工走过城墙说话时，你认为他们会相信除了从他们面前经过的影子之外的任何东西在说话吗？

格 劳 孔：我不知道，以宙斯的名义。

苏格拉底：总而言之，囚犯们所认为的真正的现实只不过是那些神器的影子。

格 劳 孔：这是完全不可避免的。

苏格拉底：那么，想一想，如果这样的事情发生在他们身上，从他们的束缚中被释放出来，从他们的愚蠢中被治愈，自然会是什么样子。当一个人获得自由，突然被迫站起来，转过脖子，走路，抬头望向光明时，他会因为做所有这些事情而痛苦，因为闪烁的灯光，他无法看到他以前看到的東西的影子。如果我们告诉他，他以前看到的東西都是愚蠢的废话，但现在——因为他更接近真实的東西，并且转向更真实的東西——他看得更正确，你认为他会怎么说？特别是，如果我们指着经过的每一件東西，强迫他回答每一件東西是什么，你不认为他会感到困惑，相信他之前看到的東西比他看到的更真实吗？

格 劳 孔：更是如此。

苏格拉底：如果他被强迫去看光本身，他的眼睛会不会痛苦，他会不会转过身去，逃向他能看到的東西，并相信它们真的比他看到的東西更清晰？

格 劳 孔：他会的。

苏格拉底：如果有人用武力把他从那里拖走，沿着崎岖，陡峭，向上的道路，不让他走，直到他把他拖到阳光下，他不会因为被那样对待而感到痛苦和愤怒吗？当他进入光里，他的眼睛会不会充满了阳光，而看不见一件现在被认为是真实的東西？

格 劳 孔：不，他不能——至少不能马上。

苏格拉底：我想，如果他想看到天上的世界，他需要时间来适应。起初，他最容易看到影子，然后是水中的人和**其他東西**的图像，然后是**東西本身**。从这些角度出发，他在夜间观察**天上的事物和天空本身**，凝视星星和月亮的光，要比在白天观察太阳和太阳的光容易得多。

格 劳 孔：当然。

苏格拉底：**最后，我想，他将能够看到太阳**——不是它在水中或其他陌生的地方的反射，而是太阳本身在它自己的地方——并且能够看着它，看到它是什么样子。

格 劳 孔：不一定。

苏格拉底：在那之后，他已经能够得出结论，它提供季节和年份，支配着可见世界的一切，并且在某种程度上是他和他的同伴过去所看到的所有事物的原因。

格 劳 孔：这显然是他的下一步。

苏格拉底：当他想起他的第一个住所，在那里被认为是智慧的东西，以及他的囚犯同伴时，又会怎样呢？你不认为他会为自己的改变感到高兴而怜悯别人吗？

格 劳 孔：当然。

苏格拉底：如果在他们中间有**荣誉，赞扬，或奖励给最敏锐地识别影子的人；而且最能记住哪些通常来得早，哪些来得晚，哪些同时发生；谁是最能**

预言未来的人，你认为我们会渴望这些奖赏还是会嫉妒那些在囚犯中享有荣誉和权力的人？或者你认为他会和荷马一样觉得他更愿意“像农奴一样为另一个人工作，一个没有自己财产的人”，并经历任何痛苦，而不是分享他们的信仰和生活方式？

格 劳 孔：是的，我认为他宁愿忍受任何痛苦也不愿那样生活。

苏格拉底：那么，也要考虑这个问题。如果这个人回到洞里，坐在原来的座位上，他的眼睛不会充满黑暗吗，突然从太阳里出来？

格 劳 孔：当然。

苏格拉底：现在，如果在他的视力还很模糊，眼睛还没有恢复的时候，他必须再一次和那些永久的囚犯**竞争辨认阴影**，如果重新调整所需的时间不短，他会不会遭到嘲笑？人们会不会说，他从向上的旅程中回来，眼睛就毁了，甚至试图向上旅行都不值得？至于那些试图释放囚犯并引导他们向上的人，如果他们能找到他，他们不会杀了他吗？

格 劳 孔：他们当然会。

苏格拉底：这个形象，我亲爱的格劳孔，必须与我们之前所说的作为一个整体结合在一起。通过视觉所揭示的领域应该被比作监狱的住所，而里面的火焰之光就像太阳的力量。如果你认为向上的旅程和看到上面的事物是灵魂向可理解领域的向上旅程，你就不会误解我的意图——因为这正是你想听到的。只有上帝知道这是不是真的。但在我看来，这些现象是这样的：在可知的领域里，**最后所能看到的是善的形式，而要看到善的形式，必须经过艰苦卓绝的努力**。然而，一旦人们看到了它，就必须推断出它是一切事物中正确和美的原因，在可见的领域，它产生光和它的来源，在可理解的领域，它控制并提供真理和理解；任何想在私下或公开场合明智行事的人都必须看到这一点。

格 劳 孔：就我所能，我同意。

苏格拉底：来吧，然后，和我一起进一步思考：你不应该感到惊讶，那些达到这一点的人不愿意把自己花在人类的事务上，相反，他们的灵魂总是渴望在上面度过他们的时间。我的意思是，这当然是我们所期望的，如果我之前描述的图像在这里也是准确的。

格 劳 孔：这是我们所期望的。

苏格拉底：当一个人，从观察神圣的事物出发，去观察人类生活的罪恶，会怎样？当他的视力还很模糊，还没有习惯周围的黑暗时，如果他被迫在法庭或其他地方为正义的影子或雕像（它们就是雕像的影子）而竞争，那么他的举止笨拙，显得十分可笑，你觉得奇怪吗？质疑那些从未见过正义的人对这些事物的理解方式？

格 劳 孔：这一点也不奇怪。

西方科学的开端

——大卫·林德伯格

第二章

希腊人和宇宙

柏拉图的形式世界

苏格拉底于公元前 399 年去世，时值世纪之交（当然，不是在他们的日历上，而是在我们的日历上），这使它成为希腊哲学史上一个方便的分界点。因此，苏格拉底在六世纪和五世纪的前辈们（这些哲学家在本章之前一直占据着我们的篇幅）通常被称为“前苏格拉底哲学家”。但是苏格拉底的突出地位不仅仅是日历上的偶然事件，因为苏格拉底代表了希腊哲学的重点转移，从六世纪和五世纪的宇宙学关注转向了政治和伦理问题。尽管如此，这种转变并没有戏剧性地阻止人们继续关注前苏格拉底哲学的主要问题。在苏格拉底年轻的朋友和弟子柏拉图的著作中，我们发现了新和旧的东西。

柏拉图（前 427 - 前 348/47）出生在雅典一个显赫的家庭，积极参与国家事务；他无疑是导致苏格拉底被处决的政治事件的密切观察者。苏格拉底死后，柏拉图离开雅典，前往意大利和西西里岛，在那里他似乎接触到了毕达哥拉斯学派的哲学家。公元 388 年，柏拉图回到雅典，创立了他自己的学校，学院，在那里年轻人可以追求更高层次的学习（见图 4.1）。柏拉图的文学作品似乎几乎全部由对话组成，其中大部分保存了下来。我们在考察柏拉图的哲学时，会发现有必要进行高度的选择；让我们从他对潜在现实的探索开始。

柏拉图在《理想国》（Republic）一书的一段对话中，思考了木匠实际制作的桌子与木匠心中对桌子的概念或定义之间的关系。木匠在他制作的每一张桌子上都尽可能地复制他心中的想法，但总是不完美。没有两张制造出来的桌子在最小的细节上都是一样的，而且材料的限制（这里有一个结，那里有一个翘曲的板）保证了没有一张桌子能完全达到理想的水平。

柏拉图认为，有一个神圣的工匠，他与宇宙的关系，就像木匠与桌子的关系一样。神圣的工匠（造物主）**根据一个想法或计划建造了宇宙**，所以宇宙和**其中的一切都是永恒的想法或形式的复制品**——但总是**不完美的复制品**，因为造物主可用的材料固有的局限性。简而言之，有两个领域：**一个是形式或观念的领域，包含了一切事物的完美形式；在物质世界中，这些形式或思想被不完美地复制。**

柏拉图关于两个不同领域的概念对许多人来说似乎很奇怪，因此我们必须强调几点重要性。这些形式是无形的、没有感觉的；它们一直存在，与造物主共享永恒的属性；它们是绝对不变的。它们包括物质世界中一切事物的形式，完美的理念。人们不谈论它们的位置，因为它们是无形的，因此不是空间的。虽然它们是无形的，无法被感官感知，但它们是客观存在的；的确，真正的实在（充实的实在）只存在于形式的世界中。相比之下，感性的、物质的世界是不完美的、短暂的。它不那么真实，因为有形对象是形式的复制品，因此它的存在依赖于形式。

形式有首要的存在，它的肉体复制品有次要的存在。

柏拉图在《理想国》第七卷中著名的“洞穴寓言”中阐释了这种现实的概念。男人们被囚禁在一个深洞里，用铁链锁住，以致于他们的头不能移动。他们身后是一堵墙，墙后面是一堆火。人们在墙后走来走去，举着各种各样的东西，包括人类和动物的雕像；这些物品在墙上投下囚犯看得见的阴影。囚犯们只能看到这些物体投下的影子；而且，由于从小就住在山洞里，他们不再记得任何其他的现实。他们不怀疑这些影子只是他们看不见的物体的不完美的形象；结果他们把影子当成了现实。

柏拉图说，我们所有人都是如此。我们是被囚禁在肉体里的灵魂。寓言的阴影代表了感官体验的世界。灵魂从它的牢笼中向外窥视，只能看到这些闪烁的影子，无知地声称这就是现实的全部。然而，确实存在着一些雕像和其他物体，影子只是它们的微弱表征，也存在着人类和动物，而雕像则是它们的不完美复制品。为了进入这些更高的现实，我们必须摆脱感官经验的束缚，爬出洞穴，直到我们最终发现自己能够凝视永恒的现实，从而进入真正的知识领域。

这些观点对前苏格拉底哲学家的关注点有什么影响？首先，柏拉图把他的形式等同于潜在的现实，而把派生的或次要的存在赋予可感知事物的物质世界。其次，柏拉图把变化和稳定分别分配到不同的现实层面，从而为两者留出了空间：物质领域是不完美和变化的场景，而形式领域则以永恒、不变的完美为特征。因此，变化和稳定都是真实的；每一个都代表某物；但不变属于形式，因此分享它们的更充分的实在。

第三，正如我们所看到的，柏拉图处理认识论的问题，把**观察和真正的知识**（或理解）对立起来。**感官远不能引导我们获得知识或理解，而是束缚我们的锁链；通往知识的道路是通过哲学反思。**这在《斐多篇》中表现得很明显，柏拉图认为**感官对于获得真理是无用的，并指出当灵魂试图运用感官时，它不可避免地被欺骗。**

关于柏拉图认识论的简短叙述经常到此结束；但有一些重要的条件如果忽略，将是一个严重的错误。事实上，柏拉图并没有完全摒弃感官，就像巴门尼德所做的，也像《斐多篇》中的段落所暗示的那样。在柏拉图看来，感觉经验具有多种有用的功能。首先，感官体验可以提供有益健康的娱乐。第二，观察某些可感知的物体（尤其是那些具有几何特性的物体），可能有助于将灵魂引向形相领域中更高贵的物体。柏拉图用这个论点作为追求天文学的理由。第三，柏拉图认为（在他的回忆理论中），感觉经验实际上可以激发记忆，并提醒灵魂它在前世所知道的形式，从而刺激回忆的过程，从而导致对形式的实际知识。

最后，尽管柏拉图坚信关于**永恒形式的知识**（最高的，也许是唯一真实的知识形式）只有通过**理性的运用**才能获得，但**物质的变化领域也是一个可以接受的研究对象。这些研究的目的是提供宇宙中理性运作的例子。**如果这是我们感兴趣的（就像柏拉图有时所做的那样），那么探索它的最佳方法肯定是**观察它**。《理想国》清楚地暗示了**感官经验的合法性和效用**，柏拉图承认，从洞穴中出来的囚犯首先运用他的视觉来理解生物，星星，最后是最高贵的可见（物质）事物，太阳。但是，**如果他渴望理解“本质的现实”，他必须“在没有任何感官帮助的情况下，通过理性的话语”进行。**因此，理性和感觉都是值得拥有的工具；我们在特定场合使用哪一种取决于**研究的对象**。

还有另一种方式来表达这一切，这可能会对柏拉图的成就有所启发。当柏拉图把实在赋予形式时，他实际上是在把实在与事物的共同属性联系起来。真实现

实的承载者不是（例如）这只耷拉着左耳的狗，或者那只吠声吓人的狗，而是每只狗所共有的理想化的狗（当然，并不完美）——凭借这些特征，我们能够将它们全部归类为狗。因此，为了获得真正的知识，我们必须抛开事物作为个体所特有的所有特征，而寻求将它们定义为类的共同特征。以这种谦虚的方式表述，柏拉图的观点具有明显的现代色彩。理想化是许多现代科学的一个显著特征；我们发展的模式或法则忽略了偶然性而看重本质。然而，柏拉图却更进一步，他不但认为真正的实在性存在于各种事物的共同属性中，而且认为这种共同属性（理念或形式）具有客观的、独立的，甚至是先验的存在。

西方科学的开端

——大卫·林德伯格

第三章

亚里士多德的自然哲学

生活与工作

公元前 384 年，亚里士多德（图 3.1）出生在希腊北部城镇斯塔吉拉的一个特权家庭。他的父亲是马其顿国王阿明塔斯二世（亚历山大大帝的祖父）的私人医生。亚里士多德有着特殊的教育优势：17 岁时，他被送到雅典跟随柏拉图学习。他作为柏拉图学院的一员在雅典待了二十年，直到柏拉图在公元 347 年去世。然后，亚里士多德花了几年时间旅行和学习，穿越爱琴海来到小亚细亚及其沿海岛屿。在此期间，他进行了生物学研究，并遇到了泰奥弗拉斯托斯（来自莱斯沃斯岛），后者后来成为他的学生和终身同事。公元 342 年，他回到马其顿，成为年轻的亚历山大（后来的“大帝”）的导师。公元 335 年，雅典被马其顿统治，亚里士多德回到雅典，开始在教师们经常光顾的公共花园——学园教书。他留在那里，建立了一所非正式的学校，直到他在 322 年去世前不久。

在他作为学生和教师的漫长职业生涯中，亚里士多德系统而全面地阐述了他那个时代的主要哲学问题。他写了 150 多篇论文，其中大约有 30 篇留给了我们。现存的作品似乎主要由讲义或未完成的论文组成，不打算广泛传播；不管它们的确切来源是什么，它们显然是针对其他哲学家的，包括高级学生。在现代翻译中，它们占据了超过一英尺的书架，呈现出一种在力量和范围上压倒一切的哲学体系。我们要考察亚里士多德的全部哲学是不可能的，我们必须从考察他的自然哲学的基本原理开始，从他对前苏格拉底和柏拉图所持的立场的回答开始。

形而上学与认识论

通过与柏拉图的长期交往，亚里士多德当然对柏拉图的型相理论非常精通。柏拉图对感官所观察到的物质世界的真实性进行了彻底的贬低（但并未完全否定）。柏拉图认为，完全充实的实在，只能在永恒的形式中找到，而永恒形式的存在不依赖于任何别的东西。相反地，构成感性世界的对象，它们的规定性和存在，都是从形式中得来的。由此可见，可感知对象只是派生地或依赖地存在。

亚里士多德拒绝接受柏拉图赋予可感知对象的这种被削弱的、依赖的地位。它们必须完全独立地存在，因为在亚里士多德看来，它们是构成现实世界的东西。此外，亚里士多德认为，赋予个体对象特征的特质，并不在形式世界中具有先验和独立的存在，而是属于对象本身。例如，不存在狗的完美形态，它独立存在于形态的世界中，不完美地复制于每只狗身上，赋予它们各自的属性。对亚里士多德来说，只有单独的狗。这些狗当然有一组共同的属性——否则我们就没有资格称它们为“狗”——但是这些属性存在于狗的个体身上，并且属于它们。

也许这种看待世界的方式似曾相识。对于本书的大多数读者来说，**将个体的可感知对象**（亚里士多德称之为“**物质**”）**作为主要现实**（primary reality）似乎是很好的常识，亚里士多德的同时代人可能也是如此。但如果它是好的常识，它也能成为好的哲学吗？也就是说，它能否成功地，或者至少貌似合理地，处理由前苏格拉底和柏拉图提出的困难的哲学问题——基本现实的本质，认识论的关注，以及**变化和稳定**的问题？让我们一个一个地讨论这些问题。

将现实定位于可感知的、有形的客体的决定，并没有告诉我们太多关于现实的东西——只是告诉我们，我们应该在可感知的世界中寻找现实。早在亚里士多德时代，任何哲学家都会要求知道更多：他会要求知道的一件事是，日常经验的物质材料（木头、水、空气、石头、金属、肉等）本身是否是**事物的基本的、不可约的组成部分**，还是它们是**更基本的物质的混合物**。亚里士多德通过区分属性和它们的主体来解决这个问题。**他坚持（和我们大多数人一样）属性必须是某物的属性**；我们称它为“主体”。成为一种属性就是属于一个主体；**属性不能独立存在**。

因此，**单个的有形物体既具有属性（颜色、重量、质地等），又具有作为其主体的其他属性**。这两个角色分别由“形式”和“物质”扮演。**有形的客体是形式和物质的“复合”**——形式由构成事物的属性组成，物质作为形式的主体或基础。例如，**一块白色的岩石，由于它的形状，所以它是白的、硬的、重的等等；但质料也必须在场，作为形式的主体，但质料与形式的结合并没有自己的性质**。（亚里士多德的学说将在下面的第 12 章进一步讨论，与中世纪试图澄清和扩展它有关。）

实际上，我们永远不能**把形式和物质分开**；它们只是作为一个单一的组合呈现给我们。如果它们是可分离的，我们应该能够把属性（不再是任何东西的属性）放在一堆，把物质（绝对没有属性）放在另一堆——这显然是不可能的。但是，如果形式和物质永远不能分开，那么说它们是事物的真正组成部分，难道不是没有意义的吗？这难道不是一种纯粹的逻辑区别，存在于我们的头脑中，而不存在于外部世界吗？亚里士多德肯定不会，也许我们也不会；我们中的大多数人在否认**冷或红的真实存在**之前都会三思而后行，尽管我们永远无法收集到其中任何一桶。简而言之，亚里士多德用常识性的概念构建了一个有说服力的哲学大厦，再一次让我们感到惊讶。

亚里士多德关于原始现实是具体个体的主张无疑具有认识论意义，因为真正的知识必须是关于真正真实事物的知识。根据这个标准，柏拉图的注意力自然是指向永恒的形式，通过理性或哲学反思可知。相比之下，亚里士多德关于具体个体的形而上学，将他对知识的追求导向了个人、自然和变化的物质**世界**——一个通过感官接触的世界。

亚里士多德的认识论是复杂而精密的。这里必须指出，获得知识的过程始于感觉经验。**从重复的感觉中产生记忆；从记忆中，通过“直觉”或洞察力的过程，有经验的研究者能够辨别事物的普遍特征**。例如，通过对狗的反复观察，一个有经验的狗饲养员会知道狗到底是什么；也就是说，他开始理解狗的形式或定义，没有这些关键特征，动物就不能成为狗。请注意，亚里士多德和柏拉图一样，决心掌握事物的普遍特征或属性；但与他老师不同的是，亚里士多德认为一个人必须从个人的物质事物开始。一旦我们掌握了普遍的性质或定义，我们就可以把它作为演绎论证的前提。

因此，知识是通过一个从经验开始的过程获得的（在某些情况下，经验是一

个足够广泛的术语，包括共同意见或远方观察者的报告）。在这个意义上，知识是经验性的；没有这样的经验，什么也不知道。但是，我们通过这种“归纳”过程所学到的东西，除非转化为演绎形式，否则不会获得真知的地位；最终的结果是从作为前提的普遍定义开始的演绎论证（在欧几里得证明中作了很好的说明）。虽然亚里士多德在获取知识的过程中讨论了归纳和演绎两个阶段（后者远远多于前者），但他对后来的方法学家，尤其是对归纳法的分析，却有相当大的欠缺。

这是亚里士多德抽象概述的知识理论。这也是亚里士多德自己的科学研究中使用的方法吗？也许不是——也许偶尔会有例外。像现代科学家一样，亚里士多德并没有遵循方法论上的处方书，而是采用粗糙而现成的方法，在实践中证明了自己的熟悉程序。有人把科学定义为“尽你最大的努力，没有任何限制”；当涉及到（例如）广泛的生物学研究时，这正是亚里士多德所做的。亚里士多德在思考知识的本质和基础的过程中，提出了一种与他自己的科学实践不完全一致的理论方案（认识论），这并不奇怪，当然也不是他性格上的缺陷。

本性与变化

在公元前五世纪，变化的问题已经成为一个著名的哲学问题（在相当小的哲学家圈子内）。在公元前四世纪，柏拉图通过将变化限制在不变的形式世界的不完美的物质复制品中来处理这个问题。亚里士多德是一位杰出的博物学家，他在哲学上致力于研究构成感性世界的多变个体的全部现实，对他来说，变化的问题是最紧迫的问题。

亚里士多德的出发点是一个常识性假设，即变化是真实的。但这本身并不能让我们走得很远；尚待证明的是，变革的观念能否经受得住哲学的推敲；还必须说明如何解释变化。亚里士多德在他的武器库中有各种各样的武器来达到这些目的。首先是他的形式和物质学说。如果每一个物体都是由形式和物质构成的，那么亚里士多德可以通过论证当一个物体经历变化时，它的形式会改变（通过替换的过程，新形式取代旧形式），而它的物质保持不变，从而为变化和稳定留出空间。亚里士多德继续认为，形式的变化发生在一对对立或对立的事物之间，其中一个是要实现的形式，另一个是它的缺失或缺失。当干变湿，或冷变热时，这是从匮乏（干或冷）到预期形式（湿或热）的变化。因此，在亚里士多德看来，变化决不是随机的，而是局限于把对立的性质联系在一起的狭窄的通道里；因此，即使在变化之中，秩序也是可见的。

一个坚定的巴门尼德主义者可能会抗议说，在这一点上，分析并没有逃脱巴门尼德对所有变化的反对，因为它不可避免地要求从虚无中出现某种东西。亚里士多德的回答可以在他的潜能和现实性学说中找到。亚里士多德无疑会承认，如果只有两种可能性是存在和非存在，也就是说，如果事物要么存在要么不存在，那么从非热到热的过渡确实包含了从非存在到存在的过渡（热的不存在到热的存在），因此很容易受到巴门尼德的反对。但亚里士多德相信，如果假设存在有三个范畴，而不是两个范畴，就可以成功地回避这个反对意见：不仅是存在和不存在，而且是（1）不存在，（2）潜在存在，（3）实际存在。如果这是事物的状态，那么变化可以发生在潜在的存在和实际的存在之间，而不需要进入画面。亚里士多德的想法也许最容易用生物学领域的例子来说明。橡子可能是一棵橡树，但实际上不是。在成为一棵橡树的过程中，它实际上变成了它最初的样子。因此，这种变化包含着从潜在性到现实性的过渡——不是从无到有，而是从一种存在或

程度到另一种存在。或者举两个非生物的例子，一个重物被放在地球上方，为了实现它与其他重物一起位于宇宙中心的潜力而下落。一个雕塑家，用木槌和锤子，揭示了一个潜在存在于原大理石内部的形状。

如果这些论点使我们能够摆脱与变化概念相关的逻辑困境，从而相信变化的可能性，那么它们还没有告诉我们任何关于变化的原因。为什么一颗橡子会从一棵潜在的橡树变成一棵真正的橡树，或者一个物体会从黑色变成白色，而不是保持原来的状态？亚里士多德的回答是一个复杂的，微妙的，并不总是一致的，关于本性和因果的理论。考虑到这些困难，我们将省去穷尽叙述的痛苦，并以简短的版本对待自己。

亚里士多德认为，我们所居住的世界是一个有序的世界，其中事物通常以可预测的方式运行，因为每个本性物体都有一个“本性”——一个属性（主要与形式相关），它使物体以其习惯的方式运行，没有不可逾越的障碍干预——或者，正如一位现代评论家所说：“在一个事物内部，它基本上决定了它作为自身时所做的事情。”对于亚里士多德这位杰出的动物学家来说，生物有机体的生长和发展很容易用这种内在驱动力的活动来解释。橡子长成橡树，因为它的本性就是这样。但这一理论不仅适用于生物生长，而且完全适用于生物领域。狗叫，石头落，大理石屈服于雕刻家的锤子和凿子，因为它们各自的性质。最终，亚里士多德认为，宇宙中所有的变化和运动都可以追溯到事物的**本质**。对于本性哲学家来说，本性哲学家对变化和能够发生变化的事物感兴趣，这些性质是研究的中心对象。

对于亚里士多德“本性”理论的一般陈述，我们需要添加一个限定条件——即，人工制造的物体是一种特殊情况，因为这样的物体除了其成分的性质外没有其他性质。如果一辆战车是由木头和铁构成的，木头的性质和铁的性质不会屈服于一种复合的“战车的性质”。相比之下，在有机世界中，组成一个有机体的器官和组织的性质服从于有机体作为一个整体的性质。人体的性质不是人体各种组织和器官的性质的总和，而是作为一个有机整体的活人的一种独特的性质特征。

有了这个本性理论，我们就可以理解亚里士多德科学实践的一个特征，这个特征让现代评论家和批评家感到困惑和苦恼——即，他的工作中没有任何类似于受控实验的东西。不幸的是，这种批评忽略了亚里士多德的目标，这极大地限制了他的方法论选择。**如果，正如亚里士多德所相信的那样，事物的本质是通过事物在自然、不受约束状态下的行为来发现的，那么人为的约束只会干扰和破坏。**如果尽管受到干扰，物体仍按其习惯方式运动，那么我们就毫无意义地麻烦了自己。如果我们设置了一些条件，阻止一个物体的本质暴露出来，我们所知道的是，它可以被干扰到保持隐藏的程度。人为的实验违背了，而不是揭示了事物的本质。因此，亚里士多德的科学实践不能被解释为他的愚蠢或缺陷——未能察觉到明显的程序改进——而是作为一种与他所感知的世界相容的方法，适合于他感兴趣的问题。**实验科学的出现，不是当人类最终产生了足够聪明的人，认识到人工条件有助于探索本性的时候，而是当各种各样的条件都得到满足的时候——包括一些问题的出现，而实验科学的过程有望提供答案。**

为了完成对亚里斯多德变化理论的分析，我们必须简单地考虑亚里斯多德著名的四个原因。要理解变更或工件的产生，就要知道它的原因（也许最好的翻译是“解释性条件和因素”）。有四种形式：事物的形式；质料：作为形式基础的物质，在变化中持续存在；带来改变的机构；改变的目的。这些分别被称为**形式因、物质因、效因和目的因**。举一个极其简单的例子——雕像的制作——形式原因是赋予大理石的形状，物质原因是接受这种形状的大理石，效率原因是雕塑家，

最终原因是制作雕像的目的（也许是美化雅典，或者是庆祝雅典的一位英雄）。在某些情况下，确定一个或另一个原因是困难的，或者一个或多个原因合并，但亚里士多德确信，他的四个原因提供了一个普遍适用性的分析方案。

关于形式与物质的区别，我们已经讲得够多了，足以说明“形式”原因和“物质”原因的含义，而“有效”原因也与现代因果关系的概念十分接近，无须再作进一步的说明。但“最终”原因需要解释。首先，“最终原因”一词在英语中是拉丁语 *finis* 的同源词，*finis* 意为“目的”或“结束”，这与它经常出现在亚里士多德的原因列表的最后一点关系也没有。亚里士多德认为，如果没有目的或功能的知识，许多事物是无法理解的，这是非常正确的。例如，要解释牙齿在口腔中的排列，我们必须了解它们的功能（前面的尖牙用于撕裂，后面的臼齿用于磨牙）。或者以无机领域为例，如果不知道锯的功能，就不可能理解为什么锯是这样被制造出来的。亚里士多德甚至认为最终原因优先于物质原因，他指出，电锯的目的决定了制造电锯的材料（铁），而我们拥有一块铁并不决定我们要把它做成电锯。

也许关于最终原因最重要的一点是它清楚地说明了目的（更专业的术语是“目的论”）在亚里士多德的宇宙中的作用。亚里士多德的世界不是原子论者的惰性的、机械的世界，在原子论者的世界里，单个原子不顾一切地追求自己的进程。亚里士多德的世界不是一个充满机会和巧合的世界，而是一个有序的、有组织的世界，一个有目的的世界，在这个世界里，事物朝着由其本性决定的目标发展。以亚里士多德对现代科学的预测程度来判断他的成功是不公平和毫无意义的（好像他的目标是回答我们的问题，而不是他自己的问题）；尽管如此，值得注意的是，亚里士多德的目的论对功能解释的强调对所有科学都具有深远的意义，并且直到今天仍然是生物科学中占主导地位的解釋模式。

宇宙学

亚里士多德不仅设计了研究和理解世界的方法和原则：形式和物质，本性，潜在和现实，以及四个原因。在这个过程中，他还发展了详细而有影响力的理论，涉及范围广泛的自然现象，从天上到地上的居民。

让我们从起源问题开始。亚里士多德坚决否认有开端的可能性，坚持认为宇宙一定是永恒的。另一种选择——宇宙是在某个时间点形成的——在他看来是不可想象的，违反了巴门尼德关于无中生有的理论。亚里士多德在这个问题上的立场会给中世纪的基督教亚里士多德派带来麻烦。

亚里士多德认为这个永恒的宇宙是一个巨大的球体，由月球所在的球壳划分为上下两个区域。月亮之上是天界；下面是陆地区域；月球，在空间上是中间的，也具有中间的性质。陆地或月下区域以出生、死亡和各种短暂的变化为特征；相比之下，天体或月上区域是一个永恒不变的周期区域。这一计划的起源似乎是显而易见的；在他的《论天堂》中，亚里士多德指出：“**在过去的整个时间范围内，就我们继承的记录而言，无论是在最外层的天堂的整个计划还是在它的任何适当部分，似乎都没有发生任何变化。**”如果我们在天空中观察到永恒不变的圆周运动，他继续说，我们可以推断，天空不是由地球元素构成的，地球元素的本质（观察显示）是在短暂的直线运动中上升或下降。**天必须由不可腐蚀的第五元素组成（地球上四种元素）：精粹（字面上，第五本质）或以太。**天体区域完全充满了这种精华（没有空洞的空间），我们将看到，它被划分成承载行星的同心球壳。

在亚里士多德看来，它具有一种优越的、准神的地位。

月下区域是生成、腐败和无常的场所。亚里士多德，像他的前辈一样，研究了陆地上发现的大量物质可以归结为的基本元素。他接受了最初由恩培多克勒提出，后来被柏拉图采纳的四要素——土、水、气和火。他同意柏拉图的观点，认为这些元素实际上可以归结为更基本的东西；但他并不认同柏拉图的数学倾向，因此拒绝接受柏拉图的正立体及其构成三角形。相反，他通过选择感官品质作为最终的构建块来表达他对感官经验世界的现实的承诺。两对品质是至关重要的：热冷和干湿。这些组合成四对，每对产生一种元素（见图 3.2）。注意这里再次使用了反义词。由于外界的影响，这四种品质中的任何一种被相反的品质所取代，这是没有什么可以禁止的。如果把水加热，使冷水变为热水，水就变成空气。这样的过程很容易解释状态的变化（从固体到液体到蒸汽，反之亦然），也很容易解释一种物质转化为另一种物质的更普遍的变化。在这样的理论基础上，炼金术士可以很容易地建立。

构成宇宙的各种物质完全填满了宇宙，没有留下任何空间。要理解亚里士多德的观点，我们必须抛开我们几乎自动的原子思维倾向；我们不能把物质想象成微小粒子的集合体，而必须想象成连续的整体。如果很明显，比如说，一条面包是由由小空间分隔的面包屑组成的，那么没有理由不假设这些空间中充满了一些更细的物质，比如空气或水。当然，没有简单的方法可以证明，也没有明显的理由可以相信，水和空气不是连续的。类似的推理，适用于整个宇宙，使亚里士多德得出结论，宇宙是充满的，一个充满，不包含空洞的空间。这种说法会受到中世纪学者的攻击。

亚里士多德用各种各样的论据来捍卫这个结论，比如下面的。下落物体的速度取决于它所经过的介质的密度——密度越小，下落物体的运动越快。由此可见，在真空（密度为零）中，没有任何东西可以减缓物体的下落，由此我们将被迫得出这样的结论：物体将以无限的速度下落——这是一个荒谬的概念，因为它意味着物体可以同时两个地方。批评家们经常指出，这一论证既可以用来证明无阻力并不意味着速度无穷，也可以用来证明虚空不存在。当然，这一点很好理解。然而，我们需要明白，亚里士多德对虚空的否定并非建立在这一单一推理之上。事实上，这只是反对原子论者的漫长战役的一小部分，在这场战役中，亚里士多德用各种各样的论据来对抗虚无空间（或虚空之地）的概念，有些更有说服力，有些不那么有说服力。

除了热或冷、湿或干之外，每一种元素也有重或轻。土和水都很重，但土更重。空气和火都是轻的，火是两者中较轻的。亚里士多德说其中两个要素轻，并不是说（如果我们这样说的话）它们较轻，而是说它们在绝对意义上轻；轻浮不是引力的弱版本，而是相反的。因为土和水都很重，所以它们的性质是向宇宙的中心下降；因为空气和火都是轻的，它们的本性是向外围上升（也就是说，地球区域的外围，包含月球的球形外壳）。因此，如果没有障碍物，土和水就会聚集在中心；由于它的重量更大，地球的位置会更低，在宇宙的正中心形成一个球体；水会聚集在它外面的同心球壳里。空气和火自然上升，但火，由于它更轻，占据最外层的区域，空气作为一个同心球体就在里面。在理想的情况下（没有混合的物体，也没有什么能阻止四种元素的性质实现它们自己），这些元素就会形成一组同心球体：火在外面，接着是空气和水，最后是土在中心（见图 3.3）。但在现实中，世界很大程度上是由混杂的物体组成的，一个物体总是相互干扰，理想永远无法实现。然而，理想的布局定义了每个元素的自然位置；地球的自然位置

是宇宙的中心，火的自然位置就在月球的内部，等等。

必须强调的是，这些元素的排列是球形的。**土聚集在中心形成地球，它也是球形的。亚里士多德用各种论证来捍卫这一信念。**从他的自然哲学出发，他指出，由于地球的自然趋势是向宇宙的中心移动，所以它必须围绕这一点对称地排列自己。**但他也提醒人们注意观测证据，包括月食期间地球投下的圆形阴影，以及观测者在地球表面的南北运动改变了恒星的明显位置。亚里士多德甚至报告了数学家对地球周长的估计（400,000 斯塔德=大约 45,000 英里，大约是现现代数值的 1.8 倍）。**由亚里士多德所捍卫的地球球形说，永远不会被遗忘，也不会受到严重质疑。中世纪人相信地球是平的这个广为流传的神话起源于现代。

最后，我们必须注意到这个宇宙论的一个含义，即空间，而不是一个中性的、同质的背景（类似于我们现代的几何空间概念），事件发生的背景，具有属性。或者更准确地说，我们的世界是空间的世界，而亚里士多德的世界是位置的世界。重的物体向它们在宇宙中心的位置移动，并不是因为它们倾向于与位于那里的其他重的物体结合，而仅仅是因为它们的本性是寻求那个中心位置；如果由于某种奇迹，中心恰好是空的（在亚里士多德的宇宙中，这在物理上是不可能的，但这是一种有趣的想象状态），它将仍然是每一个重物体的目的地。

运动，地球和天体

通过掌握亚里士多德的两个最基本的主张，我们可以最好地理解他的运动理论。首先，运动从来都不是自发的；没有推动者就没有运动。其次是两种运动类型的区别：向运动物体的自然位置运动是“自然”运动；任何其他方向的运动只有在在外力的强制下才会发生，因此是“被迫的”或“暴力的”运动。

在自然运动的情况下，推动者是物体的本性，它**负责使物体倾向于向其自然位置（由元素的理想球形排列所定义）运动。**混合体有一种方向性倾向，这取决于其组成中各种元素的比例。当进行自然运动的物体到达它的自然位置时，它的运动就停止了。在强迫运动的情况下，推动者是一种**外力**，它迫使身体违背其自然趋势，以直线运动以外的方向或方式向其自然位置移动。外力撤回时，这种运动就停止了。

到目前为止，这似乎是明智的。然而，有一个明显的困难是，要解释为什么一个水平抛射的物体，由于受到外力的运动，在与推动它的物体失去接触后，却没有立即停止。亚里士多德的回答是，**媒介作为推动者接管了一切。**当我们投射一个物体时，我们也作用于周围的介质（例如空气），赋予它移动物体的力量；这种能量从一个部分传递到另一个部分，以这种方式，抛射物总是与能够使其保持运动的部分介质接触。如果这看起来难以置信，那么考虑一下（从亚里士多德的观点来看）另一种更难以置信的选择——一个天生倾向于向宇宙中心运动的抛射物，尽管不再有任何东西使它这样做，但它还是水平或向上运动。

力不是运动的唯一决定因素。在陆地上的所有实际运动中，也会有阻力或相反的力量。亚里士多德似乎很清楚，运动的速度一定取决于这两个决定因素——动力和阻力。**问题来了：力、阻力和速度之间的关系是什么？**虽然**亚里斯多德可能没有想到可能存在普遍适用的数量法则**，但他对这个问题并非没有兴趣，并多次涉足定量领域。亚里士多德在他的《论天》和《物理学》中提到了自然运动，**他声称，当两个重量不同的物体下落时，走给定距离所需的时间将与重量成反比。（重一倍的身体只需要一半的时间）。**在《物理学》的同一章中，亚里士多德将

阻力引入到自然运动的分析中，他认为，如果相同重量的物体在不同密度的介质中运动，则穿越给定距离所需的时间与各自介质的密度成正比；也就是说，阻力越大，身体运动越慢。最后，亚里士多德在他的《物理学》中也谈到了强迫运动，他声称，如果一个给定的力在给定的时间内移动一个给定的重量（违背它的性质）一段给定的距离，那么同样的力会在相同的时间内将这个重量的一半移动两倍的距离（或者在一半的时间内移动同样的距离）；或者，一半的力会使一半的重量在相同的时间内移动相同的距离。

从这样的陈述中，一些亚里士多德的继承者作出了坚定的努力，以提取一般规律。这条定律通常被表述为： $v \propto F/R$ 。

即速度（ v ）与动力（ F ）成正比，与阻力（ R ）成反比。对于重物自然下落的特殊情况，动力为物体的重量（ W ），则关系为： $v \propto W/R$ 。

对于大多数运动情况，这种关系可能对亚里士多德的意图没有太大的影响；然而，如我们所做的那样，给予它们数学形式，表明它们对 v 、 F （或 W ）和 r 的所有值都成立——亚里士多德肯定会否认这种说法。例如，他明确地指出，等于动力的阻力将完全阻止运动，而上面的公式却没有给出这样的结果。此外，在这些关系中出现的速度严重歪曲了亚里士多德的概念框架，其中没有将速度作为运动的可量化度量的概念，而是仅用距离和时间来描述运动。速度作为一个科学技术术语，可以用数值来表示，这是中世纪的贡献（见下文第 12 章）。

亚里士多德因为这个运动理论而受到严厉的批评，因为他认为任何明智的人都应该认识到它的致命缺陷。这样的批评有道理吗？首先，我们的目标是在他们所生活的文化背景下理解历史演员的行为、信仰和成就，而不是根据这些历史演员与我们相似的程度来评估功劳或指责。简而言之，历史学家必须始终将他们的研究对象置于背景中。其次，对亚里士多德运动理论的一些批评只适用于追随者和批评者强加给亚里士多德的理论，而不是他自己的理论。第三，这个理论在真正的亚里士多德（并适当地语境化）版本中，在今天是很有意义的，在公元前 4 世纪肯定是很意义的。例如，各种调查表明，大多数受过大学教育的现代人都准备同意亚里士多德运动理论的许多基本原理。第四，亚里士多德理论中相对适度的定量内容很容易解释为他更大的自然哲学的结果。他的主要目标是理解本质，而不是探索诸如适用于运动物体的时空（或地点 - 时间）坐标等附带因素之间的定量关系；即使对后者进行详尽的调查，也不能给我们提供有关前者的有用信息。如果你愿意，你可以批评亚里士多德对现代科学家感兴趣的东西不感兴趣，但我们并没有因此学到任何关于亚里士多德的重要知识。

天体的运动是一种完全不同的现象。诸天是由不可腐蚀的精华组成的，它没有对立面，因此不能发生质变。这样一个区域是绝对静止的，这似乎是合适的，但这个假设被对天空最随意的观察所推翻。因此，亚里士多德把最完美的运动——连续均匀的圆周运动——赋予了天空。匀速圆周运动除了是最完美的运动外，似乎还能解释观测到的天体周期。

在亚里士多德的时代，这些周期在希腊世界已经研究了几个世纪，在其前身文明中已经研究了几千年。据了解，“固定”的恒星运动完全均匀，就好像固定在一个均匀旋转的球体上，旋转周期约为一天。但有七颗恒星，流浪的恒星或行星，表现出更复杂的运动，显然是在恒星球体上爬行，因为它每天都在旋转。这七颗行星分别是太阳、月亮、水星、金星、火星、木星和土星。太阳缓慢地爬行（大约 1° /天），从西向东，速度变化很小，沿着一条叫做黄道的路径，穿过黄道的中心，穿过固定恒星的球体。月球的轨道大致相同，但速度更快，大约是

12° /天。其余的行星也沿着黄道（或其附近）以不同的速度运行，偶尔也会反转方向。

如此复杂的运动是否符合天体匀速圆周运动的要求？比亚里士多德早一代的欧多克索斯已经证明了这一点。我将在第五章再谈这个问题；现在，只要指出欧多克索斯把每一个复杂的行星运动都看作是一系列简单而均匀的圆周运动的组合就足够了。为此，他给每个行星分配了一组同心球体，每个球体都分配了复杂行星运动的一个组成部分。亚里士多德接受了这个方案，做了一些修改。当他完成后，他制造了一个复杂的天体机器，由 55 个行星球体和固定恒星的球体组成。

天空运动的原因是什么？亚里士多德的自然哲学不会允许这样的问题被忽视。天球当然是由精华组成的；它们的运动既然是永恒的，就必然是自然的，而不是被迫的。这种永恒运动的原因本身必然是不动的，因为如果我们不假定一个不动的动者，我们很快就会发现陷入无限的倒退之中：一个运动的动者必须从另一个运动的动者那里获得它的运动，以此类推。亚里士多德将行星球体的不动的推动者称为“原动机”，一个代表最高善的活神，完全实现，完全专注于自我沉思，非空间的，与它（或他或她）移动的球体分离，一点也不像传统的拟人化的希腊神。那么，原动力或不动动力是如何引起天空运动的呢？不是作为有效的原因，因为这需要动者和被动者之间的接触，而是作为最终的原因。也就是说，原动机是天体所渴望的对象，它们试图通过假设永恒的、均匀的圆周运动来模仿原动机不变的完美。任何跟随亚里士多德讨论了这么多的读者都有理由假设整个宇宙中存在一个不动的移动者；因此，当亚里士多德宣布，事实上，每一个天体都有它自己的不动的动者，它的感情的对象和它的运动的最终原因时，这是令人惊讶的。

第十二章

月下区域物理学

中世纪物理学并不是现代物理学的原始版本，不能通过与现代物理学的比较来合理地判断。当然两者之间有重叠，但中世纪的物理学，与亚里士多德形而上学和自然哲学密切相关，更多地关注我们称之为“形而上学”或“哲学”的基本问题；关于宇宙的基本物质，元素和它们的组成，运动和变化的来源，诸如此类。

这位中世纪的自然哲学家（我通常会提到他）从亚里士多德的《物理学》和其他著作的文本中入手，并致力于澄清含糊之处，对文本中困难或有争议的部分进行辩论，以及对亚里士多德原则的原始应用或扩展。但他显然不像广为流传的神话所说的那样，是亚里士多德文本的奴隶；相反，他是典型的天才读者和亚里士多德文本的解释者和他的评论家（包括评论家），渴望在讨论和辩论中展示他的逻辑和创造力。在神学方面，他需要小心谨慎，但在其他方面，这位中世纪教授可以自由地按照理性和经验行事。

运动的数学描述

今天，数学在运动中的应用无需辩护。理论力学，运动理论的母学科，从定义上讲是数学的，对任何掌握现代物理学的人来说，数学方法似乎是唯一的方法。

但也许只有在事后和从现代的角度来看，这个结论才是显而易见的；对于许多在亚里士多德传统下工作的人来说，这似乎是不可信的。我们必须记住，亚里士多德和他的中世纪追随者认为运动是四种变化中的一种，他们对变化的分析并不意味着关注局部运动，而是适用于所有四种类型的变化。我们还需要认识到，大多数变化都没有明显的数学意义。物质的生成或衰变以及性质的改变显然不是数学过程，只是经过几个世纪的英勇努力，学者们才找到了用数学方法处理几种变化的方法，包括局部运动。让我们研究一下中世纪这一过程的早期阶段。

自然的数学化当然有古代的支持者，包括毕达哥拉斯、柏拉图和阿基米德；在天文学、光学和平衡学方面取得了早期的成功（见上文第五章）。**这些努力的成功将不可避免地鼓励那些对其他学科的数学化感兴趣的人。事实上，亚里士多德自己在他的《物理学》中对运动进行数学分析的原始开端负有责任，在那里，距离和时间都是可量化的，被用作运动的度量。**亚里士多德认为，两个运动的物体中速度较快的在同一时间内走的距离较大，或在更短的时间内走的距离相同，而两个运动速度相同的物体在相同的时间内走的距离相同。**在亚里士多德之后的一代，数学家奥特利库斯（公元前 300 年）更进一步，将匀速运动定义为在相同时间内走过相同距离的运动。值得注意的是，在这些古代的讨论中，距离和时间被视为运动的关键度量，可以赋予它们一个数值，而“快”或速度从未获得这种地位，仍然是一个模糊的、未量化的概念。**

这种数学分析对中世纪欧洲的影响首先体现在布鲁塞尔的杰勒德（Gerard of Brussels）的著作中，这位数学家可能曾在 13 世纪上半叶任教于巴黎大学（University of Paris）。就我们的目的而言，杰拉德的《论运动》这本简短的书中最重要的一点是，它的内容被限制在我们现在所说的“运动学”——对运动的纯粹数学描述——而不是与原因有关的“动力学”。这是一个重要的区别（类似于天文学中“工具主义”和“现实主义”的区别），它将作为我们讨论中世纪运动理论的组织原则之一。就目前而言，布鲁塞尔的杰勒德作为后来在拉丁西方发展起来的运动传统的先驱者是很重要的。

这一传统在大约 1325 年至 1350 年间，在牛津大学默顿学院的一群杰出的逻辑学家和数学家中开花结果。这组包括托马斯·布拉德瓦尔丁（d. 1349），随后任命坎特伯雷大主教；威廉·海茨伯里（卒于 1335 年）；邓不利顿的约翰（约 1349 年）；Richard Swineshead（1340 - 1355）。首先，默顿小组的成员明确指出了运动学和动力学之间的区别，这在杰拉德的《论运动》一书中是隐含的，他们指出，运动可以从原因（动力学）或结果（运动学）的角度来研究。默顿的学者们开始发展一个概念框架和技术词汇来处理运动学运动。在这个概念框架中包含了“速度”和“瞬时速度”的概念，它们都被视为可以指定大小的数学概念。**默顿物理学家区分匀速运动（匀速运动）和非匀速运动（或加速运动）。他们还设计了一个均匀加速运动的精确定义，与我们自己的定义相同：如果一个运动的速度在相同的时间单位内以相同的增量增加，那么它就是均匀加速的。最后，默顿学者发展了各种各样的运动学定理，我们将在下面研究其中的几个。**

在此之前，我们必须考虑这一运动学成就的哲学基础。速度作为一种新的运动测量方法的出现，与古代的测量方法（距离和时间）一样，是一种需要解释的发展。速度毕竟是一个非常抽象的概念，它本身并不强加于运动物体的观察者，而是由自然哲学家发明并强加于现象之上的。这是怎么发生的？答案在对品质及其强度或强度的哲学分析中找到。其基本思想是，质量或形式可以以不同的程度或强度存在：不存在单一的温暖或寒冷程度，而是**存在从极冷到极热的一系列强**

度或程度。此外，人们承认，在这个范围内，形式或质量可以有所不同；也就是说，它们可以被加强和削弱，或者，用中世纪的专业术语来说，经历强化和缓解。现在，当这种关于性质及其强化和缓和的一般讨论转到局部运动的特殊情况下（运动被认为是一种性质或类似于一种性质的东西），速度的概念很快就产生了。运动质量的强度——衡量其强度或程度的标准——只能是迅捷或（用中世纪拉丁语术语来说）“速度”。运动性质的增强和缓和必然与速度的变化有关。

因此，对品质、强度及其强化的反思，将默顿学派引向了一种新的区分：一种品质的强度（如上所述）和它的数量（有多少）之间的区别。举一个例子可以帮助我们理解这种区别：在热的情况下，一个热的物体可以比另一个热的物体更热，这是很明显的；这是指质量的强度，也就是我们所说的“温度”。但是我们也有热量的概念，有多少热量。如果我们有二个温度相同的物体，其中一个它是它的两倍大，那个大的物体显然有两倍的热量。对于 14 世纪的数学家来说，所有的性质都应该进行类似的分析，同时拥有数量（质量的多少）和强度（质量的程度或强度）。对于热量，我们有温度（强度）和卡路里（量）；重量为重量（数量）和密度或比重（强度）；等等……同样的分析能成功地应用于运动吗？是的，它可以，我们将看到。

默顿学院在素质分析方面取得成就的消息很快传到了欧洲其他知识中心。在此过程中，几何表示法的发展使分析更加丰富和清晰。默顿学院最初的素质分析是口头进行的，与我们分析的方式大致相同。然而，人们认识到几何分析的优点，并最终形成了相当复杂的几何表示系统。最早开发这种系统的人之一是来自博洛尼亚的方济各会修士乔瓦尼·迪·卡萨里（Giovanni di Casali）（他也在剑桥待过一段时间），他在 1351 年左右写道；同一年代的晚些时候，巴黎大学的尼科尔·奥勒斯姆（生于 1382 年）提出了更为详尽的几何分析。对奥勒斯姆方案的考察无疑对我们和他的中世纪读者一样具有启发性。

第一步是用线段来表示质量的强度——对于受亚里士多德（用线来表示时间）和欧几里得（用线来表示数值大小）影响的中世纪学者来说，这是一个相对容易的步骤。如果线段 AB（图 12.2）表示某种质量的给定强度，则线段 AC 表示该强度的两倍。这很好，但它还没有让我们走得很远。关键的下一步是使用这条线来表示主题的任何一点的质量强度。以一杆声发射为例（图 12.3），采用差分加热，使热量从一端均匀地增加到另一端。在 A 点和任意间隔，立一条垂直线代表该点的热强度。如果（正如我们所假设的那样）温度从 A 点均匀地上升到 E 点，则该图将显示垂直线的均匀延长。现在，oreme 通过用水平线代替杆的绘制，使这个系统更加抽象（图 12.4）。这就产生了一种普遍的表征系统，其中水平线（称为“主题线”或“延伸线”）代表主体，无论它是什么，而垂直线则代表我们在主体的各个点上选择的任何品质的强度。

奥瑞斯姆创造的是一种几何表现形式——现代绘图技术的明显先驱——其中图形的形状（如图 12.3 所示）告诉我们在其主体上质量强度的变化。但是我们如何从一般的品质过渡到具体的运动呢？一种方法是考虑一个物体，它的不同部分以不同的速度运动；一个很好的例子就是一端被大头针夹住并绕着大头针旋转的杆。在这种情况下，我们可以水平地画出杆，在任意一点上立一条垂线，表示该点的角速度。结果将是一个物体的速度分布，如图 12.5 所示。

但还有另一种情况，更困难，因为它需要更抽象的处理。假设我们有一个物体作为一个整体运动，它的所有部分都有相同的速度，但速度随时间而变化。奥瑞斯姆解释说，理解这一点的方法是看到，这里的主题线不是一个有形物体的延

伸，就像上面的例子一样，而是局部运动的持续时间。时间成为主题，用水平线表示。这给了我们一个原始坐标系，在这个坐标系中，速度可以作为时间的函数来绘制（见图 12.6）。奥勒斯姆接着讨论了速度相对于时间的各种形态。匀速将用一个图形来表示，其中所有的垂直线长度相等，即一个矩形。非匀速需要变长垂线。在这类非均匀运动中，我们有均匀非均匀速度（均匀加速运动），用三角形表示，也有非均匀非均匀运动（非均匀加速运动），用各种其他图形表示，它们的形状由特定的非均匀性模式决定（见图 12.7）。最后，奥勒斯姆如何处理上述品质的另一个特征——它们的总量？他把运动的总量与经过的距离等同起来；他认为这必须用图形的面积来表示。

奥勒斯姆非常聪明地将几何学运用到各种运动的表征中。他和他的追随者并不满足于创造几何工具。他们接着用它们来说明和证明适用于匀速或匀加速运动的运动学定理。最重要的情况是后者，见图 12.7 (b)。这种情况在 14 世纪引起了特别的兴趣，不是因为它与现实世界中的任何特定运动相一致，而是因为它提出了一个实质性的数学挑战。让我们来考察一下从这些努力中得出的适用于匀加速运动的两个重要定理。

默顿的学者们已经说过了，没有几何学上的证明或说明；它现在被称为“默顿法则”或“平均速度定理”。这个定理试图通过将匀速运动与匀加速运动进行比较来找到匀速运动的度量。这个定理声称，一个物体以匀速运动在给定时间内走过相同的距离，就好像它以匀速运动的时间等于它的平均速度（或平均速度）一样。用数值来表示，这个说法是，一个物体从速度 10 匀速加速到速度 30，所经过的距离与一个物体以速度 20 匀速运动同一段时间所经过的距离相同。现在 Oresme 提供了一个简单而优雅的几何证明（图 12.8）。匀速运动可用三角形 ACG 表示，其平均速度用线 be 表示。因此，将匀速运动与匀加速运动相比较的匀加速运动必须用矩形 ACDF 表示（其高度为 be，匀速运动的平均速度）。默顿法则简单地指出加速运动所经过的距离等于匀速运动所经过的距离。由于在 Oresme 的图中，经过的距离是用图的面积来测量的，所以我们可以用三角形 ACG 的面积等于矩形 ACDF 的面积来证明这个定理。看一下这两个数字就会发现情况的确如此。

第二个定理和第一个定理一样，旨在通过比较所经过的距离来阐明匀加速运动的数学性质。在这种情况下，均匀加速运动（从静止开始）的前半段所走的距离与相同运动的后半段所走的距离进行比较；他们声称后者是前者的三倍。为了从几何上证明这个定理，我们只需要证明四边形 BCGE（图 12.8）的面积是三角形 ABE（图 12.8）的面积三倍，三角形 BCGE 表示在后半段时间内走过的距离 BC。三角形 ABE 表示在前半段时间内走过的距离 AB。再一次，检验将证明这是正确的。

最后，两点：首先，我们必须提醒自己，中世纪的运动学完全是一种抽象的努力——就像现代数学一样。例如，有人宣称，如果匀速运动存在，那么默顿法则就适用于它。中世纪的学者从未在现实世界中发现过这种运动的实例。对于这种看似奇怪的行为有什么令人满意的解释吗？是的，有。考虑到中世纪的技术（特别是测量时间的技术），证明一个特定的运动是均匀加速的，将是一个相当大的壮举。即使是在 21 世纪，想象一下使用当地五金店中可用的任何或所有资源精确证明运动均匀加速的挑战。但也许更重要的是，发展这种运动分析的中世纪学者是数学家和逻辑学家；就像现代数学家和逻辑学家一样，他们也不会想到把自己的工作场所从书房搬到车间。

其次，从这种纯粹的智力劳动中产生了运动学的新概念框架和各种定理（例

如默顿规则），这些定理在 17 世纪由伽利略发展的运动学中占有突出地位，并通过他进入了现代力学的主流。命题 1，伽利略在他的《两门新科学》中对均匀加速运动的分析的定理 1 是默顿规则（或平均速度定理）。假设伽利略对他 14 世纪的先驱者一无所知是不可能的。

局部运动动力学

在详细讨论了中世纪的运动学（用数学方法描述运动的努力）之后，我将以对运动因果分析的简短叙述来结束对中世纪力学的讨论。中世纪所有动力学思想的起点是亚里士多德的原则，即运动的事物总是由一个动者运动的。我们必须首先弄清楚这个原则在中世纪是什么意思。然后，我们将看看在几个特别困难的运动情况下，试图识别的移动。最后，我们将检查试图量化的力量或动力之间的关系，一个移动的速度和由此产生的物体。

读者还记得，亚里士多德将运动分为两类：自然运动和强制运动。物体向其自然位置移动的自然运动，显然是由内在原因或原理引起的：即物体的本性。在任何其他方向上的运动都必须是由外力与运动物体连续接触而产生的强迫运动。这在大致上似乎足够清楚，但当中世纪的学者试图在自然运动和一个特别麻烦的强迫运动中确定动力时，问题就出现了。

在他的《物理学》一书中，亚里士多德对自然运动的推动者进行了解释，他摇摆不定，首先提出自然运动可能是由一个内因，即身体的本质引起的，但后来又争辩说，身体的本质不能是全部，还需要一个外部推动者的参与。亚里士多德的矛盾心理给他的中世纪追随者带来了一个明显的问题，他们感到有必要询问是否足以肯定身体是由其自身性质运动的。阿维森纳和阿威罗伊认为这种解释是不可接受的，因为它没有充分区分运动的物体（身体）和运动物体（身体的性质）。在他们看来，他们发现了形式 - 物质区分的一个适当的替代，即物体的形式是动者，而物体的物质是被动者。在西方，托马斯·阿奎那否定了这个解决方案，提醒他的读者物质和形式是不可分割的，不能被视为不同的东西。相反，阿奎那认为（恢复了亚里士多德的一个建议），在自然运动的情况下，推动者是在自然位置之外产生身体的任何东西；此后，身体不需要移动，而只是做自然的事情：向自然的地方移动。关于这个问题的争论一直持续到中世纪后期，没有明显的胜利者。

强迫运动的特殊情况证明是令人烦恼的，那就是抛射物；问题是如何解释他们在与原来的投影仪失去联系后的持续运动（例如，扔石头的手）。亚里士多德把原因归结为媒介，认为投影仪在投射投射物的同时，也赋予了周围媒介产生运动的力量；这种能量从一个部分传递到另一个部分，使抛射物始终被能够使其移动的一部分介质所包围。很明显，根据这个说法，需要一个持续与抛射物接触的外力。

对亚里士多德解释的第一个主要反对来自于六世纪亚历山大新柏拉图主义哲学家约翰·菲洛波诺斯（公元 575 年之后）对亚里士多德的《物理学》的评论，他认为介质的作用是阻力而不是推动力，他怀疑介质能否同时发挥这两种功能。作为一名新柏拉图主义者和一名坚定的反亚里士多德主义者，菲洛波诺斯对亚里士多德的自然哲学发起了广泛的攻击，包括强制运动需要外部推动力的观点。相反，他提出，所有的运动，无论是自然的还是被迫的，都是内部运动者的结果。因此，当抛射物被扔出去时，投射者给抛射物施加了一种“无形的动力”，这种

内力就是抛射物运动的原因。如果这似乎是一个不太可能的答案，那么考虑一下生物的运动，它们的运动显然是由内力而不是外力推动的。

尽管菲洛波诺斯的印象动力的起源是完全反亚里士多德的，但它最终被吸收到中世纪的亚里士多德传统中。菲洛波诺斯对亚里士多德《物理学》的评论在阿拉伯语翻译中有很大的影响，似乎对中世纪的拉丁思想产生了间接影响，尽管传播的细节仍有待全面追查。在 13 世纪，罗杰·培根和托马斯·阿奎那讨论并拒绝了与菲洛波诺斯非常相似的理论。在 14 世纪，印痕力理论被捍卫，首先是由方济会神学家弗朗西斯·德·马尔奇亚 (fl. 1320)，随后由约翰·布里丹 (约 ca. 1295 - ca. 1358) 等。让我们来看看布里丹的理论版本，通常被认为是最先进的形式。

布里丹用了一个新的术语“动力”来表示这种内在的动力——这个术语一直到伽利略时代都是标准的。布里丹把动力描述为一种内在的性质，它的性质是移动被它所影响的物体，并煞费苦心地将这种性质与它所产生的运动区分开来：“动力是一种永恒的性质，不同于抛射物运动的局部运动……很可能，动力是一种自然存在的品质，它倾向于移动一个被它打动的身体。”在为他的动力理论辩护时，布里丹指出了一个类似的磁铁的例子，它能够在铁中留下一种能够使铁向磁铁移动的特性。像任何品质一样，动力也会因反对或阻力的存在而腐化，但除此之外仍能保持其原有的力量。布里丹向量化动力迈出了第一步，他宣布动力的强度可以用速度和它所包含的物体的物质数量来衡量。他还扩展了动力理论的解释范围，超越了简单的抛射运动，认为天堂的运动似乎可以用上帝在创造的那一刻强加给天体的动力来解释；因为天空不提供阻力，这种动力就不会被破坏，天体就会以一种永恒不变的运动运动（正如观察所揭示的那样）。最后，他解释了一个下落物体的加速度，他的假设是，当物体下落时，它的重量不断地在体内产生额外的动力；随着动力的增加，落体的速度也随之增加。

推动力理论成为抛物运动的主要解释，直到 17 世纪，一种新的运动理论才逐渐被接受，这种理论否认持续无阻力运动需要力（无论是内部的还是外部的）。人们曾多次尝试将动力理论视为现代动力学方向的重要一步；例如，人们经常注意到布里丹的推动力（速度 \times 物质质量）和现代动量概念（速度 \times 质量）在数量上的相似性。毫无疑问，两者之间是有联系的，但我们必须注意，布里丹的推动力是抛射运动持续的原因，而动量是运动的度量，只要没有遇到阻力，就不需要原因来持续。简而言之，布里丹仍然在一个基本属于亚里士多德的概念框架内工作；这意味着他与 17 世纪的自然哲学家不同，后者在运动和惯性的新概念基础上建立了新力学。

新物理学的诞生

——I. 伯纳德·科恩

第七章

伟大的设计——一种新的物理学

1687 年艾萨克·牛顿的《原理》的出版是整个物理科学史上最著名的事件之一。在这本书里，人们可能会发现几千年来努力理解世界体系、力和运动的原理，以及在不同介质中运动的物体的物理学的顶峰。尽管《原理》中的物理学自那以后不断被改变、改进和挑战，但我们仍然按照大约 300 年前牛顿所做的那样，着手解决天体力学和物体物理学的大多数问题，这是牛顿科学天才的活力的有力证明。牛顿天体力学原理指导着我们的人造卫星、航天飞机，以及我们发射的每一艘宇宙飞船，去探索太阳系的广阔空间。如果这还不足以满足伟大的准则，牛顿作为一个纯数学家同样伟大。他发明了微积分（由德国哲学家莱布尼茨同时独立提出），这是物理学的语言；他提出了二项式定理和无穷级数的各种性质；他为变分微积分奠定了基础。在光学方面，牛顿开始了光的分析和组成的实验研究，表明白光是许多颜色的光的混合物，每种颜色都有一个特征的折射率。在这些研究的基础上产生了光谱学和颜色分析方法。牛顿发明了反射式望远镜，从而向天文学家展示了如何超越透镜望远镜的局限性。总而言之，他是一项了不起的科学成就，是前所未有的，也可能永远不会再出现。

在本书中，我们将专门讨论牛顿的动力学和万有引力系统，前面几章只是为这些中心问题作准备。如果你仔细阅读了它们，你就已经记住了理解牛顿体系所必需的所有主要成分。但是，即使给出了匀速圆周运动的分析，也仍然需要牛顿的指导来把这些成分放在一起。提出万有引力的新概念需要天才。让我们看看牛顿到底做了什么。

首先，必须明白，伽利略本人从未试图展示任何可以解释行星或其卫星运动的力的体系。至于哥白尼，《革命论》中没有关于天体力学的重要见解。开普勒曾试图提供一种天体机制，但结果并不令人满意。他认为太阳散发出的意像会导致行星围绕太阳旋转。他进一步假设，太阳和行星之间的磁场相互作用会使行星在本来是圆形的公转过程中转向椭圆轨道。其他研究行星运动问题的人提出了包含某些特征的力学体系，这些特征后来出现在牛顿动力学中。其中之一是罗伯特·胡克，他认为牛顿应该给予他更多的信任，而不仅仅是一个偶然的参考，因为他预测了动力学和万有引力的部分定律。这是完全可以理解的。

牛顿期望

宇宙力学发现的高潮篇章始于一个漂亮的故事。到了 17 世纪的 25 年代，有一群人非常渴望发展新的数学实验科学，他们联合起来共同进行实验，向彼此提出问题以供解决，并报告他们自己的研究，以及通过通信、书籍和小册子揭示的其他人的研究。于是，罗伯特·胡克、埃德蒙·哈雷和英国最著名的建筑师克里

斯托弗·雷恩爵士开会讨论了这样一个问题：在什么力的定律下，行星会沿着椭圆轨道运行？根据开普勒定律，特别是第三定律或调和定律，还有面积定律，很明显，太阳一定以某种方式控制或至少影响行星的运动，这与行星与太阳的相对距离有关。即使开普勒提出的特殊机制（意像和磁力）不得不得被拒绝，毫无疑问，某种行星 - 太阳相互作用使行星保持在它们的轨道上。此外，比开普勒更敏锐的直觉会感觉到，从太阳发出的任何力都必须从那个物体向各个方向扩散，可能会根据它与太阳距离的平方的反比而减小——光的强度与距离的关系而减小。但这么说和用数学证明是两码事。因为要证明它，就需要一个完整的物理学和数学方法来解决所有随之而来的问题。当牛顿拒绝赞扬那些在无法从数学上证明它们或将它们纳入有效的动力学框架的情况下抛出一般性命题的作者时，他很有道理地说，正如他对胡克的主张所做的那样：“这不是很好吗？数学家们发现、解决和处理所有的问题，他们必须满足于自己只是枯燥的计算器 and 苦差事；而另一个人，什么也不做，只是假装和抓住一切事物，必须带走所有的发明，以及那些跟随他和那些在他之前的人。（另见补编 11）。

无论如何，到 1684 年 1 月，哈雷已经得出结论，作用在行星上使它们保持在轨道上的力“以距离的平方的反比减少”，但他无法从这个假设推断出观测到的天体运动。当雷恩和胡克在这个月晚些时候见面时，他们同意哈雷关于太阳力的假设。胡克夸口说：“根据这个原则，天体运动的所有定律都可以被证明，他自己已经做到了。”但是，尽管他一再敦促，雷恩也提供了一笔可观的奖金，胡克没有——大概也不能——提出一个解决方案。六个月后，1684 年 8 月，哈雷决定去剑桥请教艾萨克·牛顿。在他到达后，他得知了一个“好消息”，即牛顿“已使这一论证臻于完美”。下面是 DeMoivre 对那次访问几乎同期的描述：

他们在一起待了一段时间后，哈雷博士问他，假设行星对太阳的引力与它们与太阳距离的平方成反比，他认为行星所描述的曲线会是什么样的。艾萨克爵士立即回答说，这将是一个省略号。医生又惊又喜，问他是怎么知道的。“啊，”他说，“我已经算过了。于是，哈雷博士立即要求他进行计算。艾萨克爵士翻看了他的文件，但没有找到，但他答应他续签，然后寄给他。艾萨克爵士为了兑现他的诺言，又开始工作了，但是他不能得出他认为他以前仔细检查过的那个结论。然而，他尝试了一条新的路，虽然比第一条路要长，但还是回到了原来的结论。接着，他仔细地检查了一下，他以前所做的计算不正确的原因是什么，他发现，他用自己的手粗略地画了一个省略号，画出了曲线的两个轴，而不是画出两个互相倾斜的直径，这样他就可以把他的想象固定在任意两个共轭直径上，这是他必须做的。他意识到了这一点，就使他的两个计算一致。

在哈雷来访的激励下，牛顿重新开始研究一个课题，这个课题在他二十多岁时就引起了他的注意，当时他为其他伟大的科学发现奠定了基础：白光和颜色的本质，以及微分和积分。他现在把他的研究整理好了，取得了很大的进步，在秋季学期，他在剑桥大学的一系列关于动力学的讲座中讨论了他的研究，这是他教授职位的要求。最终，在哈雷的鼓励下，这些讲座的草稿《论运动》（*De motu corporum*）成长为任何人所能想到的最伟大、最有影响力的书之一。许多科学家都赞同哈雷在他为《牛顿原理》（牛顿杰作的全称是《自然哲学的数学原理》，1687 年在伦敦出版的《自然哲学的数学原理》）作序时所写的颂歌中所表达的观点：

你们现在正饮着天上的甘露，
来和我一起用歌声庆祝这个名字

牛顿，对缪斯来说是可爱的；因为他
打开隐藏的真理宝库：
他的脑海中充满了菲比斯的影子
他自己神性的光辉。
没有凡人能接近神。

《原理》

《原理》分为三部分或三卷；我们将集中讨论第一个和第三个。在第一册中，牛顿提出了运动物体动力学的一般原理，在第三册中，他把这些原理应用于宇宙的机制。第二册涉及流体力学的一个方面，波的理论，和物理的其他方面。

在第一卷中，在序言、一系列定义和对时间和空间本质的讨论之后，牛顿提出了“公理或运动定律”。

定律一：

任何物体都保持其静止或匀速向前运动的状态，除非**施加在它上面的力迫使它改变其状态**。

定律二：

运动的变化与施加的动力成正比，并且发生在施加力的直线方向上。（见 5 - 第 184 页注。）

观察到，如果一个物体在直线上匀速运动，与物体运动方向成直角的力不会影响向前运动。这是由于加速度总是与产生加速度的力的方向相同，所以在这种情况下，加速度与运动方向成直角。因此，在第五章的玩具火车实验中，主要作用的力是向下的重力，产生垂直加速度。因此，无论是向前运动还是静止的球，都会在向上运动时减速，直到静止，然后在下降时加速或加速。

对比这两组照片（第 83 页）可以看出，无论火车是静止还是匀速运动，向上和向下的运动完全相同。在前进方向上，没有重量或重力的影响，因为这只在向下的方向上起作用。唯一向前或水平方向的力是少量的空气摩擦，几乎可以忽略不计；所以可以说在水平方向上没有力作用。根据牛顿第一运动定律，球会像火车一样沿着直线匀速向前运动——你可以通过照片来验证这一点。无论火车是静止还是直线匀速运动，钢球都保持在火车头上方。这种运动定律有时被称为惯性原理，物质物体具有的保持静止状态或在直线上匀速运动的特性有时被称为物体的惯性。

牛顿用抛射物来说明定律一，**抛射物继续向前运动，“只要它们没有受到空气阻力的阻碍，也没有受到重力的向下推动”**，他还提到了“行星和彗星等更大的天体”。（关于“较大天体”如“行星和彗星”运动的惯性方面，见补充 12。）牛顿一下子提出了与亚里士多德物理学相反的观点。在后者中，任何天体都不可能在没有力的情况下匀速地作直线运动，因为这将是一种“剧烈的”运动，因此与它的性质相反。正如我们所看到的，陆地上的物体如果没有外部动力或内部动力，也不可能沿着它的“自然”直线运动。牛顿提出了一种同时适用于地球和天体的物理学，他指出，在没有力的情况下，物体不一定像亚里士多德假设的那样静止不动或静止不动，但它们可能以恒定的直线速度运动。这种各种物体在没有力的情况下静止或匀速直线运动的“漠不关心”，显然是伽利略在他关于太阳黑子的书（第 88 页）中所述的一种高级形式，不同之处在于，伽利略在这本书中所写的是沿一个与地球同心圆的大球面匀速运动。

牛顿谈到运动定律时说，它们是“数学家所接受的原理，而且……经过大量实验的证实。根据前两个定律和前两个推论，伽利略发现物体下降的速度随时间的平方而变化，而抛射物的运动是在抛物线曲线上的，经验与这两者都相符，除非这些运动受到空气阻力的阻碍。”“两个推论”指的是伽利略和他的许多前辈将两个不同的力或两个独立的运动结合起来的方法。在伽利略的《两门新科学》发表五十年后，对于已经建立惯性物理学的牛顿来说，很难想象伽利略在没有完全放弃圆度和不知道线性惯性的真正原理的情况下，能够如此接近惯量的概念。

牛顿对伽利略非常慷慨，因为无论人们如何争论伽利略“真的”有惯性定律或牛顿定律一，都需要极大的想象力才能将定律二归功于伽利略。这个定律有两部分。在牛顿第二定律陈述的后半部分，由“作用力”或“动量力”所产生的“运动变化”——无论是物体运动速度的变化，还是运动方向的变化——被称为“沿作用力所施加的直线的方向”。这一点在伽利略对弹丸运动的分析中当然有暗示，因为伽利略假设在向前的方向上没有加速度，因为没有水平力，除了可以忽略不计的空气摩擦作用；但在垂直方向上，由于向下作用的重力，向下的速度会加速或持续增加。但定律二的第一部分，即运动大小的变化与动力有关，又是另一回事；只有牛顿才能在伽利略对落体的研究中看到它。这部分定律说，如果一个物体首先受到一个力 F_1 的作用，然后又受到另一个力 F_2 的作用，产生的加速度或速度变化， A_1 和 A_2 ，将与这些力成正比。

但在分析落体时，伽利略所处理的情况是，每个物体上只有一个力，即重力 W ，它产生的加速度为 g ，即自由落体的加速度。（关于牛顿定律二的两种形式，见第 184 页。）

亚里士多德曾经说过，一个给定的力使一个物体具有一定的特征速度，牛顿现在说，一个给定的力总是在这个物体中产生一个确定的加速度 a 。为了求出速度 V ，我们必须知道这个力作用了多长时间 T ，或者这个物体加速了多长时间，这样就可以应用伽利略定律 $V=AT$ 。

在这一点上，让我们尝试一个思想实验，在这个实验中，我们假设有两个铝立方体，其中一个的体积是另一个的两倍。（顺便说一句，在欧几里得几何的框架内，“复制”一个立方体——或使一个立方体的体积恰好是某个给定立方体的两倍——就像把一个角三等分或把一个圆平方一样是不可能的。）现在，我们对小立方体施加一系列的力 F_1, F_2, F_3, \dots ，并确定相应的加速度 A_1, A_2, A_3, \dots 根据定律 II，我们会发现有一个恒定的力与加速度之比，对于这个物体，我们可以称之为 m_s 。现在，我们对较大的立方体重复上述操作，发现同一组力 F_1, F_2, F_3, \dots 分别产生另一组加速度 a_1, a_2, a_3, \dots 根据牛顿第二定律，力 - 加速度比还是一个常数，对于这个物体，我们可以称之为 m_l 。

对于较大的物体，这个常数被证明是较小物体的常数的两倍，而且一般来说，只要我们处理的是单一种类的物质，比如纯铝，这个常数与体积成正比，因此是任何样品中铝含量的衡量标准。这个特定的常数是一个物体对加速度的阻力的测量，或者是一个物体保持原状的趋势的测量——要么静止，要么在直线上运动。 m_l 是 m_s 的两倍；要给两个物体相同的加速度或运动变化量，较大物体所需要的力只是较小物体所需要的力的两倍。任何物体保持其运动状态（匀速直线运动）或静止状态的倾向称为惯性；因此，牛顿定律 I 也被称为惯性原理。因此，对于任何给定物体，由恒定的力 - 加速度比确定的常数可以称为物体的惯性。但对于我们的铝块来说，这个常数也是物体中“物质数量”的衡量标准，即质量。现在我们精确地规定了这样一个条件：两个不同材料的物体——比如一个是黄铜的，

另一个是木头的——具有相同的“物质量”：即它们具有相同的由力 - 加速度比决定的质量，或相同的惯性。

在日常生活中，我们并不以物体的惯性来比较物体的“物质数量”，而是以物体的重量来比较。牛顿物理学清楚地说明了为什么我们可以，通过它的阐明，我们能够理解为什么在地球上的任何地方，真空中两个不同重量的物体以相同的速度下落。但我们可以观察到，至少在一种常见情况下，我们总是比较物体的惯性，而不是它们的重量。这种情况发生在一个人举起两个物体，看哪个更重或质量更大。他不会把它们拿出来，看哪个往他胳膊上拉得更多；相反，他上下移动它们，以找到更容易移动的地方。通过这种方法，他确定了在直线运动状态和静止状态的变化中，哪个具有更大的阻力——也就是说，哪个具有更大的惯性。（关于牛顿的惯性概念，见补编 15。）

惯性定律的最终公式

在《关于两种新科学的论述和论证》中，伽利略曾想象一个球在一个平面上滚动，并指出：“如果这个平面有无限的范围，那么在这个平面上的均匀运动将是永恒的。”一个没有极限的平面对于一个纯粹的数学家来说是可以的，他无论如何都是一个柏拉图主义者。但伽利略就是这样一个人，他把柏拉图主义和对现实世界感官经验应用的关注结合起来。在《两门新科学》中，伽利略不仅对抽象概念感兴趣，而且对分析地球上或地球附近的真实运动也感兴趣。所以我们明白，在谈论了一个没有限制的位面之后，他没有继续这样的幻想，而是问，如果这是一个真正的尘世位面，在这样的位面上会发生什么，对他来说，这意味着它是“终结的，位于高处”。在真实的物理世界中，球从平面上掉下来，开始落到地面。

在这种情况下，可移动的物体（我认为它是被赋予了重量的物体），被推到这个平面的末端并继续向前移动，在它原来的稳定的不可消除的运动之外，又加上它由于自身的重量而产生的向下的趋势。这样，就出现了某种运动，它是由均匀的水平运动和自然加速的向下运动混合而成的，我称之为“投影”。

与伽利略不同的是，牛顿把抽象数学的世界和物理的世界明确地分开，他仍然称之为哲学。因此，《原理》既包括“数学原理”本身，也包括那些可以应用于“自然哲学”的原理，但伽利略的《两门新科学》只包括那些在自然界中得到例证的数学条件。例如，牛顿清楚地知道，太阳对行星的吸引力是距离的平方反比。但在《原理》第一卷中他不仅研究了这种特殊力的结果还研究了其他对距离有不同依赖的力，包括 $F \propto D$ 。

《世界体系》

在专门讨论“世界体系”的第三本书的开头，牛顿解释了它与前两本书的不同之处，前两本书一直在讨论“物体的运动”：在前几本书中，我已经列出了……不是哲学的原则，而是数学的原则：这样，也就是说，我们可以在哲学探究中建立我们的推理。这些原则是某些运动或力量的规律和条件，主要与哲学有关；但是，为了避免它们本身显得枯燥和贫瘠，我在这里和那里用一些哲学学派来说明它们，叙述一些比较普遍的、似乎是哲学的主要依据的东西，例如物体的密度和阻力，没有物体的空间，以及光和声音的运动。我现在要从同样的原则来说明世界体系的结构。

我相信，公平地说，正是这种以纯数学或“哲学”（或物理）方式考虑问题的自由，使牛顿能够表达第一定律，并发展出完整的惯性物理学。毕竟，物理学作为一门科学，可以用数学的方法来发展，但它必须建立在经验的基础上，而经验从来不会向我们展示纯粹的惯性运动。即使在伽利略所讨论的线性惯性的有限例子中，也总是存在一些空气摩擦，运动几乎立即停止，就像弹丸撞击地面一样。在伽利略所探索的整个物理学领域中，没有一个物理物体具有超过很短时间的纯惯性运动成分。也许正是由于这个原因，伽利略从未提出一个普遍的惯性定律。他太像物理学家了。

但是作为一个数学家，牛顿可以很容易地想象一个物体永远以恒定的速度沿着直线运动。“永远”这个概念意味着一个无限的宇宙，对他来说并不可怕。请注意，他关于惯性定律的陈述，即物体匀速直线运动的自然条件，出现在《原理》第一卷中，他所说的那部分是数学的，而不是物理的。如果匀速直线运动是物体运动的自然条件，那么这种惯性运动必然是行星的特征。然而，行星并不是沿着直线运动，而是沿着椭圆运动。用一种伽利略式的方法来解决这个问题，牛顿可以说，因此行星必然受到两种运动的影响：一种是惯性运动（沿着匀速的直线），另一种总是与将每个行星引向其轨道的直线成直角。（见补充 11 和 12。）

虽然不是直线运动，但每颗行星都代表了宇宙中可观测到的惯性运动的最佳例子。如果没有惯性运动的分量，不断把行星拉离直线的力就会把行星拉向太阳，直到两个天体相撞。牛顿曾经用这个论证来证明上帝的存在。他说，如果行星没有受到推力，从而产生惯性（或切向）运动成分，那么太阳的吸引力就不会把它们拉进轨道，而是会让它们沿着一条直线朝向太阳。因此，宇宙不能仅从物质的角度来解释。

对于伽利略来说，纯圆周运动仍然可以是惯性的，就像在地球表面或接近地球表面的物体一样。但对牛顿来说，纯圆周运动不是惯性运动；它加速了，需要一个力来维持它的持续。因此，正是牛顿最终打破了仍然束缚着伽利略的“圆”的束缚。因此，我们可以理解，是牛顿展示了如何根据运动定律建立天体力学，因为行星的椭圆（或几乎圆形）轨道运动不是纯粹的惯性运动，而是需要一个力的持续作用，这个力就是万有引力。

因此，牛顿又不像伽利略，他开始“证明世界系统的结构”，或者用我们今天的说法，证明地球运动的一般定律如何适用于行星及其卫星。

艾萨克·牛顿的力学体系象征着世界的理性秩序，在“自然法则”下运行。牛顿科学不仅能解释现在和过去的现象；这些原理可以应用于未来事件的预测。在《原理》中，牛顿证明了彗星就像行星一样，在大轨道上运动（根据牛顿定律）必须是圆锥截面。一些彗星以椭圆轨道运动，它们必须周期性地从遥远的太空返回到我们太阳系的可见区域，而另一些彗星将访问我们的太阳系，然后永不返回。埃德蒙·哈雷（Edmond Halley）将牛顿的这些结果应用于对过去彗星记录的分析，并发现了一颗彗星，其周期约为 75 年半。他做出了一个大胆的牛顿预言，这颗彗星将在 1758 年再次出现。尽管哈雷和牛顿去世已久，但当它如期完成时，世界各地的男男女女对数学所激发的人类理性力量产生了一种新的敬畏之情。这种对科学的新尊重可以用“惊人的”、“现象级的”或“非凡的”这样的形容词来表达。对未来事件的成功预测象征着新科学的力量：对自然的数学理解的完美，体现在对未来做出可靠预测的能力上。毫不奇怪，世界各地的男男女女都看到了一种希望，即人类所有的知识和对人类事务的管理都将屈服于一种类似的推理和数学推理，再加上实验和批判性观察的理性体系。18 世纪不仅是启蒙运动，而

且成为“科学信仰的显著时代”。牛顿成为成功科学的象征，是所有思想的理想——哲学、心理学、政府和社会科学。

牛顿的天才使我们看到伽利略力学和开普勒行星运动定律的全部意义，这体现在哥白尼 - 开普勒宇宙所需的惯性原理的发展中。伟大的法国数学家约瑟夫·路易斯·拉格朗日（1736 - 1813）对牛顿的成就做出了最好的定义。他说，宇宙只有一条定律，而牛顿发现了它。牛顿并不是完全靠自己发展了现代动力学，他在很大程度上依赖于他的一些前辈；债务丝毫没有降低他成就的重要性。它只是强调伽利略和开普勒，以及笛卡尔、胡克和惠更斯等人的重要性，他们是如此伟大，足以对牛顿的事业作出重大贡献。最重要的是，我们可以从牛顿的工作中看到科学在多大程度上是一种集体和累积的活动，我们还可以从中发现一个天才个人对科学合作的未来的影响的尺度。在牛顿的成就中，我们看到科学的进步是通过英雄般的想象力，而不是耐心地收集和整理成千上万的单个事实。在研究了牛顿对思想的伟大贡献之后，谁能否认纯科学是人类精神巅峰时期创造性成就的例证呢？

自然哲学的数学原理

——艾萨克·牛顿

定义

定义 1

物质的量是由其密度和体积共同产生的物质的度量。

如果空气的密度是原来的两倍，那么空气的密度就是原来的四倍，如果空间是原来的三倍，那么空气的密度就是原来的六倍。由于压缩或液化而凝结的雪和粉末，以及由于任何原因以各种方式凝结的所有物体，情况都是一样的。目前，我不考虑任何介质，如果应该有的话，自由地遍及身体各部分之间的间隙。此外，我指的是这个量，每当我使用术语“体”或“质量”在以下几页。它总是可以从物体的重量得知，因为通过对钟摆进行非常精确的实验，我发现它与重量成正比，如下所示。

定义 2

运动量是由速度和物质质量共同产生的运动度量。

一个整体的运动是各个部分运动的总和，因此，如果一个物体是另一个物体的两倍大，并且速度相等，那么它的运动就会是另一个物体的两倍，如果它的速度是另一个物体的两倍，那么它的运动就会是另一个物体的四倍。

定义 3

物质的内在力量是一种抵抗的力量，通过这种力量，每一个物体都能保持静止或匀速直线前进的状态。

这种力总是与物体成正比，除了考虑的方式不同，它与质量的惯性没有任何不同。由于物质的惯性，每一个物体都很难脱离其静止或运动的状态。因此，固有力也可以用惯性力这个很有意义的名字来称呼。此外，一个物体只有在它的状态发生变化时才施加这种力，而这种力的作用，根据不同的观点，既是阻力，也是推动力：就物体而言，阻力是为了保持它的状态，与所施加的力作斗争；就推动力而言，同一物体，很难屈服于阻力障碍的力量，努力改变障碍的状态。阻力通常归因于静止的身体和运动的身体的推动力；但是，运动和静止，就一般意义上的术语而言，只是从观点上加以区别，而通常认为处于静止状态的物体并不总是真正处于静止状态的。

定义 4

外加力是施加在物体上以改变其静止状态或匀速直线前进状态的力。

这种力只存在于作用中，在作用停止后不会留在物体中。因为一个物体能在任何新的状态中坚持下来，完全是由于惯性的作用。此外，有各种各样的外力来源，如冲击、压力或向心力。

定义 5

向心力是使物体从四面八方被吸引、被推动或以任何方式趋向于某一点或中心的力。

其中一种力就是重力，物体靠它向地心运动；另一种是磁力，铁通过磁力寻找磁石；还有一种力，不管它是什么力，由于这种力，行星不断地从直线运动中被拉回来，被迫绕着曲线旋转。

在投石器中旋转的石头努力离开挥动它的手，通过这种努力，它伸展了投石器，它旋转得越快，力量就越大；一旦它被释放，它就飞走了。与这种努力相反的力，也就是使弹弓不断地把石头拉向手并使它保持在一个轨道上的力，我称之为向心力，因为它既指向手，也指向轨道的中心。这同样适用于所有在轨道上运动的物体。它们都在努力远离轨道的中心，除非有一种力量反对这种努力，约束它们，使它们保持在轨道上，因此我称之为向心，它们将以匀速运动沿着直线离开。

如果一个抛射物失去了重力，它就不会向地球方向偏转，而会以匀速运动直线飞向天空，前提是消除空气的阻力。由于重力作用，抛射物从直线轨道上被拉回来，不断地向地球偏转，这种偏转的程度或多或少与它的重力和运动速度成正比。它的重力与它的物质数量的比例越小，或者它被投射的速度越大，它偏离直线的距离就越小，它就会走得越远。如果一个铅球在火药的作用下，以给定的速度从某山的山顶沿一条水平线射出，并在落向地面之前沿一条曲线飞行了两英里，那么，如果排除空气的阻力，同样的球以两倍的速度射出，将会飞两倍的距离，以十倍的速度飞十倍的距离。通过增加速度，它所投射的距离可以随意增加。它所描述的线的曲率可以减小，这样它最终会以 10 度，30 度或 90 度的距离落下甚至环绕整个地球，最后，进入天堂并无限期地继续这个运动。就像抛射物在重力的作用下，可以偏转到一个轨道上，绕着整个地球转一样，月球，不管它是受到重力的作用——如果它有重力的话——还是受到任何其他能把它推向地球的力的作用，总能从直线轨道上被拉回地球，并偏转到它的轨道上；没有这种力，月球就不能保持在它的轨道上。如果这个力太小，它不会使月球充分偏离直线；如果它太大，它会使月球过度偏转，把它从轨道拉向地球。事实上，它必须有一个合适的大小，数学家的任务是找到一种力，使一个物体以给定的速度精确地保持在任何给定的轨道上，或者，找到一个曲线路径，使一个物体以给定的速度离开任何给定的地方，被给定的力偏转。

向心力的量有三种：绝对向心力、加速向心力和动力向心力。

此外，正是在同样的意义上，我称吸引和冲动为加速和动机。此外，我使用交替的、不加区分的词语来表示吸引力、冲动或任何一种倾向于一个中心的倾向，不是从物理角度，而是从数学角度来考虑这些力。因此，请读者注意，如果我碰巧说中心吸引或中心有力，请不要以为我用这类话在任何地方定义了一种行为或一种行为方式或一种物理原因或原因，或者认为我在真实的物理意义上将力归因于中心（即数学点）。

公理或运动定律

定律 1

每一个物体都保持静止或匀速直线前进的状态，除非它被施加的力强迫改变状态。

抛射物除了受到空气阻力的阻碍和受到重力的推动而向下运动外，还能保持运动。一个旋转的铁环，其各部分由于相互的凝聚力，从直线运动中不断地相互拉回，除非受到空气的阻碍，否则它不会停止旋转。而较大的天体——行星和彗星——在阻力较小的空间内进行的渐进式和圆周式运动保持的时间更长。

定律 2

运动的变化与施加的动力成正比，并沿着施加动力的直线发生。

如果某个力产生任何运动，两倍的力将产生两倍的运动，三倍的力将产生三倍的运动，无论力是一次施加还是逐次施加。如果物体以前运动过，如果原运动方向相同，则新运动（因为运动总是与生成力的方向相同）加到原运动中；如果原运动方向相反，则从原运动中减去；如果原运动方向是倾斜的，则根据两种运动的方向，斜地结合并与原运动复合。

定律 3

任何作用总有相反的、相等的反作用力；换句话说，两个物体对彼此的作用总是相等的，方向总是相反的。

任何按压或按压其他物体的东西都会被它按压或按压。如果有人用手指压石头，石头也会压着他的手指。如果一匹马拉一块拴在绳子上的石头，马也会（可以这么说）被同样地拉向石头，因为绳子的两端伸展开来，会促使马向石头和石头向马靠拢，同时也会使马放松下来，既阻碍了石头向前运动，也阻碍了石头向前运动。如果一个物体撞击另一个物体时，由于它自身的力而改变了那个物体的运动，那么，由于另一个物体的力（由于它们相互间的压力相等），它自身的运动也会发生相反方向的同样的变化。通过这些作用，相等的变化发生在运动上，而不是在速度上——当然，前提是物体没有受到任何其他东西的阻碍。因为同样发生在相反方向上的速度变化与物体成反比，因为运动的变化是相等的。这条定律也适用于景点，我们将在下一学期证明这一点。

推论 1

一个物体受到[两个]力共同作用的作用，它同时描述了平行四边形的对角线，如果这两个力分别作用，它也可以同时描述平行四边形的边。

设一个物体在给定的时间内，仅受作用于 a 的力 M ，以匀速运动从 a 移动到 B ，并在同一地点仅受作用于 N 的力，从 a 移动到 C ；然后完成平行四边形 $ABDC$ ，两种力同时将物体沿 A 到 d 的对角线移动。因为，由于力 N 沿平行于 BD 的直线 AC 作用，根据定律 2，这个力对由另一个力产生的直线 BD 的速度没有任何改变。因此，无论是否施加力 N ，物体都会在同一时间到达直线 BD ，因此在该时间结束

时，物体会在直线 BD 上的某处被发现。同样，在同一时间结束时，物体会在直线 CD 上的某处被发现，因此它必然在两条直线的交点 D 处被发现。根据定律 1，它会做匀速直线运动从 A 到 D。

第二部分

人类探索生命世界

19 世纪中期，查尔斯·达尔文在《物种起源》一书中试图解释生命的多样性，我们对生命世界的理解取得了突破。这本书常被提及，但很少有人读。在文本 4 中，达尔文提出自然选择和品种的出现是物种起源的原因，但没有回答品种出现的生物学机制问题。

大约一个世纪后的 1953 年，詹姆斯·沃森、弗朗西斯·克里克和莫里斯·威尔金斯发现了 DNA 的结构。由于这项成就，他们获得了诺贝尔生理学 and 医学奖。我们现在知道，在 DNA 中发生的一些化学过程导致了品种的出现。《沃森的 DNA：生命的秘密》节选（文本 5）是作者发现 DNA 结构的故事，也是作者的思考。

我们的生命科学现在已经发展到我们可以常规地操纵生命的地步。其中一些操作是好的，而另一些则产生了无法预料的有害后果。例如，治疗疾病的方法通常被认为是好的，而使用化学品控制农业害虫往往被证明对环境有害。雷切尔·卡森的《寂静的春天》谴责决策者使用除草剂杀死不需要的植物。

论物种起源

——查尔斯·达尔文

第四章

自然选择

自然选择——它与人类选择相比的力量——它在无关紧要的性状上的力量——它在所有年龄和两性上的力量——性选择——同一物种个体间杂交的普遍性——对自然选择有利和不利的的环境，即杂交、隔离、个体数量——自然选择导致的缓慢行动灭绝——与任何小地区居民的多样性有关的性状分化；归化——自然选择的作用，通过性格的分化和灭绝，对一个共同的父母的后代——解释了所有有机生物的分组。

在上一章中讨论得过于简略的生存斗争，将如何影响变异呢？我们已经看到，在人类手中如此强大的选择原则，能否适用于自然界？我认为我们将看到它能够最有效地行动。让我们记住，我们的家庭产品，以及在较小程度上，自然界的产物，在无数的奇怪特性上是不同的；遗传倾向有多强。在驯化下，可以说整个组织在某种程度上具有可塑性。让我们记住，所有有机生物之间的相互关系以及它们的物理生活条件是多么的复杂和紧密。既然对人类有益的变异无疑发生过，而在伟大而复杂的生命斗争中，对每一种生物都以某种方式有益的其他变异有时会在数千代的过程中发生，那么，这难道不可能被认为是不可能的吗？如果这种情况真的发生了，我们还能怀疑（记住，出生的个体比存活的个体多得多），那些拥有优势的个体，无论优势多么微小，都有最大的机会生存和繁衍后代吗？另一方面，我们可以确信，任何有害程度最小的变异都会被严格地摧毁。这种有利变异的保留和有害变异的排斥，我称之为自然选择。既不有用也不有害的变异不会受到自然选择的影响，而会留下一个波动的因素，就像我们在所谓的多态物种中看到的那样。

要理解自然选择的可能过程，我们最好以一个国家经历某种自然变化（例如气候变化）的例子为例。其居民的比例数量几乎会立即发生变化，一些物种可能会灭绝。从我们所看到的每个国家的居民紧密而复杂的联系方式来看，我们可以得出这样的结论：一些居民的数量比例的任何变化，不管气候本身的变化如何，都会严重地影响到其他许多居民。如果这个国家的边界是开放的，新的形式肯定会移民，这也会严重扰乱一些以前的居民的关系。让我们记住，一种引进的树木或哺乳动物的影响是多么强大。但是，对于一个岛屿或一个部分被障碍包围的国家，新的和更好的适应形式不能自由进入，那么，如果一些原始居民在某种程度上得到改变，我们就会在自然经济中有一些地方肯定会得到更好的填补；因为，如果该地区对移民开放，这些地方就会被入侵者占领。在这种情况下，在岁月的进程中偶然出现的每一种细微的变化，只要使任何一个物种的个体更好地适应它们改变了的条件，就会趋向于保存下来；这样，自然选择就有了改进工作的自由空间。

正如第一章所述，我们有理由相信，生活条件的变化，特别是对生殖系统的

影响，导致或增加了变异；在前面的情况下，假定生活条件发生了变化，这显然有利于自然选择，因为有更好的机会发生有益的变化；除非确实发生了有益的变异，否则自然选择是无能为力的。并不是说，正如我所相信的，任何极端的变化都是必要的；正如人类当然可以在任何特定的方向上通过将个体差异相加而产生巨大的结果一样，大自然也可以这样做，但要容易得多，因为她拥有无比长的时间。我也不相信，为了产生新的、无人居住的地方，让自然选择通过改造和改进一些不同的居民来填充，任何重大的物理变化，如气候变化，或任何不寻常的隔离程度，实际上都是必要的。因为每个国家的所有居民都在以相当均衡的力量共同奋斗，一个居民的结构或习惯的极其微小的改变往往会使它比其他居民更具优势；而对同类的进一步修改往往会进一步增加优势。没有一个国家的所有居民现在都如此完美地相互适应，并适应了他们所生活的物质条件，无论如何都无法改善；因为在所有的国家里，当地人都被归化的产品征服了，他们允许外国人牢牢地占有土地。既然外国人到处都打败了一些当地人，我们可以有把握地得出结论，当地人可能已经被改造得更具优势，从而更好地抵抗这些入侵者。

既然人类能够并且肯定已经通过他有条不紊的、无意识的选择手段产生了巨大的结果，那么什么可能不受自然的影响呢？人只能根据外在的和可见的特征来行动；大自然对外表是不关心的，除非它们对任何存在都是有用的。她可以作用于每一个体内器官，作用于每一个细微的体质差异，作用于整个生命机制。人只为自己的利益而选择；自然只对她所照料的生命负责。每一个选定的角色都被她充分地发挥了出来；生命被置于适宜的生活条件下。人类把不同气候的土著居民留在同一个国家；他很少以一种独特而恰当的方式来演绎每一个选定的角色；他用同样的食物喂一只长喙鸽和一只短喙鸽；他没有以任何特殊的方式锻炼长背或长腿的四足动物；他把羊毛长短的羊暴露在同样的气候下。他不允许最有活力的雄性为争夺雌性而斗争。他并不严格地消灭所有劣等动物，而是在他的力量所及的范围内，在每一个不同的季节保护他所有的产品。他常常以某种半怪半怪的形式开始他的选择；或者至少经过一些显著的修改，足以引起他的注意，或者显然对他有用。在自然界中，结构或体质上最微小的差异，都可能在生命的斗争中扭转平衡的天平，从而得以保存。人的愿望和努力是多么的短暂啊！他的时间真短！因此，与整个地质时期的自然积累相比，他的产物将是多么贫乏。那么，我们是否会感到奇怪，自然的产物在性质上应该比人类的产物“真实”得多？它们应该无限地更好地适应最复杂的生活条件，并且应该明显地具有更高工艺的印记？

可以说，自然选择每时每刻都在审视着世界各地的每一种变异，哪怕是最微小的变异；弃绝坏的，保留并加增一切好的；无论何时何地，只要有机会，他们就默默地、不知不觉地致力于改善每一个有机生物的有机和无机生活条件。直到时间的流逝标志着漫长的岁月流逝，我们才看到这些缓慢的变化在进行中，那时我们对过去漫长的地质时代的看法是如此不完善，以至于我们只看到现在的生命形式与以前不同。

虽然自然选择只能通过并为了每一个生物的利益而起作用，然而，我们倾向于认为非常微不足道的特征和结构，却可能因此而起作用。当我们看到吃树叶的昆虫是绿色的，吃树皮的昆虫是斑驳的灰色；高山松鸡在冬天是白色的，红松鸡是石南花的颜色，黑松鸡是泥炭土的颜色，我们必须相信，这些颜色对这些鸟类和昆虫是有帮助的，可以保护它们免受危险。松鸡，如果不是在它们生命的某个阶段被消灭，将会增加无数的数量；众所周知，它们主要遭受猛禽的袭击；鹰是靠视力找到猎物的，以至于在欧洲大陆的一些地方，人们被警告不要养白鸽，因

为白鸽最容易被破坏。因此，我没有理由怀疑，自然选择可能是最有效的，它赋予每一种松鸡适当的颜色，并使这种颜色一旦获得，就保持真实和不变。我们也不应该认为偶尔杀死任何一种特定颜色的动物不会产生什么影响：我们应该记住，在一群白羊中，杀死每一只带有最轻微黑色痕迹的羊羔是多么重要。在植物中，果实上的绒毛和果肉的颜色被植物学家认为是最不重要的特征；然而，我们从一位优秀的园艺学家唐宁那里听说，在美国，表皮光滑的果实受到甲虫和 *curculio* 的伤害要远远大于那些有绒毛的果实；紫色李子比黄色李子更易患某种疾病；然而，另一种疾病对黄色果肉的桃子的攻击远远超过其他颜色果肉的桃子。如果在所有艺术的帮助下，这些细微的差异在培育几个品种时产生了巨大的差异，那么，在树木必须与其他树木和许多敌人斗争的自然状态下，这些差异将有效地决定哪种品种应该成功，是光滑的还是柔软的，是黄色的还是紫色的果肉。

自然选择会改变后代相对于父母的结构，也会改变父母相对于后代的结构。在社会性动物中，它会为了群体的利益而调整每个个体的结构；如果每个结果都从选择的变化中获益。自然选择不能做的是，为了另一个物种的利益，在不给一个物种任何优势的情况下改变它的结构；虽然在博物学著作中可以找到这种说法，但我找不到一个值得研究的例子。一个在动物一生中只使用一次的结构，如果对它很重要的话，可以通过自然选择在一定程度上进行修改；例如，某些昆虫的大下颚，专门用来破茧，或者雏鸟的喙尖，用来破蛋。有人说，最优秀的短喙飞信鸽死在蛋里的比能从蛋里出来的还多；这样爱好者就可以帮助孵化。现在，如果自然的喙鸟的成年鸽子很短的优势，修改的过程将会非常缓慢，同时会有最严格选择年轻的鸟类在蛋中，最强大的和坚硬的喙，喙较差的所有不可避免地会灭亡：或者，更精致，更容易破碎的贝壳可能选择，壳的厚度被像其他结构的变化而变化。

性选择。由于在驯化过程中，一种性别的特征往往会出现，并遗传地依附于另一种性别，同样的事实也可能发生在自然界中，如果是这样，自然选择将能够改变一种性别与另一种性别的功能关系，或者改变两性之间完全不同的生活习惯，就像昆虫的情况一样。这让我要说几句我称之为性选择的话。这不是取决于生存斗争，而是取决于雄性为占有雌性而进行的斗争；结果不是失败的竞争者死亡，而是后代很少或没有后代。因此，性选择不如自然选择严格。一般来说，最具活力的雄性，那些最适合他们在自然界中的位置，将留下最多的后代。但在许多情况下，胜利并不取决于一般的活力，而是取决于拥有特殊的武器，仅限于男性。没有角的雄鹿或没有刺的公鸡很难生育后代。性别选择总是允许胜利者繁殖，这肯定会给他们带来不屈不挠的勇气、刺的长度和翅膀的力量，以打击有刺的腿，以及残酷的斗鸡者，他们知道他可以通过仔细选择最好的公鸡来改善他的品种。我不知道这种战斗法则在自然界的地位有多低；雄性短吻鳄被描述为为了占有雌性而战斗、咆哮、旋转，就像印第安人在跳战争之舞一样；雄性鲑鱼整天都在打架；雄鹿甲虫经常被其他雄鹿巨大的下颚所伤。在一夫多妻的雄性动物之间，战争也许是最激烈的，而这些雄性动物似乎通常都配备了特殊的武器。食肉动物的雄性已经装备精良；虽然对它们和其他动物来说，通过性选择的方式，可以赋予它们特殊的防御手段，如狮子的鬃毛，野猪的肩垫，雄鲑鱼的钩颌；因为对于胜利来说，盾牌可能和剑或矛一样重要。

鸟类之间的竞争往往比较平和。所有研究过这个问题的人都相信，许多物种的雄性之间存在着最激烈的竞争，它们都想通过唱歌来吸引雌性。圭亚那的岩画眉、天堂鸟和其他一些鸟类聚集在一起；雄企鹅在雌企鹅面前展示它们华丽的羽

毛，做出奇怪的滑稽动作，雌企鹅站在一旁旁观，最后选择最吸引人的伴侣。那些密切关注关在笼子里的鸟的人都知道，它们往往有各自的喜好和厌恶：因此，R. Heron 爵士曾描述过一只花斑孔雀如何对他所有的母鸡都极具吸引力。把任何影响归因于这种显然软弱无力的手段，可能显得幼稚。我无法在这里详细说明支持这一观点的必要细节；但是，如果人类能够在短时间内根据自己的审美标准赋予自己的鸟儿优雅的姿态和美丽，那么我就没有理由怀疑，雌鸟根据自己的审美标准，在数千代的时间里选择最悦耳动听或最美丽的雄鸟，可能会产生显著的效果。我强烈怀疑，与雏鸟的羽毛相比，雄鸟和雌鸟的羽毛的一些众所周知的规律，可以用这样的观点来解释：羽毛主要是由性选择改变的，当鸟类到了繁殖年龄或繁殖季节时，羽毛就会发生变化；由此产生的变异，在相应的年龄或季节，要么由雄性单独遗传，要么由雄性和雌性共同遗传；不过我在这里就不多谈这个问题了。

因此，我相信，当任何动物的雄性和雌性具有相同的一般生活习惯，但在结构、颜色或装饰上不同时，这种差异主要是由性选择造成的；也就是说，在连续的世代中，雄性个体在武器、防御手段或魅力方面比其他雄性有一些轻微的优势；并将这些优势传给了雄性后代。然而，我不希望把所有这些性别差异都归结于这种能力：因为我们看到，在我们的家畜中，雄性动物产生了一些特点，并与之联系在一起（比如雄性母鸡身上的鸡冠，某些家禽的公鸡身上的角状突起，等等），我们不相信这些特点既对战斗中的雄性有用，也对雌性有吸引力。我们在自然界中也看到类似的情况，例如，火鸡胸前的一簇毛，对这只鸟来说既没有用处，也没有装饰作用；事实上，如果这簇毛是在驯化的情况下出现的，它会被称为怪物。

自然选择作用的例证。为了说明我所相信的自然选择是如何起作用的，我必须举出一两个假想的例子。让我们以一只狼为例，它捕食各种各样的动物，有些靠技巧，有些靠力量，有些靠速度；让我们假设，最快的猎物，例如鹿，由于国家的任何变化而增加了数量，或者其他猎物的数量减少了，在一年中狼最迫切需要食物的季节。在这种情况下，我没有理由怀疑，最快、最瘦的狼有最好的生存机会，因此被保存下来或被选中——只要它们在这个或一年中的其他时候保持力量，在它们可能被迫捕食其他动物的时候控制它们的猎物。我没有理由怀疑这一点，就像人们可以通过仔细和有系统的选择来提高他的灰狗的速度一样，或者通过每个人都想养最好的狗而不考虑改变品种的无意识选择。

即使我们的狼捕食的动物的比例没有任何变化，幼崽也可能天生就有一种追求某种猎物的倾向。这也不能被认为是非常不可能的；因为我们经常观察到家畜的自然倾向有很大的不同；例如，一只猫抓野鼠，另一只抓家鼠；据圣约翰先生说，有一只猫带着带翅膀的猎物回家，另一只猫带着野兔或兔子回家，还有一只猫在沼泽地里打猎，几乎每晚都要捉鹬。人们知道，抓野鼠而不是家鼠的倾向是遗传的。现在，如果任何轻微的先天习惯或结构的改变有利于一只狼，它将有最大的机会生存下来并留下后代。它的一些幼崽可能会继承相同的习性或结构，通过重复这一过程，一个新的品种可能会形成，它要么取代狼的父母形式，要么与狼共存。或者，再一次，住在山区的狼和那些经常在低地出没的狼，自然会被迫捕猎不同的猎物；从最适合这两个地点的个体的持续保存中，两个品种可能会慢慢形成。这些品种会在它们相遇的地方交叉和融合；但是我们很快就要回到交叉的问题上来。我还要补充一点，根据皮尔斯先生的说法，美国卡茨基尔山脉有两种狼，一种是长得像灰狗一样的，用来追捕鹿，另一种体型更大，腿更短，经常袭击牧羊人的羊群。

现在我们来查看一个更复杂的例子。某些植物分泌一种甜的汁液，显然是为了消除它们汁液中的有害物质：这是由豆科植物托叶基部的腺体和普通月桂叶后部的腺体起作用的。这种汁液虽然数量很少，却被昆虫贪婪地寻找。现在，让我们假设一朵花的花瓣内侧分泌了一点甜汁或花蜜。在这种情况下，寻找花蜜的昆虫会沾上花粉，并且肯定会经常将花粉从一朵花运送到另一朵花的柱头上。这样，同一种的两个不同个体的花就会杂交；而杂交的行为，我们有充分的理由相信（下文将更充分地提到），会产生非常旺盛的幼苗，从而有最好的机会茁壮成长和存活。其中一些幼苗可能继承了分泌花蜜的能力。那些腺体或蜜腺最大，分泌花蜜最多的花，最常被昆虫光顾，也最常被杂交；因此，从长远来看，美国将占据上风。同样，那些雄蕊和雌蕊的位置与拜访它们的特定昆虫的大小和习性有关，以便在任何程度上有利于花粉从一朵花到另一朵花的运输，也会受到青睐或选择。我们可以以昆虫访花为例，它们是为了收集花粉而不是花蜜；由于花粉的形成是为了受精的唯一目的，它的破坏对植物来说似乎是一个简单的损失；然而，如果吃花粉的昆虫从最初偶尔到后来习惯性地从一朵花带到另一朵花，这样就实现了杂交，尽管十分之九的花粉被破坏了，这对植物来说仍然是一个很大的收获；那些产生的花粉越来越多，花药越来越大的个体将被选中。

当我们的植物，通过这种持续保存或自然选择越来越漂亮的花朵的过程，变得对昆虫非常有吸引力时，它们就会无意中定期地从一朵花到另一朵花；他们能最有效地做到这一点，我可以很容易地用许多引人注目的例子来证明。我只举一个例子，不是作为一个非常引人注目的例子，而是同样地说明植物性别分离的一个步骤，这是现在要提到的。有些冬青树只结雄花，雄花有四个雄蕊，产生相当少量的花粉，雌蕊发育不全；其他的冬青树只开雌花；它们有一个完全大小的雌蕊和四个雄蕊，花药枯萎，其中没有一粒花粉可以检测到。在距离一棵雄树六十码的地方发现了一棵雌树，我把取自不同树枝上的二十朵花的柱头放在显微镜下观察，无一例外地都有花粉粒，有的甚至有大量的花粉。因为从雌树到雄树的风已经停了好几天了，所以花粉不可能被带走。天气又冷又吵，因此对蜜蜂不利，然而我观察到的每一朵雌花都被蜜蜂有效地受精了，它们偶然地撒上花粉，从一棵树飞到另一棵树去寻找花蜜。但是回到我们想象的情况：一旦植物变得对昆虫非常有吸引力，花粉定期从一朵花传到另一朵花，另一个过程就可能开始了。没有一个博物学家怀疑所谓“生理分工”的好处，因此我们可以相信，对植物来说，在一朵花或整株植物上只产生雄蕊，在另一朵花或另一株植物上只产生雌蕊是有利的。在培养和置于新的生活条件下的植物中，有时雄性器官，有时雌性器官或多或少地变得无能为力；现在，如果我们假设这种情况在自然界中发生的程度很小，那么，由于花粉已经有规律地从一朵花传递到另一朵花，并且由于我们的植物的性别更完全的分离将有利于劳动分工的原则，具有这种倾向的个体将越来越多，将继续受到青睐或选择，直到最终实现性别的完全分离。

现在让我们把目光转向我们想象中的取花昆虫：我们可以假设，通过不断的选择，我们一直在缓慢地增加花蜜的植物是一种普通的植物；某些昆虫主要以花蜜为食。我可以举出许多事实，说明蜜蜂是多么急于节省时间；例如，它们习惯在某些花的底部挖洞，吮吸花蜜，这样它们就可以通过嘴进入花蜜，这稍微麻烦一点。把这些事实记在心里，我看不出有任何理由怀疑，在身体的大小和形状上，或者在长鼻的弯曲度和长度上，等等，偶然的偏差。这种微小到我们无法察觉的特性，可能对蜜蜂或其他昆虫有益，这样具有这种特征的个体就能更快地获得食物，从而有更好的生存和繁衍后代的机会。它的后代可能会继承类似的轻微结构

偏差的倾向。普通的红三叶草和三叶草 (*Trifolium pratense* 和 *incarnatum*) 的花冠的管状花序乍一看, 长度并不不同; 然而, 蜜蜂可以很容易地从化身的三叶草中吸取花蜜, 但却不能从普通的红三叶草中吸取花蜜, 因为只有卑微的蜜蜂才光顾红三叶草; 因此, 整片红三叶草的田地都徒劳地为蜜蜂提供了大量珍贵的花蜜。因此, 对于蜂群来说, 拥有稍长的或不同构造的喙可能是一个很大的优势。另一方面, 我通过实验发现, 三叶草的繁殖力很大程度上取决于蜜蜂访问和移动花冠的部分, 从而将花粉推到柱头表面。因此, 再一次, 如果蜜蜂在任何一个国家变得稀有, 那么红三叶草的花冠上有一个更短或更深的管, 这样蜜蜂就可以访问它的花朵, 这可能是一个很大的优势。因此, 我可以理解一朵花和一只蜜蜂是如何慢慢地, 或者同时, 或者一个接一个地, 通过个体的持续保存, 呈现出相互的和稍微有利的结构偏差, 以最完美的方式相互修改和适应的。

我清楚地意识到, 这个自然选择学说, 为在上述假想的情况下, 对相同的反对开放起初敦促对查尔斯爵士莱尔的高贵的意见“现代地球的变化, 说明地质, “但我们现在很少听到行动, 例如, *coast - waves*, 称为些许微不足道的原因, 当应用于挖掘巨大的山谷或最长的线内陆悬崖的形成。自然选择只能通过保存和积累无限小的遗传变异来起作用, 每一个变异都对被保存下来的生物有益; 正如现代地质学几乎已经摒弃了一次洪积波就能挖出一个大山谷这样的观点一样, 如果自然选择是一个真正的原则, 那么自然选择也会摒弃继续创造新的有机生物或其结构发生任何重大而突然的变化的信念。

灭绝。这个问题将在我们的地质学一章中更充分地讨论; 但这里必须暗指它与自然选择密切相关。自然选择的作用完全是通过以某种有利的方式保存变异, 从而使变异得以延续。但是, 由于所有有机生物的几何增长能力很高, 每个地区都已经充满了居民, 因此, 随着每一种被选中和受到青睐的形式数量的增加, 那么不受青睐的形式也会减少并变得罕见。地质学告诉我们, 稀有是灭绝的前兆。我们也可以看到, 任何由少数个体代表的形式, 在季节的波动或敌人的数量上, 都有可能彻底灭绝。但我们可以走得更远; 因为随着新的形式不断地、缓慢地产生, 除非我们相信特定形式的数量永远地、几乎无限地增加, 否则数量必然会灭绝。地质清楚地告诉我们, 特定形式的数量并没有无限增加; 事实上, 我们可以看到它们不应该这样增加的原因, 因为在自然政体中, 地方的数量并不是无限大的, 并不是说我们有任何方法知道任何一个地区已经达到了物种的最大值。也许还没有一个地区的植物储备充足, 因为在好望角, 植物种类比世界上任何其他地方都要多, 一些外来植物已经归化了, 据我们所知, 没有造成任何本地植物的灭绝。

此外, 个体数量最多的物种在任何给定期限内产生有利变异的机会最大。在第二章给出的事实中, 我们有证据表明, 普通物种提供了最多数量的记录变种, 或早期物种。因此, 稀有物种在任何给定的时期内变异或改进的速度较慢, 因此它们将在生存竞赛中被普通物种的变异后代打败。

从这几点考虑, 我认为不可避免地会得出这样的结论: 随着时间的推移, 新物种通过自然选择而形成, 其他物种将变得越来越稀少, 最终灭绝。与那些正在进行修改和改进的形式最密切竞争的形式自然会受到最大的影响。我们在关于生存斗争的章节中已经看到, 它是最紧密结合的形式, 同一物种的变种, 同一属或相关属的物种, 由于具有几乎相同的结构, 体质和习惯, 通常彼此之间会进行最激烈的竞争。因此, 每一个新的变种或物种, 在其形成的过程中, 通常会对其最近的亲属施加最大的压力, 并倾向于消灭它们。我们在我们驯化的产品中看到了

同样的灭绝过程，通过人类选择改良的形式。可以举出许多奇怪的例子来说明，新品种的牛、羊和其他动物以及各种各样的花是如何迅速地取代了古老的劣等品种。在约克郡，据历史记载，古代的黑牛被长角牛取代了，而这些“被短角牛带走了”（我引用一位农业作家的话），“就像被某种致命的瘟疫带走了一样”。

性状差异。我用这个术语所指定的原则，在我的理论中是非常重要的，而且我相信，它解释了几个重要的事实。首先，品种，即使是有明显标记的品种，虽然具有某种种类的特征——在许多情况下，如何对它们进行排序的无望的怀疑就表明了这一点——然而，它们彼此之间的差异肯定远远小于优良的和独特的物种之间的差异。然而，根据我的观点，变种是处于形成过程中的物种，或者，正如我所说的，是早期的物种。那么，品种之间较小的差异是如何扩大为物种之间较大的差异的呢？我们必须从自然界中表现出明显差异的无数物种中的大多数来推断，这种情况确实会习惯性地发生；而变种，被认为是未来标记良好的物种的原型和亲本，呈现出轻微的和不明晰的差异。我们可以这样说，仅仅是偶然的机会，就可能使一个品种在某些性状上与其亲本不同，而这个品种的后代又在同样的性状上与它的亲本不同，而且差异更大；但是，单凭这一点，决不可能像同一种的变种和同一属的种之间那样，造成惯常的和大量的差异。

按照我一贯的做法，让我们从国内的作品中寻找线索。我们在这里可以找到类似的东西。鸽友被喙略短的鸽子击中；另一个爱好者被一只长着长喙的鸽子击中；根据公认的原则，“爱好者不会欣赏中等标准的鸟，而是喜欢极端的鸟”，他们都继续选择和繁殖喙越来越长的鸟，或者喙越来越短的鸟（就像在翻杯鸽身上发生的那样）。同样，我们可以假设，在早期，有人喜欢更快的马；另一匹更强壮、更笨重的马。早期的差异非常微小；随着时间的推移，一些繁育者继续选择更快的马，而另一些繁育者选择更强壮的马，这种差异会变得更大，并会被认为形成了两个亚种；最后，经过几个世纪的流逝，亚种将转变为两个成熟而独特的品种。随着差异逐渐扩大，那些具有中等特征的劣等动物，既不是很敏捷也不是很强壮，就会被忽视，并趋于消失。在这里，我们看到，在人类的生产中，所谓的分化原则的作用，导致差异，最初几乎难以察觉，稳步增加，品种在性格上彼此不同，也不同于它们共同的父母。

但是，人们可能会问，类似的原理如何适用于自然界呢？我相信，从一个简单的情况来看，它能够而且确实是最有效地应用的，即任何一个物种的后代在结构、体质和习惯上越是多样化，他们就越能更好地掌握自然政体中许多广泛多样化的地方，从而能够增加数量。

我们可以清楚地看到，在动物的简单习惯的情况下，以肉食性四足动物为例，在任何国家都能得到支持的四足动物数量早已达到其全部平均数量。如果允许它的自然繁殖能力发挥作用，它（这个国家的条件没有发生任何变化）只有通过它的不同后代占领目前被其他动物占据的地方才能成功地增长。例如，其中一些动物能够以新的猎物为食，无论是死的还是活的；有些栖息在新的站点，爬树，经常在水里出没，有些可能变得不那么食肉。我们这种食肉动物的后代在习性和结构上越多，它们能够占据的地方就越多。适用于某一种动物的法则将永远适用于所有动物——也就是说，如果它们各不相同的话——否则自然选择就无能为力了。植物也是如此。实验证明，如果在一块土地上种一种草，在类似的土地上种几种不同属的草，那么可以种植更多的植物和更重的干牧草。同样的道理也适用于在等量的土地上先种一种小麦，然后再种几种混合小麦。因此，如果任何一种草继续变化，并且那些不断被选择的品种彼此不同，就像不同的草种和属彼此

不同一样，那么这种草的更多的单株植物，包括其改良的后代，将成功地生活在同一块土地上。我们都知道，每一种草，每一个品种，每年都播下几乎无数的种子；因此，可以说，它正在尽最大努力增加其数量。因此，我毫不怀疑，在数千代的过程中，任何一种草的最独特的品种总是有最好的机会成功和数量增加，从而取代不太独特的品种；而变种，在彼此截然不同的情况下，取物种的等级。

在许多自然环境中都可以看到这一原则的真理，即结构的极大多样化可以支持大量的生命。在一个极小的地区，特别是在对移民自由开放的地区，在个人与个人之间的竞争一定很激烈的地区，我们总是发现其居民具有很大的多样性。例如，我发现一块三英尺乘四英尺的草皮，在完全相同的条件下生长了许多年，**生长着二十种植物，它们分属十八属八目，这说明这些植物彼此之间有多么不同。**小岛上的植物和昆虫也是如此；小池塘里的淡水也是如此。农民发现，他们可以通过轮种属于最不同目的植物来种植大部分粮食：大自然遵循所谓的**同步轮种**。生活在任何一小块土地附近的大多数动物和植物都能在那块土地上生存（假设它在性质上没有任何特殊之处），而且可以说是尽最大努力在那里生存；但是，可以看到，在它们彼此竞争最密切的地方，结构多样化的优势，以及随之而来的习惯和体质的差异，**决定了居民，因此彼此最紧密地挤在一起，作为一般规则，应该属于我们所说的不同的属和目。**

在前面的讨论之后，我认为，我们可以假设，任何一个物种的改良后代都将成功得更好，因为它们在结构上变得更加多样化，从而能够侵占其他生物所占据的地方。现在让我们来看看，从性格差异中产生巨大利益的原则，与自然选择和灭绝的原则相结合，将如何发挥作用。

随附的图表将帮助我们理解这个相当复杂的问题。设 A 到 L 表示一个在本国较大的属的种；这些物种被认为在不同程度上彼此相似，就像自然界中普遍存在的情况一样，正如图表中字母站在不同距离上所表示的那样。我之所以说大属，是因为我们在第二章中已经看到，大属的种平均比小属的种变化多；大属的不同种呈现出更多的变种。我们还看到，最常见和分布最广的物种比分布范围有限的稀有物种变化更大。设 (A) 是一种常见的、广泛分布的和变化的物种，在其本国属于一个大属。从 (A) 开始的不相等长度的分散虚线的小扇形可能代表其不同的后代。这些变化应该是极其微小的，但却是最多样化的；它们不是同时出现的，而是在很长一段时间之后出现的；它们也不应该都持续相同的时间。只有那些在某种程度上有利的变异才会被保留或自然选择。在这里，从性格差异中获得利益的原则的重要性就出现了；因为这通常会导致最不同或最不同的变异（由外部虚线表示）通过自然选择被保存和积累。当一条虚线到达一条水平线，并在那里标上一个小的数字字母时，就认为已经积累了足够多的变化，形成了一个相当明显的变化，这种变化被认为值得在系统的工作中记录下来。

图表中水平线之间的间隔，可以代表每一千代；但如果每个人都能代表一万个世代，那就更好了。经过一千代，物种 (a) 应该产生了两个相当明显的变种，即 a1 和 m1。这两个品种通常将继续暴露在使其亲本变异的相同条件下，而变异的趋势本身就是遗传的，因此它们将倾向于变异，并且通常以与亲本几乎相同的方式变异。此外，这两个品种，只是轻微的变化形式，将倾向于继承那些优势，使他们的共同亲本 (A) 比同一国家的大多数其他居民更多；它们同样也会分享那些使亲本种所属的属在其本国成为一个大属的更普遍的优点。我们知道，这些环境有利于新品种的生产。

因此，如果这两个变种是可变的，那么它们的变种中最不同的变种一般会在

下一个千代中保存下来。在这个区间之后，图中假定品种 a1 产生了品种 a2，由于散度原理，品种 a2 与 (A) 的差异大于品种 a1。假定变种 m1 产生了两个变种，即 m2 和 s2，它们彼此不同，而且与它们共同的亲本 (A) 的差别更大。我们可以按照同样的步骤，把这个过程继续下去。有些品种，在每一千代之后，只产生一个品种，但在越来越多的修改条件下，有些产生两个或三个品种，有些没有产生任何品种。因此，从共同亲本 (A) 出发的品种或修改的后代通常会在数量上继续增加，在特征上继续分化。在图表中，这个过程表示到第 10000 代，并以浓缩和简化的形式表示到第 14000 代。

但我必须在这里指出，我并不认为这个过程会像图中所示的那样有规律地进行，尽管它本身有些不规则。我绝不认为最不同的品种一定会流行和繁殖：一个中等的形式可能会长期存在，可能会或可能不会产生多个改良的后代；因为自然选择总是根据其他生物没有占据或没有完全占据的地方的性质而起作用；这取决于无限复杂的关系。但是，一般说来，任何一个物种的后代在结构上越是多样化，他们就能占领越多的地方，他们经过改良的后代也就越多。在我们的图表中，连续的线条以固定的间隔被小的数字字母打破，这些字母标记了连续的形式，这些形式已经变得足够明显，可以作为品种记录下来。但是，这些断裂是想象出来的，可能是在足够长的时间间隔之后，在任何地方插入的，这样就可以积累相当数量的发散变异。

由于一个广泛分布的共同物种的所有变异后代都属于一个大属，它们往往具有使其亲本在生活中获得成功的相同优势，因此它们通常会在数量上继续繁殖，在性格上继续分化。这在图中由 (A) 开始的几个不同的分支表示。在血统线中，来自较晚和更高度改进的分支的改良后代，很可能经常取代并破坏较早和改进较少的分支：这在图中由一些未达到上层水平线的较低分支表示。在某些情况下，我毫不怀疑，修改的过程将局限于单一的血统，后代的数量将不会增加；尽管在连续的世代中，变异的数量可能有所增加。如果除去从 (A) 开始的所有线，除了从 a1 到 a10 的线，这种情况将在图中表示。同样地，例如，英国的赛马和英国的指示犬显然都在慢慢地从它们原来的种群中分化出来，既没有长出任何新的分支，也没有长出任何新的品种。

经过一万个世代，物种 (A) 应该产生了三种形式，a10，f10 和 m10，由于在连续的世代中在特征上发生了分歧，它们彼此之间以及与它们共同的亲本之间将会有很大的差异，但可能是不相等的。如果我们假设图表中每条水平线之间的变化量非常小，那么这三种形式可能仍然只是明显的变化；或者他们可能已经到达了令人怀疑的亚种范畴；但是我们只需要假设在修改过程中的步骤数量更多或更大，将这三种形式转化为定义明确的物种：因此图表说明了区分品种的小差异增加到区分物种的大差异的步骤。通过将同样的过程继续进行更多的世代（如图中以浓缩和简化的方式所示），我们得到了 8 个物种，用字母 a14 和 m14 标记，都是 (a) 的后代。因此，正如我所相信的，物种繁殖和属形成了。

在一个大属中，很可能有一个以上的种在变化。在图中，我假设第二个物种 (I) 通过类似的步骤，经过 1 万代，产生了两个标记良好的变种 (w10 和 z10) 或两个物种，根据水平线之间应该表示的变化量。经过一万四千代之后，产生了六个新物种，标记为字母 n14 到 z14。在每一个属中，那些在性状上已经非常不同的种，通常倾向于产生最多数量的变异后代；因为这些物种最有可能在自然政体中填补新的和广泛不同的地方：因此在图表中，我选择了极端物种 (A) 和接近极端物种 (I)，作为那些变化很大的物种，并产生了新的变种和物种。我们

原属的其他九个种（用大写字母标记）可能在很长一段时间内继续传递不变的后代；这在图中通过虚线显示出来，由于空间不够，虚线向上延伸不多。

但在图中所示的修改过程中，我们的另一个原则，即灭绝原则，将发挥重要作用。正如在每一个物产丰富的国家里，自然选择必然使被选择的物种在生存斗争中比其他物种有优势一样，在任何一个物种的改良后代中，都会有一种持续的趋势，即在每一个遗传阶段取代和灭绝它们的祖先和它们的原始父母。因为应该记住，在习惯、构成和结构上彼此最接近的那些形式之间的竞争通常是最激烈的。因此，所有介于较早和较晚状态之间的中间形式，即一个物种较差和较好状态之间的中间形式，以及原始的亲本物种本身，通常都会趋于灭绝。因此，可能会有许多完整的附属血统，这些血统将被后来的和改进的血统所征服。然而，如果一个物种经过改良的后代进入了某个独特的国家，或者很快适应了某个全新的地方，在那里，孩子和父母之间没有竞争，那么两者都可以继续存在。

如果假设我们的图表代表了相当数量的变化，物种（a）和所有早期的变种将会灭绝，被 8 个新物种（a14 到 m14）所取代；（l）将被 6 个（n14 到 z14）新物种所取代。

但我们可能会走得更远。我们属的原始物种被认为在不同程度上彼此相似，正如自然界中普遍存在的那样；A 种与 B、C 和 D 的亲缘关系比与其他物种的亲缘关系更近；物种（l）对 G、H、K、L 的依赖程度高于其他物种。这两个物种（A）和（l）也被认为是非常普遍和广泛扩散的物种，所以它们最初一定比大多数其他物种有一些优势。他们经过改良的后代，在第 14000 代中有 14 个，可能会继承一些相同的优点：他们在每个血统阶段也以不同的方式进行了改良和改进，以便适应他们国家自然经济中许多相关的地方。因此，在我看来，极有可能的是，它们不仅取代了它们的亲本（A）和（l），而且灭绝了与它们亲本关系最密切的一些原始物种。因此，很少有原始物种能够将后代传递到第 14000 代。我们可以假设，在与其他九个原始物种关系最不密切的两个物种中，只有一个（F）将后代传播到了这个晚期。

我们图表中的新物种是从最初的 11 个物种进化而来的，现在数量将达到 15 个。由于自然选择的分化倾向，物种 a14 和 z14 之间的性状差异极值将远远大于原来 11 个物种中差异最大的物种之间的性状差异极值。此外，新物种将以一种截然不同的方式彼此结合。在（A）的 8 个后代中，标记为 a14、q14、p14 的 3 个后代因最近从 a10 分支而有近亲缘关系；由于 B14 和 f14 在较早的时期从 a5 中分化出来，因此在某种程度上不同于三个最初命名的物种；最后，o14，e14，和 m14，将是彼此接近的亲缘关系，但由于在修改过程的第一次开始就有分歧，将与其他五个物种有很大的不同，可能构成一个亚属，甚至是一个独特的属。

（l）的六个后代将形成两个亚属甚至属。但由于原始物种（l）与（A）的差异很大，几乎处于原始属的极端点，因此（l）的 6 个后代将由于遗传而与（A）的 8 个后代有很大的差异；此外，这两个群体本应继续朝着不同的方向分化。连接原始物种（a）和（l）的中间物种（这是一个非常重要的考虑因素），除了（F）外，都灭绝了，没有留下后代。因此，从（l）进化而来的 6 个新种和从（A）进化而来的 8 个新种，将不得不被划分为非常不同的属，甚至是不同的亚科。

因此，我相信，两个或两个以上的属是由同一属的两个或两个以上的种经过变异而产生的。两个或两个以上的亲本物种被认为是从一个更早的属的某个物种进化而来的。在我们的图表中，大写字母下面的虚线表示了这一点，它们以分支向下汇聚到一个点；这一点代表了一个单一的物种，被认为是我们几个新亚属和

新属的唯一亲本。

本章摘要。——如果在漫长的岁月过程中，在不同的生活条件下，有机生物在其组织的几个部分是完全不同的，我认为这是无可争议的；如果在某一年龄、季节或年份，由于每一物种在几何上的高速增长，存在着激烈的生存斗争，这当然是无可争议的；然后，考虑到所有有机生物彼此之间的关系及其生存条件的无限复杂性，导致对它们有利的结构，构成和习惯的无限多样性，我认为，如果从来没有发生过对每个生物自身福利有益的变化，就像发生过对人类有益的许多变化一样，这将是一个最不寻常的事实。但是，如果对任何有机生物有用的变异确实发生了，那么毫无疑问，具有这种特征的个体将最有可能在生存斗争中被保存下来；根据强大的遗传原则，他们将倾向于产生具有相似特征的后代。为了简洁起见，我把这种保存原则称为“自然选择”。自然选择根据在相应年龄遗传性状的原则，可以像改变成虫一样轻易地改变卵、种子或幼虫。在许多动物中，性选择将通过确保最具活力和最具适应性的雄性获得最多的后代来帮助正常选择。在与其他雄性的斗争中，性选择也会给雄性提供有用的角色。

自然选择是否真的在自然界中这样起作用，改变和适应各种形式的生命以适应它们的各种条件和位置，必须根据以下各章所提供的证据的一般内容和平衡来判断。但我们已经看到了它是如何导致灭绝的；地质学清楚地表明，物种灭绝在世界历史上的作用有多大。自然选择也会导致性格的分化；因为同一地区的生物越多，它们在结构、习性和体质上的差异就越大，这一点我们可以从任何一个小地点的居民或自然化的产物中得到证明。因此，在任何一个物种的后代的修改过程中，以及在所有物种不断增加数量的斗争中，这些后代变得越多样化，他们在生命之战中获胜的机会就越大。因此，同一物种的不同变种之间的微小差异将稳步增加，直到它们与同一属甚至不同属的物种之间的较大差异相等。

我们已经看到，它是普通的，广泛扩散的，广泛分布的物种，属于较大的属，变化最大；这些人会倾向于把这种优势传给他们改良过的后代，这种优势现在使他们在自己的国家占据主导地位。正如刚才所说的，自然选择导致了性格的分化，导致了较差的和中间的生命形式的大量灭绝。我相信，根据这些原则，所有有机生物的亲缘关系的本质都可以得到解释。这是一个真正奇妙的事实——我们很容易因为熟悉而忽略了这个奇妙的事实——所有的动物和植物在任何时间和空间里都应该以一种隶属于一种的方式相互联系，就像我们在任何地方都能看到的那样——也就是说，同一物种的变种在一起关系最密切，同一属的物种在一起关系不那么密切和不平等，形成分部和亚属，不同属的物种在一起关系不那么密切，与属有不同程度的亲缘关系，形成亚科、科、目、亚类、类。任何类中的几个从属群体都不能排列成一个纵队，而似乎是围绕着点聚集起来，这些点围绕着其他点，如此循环下去，几乎是无穷无尽的。根据每一物种都是独立产生的观点，我看不出这一伟大的事实可以用一切有机生物的分类来解释；但是，据我所知，它可以通过遗传和自然选择的复杂作用来解释，包括灭绝和性格的分化，正如我们在图表中所看到的那样。

同一阶级的所有生物的亲缘关系有时可以用一棵大树来表示。我相信这个比喻在很大程度上讲的是事实。绿色和萌芽的树枝可能代表现有的物种；而那些在前一年产生的物种可能代表了灭绝物种的长期演替。在每一个生长时期，所有生长的小枝都试图向四面伸展，并压倒和杀死周围的小枝和树枝，就像物种和物种群体在生命的伟大战斗中试图征服其他物种一样。枝干分成大枝，这些大枝又分成越来越小的小枝，当这棵树还很小的时候，它们本身就是萌芽的小枝；以前的

芽和现在的芽通过分枝连接在一起，这可以很好地代表所有灭绝的和现存的物种的分类。当这棵树还是一丛灌木的时候，许多小枝都很茂盛，现在只有两三根长成了大树枝，还能存活下来，承受着其他所有的树枝；因此，对于生活在很久以前的地质时期的物种，现在很少有存活的和经过改造的后代。从树第一次生长起，许多枝干已经腐烂脱落；这些失去的大小不一的分支可能代表了那些现在没有活的代表的整个目、科和属，我们只知道它们是在化石状态下发现的。就像我们不时看到一棵树的低叉上伸出一根细细的树枝，碰巧受到了青睐，现在还活在树梢上一样，我们偶尔也会看到一种像鸟嘴龙或鳞翅目龙这样的动物，它们的亲缘关系在某种程度上把两个大的生命分支联系在一起，它们显然是由于栖息在受保护的地方而免于致命的竞争。正如蓓蕾在生长过程中生出新芽，这些新芽如果充满活力，就会从四面八方长出许多较弱的枝条，我相信，一代又一代，伟大的生命之树就是这样，它用死去的和折断的枝条填满了地壳，用它的枝条和美丽的分枝覆盖了地表。

第一章

遗传学的开端：从孟德尔到希特勒

我的母亲邦妮·简（Bonnie Jean）相信基因。她为父亲的苏格兰血统感到自豪，并在他身上看到了诚实、勤奋和节俭的苏格兰传统美德。她也具有这些品质，而且觉得这些品质一定是他传给她的。他不幸的早逝意味着她唯一的非遗传遗产是他从格拉斯哥为她订购的一套小女孩的方格呢短裙。因此，她看重父亲的精神遗产胜过看重他的物质遗产也就不足为奇了。

在成长过程中，我与母亲无休止地争论先天和后天在塑造我们的过程中所起的相对作用。通过选择后天培养而不是天生的，我有效地认同了这样一种信念：我可以让自己成为任何我想成为的人。我不想承认我的基因有那么大的影响，我更愿意把我的沃森祖母的极度肥胖归因于她吃得太多。如果她的身材是她基因的产物，那么我也可能有一个美好的未来。然而，即使是在十几岁的时候，我也不会对遗传的显而易见的基本原则提出异议，即物以类聚。我和母亲的争论涉及复杂的特征，比如性格的各个方面，而不是简单的属性，即使作为一个倔强的青少年，我也能看出这些属性是代代相传的，导致了“家族相似性”。我的鼻子是我母亲的，现在属于我儿子邓肯。

有时特征会在几代人内出现和消失，但有时它们会持续许多代人。最著名的长寿特征之一是“哈布斯堡唇”。这种独特的下颚伸长和下唇下垂——这使得欧洲哈布斯堡王朝的统治者成为几代宫廷肖像画家的噩梦——被完好无损地传承了至少 23 代。

哈布斯堡家族的近亲通婚加剧了他们的遗传问题。在哈布斯堡家族的不同分支之间安排婚姻，通常在近亲之间安排婚姻，作为建立联盟和确保王朝继承的一种方式，可能在政治上是有意义的，但从基因的角度来看，这一点也不精明。正如哈布斯堡王朝付出代价后发现的那样，这种近亲繁殖会导致遗传病。查理二世是西班牙哈布斯堡王朝的最后一位君主，他不仅自封为家族嘴唇的典范——他甚至不会咀嚼自己的食物——而且还是一个完全残疾的人，尽管结过两次婚，也没有生育能力。

遗传疾病长期困扰着人类。在某些情况下，比如查理二世，它对历史产生了直接影响。回顾性诊断表明，以在独立战争中失去美国殖民地而闻名的英国国王乔治三世患有一种遗传性疾病卟啉症，这种疾病会导致周期性的疯狂发作。一些历史学家——主要是英国的历史学家——认为正是乔治的疾病分散了美国人的注意力，才使得美国人在军事上取得了巨大的成功。虽然大多数遗传性疾病没有这种地缘政治影响，但它们却给患病家庭带来残酷的、往往是悲剧性的后果，有时会影响许多代人。理解遗传学不仅仅是理解为什么我们长得像我们的父母。它还涉及到应对人类最古老的敌人：导致遗传疾病的基因缺陷。

当进化赋予我们的祖先能够提出正确问题的大脑时，他们一定对遗传的运作

方式感到好奇。近亲往往相似这一显而易见的原则，如果你像我们的祖先一样，把遗传学应用的关注局限在实际问题上，比如改良家养动物（比如牛的产奶量）和植物（比如水果的大小），那么它就能让你走得很远。一代又一代的精心选择——最初是为了驯化合适的物种，然后只从产量最高的奶牛和果实最大的树木中繁殖——导致了为人类目的量身定做的动植物。这一巨大的未被记录的努力背后是一个简单的经验法则：生产力最高的奶牛将产生生产力最高的后代，而果实大的树的种子将会长出果实大的树。因此，尽管在过去一百年左右的时间里取得了非凡的进步，但二十世纪和二十一世纪绝不是基因洞见的垄断者。尽管直到 1909 年英国生物学家威廉·贝特森（William Bateson）才给遗传科学起了一个名字——遗传学，尽管 DNA 革命为潜在的进步开辟了新的非凡前景，但事实上，遗传学对人类福祉的最伟大应用是在亿万年前由无名的古代农民完成的。我们所吃的几乎所有东西——谷物、水果、肉类、乳制品——都是最早、影响最深远的基因操纵应用于人类问题的遗产。

事实证明，理解遗传学的实际机制是一个更难破解的难题。格雷戈尔·孟德尔（1822 - 1884）在 1866 年发表了关于这一主题的著名论文（科学界又忽视了它 34 年）。为什么花了这么长时间？毕竟，遗传是自然世界的一个主要方面，更重要的是，它是容易观察到的，而且是普遍可见的：狗的主人看到一只棕色和黑色的狗杂交的结果，所有的父母都有意识或下意识地在他们的孩子身上追踪自己特征的出现。一个简单的原因是遗传机制变得复杂。孟德尔对这个问题的解决方案在直觉上并不明显：毕竟，孩子并不是父母特征的简单混合。也许最重要的是早期生物学家未能区分遗传和发育这两个根本不同的过程。今天我们知道，一个受精卵包含了父母双方共同贡献的遗传信息，这决定了一个人是否会患上卟啉症。这是遗传。随后的过程，从单个细胞，受精卵的卑微起点发展成一个新个体，涉及到实现这些信息。从学科的角度来看，遗传学关注信息，而发育生物学关注信息的使用。早期的科学家把遗传和发育混为一谈，认为这是一个单一的现象，他们从来没有提出过可能引导他们探索遗传秘密的问题。然而，自西方历史开始以来，这种努力就以某种形式进行着。

包括希波克拉底在内的希腊人都在思考遗传问题。他们提出了一种“泛生”理论，声称性涉及到微小身体部位的转移：“头发、指甲、静脉、动脉、肌腱和它们的骨头，尽管它们的颗粒非常小，所以看不见。在成长的过程中，它们逐渐彼此分离。” 19 世纪下半叶，查尔斯·达尔文（Charles Darwin）迫切希望用一个可行的遗传假说来支持他的自然选择进化论，于是提出了一种改良版的泛生说，这一观点曾短暂复兴。在达尔文的理论中，每个器官——眼睛、肾脏、骨骼——都贡献了循环的“生殖母粒”，这些生殖母粒积累在性器官中，并最终在有性生殖过程中交换。因为这些生殖细胞是在生物体的整个生命周期中产生的，达尔文认为，个体出生后发生的任何变化，就像长颈鹿为了获得最高的叶子而伸长脖子一样，都可以遗传给下一代。具有讽刺意味的是，为了支持他的自然选择理论，达尔文转而支持让-巴蒂斯特·拉马克的后天特征遗传理论的某些方面，而他的进化思想正是对这一理论进行了大量的质疑。达尔文只是引用了拉马克的遗传理论；他继续相信自然选择是进化背后的驱动力，但假设自然选择是在泛生作用产生的变异上起作用的。如果达尔文知道孟德尔的工作（尽管孟德尔在《物种起源》出版后不久就发表了他的研究结果，但达尔文从未意识到这些），他可能就不会在职业生涯后期为拉马克的一些观点提供支持而感到尴尬了。

泛生说认为胚胎是由一组微小的成分组装而成的，而另一种方法，“预形成

说”，则完全避免了组装的步骤：卵子或精子（确切地说，这是一个有争议的问题）都包含一个完整的预形成的个体，称为侏儒。因此，发展只不过是把它扩大为一个完全形成的存在而已。在预形成论的时代，我们现在所认识到的遗传疾病有各种各样的解释：有时是上帝愤怒的表现，有时是恶魔和魔鬼的恶作剧；有时作为父亲“种子”过剩或不足的证据；有时是由于母亲在怀孕期间的“邪恶思想”。假设怀孕母亲的欲望受挫，使她感到压力和沮丧，就会导致胎儿畸形，拿破仑通过了一项允许孕妇入店行窃的法律。不用说，这些观念都没有对增进我们对遗传性疾病的了解有多大帮助。

到19世纪早期，更好的显微镜已经击败了预形成论。不管你怎么努力看，你都不会看到一个蜷缩在精子或卵细胞里的小矮人。panggenesis 虽然是一个早期的误解，但持续的时间更长——这个观点坚持认为，胚芽太小了，无法看到——但最终被 August Weismann 推翻了，他认为遗传依赖于胚芽在世代之间的连续性，因此个体一生中身体的变化不可能遗传给后代。他的简单实验是切掉几代老鼠的尾巴。根据达尔文的泛生说，无尾老鼠会产生代表“没有尾巴”的小颗粒，因此它们的后代会发育出严重发育不良的后肢，或者根本没有。当 Weismann 证明，在截肢者的许多代之后，尾巴仍然出现时，panggenesis 就被淘汰了。

格雷戈尔·孟德尔是正确的人。然而，无论以何种标准衡量，他都不太可能成为科学超级明星。他出生在现在捷克共和国的一个农民家庭，在乡村学校成绩优异，21岁时进入了布尔尼恩的奥古斯丁修道院。在当教区牧师被证明是一场灾难之后——他对牧师的反应是精神崩溃——他尝试着去教书。大家都说他是个好老师，但为了有资格教所有科目，他必须参加考试。他失败了。孟德尔的父亲院长阿博特·纳普（Abbot Napp）随后将他派往维也纳大学（University of Vienna），在那里他将全职为复试做准备。尽管孟德尔在维也纳的物理成绩很好，但他又一次考试不及格，因此从未升到代课教师的职位。

大约在1856年，在纳普修道院院长的建议下，孟德尔进行了一些关于遗传的科学实验。他选择研究他在修道院花园里自己种植的豌豆植物的一些特征。1865年，他在两次讲座中向当地自然历史学会介绍了他的研究结果，一年后，他在该学会的杂志上发表了这些研究结果。他的作品堪称绝技：实验设计精巧，执行煞费苦心，他对实验结果的分析既深刻又灵活。看来，他在物理学方面的训练促成了他的突破，因为与当时的其他生物学家不同，他从数量上解决了这个问题。孟德尔并没有简单地指出红花和白花杂交会产生一些红色和一些白色的后代，他实际上计算了它们，意识到红色和白色后代的比例可能很重要——事实确实如此。尽管孟德尔把他的文章寄给了许多著名的科学家，但他发现自己完全被科学界忽视了。他试图引起人们对他的成果的注意，结果适得其反。他写信给当时在慕尼黑的顶级科学家、植物学家卡尔 Nägeli，请他重复实验，并及时寄去140包贴上标签的种子。他本不该麻烦的。Nägeli 认为这个默默无闻的和尚应该为他服务，而不是为他服务，所以他把自己最喜欢的植物山楂的种子寄给孟德尔，挑战这个和尚用不同的物种重新创造他的结果。遗憾的是，由于种种原因，山楂不太适合进行孟德尔在豌豆上进行的培育实验。整个练习都是在浪费他的时间。

1868年，当纳普去世后，孟德尔被选为修道院院长时，他作为僧侣、教师、研究员的低调生活突然结束了。尽管他继续他的研究——越来越多的关于蜜蜂和天气的研究——但管理职责是一个负担，尤其是当修道院卷入了一场关于补缴税款的混乱纠纷时。其他因素也阻碍了他成为一名科学家。肥胖最终限制了他的野外工作：正如他所写的，“在一个万有引力盛行的世界里，爬山对我来说变得

非常困难”。医生给他开了烟草处方来控制他的体重，他遵照医嘱每天抽 20 支雪茄，和温斯顿·丘吉尔一样多。然而，让他失望的并不是他的肺：1884 年，61 岁的孟德尔死于心脏病和肾病。

孟德尔的研究结果不仅被埋没在一本不知名的杂志上，而且对那个时代的大多数科学家来说，它们都是无法理解的。他将细致的实验和精密的定量分析相结合，远远领先于他的时代。也许不足为奇的是，直到 1900 年科学界才赶上了他。三位对类似问题感兴趣的植物遗传学家重新发现了孟德尔的工作，引发了生物学的一场革命。科学界终于准备好接受僧侣的豌豆了。

孟德尔意识到有一些特定的因素——后来被称为“基因”——可以从父母传给后代。他发现这些因素是成对出现的，后代从父母身上各得到一个。

注意到豌豆有两种不同的颜色，绿色和黄色，他推断出豌豆颜色基因有两个版本。如果一颗豌豆要变成绿色，它必须有两个 G 版本的拷贝，在这种情况下，我们说它是 GG 豌豆颜色基因。因此，它一定从它的双亲那里得到了一个豌豆色的基因。然而，黄豌豆可能是由 YY 和 YG 组合产生的。只要有一个 Y 型的拷贝就足以生产黄豌豆。因为在 YG 的情况下，Y 信号优于 G 信号，我们称 Y 为“显性”。豌豆色基因的次要 G 版本被称为“隐性”。

每个亲本豌豆植株都有两个豌豆色基因的拷贝，但它只向每个后代提供一个拷贝；另一份由另一方家长提供。在植物中，花粉粒含有精子细胞——雄性对下一代的贡献——而每个精子细胞只含有一个豌豆色基因的拷贝。具有 YG 组合的亲本豌豆植株将产生含有 Y 版本或 G 版本的精子。孟德尔发现这个过程是随机的：这种植物产生的精子中有 50% 是 Y 染色体，50% 是 G 染色体。

突然间，许多遗传之谜变得有意义了。像哈布斯堡唇这样具有高概率（实际上是 50%）代代相传的特征是显性的。在家谱中出现的其他特征更为零星，通常是隔代遗传，可能是隐性的。当一个基因是隐性的，一个个体必须有两个拷贝才能表达相应的性状。那些拥有一个基因副本的人是携带者：他们自己不表现出这种特征，但他们可以将这种基因传递下去。白化病是一种隐性遗传特征，通过这种方式传播。白化病患者的身体无法产生色素，因此皮肤和头发明显变白。因此，要成为白化病，你必须有两个基因拷贝，一个来自父亲，一个来自母亲。（威廉·阿奇博尔德·斯普纳（William Archibald Spooner）牧师博士就是这种情况，也许只是巧合，他也容易出现一种特殊形式的语言混淆，例如，“一辆上了油的自行车”可能会变成“一根煮得很好的冰柱”。为了向他致敬，这种颠倒被称为“欺骗”。）与此同时，你的父母可能根本没有表现出这种基因的迹象。如果，通常情况下，每个人只有一个副本，那么他们都是携带者。这一特征至少跨越了一代。

孟德尔的结果表明，物质是代代相传的。但这些东西的本质是什么呢？

大约在 1884 年孟德尔去世的时候，科学家们利用不断改进的光学技术来研究细胞的微小结构，创造了“染色体”这个术语来描述细胞核中细长的线状体。但直到 1902 年，孟德尔和染色体才走到了一起。

哥伦比亚大学医学院的学生沃尔特·萨顿（Walter Sutton）意识到染色体与孟德尔的神秘因素有很多共同之处。在研究蚱蜢的染色体时，萨顿注意到，大多数时候它们是成对的——就像孟德尔的成对因子一样。但萨顿也发现了一种染色体不配对的细胞：性细胞。蚱蜢的精子只有一组染色体，而不是两组。这正是孟德尔所描述的：他的豌豆植物精细胞也只携带了他的每种因子的一个副本。很明显，孟德尔的因素，现在被称为基因，一定在染色体上。

在德国，西奥多·波维里独立地得出了与萨顿相同的结论，因此他们的工作

引发的生物学革命被称为萨顿 - 波维里染色体遗传理论。突然间，基因变得真实了。它们在染色体上，你可以通过显微镜看到染色体。

并非所有人都相信萨顿 - 波维里理论。托马斯·亨特·摩根 (Thomas Hunt Morgan) 也是哥伦比亚大学的怀疑论者。在显微镜下观察那些细长的染色体，他看不出它们是如何解释从一代到下一代发生的所有变化的。如果所有的基因都排列在染色体上，所有的染色体都完好无损地代代相传，那么肯定会有许多特征被遗传在一起。但是，由于经验证据表明情况并非如此，染色体理论似乎不足以解释在自然界中观察到的变异。然而，作为一个精明的实验家，摩根有一个解决这些差异的办法。他把目光转向果蝇，黑腹果蝇，这种褐色的小动物，自摩根以来，一直深受遗传学家的喜爱。

事实上，摩根并不是第一个在繁殖实验中使用果蝇的人——这一殊荣属于哈佛大学的一个实验室，该实验室于 1901 年首次将果蝇投入使用——但正是摩根的工作使果蝇进入了科学的版图。果蝇是基因实验的好选择。它很容易找到（任何在夏天把一串熟透的香蕉丢在外面的人都知道）；它很容易饲养（香蕉可以作为饲料）；你可以在一个牛奶瓶里容纳数百只苍蝇（摩根的学生毫不费力地获得牛奶瓶，在黎明时分从曼哈顿社区的门口抓起它们）；它繁殖，繁殖，繁殖（整整一代大约需要十天，每只雌性产下几百个卵）。从 1907 年开始，摩根和他的学生（他们被称为“摩根的男孩”）在一个臭名昭著的肮脏、蟑螂横行、香蕉臭味熏天的实验室里开始研究果蝇。

孟德尔可以依靠农民和园丁多年来分离出来的变异菌株——黄豌豆和绿豌豆，皱纹皮肤和光滑的皮肤——摩根没有果蝇基因差异的菜单来借鉴。除非你分离出一些独特的特征来追踪几代人，否则你无法进行遗传学研究。因此，摩根的第一个目标是找到“突变体”，即果蝇中的黄色或皱巴巴的豌豆。他在寻找基因的新奇之处，在人群中随机出现的变异。

摩根观察到的第一批突变体中，有一个是最有启发意义的。正常果蝇的眼睛是红色的，而这些果蝇的眼睛是白色的。他注意到白眼苍蝇通常是雄性。众所周知，果蝇的性别——或者就此而言，人类的性别——是由染色体决定的：雌性有两个 X 染色体的副本，而雄性有一个 X 染色体的副本和一个小得多的 Y 染色体的副本。根据这些信息，白眼的结果突然变得有意义了：眼睛的颜色基因位于 X 染色体上，而白眼的突变 W 是隐性的。因为雄性只有一条 X 染色体，即使是隐性基因，在没有显性对应物抑制它们的情况下，也会自动表达。白眼女性相对罕见，因为她们通常只有一个 W 基因拷贝，所以她们表达的是占主导地位的红眼颜色。尽管摩根最初持保留态度，但通过将决定眼睛颜色的基因与染色体“X”联系起来，他已经有效地证明了萨顿 - 波维里理论。他还发现了一个“性别连锁”的例子，即一个特定的特征在一个性别中不成比例地表现出来。

就像摩根的果蝇一样，维多利亚女王提供了一个著名的性别连锁的例子。在她的一条 X 染色体上，她有一个突变的血友病基因。血友病是一种“出血性疾病”，患者无法正常凝血。因为她的另一个副本是正常的，而血友病基因是隐性的，所以她自己没有患病。但她是个携带者。她的女儿们也没有得这种病；显然，每个人都至少拥有一份正常版本的副本。但维多利亚的儿子们并不都这么幸运。像所有雄性果蝇（包括果蝇）一样，每只果蝇只有一条 X 染色体；这必然来自维多利亚（Y 染色体只能来自维多利亚的丈夫阿尔伯特亲王）。因为维多利亚有一个突变的副本和一个正常的副本，她的每个儿子都有 50% 的机会患上这种疾病。利奥波德王子倒霉了：他得了血友病，在一次轻微跌倒后失血过多而死，享年 31 岁。

维多利亚的两个女儿，爱丽丝公主和比阿特丽斯公主都是携带者，她们从母亲那里继承了突变基因。他们每个人都有携带血友病的女儿和儿子。爱丽丝的孙子，俄国王位继承人亚历克西斯患有血友病，如果不是布尔什维克先找到他，他肯定会英年早逝。

摩根的果蝇还有其他秘密要揭示。在研究位于同一染色体上的基因的过程中，摩根和他的学生发现染色体实际上在精子和卵细胞的产生过程中分裂并重新形成。这意味着摩根最初对萨顿-波维里理论的反对是没有根据的：断裂和重组——用现代遗传学术语来说就是“重组”——会在一对染色体的成员之间打乱基因拷贝。这意味着，比如说，我从我母亲那里得到的12号染色体的副本（当然，另一个来自我父亲）实际上是我母亲的两个12号染色体副本的混合体，其中一个来自她母亲，另一个来自她父亲。她的两个12s重组交换材料，在卵细胞的生产过程中，最终变成了我。因此，我的母系遗传的12号染色体可以看作是我祖父母的12号染色体的马赛克。当然，我母亲的母系血统本身就是她祖父母的12岁的马赛克，等等。

重组使摩根和他的学生能够绘制出特定基因在特定染色体上的位置。重组包括染色体断裂（和重新形成）。因为基因像珠子一样排列在染色体串上，从统计学上讲，染色体上两个相距很远的基因（中间有更多的潜在断点）之间的断裂比两个靠得近的基因之间的断裂更容易发生。因此，如果我们看到一条染色体上任意两个基因的重组，我们就可以得出这样的结论：它们相距很远；重组越罕见，基因可能越接近。这个基本而强大的原理是所有基因图谱的基础。因此，参与人类基因组计划的科学家和抗击遗传疾病的前沿研究人员的主要工具之一，就是多年前在哥伦比亚大学肮脏、杂乱的苍蝇室里开发出来的。这些天，报纸科学版的每一个新标题都是“定位基因”之类的，是对摩根和他的孩子们开创性工作的致敬。

孟德尔工作的重新发现，以及随后的突破，激起了人们对遗传学的社会意义的兴趣。当科学家们在整个十八、十九世纪都在努力研究遗传的精确机制时，公众对后来被称为“堕落阶级”的人——济贫院、济贫院和精神病院的居民——给社会带来的负担越来越关注。我们能对这些人做些什么？是否应该仁慈地对待他们仍然是一个有争议的问题——不那么仁慈的人声称，这样做可以确保这些人永远不会努力，因此将永远依赖于国家或私人机构的慷慨——或者干脆忽视他们，根据有慈善倾向的人，这样做只会导致不幸的人永远无法从他们的悲惨境遇中解脱出来。

1859年达尔文的《物种起源》的出版使这些问题成为人们关注的焦点。虽然达尔文小心翼翼地没有提到人类的进化，担心这样做只会进一步激化已经很激烈的争论，但把他的自然选择理论应用到人类身上并不需要多大的想象力。自然选择是决定自然界中所有基因变异命运的力量——比如摩根在果蝇眼睛颜色基因中发现的突变，但也可能是人类个体自我保护能力的差异。

自然种群具有巨大的繁殖潜力。以果蝇为例，它们的一代周期只有10天，雌性果蝇每只会产生大约300个卵（其中一半是雌性）：从一对果蝇开始，一个月后（即三代之后），你手上会有 $150 \times 150 \times 150$ 只果蝇——超过300万只苍蝇，它们都是由一对果蝇在一个月内产生的。达尔文通过选择一个生殖谱系另一端的物种来证明这一点：

大象被认为是所有已知的动物中繁殖速度最慢的，我已经费了些功夫来估计它可能的最低自然增长率：假设它在三十岁时繁殖，一直繁殖到九十岁，在这段

时间内生三对幼崽，这是不正确的；如果是这样的话，到公元 5 世纪末，就会有 1500 万头大象是第一对大象的后代。

所有这些计算都假设所有的小果蝇和小象都能成功地长大成人。因此，从理论上讲，必须有无限大的食物和水供应来维持这种过度繁殖。当然，在现实中，这些资源是有限的，并不是所有的小果蝇或小大象都能活下来。同一物种内的个体之间存在着对这些资源的竞争。是什么决定了谁在争夺资源的斗争中获胜？达尔文指出，基因变异意味着某些个体在他所谓的“生存斗争”中具有优势。以 Galápagos 群岛的达尔文雀为例，那些具有遗传优势的个体更有可能生存和繁殖，比如喙的大小合适，可以吃到最多的种子。因此，有利的基因变异——喙的大小合适——往往会遗传给下一代。结果是，自然选择用有益的突变丰富了下一代，最终，经过足够多的世代，物种的每个成员最终都具有这种特征。

维多利亚时代的人把同样的逻辑应用到人类身上。他们环顾四周，被眼前的景象吓了一跳。体面、有道德、勤奋的中产阶级被肮脏、不道德、懒惰的下层阶级大大超过。维多利亚时代的人认为，体面、道德和勤奋的美德就像肮脏、放荡和懒惰的恶习一样，会在家庭中遗传。这样的特征必然是遗传的；因此，对维多利亚时代的人来说，道德和不道德只是达尔文的两个基因变体。而且，如果下层社会的人口比上流社会的人口多，那么“坏”基因就会在人口中增加。这个物种灭亡了！随着“不道德”基因越来越普遍，人类会逐渐变得越来越堕落。

弗朗西斯·高尔顿有充分的理由特别关注达尔文的书，因为作者是他的表亲和朋友。达尔文比高尔顿大 13 岁左右，他在高尔顿坎坷的大学生活中给了他指导。但正是《物种起源》激发了高尔顿发起一场社会和基因运动，这场运动最终带来了灾难性的后果。1883 年，在他堂兄去世一年后，高尔顿给这一运动起了一个名字：优生学。

优生学只是高尔顿众多兴趣之一；高尔顿的拥趸称他为博学多才，批评者称他为外行。事实上，他在地理学、人类学、心理学、遗传学、气象学、统计学等领域都做出了重大贡献，并为指纹分析奠定了坚实的科学基础，他还为犯罪学做出了贡献。他于 1822 年出生在一个富裕的家庭，他所受的教育——一部分是医学，一部分是数学——基本上是一部失败期望的编年史。他父亲在他 21 岁时去世，他从父亲的束缚中解脱出来，同时得到了一笔可观的遗产；年轻人适时地利用了这两者。然而，在经历了整整六年的信托基金辍学之后，高尔顿安顿下来，成为维多利亚时代建制派的一名有贡献的成员。1850 年至 1852 年，他带领一支探险队前往当时鲜为人知的非洲西南部地区，从而一举成名。在他对探险的描述中，我们第一次看到了将他的各种兴趣联系在一起的一条线索：他计算和测量一切。高尔顿只有在把一种现象简化为一组数字时才会感到高兴。

在一个传教站，他遇到了一个引人注目的肥胖病例——臀部特别突出，在该地区的土著纳玛妇女中很常见——他意识到这个女人天生就有当时在欧洲流行的身材。唯一的区别是，欧洲裁缝需要巨大的（和昂贵的）创造力来为他们的客户创造理想的“外观”。

我承认我是一个有学问的人，我非常渴望得到她身材的精确尺寸；但是这样做有一个困难。我一个字也不懂霍屯督（霍屯督是荷兰人对名字的称呼），因此我永远无法向那位女士解释我的脚是为了什么。我实在不敢请我那位可敬的传教士主人帮我翻译。因此，当我凝视着她的身材时，我感到进退两难，这是大自然赐予这个受人喜爱的种族的慷慨礼物，没有一个缝制斗篷的人，除了谦卑地模仿她所有的褶边和填充物之外，还能做得更好。我爱慕的对象站在一棵树下，像那

些希望被人爱慕的小姐们通常所做的那样，在四周转来转去。突然，我的目光落在我的六分仪上；我突然想到了一个明亮的念头，于是我从上下、横线、对角线等各个方向，仔细地观察了她的身材，并把它们仔细地记录在一张轮廓图上，以免出错；做完这些后，我大胆地拿出卷尺，测量了从我所在的地方到她站的地方的距离，这样就得到了底和角度，我用三角函数和对数计算出了结果。

高尔顿对量化的热情使他发展了许多现代统计学的基本原则。它也产生了一些聪明的观察结果。例如，他测试了祈祷的功效。他认为，如果祈祷起作用，那些祈祷最多的人应该处于有利地位；为了验证这一假设，他研究了英国君主的寿命。每个星期天，英国国教的会众都按照《公祷书》（Book of Common Prayer）恳求上帝：“赐给国王/王后丰厚的天赐；愿他/她健康长寿。”当然，高尔顿推断，所有这些祈祷的累积效果应该是有益的。事实上，祈祷似乎是无效的：他发现平均而言，君主比其他英国贵族成员死得要早一些。

由于与达尔文的关系——他们共同的祖父伊拉斯谟·达尔文也是他那个时代的智力巨人之一——高尔顿对某些血统似乎会产生不成比例的大量杰出和成功人士的方式特别敏感。1869年，他发表了一篇名为《遗传天才：对其规律和后果的探究》的论文，这将成为他所有优生学思想的基础。在书中，他试图证明天赋，就像哈布斯堡唇这样简单的基因特征一样，确实会在家族中遗传；例如，他讲述了一些家族如何培养出一代又一代的法官。他的分析在很大程度上忽略了环境的影响：毕竟，一个杰出法官的儿子比一个农民的儿子更有可能成为一名法官——如果没有其他因素的话，这要归功于他父亲的关系。然而，高尔顿并没有完全忽视环境的影响，他是第一个提到“先天/后天”二分法的人，可能是指莎士比亚笔下不可救药的恶棍卡利班，“一个魔鬼，一个天生的魔鬼，先天/后天永远无法固定在他身上”。

然而，他的分析结果在高尔顿心中没有留下任何疑问。

我无法忍受那种偶尔表达出来的、常常暗示出来的假设，尤其是在那些教孩子要乖的故事里，认为婴儿生下来都差不多，造成男孩和男孩、男人和男人之间差异的唯一因素是持之以恒的努力和道德上的努力。我绝对反对所谓天生平等的说法。

他认为，这些特征是由基因决定的，这一信念的一个必然结果是，通过优先培育有天赋的个体，并阻止天赋较低的个体繁衍后代，有可能“改善”人类种群。

这很容易……通过精心挑选获得一种具有奔跑或其他特殊能力的狗或马的永久品种，因此，通过明智的婚姻，在连续几代人产生一个具有高度天赋的人类种族是完全可行的。

高尔顿引入了优生学这个术语（字面意思是“天生好”）来描述农业育种的基本原理对人类的应用。随着时间的推移，优生学开始指的是“自我导向的人类进化”：优生学家认为，通过有意识地选择谁应该有孩子，他们可以阻止维多利亚时代想象中的“优生学危机”，这种危机是由劣等人种的高繁殖率与典型的中产阶级小家庭相结合造成的。

第二章

双螺旋结构：这就是生命

在芝加哥大学的第三年，我迷上了这种基因。在那之前，我一直计划成为一

名博物学家，并期待着一份远离芝加哥南区（我长大的地方）喧嚣的职业。启发我改变想法的不是一位令人难忘的老师，而是 1944 年出版的一本小书《什么是生活？》由奥地利出生的波动力学之父 Erwin 薛定谔提出。它源于他前一年在都柏林高等研究院（Institute for Advanced Study）的几次讲座。一位伟大的物理学家花时间写生物学引起了我的兴趣。在那些日子里，和大多数人一样，我认为化学和物理是“真正的”科学，理论物理学家是科学的佼佼者。

薛定谔认为生命可以被看作是储存和传递生物信息的过程。因此，染色体仅仅是信息的载体。因为如此多的信息必须被装入每个细胞，它必须被压缩成薛定谔所说的嵌入在染色体分子结构中的“遗传密码”。因此，为了了解生命，我们必须识别这些分子，并破解它们的密码。他甚至推测，理解生命——包括找到基因——可能会让我们超越我们当时所理解的物理定律。薛定谔的书非常有影响力。许多后来在分子生物学这出伟大戏剧的第一幕中扮演重要角色的人，包括弗朗西斯·克里克（Francis Crick）（他自己也曾是物理学家），都和我一样读过《生命是什么？》我印象深刻。

就我自己而言，薛定谔引起了我的共鸣，因为我也被生命的本质所吸引。一小部分科学家仍然认为生命依赖于从全能的神发出的生命力。但就像我的大多数老师一样，我鄙视生机论这个概念。如果这样一种“至关重要”的力量在大自然的游戏中发号施令，那么通过科学的方法来理解生命就几乎没有希望了。另一方面，生命可以通过一本写有密码的说明书而得以延续的观念吸引着我。什么样的分子密码可以如此精细地传达生命世界的所有奇妙之处？什么样的分子技巧可以确保每次染色体复制时代码都精确地复制？

在薛定谔的都柏林讲座期间，大多数生物学家认为，蛋白质最终将被确定为遗传指令的主要承担者。蛋白质是由 20 种不同的氨基酸组成的分子链。由于氨基酸链上的排列顺序实际上是无限的，原则上，蛋白质可以很容易地编码支撑生命非凡多样性的信息。那时，人们并不认为 DNA 是编码脚本的重要载体，尽管它只位于染色体上，而且人们对它的认识已经有 75 年的历史了。1869 年，在德国工作的瑞士生物化学家弗里德里希·米歇尔从当地一家医院提供的浸过脓的绷带中分离出一种他称之为“核蛋白”的物质。因为脓液主要由白细胞组成，而白细胞与红细胞不同，白细胞有细胞核，因此含有 DNA 的染色体，米歇尔偶然发现了一个很好的 DNA 来源。当他后来发现“核蛋白”只存在于染色体中时，米歇尔明白他的发现确实是一个重大发现。1893 年，他写道：“遗传确保了一代又一代形式的连续性，这种连续性甚至比化学分子更深刻。它存在于原子基团的结构中。从这个意义上说，我是化学遗传理论的支持者。”

然而，在此后的几十年里，化学仍然无法胜任分析 DNA 分子的巨大尺寸和复杂性的任务。直到 20 世纪 30 年代，人们才发现 DNA 是一个长分子，包含四种不同的化学碱基：腺嘌呤（a）、鸟嘌呤（G）、胸腺嘧啶（T）和胞嘧啶（C）。但在薛定谔的讲座期间，人们还不清楚分子的亚基（称为脱氧核苷酸）是如何在化学上联系在一起。也不知道 DNA 分子的四种不同碱基的序列是否会有所不同。如果 DNA 确实是薛定谔的密码脚本，那么分子就必须能够以大量不同的形式存在。但当时人们仍然认为，像 AGTC 这样的简单序列可能会沿着整个 DNA 链的长度反复重复。

直到 1944 年，纽约市洛克菲勒研究所的奥斯瓦尔德·艾弗里（Oswald Avery）的实验室报告称，肺炎细菌表面涂层的组成可以改变，DNA 才成为遗传学的焦点。这不是他和他的年轻同事科林·麦克劳德（Colin MacLeod）和麦克林·麦卡蒂

(Maclyn McCarty) 预期的结果。十多年来, 艾弗里的研究小组一直在追踪 1928 年英国卫生部科学家弗雷德·格里菲斯 (Fred Griffith) 所做的另一项最意想不到的观察。格里菲斯对肺炎很感兴趣, 并研究了它的细菌病原体肺炎球菌。已知有两种菌株, 根据其在显微镜下的外观命名为“光滑” (S) 和“粗糙” (R)。这些菌株不仅在视觉上不同, 而且在毒力上也不同。将 S 型细菌注射到老鼠体内, 几天内老鼠就会死亡; 注射 R 细菌, 老鼠仍然健康。事实证明, S 型细菌细胞有一层保护膜, 可以阻止老鼠的免疫系统识别入侵者。R 细胞没有这种涂层, 因此很容易受到小鼠免疫防御系统的攻击。

通过参与公共卫生工作, 格里菲斯知道有时从一个病人身上分离出多种菌株, 所以他很好奇不同的菌株在他不幸的老鼠身上是如何相互作用的。通过一种组合, 他有了一个惊人的发现: 当他注射热杀灭的 S 细菌 (无害) 和正常的 R 细菌 (也无害) 时, 老鼠死亡了。两种无害的细菌是如何合谋变得致命的呢? 当他从死老鼠身上分离出肺炎球菌并发现活的 S 细菌时, 线索就出现了。看起来, 活的无害 R 细菌从死亡的 S 变体中获得了一些东西; 不管它是什么, 某种东西允许 R 在热致死 S 细菌存在的情况下将自己转化为活的 S 杀手菌株。格里菲斯通过培养从死老鼠身上提取的 S 型细菌, 经过几代的培养, 证实了这种变化是真实的: 细菌繁殖出真正的 S 型, 就像任何普通的 S 型菌株一样。注射到老鼠体内的 R 型细菌确实发生了基因变化。

虽然这种转变现象似乎难以理解, 但格里菲斯的观察起初在科学界几乎没有引起什么轰动。这在一定程度上是因为格里菲斯非常注重隐私, 非常讨厌大型聚会, 所以他很少参加科学会议。有一次, 他实际上是被迫去讲课的。他被塞进一辆出租车, 在同事们的陪同下来到大厅, 用一种含糊不清的语调进行了演讲, 强调了他微生物研究的一个不起眼的角落, 但没有提到细菌转化。幸运的是, 并非所有人都忽视了格里菲斯的突破。

奥斯瓦尔德·艾弗里也对肺炎球菌的糖状外壳感兴趣。他开始重复格里菲斯的实验, 以分离和表征导致 R 细胞转变为 S 型的原因。1944 年, 艾弗里、麦克劳德和麦卡蒂发表了他们的研究结果: 一组精美的实验明确表明, DNA 是转化的原理。在试管中培养细菌比在小鼠中培养细菌更容易在热杀死的 S 细胞中寻找转化因子的化学特性。艾弗里和他的研究小组有条不紊地一个接一个地破坏热处理 S 细胞的生化成分, 观察转化是否被阻止。首先, 他们降解了 S 型细菌的糖状外壳。变形还是发生了: 外衣并不是变形的原理。接下来, 他们使用两种蛋白质破坏酶——胰蛋白酶和凝乳胰蛋白酶的混合物, 来降解 S 细胞中几乎所有的蛋白质。令他们惊讶的是, 转型再次没有受到影响。接下来, 他们尝试了一种分解核糖核酸的酶 (RNase)。核糖核酸是类似于 DNA 的第二类核酸, 可能与蛋白质合成有关。转变再次发生了。最后, 他们来到了 DNA, 将 S 细菌提取物暴露在 DNA 破坏酶 (DNase) 中。这次他们打出了全垒打。所有 s 诱导活动完全停止。转化因子是 DNA。

1944 年 2 月, 艾弗里、麦克劳德和麦卡蒂发表了一篇论文, 部分原因是它的爆炸性影响, 引起了褒贬不一的反响。许多遗传学家接受了他们的结论。毕竟, DNA 是在每条染色体上发现的; 为什么不应该是遗传物质? 然而, 相比之下, 大多数生物化学家对 DNA 是否复杂到足以充当如此大量生物信息的存储库表示怀疑。他们仍然相信, 染色体的另一个组成部分——蛋白质, 将被证明是遗传物质。原则上, 正如生物化学家正确指出的那样, 用蛋白质的 20 个字母的氨基酸序列来编码大量复杂的信息要比用 DNA 的 4 个字母的核苷酸序列来编码容易得多。艾弗

里在洛克菲勒研究所的同事、蛋白质化学家阿尔弗雷德·米爾斯基 (Alfred Mirsky) 对 DNA 作为遗传物质的拒绝态度尤为尖刻。然而，到那时，埃弗里已经不再从事科学活动了。洛克菲勒研究所在他 65 岁时强制他退休。

艾弗里错过的不仅仅是为自己的研究成果辩护、抵御同事攻击的机会：他从未因为发现 DNA 是转化原理而获得诺贝尔奖，这当然是他应得的。因为诺贝尔委员会在每次获奖 50 年后都会公开其记录，所以我们现在知道，埃弗里的候选资格受到了瑞典物理化学家埃纳尔·哈马斯滕 (Einar Hammarsten) 的阻挠。尽管 Hammarsten 的声誉主要是基于他制作了前所未有的高质量 DNA 样本，但他仍然认为基因是一种未被发现的蛋白质。事实上，即使在双螺旋结构被发现之后，Hammarsten 仍然坚持认为，在 DNA 转化的机制被完全弄清楚之前，艾弗里不应该获奖。艾弗里于 1955 年去世；如果他再多活几年，他几乎肯定会获奖。

当我在 1947 年秋天来到印第安纳大学，打算在博士论文中研究这种基因时，艾弗里的论文在谈话中被反复提起。到那时，没有人怀疑他的结果的可重复性，洛克菲勒研究所最近的工作使蛋白质被证明是细菌转化的遗传角色的可能性大大降低。DNA 最终成为化学家们着眼于下一个突破的重要目标。在英国剑桥，精明的苏格兰化学家亚历山大·托德 (Alexander Todd) 接受了识别 DNA 中连接核苷酸的化学键的挑战。到 1951 年初，他的实验室已经证明了这些链接总是相同的，因此 DNA 分子的主干是非常规则的。在同一时期，在哥伦比亚大学内外科医生学院工作的奥地利出生的难民 Erwin Chargaff，使用纸色谱的新技术来测量从各种脊椎动物和细菌中提取的 DNA 样本中四种 DNA 碱基的相对数量。一些物种的 DNA 中腺嘌呤和胸腺嘧啶占主导地位，而另一些物种的 DNA 中鸟嘌呤和胞嘧啶占主导地位。这样就出现了一种可能性，即没有两个 DNA 分子具有相同的组成。

在印第安纳大学，我加入了一个有远见的科学家小组，主要是物理学家和化学家，研究攻击细菌的病毒（噬菌体，简称“噬菌体”）的繁殖过程。噬菌体小组诞生于我的博士导师、意大利培养的医生萨尔瓦多·卢里亚 (Salvador Luria) 和他的密友、德国出生的理论物理学家马克斯·德尔布尔 (Max delbr)，以及美国物理化学家阿尔弗雷德·好时 (Alfred Hershey) 的合作。在第二次世界大战期间，Luria 和 delbr 都被认为是敌人，因此没有资格为美国科学的战争努力服务，尽管 Luria 是犹太人，被迫离开法国前往纽约市，而 delbr 作为纳粹主义的反对者逃离了德国。因此，他们被排除在外，继续在各自的大学实验室工作——印第安纳州的 Luria 和范德比尔特大学的 delbr——并在冷泉港连续的夏天合作进行噬菌体实验。1943 年，他们与才华横溢但沉默寡言的好时合作，当时好时正在圣路易斯的华盛顿大学进行噬菌体研究。

噬菌体小组的计划是基于他们的信念，即噬菌体和所有病毒一样，实际上是裸露的基因。这个概念最早是在 1922 年由富有想象力的美国遗传学家赫尔曼·J·穆勒提出的，他在三年后证明了 X 射线会导致基因突变。1946 年，他获得了姗姗来迟的诺贝尔奖，就在他加入印第安纳大学 (Indiana University) 之后。事实上，正是他的存在把我带到了印第安纳州。穆勒在 T.H. 摩根手下开始了他的职业生涯，他比任何人都清楚遗传学在 20 世纪上半叶是如何进化的，我在第一学期就被他的讲座迷住了。然而，在我看来，他对果蝇 (*Drosophila*) 的研究更像是属于过去而不是未来的，我只是短暂地考虑过在他的指导下做论文研究。我选择了 Luria 的噬菌体，这是一个比果蝇更快的实验对象：今天完成的噬菌体基因杂交可以在第二天进行分析。

在我的博士论文研究中，Luria 让我跟随他的脚步，研究 X 射线如何杀死噬

菌体颗粒。最初，我希望证明病毒的死亡是由噬菌体 DNA 受损引起的。然而，我最终不得不情愿地承认，我的实验方法永远无法在化学层面上给出明确的答案。我只能得出生物学上的结论。尽管噬菌体实际上是赤裸裸的基因，但我意识到，噬菌体小组正在寻找的深层答案只能通过先进的化学方法得到。DNA 必须以某种方式超越其作为首字母缩略词的地位；它必须被理解为分子结构的所有化学细节。

论文一写完，我别无选择，只好搬到实验室去研究 DNA 化学。然而，不幸的是，我几乎不懂纯化学，在任何实验室里尝试有机化学或物理化学的困难实验，我都会感到力不从心。因此，1950 年秋，我在生物化学家赫尔曼·卡尔卡（Herman Kalckar）的哥本哈根实验室获得了博士后奖学金。他正在研究构成 DNA 的小分子的合成，但我很快就发现，他的生化方法永远不会导致对基因本质的理解。在他的实验室里多待一天，就意味着在了解 DNA 如何携带遗传信息方面又多耽搁了一天。

尽管如此，我在哥本哈根度过的一年还是收获颇丰。为了躲避丹麦寒冷的春天，我在 4 月和 5 月期间去了那不勒斯的动物站。在那里的最后一周，我参加了一个关于 x 射线衍射方法确定分子三维结构的小型会议。x 射线衍射是研究任何可结晶分子的原子结构的一种方法。晶体受到 X 射线的轰击，X 射线被其原子反射而散射。散点模式提供了分子结构的信息，但单独来看，还不足以解决结构问题。所需的附加信息是“相位分配”，它处理分子的波动特性。解决相位问题并不容易，当时只有最大胆的科学家才愿意承担这个任务。衍射法的大多数成功都是在相对简单的分子上取得的。

我对这次会议的期望很低。我相信，对蛋白质结构的三维理解，或者对 DNA 的三维理解，还需要十多年的时间。令人失望的早期 x 射线照片表明，DNA 尤其不可能通过 x 射线方法揭示其秘密。这些结果并不令人惊讶，因为 DNA 的确切序列预计会因单个分子而异。由此产生的表面结构的不规则性可以理解地阻止长而细的 DNA 链整齐地并排排列成 x 射线分析成功所需的规则重复模式。

因此，当听到来自伦敦国王学院生物物理实验室的 34 岁的英国人莫里斯·威尔金斯在最后一刻关于 DNA 的演讲时，大家既惊讶又高兴。威尔金斯是一位物理学家，在战争期间曾参与过曼哈顿计划。对他和其他许多参与其中的科学家来说，原子弹在广岛和长崎的实际投放，本应是他们所有工作的高潮，却让他们的幻想彻底破灭。

他曾考虑完全放弃科学，到巴黎去当画家，但生物学影响了他。他也读过薛定谔的书，现在正在用 x 射线衍射处理 DNA。

他展示了一张他最近获得的 x 射线衍射图的照片，它的许多精确反射表明了一个高度规则的晶体堆积。人们不得不得出结论，DNA 必须有一个规则的结构，对它的阐明很可能揭示基因的本质。我立刻想到自己要去伦敦帮威尔金斯寻找建筑。然而，在他演讲后，我试图与他交谈，却毫无结果。我所付出的努力换来的只是他的一份声明，他相信前方还有许多艰苦的工作要做。

当我接连陷入死胡同时，回到美国，世界上最杰出的化学家，加州理工学院的莱纳斯·鲍林宣布了一项重大胜利：他发现了氨基酸链（称为多肽）在蛋白质中折叠的确切排列，并将他的结构称为 α -螺旋（ α 螺旋）。鲍林取得这一突破并不令人意外：他是科学界的超级巨星。他的著作《化学键的性质》奠定了现代化学的基础，对当时的化学家来说，这本书就是《圣经》。鲍林是个早熟的孩子。在他九岁的时候，他的父亲——俄勒冈州的一名药剂师——写信给俄勒冈州的报

纸，请他给爱读书的儿子推荐一些读物，并补充说他已经读过《圣经》和达尔文的《物种起源》。但鲍林的父亲英年早逝，给家庭带来了经济上的崩溃，这使得这个前途无量的年轻人能够接受教育变得非同寻常。

我一回到哥本哈根就读到了鲍林的 α - 螺旋结构。令我惊讶的是，他的模型并不是基于实验 x 射线衍射数据的演绎飞跃。相反，鲍林作为结构化学家的长期经验使他有勇气推断出哪种类型的螺旋折叠最符合多肽链的潜在化学特征。鲍林制作了蛋白质分子不同部分的比例模型，在三维空间中制定出合理的方案。他把这个问题简化成了一种三维的拼图游戏，方法简单而聪明。

现在的问题是 α - 螺旋结构是否正确——除了美观之外。仅仅一周后，我就得到了答案。英国 x 射线晶体学的发明者、1915 年诺贝尔物理学奖得主劳伦斯·布拉格爵士 (Sir Lawrence Bragg) 来到哥本哈根，兴奋地报告说，他的年轻同事、奥地利出生的化学家马克斯·佩鲁茨 (Max Perutz) 巧妙地利用合成多肽证实了鲍林 α - 螺旋结构的正确性。对于布拉格的卡文迪什实验室来说，这是一个苦乐参半的胜利。一年前，他们在论文中概述了多肽链可能的螺旋折叠，完全错过了机会。

那时，萨尔瓦多·卢里亚已经初步安排我到卡文迪什去做研究。它位于剑桥大学，是所有科学领域最著名的实验室。欧内斯特·卢瑟福在这里首次描述了原子的结构。现在这是布拉格自己的领域了，我要给英国化学家约翰·肯德鲁当学徒，他对确定肌红蛋白的三维结构很感兴趣。卢里亚建议我尽快去参观卡文迪什。肯德鲁在美国的时候，麦克斯·佩鲁茨会调查我。肯德鲁和佩鲁茨早些时候一起成立了医学研究委员会 (MRC) 生物系统结构研究部门。

一个月后，在剑桥，佩鲁茨向我保证，我很快就能掌握必要的 x 射线衍射理论，而且在他们小小的 MRC 单元里，我应该不会有任何困难。令我欣慰的是，他并没有因为我的生物学背景而退缩。劳伦斯·布拉格 (Lawrence Bragg) 也没有，他短暂地从办公室下来打量了我一番。

10 月初，当我回到剑桥的 MRC 部门时，我 23 岁。我发现自己和一个 35 岁的前物理学家弗朗西斯·克里克共处一室，他在战争期间为海军部研究磁雷。战争结束后，克里克原计划继续从事军事研究，但在阅读薛定谔的《生命是什么？》在美国，他转向了生物学。现在他在卡文迪什实验室攻读蛋白质的三维结构博士学位。

克里克总是对复杂的重要问题着迷。他小时候没完没了的问题迫使他疲惫的父母给他买了一本儿童百科全书，希望能满足他的好奇心。但这只会让他没有安全感：他向母亲吐露了他的恐惧，担心等他长大了，一切都会被发现，让他无事可做。他的母亲安慰他说（事实的确如此），总有一两件事需要他去解决。

克里克是个健谈的人，在任何聚会上都是众人关注的焦点。他那洪亮的笑声永远回荡在卡文迪什饭店的走廊里。作为 MRC 部门的常驻理论家，他过去至少每个月都会提出一个新颖的见解，他会向任何愿意倾听的人详细解释他的最新想法。我们见面的那天早上，当他得知我来剑桥的目的是为了学习足够多的晶体学来研究 DNA 结构时，他高兴了起来。很快，我开始询问克里克对使用鲍林的模型构建方法直接构建结构的看法。在建模可行之前，我们是否还需要多年的衍射实验？为了让我们了解 DNA 结构研究的最新进展，克里克邀请战争结束后的朋友莫里斯·威尔金斯 (Maurice Wilkins) 从伦敦过来共进周日午餐。这样我们就可以知道威尔金斯自从那不勒斯谈话以来取得了什么进展。

威尔金斯表达了他的信念，认为 DNA 的结构是一个螺旋，是由几条相互缠绕

的核苷酸链形成的。剩下要解决的问题是锁链的数目。当时，威尔金斯根据他对 DNA 纤维的密度测量，选择了三种。他很想开始建立模型，但他遇到了一个障碍，那就是国王学院生物物理部门的新成员罗莎琳德·富兰克林。

31 岁的富兰克林是剑桥大学培养出来的物理化学家，她是一位痴迷的专业科学家；在她 29 岁生日那天，她所要求的只是订阅她所在领域的技术期刊《晶体学报》。她逻辑严谨，对那些不这样做的人很不耐烦。她有一次形容自己的博士论文导师、后来的诺贝尔奖得主罗纳德·诺里什（Ronald Norrish）“愚蠢、偏执、虚伪、无礼、专横”。在实验室之外，她是一位坚定而勇敢的登山运动员，来自伦敦社会的上层，与大多数科学家相比，她属于一个更高贵的社会圈子。在长凳上辛苦工作了一天之后，她偶尔会脱下白大褂，换上一件优雅的晚礼服，消失在夜色中。

富兰克林在巴黎对石墨进行了为期四年的 x 射线晶体学研究，刚从那里回来，威尔金斯离开国王学院时，富兰克林被分配到 DNA 项目。不幸的是，这一对很快就被证明是不相容的。直接且注重数据的富兰克林和退休且爱投机的威尔金斯注定永远不会合作。在威尔金斯接受我们的午餐邀请前不久，两人大吵了一架，富兰克林坚持说，在她收集到更广泛的衍射数据之前，不能开始建立模型。现在他们实际上没有沟通，威尔金斯没有机会了解她的进展，直到富兰克林在 11 月初举行她的实验室研讨会。如果我们想听，欢迎克里克和我作为威尔金斯的客人去。

克里克无法参加研讨会，所以我独自参加了，并向他简要介绍了我认为是关于晶体 DNA 的关键信息。特别是，我根据记忆描述了富兰克林对晶体重复和水含量的测量。这促使克里克开始在一张纸上画出螺旋网格，并解释说，他与比尔·科克伦和弗拉基米尔·万德共同设计的螺旋 x 射线新理论，甚至可以让我这样一个曾经的观鸟者，正确地预测出我们即将在卡文迪什实验室建立的分子模型所期望的衍射模式。

我们一回到剑桥，我就安排卡文迪什机械车间制造出 DNA 中磷酸糖骨架的短段所需的磷原子模型。一旦有了这些，我们就测试了不同的方式，这些骨干可能在 DNA 分子的中心相互缠绕。它们规则的重复原子结构应该允许原子以一致的、重复的构象聚集在一起。根据威尔金斯的直觉，我们专注于三链模型。当其中一种似乎是可信的时候，克里克给威尔金斯打了个电话，宣布我们有了一个模型，我们认为可能是 DNA。

第二天，威尔金斯和富兰克林都来看看我们做了什么。意想不到的竞争威胁使他们短暂地团结在一个共同的目标上。富兰克林毫不犹豫地对我们的基本概念提出了错误。我的记忆是，她报告说晶体 DNA 中几乎没有水。事实上，情况正好相反。作为一个晶体学的新手，我混淆了“单位细胞”和“不对称单元”这两个术语。水晶 DNA 实际上是富含水的。因此，富兰克林指出，如果只是为了容纳她在晶体中观察到的所有水分子，骨架就必须在外面，而不是像我们现在看到的那样，在中间。

11 月那不幸的一天投下了很长的阴影。富兰克林对模型制作的反对得到了加强。做实验，而不是玩弄原子的小叮当，是她想要进行的方式。更糟糕的是，劳伦斯·布拉格爵士传话说，克里克和我应该停止进一步尝试建立 DNA 模型。她还进一步规定，DNA 研究应该留给国王实验室，剑桥继续专注于蛋白质研究。两个 mrc 资助的实验室相互竞争是没有意义的。由于没有更多的好主意，克里克和我被迫不情愿地退让了，至少目前是这样。

这不是一个被判为 DNA 旁观者的好时机。莱纳斯·鲍林写信给威尔金斯，要求得到一份晶体 DNA 衍射图的副本。虽然威尔金斯拒绝了，说他需要更多的时间来解释，但鲍林几乎没有义务依赖国王学院的数据。如果他愿意，他可以很容易地在加州理工学院开始认真的 x 射线衍射研究。

第二年春天，我适时地放弃了对 DNA 的研究，开始利用卡文迪什实验室强大的新型 x 射线束，扩展战前对铅笔状烟草花叶病毒的研究。这种轻微的实验工作量让我有足够的时间在剑桥的各个图书馆里闲逛。在动物学大楼里，我读到了欧文·查格夫的论文，文中描述了他的发现，即 DNA 碱基腺嘌呤和胸腺嘧啶的数量大致相同，鸟嘌呤和胞嘧啶的数量也大致相同。听到这种一对一的比例，克里克想知道，在 DNA 复制过程中，腺嘌呤残基是否可能被胸腺嘧啶吸引，反之亦然，鸟嘌呤和胞嘧啶之间是否存在相应的吸引力。如果是这样，“亲本”链（如 ATGC）上的碱基序列必须与“子”链（在这种情况下产生 TACG）上的碱基序列互补。

直到 1952 年夏天，欧文·查格夫在前往巴黎参加国际生物化学大会的途中经过剑桥，这些想法才被人们所接受。查格夫对克里克和我都不认为有必要了解这四种碱基的化学结构表示不满。当我们告诉他我们可以根据需要在教科书中查找结构时，他更沮丧了。我只希望查格夫的数据被证明是无关紧要的。然而，克里克受到鼓舞，做了几个实验，寻找腺嘌呤和胸腺嘧啶（或者鸟嘌呤和胞嘧啶）在溶液中混合时可能形成的分子“三明治”。但他的实验没有成功。

和查加夫一样，莱纳斯·鲍林也参加了国际生化大会，会上的大新闻是噬菌体小组的最新成果。冷泉港的阿尔弗雷德·好时和玛莎·蔡斯刚刚证实了艾弗里的转化原理：DNA 是遗传物质！Hershey 和 Chase 证明只有噬菌体病毒的 DNA 才能进入细菌细胞；它的蛋白质外壳留在外面。比以往任何时候都更明显的是，如果我们要揭示基因的本质，就必须在分子水平上理解 DNA。随着好时和蔡斯的研究结果成为全城议论的焦点，我确信鲍林现在将把他令人敬畏的智慧和化学知识运用到 DNA 问题上。

1953 年初，鲍林确实发表了一篇论文，概述了 DNA 的结构。我焦急地读着，看到他提出了一个三链模型，磷酸糖骨架形成了一个密集的中心核心。从表面上看，这与我们 15 个月前的拙劣模式相似。但是鲍林并没有使用带正电的原子（例如 Mg^{2+} ）来稳定带负电的骨架，而是提出了一个非正统的建议，认为磷酸盐是由氢键结合在一起的。但在我这个生物学家看来，这种氢键需要在细胞中从未发现过的极端酸性条件。疯狂地冲向亚历山大·托德（Alexander Todd）附近的有机化学实验室，我的信念得到了证实：不可能的事情发生了。世界上最著名的化学家，如果不是最好的化学家，他的化学研究出了问题。实际上，鲍林已经把 DNA 中的 A 去掉了。我们的目标是脱氧核糖核酸，但他提出的结构甚至不是酸性的。

我赶紧把手稿带到伦敦，通知威尔金斯和富兰克林，他们还在玩这个游戏。富兰克林确信 DNA 不是螺旋结构，所以她甚至不愿阅读这篇文章，也不愿处理鲍林螺旋结构观点的干扰，即使我提出克里克关于螺旋结构的论点。然而，威尔金斯确实对我带来的消息很感兴趣。他现在比以往任何时候都更加确信 DNA 是螺旋状的。为了证明这一点，他给我看了一张六个多月前富兰克林的研究生雷蒙德·高斯林（Raymond Gosling）获得的照片，这张照片是用 x 光对所谓的 B 型 DNA 进行的。在那之前，我根本不知道有 B 表格存在。富兰克林把这张图放在一边，更愿意把注意力集中在 A 表格上，她认为这更有可能产生有用的数据。B 型的 x 线图像是一个明显的十字。因为克里克和其他人已经推断出这种反射模式是由螺旋

结构产生的，这个证据清楚地表明 DNA 必须是螺旋结构！事实上，尽管富兰克林有所保留，但这并不奇怪。几何学本身表明，螺旋结构是一长串重复单元（如 DNA 的核苷酸）最符合逻辑的排列方式。但我们仍然不知道螺旋是什么样子的，也不知道它包含了多少条链。

是时候重新建立 DNA 的螺旋模型了。鲍林很快就会意识到他的想法是错误的。我劝威尔金斯不要浪费时间。但他想等到富兰克林完成了她预定的那年春天晚些时候去另一个实验室的计划。为了避免在国王学院的不愉快，她决定离开。在离开之前，她被要求停止进一步的 DNA 研究，并且已经把她的许多衍射图像交给了威尔金斯。

当我回到剑桥，宣布 DNA B 型的消息时，布拉格不再认为克里克和我有任何理由回避 DNA。他非常希望能在大西洋彼岸找到这种 DNA 结构。于是我们回到模型构建，寻找一种已知的 DNA 基本成分——分子的主干和四种不同的碱基，腺嘌呤、胸腺嘧啶、鸟嘌呤和胞嘧啶——可以组合在一起形成螺旋结构的方法。我委托卡文迪什的商店为我们制作了一套锡底座，但他们生产的速度不够快，我只好从硬纸板上剪出大致的轮廓。

这时，我意识到 DNA 密度测量的证据实际上稍微倾向于双链模型，而不是三链模型。所以我决定寻找可行的双螺旋结构。作为一名生物学家，我更喜欢由两个而不是三个成分组成的基因分子的想法。毕竟，染色体和细胞一样，是通过复制而不是三倍复制来增加数量的。

我知道我们之前的模型，骨干在里面和基地悬挂是错误的。诺丁汉大学（University of Nottingham）的化学证据表明，这些碱基之间一定是氢键，而我一直忽视了这些证据。只有当它们位于分子中心时，它们才能像 x 射线衍射数据所暗示的那样以规则的方式形成键。但它们是如何成对出现的呢？我被核酸化学课本上的一个错误误导了两个星期，结果一无所获。令人高兴的是，在 2 月 27 日，来自加州理工学院的理论化学家杰里·多纳休（Jerry Donahue）在参观卡文迪什实验室时指出，教科书是错误的。所以我改变了分子纸板上氢原子的位置。

第二天早上，1953 年 2 月 28 日，DNA 模型的关键特征都到位了。这两条链通过腺嘌呤 - 胸腺嘧啶和鸟嘌呤 - 胞嘧啶碱基对之间的强氢键连接在一起。克里克一年前根据查格夫的研究得出的结论确实是正确的。腺嘌呤与胸腺嘧啶结合，鸟嘌呤与胞嘧啶结合，但不是通过平面形成分子三明治。克里克到达后，迅速接受了这一切，并对我的碱基配对计划表示赞同。他马上意识到，这将导致双螺旋的两条线向相反的方向运行。

这是一个相当大的时刻。我们确信就是这样了。任何简单、优雅的东西都必须是正确的。最让我们兴奋的是两条链上碱基序列的互补性。如果你知道一条链上的碱基序列，你就会自动知道另一条链上的碱基序列。很明显，当染色体在细胞分裂之前复制时，基因的遗传信息就是这样被精确复制的。分子会“解压缩”，形成两条独立的链。然后，每一条分离的链都可以作为合成新链的模板，一条双螺旋变成两条。

在《什么是生命？》中，薛定谔提出，生命的语言可能就像摩尔斯电码，由一系列的点和线组成。他离得不远。DNA 的语言是 a、t、g 和 c 的线性序列。就像抄写一页书可能会出现奇怪的拼写错误一样，当所有这些 a、t、g 和 c 沿着染色体复制时，罕见的错误也会悄悄出现。这些错误是遗传学家们讨论了近 50 年的突变。把“i”改成“a”，英语中的“Jim”就变成了“Jam”；把 T 变成 C，

DNA 中的 ATG 就变成了 ACG。

双螺旋结构在化学上和生物学上都有意义。现在没有必要担心薛定谔的建议，即可能需要新的物理定律来理解遗传密码是如何复制的：事实上，基因与化学的其他部分没有什么不同。那天晚些时候，在几乎毗邻卡文迪什实验室的酒吧 Eagle 吃午饭的时候，克里克忍不住告诉大家，我们刚刚发现了“生命的秘密”。我自己，虽然对这个想法同样感到兴奋，但还是会等到我们有了一个漂亮的三维模型来炫耀。

化学家亚历山大·托德是第一批看到我们示范模型的人之一。基因的性质如此简单，他既惊讶又高兴。然而，后来他一定问过自己，为什么他自己的实验室已经确定了 DNA 链的一般化学结构，却没有进一步研究 DNA 链是如何在三维空间中折叠的。相反，分子的本质是由一个生物学家和一个物理学家两个人组成的团队来发现的，这两个人甚至连本科化学都没有详细的知识。但矛盾的是，这至少在一定程度上是我们成功的关键：克里克和我首先发现了双螺旋结构，正是因为当时大多数化学家认为 DNA 分子太大，无法通过化学分析来理解。

与此同时，仅有的两位有远见的化学家在寻找 DNA 的三维结构时犯了重大的战术错误：罗莎琳德·富兰克林 (Rosalind Franklin) 拒绝建立模型；莱纳斯·鲍林的问题在于他忽略了阅读现有的 DNA 文献，尤其是查格夫发表的关于 DNA 碱基组成的数据。具有讽刺意味的是，鲍林和查格夫在 1952 年巴黎生物化学大会之后乘坐同一艘船横渡大西洋，但未能合不来。鲍林早就习惯了正确。他相信没有什么化学问题是他自己不能从第一性原理中解出来的。通常这种信心并不是错位的。冷战期间，作为美国核武器发展计划的著名批评者，他在发表演讲后受到了联邦调查局的质疑。他怎么知道原子弹里有多少钚？鲍林的回答是：“没人告诉我。我想明白了。”

在接下来的几个月里，克里克和我（在较小程度上）津津有味地向无数好奇的科学家展示我们的模型。然而，剑桥的生物化学家并没有邀请我们在生物化学大楼里做正式的演讲。他们开始称它为“WC”，这是我们的首字母与英国用于厕所或抽水马桶的双关语。我们没有做实验就发现了双螺旋结构，这让他们很恼火。

我们在四月初提交给《自然》杂志的手稿在三周后的 1953 年 4 月 25 日发表了。与此同时，还有富兰克林和威尔金斯的两篇较长的论文，都支持我们模型的总体正确性。今年 6 月，我在冷泉港病毒研讨会上首次展示了我们的模型。马克斯·德尔布里克 (Max delbrück) 确保在最后一刻邀请我发言。我带着一个在卡文迪什实验室里制作的三维模型去参加这次智力会议，腺嘌呤胸腺嘧啶碱基对是红色的，鸟嘌呤-胞嘧啶碱基对是绿色的。

观众中有西摩·本泽，他也是一位前物理学家，也曾听从薛定谔这本书的号召。他立刻明白了我们的突破对他的病毒突变研究意味着什么。他意识到，他现在可以对一小段噬菌体 DNA 做摩根的孩子们 40 年前对果蝇染色体所做的事情：他可以沿着基因绘制突变图——确定它们的顺序，就像果蝇先驱沿着染色体绘制基因一样。像 Morgan 一样，Benzer 必须依靠重组来产生新的基因组合，但是，Morgan 有重组机制的优势——在果蝇中产生性细胞——Benzer 必须通过同时用两种不同的噬菌体菌株感染单个细菌宿主细胞来诱导重组，这两种噬菌体菌株在感兴趣的区域有一个或多个突变。在细菌细胞内，不同的病毒 DNA 分子之间偶尔会发生重组，即分子片段的交换，从而产生新的突变排列，即所谓的“重组”。在普渡大学的实验室里，本泽仅用了一年的时间就取得了惊人的成果，他绘制了一个噬菌体基因 rII 的图谱，展示了一系列突变——基因脚本中的所有错误——

是如何沿着病毒 DNA 线性排列的。语言简单而线性，就像纸上的一行文字。

匈牙利物理学家利奥·西拉德（Leo Szilard）对我在冷泉港关于双螺旋结构的演讲的反应不那么学术化。他的问题是“你能申请专利吗？”西拉德的主要收入来源曾经是他与爱因斯坦共同拥有的一项专利，后来他曾试图与恩里科·费米（Enrico Fermi）一起申请 1942 年他们在芝加哥大学建造的核反应堆的专利，但没有成功。但当时和现在一样，专利只授予有用的发明，当时没有人能想到 DNA 的实际用途。西拉德建议，也许到那时，我们应该为它申请版权。

然而，在这个双螺旋拼图中仍有一个缺失的部分：我们关于 DNA 复制的解压缩想法尚未得到实验验证。例如，Max delbr 就不相信。虽然他喜欢双螺旋结构作为模型，但他担心拉开它可能会产生可怕的结。五年后，鲍林以前的学生马特·梅塞尔森（Matt Meselson）和同样聪明的年轻噬菌体工作者弗兰克·斯塔爾（Frank Stahl）发表了一项优雅的实验结果，消除了这种担忧。

他们于 1954 年夏天在马萨诸塞州伍兹霍尔的海洋生物实验室相识，当时我正在那里讲课。在喝了很多杜松子马提尼酒之后，他们一致认为应该聚在一起做一些科学研究。他们合作的结果被描述为“生物学中最美丽的实验”。

他们使用了一种离心技术，使他们能够根据重量的细微差异对分子进行分类；在离心旋转之后，较重的分子最终会比较轻的分子更接近试管的底部。由于氮原子（N）是 DNA 的一个组成部分，而且它们以两种不同的形式存在，一种是轻的，一种是重的，因此 Meselson 和 Stahl 能够标记 DNA 片段，从而跟踪其在细菌中的复制过程。最初，所有的细菌都是在含有重氮的培养基中培养的，因此，重氮被合并到 DNA 的两条链中。他们从这个培养液中取出样本，将其转移到只含有轻 N 的培养基中，以确保下一轮 DNA 复制必须利用轻 N。如果，正如克里克和我所预测的那样，DNA 复制包括打开双螺旋并复制每条链，那么实验中得到的两个“子”DNA 分子将是杂交的，每一个都由一条重 N 链（来自“母体”分子的模板链）和一条轻 N 链（来自新介质的新合成链）组成。Meselson 和 Stahl 的离心程序准确地证实了这些期望。他们在离心管中发现了三个离散的条带，重后轻的样本位于重后轻的样本和轻样本之间。DNA 复制就像我们的模型所设想的那样。

大约在同一时间，圣路易斯华盛顿大学亚瑟·科恩伯格的实验室正在分析 DNA 复制的生化细节。通过开发一种新的“无细胞”DNA 合成系统，科恩伯格发现了一种酶（DNA 聚合酶），它可以连接 DNA 成分，并形成 DNA 主干的化学键。科恩伯格的酶促 DNA 合成是一项意想不到的重大事件，因此在关键实验完成不到两年之后，他被授予 1959 年诺贝尔生理学或医学奖。在宣布获奖后，有人拍到科恩伯格拿着一张我 1953 年带到冷泉港的双螺旋模型的复制品。

直到 1962 年，弗朗西斯·克里克、莫里斯·威尔金斯和我才获得了我们自己的诺贝尔生理学或医学奖。四年前，罗莎琳德·富兰克林死于卵巢癌，年仅 37 岁。在此之前，克里克已经成为富兰克林的亲密同事和真正的朋友。两次手术都未能阻止她的癌症发展，富兰克林在剑桥与克里克和他的妻子奥迪尔一起康复。

诺贝尔委员会的一个长期规则是，永远不会把一个奖项分给三个以上的人。如果富兰克林还活着，就会出现一个问题，是把这个奖颁给她，还是颁给莫里斯·威尔金斯。瑞典人本可以通过授予他们当年的诺贝尔化学奖来解决这个难题。取而代之的是马克斯·佩鲁茨和约翰·肯德鲁，他们分别阐明了血红蛋白和肌红蛋白的三维结构。

双螺旋结构的发现敲响了生机论的丧钟。严肃的科学家，甚至是那些有宗教倾向的科学家，都意识到对生命的完全理解并不需要揭示新的自然规律。生命只是物理和化学的问题，尽管物理和化学组织得非常精细。眼前的任务是弄清楚 DNA 编码的生命脚本是如何工作的。细胞的分子机制是如何读取 DNA 分子的信息的？正如下一章将揭示的那样，阅读机制出乎意料的复杂性导致了对生命起源的深刻见解。

寂静的春天

——雷切尔·卡森

第六章

地球的绿色地幔

水、土壤和由植物构成的绿色地幔构成了支撑地球上动物生命的世界。尽管现代人很少记得这一事实，但如果没有植物，人类就无法生存。植物利用太阳的能量，制造人类赖以生存的基本食物。我们对植物的态度非常狭隘。如果我们看到一种植物有什么直接的用途，我们就培育它。如果出于某种原因，我们发现它的存在是不受欢迎的，或者仅仅是一件漠不关心的事情，我们可以立即谴责它，以致其毁灭。除了那些对人类或牲畜有毒，或排挤食用植物的各种植物外，许多注定要毁灭的植物，根据我们狭隘的观点，只是因为它们碰巧在错误的时间出现在错误的地方。还有许多植物被毁掉，仅仅是因为它们碰巧与那些不受欢迎的植物为伍。

地球上的植被是一个生命之网的一部分，在这个生命之网中，植物与地球、植物与其他植物、植物与动物之间有着密切而必不可少的关系。有时候，我们别无选择，只能干扰这些关系，但我们应该深思熟虑地这样做，充分意识到我们的所作所为可能会在遥远的时间和地点产生后果。但是，当今蓬勃发展的“除草剂”行业却没有这样的谦逊，在这个行业中，销售飙升和使用扩大标志着杀死植物的化学物质的生产。最悲惨的例子之一是我们对景观的轻率破坏，在西部的鼠尾草地带，一场大规模的运动正在摧毁鼠尾草，代之以草原。如果有一个企业需要用一种历史感和景观的意义来照亮，那就是这个。因为这里的自然景观雄辩地说明了创造它的各种力量的相互作用。它就像一本打开的书，展现在我们面前，我们可以从中了解到为什么这片土地是这样的，为什么我们应该保持它的完整。但那些书页还没有被读过。

圣贤的土地是西部高平原和高山低坡的土地，这片土地诞生于数百万年前落基山脉系统的巨大隆起。这是一个气候极端恶劣的地方：在漫长的冬天，暴风雪从山上刮下来，平原上积雪很深；在夏天，只有很少的降雨才能缓解炎热，干旱深深侵蚀着土壤，干燥的风从叶子和茎中偷走了水分。

随着地形的演变，一定有很长一段时间的试验和错误，植物试图殖民这片高风吹过的土地。一个接一个一定失败了。最后有一类植物进化了，它们结合了生存所需的所有品质。鼠尾草——低矮的灌木——可以在山坡上和平原上站稳脚跟，在它灰色的小叶子里，它可以保持足够的水分，抵抗偷窃的风。这不是偶然，而是大自然长期试验的结果，西部的大平原成为了鼠尾草的土地。

和植物一样，动物也在进化，以适应陆地上的寻找需求。随着时间的推移，有两个像鼠尾草一样完全适应了他们的栖息地。一个是哺乳动物，敏捷而优雅的叉角羚。另一种是一种鸟，艾草松鸡——刘易斯和克拉克的“平原上的公鸡”。

鼠尾草和松鸡似乎是天生一对。这种鸟最初的活动范围与鼠尾草的活动范围一致，随着鼠尾草的减少，松鸡的数量也随之减少。对这些平原上的鸟来说，智

者就是一切。山麓上低矮的鼠尾草庇护着它们的巢和幼崽；生长密度较高的是游憩和栖息区域；鼠尾草在任何时候都是松鸡的主食。然而，这是一种双向关系。雄鸡壮观的求偶表演有助于松动鼠尾草下面和周围的土壤，帮助生长在山艾树庇护下的草入侵。

羚羊也适应了鼠尾草的生活。它们主要是平原上的动物，在冬天，当第一场雪来临时，那些在山上度过夏天的动物会转移到低海拔地区。在那里，鼠尾草为它们提供过冬的食物。当其他植物都落叶的时候，鼠尾草依然是常绿的，它的灰绿色的叶子——苦涩而芬芳，富含蛋白质、脂肪和所需的矿物质——紧紧地附着在茂密的灌木状植物的茎上。虽然雪堆积如山，但鼠尾草的顶部仍然暴露在外面，或者可以被羚羊锋利的爪子够到。然后松鸡也以它们为食，它们会在光秃秃的、被风吹过的岩架上找到它们，或者跟着羚羊去抓雪的地方觅食。

另一种生命向智者张望。骡鹿经常以它为食。鼠尾草可能意味着冬季放牧牲畜的生存。羊在许多冬季的牧场上吃草，那里的大山艾树几乎是纯林。在半年的时间里，它是他们的主要饲料，这种植物的能量价值甚至比苜蓿干草还要高。

苦涩的高原平原，紫色的鼠尾草，野生的，敏捷的羚羊和松鸡是一个完美平衡的自然系统。是谁？这个动词必须改变——至少在那些已经广袤的、不断增长的地区是这样，在这些地区，人类正试图按照自然的方式进行改良。在进步的名义下，土地管理机构已经着手满足牧场主对更多牧场的永不满足的需求。他们指的是没有鼠尾草的草地。因此，在一片自然发现适合与鼠尾草混合生长并在其庇护下生长的土地上，现在有人提议消灭鼠尾草，创造完整的草原。似乎很少有人问，在这个地区，草原是否是一个稳定和理想的目标。当然，大自然的答案并非如此。在这片很少下雨的土地上，年降水量不足以支持良好的成草；它更喜欢生长在鼠尾草遮蔽处的多年生束草。

然而，消灭鼠尾草的计划已经进行了好几年。几个政府机构积极参与其中；工业界热情地联合起来，促进和鼓励一个企业，这个企业不仅为草籽而且为各种各样的割、耕和播种机器创造了扩大的市场。最新增加的武器是化学喷雾剂。现在，每年都有数百万英亩的山艾灌木地被喷洒农药。

结果如何？消除鼠尾草和用草播种的最终效果在很大程度上是推测的。对这片土地有长期经验的人说，在这个国家，一旦保持水分的鼠尾草消失，在鼠尾草之间和下面生长的草可能比在纯净的林分上生长的草更好。

但是，即使该计划成功地实现了它的直接目标，很明显，整个紧密结合的生命结构已经被撕裂了。羚羊和松鸡将随着鼠尾草一起消失。鹿也会遭殃，这片土地也会因为野生动物的灭绝而变得贫瘠。即使是预期受益者的牲畜也会受苦；由于平原上缺乏鼠尾草、苦艾草和其他野生植物，夏天再多茂盛的绿草也无法帮助冬天暴风雨中挨饿的羊。

这些是最初的和明显的影响。第二种是一种总是与猎枪式的自然方法联系在一起的方法：喷洒也消灭了许多不是它预期目标的植物。大法官威廉·道格拉斯在他的新书《我的荒野：东至卡塔丁》中讲述了美国林务局在怀俄明州布里杰国家森林造成生态破坏的骇人听闻的例子。迫于牧场主要求更多草地的压力，管理局喷洒了大约1万英亩的sagelands。鼠尾草被杀死了，正如预期的那样。但是，沿着曲曲折折的小溪，在平原上蜿蜒而过的翠绿的、赋予生命的柳树带也是如此。驼鹿曾经生活在这些柳树丛中，因为柳树之于驼鹿就像鼠尾草之于羚羊。海狸也住在那里，以柳树为食，把它们砍倒，在小溪上筑起一座坚固的水坝。通过海狸的劳动，一个湖变瘪了。山间溪流里的鲑鱼很少超过六英寸长；在湖里，它们长

得非常茂盛，许多长到五磅重。水鸟也被吸引到湖边。仅仅因为柳树和以柳树为食的海狸的存在，这个地区就成为了一个有吸引力的休闲区，有很好的钓鱼和狩猎活动。

但是，随着林务局的“改进”，柳树走上了山艾树的道路，被同样公正的喷雾杀死了。1959年，也就是喷洒杀虫剂的那一年，道格拉斯法官访问了该地区，他震惊地看到枯萎和垂死的柳树——“巨大的、令人难以置信的破坏”。驼鹿会变成什么样子？海狸和它们建造的小世界？一年后，他回到被摧毁的土地上寻找答案。驼鹿不见了，海狸也不见了。他们的主要水坝由于缺乏熟练的建筑师的注意而坍塌了，湖也干涸了。大鳟鱼一条也没有留下。没有人能生活在剩下的小溪里，它穿过一片光秃秃的、炎热的土地，没有树荫。活生生的世界被粉碎了。

除了每年喷洒农药的400多万英亩牧场外，还有大量其他类型的土地也有可能或实际使用化学药剂来控制杂草。例如，有一块面积比整个新英格兰还要大的地区——大约5000万英亩——由公用事业公司管理，其中大部分被例行地处理为“灌木控制”。在美国西南部，估计有7500万英亩的豆科植物地需要通过某种方式进行管理，而化学喷洒是最积极推广的方法。一大片不为人知但面积很大的木材生产地正在进行空中喷洒，以“清除”更耐喷洒的针叶树中的硬木。在1949年之后的十年里，用除草剂处理农业用地的面积翻了一番，1959年达到5300万英亩。而现在正在处理的私人草坪、公园和高尔夫球场的总面积肯定达到了一个天文数字。

化学除草剂是一个崭新的玩具。它们以惊人的方式工作；它们给那些使用它们的人一种凌驾于自然之上的眩晕感，至于长期的和不太明显的影响——这些很容易被视作悲观主义者毫无根据的想象而置之不理。在一个被敦促把犁头打成喷枪的世界里，“农业工程师”兴高采烈地谈论着“化学耕作”。上千个社区的镇长们愿意倾听化学品推销员和热心的承包商的意见，他们愿意有偿清除路边的“灌木”。割草比割草便宜，这是人们的呼声。所以，也许，它出现在官方书籍中整齐的数字中；但是，如果把真正的成本，不仅以美元计算，而且以我们即将考虑的许多同样有效的借方计算，则化学品的大规模投放在美元上的成本会更高，而且会对景观的长期健康和依赖于它的各种利益造成无限的损害。

例如，被全国各地的商会所珍视的商品——度假游客的善意。化学喷药毁坏了曾经美丽的路边，取而代之的是一片片枯萎的褐色植被，取而代之的是蕨类植物、野花、点缀着花朵或浆果的原生灌木的美丽，对此，愤怒的抗议呼声日益高涨。一位新英格兰的妇女愤怒地在她的报纸上写道：“我们在我们的道路两旁制造了一个肮脏的、棕色的、垂死的烂摊子。”“这不是游客们所期望的，我们花了那么多钱宣传美丽的风景。”

1960年夏天，来自许多州的自然资源保护主义者聚集在缅因州一个宁静的岛上，见证了它的主人米利森特·托德·宾厄姆向国家奥杜邦协会（National Audubon Society）的展示。那一天的重点是保护自然景观和错综复杂的生命之网，这些生命之网是由微生物和人类相互交织而成的。但是，在岛上游客们所有谈话的背后，都隐藏着对他们所走过的道路遭到掠夺的愤慨。曾经，沿着这些道路穿过常绿的森林是一种乐趣，道路两旁种满了杨梅、甜蕨、桤木和越橘。现在一切都变成了褐色的荒凉。其中一位自然资源保护主义者写到八月去缅因州的一个岛屿朝圣：“我回来了……对缅因州路边的衰败感到愤怒。在过去的几年里，高速公路两旁是野花和迷人的灌木，现在只有一英里又一英里死植被的伤痕……作为一项经济提案，缅因州能承受因这些景点而失去游客的好感吗？”

缅因州的路边只是一个例子，尽管对于我们这些深爱该州美景的人来说，这是一个特别令人悲伤的例子，因为在全国范围内，以控制路边灌木丛的名义进行的毫无意义的破坏正在发生。

康涅狄格植物园的植物学家宣称，美丽的本土灌木和野花的灭绝已经达到了“路边危机”的程度，杜鹃花、山月桂、蓝莓、越橘、刺耳草、山茱萸、杨梅、甜蕨、矮灌木、冬莓、樱桃和野李子，在化学物质的猛烈攻击之前就已经死亡。雏菊、黑眼苏珊花、安妮女王的花边、金菊和秋紫苑也是如此，它们为风景增添了优雅和美丽。

喷洒不仅计划不当，而且充斥着诸如此类的滥用行为。在新英格兰南部的一个小镇，一位承包商完成了他的工作，他的水箱里还残留着一些化学物质。他沿着没有被授权喷洒的林地路边排放了这个。结果，这个社区失去了秋天道路上蓝色和金色的美丽，在那里，紫苑和菊花会成为值得长途跋涉去看的表演。在另一个新英格兰社区，一个承包商在公路部门不知情的情况下修改了州对城镇喷洒的规范，将路边植被喷洒到8英尺高，而不是规定的最高4英尺高，留下了一大片毁容的棕色地带。在马萨诸塞州的一个社区，镇上的官员从一个热心的化学推销员那里购买了一种除草剂，却不知道它含有砷。随后的路边喷洒的一个结果是十几头牛死于砷中毒。

1957年，当沃特福德镇向路边喷洒化学除草剂时，康涅狄格植物园自然区域内的树木受到了严重伤害。即使是没有直接喷洒的大树也受到了影响。橡树的叶子开始卷曲，变成褐色，尽管这是春天生长的季节。然后，新芽开始长出来，生长得异常迅速，给树木带来了哭泣的外观。两个季节过后，这些树上的大树枝都枯死了，其他的也没有叶子了，整棵树的变形和流泪的效果仍然存在。

我很清楚地知道有一段路，在那里，大自然自己的造景为它提供了一条边沿，长着桤木、豆荚、甜蕨类植物和杜松，它们随着季节的变化而变换着鲜艳的花朵，或者在秋天挂着一串串珠宝般的果实。这条路没有沉重的车辆需要支撑；很少有尖锐的弯道或十字路口，在那里，刷子会挡住司机的视线。但是，喷雾器占据了一切，这条路上的几英里变成了一种需要快速穿越的东西，一种需要忍受的景象，一种我们让我们的技术人员创造的贫瘠而丑陋的世界的思想。但是在某些地方，权威不知怎么地动摇了，由于一种无法解释的疏忽，在严格的控制之下，出现了一些美丽的绿洲——这些绿洲使大部分道路的衰败变得更加难以忍受。在这样的地方，我的精神得以升华，看到白三叶草的飘动，或紫紫薇的云彩，到处都有燃烧着的木百合的花杯。

只有那些以销售和使用化学品为业的人才把这些植物称为“杂草”。在一个现在已成为常规机构的杂草控制会议的论文集中，我曾经读到一篇关于杂草杀手哲学的非凡陈述。作者为杀死好植物辩护，“仅仅因为它们和坏植物在一起”。他说，那些抱怨杀死路边野花的人让他想起了反活体解剖主义者，“如果从他们的行为来判断，对他们来说，流浪狗的生命比孩子的生命更神圣”。

对于这篇文章的作者来说，我们中的许多人无疑会怀疑，因为我们宁愿看到紫薇、三叶草和木百合娇嫩而短暂的美丽，而不愿看到被大火烧焦的路边，灌木枯黄而脆弱，曾经高高举起其引以为傲的花边的蕨类植物现在枯萎而下垂。如果我们能容忍这种“杂草”的出现，我们会显得软弱得可悲，如果我们不为它们的根除而欢欣鼓舞，如果我们不为人类再次战胜邪恶的大自然而欢欣鼓舞。

道格拉斯法官讲述了他参加的一次联邦外勤人员会议，会议上讨论了市民抗议喷洒山艾树的计划，我在本章前面提到过。这些人认为一个老太太反对这个计

划是非常滑稽的，因为这会破坏野花。然而，难道她找一只带条纹的杯子或一只虎百合花的权利不就像畜牧工人找草或伐木工人认领一棵树的权利一样不可剥夺吗？这位仁慈而敏锐的法学家问道。“荒野的审美价值是我们的遗产，就像我们山上的铜脉和金矿以及我们山上的森林一样。”

当然，保护路边植被的愿望比这些美学考虑更重要。在自然经济中，自然植被具有其不可缺少的地位。沿着乡村道路和边地的树篱为鸟类和许多小动物提供食物、掩护和筑巢的地方。仅在东部各州，就有大约 70 种典型的路边灌木和藤蔓植物，其中约 65 种是野生动物的重要食物。

这些植被也是野生蜜蜂和其他授粉昆虫的栖息地。人类比通常意识到的更依赖这些野生传粉者。甚至连农民自己也很少了解野蜂的价值，而且常常参与剥夺他们服务的措施。一些农作物和许多野生植物部分或全部依赖于本地传粉昆虫的服务。几百种野生蜜蜂参与农作物的授粉工作，其中仅紫花苜蓿就有 100 种。如果没有昆虫授粉，大部分未开垦地区的保土和富土植物将会灭绝，对整个地区的生态产生深远的影响。森林和山地的许多草本植物、灌木和树木依靠本地昆虫繁殖；没有这些植物，许多野生动物和牧场家畜就找不到什么食物。现在，清洁的耕作和对树篱和杂草的化学破坏正在消灭这些授粉昆虫的最后庇护所，并打破了将生命联系在一起的纽带。

正如我们所知，这些昆虫对我们的农业和我们的景观如此重要，我们应该做些更好的事情，而不是毫无意义地破坏它们的栖息地。蜜蜂和野生蜜蜂严重依赖诸如菊科植物、芥菜和蒲公英之类的“杂草”来获取花粉，作为它们幼仔的食物。紫薇在紫花苜蓿开花之前为蜜蜂提供必要的春季饲料，在这个早期季节为它们提供潮汐，以便它们准备好为紫花苜蓿授粉。在秋天，当没有其他食物可用时，它们依靠黄花为冬天储备食物。由于大自然自己精确而微妙的时间安排，一种野生蜜蜂恰好在柳树开放的那一天出现。懂得这些事情的人并不缺乏，但这些人并不是那些下令用化学药品大规模浇灌大地的人。

那些被认为懂得适当栖息地对保护野生动物的价值的人又在哪里呢？他们中有太多的人认为除草剂对野生动物是“无害的”，因为他们认为除草剂的毒性比杀虫剂小。因此，据说没有造成伤害。但是，随着除草剂如雨点般落在森林、田野、沼泽和牧场上，它们正在带来明显的变化，甚至是对野生动物栖息地的永久性破坏。从长远来看，破坏野生动物的家园和食物可能比直接杀戮更糟糕。

这种对路边和公用事业通行权的全面化学攻击具有双重讽刺意味。它正在使它试图纠正的问题永久化，因为经验清楚地表明，地毯式地喷洒除草剂并不能永久地控制路边的“灌木丛”，而且必须年复一年地重复喷洒。更具有讽刺意味的是，尽管我们已经知道了一种非常合理的选择性喷洒方法，这种方法可以实现对大多数植被的长期控制，并且可以消除重复喷洒，但我们仍然坚持这样做。控制道路和通行权沿线的灌木丛的目的不是清除土地上除了草以外的一切；更确切地说，这是为了消除最终高到足以阻碍司机视野或干扰道路上电线的植物。这通常指的是树。大多数灌木足够低，不会造成危险；当然，蕨类植物和野花也是如此。

选择性喷洒是弗兰克·埃格勒博士在美国自然历史博物馆担任道路通行权控制建议委员会主任期间发明的。它利用了自然固有的稳定性，建立在大多数灌木群落对树木入侵有很强抵抗力的事实之上。相比之下，草地容易被树苗入侵。选择性喷洒的目的不是在路边和路权上长草，而是通过直接喷洒消除高大的木本植物，并保护所有其他植被。一种治疗可能就足够了，对极具耐药性的物种可能还需要后续治疗；此后，灌木开始控制，树木不再生长。对植物最好和最便宜的控

制不是化学物质，而是其他植物。

这种方法已经在散布在美国东部的研究地区进行了测试。结果表明，一旦处理得当，一个区域就会变得稳定，至少 20 年内不需要重新喷洒。喷洒通常可以由徒步的人完成，他们使用背负式喷雾器，并完全控制他们的材料。有时压缩机泵和物料可以安装在卡车底盘上，但没有毯式喷涂。处理只针对树木和任何必须清除的异常高的灌木。因此，环境的完整性得以保存，野生动物栖息地的巨大价值得以保留，灌木、蕨类植物和野花的美丽也没有被牺牲。

到处都采用了选择性喷洒的植被管理方法。在大多数情况下，根深蒂固的习俗很难消失，地毯式喷洒继续盛行，从纳税人那里榨取沉重的年度成本，并对生命的生态网络造成破坏。当然，它的繁荣只是因为事实不为人所知。当纳税人明白为城镇道路喷洒杀虫剂的账单应该一代人支付一次而不是一年一次时，他们肯定会起来要求改变方法。

选择性喷洒的诸多优点之一是它可以最大限度地减少施用于景观的化学物质的量。没有传播材料，而是集中应用到树的底部。因此，对野生动物的潜在危害被控制在最低限度。

最广泛使用的除草剂是 2, 4 - D, 2, 4, 5 - T 及其相关化合物。这些物质是否真的有毒是一个有争议的问题。在草坪上喷洒 2, 4 - D 并被喷雾弄湿的人偶尔会患上严重的神经炎，甚至瘫痪。尽管此类事件显然不常见，但医学权威人士建议谨慎使用此类化合物。使用 2, 4 - D 也可能有其他更不为人知的危害。实验表明，它会干扰细胞中呼吸的基本生理过程，并模仿 x 射线破坏染色体。最近的一些研究表明，这些除草剂和某些其他除草剂可能对鸟类的繁殖产生不利影响，其程度远低于导致死亡的除草剂。

除了任何直接的毒性作用外，使用某些除草剂后还会产生奇怪的间接结果。人们已经发现，动物，无论是野生食草动物还是牲畜，有时都会奇怪地被喷洒过的植物吸引，尽管这种植物不是它们的天然食物之一。如果使用了剧毒的除草剂，如砷，这种对枯萎植被的强烈渴望不可避免地会带来灾难性的后果。如果植物本身有毒，或者长有刺，那么毒性较低的除草剂也可能导致致命的后果。例如，有毒的野杂草在喷洒后突然变得对牲畜有吸引力，动物们因为放纵这种不自然的食欲而死亡。兽医学文献中有很多类似的例子：猪吃了喷过杀虫剂的鸟耳草，导致了严重的疾病，羊羔吃了喷过杀虫剂的蓟，蜜蜂因为吃了开花后喷过杀虫剂的芥末而中毒。野樱桃的叶子是剧毒的，一旦它的叶子被喷上 2, 4 - D，就会对牛产生致命的吸引力。显然，喷洒（或切割）后的枯萎使植物更有吸引力。Ragwort 提供了其他例子。牲畜通常避免这种植物，除非在冬末和早春由于缺乏其他饲料而被迫转向它。然而，在它的叶子被喷上 2, 4 - D 后，动物们急切地以它为食。

对这种奇特行为的解释有时似乎在于这种化学物质给植物本身的新陈代谢带来的变化。糖的含量暂时显著增加，使这种植物对许多动物更有吸引力。

2, 4 - D 还有一个奇特的作用，它对牲畜、野生动物，显然对人类也有重要影响。大约十年前进行的实验表明，用这种化学物质处理后，玉米和甜菜的硝酸盐含量急剧增加。在高粱、向日葵、蜘蛛草、羊角草、藜草和荨麻中也有同样的效果。其中一些通常被牛忽略，但在用 2, 4 - D 处理后，它们会津津有味地吃下去。据一些农业专家说，许多牛的死亡被追溯到喷洒的杂草。危险在于硝酸盐含量的增加，因为反刍动物的特殊生理机能立即造成了一个严重的问题。大多数这类动物的消化系统异常复杂，包括分为四个腔室的胃。纤维素的消化是通过微生物（瘤胃细菌）在其中一个腔室中的作用来完成的。当动物以硝酸盐含量异常高

的植物为食时，瘤胃内的微生物对硝酸盐起作用，将其转化为剧毒的亚硝酸盐。此后，一连串致命的事件接踵而至：亚硝酸盐作用于血液色素，形成一种巧克力棕色的物质，其中的氧气被牢牢地锁住，不能参与呼吸，因此氧气不能从肺部转移到组织中。由于缺氧或缺氧，几小时内就会死亡。因此，关于用 2, 4-D 处理过的某些杂草放牧后牲畜损失的各种报告有一个合乎逻辑的解释。同样的危险也存在于反刍动物中的野生动物，如鹿、羚羊、绵羊和山羊。

尽管各种因素（如异常干燥的天气）会导致硝酸盐含量增加，但 2, 4-D 的销售和应用激增的影响不容忽视。威斯康星大学农业实验站认为这种情况非常重要，因此在 1957 年发出警告：“被 2, 4-D 杀死的植物可能含有大量硝酸盐。”这种危害不仅蔓延到动物身上，也蔓延到人类身上，这可能有助于解释最近“筒仓死亡”的神秘增加。当含有大量硝酸盐的玉米、燕麦或高粱被青贮时，它们会释放出有毒的氮氧化物气体，对进入筒仓的任何人造成致命的危险。只要呼吸几次这些气体中的一种就能引起弥漫性化学性肺炎。在明尼苏达大学医学院研究的一系列此类案例中，除一例外，其余病例均以死亡告终。

“我们又一次在大自然中行走，就像一只大象在瓷器柜里一样。”因此，荷兰科学家 C. J. briej 总结了对除草剂的使用。“在我看来，太多的事情被认为是理所当然的。我们不知道作物中是否所有的杂草都是有害的，还是其中一些是有益的。”briiej 博士说。

很少有人问这样的问题：杂草和土壤之间有什么关系？也许，即使从我们狭隘的直接利己主义观点来看，这种关系也是有用的。正如我们所看到的，土壤及其上的生物存在于一种相互依存和互利的关系中。大概是杂草从土壤中吸取了一些东西；也许它也对它有所贡献。荷兰某城市的公园最近提供了一个实际的例子。玫瑰长得不好。土壤样本显示，微小的线虫严重侵扰。荷兰植物保护局的科学家不建议使用化学喷雾或土壤处理；相反，他们建议在玫瑰中间种植金盏花。这种植物无疑会被纯粹主义者视为玫瑰花圃中的杂草，它从根部释放出一种排泄物，杀死土壤中的线虫。这个建议被采纳了；一些床上种了金盏花，一些没有作为对照。结果是惊人的。在金盏花的帮助下，玫瑰繁盛；在对照床上，他们体弱多病，无精打采。金盏花现在在许多地方被用来对抗线虫。

以同样的方式，也许我们完全不知道，其他被我们无情地铲除的植物可能对土壤的健康起着必要的作用。天然植物群落的一个非常有用的功能——现在被普遍称为“杂草”——是作为土壤状况的指示器。当然，在使用化学除草剂的地方，这种有用的功能就失去了。

那些在喷洒中找到所有问题的答案的人也忽视了一个具有重要科学意义的问题——保护一些自然植物群落的必要性。我们需要这些作为衡量我们自己的活动所带来的变化的标准。我们需要它们作为维持昆虫和其他生物原始种群的野生栖息地，因为，正如将在第 16 章中解释的那样，对杀虫剂的抗性的发展正在改变昆虫，也许还有其他生物的遗传因素。一位科学家甚至建议，应该建立某种“动物园”来保护昆虫、螨虫等，以免它们的基因组成进一步改变。

一些专家警告说，越来越多地使用除草剂会导致细微但影响深远的植被变化。化学物质 2, 4-D 通过杀死阔叶植物，使草类在竞争减少的情况下茁壮成长——现在一些草类本身已经变成了“杂草”，提出了一个新的控制问题，并使循环发生了另一个转变。最近一期专门研究作物问题的杂志承认了这种奇怪的情况：“随着 2, 4-D 的广泛使用来控制阔叶杂草，特别是禾草杂草日益成为玉米和大豆产量的威胁。”

豚草是花粉热患者的祸根，它提供了一个有趣的例子，说明控制自然的努力有时会适得其反。成千上万加仑的化学物质以控制豚草的名义被排放到路边。但不幸的事实是，地毯式喷洒导致豚草增多，而不是减少。豚草是一年生植物；它的幼苗每年都需要开阔的土壤才能生长。因此，我们对这种植物最好的保护是保持浓密的灌木、蕨类植物和其他多年生植被。频繁的喷洒会破坏这些保护性的植被，造成空旷贫瘠的区域，豚草很快就会填满。此外，大气花粉含量可能与路边豚草无关，而与城市地块和休耕地的豚草有关。

化学灭草剂的热销是另一个例子，说明不合理的方法是多么容易流行起来。比起年复一年地用化学药品将其消灭，有一种更便宜、更好的方法来清除杂草。这是给了它一种它无法生存的竞争，其他草的竞争。杂草只存在于不健康的草坪上。它是一种症状，而不是疾病本身。通过提供肥沃的土壤，并给所需的草一个良好的开端，就有可能创造一个杂草无法生长的环境，因为它需要开阔的空间，才能年复一年地从种子开始生长。

郊区居民不去治疗这种基本疾病，而是在苗圃工人的建议下，每年继续在草坪上施用数量惊人的除草剂，而苗圃工人又被化学品制造商建议。在市场上销售的这些制剂中，有许多都含有汞、砷和氯丹等有毒物质，但商品名称却没有透露其性质。按推荐的用量施用会在草坪上留下大量的化学物质。例如，一种产品的使用者在遵照说明的情况下，每英亩要使用 60 磅的技术氯丹。如果他们使用另一种可用的产品，他们就会在一英亩土地上施用 175 磅的金属砷。正如我们将在第 8 章看到的那样，死鸟的死亡人数令人痛心。这些草坪对人类有多致命还不得而知。

选择性喷洒路边和路权植被的成功实践，为农场、森林和牧场的其他植被规划开发出同样合理的生态方法带来了希望——这些方法的目的是消灭特定的物种，而是把植被作为一个有生命的群落来管理。

其他坚实的成就表明我们可以做些什么。生物防治在抑制有害植被方面取得了一些最引人注目的成功。现在困扰我们的许多问题，大自然自己也遇到过，而且通常以她自己成功的方式加以解决。凡是人类有足够的智慧去观察和模仿自然的地方，他也常常得到成功的奖赏。

在控制有害植物的领域，一个突出的例子是处理加利福尼亚的克拉马斯杂草问题。虽然克拉马斯草或山羊草是欧洲的原生植物（在那里它被称为圣约翰草），但它伴随着人类向西迁徙，于 1793 年首次出现在美国宾夕法尼亚州的兰开斯特附近。到 1900 年，它已经到达加利福尼亚的克拉马斯河附近，因此当地给它起了这个名字。到 1929 年，它已经占据了大约 10 万英亩的牧场，到 1952 年，它已经侵占了大约 250 万英亩的牧场。

与山艾树等本土植物不同，克拉茅在该地区的生态环境中没有立足之地，也没有动物或其他植物需要它的存在。相反，无论它出现在哪里，牲畜都因为吃了这种有毒的植物而变得“结痂、口酸、不节俭”。土地价值相应下降，因为克拉马斯杂草被认为持有第一抵押。

在欧洲，克拉马斯杂草，或圣约翰草，从来没有成为一个问题，因为随着这种植物的生长，那里已经发展出各种各样的昆虫；它们以它为食的范围如此之广，以至于它的丰度受到严重限制。特别是法国南部的两种甲虫，豌豆大小，金属色，它们的整个身体都适应了杂草的存在，它们只以杂草为食并繁殖。

1944 年，第一批甲虫被运到美国，这是一个具有历史意义的事件，因为这是北美第一次尝试用一种以植物为食的昆虫来控制一种植物。到 1948 年，这两

个物种已经很好地建立起来，不需要进一步的输入。它们的传播是通过从原始栖息地收集甲虫，并以每年数百万只的速度重新分配它们来完成的。在小范围内，甲虫完成了自己的分散，一旦克拉马斯杂草灭绝，它们就会继续移动，并非常精确地找到新的栖息地。当甲虫把杂草变细时，那些被排挤出去的理想范围的植物就能够重新生长。

1959 年完成的一项为期十年的调查显示，对克拉马斯杂草的控制“比狂热者所希望的更有效”，杂草的数量减少到以前的 1%。这种象征性的侵扰是无害的，实际上是为了维持甲虫的数量，以防止未来杂草的增加。

另一个非常成功和经济的控制杂草的例子可以在澳大利亚找到。由于殖民者通常喜欢把植物或动物带到一个新的国家，阿瑟·菲利普船长在 1787 年左右把各种仙人掌带到了澳大利亚，打算用它们来培育胭脂虫作为染料。一些仙人掌和多刺梨从他的花园里逃了出来，到 1925 年，大约有 20 种仙人掌和多刺梨在野外生长。由于在这片新领土上没有自然的控制，它们迅速蔓延，最终占据了大约 6000 万英亩的土地。至少有一半的土地被密集的植被覆盖而变得毫无用处。

1920 年，澳大利亚昆虫学家被派往北美和南美研究刺梨原生栖息地的天敌昆虫。1930 年，在对几个物种进行试验后，一只阿根廷蛾的 30 亿个卵在澳大利亚被释放。七年后，最后一片密密麻麻的刺梨被摧毁了，曾经无法居住的地区重新开放，开始定居和放牧。整个操作每英亩花费不到一便士。相比之下，早些年的化学防治尝试并不令人满意，每英亩的成本约为 10 英镑。

这两个例子都表明，通过更加重视食植物昆虫的作用，可以非常有效地控制许多不需要的植被。范围管理的科学在很大程度上忽略了这种可能性，尽管这些昆虫可能是所有食草动物中最挑剔的，它们高度限制的饮食很容易变成人类的优势。

第三部分

我们对人类认识的理解

现在我们反思一下自己的理解。科学家用他们的思维，运用推理的能力来研究物质宇宙和生命世界。但是人脑是如何运作的呢？人类的思想是什么？我们有灵魂吗？推理有什么局限？许多科学家已经解决了这些问题。其中两个是亨利·庞加莱和埃里克·坎德尔。

在《科学与方法》的节选（文本 7）中，庞加莱分享了他对美的看法。他还回顾了自己的数学发现经历，发现了数学思想形成的可能机制。庞加莱对科学发现心理学的研究是科学家们了解人类思维的早期尝试，而坎德尔的《寻找记忆》则是对这一学科现状的简明描述。在这本书的节选（文本 8）中，诺贝尔生理学或医学奖得主提出了人类心灵研究的两个中心问题，一个是容易的问题，即意识的统一性，另一个是困难的问题，即意识的主体性。

人们普遍认为现代科学起源于西欧。然而，在很长一段时间里，中国发现了最先进的技术。那么，现代科学为什么没有在中国出现呢？中国文化能对现代科学做出贡献吗？这些都是非常大的问题，吸引了伟大的头脑。李约瑟就是其中之一。李约瑟在《中国较短的科学和文明》一书中谈到中国人是如何用五行、阴阳和联想思维来认识世界的。

对于近代科学为什么在西方而不是中国出现的问题，李约瑟从社会经济的角度出发，认为主要原因是资产阶级的兴起。有些人同意他的观点，但有些人不同意。在他经常被引用的论文（文本 10a）中，Nathan Sivin 指出中国有科学。然而，中国科学的统一性并不存在，沈括的思想体系就是明证。西文指出了历史推理中的两个漏洞，并指出中国确实发生了一场科学革命。本文节选自沈括的《梦溪笔谈》（文本 10b），读者可以更深入地了解中国科学。

原理（文本 3b）以定义和公理开始，牛顿由此推导出所有的运动定理。这种写法起源于欧几里得的《几何原本》，它写于公元前 300 年的古希腊。欧几里得的伟大成就是他证明了几何的整体是如何从几个不可约的定义、公设和普通概念中推导出来的。Elements 不是一个简单的文本。它以一种精确而简洁的方式写出来，许多读者觉得它很无聊。在威廉·邓纳姆的《数学宇宙》的节选（文本 11a）中，邓纳姆对元素的基本思想做了很好的介绍。文本 11b 摘自《要素》。读者将欣赏欧几里得如何系统地证明了著名的定理，即三角形任意两条边的和都比第三条边长。

科学与方法

——亨利·庞加莱

1. 事实的选择

托尔斯泰在他的著作中解释了为什么在他看来，“为科学而科学”是一个荒谬的概念。我们不可能知道所有的事实，因为它们的数量实际上是无限的。我们必须做出选择；既然如此，难道这种选择仅仅是由我们好奇心的反复无常所决定的吗？以实用为导向，以我们的实际需要，尤其是道德需要为导向，不是更好吗？我们难道没有比计算这个地球上现存的雌鸟的数量更好的工作吗？

很明显，对他来说，“效用”一词并不具有商人以及后来我们大多数同时代人所赋予它的意义。他对科学在工业上的应用，对电力或汽车的奇迹，几乎不感兴趣，他认为这些都是道德进步的障碍。对他来说，有用的东西仅仅是能够使人变得更好的东西。

就我而言，我对这两种理想都不满意，这一点几乎无须我来说明。我既不喜欢贪婪狭隘的财阀统治，也不喜欢品德高尚、没有抱负的民主政体，他们只会把脸转过去，在那里我们会发现缺乏好奇心的好人，他们避免一切过度行为，除了无聊，不会死于任何疾病。但这完全是个人品味的问题，这不是我想讨论的问题。

尽管如此，这个问题仍然存在，它需要我们的注意。如果我们的选择仅仅是由反复无常或直接的必然性所决定的，那么就不可能有为科学而科学，因而也就不可能有科学。这是真的吗？毫无疑问，我们必须做出选择：无论我们多么活跃，事实总是超过我们，而我们永远也追不上事实；当科学家发现一个事实的时候，他身体的每一立方英寸都在产生成千上万个事实。试图让科学包含自然，就像试图让部分包含整体一样。

但科学家们相信，事实是有等级的，可以做出明智的选择。他们是对的，否则就不会有科学，而科学确实存在。只要睁开眼睛，你就会发现，如果没有这些实干家存在，如果没有在他们之前有一些无私的傻瓜，他们死时很穷，从来没有想过有用的东西，他们的指导不是他们自己的任性，那么，工业的胜利就永远不会看到光明。

这些傻瓜所做的，正如马赫所说的那样，是为他们的后继者省去了思考的麻烦。如果他们只是为了眼前的工作而工作，他们就不会留下任何东西，而面对新的要求，他们就不得不重新做一遍。大多数人不喜欢思考，这也许是一件好事，因为本能引导他们，至少在他们追求一个直接的、永远相同的目的时，本能往往比理性更能引导纯粹的理智。但本能是例行公事，如果没有思想的滋养，它在人身上就不会像蜜蜂或蚂蚁一样前进。因此，有必要为那些不喜欢思考的人思考，因为他们很多，我们的每一个想法都必须在尽可能多的情况下有用。因此，一个规律越普遍，它的价值就越大。

这向我们展示了应该如何进行选择。最有趣的事实是那些可以多次使用的事实，那些有机会重复出现的事实。我们很幸运地出生在一个有这些事实存在的世界。假设我们不是有 80 种化学元素，而是有 8000 万种，而且它们不是常见的，也不是稀有的，而是均匀分布的。然后，每次我们捡起一块新的鹅卵石，就很有

可能它是由某种未知物质组成的。我们对其他鹅卵石的了解无法告诉我们任何关于它的信息。在每一件新事物面前，我们都应该像一个新生的孩子；像他一样，我们只能顺从自己的任性和需要。在这样一个世界里，科学将不复存在，也许思想甚至生命也将不复存在，因为进化不可能发展出自我保护的本能。幸运的是，情况并非如此；但是，这种祝福，就像我们所习惯的所有祝福一样，并没有得到真正的赏识。**如果只有个体而没有物种，如果遗传不能使子女与父母相似，生物学家也会同样感到尴尬。**

那么，哪些是有可能重复出现的事实呢？首先，简单的事实。很明显，在一个复杂的事实中，许多情况是偶然结合在一起的，只有一种更不可能的机会才能把它们再次结合起来。但是有简单的事实吗？如果有的话，我们如何识别它们？谁能说，我们认为简单的东西背后不隐藏着令人担忧的复杂性？我们所能说的是，我们一定更喜欢那些看起来简单的事实，而不是那些我们粗糙的视觉从中发现不同成分的事实。那么只有两种选择是可能的；要么这种简单是真实的，要么这些元素是如此紧密地混合在一起，以至于无法区分。在第一种情况下，我们又有机会碰到同样的简单事实，或者是它的纯粹性，或者它本身作为一个环节进入某个复杂的整体。在第二种情况下，亲密混合物同样比异质组合具有更大的繁殖机会。机遇可以混合在一起，但它不能分开，只有经过深思熟虑，才能把各种元素组合在一个秩序井然的大厦里，使某些东西与众不同。因此，一个能够区分不同事物的组合几乎不可能被复制出来。另一方面，一种乍看是均匀的混合物很可能被重复多次。因此，看似简单的事实，即使在现实中并非如此，也会更容易偶然地再次出现。

正是这一点证明了科学家们本能地采用的方法是正确的，而也许更能证明这种方法正确的是，那些经常发生的事实对我们来说是简单的，只是因为我们对它们习以为常。

但简单的事实在哪里？科学家们试图在两个极端中找到它，在无限大和无限小中。天文学家之所以发现它，是因为恒星之间的距离是如此之大，以至于每一颗恒星都只表现为一个点，性质上的差别消失了，而且因为一个点比一个有形状和性质的物体更简单。另一方面，物理学家在把物体想象成无限小的原子中寻找基本现象，因为当我们从物体的一点到另一点时，问题的条件经历缓慢而连续的变化，而在每一个小原子中，这些条件可以被认为是恒定的。同样，生物学家也本能地认为细胞比整个动物更有趣，事实证明他是对的，因为对于那些能认出它们的人来说，属于最不同有机体的细胞比有机体本身更相似。这位社会学家的处境更为尴尬。对他来说，那些要素就是人，它们太不相同，太多变，太反复无常，总之，它们本身太复杂了。此外，历史不会重演；那么，他如何选择有趣的事实，重复的事实呢？方法就是对事实的选择，因此我们首先要考虑的是设计一种方法。许多人被设计出来，因为没有一个人在这个领域是无可争议的。几乎每一篇社会学论文都提出了一种新的方法，然而，它的作者非常小心地不去应用这种方法，因此**社会学是方法最多而结果最少的科学。**

因此，我们应该从常规的事实开始；但是，一旦规则确立了，一旦它不再有疑问，那些完全符合规则的事实就失去了意义，因为它们不能教给我们任何新的东西。那么例外就变得重要了。我们不再寻找**相似之处**，而是首先研究**差异**，在这些差异中，我们首先选择那些最突出的差异，不仅因为它们最引人注目，而且因为它们最有启发意义。用一个简单的例子最好地解释这一点。假设我们正试图通过观察曲线上的一些点来确定曲线。注重实际的人只看眼前的效用，他只会观

察到他为某一特殊目标所需要的点；这些点在曲线上的分布会很糟糕，它们在某些部分会拥挤在一起，而在其他部分则很少，因此不可能用一条连续的线将它们连接起来，它们在其他任何应用中都是无用的。科学家将以不同的方式进行研究。由于他希望研究曲线本身，他将有规律地分布要观察的点，一旦他知道了其中的一些点，他就会用一条规则的线把它们连接起来，然后他就会得到完整的曲线。但他如何才能做到呢？如果他已经确定了曲线上的一个极端点，他不会一直靠近这个极端点，而是会移动到另一端。两个极端之后，中心点最有指导意义，以此类推。

因此，当一项规则确立后，我们必须首先寻找在哪些情况下该规则最有可能被发现是错误的。这是人们对天文事实和地质年代感兴趣的众多原因之一。通过在空间或时间上的长途旅行，我们可能会发现我们的日常规则完全被颠覆了，这些巨大的颠覆将使我们更清楚地看到和更好地理解那些可能发生在我们附近的微小变化，在我们被召唤生活和活动的世界的小角落里。我们对这个角落有了更深的了解，因为我们已经踏上了前往遥远国度的旅程。

但是，我们的目的与其说是要确定相似和不同，不如说是要发现隐藏在明显差异之下的相似之处。个别的规则起初似乎不一致，但仔细观察，我们通常可以发现相似之处；它们虽然在物质上不同，但在形式和各部分的顺序上却很接近。当我们从这个角度审视它们时，我们会看到它们变宽了，并倾向于包容一切。正是这一点赋予了构成一个整体的某些事实以价值，并表明它是其他已知整体的忠实形象。

关于这一点，我不能再详述了，但这几句话足以说明，科学家并不是随意选择要观察的事实的。他没有像托尔斯泰所说的那样计算瓢虫的数量，因为这些昆虫的数量虽然有趣，但会发生反复无常的变化。他试图把大量的经验和大量的思想浓缩在一本小书里，这就是为什么一本关于物理学的小书包含了那么多过去的实验，以及一千倍的可能的实验，这些实验的结果是预先知道的。

但到目前为止，我们只考虑了问题的一个方面。科学家研究自然不是因为这样做有用。他研究它是因为他从中得到乐趣，他从中得到乐趣是因为它是美丽的。如果大自然不美丽，它就不值得了解，生活就不值得过下去。当然，我说的不是那种震撼感官的美，不是那种品质和外表的美。我一点也不鄙视这一点，但这与科学毫无关系。我的意思是，更亲密的美，它来自于各部分的和谐秩序，是一种纯粹的智慧所能把握的。可以说，正是这一点，使我们的身体有了一个骨架，使我们的感官得到了闪光的视觉，没有了这一点，这些转瞬即逝的梦的美就不完美了，因为它将是无限的，永远难以捉摸的。相反，智力之美是自给自足的，科学家使自己从事长期而痛苦的工作，也许更多的是为了智力之美，而不是为了人类未来的福祉。

因此，正是为了追求这种特殊的美，追求世界的和谐，我们才选择了最适合促进这种和谐的事实；就像艺术家选择他的被画对象的那些特征来完成肖像并赋予它个性和生命一样。无须担心，这种本能的、未被承认的专注会使科学家偏离对真理的追求。我们可以梦想一个和谐的世界，但它与现实世界相差甚远！希腊人是有史以来最伟大的艺术家，他们为自己建造了一个天堂；与我们所知道的天堂相比，它是多么可怜啊！

正因为简单和浩瀚都是美，所以我们偏爱简单的事实和浩瀚的事实；让我们感到快乐的，有时是追随恒星的巨大运行轨迹，有时是用显微镜仔细观察那巨大而微小的事物，有时是在地质年代中寻找过去的痕迹，而过去因其遥远而吸引着

我们。

因此，我们看到，对美和对有用的关注会导致我们做出同样的选择。同样，按照马赫的观点，节约思想，节约努力，是科学的永恒趋势，这既是一种实用的好处，也是一种美的源泉。我们欣赏的建筑是那些建筑师成功地将手段与目的相协调的建筑，在这些建筑中，柱子似乎轻松而毫不费力地承受着强加在它们身上的负担，就像埃雷希图姆的优雅的女像柱。

这种一致性从何而来？难道仅仅是那些在我们看来美丽的东西是那些最适合我们的智力的东西，因此它们同时也是智力最知道如何处理的工具吗？还是进化和自然选择的结果？那些理想最符合自己利益的民族，是否被正确地理解，消灭了其他民族并取代了他们的位置？每个人都不顾后果地追求自己的理想，但这种追求导致了一些人的毁灭，也给了另一些人帝国。我们很容易相信这一点，因为如果希腊人战胜了野蛮人，如果继承了希腊人思想的欧洲统治了世界，那是因为野蛮人喜欢花哨的色彩和鼓声，这是他们的感官所能感受到的，而希腊人则喜欢隐藏在感性美背后的知性美，正是这种美给了知性的确定性和力量。

毫无疑问，托尔斯泰会对这样的胜利感到恐惧，他会拒绝承认它可能真正有用。但是这种为了真理本身的美而无私地追求真理也是有益的，可以使人变得更好。我很清楚地知道，失望是存在的，思想家并不总能找到应有的平静，甚至有些科学家脾气很坏。

因此，我们是否应该说科学应该被抛弃，而只研究道德？难道有人认为道德家从讲坛上走下来就完全无可指责吗？

3. 数学的发现

数学发现的起源是一个必须激发心理学家最浓厚兴趣的问题。因为在这一过程中，人的心灵似乎很少借用外部世界，在这一过程中，人的心灵活动，或似乎活动，只是靠它自己和作用于它自己，因此，通过研究几何思维的过程，我们可以希望达到人的心灵中最本质的东西。

这一点早已为人所知，几个月前，由莱桑特和费尔编辑的一篇题为《数学学报》的综述对不同数学家的思维习惯和工作方法进行了调查。当调查结果公布时，我已经概述了这篇文章的主要特征，因此我几乎无法利用它们，我将满足于说，大多数证据证实了我的结论。我并不是说有全体一致的意见，因为在呼吁普选时，我们不能指望获得全体一致的意见。

第一个事实一定会使我们吃惊，或者说，如果我们不是太习惯于它，就会使我们吃惊。怎么会有人不懂数学呢？如果科学仅仅诉诸于逻辑规则，即那些为所有健全的头脑所接受的规则，如果它的证据是建立在所有人都共通的原则之上的，而只有疯子才会试图否认这些原则，那么怎么会有那么多人对它完全无动于衷呢？

每个人都没有发现的能力，这一点也不神秘。每个人都不应该记住他曾经学过的演示，这仍然是可以理解的。但是，当我们考虑到这一点时，最令人惊讶的似乎是，任何人都不能在向他陈述数学论点的那一刻理解它。然而，那些只能勉强跟上论点的人占多数；这是无可争辩的，中学教师的经验肯定不会反驳我。

更进一步，数学中怎么可能有错误？一个健康的智力不应该犯任何逻辑错误，然而，有一些非常敏锐的头脑不会在简短的论证中犯错误，就像我们在日常生活中不得不做的那样，然而，他们不能正确地遵循或重复数学的论证，这些论

证更长,但毕竟只是与他们很容易做出的论证完全相似的简短论证的积累。有必要补充说,数学家本身也不是绝对正确的吗?

答案在我看来是显而易见的。想象一长串的三段论,其中前面的结论构成后面的前提。我们将能够掌握每一个三段论,并不是在从前提到结论的过渡中,我们有误入歧途的危险。但是,从我们第一次遇到一个命题作为一个三段论的结论,到我们再次发现它作为另一个三段论的前提,在这段时间里,有时会经过很长一段时间,我们会发现链条上的许多环节;因此,我们很可能会忘记它,或者更严重的是,忘记它的意义。因此,我们可能偶然地用一个稍有不同的命题来代替它,或者保留同样的陈述,但赋予它一个稍微不同的含义,这样我们就有陷入错误的危险。

数学家必须经常使用一个规则,而且很自然地,他会从证明这个规则开始。此时此刻,这个示范在他的记忆中还十分清晰,他完全理解它的含义和意义,而且他没有改变它的危险。但后来,他把它记在记忆里,只是机械地应用它,然后,如果他的记忆失败了,他可能会应用错误。因此,举一个简单而粗俗的例子,我们有时在计算中犯错误,因为我们忘记了乘法表。

按照这种观点,数学方面的特殊才能,无非是由于非常牢固的记忆力或非凡的注意力。这种品质类似于惠斯特牌手能够记住所出的牌,或者更进一步说,类似于国际象棋选手能够描绘出大量的组合并记住它们。每一位优秀的数学家都应该是一名优秀的棋手,反之亦然,同样,他也应该是一名优秀的数字计算器。当然,这种情况有时会发生,因此高斯既是一个天才的几何学家,又是一个非常早熟、非常确定的计算器。

但是也有例外,或者说我错了,因为我不能称它们为例外,否则例外就会比符合规则的情况更多。相反,高斯是个例外。至于我自己,我必须承认我绝对不能做加法而不犯错误。同样地,我应该是一个非常糟糕的棋手。我可以很容易地计算出,通过以某种方式玩耍,我应该暴露在这样或那样的危险中;然后,我应该重新考虑许多其他的招式,这些招式由于其他原因我应该拒绝,最后,我应该采取我最初研究过的招式,在这段时间里,我忘记了我预见到的危险。

总而言之,我的记忆力还不错,但不足以使我成为一名优秀的棋手。那么,为什么它没有让我在一个困难的数学论证中失败呢?在这个论证中,大多数棋手都会输掉。很明显,因为它是由论证的总趋势所引导的。数学论证不是三段论的简单并列;它由按一定顺序排列的三段论组成,这些要素的排列顺序比要素本身重要得多。如果我有这种感觉,可以说是直觉,那么我就能一眼看出整个论证,我就不必再害怕忘记其中的一个要素;他们每个人都会自然地站在为他们准备的位置上,而不需要我努力记忆。

在我看来,当我重复我学到的一个论点时,我可能已经发现了它。这通常只是一种错觉;但即便如此,即便我不够聪明,无法为自己创造,我也会在重复的过程中重新发现它。

我们可以理解,这种感觉,这种对数学秩序的直觉,它使我们能够猜测隐藏的和谐和关系,不可能属于每个人。有些人既没有这种难以定义的微妙感觉,也没有超乎寻常的记忆力和注意力,因此他们甚至完全无法理解高等数学的最初步骤。这适用于大多数人。另一些人只有轻微的感觉,但他们天生具有非凡的记忆力和极大的注意力。他们一个接一个地记住细节,他们能理解数学,有时也能应用数学,但他们不具备创造的条件。最后,还有一些人拥有我所说的或多或少高度发达的特殊直觉,他们不仅能理解数学,即使他们的记忆力一点也不特别,而

且他们可以成为创造者，并根据他们的直觉或多或少的发展程度，寻求发现，成功的机会或多或少。

实际上，数学发现是什么？它不在于用已知的数学实体进行新的组合。这是任何人都可以做到的，可以形成的组合将是无数的，其中大部分将是绝对没有兴趣的。发现不在于构造无用的组合，而在于构造有用的组合，而这些组合是无限小的少数。发现是辨别，是选择。

如何选择，我已经在上面解释过了。值得研究的数学事实是那些通过与其他事实的类比，能够引导我们认识数学规律的事实，就像实验事实引导我们认识物理规律一样。它们揭示了其他事实之间毫无疑问的关系，这些事实早已为人所知，但却被错误地认为彼此无关。

在我们选择的组合中，最富有成效的往往是那些由从广泛分离的领域借来的元素组成的组合。我的意思并不是说，对于发现来说，把尽可能不协调的物体放在一起就足够了。这样形成的大部分组合是完全没有结果的，但是其中有些组合，虽然非常罕见，却是最有结果的。

正如我所说，发现就是选择。但这个词或许不太恰当。它建议购买者在展示了大量样品后，一个接一个地进行检验，以便做出选择。在我们的例子中，样本是如此之多，以至于一生都没有足够的时间来检查它们。事情不是这样发生的。没有结果的组合根本不会出现在发现者的脑海里。在他的意识领域中，从来没有出现过真正有用的组合，而他拒绝的一些组合，然而，它们在某种程度上具有有用组合的特征。一切都好像发现者是一个二级考官，他只需要审问通过预审后宣布合格的候选人。

但是，到目前为止，我所说的只是通过阅读几何学家的作品所能观察到或推断出来的东西，只要阅读时带着一些思考。

现在是时候进一步深入，看看在数学家的灵魂深处发生了什么。为了这个目的，我想最好的办法就是叙述我个人的回忆。只是我要把自己限制在叙述我是如何写我的第一篇关于富克斯函数的论文的。我必须道歉，因为我将介绍一些专业术语，但读者不必惊慌，因为他不需要理解它们。例如，我会说，我在这样那样的情况下找到了这样那样的定理的证明；这个定理将有一个许多人都不知道的野蛮名字，但这并不重要。心理学家感兴趣的不是定理而是环境。

两个星期以来，我一直在试图证明不可能有任何函数类似于我后来称之为富克斯函数的那种函数。那时我很无知。每天我坐在桌旁，花上一两个小时尝试各种各样的组合，却一无所获。一天晚上，我打破习惯，喝了些黑咖啡，睡不着。一大堆的想法在我的脑海里涌动；我几乎能感觉到它们在互相碰撞，直到其中的两个合在一起，可以说，形成一个稳定的组合。到了早晨，我已经证明了一类富克斯函数的存在性，它们是由超几何级数推导出来的。我只需要验证一下结果，这只花了几个小时。

然后我希望用两个级数的商来表示这些函数。这个想法完全是经过深思熟虑的；我被椭圆函数的类比所引导。我问我自己，如果这些级数存在的话，它们的性质是什么呢？我毫不费力地形成了我称之为希塔-富克斯的级数。

就在这时，我离开了我当时居住的卡昂，去参加一个由矿业学院安排的地质会议。旅途中的意外使我忘记了我的数学工作。当我们到达科坦斯的时候，我们休息了一下，准备去兜风，当我踏上台阶的时候，我突然想到，我用来定义富克斯函数的变换与非欧几里得几何的变换是相同的，虽然我以前的思想似乎没有准备好。我没有去证实，也没有时间去证实，因为我在休息时间一坐下就重新开始

谈话，但我立刻感到绝对肯定。当我回到卡昂时，我在闲暇时核实了结果，以满足我的良心。

然后，我开始研究算术问题，没有任何明显的重大结果，也没有怀疑它们与我以前的研究有任何联系。我对自己的失败感到厌恶，于是去海边待了几天，脑子里想的是完全不同的事情。有一天，当我走在悬崖上时，一个念头又闪现在我的脑海里，它同样具有简洁、突然和直接确定的特点，那就是不定三元二次型的算术变换与非欧几里得几何的算术变换是相同的。

回到卡昂，我思索这个结果，并推断出它的后果。二次型的例子告诉我，除了那些与超几何级数相对应的，还有富克斯群；我发现我可以把 Theta - Fuchsian 级数的理论应用到它们身上，因此，除了那些从超几何级数推导出来的函数之外，还有 Fuchsian 函数，那是我当时唯一知道的。自然，我建议形成所有这些函数。我有系统地包围了他们，一个接一个地占领了所有的堡垒。然而，有一座城堡仍然屹立不倒，它的陷落将会连带着中央堡垒的陷落。但我所有的努力起初都无济于事，除了让我更好地理解困难，这已经是一些东西了。所有的工作都是完全有意识的。

于是，我动身去瓦尔萨梅连山，在那里我必须服兵役，所以我的脑子里满是不同的事情。一天，当我过马路的时候，那个使我停滞不前的难题突然想到了解决办法。我并没有马上去想它，直到我的服务结束后，我才回到这个问题上来。我有了所有的元素，只需要把它们组合起来。因此，我毫不费力地一次完成了我的最终论文。

举很多例子是没有用的，我只举这一个就够了。至于我的其他研究，我应该给出的描述将是完全相似的，而其他数学家在研究 *L'Enseignement mathématique* 时所做的观察只会证实它们。

人们立刻就会被这些突然顿悟的现象所震撼，这是以前长期无意识工作的明显迹象。在我看来，这种无意识的工作在数学发现中所起的作用是无可争辩的，我们将在其他不太明显的情况下发现它的痕迹。通常，当一个人在研究一个难题时，他第一次开始工作时什么也做不成。然后他稍作休息，又在他的桌旁坐下。在最初的半小时里，他还是什么也找不到，然后突然一个决定性的想法出现在他的脑海里。我们可以说，有意识的工作之所以更有成效，是因为它被打断了，而其余的工作则恢复了精神的活力和活力。但更可能的是，其余的占领与无意识的工作，这项工作的结果是后来发现几何学者 cases I 引述完全一样，除了启示，而不是光在散步或一个旅程，是在一段时间的意识工作，但独立工作，最多只执行解锁过程，就好像它是刺激兴奋到意识形态结果已经获得了在休息，在那之前一直没有意识。

关于这种无意识工作的条件，还有一点要说的，那就是，除非在无意识工作之前和之后先进行一段有意识的工作，否则无意识工作是不可能的，或者在任何情况下都是没有结果的。这些突然的灵感从来没有产生过（我所引用的例子已经充分证明了这一点），除非经过几天的自愿努力，这些努力似乎完全没有结果，人们认为自己什么也没有完成，似乎走在一条完全错误的道路上。然而，这些努力并不像人们想象的那样徒劳无益；它们使无意识的机器运转起来，如果没有它们，机器根本就不会工作，就不会产生任何东西。

第二阶段自觉工作的必要性就更容易理解了。必须计算出灵感的结果，推断出直接的结果，并加以整理，并进行论证；但最重要的是，有必要对它们进行核实。我已经说过，灵感带来了一种绝对确定的感觉；在引用的案例中，这种感觉

并不是欺骗性的，而且情况往往是这样。但是，我们必须注意不要认为这是没有例外的规律。这种感觉往往欺骗了我们，但并没有因此而变得不那么明显，只有当我们试图建立证明时，我们才发现它。我观察到这一事实，最明显的是我在早晨或晚上半睡半醒状态下躺在床上时产生的想法。

事实情况就是这样，它们激发了以下几点思考。前面的一切的结果表明，无意识的自我，或者，正如它所说的，潜意识的自我，在数学发现中起着最重要的作用。但潜意识自我通常被认为是纯粹自动的。现在我们已经看到，数学功不是简单的机械功，它不能委托给任何机器，不管我们认为它已经达到了多么完美的程度。这不仅仅是应用某些规则的问题，也不仅仅是根据某些固定的规律制造尽可能多的组合的问题。这样获得的组合将是非常多的、无用的和累赘的。发现者的真正工作是在这些组合中进行选择，以消除那些无用的组合，或者干脆不给自己制造这些组合的麻烦。必须指导这种选择的规则是极其微妙的，几乎不可能用精确的语言来陈述它们；它们必须是感觉而不是表述出来的。在这些条件下，我们怎么能想象筛子能够机械地应用它们呢？

因此，下面的假设是第一种假设。潜意识的自我并不逊于意识的自我；它不是完全自动的；它有辨别能力；它触感灵敏，轻巧；它可以选择，它可以预言。更重要的是，它比有意识的自我更能预测，因为它在后者失败的地方成功。总而言之，潜意识的自我不是优于有意识的自我吗？这个问题的重要性是很容易理解的。在最近的一次演讲中，布鲁克斯先生展示了它是如何在完全不同的场合出现的，以及一个肯定的答案会带来什么样的后果（另见同一作者的《科学与宗教》，第 313 页及以下）。

我刚才所说的事实是否迫使我们作出这个肯定的回答？我承认，就我而言，我不愿意接受它。那么，让我们回到事实上来，看看它们是否允许有其他的解释。

毫无疑问，经过一段较长时间的无意识工作后，在一种突然的启发下呈现在头脑中的组合通常是有用的和富有成效的组合，这些组合似乎是初步筛选的结果。由此可以得出结论，潜意识的自我，通过敏锐的直觉预测到这些组合可能是有用的，除了这些之外，没有形成任何组合，或者它形成了许多其他没有兴趣的组合，仍然是无意识的？

在第二个方面，所有的组合都是潜意识自我自动行动的结果，但只有那些有趣的组合才会进入意识领域。这也是最神秘的。我们如何解释这样一个事实：在我们无意识活动的上千个产物中，有些被邀请跨过门槛，而另一些则留在门外？难道仅仅是机遇给了他们这种特权吗？显然不是。例如，在我们所有的感官刺激中，只有最强烈的刺激才能吸引我们的注意力，除非它是由其他原因引起的。更常见的特权无意识现象，那些能够成为意识的现象，是那些直接或间接最深刻地影响我们的感性的现象。

将感性与数学论证联系起来，这似乎令人惊讶，因为数学论证似乎只会引起智力的兴趣。但如果我们牢记数学之美，数字与形式的和谐以及几何的优雅，就不会有这种感觉。这是一种真正的美感，所有真正的数学家都认识到，这是真正的感性。

那么，究竟是什么数学实体赋予了我们这种美和优雅的特质，使我们能够发展出一种审美情感呢？那些元素被和谐地安排在一起的人，他们的思想可以毫不费力地接受整体，而不忽略细节。这种和谐既满足了我们的审美要求，又帮助了它所支持和引导的心灵。同时，通过在我们眼前呈现一个有序的整体，它给我们一种数学定律的预感。现在，正如我在上面说过的，唯一值得我们注意和有用的

数学事实是那些能使我们熟悉数学定律的事实。因此，我们得出以下结论。**有用的组合恰恰是最美丽的，我的意思是那些最能吸引所有数学家都知道的特殊情感的组合，但外行人对这种特殊情感是如此无知，以至于他们常常忍不住对它微笑。**

接下来呢？在潜意识自我盲目形成的大量组合中，几乎所有的组合都没有兴趣，也没有效用。但是，正因为如此，它们对审美感性没有作用；意识永远不会知道它们。只有少数是和谐的，因此既有用又美丽，它们将能够影响我所说的几何学家的特殊情感；它们一旦被唤醒，就会把我们的注意力引向它们，从而给它们成为意识的机会。

这只是一种假设，然而有一种观察倾向于证实它。当一个突然的灵感侵入数学家的头脑时，它通常不会误导他。但正如我所说，有时也会发生这种情况，即它经不起核查的考验。嗯，我们几乎总是可以观察到，这个错误的想法，如果它是正确的，就会使我们对数学优雅的本能感到高兴。

因此，正是这种特殊的审美感受力在我上面所说的精致筛子中起着作用，这也充分说明了为什么没有这种感受力的人永远不会成为一个真正的发现者。

然而，所有的困难并没有消失。有意识的自我是有严格限制的，但关于潜意识的自我，我们不知道它的限制，这就是为什么我们不太愿意假设，在短暂的时间内，它可以形成比一个有意识的存在的整个生命所能形成的更多的不同组合。然而，这些限制确实存在。它能形成所有可能的组合吗？其数目之多令人难以想象。然而，这似乎是必要的，因为如果它只产生一小部分组合，而且是偶然的，那么在这些组合中找到正确的那个，必须被选中的那个的可能性很小。

也许我们必须在有意识的初步工作中寻找解释，这一阶段总是先于所有富有成效的无意识工作。如果允许我做一个粗略的比较，让我们把我们组合的未来元素描绘成类似伊壁鸠鲁的钩状原子。当心灵完全静止时，这些原子是不动的；可以说，它们是附在墙上的。这种完全静止的状态可以无限期地持续下去，而原子不会相遇，因此也就不可能形成任何组合。

另一方面，在表面上的休息，但无意识的工作期间，他们中的一些人脱离了墙，开始行动起来。它们在太空中向各个方向移动，就像一群蚊子，或者，如果我们喜欢一个更有学问的对比，就像气体动力学理论中的气体分子。它们的相互碰撞可能会产生新的组合。

前期自觉工作起什么作用？很明显，这是为了解放这些原子，把它们从壁上分离出来，让它们运动起来。当我们用千百种不同的方法去搅动各种元素，试图把它们排列起来，却还没有找到一种令人满意的排列方式时，我们会认为自己一事无成。但是，在我们的意志赋予它们这种激动之后，它们并没有回到原来的状态，而是继续自由地流动。

现在，我们的意志不是随意地选择它们，而是为了追求一个完全明确的目标。因此，被它释放出来的不是偶然的原子；我们可以合理地期望从中得到理想的解决方案。然后，被释放的原子将经历碰撞，要么彼此碰撞，要么与保持静止的原子碰撞，它们将在运动过程中与之相撞。我再次道歉。我的对比很粗糙，但我不知道如何用其他方式来解释我的想法。

不管怎样，唯一有可能形成的组合，是那些至少有一个元素是由我们的意志精心选择的原子之一的组合。显然，我刚才所说的“正确的组合”是要在这些东西中找到的。也许这里有一种方法可以修正原始假设中的矛盾之处。

这是另一个观察结果。无意识的工作从来不会提供我们只需应用固定规则的长时间计算的现成结果。我们可能会认为，潜意识的自我，虽然是纯粹自动的，

但它特别适合于这种工作，在某种意义上，它完全是机械的。似乎，通过一夜之间思考乘法和的因子，我们可能希望在醒来时找到现成的产品；或者，再一次，一个代数计算，或者一个验证，可以无意识地进行。观察证明，情况绝非如此。这些灵感是无意识工作的成果，我们所能希望的就是为这些计算找到出发点。至于计算本身，它们必须在灵感之后的第二阶段有意识的工作中进行，在这个阶段，灵感的结果得到证实，结果得到推导。这些计算的规则严格而复杂；它们需要纪律、注意力、意志和意识。相反，在潜意识的自我中，统治着我称之为自由的东西，如果人们可以把这个名字赋予仅仅是缺乏纪律和偶然产生的混乱的话。只是，正是这种无序允许了意想不到的耦合。

我再讲最后一句话。当我在上面叙述一些个人的观察时，我谈到了一个兴奋的夜晚，我仿佛不由自主地工作着。这种情况是经常发生的，并不一定是由物理刺激物引起的大脑异常活动，就像上面提到的例子一样。看来，在这些情况下，我们自己是在帮助我们自己无意识的工作，这部分被过度兴奋的意识所察觉，但并没有因此改变其性质。然后，我们模糊地意识到这两种机制的区别，或者，如果你愿意，这两种自我的工作方法。在我看来，我成功地进行的心理学观察，就其一般特征而言，证实了我一直在阐述的观点。

的确，这是非常需要的，因为尽管如此，它们在很大程度上仍然是假设的。这个问题很有趣，我不后悔把它们交给读者。

寻找记忆：一门新的心灵科学的出现

——埃里克·R·坎德尔

第4章

一次一个细胞

1955年秋天，我进入了哥伦比亚大学哈里·格兰德费斯特的实验室，参加了为期六个月的选修课，希望能学到一些关于大脑高级功能的知识。我没有想到要开始一项新的事业，一种新的生活方式。但我与 Grundfest 的第一次对话让我有理由反思。在那次谈话中，我描述了我对精神分析的兴趣，以及我希望了解大脑中自我、本我和超我可能位于何处。

我找到这三种精神媒介的愿望是由弗洛伊德在总结他在1923年到1933年间发展起来的新的心理结构理论的过程中发表的一张图表激发的（图4-1）。这个新理论保留了他早期对有意识和无意识心理功能的区分，但它增加了三种相互作用的精神媒介：自我、本我和超我。**弗洛伊德把意识看作是精神器官的表面。**弗洛伊德认为，我们的大部分心理功能都被淹没在水面之下，就像冰山的大部分被淹没在海洋表面之下一样。**一种心理功能隐藏得越深，意识就越难以触及。**精神分析提供了一种深入挖掘被掩埋的心理层次的方法，即人格的前意识和无意识成分。

使弗洛伊德的新模型发生戏剧性转变的是三种相互作用的精神机构。弗洛伊德没有将自我、本我和超我定义为有意识或无意识，而是将其定义为不同的认知方式、目标和功能。

根据弗洛伊德的结构理论，**自我（“我”或自传式自我）是执行机构，它既有有意识的成分，也有无意识的成分。**意识部分通过视觉、声音和触觉等感觉器官与外部世界直接接触；它与感知、推理、行动计划以及对快乐和痛苦的体验有关。在他们的工作中，哈特曼、克里斯和洛温斯坦强调，自我的这种无冲突的组成部分在逻辑上运作，并在其行动中受到现实原则的指导。自我的无意识部分与心理防御（压抑、否认、升华）有关，这是自我抑制、引导和重定向本我的性本能和攻击性本能驱动的机制，本我是第二种心理代理。

本我（“它”），弗洛伊德从弗里德里希·尼采那里借用的一个术语，是完全无意识的。它不受逻辑或现实的支配，而是受寻求快乐和避免痛苦的享乐主义原则的支配。**弗洛伊德认为，本我代表婴儿的原始心智，是出生时唯一存在的心智结构。超我，第三个统治者，是无意识的道德力量，是我们愿望的化身。**

虽然弗洛伊德并没有打算把他的图表变成一幅心灵的神经解剖图，但它激发了我的好奇心，让我想知道，在人类大脑的复杂褶皱中，这些心理机构可能生活在哪里，就像它早些时候激发了库比和奥斯托的好奇心一样。正如我所提到的，这两位对生物学有浓厚兴趣的精神分析学家鼓励我和 Grundfest 一起学习。

格兰德费斯特耐心地听着我向他讲述我那些相当宏伟的想法。另一位生物学家很可能会不理睬我，不知道该如何处理这个 naïve 误入歧途的医学院学生。但不是 Grundfest。他解释说，我希望理解弗洛伊德心理结构理论的生物学基础，

这远远超出了当代脑科学的掌握范围。相反，他告诉我，为了理解思维，我们需要一次一个细胞地观察大脑。

一次一个细胞！起初，我觉得这些话令人泄气。一个人如何通过单个神经细胞的水平上研究大脑来解决关于行为的无意识动机或我们有意识生活的行为的精神分析问题呢？但在我们谈话的时候，我突然想起，1887年，当弗洛伊德开始自己的职业生涯时，他曾试图通过一次研究一个神经细胞来解开精神生活中隐藏的谜题。弗洛伊德最初是一名解剖学家，研究单个神经细胞，并预见了后来被称为神经元学说的一个关键点，即神经细胞是大脑的组成部分。直到后来，弗洛伊德开始在维也纳治疗精神病患者后，他才在无意识心理过程方面有了重大发现。

我觉得这很讽刺，也很了不起，因为我现在被鼓励往回走，从对自上而下的心智结构理论的兴趣转向对神经系统信号元素的自下而上的研究，即神经细胞复杂的内部世界。哈利·格兰德费斯特提出要带我进入这个新世界。

第 28 章

意识

精神分析以几种形式向我们介绍了无意识。像许多研究大脑的科学家一样，我一直对大脑最大的问题很感兴趣：**意识的本质，以及各种无意识的心理过程如何与有意识的思维联系起来。**当我第一次和 Harry Grundfest 谈论弗洛伊德的心智结构理论——自我、本我和超我——时，我思考的中心焦点是：有意识和无意识过程在大脑中的表现有何不同？但直到最近，新的心灵科学才开发出实验探索这个问题的工具。

为了发展对意识的富有成效的见解，新的心灵科学首先必须确定意识的一个有效定义，即知觉意识的状态，或选择性注意的放大。人的意识，其核心是对自我的意识，对被意识的意识。因此，意识不仅指我们体验快乐和痛苦的能力，还指我们关注和反思这些经历的能力，这种能力是在我们直接生活和生活史的背景下进行的。有意识的关注让我们把无关的经历拒之门外，把注意力集中在我们面临的关键事件上，无论是快乐还是痛苦，是湛蓝的天空，是维米尔（Vermeer）画作中凉爽的北极光，还是我们在海边体验到的美丽和平静。

迄今为止，理解意识是科学面临的最具挑战性的任务。Francis Crick 也许是 20 世纪下半叶最具创造力和影响力的生物学家，他的职业生涯最能证明这一论断的真实性。第二次世界大战后，当克里克第一次进入生物学领域时，有两个大问题被认为是科学无法回答的：是什么区别了生命和非生命的世界？意识的生物学本质是什么？克里克首先转向了比较容易的问题，即区分有生命的和无生命的物质，并探索了基因的本质。到 1953 年，仅仅两年后，他和吉姆·沃森就帮助解开了这个谜团，正如沃森后来在《双螺旋》（The Double Helix）中所描述的那样：“午餐时，弗朗西斯飞进鹰酒吧（Eagle Pub），告诉所有能听到的人，我们发现了生命的秘密。”在接下来的 20 年里，克里克帮助破解了遗传密码：DNA 如何制造 RNA，RNA 如何制造蛋白质。

1976 年，60 岁的克里克转向了仍然存在的科学谜团：意识的生物学本质。他与年轻的计算神经科学家克里斯托弗·科赫（Christof Koch）合作，用余生研究这个问题。克里克在这个问题上发挥了他特有的聪明才智和乐观精神；此外，

他使意识成为科学界关注的焦点，而科学界此前一直忽视意识。但是，尽管克里克花了将近三十年的时间不断努力，他还是只能把这个问题稍微移开一点。事实上，一些科学家和心灵哲学家仍然认为意识是如此不可思议，以至于他们担心意识永远无法用物理术语来解释。他们问，一个生物系统，一个生物机器，怎么能有感觉呢？更令人怀疑的是，它怎么能想到自己呢？这些问题并不新鲜。公元前 5 世纪，希波克拉底（Hippocrates）和哲学家柏拉图（Plato）首次在西方思想中提出了这些问题。柏拉图是雅典学院的创始人。希波克拉底是第一个摒弃迷信的医生，他将自己的想法建立在临床观察的基础上，并认为所有的心理过程都来自大脑。柏拉图拒绝观察和实验，他相信我们能够思考我们自己和我们身体唯一的唯一原因是我们有一个非物质的、不朽的灵魂。不朽灵魂的观念随后被纳入基督教思想，并在 13 世纪由圣托马斯·阿奎那加以阐述。阿奎那和后来的宗教思想家认为，灵魂——意识的产生者——不仅不同于身体，它也有神圣的起源。

在 17 世纪，笛卡尔提出了人类具有双重本性的观点：他们有一个由物质构成的身体，还有一个来自灵魂的精神本质的心灵。灵魂接受来自身体的信号，可以影响身体的行为，但它本身是由一种非物质物质组成的，这种物质是人类所特有的。笛卡尔的思想产生了这样一种观点，即像吃饭和走路这样的行为，以及感官知觉、食欲、激情，甚至简单的学习形式，都是由大脑调节的，可以科学地研究。然而，心灵是神圣的，因此不适合作为科学的研究对象。

值得注意的是，这些 17 世纪的思想在 20 世纪 80 年代仍然流行。维也纳出生的科学哲学家卡尔·波普尔（Karl Popper）和诺贝尔奖得主神经生物学家约翰·埃克斯（John Eccles）一生都信奉二元论。他们同意阿奎那的观点，即灵魂是不朽的，独立于大脑之外。英国科学哲学家吉尔伯特·赖尔（Gilbert Ryle）将灵魂的概念称为“机器中的幽灵”。

今天，大多数心灵哲学家都同意我们所说的意识来自物理大脑，但有些人不同意克里克关于是否可以科学地接近它的观点。Colin McGinn 等少数人认为意识根本无法被研究，因为大脑的结构限制了人类的认知能力。在 McGinn 看来，人类的思维可能只是无法解决某些问题。在另一个极端，哲学家如丹尼尔·丹尼特根本否认存在任何问题。丹尼特认为，就像一个世纪前神经学家约翰·休林斯·杰克逊（John Hughlings Jackson）所做的那样，意识并不是大脑的一种独特的操作；相反，它是大脑中与信息处理后期阶段有关的高阶区域的计算工作的综合结果。

最后，约翰·塞尔（John Searle）和托马斯·内格尔（Thomas Nagel）等哲学家持中间立场，认为意识是一系列离散的生物过程。这些过程是可以分析的，但我们在理解它们方面进展甚微，因为它们非常复杂，所代表的不仅仅是它们各部分的总和。因此，意识比我们所了解的大脑的任何特性都要复杂得多。

Searle 和 Nagel 认为意识状态有两个特征：统一性和主体性。意识的单一性指的是我们的经验作为一个统一的整体出现在我们面前。所有不同的感觉模式都融合成一个单一的、连贯的、有意识的体验。因此，当我走近我在 Riverdale 家附近波浪山植物园里的一株玫瑰花丛时，我在闻到花香的同时，看到了它们美丽的红色——我察觉到这株玫瑰花丛的背景是哈德逊河和它后面的帕利塞德山脊的悬崖。我的感知不仅在我经历它的那一刻是完整的，而且在两周后，当我进行精神时间旅行以重新捕捉那一刻时，它也是完整的。尽管嗅觉和视觉有不同的器官，而且每个器官都有自己的通道，但它们在以这样一种方式汇聚在一起，我的感知是统一的。

意识的单一性构成了一个难题，但也许不是一个不可克服的问题。这种单一性会被打破。一个手术病人的大脑被切断在两个半球之间，有两个有意识的头脑，每一个都有自己统一的感知。

主观性是意识的第二个特征，它对科学提出了更为艰巨的挑战。我们每个人都经历着一个私人 and 独特的感觉世界，对我们来说，这比别人的经历更真实。我们直接体验自己的想法、情绪和感觉，而我们只能通过观察或倾听间接地欣赏他人的体验。因此我们可以问，你对你看到的蓝色和闻到的茉莉花的反应——它们对你的意义——和我对我看到的蓝色和闻到的茉莉花的反应以及它们对我的意义是一样的吗？

这里的问题不是感知本身的问题。问题不在于我们是否每个人都看到了同样深浅的蓝色。通过记录不同个体视觉系统中的单个神经细胞，这相对容易建立起来。大脑确实会重建我们对物体的感知，但感知到的物体——钢琴上的蓝色或中音 C——似乎与反射光的波长或发出声音的频率的物理特性相对应。相反，问题是那个蓝色和那个音符对我们每个人的意义。我们不明白的是，神经元中的电活动是如何产生我们赋予声音颜色或波长的含义的。意识体验对每个人来说都是独一无二的，这一事实提出了一个问题，即是否有可能客观地确定每个人都共有的意识特征。如果感官最终产生的经验完全是个人主观的，那么我们就不能根据个人经验得出意识的一般定义。

Nagel 和 Searle 举例说明了用物理术语解释意识的主观本质的困难：假设我们成功地记录了一个已知对意识很重要的区域的神经元的电活动，而被研究的人正在执行一些需要有意识注意力的任务。例如，假设我们确定了当我看到并意识到波浪山玫瑰花丛上的红色花朵时，激活的细胞。我们现在已经迈出了研究意识的第一步，也就是说，我们已经发现了克里克和科赫所说的意识的神经关联。对我们大多数人来说，这将是一个巨大的进步，因为它指出了意识感知的物质伴生物。从那里，我们可以继续进行实验，以确定这些相关物是否也融合成一个连贯的整体，即哈德逊河和帕利塞德的背景。但对内格尔和塞尔来说，这是一个简单的意识问题。意识的难题是第二个谜题，即主观经验的难题。

我是如何对玫瑰的红色形象产生一种独特的感觉的呢？再举一个例子，我们有什么理由相信，当一个母亲看着她的孩子时，大脑皮层中与面部识别有关的区域的细胞的激活解释了她所感受到的情绪，以及她唤起这些情绪和孩子形象的记忆的能力？

到目前为止，即使在最简单的情况下，我们也不知道特定神经元的放电是如何导致意识知觉的主观成分的。事实上，根据 Searle 和 Nagel 的说法，我们缺乏一个足够的理论来解释客观现象（如大脑中的电信号）是如何引起主观体验（如疼痛）的。因为我们目前所从事的科学是一种对复杂事件的简化论分析观点，而意识是不可简化的主观观点，所以这样的理论目前还遥不可及。

根据内格尔的观点，如果方法论没有重大的改变，科学就无法接受意识，这种改变将使科学家能够识别和分析主观经验的要素。这些元素很可能是大脑功能的基本组成部分，就像原子和分子是物质的基本组成部分一样，只是以一种我们还无法想象的形式存在。内格尔认为，在科学研究中例行进行的缩减没有问题。生物科学可以很容易地解释一种特定物质的性质是如何从构成它的分子的客观性质中产生的。科学所缺乏的是解释主观属性（意识）如何从客体属性（相互联系神经细胞）中产生的规则。

内格尔认为，我们对主观经验要素的完全缺乏洞察，不应妨碍我们发现意识

的神经关联，以及意识现象与大脑细胞过程之间的关联规则。事实上，只有通过积累这样的信息，我们才能够考虑将主观事物还原为物理和客观事物。但是，要得出一个支持这种还原的理论，我们首先必须发现主观意识的要素。内格尔说，这一发现的重要性和意义都将是巨大的，它需要一场生物学的革命，很可能需要科学思想的彻底转变。

大多数研究意识的神经科学家的目标比这种宏大的观点所暗示的要温和得多。他们并不是故意致力于或期待一场科学思想的革命。尽管他们必须与实验定义意识现象的困难作斗争，但他们并不认为这些困难排除了现有范式下的所有实验研究。神经科学家相信，他们已经能够在理解感知和记忆的神经生物学方面取得相当大的进展，而不必考虑个人经验，Searle 就是其中之一。例如，认知神经科学家在理解感知蓝色的神经基础方面取得了进展，但没有解决我们每个人对同一种蓝色的反应。

我们不理解的是意识的难题——神经活动如何产生主观经验的奥秘。克里克和科赫认为，一旦我们解决了意识这个简单的问题，意识的统一性，我们就能通过实验操纵这些神经系统来解决难题。

意识的统一性是最初在视觉感知研究中发现的绑定问题的一种变体。在波浪山的那一刻，我体验到主观愉悦的一个亲密部分是，花园中玫瑰的外观和气味是如何与我对哈德逊河、帕利塞德河的看法以及我感知的所有其他组成图像联系在一起并统一起来的。我主观体验的每一个组成部分都是由我的视觉、嗅觉和情感系统中的不同大脑区域调节的。我的意识体验的统一性意味着，绑定过程一定以某种方式连接并整合了大脑中所有这些独立的区域。

作为解决简单的意识问题的第一步，我们需要问意识的统一性——被认为是由调节选择性注意的神经系统实现的统一性——是否会局限于一个或几个位置，这将使我们能够从生物学上操纵它们。这个问题的答案一点也不清楚。杰拉尔德·埃德尔曼（Gerald Edelman）是研究大脑和意识的主要理论家，他有力地论证了，负责统一意识的神经机制很可能广泛分布于大脑皮层和丘脑。因此，埃德尔曼断言，我们不太可能通过一组简单的神经关联来找到意识。另一方面，克里克和科赫认为，意识的统一性将有直接的神经关联，因为它们很可能涉及一组具有特定分子或神经解剖学特征的特定神经元。他们认为，神经关联可能只需要一小部分神经元充当探照灯：注意力的聚光灯。他们认为，最初的任务是在大脑中定位那些活动与意识体验的统一性联系最密切的一小部分神经元，然后确定它们所属的神经回路。

我们怎样才能找到这一小部分神经细胞来调节意识的统一性呢？他们必须满足什么标准？在克里克和科赫的最后一篇论文中（2004 年 7 月 28 日，克里克去世前几个小时还在去医院的路上修改），他们把重点放在了屏状体上，这是一块位于大脑皮层下方的脑组织，是调节体验统一性的部位。我们对屏状体知之甚少，只知道它与皮层几乎所有的感觉和运动区域以及杏仁核相连，并与杏仁核交换信息，杏仁核在情绪中起着重要作用。克里克和科赫把屏状体比作管弦乐队的指挥。的确，屏状体的神经解剖学连接符合导体的要求；它可以结合并协调大脑的各个区域，这是统一意识意识所必需的。

在克里克生命的最后，他提出了一系列重要观点，其中最后一个观点是，屏状体是注意力的焦点，是将任何感知的不同组成部分联系在一起的地方。克里克对生物学的巨大贡献（DNA 的双螺旋结构，遗传密码的本质，信使 RNA 的发现，将信使 RNA 翻译成蛋白质氨基酸序列的机制，以及意识生物学的合法化）使他与

哥白尼，牛顿，达尔文和爱因斯坦并列。然而，他对科学和精神生活的毕生关注与科学界的许多人一样，这种痴迷是科学最好的象征。克里克的朋友兼同事、认知心理学家维拉亚努尔·拉马钱德兰（Vilayanur Ramachandran）描述了克里克生命最后几周对屏状核的关注：

在他去世前三周，我去他位于拉霍亚的家中拜访了他。他 88 岁，癌症晚期，痛苦不堪，正在接受化疗；然而，他显然一直在为他的最新项目不停地工作。他那张很大的桌子占据了半个房间，上面堆满了文章、信件、信封、最新一期的《自然》杂志、一台笔记本电脑（尽管他不喜欢电脑）和最近出版的神经解剖学书籍。在我呆在那里的整整两个小时里，没有提到他的病——只是在意识的神经基础上闪现出一些想法。他对一种叫做屏状体的微小结构特别感兴趣，他觉得这种结构在很大程度上被主流权威人士所忽视。当我离开时，他说：“罗摩，我认为意识的秘密就在幽闭中——你不这样认为吗？为什么这个微小的结构会连接到大脑的这么多区域呢？”然后给了我一个狡猾的、阴谋的眼色。那是我最后一次见到他。

由于对屏状体知之甚少，克里克继续说，他想成立一个研究所，专注于它的功能。他特别想确定，当一个人的感觉器官对给定刺激的潜意识感知转变为有意识的感知时，屏状核是否会被激活。

这种转变引起克里克和科赫兴趣的一个例子是双目竞争。在这里，两种不同的图像——比如，垂直条纹和水平条纹——同时呈现给一个人，这样每只眼睛只能看到一组条纹。这个人可能会把两幅图像结合起来，然后报告说看到了格子图案，但更常见的是，这个人会先看到一张图像，然后是下一张，水平和垂直的条纹会自发地来回交替。

利用核磁共振成像技术，伦敦大学学院的埃里克·卢默和他的同事们确定了大脑皮层的额叶和顶叶区域，当一个人有意识的注意力从一个图像切换到另一个图像时，这些区域就会变得活跃。这两个区域在将有意识的注意力集中到空间中的物体上方面起着特殊的作用。反过来，大脑皮层的前额叶和后顶叶区域似乎将关于哪幅图像需要增强的决定传递给视觉系统，然后视觉系统将图像带入意识。事实上，前额叶皮层受损的人在双眼竞争的情况下很难从一个图像切换到另一个图像。克里克和科赫可能会认为，大脑皮层的额叶和顶叶区域是由屏状体负责的，它将注意力从一只眼睛转移到另一只眼睛，并将每只眼睛呈现的图像统一为有意识的意识。

正如这些争论表明的那样，意识仍然是一个巨大的问题。但是通过埃德尔曼和克里克、科赫的努力，我们现在有了两个值得探索的具体的、可检验的理论。

作为一个对精神分析感兴趣的人，我想采用克里克 - 科赫的范式，将对同一刺激的无意识和有意识的感知进行比较，以进入下一步：确定视觉感知是如何被赋予情感的。与简单的视觉感知不同，充满情感的视觉感知可能因人而异。因此，进一步的问题是，**无意识的情绪感知是如何以及在哪里被加工的？**

阿米特·埃特金是一位大胆而富有创造力的医学博士。我和乔伊·赫希（Joy Hirsch）合作进行了一项研究，他是哥伦比亚大学的脑成像师，在这项研究中，我们诱导了对情绪刺激的有意识和无意识感知。我们的方法在情感领域和克里克和科赫在认知领域是平行的。我们探索了正常人是如何有意识和无意识地对照片中的人做出反应的，照片中的人脸上有明显的中性表情或恐惧的表情。图片由加州大学旧金山分校的彼得·埃克曼提供。

埃克曼对 10 万多种人类表情进行了分类，他能够像查尔斯·达尔文一样证

明，无论性别或文化，对七种面部表情的有意识感知——快乐、恐惧、厌恶、蔑视、愤怒、惊讶和悲伤——实际上对每个人都有相同的含义（图 28 - 1）。因此，我们认为，在我们的研究中，健康的年轻医学志愿者和研究生志愿者会对恐惧的面孔产生类似的反应，而不管他们是有意识还是无意识地感知到刺激。我们通过长时间呈现恐惧的面孔来产生一种有意识的恐惧感知，这样人们就有时间反思它们。我们通过快速呈现相同的面孔来产生无意识的恐惧感知，以至于志愿者无法报告他们看到的是哪种表情。事实上，他们甚至不确定他们是否看到了一张脸！因为即使是正常人对威胁的敏感度也不同，我们给了所有志愿者一份调查问卷，用来测量他们的背景焦虑。与大多数人在新环境中感受到的短暂焦虑相反，背景焦虑反映了一种持久的基线特征。

不出所料，当我们向志愿者展示恐惧表情的照片时，我们发现杏仁核（大脑深处调节恐惧的结构）活动明显。令人惊讶的是，有意识和无意识的刺激会影响杏仁核的不同区域，而且对不同人的影响程度也不同，这取决于他们的基线焦虑程度。

对恐惧面孔的**无意识**感知激活了**基底外侧核**。人和老鼠一样，杏仁核的这个区域接收大部分传入的感觉信息，是杏仁核与大脑皮层沟通的主要途径。对恐惧面孔的无意识感知对基底外侧核的激活与一个人的背景焦虑程度成正比：背景焦虑程度越高，人的反应就越强烈。低背景焦虑的人根本没有反应。相比之下，对恐惧面孔的**有意识**感知激活了**杏仁核的背侧区域**，该区域包含中央核，而且不管一个人的背景焦虑如何，它都会这样做。杏仁核的中央核将信息发送到大脑中与觉醒和防御反应有关的自主神经系统的一部分。总之，无意识感知到的威胁对高背景焦虑者的影响不成比例，而有意识感知到的威胁激活了所有志愿者的战斗或逃跑反应。

我们还发现，对恐惧面孔的无意识和有意识的感知会激活杏仁核外的不同神经网络。**在这里，被无意识感知到的威胁激活的网络只被焦虑的志愿者招募。**令人惊讶的是，即使是无意识的感知也会调动大脑皮层内区域的参与。

因此，看到令人恐惧的刺激会激活两个不同的大脑系统，一个涉及有意识的，大概是自上而下的注意，另一个涉及无意识的，自下而上的注意，或警惕，就像一个突出的信号在外显和内隐记忆中的作用一样。

这些都是令人着迷的结果。首先，它们表明，在情感领域，就像在感知领域一样，**刺激可以被无意识和有意识地感知。**他们还支持克里克和科赫的观点，即在感知方面，大脑的不同区域与刺激的有意识的意识和无意识的意识相关。**其次，这些研究从生物学角度证实了无意识情绪的精神分析思想的重要性。**他们认为，当刺激留给想象时，焦虑的影响在大脑中发挥得最为显著，而不是当刺激被有意识地感知时。一旦有意识地面对惊恐面孔的图像，即使是焦虑的人也能准确地评估它是否真的构成威胁。

弗洛伊德提出，精神病理学起源于无意识层面的冲突，如果有意识地面对冲突的根源，它可以被调节，一个世纪之后，我们的成像研究表明，这种冲突过程可能在大脑中被调解。此外，志愿者的背景焦虑和他们无意识的神经过程之间的相关性的发现，从生物学上证实了弗洛伊德的观点，即无意识的心理过程是大脑信息处理系统的一部分。虽然弗洛伊德的思想已经存在了一百多年，但之前没有任何脑成像研究试图解释人们的行为和对世界的解释的差异是如何从他们无意识地处理情感的方式的差异中产生的。对恐惧的无意识感知点亮了杏仁核基底外侧核，与一个人的基线焦虑成正比，这一发现为诊断焦虑状态和评估各种药物和

心理治疗的效果提供了生物学标记。

在识别神经回路活动与对威胁的无意识和有意识感知之间的关系时，我们开始描绘出一种情绪——恐惧——的神经关联。这种描述很可能会引导我们对有意识地感知恐惧做出科学解释。这可能会让我们大致了解神经事件是如何引起进入我们意识的心理事件的。因此，在我离开精神分析转向心理生物学半个世纪之后，新的心理生物学已经准备好解决精神分析和意识的一些核心问题。

其中一个问题就是自由意志的本质。既然弗洛伊德发现了心灵决定论——我们的认知和情感生活的大部分都是无意识的——那么还有什么留给个人选择和行动自由的呢？

1983 年，旧金山加利福尼亚大学的本杰明·利贝特（Benjamin Libet）针对这个问题进行了一系列关键的实验。利贝特以德国神经学家汉斯·科恩胡贝尔的发现为出发点。在他的研究中，Kornhuber 要求志愿者移动他们的右手食指。然后，他用应变计测量了这种自主运动，同时通过颅骨上的电极记录了大脑的电活动。经过数百次试验，科恩胡伯发现，每次运动之前，大脑的电子记录中都会出现一个小光点，这是自由意志的火花！他把大脑中的这种电位称为“准备电位”，并发现它发生在自愿运动前 1 秒。

利贝特在 Kornhuber 的发现基础上做了一个实验，他要求志愿者在有冲动的时候举起手指。他在志愿者的头骨上放置了一个电极，并在志愿者抬起手指前 1 秒左右确认了准备电位。然后，他比较了这个人的这个动作所需的时间和准备电位的时间。令人惊讶的是，Libet 发现准备电位不是在一个人感觉到移动他或她的手指的冲动之后，而是在 200 毫秒之前出现的！因此，仅仅通过观察大脑的电活动，Libet 就可以在一个人真正意识到自己决定做某事之前预测他将要做什么。

这一发现引起了心灵哲学家的疑问：如果选择在我们决定行动之前就在大脑中决定了，那么自由意志在哪里呢？难道我们对行动的意愿只是一种幻觉，是对已经发生的事情事后的一种合理化吗？或者是自由做出的选择，但不是有意识的？如果是这样，行动中的选择，就像感知中的选择一样，可能反映了无意识推理的重要性。Libet 提出，发起一个自愿行动的过程发生在大脑的无意识部分，但就在行动开始之前，意识被招募来批准或否决该行动。在手指被举起前的 200 毫秒里，意识决定了手指是否移动。

无论决定和意识之间的延迟的原因是什么，Libet 的发现也提出了一个道德问题：一个人怎么能对无意识的决定负责呢？心理学家 Richard Gregory 和 Vilayanur Ramachandran 对这种观点进行了严格的限制。他们指出：“我们的意识可能没有自由意志，但它确实有自由意志。”认知神经科学发展的先驱之一、美国生物伦理委员会成员迈克尔·加扎尼加（Michael Gazzaniga）补充说：“大脑是自动的，但人是自由的。”人们不能仅仅通过观察大脑中的几个神经回路就推断出神经活动的总和。

中国较短的科学和文明

——李约瑟

中国科学的基本思想

我们现在要探讨的是一个对中国科学思想史至关重要的领域：中国博物学家从早期就形成的基本思想和理论。这门学科可以方便地分为三个部分：第一，五行学说；其次是阴阳两种基本力量；第三，科学的，或者更准确地说，是对《易经》这种复杂的象征结构的原始科学的使用。从现代研究的角度来看，我们的讨论将与早期西方汉学家不加批判地接受的中国传统有很大的不同，如果我们先看一下对科学思想最重要的一些汉语词汇的起源和发展，也会有很大的不同。

一些最重要的汉语科学词汇的起源

在任何科学发展之前，都必须有适当的词汇储备，现在，由于已经描述过的安阳甲骨文（第四章）的发现，以及商周铜器上的文字，有丰富的图形词汇可供研究。并不是所有的汉字都被识别出来了，但即便如此，也有足够的汉字可供选择，这些汉字有助于了解中国科学术语的起源。的确，古代文字可能对汉代原始科学倡导者的思想影响不大，但对我们来说，这些早期的表意文字本身就很有趣，因为它们有助于我们理解古代中国的科学方法。一些重要词汇的选录见所附表（表8），在表中，英文单词后面是汉语对应词的现代读音，然后是汉字，然后是它的古代形式，最后是对其古代意义的简要说明。

对这张表的研究表明，科学开端所必需的基本术语，正如人们所预料的那样，是根据表意文字的原理形成的。只有两个数字（20 和 21）可以被视为纯粹的几何符号；剩下的 78 幅是这样或那样的图画。其中一个仍然无法分析，至少有八个是借来的类似的发音词（同音异义词），三四个涉及抽象的概念，但除此之外，汉字描绘了自然物体，人体及其部位，以及人类活动。这可能是意料之中的，但值得注意的是，与技术和交流有关的角色是最多的。如果我们分析一个更大的样本，这种偏见可能会改变，但即使如此，我们也可以看到表意文字是如何从日常生活中发展出来的，后来可以获得相当抽象的含义。它们也展示了日常思考和实验的技术术语是如何产生的。

稳定的五行学说

我们现在可以考虑五行学说，因为它在汉代定型，并因此流传到后来的所有时代。有两个方面值得特别注意：枚举顺序和符号关联。

列举顺序是在各种古代和中世纪的主题介绍中命名的五种元素的顺序。它们并不总是相同的，但最重要的四个是：

演化序：水、火、木、金、土。

相生序：木、火、土、金、水。

相克序：木、金、火、水、土。

现代序：金、木、水、火、土。

宇宙演化秩序是元素被认为是形成的秩序。它从水开始，从而呼应了中国著作中反复强调的水是原始元素。相互生产秩序是一种要素相互产生的秩序；它以正确的顺序给出了季节，从春天的木和冬天的水开始（地球对应于夏季和秋季之间的一个月）。

相互征服秩序描述了一个系列，在这个系列中，每个元素都应该征服它的前身。从某种意义上说，这是最受尊敬的秩序，因为它与祖炎本人的教学有关。它建立在一系列逻辑观念的基础上，这些观念的基础是日常的科学事实：例如，木征服土，大概是因为当它以铁锹的形式出现时，它可以挖出泥土。再一次，金战胜了木，因为它可以切割和雕刻木头；火可以征服金，因为它可以熔化甚至蒸发金属；水能战胜火，因为水能熄灭火；最后，土征服了水，因为它可以筑坝并控制水——这是对那些重视灌溉和水利工程的人来说非常自然的比喻。从政治角度来看，这个顺序也被认为是重要的；它是作为对历史进程的一种解释而提出的，其含义是它将继续适用于未来，因此对预测是有用的。最后是“现代”秩序，意义模糊。然而，正是这个顺序在中国口语中流传下来，每个人仍然学习“金、木、水、火、土”，甚至在童谣中也是如此。

在《点票令》中有两个有趣的次要原则，它们与变化率有关；这就是控制和屏蔽原理。控制原则完全是从共同征服秩序中衍生出来的，根据它，一个给定的征服过程被称为由征服征服者的因素控制。例如，金征服了木，但火控制了过程；火征服金，但水控制过程，等等。这个思想是用来计算命运的，但是中国人在这个思想中所遵循的是一种完全合乎逻辑的思维方式，这种思维方式在我们这个时代已经被发现适用于实验科学的许多领域。例如，在动物物种的生态平衡中，按顺序相互捕食的各种形式的丰度取决于它们的大小和习性；例如，增加一种特定鸟类的数量，将间接有利于绿蝇的数量，因为减少了对瓢虫（“征服”）的影响，瓢虫吃绿蝇，但自己也被绿蝇吃掉（“控制”）。

中国的控制原则当然可以受到批评，因为作为一个循环过程，它意味着什么都不会发生，因为每个元素总是会抑制另一个元素。但中国人从不认为所有的元素都同时有效地出现在每个地方，所以批评纯粹是形式上的。当涉及到相生序（木、火、土、金、水）和相克序（木、金、火、水、土）时，则控制因素总是被征服因素所产生的因素，系统可以继续运行。例如，木在金控制的过程中征服了土，但是金是土的产物，所以必然会有一个反馈。这一思想可能会产生社会影响，因为儒家采用它来证明儿子有权报复父亲的敌人。但它的主要内涵是科学的。在古代炼金术中，有这样一种观念，即某物作用于他物而使他物毁灭，但在这样做的过程中，它本身也受到影响，从而使它自己发生变化或毁灭。今天的化学家也很熟悉，化学反应因为反应产物的积累而停止就是一个例子。生物化学有更能说明问题的例子，例如，我们肌肉中的一种可收缩的蛋白质，肌球蛋白，本身就是一种腺苷三磷酸酶，它能分解给肌肉带来能量的物质。

第二个原则，掩蔽原则，依赖于共同生产秩序和共同征服秩序。它指的是一个变化过程被另一个过程掩盖，这个过程创造的物质比被破坏的要多，或者使它更快。因此，木毁灭（征服）土，但火掩盖了这个过程，因为火会以比木毁灭土更快的速度毁灭木和土（灰烬）。与控制原则一样，现代生物学和生态学也有类似的例子，比如挪威大型食肉动物吞食旅鼠的行为被其他因素掩盖了，这些因素极大地增加了旅鼠的数量。

值得注意的是，在这两个原则中都隐藏着很强的定量因素：结论取决于数量、

速度和速率。这也许是由于计数令本身所引起的问题，因为我们应该意识到，早期的中国思想家并不满足于计数令。这一点可以在《墨经》中看到，其中有一段后期墨家对自然主义者的批评被保留了下来：“五行不是永远互相战胜的。”

这五种是金、水、土、木、火。如果有足够的火，火自然会融化金属。或者，如果有足够的金属，金属可以把燃烧的火碾成灰烬。金属能储存水[但不产生水]。火附着在木头上[但不是由木头产生的]。这种对祖衍互争论的攻击，可能是对他对墨家逻辑研究的傲慢态度的一种反驳，但同样有趣的是，它证明了墨家科学思维中的定量方法。

符号相关性

五行逐渐与宇宙中每一种可以想象到的、可以被分为五类的事物联系在一起。表 9 列出了其中的一些，但必须认识到这只是一个选择。

如果把这些相关性分成不同的组，就像在绘制表格时所做的那样，仔细分析就会发现，不同的组似乎是由不同的学者群体编制的。例如，天文小组可以追溯到公元前 9 世纪，尽管它似乎显示了公元前 4 世纪伟大的天文学家菅 Tê 的确切证据，以及可能是占星家菅仲柯的手，他是同一个家族，但三个世纪之后。然后是自然主义团体与祖言有关，其中阴阳组和人类心理生理功能组在这里给出，最后是两个特别感兴趣的科学团体，一个主要是农业，一个主要是医学。关于农业组的一个引人注目的问题是，他们没有在他们的谷物清单中提到大米，尽管它确实出现在一个医疗组中（这里没有给出）；由此推测，中国北方或更早的时候出现了农业相关性。事实上，医学哲学家从很早的时候就有一个六倍的系列来补充或取代科学思想家的五倍系列。因此，有六个，而不是五个，体内的阳器官和六个阴器官，这种分类的许多其他例子可以在医学上找到。也许它起源于巴比伦，在那里，六十数而不是十数占主导地位；也许这五重顺序更符合中国本土。

正如我们可以想象的那样，这些相关性遭到了批评，有时甚至是严厉的批评，因为它们导致了許多荒谬的事情，正如公元一世纪的王仲鸿所指出的那样：

“[周期]符号阴对应于木，它的合适动物是老虎。Hsü 对应地球，地球上的动物是狗。周和卫同样对应地球，周有牛，卫有羊。现在森林征服了地球，因此老虎战胜了狗、牛和羊。再次，海与水，它的动物是野猪。Ssu 与火同在，蛇是它的动物。子也表示水，它的动物是老鼠。相反，‘吴’与火相对应，它的动物表现是马。水能胜火，所以野猪能吃蛇。马吃老鼠，肚子就胀痛。[所以运行通常的论点。]

“然而，当我们更深入地研究这个问题时，我们发现，事实上，动物们经常没有像这些理论所认为的那样，压倒彼此。马与‘火’有关，鼠与‘水’有关。如果水真的能征服火，那么老鼠通常会攻击马并把它们赶走，这就更有说服力了。然后公鸡与‘玉’（金属）相连，野兔与‘毛’（木头）相连。如果金属真的能征服木头，为什么公鸡不吃兔子呢？”

王仲鸿的这种攻击是中国怀疑论传统的一部分，这将在下一章中讨论，但它被引用在这里是因为它不是不典型的那种出现在相关性以及整个五行理论上的批评。然而，尽管有这样的批评，这些关联在一开始似乎对中国的科学思想是有帮助的。它们当然不比主宰欧洲中世纪思想的希腊元素理论更糟，只有当它们变得过于复杂和幻想，远离对自然的观察时，它们才真正有害。沈括的《梦溪笔谈》就是一个很好的例子。沈括的著作出版于公元 1086 年，他是中国历史上涉世最

广的思想家之一，因此他对这一理论的运用引起了人们极大的兴趣。

在新州的赤山地区，有一股苦泉在峡谷底部形成了一条小溪。当它的水被加热时，它变成了棕矾（苦明矾，字面意思是“胆明矾”——可能是不纯的硫酸铜）。当它被加热时，就会产生铜。如果这种“明矾”在铁锅里加热很长时间，锅就会变成铜锅。因此，水可以转化为金属——这是一种非同寻常的物质变化。

“根据《黄帝内经》，天上有五行，地上也有五行。地球的气，在天空中，是湿气。地球（我们知道）产生金属和石头（如山上的矿石），在这里我们看到水也可以产生金属和石头。因此，这些例子证明了《黄帝内经》是正确的。”

当然，沈括对化学变化并没有明确的认识，因为当时他和其他人一样，被五行学说所支配。在同一时期和更晚的欧洲，一直到 17 世纪，沈括所描述的化学反应被视为嬗变的证据。事实上，他的描述表明他是一个优秀的观察者，他的描述可能是任何语言中第一个记录金属铜被铁沉淀，随后形成铁的硫酸盐。

命理学与科学思维

在我们离开五行体系之前，必须提到中国自然主义思维的两个重要例子。这两件事都载于公元 85 年至 105 年间编纂的《大台礼记》中，尽管所引用的引文可能是公元前 2 世纪的。第一段是：“Sanchū李问曾子曰：‘曰天圆地方，是真的吗？’”

曾子说：“上天所生的，头在上面；地球所生的那颗行星的头在它的下面。前者叫圆，后者叫方。如果天堂真的是圆的，地球真的是方的，那么地球的四个角就不会被完全覆盖。走近一点，我告诉你我从孔子那里学到了什么。他说天道是圆的，地道是方的。方形暗，圆形亮。明亮的放射出光，所以外面有光。黑暗吸收光，因此在它里面有光。因此，火和太阳有一个外部的亮度，而金属和水有一个内部的亮度。辐射的是主动的，吸收辐射的是被动的。因此，阳是活跃的，阴是被动的。

“阳的精粹叫做“神”。阴的生发精华被称为灵。神灵是万物之根；礼乐、仁义的祖先；是善与恶的制造者，也是社会秩序与混乱的制造者。

“当阴阳精确地保持在适当的位置时，就会有安静与和平……”

有毛的动物在来到这个世界之前就长出了皮毛，有羽毛的动物同样是先长出了羽毛。两者都是由阳的力量所生。带着甲壳和鳞片的动物也跟着来到这个世界；他们是由阴的力量所生。只有人赤裸裸地来到这个世界；（这是因为）他有阴阳两方面的精华（平衡）。

“有毛动物的精华（或最具代表性的例子）是独角兽，有羽毛的动物是凤凰（或野鸡）；甲壳类动物是乌龟，有鳞类动物是龙。赤身裸体的人就是圣人。”

这篇文章作为下一篇文章的导言，尤其重要的是，它指出圣人是裸体动物的主要代表；这确实是中国思想拒绝将人与自然、个人与社会分开的一个极好的例子。但它也包含了一种观点，这种观点即使是现代进化论者也不能比它更好，即在最低级生物中起作用的基本力量与那些在更高层次上发展出人类社会和伦理生活的最高表现的基本力量是相同的。第二段几乎完全是生物学上的：

孔子说：“变化之道造就了人、鸟、兽和各种爬行的动物，有独居的，有成对的，有飞翔的，有在地上奔跑的。没有人知道他们每个人对事物的看法。只有深究道之德，才能把握道之德的基础和本源。

“天堂是 1，地球是 2，人类是 3。3×3 等于 9。9×9 等于 81。1 掌管太阳。

太阳的数字是 10。因此，人在发育的第 10 个月出生。

“ 8×9 等于 72。这里偶数跟在奇数后面。奇数支配时间。时间支配着月亮。月亮掌管马。因此，这匹马的妊娠期为 11 个月。

“ 7×9 等于 63。3 统治大熊[犁或北斗星]。这个星座掌管着狗。因此这只狗只在 3 个月后就出生了……

“现在鸟和鱼出生在阴的标志下，但他们属于阳。这就是为什么鸟和鱼都会下蛋。鱼在水里游，鸟在云里飞。但在冬天，燕子和椋鸟会下海变成贻贝。

“不同种类的动物的习性大不相同。因此，蚕吃而不喝，蝉喝而不吃，而短暂的蚊蚋和苍蝇都不吃。有鳞和甲壳的动物夏天进食，冬天冬眠。有喙的动物（鸟类）在身体上有 8 个开口来产卵。咀嚼（哺乳动物）的动物身体有 9 个开口，在子宫里哺育它们的后代。”

在这里我们看到，自然主义者，或者是写这篇文章的人，不仅是自然的密切观察者，而且他们的观察也符合数字神秘主义的框架。这种神秘主义的痕迹在符号联系表中已经很明显了（表 9，第 154 - 5 页），而且它似乎在很长一段时间内发挥了吸引力，因为虽然它开始于公元前三世纪，甚至更早一点，但它一直活跃到公元十二世纪。我们在评价中国的科学思想时必须考虑到这一点。

两种基本力的理论

到目前为止，关于五行及其象征关系的讨论多于关于阴阳两种基本力量的讨论。这仅仅是因为我们对五行的了解多于对两种力量的了解，而这两种力量并没有出现在现存的祖岩的碎片中，尽管他的学派被称为阴阳家，在后来的书中对它们的讨论通常被归功于他。然而，毫无疑问，这些术语在哲学上的使用始于公元前四世纪初，而在较早的文本中使用它们的段落是后来的内插。

然而，关于阴阳的一些事实是清楚的。例如，我们知道汉字“阴”和“阳”与“光”和“暗”有关。阴包括山（阴影）和云的图形，阳有倾斜的太阳光线或在阳光下飘扬的旗帜（尽管后者可能代表某人拿着一个穿孔的玉盘，这是天堂的象征，可能是所有天文仪器中最古老的）。这些与这些术语的使用方式非常吻合，例如，在古代民歌集《诗经》中。在这里，阴唤起了寒冷、云、雨、女性的概念，唤起了里面的东西，黑暗得像地下的房间，那里保存着夏天用的冰。另一方面，阳唤起了阳光和温暖，春夏季节，男性和光明的概念。阴阳也有更多的事实意义：阴指山或山谷的阴面，阳指阳面。

作为哲学术语，它们的明确用法出现在公元前三世纪的经典《易经》的附录中，这将在后面更详细地讨论。这里有一些说法，意思是说宇宙中只有两种基本的力量或作用，时而一种占主导地位，时而另一种，呈波浪状连续存在。还有其他早期提到的。例如，公元前 4 世纪的《墨子》就有两处参考文献，其中一处说，每一个生物都享有天地的自然和阴阳的和谐，另一处说，圣贤国王按时带来了阴阳、雨露。然后在另一个世纪的著作《道德经》中，它说生物被阴包围着，被阳包围着，它们生命过程的和谐取决于这两种力量的和谐。

当我们向前推进到公元前二世纪，汉朝儒家时代，我们会遇到一些更具体的评论。用董仲舒的话来说：

“天有阴阳，人也有阴阳。当天地的阴气开始统治时，人的阴气也会起带头作用。或者，如果人的阴气开始进步，天地的阴气也必然相应地上升。他们的道是一体的。那些清楚这一点的人[知道]，如果下雨，那么阴必须被激活，它的影

响开始发挥作用。要想止住雨，就必须激活阳，发挥它的作用。”

我们很快就会看到，《易经》包含了一些至关重要的材料，使我们对科学思想的观念有了更深入的了解，但由于阴阳是文本及其众多附录中如此基本的一部分，所以最好在这里考虑一下这方面的问题。《易经》包含一系列 64 个象征性的卦，每个卦由六条线组成，或完整或破碎，分别对应阳和阴。每一个卦都主要是阴或阳，通过一个明智的安排，可以发现所有 64 个卦都以这样一种方式产生交替的阴和阳。图 23 给出了一个示例，显示了阳如何分成两个，然后是四个，然后是八个，以此类推，直到存在 64 个交替。当然，这个过程不必就此停止；64 位可以扩展到 128 位，因此永无止境。阴和阳的组成部分永远不会完全分离，但在每个阶段，在任何给定的片段中，只有一个表现出来。这在科学上引起了相当大的兴趣，因为两个因素的分裂和再分裂，一个是显性的，一个是隐性的，在现代科学思维中有相似之处，比如遗传学。因此，这里我们又一次看到了五行相互作用的相似之处——它们通向的思想道路，只有在我们自己的时代才被认为对自然有有效的应用。简而言之，现代科学所看到的世界结构的某些要素，在早期中国哲学家的思辨中就已经有了预兆。

“联想”思维及其意义

我们现在已经到了这样一个阶段，我们可以看到中国人的科学思想涉及两个基本原则，即“两种力量”和“五行”。基本上，阴阳两种力量来源于人类自身性经验的消极和积极的投射，而五行被认为隐藏在每一种物质和每一个过程的背后。与这五行相关联或相互关联的是宇宙中的一切事物，它们都受五重排列的影响，尽管并非所有事物都能以这种方式分组，但存在一个更大的区域，包括所有其他可分类的事物，但它们只能按其他顺序排列（四、九、二十八等）。这种更广泛的方法产生了中国思想 - 数字神秘主义的另一个方面，其主要目的是将各种数字类别彼此联系起来。

大多数欧洲观察家认为这种数字神秘主义纯属迷信，并声称它阻碍了真正科学思想在中国的兴起。一些现代中国科学家也倾向于持同样的观点，但至少他们有借口说，他们必须与成千上万的中国传统学者打交道，这些学者没有受过任何现代科学观点的教育，仍然想象着中国古代的思想体系是一种可行的选择。但是我们不关心最后一个问题，不关心中国社会的现代化问题，中国社会本身是完全有能力实现现代化的；我们必须发现，古代和传统的思想体系是否仅仅是迷信，还是仅仅是各种原始思想；它是否包含产生它的文明的某些特征，如果包含，它是否对其他文明有积极的贡献。

对原始魔法的研究表明，这似乎是在两个“法则”的基础上运作的，一个是“相似法则”，根据“相似法则”，相似的东西会产生相似的东西；另一个是“传染法则”，根据“传染法则”，曾经接触过的东西，但不再接触了，仍然会继续相互作用。然而，这些只是隐藏在中国相关性或关联背后的那种“规律”，完全符合相似性和传染的概念。那么，我们马上就知道了他们庞大的相关清单背后的动机，这是神奇的；这一事实不必打扰我们，因为我们已经注意到，在早期，是魔法滋养了科学，最早的科学家可能就是魔术师。毕竟，尽管魔法以各种各样的方式从神秘的生活中产生，并从中汲取力量，但它随后会与普通人的生活融合在一起，为他服务。它倾向于具体的，事实的；它处理的是现实。的确，魔法的作用与技术、化学操作或工业中的作用是一样的；它是一种做事的艺术。不过，这

一点没有必要再多讲了，因为在关于道教的那一章中已经强调过了；然而，我们现在看到的是，由于这种对魔法的实际强调，中国人的符号关联正是魔术师实践他的艺术所需要的：它们给事物带来了秩序，并且在没有人知道在任何魔法或实验过程中什么会带来成功，什么不会的时候做到了这一点。在选择合适的条件时，必须有一些指导，而相关性提供了这种指导。如果一个人在用水做实验或施魔法，那么不穿红色（火的颜色）似乎是合乎逻辑的。这种联想可能比其他任何东西都更直观，但在当时，它们还能是什么呢？

现代学者称这种思维方式为“联想思维”或“协同思维”。它是一个通过联想和直觉运作的系统，它有自己的逻辑和自己的因果规律。它不仅是迷信，而且是一种按照自己的标准完全合理的思想形态，当然，它不同于现代科学的思维特征，现代科学强调的是外部原因。它不把自己的想法分成一系列的等级，而是以一种模式并排排列。事物之间的相互影响不是通过机械原因，而是通过一种感应效应。

在我们所讨论的中国思想中，关键词是秩序和格局；或者人们几乎可以说只有一个关键词，有机体，因为它们的《易经》中的符号关联、对应、卦象，都构成了一个巨大整体的一部分。事物以特定的方式表现并不一定是因为其他事物先前的行为，而主要是因为它们在不断变化的循环宇宙中的位置，即它们被赋予了内在的性质，这使得它们的这种行为对它们来说是自然的。如果他们不以这些特定的方式行事，他们就会失去自己的地位，他们与其他事物的关系（正是这些关系使他们成为现在的自己）就会改变，并将他们变成自己以外的东西。它们的存在依赖于整个世界有机体，它们以一种神秘的共鸣相互作用。

在公元前 2 世纪的《春秋珍珠串》中，董仲舒在“同属之物相辅相成”一章中说：

“如果水倒在平地上，它会避开干燥的部分，流向潮湿的部分。”如果把两根相同的柴火放在火上，后者会避开湿气而引燃干的那根。一切事物都排斥与自己不同的东西，而追随与自己相似的东西。因此，如果[两个]智是相似的，它们就会合并；如果音符一致，它们就会产生共鸣。这方面的实验证据非常清楚。试着给乐器调音。在一把琵琶上敲出的 kungnote 或 shang note 会被其他弦乐器的 kung 或 shang note 所回应。它们自己发声。没有什么奇迹，但五个音符是相互关联的；他们是根据数字而存在的[世界是根据数字而构成的]。

“同样，可爱的事物也会在可爱的事物中召唤其他事物；令人厌恶的事物会在令人厌恶的事物中召唤其他事物。这源于同类事物相互补充的反应方式——例如，如果一匹马发出呜呜声，另一匹马也发出呜呜声作为回应，如果一头牛发出呜呜声，另一头牛也发出呜呜声作为回应。

“一个伟大的统治者即将崛起，吉兆初现；当一个统治者将要被毁灭的时候，有邪恶的人在前面。事物确实相互召唤，喜欢来喜欢去，一条龙带来雨水，一把扇子赶走热气……

“不仅是阴阳两气按其范畴进退。甚至人类各种命运的起源，无论是好是坏，都以同样的方式表现。没有一件事的开始不依赖于它之前的某件事，它对它做出反应，因为它属于同一个范畴，（lei）。 ”

董仲舒使用的分类是宇宙中各种事物的能力，适合于五倍或其他一些数字分组。有趣的是，他以弦乐器的声学共振为例，因为对于那些对声波一无所知的人来说，这一定很有说服力，证明了他的观点，即宇宙中属于同一类的事物相互共鸣或相互激发。当然，他并不认为任何事物都会影响其他事物：他的人际关系是

一个紧密结合的宇宙的一部分，具有选择性的作用。的确，对董仲舒和他的后继者来说，因果关系是非常特殊的，因为它以一种分层的模式起作用，而不是随机的。没有什么是没有原因的，但也没有什么机械造成的。宇宙的有机体是这样的：一切事物都各有其位置，并按照一个永恒的戏剧性循环而行动；如果任何东西错过了它的提示，它就会停止存在。但从来没有这样失败过。在这里，正如中国思想的其他地方一样，文本表明，自然过程的规律性不是被视为法律政府，而是对社会生活的相互适应。不仅在人际关系中，而且在整个自然界中，存在着相互给予和接受，一种相互的礼貌，而不是无生命的力量和过程之间的冲突。通过妥协找到了解决办法。

如果所有这些都表达了中国世界图景的某些深刻的真理——我们有很多理由相信这一点——那么五重关联就是整个思想体系的抽象图表，汉代和后世的学者远没有陷入“原始思想”的泥淖。在真正的原始思维中，任何事物都可能是其他事物的原因：一切都是可信的；没有什么是不可能或荒谬的。如果一艘比平时多了一个漏斗的汽船停靠在一个小海港，然后发生了流行病，那么这艘汽船的出现就像其他任何事情一样，很可能被认为是原因。但是一旦事物被分类，就像它们在五重系统中一样，那么任何事物都不可能是其他事物的原因。

有了这些思想，我们就会得出这样的结论：从原始真理出发，有两种前进的道路。一种是一些希腊人所采用的方式：以这样一种方式来完善因果关系的概念，最终得到宇宙的机械解释，就像德谟克利特对他的原子所做的那样。另一种方法是将事物和事件的宇宙系统化，形成一种结构模式，这种模式制约了宇宙中不同部分的相互影响。在**希腊人的世界观**中，如果一个物质粒子在特定的时间占据了特定的位置，那是因为另一个粒子把它**推到了那里**。另一种观点认为，粒子的行为是由这样一个事实决定的，即**它与其他同样有反应的粒子一起出现在一个“力场”中**：这里的因果关系不是“反应”，而是“环境”。

希腊民主主义的方法可能是现代科学的必要前奏，但这并不意味着对中国观点的批评仅仅是迷信是正确的；远非如此。属于同一阶级的事物彼此产生共鸣或相互激励的想法在希腊也得到了呼应。例如，亚里士多德声称有三种“运动”：空间中的运动可以用物以类聚来解释；以同类滋养同类来成长；通过说喜欢影响喜欢来改变品质。这种观点，以及其他类似的观点，呼应了最早的希腊哲学家在自然现象中所说的“爱”和“恨”。但是这里要强调的一点是，当希腊思想作为一个整体离开了这些观点，走向机械的因果概念时，中国思想发展了有机的概念。认为中国人的自然观本质上是原始的，这是一个严重的错误。这是一个秩序井然的宇宙，既不受最高造物主——立法者的命令支配，也不受原子之间无情的碰撞支配，而是受意志的和谐支配，自发而有序，很像乡村舞蹈中的舞者，谁也不受法律的约束，也不受其他人的推动，而是自愿合作。如果月亮在某一时刻出现在某一星座中，它之所以出现，并不是因为有人命令它这样做，也不是因为它遵循某种规律，某种可以用数学来表达的孤立的原因。它这样做是因为这是宇宙有机体模式的本质，它应该这样做，没有其他原因。回顾漫长的时间之路，我们在民主主义观点的尽头看到牛顿的宇宙，但在另一边却找不到空虚；取而代之的是源于20世纪数学家和哲学家怀特黑德的现代“有机体哲学”，关于它，我们将在不久的将来作更多的论述。

中国传统的宇宙观和现代科学普遍接受的两种宇宙观之间的对比，在它们对数字的使用上表现得非常明显。当然，大量值得信赖的数学是在中国完成的，正如我们将看到的，但问题的关键是中国人将数字神秘主义或数字命理学与他们的

联想思维联系起来。数字命理学——这种东西在 19 世纪与大金字塔有关的幻想中得到了体现，在大金字塔中，通道的长度和交叉点被视为提供未来事件的日期——对现代科学头脑来说是完全令人厌恶的。在中国，它似乎也没有贡献多少科学价值，但同样重要的是，它似乎也没有产生任何真正的不良影响；事实上，可以说，即使是五行之间最夸张的“数字”关联，也以它们的方式是有效的。当然，它们在中国科学思想的发展中发挥了作用，就像在欧洲，对动物的轻罪进行法律审判等奢侈行为预示着自然法则的概念一样。

东西方对时间和空间的看法也不同。因为中国古代的时间不是一个纯粹抽象的量，而是分为不同的季节，每个季节都有自己的细分。然而，也有连续性，因为时间只向一个方向流动，在中国，从来没有人倾向于采用印度哲学家的循环往复的时间，即使他们的信仰是已知的。空间不是抽象的统一的東西，向四面八方延伸，而是被划分成独立的区域——南、北、东、西和中心——每个区域都与时间和五行相对应。东方与春天和森林不可分割地联系在一起，南方与夏天和火等等联系在一起。这个分隔的世界与伽利略和牛顿将几何空间和万有引力推广到整个宇宙之前的中世纪欧洲非常相似。

对于古代中国人来说，事情是相互联系的，而不是因果关系，正如公元前 2 世纪的董仲舒所说：

“自然的永恒规律是，相互对立的事物不可能同时产生。阴阳（例如）彼此平行运动，但不是沿着同一条路运动；它们彼此相遇，并轮流作为控制者操作。这就是他们的模式。”

宇宙是一个巨大的有机体，有时这个部分，有时那个部分，在任何时候都起主导作用，所有的部分都以一种完全自由的相互服务的方式合作。

在这样一个系统中，因果关系不像一连串的事件，而更像现代生物学家所说的哺乳动物的“内分泌管弦乐队”，尽管所有的内分泌腺体都在工作，但在任何时候都不容易找到哪一个因素在带头。我们应该清楚这一点；现代科学在考虑哺乳动物甚至人类自身的高级神经中枢等问题时，需要这样的概念。但撇开现代科学不提，很明显，因果关系的概念——继承的概念从属于相互依存的概念——主导了中国人的思想。

为什么科学革命没有在中国发生——或者说没有发生？

——内森·西文

这篇文章提出了两个结论。首先，**科学革命为什么没有在中国发生，这不是历史研究可以回答的问题**。当你找到导致人们问这个问题的谬误时，它就变成了一个有用的问题。其次，按照科学史家使用的标准，18 世纪的中国确实发生了一场科学革命。然而，它并没有产生我们认为科学革命会产生的社会后果。最明显的结论是，这些假设是错误的。

任何研究过近一代人的科学、技术和医学史的人都会意识到，古代世界所有伟大的文明都有自己复杂的传统。中国的传统，因为它们被记录得如此完整，而且因为它们比伊斯兰和印度的传统更不受欧洲的影响，如果我们想要比较不同文化环境下对自然的理解是如何变化的，那么中国的传统就特别迷人。从 20 世纪 20 年代开始，中国和日本的历史学家解释了中国人所知道和所做的事情。20 世纪 50 年代，我的英国同事李约瑟（Joseph Needham）开始呼吁西方受过教育的人注意他们的工作，并鼓励他们补充。到目前为止，对中国的研究是科学史上最繁荣的领域之一，在中国、日本、欧洲、美国和其他地方大约有一千名专家。

当人们意识到我们的发现时，他们通常会开始想知道为什么现代科学的过渡首先发生在它所在的地方。1969 年，李约瑟（Joseph Needham）给出了“科学革命问题”的经典表述：为什么现代科学，即对自然假设的数学化，及其对先进技术的所有影响，只在伽利略时代的西方迅速崛起？**“为什么近代科学没有在中国文明中发展起来……”**他补充了第二个问题，使这个更大的问题变得更有兴趣：**“为什么在公元前 1 世纪到公元 15 世纪之间，中国文明比西方文明更有效地将人类的自然知识应用于人类的实际需求？”**

在那 1500 年里，欧洲文明首先经历了缓慢的全面崩溃，然后更缓慢地从中恢复。很明显，我们应该把目光投向欧亚大陆的西端，而不是远东，以解释欧洲在 1400 年的时间里在技术上的劣势。但是，关于第二个问题，关于中国在许多世纪以来的优越地位，还有其他的疑问需要表达。应用于人类需要的自然知识不是我们通常所说的中国科学。

早期技术的成功或失败并不取决于它在多大程度上应用了早期科学的见解。总的来说，**在中国，从事科学研究的是少数受过教育的人，他们把自己的理解通过书籍传递下来**。技术是手工艺和制造技能的问题，工匠私下传授给他们的孩子和学徒。**大多数这样的工匠读不懂科学家的书。他们只能依靠自己的实践知识和审美知识**。我们只能从他们留下的文物和有文化的人的零星书面证词中重建他们的知识是什么样的。在过去的几个世纪里，读写能力在精英阶层之外广泛传播，但这并没有导致大量使用书籍来教授工艺技能。

将一种文明的所有科学和工程活动与另一种文明的所有科学和工程活动进行单一的概括，所掩盖的比它所揭示的要多，因为只有现代，这些不同类型的工作才紧密联系在一起。的确，从罗马时代末期到 1400 年左右，一个访问欧洲的中国人会发现欧洲在许多方面技术落后。另一方面，**在大约 1850 年之前，中国和欧洲的医疗实践可能没有太多的选择**（解剖学和生理学的知识在更早的时候几乎没有任何治疗用途）。**中国的数学天文学在 1300 年左右达到了它的最后一**

个高峰，但它在预测准确度方面一直没有达到托勒密在 1100 年前所掌握的一般水平。

我不需要详述这类比较。它们根本没有告诉我们，我们可以期望从一种文化或另一种文化中学到什么。毕竟，没有人会因为中国的炼金术文献中含有更丰富的化学知识，就建议我们停止研究欧洲的炼金术传统。重要的是，我们现在能够开始比较基于不同文明的思想和社会安排的几种强大的科学和技术传统。如果我们想了解科学与文化、科学与社会、科学与政治、科学与个人意识之间的历史和全球的一般关系，所有这些都必须加以研究。如果没有这种比较的理解，我们将继续囿于自己狭隘的观点。历史学家有更紧迫的工作要做，而不是试图证明其他所有文化都不如他们专门研究的文化。

作为研究中国经验如何能够提供关于早期科学一般特征的线索的一个例子，让我简要地谈谈中国科学和工程历史上最全能的人物之一沈括（1031 - 1095）的案例。举几个例子，他以第一个讨论磁偏角和活字印刷术而闻名，他是中国传统数学中唯一应用排列法的人，他提出了月球和行星位置的日记录，他是东亚地区第一个提出纯阳历的人，他解释了泥沙沉积和侵蚀形成陆地的过程，他还写了一本关于医学理论和实践的重要著作。除了他的技术活动外，他的著作还必须为研究中国早期考古、音乐、艺术和文学批评、经济理论和外交的每一位学生所参考。他早期以土地复垦专家的身份而闻名。他作为一名高级官员在 60 年代深入参与了几个世纪以来最重要的政治改革运动。

沈无限的好奇心和他那个时代的事务的参与使我对自己的教育产生了特殊的兴趣。一段时间以来，通过对不同历史时期和技术学科的一系列研究，我一直试图拼凑出一个大问题的答案，我发现这个问题非常有趣。在传统时代，中国科学家是如何向自己解释他们所做的事情的？换句话说，作为生活在社会中的有意识的个体，他们对自然的理解以及他们与自然的关系是怎样的？不同科学的见解是如何结合在一起形成这种理解的？我对中国早期的科学逐渐形成了一个大致概念，但我不明白他们的见解是如何结合起来形成这个大致理解的。我突然想到，我可能会很好地研究科学是如何在一个参与所有科学的人的头脑中融合在一起的。最明显的研究对象是沈括。

出现的模式并不出乎意料，但我不得不第一次对它进行评估。一个方面是，在从事科学研究的人的头脑中，所有科学之间似乎没有系统的联系。他们不像欧洲和伊斯兰教的学校和大学那样，被哲学所支配。他们有科学“事物”，但没有科学“学科”，没有一个单一的概念或词来概括所有这些。

在沈括的回忆录中，有一个分类叫做“现象背后的规律”。在这个标题下，他像其他许多人一样，将天文学、占星术、宇宙学和占卜的物理和数字方面组合在一起，它们以不同的方式折射出物理现实的模式。一个叫做“技术技能”的部分把医学、工程和数学（包括天文数学）放在一起，因为它们共享纯粹的工具体价值。在那里，它们与建筑和游戏并存。他在“奇怪事件”一章中阐述了他对植物化石起源的思考，对东亚龙卷风的第一次记录描述，他对彩虹形成的实验的描述，以及类似的珍宝，所有这些都与不太可能的道听途说和短暂的好奇心并列。

你可以看到，让我们认为沈括是一个科学家的东西，在他自己的人类知识体系中是广泛分散的。这个计划不是在科学层面上，而是在一个更普遍的层面上。在他的作品中，符合现代科学概念的材料与不符合现代科学概念的材料之间没有明确的界限。这种现代观念并不能帮助我们理解沈括的意思。

沈括在 11 世纪下半叶登上历史舞台时，正值社会流动性高涨，统治中国的

群体不断扩大。这些新人中有许多人对各种各样的实际事务感兴趣，而这些事务在以前是出身名门的人认为是他们不配做的。**官员被期望是能干和多才多艺的，并且可能会以财务大臣的身份进入帝国的最高职位。**当时，政府对官员的评价是基于底线——收税、开垦土地等方面的效率的定量衡量，而不是像以前那样完全基于美德、教养和正统。在闲暇时，沈括所属的这一大群人也可以自由地——当然是以业余的方式——放纵对宇宙万物的好奇心，包括以前只适合文员或工匠的技术问题。

只是在沈的一生之后，这种不断发展的业余理想才把哲学、艺术和文学作为适当的领域，作为普遍存在的领域，再一次把对天地的研究主要留给了纯粹的技术人员。在 11 世纪，沈只是众多博学多才中的一个，他们对科学和技术的兴趣，无论多么业余，都与他们各种各样的官方职责有关。沈的科学思想风格在思想上的一致性似乎只反映了他的公共事业的一致性，而这种风格正是在公共事业中形成的。换句话说，将他的研究兴趣联系在一起的，是他任命的公务员担负的极其多样化的责任和义务。

宫廷里的天文学家在计算以皇帝的名义发布的历法，医生在他出生的社会的任何地方治疗病人，炼金术士在传说中的老师常去的山上追寻古老的秘密，没有理由把他们的艺术联系在一起。哲学家们无法像亚里士多德和他的后继者在欧洲所做的那样，为所有这些学科**定义一个共同的学科**，因此**哲学家们实际上对这些特殊追求的发展没有影响。**

如果有人要在中国寻找科学的共同点，那就是像沈括这样的人，他掌握了所有的科学。但是**沈把他自己的理解结合在一起，并没有把中国的科学领域直接联系起来，而是把今天被认为是科学的东西和被称为非常迷信的东西紧密地联系在一起。**这种区别只会阻碍我们理解沈括的思想是如何联系起来的。当然，在给思想贴上标签之前，有必要先了解它。

我不得不说，我没能从沈括的思想中找到中国科学的内在统一性。作为补偿，我确实了解到一个问题的重要性，我以前没有足够的重视，那就是，科学与其他类型的知识的关系。

现在回到科学革命的问题。令人惊讶的是，这个问题——为什么中国人没有在科学革命上击败欧洲人？——这恰好是人们经常公开问的几个问题之一，**为什么历史上没有发生过什么。**这类似于为什么你的名字没有出现在今天报纸的第三版。它属于一个无穷无尽的问题，历史学家没有组织研究项目，因为他们没有直接的答案。它们转化为关于世界其他地方的问题。例如，与我们有关的问题可以翻译成：“17 世纪和 18 世纪西欧的科学革命是在什么情况下发生的？”

为什么人们一直在问为什么科学革命没有在中国发生，当他们知道不需要浪费时间解释为什么他们的名字没有出现在今天的报纸的第三版？因为**这个问题鼓励人们探索一个有趣的话题，并为思考这个话题提供了一些秩序。**换句话说，它是启发式的。启发式问题在调查开始时很有用。当我们有足够的理解来处理复杂的模式时，启发式问题往往会变得模糊，最终与逐渐清晰的事实相比，失去了它们的兴趣。

启发式问题就讲到这里。为什么我们倾向于更认真地对待这一次而不是一般的跑步？不知何故，科学革命的问题显得特别紧迫。

我认为，紧迫性之所以存在，是因为这个问题**依赖于某些西方的假设**，这些不可靠的假设让我们对质疑感到不舒服。最重要的是，我们通常认为**科学革命是每个人都应该经历的。**但是，在最近成为在暴力变革中生存的紧迫问题之前，我

们根本不清楚这是不是每个人都想要的。这一变化的原因之一是确实发生了的科学革命。事实上，到目前为止，我们在理解欧洲人最初是如何在一个又一个国家想要革命方面几乎没有取得任何进展，因为历史学家的注意力一直集中在它是如何发生的。

通常也会有一种感性的假设，认为**有可能发生科学革命的文明应该像西方发生的那样，导致西方出现的那种制度和社会变革。**

这些假设通常与这样一种信念有关，即欧洲文明——尤其是以现在的美国形式存在的文明——在某种程度上与现实联系在一起，这是其他文明无法做到的，而且它在世界财富和权力中的巨大份额来自于某种内在的适应性，即继承一直存在的地球。历史研究并没有表明，到1600年，欧洲在智力、想象力、才能或美德方面的集中程度是其他文明无法比拟的。它确实表明，**西方的特权地位来自于对自然的技术开发和对没有技术装备来保护自己的社会的政治开发的领先优势。**

最后，科学家们相信，由于科学已经如此迅速和彻底地国际化，它超越了欧洲的历史和哲学偏见，并且与它试图理解和操纵的自然一样普遍、客观和无价值。

在最后一个假设中（或者在自我概念中，我提到的所有信条都是其中的一部分），似乎是常识的东西，经不起深思熟虑的检验。现代科学在欧洲发展的特殊情况仍然是它的特点，不能被认为是普遍的。

中国的科学没有思想与身体、客观与主观、甚至波与粒子的二分法。在西方，前两者在柏拉图时代就已经在科学思想中根深蒂固了。伽利略、笛卡尔等人把它们带到了现代，把物理科学的领域与灵魂的领域区分开来，而灵魂的领域显然是像他们这样的世俗创新者所不能触及的。这些区别让早期的现代科学家声称对物质世界有权威，因为纯粹的自然知识不会与既定宗教的权威发生冲突，因此也不会威胁到既定宗教的权威。

科学和宗教早已学会共存，但我们仍然生活在精神和身体等之间的这些明显区别中。如果它们是欧洲的特点，并且是麻烦的永久根源，为什么现代科学还没有设法摆脱它们呢？要根除它们显然不是一件容易的事。在我们这样做之前，坦率地承认科学基础中存在一定的狭隘性是有道理的。数学方程可能是普遍的，但人类努力在自然知识的可能性之间的分配却不是。

科学和技术已经传播到世界各地，但从超越欧洲思维模式的意义上说，这**并没有使它们具有普遍性**。在一个又一个社会中，**新旧思想的碰撞都以失败告终**，只能通过社会变革和政治立法来解决。传统思想被简单地排除在教育系统之外（理由是它们落后、迷信、倒退、只适合下层阶级等），而这些教育系统是为了向新的技术和管理精英传授技术的价值以及理论和实践而创建的。

现代技术显然比传统社会的技术更强大；但是，在比我们普遍认识到的更大的程度上，它的力量是在应用于需要和期望方面表现出来的，这些需要和期望在它产生之前是不存在的。真正的普遍性需要现代技术与文化多样性共存并为之服务，而不是使其标准化而消失。

我认为，某种程度上独立于其社会和历史起源的普遍和无价值的现代科学的概念是一厢情愿的想法。即使是聪明的读者也很容易在这一点上误入歧途。那些打算向非科学家解释科学的人从来没有仔细地定义过产生这种概念的确定性的狭隘界限。

否认现代科学已经达到了可验证性、内在的一致性、对分类学的把握、对物理现象的精确解释和预测的准确性，这是其他任何活动都无法达到的，而且远远超出了早期科学的能力范围，这将是愚蠢的。然而，一旦在数学方程、类别矩阵

或精确定义的技术概念和模型中形成的定律或理论被翻译成特定文化的日常语言和一般话语，使这些显著特征成为可能的严谨性就会迅速消失。在所有关于科学的公开讨论，以及几乎所有的哲学讨论之前，都必须将其翻译成充满价值的类比和隐喻。它甚至早于大多数科学家对自己学科以外领域的思考。

在可能做到精确的狭隘抽象领域之外，价值观和主观判断开始影响社会中的每一项活动。例如，在当代中华人民共和国和美国，现代科学活动的性质存在着深刻的差异。它们反映了关于基础科学和应用科学之间的关系、两者与一般文化的关系、科学家在确定研究计划中的作用、规划和支持个人研究项目的程序、对科学工作将有助于实现的社会目标的期望、专业科学家的组织和地位、政治思想和科学知识之间的联系、以及国家资源在科学和其他优先事项之间，以及在各种科学活动之间的划分。某些方程和模型在两个社会之间是不变的，这是所有这些共识的一个因素，但无处不在的对生拇指也是如此。尽管存在这种不变性，一组给定的价值观将决定某些规律和假设可以进一步发展，而另一些规律和假设将被抛弃，除非它们属于极少数个人可以自行决定和自费探索的规律和假设。中美两国对心理学定义的巨大差异只是一个特别明显的例子，它影响着一个社会或另一个社会中特定理论的生死。

只要在科学的认知、实践、规范和社会维度之间的平衡存在如此巨大的变化，“国际”和“普遍”这样的词就不合适了。如果把它们单独应用于科学认识这一狭窄而严格的技术领域，它们确实是一种谦虚的主张。

人们也不能不加批判地接受这样一种观点，即现代科学在其社会和历史起源的每一个基本方面都是欧洲的。对于那些熟悉其他文化的科学的人来说，任何对早期科学史的描述，如果把自己基本上局限于欧亚大陆西端的发现和理解，都是不平衡的，并且在最基本的问题上是误导性的；如果它忽视了从新石器时代到现在不同文明之间不断的思想交流；如果没有充分考虑到欧洲人在1600年前对伊斯兰教、印度和中国科学的了解；或者忽视了外来技术和材料对欧洲人经历的影响。

历史推理的谬误

随着人们对中国古代科学技术水平的认识不断提高，一些学者提出了如瀑布般倾泻而下的假设，比如阻碍中国现代科学发展的因素，或者是西方独有的、使重大科学革命成为可能或进一步发展的特征。这些通常包含值得注意的历史推理的基本谬误。

在大约三分之二世纪的时间里，历史学家们一直认为，尽管清朝的思想家们像弗朗西斯·培根（Francis Bacon, 1561 - 1626）一样，将世界视为可观察的、唯名论的事实，但与培根不同的是，他们没有发展出科学的方法论。尽管这些论点带有实证主义的偏见，但他们甚至没有考虑培根的科学方法是否在当代科学的实践中幸存下来。事实上，它的起源很大程度上是经院学派的，关注的是分类法，而不是自然现象的理论，而且坚决不关心数学测量。在早期现代的主要尝试中，定义物理科学如何富有成效地进行可能是最乏味的，与培根关于科学活动的组织和意识形态的非常有影响力的信念形成鲜明对比。

因此，这种思维模式是中国人没有发展出一种科学方法的错误，这种方法后来在西方被证明是失败的。同样的习惯也以许多其他形式出现。公元前最后两个世纪的一项著名的天文学社会学研究解释了未能形成“统一的科学体系”的原因。

其中一个原因是，中国天文学家“对应用技术科学不感兴趣，例如，对开发可用于控制炮弹飞行或指挥船只安全横渡海洋的理论工具不感兴趣”。第一个注意到罗盘指针的偏角的文明就是这样。这就是大炮发明前一千多年的天文学。从约翰·菲洛波诺斯（约 530 年）到让·布里丹（约 1295 - 约 1358 年），以及巴黎学派的其他理论家，他们的研究为伽利略力学提供了许多基础，同样的缺乏兴趣也很突出。那么，在中国被认为是一个灾难性的缺陷，而在意大利却没有阻止——事实上，根据传统的智慧，它直接促成了——对运动物体的数学研究呢？

总的来说，这个谬论相当于声称，如果欧洲科学革命的一个重要方面不能在另一个文明中找到，那么整个基本变化的集合就不可能在那里发生。它背后的推理缺陷是武断的假设，从来没有明确的，从来没有讨论过，一个给定的环境等于一个必要条件。它几乎总是武断的，因为如果我们把真正的科学革命的史前史追溯到足够远的地方，在大多数情况下，我们可以找到欧洲没有这种情况的一个点。在这种情况下，凭什么可以认为这是一个必要条件？在大多数情况下，人们不需要追溯到很远的地方。这就是为什么，尽管这些必要条件在汉学家中流行，但在过去的一代中，从有鉴赏力的科学史家的装备中几乎消失了。

这一谬论的镜像可以在《周易》的一篇颇具影响力的评论中看到，《周易》是对科学的威慑。李约瑟在 1956 年是这样说的：

“虽然五行理论和阴阳理论对中国科学思想的发展是有利的，而不是有害的，但《易经》中精心设计的符号系统几乎从一开始就是一个有害的障碍。它诱使那些对自然感兴趣的人停留在根本不是解释的解释上。《易经》是一个将新奇事物归类的系统，然后就什么也不做了。”

将近二十年后，何丙郁向我们保证，如果中国科学家“对他们能从《易经》体系中找到的解释完全满意，他们就不会再去寻找他们科学研究的数学公式和实验验证”。从这个角度来看《易经》的体系，可以认为它是中国科学思想发展的制约因素之一。

在这些情况下，人们忍不住要用事实来反驳这些论点。尽管李约瑟的扩展讨论将《易经》主要视为一个静态的概念分类系统，但我们发现自然哲学家最常使用它来构建对变化的动态解释。在早期的中国科学家中，建立纯数学公式和实验验证的习惯也是徒劳的。如果不能证明这种趋势是稳定地发展到某一点，如果没有切实的证据表明没有《易经》他们会“走得更远”，那么就没有理由从现代生物学中引入抑制的比喻。

在这种情况下，“抑制因素”究竟是什么意思？想想其中一个经常被用来解释为什么中国在科学革命中未能击败欧洲的原因，尽管人们认为中国在科学革命中有一个较早的开端，即一个沉浸在书本中的学者官僚阶级占主导地位，他们面向过去，面向人类制度，而不是将自然作为美好生活的母体。但是在欧洲，在科学革命开始的时候，我们面对的是在大学里占主导地位的学生和大学教师，他们沉浸在书本中，面向过去，面向人类制度，而不是面向自然。他们没有阻止席卷欧洲的巨大变革。只有比我更有想象力的历史学家才能发誓，如果没有经院哲学，这些变化会发生得更快。

当涉及到想法或技术时，关于“抑制因素”的困惑同样令人困惑。我们不妨把欧几里得几何称为阻碍非欧几里得几何发展的因素，因为只要人们对它感到满意，他们就不会进入新的阶段。但有人能说，没有它，非欧几里得几何会发展得更快吗？令人遗憾的是，《易经》中非常有趣的技术语言，在系统地讲述比现代科学试图涵盖的更广泛的人类经验方面是如此强大，在任何人花时间去理解它的

所有维度之前，就被当作障碍而被抹掉了。

因此，第一个谬论将仅仅描述一种文化的早期状态或一种文化做事方式的東西混淆为原因或必要条件。在它的补充中，正如刚才给出的例子所示，后续状态的缺失与抑制剂相混淆。犯第二个谬论的人是在阻止从未发生过的增长。我所描述的两种困惑——指责早期的状态延迟了后来的状态，并利用早期现代事物的缺失来证明现代性后来是无法实现的——将连续性与停滞相混淆。它们是糟糕的历史，因为它们都是糟糕的推理。

我重申我之前讨论过的关于我们自己的假设，因为它们是这两种谬论的根源。他们把世界科学史变成了欧洲的成功和其他所有人的失败的传奇，或者充其量是内在的缺陷和短暂的成功，直到通过现代化实现救赎的到来。

把这两个谬论结合起来使用，很容易证明欧洲的突破不仅仅是一个历史事实，而是历史开始以来就不可避免的。马和马车是汽车发明的必要前提，还是延缓了汽车的发明？如果马车没有被发明出来，汽车会不会出现得早一些，这样人们就会对不够齐全的交通工具感到不满？如果我们在欧洲发现了马和马车，那么由于谬误 1，中国没有马和马车，就不可能发明类似的汽车。如果我们在中国发现一些类似的马和马车，我们应用谬误 2，使其成为一个抑制因素。因此，中世纪欧洲的动力理论，抽象和不关心应用，是惯性制导发展的一个阶段；如果思考物理问题的中国人对其应用同样不感兴趣，那么惯性制导就不可能起源于东亚。

这是一个万无一失的公式，可以将现代科学的力量和力量解读为历史的过去——但仅限于欧洲过去。对于其他文明的过去，检验标准总是对早期欧洲科学或现代科学的某些方面的预测或近似。为什么早期欧洲的科学不需要检验？因为人们认为，只有它才催生了科学革命。其他文明只有在欧洲传统的照耀下才能熠熠生辉。或者说，现代化的先知们是这么认为的。

因此，我断言，在科学革命问题的讨论中经常出现的谬论反映了一系列灾难性的假设，这些假设隐藏在这种论述明显的“启发式”兴趣和魅力之下。它们是灾难性的，因为它们向我们保证，用它们自己的术语来理解非西方文化的技术问题是没有意义的。我们现在发现，这些假设不仅在欧洲被接受，而且在某种程度上在每一个研究中国历史的国家都被接受。

为什么在一个近代之前文化几乎不受西方影响的非欧洲国家，知识分子要接受这种偏见呢？这也许是不可避免的，考虑到现代教育的建立（就像它最初在欧洲所做的那样）是通过教导对传统过去的拒绝，或者将其降格为可能用于培养民族主义的文化展览（并且，在国外度假的大众市场时代，用于吸引游客）。由于日本在现代教育体系及其产生的自我意识方面有一个多世纪的经验，西岛定生的敏锐分析并不令人惊讶：

“静态特征”假说认为，中国社会缺乏通过自身努力逐步形成新时代的能力。中国社会现代化发展滞后的观点特别强调了这一假设。最初，“静态特征”假说，连同“东方专制”假说，作为一种两极对立的概念，与西欧社会形成对比，是为了证实随着现代西欧社会的形成而产生的自我意识。也就是说，它是一种假设，作为承认现代西欧社会价值的一个因素……在我国，当我们从将现代自我的形成与西欧文明中对个人的平等评价等同起来的观点来看待中国社会时，我们被不加批判地引入了“静态性格”假说。这导致我们倾向于被一种颠倒的逻辑所控制，这种逻辑使得理解中国社会的目标等同于掌握其“静态特征”持续存在的起源甚至机制。

简言之，任何一开始就认为中国研究的首要问题是解释其落后的必然性的人，都不太可能质疑落后是否是不可避免的，也不太可能问，在中国的历史中是否没有我们可以借鉴的突出的成功模式，或者重新审视关于现代化的西方的假设，这些假设将欧洲历史组织为成功的高潮（当然，有挫折）。这增加了复杂性，从而使其魅力渐强，而其他文明则是静态的失败图景。因此，西岛所陈述的信念不仅证明和支持了日本对欧洲文明的尊重，也证明了日本在甲午战争前和战争期间在东亚的政治抱负。

当历史学家选择欧洲经验中适合与其他文明比较的方面时，另一个与科学革命问题有关的谬误经常出现。我指的是一个错误的假设，即人们可以根据偏好，只看智力因素，或只看社会经济因素，就能理解科学的进化。有些人认为科学主要是对隐藏在自然中的真理的智力探索。他们倾向于认为中国在现代科学方面未能击败英国是思想上的失败。另外一些人认为科学主要是一种社会或经济现象，他们倾向于把这次失败看作是中国社会或经济落后的问题。但这两种排他性的解释方法都不充分。智力因素和社会因素或内部因素和外部因素之间的区别并不存在于我们研究的事件中，而是存在于历史学家的心理习惯和职业联系中，存在于历史学家的劳动分工中。

科学革命的维度

科学革命及其后果跨越了历史专门化的界限。我来定义一下它的重要维度。

先从知识层面讲起，科学革命是我们对外部世界认识的一次转变。它改变了我们提出的问题，我们探索这些问题的方式，以及答案的性质。它首次确立了数和尺度对每一种物理现象的支配地位。

恩斯特·盖尔纳（Ernst Gellner）指出，欧洲科学革命在某种程度上不仅仅是向一种新的认识形式的飞跃。人们很自然地认为，在科学领域，关键的检验一直是：“这是真的吗？”但之前这只是几个同样重要的问题之一：它漂亮吗？它是传统的吗？它在道德上提高了吗？它会导致对善的感知吗？它是否符合所有真理都必须遵循的某种美学模式，就像开普勒之前的天文学家认为，天体轨道必须由完美的圆周运动组成？在科学中，对真理的检验取代了其中的大部分，并重新定义了其他的。这种对真理的要求首先是一种对事实的呼吁，这种事实在原则上是公开的、可证实的、道德中立的，不随观察者的社会环境而改变，不受魔术师、上帝或人类需求的干扰。但这门新科学不仅仅是诉诸于事实。它第一次创造了这样的事实，除了真理价值之外没有任何价值的知识。这是一个了不起的原创作品。它发生在哥白尼和拉普拉斯之间的欧洲，并从那时起传遍了世界。

17 世纪的中国却没有这样的飞跃。那里的人认为没有智慧、没有道德和审美意义的客观知识是怪诞的。

欧洲的科学革命也意味着重新定义自然哲学（即科学思想）与其他知识之间的联系。它意味着重新定义人类对过去和未来的取向。它意味着重新定义由什么权威来决定知识的用途。它意味着重新定义什么样的自然知识是社会需要的，什么样的自然知识是社会不需要的。它意味着重新定义知识应该如何与人的个性以及人与自然的积极关系联系起来。

伽利略和他的朋友及后继者不可能仅凭思想的力量就绕过教会的权威。这个信息在 1616 年由索引会议传达给伽利略，然后在 1633 年他被判处死刑时，这一信息被彻底终结了。但他和他的同伴们已经开始在旧体制之外建立一个新的知识

分子社区。一百年前，除了教会及其学术教育体系之外，还没有其他有组织的教育体系；那么就连伽利略去世时也可能是大主教。但在反宗教改革运动中，教会受到新教的威胁，开始为自己辩护，并痴迷于思想控制。对于最有才华、最有抱负的人来说，它自然变得不那么有吸引力了（当然，对于那些被吸引的人来说，空间也更小了）。各种各样的新职业正在出现。在他们当中，**科学家这一职业正在兴起**。直到 1800 年左右，这个专业才能够提供为专业职业支付薪水的结构。然而，从一开始，它就认为它的业余爱好者、信徒和狂热爱好者有独立的权威来制定自然规律。**事实上，科学家从学究那里夺走了这种权威，对学究来说，科学永远只能是信仰的合作者**。世俗的学习重塑了大学，取代了其他古老的机构，而经过几个世纪的进化和革命，它形成了一个技术机构。

对科学革命的诸多维度的概述意在表明，如果我们在考察中国的情况时只关注社会因素，或只关注智力因素，我们可能会错过多少。例如，直到最近，关心这个话题的人，包括我自己，都忽略了中国图景的一个重要部分，我现在将讨论这个问题。

中国的科学革命

按照传统的知识标准，中国在 17 世纪发生了自己的科学革命。如果我们思考为什么中国不能有一个，这是一个不小的兴趣点。

西方数学和数学天文学在 1600 年之后不久就被引入中国，**在欧洲那些允许读者接触到现代知识的地方，这种形式不久就会过时。几位中国学者迅速做出回应，开始重塑中国天文学的研究方式**。它们从根本上永久地改变了人们理解天体运动的方式。它们改变了人们对哪些概念、工具和方法最重要的认识，因此**几何和三角学在很大程度上取代了传统的数值或代数方法**。像行星的绝对自转和它与地球的相对距离这样的问题第一次变得重要起来。**中国的天文学家第一次开始相信数学模型可以解释和预测这些现象**。这些变化相当于天文学概念上的革命。

那场革命并没有像同一时期在欧洲发生的革命那样产生同样的紧张气氛。它并没有从根本上引起对自然思想的重新定位。它并没有对构成天文学问题的所有传统观念产生怀疑。它并没有限制人们对天文预测对最终理解自然以及人与自然的意义的看法。

事实上，与欧洲科学相遇的最显著的长期结果是中国传统天文学的复兴，被遗忘的方法的重新发现，这些方法与新思想结合起来再次被研究，并支持了所谓的新古典主义。外来天文著作中蕴含的新价值不是取代传统价值，而是用来更新传统价值。

为什么这一概念革命没有产生西方科学史家鼓励我们期待的社会后果？一旦中国人认识到欧洲的技术产生了更可靠的预测，旧天文学和新天文学就不再处于敌对的竞争状态。到 17 世纪中叶，欧洲文明已经没有明显的政治或社会影响，天文学也在靠自己的优势发展。

人们很容易把**西方天文学后来在中国扎根的过程**看作是**世界历史上非西方科学和欧洲科学最后一次主要的面对面对触**。到了 18 世纪，现代科学沿着帝国的海岸线跨越了国界，科学、文学、宗教等之间基于各自独特优点的竞争已经成为过去。即使是在 17 世纪中期，尽管明末的月食预测竞赛非常激烈，但事实仍然是，欧洲计算技术的胜利不是通过伟大头脑的共识，而是由于帝国决定将天文局的操作控制权移交给耶稣会传教士。

外国的技术虽然强大，但却没有给中国学生提供通往安全和名誉的其他途径，而公务员考试制度也没有留下任何余地。唯一能对耶稣会士的著作做出回应的天文学家是那些古老的知识精英。他们必须根据既定的理想来评价创新，他们认为个人有责任加强这些理想并将其传递给下一代。

科学革命和政治革命都发生在社会的边缘，但在 17 世纪的中国进行革命的人们却牢牢地依附于他们文化的主导价值。当时还没有天文学的学生愿意抛弃传统的价值观。即使周围的社会分崩离析，也没有一群知识分子被异化到足以追随他们所引领的思想。

西方天文学最具影响力的第一代冠军是长江下游地区的人，他们经历了 1640 年代的满族入侵。他们扮演了保皇派的传统角色，不愿为新朝代服务，尤其是他们眼中的非中国朝代。在他们看来已经分崩离析的社会里，他们拒绝为传统的职业而奋斗，他们被激励着用一生的时间来学习和教授新的数学和天文学，同时利用这些知识来掌握自己传统中被忽视的技术。他们拒绝清朝的现在，不是为了一个现代主义的未来，而是为了让明朝失去的事业再延续一代人。王锡山甚至避免使用秦国的相亲系统。尽管他具有高超的批判能力，但他与笛卡尔截然相反。在笛卡尔看来，每一种古老的制度都必须以清晰而独特的思想为新标准来证明自己的合理性，否则就会被认为是一种僵死的遗迹。

如果我们在中国寻找这样的人，对他们来说，科学不是达到保守目的的手段，对他们来说，经过证实的事实重于几千年来形成的价值观，那么直到 19 世纪晚期，我们才找到他们。然后，正是那些与旧社会没有利害关系的人成为了第一批现代科学家。到那时，外国人可以不受中国法律的约束，在炮舰的支持下，可以在中国为所欲为。他们建立了新的制度和新的职业路线，使他们能够吸引和教育那些没有其他前景的有才华的年轻人。我们不能再谈论新旧天文学的相遇。社会和政治的变化使老年人无事可做。随着时间的流逝，现代科学家很少意识到他们的国家有自己的科学传统。直到最近几代人，这种意识才变得普遍。

结论

我在试图理解中国科学的过程中感到沮丧，部分原因是人类活动的许多层面必须包含在如此漫长的时间和人类经验中。它们出现的部分原因是，欧洲科学革命似乎要求比其历史学家所坚持的更广泛和更深入的理解。一旦我们记住了科学变革的许多方面以及它们之间的复杂关系，科学革命只在它发生的时间和地点发生就不足为奇了。这个过程越来越像任何历史上的进化，它总是人类决定和行为的总和，有些是武断的，许多是错误的——换句话说，混过去。我们不需要诉诸命运、决定论、目的论、文化优越感、一种无情展开的内在逻辑，或者某种世界精神的隐藏运作。

看看这两场科学革命——一场我们自认为在欧洲非常熟悉，另一场在 17 世纪的中国并不如我们所预料的那样——就会发现，在我们准备好告诉世界为什么它不可能发生在其他时代或其他地方之前，我们还需要从各个方面了解每一场科学革命的具体情况。

我相信，在中国科学研究中出现的突破将完全是另一种突破。它们必须以一种完整的方式深入地理解从事科学和技术工作的人的情况：他们的技术思想如何与他们的其他思想联系起来；什么是科学团体。也就是说，他们形成了一种共识，认为某些现象是有问题的，某些类型的答案是合理的；这些社区是如何与社会其

他部分联系起来的；他们是如何得到支持的；知识分子对科学同行的责任与对社会的责任是如何调和的；科学服务于什么更大的目的，使它们的规律符合中国画的规律和道德行为的基本原则。

这些是我们对中国或欧洲知之甚少的问题。在比较科学史准备起飞之前，双方都需要进一步的研究和反思。我的预言是，到那时，我们将不再问为什么向现代科学的过渡没有首先发生在中国。

《梦溪笔谈》节录

——沈括

卷十八

技艺

304. 棋局都数

小说，唐僧一行曾算棋局都数，凡若干局尽之。予尝思之，此固易耳。但数多非世间名数可能言之。今略举大数，凡方二路，用四子，可变八千十一局；方三路，用九子，可变一万九千六百八十三局；方四路，用十六子，可变四千三百四万六千七百二十一局；方五路，用二十五子，可变八千四百七十二亿八千八百六十万九千四百四十三局；古法：十万为亿，十亿为兆，万兆为穰。算家以万万为亿，万万亿为兆，万万兆为垓。今但以算家数计之。方六路，用三十六子，可变十五兆九十四万六千三百五十二亿八千二百三万一千九百二十六局；方七路以上，数多无名可记。尽三百六十一路，大约连书万字四十三即是局之大数。万字四十三，最下万字即万局，第二是万万局，第三是万亿局，第四是一兆局，第五是万兆局，第六是万万兆，谓之一垓，第七是垓局，第八是万万垓，第九是万亿万万垓。此外无名可纪，但四十三次万倍乘之，即是都大数，零中数不与。

【译文】

304. 棋局总数

（某）笔记小说（记载）：唐代僧人一行曾计算（围棋）棋局的总数，（发现）大概某一定数（就能）算尽围棋的棋局。我曾思考这个数目，这个算法其实（是）容易的。然而数目大（得）并非世间的带单位数字能够表述它。

现在简略说明几个大数，（在棋盘上的）纵横各二路，使用四枚棋子，可以变出八十一一种棋局；纵横各三路，使用九枚棋子，可以变出一万九千六百八十三种棋局；纵横各四路，使用十六枚棋子，可以变出四千三百四万六千七百二十一一种棋局；纵横各五路，使用二十五枚棋子，可以变出八千四百七十二亿八千八百六十万九千四百四十三种棋局；古代的命数法：十万为亿，十亿为兆，万兆为穰。算学家（则）以万万为亿，万万亿为兆，万万兆为垓。现在只用算学家的命数法来计算棋局数字。纵横各六路，使用三十六枚棋子，可以变出十五兆九十四万六千三百五十二亿八千二百三万一千九百二十六种棋局；纵横各七路以上，（棋局的）数目太大没有单位可以表述，（如果）尽（用）三百六十一个位置，大约连写万字四十三次就是棋局的大概总数。四十三个万字，最后的万字代表万局，第二（个万字）代表万万局，第三（个万字）代表万亿局，第四（个万字）代表一兆局，第五（个万字）代表万兆局，第六（个万字）代表万万兆（局），称为一垓，第七（个万字）代表（万）垓局，第八（个万字）代表万万垓（局），第九

（个万字）代表万亿万万垓（局）。这个数目以外，就没有单位可以纪录，只是将万字乘四十三次，（所得的积）就是（全部棋局）总合的大概数，零头数不包括。

307. 活板印刷

板印书籍，唐人尚未盛为之。自冯瀛王始印五经，已后典籍，皆为板本。庆历中，有布衣毕昇，又为活板。其法用胶泥刻字，薄如钱唇，每字为一印，火烧令坚。先设一铁板，其上以松脂腊和纸灰之类冒之，欲印则以一铁范置铁板上，乃密布字印，满铁范为一板，持就火炆之，药稍镕，则以一平板按其面，则字平如砥。若止印三、二本，未为简易；若印数十百千本，则极为神速。常作二铁板，一板印刷，一板已自布字，此印者才毕，则第二板已具。更互用之，瞬息可就。每一字皆有数印，如之、也等字，每字有二十余印，以备一板内有重复者。不用则以纸贴之，每韵为一贴，木格贮之。有奇字素无备者，旋刻之，以草火烧，瞬息可成。不以木为之者，木理有疏密，沾水则高下不平，兼与药相粘，不可取，不若燔土，用讫再火令药镕，以手拂之，其印自落，殊不沾污。升死，其印为予群从所得，至今宝藏。

【译文】

307. 活板印刷

用雕板印刷书籍，唐代人还没有广泛地实行这种方法。自从冯道印刷五经开始，以后的经书要籍，（才）全部都是以雕板印刷的本子。庆历年间，有平民（名）毕昇（者），又创造了活字板（印刷术）。他的方法（是）使用胶泥刻制字形，（字形的突出部分）薄得像铜钱的边缘，每字都做成一个方印，用火烧（印）使（印）坚硬。先设置一块铁板，在板上面以松脂蜡掺和纸灰的药料涂满它，要印刷就将一个铁框放置在铁板上，（在其中）紧密地铺排字形方印，（排）满了铁框即为一板，拿着它到火上烤；（覆盖板上的）药料稍为镕化（时），则以（另）一块平板按压字印的上面，那么（整版）字（就会）平滑如磨刀石了。如果只是印刷三、两本，（这种方法）不算简单方便；（但）如果印刷数十、（数）百（或数）千本，（那）就极为神速（了）。通常准备两块铁板，一板（在）印刷（时），（另）一板已经在排字，这一板字方才（印）好，而第二板已经备好。更替轮互地运用两板，（工作）很快就可以完成。每一个字形都有数个印，好像之、也等字，每个字（更）有二十多个印，以备一板之内（的文字）有重复的。不使用（时）就以纸条标签这些字印，每一个韵部是一个标签，（并以）木格子贮存它们。遇有素来没有准备的冷僻字，立刻（就）制作字印，以草（生）火烧焙，转眼可以制成。（之所以）不用木材制作字印，（是因为）木材的纹理有疏（有）密，如果沾了水（字板）就会高低不平，而且还（会）与药料黏在一起，不可以拿下来。不像烧泥（做）的字印，用完再用火烤（它）使药料镕化，（然后）用手一拂，板上的字印就会自行掉落，完全不会沾上污垢。毕昇死（后），他的活字印被我的堂兄弟/子侄得到，到现在还珍重地收藏（着）。

卷二十一

异事异疾附

357. 虹

世传虹能入溪涧饮水，信然。熙宁中，予使契丹，至其极北黑水境永安山下卓帐。是时新雨霁，见虹下帐前涧中。予与同职扣涧观之，虹两头皆垂涧中。使人过涧，隔虹对立，相去数丈，中间如隔绡縠⁷。自西望东则见；盖夕虹也。立涧之东西望，则为日所铄，都无所覩。久之稍稍正东，逾山而去。次日行一程，又复见之。孙彦先云：「虹乃雨中日影也，日照雨则有之。」

【译文】

357. 虹

世人传说彩虹能够到溪涧中饮水，这事（是）真确的。熙宁年间，我出使契丹，到了它最北边的黑水境内永安山下支起了帐篷。当时刚好雨后初晴，看见彩虹下探到帐篷前的溪涧里。我与同事（一起）贴近溪涧观察它，（发现）彩虹的两首都垂入溪涧之中。着人渡过溪涧，（大家）隔着彩虹相对而立，相距数丈，中间好像隔了（一层）轻纱。（这道彩虹）从西向东观望就（可以）看到。因为（是）傍晚的彩虹啊。站在溪涧的东面向西观望，就会被太阳晃眼，（甚么）都没有看见。过了很久，（彩虹）慢慢（向）正东，逾越山岭而消失。第二天走了一段路，又再看见彩虹。孙彦先说：「彩虹是（下雨时）雨水中太阳的影子，太阳照着雨点就会有彩虹（出现）。」

卷二十四

杂志一

430. 海陆变迁

予奉使河北，遵太行而北，山崖之间，往往衔螺蚌壳及石子如鸟卵者，横亘石壁如带。此乃昔之海滨，今东距海已近千里。所谓大陆者，皆淤泥所湮耳。尧殛鯀于羽山，旧说在东海中，今乃在平陆。凡大河、漳水、滹沱、涿水、桑干之类，悉是浊流。今关、陕以西，水行地中，不减百余尺，其泥岁东流，皆为大陆之土，此理必然。

【译文】

430. 海陆变迁

我奉命任察访使（出访）河北，沿着太行山北（行），（发现）山崖之间，往往混衔螺蚌壳和像鸟卵一样的石头，横贯在石壁中仿如一条带子。这里属以前

的海滨，现在离开东面的大海已经接近千里。所谓的大陆，都（由）河水冲带下来的沙土所沉积（而成）。尧杀鲧于羽山，过去传说在东海之中，如今已在陆地上。黄河、漳河、滹沱河、拒马河、桑干河等等，都是（富含）泥沙的河流。现在潼关、陕西以西，水都行走于地表下，不少于一百尺之处。水中的沙泥年年向东流，全都成为大陆的泥土，这是理所当然。

437. 指南针

方家以磁石磨针锋，则能指南，然常微偏东，不全南也。水浮多荡摇。指爪及盂唇上皆可为之，运转尤速，但坚滑易坠，不若缕悬为最善。其法取新纆中独蠶缕，以芥子许蜡，缀于针腰，无风处悬之，则针常指南。其中有磨而指北者。予家指南、北者皆有之。磁石之指南，犹柏之指西，莫可原其理。

【译文】

437. 指南针

方术者以磁石摩擦针尖，就能（令针尖）指向南方，然而经常稍稍偏向东方，不全然指向正南方。（磁针）浮在水上常荡漾摇晃。指甲及碗边上都可以放置磁针，运转尤其快速，但是（这些物品的表面）又硬又滑（磁针）容易坠落，不如以丝线悬挂最好。其方法（是）抽取新丝中（由）单一个蚕茧（缫出来）的丝，以芥菜籽大小的蜡，（把丝）黏贴于针腰，在没有风的地方挂起它，则针尖经常指向南方。其中（也）有磨擦后（针尖）指向北方的。我家中指向南方、北方的针都有。磁石指向南方，好比松柏指向西方，不能够推原其中的道理。

第 G 章

希腊几何学

几何，曾经是数学的基石，在 c 章中被介绍。在这一章和接下来的两章中，我们将更深入地研究这个古老而美丽的学科。还有什么比从最优秀的几何学实践者，古典希腊的数学家开始更好的呢？

希腊几何学是人类智力的一项重大成就，既有数学上的，也有历史上的，既有实用上的，也有美学上的。它的黄金时代从公元前 600 年左右的米利都的泰勒斯一直延续到公元前 2 世纪埃拉托色尼、阿波罗尼乌斯和无与伦比的锡拉库扎的阿基米德。从那时起，一个不那么突出的“白银时代”一直持续到公元 300 年左右的帕普斯时代。这些人，还有其他许多人，把几何学从一种测量土地的实用方法（geo=earth, metria=measure）发展成了一大堆抽象的定理和结构，这些定理和结构由毫不妥协的逻辑规则串联在一起。希腊几何是西方文明中伟大的知识/艺术运动之一，在这个意义上与伊丽莎白戏剧或法国印象派有很多共同之处。和印象派画家一样，希腊几何学家也有共同的哲学和风格。尽管希腊画家和法国画家一样有许多不同的变体，但印象派绘画或希腊定理的更深层次、统一的特征是一目了然的。

这些特征是什么？历史学家伊沃·托马斯在他的《希腊数学著作》中，特别指出：（1）希腊人在证明定理时所采用的令人印象深刻的逻辑严谨性；（2）希腊数学的纯粹几何性质，而不是数字性质；（3）他们在提出和发展数学命题时的巧妙组织。

除了这些特征，我们还增加了另外两个特征。其一，他们承认几何是纯粹思维的一种无可超越的练习，既是理想的、非物质的，又是永恒的学科。柏拉图在《理想国》中指出，尽管几何学家绘制有形的图形来辅助他们的研究，但他们思考的不是这些图形，而是这些图形所代表的东西；因此，他们论证的对象是方形本身和直径本身，而不是他们所画的东西；同样，当他们塑造或描绘物体时，这些物体本身可能在阴影中或水中有形象，他们也把它们当作形象来使用，力图看到那些只有通过思维才能看到的绝对物体。当然，这种观点与柏拉图关于人类经验之外的理想存在的概念非常吻合，而几何的考虑无疑在他的哲学形成中发挥了作用。追求完美、逻辑和完全理性的希腊思想家可以把几何学看作这种理想的体现。

虽然没有那么惊天动地，但对希腊数学来说仍然很重要，那就是依赖圆规和直尺来进行几何构造。一方面，这是两种现成的工具，可以用来描绘柏拉图所说的有形图形。但在更抽象的意义上，这些工具将直线（通过直尺）和圆（通过圆规）奉为几何存在的关键。凭借理想直线的毫不动摇的精确和理想圆的完美对称，希腊人创造了他们的几何图形，并以此为基础，创造了他们的几何定理。虽然我们今天已经把数学扩展到线和圆的局限之外，但它们对希腊数学家来说是绝对至

高无上的。

毫无疑问，几何观念早于希腊人。例如，埃及和美索不达米亚的文明，用几何学来划分田地和建造金字塔，我们将在第一章中回到这个话题。但是，我们是在希腊人那里寻找第一个几何定理，第一个用严密的逻辑证明的命题。

根据传统，**希腊最早的数学家**，更不用说它最早的天文学家和哲学家，是**泰勒斯**（发音为 THAY - leez），他在爱琴海东部海岸长大，看着游泳的鲸鱼（发音为 WHAY - leez）。根据后来的评论员普罗克劳斯的说法，“泰勒斯是第一个去埃及并把这项研究带回希腊的人；他发现了许多命题，并向他的继任者揭示了许多其他命题的基本原理”。

传说是**泰勒斯首先证明了等腰三角形的底角是全等的，半圆上的任何角都是直角**（后者有时被称为泰勒斯定理）。不幸的是，我们只能依靠传说，因为他的实际证据很久以前就消失了。尽管如此，古人对他的评价还是很高，将他列为“古代七大智者”之一。（有传言说，另外六个是暴躁、快乐、大迷糊、打喷嚏、医生和害羞。）

随着泰勒斯的到来，希腊几何学开始崭露头角。要追溯它后来的发展，它的成功和失败，即使没有数不清的卷，也要占用无数章。因此，在这里，我们只讨论两个具体的几何问题：欧几里得是如何用一个塌陷的圆规做几何的，以及为什么伊壁鸠鲁学派的哲学家指责他比驴还不聪明。尽管这些选择看起来有点奇怪，但它们准确地反映了那个时代的数学气质。

我们从公元前 300 年左右亚历山大的**欧几里得**开始。尽管他写了许多数学论文，但他最被人记住的是**《几何原本》**，这是迄今为止希腊数学的系统发展。这部著作分为 13 卷，包含 465 个关于平面几何、立体几何和数论的命题。这本书被恰如其分地称为有史以来最伟大的数学教科书，从它出现在古希腊到今天，人们一直在研究、编辑和尊敬它。

《要素》之所以如此重要，是因为它**从基本原则到复杂结果的逻辑发展**。欧几里得在**第一卷的开头列出了 23 个定义**，这样**读者就能准确地知道他的术语是什么意思**。他把点引入为“没有部分的东西”（这是他不大有启发性的定义之一）；等边三角形是指“三条边相等”的三角形；而等腰三角形是指两条边相等的三角形

在定义了术语之后，欧几里得提出了五个公设，作为他的几何学的基础，这些公设是所有几何学的起点。这些都是没有证据或理由的；他们只是被接受而已。幸运的是，这种接受并不困难，因为这些假设在欧几里得的同时代人，甚至在我们今天的大多数人看来，都是完全无害的。对于本章的目的，我们只需要前三个：

1. 从任何一点到任何一点都可以画一条直线。
2. 在一条直线上连续地产生一条有限直线是可能的。
3. 描述一个有任何圆心和距离的圆是可能的。

这些看起来很简单，不言自明。前两点证明了在几何结构中使用未标记的直线是合理的，因为它们**允许我们用一条直线连接两点（假设 1），或者取一条现有的直线并扩展它（假设 2）。这正是直线的好处所在。第三个假设允许我们使用圆规**：画一个圆圈，以一个给定的点为圆心，以一个预定的长度为半径。因此，似乎前三个假设为几何工具的操作提供了逻辑支持。

但读者可能会回想起她或他自己的几何课，并回忆起用圆规进行的另一种操作：将长度从平面的一个部分转移到另一个部分。这很容易做到。我们把圆规的点放在要转移的线段的两端，把圆规锁在合适的位置，把它拿起来，牢牢地移动

它，然后把它放在想要的目的地。在许多几何结构中，这是一个既简单又必要的过程。

然而，欧几里得**并没有提出任何假设来证明以这种方式传递长度是合理的**。当我们期待一个允许这个程序的公理分配时，我们什么也找不到。虽然他的圆规可以画一个圆，但他没有明确地允许它被锁定位置和移动。**欧几里得的圆规因此被滑稽地称为“可折叠圆规”，一从纸上拿起来就会合上。**

这引发了一个严肃的逻辑问题：这位受人尊敬的希腊几何学家是否忘记了“长度转移”假设？这是欧几里得式的错误吗？

一点也不！我们马上就会看到，欧几里得不包括这样一个假设是有他的理由的——这些理由在逻辑上是合理的，本质上是**非常希腊的**。**这不是一个错误，而是他的几何敏锐度和组织能力的证明。**

有了公设，欧几里得引入了一些“共同概念”：更普遍、更少几何性质的自明陈述。例如，在这里，我们无须证明就接受“与同一事物相等的事物也彼此相等”，“如果等号加等号，则整体相等”，以及“整体大于部分”。很少有人会对这些声明吹毛求疵。

然后他准备跳入水中。要从一小部分定义、假设和普通概念中推导出大量的几何图形，从哪里开始呢？这是一种最初的挑战，会让数学家（和作家）停滞不前。但是，如果像中国人告诉我们的那样，千里之行始于足下，那么欧几里得的几何学之旅就始于一个等边三角形。《要素论》的第一个命题就是在给定的线段上构造这样一个图形。

这个论点很简单。从图 g. 1 中给定的线段 AB 开始，根据假设 3，我们构造一个圆心为 a，半径为 AB 的圆。接下来，以圆心 B 和半径 AB，我们用同样的假设来构造第二个圆。设 C 为圆弧交点（见关于存在这样一个交点的章节注释）。然后我们根据假设 1 画出直线 AC 和 BC，形成 $\triangle ABC$ 。在这个三角形中，AB 和 AC 的长度相同因为它们是第一个圆的半径；AB 和 BC 长度相同，因为它们是第二个圆的半径。因为相等的数彼此相等，这三条边是相等的。根据欧几里得的定义，三角形是等边的，证明是完整的。

重要的是要注意到，欧几里得在使用圆规进行这种构造时，从不需要把它固定地移动。每画出一条弧线后，圆规就会碎裂，丝毫不影响证明。

但在第一卷接下来的两个命题中，欧几里得展示了如何用**一个塌陷的圆规**来传递长度。这意味着长度转移是由已经在桌面上的假设隐含的。为此目的而提出一个新的假设是多余的包袱，欧几里得很敏锐，他意识到了这一点。

他的论证——在这里结合成一个单独的论证——相当优雅。假设我们有如图 G. 2 所示的线段 AB，并希望将其长度转移到从点 c 发出的线段 CD 上。首先，使用直尺并应用假设 1 绘制连接 B 和 c 的线段，然后在线段 BC 上构造等边三角形 BCE；当然，这种建构的正当性正是前面的命题所确立的。

然后我们进行一轮画圈。以 B 为圆心，以 AB 为半径，在 F 处画一个与 BE 相交的圆（当拿起圆规时，假设它塌陷）。以 E 为中心，以 EF 为半径，在 G 处画一个与 CE 相交的圆（同样，当我们将圆规从页面上抬起时，它可能会塌陷）。以 C 为圆心，以 CG 为半径，在 h 处画一个与 CD 相交的圆。所有这些构造都是欧几里得第三公设所允许的；它们都不需要坚硬的罗盘。

现在我们仅仅生成一串等式。

这条链的开头和结尾表明 $AB=CH$ 。因此，AB 的初始长度已按要求转移到段 CD 上，但我们没有任何地方必须拿起圆规并刚性地移动它。

这一证明令人惊讶的结论是，**看似需要一个不可折叠的圆规的结构实际上可以用一个可折叠的圆规来完成**。随着欧几里得几何学的发展，他可以像使用刚性圆规一样合理地将长度从一个地方转移到另一个地方，他的基本原理就是刚刚证明的定理。这么早、这么简单地解决了这个问题，他就可以在接下来的所有事情中自由地使用它。

在这一点上，一些读者可能会抑制打哈欠，认为整个事情都是无事生非。毕竟，每个人都知道文具店出售廉价的金属圆规，这些圆规是用来保持打开状态的，欧几里得当然不会因此而增加一个额外的假设。

我们相信，持这种立场的人还没有进入形式希腊几何学的精神。**首先，刚性圆规在现实世界的存在与理想概念的发展没有任何关系。其次，文具店还没有发明。第三，也是最关键的一点，欧几里得不会想在他的清单上增加一个不必要的假设。**为什么要假设一些可以从其他假设推导出来的东西呢？这会使他的假设不那么纯粹，不那么流线型，不那么完美，从而违反了美学原则，而不是数学原则。美学考虑对这位希腊数学家来说至关重要，这是显而易见的。在欧几里得的证明中，我们瞥见了艾弗·托马斯的意思，他写道：

伟大的希腊几何学家们的作品中完美的形式，这一点不能不给现代数学家留下深刻的印象。这种形式的完美，是创造了帕台农神庙和索福克勒斯戏剧的天才的另一种表现，同样可以在单个命题的证明中找到，也可以在将这些单独的命题整理成书中找到。也许在欧几里得的《几何原理》中，它达到了顶峰。

现在我们深入到第一卷，看看欧几里得天才的进一步证据。欧几里得在命题二和命题三中处理了可折叠罗盘后，又在命题四中证明了所谓边角边同余方案。也就是说（见图 G. 3），如果我们有三角形 ABC 和 DEF，其中 $AB=DE$ ， $AC=DF$ ，并且夹角 $\alpha = \delta$ ，那么三角形是全等的，这意味着它们具有完全相同的大小和形状。换句话说，如果把 $\triangle DEF$ 拿起来放在 $\triangle ABC$ 上面，两者就会完美地重合，直线对直线，角度对角度，点对点。

在欧几里得的手中，三角形同余是证明几何命题的关键。后来，他在命题 8 中建立了边 - 边 - 边（SSS）的附加同余模式，在命题 26 中建立了角 - 边 - 角（ASA）和角 - 角 - 边（AAS）的附加同余模式。

第一册的命题 5 证明了等腰三角形的底角是全等的。如前所述，这一结果归功于泰勒斯，但在《元素》中的证明可能是欧几里得自己的。虽然我们不会在这里给出它，但我们注意到它附有图 G. 4 中的图表。这种结构，让人联想到一座桥（至少对那些想象力丰富的人来说），可以解释为什么命题 5 被称为“桥”，即“驴的桥”。根据传统，笨蛋——也就是笨蛋——会找到超越他们的证明，因此无法跨越这条逻辑桥梁，进入元素的几何应许之地。

如果把成绩差的学生比作驴子，那么欧几里得自己也因为他的命题 20 的证明，在伊壁鸠鲁学派手中遭遇了类似的命运。为了了解其中的原因，我们必须先描述一下第一册中的几个定理。

在穿越了“笨人难过的桥”之后，欧几里得展示了**如何用圆规和直尺等分角和构造垂线**，并很快得出了第一卷中的一个关键定理，即通常所说的外角定理。这个结果，即命题 16，保证了**任何三角形的外角大于对角和内角中的任何一个**。也就是说（见图 G. 5），如果从 $\triangle ABC$ 开始，将 BC 边向右延伸至 D，则 α 和 β 都小于 $\angle ACD$ 。

外角定理是《几何要素》中的第一个几何不等式。欧几里得以前已经证明了边或角是相等的（如在桥状体中），他在这里证明了某些角是不相等的。这个定

理在第一卷的剩余部分中扮演了重要的角色。

这就引出了另一个不等式，即命题 19，其示意图如图 G. 6 所示。欧几里得将其表述为：“在任何三角形中，较大的角都与较大的边相对应。”

命题 19：在 $\triangle ABC$ 中，如果 $\beta > \alpha$ ，则 $AC > BC$ （即 $b > a$ ）。

证明：这里我们假设 $\beta > \alpha$ 。我们的任务是证明对 $\angle ABC$ 的边 AC 比对 $\angle BAC$ 的边 BC 长。

欧几里得分别考虑了三种可能的情况： $b=a$ ， $b < a$ ，和 $b > a$ ；他的策略是证明前两种情况是不可能的，从而得出第三种情况一定成立的结论，正如定理所断言的那样。这种方法被称为双重还原法和反证法，或者双重反证法。这种强大的逻辑策略在希腊数学中得到了最好的运用。欧几里得是这样处理的：

情形 1：假设 $b=a$ 。

参考图 G. 6，我们得到 $BC=a=b=AC$ 。这使得 $\triangle ABC$ 是等腰的，因此，根据肌桥，我们得出底角本身相等的结论。即 $\angle BAC = \angle ABC$ ，或等价的 $\alpha = \beta$ 。但这与 $\beta > \alpha$ 。因此我们认为情形 1 不可能。

情形 2：假设 $b < a$ 。

这里的情况如图 G. 7 所示。因为假设 AC 比 BC 短，我们可以构造长度为 b 的线段 CD ，其中 D 落在较长的边 BC 内。然后绘制 AD 形成 $\triangle ADC$ 。这个三角形的两条边长为 b ，是等腰三角形，因此底角 $\angle DAC$ 和 $\angle ADC$ 相等。但将外角定理应用于狭义的 $\triangle ABD$ ，我们推导出 $\beta = \text{内角 } \angle ABD < \text{外角 } \angle ADC = \angle DAC < \angle BAC = \alpha$ 。

也就是说， $\beta < \alpha$ ，这与定理最初的规定相矛盾， $\beta > \alpha$ 。案例二虽然导致矛盾，但也失败了。剩下的是：

情形 3： $b > a$ 。

这肯定是对的，因为没有其他选择，定理被证明了。

我们现在已经到达了困扰伊壁鸠鲁哲学家的命题。从表面上看，这听起来很无害：

命题 20：在任何三角形中，两条边以任何方式加在一起都大于剩下的边。

为什么会有争议？为什么会被嘲笑？我们引用评论员普罗克罗斯的话：

伊壁鸠鲁派惯于嘲笑这个定理，说它对驴子来说也是显而易见的，不需要证明；他们说，需要被显而易见的真理所说服，就像相信毫无疑问是模糊的东西一样，这是无知的人的标志……驴知道这个定理，他们从观察中得出结论，如果稻草放在两边的一端，寻找食物的驴会沿着一边走，而不是从另外两头走。

简而言之，即使是愚蠢的动物也知道从图 G. 8 中从 C 点直走到 B 点，而不是绕着 a 点走很远的路。那么，伊壁鸠鲁派问道，为什么欧几里得要费力去证明如此显而易见的事情呢？普罗克罗斯回答说：

应该回答说，虽然这个定理对于感官知觉是明显的，但对于科学思维来说，它仍然是不清楚的。许多事物都具有这种特性；例如，火变暖。这是显而易见的，但科学的任务是找出它是如何变暖的。

在欧几里得的精神中，在希腊几何学的典型精神中，我们必须运用我们的理性才能来证明驴子凭本能所知道的东西。即使是一个看似不证自明的命题也需要证明，而欧几里得非常乐意提供这个证明。根据以前的结果，他得出如下结论：

提案 20：在 $\triangle ABC$ 中， $AC+AB > BC$ （即 $b+c > a$ ）

证明：在图 G. 9 中，将边 BA 扩展到 D ，使 $AD=AC=b$ ，因此 $BD=b+c$ 。这种构造产生了 $\triangle DAC$ ，它是等腰的，因为它有两条长度为 b 的边。考虑到较大的 $\triangle BDC$ ，我们注意到 $\angle BCD > \angle ACD = \angle BDC$ 。

所以 $\angle BCD$ 大于 $\angle BDC$ 。正如欧几里得刚才证明的，大的边对着大的角，由此可以得出公元前；换句话说， $b+c>a$ ，这就是要证明的。

这是一个精彩的小证明。它有它的精妙之处，它对不平等的巧妙运用，它的宁静优雅。

在阿瑟·柯南·道尔爵士的《血字的研究》中，华生医生这样描述福尔摩斯的推理能力：“他的结论就像欧几里得的许多命题一样无误。”华生并不是唯一一个对这位希腊几何学家评价很高的人。几个世纪前，阿拉伯学者齐夫提（al-Qifti）谈到欧几里得时说：“不，即使是后来的人，也没有一个不追随他的脚步的。”无与伦比的爱因斯坦（Albert Einstein）也表达了自己的敬意：“如果欧几里得没能点燃你年轻时的热情，那么你就不是天生的科学思想家。”

当然，到目前为止，我们所考虑的只是冰山一角，只是历史学家莫里斯·克莱恩（Morris Kline）所说的希腊人“逻辑大实践”的一个样本。我们现在必须离开他们。但从某种意义上说，没有数学家能留下经典几何学家的遗产。他们开创了论证数学的先机，磨练了它的逻辑工具，并将其定位在了它至今所走过的方向上。我们以 20 世纪英国数学家 g·h·哈代的话结束：“希腊人……说着现代数学家能理解的语言；正如利特尔伍德有一次对我说的，他们不是聪明的学生，也不是‘奖学金候选人’，而是‘别的学院的研究员’。”

哈代说：“希腊数学是真实的东西。”

定义

1. 点是没有部分的东西。
2. 线是无宽度的长度。
3. 直线的两端是点。
4. 直线是与自身上的点均匀相交的直线。
5. 面是只有长度和宽度的东西。
6. 曲面的端点是直线。
7. 一个平面是一个表面，它与自身的直线均匀地相交。
8. 平面角是平面上两条线彼此相交而不在一条直线上的倾斜度。
9. 当包含这个角的直线是直线时，这个角就叫做直线。
10. 当一条直线与另一条直线相交，使两个相邻的角相等时，每个等角都是对的，而与另一条直线相交的这条直线就称为与其所在直线的垂线。
11. 钝角是比直角大的角。
12. 锐角是比直角小的角。
13. 边界是任何事物的极限。
14. 图形是由任何一个或多个边界所包含的。
15. 圆是由一条直线包含的平面图形，在图形内的所有直线中，从一点落在它上面的所有直线彼此相等；
16. 这个点叫做圆心。
17. 圆的直径是任何一条通过圆心并以圆的周长在两个方向终止的直线，这样一条直线也将圆平分。
18. 半圆是由直径和它所切断的周长所包含的图形。半圆的圆心和圆的圆心是一样的。
19. 直线图形是由直线包含的图形，三边图形是由三条直线包含的图形，四边形图形是由四条直线包含的图形，多边形图形是由四条以上直线包含的图形。
20. 在三边三角形中，等边三角形是三条边相等的三角形，等腰三角形是两条边相等的三角形，不等边三角形是三条边不等的三角形。
21. 此外，在三边三角形中，直角三角形是有一个直角的三角形，钝角三角形是有一个钝角的三角形，锐角三角形是有三个锐角的三角形。
22. 在四边形中，正方形既是等边又是直角；长方形直角但不等边的长方形；菱形：等边但不直角的菱形；菱形的对边和角都相等但既不是等边也不是直角。我们把其他的四边形叫做斜方。
23. 平行直线是指在同一平面上，在两个方向上无限延伸，但在任何一个方向上互不相交的直线。

假设

假设如下：

1. 从任意点到任意点画一条直线。
2. 在一条直线上连续地产生一条有限的直线
3. 描述一个有任意圆心和距离的圆。
4. 所有的直角都是相等的。
5. 如果一条直线落在两条直线上使同一侧的内角小于两个直角，这两条直线，如果无限产生，在小于两个直角的那一侧相交。

共同的观念

1. 等于同一事物的事物也彼此相等。
2. 如果等号加等号，则整数相等。
3. 如果等号减去等号，余数相等。
4. 彼此一致的事物彼此相等。
5. 整体大于部分。