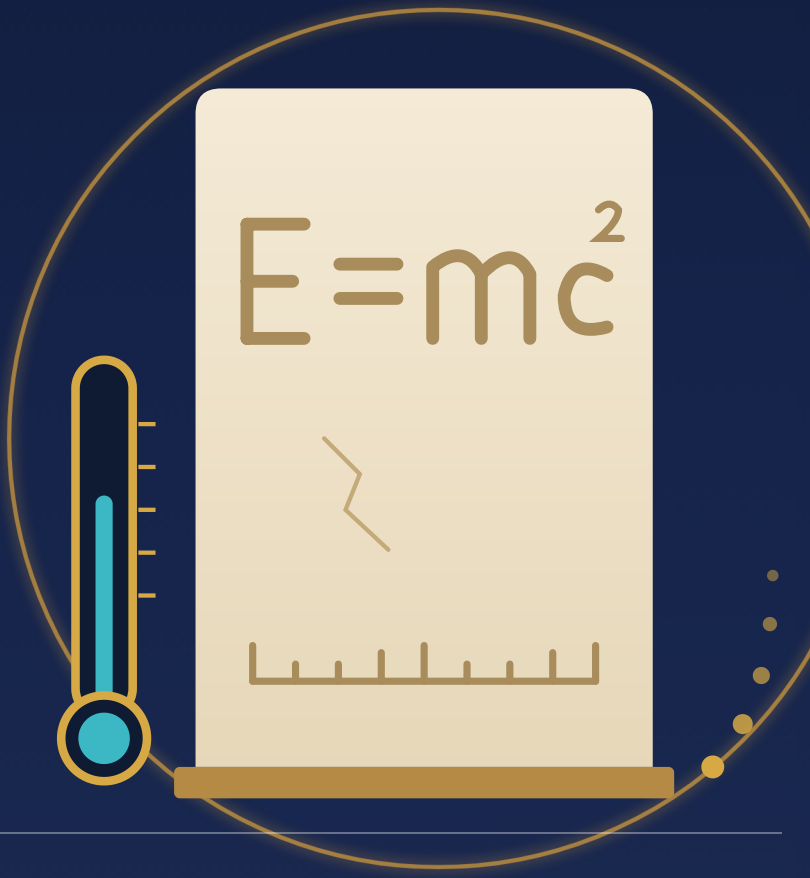
被刻进世界的公式

科学的符号学



王德生　著

德麦国际出版社
Demai International Press

德麦国际专著 · 第 407 号

被刻进世界的公式

科学的符号学

王德生　著

德麦国际出版社
Demai International Press · Singapore

出　版　信　息

书名	《被刻进世界的公式——科学的符号学》
著者	王德生
执笔	复合主体：王德生立题、制定大纲与口径，Claude 执笔与统稿，经三审
出版	德麦国际出版社（Demai International Press）· 新加坡
丛书	SDE 符号学系列 · 理论卷之九
编号	德麦国际专著第 407 号
ISBN	979-8-90690-407-2
定价	US$23.00
开本	170 mm × 240 mm
字数	约 25 万字
版次	2026 年 10 月第 1 版

AI 协作声明：本书的立题、大纲、判词与八条承重命题由王德生给出；文字在其指令下由 AI（Claude）协作成稿，经初审、复审、终审三审定稿。

书中科学史案例只用公开文献里的公认事实；现代学者的原话一律转述大意，至多单句短引。三审后仍未能核实的年份、人名与细节标〔待核〕，汇总于附录三。各章开头的人物与场景均为虚构。

全书结构：出版信息、作者介绍、前言、导读、目录；八编二十二章；结语、参考书目、附录三件、后记。

版权所有　侵权必究

作者介绍

王德生，博士，SIO 本体论与 SDE 发生学的创立者，新加坡德麦国际（Demai International Pte. Ltd.）创始人、董事长，SDE Universes 平台主持人。

他是计算数学出身：湘潭大学数学系本科与硕士，中国科学院数学研究所博士，中国科学院计算数学研究所博士后；此后在英国威尔士大学斯旺西分校任高级研究员，在新加坡南洋理工大学数学系任教与研究十三年，任博士生导师，在国际期刊发表计算数学与图形学论文四十余篇，研究集中在网格生成、变分表面重建与波的模拟。

2015 年起他回国推广自己的方法论，2017 年 1 月以一篇《给你一双慧眼看天地》开始了“三视角”时期。此后他的思想走过四站：三视角（2017 年 1 月起）、321 智慧系统（2022 年 10 月起）、SIO 本体论（2024 年 7 月起）、SDE 本体论（2026 年 1 月起；同年 5 月起“结构”改读为“显露”）。

本书是他主持的“SDE 符号学”系列理论十卷中的第九卷。一个在公式、网格与数值误差里做了二十多年研究的人，回过头来问：一个公式，是怎样被刻进世界的。

前言

一根温度计

◆ 一、凌晨两点的那个数

凌晨两点，林晓雯被一声“妈妈”叫醒。

她三十四岁，在长沙一家社区医院做药剂师，白天在发药窗口后面站八个小时，一天要回答几十个家长的同一类问题：“孩子烧到多少度该吃退烧药？”“两种药能不能隔开吃？”她答得很熟。可是这天夜里，发烧的是她自己的女儿朵朵，五岁。

她伸手一摸，朵朵的额头烫，脖子后面也烫。孩子缩成一团，说冷。

丈夫陈屹已经爬起来开了灯，从抽屉里摸出那把额温枪，对着朵朵的额头“嘀”了一下。屏幕上跳出来：37.4。

“不高嘛。”陈屹松了口气。

林晓雯没说话。她的手告诉她不是这样。她翻出那支电子体温计，夹进朵朵腋下，按着孩子细细的胳膊等了一分多钟。“嘀嘀嘀”，屏幕亮了：38.6。

两个数字摆在灯下，差了一度多。

她在药房里见过太多家长拿着两个不一样的读数来问。轮到自己，她才知道那一刻心里有多乱：一个数字说可以再等等，一个数字说该用药了，而孩子就躺在中间，等着大人拿主意。

陈屹拿起额温枪又测了一次，37.6。再测，37.3。他有点慌：“到底哪个是真的？”

这一问，就是本书的起点。

◆ 二、一个数字，三种来历

先别急着回答哪个是真的。先问一个更古怪的问题：那个 38.6，是谁的符号？

本书说的“符号”，不是只指文字和图案。它指的是一样东西沉下来、站稳了，能被反复认出，能被带走。本书给它定了三条判据：稳定，换个时候再看还是它；整体，拆开就不再是它；独立，能离开它出生的地方，被带到别处去。这三条，后面叫“三判据”。

拿这三条去看那个 38.6，会看到它其实有三层来历。

第一层，它是现实留下的痕。

体温计里的那个小小的感温元件，被孩子腋下的热量改变了电阻。老式的水银体温计更直观：水银受热膨胀，沿着细管爬上去，停在某一格。这一格，不需要任何人去解释，它就在那里。你睡着了，它也在那里。

本书把这一类东西叫作**现实符号**：现实自己沉下来、不需要解释者也立得住的痕。村口被踩出来的小路、河水刻出的河床、手上的一道伤疤，都是这一类。水银柱停在那一格，和小路停在那里，是同一种站法。

第二层，它是一个概念。

可是“38.6”这个读法，水银柱自己不会说。它要先有一套温标，规定冰水混合是多少度、沸水是多少度，中间怎么分格；要先有一门医学，规定成年人和孩子的体温大概在哪个范围，过了哪条线叫发烧；还要有一张印在说明书上的表，告诉家长多少度可以考虑用药。

这些都不在水银里。它们是人类花了几百年，一点一点立起来的想法。本书把这一类叫作**理念符号**：概念、公式、定义、一条医学上的分界线。“38.6 度，是发烧”，这句话属于这一类。

第三层，它是她身上的一样东西。

在体温计亮起来之前，林晓雯的手已经有了判断。五年来，她夜里摸过这个额头几百次。烫到什么程度该醒着守，烫到什么程度可以再睡一会儿，她的手掌比她的脑子先知道。朵朵缩成一团喊冷，她心里一紧，知道体温还在往上走，这也是这几年一次次守夜练出来的。

这种练进身体里、不用想就会的东西，本书叫作**自我符号**。它和现实符号一样稳，和理念符号一样能被带走，只是它住在一个人身上。

一个数字，三种来历。现实的痕、人的概念、她的手，在那个凌晨两点，同时落在了 38.6 上。

这三层不是各管各的，它们一直在互相改写。

林晓雯的手为什么准？因为五年来，每一次手掌觉得“烫”，她都会再夹一次体温计，看看到底多少度。一次次对下来，手掌的感觉被数字校过了。这是理念符号和现实符号，回过头来改写了她身上的自我符号。

反过来也一样。她在备忘录里记下的读数，会变成病历上的一行，再汇进医院的统计。千千万万这样的行，又会让医生对“孩子发烧一般怎么走”有新的认识。一个母亲身上的判断，经过记录，回到了理念那一层。

本书把这种“沉下来的东西反过来改写原先条件”的过程，叫作**回写**。

◆ 三、对不上的那一刻

现在回到陈屹那一问：到底哪个是真的？

这一问来得一点都不奇怪。如果额温枪也显示 38.6，夫妻俩根本不会问“哪个是真的”。他们会直接去拿退烧药，或者再观察一会儿。没有人会在两个读数一致的时候，去追问读数是什么。

问题是被那一度多的差逼出来的。

本书把这种情形叫作**对不上**。两样已经站稳了的东西，撞在一起，彼此不吻合。额温枪的读数和腋下的读数对不上，林晓雯的手掌和额温枪对不上。一旦对不上，“这是怎么回事”就冒出来了。

这件小事里藏着一条本书要反复讲的话：

对得上，就没有解释；对不上，解释才开始。

那天夜里，解释是这样走的。林晓雯想起药房培训时听过的话：额温枪测的是额头皮肤表面。孩子发冷、打寒战的时候，皮肤血管收紧，额头表面的温度会偏

低，可身体里面的温度还在往上走。她又看了一眼朵朵发白的小手和缩着的肩膀，心里就有数了。

额温枪没有坏，它老老实实地报告了额头皮肤的温度。腋下体温计也没有骗人，它报告的是另一处的温度。两个读数都是真的现实之痕，只是它们回答的不是同一个问题。

那一度多的差，没有让她怀疑“体温”这回事。它让她更准地知道了“体温”指的是哪里的温度，以及什么时候哪件仪器靠得住。

这一回，一个更细的理解在她身上沉了下来。下次再有家长在窗口问“额温枪为什么不准”，她能讲得比培训手册更清楚。

◆ 四、“真正的体温”在哪里

可以把陈屹那一问再往前推一步。

一种很自然的回答是：真正的体温就在孩子身体里，早就在那里了；额温枪和腋下体温计都只是去够它，有的够得准，有的够不准。科学的任务，就是造出越来越准的工具，把那个早已摆好的数读出来。

这个回答有力量，本书不打算轻易推开它。它让人不肯随便将就，逼着工程师把体温计越做越准，逼着医生弄清楚每一种测法的误差。没有这份认真，就没有今天药房柜台上那支几十块钱、一分钟出结果的电子体温计。

可是请多想一步。

人发烧当然一直都有，母亲的手摸到额头发烫也一直都有。十七世纪初，意大利已经有医生用一种测温器给病人比较冷热。可是那时没有大家共认的刻度，“烧到多少度算发烧”成为人人会说的日常话，还要晚得多。

要把冷热变成一个数字，能写在病历上，能互相比较，能带到另一个城市去，得先有好几样东西。先要有一根能稳定膨胀的玻璃管，再要有一套大家都认的温标，还要有医生们一年年在病床边记下成千上万个读数。有了这些，才慢慢有了“正常体温大约是多少”这个说法。这一段来历，第 8 章会细讲。

所以那个 38.6，不是从孩子身体里直接掏出来的。它是一次相会的结果。孩子身体的热，一根造得很讲究的仪器，一套几代人立起来的温标和医学概念，还有一位母亲守夜练出来的判断，在凌晨两点碰到了一起。

本书把这样的相会叫作一次**结晶**：本来分散的东西，经过一番对账，沉成了一个稳定、整体、能被带走的东西。“38.6 度”一旦写进病历，它就能被另一位医生读懂，能和昨天的读数比较，能决定下一步用什么药。它站住了。

◆ 五、这不是“随便怎么说都行”

讲到这里，有一个误会必须先堵住。

说一个读数是“结晶”，不是说它可以随人的意思改。你把体温计放进冰水里，它会显示接近零度，不会因为你盼着孩子退烧就显示 36.5。林晓雯的手掌再有经验，也替代不了那支体温计；夜里她把读数记在手机备忘录里，第二天带去给医生看，靠的正是这个数字不随她的心情走。

结晶有判据。它得稳定、得整体、得能离开发生地。它还得经得起下一次对账。一个读数如果换一支体温计、换一个人来测就面目全非，它就算不上结晶。

不随人的意思改，还有一个日常的证据。朵朵的幼儿园每天早上在门口测体温，一个孩子量出 37.8，老师就会打电话给家长。老师不认识这个孩子的妈妈，也不需要知道她信什么、盼什么。数字一出来，大家照着同一条线办事。一个读数能让陌生人之间不必争吵，这是它最朴素的力量。

还有一层更要紧：**稳定，不等于对**。

谣言也很稳。“孩子发烧捂一身汗就好了”，这句话在很多家庭里传了几代，稳得很。可是它站得稳，靠的是没有人再去检验，不是它经得起检验。林晓雯在窗口劝过不少给孩子裹三层被子的老人。所以本书看一个科学说法，总要问两件事：先问它是怎样站稳的，再问它站的方向对不对。前一问是本书的本行，后一问，科学自己有一整套办法去回答，本书只会更尊重这套办法。

◆ 六、一个夜里，装着整本书

把那个凌晨两点再慢放一遍，会看到本书后面每一编要讲的东西，在这间小小的卧室里都出现过一次。

她又测了一次。 额温枪说不高，林晓雯没有就此放下，而是换了一种测法再去碰一次。这个动作很小，却是实验的雏形：把心里的一个判断，推到一个读数面前去对一对。第二编讲实验，讲的就是人怎样有意地、成规矩地去做这件事。

两样仪器给了两个数。 额温枪和腋下体温计，是两只不同的“眼睛”，各自把一处的热变成一个可读的痕。仪器从来不是一扇透明的窗，它造出了以前没有的读数。第三编讲望远镜、温度计、探测器，讲的是仪器怎样把现实变成可读的符号。

38.6 是按摄氏度读的。 如果她用的是华氏温标，屏幕上会是另一个数，孩子的热却一点没变。一个数字能在长沙的卧室和北京的病房之间通行无阻，靠的是一套全世界都认的刻度和单位。第四编讲记号和单位，讲的是人的概念怎样被刻进世界。

天亮后要去给医生看。 她夜里记的那几行字，要等到儿科医生读过，才真正成了“病情记录”。一个读数要站稳，得有一群懂行的人接得住它。第五编讲科学共同体，讲的就是这张托住结晶的网。

她和陈屹轮流守了一夜。 一个更准的理解在她身上沉下来，是用一夜没睡换来的。科学里的每一个事实也是这样，要花力气，要花钱，要花一代人的工夫。第六编算的就是这本账。

陈屹差一点只信了额温枪。 如果他认定“仪器说不高就是不高”，不再看孩子发白的手和缩起来的肩膀，一个读数就会被供起来，挡住了它本来要服务的那个孩子。第七编讲科学的偶像，讲的就是这种把工具的结论当成不许再碰的东西的时刻。

一个普通家庭的一夜，装着整本书的骨架。

◆ 七、这本书想讲什么

从那根温度计往外走一步，就是整个科学。

科学里到处是这种凌晨两点的时刻。一颗行星的轨道和计算差了一点点；一种病的血清检测时灵时不灵；一组桥梁的读数和设计值合不上。一次对不上，逼出一次解释；解释走到头，沉下一个新的、更稳的东西：一个新概念、一种新仪器、一条新定义。下一次对不上来了，它又可能松开，再沉一次。

本书要讲的，就是这件事。

传统的讲法，把科学说成去发现一个早已摆好的世界：自然是一本写好了的书，科学家是读者，读得越准，科学越成功。这个讲法本书叫它**发现学的科学观**。第 1 章会把它的长处讲足：客观，可复验，不让私心说了算。这些长处是真的，本书一样都不想丢。

本书要补的是另一半。科学不只是读出一本现成的书，它还是一场让理念符号和现实符号反复对账的发生。实验，是有意去制造对不上；仪器，把看不见的现实变成可读的痕；记号和单位，把人的概念刻进世界，刻进一根铂铱合金棒，刻进一个常数；科学共同体，是托住这些结晶、让它们不散掉的那张网。

一个“科学事实”，是一次结晶。它稳、它完整、它能被带到世界任何一个实验室。它也会在新的反常面前松开，再结晶一次。

那几行备忘录还能再看出一层。单独一个“38.6”，是一个立得住、能带走的点，本书说它像一颗粒子。两点、两点二十、四点四十连起来，读数先高后低，有了走向和快慢，这像一道波，是推理顺着走的那条线。

医生脑子里，体温和年龄、心率、精神状态之间那一整张互相牵连的关系，像一个场，是数学最擅长描写的东西。符号、逻辑、数学，是信息的三种样子，它们在一张病历上一起干活，彼此转来转去，谁也不比谁高一级。全书最后一条命题，讲的就是这三样怎样协作。

这本书写给认真过日子、也愿意多想一步的普通人。你不需要会推导公式，只需要记得自己也有过凌晨两点那样的时刻：两样都靠得住的东西，偏偏对不上。

本书给全书下的判词只有一句：

科学的力量不在于它找到了现成的真理，而在于它把“对不上”变成了一种制度。

那天夜里，林晓雯家里只有一个小小的、私人的对不上。科学做的事情，是把这样的对不上请进实验室、请进期刊、请进一代代人的训练里，让它有规矩地发生，有人记账，有人复查，有人承认自己错了。这是人类迄今最了不起的一套办法。本书要讲清楚它为什么了不起，也讲清楚，当人忘了它的来历、把它的结论供起来不许再碰时，它会怎样变成另一样东西。

◆ 八、天亮的时候

那天夜里，林晓雯按朵朵的体重算好剂量，给她喂了退烧药，又换了一身薄衣服，没有捂被子。陈屹守了前半夜，她守后半夜。

四点多，朵朵出了一身汗，额头凉下来。林晓雯又夹了一次腋下：37.5。这次她顺手用额温枪也测了一下：37.3。两个数字挨得很近了。

她在备忘录里记下：两点，腋下 38.6，额温 37.4，寒战；两点二十，用药；四点四十，腋下 37.5，额温 37.3，出汗。

天亮以后，她会带着这几行字去儿科。医生会读这几行字，读出她夜里没法读出来的东西。如果烧反复不退，或者孩子精神越来越差，那就不是一根温度计能答的问题了，得请医生来看。

这几行字很普通。可它们正是本书要讲的东西的一个缩影。一个现实的痕，一个人练出来的判断，一套几百年立起来的概念，在一次对不上里碰到一起，沉成了一个符号。它能被带走，能被别人读懂，也能被下一个读数改写。

接下来，本书就从这几行字出发，走进实验室、天文台和计量院，看一看人类是怎样把一个个这样的数字，刻进世界里去的。

先从那幅最古老、也最有力量的图景讲起：自然是一本书。

导读

◆ 一、从那几行备忘录说起

前言里，林晓雯在四点四十再量过一次以后，在备忘录里记下了几行字：两点，腋下 38.6，额温 37.4，寒战；两点二十，用药；四点四十，腋下 37.5，额温 37.3，出汗。

这几行字，是一个现实的痕、一位母亲练出来的判断、一套几百年立起来的概念，在一次对不上里碰到一起，沉下来的东西。本书管这种沉下来的东西叫**结晶**，管那一度多的差叫**对不上**。

这篇导读帮你认路。它讲五件事：全书走哪几段路；全书一句判词；八条撑起全书的命题，每条配一个日常例子；三种读法；以及这句判词在什么情况下就算错了。

◆ 二、先认几个常用词

本书用的词不多，翻来覆去就是这几个。读者可能跳着读，这里先放一张小表。

本书的说法	大白话意思	一个日常的样子
现实符号	现实自己沉下来、不需要谁解释也立得住的痕	村口踩出来的小路，水银柱停住的那一格
理念符号	人立起来的概念、公式、定义	“多少度算高烧”这条线（常见说法是 39 度以上，各处口径不一）
自我符号	练进一个人身上、不用想就会的东西	母亲一摸额头就知道烫不烫
三判据	稳定、整体、独立	一句话换个时候还是它，拆开就不是它，能带到别处去

本书的说法	大白话意思	一个日常的样子
对不上	两样都站稳了的东西撞在一起，不吻合	额温枪说 37.4，腋下说 38.6
结晶	经过对账，沉成一个稳的、整的、能带走的东西	一次守夜后，对“额温为什么偏低”有了自己的理解
回写	沉下来的东西反过来改写原先的条件	手掌的感觉被一次次读数校准
内能／动能／势能	结实的程度／拆开重接的力气／周围那张网的拉扯	老习惯难改／熬夜去弄懂／一群人托着你学

本书的思想底子，是王德生提出的发生学。它讲一件东西怎样先有个形状（显露），沿着一条路（差异序列）走出来，扎根在一片土（特征纠缠）里。东西刚冒头时是一锅粥（混沌），中间是正在成形（介生），最后定型（秩序）；定型之后，又会被新的对不上熔开。这几个大白话词，正文里偶尔会用到。

还有一对词，全书都绕着它转：**发现学**和**发生学**。发现学默认东西早就摆在那里，认识只是去够它，够得越准越好。发生学认为，被认识的东西和认识本身，是在同一次相会里一起显出来的。

打个日常的比方。你在旧箱子里翻出一张老照片，这叫找到。你和老朋友聊了一晚，聊出一个两人都没想到的主意，这个主意事先并不在谁的口袋里，它是那一晚聊出来的。本书并不说科学里没有“找到”，它要问的是：被科学说出来的那些东西，有多少是像那个主意一样，在一次次对账里长出来的。

◆ 三、全书地图：八编二十二章

全书分八编，前有前言、导读，后有结语、附录、参考书目和后记。

第一编　科学是发现，还是发生

· 第 1 章　发现学的科学观

· 第 2 章　它停在哪里

· 第 3 章　发生学的科学观

这一编先把传统图景讲足：自然是一本写好的书，科学家把它读出来。再看这幅图在哪里停下，最后给出本书的说法。

第二编　实验：有意制造的对不上

- 第 4 章　实验是什么
- 第 5 章　反常：科学的对不上
- 第 6 章　范式转换：熔开与再结晶

第三编　仪器：把现实变成可读的符号

- 第 7 章　望远镜与显微镜：把看不见的变成符号
- 第 8 章　温度计与钟：把感觉变成数字
- 第 9 章　探测器：一道闪光是谁的符号

第四编　记号与单位：理念刻进现实

- 第 10 章　数学记号：好记号是会思考的
- 第 11 章　公式：一个粒子装下一张网
- 第 12 章　单位：从一根铂铱棒到自然常数

第五编　共同体：托住结晶的场

- 第 13 章　思想集体与学派
- 第 14 章　论文、评审、引用：科学的回写系统
- 第 15 章　复现危机：结晶失败的时候

第六编　科学的能量账

- 第 16 章　一个事实要花多少能量
- 第 17 章　AI 进入科学：生成的综述与结晶的发现

第七编　科学的偶像

- 第 18 章　可用不等于证实
- 第 19 章　科学主义：一种固化

第八编　收束

- 第 20 章　科学教育：先让学生卡住
- 第 21 章　中国科学的符号能量账
- 第 22 章　它怎样才算错

第二编到第五编，是科学这台“对账机器”的四个部件：实验、仪器、记号与单位、共同体。第六、七编算它的成本，查它的毛病。第八编把它放回课堂、放回一个国家的科研，最后交出本书自己的可推翻条件。

◆ 四、全书的判词

全书只有一句判词：

科学的力量不在于它找到了现成的真理，而在于它把“对不上”变成了一种制度。

“制度”两个字要读重。一个人夜里发现两个读数不一样，那是一次私人的对不上，天亮就忘了。科学做的是另一件事。它让对不上有地方发生，那是实验室；有工具放大，那是仪器；有统一的刻度记账，那是单位；有一群人负责复查和争论，那是期刊和同行。它还有一条大家都认的规矩：被对不上推翻的说法，必须改。

打个比方。一家小饭馆，老板凭舌头调味，哪天咸了淡了，客人皱皱眉就过去了。一家连锁餐厅不一样：每份汤要称盐，每天有人试吃，有顾客投诉就记进本子，同一个问题投诉三次，配方就得改。老板的舌头再灵，也比不上这套规矩靠得住。科学就是把“皱眉”变成了“记账”。

这句判词不贬低科学。它恰恰是在说，科学之所以比任何一种个人的聪明都可靠，是因为它不靠哪一个人聪明。

◆ 五、八条承重命题，每条一个例子

第一条：实验，是有意制造对不上。　实验把一个想法推到一个读数面前，让两者对账。

你想把一张新沙发搬进家门。量过尺寸，心里觉得“放得进”。真正抬起来往门里推的那一下，就是实验。推进去了，想法被保住；卡在门框上，你就得重新想：是斜着进，还是拆掉腿。

好的实验，是事先把“卡住”的地方想清楚，再去推。实验的价值不在于证明你对，在于给“你可能错”留出一个清清楚楚的位置。第 4 章讲伽利略的斜面，讲的就是这一下；控制变量，说穿了就是把可能卡住的地方收窄到一处。

第二条：反常，是科学的对不上；范式转换，是熔开再结晶。

导航让你直行，前面却是一堵新砌的墙。一次，你会以为是临时修路，绕过去就算了。可如果这个月里一次次撞墙，你最后会承认：这张地图整个旧了，得换一张。

旧地图并没有白用，它带你走了很多年；可新地图一来，很多路的意思都变了。第 5、6 章讲水星轨道、讲氧气取代燃素，讲的就是从“绕过去”到“换地图”的那一步。

换地图之所以难，是因为旧地图上连着太多东西：你的习惯、你记住的路名、你给朋友指过的路。一套连接得越密的说法，要拆开它花的力气越大。

第三条：仪器，是把现实变成可读符号的器官。

手机计步器出现以前，人只是“今天走了不少路”。有了它，才有了“今天走了 8,000 步”这个可以比较、可以记录、可以和朋友较劲的数。计步器没有把步数从哪里挖出来，它造出了一种以前没有的读数。望远镜、温度计、探测器，在更大的尺度上做着同一件事。

要分清的是：计步器里那个传感器的抖动，是现实留下的痕；被你读成“今天运动够了”，是一个概念；你天天看、看惯了，不看就心里空，那就成了你身上的东西。一个读数，往往同时住在这三处。

第四条：记号与单位，是把理念符号刻进现实。

奶奶的菜谱写“盐少许”，你照着做，咸淡全凭运气。换成“盐 3 克”，长沙的厨房和新加坡的厨房就能做出差不多的味道。

2019 年，国际单位制把千克改成用普朗克常数来定义，菜市场那杆秤的最终依据，从巴黎郊外一块金属，变成了一个自然常数。第 12 章讲这次改动，本书把它看作现实符号与理念符号的一次深层回写。

记号也是这样：同一道算术题，用罗马数字算和用阿拉伯数字算，难度天差地别。好的记号自己会帮你想。

第五条：科学事实是结晶，思想集体是托住它的场。

小区群里有人说“晚上九点以后地下车库 B2 总有空位”。一个人说，大家半信半疑；十几个邻居各自去试过，都对，这句话就成了小区里的“事实”，新搬来的人也照着办。隔壁小区的人听了，却未必当真，因为没有他们那群人一次次去试。科学事实也要一群人接住才站得稳。弗莱克在 1935 年的《一个科学事实的起源与发展》里，已经讲过事实在“思想集体”中生成的意思〔转述〕。第 3、13 章细讲。

要补一句：说事实需要一群人接住，不是说一群人点头就算事实。那十几个邻居是各自去车库看过的，他们点头，是因为车库给了他们一样的回答。

第六条：科学有一本能量账。实验、仪器、评审、复现都要付力气；复现危机，是结晶失败或连接度虚高。

朋友圈里有人晒一个减肥方法，说自己一个月瘦了十斤。

你照着做了一个月，一斤没少。那个方法在他身上也许是真的，换一个人、换一种生活就不灵了：它的结实只在一个小圈子里成立，这就叫连接度虚高。第 15 章讲心理学的复现危机，第 16 章算一个科学事实背后花了多少钱、多少年。第 17 章再问一个新问题：AI 能替人写出一篇漂亮的综述，可是对不上由谁来提供，力气由谁来付。

第七条：作者的“科学宗教”立论线所警惕的风险，是把“可用”当成“证实”，把客体当成先在的、等着被发现的东西。

感冒了，喝了一碗老偏方，三天后好了，于是认定偏方有效。可是普通感冒本来就常在几天里自己好。偏方“能用”，不等于它“被证实”。

科学也会掉进同一个坑：一套算法算得准，就以为它描写的东西真的就是那样摆在那里。第 18、19 章讲这种供奉怎样发生，也讲尊重科学和科学主义的分界。

尊重科学，是尊重它那套不断检验的办法；科学主义，是把某一天的结论供起来，不许再检验。前者让人更谦虚，后者让人更傲慢。

第八条：数学是场，符号是粒子，逻辑是波；科学是三种信息形态的协作与互转。

看一份天气预报。“明天降水概率 70%”是一个立得住、能带走的点，像粒子；气象员从今天的云图一步步推到明天，那条推演的线像波；背后那套把气压、温度、湿度牵在一起的方程，像一个场。

三样东西在一份预报里来回转换，谁也不比谁高一级。气象员把方程算出来的一大片结果压成“70%”这一个数，是场变成了粒子；你看到这个数，推出“明早得带伞、得早点出门”，是粒子又展开成了波。第 10、11 章讲记号和公式，讲的就是这种转换。

◆ 六、三种读法

为科学来的。 如果你学理工，或者在实验室工作，可以先读第二到第五编，看本书怎样拆开实验、仪器、记号、共同体这四样你天天用的东西。再读第 15、16 章和第 22 章。你会看到本书没有一条要你怀疑科学的方法，它只是请你看清，这些方法为什么管用。

为哲学来的。 如果你读过培根、库恩、波普尔，可以按第 1、2、3、6 章，再到第 18、19、22 章的顺序读。本书在每一位前人那里都先写足他对在哪里，再写他停在哪里。读者要盯住的是一个问题：客体那一头，到底是先摆在那里的，还是和认识一起显出来的。

为教育来的。 如果你是老师或家长，可以从前言读起，接着读第 4 章、第 13 章，然后直接读第 17、20、21 章。本书在这里的主张很简单：课本上的结论是别人的结晶，学生要自己经历一次对不上，结论才会在他身上沉下来。

举个家常的例子。孩子背下“物体下落快慢和轻重无关”，考试能得分。可要是他亲手把一张纸和一本书同时松手，看到纸慢悠悠飘下来，心里“咦”了一声，再把纸揉成团重来一次，这句话才算在他身上落了地。那一声“咦”，就是本书说的对不上。第 20 章会讲，实验课真正该给学生的，正是这一声。

只想读一章的。 如果时间很少，读第 3 章。它把本书的科学观一次讲完：理念符号与现实符号怎样反复对账，一个事实怎样结晶，又为什么需要一群人接住。

几条路最后都会走到第 22 章。

◆ 七、这句判词怎样才算错

一套说法如果怎么都讲得通，它就什么也没说。本书在第 22 章交出三条可推翻条件。只要下面任何一种情形被确证，本书的相应说法就要修改，甚至推翻：

1. **找到一个重大科学概念，它的诞生前后，查不到任何可以事前指认的反常。** 也就是说，它不是从哪一次对不上里逼出来的，而是在纯粹的想法里凭空长出来的。
2. **仪器与记号的革新，和理论的变化毫无关系。** 如果望远镜、温度计、新记号的出现，从来不曾带出新的概念，概念的变化也从来不曾带出新的仪器，那么“仪器把现实变成可读符号”这条就站不住。
3. **没有共同体之场的结晶，能长期稳定。** 如果一个科学说法从没有人复查、没有人争论、没有一群人接住，却几十年站得稳稳的、经得起检验，那么“共同体是托住结晶的场”这条就要改。

这三条都不是空话，都能拿史料去查。

比如第一条。假如有人拿出一个重大概念：它的提出者当时手里没有任何读数和预测对不上，同时代人也说不出它要解决哪个难题。那么，本书第一编的说法就得改。

又比如第三条：本书预测，凡是只在一个实验室、一个学派里站得住的结论，一旦换一群人去复查，松动的比例会明显更高。第 15 章讲的复现危机，正是对这条预测的一次考验。

还有一道本书必须自己守住的闸：**对不上必须能在事前被独立指认。**

如果每看到一个新理论，就回过头说“那里一定有过对不上”，这套说法就成了永远正确、因而空洞的东西。

这就好比一个算命先生，事后总能找到理由说自己算准了。他说你“今年有坎”，你摔了一跤，他说应验了；你升了职，他说那是“坎”过去了。

一种怎么都对的说法，等于什么也没说。科学之所以和算命不同，正因为它肯事先把话说死，留出被现实打脸的余地。本书也想这样要求自己：每一章讲到的结晶，都请你回头去查那条缝在不在。所以本书讲每一次结晶，都要先在史料里找出那条缝：哪一个读数，哪一次预测落空，哪一回实验失败。找不到，本书就老实说找不到。

最后再说一遍分寸。“科学是一场发生”，不是“科学怎么说都行”。结晶有三判据，理论有可推翻条件，谣言也很稳，可稳不等于对。本书先问一个说法是怎样站稳的，再把它对不对，交还给科学自己那一整套检验的办法。

本书写的不是科学的反面，而是科学的来历。知道一样东西是怎样来的，你会更懂得珍惜它，也更知道它在哪里需要小心。

下面，从那幅最古老、也最有力量的图景开始：自然是一本书。

目 录

作者介绍 iii

前言　一根温度计 iv

导读 xii

第一编　科学是发现，还是发生 **1**

第 1 章　发现学的科学观 2

第 2 章　它停在哪里 19

第 3 章　发生学的科学观 36

第二编　实验：有意制造的对不上 **53**

第 4 章　实验是什么 54

第 5 章　反常：科学的对不上 71

第 6 章　范式转换：熔开与再结晶 90

第三编　仪器：把现实变成可读的符号 **109**

第 7 章　望远镜与显微镜：把看不见的变成符号 110

第 8 章　温度计与钟：把感觉变成数字 127

第 9 章　探测器：一道闪光是谁的符号 145

第四编　记号与单位：理念刻进现实 **163**

第 10 章　数学记号：好记号是会思考的 164

第 11 章　公式：一个粒子装下一张网 181

第 12 章　单位：从一根铂铱棒到自然常数 198

第五编　共同体：托住结晶的场 **215**

第 13 章　思想集体与学派 216

第 14 章　论文、评审、引用：科学的回写系统 232

第 15 章　复现危机：结晶失败的时候 248

第六编　科学的能量账 **265**

第 16 章　一个事实要花多少能量 266

第 17 章　AI 进入科学：生成的综述与结晶的发现 282

第七编　科学的偶像 **301**
第 18 章　可用不等于证实 302
第 19 章　科学主义：一种固化 320

第八编　收束 **339**
第 20 章　科学教育：先让学生卡住 340
第 21 章　中国科学的符号能量账 358
第 22 章　它怎样才算错 375

结语　每一个公式都是一道被刻进世界的痕 393

参考书目 397

附录 405
附录一　科学符号大事年表 406
附录二　发现学科学观与发生学科学观对照表 409
附录三　引文核验总表 411

后记 413

第　一　编

科学是发现，还是发生

导　语

第一编只做一件事：先看清“科学是读出一本写好的书”这幅图，再看它停在哪里，最后把本书的说法摆出来。

第 1 章从济南一间高三教室讲起。郑国栋讲了三十多年哈雷彗星，学生贺子轩问：如果彗星没回来，是牛顿读错了，还是书写错了？本章跟着培根、牛顿、拉普拉斯，把发现学的科学观讲足。客观、可复验、抗私意，都是它交给我们的。

第 2 章换到新加坡一家医院的夜班。同一张胸片，技师何嘉怡看成血管，陈医生看成结节。汉森说“看”渗透着理论，这一步走得对；可是被看的那一头，他没有动。开普勒与火星的八角分，是本章的完整例子。

第 3 章给出本书的科学观：科学是理念符号与现实符号的反复对账，事实是对账后沉下来的结晶。杭州药厂里的“17 号”，弗莱克笔下的梅毒概念和瓦色曼反应，讲的都是这件事。

读这一编时，请带着骆欣问宋明远的那一句：一个事实，是找到的，还是做出来的？

01

第 1 章

发现学的科学观

这一章的问题

彗星准时回来，郑国栋说那是“自然本来就那样写着”。这幅图景凭什么站得这么稳？它又漏问了什么？

◆ 一、最后一届的复习课

济南的十月，梧桐叶刚开始黄。郑国栋站在高三（七）班的讲台上，粉笔在黑板右上角写下一行字：

自然是一本书，物理是读它的方法。

这行字他写了三十多年。五十八岁的郑国栋，在这所中学教了一辈子物理，这一届是他带的最后一届毕业班。明年六月，学生们走进考场，他就退休了。每年讲到“万有引力”这一章，他都要先写这行字，再讲同一个故事：哈雷彗星。

“1705 年，英国有个天文学家叫哈雷。”他转过身，“他用牛顿的力学去算一颗彗星的轨道，算完了说：这颗彗星，1758 年前后还会回来。那时候他已经快五十岁了，知道自己多半看不到。”

教室里有人笑。

“他确实没看到，1742 年就去世了。可 1758 年的圣诞节晚上，德国一个种地的天文爱好者，在望远镜里看见了它。”郑国栋把粉笔放下，“一个人死了十几年，他算出来的东西准时回来了。你们说，这靠的是什么？”

“靠牛顿。”有人喊。

“靠自然本来就是那样写的。”郑国栋说，“牛顿只是把它读出来了。哈雷只是照着往下读了几页。”

这是他最喜欢的一刻。三十多年里，总有几个孩子在这一刻眼睛发亮。他自己当年也是在这样一堂课上眼睛发亮，后来去读了物理系。

下课铃响了，学生们往外涌。贺子轩没走，抱着练习册站在讲台边上。这孩子成绩不算最拔尖，却总爱问些课本上没有的问题。

“郑老师，我想问一下。”他犹豫了一下，“如果那颗彗星没回来呢？是牛顿读错了，还是那本书写错了？”

郑国栋愣了一下，笑了：“书不会写错。读错了，就再读。”

“那这本书是谁写的？”贺子轩又问，“我们读出来的，就一定是它本来写的吗？”

郑国栋张了张嘴，那天没有答好。他拍拍孩子的肩膀，说下次再聊。

这一章，本书想替郑老师把这堂课讲完整。不是去推翻那行字，而是先把它的分量讲足：这幅“自然是一本书”的图景，是人类几百年里最了不起的思想成果之一。它从哪里来，它凭什么站得这么稳，它给了我们什么。讲足了，再看它悄悄默认了什么。

本书把这幅图景叫作**发现学的科学观**：自然早已写好，科学家去读；读得越准，科学越成功。

◆ 二、自然被当成一本书

“自然是一本书”，这个说法比科学还老。

中世纪的欧洲学者常说，上帝写了两本书：一本是《圣经》，一本是自然。读《圣经》能认识上帝的话，读自然能认识上帝的作为。这两本书出自同一位作者，所以不会互相矛盾。这个“两本书”的说法流传很久，到十七世纪，培根在《学术的进展》（1605）里也用过它，说人在“神的话语之书”和“神的作为之书”里都不怕钻研得太深。

这个比喻有一个很要紧的意思：自然是有字的。它不是一团乱麻，它有秩序，有规矩，可以被读懂。今天你觉得这理所当然，可是在很多古代的世界观里，自然

是神灵的脾气，是命运的捉弄，是说不清的东西。相信“它可读”，本身就是一步大跨越。

真正把这本书换了一种文字的，是伽利略。1623 年，他在一本论战小册子《试金者》里说过一段后来被反复引用的话，大意是：哲学写在宇宙这本大书里，这本书一直摊开在我们眼前；可是要读懂它，得先学会它的文字，这文字是数学，字母是三角形、圆和别的几何图形。不懂这些，人就只能在黑暗的迷宫里乱转。

这段话把“两本书”的老比喻推了一大步。读自然，不再靠灵感和冥想，也不再只靠翻古书，要靠测量、计算和几何。一块石头往下掉，不再问“它为什么想回到大地的怀抱”，而是问“它在第一秒、第二秒、第三秒各走了多远”。

打个日常的比方。一个人第一次去看中医，觉得脉象玄妙；第一次拿到体检报告，看到一排数字和箭头，才觉得“身体是可以读的”。伽利略那一句，就是把整个宇宙从脉象换成了体检报告。读法变了，看见的东西也跟着变了。

伽利略用望远镜看月亮和木星的故事，第 7 章细讲。这里只记住一件事：到十七世纪初，“自然是一本用数学写成的书”已经成了一批欧洲学者共同的信念。

◆ 三、培根：先把眼睛擦干净

同一个时代，英国的弗朗西斯·培根从另一个方向使劲。

培根做过英国的大法官，也是那个时代最雄心勃勃的思想规划者。他想重建人类的全部知识，给这项大工程起名叫“伟大的复兴”。其中最有名的一部，是 1620 年出版的《新工具》。

书名本身就是一句挑战。古希腊亚里士多德的逻辑学著作，后人合称《工具论》；培根的意思是：旧工具不够用了，要造一套新的。

《新工具》开篇第一条格言，大意是：人是自然的仆役和解释者。他能做多少、懂多少，取决于他在事实里、在思想里观察到了多少自然的秩序；再多，就做不到，也懂不了。第三条格言更有名，大意是：人的知识和人的力量合而为一，因为不知道原因，就产生不了效果。后来人们把它压成五个字：“知识就是力量。”

这两条合起来，正好是发现学科学观的骨架。自然在那里，有它的秩序；人是仆役，是解释者，任务是把那个秩序看准、读准。看准了，就有了力量。

怎样才能看准？培根最有名的贡献，是先列出了挡住人眼睛的四种“偶像”。

种族偶像，是全人类共有的毛病。人总爱在自然里看出比实际更多的秩序和规律，看到几次巧合，就以为是定律。

洞穴偶像，是每个人自己的毛病。各人的性情、教养、读过的书，像一个各自的洞穴，扭曲了从外面照进来的光。

市场偶像，是语言带来的毛病。人在市场上交谈，用词含糊，名字可能指向根本不存在的东西，大家却用得理直气壮。

剧场偶像，是各家学说带来的毛病。历代哲学体系像一出出舞台剧，编得精彩，人一看入了迷，就把戏台当成了世界。

这四种偶像，今天读来还是一针见血。

你在手机上看到“某某星座本周财运大旺”，连着两次应验，就开始信了，这是种族偶像。你是做销售的，看什么都像人情往来，这是洞穴偶像。小区群里一个说法叫得响，大家都跟着用，其实没人说得清它指什么，这是市场偶像。你迷上了一位养生博主的整套理论，从吃饭到睡觉都照着他的体系来解释，连身体的新变化也硬往他那套说法里塞，这是剧场偶像。

擦干净眼睛之后呢？培根给的方法是有序的归纳。他不赞成从几个例子一下跳到大原理，主张一步一步来，先收集大量事实，排成表格，再小心地往上走。

他自己举过一个例子：热是什么。第一张表，列出所有有热的情形，太阳光、火焰、发酵的粪堆、动物的身体。第二张表，列出跟它们相近、却没有热的情形，比如月光。第三张表，列出热的程度有高有低的情形。三张表排好，再一项项排除。最后培根得出一个初步的结论，大意是：热是一种运动，是一种扩张性的、受到约束的运动，发生在物体的微小部分之间。

这个结论放在两百年后的热学里看，方向居然大致不差。

关于培根，还流传着一个故事。1626 年早春，他坐马车经过伦敦郊外，忽然想知道雪能不能让肉保鲜，就下车买了一只鸡，亲手往鸡肚子里塞雪。不久他着了

凉，几天后去世。这个故事主要出自后人约翰·奥布里的记述，未必全真，可它很像培根：一个大法官，在雪地里蹲下来，亲手去试一试。

培根没有留下什么重大的科学发明。可是他留下了一种气质：不迷信古书，不迷信体系，先去看，先去记，让事实自己排队。四十年后英国成立皇家学会，很多创会成员都把培根奉为精神上的先驱。

◆ 四、牛顿：把书读成几行式子

如果说伽利略说明了这本书是用数学写的，培根说明了读之前要把眼睛擦干净，那么牛顿让整整一代人相信：这本书，真的可以被读出来。

1687 年，牛顿的《自然哲学的数学原理》出版，后人常简称《原理》。

它做成了一件前人连想都不敢想的事：用同一组定律，同时管住地上的苹果和天上的月亮。三条运动定律，加上一条万有引力定律，就能算出炮弹落在哪里，潮水什么时候涨，行星怎样绕太阳转，月亮为什么不掉下来。

在牛顿之前，人们普遍相信天上和地上是两个世界，天上是完美的圆周运动，地上是会腐朽、会掉落的东西。牛顿用一套式子把两个世界缝在了一起。苹果落地的传说流传很广，那个故事细节真假难考，可它说出的意思是对的：同一种力，从树梢一直伸到月亮。

这件事给人的震动有多大，可以从当时的一句诗里看出来。牛顿 1727 年去世后，英国诗人蒲柏为他写过一句墓志铭式的诗。大意是：自然和自然的法则隐藏在黑夜里，上帝说“让牛顿去吧”，于是一切都亮了。

在这句诗里，发现学的图景已经完整了。法则本来就在那里，藏在黑夜中；牛顿做的，是把灯点亮。

牛顿自己的态度也很有代表性。1713 年《原理》第二版的结尾，他加了一段“总释”。在那里，他说自己还没能从现象中推出引力为什么会有那些性质，接着说了一句后来很有名的话：“我不杜撰假说。”他的意思是：凡不是从现象推出来的东西，都不该叫知识；他只说现象告诉他的，不往里面添自己的想象。

这句话后来几乎成了科学精神的口号。

牛顿还有一句话流传更广。1676 年（旧历 1675 年），他在给胡克的一封信里写道，大意是：如果说我看得更远，那是因为站在巨人的肩上。这句话常被读成谦虚。放在发现学的图景里，它还有一层意思：读书是接力，前一个人读到哪一页，后一个人接着往下读，书本身不变，读者一代代换。它和培根的四种偶像是一个意思：不要让人的脑子去替自然说话。

牛顿还留下了另一种读法的样板：实验。

1672 年，他在皇家学会的会刊上发表了一篇关于光和颜色的文章。他在暗室的百叶窗上开一个小孔，让一束阳光穿过三棱镜，墙上出现一条从红到紫的彩带。这个现象前人也见过，通常的解释是：白光是纯的，玻璃把它“弄脏”了，才染出颜色。

牛顿做了一个关键的安排。他用一块开了小孔的板子，从彩带里只挑出一种颜色，比如红光，让它再穿过第二个三棱镜。如果颜色是玻璃染出来的，红光穿过第二块玻璃应当再被染一遍，变出别的颜色。结果它还是红光，只是偏折了一个固定的角度。

牛顿把这个安排叫作“判决性实验”。这个说法的源头在培根：他讲过“十字路口的事例”，意思是在两条路之间只能选一条；胡克在《显微图谱》里把它改称“判决性实验”，牛顿接着用了下来。

他由此得出：白光不是纯的，它本来就是各种颜色的光混在一起；三棱镜没有造出颜色，只是把混在一起的东西按偏折程度分开了。

这件事在发现学的图景里有很重的分量。它说明自然这本书不只能“看”出来，还能“问”出来：你设计一个安排，让自然在两个答案之间只能选一个。读者不再只是坐着读，还可以翻页、折角、对着光去照。不过，实验到底在做什么，本书第 4 章会换一个角度细讲。

牛顿的成功是压倒性的。十八世纪的欧洲，几乎每一个领域的学者都想成为“本行的牛顿”：有人想找化学的牛顿定律，有人想找社会的牛顿定律，有人想找人心的牛顿定律。他读那本书读得太好了，好到所有人都相信，剩下的只是翻页的工夫。

◆ 五、拉普拉斯的那位全知者

把这幅图景推到最远的，是法国数学家拉普拉斯。

拉普拉斯本人就是牛顿力学最出色的继承者之一，他用了几十年，把太阳系里那些细小的不规则运动一项项算清楚，写成了多卷本的《天体力学》。1814 年，他在《概率的哲学随笔》里写了一段话，大意是这样：

设想有一位智者，在某一时刻知道推动自然的一切力，也知道组成自然的一切东西各自的位置。只要他的头脑大到能把这些数据全部拿来分析，他就能用同一个公式，把宇宙中最大的天体和最轻的原子的运动都包括进去。对他来说，没有什么是不确定的，未来和过去一样，都摊开在他眼前。

后来的人管这位智者叫“拉普拉斯妖”。

这位“妖”今天其实就住在你的手机里，只是缩小了很多。天气预报说明天下午三点开始下雨，导航说你会在七点十二分到家，它们背后都是同一种信心：只要知道现在的状态和规矩，就能往后推。推得不准，人们第一个念头是“数据还不够多、算力还不够大”，而不是“世界本来推不出来”。这就是拉普拉斯留下的那份底气。

这段话常被当作“机械决定论”的标本来批评。可本书想先请你看到它动人的地方。它表达的是一种极大的信心：世界是一个整体，有一套从头到尾一致的规矩，人的理性原则上能把它读完。没有一个角落是神秘的禁区，没有一件事是“本来就说不清”的。

还流传着一个故事。拿破仑读了拉普拉斯的书，问他书里怎么没提到上帝。拉普拉斯回答，大意是“陛下，我不需要那个假设”。这个故事是几十年后才由别人转述出来的，未必可靠，可它说出了那个时代的气氛：读这本书，连作者都可以不问了。书就是书，摊在那里，字字分明。

到这里，发现学的科学观有了最完整的形状（显露）：

- 自然是一本早已写好的书，它的字是数学；
- 书里的每一个字都在那里，等着被读出来；
- 科学家是读者，好读者要擦干净眼睛，不往书里添字；

· 读得越多，剩下没读的越少；原则上，这本书可以读完。

◆ 六、这幅图也来到了中国

郑国栋那行“自然是一本书”，不是他自己想出来的。它有一条从欧洲走到济南讲台的长路。

明朝末年，传教士利玛窦和徐光启合作，把欧几里得《几何原本》的前六卷译成中文，1607 年刊行。徐光启在《刻几何原本序》里称赞这部书“由显入微，从疑得信”，意思是一步一步推下去，可以从怀疑走到确信。那是中国读书人第一次成规模地接触“用几何读世界”的方法。

真正让这幅图景在中国扎根的，是二十世纪初。1915 年，陈独秀创办的刊物后来改名《新青年》，提倡“德先生”和“赛先生”，也就是民主与科学。在那一代人眼里，科学首先是一种破除迷信的力量：用实验和证据，去替代鬼神、风水和“祖宗之法”。1923 年还有一场著名的“科学与人生观”论战。张君劢认为人生观是主观的、自由的，科学管不了人心；丁文江反驳说，人生观也该交给科学的方法去回答。

这一段历史，让“科学”在中文里带上了一层特别的分量。它不只是一门学问，还是一种启蒙，一种做人做事要讲证据的态度。郑国栋读中学时的物理老师，在黑板上写的也是类似的话。他当年眼睛发亮，亮的不只是公式，还有那种“世界可以被弄明白”的底气。

这份底气，正是发现学科学观给中国几代人的礼物。本书接下来讲它对在哪里，你可以想着这份礼物来读。

◆ 七、这幅图对在哪里

现在要做本书最看重的一件事：先把这幅图对的地方讲足。

它对的地方很多，本书挑出最要紧的三样：客观，可复验，抗私意。这三样不是空口号，它们在几百年里实实在在地改变了人类处理分歧的方式。

第一样，客观：结果不随人走。

在发现学的图景里，自然有它自己的字，不管谁来读，读到的都应当是同一句话。哈雷彗星回不回来，不看英国人还是法国人算，不看算的人是贵族还是平民，也不看他信什么教。

这听起来平常，在历史上却是一件大事。很长时间里，一个说法对不对，要看谁说的：是古代圣贤，是教会，还是国王的学者。发现学的科学观把裁判权交给了一个谁也收买不了的东西：自然本身。

日常里你天天受这份好处。你去菜市场买肉，秤上显示一斤二两，你和摊主都看那杆秤，不看谁嗓门大。秤可能有偏差，可大家先默认“有一个真重量在那里”，然后围着它去校、去争。这份默认，让陌生人之间可以做生意。

第二样，可复验：别人能照着做一遍。

1660 年，伦敦的一群学者成立了一个学会，两年后得到国王特许，就是后来的英国皇家学会。学会的格言是一句拉丁文 Nullius in verba，大意是“不随他人之言”：别光听谁说，要拿出来看。

学会早期的一项重要工作，是在会员面前当场做实验。罗伯特·玻意耳造了一台抽气机，能在会员们眼前把玻璃罩里的空气抽走。大家一起看罩子里的蜡烛怎样熄灭，挂在里面的怀表滴答声怎样变轻，小鸟、小鼠怎样难受。做完了，报告里写明有哪些可靠的人在场见证，再把过程写得详详细细，让没到场的人也能照着重做一遍。

“能被别人重做一遍”，从此成了科学的一条硬规矩。一个结果，只在一个人手里灵、换个人就不灵，是不算数的。

日常里也一样。一个朋友说“这家店的红烧肉特别好吃”，你会将信将疑；三个不认识的人分别去吃，都说好吃，你才会真去。菜谱能流传，就是因为它写得让别人能照着做出来。

第三样，抗私意：不让人的心愿冒充自然的声音。

1784 年，巴黎流行一种“动物磁气”疗法，由一位叫梅斯梅尔的医生带起来。据说有一种看不见的磁流体充满人体，治疗者用手隔空一挥，病人就会浑身抽搐，病也随之好转。很多上流社会的病人都说自己感觉到了。

法国国王组织了一个调查委员会，成员里有当时正在法国的美国人富兰克林，也有化学家拉瓦锡等人。委员会想出了一个办法：把受试者的眼睛蒙上。结果是，受试者以为自己被“磁化”时，就会抽搐，哪怕其实没人对他做任何事；真被“磁化”了却不知道时，反而毫无反应。委员会的结论是：起作用的是想象，不是磁流体。

这可能是历史上最早的“盲法”实验之一。它的精神，正是培根说的擦干净眼睛：不让受试者的期待、也不让实验者的期待，冒充自然的回答。今天的新药要做双盲试验，医生和病人都不知道谁吃的是药、谁吃的是安慰剂，就是同一条路上的后来者。

日常里，你一定见过反面。一个人特别想买某只股票，就只看得见利好消息。一位家长特别相信某种补脑保健品，孩子考好了就归功于它，考砸了就说“吃得还不够久”。发现学的科学观给了人一种对付自己的办法：先承认有一个不随你心愿的自然，再设计手段，挡住你的心愿。

把这三样长处，和它们背后的默认，排成一张表：

发现学的默认	它带来的长处	一个日常的样子	本书怎样看
自然是一本早已写好的书	相信世界有秩序、可读懂	体检报告比“看气色”靠得住	秩序要保住，“早已写好”要再问
不管谁来读，读到的都一样	客观：裁判权交给自然	买卖双方都看那杆秤	完全保留，这是对账的前提
读法必须让别人能照做	可复验：一个人说了不算	菜谱写清楚，别人才做得出	完全保留，这是结晶的判据
读者要擦干净眼睛	抗私意：心愿冒充不了自然	新药双盲试验	完全保留，这是挡住偶像的闸
仪器是一扇透明的窗	让人敢信读数	额温枪一“嘀”就信	要再问：窗子自己也在造读数
读得越多，剩下越少	给人往前走的信心	拼图拼一块少一块	要再问：新读数常常带出新空白

这三样长处合在一起，还带出一个常被忽略的好处：认错变得不丢人。

如果对错由谁的地位来定，认错就等于丢了地位。如果对错由那个谁也收买不了的自然来定，一个人说“我算错了”，丢的只是那一次计算，不是他这个人。导航软件每天被千万次绕路纠正，没有人觉得它丢脸；一个学者承认自己的结论被新数据推翻，在科学的规矩里反而是本分。这份“认错不丢人”的风气，是发现学科学观最可贵、也最难得的遗产之一。

表里前四行，本书一样都不打算丢。后面会讲到，本书自己的说法离开这四样根本站不住：没有客观，就没有可以对账的另一方；没有可复验，就判断不了一个说法是不是真的稳；没有抗私意，“对不上”就会被人的心愿悄悄抹平。

◆ 八、它默认了什么，又停在哪里

可是表里最后两行，已经露出一点缝。

先看贺子轩那一问：“这本书是谁写的？我们读出来的，就一定是它本来写的吗？”

发现学的科学观对这一问的回答，是不回答。它把“书早已写好”放在一切讨论之前，当作不用问的起点。读者可以读错，可以读漏，可以读得慢；可是那本书本身，是现成的、完整的、一个字也不会多的。

这个默认，带出了三个连锁的默认。

一是，读出来的符号是透明的。 牛顿写下的引力公式，被当成那本书里本来就有的一行，只是被抄了出来。公式本身怎么来的、为什么用这些记号而不用别的、在多少次计算失败后才定下来，都不重要。

二是，仪器是透明的。 望远镜被当成一副更好的眼镜，温度计被当成一只更灵的手。它们只是让人看得更清，不会让人看见原来不存在的东西。

三是，读书的人是透明的。 科学共同体被当成一群清洁工，任务是擦掉每个人眼睛上的偶像。擦干净了，人就消失了，只剩书和读出来的字。

还有一个默认藏在表的最后一行：读得越多，剩下越少。 1900 年 4 月，英国物理学家开尔文在伦敦皇家研究所演讲，说热和光的动力学理论之美，正被“两朵乌云”遮住。后来流传开的说法，是物理学晴朗的天空上只剩两朵小乌云。

后来的人常把它当笑话讲，因为那两朵“小乌云”，一朵牵出了相对论，一朵牵出了量子力学。可是开尔文并不糊涂。他那次演讲，本意是点出两处严重的难题，不是宣告物理学快要完工。

只是在那个年代，不少人以为力学的大厦已大体建成，剩下的多是修补细节〔转述〕。在发现学的图景里，这样的气氛并不难理解。

这三个“透明”，在大多数时候都很好用，像你戴眼镜时不会去想眼镜。

可是你一定有过这样的经历。新配了一副眼镜，头两天走楼梯总觉得台阶在晃，地面像是斜的。过几天，晃没了，你又忘了眼镜的存在。那两天里你看见的“斜的地面”，是地面的，还是眼镜的，还是你那双还没适应的眼睛的？三样东西一起作用，才有你看见的那个台阶。等你适应了，三样东西缠在一起分不开，你就只说“我看见了台阶”。

科学里的仪器和训练，也是这样慢慢变透明的。变透明，不等于它们不在。可它们让一个问题始终没被问起：**在读者和那本书之间，到底发生了什么**。

本书把发现学科学观停下的地方，说得具体一点：它把“客体”那一头当成了不用动的常量。书早已写好，这一项不参与变化；会变的只是读者读得准不准。这正是本书的姊妹篇《SDE 符号学》第 4 章说过的那个亏空：哲学家们在认识的一头花了无数心思，客体那个变量，却一直没人去动。

这里要很小心。说它停在这里，不是说它错了。说它停在这里，是说它停下的地方，正好是接下来要走的一步。

这一步怎么走，第 2 章会从一个具体的现象讲起：两个人看同一样东西，看到的是不是同一样东西。第 3 章再给出本书完整的说法。

这里先预告一句本书的立场，好让你带着它读下面那个例子。

本书不说“没有那本书”，也不说“读出来什么都行”。本书说的是：科学里有两样东西在反复碰面。一样是人立起来的概念、公式、预言，本书叫它**理念符号**。一样是现实自己留下的痕，比如望远镜底片上的一个光点、温度计里停住的一格水银，它们不需要谁解释也立在那里，本书叫它**现实符号**。

两样东西碰在一起，对得上，就相安无事；对不上，解释就开始了，一直要到沉下一个新的、稳的、整的、能被带走的东西才停。本书把这种两样东西不吻合的时刻叫作**对不上**，把最后沉下来的那个东西叫作**结晶**。判断它是不是结晶，看三条：稳定，换个时候、换个人还是它；整体，拆开就不再是它；独立，能离开发生的地方，被带到别处去。这三条，本书叫作“三判据”。

在发现学的图景里，读者是在抄书。在本书的图景里，读者是在对账，而且账本的两边都在变。

还有一样东西住在读者身上，叫**自我符号**：一个科学家多年训练练进手里、眼里的判断，一个天文学家一眼就认得出哪个光点是彗星。这一样，在发现学的图景里被当成要擦掉的偶像；本书会在后面几章讲到，它同样是对账里不可少的一方。

◆ 九、一个完整的例子：彗星回来的那个圣诞夜

现在回到郑老师每年都讲的那个故事。本书把它用两种读法各读一遍。

先用发现学的读法。

1682 年，一颗明亮的彗星出现在欧洲的夜空。哈雷观测了它，后来又翻查历史记录，注意到 1531 年和 1607 年出现过的两颗彗星，轨道和它非常相像。他推断这是同一颗彗星，大约每七十多年回来一次。1705 年，他发表了一份彗星天文学的概要，预言它将在 1758 年前后再次出现。

半个多世纪后，法国数学家克莱罗和同事拉朗德、勒波特夫人一起，花了几个月时间，用牛顿的引力理论把这颗彗星的回归时间重新精算了一遍。1758 年 11 月，克莱罗在巴黎科学院宣布：彗星过近日点的时间，大约在 1759 年 4 月中旬，误差可能在一个月左右。

1758 年圣诞夜，德国德累斯顿附近一位务农的天文爱好者帕利奇，用望远镜看见了它。彗星实际过近日点的时间，是 1759 年 3 月中旬，落在克莱罗给出的误差范围边上。

在发现学的读法里，这个故事干净极了：彗星的轨道早就写在自然这本书里，牛顿读出了语法，哈雷读出了这一行，克莱罗把这一行读得更细。彗星准时回来，证明他们读对了。从那以后，牛顿力学在欧洲几乎再没有人怀疑。

这个读法有它的力量。它说的每一件事都是真的：彗星确实回来了，计算确实准，这确实是牛顿力学最漂亮的一次胜利。郑老师讲了三十年，没有讲错一个字。

再用发生学的读法。

可是请把故事放慢，看看里面有没有一条可以独立指认的缝。

有的。缝就在哈雷自己翻出来的那几个年份里：1531 年，1607 年，1682 年。前一个间隔是七十六年，后一个间隔是七十五年。

如果自然这本书只有“彗星绕太阳走椭圆”这一行字，同一颗彗星的周期应当一样长。两个间隔不一样，这是一个读数和一个预期对不上了。

面对这一条缝，可以有两种处理。一种是说：这不是同一颗彗星，哈雷认错了。另一种是说：是同一颗，只是路上有别的东西在拽它。哈雷走了第二条路。他提出，彗星一路上会被别的行星拉一下，尤其是木星，周期因此忽长忽短。

正是这条缝，逼出了后来克莱罗那几个月的苦算。要算准彗星什么时候回来，光有“椭圆轨道”这一个理念符号不够，得把木星、土星对它的拉扯一段一段加进去。这是牛顿理论在当时最难的计算之一，三个人分工，据说算得昏天黑地。算的过程本身，就是在把一条缝一点点补成一套更细的理念符号：带着摄动修正的轨道。

然后是那个圣诞夜。帕利奇望远镜里的那个模糊光点，是现实留下的痕。它不需要谁解释，就在那里。可是要把这个光点认作“哈雷彗星回来了”，得先有那套带摄动修正的轨道，告诉人往天上哪一块看；还得有一双练过多年的眼睛，认得出彗星和星云的区别。一个现实的痕，一套算出来的概念，一双练出来的眼睛，在那一夜碰到了一起。

对上了。那一刻沉下来的东西，比“哈雷彗星”这个名字大得多。“牛顿力学可以算准天上的事”这个判断，在整个欧洲学界结晶成了一个稳的、整的、可以带走的东西。

还有一个细节，发现学的读法常常略过：误差。克莱罗给出的是四月中旬，实际是三月中旬，差了一个月左右。这一个月的差，在当时也引起过争论，有人拿它

挑剔克莱罗的计算。克莱罗自己承认，计算里做了不少近似，木星、土星的质量也还量得不够准。他还提到一种可能：土星以外也许还有看不见的天体在拉它。

这一小块对不上，当时没有动摇牛顿力学。它被一个更大的对得上压住了，留在账本角落里。后来天王星的轨道又出现对不上，那一回结晶出了什么，第 5 章再讲。

顺便看一眼这颗彗星的名字。在哈雷之前，1531 年、1607 年、1682 年的三颗彗星，在人们眼里是三颗不同的彗星，各自出现，各自消失。哈雷的计算让它们被看成了“同一颗、会周期回来的彗星”。这是一个新的区分和一个新的辨认单位一起长出来：从此天上多了一类东西，叫周期彗星。1759 年它回来以后，人们才用哈雷的名字称呼它，那是给一个已经能辨认的东西加上一个新名字。

两件事要分开看。“哈雷彗星”这个名字是后加的，加名字不难；难的是前一步，把三次出现认作一个东西。那一步，是七十六年和七十五年那条缝、几个月的苦算、一个圣诞夜的光点一起换来的。

两种读法摆在一起：

在发现学的读法里，这是一个“读对了”的故事。书早已写好，牛顿、哈雷、克莱罗依次读出了它，彗星准时回来作证。

在发生学的读法里，这是一个“对上了”的故事。一条缝（七十六年和七十五年），逼出一套更细的计算；计算给出一个可以落空的预言；一个现实的痕在约定的时候出现在约定的地方；一群人接住了它。一个科学事实就这样结晶了。

两种读法讲的是同一件事，彗星一样准时，计算一样漂亮。区别在于：第二种读法让你看见了那条缝，看见了几个月的苦算，看见了那个预言本来是可以落空的。

◆ 十、放回郑老师的讲台上

过了一周，郑国栋又讲到万有引力的习题课。下课前五分钟，他在黑板右上角那行字下面，又添了一行：

自然是一本书，物理是读它的方法。

可这本书，是一页一页对出来的。

他把哈雷翻出来的三个年份写在黑板上，问全班：“七十六年，七十五年，不一样。要是你是哈雷，你怎么办？”

教室里安静了一会儿。有人说“算错了吧”，有人说“不是同一颗”。贺子轩举手：“是不是有东西在半路拉了它一把？”

郑国栋笑了。他想起自己当年在大学里第一次自己算出一个摄动修正时，在宿舍里坐到半夜的那种感觉。那份感觉，是在一次对不上之后才来的，不是在背下牛顿定律的时候。

下课后，贺子轩又留了下来。

“老师，那天您说书不会写错。”他说，“可要是没有那七十六年和七十五年对不上，哈雷是不是就不会去想木星？”

“多半不会。”郑国栋说，“他会满足于一个整数周期，说每七十五年回来一次。那样算出来的日子，会差得更远。”

“那对不上不是坏事。”

“对不上是好事。”郑国栋把粉笔头放进盒子里，“可你记住，对上了才算数。光有对不上，没有那几个月的苦算，没有那个圣诞夜，什么也沉不下来。”

贺子轩点点头走了。郑国栋看着黑板上两行字，觉得这一届没白带。

他没有擦掉第一行字。那一行讲的是科学最宝贵的东西：世界有秩序，能被读懂，不随谁的心愿改。第二行讲的是另一半：这份读懂，是一次次对账对出来的，每一次都可能对不上，正因为可能对不上，对上的那一次才算数。

这一章讲的那几位，培根、伽利略、牛顿、拉普拉斯，没有一个是本书要驳倒的对象。他们给了这门学问一副骨架。本书后面二十一章，是在这副骨架上补上血管和神经。实验怎样制造对不上，仪器怎样造出读数，记号和单位怎样把概念刻进世界，一群人怎样托住一个事实。

对你来说也一样。下次你听到一句“科学已经发现了”，可以在心里多问一句：它是在哪一次对不上之后，对上的？那条缝在哪里？找得到那条缝，你对这句话的信任会更踏实；找不到，也不必急着怀疑，记下来，去问问懂行的人。

带 走 的 话

发现学的科学观把客观、可复验、抗私意交给了我们；它没有问的，是读者和那本书之间发生了什么。

小　账

前人在这里关上的门：把“书早已写好”放在一切讨论之前，客体那一头不参与变化；本书打开的门：把读出来的东西看成理念与现实对账后的结晶。

发生被收回为发现的那一下：七十六年与七十五年那条缝、克莱罗几个月的苦算，被压成一句“自然本来就是那样写的”。

想 一 想

1. 你最信任的一个“数字”是什么，体重秤、血压计，还是银行余额？你信它，靠的是本章说的哪一样：客观、可复验，还是抗私意？
2. 你有没有过这样的时候：一件事你本来很确定，后来两个说法对不上了，逼着你重新想？那一次最后沉下来的是什么？
3. 培根说的四种偶像里，你身上最常犯的是哪一种？最近一次是在什么时候？

◆

02

第 2 章

它停在哪里

这一章的问题

同一张胸片，何嘉怡看成血管，陈医生看成结节。他们看见的是同一样东西吗？看法不一样时，该回到哪里去对？

◆ 一、同一张片子两种看法

新加坡下了一整夜的雨。

何嘉怡二十九岁，在一家公立医院的放射科做技师，这个月轮到夜班。凌晨两点多，急诊送来一位六十出头的阿伯，咳了快一个月，要拍一张胸片。

她让阿伯贴紧胸板，双手叉腰，肩膀往前转，深吸一口气，憋住。曝光，一秒都不到。片子出来，她先做技师该做的事：查质量。没有晃动，吸气够深，肩胛骨转开了，左右锁骨对称。这张片子拍得干净。

就在她准备传给值班医生的时候，眼睛在右上肺停了一下。

那里有一个小小的圆影，比周围略白，大约一厘米。她看过几千张胸片，第一个念头是：血管断面。血管正对着射线走的时候，在片子上就是一个小圆点。也可能是乳头的影子，男病人身上也常见。她没有多想，按流程在系统里加了一句备注，传了出去。

二十分钟后，值班的放射科医生陈伟明（Dr. Tan Wei Ming）走过来，指着屏幕上同一个位置：

“这个，你也看到了？”

“看到了，我以为是血管。”

“边缘不对。血管断面边缘清楚，旁边能接上走向。这个边有点毛，周围接不上。”他把三年前阿伯来体检时拍的旧片调出来，两张并排，“你看，旧片上这里什么都没有。”

他写报告：右上肺结节，建议进一步做 CT。

交班的时候天快亮了。何嘉怡站在饮水机边上，脑子里转的是一个很简单的问题：那张片子从头到尾没有变过一个像素，她和陈医生看的是同一块屏幕、同一个位置。为什么她看到的是血管，他看到的是结节？

陈医生收拾东西的时候说了一句：

“我做住院医生第一年，也什么都看不出来。”

这句话让她更糊涂了。如果结节一直在片子上，为什么有人看得见、有人看不见？如果看得见要靠练，那看见的到底是片子上的东西，还是自己练出来的东西？

第 1 章讲了一种很结实的科学观：自然是一本摊开的书，科学家的本事是把它读准。按这个看法，事情很简单——阿伯的肺里有一个结节，射线把它印在片子上，陈医生读对了，何嘉怡读漏了。读漏是因为经验不够，练够了就能读对。

这个看法没有错到哪里去。它守住了一个很要紧的东西：片子上确实有东西，不是谁想看见什么就有什么。

可是它解释不了陈医生那句话。如果读书只是把书上的字认出来，那“什么都看不出来”的人，看到的就应该是一张模糊的片子，而不是一张清清楚楚、却“没有结节”的片子。何嘉怡那晚看到的，不是模糊，而是一根血管。她看得清清楚楚，只是看成了另一样东西。

这一章就从这里开始。二十世纪有一位科学哲学家，把“看”这件事正式请上了台面。他叫汉森。

◆ 二、汉森把“看”请上台面

要明白汉森为什么要紧，得先知道他在跟谁说话。

二十世纪上半叶，有一种影响很大的科学哲学，通常叫逻辑经验主义。它的想法很干净：科学像一座楼，最底下一层是观察。观察是中立的，像一台照相机，谁去拍都一样。上面几层是理论，理论要一层层建在观察上，靠观察来检验。

维也纳学派的纽拉特、卡尔纳普、石里克等人，在二十世纪三十年代初甚至争论过“记录语句”，也就是最朴素的观察报告，比如“某时某地，指针指向 3”。他们希望用这种句子当整座楼的地基。

这套图景是第 1 章那种科学观在哲学上的精密版本。它的长处实打实：观察是公共的，你看到的指针位置我也能看到；争论最后可以回到读数上解决；谁也不能靠嗓门大改掉一个读数。

汉森（Norwood Russell Hanson，1924—1967）在 1958 年出版《发现的模式》，正面去碰这座楼的地基。他问：观察真的像照相机一样中立吗?

他在书的第一章摆了一个场景，后来成了科学哲学课上最有名的画面之一。

设想天文学家第谷和开普勒一起站在小山上，看日出。第谷相信地球不动，太阳绕着地球转——他自己设计过一套体系，让别的行星绕太阳、太阳带着它们绕地球。开普勒相信哥白尼，地球自转，同时绕太阳转。

汉森问：这两个人在黎明时分，看到的是同一样东西吗?

一种回答是：当然一样。同一个太阳，同样的光进入两人的眼睛，视网膜上的像几乎相同。分歧是看完之后的解释不同：第谷解释成“太阳升起来了”，开普勒解释成“地平线转下去了”。

汉森不满意这个回答。他说，视网膜上的像不是“看”。看，是看见某样东西。第谷看见的是一个在动的太阳和一块不动的大地；开普勒看见的是一个不动的太阳和一块正在转开的大地。看这件事本身，已经被各自的理论装满了。汉森用的说法后来被概括成一句话：观察渗透着理论〔转述〕。

他还借了一张图：鸭兔图。

这张图最早出现在 1892 年德国幽默杂志《飞叶》（Fliegende Blätter）上。后来美国心理学家贾斯特罗用它做知觉研究，维特根斯坦在《哲学研究》里讨论“看

出一个面相”时也用了它。图上就几根线条：朝左看是一只鸭子，嘴伸出去；朝右看是一只兔子，那张“鸭嘴”变成了两只耳朵。

线条一笔没变。你一会儿看到鸭，一会儿看到兔，中间有那么一下“翻过去”。翻过去的时候，你并不是先看到一堆中性线条、再加上“鸭”的解释；你是一下子就看到了鸭。

汉森的意思是：科学家看实验，比看鸭兔图复杂得多，可结构一样。他在书里举过一个物理实验室的例子：同一根 X 射线管，一个物理学家看到的是“从阴极那头看过去的 X 射线管”。一个外行看到的，是一些玻璃和金属丝〔转述〕。外行并没有看漏什么，玻璃和金属丝他看得一清二楚；他只是没有“看成”X 射线管。

汉森还分了两种“看”。一种是“看成”：把线条看成鸭子。另一种是“看出”：看出这根管子通电后会发射 X 射线，看出这片云要下雨。后一种“看”里，已经装着一整套知识：你看见的不只是一个形状，而是这个形状接下来会怎样。

他的意思是，科学家的看，大多是“看出”。物理学家看那根管子，看见的已经是阴极、阳极、电子流、射线的方向；这些不在视网膜上，却在他看见的东西里。一个人懂得越多，同一眼里看见的就越多，也越难再看回一堆玻璃和金属丝。

这下何嘉怡的困惑有了第一个答案。她那晚不是没看见，是看成了血管；陈医生不是视力更好，是看成了结节。差别不在眼睛，在眼睛背后那一整套东西。

本书要先把汉森对在哪里写足，因为他对的地方很多。

第一，他把一个日常经验正式变成了哲学问题。下棋的老手扫一眼棋盘，看到的是“白方要输”，新手看到的是一些棋子的位置。修车的老师傅隔着引擎盖听到的是“皮带松了”，你听到的是一阵噪音。品酒的人喝到的是“橡木桶陈了三年”，你喝到的是酒。这些都不是先看到、再推理，而是一下子就看成了某样东西。汉森让科学哲学不能再假装这件事不存在。

第二，他打掉了一种天真的说法：数据自己会说话。数据不会自己说话，同一堆数据，在不同的人眼里可以说出完全不同的话。这一点对后来的科学史研究影响极大，库恩在《科学革命的结构》里也借过这条思路（见第 6 章）。

第三，他解释了为什么科学争论常常久拖不决。两派学者面对同一组读数争了几十年，不一定是谁笨、谁固执，而可能是双方“看到”的根本不是同一样东西。

第四，汉森并没有因此滑向“怎么说都行”。他很看重事实，也很看重科学的进步。他书名里的“发现”二字是认真的：他想证明发现有它自己的逻辑，不是灵感一闪、没法讨论。他接过了皮尔斯讲过的“溯因推理”：从一个令人惊讶的现象出发，倒推出一个能让它不再奇怪的假说。他还专门拿开普勒推出火星椭圆轨道的过程来分析〔转述〕。

这四条加在一起，汉森的贡献可以用一句话说：

他让“看”本身成了科学哲学要研究的对象，而不再是一块不用检查的地基。

◆ 三、同一个读数是不同的符号

汉森的思路往前推一步，就得到一个很有用的说法：同一个读数，放进不同的理论里，就是不同的符号。

这里先交代一下本书对“符号”的用法，后面几章会反复用到。本书说的符号，是某样东西经过反复的来回之后沉下来、站稳了的结果。它能被反复认出（稳定）；拆开就不再是它（整体）；能离开它出生的地方，被带去别处（独立）。这三条叫三判据，第 3 章会细讲。你此刻只要记住一个意思：符号不是贴在东西上的标签，是一次来回沉下来的结晶。

拿这个意思回头看，日出就不是一个符号，而是两个。

在第谷那里，日出是“太阳运行到地平线以上”；在开普勒那里，日出是“观察者所在的地面转到了面向太阳的一侧”。这两个说法各自都稳定、整体，也都能被带到别处去用：第谷可以拿他的说法去排历书，开普勒也可以。它们是两个符号，不是一个符号穿了两件外衣。

下面这张表，把几组“同一个读数、两种符号”排在一起。

同一个读数	在甲理论里是	在乙理论里是
黎明时分太阳出现在东方地平线上	太阳绕静止的大地运行升起（第谷）	大地自转把观察者转向太阳（开普勒）

同一个读数	在甲理论里是	在乙理论里是
火星有几个星期在星空背景上往回走	火星在本轮上倒转（托勒密，详见第 18 章）	地球在内圈追过火星（哥白尼）
胸片右上肺一个一厘米的圆影	血管正对射线的断面	一个需要追查的结节
通电导线旁的罗盘针扭了一下	导线里“电的冲突”向外作用（奥斯特，1820）	导线周围存在环形的磁力线（法拉第以后的场的说法）
高山岩层里嵌着海生贝壳化石	一场大洪水把海里的东西冲上了山	海底地层在漫长年代里被抬升成山
体检单上一项指标高出参考范围一点	生理波动，下次复查	早期病变的信号

你看这张表，会有一种很自然的反应：每一行都是一个读数、两种解释，总有一种是对的。比如胸片那一行，阿伯的肺里要么有结节、要么没有，CT 一做就知道。

这个反应是第 1 章那种科学观的反应，它有道理，本章后面还要回来护住它。可是汉森要你先停一下：在 CT 做出来之前，何嘉怡和陈医生看到的就已经不是同一样东西了。不是同一个东西的两种解释，而是两个“看见”。

这一下停顿很要紧。它说明在科学里，一个读数要成为“证据”，必须先成为某个理论里的符号。离开了理论，那一厘米的白影只是一片灰度略高的像素，它什么也不证明。指针指向 3，要先知道这是电流表、量程多少、接在哪里，才是一个读数；否则它就是一根铁片停在一道刻线上。

汉森把这一层讲清楚了。到这里，他走了一大步。

◆ 四、动了看的人，没动被看的

可是汉森也停下了。停在哪里，要看他动了什么、没动什么。

他动的是“看的人”这一头。观察不再中立，看见什么取决于你带着什么理论、受过什么训练。第谷和开普勒带着不同的理论，所以看到不同的日出。

他没动的是“被看的东西”这一头。在他的小山上，太阳始终是那一个太阳。两个人的分歧，是对同一个太阳的不同看法；那个太阳本身稳稳地在那里，不受谁看、怎么看的影响。鸭兔图也一样：线条是固定的，翻来翻去的只是看的人。

这个结构，并不是汉森一个人的。本系列书二第 4 章把它追到了更早的地方：康德、尼采、皮尔斯，三个性情完全不同的人，在这里共用一个结构。

康德说，我们只能认识被自己的感性形式和知性范畴整理过的“现象”，事物本身是什么样，永远够不着。这是悲观的一版：看的人这一头装满了先天的框子，被看的东西那一头锁在框子外面。

尼采说，没有事实，只有解释〔转述〕。这是嘲讽的一版：看的人这一头被推到极致，一切都是视角。可是“解释”这个词本身已经假定了有一个被解释的东西，只是他不再关心它。

皮尔斯说，符号背后有一个“动力对象”，探究的共同体只要一代代查下去，终会越来越接近它。这是乐观的一版：被看的东西够得着，只是要等。

三个人一个悲观、一个嘲讽、一个乐观，可是结构一样：**看的人那一头可以动，被看的东西那一头不动**。书二把这叫作“客体那个变量没人动”。

汉森之后，库恩把这条思路推得更远，说科学革命之后，科学家好像是在一个不同的世界里工作〔转述，详见第 6 章〕。这句话听上去像是连被看的东西都动了。可细看下去，它说的仍然是科学家的“世界观”换了，那个让他们换来换去的东西本身是什么、怎样站稳的，并没有被正面讨论。

汉森把这个结构带进了科学哲学。他比逻辑经验主义多走了一步——观察不中立；可他和逻辑经验主义共用一个前提——被观察的东西是现成的，在那里等着，问题只在于我们怎样去够它。

这个前提一旦不动，汉森的洞见就会带出一个他自己也不愿意要的麻烦。

麻烦是这样的：如果看见什么取决于理论，那观察还怎么检验理论？第谷用第谷的眼睛看，永远看到太阳在动；开普勒用开普勒的眼睛看，永远看到地在转。双方各看各的，谁也说服不了谁。科学岂不成了各说各话？

汉森之后，不少哲学家正是这样批评“观察渗透理论”的。美国哲学家谢弗勒在 1967 年的《科学与主观性》里就担心，这条思路会把科学的客观性掏空。这些批评者想要保住的是观察的检验力；他们给出的办法，多半是退回去，证明观察其实还是有一个中立的核心。

你看，双方吵得很凶，可他们在吵的是同一个问题：我们够那个现成的东西，是干净地够，还是戴着眼镜够？谁都没有问：那个东西本身，是不是也是在这一来一回里才站稳的？

把汉森停下的地方拆细，是三处。

第一处：被看的东西被当成了现成的。

在阿伯的胸片这件事上，这个前提的意思是：阿伯肺里早就有一个叫“结节”的东西，它一直在那里等着，陈医生的眼睛够到了它，何嘉怡的眼睛没够到。

这里要小心，不要一步踩空。阿伯的肺组织当然在那里，那一小块组织比周围密，挡住了更多射线，这些都不由谁看、怎么看决定。本书没有说肺里什么都没有。

本书要动的是另一样东西：“结节”。“结节”不是那块组织自己挂出来的牌子。它是放射学里一个经过很多年、很多病例、很多次对照才站稳的说法：多大算结节，边缘什么样算可疑，多久不长算稳定，什么时候要活检。这个说法今天非常稳，稳到陈医生一眼就能看出来；可它的稳，是挣来的。在它站稳之前，同一块组织在片子上的影子，会被读成别的东西。

所以“结节”不是在那里等着被看见的。它是一次次对照里结晶出来的东西，而阿伯身上那一块组织，是今晚又一次被拿来对照的材料。

第二处：一切都被收进了“看”里。

汉森说观察渗透理论，这个“观察”的范围太大了。他把片子、眼睛、读法都装进了同一个词。

可是片子上的灰度，并不渗透任何理论。X 射线穿过阿伯的胸腔，被骨头挡得多，被肺挡得少，被那一小块密组织又多挡了一点；感光板记下了这一切，不管有

没有人看、谁来看。屏幕关掉，那些灰度还存在系统里；三年后调出来，它们还是那样。

这一层，是不需要解释者也立得住的痕，像一条被脚踩出来的小路，像河水刻出来的河床。本书管这一类叫现实符号。

真正渗透着理论的，是另外两层：一层是“这个白影是结节”这个读法，本书叫理念符号；一层是陈医生练了十几年、何嘉怡练了几年的那双眼睛，那种不用想就会往边缘、往走向、往旧片上看的习惯，本书叫自我符号。三类合在一起，叫三界符号。

汉森把三层压成了一层，所以他的洞见一推到底，就好像连片子本身都“渗透理论”了。批评者担心的客观性被掏空，根子在这里。要保住检验力，不必退回中立观察，只要把痕和读法分开：读法渗透理论，痕不渗透。痕可以一遍遍回去对。

第三处：新的看法从哪里来，要花多少力，他没有算。

第谷和开普勒看到不同的日出，因为他们带着不同的理论。可是开普勒的理论是从哪里来的？他并不是生下来就相信哥白尼，更不是生下来就知道火星走椭圆。

汉森其实摸到了答案。他讲溯因推理，第一句就是“一个令人惊讶的现象”。惊讶是什么？就是手里已经站稳的东西，撞上了另一样已经站稳的东西，两边对不上。可是汉森把这台发动机装在了“发现的逻辑”里，当成科学家推理的一个步骤；他没有拿它回答：一种新的看法，作为一个新符号，是怎样被逼出来的。这和皮尔斯当年的情形一模一样：发动机在手里，装错了抽屉。

而且，新的看法不是免费的。陈医生那句“我第一年也什么都看不出来”，说的正是一笔账：十几年、几万张片子、无数次被病理报告纠正，才练出那双眼睛。汉森讲“训练有素的眼睛”，却没有问这双眼睛是用多少力气换来的，也没有问为什么一双练成的眼睛那么难改。

放射科里有一个老问题，正好说明练成的眼睛有多难改。读片的人在一张片子上找到一处明显的异常之后，常常会漏掉同一张片子上的第二处。这个现象在放射学文献里有个名字，叫“搜索满意”（satisfaction of search），1962 年就有人专门写文章讨论过。找到了一个，眼睛就像交了差，不再往下找。

这不是粗心。一双眼睛练成之后，它有自己的节奏：看到什么就停，看到什么就走。

这套节奏在绝大多数片子上帮了大忙，又快又准；可它也让眼睛在某些地方自动关门。要改它，光靠一句“下次仔细点”没有用，得一遍遍地被漏诊的病例打回来，再一遍遍地重新练。科室里有些人会给自己定规矩：找到第一处以后，强制从头再扫一遍。这条规矩本身，就是一个新习惯，要花力气才能练成。

你在日子里也见过同样的事。一位开了二十年车的老司机，换到靠左行驶的地方，头几天在每个路口都会往错的方向看。他的眼睛没有坏，只是练得太好了。一双练得越好的眼睛，越难被说服。

这件事，汉森的框架里放不下。在他那里，“看”随理论而变，理论一换，看法就跟着换。可真实的情形是：理论在纸上换了，眼睛常常还要很久才跟上，有时一辈子也跟不上。看的人这一头，并不像他写的那样轻。

这三处，归结成一句：

汉森动了看的人，没动被看的东西；他看见了读法渗透理论，没有把痕从读法里分出来；他说出了新看法会出现，没有算出它从哪来、花了多少。

还有一个细节，值得你记住。汉森这本把“看”彻底翻过来的书，书名叫《发现的模式》。被看的东西在那里等着被发现，这一层到最后都没有被翻动。

◆ 五、一次看是三种符号碰头

本书接着汉森走的一步，是把一次“看”拆开，拆成三种符号的碰头。

先说清一个词：对不上。本书说的对不上，是两样已经站稳的东西彼此顶住了，不是一个人随便的不满意。何嘉怡的眼睛（自我符号）习惯把这种小圆影看成血管，这是站稳的；今晚的片子（现实符号）和三年前的旧片放在一起，同一位置多了一个影子，这也是站稳的。陈医生把两张片并排的那一刻，两样站稳的东西顶住了：如果它是血管，三年前为什么没有？

对不上之前，没有解释。何嘉怡第一眼看成血管，是因为片子和她的习惯对得上，没有任何东西逼她多问一句。这是本系列反复说的一句话：

对得上，就没有解释；对不上，解释才开始。

现在把阿伯这张片子，完整地拆成三种符号。

现实符号：片子上的灰度。 它由射线、组织、感光板一起刻下，不需要谁去看。三年前的旧片也是现实符号，两张片放在一起，就有了一个不依赖任何人眼光的差别：多了一个影子。

理念符号：“结节”。 它是放射学的说法，有定义、有分级、有处理流程。它能被写进报告、带到别的医院、传给 CT 室和胸外科——稳定、整体、独立，三条都满足。它渗透着理论，也正因为渗透着理论，它才能指导下一步做什么。

自我符号：两双眼睛。 何嘉怡那双先查质量、再顺手扫一遍的眼睛；陈医生那双先看边缘、再找走向、然后一定要调旧片的眼睛。这些习惯沉在身上，不用想就会，夜里两点也照样运转。它们是练出来的，练成了也不容易改。

这三样也不是各管各的，它们一直在互相改写。

陈医生那双眼睛是怎么来的？不是背熟了教科书就有的。住院医生读片，写下报告；几天、几周后，CT、手术、病理切片的结果回来，和报告放在一起对。对上了，那种看法就沉得更深一点；对不上，就要回头去想：那天我看漏了什么，看错了什么。几万次这样的来回，眼睛就慢慢长成了现在的样子。

所以自我符号也是对账对出来的，只是它对的账记在身上，不记在纸上。何嘉怡那晚的血管读法，也是这样来的：在几千张片子上，她把小圆点读成血管，几乎每次都对，于是这种读法就沉了下来。它沉得有道理，只是这一次，它碰上了一张它没见过的片子。

这三样一碰头，汉森的困境就松开了。

观察渗透理论，说的是理念符号和自我符号在塑造读法——这一点汉森全对。可是读法之外还有痕，痕不渗透理论，所以痕可以拿来对账。理论再强，也改不了片子上多出来的那片灰度；理论能改的，只是把它读成什么。

放射科有一个很小、很老的做法，正好把这一层演给你看。片子上出现一个疑似乳头影的小圆点，医生拿不准时，会让技师在病人乳头上贴一个小小的金属标记，再拍一张。标记和圆点重合，就是乳头影；不重合，就要另查。

这个做法的意思是：读法有分歧，不靠争，而是去造一个新的痕。金属标记在片子上的位置，不管谁看都一样。新痕和旧痕放在一起，对不对得上，片子自己说了算。

所以本书的说法，可以分三句讲。

第一句：一次看，是现实符号、理念符号、自我符号三种符号的碰头。 看见什么，取决于后两种；能不能对账，取决于第一种。

第二句：被看的那个“东西”，作为科学里的对象，是在一次次对账里结晶出来的。 阿伯肺里那块组织是现实的；可是“右上肺结节，大小一厘米，边缘毛糙，建议 CT”这一个对象，是今晚这张片、三年前那张片、陈医生的眼睛、放射学的分级标准一起碰出来的。明天的 CT 会再碰一次，活检会再碰一次。每碰一次，这个对象要么更稳，要么熔开、重结。

第三句：结晶有标准，不是随便看成什么都行。 它要满足三判据：稳定、整体、独立。还要经得起回到痕上去对。一个读法哪怕很稳——稳到整个科室都这么读——也不等于它对。谣言也很稳。先问它站得稳不稳，再问它方向对不对；后一个问题，靠的是再造新痕、再对一次账。

这样，“客体”这个变量就动了，但动的方式和相对主义完全不同。相对主义说：被看的东西取决于看的人，所以怎么看都行。本书说：被看的东西作为一个对象，是在痕与读法、读法与眼睛反复对账里结晶的，所以要问它在哪几次对账里结晶、结得稳不稳、经不经得起下一次。

问题因此换了一个问法。

发现学问的是：谁看对了那个现成的东西？

本书问的是：这个东西是在哪几次对不上里结晶出来的？它现在有多稳？下一次对账在哪里？

下面这张表，把三种立场并排放一放。

	第 1 章的发现学科学观	汉森	本书
观察是什么	中立的照相机	渗透理论的“看成”	三种符号的碰头

	第 1 章的发现学科学观	汉森	本书
片子上的灰度	对象的忠实记录	和读法一起渗透理论	现实符号，不渗透理论，可回去对账
“结节”	早就在肺里，等着被读出	早就在肺里，有人看得见有人看不见	在一次次对账里结晶的对象
看法为什么不同	有人读错	理论与训练不同	自我符号与理念符号不同，且可指认它们从哪次对不上来
新看法从哪来	读得更仔细	溯因推理，放在发现的逻辑里	两种站稳的符号对不上，逼出新的符号
怎样防止各说各话	观察中立	汉森本人未给出满意回答	回到痕上，或造一个新痕

◆ 六、一个完整的例子：火星的八分

第谷和开普勒在小山上看日出，是汉森设想出来的一幕。可这两个人真的共事过，而且他们之间真正发生的事，比日出精彩得多。

1600 年，开普勒来到布拉格，投奔当时在神圣罗马帝国宫廷做天文学家的第谷。第谷手里有一样当时天下无双的东西：几十年里，用没有望远镜的大型仪器，一夜夜记下的行星位置。他的仪器做得极精，记录的误差据后人估计大约在一到两角分之间。一角分是一度的六十分之一，大约是满月直径的三十分之一。

这里要先替第谷说一句公道话。他坚持地球不动，并不是守旧。他的理由是一个实打实的读数：如果地球绕太阳转，一年里从不同位置看恒星，近处的恒星应该相对远处的恒星挪一点位置，这叫恒星视差。第谷用他那套天下最精的仪器去找，没找到。

没找到，有两种可能：要么地球不动，要么恒星远得超出所有人的想象，视差小到仪器量不出。第谷选了前一种，在当时这是更省事、也更讲证据的选择。恒星视差要到 1838 年才由贝塞尔第一次量出来，小得不到一角秒，只有约三分之一角秒。

所以第谷的“太阳在动”，也不是凭空的偏见，而是他手里的理念符号和他量不出视差这个读数对得上的结果。他看日出的那双眼睛，同样有来历。

第谷给开普勒派的活是火星。火星的轨道在当时所有模型里都最难算。1601 年第谷去世，开普勒接过了全部记录。

接下来几年，开普勒打了一场后来常被称为“与火星的战争”的仗。他先按两千年来天文学的老规矩造模型：行星走圆；从圆心以外一个特别选定的点看过去，它转过的角度是均匀的。这个点，本书叫它偏心匀速点（equant），第 18 章还会讲到它。他用很巧的办法调好参数，这套模型和第谷记录里火星冲日的位置对得相当好，差不过两角分左右——这个模型后来被叫作“替代假说”。

可是拿这套模型去算火星在别的位置，和第谷的记录比，差了大约八角分。

八角分是多少？比满月直径的四分之一略大一点。在第谷之前，天文学家的观测误差常常有十角分，八角分的差在那时根本算不上差，可以放心地归给观测误差。

开普勒没有这样做。他后来在《新天文学》（1609）里写到，正是这八分，指出了改造整个天文学的路。他放弃了圆。又经过几年的计算——他在《新天文学》里自己说，其中一组繁琐的推算，他至少重做了七十遍——他最后得到：火星沿椭圆走，太阳在椭圆的一个焦点上；火星和太阳的连线在相同时间里扫过相同面积。这就是今天课本里的开普勒前两条定律。

发现学的讲法是：火星一直沿椭圆走，开普勒发现了它。

汉森的讲法更细：开普勒经历了一场溯因推理，从令人惊讶的数据，一步步倒推出能让它不奇怪的假说；他最后“看见”了椭圆，像在鸭兔图里看到了兔子。

本书用三种符号把它重走一遍。

第一步，先独立指认那条缝。 这不是事后找补：缝在史料里有名有姓，就是那八角分。

一边是“行星走圆”这个理念符号，它在天文学里已经稳了将近两千年，从柏拉图的学生到托勒密到哥白尼，没有人动过它；它和“天体完美”“匀速圆周”这一整套说法连得极紧，要拆它，代价极大。另一边是第谷的记录：火星的位置经由仪器刻下、写进本子，这些数字一旦记下，就不再随谁的理论改变——在这场对账里，它们担任现实符号的角色。两边顶住了，差八角分。

第二步，看第三个角。 光有八角分还不够，因为八角分完全可以被当成误差吞掉。让它吞不掉的，是开普勒身上的一样东西：他相信第谷的仪器精到两角分。这份信任不是一个念头，是他和第谷记录朝夕相处、反复核过之后，沉在身上的习惯——在他那里，第谷的数字就是可以拿命去赌的数字。这是自我符号。

换一个对第谷没有这份信任的人，八角分就只是噪音。三个角缺一个，这条缝就不成其为缝。

第三步，看能量。 拆一个连了两千年的理念符号，要付出的力气，得大过它的结实程度。开普勒付的是几年的命：一遍遍地算，一次次地错，模型推倒重来。托住他的，是一张已经在那里的网：第谷几十年的记录、哥白尼体系给出的框架、布拉格宫廷给他的位置和时间。没有这张网，他的力气会散掉；没有他的力气，这张网也只是一堆数字。

本书后面会给这几样力气起名字：一个符号有多结实，叫内能；拆开、重接的那股力气，叫动能；托住新结晶的那张网，叫势能。第 3 章会把它们讲清楚。

第四步，看结晶。 椭圆轨道最后站住了。它稳定：后来几百年的观测一再对得上。它整体：椭圆、焦点、面积速度连在一起，拆掉一条，另外两条就失了意思。它独立：它离开了火星、离开了布拉格，被带到每一颗行星，带到彗星，带到今天的人造卫星轨道计算里。

它还有一种特别的稳：将近八十年后，牛顿可以从引力和运动定律把椭圆推导出来。一个结论能被推导回去，说明它压进去的东西能被重新展开——它是一个能返回的压缩。好符号都有这种品质。

这里顺带说一下命名。“行星沿椭圆走”属于提出一个理论对象。这一类命名，不靠任何机构授权成立；它后来写进全世界的课本，也不等于课本替它证明了对错。它的对，是一次次回到天上去对出来的。

现在再回到汉森的小山。

第谷和开普勒在黎明时分看到不同的东西，汉森说得对。可是两人看法的分岔，不是两副天生的眼镜，而是有来历的：开普勒那双“看得见椭圆”的眼睛，恰

恰是第谷自己的数据逼出来的。第谷一辈子攒下的现实符号，撞上了两千年的理念符号，在一个相信这些数据的人身上，逼出了一个新的看法。

被看的那个“火星的轨道”，也不是一直挂在那里等着被看见。在开普勒之前，它是本轮、均轮加一个偏心匀速点；在开普勒之后，它是椭圆；牛顿以后，它是引力的一种结果；再往后，水星那里又出现了新的缝（见第 5 章）。每一次，那颗红色的星都还在夜空里走它的路；变的是“轨道”这个对象，在一次次对账里结晶、熔开、再结晶。

◆ 七、看不一样时先找痕

一个星期后，阿伯做了 CT。右上肺确实有一个一厘米左右的结节，医生建议活检。后面的事，就不归放射科管了。

何嘉怡那天在科室里多待了一会儿，把那两张胸片又并排调出来看。她现在一眼就能看到那个影子，甚至觉得奇怪：那天夜里怎么会看成血管？

她明白了一件事：她不是那天晚上“没看见”，她是用一双对得上的眼睛看了一张对不上的片子。那双眼睛没有错，它在几千张片子上都是对的；只是这一张，它没有被逼着多问一句。真正逼出那一问的，是三年前的旧片。

从那以后，她养成了一个新习惯：凡是看到拿不准的影子，先查有没有旧片。这个习惯要练上一阵子，才会变成不用想就会。

你在日子里，也常常遇到“同一样东西，两个人看得不一样”。

一份体检报告，你觉得没事，家里人觉得要命；一次会议上的一句话，你听到的是建议，同事听到的是批评；孩子成绩单上一个分数，你看到退步，孩子看到“已经比上次努力了”。

这时候最常见的两种处理，一种是发现学的：总有一个人看对了，去查个明白，谁错了谁改。另一种是汉森式的：大家立场不同、背景不同，看法不同很正常，互相尊重就好。

第一种太急，它不肯承认看法本身有来历。第二种停得太早，停在“各看各的”，就再也走不动了。

本书建议你多走一步：先找一个双方都能回去对的痕。体检报告上的原始数值和去年的那一份，会议的录音，孩子这一学期的全部作业。痕找到了，再看对方是被哪一次对不上逼出了那种看法。

举一个小例子。你觉得家里的老人最近记性差了，老人自己觉得没有。吵是吵不出结果的。你们可以一起回去看一样东西：这三个月他手机里的备忘录、药盒里每天剩下的药片、他上个月和这个月写的购物单。这些东西不随谁的看法改变，它们是痕。痕摆在桌上，你们再谈，谈的就不只是“我觉得”和“你觉得”了。

这一步不保证你们最后看法一致。可它让你们不再只是各看各的，而是站在同一张片子前面。

带 走 的 话

汉森看见了“看”渗透着理论，没动被看的东西；把痕从读法里分出来，对账才有地方落脚。

小　账

汉森打开了“观察中立”这扇门，却把被看的东西关在了门外；本书把它请进来，当作一次次对账里结晶出来的对象。

一本把“看”整个翻过来的书，仍然叫《发现的模式》：被看的东西在那里等着被发现，这一层被原样收了回去。

想 一 想

1. 你和家里人最近一次“同一件事看得完全不一样”，是哪件事？那时有没有一个双方都能回去对的痕？
2. 你身上有没有一双“对得上的眼睛”——在大多数时候都很准，所以从来没被逼着多问一句？
3. 回想一次你改变看法的经历：是哪两样原本站稳的东西顶住了，逼你换了一种看法？

◆

03

第 3 章

发生学的科学观

这一章的问题

17 号第一周的漂亮曲线，两个月后只剩一句“中等强度”。这活性是找到的，还是做出来的？一个数据怎样才算事实？

◆ 一、一个数据还不是事实

杭州，钱塘江边一处医药园区，晚上九点，研发楼三层还亮着一半的灯。

宋明远四十一岁，是这家药厂一个小分子研发组的主管。桌上摊着一张打印出来的曲线图，横轴是浓度，纵轴是酶活性的抑制率。曲线漂亮极了：浓度一上去，抑制率陡然爬到九成以上。图的角上写着化合物编号，组里人都叫它“17 号”。

下午开会的时候，一位新来的研究员兴奋地说：“17 号有活性，而且很强。”会议室里好几个人都笑了，是那种松了口气的笑。这个靶点组里追了两年，筛过的化合物上千个，第一次见到这样的曲线。

宋明远没笑。他只说了一句：“这是一个数据，还不是一个事实。下周让骆欣在她那边重做一遍。”

骆欣是组里做酶学实验最老到的同事。一周后，她把结果发了过来：抑制还在，可是弱了一大截，曲线也没那么陡了。她在邮件里多写了一段：

“我加了一点去垢剂再测，活性又掉了一半。17 号在这个浓度下可能会自己抱成小团，把酶裹住。一部分抑制，可能是这么来的。”

小分子在溶液里聚成微小的颗粒，把蛋白质黏住，看上去像抑制，其实不是真正结合在靶点上。这在药物筛选里是一个出了名的坑，做久了的人都知道要防；美国药物化学家肖伊切特的团队 2002 年前后的研究，让这个机制广为人知。

组里一下子冷了下来。宋明远却觉得事情才刚开始。去垢剂之后，活性没有归零，还剩一半。这一半是真的吗？

接下来两个月，他们做了一串事：换了一个批次重新合成 17 号，排除杂质；送到外面一家合同研究机构，请完全不认识的人用另一种检测方法再测；做晶体，看 17 号到底有没有钻进酶的口袋；再上细胞实验，看它在活细胞里还管不管用。

结果一样一样回来。新批次，活性还在。外面的机构，换了方法，数值接近骆欣的第二轮。晶体图上，17 号确实卡在酶的口袋里，位置和设计时的设想差了一点，可是卡得很稳。细胞实验里，效果比试管里弱，方向一致。

两个月后的组会上，宋明远在白板上写了一句话：“17 号是一个中等强度、确实结合靶点的抑制剂。”这一次，没有人欢呼，大家点头，开始讨论下一步怎么改结构。

散会后，骆欣问他：“你说，17 号的活性，是我们两个月里找到的，还是两个月里做出来的？”

宋明远想了一会儿：“分子是那个分子，它和酶怎么结合，不是我们说了算的。可是‘17 号是中等强度抑制剂’这句话，两个月前是没有的。第一周那句‘很强’，我们后来不认了。”

骆欣说：“那第一周那张漂亮曲线算什么？”

“算一次对账。没对上。”

第 2 章说到汉森：观察渗透理论，看见什么取决于你带着什么。可汉森没有动“被看的东西”那一头，仿佛 17 号的活性一直在那里，只等一双对的眼睛。宋明远的这两个月提示了另一种说法：一个科学事实，是一次次对账之后沉下来的结晶。

这种说法，有一位前人在 1935 年就讲过，讲得很早，也讲得很具体。他是一位做血清学和微生物学的医生，叫弗莱克。

◆ 二、一位医生写的事实传记

路德维克·弗莱克（Ludwik　Fleck，1896—1961），出生在当时属于奥匈帝国的利沃夫，今天在乌克兰境内。他是犹太裔波兰人，学医，长年在实验室里做细菌学、血清学的研究。

1935 年，他在瑞士巴塞尔用德文出版了一本书，书名直译是《一个科学事实的起源与发展》，副题是“思想风格与思想集体学说导论”。

写这本书的时候，弗莱克在利沃夫一边行医、一边做实验，手里天天过的就是血清、试管和培养皿。他不是先读了一肚子哲学再去看实验室。他是在实验室里待久了，慢慢觉出书上写的“事实”和他手上的“事实”不是一回事：书上的事实干净、现成，手上的事实要调、要试、要等，还要和同行吵。

这本书，就是从这条缝里写出来的。

这本书出版后几乎没人注意。几年后，战争来了。弗莱克一家被关进隔离区，后来被送进集中营，先后在奥斯维辛和布痕瓦尔德。他在营里被迫做斑疹伤寒疫苗的工作，活了下来。战后他回到波兰继续做研究，晚年移居以色列，1961 年去世。

这本书真正被人读到，是因为另一位作者。1962 年，库恩在《科学革命的结构》的序言里提到，他读过弗莱克这本“几乎无人知晓”的专著，很多想法在那里早有预见〔转述〕。1979 年，英译本在芝加哥大学出版社出版，库恩为它写了前言。弗莱克从此进入科学哲学的书单。

弗莱克的书名里有一个词特别扎眼：“事实”。按第 1 章那种科学观，事实是最不需要“起源”的东西。理论会变，事实就是事实；科学家的任务是找到它，不是制造它。弗莱克偏偏要给一个事实写传记，问它怎么出生、怎么长大。

他选的事实是：瓦色曼反应与梅毒相关。

用今天的话说，1906 年前后，德国医生瓦色曼和同事建立了一种血清检测，抽病人的血，在试管里做一组反应，就能判断这个人是否感染了梅毒。这个检测后来在全世界用了几十年，弗莱克本人也做过这方面的实验工作。在一般人眼里，这是一个干净的事实：“瓦色曼反应阳性，提示梅毒。”

弗莱克的书，就是要把这句干净的话拆开，看它是怎么一层层长出来的。

他的主要想法，可以归成几条。本书只转述大意。

第一，事实不是一个人看见的，是一群人一起做出来、认下来的。 弗莱克把一群因为交流思想、在相同的问题上一起工作而连在一起的人，叫作“思想集体”；把这群人共有的看法、问法、做法、判断什么算数的方式，叫作“思想风格”。一个事实，总是在某个思想集体里、按某种思想风格成形的〔转述〕。思想集体内部怎样运作、怎样传承、怎样排外，本书放在第 13 章细讲；这里只用它的大意。

第二，概念有很长的前史。 一个今天看起来很新的科学概念，常常是从很早很模糊的“原观念”里慢慢长出来的。原观念不一定对，可它给后来的概念指了方向〔转述〕。

第三，事实里有两种连接。 弗莱克区分了“主动的连接”和“被动的连接”。前者是思想集体自己选的：用什么单位、怎么分类、从哪里开始问。后者是选完之后，结果不由你选：一旦你定了用什么单位，测出来是多少，就不由你了。事实就是在这两种连接的交织里出现的，它像一种对思想的约束，一种“抵抗”〔转述〕。

第四，看要练。 弗莱克写过很多关于“看”的段落：初学者在显微镜里什么也看不出来，或者看出一堆不相干的东西；只有在思想集体里训练过的人，才能一眼看到“该看到的形状”〔转述〕。这一点比汉森早了二十多年。

第五，观点体系会自己保护自己。 一套观点一旦成形，和它冲突的东西会被一层层挡在外面〔转述〕。这一层留给第 13 章。

这五条，每一条都对着第 1 章那幅图景的要害。

本书要先写足弗莱克对在哪里。

他是最早把“事实”本身当成有历史的东西来研究的人之一，而且不是从哲学书里，是从实验室里写出来的。他自己就在做血清学，知道一个反应从文献里的一段描述，到实验台上稳定可用，中间隔着多少试管、多少次失败、多少人手上的分寸。

他也没有说事实是随便编的。他的“被动连接”正好是那道不由人选的边：单位你可以选，读数不由你。这让他的书和后来一些“科学只是社会建构”的说法拉开了距离。

他还把“看”放进了事实的形成里，比汉森更具体：汉森说看渗透理论，弗莱克说看要在集体里练成，练成了就很难看成别的样子。

最后，他看到了观点体系的顽固，而且把它写成了一个过程，一步一步，每一步都有实验室里的例子。

这几条加起来，本书愿意承认：

弗莱克在 1935 年就已经站在了“事实是发生的”这道门口。

◆ 三、梅毒这个概念走过的路

弗莱克给事实写传记，用的材料是梅毒这个概念几百年的历史。这段历史本身就值得你知道，因为它把“一个概念怎样被一层层编织起来”演示得极清楚。

十五世纪末，一种来势凶猛的病在欧洲流行开来。通常的说法是 1495 年前后在意大利那不勒斯一带的战事中暴发，随后随军队扩散。各国互相起名字：意大利人叫它法国病，法国人叫它那不勒斯病。今天用的“梅毒”一词的西文名称，来自 1530 年一位意大利医生写的一首拉丁文长诗，诗里的牧羊人名叫 Syphilus。

按弗莱克的梳理，此后几百年，“梅毒”这个概念大致由几股线编在一起〔转述〕。

第一股是伦理—神秘的线。 这种病和性行为有关，于是在当时的宗教与星象学语境里，它被看作对淫乱的惩罚，是“肉欲之灾”。有人还把它和 1484 年土星与木星的会合联系起来。

第二股是经验—治疗的线。 医生们发现，水银制剂对一些皮肤病损有效。于是凡是用水银治得好的，就容易被归到这一种病里。这样定出来的病，范围很宽，把今天看来是不同病的东西也拉了进来。

第三股是“坏血”的线。 很早就流传一种看法：这病是血液变坏了，所谓“梅毒的血”。这个想法长期没有实验依据，只是一种模模糊糊的原观念。

第四股是病原的线。 十九世纪，人们逐渐把它和淋病等别的性病分开，这中间有过激烈的争论，也有法国医生里科尔等人的接种实验。1905 年，德国的绍丁和霍夫曼在病人的病损里看到了一种螺旋形的微生物，后来定名为苍白螺旋体，今天叫梅毒螺旋体。

第五股是血清学的线。 1906 年，瓦色曼和同事奈塞尔、布鲁克造出了一种检测病人血清的方法。他们借用的是比利时人博尔代与让古稍早建立的“补体结合”技术（1901）。

弗莱克的要点是：今天我们说“梅毒是梅毒螺旋体引起的传染病，可用血清学方法诊断”，这一句话里，这五股线都在。伦理的线让社会急切地需要一种诊断手段；治疗的线圈出了最早的范围；“坏血”那条原观念，在几百年后变成了“去血里找证据”的血清学；病原学提供了对象；血清学提供了工具。

尤其是“坏血”那一条。它在几百年里一直没有被证实，却一直没有消失；直到血清学出现，它突然有了一副实验的身体。弗莱克认为，没有这条老线索指方向，人们未必会想到在血清里找梅毒〔转述〕。这就是他说的“原观念”：它本身算不上对，却为后来的事实开了一条路。

还有一件事，让这几股线拧得更紧。1910 年，德国的埃尔利希和日本合作者秦佐八郎推出了一种含砷的药物，后来以“606”之名流传，商品名洒尔佛散。有了药，就需要知道谁该用药、用了以后好没好；瓦色曼反应正好成了判断治疗效果的工具。

诊断和治疗从此咬在一起：反应帮药找到病人，药又让反应成了每家医院都要做的检查。一个事实被越多别的东西用着，就越难拆，这一点后面算能量时还会回来。

你看，“梅毒”这个概念并不是某一天在某个显微镜下被一眼看见的。它是几百年里，几股原本互不相干的线，一点点拧成的一股绳。

◆ 四、他停在门口的三处

弗莱克站在了门口。本书说他停在门口，是因为有三件事他没有做完。这三件事，正好是接下来要走的路。

第一处：被动的连接，始终从属于思想风格。

弗莱克看到了不由人选的那一面，这很可贵。可在他的书里，被动连接总是某个思想风格的被动连接：你选了这套问法，才有这套“不由你”。换一个思想集体，换一套问法，被动连接也跟着换。

这样写有它的道理，可它让一样东西始终没有自己的位置：试管里的那一层沉淀，显微镜视野里的那一团染色，感光板上的那一道痕。这些东西在没有人问之前，也已经在那里了。它们不需要解释者也立得住。本书第 2 章把这一类叫作现实符号。弗莱克有被动连接，却没有给现实符号一个独立的名分。

后来很多读者把他读成相对主义者，原因多半就在这里：如果每一种抵抗都属于某种风格，那么风格之外，好像什么也没有了。这不是弗莱克的本意，可他的框架里，缺一块能挡住这种读法的硬边。

用一个家常的例子说。家里人都说你最近胖了，你自己觉得没有。按弗莱克的写法，“胖了”是这一家人的看法，换一家人可能就不这么看。这话有一半对：什么算胖，确实是一家人的说法。可是浴室里那台秤上的数字，不是谁家的说法；它每天早上就在那里，比上个月多了两公斤。家里人怎么看是一回事，秤上的痕是另一回事。弗莱克的框架里，这台秤没有自己的位置。

第二处：事实什么时候算是成了，没有判据。

弗莱克讲事实的起源与发展，讲得极细。可是一个事实走到哪一步才算立住了？瓦色曼反应在 1906 年的论文里算不算事实？在 1910 年算不算？在 1930 年呢？他描述了过程，没有给出一把尺子。

没有尺子，就分不清两种东西：一种是还在成形的看法，一种是已经站稳的事实。也分不清另一对：站稳了的事实，和站稳了却其实站错了的看法。

家里学做一道菜，也是这样。妈妈第一次照着视频做红烧肉，成了一次，这算会了吗？大概不算。第二次火大了，第三次糖多了，第五次、第六次以后，换了锅、换了一家超市的肉，也还是那个味道，这才算会了。“会了”和“碰巧成了一次”之间，有一条看得见的线，只是要有人把它说出来。弗莱克没有把这条线画出来。

第三处：观点的顽固，他描述了，没有算账。

弗莱克写观点体系怎样保护自己，写得入木三分。可是为什么有的观点一两次反例就松动，有的要几十年、几代人才拆得动？拆一个观点要付出多少力气？是什么在托着一个新观点，让它能长起来？这些他没有算。

你也见过这种事。一家人坚持某种老偏方几十年，孩子拿出一篇又一篇文章，也说不动；可另一件事，比如家里该用哪个牌子的洗衣粉，邻居一句话就改了。两样看法的顽固程度差得很远。差在哪里？差在前一样连着太多东西：长辈的面子、几十年的经验、某一次“真的管用了”的记忆；后一样几乎什么也没连着。

他的思想集体，其实就是托住事实的那张网；他说的顽固，其实就是事实结得有多牢。他摸到了这两样东西，却没有把它们当作可以比较大小的量来处理。

这三处归成一句：

弗莱克看见了事实是一群人一起做出来的，却没有给现实的痕一个独立名分，没有给“做成了”一把尺子，也没有替做成它的力气记账。

还有一个细节，也值得记住。弗莱克一辈子在实验室里，书里却把重心放在思想集体上。他写得最动人的，是人怎样一起看、一起想；写得最少的，是试管自己怎样说话。

◆ 五、本书的说法：反复对账

现在可以把本书的科学观摆出来。它不长，分几句讲。

第一句：科学是理念符号与现实符号的反复对账。

先把三种符号放在科学里说清楚。

理念符号，是科学里的概念、假说、定律、公式、分类。“梅毒螺旋体”“中等强度抑制剂”“行星沿椭圆走”，都是理念符号。它们能写下来、教出去、带到别处去用。

现实符号，是现实自己沉下来、不需要谁去解释也立得住的痕。试管底部那一层没被溶开的红细胞，晶体衍射在底片上留下的那一片斑点，第谷仪器读出、写进本子的那一行数字。这里要分清一件事：读数作为仪器里留下的痕，是现实符号；

被科学家读成“一个结合信号”“一个粒子”，那是理念符号；值班的人看惯了这种读数，一眼就知道是正常还是异常，那是自我符号。

自我符号，是沉在科学家身上的习惯与手艺。骆欣一看曲线太陡就起疑心的那种直觉，陈医生（第 2 章）一定要调旧片的那个动作，弗莱克说的那双练成的眼睛。

对账，就是把理念符号推到现实符号面前，看对不对得上。第 4 章会讲，实验就是有意去制造这种对账。

“对账”这个词，你在日子里天天用。月底银行发来对账单，你拿手机里的记账本一笔笔去对。记账本是你心里的账，是一种说法；银行流水是钱真实走过的痕，不随你怎么记而改。两边对上了，你看一眼就放下；对不上，差了三百块，你才会停下来，去想是哪一笔漏记了、是不是被多扣了一笔。科学里的对账，结构一模一样，只是对得更细、更狠，而且要请不认识你的人再对一遍。

第二句：对得上，就没有解释；对不上，新的符号才被逼出来。

对不上，不是一个人心里不舒服，是两样已经站稳的东西顶住了。17 号的漂亮曲线（现实符号）和“它真正结合在靶点上”（理念符号），在骆欣加了去垢剂以后顶住了。

三种符号构成一个三角，任何两种对不上，都会逼第三种变化，再反过来改写另外两种：

- 理念符号＝F（现实符号，自我符号）：读数和老手的直觉对不上，逼出一个新说法，如“聚集型假阳性”。
- 现实符号＝G（理念符号，自我符号）：理论和手上的经验对不上，就去造新的痕，换一种检测、长一颗晶体。
- 自我符号＝H（理念符号，现实符号）：理论和读数对不上，被改的是人：骆欣从此每测一个新化合物都先加去垢剂。

三条没有哪一条是源头。科学里最常被讲的是第一条，可另外两条一样在发生。

第三句：事实是结晶，结晶有三判据。

本书说的结晶，是指一次次对账之后，某样东西沉了下来，站稳了。判断它是否站稳，看三条：

- **稳定**：换个时间、换个人、换一批材料，还能重复出来。17 号换了批次、换了机构，活性还在。
- **整体**：它的几个部分连在一起，拆掉一部分，剩下的就不再是它。“中等强度、确实结合靶点”这句话，去掉“确实结合”，就回到了那张可疑的曲线。
- **独立**：它能离开出生的实验室，被带去别处，在别人手里照样成立、照样能用。

用本系列的话说，结晶出来的东西，就是符号的“粒子态”：稳定、整体、独立。这也是“可返回的压缩”的另一种说法：一个好的事实，压进去了很多次对账，需要时还能展开回去，让人重新检查当初是怎样对上的。

第四句：结晶要付能量。

这里用三个词，它们会在后面各章反复出现。

内能，是一个结晶有多结实，也就是把它拆开有多难。本系列管它叫连接度。一个事实和越多别的事实、方法、仪器连在一起，要拆它，就要同时拆掉越多东西。弗莱克说的观点体系的顽固，就是内能。

动能，是把旧连接拆开、把新连接接上的那股力气，以及它往哪个方向推。17 号的两个月，重新合成、外送检测、长晶体、做细胞，都是动能。开普勒算火星的那几年，也是动能。

势能，是周围那张网对一个新结晶的吸引与拉扯：它往哪里结晶，能不能结得住，要看有没有一张网托着。宋明远的组、合同研究机构、晶体学的方法、整个药物化学的知识，就是 17 号这个事实的势能。弗莱克的思想集体，用本书的话说，就是托住结晶的势能之场。

用这三个词，对账的全过程就能讲完：对不上，是两张网在同一处拉扯，出现了落差；解释，是动能被消耗，连接被拆开、重接；结晶，是新的连接度建立起来，内能存了进去。

拆一个旧事实，付出的动能得超过它的连接度。这就是为什么科学里的大概念难推翻（第 6 章、第 16 章会细算），也是为什么一个刚冒出来的新数据，经不起一次去垢剂。

第五句：符号、逻辑、数学三种形态在科学里协作，彼此转换。

本系列把信息分成三种形态：符号像粒子，稳定、整体、独立；逻辑像波，有轨迹、有速度、有黏性；数学像场，讲连接、次序、结构。三者不是一级级往上走的台阶，而是来回往返、彼此转换。

17 号的故事里三种都有。一条剂量—反应曲线是场：浓度和抑制率之间的一整套连接与次序。“去垢剂一加活性就掉，所以有一部分是聚集”是一段推理，是波。“17 号是中等强度抑制剂”是一句可以带走的话，是粒子。曲线被压成一个数值，是场压成粒子；这句话被同事拿去推出“可以改哪个基团”，是粒子展开成波。

王德生和牟军在《科学是什么？》里有一个相近的说法：符号学、逻辑学、数学是科学的三大规范工具；某一实体的科学，就是它的符号系统、逻辑系统加上数学体系。只有符号，是一部名词百科；只有数学，是形式空转；只有逻辑，是一场争论叙事〔待核：书名与表述〕。

第六句：稳定不等于对。

这一句要单独说，因为它是本书的防线。

谣言也很稳。一种看法可以稳到整个思想集体都这么看，几十年不变，却是站错了的。所以本书先问发生学的问题：它站得稳不稳？再问另一个问题：它的方向对不对？后一个问题，只能靠继续对账回答。

这里要区分两种稳。一种是**发生型稳定**：它一直被重新点火、重新检验，每检验一次都还站着，所以稳。另一种是**锁化型稳定**：没有人再去检验它，它也就一直在那里，所以稳。前一种是科学，后一种是固化。第 15 章讲复现危机时，会拿两座桥把这一对完整展开；后面第 16、18、19 章还会用到它。

第七句：命名有四种，不能互相冒充。

科学里说“发现了某某”“命名了某某”，其实可能是四种不同的事：

1. 给已经能辨认的东西加一个新名字；
2. 一个新的区分和一个新名字一起，帮助形成一个新的辨认单位；
3. 设立一个制度身份，比如国际单位制里的法定定义、一个学会的会员资格；
4. 提出一个理论对象，比如“氧”（见第 6 章）。

四种常常交织在一起，可是不能互相冒充：一个理论对象，不因为它被提出就自动享有制度的授权；一项制度成立了，也不证明背后的理论正确。

日子里也有这四种。孩子出生后，家里给他起了个小名，这是给一个已经能认出来的人加个名字。小区里新规定“快递柜超时收费”，“超时件”从此成了一个新的辨认单位，以前没人这么分。孩子拿到一张学生证，是设立了一个制度身份。

家里老人说“这孩子脾胃弱”，是提出了一个看不见的对象，用来解释他为什么总不爱吃饭。一张学生证，不证明“脾胃弱”对不对；反过来，“脾胃弱”说得再有道理，也换不来一张学生证。

这七句合在一起，就是本书的发生学科学观。它和第 1 章的发现学科学观，可以对照着看。

	发现学的科学观	发生学的科学观
科学在做什么	读出一本早已写好的自然之书	让理念符号与现实符号反复对账
事实是什么	早就在那里，等着被找到	一次次对账之后沉下来的结晶
一个数据	事实的直接呈现	一次对账，可能对上，也可能对不上
科学家的眼睛	越中立越好	自我符号，练出来的，也要被对账改写
科学共同体	检查个人错误的机构	托住结晶的势能之场
一个事实为什么难推翻	因为它是真的	因为连接度高；真不真另由对账判断
事实会不会变	不会，变的只是理论	会熔开、再结晶，有三判据和可推翻条件管着
防私意靠什么	观察中立	现实符号不随人改，结晶要过三判据

最后一行要多说一句。发现学科学观最大的长处，是防私意：谁也不能凭自己的愿望改一个读数。发生学科学观不放弃这一条，只是换了一个地方守。不是靠观察中立，而是靠现实符号不随人改、靠结晶必须过三判据、靠每一个说法都要写出它在什么条件下会被推翻。

发生不是“随便怎么说都行”。随便说出来的东西，过不了三判据。

拿一句最常见的谣言试一试。某种水果和某种海鲜一起吃会中毒，这句话在很多家庭里流传了很多年，稳得很。它稳定吗？在家族群里，它确实一再被转发。可它整体吗？一问“为什么会中毒”“吃多少会中毒”，它就散了，拆开以后什么也剩不下。它独立吗？一离开家族群，进到营养学的化验室里，在别人手里重复，它就立不住了。它的稳，是没人再去对账的稳，是锁化型的稳。

科学事实要过的，是另一种关：它要在不认识你的人手里、用你没想到的方法、在你不在场的地方，还能站住。

◆ 六、一个完整的例子：瓦色曼反应

现在用本书的话，把弗莱克那个事实重走一遍。

先看反应本身。 补体结合的原理，用大白话说是这样的。血清里有一类叫“补体”的成分，它会在抗体和抗原结合的地方被用掉。

检测时，先把病人血清、一种“抗原”提取液和补体放在一起；如果病人血里有相应的抗体，补体就被消耗掉了。然后再加进去一组用来报信的东西：羊的红细胞和针对它的抗体。如果补体还在，红细胞会被溶开，试管里变成一片透明的红；如果补体已经被前面用掉，红细胞就完好地沉在管底。

管底那一层沉淀，或者那一管透明的红，就是现实符号。它是试管里的物质自己落下来的结果，谁看都一样，拍下来过十年也还是那样。

再看第一次对账。 瓦色曼和同事当初的设想很合理：既然梅毒是一种病原引起的，那就用富含这种病原的组织做抗原，去检测病人血里有没有针对它的抗体。他们用的提取液，取自死于先天梅毒的胎儿的肝脏，那里病原极多。

初步结果令人鼓舞：不少梅毒病人的血清呈阳性。理念符号（针对病原的特异抗体）和现实符号（试管里的沉淀）对上了。

接着是一条缝。 很快，在 1907 年前后，有研究者改用没有病的正常器官做提取液，比如动物的心脏。结果反应照样能做出来，病人的血清照样阳性。法国的马里和勒瓦迪蒂、维也纳的兰德施泰纳和同事，都在这一年前后报告了这类结果。

这条缝可以在史料里独立指认：一边是“抗原必须来自病原”这个理念符号，一边是“正常组织提取液也让梅毒病人的血清阳性”这一管管沉淀。两边顶住了。

按严格的理论，这个反应的根据塌了一半：它检测的并不是（或者不只是）针对螺旋体本身的抗体。可是这个反应在实践中照样能把大多数梅毒病人挑出来。

这里发生了一件弗莱克特别看重的事。理论上的那一半熔开了，实践上的那一半却留了下来，并且越来越稳。1941 年，美国化学家潘伯恩从牛心里提纯出起作用的成分，命名为心磷脂；后来人们才逐渐明白，这类检测查的是感染引起组织损伤之后，人体产生的一种针对类脂的抗体。

最初的理念符号被改写了，新的理念符号是被那一管管“不该阳性却阳性”的试管逼出来的。

再看第三个角。 弗莱克反复写到，这个反应在早年极难做稳。同一份血清，这个实验室阳性，那个实验室阴性；同一个人做两遍，结果不一样。各种成分的用量、温度、时间、红细胞的新鲜程度，都会影响结果。

让它稳下来的，不只是论文里的配方，还有一大批血清学家手上的分寸。什么样的溶血算“部分阳性”，什么时候该怀疑补体失效，哪一批羊红细胞不能用。这些东西很难写全，只能在实验室里一代代带出来。这是沉在人身上的自我符号。弗莱克说，这个反应的可用性，是思想集体在多年经验里一点点调出来的〔转述〕。

这三样放在一起看：现实符号是试管里的沉淀与溶血，理念符号是抗原抗体的理论和“梅毒”的概念，自我符号是血清学家的手艺。三者反复互相改写，几十年才让“瓦色曼反应阳性提示梅毒”站稳。

再算能量。

动能：十几年里，欧洲许多实验室的成千上万次试验、比对、调整，一次次失败后重来。

势能：托着它的网很大。“坏血”那条几百年的老线索，让人想到去血里找；梅毒在当时社会上的巨大压力，让医生、政府、病人都急切地需要一种诊断办法；补体结合技术和刚刚出现的病原学，给了它工具和对象。弗莱克特别强调社会对梅毒的焦虑在这件事里的分量〔转述〕。

内能：一旦站稳，它就和诊断流程、医院化验室、公共卫生政策、教科书连在一起。在一些国家和地区，婚前检查甚至一度要求做梅毒血清检测，美国许多州从二十世纪三十年代起就这样规定。到了这一步，这个事实已经很难拆了。

最后看三判据。

稳定：经过多年调整，它在不同实验室里能重复出相近的结果。

整体：抗原、补体、血清、羊红细胞、判读标准是一整套，拿掉任何一样，剩下的什么也说明不了。

独立：它离开了柏林，被带到全世界的医院和化验室，在不认识瓦色曼的人手里照样能用。

这里也能看清命名的四种情形怎样交织。“梅毒螺旋体”是一个新区分连着一个新名字，形成新的辨认单位；“瓦色曼阳性”进了婚检规定，是设立了一个制度身份；“针对病原的特异抗体”是一个理论对象。制度身份的成立，并没有证明那个理论对象站得住——它恰恰在理论上被改写过。

它还熔开过，并且再结晶。 后来人们越来越清楚，这类检测会有“生物学假阳性”：一些别的疾病，如某些自身免疫病、疟疾，也可能让结果阳性。1949 年，直接针对螺旋体的“梅毒螺旋体制动试验”问世，此后同类方法陆续出现；瓦色曼反应本身逐渐被更稳的方法取代。

这不是这个事实的失败。它是一个发生型稳定的样本。一直有人在重新检验它，每检验一次，它就更清楚自己在什么条件下可靠、在什么条件下不可靠，最后被一个更好的结晶接了班。

你再看这段历史，会发现“瓦色曼反应与梅毒相关”这件事，从来就不是某一天在某张论文里被一次看见的。它有前史，是坏血的老线索；有一条可以指认的缝，是正常组织提取液也阳性；有一大笔动能，是十几年的调试；有一张托住它的网，是梅毒的社会压力和血清学的集体。最后结成了一个站得住、能带走的事实。它站住之后，还在被继续对账。

这就是本书说的：事实是结晶。

回头看 17 号的两个月，它走的是同一条路，只是短得多、小得多。第一周的漂亮曲线是一次对账，对上了；骆欣加了去垢剂，出现了一条可以指认的缝。

新批次、外送检测、晶体、细胞实验，是动能；组里的经验、合同研究机构的方法、晶体学和药物化学的整套知识，是托住它的势能；最后那句“中等强度、确实结合靶点的抑制剂”，换批次能重复、拆开就不成立、送到外面也站得住，三判据都过了。

它以后也许还会熔开。动物实验里如果出现预料不到的结果，这句话会被再对一次账。一个事实站住了，不等于它从此不用再对账。

◆ 七、问一句对过几次账

两个月后的一个周末，宋明远在家里给上初中的儿子检查作业。儿子的科学课本上写着：“科学家发现，维生素 C 可以预防坏血病。”

他想起了 17 号，想起那张漂亮的曲线和骆欣的那封邮件。课本上的这一句，背后大概也有一条他看不见的缝、一串他看不见的试验、一群他看不见的人。课本只给了结晶，没有给它的来历。

他想了想，问儿子：“你知道这句话是怎么来的吗？”

儿子摇头：“课本上写的，就是这样嘛。”

这句回答，和第 1 章那种科学观一模一样：书上有，就是事实。宋明远没有责怪他。他自己读书的时候也是这样。直到在实验室里做了十几年，一张张漂亮的曲线被重做打回原形，他才慢慢知道：课本上一句轻轻的“科学家发现”，背后可能是几十年、几代人的对账。

他没有改课本上的字，只在旁边用铅笔写了一句：“这件事是怎么知道的？”

回到你的日子里。

你每天都会听到“研究表明”。研究表明喝咖啡对心脏好，研究表明喝咖啡对心脏不好；研究表明某种饮食能减肥，研究表明那种饮食没用。按发现学的科学观，这些说法里总有一个是“被发现的真相”，你只要找到最新、最权威的那一个就行。

按本书的科学观，你可以换一个问法：这个说法对过几次账？

它是一项研究里的一张漂亮曲线，像 17 号的第一周；还是被别的人、别的方法、别的地方重复过，像 17 号的第二个月？它有没有遇到过“不该这样却这样”的缝，那条缝后来怎么处理了？它是一直有人在检验而稳，还是没人再检验而稳？

这一问不会让你变成专家，可它会让你分清：哪些话是一个数据，哪些话已经是一个事实。

带 走 的 话

事实不是早就摆好等人找到的东西，是理念与现实一次次对账后沉下来的结晶，有判据，也会熔开。

小　账

弗莱克打开了“事实有起源”这扇门，却把现实的痕留在了思想风格里面；本书给它独立名分，再给结晶三条判据、给做成它的力气记账。

瓦色曼反应走了几十年才站稳，课本上只剩一句“科学家发现”：几十年的对账，被收成了一次看见。

想 一 想

1. 你最近一次被“研究表明”说服，是哪一句？你知道它对过几次账吗？
2. 你工作里有没有一个“第一周的漂亮曲线”，后来被人一重做就弱了？当时是谁、用什么办法让它露出原形的？
3. 你身上有没有一种因为一直没人再检验、所以一直很稳的看法？

◆



第　二　编

实验：有意制造的对不上

导　语

第二编只做一件事：把实验从“向自然提问、听它回答”，改看成一次有意请来的对不上。

第 4 章从成都一节公开课开始。唐书瑶做过五十次的银镜反应，当着听课老师的面没出镜子。那一夜她一样一样排查，做的正是实验最核心的手艺：控制变量，把对不上收窄到一处。伽利略的斜面、巴斯德的鹅颈瓶，都在这一章。

第 5 章讲反常。深圳桥梁检测员陆建平没让徒弟剔掉第七号测点那个一点三一。勒维耶算出的海王星、等不来的祝融星、水星近日点那半个多世纪，说的是同一件事：反常不是错误，是结晶的起点。

第 6 章讲范式转换。退休医生方志诚书架上的两本教科书，一本说溃疡出在胃酸，一本说出在幽门螺杆菌。库恩看见了革命，本书再往前走一步：范式是一群连得很紧的理念符号，拆它要的力气得超过它的连接度。拉瓦锡与一堆红色粉末的十五年，是完整的例子。

读这一编时，请带着一个问题：一次对不上，怎样从撞上的，变成请来的？

04

第 4 章

实验是什么

这一章的问题

唐书瑶那支没镀出银镜的试管，比成功的那支多告诉了她什么？实验到底在做什么？

◆ 一、银镜没出来的那节课

唐书瑶这节公开课，准备了整整两个星期。

她三十七岁，在成都一所中学教化学，教了十四年。这节课讲醛的性质，压轴是银镜反应。往试管里加银氨溶液，再滴葡萄糖溶液，放进热水里温一会儿。管壁上会慢慢镀出一层亮晶晶的银，像一面小镜子。

这个实验她做过不下五十次。前一天晚上在实验室试过两遍，两遍都亮得能照出人影。

那天下午，后排坐着区里来听课的十几位老师。她把试管放进水浴，跟学生讲醛基怎样把银离子还原成银。讲完三分钟，她把试管拿出来举高。

管里是一团灰黑色的浑浊，管壁上星星点点挂着几粒黑渣，没有镜子。

教室安静了两秒。坐在第二排的冉小满举手：“老师，是不是书上写错了？”

后排有人笑出声。唐书瑶脸上发烫，嘴上说了句“实验有时候会失败，我们课后再分析”，把课讲完了。

那天晚上她没回家，一个人留在实验室。

她没有去想“书上是不是写错了”。银镜反应写进教科书一百多年，她自己做过五十次。这个想法在她身上站得太稳，一次失败撼不动它。她想的是另一件事：这一次，和前一天晚上那两次，到底哪里不一样？

她在一张草稿纸上列了一排：

- 试管：今天用的是学生实验柜里的那一批，昨晚用的是她自己的；
- 银氨溶液：今天上午现配的，氨水是不是加多了？

- 葡萄糖溶液：同一瓶；
- 水浴：今天用的是教室的电水壶烧的水，昨晚是实验室的恒温水浴锅，温度可能高了；
- 有没有晃动：今天她拿着试管边走边讲，昨晚是静置的。

五条，每一条都可能是那团灰黑的来路。

她做了一件很朴素的事：一次只改一样。先用学生柜里的试管，其余全照昨晚——黑了。换回她自己的试管，其余照今天——亮了。

缝找到了。

学生柜里那批试管用自来水冲过就收了，管壁上挂着一层看不见的油膜。银在干净的玻璃上能均匀地铺开，在油膜上只能结成一粒一粒的黑渣。她后来查到，很多实验手册都写着“试管须先用热的氢氧化钠溶液洗净”。她自己做了五十次都没出问题，是因为她的试管一直是洗干净的。这一条在她手上从来不是变量，所以她从来没看见它。

第二天上课，她把那支黑试管和一支亮试管并排放在讲台上，跟学生讲了这一夜。冉小满听完说：“那失败的那支，比成功的那支讲得还多。”

唐书瑶愣了一下，觉得这孩子说中了一件她教了十四年都没说清的事。

那天晚上回家的路上，她一直在想冉小满的那句话。

十四年来，她在课堂上做过的演示实验，绝大多数都成功了。成功的时候，学生们“哇”一声，抄下现象，抄下方程式，下课。她一直以为，演示实验的用处就是让学生“亲眼看见”书上写的东西是真的。

可是那支黑试管让她起了疑心。学生们亲眼看见了成功，然后呢？他们看见的，只是一个早就写在书上的结果被又演了一遍。真正让她自己学到东西的，恰恰是那一次没演成。

这一章要讲的，就是这件事：**实验到底是什么**。

◆ 二、实验向来被当成什么

先把通常的看法讲足。它有它的道理，而且道理很大。

通常的看法是这样的：自然是一本写好的书（这个图景见第 1 章），可它不会自己翻开。你得问它，它才答。实验就是提问的方式。你把条件摆好，让自然在你面前表演一遍，你看清它怎样做，记下来，就读到了书里的一行字。

这个看法里有三层。

第一层：**实验是问，读数是答。** 你想知道重的东西是不是比轻的东西落得快，就让它们一起落；你想知道光是不是由不同颜色合成的，就让它穿过棱镜。

牛顿用两块棱镜做的那个“判决性实验”，就是这种形象的样板：问一个问题，得一个干净的答案（见第 1 章）。

第二层：**实验比权威可靠。** 亚里士多德说重物下落得快，权威摆在那里一千多年。实验的力量在于，它不看谁说的，只看做出来是什么。英国皇家学会的格言是“不随他人之言”（Nullius in verba），意思是别人的话不算数，要拿来看。这一层是科学最可贵的地方：一个乡下学徒做出的实验，可以推翻一位大学者的结论。

第三层：**实验可以重复。** 你在伦敦做出来，我在巴黎照着做，也得出来；今天做出来，十年后照着做，还得出来。重复让一个结果脱离了做它的那个人，变成大家的。

这三层里，还藏着实验和一般观察的分别。

天文学家看星星，是观察：星星怎么走，他管不着，只能等、只能记。农民看天吃饭，也是观察。实验不一样，实验要动手。你得去改变一样东西，看另一样东西跟着怎么变。观察是在门外听，实验是推门进去，把桌上的东西挪一挪。

这个分别很早就被人看重。动手意味着你可以挑：挑哪一样东西变，挑它变多少，挑什么时候变。能挑，结论就比“碰巧看见”牢靠得多。

这三层合在一起，造出了一种了不起的东西：一套不靠信谁、不靠辩才、只靠“拿来看”的公共程序。人类在这件事上花了几千年才学会，学会以后，医学、工程、农业都跟着变了样。

本书不会说这套看法错了。它说中的东西，后面每一节都要保住。

本书要问的是：在“问—答”这个图景里，**那个“答”到底是怎么来的？** 唐书瑶那一夜得到的答案——“试管要洗净”——自然从来没有“说”过。它是从一次失败里被逼出来的。

要看清这一点，最好的材料是实验科学开山时最有名的那一个实验，还有围绕它吵了七十年的那场官司。

◆ 三、伽利略的斜面，和后人的官司

书上是怎么写的

1638 年，伽利略在荷兰莱顿出版了《关于两门新科学的对话》。那时他七十四岁，被宗教裁判所软禁在佛罗伦萨郊外，书是辗转送出意大利印的。

书里的第三天，讨论落体。伽利略借书中人物之口提出一个命题。从静止开始自由下落的物体，走过的距离和所用时间的平方成正比。走一个单位时间落一份，走两个单位时间落四份，三个单位时间落九份。

光说不行，得拿来看。可是自由落体太快了，那个年代没有能计到几分之一秒的钟。伽利略的办法是：不让它直落，让它沿着斜面滚。斜面把“落”冲淡了，同样的规律，慢下来就能量。

书里对这个装置写得很具体。大意是这样。取一根长约十二肘尺的木条，宽约半肘尺，厚约三指。在窄面上刻一道略宽于一指的直槽，槽里贴上光滑的羊皮纸。把木条一头垫高，让一个坚硬、光滑、滚圆的铜球沿槽滚下。计时用水。高处放一个大水桶，桶底接一根细管，球滚动期间让水流进一只小杯。事后用精密的天平称水的重量，水重之比就是时间之比。

书里说，这样的测量“重复了整整一百次”，走过的距离总是和时间的平方成正比；斜面换一个倾角，结论照样成立；几次测量之间的差别，从来不超过一次脉搏的十分之一。

这段描写，后来成了“近代实验科学诞生”的标准画面。

科伊雷的怀疑

画面挂了三百多年。1953 年，法国科学史家亚历山大·科伊雷发表了一篇文章，题目就叫《一个测量实验》。这篇文章给那幅画面泼了一盆冷水。

科伊雷是那一代最懂伽利略的人之一，他的怀疑有根有据。他指出，一道木槽、一层羊皮纸、一个铜球、一桶水，就这些家什。用它们要做到“误差不超过脉搏的十分之一”，几乎不可能。铜球在槽里会跳，会擦边，羊皮纸会起皱，水流会随桶里水位下降而变慢。他还注意到，伽利略的同时代人照着做，结果并不理想。

科伊雷的结论很重：伽利略大概并没有真的做到他写的那样，那段描写更像一个“思想实验”。在他看来，伽利略心里先有了数学，再给它配了一件看起来像实验的外衣。科伊雷一向认为，近代科学的诞生首先是思想方式的转换，是把世界当成几何来想，实验退居其次。

这个判断在二十世纪中叶影响很大。很多人从此相信，伽利略的斜面是一个“没做过的实验”。

塞特尔复做，德雷克翻手稿

转折来得不慢。1961 年，美国年轻学者托马斯·塞特尔在《科学》杂志上发表文章。他照着伽利略书里的描写，用相近的材料自己搭了一套斜面和水钟，实打实地做了一遍。结果是，用那样的家什，确实能得到和“时间平方律”相当吻合的数据。吻合的程度足以支持伽利略的结论。

塞特尔的复做没有证明伽利略当年一定这样做过。它证明的是另一件事：**书上写的那个实验是做得出来的。**　　科伊雷“做不到”的判断，被一次真实的复做撼动了。

再往后，加拿大科学史家斯蒂尔曼·德雷克在佛罗伦萨国家图书馆整理伽利略的工作手稿。他从一沓写满数字和草图的纸里，辨认出伽利略早年（约 1604 年至 1608 年间）做斜面和抛射测量时留下的原始记录。纸上是一排排距离数据，旁边是计算，有的页上还有对不上的数据被涂改的痕迹。

德雷克据此认为，伽利略是先量出了数据，才从数据里认出平方规律的，而不是先有了定理再去装样子。德雷克对其中几张的解读后来被反复讨论，比如第 107 张背面（他定在 1604 年前后，记的是斜面上的距离），和第 116 张背面（约 1608 年，记的是抛射）。

德雷克还提过一个很好听的猜想。伽利略出身音乐世家，父亲是有名的琉特琴手和音乐理论家。他也许在斜面上绑了几根琴弦，让球滚过时依次碰响。他再用耳朵调整琴弦的位置，直到响声间隔听起来均匀。人的耳朵对节拍的分辨，远比看水钟精细。这个猜想很动人，可是手稿里没有直接写，它至今只是猜想。德雷克 1975 年在《科学美国人》上撰文提出过它。

伽利略自己的那条缝

官司之外，还有一条更细的线索，常被略过。

伽利略在 1604 年 10 月给朋友、威尼斯修士萨尔皮写过一封信。信里他已经写出了“距离与时间平方成正比”。可他用来推出这条规律的那个前提，是“下落的速度与走过的距离成正比”。

这两样放在一起，其实是打架的。后来人们推算出来：如果速度真和距离成正比，一个从静止出发的物体根本动不起来。速度应当和时间成正比，才推得出平方律。

伽利略在这里卡了很多年。到了 1638 年的书里，他借书中人物之口，专门把“速度与距离成正比”这个说法拿出来驳倒了，改用“速度与时间成正比”。这一段在书的第三天。

这条缝很要紧，因为它可以在材料里独立指认出来。一边是他手上的测量数字（平方律对得上），一边是他自己的推导前提（速度与距离成正比）。数字和前提都站得很稳，可是合不到一起。改的不是数字，是前提。

也就是说，斜面实验在伽利略身上，不是“一次读出答案”。它是一段好些年的对账：理念和读数来回顶，顶到前提换掉，平方律才在一个对的地基上站住。

现在能说准的是什么

把这场官司摊开，能说准的有这样几条：

1. 1638 年的书里有一段具体的斜面实验描写，说重复了一百次。
2. 科伊雷 1953 年怀疑这段描写的精度做不到，认为它近于思想实验。
3. 塞特尔 1961 年照书复做，表明用那样的器材可以得到支持结论的数据。
4. 德雷克整理的手稿表明，伽利略早年确实做过大量斜面与抛射测量，留下了原始数字。
5. 伽利略当年具体怎样计时、精度到底多高、书里那段描写和手稿里的实际操作有多大出入，史家至今仍有争议。

还要顺手说一句比萨斜塔。同时扔下两个球的故事，来自伽利略晚年的学生维维亚尼写的传记。伽利略自己的著作里没有记载，多数史家把它当作传说看。

把这一节写得这么细，不是为了考据。这场官司本身，就是一个关于“实验是什么”的实验。科伊雷心里有一个说法（伽利略做不到），塞特尔把它推到一套真实的木槽和水钟面前，对不上了；德雷克再把它推到一沓手稿面前，又对不上了。一个关于实验的判断，最后也是被实验和档案逼着改的。

◆ 四、“问—答”图景停在哪里

现在回头看“实验是问，读数是答”那个图景。它在三处停下了。

第一处：答案不是读出来的，是对不上逼出来的

伽利略的斜面要是只得到“球滚下来了”，那什么也没得到。它之所以有分量，是因为在它之前，有一个清清楚楚、可能落空的说法摆在那里。这个说法是：距离和时间的平方成正比。这个说法可能错。也许是和时间成正比，也许是和时间的立方成正比，亚里士多德派会说重的球滚得快。水杯里称出来的水重，要么和这个说法对得上，要么对不上。

实验的分量，全在它可能对不上。

一个永远对得上的实验，等于没做。你在家里试“把手松开，杯子会不会往下掉”，做一万次都对得上，你一个字也没学到。唐书瑶前一天晚上那两次漂亮的银镜，也没教会她任何新东西；是那一团灰黑，把“试管必须洗净”这一条推到了她面前。

所以“问一答”这个比方有一处说偏了。它好像在说：答案原本就在自然里，你一问它就递出来。可是唐书瑶问的是“醛基能不能还原银”，自然递回来的却是一团黑渣——它答非所问。正是这个答非所问，逼出了一个她原本不知道要问的问题。

第二处：读数在那里，可它不自己开口

伽利略的天平上，有一小杯水的重量。这个重量在天平上，是一道实实在在的刻度位置，不管有没有人看，它都在那里。本书把这种东西叫**现实符号**：现实自己沉下来、不需要解释者也立得住的痕，像踩出来的小路、河床、伤疤。仪器上的读数就是这一类（第三编会细讲仪器怎样造出新的现实符号）。

可是“这杯水重若干”要变成“时间之比是一比二”，再变成“距离与时间平方成正比”，中间隔着一整套想法。水流是均匀的；水重正比于时间；球在槽里的滚动，和自由落体是同一个规律的慢版本。这一套想法，本书叫**理念符号**：概念、假说、公式，在人的理解里站稳的东西。

“问一答”图景把这两样混成了一样，好像读数一出来，意思就跟着出来了。第 2 章讲过，同一个读数放进不同的理论，是不同的符号。实验不是把现实的话原样抄下来，是把理念符号推到现实符号面前，看它们对不对得上。

第三处：实验是造出来的，不是摆好的

斜面不在自然里。刻着直槽，贴着羊皮纸，垫高一头，放一个铜球，接一根细管。这是一个被人工造出来的小世界，专门为了让某一处对不上能被看清。自然界里没有一个现成的地方，球在没有阻力的槽里滚，水均匀地流进杯子。

“问一答”图景容易忘掉这一点。它把实验说成“让自然在你面前表演”，好像自然原本就有那出戏，你只是买了票。其实那出戏是你写了剧本、搭了台、请了演员，还反复排练过的。排练失败的那些场次——伽利略手稿上被涂掉的数字，唐书瑶那支黑试管——一般不写进教科书。

这三处合起来，就是“问一答”图景停下的地方：**它看见了答案，没看见答案是从哪一条缝里被逼出来的。**

科伊雷其实站在另一头，也停下了。他说科学的根在思想、实验只是外衣，等于说理念符号自己就能长出来，现实符号只是事后的点缀。塞特尔的复做和德雷克的手稿，恰恰说明理念和读数是一来一回、互相逼着改的。一头说“读数自己开口”，一头说“思想自己长出来”，两头都只抓住了一半。

◆ 五、本书的说法：实验是有意制造的对不上

先把几个本章要常用的词讲清。

对不上：你心里站稳的一个说法，和眼前站稳的一个痕，两样都不肯让，就叫对不上。唐书瑶心里的“银镜反应会出镜子”，和眼前那团灰黑，就是对不上。本书的基本主张是：对得上的时候，没有解释；只有对不上，人才会去问“这是怎么回事”，新的理解才会被逼出来。

结晶：一次对不上被解释平息以后，留下一个新的、站得稳的东西。它要过三条判据（第 3 章讲过）：**稳定**，换个时间换个人再做还是它；**整体**，拆开就不成它了；**独立**，能离开它诞生的那个实验室，被带到别处去用。唐书瑶那一夜结晶出来的“试管要先用碱液洗净”，第二天在她的课堂上站住了。以后每一届学生都会被她叮嘱一遍。这就是一次小小的结晶。

有了这两个词，本书的说法可以写成一句话：

实验，就是有意制造对不上：把理念符号（假说）推到现实符号（读数）面前对账。

这句话里有三个要紧的字眼。

“有意”：对不上是被请来的

平常的对不上是撞上的。你出门忘了带伞，下雨了，你的计划和天气对不上，你被逼着想办法。这种对不上来得随机，可能很久不来，来了也不一定在要紧的地方。

实验是把这种撞上，变成**请来**。伽利略不等哪天碰巧看见一个球滚下斜坡。他专门去造一道槽，让“平方律”这个说法每滚一次球就面对一次落空的可能。一百次滚动，就是一百次有意请来的对账机会。

这就是科学和一般经验不一样的地方。一般经验也会被对不上改写，可它是被动的，碰上什么算什么。科学把对不上变成了一种可以安排、可以重复、可以交给别人去安排的东西。本书的全书判词说：科学的力量，在于把“对不上”变成了一种制度。实验，就是这个制度的第一块砖。

缝要在事前指认

这里有一道闸，本书自己必须守住。

说“每一个新认识背后都有一次对不上”，很容易变成一句事后永远正确的话。看到任何一个结论，都回头说“那里一定有过对不上”，这就什么也没说。

所以本书用“对不上”讲一次实验，要先在材料里把那条缝指出来：是哪个读数，和哪个说法，在哪一处合不上。唐书瑶那里，是一团灰黑和“会出镜子”；伽利略那里，是平方律的数字和“速度与距离成正比”；下一节巴斯德那里，是一碗碗浑汤和两个都说得通的说法。

指不出来，就老实说指不出来，不硬套。实验是讲这个道理最好的地方，因为它的缝通常是事先摆好的。做实验的人在动手之前，就已经写下了“如果结果是这样，我的说法就错了”。

“推到面前”：理念要站出来，可能挨打

一个说法要被推到读数面前，它得先站出来，说清楚自己会被什么打倒。

拿“重的东西落得快”来说。如果你说“快一点点，可能快得看不出来”，那它就躲开了一切读数，什么实验都碰不到它。伽利略的平方律不一样，它说得很死：一比四比九。说得死，才挨得着打；挨得着打，对账才有意义。

日常也一样。你说“这家店的菜一般”，这句话谁也驳不倒，因为“一般”可以指任何东西。你说“这家店的红烧肉比楼下那家咸”，这句话就站出来了。两盘端上来一尝，对得上就对得上，对不上就对不上。

“对账”：两边都可能被改

对账这个词是故意选的。会计对账的时候，账本和库房对不上，不一定是库房丢了东西，也可能是账记错了。两边都要查。

实验也一样。理念和读数对不上，可能是假说错了，也可能是读数不可靠——仪器坏了、试管脏了、水流不匀。唐书瑶那一夜，最后被改写的不是“醛基能还原银”这个理念，而是她对实验条件的认识。伽利略同时代人复做失败，多半也不是平方律错了，是槽不够直、球不够圆。

所以，实验不是单方面地“拿事实检验理论”。它是两张网在同一处拉扯。最后可能是理念让步，可能是读数让步，也可能两边都改一点。然后长出第三样东西：一个新的实验条件，一个新的概念，或者做实验的人身上一种新的手感。

控制变量：把对不上收窄到一处

现在可以讲实验里最核心的那门手艺了：控制变量。

教科书上讲控制变量，常说成“保证公平比较”。这么说没错，可是没说到点子上。用本书的话说：

控制变量，就是把对不上收窄到一处。

想想家里那串圣诞彩灯。一整串不亮了，你知道“有地方坏了”，这是一个对不上：你以为插上会亮，它没亮。可是这个对不上散在整串灯上，你不知道是哪一颗。怎么办？一颗一颗换。换一颗，其余不动，看亮不亮。不亮，就不是这一颗；亮了，缝就在这里。

唐书瑶那一夜做的就是这件事。灰黑色的浑浊是一个对不上，可它散在五个可能的地方：试管、氨水、葡萄糖、水温、晃动。只要五样同时在变，这个对不上就落不了地，她什么也学不到——下次可能成功，可能还失败，全凭运气。一次只改一样，其余照旧，对不上就被一步步逼到一个角落里，最后只剩一处：试管。

伽利略也是这样。斜面倾角可以变，球的轻重可以变，滚的距离可以变。他要检验的是“距离和时间的关系”，就让其他东西尽量不动，只让距离和时间两样对账。他还特意换了几个倾角，看结论变不变——这是在问：对得上，是不是只因为某个倾角凑巧？

控制变量为什么这么要紧？因为一个散开的对不上，结晶不了。它能让你心里不安，却不能告诉你该改哪里。只有当对不上被收窄到一处，才有一个清清楚楚的地方让新的理解落下来。散开的不安只是一锅粥（混沌）；收窄以后，才是正在成形（介生）；最后在那一处立起一条新的认识，就是定型（秩序）了。

失败的实验去了哪里

还有一件事，常被“问一答”图景藏起来：失败的实验。

教科书里的实验，几乎都是成功的。一个结论配一个实验，实验一做就出来。读的人很容易以为，科学家是一路对得上走过来的。

真实的实验室不是这样。一个研究生一年做的实验，大半是失败的。仪器漏气，样品污染，温度飘了，信号被噪声盖住。

这些失败不是白费。每一次失败，都是一次对不上。它告诉你：这里有一个你没想到的变量。唐书瑶的脏试管是这样，伽利略手稿上被涂掉的数字也是这样。

可是失败很少被写下来。论文只写最后成功的那一条路，前面绕过的弯都被剪掉了。剪掉以后，读的人只看见结论，看不见结论是从多少次对不上里一点点收窄出来的。

一个实验的成功，是它前面所有失败收窄的结果。

这也是唐书瑶后来要学生先做一次脏试管的道理。她不是在教他们失败，是在把那条被剪掉的路，还给他们走一遍。

实验要付能量

还有一层，平常讲实验时很少提：实验很贵。

这个“贵”不只是钱。唐书瑶那一夜在实验室熬到十一点，一支支试管地换，一次次地等水浴——这是她付出的力气。本书把这种力气叫**动能**：一个人为了把旧的连接拆开、把新的连接接上，一步步往前推的速度和方向。

她能熬这一夜，还因为身后有东西托着。学校的实验室、柜子里的试剂、手册上写着的“须用热碱液洗净”、十四年的教学积累。本书把这种托举叫**势能**：周围那张网对一个新理解的吸引和拉扯，像水往低处流要有地势。

熬完这一夜，“试管须洗净”在她身上站住了，以后再也不会忘。本书把这种站住叫**内能**：一个理解结晶以后的连接度，也就是要拆散它有多难。

一次实验，就是一次能量的支出：耗动能，靠势能，存内能。

这也说明了为什么有的实验课学不到东西。如果学生拿到一张步骤单，照着第一步、第二步做下去，对上了就填表交差，他一点动能都没付。那个结果在他身上就结晶不了（第 20 章会专门讲“照方抓药”式的实验课）。

三种形态在实验里来回走

最后补一笔。符号学、逻辑学、数学三样缺一不可，这层意思第 3 章借王德生、牟军《科学是什么？》说过〔待核〕。

放到实验里看，这三样是来回走的。“加速”、“斜面”、“时间平方律”这些站得稳、可以带走的说法，是符号，像一颗颗粒子；从“斜面是冲淡了的落体”一步步推到“距离之比是一比四比九”，是逻辑，像一道波，有轨迹、有方向；一比四比九这个比例本身，把每一个时刻和每一段距离连成一张有次序的表，是数学，像一片场。

一次实验，就是让这三种形态轮流出场。一个说法（粒子）展开成一串推导（波）。推导落到一张比例表（场）上，比例表被拿去和水杯的重量对账。对上了，比例表又被压回成一句可以带走的定律（粒子）。三样不是一级一级往上爬的台阶，是互相转换、互相托着的三种样子。

◆ 六、一个完整的例子：巴斯德的鹅颈瓶

讲到这里，换一个实验，把整个过程从头走一遍。

一锅肉汤为什么会坏

十九世纪中叶，法国科学界还在争一个很老的问题：生命能不能从非生命里自己长出来？

一碗肉汤放几天就浑了，长满了细小的东西。旧说法认为，这是腐败的物质里自然生出了微小的生命，叫“自然发生”。这个说法有很长的来历。看起来支持它的现象也很多：腐肉生蛆、湿草堆里长出小虫、密封不严的罐子照样会坏。

到了十七世纪，意大利人雷迪用纱布盖住肉，苍蝇落不上去，肉里就不生蛆，这已经撼动了“腐肉生蛆”。可是到了显微镜下的微生物这一层，争论又回来了：这么小的东西，总不会也是从卵里来的吧？

十八世纪又吵过一轮。英国人尼达姆把肉汤煮一煮，封上瓶口，过几天里面照样长出微生物。意大利人斯帕兰扎尼不服，他在 1760 年代把肉汤煮得更久，再把瓶口熔封，汤就一直不坏。

尼达姆的回答很巧：你煮得太久了，把空气里那种让生命发生的“生命力”也煮坏了。斯帕兰扎尼没法反驳，因为他的瓶子确实同时隔绝了两样东西——空气里的微粒，和空气本身。

这一轮没有吵出结果。缝其实已经露出来了，就在“空气”和“空气里的东西”绑在一起这一处。可是当时没有一件装置能把它们拆开。

1859 年，法国博物学家普歇出版了一本书，用一系列实验支持自然发生说。他把干草浸液煮沸，隔绝空气，过一阵子里面还是长出了微生物。差不多同一时期，法国科学院设了一个奖项，悬赏能用严谨实验澄清这个问题的人。

路易·巴斯德接了这个题。

第一步：把对不上指认出来

巴斯德面对的对不上，可以在材料里一处一处指出来：

- 理念符号这一头，有两个互相顶着的说法。自然发生说说：微生物是汤里自己生出来的。另一个说法说：微生物是从外面——空气里的微粒——落进去的。
- 现实符号这一头，是一碗碗变浑的汤。

麻烦在于，这两个说法对同一碗浑汤都“对得上”。汤敞着口变浑了，自然发生说说“你看，生出来了”；对手说“空气里的东西落进去了”。汤密封了不浑，对手说“外面的东西进不来”；自然发生说说“你把空气隔绝了，生命需要新鲜空气才能发生”。

两个说法都对得上，就等于没有对账。

这正是本章第五节讲的散开的对不上。空气和空气里的微粒总是一起来、一起走，只要它们绑在一起，你就分不清到底是哪一个在起作用。

第二步：把对不上收窄到一处

巴斯德的办法，是设计一个只让一样东西变的瓶子。

他把肉汤装进玻璃烧瓶，然后把瓶颈在火上烧软，拉长，弯成一个向下再向上的 S 形，像天鹅的脖子。瓶口不封，空气可以自由进出。然后把汤煮沸，杀死里面原有的东西，放凉，静置。

这个瓶子的妙处在于：**空气能进去，空气里的尘埃进不去。** 空气流进弯曲的瓶颈时，尘埃会落在最低的那个弯里，被冷凝的水汽粘住，到不了汤面。

这样一来，“空气”和“尘埃”这两个绑在一起的变量，被一根弯管拆开了。自然发生说的辩护——“生命需要空气”——在这里没有了退路，因为空气是通着的。

结果是：鹅颈瓶里的汤一直是清的，放几天、几个星期都不浑。

然后巴斯德做了第二步：把瓶颈折断，或者把瓶子倾斜，让汤流到那个积了尘埃的弯里再流回来。没过多久，汤就浑了。

对不上被收窄到了一处：不是空气，是空气里的尘埃。

1864 年 4 月 7 日晚，巴斯德在巴黎索邦大学做了一场公开演讲，向满座的听众展示了这些瓶子。据说他保存的一些鹅颈瓶，至今陈列在巴斯德研究所，里面的汤还是清的。

第三步：结晶，可它是局部的

鹅颈瓶的结果过了三条判据。

稳定：换一锅汤、换一个瓶子、换一个人做，结果一样。整体：“微生物来自空气中的微粒，而非汤里自生”这个说法，拆掉“微粒”这一环就不成立，它是一个整的东西。独立：它很快离开了巴斯德的实验室，被带进酿酒、养蚕、外科消毒。英国外科医生李斯特后来推行手术消毒，就受了巴斯德工作的启发。

可是这次结晶有它的边界。故事没有在 1864 年画上句号。

普歇那边，用干草浸液做实验，煮沸后仍然会长出微生物。巴斯德用的多是酵母浸液和肉汤，结果是清的。双方各自的实验都“做得出来”，吵了好些年。十多年后，英国物理学家丁达尔等人注意到，干草里有一种能耐高温的东西，普通的煮沸杀不死它。1876 年前后，德国植物学家科恩辨认出了细菌的耐热芽孢。

也就是说，普歇的干草浸液之所以“自然发生”，另有缘故。里面藏着一个巴斯德的实验没有控制到的变量：耐热芽孢。巴斯德的结论并没有被推翻，它被补全了。“煮沸就能杀死汤里原有的一切”这个暗中的前提，在干草面前对不上了，又被逼出了一次新的结晶。

这个例子说了什么

把鹅颈瓶的整个过程摆成一张表，和“问—答”的说法对照着看：

环节	“问—答”图景的说法	本书的说法
实验之前	有一个问题等着自然回答	两个说法对同一碗浑汤都对得上，对不上散开，落不了地

环节	“问—答”图景的说法	本书的说法
设计装置	摆好条件让自然表演	造一根弯管，把空气和尘埃拆开，有意制造一处可能对不上的地方
控制变量	保证比较公平	把对不上收窄到一处：不是空气，是尘埃
读数	自然给出的答案	一瓶清汤、一瓶浑汤，是现实符号；被读成“微生物来自尘埃”，是理念符号
结论	发现了真相	一次过了三条判据的结晶，稳定、整体、可带走
后来的争议	对手做错了	干草浸液里藏着没控制到的变量，对不上再起，结晶被补全
实验的代价	一般不提	巴斯德的动能、科学院与实验室的势能、结论建立起来的连接度

最后一行值得多说一句。鹅颈瓶为什么能说服人？不只是因为它巧妙。是因为在它之前，有几十年的争论、几百个实验、一整个学界盯着这个问题——这是一张已经绷紧的网。巴斯德的弯管落下去，正好落在网上最紧的那一处，所以一落下就站住了。同样一根弯管，如果放在一个没人关心这个问题的年代，可能就只是一个好看的玻璃器皿。

◆ 七、放回日子里

唐书瑶后来把那支黑试管洗干净，留了一支没洗的，一直放在办公桌的抽屉里。

每一届新生做银镜反应之前，她都先让他们故意用脏试管做一次，再用洗净的做一次。有学生问为什么要先做一个“肯定失败的”。她说：成功的那支只告诉你“可以”，失败的那支才告诉你“为什么”。

你在日子里其实也在做实验，只是很少这样叫它。

你按网上的方子烤面包，烤出来又硬又塌。你心里有个说法——“照着方子做就会成功”，眼前是一块硬面包，对不上了。这时候有两种做法。

一种是下次换一个方子，再换一个，再换一个。每次都改了五六样东西：面粉、酵母、水温、发酵时间、烤箱温度。成功了，你不知道为什么成功；失败了，你也不知道为什么失败。对不上一直是散开的，什么也结晶不了。

另一种是唐书瑶的做法：其余都不动，这次只把发酵时间延长一倍。还塌，就不是发酵；不塌了，缝就在这里。几次之后，你身上会长出一样东西——不是方子，是手感。那是你自己付了力气换来的，它会一直跟着你。

一个散开的对不上只会让你烦，一个收窄的对不上才会让你长。

孩子身上起了疹子，医生怀疑是吃的东西过敏，常会让家长这样做。先把可疑的几样都停掉，等疹子退了，再一样一样加回来。每加一样，观察几天。加到牛奶，疹子又起了，缝就在牛奶上。

这个办法有个名字，叫回避与激发。它其实就是家里人也能做的控制变量。它慢，要等，要记，可它把一个散在一桌饭菜上的对不上，逼到了一杯牛奶上。

孩子成绩忽高忽低，你想知道原因，也可以这样想。先别同时换补习班、换作息、换书桌、换手机规矩，一样一样来。一样一样来很慢，可它是唯一能让你真正知道点什么的办法。

伽利略的斜面、巴斯德的鹅颈瓶、唐书瑶的那一支脏试管，做的是同一件事：不等对不上来找你，你去请它；请来了，不让它散开，把它逼到一处；在那一处，让新的东西长出来。

带 走 的 话

实验不是向自然讨一个现成的答案，是有意请来一次对不上，再把它收窄到一处，让新的认识在那里结晶。

小　账

“问一答”图景把实验关成了“读出自然的回答”；本书打开的是：答案是被一次可能落空的对账逼出来的，控制变量就是把对不上收窄到一处。

发生被收回为发现的那一下，在教科书那一句“伽利略做了斜面实验，发现了落体定律”里。它把被涂改的数字、复做的失败、吵了七十年的官司都抹掉了。

想 一 想

1. 你最近一次“照着做却没成功”的事是什么？当时你是一下子改了好几样，还是一次只改一样？

2. 你心里有没有一个说法，说得太圆，以至于任何结果都驳不倒它？试着把它改成一句“可能挨打”的话。

3. 孩子或你自己做错一道题时，你更想要那个正确答案，还是更想知道错在哪一步？这两种想要，留下的东西有什么不同？

◆

05

第 5 章

反常：科学的对不上

这一章的问题

七号测点那个一点三一，该当坏数剔掉，还是该钻到桥下去看？科学里对不上的数，算什么？

◆ 一、第七号测点的读数

陆建平五十二岁，在深圳做桥梁检测，干了二十六年。

那年秋天，他带队给一座新建的城市高架桥做通车前的荷载试验。做法不复杂：找十几辆装满砂石的重卡，每辆车多重，事先过磅称好。按设计好的位置把车开上桥，停稳，然后读桥上各处的应变和挠度。

应变是钢筋和混凝土被拉长、压短的程度，很小，要用贴在梁底的传感器去读。挠度是桥面往下沉了多少，用仪器从桥下量。

每一个测点，事先都有一个算出来的数。设计院用计算机模型把这座桥算过一遍：这么多车停在这里，第几号梁底应当拉长多少，桥面应当沉多少。试验就是拿量出来的数，去和算出来的数比。

行里有个习惯的比法，叫校验系数：实测值除以计算值。一座正常的桥，这个系数通常小于一，具体落在什么范围，规程里按桥型和测的是应变还是挠度分别给出。意思是桥比模型算的还要结实一点，因为模型总是偏保守。

那天上午，二十几个测点的系数一个个报上来：零点七一，零点七八，零点六九，零点八二……都在预料之中。

报到第七号测点，徒弟邝志杰念了一个数：一点三一。

车上的人都抬了一下头。

一点三一的意思是，这一处梁底被拉长的程度，比模型算的多了三成。别的测点都比模型“更结实”，只有它比模型“更软”。

邝志杰二十六岁，入行三年，手脚麻利。他第一个反应是：“传感器的问题吧？七号是昨天下午最后贴的，胶可能没干透。我在记录里标个异常，后面数据处理的时候剔掉就行。”

这是一个很合理的反应。一个测点和二十几个测点都不一样，最省事的解释是：这个测点坏了。

陆建平没马上答应。他让邝志杰做三件事。

第一，把七号传感器旁边再贴一个新的，同一个位置，两个一起读。第二，等太阳下去，晚上气温稳了再加载一遍，排除温度的影响。第三，把车撤掉，看七号的读数能不能回到零。

晚上十点，结果出来了。新贴的传感器读数和旧的几乎一样。夜里重做，系数一点二八。撤车以后，读数回零。

邝志杰不说话了。传感器没坏，温度不是原因，桥也没有留下什么永久变形。这个一点三，是真的。

陆建平说：“读数不会撒谎，可它也不会告诉你它为什么是这个数。现在要问的，是模型哪里不像这座桥。”

第二天一早，他们钻到桥下去看七号测点附近的支座。支座是梁和桥墩之间垫着的橡胶块，梁的重量通过它传给桥墩。

问题找到了。七号所在的那片梁旁边，相邻一片梁的一个支座脱空了：橡胶块和梁底之间有一道几毫米的缝，没有贴实。那片梁本该自己扛的一部分重量，传不下去，就分到了旁边的梁上——七号测点正好在那里。

模型里，每个支座都是贴实的。真桥上，有一个没有。

支座重新调平垫实以后，再做一遍试验，七号的系数落到了零点八四。

回去的车上，邝志杰说了一句：“要是昨天我把它剔掉了……”

陆建平没接话。他想起自己刚入行时，也剔过一个这样的数。后来那座桥没出事，他也一直不知道当年那个数到底是坏传感器，还是一道没被看见的缝。

这一章讲的，就是这样的数。科学里管它叫**反常**。

◆ 二、反常向来怎么被对待

先讲科学家对付反常的老办法。这套办法很聪明，而且屡建奇功。

一个理论站得很稳的时候，冒出一个和它不合的读数，科学家通常不会马上去动理论。他们按顺序做几件事。

第一，查读数。 是不是仪器坏了，是不是记错了，是不是有干扰。邝志杰想到的就是这一步。大多数反常，走到这一步就消失了：真是传感器坏了，真是数抄错了。

第二，查有没有漏掉的东西。 理论没错，可是用理论去算的时候，少算了一样东西。陆建平找到的支座脱空，就属于这一类：力学没错，模型少了一个条件。

第三，实在不行，才去动理论本身。

这个顺序有它的道理。一个理论站得稳，是因为它已经和成千上万个读数对过账。一个新冒出来的不合，十有八九是读数的毛病或计算的遗漏。为了一个读数就推倒一个理论，等于为了一张收据对不上就把整本账烧了。

这个顺序，是在保护一个已经结晶的东西不被噪声冲散。

天文学史上最漂亮的一次胜利，就是按这个顺序走出来的。

天王星走歪了

1781 年 3 月，德国出生、定居英国的音乐家和业余天文学家威廉·赫歇尔用自己磨制的望远镜，在双子座附近看见一个圆面模糊的天体。他起先以为是彗星，后来几位天文学家算出它的轨道，认定这是一颗新的行星。这是有史以来第一颗靠望远镜认出的行星，后来叫天王星。

有了轨道，就可以按牛顿的引力理论，预先算出它将来每天在天上的位置。天文学家把太阳、木星、土星的引力都算进去，编成星表。

麻烦来了。天王星不按星表走。

1821 年，法国天文学家布瓦尔编了一份新的天王星星表。他觉得很难让新旧观测数据同时对得上：拿较早的记录去配，近期的就偏；拿近期的去配，早年的就偏。他在星表里坦白写了这个困难，留了一句话：也许有某个外在的、未知的东西在干扰这颗行星。

此后二十年，偏差越积越大。到了十九世纪四十年代，天王星偏离计算位置已经接近两角分。两角分在天上很小，大约是满月直径的十五分之一，可是对当时的天文学家来说，这已经是一个无法装作没看见的数。

这就是一个反常：牛顿理论算出来的位置（理念这一头），和望远镜里量到的位置（读数这一头），对不上。

两条路

当时有人想到了动理论：也许在离太阳这么远的地方，引力不再严格地按距离平方衰减。这是第三步。

更多的人走第二步：理论没错，是少算了一样东西。如果在天王星外面还有一颗没被看见的行星，它的引力就会拉着天王星时快时慢。

这个想法听起来简单，算起来极难。正常的问题是“已知一颗行星，算它怎样拉别的星”；这里要反过来，“已知被拉歪的样子，倒推拉它的那颗星在哪里、有多重”。

英国剑桥的年轻数学家亚当斯和法国的勒维耶，各自独立做了这道题。亚当斯在 1845 年秋算出了结果，可是没能说动英国的天文台及时去找。勒维耶在 1846 年夏天发表了他的计算，给出了这颗未知行星应在的位置。

1846 年 9 月 23 日，柏林天文台的伽勒收到勒维耶的来信。当天夜里，他和助手达雷斯特把望远镜对准信里给的位置，对照星图，不到一个小时就找到一颗星图上没有的星。它离勒维耶预言的位置，相差大约一度。

这颗星后来叫海王星。

这一次，反常被旧理论吸收了

海王星的故事常被说成“笔尖上的发现”，是牛顿力学最辉煌的时刻之一。这么说一点不夸张。

一个反常摆了二十多年。理论没有被推倒，反而被拿来当工具，倒推出一个谁都没见过的天体，再被望远镜接住。反常不但没有伤到牛顿力学，还让它更结实了：从此以后，谁还怀疑引力理论能不能用到太阳系边缘？

从命名的角度看，海王星走过了一段很清楚的路。起先它是一个**理论对象**：一颗只在算式里存在、由被拉歪的轨道推出来的星。这时它还没有自己的现实痕迹。9 月 23 日夜里，伽勒的望远镜里出现了一个光点，这个理论对象才和一个可以反复看到的现实痕迹对上。再之后，它才得到“海王星”这个名字：这是给一个已经能被辨认的东西加上新名。

理论对象和观测对上，是两件事；有了名字，又是一件事。它们在海王星身上接连发生，可不能互相冒充：勒维耶的算式算得再漂亮，在伽勒看见那个光点之前，海王星都只是一个待对账的说法。

这就是老办法的力量。**它把一个反常，变成了一次新的对账机会，而且赢了。**

本书要先把这一点写足：按顺序查读数、查遗漏、最后才动理论，这是科学最可靠的习惯之一。它让陆建平没有把七号测点剔掉，也没有一上来就怀疑整套桥梁力学。下面要讲的，是同一套办法、同一个人，第二次走同一条路时，遇到了什么。

◆ 三、同一个人，第二颗星没有来

水星的近日点在挪

水星是离太阳最近的行星，轨道是一个扁一点的椭圆。椭圆上离太阳最近的那一点，叫近日点。

如果太阳系里只有太阳和水星，按牛顿理论，这个椭圆会一圈一圈地重合，近日点一动不动。可是太阳系里还有金星、地球、木星，它们的引力会一点点拉偏水

星的轨道，让椭圆整个慢慢转动。近日点于是会一年一年往前挪，这叫近日点进动。

进动本身不是反常。它是牛顿理论预先就说会有的。问题在于挪多少。

1859 年，刚刚因为海王星名满天下的勒维耶，发表了他对水星运动的详细计算。他把所有已知行星的拉扯都算进去，得出的进动量，和观测到的进动量差了一点：每一百年大约差三十八角秒。

三十八角秒有多小？大约是一角分的三分之二。在一百年里攒下的这么一点点。可是勒维耶的计算极其精细，观测数据跨越了一百多年，这一点差额躲不过去。

这又是一个反常。理念这一头：牛顿理论算出的进动量。读数这一头：一百多年的水星观测。两头之间，有一道三十八角秒的缝。

照老办法：再找一颗星

勒维耶走的是他走过的老路。理论没错，是少算了一样东西。如果在水星轨道里面、离太阳更近的地方，还有一颗小行星，或者一群小天体，它们的引力就可以补上这三十八角秒。

同一年年底，一位叫莱斯卡博的法国乡村医生写信给勒维耶，说他在 1859 年 3 月用自家的小望远镜，看见一个小黑点从太阳表面横穿过去。勒维耶专程去拜访他，查看了他的仪器和记录，相信了。1860 年初，勒维耶宣布：水星内侧有一颗新行星。他给它起名“伏尔甘”，罗马神话里的火神与锻冶之神，中文也译作“祝融星”。

这一下，海王星的故事好像要重演一遍。

接下来几十年，天文学家一次次去找它。日全食的时候，太阳被月亮挡住，太阳旁边的暗星才看得见，正是找它的好时机。1878 年 7 月的一次日全食，美国的沃森和斯威夫特两位天文学家报告说看到了可疑的星点，可是位置对不上，别人也没能重复看到。别的观测者在太阳表面盯了很多年，那个小黑点再也没有被可靠地认出来过。

祝融星就这样一直挂着，挂成了一个只有名字、没有现实痕迹的理论对象。它和海王星一样，一开始都是从轨道偏差里推出来的；不同在于，海王星后来在望远镜里和一个光点对上了，祝融星始终没有。

缝没有消失

祝融星没来，那三十八角秒还在。

1882 年，美国天文学家纽康把水星数据重新算了一遍，把这个差额修正为每百年约四十三角秒。缝不但没有被抹掉，反而被量得更准了。

这段时间里，人们又试了好几种办法补这道缝。

有人提出，太阳可能不是一个完美的圆球，赤道略鼓，多出来的那一圈质量会额外拉动水星。有人提出，太阳附近有一大片稀薄的尘埃，就是黄昏时偶尔能看到的黄道光，它们的引力也许够补上这个数。美国天文学家霍尔在 1894 年提出过一个更大胆的想法：引力并不严格按距离的平方衰减，指数比二大那么一丁点。这已经是在动理论本身了。

每一种办法都能补上水星这一处的缝。可是每一种办法，都会在别处惹出新的不合：太阳的扁度测不出那么大，尘埃的量对不上，改了平方律，月球的运动又偏了。

这道四十三角秒的缝，就这样在天文学里挂了半个多世纪。它没有让牛顿力学垮掉。人们照样用牛顿力学算行星、造机器、修铁路。它只是挂在那里，偶尔被人拿出来看一看，又放回去。

1915 年 11 月

1915 年 11 月，爱因斯坦正在给他的广义相对论做最后的收尾。这套理论把引力讲成了时空的弯曲，和牛顿的讲法从根上不一样。

那个月里，他用新理论的方程去算水星的近日点。算的时候，他没有往太阳系里添任何新的星，也没有调任何可以随意拧的参数。新理论自己给出了一个额外的进动：每百年大约四十三角秒。

11 月 18 日，他在普鲁士科学院报告了这个结果。据他两个月后给朋友埃伦费斯特的信里说，算出这个数的那几天，他高兴得好几天不能自已。

半个多世纪的缝，在一个完全不同的理论里，严丝合缝地对上了。

这不是故事的结尾。下一节讲完另一个反常，再回来用本书的眼光，把水星这半个多世纪从头走一遍。

◆ 四、一束光什么也没告诉你

以太风

十九世纪的物理学家相信，光是一种波。水波要靠水传，声波要靠空气传，光波也该有个东西传它。这个看不见、摸不着、充满宇宙的东西，叫以太。

地球绕太阳转，每秒大约三十公里。如果以太静止不动，地球就是在以太里穿行，地面上的人应该感到一股“以太风”，就像骑车时迎面有风。

既然有风，光顺风跑和逆风跑，速度就该有一点差别。量出这点差别，就能量出地球在以太里的速度。

难处在于，这点差别太小了。光速是每秒三十万公里，地球的速度只有它的万分之一。要量出来的效应，是这个万分之一的平方，也就是一亿分之一。

迈克耳孙的仪器

美国物理学家迈克耳孙设计了一台精巧的仪器，叫干涉仪。原理是：把一束光一分为二，让两束光沿着互相垂直的两条路各跑一个来回，再合到一起。两束光如果跑的时间完全一样，合起来是一个样子；如果有一点点快慢，合起来的明暗条纹就会挪动。

把仪器转个方向，一条路从顺着以太风变成横着以太风，条纹就该挪。挪多少，就能算出以太风有多大。

1881 年，迈克耳孙在德国波茨坦做了第一次实验，没有看到预期的条纹移动。可是那台仪器的精度还不够，结论说服不了人。

1887 年，他和化学家莫雷在美国克利夫兰合作，造了一台好得多的仪器。他们把光学元件装在一块厚重的石板上，让石板浮在一槽水银里，可以平稳地缓缓转动。光在石板上的镜子之间来回反射多次，把光路拉长到十一米左右，效应也就放大了。

按以太理论，石板转动时，条纹应当移动大约零点四条。

他们报告的结果是：实际看到的移动，肯定不到预期的二十分之一，很可能不到四十分之一。

几乎是零。

一个“什么也没有”的反常

迈克耳孙–莫雷实验的反常，和水星不一样。水星是多了一点：多出四十三角秒。这里是少了：该有的东西没有。

一个没有出现的效应，也是一个读数。条纹没动，这在仪器里是一个实实在在的现实痕迹：明暗条纹的位置，转了一圈还在原处。它和以太理论算出来的“应当移动零点四条”对不上。

当时的物理学家面对这个反常，也是按老顺序走的。

先查读数。会不会是仪器不够灵敏？可是仪器的灵敏度足以测出零点四条的二十分之一，不是不够。会不会正好碰上某个季节，地球和以太相对静止？迈克耳孙和莫雷原本计划在一年中不同时节再做，后来的人也确实在不同时节、不同地点重复过，结果都差不多。

再找遗漏。有人提出，地球表面附近的以太被地球拖着走了，就像船边的水被船带着走，所以在地面上感觉不到风。这个想法补了这里，可又和星光的光行差观测合不上。

1889 年，爱尔兰物理学家菲茨杰拉德提出一个奇怪的设想；1892 年前后，荷兰物理学家洛伦兹也独立提出了类似的想法：物体在以太中运动时，沿运动方向的长度会缩短一点点，缩短的量正好抵消光速的差别。仪器自己缩了，所以量不出来。

这个设想补得严丝合缝，后来洛伦兹还把它发展成一整套电子理论。可是它有一点让人不安：它好像是专门为了补这一个缝造出来的。

缝被谁接住

1905 年，爱因斯坦发表了狭义相对论。他从两条原则出发：物理规律在所有匀速运动的参照系里都一样；光在真空中的速度，对任何观察者都一样。从这两条出发，长度缩短、时间变慢都成了推论，不再需要以太。

以太这个概念，在这里不是被一个实验“驳倒”的。它是在一个新的理论里变得用不着了。

这里有一处史实必须讲准：爱因斯坦 1905 年的论文里并没有提到迈克耳孙–莫雷实验。迈克耳孙–莫雷实验对爱因斯坦的思路到底起了多大作用，科学史家至今有争论，爱因斯坦本人晚年的说法也前后不一。教科书常把这个实验写成“推翻以太、催生相对论的判决性实验”，这是后来人整理出来的一条干净线索，真实的历史要曲折得多。

还有一个细节很耐人寻味：迈克耳孙本人长期把这次实验看成一次失败。他造仪器是为了量以太风，没量出来。他到晚年写书时，还把以太称作“可爱的老以太”。1907 年，他因为精密光学仪器和用它们做的测量获得诺贝尔物理学奖——授奖的理由，是他的仪器做得准，而不是这个“零”推翻了什么。

一个后来被看成二十世纪物理学起点之一的读数，在做出它的人那里，首先是一件没做成的事。

◆ 五、老办法停在哪里

现在可以把天王星、水星、以太三件事放在一起看了。

老办法在三件事里用的是同一个顺序：查读数，找遗漏，最后才动理论。在天王星那里，它大获全胜；在水星那里，它找了半个世纪的祝融星，一无所获；在以太那里，它补出了一个严丝合缝、却总让人不安的长度收缩。

这说明什么？

同一套办法，事先分不出哪一个反常会被吸收，哪一个会把旧理论熔开。

勒维耶面对水星时，没有任何理由认为这一次会和天王星不同。两次都是轨道和计算差了一点，两次都可以用“还有一颗看不见的星”来解释。他在第二次走老路，不是糊涂，是在做一个被成功证明过的、最合理的选择。

老办法停下的地方，在这里显出来了。它有一个暗中的前提：反常要么是错误，要么是一个还没被看见的东西。错误就剔掉，没被看见的东西就去找出来。总之，世界已经在那里了，理论大体是对的，反常只是一张还没对完的账。

在这个前提下，反常只有两种命运：被消灭，或者被收编。

这个前提解释不了三件事。

第一件：**有的反常为什么能挂几十年。** 水星的缝挂了半个多世纪，既没被消灭，也没被收编。在“反常就是错误或未知物”的眼光里，这段时间只是“还没找到”。可是它不只是“还没找到”。这道缝在那几十年里，一直被精细地重新测量，越量越准，越来越硬。它在长成一样东西。

第二件：**新理论出现以后，反常为什么会突然变了身份。** 1915 年以前，四十三角秒是牛顿力学的一个“小麻烦”。1915 年以后，它成了广义相对论的“第一个证据”，写进了每一本相对论教科书。同一个数，换了一个理论，就从麻烦变成了证据。这不是那个数变了，是它被接进的那张网变了。

第三件：**事后回看，为什么总能把历史讲得很顺。** 教科书说：迈克耳孙–莫雷实验推翻了以太，水星近日点证明了广义相对论。讲得很干净，好像反常一出现，真相就在那里等着被看见。可是迈克耳孙觉得自己失败了，勒维耶去找了一颗不存在的星，爱因斯坦的论文里没提那个实验。干净的讲法，是把一段长长的、谁也不知道结局的对账，收成了一个“反常揭示真相”的瞬间。

老办法在保护理论的时候是对的。它停下的地方是：**它只把反常当作需要被处理掉的东西，没有把它当作一个会自己长大的东西。**

◆ 六、本书的说法：反常是结晶的起点

先把本章用到的几个词讲清。

对不上：心里站稳的一个说法，和眼前站稳的一个痕，两样都不肯让。本书的基本主张是：对得上，就没有解释；只有对不上，新的理解才会被逼出来。

理念符号与现实符号：理论算出来的数、一个关于“还有一颗星”的说法，是理念符号，是在人的理解里站稳的东西。望远镜里的光点位置、干涉仪里的条纹、

梁底传感器的读数，在仪器里是现实符号，是现实自己沉下来、不需要谁去解释也立在那里的痕。一旦被科学家读成“天王星偏了两角分”，它又成了理念符号。

结晶：一次对不上被解释平息后，留下一个站得稳的新东西。它要过三条判据：稳定，换人换时间再量还是它；整体，拆开就不成它；独立，能离开它诞生的地方，被带到别处去用。

有了这几个词，可以给反常下一个定义：

反常，是理念符号和现实符号之间一道经过检查仍然不肯合上的缝。

“经过检查”这四个字很要紧。邝志杰念出一点三一那一刻，那还不是反常，只是一个可疑的数。换了传感器、夜里重做、撤车回零，三道检查都过了，它才成了反常。

天王星的偏差在 1821 年还只是“新旧数据配不齐”，二十多年越积越大、反复核对，才成了一个公认的反常。水星的三十八角秒，纽康重算以后变成更准的四十三角秒，这是它被检查得更硬了。

反常本身就是一次结晶

这里是本章最要紧的一步。

通常的眼光里，反常是“还没解决的问题”，是空缺，是窟窿。本书的看法是：一个被检查过、站住了的反常，本身已经是一次结晶。

拿水星的四十三角秒，用三条判据筛一遍。

稳定：勒维耶算出来，纽康重算还在，后来的天文学家用更好的数据算，还在。它不随一次计算散掉。

整体：“水星近日点每百年比牛顿理论多进动约四十三角秒”，这是一个整的东西。拆掉“牛顿理论”这个参照，它就不再是一个反常；拆掉“四十三”这个数，它就说不清。

独立：它离开了勒维耶的书房，被带到了纽康的计算里、霍尔的引力修正里、爱因斯坦 1915 年的草稿纸上。每个想动引力理论的人，都要先拿它来试一试。

三条都过了。**一个站住的反常，本身已经是一颗结晶——它由一百多年的读数撑着，在等一张能接住它的网。**

这就是本章的判断：

反常不是错误，是结晶的起点。

它是起点，不是终点，因为它还没被任何理论接住；它又已经是结晶，因为它稳定、整体、可以带走。正因为它已经结晶，它才能挂几十年而不散；正因为它挂着，新理论出现时，才有一个现成的、硬邦邦的东西可以去对账。

反常的三种去向

一道被检查过的缝，后来会往哪里走？大致有三种去向。

第一种，**读数让步**。查到最后，查明还是读数的问题，只是藏得深。这时候缝合上了，旧理论不动，被改写的是对仪器和测量条件的认识。很多反常是这样结束的。

第二种，**被旧网吸收**。理论不动，添一样之前没算进去的东西，缝就合上了。天王星和海王星是这一种，陆建平的支座脱空也是这一种。旧的结晶因此更结实了：它不但没被打破，还多了一次赢下对账的记录。

第三种，**旧网接不住，熔开再结晶**。旧理论怎样添补都会在别处惹出新的不合，缝一直挂着，直到一个新的理论在别的地方先站起来，再回头把这道缝接住。水星和以太是这一种。下一章会专门讲这种熔开与再结晶。

把四件事放进一张表：

案例	理念这一头	读数这一头	第一反应	补上的东西	去向
七号测点	计算模型给出的应变	系数一点三一，换传感器、夜测、撤车后仍在	传感器坏了，剔掉	一个脱空的支座	被旧网吸收：力学不动，模型补一个条件
天王星	牛顿理论算出的位置	偏离近两角分，二十多年越积越大	观测误差，或引力在远处变了	一颗未知行星，1846 年被望见	被旧网吸收：牛顿力学更结实

案例	理念这一头	读数这一头	第一反应	补上的东西	去向
水星近日点	牛顿理论算出的进动量	每百年多约四十三角秒	还有一颗看不见的星	祝融星，始终没被可靠望见	挂了半个多世纪，1915 年在新理论里被接住
迈克耳孙–莫雷	以太理论预言条纹移动约零点四条	不到预期的四十分之一	仪器不够灵敏、以太被拖着走	长度收缩，补得上却让人不安	1905 年起，以太在新理论里变得用不着
祝融星本身	一颗推出来的行星	没有可重复的光点	再找	无	只有名字的理论对象，没有结晶

事前能不能分得出

老办法事先分不出哪个反常会被吸收、哪个会把旧网熔开。本书能不能？

老实说，本书也不能事先断定一个反常的结局。谁也不能。可是本书能给出几个可以事先观察的信号。

第一个信号：**添补是不是只补一处、在别处惹出新的不合。** 海王星一添进去，天王星的偏差就消了，别处也没出问题。祝融星、太阳扁度、改平方律，每一样都补了水星，又在别处出了新的对不上。添补越是按下葫芦浮起瓢，旧网越可能接不住。

第二个信号：**缝是越量越模糊，还是越量越硬。** 读数的毛病，往往一查就松，越精细越小。水星的缝从三十八角秒量成四十三角秒，越量越准，没有缩小。越量越硬的缝，就越不像是读数的毛病。

第三个信号：**缝挂了多久而没有被吸收。** 挂得越久，说明旧网为了吸收它已经试了越多的办法。这不能证明旧网错了，可它在为一次熔开攒落差。

这几个信号都不是事后诸葛。它们在 1880 年、1900 年都可以观察。这也是本书必须守的一道闸：**对不上必须能在事前被独立指认。** 本章讲的每一道缝，都先在史料里指出了是哪个读数、和哪个说法、差了多少——两角分、四十三角秒、零点四条中的不到四十分之一、校验系数一点三一。指不出这样一个数，就不要说“这里有反常”。

能量的眼光

再用本书的能量账看一眼，为什么有的反常挂得住，有的一下就消了。

一个理论结晶以后，有它的**内能**：连接度，也就是要把它拆散有多难。牛顿力学到十九世纪末，已经和无数行星、彗星、潮汐、炮弹、机器对过账，连接度高得惊人。

一个反常，是一处**势能落差**：理念那张网往这边拉，读数那张网往那边拉，同一处被两头扯着。落差越大、越硬，积的力就越多。

要把一个理论熔开，需要**动能**：有人花力气，沿着一条路把旧的连接一条条拆开、把新的连接一条条接上。

水星的四十三角秒，是一处又小又硬的落差。它小，所以单靠它，拆不动牛顿力学那么高的连接度；它硬，所以它也散不掉。它就挂着，积着。直到爱因斯坦从另一头——光速、引力与加速的等效——花了八年左右的动能，在旁边搭起一张新网，这处落差才有地方可以放下去。

邝志杰想剔掉的那个一点三一，也是一处落差。它要是被剔掉，落差就被人为抹平了，什么也不会结晶：没有人会去桥下看那个支座。

剔掉一个反常，就是放掉一处落差，也就放掉了它本可以做的功。

也别把每个反常都当宝

说到这里，要防另一头的毛病。

反常是结晶的起点，可这不等于每一个怪数都藏着一场科学革命。大多数怪数，最后都是第一种去向：读数让步。仪器漏电，样品污染，程序里一个小数点错位。

2011 年有一个很有名的例子：一个国际实验组报告，他们测到的中微子好像比光跑得还快一点。这个数要是真的，相对论就得改。实验组自己也不信，把数据公开出来请大家一起挑错。几个月后，问题查到了一个光纤接头上：它没有插好（这件事见第 16 章）。

这个例子说明两件事。一件是：怪数要先过三道检查，过不了，就不是反常，只是故障。另一件是：实验组没有把那个数藏起来，也没有急着宣布推翻了谁，而是把它摆到大家面前对账。这正是把对不上变成制度的样子。

对反常的正确态度，不是崇拜，也不是剔除，是检查到它站住或者倒下为止。

邝志杰后来也学会了这一点。他不再一看到怪数就想剔，也不会一看到怪数就慌。他先把三道检查做完，再说话。

◆ 七、一个完整的例子：水星的半个多世纪

现在回到水星，用本书的眼光从头走一遍。

第一段：缝被指认（1859 年）

勒维耶把一百多年的水星观测和牛顿理论的计算放在一起。理念这一头是一个算出来的进动量，读数这一头是观测到的进动量。差额约三十八角秒。

这道缝是事先就能指出来的。它不是事后为了衬托相对论去找的，它在 1859 年就白纸黑字写在勒维耶的报告里。

第二段：老办法上场（1859—1890 年代）

勒维耶按海王星的成功经验，推出一颗内侧行星，命名为祝融星。这是一个**理论对象**的命名：先有算式里的位置，再给它一个名字，等着现实痕迹来对上。

莱斯卡博报告的小黑点，一度像是那个现实痕迹。可它不稳定，别人看不到，同一个人也没再看到。按三条判据，它连“稳定”这一条都没过。一个过不了稳定的痕，接不住一个理论对象。

于是祝融星一直只有名字。这是一个很好的提醒：**一个名字立住了，不等于它指的东西立住了。** 名字可以在文献里流传几十年，可是理论对象要成真，得有一个能反复看见的痕来接。

第三段：缝变硬（1882 年前后）

纽康重算，得到约四十三角秒。缝没有因为祝融星找不到而消失，反而更准了。这是反常本身在结晶：稳定、整体、可带走。

同时，各种添补轮番登场：太阳扁度、黄道光尘埃、霍尔改平方律的指数。每一样都能补上水星，又都在别处出了问题。这就是上一节说的信号：添补按下葫芦浮起瓢。

第四段：挂着（1890 年代—1915 年）

几十年里，牛顿力学照常用，水星的缝照常挂。这一段看起来什么也没发生，其实在攒落差。每多一种添补失败，旧网吸收这道缝的路就少一条。

这一段也说明了，熔开不是一个瞬间。旧理论不会因为一个反常就垮，它可以带着一道缝工作很多年。在这些年里，理论是一种定型（秩序）的状态，只是边上有一道裂纹。

第五段：新网在别处先站起来（1907—1915 年）

爱因斯坦的广义相对论，不是为了补水星的缝而起头的。它的起点在别处：一个在自由下落的电梯里的人，感觉不到重力；引力和加速度能不能看成一回事？从这个想法到最后的方程，他走了八年左右，中间改过好多次，走过不少弯路。

这八年里，旧的连接被一条条拆开：时间不再是到处一样的，空间不再是平直的。新的连接被一条条接上：引力是时空弯曲，物体沿着弯曲时空里最直的路走。这是一段很长的正在成形（介生）。

第六段：接住（1915 年 11 月）

新方程写定，爱因斯坦拿它去算水星。没有添一颗星，没有拧一个参数，四十三角秒自己出来了。

这一下，挂了半个多世纪的那颗结晶，终于被一张网接住了。它从牛顿力学的“小麻烦”，变成了广义相对论的“第一个证据”。同一个数，换了一张网，身份就变了。

第七段：回写

接住以后，事情还没完。新理论被那个数接住，反过来又改写了很多东西。

它改写了水星：从此水星近日点进动成了检验引力理论的标准考题，任何新的引力理论都得先过这一关。

它改写了牛顿力学的位置：牛顿力学没有被扔掉，它成了广义相对论在引力弱、速度慢时的近似。造桥、算炮弹、发射大多数卫星，照用牛顿。

它还改写了祝融星：一个只有名字的理论对象，从此被放进了科学史，成为“老办法也会失手”的一个标本。

这就是**回写**：新结晶的东西反过来改写原先的条件。

把这七段连起来看，水星的半个多世纪不是“一个反常揭示了真相”。它是一道缝被指认、被老办法试、自己越来越硬、挂着攒落差、在旁边一张新网站起来以后被接住、再回头改写旧网的全过程。

反常的一生，就是一次结晶的一生：先自己站住，再等一张网，最后被接住，再回写。

◆ 八、放回日子里

陆建平后来在单位里给新人讲课，每次都讲七号测点的故事。

他说，干检测的人，最怕两种毛病。一种是什么数都信，传感器坏了也照单全收，那叫糊涂。另一种是不合意的数一律剔掉，只留下和模型对得上的，那叫自欺。

不合意的数来了，先别急着信，也别急着剔。按顺序查：仪器，条件，重复。三道都过了，它还在，那它就不是噪声，是一个反常。这时候要做的，是去桥下看。

你的日子里也有这样的数。

体检报告上有一项指标高了一点。你可能想：大概是那天没睡好。也可能想：完了，得了大病。两种想法都太快了。医生通常会让你过一段时间再查一次，换个

时间、换个状态，看它还在不在。还在，才去找原因。这就是陆建平的三道检查。身体真有难处，请找医生。

孩子平时数学都在九十分上下，有一次考了六十。家长的第一个反应常是“粗心了”，然后就过去了。“粗心”就是邝志杰那句“传感器的问题”：最省事，也最容易放掉一道缝。下次如果又是六十，而且错在同一类题上，那就不是粗心了。它越来越硬，就该去看看是哪个支座没垫实。

单位里一个方案，前面几次都很顺，这次在一个客户那里卡住了。大家第一反应是“这个客户太特殊”。也许是。可是如果第二个、第三个客户都在同一处卡住，这就不是客户特殊，是方案里有一个你们一直当成贴实了的支座，其实是空的。

一个让你不舒服的数，别急着删。它可能是整张账里唯一在说实话的那一行。

带 走 的 话

反常不是要被剔掉的错误，而是一颗由读数撑着、已经站住的结晶；它挂着攒落差，等一张能接住它的网。

小　账

老办法把反常关在“错误或未知物”两扇门里，只问怎样消灭或收编它；本书打开的是：一个站住的反常本身就是结晶，挂着、变硬、等着被接住。

发生被收回为发现的那一下，是教科书把水星的半个多世纪写成“广义相对论解释了近日点进动”，把祝融星、纽康重算、几十年的添补失败一笔抹掉。

想 一 想

1. 你最近一次碰到“一个不合意的数”是什么时候？你当时是信了、剔了，还是去查了？
2. 你身边有没有一道“挂了很多年”的缝——一个大家都知道不对劲、却一直没人去碰的地方？它为什么挂得住？
3. 孩子或同事身上一次“反常”的表现，你习惯把它归为偶然，还是会等它第二次出现再看？

◆

06

第 6 章

范式转换：熔开与再结晶

这一章的问题

方志诚从不信细菌，到给年轻医生讲细菌，这十几年里发生了什么？一整套学问是怎样换掉的？

◆ 一、老方的两本教科书

方志诚六十三岁，在青岛一家医院做了三十多年消化科医生，前年退休。

退休以后他开始收拾书房。书架最下面一层，压着他读大学时的内科学教科书，纸已经发黄，封面掉了一角。他翻到消化性溃疡那一章，自己当年用红笔划的线还在。

书上写得很清楚：溃疡的根子是胃酸。胃酸太多，把胃和十二指肠的黏膜烧坏了。为什么胃酸多？精神紧张、饮食不规律、吸烟、性格急躁。旁边还引了一句老话，萨格勒布的医生施瓦茨 1910 年用德文写下的：“没有酸，就没有溃疡。”

他记得那时候的治法：先吃中和胃酸的药，后来有了能抑制胃酸分泌的新药，效果好得多。病人吃上几个星期，溃疡就愈合了。可是一停药，过一两年，很多人又复发。复发了再吃，再停，再复发。实在不行，就开刀，切断一部分管胃酸分泌的神经，或者切掉一部分胃。

他刚当住院医生那几年，病房里总有几个“老病号”，一年进来两三回。大家都觉得这就是溃疡的命：它是一种慢性病，跟性子急、压力大一样，改不了。

书架上第二本是他九十年代后期买的新版教科书。同一章，开头一段就变了：大多数消化性溃疡与一种叫幽门螺杆菌的细菌感染有关。治疗方案是两种抗生素加一种抑酸药，吃一两个星期，把细菌杀掉。杀干净了，绝大多数人不再复发。

两本书摆在桌上，中间隔了十几年。

方志诚记得这十几年在自己身上是怎么过来的。

九十年代初，他第一次在期刊上读到“溃疡是细菌引起的”，第一反应是不信。胃里那么酸，pH 一二，什么细菌活得下来？何况他亲手治好过那么多溃疡，靠的就是抑酸，这还能有错？

那时候科里的老同学鲁光耀比他还硬，在科室会上说：“这是把个别现象当成规律。”

可是读到的东西越来越多。有人用抗生素治溃疡，复发率一下子降了下来。他自己也试着给几个反复复发的老病号加了抗生素。一年过去，那几个人没再进病房。

他说不出自己是哪一天“想通”的。没有哪一天。是一个个病人、一篇篇文章、一次次查房，把旧的那套慢慢松动了，新的那套慢慢长进来。等他回过神来，他已经在给年轻医生讲幽门螺杆菌了，讲得理直气壮，好像从来就是这样。

鲁光耀转得更晚，可最后也转了。

这十几年，在方志诚身上不是一次决定，是一段经历。这段经历过完，显出了一个新的方医生。

这一章要讲的，就是这样的十几年。科学史上管它叫**范式转换**。

◆ 二、库恩讲的那个故事

1962 年，美国物理学家出身的科学史家托马斯·库恩出版了《科学革命的结构》。这本书篇幅不大，后来成了二十世纪被引用最多的学术著作之一，“范式”这个词也从这里走进了日常语言。

先把库恩讲的故事讲足。他看见了很多前人没看见的东西。

常规科学：在一个框子里解题

库恩说，科学的大部分时间是“常规科学”。一个学科里的人共享一套东西：基本的理论、公认的典型例题、用什么仪器、什么样的问题算好问题、什么样的答案算合格。这一整套，他叫**范式**。

在范式里工作，很像解谜题。框子已经给定了，答案也大体知道应当长什么样，科学家的本事在于把一块块拼图拼上。拼不上，通常先怪自己的手艺，不怪框子。

这个说法初听有点不敬，好像科学家只是在做填空。可是库恩是在替常规科学说话：正因为大家不必每天争论根基，才能把力气集中在细处，把测量做到极精。没有常规科学，就没有那么多精确的数据；没有那么多精确的数据，反常也就无从显出来。

反常、危机、革命

常规科学做久了，总会碰到拼不上的地方，这就是反常（上一章讲过它）。一两个反常，范式扛得住。反常多了，或者某一个反常怎么都消化不掉，学科里就开始不安：有人修修补补，有人开始怀疑根基，各种说法纷纷冒出来。库恩管这叫**危机**。

危机里如果冒出一个新的框子，能把旧框子解释不了的东西接住，一部分人就转过去。转过去的人越来越多，新框子成了新的范式。这就是**科学革命**。

格式塔转换

库恩用了一个心理学的比方。同一张图，你一会儿看成鸭子，一会儿看成兔子（这张图在第 2 章讲汉森时用过）。图上的线一根没变，你看见的东西整个变了。

他认为科学革命也是这样：革命之后，科学家面对的还是同一些仪器、同一些读数，可他们“看见”的世界变了。

库恩还引了一个心理学实验。1949 年，布鲁纳和波斯特曼让受试者快速看一张张扑克牌，其中混进几张特制的反常牌，比如红色的黑桃六。很多人起初根本不觉得有什么不对，把它看成红桃六或者黑桃六；看的时间拉长，有人开始犹豫、不

安，说不出哪里怪；再往后，大多数人才认出这是一张“红黑桃”。少数人到最后也没认出来，还变得很烦躁。

库恩说，科学家面对反常，走的也是这条路：先看不见，再不安，最后换了眼光才看得见。

不可通约，与普朗克的那句话

库恩还提出一个让很多人吃惊的说法：新旧范式之间，往往“不可通约”。意思是，两套范式里同一个词指的不是同一样东西，衡量好坏的标准也不同，没法放在同一把尺子上一条条比。

所以范式转换不全是靠论证完成的。库恩引了物理学家普朗克的一个说法。大意是：一个新的科学真理取胜，往往不是因为反对者被说服了。更常见的是反对者渐渐老去，新一代从一开始就熟悉它。这句话出自普朗克晚年的《科学自传》。

库恩对在哪里

这本书的分量，至少有四处。

第一，它把科学史从“一步步逼近真理的直线”里解放出来。科学不是一砖一瓦往上垒，中间有断裂、有推倒重来。

第二，它把科学家群体请进了科学。一个理论成不成立，不只看它和自然对不对得上，还看一群人肯不肯在它里面工作。

第三，它看见了教科书的把戏。教科书总把科学写成一路顺下来，把革命的痕迹抹得干干净净，让学生以为现在的样子就是从来的样子（第 20 章会接着谈）。方志诚的新版教科书里，就没有一个字提到旧版曾经怎么写。

第四，它替常规科学正了名。不是每天都要革命，绝大多数时候，科学就是在一个框子里耐心解题。

这些都是真的。本书后面每一步，都踩在库恩的肩上。

◆ 三、库恩停在哪里

可是库恩也在几处停下了。这几处，正好是本书要接着走的地方。

第一处：范式到底是什么，说不定

库恩书里的“范式”用得很宽。英国学者玛格丽特·马斯特曼在 1970 年前后细数过，说书里这个词至少有二十一种用法。有时指一个理论，有时指一本经典著作，有时指一套仪器用法，有时指一个学科共同体的整个世界观。

库恩自己也觉得不妥。1969 年他给书加了一篇后记，把“范式”拆成两层：一层是一个学科共享的整套东西，他改叫“学科基质”；一层是具体的典型例题，叫“范例”。

拆得有道理，可还是没回答一个问题：一套范式为什么能把一群人、一堆仪器、一摞教科书绑得那么紧？它是靠什么连在一起的？

第二处：革命为什么难，只讲了人心

库恩讲革命之难，讲的多是人：老一辈不肯转，要等他们退场；转变像宗教皈依，不全靠论证。

这些描写很传神，可是它们停在社会和心理的层面。它说不清一件事：为什么有的范式一个反常就晃，有的范式扛了几十个反常还纹丝不动？难，到底难在哪里？能不能量？

第三处：不可通约，滑向了“怎么说都行”

“不可通约”这个说法后来被很多人读成：新旧范式之间没有共同的尺子，所以谁也不比谁更好，科学只是换了一种说法。这是相对主义的读法。

库恩本人后来多次说过，他不是这个意思，他相信后来的理论在解题能力上确实更强。1969 年那篇后记里就有这层意思。可是他的框架里，缺一样能拦住相对主义的东西：新旧范式之间，到底有什么是共有的、可以拿来对账的？

第四处：格式塔转换太快了

鸭兔图是一瞬间翻过来的。可是方志诚的转变用了十几年，拉瓦锡的化学用了十五年以上才站稳。中间那些年，人们不是一会儿看鸭一会儿看兔，而是新旧东西搅在一起，有的地方已经换了，有的地方还没换。

格式塔的比方抓住了“整个换掉”这一面，漏掉了“慢慢换掉”那一段。那一段里发生了什么，库恩没有细讲。

这四处停下，不是库恩错了。它停下的地方，正好是接着要走的一步。

◆ 四、本书的说法：范式是连得很紧的一群理念符号

先把本章要常用的几个词讲清，你可能是跳着读到这里的。

理念符号：概念、假说、公式、定律，在人的理解里站稳的东西。“胃酸”“燃素”“氧”都是。**现实符号**：现实自己沉下来、不需要解释者也立在那里的痕。天平上的读数、胃镜下的一处溃疡面、培养皿上的一片菌落，在仪器和身体里都是现实符号。

对不上：心里站稳的一个说法，和眼前站稳的一个痕，两样都不肯让。**结晶**：一次对不上被平息以后，留下一个站得稳的新东西，要过三条判据：稳定、整体、独立（能离开诞生的地方被带走）。

能量账：一个东西结晶以后，有**内能**，也就是连接度，要把它拆散有多难；它周围那张网的吸引和拉扯，是**势能**；有人花力气把旧连接拆开、把新连接接上，那是**动能**。

有了这些词，本书的说法可以分四步讲。

第一步：范式是一群理念符号，连得很紧

范式，就是一群彼此高度连接的理念符号。

拿方志诚学的那套溃疡理论看。它不是一个孤零零的说法，是一群互相扣着的说法：

· 胃酸会腐蚀黏膜；

- 溃疡的人胃酸偏多；
- 精神紧张会让胃酸分泌增加；
- 抑酸药能让溃疡愈合；
- 胃里太酸，细菌活不了；
- 复发是因为病人的体质和性子没改；
- 切断迷走神经能减少胃酸，所以手术有效。

每一条都有证据。更要紧的是，它们互相撑着。抑酸药有效，撑住了“溃疡是酸造成的”；“溃疡是酸造成的”，又撑住了“压力让胃酸多，所以压力致溃疡”；“胃里没有细菌”，堵住了另一条可能的路；“复发是因为体质”，把那个最扎眼的读数解释掉了。

拆掉其中任何一条，别的几条会伸手把它拉回来。这就是连接度。

而且这群理念符号不只连着彼此。它们还连着很多现实的东西：药厂的生产线、医院的手术科室、几代教科书、医生的职称考试、病人“我这是急出来的病”的自我理解。连得越多，越难拆。

库恩说范式像一个框子。本书说，它更像一张织得很密的网，每一个结都被好几根线拉着。网是看不见的，可是你一动其中一个结，就能感到整张网在往回拽。

第二步：拆它，要的动能得超过它的连接度

一群连得很紧的理念符号，要把它熔开，就得有人付力气，把一条条连接拆开。

革命之所以难，是因为拆一个范式所要的动能，必须超过它的连接度。

这句话把库恩讲的“人心之难”放进了一本可以算的账。

一个反常，是一处落差。一处落差能积的力是有限的。范式的连接度低，一处落差就够拆；连接度高，一处落差拆不动，要好几处落差一起攒，还要有人肯花很多年的力气去拆、去接。

溃疡理论的连接度很高。所以1980年代初，两位澳大利亚医生沃伦和马歇尔提出细菌致溃疡时，一处落差远远不够。他们得把落差一处处攒起来：胃镜活检里看

到细菌，把细菌培养出来，证明杀菌后复发率大降。马歇尔甚至在 1984 年喝下了一管细菌培养液，几天后自己得了胃炎。这是他付的动能，付在自己身上。

普朗克那句话在这里也有了能量上的意思。老一辈不转，不一定是固执。在他们身上，旧范式不只是一群理念符号，它已经沉成了自我符号：几十年的手感，治好过的病人，在病房里站稳的那个“我”。拆它，等于拆自己。一个人一生的动能是有限的，到了晚年，未必还付得起拆一座自己的房子的力气。

稳定，不等于对。 燃素说在化学里站了大半个世纪，“无酸无溃疡”在医学里站了七十多年，它们都很稳。稳是一回事，对是另一回事。先问站不站得稳，再问方向对不对。

连接度能不能量

说“连接度”，不能只是一个好听的比方。它得能量，至少能比。

一个办法是看：要多少处落差、多少年的反证，一个说法才开始松动。燃素说扛着“锻灰变重”这道缝扛了几十年，说明它连得紧。一个刚提出、只连着一两个实验的新说法，往往一次失败的复做就倒了，说明它连得松。

另一个办法是数它连着什么：连着几条别的定律，几种仪器用法，几门课，几个科室，几代人的手艺。连得越多，拆起来越难。

这也给本书的说法留了一道可以被推翻的门。假如有人找到一批例子，一个范式松动的难易，和它累积的连接毫无关系。连得很紧的一碰就倒，连得很松的怎么也拆不动。那么“拆它要的动能必须超过连接度”这一条，就要修改。

第三步：熔开，是一段时间，不是一个瞬间

范式不是一下子翻过去的。它要经过一段熔开的时间。

用本套书的几个大白话词来说。

旧范式站稳的时候，是**定型（秩序）**：每个说法各有位置，彼此扣得好好的。反常攒多了，连接开始松动，有的说法掉了出来，有的说法被改得面目全非，各种新旧说法搅在一起，谁也说服不了谁，这是**一锅粥（混沌）**。然后一些新的连接开

始在某几处先接上，一块一块往外长，这是**正在成形（介生）**。最后，新的一群理念符号连到足够紧，过了三条判据，又是一个定型。

方志诚那十几年，就是这样过来的。九十年代初，他身上的旧网还在，只是有一处松了；中间几年，他一边开抑酸药，一边给个别病人加抗生素，新旧两套在他手上同时在用；后来新的一套越接越多，旧的一套退到了一角（抑酸药还在用，只是不再是根本的解释）。这不是格式塔那一下翻转，是一段有中间态的熔开与再结晶。

常规科学里，也天天在小结晶

库恩把科学分成两种时间：平常是常规科学，偶尔是革命。本书的看法稍有不同。

熔开与再结晶，不只发生在大革命里，也天天在小处发生。上一章的海王星就是一例：天王星的偏差没有拆掉牛顿力学，却让天文学家对太阳系的认识重新结晶了一次——太阳系多了一颗行星，星表全部重编。陆建平的桥也是：力学没动，模型里多了一个“支座可能脱空”的条件，他以后做每一座桥都会先去看支座。

大范式和小结晶，是同一个过程在不同尺度上。区别只在连接度：拆一个小模型的一个条件，花一夜的力气就够；拆一整个学科的根基，要一代人的力气。

这样看，常规科学和革命不是两样东西，是同一张网在小处不停地重织，偶尔在大处整片重织。

第四步：现实符号是跨过去的那本账

最后一步，回答“不可通约”带来的那个麻烦。

新旧范式的理念符号确实不一样。同一个“溃疡复发”，在旧范式里是体质和性子的证据，在新范式里是细菌没杀干净的证据。在这个意义上，库恩是对的：同一个词，在两张网里是两个符号。

可是有一样东西是两边共有的：现实符号。

胃镜下那处溃疡面，愈合了还是没愈合，它就在那里，不看谁的范式。病人一年内回没回病房，记在病历上。培养皿里长没长出那种弯弯的细菌，也在那里。这些痕不需要先认同哪一套理论才立得住。

范式之间说的话可以不通，可它们要对同一本现实符号的账。

这就是拦住“怎么说都行”的那道闸。新范式之所以能取代旧范式，不是因为它更时髦、更有权势，是因为它和那本共同的账对得更好。杀菌以后，复发率从很高降到很低，这个数两边的人都得认。

不是相对主义，还因为结晶有判据，理论有可推翻条件。一个新范式如果在共同的账上对得比旧的还差，它就站不住。

把库恩和本书的说法放在一起看：

问题	库恩的说法	本书的说法
范式是什么	一个学科共享的理论、范例、仪器与世界观，用法很宽	一群彼此高度连接的理念符号，并连着仪器、机构、教科书与人身上的手感
反常起什么作用	积累到一定程度引起危机	是一处落差，积力；站住的反常本身是一次结晶（见第 5 章）
革命为什么难	老一辈不肯转，像宗教皈依	拆范式要的动能必须超过它的连接度；旧范式在老一辈身上已沉成自我符号
转变怎样发生	像格式塔，一下翻过去	有中间态：定型→一锅粥→正在成形→再定型
新旧有没有共同尺子	不可通约，难以逐条比较	理念符号可以不通，现实符号是两边共对的那本账
怎样防相对主义	解题能力更强（后来补充）	结晶有三判据，理论有可推翻条件，对得好坏有共同的账

◆ 五、一个完整的例子：一堆红色粉末的十五年

现在走一遍科学史上最经典的一次范式转换：氧取代燃素。

燃素：一张织得很好的网

十八世纪初，德国医生、化学家施塔尔在前人贝歇尔的基础上，系统提出了燃素说。它的核心很简单：能燃烧的东西里，都含有一种叫“燃素”的成分。燃烧，就是燃素跑出去。

这个简单的说法，一口气解释了一大串现象。

- 木头烧完只剩一点灰：燃素跑了，剩下的是灰。
- 蜡烛在密闭的罐子里烧一会儿就灭：罐子里的空气吸饱了燃素，再也吸不进去了。
- 金属在空气里加热，变成一种粉末，当时叫“锻灰”：金属失去了燃素。
- 把锻灰和木炭一起加热，又变回金属：木炭富含燃素，把燃素还给了锻灰。
- 动物在密闭罐子里会憋死：呼吸也在往外排燃素，空气吸饱了就不能再用。

燃烧、冶炼、呼吸，这几样看起来毫不相干的事，被一个概念连成了一张网。冶金工匠的经验、药剂师的操作、气体化学家的实验，都能在这张网里找到位置。

这是一个很好的理念符号群。它稳定，它整体，它可以被带到任何一个化学实验室去用。按本书的眼光，它是一次实实在在的结晶，绝不是一个笑话。

一道早就在那里的缝

可是这张网里，有一道缝很早就在。

金属煅烧成锻灰，按燃素说，是失去了燃素，那应该变轻。可是十七世纪就有人称过：锻灰比原来的金属重。法国医生让·雷伊 1630 年写过锡煅烧后变重，英国的玻意耳也称过。

这道缝可以在材料里清清楚楚地指出来。理念这一头：失去了一样东西。现实这一头：天平说它变重了。

燃素说的拥护者怎么对待这道缝？有人说，燃素可能有“负重量”，跑掉了反而变重。更多的人不太在意。当时的化学关心的是物质的性质和转化，重量还不是化学家眼里最要紧的读数。

这是一道被放着的缝。它稳稳地挂在那里，像水星的四十三角秒。

拉瓦锡称重量

法国人拉瓦锡把这道缝拿起来了。

拉瓦锡是一位包税官，有钱，有一间当时欧洲最好的私人实验室，有一批极其精密的天平。他把称量放在了化学的正中央：一个反应前后，所有东西加起来的重量，应当不变。

1772 年，他做了磷和硫的燃烧实验。按他的报告，两者烧完以后都变重了，而且吸收了空气。同年 11 月 1 日，他给法国科学院交了一份密封的短笺，记下这个结果，用来证明自己在先。

这时候，他手上有一处被重新拿起来的落差：东西烧了反而变重，而且和空气有关。可是空气里到底是什么在起作用，他还说不清。

普里斯特利的“脱燃素空气”

1774 年 8 月，英国人普里斯特利用一面大凸透镜聚焦阳光，加热一种红色的粉末——汞的锻灰，也就是今天说的氧化汞。粉末放出一种气体。他把蜡烛放进去，火焰烧得异常明亮。后来他又把老鼠放进装满这种气体的罐子，老鼠活得比在普通空气里长得多。

普里斯特利是那个时代最出色的气体实验家之一。他用燃素说的语言来理解这种气体。既然蜡烛在里面烧得特别旺，说明这种空气特别“饥渴”，能吸收大量燃素，那它一定是被抽掉了燃素的空气。他把它叫作“脱燃素空气”。

这个命名在燃素说的网里完全说得通。

几乎同时，瑞典药剂师舍勒也用别的办法制得了这种气体，叫它“火空气”，他的书拖到 1777 年才出版。

1774 年 10 月，普里斯特利访问巴黎，和拉瓦锡同桌吃饭，讲了自己制备这种气体的办法。

同一堆粉末，两张网

接下来的几年，拉瓦锡反复做汞锻灰的实验，并且做得更全。他把汞在密闭容器里加热，汞变成红色锻灰。同时容器里的空气少了大约五分之一，剩下的空气不能助燃、不能供呼吸；再把红色锻灰单独加热，放出的气体正好补上那少掉的部分，汞又回来了。每一步都称重。

这是一个干净的对账。重量在天平上，空气的体积在刻度上，这些现实符号不看谁的理论。

普里斯特利读这些读数，读出的是“脱燃素空气”。拉瓦锡读同样的读数，慢慢读出了另一种东西。不是空气失去了燃素，而是空气里本来就有一种成分。金属煅烧和东西燃烧时，正是和这种成分结合，所以变重。

注意“慢慢”两个字。拉瓦锡也不是一下子就看清的。1775 年他交给科学院的报告里，起初把这种气体说成“更纯净的空气本身”，几年后才改口，说它是空气中一种特殊的组分。

1777 年前后，他给这种成分起了名字，叫“oxygène”，取希腊语“产生酸的东西”的意思，因为他认为一切酸里都含有它。这就是“氧”。

氧是哪一种命名

这里要停一下，看清“氧”是哪一种命名。

本套书把命名分成四种情形：给已能辨认的东西加新名；新的区分和新名一起帮助形成一个辨认单位；设立一个制度身份；提出一个理论对象。四种可以交织，却不能互相冒充。

“氧”首先是第四种：**一个理论对象**。普里斯特利和舍勒手里都有那瓶气体，可“氧”不只是给那瓶气体换个名字。它是一个新理论里的元素：燃烧是与它化合，煅烧是与它化合，呼吸是缓慢的与它化合。它的意思，是整张新网给的。

所以科学史上那个老问题——“氧是谁发现的”——在这里不好回答，库恩也专门讨论过它。舍勒和普里斯特利先制出了那瓶气体，拉瓦锡先把它放进了一个新

理论的位置。同一样东西，属于不同的命名情形，不能互相冒充：先拿到那瓶气体，不等于先提出了氧这个理论对象；提出了理论对象，也不等于那个理论就对。

而且“氧”这个名字里本身就带着一个错的说法。1810 年前后，英国化学家戴维证明盐酸里并没有氧，“一切酸都含氧”这一条站不住了。可是名字留了下来，它的意思被新的连接改写了。**一个名字可以活过它最初承载的那个说法**。

中文的“氧”字也有一段路。清末徐寿等人译化学书时，用过“养气”这个译名，取“养人之气”的意思，后来才造了带“气”字头的“氧”字。这是给一个已经辨认出来的东西，在另一种语言里加新名。

新网一块一块接上

一个理论对象立起来，还远不是新范式。接下来的十多年，拉瓦锡和同道一块一块地把新网接上。

1780 年代初，他和数学家拉普拉斯用一台冰量热器，比较动物呼吸和木炭燃烧放出的热量，支持“呼吸是一种缓慢的燃烧”。1783 年到 1785 年前后，他把英国人卡文迪许制得的“可燃空气”和氧结合成水，又把水分解开，证明水不是元素，是化合物。

1787 年，他和居顿·德·莫尔沃、贝托莱、富克鲁瓦合写了《化学命名法》，按组成重新给物质起名字。比如硫酸、硫酸盐、氧化物……一个物质叫什么，直接告诉你它由什么组成。这是第二种命名情形：新的区分和新名一起，帮助形成了新的辨认单位。化学家一开口说话，就已经站在新网里了。

1789 年，他出版了《化学基础论》，列出了三十三种“简单物质”。

这张表里还有一个有意思的东西：光和“热质”也被列为元素。热质是一种看不见的热的流体，后来也被抛弃了。**新范式刚定型的时候，身上也带着旧时代的东西**。再结晶不是一步到位的纯净，它也会带进下一次要熔开的杂质。

为什么偏偏是天平

这里值得多问一句：为什么是拉瓦锡，而不是普里斯特利，把这次再结晶推到了底？

一个重要的原因在仪器上。普里斯特利的强项是制气、收气、试气，他的实验桌上最要紧的是集气槽和各种玻璃器皿。拉瓦锡的强项是称量，他的实验室里最要紧的是那几台精密天平，是请巴黎最好的仪器匠定做的，在当时属于最精的一批。

仪器决定了哪一种读数被看重。在普里斯特利的桌上，一种气体最要紧的读数是：蜡烛烧得旺不旺，老鼠活得长不长。在拉瓦锡的桌上，最要紧的读数是：反应前后重了还是轻了，重多少。

“锻灰变重”这道缝，在燃素说的网里挂了几十年。它挂得住，部分是因为当时多数化学家桌上的读数，不是重量。拉瓦锡把天平搬到化学的正中央，这道缝就从边角被搬到了眼前，再也绕不过去。

这一点第三编讲仪器时还会接着说：仪器不只是读出一个早就在那里的数，它还决定了哪些对不上能被看见。

熔开的那些年

这十五年左右，化学界是一段熔开的时间。

拉瓦锡这边越接越多，燃素那边也没有坐着不动。爱尔兰化学家柯万 1787 年写了一本《论燃素》，系统为燃素说辩护。拉瓦锡和同道把它译成法文，在每一章后面附上逐条的反驳，1788 年出版。这是两张网在同一本书里正面对账。

这段时间里，各种气体有好几套名字并行。同一瓶东西，有人叫脱燃素空气，有人叫火空气，有人叫生命空气，有人叫氧。化学家们一边吵，一边做实验，一边改名字。这就是一锅粥。

然后，年轻一代化学家开始直接用新命名法学化学。新网在一块块地方先站住，再往外长。到了十八世纪九十年代，法国、德国、英国的主要化学家大多转了过去。

普里斯特利始终没转。1794 年他移居美国宾夕法尼亚，1800 年还出版过为燃素说辩护的小册子，1804 年去世。

不能把他写成一个顽固的人。他是那个时代最好的实验家之一，那瓶气体就是他亲手制出来的。他对拉瓦锡体系的一些质疑，也并不都是无理的，比如热质的说

法确实站不住。可是在他身上，燃素说已经不只是一群理念符号，它连着他几十年的实验、他给每一种气体起的名字、他在实验台前的手感。拆它，要的动能太大了。

拉瓦锡也没能看到这场转换完全结束。1794 年 5 月，他因为包税官的身份，在法国大革命中被送上断头台。

用三条判据看这次再结晶

氧化学最后站住，不是因为拉瓦锡有名、有钱，或者法国人多。它过了三条判据。

稳定：别的化学家用别的天平、别的样品做汞的煅烧与分解，重量守恒、空气少五分之一，结果都重复得出来。

整体：燃烧、煅烧、呼吸、水的组成、命名法，连成一张整的网；拆掉“氧”，这张网就散了。

独立：它离开了巴黎的实验室，被带到了全欧洲的教科书、药房、冶炼厂。后来的化学，包括后来推翻“一切酸都含氧”的戴维，都是在这张网上接着织的。

更要紧的是，它和那本共同的账对得更好。天平是两边都认的。燃素说要解释“变重”，得请出“负重量”这样只为一处缝而设的说法；氧化学不用，它的整个框子就是围着重量搭起来的。

把两张网对同一批现象的解释放在一起：

现象	燃素说的解释	氧化学的解释	天平上的读数
木头燃烧剩下灰	燃素跑掉了	木头中的成分与氧化合，生成的气体跑掉了	收集全部产物，总重量不减
蜡烛在密闭罐中熄灭	空气吸饱了燃素	罐中的氧用完了	剩余气体体积约减少五分之一
金属煅烧成锻灰	金属失去燃素	金属与氧化合	锻灰比金属重
锻灰加木炭变回金属	木炭把燃素还给锻灰	木炭夺走锻灰中的氧	生成的气体带走的重量与锻灰减重相当

现象	燃素说的解释	氧化学的解释	天平上的读数
动物在密闭罐中憋死	呼吸排出的燃素使空气饱和	呼吸消耗了氧，是缓慢的燃烧	呼吸与燃炭放热可比（冰量热器）
加热汞锻灰放出的气体	脱燃素空气	氧，一种元素	放出的气体正好补回煅烧时减少的部分

表的最后一列，是两张网共同面对的那本账。前两列可以说两种话，最后一列只有一种读数。

◆ 六、回到方医生的胃镜室

现在回到方志诚。他经历的那一次，和拉瓦锡那一次，是同一个形状。

旧网的连接度。 “无酸无溃疡”那一套，连着抑酸药、手术、教科书、医院的科室设置、病人对“急出来的病”的理解。拆它，要很大的动能。

早就在那里的缝。 胃里有弯弯的细菌，十九世纪末就有人在动物和人的胃里看到过。可是 1954 年，美国一位医生检查了一千多份胃活检标本，报告说没找到细菌。这项研究让“胃里没有细菌”在很多人心里定了型，那些零星的报告就被放着了。这又是一道挂着的缝。

有人把缝拿起来。 1979 年，澳大利亚病理科医生沃伦在胃活检切片上反复看到弯曲的细菌，而且总出现在发炎的胃黏膜上。1981 年，年轻医生马歇尔加入。

他们想把细菌培养出来，一次次失败。1982 年复活节，一批培养皿因为假期被多放了几天，菌落长出来了。这次“多放了几天”，事后看是一次偶然；可是在那之前，他们已经把对不上收窄到了“这种细菌长得慢”这一处，偶然才有地方落下。

付动能。 他们的论文一开始很难被接受，1983 年向澳大利亚消化病学会年会的投稿被退了回来。马歇尔在 1984 年喝下细菌培养液，用自己的胃做了一次对账。

共同的账。 最后说服医学界的，不是马歇尔的勇气，是数字：用抗生素把细菌杀掉的病人，溃疡复发率大幅下降。这个数，旧范式的人和新范式的人都得认。1994 年，美国国立卫生研究院的共识会议建议对溃疡病人检测并根除幽门螺杆菌。2005 年，沃伦和马歇尔获得诺贝尔生理学或医学奖。

回写。 新范式定型以后，旧的东西没有全扔掉。抑酸药还在用，而且是根除方案里的一部分；只是“胃酸是溃疡的根本原因”变成了“胃酸是溃疡形成的条件之一”。压力和溃疡的关系，后来也还有人在研究。旧网的一些结，被拆下来，接进了新网的边上。

在方志诚身上。 那十几年里，他身上的旧网，不只是书上的理念符号，还有一个自我符号：一个“靠抑酸治好过很多溃疡”的方医生。那个自我符号的连接度很高，所以他第一反应是不信。拆开它的，是一个个复发又被根治的病人，是他亲手加了抗生素的那几个老病号一年没回来。新的方医生，是在这些病人身上一点点长出来的。

鲁光耀转得晚，不是因为他笨。他手上治过的病人比方志诚还多，他身上那个旧的自我符号连得更紧。

◆ 七、放回日子里

方志诚把两本教科书都留下了，并排插在书架上。

他说，旧书不是错书。它是那个年代最好的一次结晶，帮他治好过很多人。它只是后来遇到了一本对账对得更好的书。

你身上也有这样的范式，只是不叫这个名字。

你养第一个孩子时，脑子里有一整套东西：几点该睡，哭了要不要抱，什么时候该吃辅食，打不打得骂不骂得。这一套是从父母、育儿书、亲戚、朋友圈里一点点织起来的，每一条都连着别的几条，连得很紧。

然后孩子不按这一套长。哄睡的办法对他不管用，别人家孩子吃得香的东西他一口不碰。一开始你会想：是这次没做好，再试一次。这是老办法，没错。试了几次还不行，你会开始松动：也许这一条不对。松动一条，别的几条也跟着晃。有一段时间，你什么都拿不准，听谁说的都像有道理，又都像没道理。那是一锅粥。

再往后，一些新的做法在你家里先站住了，然后连成一片，你又有了一套。这一套是你和这个孩子一起长出来的。

单位里也是。一个干了十年的工作流程，突然因为一个新系统、一个新客户、一个新规定，处处对不上。老员工最难转，不是因为他们笨，是因为那套流程已经长在他们手上了。拆那套流程，等于拆他们自己。给他们时间，给他们看一本两边都得认的账，比讲道理有用得多。

还有一样要分清：不是每一次“什么都拿不准”都是在熔开再结晶。有时候只是累了，或者被一堆互相矛盾的说法吵晕了。分辨的办法，还是看那本共同的账：孩子睡得好不好，病人回不回病房，客户续不续约。新的那一套，要在这本账上对得比旧的好，才算站住。

一个人转过一个大弯，不是哪天想通了，是那段日子过完，显出了一个新的他。

带 走 的 话

范式是一群连得很紧的理念符号；拆它要的力气得超过它的连接度，熔开再结晶要经过一锅粥，要对同一本现实的账。

小　账

库恩把范式转换关在“格式塔一翻”和“不可通约”两扇门里，革命之难只讲人心；本书打开的是：范式有连接度可算，熔开有中间态，新旧要对同一本现实符号的账。

发生被收回为发现的那一下，是教科书写“拉瓦锡发现了氧，推翻了燃素说”。这句话把那瓶先被别人制出的气体、改口的报告、十五年的一锅粥和普里斯特利的手感全抹掉了。

想 一 想

1. 你身上有没有一套“连得很紧”的想法，最近被一件事撼动了一角？松动的那一条，连着哪几条？
2. 你经历过的一次大转变，中间有没有一段“什么都拿不准”的日子？你当时是怎么熬过去的？
3. 你身边那个“最难转”的人，他身上的旧东西连着什么？你能不能给他看一本你们两个都得认的账？

◆



第　三　编

仪器：把现实变成可读的符号

导　语

第三编只做一件事：把仪器从“透明的窗户”请回画面里，看它怎样在现实里造出新的痕。

第 7 章跟着南京的天文爱好者邱雨桐，看木星旁边三个小点。伽利略 1610 年一月那几夜，列文虎克那一滴胡椒水，都要回答同一问：是看见了，还是镜筒造出来的？本章的回答是，痕、说法、一双练过的眼睛，三样站稳才算看见。

第 8 章从厦门退休挡车工黄秀兰的头晕讲起。血压计说正常，她的头说不正常。冷热和早晚，原本长在人身上；温度计和钟把它们迁进器物，再写成定义；哈里森的航海钟、铯原子的秒，都走在这条路上。

第 9 章到广东一处地下实验站。值班工程师江浩然面前亮起两道光，新同事柯蔚问：这是一个中微子吗？云室里拐错方向的白线、安德森的正电子、四公里长的尺子抖了一下，都在说：读数是三界碰头的地方。

读这一编时，请带着一个问题：一个读数，是谁的符号？

07

第 7 章

望远镜与显微镜：把看不见的变成符号

这一章的问题

邱雨桐在目镜里看见的，是四颗卫星，还是几个会换位置的小光点？仪器到底让人看见了什么？

◆ 一、木星旁边有三个小点

邱雨桐二十三岁，在南京一家设计公司做排版，周末跟着天文社跑郊外。

那台望远镜是她攒了半年工资买的，口径不大，镜筒白色，三脚架有点晃。十月的一个晚上，社里在江宁一处山坡上观测。社长聂远舟帮她把镜筒对准东南方最亮的那颗“星”，让她自己调焦。

她弯腰凑到目镜前，先是一团晃动的白光。手指轻轻拧了半圈，白光收紧了，变成一个小小的圆盘，圆盘上隐约有两道浅褐色的带子。

她屏住气。圆盘左边有两个小亮点，右边有一个，三个点几乎排成一条直线。

“社长，这是木星吧。旁边这几个点是什么？”

“你说呢？”

“卫星？”她又看了一眼，“会不会是镜片上的灰？”

聂远舟没有直接回答。他让她把望远镜轻轻推一下，让木星从视野中间挪到边上。三个小点跟着木星一起挪。

“灰会跟着镜片走，不会跟着木星走。”聂远舟说，“明天晚上你再看一次。”

第二天晚上多云，第三天才放晴。她再看时，左边只剩一个点，右边变成了三个。她在手机备忘录里画了一个小圆圈，旁边点了四个点，写上日期和时间。

回家的地铁上，她一直在想一件事。她当然知道木星有卫星，课本里写过，科普视频里看过，连名字都叫得出：木卫一、木卫二、木卫三、木卫四。可是这一晚，她看见的到底是什么？是四颗绕着木星转的卫星，还是目镜里几个会换位置的小光点？

这一问看着像抬杠，其实正是本章要讲的事。

望远镜和显微镜，给人看见了原来看不见的东西。可“看见”这两个字里，藏着三样不一样的东西：镜筒里那几个光点，脑子里“木星的卫星”这个说法，还有邱雨桐那双慢慢学会看的眼睛。本章要把这三样分开，再看它们怎样碰到一起。

◆ 二、一六一〇年一月的那几夜

先回到四百多年前。

1608 年前后，荷兰有眼镜匠做出了能把远处东西拉近的镜筒，消息很快传遍欧洲。1609 年，在帕多瓦教数学的伽利略听说了这件事，自己磨镜片，做出了一架又一架。到那年年底，他手里的镜筒大约能放大二十倍上下。

有一份记录说，1608 年秋天，一位眼镜匠向荷兰议会申请这种镜筒的专利，没批下来，因为差不多同时还有别人说自己也会做。这件小事说明，镜筒本身在当时不算稀罕，做的人不止一个。稀罕的是后来有人把它举起来，一夜一夜对着天。

他先拿它看月亮。月亮表面坑坑洼洼，明暗交界处有山的影子。这已经和当时通行的说法对不上了：天上的东西本应是完美光洁的球。

1610 年 1 月 7 日夜里，他把镜筒对准木星。木星旁边有三颗小星，两颗在东，一颗在西，几乎排成一条线，和黄道平行。他以为那是三颗恒星，只是排得巧，顺手记了下来。

第二天夜里，他又去看。三颗小星全跑到了木星西边，排得更紧。

这是第一条缝。按当时的星表，木星那几天正在“逆行”，也就是相对恒星往西挪。如果那三颗是不动的恒星，木星往西走，它们就该落到木星东边去。可是眼前它们全在西边。要么星表算错了，木星其实在往东走；要么这几颗“恒星”自己会动。

1月9日阴天。10日只剩两颗，都在东边。他猜第三颗躲到了木星背后。11日还是两颗，一颗比另一颗亮了不少。就在这一夜，他后来在书里写道，自己断定天上有三颗星在绕着木星转，就像金星、水星绕着太阳转。13日，第四颗出现了。

注意这一路是怎么走的。不是一眼看出来的。头一夜，记录里写的是“恒星”；第二夜，位置和“恒星”这个说法对不上；后面几夜，每一次数目和位置的变化，都在逼着这个说法改。他前后连着看了两个月，一夜一夜画下小星的位置。

这条缝是能在事前独立指认的。它不在后人的回忆里，在伽利略自己画的那一排排小圆点里：1月8日那张图上，三颗小星全在西侧，和“恒星”的说法放不进同一张表。

这年3月，他在威尼斯印了一本小书，叫《星际信使》。书里有几十幅木星与小星的草图，按日期排开。他把这四颗星献给托斯卡纳的美第奇家族，叫它们“美第奇星”。

◆ 三、看见了，还是镜筒造出来的

《星际信使》一出版，欧洲的学者分成了几拨。

有人兴奋，有人怀疑，还有人不肯看。

怀疑并不是愚蠢。本书要先替那些怀疑的人说几句公道话。

当时的镜片是手工磨的，玻璃里有气泡，边缘有彩色光晕，看亮星时常常拖出假影子。望远镜为什么能放大，光在镜片里怎么走，那时还没有一套像样的理论。开普勒讲透镜成像的《屈光学》要到1611年才出版。

你拿着一件自己也说不清原理的器物，说它让你看见了别人看不见的东西，凭什么让人信?

据记载，1610年4月，伽利略带着望远镜到博洛尼亚，请当地一批学者当场看木星。有个叫霍基的年轻人事后写文章说，望远镜看地面东西很好，看天上就骗人，在座的人没一个看清那几颗新星。帕多瓦的哲学教授克雷莫尼尼据说干脆不肯凑到镜筒前，说看了只会让他头晕。

这些故事后来常被当笑话讲，说老学究闭着眼睛不肯面对事实。可是放回当时，“不肯看”的背后有一个正经的问题：这几个光点，是天上的东西，还是镜筒自己生出来的？

开普勒的态度很值得记一笔。他手边一开始没有好镜筒，没亲眼看到，却在1610年4月很快写了一封长信公开支持伽利略。同年夏末，他借到一架望远镜，和几个人一起观测，各自把看到的位置画在纸上，互不商量，画完再对。对上了，他才写文章说自己确认了，文章1611年印出。

这个“各画各的、画完再对”，是一个很朴素也很硬的办法。如果光点是镜筒造的，或者是某个人眼花，几个人的图就会各不相同。几张图对上了，说明有一个东西在不同人、不同镜筒之间站得住。

1611年，罗马学院的耶稣会天文学家也用望远镜确认了木星旁的小星。再往后，伽利略自己算出了四颗星各自绕木星一圈要多少天，可以提前预报它们哪天在东、哪天在西。

到了能提前预报的这一步，那几个光点就不再只是“我在镜筒里看到的”。你今晚看，我明晚看，他在别的城市用别的镜筒看，大家都能在预报的位置上找到它们。

伽利略自己也明白，光靠一本书说服不了人。他做了一批镜筒，送到几位有权势的赞助人和学者手里，请他们自己去看。这件事的意思很朴素：别信我的话，你拿着镜筒自己对准木星。一样东西能不能离开最先看到它的人，这一步就是在试。

◆ 四、一滴胡椒水里的小东西

望远镜把远处拉近，显微镜把小东西放大。显微镜那边的故事，主角是一个布商。

列文虎克生在荷兰代尔夫特，做布匹生意。布商要看布的经纬疏密，手里常备放大镜。他后来自己磨小透镜，越磨越小，越磨越精。他的显微镜样子很怪：两块铜片夹着一粒米粒大小的玻璃珠，样品插在一根针尖上，凑到眼睛跟前看。这种单片镜据后人测，放大倍数可到两百多倍。

1674 年前后，他从湖里取了一点水来看，看见里面有许多会动的小东西。1676 年秋天，他泡了一罐胡椒水，想看看胡椒为什么辣，结果在水里看到了更小、更多的活物，一滴水里数以千计。他把这些写成长信，寄给伦敦的皇家学会。他管它们叫“小动物”（animalcules）。

伦敦那边的反应，和博洛尼亚那边差不多：有兴趣，也不太信。

一个没受过大学教育的商人，说自己在一滴水里看见了几千个活物，用的器物别人没有，磨镜片的法子他又不肯说。你是皇家学会的会员，你怎么办？

列文虎克想了个办法。他请代尔夫特几位有身份的人，有牧师，有公证人，到他家来亲眼看，再写下证词寄去伦敦。这是用人的名誉做担保。

皇家学会这边，罗伯特·胡克接手了这件事。胡克自己就是显微镜好手。他起初用自己的复式显微镜照做，没看到；后来改做单片小透镜，1677 年 11 月，在学会的会议上让会员们看到了胡椒水里的小东西。

后来的事情说明，伦敦那一关是过了。1680 年，列文虎克被选为皇家学会会员。他一辈子给学会寄了一两百封信，讲他在镜下看到的牙垢、血液、肌肉、种子。他据说做过几百架小显微镜。一个不懂拉丁文、只会写荷兰语的布商，靠这些信和镜子，成了那个时代看小东西看得最远的人。

胡克的名字值得多说几句。十二年前，也就是 1665 年，他出版了一本大书，叫《显微图谱》。书里是他在显微镜下看到的东西，一一画成精细的铜版画：跳蚤像一副披甲的怪兽，虱子攥着一根头发，针尖原来坑坑洼洼，刀刃原来像锯齿。最出名的是一片软木薄片：里面是一格一格的小空室，他管它们叫 cell。这个词来自拉丁文 cella（小房间），中文后来译作“细胞”。

这本书在伦敦卖得很好。写日记出名的佩皮斯在日记里记下，他读它一直读到凌晨两点。为什么好卖？因为大多数人一辈子都不会摸到显微镜，可是一张铜版画能被印出几百张，跟着书走进每个人的书房。

◆ 五、“仪器只是把眼睛变长了”

把这两段故事放在一起，最常见的讲法是这样的：

木星的卫星，在伽利略之前就已经绕着木星转了亿万年；胡椒水里的微生物，在列文虎克之前也早就在水里游着。仪器的作用，是把人的眼睛延长、放大，让本来就在那里的东西进入视野。那些不肯看的学者，是被成见挡住了眼睛；最后事实胜出了，因为事实本来就在那里。

这是发现学的讲法。它对在哪里，本书要先写足。

第一，它守住了一条很要紧的底线：木卫三不会因为没人看它就不转了。你不能说“伽利略之前木星没有卫星”，那是胡说。科学之所以值得信，正因为它的结论不随某个人高兴不高兴而改变。

第二，它解释了为什么不同的人用不同的镜筒，最后能看到同一样东西。如果卫星是各人心里想出来的，开普勒那几张各画各的图就对不上。

第三，它给了反对成见一件有力的武器。你凭什么不看？看了再说。这句话今天依然有用。

第四，它让科学可以积累。前人看到的，后人可以照着去看，看到的应该一样。

这四条都是真的。本书不打算推翻其中任何一条。

可是这套讲法在一个地方停下了：它把仪器当成一扇透明的窗户，好像窗户本身不在画里。

这个毛病，日常里也常见。你戴着眼镜看东西，平时根本想不起眼镜的存在，好像世界本来就是这么清楚。直到哪天镜片上沾了一点油，看什么都蒙着一层雾，你才想起来：原来一直有一样东西夹在你和世界中间。发现学看仪器，就像平常人看自己的眼镜：太好用了，好用到忘了它在。

如果望远镜只是把眼睛变长了，那博洛尼亚那一夜就不好解释。镜筒就摆在那里，木星也在天上，在座的都是读过书的人，为什么大多数人说没看见？说他们全是被成见挡住了眼睛，这话太省事了。手工镜筒视野窄，像抖动，不会调焦的人确实看不清；不知道该往哪里看、该看什么样子的人，确实会把小星当成光晕。

如果显微镜只是把眼睛变长了，那胡克第一回为什么没看到？他手里也是显微镜，看的也是胡椒水。他没看到，是因为他用的镜子、调的光、取样的法子，和列文虎克不一样。

还有更深的一层。列文虎克在水里看到的那些东西，他叫“小动物”。一百五十多年后，德国的埃伦伯格才用“细菌”这个词去叫其中一些；又过了几十年，巴斯德、科赫那一辈人才把某些细菌和某些疾病一一对上。

同一类在镜下游动的小东西，在 1676 年的信里是“小动物”，到了十九世纪八十年代科赫等人的论文里，其中一些成了某种病的“病原菌”。镜下的那个样子没怎么变，它被读成的那个东西变了好几回。

胡克的“细胞”也是这样。他看到的是死软木里空空的小格子，墙壁而已，里面什么也没有。

他给这些格子起名“小房间”，是给一个新看出来的区分配上新名字。这属于命名里的第二种情形：新区分和新名一起，帮着形成了一个能被认出来的单位。一百七十多年后，施莱登和施旺提出动植物都由细胞构成，“细胞”才成了一个理论对象，属于命名的第四种情形。同一个词，前后是两种命名，不能互相冒充：胡克起的名字，不等于胡克提出了细胞学说。

发现学的讲法，把这几百年的周折压成了一句“人看到了本来就在的东西”。这句话没错，只是太短了。它把“看见”当成一下子的事，而“看见”其实是一段很长的路。

◆ 六、仪器造出了新的痕

本书换一个讲法。先说清两个工作词。

第一个是“对不上”。手里已经站稳的说法，和眼前已经站稳的东西放不到一起，这一下就叫对不上。伽利略 1 月 8 日那张图就是一次对不上：“恒星”的说法放不下西边那三颗星。本书认为，新的解释都从这样的一下开始，对得上的地方没人去解释。

第二个是“结晶”。一个说法或一样东西，经过来回折腾，最后稳下来了，本书叫它结晶。结晶有三条判据：稳定，能反复出现，不会一碰就散；整体，拆开就不是它了；独立，能离开出生的地方，被带到别处去。

有了这两个词，再看望远镜和显微镜在做什么。

仪器做的第一件事，是在现实里造出一道新的痕。

本书把符号分成三界。第一界是现实符号：现实自己沉下来、不需要谁来解释也立得住的痕，比如脚踩出来的小路、水冲出来的河床、愈合留下的伤疤。第二界是理念符号：概念、说法、公式。第三界是自我符号：沉在一个人身上的习惯、手艺、眼光。

没有望远镜的时候，木卫三在天上转，可它在人间没有留下任何痕。它太暗，人眼收不到。望远镜做了一件事：把木星附近的一小片光聚起来，在目镜后面造出几个稳定的小光点。今晚有，明晚还有；位置会变，变得有规律；谁拿合格的镜筒对准，都能在差不多的地方找到。

这几个光点，就是一个新的现实符号。用三判据一筛：它稳定，一夜一夜都在；它整体，四颗小星和木星是一组，单拎一颗出来看不出名堂；它独立，不跟着伽利略一个人走，换一架镜筒、换一座城市照样出现。

到了十九世纪，又多了一种记录办法：照相底片。望远镜后面不再只接一只眼睛，而是接一块涂了感光药膜的玻璃板。星光在板上留下一个个小黑点，冲洗出来，就固定住了。

这一步很要紧。眼睛看到的光点，一闭眼就没了，要靠手画下来才能带走；手画难免带上画的人的习惯。

底片上的黑点不一样：它是光自己在药膜上留下的痕，没有人去读，它也在那里。哈佛天文台积攒了几十万块这样的玻璃底片。二十世纪初，在那里做计算工作的勒维特一块一块比对底片上恒星的亮暗，整理出了一类变星的亮度和周期之间的规律。后来的天文学家又把一百年前的旧底片翻出来重读，找到当年没人注意过的变化。

一块底片放了一百年，还能被重读，还能逼出新说法。这就是现实符号的“独立”：它不靠当年拍它的那个人，也不靠当年那一套说法。

还要多说一句，防止把话说过头。本书说“光点是现实符号”，不是说木星在对人说话，也不是说星星在“表达”什么。现实符号指的只是一道痕：在这里，是光经过镜片之后，在一个固定位置上、按固定规律、一再落下的那几个亮点。它像小路一样，没人去读它也在那里。等它被画进《星际信使》，被印成铜版，被开普勒那几个人各画一张拿来比对，它就跟着纸张走得更远了。

仪器做的第二件事，是逼出一个新的理念符号。

光点在那里，不等于“木星的卫星”这个说法就在那里。1月7日伽利略看着光点，脑子里给它们的名字是“恒星”。从“恒星”到“绕木星转的星”，中间隔着一周的对不上。新说法是被光点一夜一夜逼出来的，不是镜筒自己吐出来的。

本书把这条关系写成一个式子：理念符号是现实符号和自我符号的函数。现实这边站稳了一样东西，人身上原有的那套看法接不住，“这是什么”就被逼出来；来回折腾，最后结晶成一个新说法。“木星的卫星”就是这样结晶的。

开普勒后来给这类绕着行星转的小天体起了个总名，拉丁文叫satellites，原意是“随从”。这又是一次命名：先有了能反复辨认的单位，再给它配一个类名，属于第一种情形。

仪器做的第三件事，是要求一种新的自我符号。

博洛尼亚那一夜说明了一件事：光点在那里，说法也在那里，可是看不见的人还是看不见。看见它，要一双练过的眼睛。

伽利略那几个月一夜一夜地看，学会了怎么握稳镜筒、怎么等大气平静的那一瞬、怎么分辨真星和光晕。这些本事沉在他身上，不用想就会，换个人一时学不来。本书把这种东西叫自我符号：付过代价、沉在一个人身上、稳定可用的习惯和眼光。

列文虎克更极端。他的玻璃珠怎么磨、样品怎么照光，他到死都没教给别人。他身上那套手艺，是一个结实的自我符号，可它不肯离开他。结果是什么？据说他死后很长一段时间，别人很难看到他看到过的那些东西。现实里的痕和脑子里的说法都还在，缺了能读它的那双手和那双眼，“看见”就断了线。

这是一个很好的旁证：三界缺一，看见就立不住。光点（现实）、说法（理念）、眼光（自我）三样，要同时站稳，“木星有卫星”才算结晶。

仪器本身，也是一个现实符号。

还要往回退一步看。望远镜这件器物，是怎么来的？

伽利略想看得更远，这是一个说法，在理念那一端；他手里有的，是眼镜匠的磨镜手艺、几块不太好的玻璃、一双越磨越熟的手，这在自我那一端。想法和手艺

对不上：想看二十倍，手里的镜片只能做到三四倍。这一下对不上，逼着他去改世界：换玻璃、改镜筒长度、加光阑挡住边缘的彩晕。改出来的那根镜筒，从此立在那里，谁拿起来都能用。

本书把这条关系也写成一个式子：现实符号是理念符号和自我符号的函数。想法和身体对不上，人就去改世界，开路、造器、立碑。望远镜和列文虎克的玻璃珠，都是这样被逼出来的器物。器物先是对不上的产物，然后又去造出新的痕，逼出新的对不上。三个角轮着转，没有哪一个是起点。

三样东西的发生，都要付能量。

本书把符号发生的能量分成三种，借物理的三个词来说。动能，是来回折腾、拆了重接的那股劲；势能，是周围那张网把新东西往哪边拉；内能，是结晶以后那种拆不散的结实，也就是连接度。

伽利略几十个夜晚守在镜筒边，列文虎克几十年磨玻璃珠，开普勒几个人各画各的图，这是动能。

哥白尼学说那几十年在欧洲掀起的争论，是一张拉扯着所有人的网。木星有卫星一出来，就被这张网猛地拉了一把：原来不是所有天体都绕地球转。这给哥白尼那边添了一份分量。皇家学会那张通信网，把代尔夫特一个布商的信拉到伦敦，这是势能。

今天你在任何一本天文书里都能读到木卫一到木卫四，天文社的新人第一次看木星都会被提醒找它们，它稳得拆不散，这是内能。

◆ 七、光点反过来改了尺子

一个新的现实符号站稳以后，不会老老实实待在原地。它会反过来改写别的东西。本书把这叫回写：新结晶的东西，回头改写了它出生时的条件。

先看名字。伽利略管四颗星叫“美第奇星”，那是献给赞助人的名字。差不多同时，德国天文学家马里乌斯说自己在 1609 年底也看到了这几颗星。他还给它们各起了一个名字：伊奥、欧罗巴、伽尼墨得、卡利斯托，都是希腊神话里宙斯身边的人物。两人之间为谁先看到吵过一阵。

“美第奇星”这个名字后来没人用了，马里乌斯起的四个名字在二十世纪成了通用名。这是命名里的第一种情形：东西已经能被稳定辨认了，再给它加名字。名字可以换，可以争，可以过时；光点不跟着名字走。这正好说明，名字是理念那一端的事，镜筒里那道痕是现实那一端的事，两样不能互相顶替。

再看一件更有意思的事。

木卫一绕木星一圈不到两天，每一圈都会钻进木星的影子里一次，忽然暗下去。这个“食”的时刻很准，可以排成时刻表。十七世纪的人很快想到一个用处：海上和陆地上测经度，要知道“此刻是某个标准地点的几点”，而木卫一的食，就是天上一只人人能看的钟。意大利出身、后来主持巴黎天文台的卡西尼，据此编过详细的木卫时刻表。

到了 1670 年代，在巴黎天文台工作的丹麦人罗默注意到一件事：木卫一的食，有时比表上早，有时比表上晚，前后能差出十几二十分钟。而且早晚很有规律：地球离木星近的那几个月，食来得早；离得远的那几个月，食来得晚。

这又是一条能在事前指认的缝。时刻表是按“木卫一绕得很匀”排的，观测记录和它对不上，而且对不上的方式跟地球和木星的距离一起变。

罗默给出的解释是：光从木星跑到地球要花时间，地球离得远，光走得久，地球上看到的食就晚。他据此预报过某一次食会比表上晚十分钟左右，据说后来真的晚了。在这之前，光是不是一下子就到，学者们一直在争。1676 年，就是列文虎克泡胡椒水的同一年，“光要走一段时间”有了第一份像样的观测依据。

你看这一圈是怎么转的。1610 年，光点逼出了“木星有卫星”；几十年后，卫星的规律被排成时刻表，成了一把尺子；再后来，尺子和读数对不上，逼出了“光速是有限的”。一个新的现实符号站稳了，它就成了一块新的试金石，去试别的说法。

显微镜那边也一样。细胞一旦被看成生物的基本单位，人们就开始按细胞去设计更好的镜头、更好的染色法，去看细胞里面还有什么。染色法又造出了新的痕。细胞核在染色以后看得格外分明；染色体更是先被染料“刻”出来才被人看清的，它的名字就是“染了色的小体”。仪器造痕，痕逼出说法，说法又回头去改仪器。这个圈一直在转，转到今天的电子显微镜、空间望远镜。

◆ 八、稳下来的，不一定对

讲到这里，要防一种误会：好像只要几个人都看到、都画得一样，就一定是真的。

不是。稳定不等于对。

十九世纪末，意大利天文学家斯基亚帕雷利在火星上画出了许多细长的线条，叫 canali，意思是“水道”。传到英语里，被读成了“运河”。美国的洛厄尔在亚利桑那建了一座天文台，专门看火星，画出了上百条“运河”，还写书说那是火星人修的灌溉工程。

这些线条在相当一段时间里是“稳定”的。好几个观测者都画出了线，洛厄尔每年画的大致对得上。照“几个人都看到”的标准，它好像过了关。

可是它没有过另外几道关。用更大口径的望远镜看，线条反而碎成了斑点；照相底片拍不出那些清晰的直线；1965 年水手 4 号飞过火星拍回照片，没有运河。

问题出在哪里？出在那几条线主要不是火星自己在镜筒里留下的痕，而是人眼在极限分辨率下，把零散斑点连成线的老习惯，加上“运河”这个说法一路推着往下画。它稳定，是因为眼睛的习惯和说法互相撑着；它站不住，是因为一换仪器、一换记录法，现实那一端就接不上了。

这个例子正好说明，本书的讲法不是“怎么读都行”。一次看见要过的关是硬的：换镜筒还在不在？换记录方式还在不在？能不能提前预报？木星的四颗卫星一关一关都过了，火星的运河一关一关都没过。一个是结晶，一个是靠习惯和说法撑起来的、看起来很稳的东西。

显微镜这边也有一段相似的往事。列文虎克在 1677 年前后看到了精液里游动的小东西。那时生物学界正在争一个问题：一个新生命，是事先缩小了藏在卵里，还是藏在精子里。有人相信后一种，十七世纪末就有人画出了一幅很出名的图：精子的头里蜷着一个缩小的小人。

那个小人，镜下从来没有。它是“生命预先成形”这个说法，借着一个模糊的镜像，画进了图里。图印出来了，流传了，看起来很稳。可是它和火星运河一样，换一架更好的显微镜就找不到了。

把木卫、运河、小人三件事放在一起，可以列出一次看见要过的几道关。

第一关，换仪器。换一架镜筒、换一种镜片、换一个国家做的显微镜，痕还在不在？

第二关，换记录。从眼睛换成手画，从手画换成底片，从底片换成今天的电子传感器，痕还在不在？

第三关，换人。不信这个说法的人来看，痕还在不在？开普勒那几张各画各的图，就是在过这一关。

第四关，能不能事先说中。不是看到以后说“果然如此”，而是看之前就写下“明晚它会在西边第二个位置”，到时候去看。

四关全过的，本书才说它是一次站稳的结晶。

这里要把两件事分开。换仪器、换记录，问的主要是痕在不在：镜筒里那几个光点，是不是现实自己一再落下的。换人、事先说中，问的主要是读法站不站得住：把光点读成“绕木星转的卫星”，经不经得起不信的人来看、经不经得起明晚的天空。痕在，读法也站住，才算结晶。

过不了的，不管多少人画过、多少本书印过，都只是习惯和说法互相撑着的东西。这几道关，伽利略那一代人并没有写成条文，可是他们在一次次争论里，实际上已经在用了。

再看一个反过来的例子。1610 年伽利略也拿望远镜看了土星。他的镜筒太小，土星看上去像一个大球两边各贴着一个小球，他就记成“三体”。过了两年，两边的小球不见了；再过几年，又冒出来，形状像两只耳朵。

这一回是现实那一端很稳，说法那一端一直对不上。土星的样子一年一年在变，“三个球”放不下，“两只耳朵”也放不下。直到 1650 年代，惠更斯用更好的镜筒、换了一个说法：土星外面套着一个又薄又平的环，环的倾角随土星绕太阳的位置改变，侧对地球时就看不见了。说法一换，几十年的怪样子都放进去了。

一个是说法撑着假痕，一个是真痕逼着说法换。两件事放在一起，就能看清本书说的那个三角是怎么转的。

问题	发现学的讲法	本书的讲法
仪器是什么	透明的窗户，把眼睛变长	在现实里造出新痕的器官
木星旁的光点	卫星本来就在，人终于看到了	新的现实符号；卫星绕木星转是另一回事，两者都不假
“木星的卫星”这个说法	看到即知道	被一周的对不上逼出来的理念符号
博洛尼亚那些没看见的人	被成见挡住了眼睛	缺一双练过的眼睛，也缺一个能接住光点的说法
列文虎克死后无人能复看	偶然的技术失传	自我符号不肯离身，三界缺了一角
火星运河	观测错误，后来被纠正	习惯和说法互相撑出的稳定，一换仪器就接不上现实
胡克的“细胞”	发现了细胞	先是给新区分配名（第二种命名），后来才成理论对象（第四种）

◆ 九、邱雨桐的观测本

回到邱雨桐。

那次之后，她买了一本硬皮小本子，每次看木星都画一张：中间一个圆，旁边几个点，标上东西方向、日期、几点几分。聂远舟教她一个规矩：先画，再查。不要先打开手机上的星图软件，看完人家算好的位置再去目镜里“找”。

她一开始不理解。软件那么准，先看软件再看镜筒，不是更省事？

聂远舟说：“你先看软件，你就只能看到软件告诉你的东西。”

这句话她后来想了很久。软件里的位置是别人算好的，算的人用的是几百年积累下来的轨道数据，那是一个早已结晶的说法。你先看了它，再去目镜里找，你的眼睛就只是在核对。核对得上，你心里说一声“对了”，什么也没留下；核对不上，你多半会以为是自己看错了，而不是去追那个多出来的点。

先画再查，是把顺序倒过来：先让镜筒里的痕和自己的眼睛碰一碰，留下一张自己的图；再拿别人的说法来对。这样，一旦对不上，那条缝是你自己的，不是软件替你填平的。

十一月里有一晚，她画了五个点。四个点在一条线上，第五个点稍微偏上一点。她画完打开软件，软件上只有四颗卫星。

她愣了一下。这是她自己的第一条缝：本子上的图和软件给的预报对不上。

她回去再看。第五个点不在那条线上，亮度也不太一样。她把望远镜推一推，五个点一起挪；第二天晚上再看，那个偏上的点留在原地，木星和四颗卫星已经往旁边走了一小段。

是一颗背景恒星。木星那几天正好从它旁边经过。

这件小事，伽利略那几夜里的东西一样不少。

现实那一端：目镜里五个光点，一夜一夜可以复看，换一晚还在原位的那个和跟着木星走的那四个，分成了两组。这是镜筒里站稳的痕。

理念那一端：她原有的说法是“木星旁边的点都是卫星”。这个说法和第五个点对不上。对不上之后，她的说法改成了“木星旁边的点，跟着木星走的才是卫星，留在原地的是背景星”。这句话从此站稳了，她以后带新人时一开口就是这句。

自我那一端：她的眼睛变了。从那以后，她看木星不再只是数点，她会下意识地看一眼哪个点不在那条线上。这个本事是用十几个冷夜换来的，现在不用想就会。

能量也一样不少。动能，是那十几个晚上在山坡上冻手冻脚，是一页一页画；势能，是天文社这个小圈子，有人教她“先画再查”，有人在群里接她的问题；内能，是那句话和那双眼睛从此拆不散了。

还有一处要说清楚。邱雨桐的“对不上”不是她事后编出来的。它就在本子上：那一页画着五个点，旁边用铅笔写着“？”，下一页写着“第五个不动，背景星”。缝在哪里，一翻本子就能指出来。

那年冬天，她在图书馆借到一本《星际信使》的中译本，翻到后面那几十幅木星草图。一个圆圈，旁边几颗星，下面写着日期。她把自己的硬皮本摊在旁边，一页一页对着看。

画法几乎一样。四百多年前那个人，也是一夜一夜画圈、点点、记时刻。她忽然明白了社长那句“先画，再查”是什么意思：伽利略那几夜，手边没有任何软件可查。他只有镜筒里的光点和自己手里的笔。说法是从这两样东西的碰撞里一点一点长出来的。

到了第二年春天，社里来了几个大学新生。邱雨桐带他们看木星。有个男生凑到目镜前，说：“我看见木卫一了。”

她笑了一下，问他：“你看见的是一个光点。你怎么知道它是木卫一？”

男生答不上来。她没有解释，只把那本硬皮小本子递给了他。

男生后来也买了一本硬皮本。几个月后，他在群里发了一张照片：本子上一个圆，五个点，旁边一个问号。邱雨桐看着那个问号，没回话，只给他点了个赞。

◆ 十、放回日子里

你可能这辈子都不会摸望远镜，可是你天天在用别的“镜筒”。

去医院做 B 超，屏幕上一片灰白的雪花里，医生指着一处说“这是胎心”。那片明暗，是超声波在身体里反射回来、被仪器排成图像的一道痕。它是现实那一端的东西。“胎心”这个说法，是理念那一端的。医生一眼就能在雪花里找到它，是他练了很多年的眼睛，是自我那一端的。你看不出来，不是因为你笨，是因为你身上还没长出那双眼睛。

手机拍月亮也是一样。有的手机拍出来的月亮细节清清楚楚，坑都看得见；有人发现，这些细节并不全是镜头收进来的光，有一部分是软件按“月亮应该长这样”补上去的。2023 年就有人用模糊的月亮图做试验，揭出过这件事。

这时候，照片里那道痕，一半是现实留下的，一半是理念画上去的。你看着它觉得很稳，可是稳不等于对。要想知道哪一部分是月亮自己留下的，就得问那几道硬关：换一台不做补画的相机，还在不在？

看病时拍的片子也一样。今天有些医院用软件帮忙读片，软件会在片子上圈出一块，标一个“疑似结节”。那个圈是谁画的？片子上的明暗，是射线穿过身体留下的痕；圈和那四个字，是一套说法借着软件写上去的。好的医生会把圈拿掉再看一遍，也会让你过几个月再拍一次，看那块阴影还在不在、变没变。这就是在过“换时间、换人”那几道关。

还有体检报告上的一排箭头，体重秤上的一个数，智能手表半夜记下的一段心率。它们都是仪器在现实里造出来的痕。痕本身不会骗你，可它被读成什么，要看那一端的说法和你身上那双眼睛。

下次你凑到任何一个“镜筒”前面，不妨分三步问自己：

这里留下的痕是什么？换个仪器还在不在？

我脑子里给它起的那个名字，是从哪里来的？它和眼前的东西对得上吗？

我能看出来，靠的是谁练出来的眼睛？是我自己的，还是借来的？

带 走 的 话

仪器在现实里造出新痕，痕逼出新说法，说法要一双练过的眼睛接住，三样站稳才算看见。

小　账

发现学把仪器当成透明的窗户，关上了“看见是怎样发生的”这扇门；本书把仪器放回画里，打开了现实痕、理念说法、自我眼光三样一起结晶的门。

“伽利略看到了本来就在的卫星”这一句，把一周的对不上、一年的争论、一双练过的眼睛，收成了一下子的“看到”。

想 一 想

1. 你最近一次通过某个仪器“看见”了什么（一张片子、一个读数、一张照片）？那里面哪一部分是现实留下的痕，哪一部分是别人给你的说法？
2. 你有没有一双别人没有的“眼睛”？它是怎么练出来的？花了多少个晚上？
3. 你有没有过“先看了答案再去找，结果只找到答案说的东西”的经历？如果先看再查，会不会不一样？

◆

08

第 8 章

温度计与钟：把感觉变成数字

> **这一章的问题**
>
> 黄秀兰头晕，血压计却说正常，那个数和她身上的感觉，到底该听谁的？冷热和早晚，又是怎样变成数字的？

◆ 一、两个小本子，一种头晕

黄秀兰六十七岁，住在厦门湖里区一栋老楼的五层。她在纺织厂做了三十年挡车工，退休快十五年了。

她每天早上做的第一件事，是量血压。第二件事，是量体温。量完，她把两个数抄在一个蓝皮小本子上：日期，高压，低压，心跳，体温。本子已经记满了四本，用橡皮筋捆在抽屉里。

血压计是外孙黄一凡去年给她买的，电子的，套在手腕上，按一下，嗡嗡地充气，几秒钟后屏幕上跳出三个数。体温计也是他买的，额温枪，对着额头一按，“嘀”一声。

她原先不用这些。年轻时在车间里，冷了热了，她用手背贴一下额头就知道。家里谁发烧，她摸一摸后脖子，就能说出“有点烧”还是“烧得厉害”。孩子半夜发烧时大人那种慌张，前言里林晓雯那一夜已经讲过，这里不再重复。黄秀兰那一辈人，靠的是手。

这天早上，她醒来就觉得头有点晕，后脑勺发紧。她心里先下了判断：血压高了。

套上血压计，按下去。屏幕上跳出来的是 128 和 79。

她盯着那两个数看了半天。不高啊。可是头明明是晕的。

她又量了一次，换成左手，126 和 80。

她打电话给黄一凡：“你这个机器是不是坏了？我头晕得很，它说我正常。”

黄一凡在电话那头笑：“外婆，机器没坏。正常就是正常嘛。”

“那我的头晕算什么？”

黄一凡一时答不上来。

这一问，比看上去要深。血压计上的那个数，是谁的符号？黄秀兰后脑勺那一阵发紧，又是谁的符号？两样对不上的时候，该听谁的？

本书把这种情形叫“对不上”：一个已经站稳的东西，和另一个已经站稳的东西，放不到一起。本书认为，新的说法、新的尺子，都是从这样的一下里被逼出来的；对得上的地方，没人去追问。

本章要讲的，是冷热、早晚这些本来长在身上的感觉，怎样一步步离开身体。它们先变成玻璃管里的一道水银柱、钟面上的一格刻度，再变成书本里的一个定义。还要讲：这一路并不是一级一级往上走的台阶，而是三种东西来回走动。黄秀兰的头晕和血压计的数，到最后还得重新碰一碰。

◆ 二、冷热原来长在身上

先讲冷热。

在温度计出现之前，冷和热是什么？是身上的感觉。手伸进河里，凉；靠近灶台，烫；三伏天一身汗，热；数九天手脚僵，冷。

这种感觉很稳。同一个人，冬天摸铁栏杆总觉得冰，夏天摸总觉得烫。一个老挡车工，摸一摸车间里的棉纱，就知道今天空气是干是潮，纱会不会断。黄秀兰年轻时就有这个本事，她说：“纱发脆，就是天干，要赶紧喷水。”

本书把这种东西叫自我符号：付过代价、沉在一个人身上、稳定可用的感觉、习惯和手艺。它不用想就会，不随一次感觉散掉。

可是自我符号有一个短处：它不肯离开身体。

英国哲学家洛克在《人类理解论》（1690）第二卷里讲过一个小实验，至今常被拿来讲。准备三盆水：一盆热，一盆冷，一盆温。左手泡进热水，右手泡进冷水，泡一会儿，再把两只手同时放进温水里。左手觉得这盆水凉，右手觉得这盆水暖。

同一盆水，两只手说出两样话。

你在日子里也遇到过。冬天从外面进屋，觉得屋里暖烘烘的；家里人一直坐在屋里，说“冷死了，暖气怎么还不来”。同一间屋，两个人两样冷热。

时间那一边也有一个相似的例子。老中医号脉，讲“迟”“数”：脉跳得慢叫迟，跳得快叫数。快慢怎么定？靠医生自己的一呼一吸，一息之间脉跳几下，古书以一息四至为平。尺子是医生自己的呼吸，练得极熟，可它长在医生身上。

十七世纪初，帕多瓦的医生桑托里奥做过一种用摆来比较脉搏快慢的小器具，叫“脉搏计”：把摆绳调到和脉搏一样快，读绳子的长度。脉的快慢，第一次有了一道离开医生呼吸的痕。

用三判据一筛就看清了。所谓结晶，是一个东西经过来回折腾，最后稳下来、立住了。三判据是本书判断它有没有结晶的三条标准：稳定，能反复出现；整体，拆开就不是它；独立，能离开出生的地方，被带去别处。

手上的冷热，对一个人来说相当稳定，也自成一体，可它不独立。它离不开这只手、这个人、这一刻手刚从哪里来。你没法把你手上的“有点凉”装进信封寄给远方的人，让他照着去调炉火。

古人当然知道冷热有程度。罗马帝国时代的希腊医生盖伦，把药物的热与寒各分成四“度”；中医讲寒热，也细分表里虚实，几千年积累下极丰富的辨证经验。这些分法在各自的传统里有它的用处和道理，本书不评判它们。

这里只指出一件事：这些“度”，主要靠医生的手和眼、病人的口述来定，它们是练出来的眼光，是理念和自我两样东西合在一起。它们还缺一样：一道离开人也立得住的痕。

◆ 三、一根玻璃管里的水柱

那道痕，是从一根玻璃管开始的。

十六世纪末，意大利已经有人做出一种器物：一个玻璃球连着一根细管，管口倒插在一碗水里。球里的空气受热膨胀，管里的水柱就往下退；空气遇冷收缩，水柱就往上爬。后人叫它“测温器”，伽利略和他的朋友们都摆弄过。前面提到的那位桑托里奥，把它改成能含在嘴里或握在手里的样子，用来比较病人身上的热。

这是一件很要紧的事。从这一刻起，冷热在人的身体之外，第一次有了一道看得见的痕：水柱停在管子的某个高度。

这道痕和手上的感觉不一样。它不管你的手刚从哪盆水里出来，它只跟着球里的空气走。你看是那个高度，我看也是那个高度。它可以被很多人同时看，可以被记下来，可以拿来比较今天和昨天。

可是问题很快就来了。

这种敞口的测温器，水柱不光跟着冷热动，还跟着天气动。那时候的人还不知道大气压会变。同一间屋，同样的冷热，今天和明天水柱的高度却可能不一样。

这就是一条能在事前指认的缝：水柱的高度，和身上感觉到的冷热、和“温度一样水柱就一样”这个想法，有时候对不上。这条缝后来逼出了两样东西：一样是“空气有重量、气压会变”的说法，托里拆利 1643 年前后用一根装满水银的玻璃管把它显了出来；一样是把玻璃管两头封死的温度计。

到十七世纪中叶，托斯卡纳大公斐迪南二世和佛罗伦萨一帮学者做出了封口的酒精温度计，管子上用一个个小点做刻度。水柱不再受天气摆布了。

可是新的缝又出现了。每个工匠刻的刻度不一样，佛罗伦萨的“二十度”和伦敦的“二十度”不是一回事。每一根温度计都说着自己的方言。你在佛罗伦萨记下的读数，到了巴黎没人看得懂。

一道痕立住了，却走不远。用三判据说，它有了稳定，还缺独立。

◆ 四、两个固定点，一场争论

要让读数走得远，得有一把大家都认的尺子。一把尺子，至少要两个大家都能重复找到的点，中间再分格。这就是“固定点”。

十八世纪前后，好几位做仪器的人各自找了一套固定点。

华伦海特生在但泽，后来在阿姆斯特丹做仪器。他做出了很好用的水银温度计，1724 年发表了他的温标。他把冰、水和一种盐混在一起，得到的那个最冷的温度定为零度；把冰水混合定为 32 度；把健康人的体温定在 96 度左右。后来人们把水沸腾的温度定在 212 度。今天美国天气预报说的“华氏度”，就是从这里来的。

华伦海特在当时出名，还有一个原因：他做的温度计彼此之间读数很一致。你买他两根，放在同一盆水里，两根说的是同一个数。这在当时很难得。他对自己的做法守得很紧，多年不肯外传。这和第 7 章里列文虎克不肯教人磨镜片，是同一种处境：一门手艺结实地沉在一个人身上，读数就很难真正离开他。

瑞典乌普萨拉的天文学家摄尔修斯在 1742 年提出了另一套：水的冰点和沸点之间分成一百格。有意思的是，他原先定的是沸点为零、冰点为一百，和今天正好倒过来。到他 1744 年去世前后，这把尺子才被翻了个身。翻它的人，常见的说法是植物学家林奈，也有记载提到别的人，史家说法不一。今天你说“三十七度”，用的就是这一套翻过身的摄氏温标。

法国的列奥米尔在 1730 年还提出过一套八十分度的温标，在欧洲用了很久。

到这里，好像只是“选哪套方言当普通话”的问题。可是事情没有这么简单。科学哲学家张夏硕写过一本书，英文名 Inventing Temperature（2004），可译作《发明温度》，把这段历史里藏着的难处一层层剥了出来。本书在这里转述它的几处大意。

第一处难处：固定点并不固定。

“水在沸腾时温度不变”，听上去是一句大白话。可是十八、十九世纪的人认真去测，发现水的沸点会随着容器、水里溶了多少空气、是不是有杂质而变；在很光滑的玻璃杯里，水可以烧到比“沸点”更高才突然翻滚起来。大家拿来当尺子起点的那个“点”，自己会晃。

第二处难处：管子里的液体，涨得匀不匀？

一根温度计在冰点和沸点之间分一百格，默认里面的液体每升高一度涨得一样多。可是酒精和水银，在两个固定点上对齐了，中间的读数却对不上：水银说五十度的时候，酒精温度计说的并不是五十度。那么谁涨得匀？要回答这个问题，你得先有一把准的温度计去量它们；可是准的温度计，正是你想造的东西。

张夏硕把这种处境叫做测量里的循环：要定义温度，先得有可靠的测温物质；要判断哪种物质可靠，又得先知道温度。

第三处，是人怎样从这个循环里走出来。

据张夏硕的讲述，十九世纪法国物理学家勒尼奥做了大量细致的比较。他用的标准不是“哪一种液体符合某个理论”，而是“同一种测温器做出好多根，彼此之间读数是不是一致”〔转述〕。空气温度计在这一项上表现最好，于是被选作标准。张夏硕把这种做法叫“认识的迭代”：不靠一块绝对坚实的地基，靠一轮一轮的相互校正，把尺子越磨越准〔转述大意〕。

这本书对在哪里，本书要写足。

第一，它把“温度”这个看起来最不成问题的东西，重新变成了问题。课本里一句“摄氏温标以冰点为零度、沸点为一百度”，背后是两百年的争论、无数次失败的测量。它让你看见了结论背后的路。

第二，它没有走向“怎么定都行”。勒尼奥的选择不是随便拍板，是一次次比较读数之后选出来的；迭代有方向，尺子越来越准。这和本书的立场是一致的：发生不等于随便。

第三，它把一个哲学难题，落到了一根根玻璃管、一次次具体的读数上。

它停下的地方，正好是本书要接着走的一步。张夏硕关心的主要是测量怎样得到辩护、怎样一步步变得可靠，是认识论的问题。本书想多问两句：每一轮迭代是从哪里起的？又是什么在推它往前走？

翻回那段历史，每一轮都起于一条能指认的缝：敞口测温器读数跟着天气晃，是一条；各地刻度说方言，是一条；沸点在不同杯子里不一样，是一条；酒精和水银在中间对不上，又是一条。每一条缝都要人付出大量的劳动去补，烧坏无数根玻

璃管，熬无数个夜。缝在前，劳动在中间，一把更好的尺子在后面结晶。这正是本书说的符号发生的样子。

◆ 五、从玻璃管到定义

到了十九世纪中叶，温度又换了一种身份。

1848 年，英国物理学家威廉·汤姆孙，也就是后来的开尔文勋爵，提出了一种“绝对温标”。它不靠任何一种液体或气体，而是靠热机理论来定义：温度是什么，由热怎样变成功的那套关系来规定。在这套温标里，有一个谁也越不过去的最低点，叫绝对零度。

这一步很有意思。温度从管子里的一道痕，变成了理论里的一个量。它不再说“水银涨到哪里”，它说“这个系统在热力学关系里处于什么位置”。本书把这样的东西叫理念符号：概念、定义、公式。

再往后，温度的单位开尔文，2019 年改用一个自然常数，也就是玻尔兹曼常数来定义。这和米、千克的重新定义是同一次改革，第 12 章会细讲，这里只点一句。

把这条路摆出来，冷热走过了三种身份：

先是自我符号：手上的冷暖，老挡车工指尖上的“纱发脆”。

再是现实符号：玻璃管里的一道液柱，离开人也立得住，谁来看都在那个高度。

再是理念符号：一条热力学的定义，一个以自然常数为根的单位。

可是本书要马上补一句：这不是一级一级往上走的台阶。

后面那一种，并没有把前面的取消掉。今天的你，手伸进洗澡水，照样先凭手感，不会先找温度计；厂里的老师傅，照样会摸一摸料子再看仪表；物理学家在实验室里讲开尔文，回家照样嫌屋里冷。三种身份同时活着，而且一直在来回走动。

走动的方向也不只是“往上”。拿体温来说。十九世纪德国医生冯德利希收集了约两万五千名病人、上百万次的体温读数，1868 年出书，把三十七摄氏度左右定为健康人的正常体温。这个数从此写进了教科书，成了一个理念符号。

然后它又回头改写了人身上的感觉：今天许多人量出 37.3 度，哪怕身上并没有什么不适，心里也会“咯噔”一下，开始觉得自己不舒服。数先站稳了，感觉跟着数走。

本书把这种走动叫回写：新结晶的东西，回头改写了它出生时的条件。冷热从身上走到玻璃管，又从玻璃管走进定义，再从定义回到身上，改变了你怎样感觉自己的身体。

还有一件小事可以作证：2020 年斯坦福大学的一项研究说，今天美国人的平均体温，比十九世纪的记录低了一点。三十七度这个理念符号，被新的大量读数重新检验，有松动的迹象。好的理念符号就是这样：它稳，不是因为没人敢碰，是因为一直有人拿新的读数去碰它。

◆ 六、钟：把日子切成一样长

再讲时间。

人对时间的第一种感觉，也长在身上。饿了，是该吃饭了；困了，是该睡了；天亮了起来干活，天黑了收工。农民看太阳的高度，渔民看潮水，母亲听孩子的哭声，都知道“什么时候了”。

这也是自我符号，而且同样不独立。你说“天快黑了”，在厦门和在哈尔滨不是同一个钟点；你说“我饿了”，和别人饿的时候不一样。

古人很早就给时间造了现实里的痕。日晷上那根针的影子，漏壶里一格一格往下走的水，夜里打更的梆子声。中国北宋的苏颂主持造了一座水运仪象台，1088 年前后建成，用水力推动，能报时、能演示天象，是那个时代极精巧的计时器物。

可是这些痕都有短处。日晷阴天不灵，夜里不灵，换个纬度还得重新做；漏壶的水流快慢跟着水温、水位变。

中国古代的计时，也有过“两套方言”并存的时候。一天分十二个时辰，是一套；漏刻把一昼夜分成一百刻，又是一套。一百不能被十二整除，两套刻度对起来总有零头，历代为此改过好几回，到清代才定为九十六刻。这和欧洲温标的争论很像：痕已经立住了，尺子还没统一，读数就走不远。

十七世纪，荷兰的惠更斯把摆引进了钟里。摆来回一次的时间几乎不变，钟一下子准了很多，误差从一天差十几分钟，缩到一天只差十几秒。

到这里，时间也有了一道离开身体立得住的痕：钟面上的指针。你看几点，我看几点，只要钟对过，就是同一个几点。

机械钟进入中国，也有一段可记的往事。明朝万历二十九年（1601），意大利传教士利玛窦把西洋的自鸣钟作为礼物带进北京宫廷。到清朝，宫里专门设了造钟的作坊“做钟处”，收藏的钟表多到成了一大门类。

一开始，这些钟在宫里多半是稀罕的玩物；它们把一天切成二十四个一样长的小时，和十二时辰、一百刻那两套尺子又对不上。一种新的痕进了门，要过很久，才真正改了日子里怎样说“几点”。

可是在陆地上好用的摆钟，到了海上就不灵了。船一晃，摆就乱了。这一乱，乱出了十八世纪最出名的一桩难题。

◆ 七、海上差的那几分钟

在海上航行，要知道船在哪里，得知道两个数：纬度和经度。纬度好测，看北极星或正午太阳的高度就行。经度难测。

难在哪里？地球一天转一圈，三百六十度，一小时转十五度，四分钟转一度。所以，只要你知道此刻船上是几点、家乡港口是几点，两者一减，就能算出相差多少经度。船上的时间好办，看太阳就行；难的是，在大海中间，你怎么知道此刻家乡是几点？

你需要一只从家乡带出来、走了几个月还不走样的钟。

第 7 章讲过，木星卫星的食可以当一只天上的钟，在陆地上测经度很好用。可是在晃动的甲板上，拿望远镜去追一颗木星卫星，几乎做不到。

经度测不准，船就会撞上它以为还远着的礁石。1707 年，一支英国舰队在锡利群岛附近触礁，死了上千人，常被认为与位置算错有关。1714 年，英国议会通过《经度法案》，悬赏海上测经度的办法，最高一档两万英镑，要求误差在半度以内。

当时学界寄予厚望的，是天文学的办法：测月亮和恒星之间的角距离，再查表算出时间，叫“月距法”。这条路背后站着一大批天文学家和数学家。

本书也要替月距法说句公道话。它不需要昂贵的精密钟表，只要一架好的六分仪、一本好的历表和一个会算的人。英国皇家天文学家马斯基林大力推行它，1766年起主持编出了供航海用的历书，让普通船长也能照表计算。在航海钟还贵得只有少数船买得起的几十年里，月距法实实在在救过很多船。两种办法并行了很长时间，直到十九世纪航海钟便宜到能普及。

两条路其实是两种不同的结晶方式。月距法把功夫压在理念那一端：精确的月亮运动理论、一大本计算表。航海钟把功夫压在现实那一端：一个能装着家乡时间漂洋过海的铜壳子。两条路都要付出巨大的劳动，谁也不是捷径。

另一条路，是造一只不怕晃的钟。走这条路的，是一个叫约翰·哈里森的木匠。

哈里森没受过多少正规教育，最早做的是木头齿轮的钟。他花了几十年，前后做了几台海钟：头几台又大又重，像一只箱子。

哈里森的功夫里，有一处正好和本章前半截接上。金属热了会胀，冷了会缩，钟里的摆杆和发条一胀一缩，走时就变。航海钟要从英国的冬天一路开进加勒比海的夏天，冷热一变，钟就不准。

哈里森用过两种热胀程度不同的金属并在一起，让它们的胀缩互相抵消。温度的那道痕，被他反过来做进了钟的身体里，用来抵消温度本身。温度计和钟这两样东西，在一只铜壳子里碰了头。

最后一台叫 H4，样子却像一块大怀表。1761 年到 1762 年，H4 随船去牙买加，航行八十多天，误差只有五秒左右。

照理说，这下该领奖了。可是经度委员会没有痛快地发钱。他们要求再试一次，要求哈里森交出全部图纸、拆开讲清楚原理，还要求别人照着图纸再做一台，看是不是一样准。哈里森和委员会为此拉锯了很多年，直到 1773 年靠国会出面，才拿到了大部分奖金。

这段往事常被讲成“体制压制天才”。本书要先替委员会说句公道话：一只钟一次跑准，可能是运气。它要成为能托付几百条船、几万条人命的东西，就得过几

道关：再跑一次还准不准？别人照着做，准不准？离开哈里森那一双手，还准不准？

这几道关，正是本书说的“独立”。

后来的事实回答了这个问题。钟表匠肯德尔照着 H4 做了一台复制品，叫 K1。库克船长第二次远航带上了它，在南太平洋上漂了几年，表现很好。从这一刻起，“带着家乡的时间去航海”不再是一个人的绝活，它成了一件可以复制、可以买卖、可以托付的东西。

把这段历史放进三界里看：

哈里森那双手、几十年磨出来的对金属热胀冷缩的感觉、他想出来的种种补偿机构，是一个极结实的自我符号。

H4 和 K1 这样的钟，是现实符号：它们把格林尼治的时间装进一个铜壳子，带着它漂过大洋。一只好的航海钟，船员不用理解它的原理，它也照样走。

“经度＝时差乘以十五度”这条关系，以及后来的航海历书和计算表，是理念符号。

三样缺一不行。只有理念，没有钟，算不出来；只有钟，没有那条关系，钟只是一只钟；只有哈里森的手，不能复制，船队用不上。

◆ 八、秒，从地球转一圈到铯原子

时间这条路，最后也走进了定义。

很长一段时间里，一秒的意思是：一个平太阳日的八万六千四百分之一。说白了，就是地球自转一圈，切成八万六千四百份，一份是一秒。时间的尺子，是地球。

二十世纪三十年代以后，石英钟出来了。石英晶体通电后振动得极稳，做成的钟比任何摆钟都准。

于是一件怪事出现了：用最准的石英钟去量地球自转，发现地球转得并不匀，有时快一点，有时慢一点，长期看还在慢慢变慢。

这是一条非常干净的缝。尺子是地球，被量的东西也是地球。现在一件更稳的器物出来了，拿它一比，尺子自己在晃。原来用来定义“一秒”的那个东西，和更好的读数对不上了。

这条缝逼着人换尺子。先是 1960 年改用地球绕太阳公转来定义秒。再往后，原子钟出来了。1955 年，英国国家物理实验室的埃森和帕里做出了一台实用的铯原子钟。铯原子在两个能级之间跳动时发出的电磁波，频率极其稳定，比地球、比石英都稳得多。

1967 年，国际计量大会把秒重新定义为：铯 133 原子基态的两个超精细能级之间跃迁所对应的辐射，振荡 9,192,631,770 个周期所持续的时间。

从这一天起，秒不再由地球来规定，反过来，地球的自转要用原子钟来量。地球转慢了，就给世界时插进一个“闰秒”。近年国际上又议定，要在 2035 年前后停止加闰秒。尺子和被量的东西，位置倒了过来。

今天你手机右上角的那个时间，也是从这一串尺子里来的。手机从网络上取时间，网络又一层层对到各国的原子钟上；卫星导航更离不开星上的原子钟，那里面还要算进相对论的修正，第 18 章会讲到。你一天看几十次的那几个数字，背后连着铯原子的跳动、国际计量大会的定义、全世界成千上万台互相比对的钟。这就是本书说的连接度：连得越多，越难拆。

还要补一句稳定和对的关系。地球自转当了几千年的尺子，很稳，可是更好的读数一来，它就让了位。今天的秒为什么稳？不是因为没人敢碰它，而是因为世界各地几百台原子钟一直在互相比对，哪一台走偏了，马上就会被别的钟指出来。这种稳，是一直被重新检验出来的稳，也就是第 3 章说的发生型稳定（第 15 章会完整展开），和那种“没人再去查所以不动”的稳定是两回事。

这里要说清楚一种命名。1967 年那条定义，是一次制度上的命名：一个国际机构正式规定“秒”从此是什么。这属于命名里的第三种情形，设立一种制度身份。

它的分量很重，全世界的手机、卫星、电网都跟着它走。可是制度上的定义，和“铯原子为什么会这样跳动”的理论是两回事。定义成立，不等于背后的原子理论就此被证明；理论再漂亮，也不会自动取得法定的地位。两样东西交织在一起，彼此托着，不能互相冒充。

◆ 九、本书的说法：三种身份来回走

把温度计和钟两条路放在一起，本书的说法可以压成几句。

第一句：仪器把一界的符号，迁到另一界去。

冷热本是身上的自我符号，温度计把它迁成了玻璃管里的现实符号；早晚本是身上的自我符号，钟把它迁成了钟面上的现实符号。迁过去以后，它才有了独立：可以离开某一个人、某一只手，被带到远方。

第二句：每一次迁移，都起于一条能指认的缝。

三盆水让两只手说两样话；敞口测温器跟着天气晃；各地刻度说方言；沸点在不同杯子里不一样；船在海上撞了礁；最准的钟量出地球在晃。每一条都在史料里查得到，不是事后补出来的。本书用“对不上”解释这些符号的发生，靠的是这些具体的缝。

第三句：三种身份同时活着，来回回写。

理念符号没有取消现实符号，现实符号也没有取消自我符号。

三十七度从读数变成定义，又回头改写了人对自己身体的感觉；原子钟从地球那里接过了尺子，又回头去量地球。本书把这种关系写成三条互相牵制的式子。

理念符号随现实符号和自我符号而变，现实符号随理念符号和自我符号而变，自我符号随理念符号和现实符号而变。三个角轮流被改写，没有哪个是最终的地基。

第四句：每一次结晶都要付能量。

本书借物理的三个词讲符号发生的能量。动能，是来回折腾、拆了重接的劲：几代仪器匠烧坏的玻璃管，哈里森几十年的工夫。势能，是周围那张网的吸引和拉扯：航海帝国对经度的迫切需要，计量机构和学会的网络。内能，是结晶以后那种拆不散的结实，也就是连接度：今天的摄氏度、今天的秒，连着全世界的仪器、法规、课本和习惯，要拆它，得付出极大的力气。

第五句：粒子、波、场，三种形态也在来回转。

本书把信息分成三种形态：符号像粒子，稳定、整体、能带走；逻辑像波，有轨迹、有快慢；数学像场，讲连接、次序和结构。

一根温度计上的“37.2”，是一个粒子，可以抄进小本子带走。勒尼奥一轮一轮地比对、校正，是一道波，沿着一条轨迹往前推。热力学温标里温度和热、功之间的那张关系网，是一个场。三种形态不是台阶，谁也不比谁高：场里推出来的定义要落成一个个读数才用得上；读数积多了，又逼着人去改那张网。

东西	自我符号（身上）	现实符号（器物上的痕）	理念符号（定义与理论）	逼出迁移的那条缝
冷热	手背贴额头，“纱发脆”	封口玻璃管里的液柱	热力学温标，开尔文	三盆水实验；敞口测温器随天气晃
温标	老师傅的“差不多”	各家刻度的温度计	冰点、沸点两固定点的约定	各地读数说方言；沸点不固定
体温	摸后脖子“有点烧”	体温计上的读数	三十七度正常值	同一病人各人摸出不同；新数据显示均值下移
时刻	饿了、困了、天黑了	日晷、漏壶、摆钟	平太阳日的等分	阴天日晷不灵；漏壶随水温变快慢
经度	老水手的估算	H4、K1 航海钟	经度＝时差乘十五度	海上船位算错、触礁
秒	一呼一吸的长短	石英钟、铯原子钟	1967 年铯原子定义	石英钟量出地球自转不匀

◆ 十、黄秀兰的头晕

回到黄秀兰那天早上。

两次血压都正常，头还是晕。她没再打电话，换了衣服下楼，去了小区旁边的社区卫生服务站。

社区医生给她量了一次，是水银柱的老式血压计，袖带绑在上臂，听诊器压在肘窝。138 和 84。比家里那台高一点，也还算不上高血压。

站里那台血压计已经有些年头了。黄秀兰听说，从 2026 年起国家已经不许再生产含水银的体温计和血压计，老的这些用一台少一台。她家抽屉里原来也有一根水银体温计，前几年黄一凡怕她打碎了吸进汞蒸气，硬是拿走了。水银柱那道用了几百年的痕，正在一点点退出日子，换成电子屏上的数字。

医生问她：早上起得急不急？昨晚睡得好不好？头晕是转圈那种晕，还是发紧发胀？

她一一答了。医生说，这几天气温忽冷忽热，她又有颈椎的老毛病，头晕不一定是血压的事。让她回去别光量血压，把头晕也记下来：什么时候晕，晕多久，晕之前在干什么。过两个星期拿本子来看。还说，要是晕得厉害、手脚发麻、说话不利索，别等，马上打急救电话。

这一路，三界的东西一样不少。

自我那一端：她后脑勺那一阵发紧，是一个真实的、稳稳待在她身上的感觉。几十年来，“头晕就是血压高”也已经在她身上沉成了一个习惯，一晕就往那里想。

现实那一端：血压计上的数。

说到血压，还有一个小细节。血压的单位是“毫米汞柱”，也就是水银柱升起多少毫米。1896 年，意大利医生里瓦－罗奇做出了袖带式的血压计；1905 年，俄国医生柯罗特科夫又找到了用听诊器听声音判断血压的办法。今天黄一凡买的电子血压计里早就没有水银了，可屏幕上那个数，依然叫“毫米汞柱”。一道老的现实符号，沉进了单位的名字里，一直跟着走到今天。

理念那一端：“正常血压”的标准，是医学界根据大量人群的读数和长期追踪定出来的一条线。

那天早上的对不上，是自我那一端和现实那一端顶了起来：身上说“有事”，读数说“没事”。

黄一凡那句“正常就是正常”，是用理念和现实两端，去压住自我那一端。这在很多时候是对的：人的感觉会骗人，读数能帮你看清。可是如果每一次都这样压，就会漏掉一些东西。头晕的原因不止血压一个；读数正常，不等于身上那个感觉是假的。

医生给的办法，是让三端重新碰一碰：继续量血压，让现实那一端有一串稳定的痕；把头晕也记下来，让自我那一端也留下痕；两周后把两串痕摆在一起，再看理念那一端能说出什么。

黄秀兰回家，在蓝皮本子上多画了一栏。表头原来是“日期、高压、低压、心跳、体温”，她在最右边加了两个字：“感觉”。

两个星期以后，那一栏里写着：晨起急，晕；落枕，晕；下雨，脖子酸，晕。医生翻了翻，说：“你看，你的晕跟着脖子走，不跟着血压走。”

那个习惯，“头晕就是血压高”，在黄秀兰身上松动了。一个新的说法替进来：“我的头晕，多半是脖子。”她开始每天早上做一套颈椎操，是黄一凡从网上找来、打印出来贴在冰箱上的。

那天晚上，黄秀兰跟黄一凡讲起了一件老事。

八十年代末，她们车间装了干湿球温湿度计，挂在墙上，两根玻璃管，一根包着湿纱布。厂里规定，湿度低于某个数就要开喷雾。从那以后，车间里看湿度不再靠老师傅摸纱，看墙上的表。

有一年冬天，表上的数一直正常，可是她那排车上的纱总断。她摸了摸纱，发脆，跟老师傅说天干。组长指着墙上的表说：“表说不干。”

断了一个礼拜，有人才发现，那只表挂在暖气管旁边的墙上，湿纱布那一根早就干了，读数是假的。表挪了个地方，纱布换了，读数一下子掉下来，喷雾开起来，纱就不断了。

“那时候我就晓得，”黄秀兰说，“表也要人看着。手也会错，表也会错。”

黄一凡没吭声。他想了想，把外婆那个本子拿过来，拍了张照片，存进了手机。

这一段小事，和两百年前的温标之争是一个样子：先有一条能指认的缝，读数和感觉对不上；然后付出劳动，两个星期一天不落地记；最后结晶出一个新的说法，稳稳地沉在她身上，回头改了她每天早上的样子。

能量也一样不少。动能，是她两个星期每天早上量、每天晚上回想、一笔一笔记下来，七十岁不到的人，这件事不轻松。势能，是社区医生那几句话、外孙的那张颈椎操、家里人一起陪她对本子，是托住她的一张小网。内能，是那句“我的头晕多半是脖子”从此稳稳待在她身上，下次再晕，她先摸脖子，不慌了。

身体或心里的难处真的大了，请找医生或心理咨询师。本书讲的，只是怎样理解读数和感觉，不能代替看病。

◆ 十一、放回日子里

你家里大概也有几样把感觉变成数字的东西：体重秤、温度计、血压计、手机上的步数，手表上的睡眠评分。

它们给了你一样很宝贵的东西：独立。你的感觉不再只是你一个人的事，可以记下来，可以拿给医生看，可以和去年的自己比。这是几百年里无数仪器匠、医生、物理学家一代代付出劳动换来的。不要小看它。

有意思的是，这些仪器自己也在往回走。你看天气预报，现在常常有两个数：一个是气温，一个是“体感温度”。同样是零下五度，有风和没风，人身上的冷不一样；同样是三十三度，干和潮，人身上的闷不一样。气象部门把风速、湿度和气温放进一个公式，算出一个“身体大概会觉得是几度”的数。

这是一次很好看的回写。冷热从人身上出发，走进玻璃管，走进定义，走了几百年；现在又有人回过头来，把身上的感觉重新请进数字里。三种身份不是一条单行道。

家里的空调遥控器上也有一个数，二十六度。可是你肯定有过这种时候：遥控器说二十六度，你觉得冷，家里另一个人觉得热。遥控器上的数是空调出风口附近某一处传感器的读数，你身上的冷热是你这具身体此刻的感觉，“二十六度最舒适”是一条别人替你定好的线。三样东西放在一个小小的遥控器上，难怪常常吵架。

可是也别让它把另外两端压没了。

一个数，是一道现实里的痕。它要被读成“正常”还是“异常”，靠的是一套理念：标准是谁定的，按什么人群定的，什么时候定的。它最后落在你身上，变成你今天是安心还是心慌，那是自我那一端。

下次你看到一个数和你的感觉对不上，别急着判谁对谁错。先问三句：

这个数，换一台仪器、换一个时间量，还是不是它？

我心里拿来比的那条“正常线”，是从哪里来的？

我身上这个感觉，它自己有没有规律？能不能也把它记下来，和数摆在一起看？

带走的话

温度计和钟把身上的冷热早晚迁进器物，再写成定义；三样同时活着，彼此回写，谁也取消不了谁。

小　账

发现学把温度和时间当成早就摆在那里、等着被量出来的量，关上了“一把尺子是怎样长成的”这扇门；本书把每一次换尺子都追到一条能指认的缝，打开了三种身份来回回写的门。

“温度就是物体冷热程度的客观量度”这一句，把三盆水、两个晃动的固定点、两百年的比对，收成了一个现成的定义。

想一想

1. 你身上有没有一种“不用仪器也知道”的本事，比如摸一摸就知道饭熟没熟、听一听就知道车有没有毛病？它和仪器的读数对不上过吗？
2. 你有没有因为看到一个数字，原本没感觉的地方突然觉得不舒服？那个数背后的“正常线”，你知道是怎么来的吗？
3. 你手机上的时间，是从哪里来的？如果有一天它和你墙上的钟差了几分钟，你会信哪一个，为什么？

◆

09

第 9 章

探测器：一道闪光是谁的符号

这一章的问题

凌晨三点，屏幕上先后亮起两道光，它是液体里的一件事、一个反中微子，还是值班员懒得多看的一个标记？

◆ 一、凌晨三点，两道光

江浩然三十五岁，在广东一处地下物理实验站做值班工程师。

实验站藏在一座山的肚子里。从山脚坐一趟缓慢的斜井车，往下走好几分钟，才到实验厅。上面几百米厚的岩石，是用来挡宇宙线的。实验厅中央是一个巨大的球形探测器，里面装满一种特制的液体，叫液体闪烁体；球的内壁上密密麻麻排着上万只光电倍增管，每一只都像一只朝里看的眼睛。

液体里如果有带电的粒子穿过，会发出极微弱的一点光。这点光人眼看不见，光电倍增管能接住，把它放大成一个电脉冲，送到楼上的机房。

江浩然的岗位，就在机房里。一排屏幕，一杯早就凉了的茶。他上的是夜班，从晚上八点到第二天早上八点。

和他搭班的是柯蔚，刚从另一个组调过来，第一次值夜班。

凌晨三点多，屏幕上的一个窗口闪了一下。一圈光电倍增管几乎同时亮起，亮度不算大；过了不到一毫秒，又有一圈亮起来，亮度稍小一点，位置就在旁边。

系统在那条记录旁边加了一个小标记：候选事例。

那两道光为什么会被读成反中微子，培训时讲过一个大概。附近核电站的反应堆，日夜不停地往外放反中微子，它们几乎什么都能穿过，穿过整座山也不费劲。极偶尔，有一个撞上液体里的一个质子，变出一个正电子和一个中子。

正电子很快湮灭，发出第一道光；中子在液体里乱撞一阵，过两百微秒左右被一个原子核俘获，放出第二道光。先一道，再一道，间隔和亮度都有讲究。

这一串说法，是理论家和实验家几十年一起磨出来的。江浩然背得出来，可他上夜班时并不去想它。他看的只是屏幕上那两圈光的时间、位置和亮度，是不是在规定的范围里。

柯蔚凑过来，声音压得很低，好像怕吵醒什么：“这是一个中微子吗？”

江浩然看了一眼，端起茶杯喝了一口凉茶。

“这是两道光。”他说，“是不是中微子，等分析组说。”

“可是它的样子，跟培训的时候讲的一模一样。先一道，再一道。”

“对。样子是像。”江浩然把那条记录点开，看了看时间间隔和能量，又关上，“今晚还会有好几个。你明天这个时候就不会这么激动了。”

柯蔚有点泄气，又有点不服。她盯着屏幕想：这两道光，到底算什么？是液体里真的发生过的一件事？是一个叫“反中微子”的粒子？还是只是屏幕上一个让老值班员懒得多看的小标记？

本章要说的是：三样都是。而且三样不能混。

那两道光留在探测器的记录里，是现实里的一道痕。分析组把它读成“一个反中微子”，那是理念里的一个说法。江浩然一眼扫过去、端起茶杯的那份熟练，是沉在他身上的一种眼光。一个读数，是三界碰头的地方。

◆ 二、山顶的云，屋里的白线

讲探测器，要从一团云讲起。

1894 年，苏格兰青年物理学者威尔逊在本尼维斯山顶的气象站待了几个星期。山顶常在云里，太阳照过来，他看见云雾上出现一圈圈彩色的光环，人站在光里，影子周围也绕着光晕。他被迷住了，回到剑桥，想在实验室里把云造出来。

先说清本章要用的两个工作词。手里已经站稳的说法，和眼前已经站稳的东西放不到一起，本书叫“对不上”。威尔逊那箱干净空气里凝出的雾，就是一次对不上。经过来回折腾，一样东西或一个说法最后稳下来、立住了，本书叫“结晶”。

判断它有没有结晶，看三条：稳定，能反复出现；整体，拆开就不是它；独立，能离开出生的地方，被带到别处。

办法是做一个密封的小箱子，里面装着湿空气，突然把箱子的体积拉大，空气一膨胀就变冷，水汽就凝成雾。做着做着，他注意到一件怪事：即使把空气里的灰尘滤得干干净净，雾有时照样会凝出来。

这是一条能指认的缝。当时的人知道，水汽要凝成水滴，得有个“核”，一般是灰尘。没有灰尘还起雾，那水滴是凝在什么上面的?

后来的研究给了一个回答：凝在带电的离子上。空气里有少量被射线打出来的离子，离子也能当核。用 X 射线照一照箱子，雾就浓了。

从这里往前再走一步，就是那件改变了整个二十世纪物理学的器物。一个带电的粒子高速穿过箱子，一路上会在空气里打出一串离子。如果就在这一刻让箱子膨胀，水汽会沿着那串离子凝成一行细细的小水滴。拿强光一照、拿相机一拍，就是一条白线。

1911 年，威尔逊拍到了这样的照片。α 粒子留下的是又粗又直的白线，β 粒子，也就是电子，留下的是细细的、拐来拐去的白线。这种箱子后来叫“云室”。1927 年，威尔逊因此获得诺贝尔物理学奖。

注意那条白线是什么。它不是粒子本身，粒子小到谁也看不见。它是粒子经过以后，在一箱湿空气里留下的一串小水滴；相机按下快门，它又被固定在一张底片上。

它很像一条被脚踩出来的小路。小路不是走路的人，是人走过以后留在地上的痕；白线不是粒子，是粒子经过以后留在云里的痕。没有人去解释它，底片上那条白线照样在那里，一百年后拿出来，还是那一条。

本书把这样的东西叫现实符号：现实自己沉下来、不需要谁来解释也立得住的痕。

◆ 三、一条拐错了方向的线

有了白线，下一步是读白线。

1932 年，美国加州理工学院的安德森在云室外面加了强磁铁，用来拍宇宙线留下的径迹。带电粒子在磁场里会拐弯：正电荷往一边拐，负电荷往另一边拐，拐得越急，说明动量越小。他还在云室中间横放了一块铅板。

8 月里的一张照片上，有一条白线穿过铅板。线的粗细和电子的线差不多，拐弯的方向，却可能是正电荷的方向。

这是一条非常清楚的缝。

照当时的知识，带正电的粒子只有质子，质子留下的线要粗得多，也走不了这么远。像电子一样细的线，就该是电子；可是电子带负电，不该往这边拐。

会不会只是一个普通电子，走的方向被读反了？方向反过来，拐弯也就反过来了。这是一个合理的怀疑。那块铅板这时派上了用场：粒子穿过铅板会损失能量，出来以后拐得更急。照片上，铅板一边的弯拐得急，另一边拐得缓，由此能判断粒子是从哪一边穿进来的。判断的结果是：它是从下往上穿过铅板的，按这个方向读，拐弯确实是正电荷的拐法，质量又和电子差不多。

安德森后来把它叫“正电子”。

有意思的是，在这之前几年，英国物理学家狄拉克已经从他 1928 年提出的电子方程里推出，应该存在一种和电子质量相同、电荷相反的粒子。1931 年，他把这个“反电子”明确提了出来。据安德森后来的回忆，他拍照时并没有在追狄拉克的预言。理论那边早就画出了一个空位，实验这边一条拐错方向的白线撞了进来，两样东西隔着大洋，在 1932 年碰在一起。

第二年，英国的布莱克特和意大利的奥基亚利尼又往前走了一步。他们在云室上下各放一个计数器，只有宇宙线粒子同时穿过上下两个计数器时，才让云室膨胀、相机拍照。这样拍下来的照片，张张都有东西，不再靠碰运气。他们拍到了一个点上同时冒出一正一负两条线的照片，正负电子成对出现。

这一步值得记住：一路靠图像的云室，和一路靠电路计数的计数器，在这里接到了一起。下一节要讲的那位科学史家，正是把这两路分开来讲的。

这里要分清两种命名。狄拉克方程里推出的那个“反电子”，是一个理论对象，属于命名的第四种情形：先有理论，再提出一个对象。“正电子”这个名字，给的是照片上已经能被认出来的那一类白线，属于第一或第二种情形。两样东西后来被认定是同一个，可是在 1932 年那一刻，它们是从两头走过来的。

还有一段常被提起的旁事。据说在安德森之前，欧洲已经有实验室拍到过类似的径迹，读的人把它们当成了“朝放射源方向走回去的电子”。如果这段旁事属实，它说明了一件很要紧的事：同一种白线早就躺在底片上，现实那一端的痕不缺；缺的是能接住它的说法，和敢怀疑“那一定是电子”的那双眼睛。

◆ 四、一屋子看照片的人

云室之后，有了气泡室。

1952 年前后，美国物理学家格拉泽做出了气泡室。原理和云室相反：云室是在过冷的气里凝出水滴，气泡室是在过热的液体里冒出气泡。带电粒子穿过一罐快要沸腾、又被压着不让沸腾的液体，沿途会冒出一串小气泡。拍下来，又是一条线。坊间流传说，他的灵感来自一瓶啤酒冒泡，这多被认为是传说。1960 年，他获得诺贝尔物理学奖。

气泡室比云室密得多，粒子在里面撞上原子核的机会多得多。一张照片上常常是一团交错的线：直线、弧线、螺旋线，从一个点上炸开的几条线，凭空冒出来的一个“V”字。

二十世纪五六十年代，美国伯克利阿尔瓦雷茨小组的大型液氢气泡室，一年能拍出约一百万张照片。谁来看？

实验室雇了一批专门看照片的人，叫“扫描员”。据记载，其中很多是年轻女性，她们大多不是物理学家。她们坐在投影台前，一张一张地翻，按照物理学家给的规则，找某几种特定形状的径迹：一个没有来路的“V”，一条线突然折了个角，一组线从一点散开。找到了，就做标记，交给下一道工序去量。

据说熟练的扫描员，眼睛扫过一张乱糟糟的照片，几秒钟就能把那个要找的“V”挑出来，物理学家自己反倒没有她们快〔待核〕。

本书在这里停一下，因为这一屋子人正好让三界分得最清楚。

照片上的线，是现实那一端的。它躺在胶片上，谁不看它，它也在。

“这个 V 是一个中性粒子衰变成两个带电粒子”，是理念那一端的。它是物理学家的理论，扫描员不一定懂，也不需要懂。

扫描员那双几秒钟就能挑出“V”的眼睛，是自我那一端的。它是一张张看出来的，沉在她们身上，不用想就会。它不是理论，也不是胶片，它是第三样东西。

后来，扫描员这个行当慢慢没有了。电子探测器直接把径迹变成数字，计算机程序按规则去挑形状。可是那些规则从哪里来？很大一部分，来自一代代扫描员和物理学家在投影台前认过的千万张照片。沉在人身上的眼光，被一条条写成程序，又搬回了机器里。自我那一端的东西，迁到了现实那一端。

科学史家伽里森写过一本厚书《图像与逻辑》，1997 年出版，讲的就是二十世纪粒子物理里的仪器传统。

据他的讲述，粒子物理里大致有两路做法：一路靠拍图像，云室、气泡室、核乳胶，一张照片里看出一个完整的事件；一路靠计数，盖革计数器、火花室，用电路记下“响了几下”，靠统计说话〔转述大意〕。两路人有各自的手艺、各自的习惯，甚至各自信什么样的证据。后来两路慢慢合流，成了今天的电子探测器。

伽里森对在哪里，本书要写足。他让人看见，仪器不是物理学家脑子的附件，它有自己的历史、自己的手艺传统，有一群自己的人。扫描员、技师、工程师，在他的书里第一次站到了台前。这一点很要紧：科学不只是理论家的事。

本书想接着往前走一步：伽里森讲的两种“传统”，其实正好落在三界的不同角上。图像那一路，把功夫压在现实那一端，一张照片就是一道完整的痕；计数那一路，把功夫压在理念那一端，单个读数说明不了什么，要靠统计的那张网才立得住。而两路都离不开第三个角：一大群被训练出来的眼睛和手。

◆ 五、四公里长的尺子抖了一下

时间跳到二十一世纪。

2015 年 9 月 14 日，北京时间下午五点五十分左右，美国两处相隔三千公里的探测器先后记下了一段信号。

这两处探测器属于一个叫 LIGO 的项目，一处在路易斯安那州的利文斯顿，一处在华盛顿州的汉福德。每一处都是一个巨大的“L”形，两条臂各长四公里，臂里是抽成真空的管道，一束激光被分成两路，在两条臂里来回反射，再合到一起。两条臂长得一模一样时，合起来的光会互相抵消；只要其中一条臂长了或短了一点点，光就不再完全抵消，探测器会记下一个变化。

那天记下的变化有多小？据公开的数据，四公里长的臂，长度变化只有一个质子直径的几百分之一。

信号只持续了零点二秒左右。频率从每秒几十次一路往上爬，到最后升到每秒两百多次，然后突然消失。转换成声音，像一声“啾”。利文斯顿那边比汉福德早了大约七毫秒。

这一串读数，是现实那一端的。它被记在两处探测器的数据里，今天任何人都能从公开的数据库下载下来，自己画一遍。

可是它被读成什么？

LIGO 合作组后来公布的说法是：大约十三亿年前，在很远的地方，两个黑洞相互绕转、越转越快，最后合并成一个。一个约三十六倍太阳质量，一个约二十九倍，合并时约有三个太阳质量的能量变成引力波辐射了出去。那一声“啾”，就是它们最后那零点几秒留下的涟漪，走了十几亿年，刚好扫过地球。

这是理念那一端的。它要用到爱因斯坦 1916 年提出的引力波预言，要用到几十年数值相对论算出来的波形模板，要用到对两处探测器噪声的统计。没有这一整套说法，那一串读数只是两条抖动的曲线。

顺带说一句命名。“引力波”最初是一个理论对象，爱因斯坦从他的方程里推出它，属于命名的第四种情形。

2015 年那一段信号，后来按日期被编号为 GW150914，这是合作组按约定给一次事件起的编号，近似于第三种情形里的制度性名分。理论对象的名字和事件的编号是两回事：编号说明“这一次被正式登记了”，不说明理论一定对；理论再漂亮，也不会自动给某一段读数登记名分。

还有自我那一端。

据报道，最先注意到这段信号的，是德国汉诺威一位年轻的博士后，他在屏幕上看到了自动分析程序发出的提醒。他和同事最先的反应，不是欢呼，而是怀疑：这个信号太干净、太像教科书上的样子了，会不会是有人故意注入的假信号？

这份怀疑背后，有一段往事。LIGO 合作组为了检验自己，定过一个规矩。在只有极少数人知道的情况下，往探测器里偷偷“注入”一个假信号，看整个团队能不能把它找出来、分析对，又会不会被它骗。2010 年就有过一次，团队把那个假信号当真，一路分析到写好论文，开会揭晓时才知道是演习。

所以 2015 年那段信号一出来，第一件事是查：这一次有没有人注入？查下来，没有。第二件事是查本地有没有干扰：附近有没有地震、有没有雷电、有没有卡车经过、电网有没有波动。两处探测器周围布满了地震仪、磁力计、麦克风，就是为了排除这些。

查了将近五个月，2016 年 2 月 11 日，合作组才对外宣布。2017 年的诺贝尔物理学奖，颁给了这个项目的三位奠基者。

为了这一声“啾”，人们付出的代价也该记一笔。早在二十世纪七十年代，就有人提出用激光干涉仪测引力波的设计。LIGO 的两处探测器建成以后，从 2002 年前后到 2010 年，前后观测了好几年，一个可信的信号也没有测到。随后探测器停下来大改，换激光、换悬挂系统、换镜子，灵敏度提高了好几倍。改造后的探测器 2015 年 9 月刚开始试运行，几天之后就记下了这一段信号。

几十年的设计、建造、空等、再改造，这是一笔极大的动能。在这之前，天文学家已经有过间接的证据。有一对 1974 年发现的、互相绕转的脉冲星，轨道在一年一年慢慢缩小，缩小的快慢和引力波带走能量的预言对得上。理念那一端早就站着一个结实的说法，现实那一端缺的，是一道直接的痕。

这段经过里，三界一样不少，而且对不上一个接一个。

现实和理念：两条曲线和“两个黑洞合并”的模板，要先对得上，才谈得上读成引力波。

现实和自我：一个太干净的信号，撞上一群被假信号骗过的人身上养出来的怀疑。这份怀疑，是自我那一端的东西。它不写在任何理论里，却实实在在地逼着团队多查了几个月。

理念和自我：引力波预言了一百年，许多人盼了一辈子；盼得越久，越要防着自己“想看见”。

◆ 六、真信号，错读法

这里要防一种误会：好像只要仪器里真有信号，读出来的就一定对。

不是。稳定不等于对，真痕也可能被读错。

2014 年 3 月，另一个叫 BICEP2 的团队宣布，他们在南极用望远镜测到了宇宙微波背景里一种特殊的偏振图样。他们说这是宇宙诞生之初的原初引力波留下的印记。消息轰动一时。

那个偏振图样是真的，探测器里确实有，换个时间测还在。现实那一端的痕不假。可是后来，团队和另一台空间望远镜“普朗克”的数据合起来分析，发现这个信号的大部分，可以用银河系里尘埃发出的光来解释。原初引力波的读法，站不住了。

这个例子和第 7 章的火星运河有点像，又不一样。火星运河是现实那一端本来就没有那条痕，是眼睛的习惯和说法撑出来的；BICEP2 是现实那一端的痕实实在在，理念那一端读错了来历。两件事放在一起，正好说明为什么要把三界分开：痕在不在，是一个问题；痕被读成什么，是另一个问题；读的人有没有被自己的盼望推着走，又是一个问题。

第 16 章还会讲一个更有名的例子：2011 年的“超光速中微子”，最后查出是光纤接头没有插好。这里只点一句。

◆ 七、一个点，又一个点

再往小处走，就到了量子测量的那一下闪光。

1989 年前后，日本日立公司的外村彰团队做过一个后来很出名的实验。他们让电子一个一个地穿过一种相当于双缝的装置，打到后面的探测屏上。每来一个电子，屏上就亮起一个小点。

一个电子，一个点。点落在哪里，事先说不准，东一个西一个，看上去完全随机。可是等到几千个、几万个点积下来，屏上慢慢显出一道一道明暗相间的条纹，正是波穿过双缝才会有的干涉图样。

这个画面，量子力学讲了一百年。作者在他的量子力学专著〔待核书名〕里，把测量中的这一次闪光当作一个核心画面来讨论。本章不展开那里的论证，只借这个画面说一件事。

屏上那个点，是现实那一端的。它亮了，被记下了，不管谁来解释，它都落在那个位置上。

可是“一个电子穿过双缝落在这里”该怎么理解，物理学界至今有好几种说法。有人说测量那一刻，原本铺开的可能性“塌缩”成了一个点；有人说世界在那一刻分了岔；还有别的讲法〔转述〕。几种说法彼此争了几十年，谁也没能把对方赶出去。

这正好是一个干净的样本：同一批点，现实那一端完全一样，谁做实验都得到同样的条纹；理念那一端，却同时站着几种读法。这说明点和读法是两样东西，可以分开来看。点是现实里的痕，读法是理念里的说法。把两样东西混成一句“看见了电子”，就把这里面最有意思的那条缝抹平了。

还要守住一条线，防止把话说过头。本书说“屏上的点是现实符号”，不是说电子在对人说话，也不是说宇宙万物都在发信号等人来读。现实符号只是一道痕：在这里，是一次撞击在屏上留下的一个亮点，就像小路是脚步在地上留下的痕。痕自己不“表达”什么，它只是立在那里。

单个的点，离你的日子也不远。手机相机在很暗的地方拍照时，感光元件上每一个小格子收到的光子少得可怜。照片于是满是颗粒，那颗粒有一部分就是光子一个一个落下来的样子。你嫌照片“噪点多”，其实是看到了光一份一份到达时留下的痕。

◆ 八、“看见了粒子”这句话

把这几段放在一起，最常见的讲法是：

探测器让人看见了原本看不见的粒子和波。正电子本来就在，安德森看到了它；引力波本来就在，LIGO 测到了它；电子本来就在，屏上的点就是它留下的。科学的进步，就是仪器越来越灵敏，看见的东西越来越多。

这是发现学的讲法。它对在哪里，本书要写足。

第一，它守住了一条底线：两个黑洞合并，不会因为没人测就不发生。科学的读数之所以值得信，就因为它不随人的愿望改变。BICEP2 的团队再盼原初引力波，尘埃也不会因此变少。

第二，它解释了为什么不同的实验室、不同的仪器能得到一致的结果。

第三，有一位科学哲学家哈金，给这种讲法添过一条很有力的理由。

他大意是说：当你不光能“看到”一种粒子，还能拿它去做事，那你就很难再怀疑它是真的。比如用一束电子去轰击别的东西，或者用它来造新的仪器〔转述，见哈金《表征与干预》，1983〕。

今天医院里的 PET-CT，就是让正电子在病人身体里湮灭、用探测器接住湮灭时放出的光子，拿它来看肿瘤。正电子已经从照片上一条拐错方向的白线，变成了每天上万次被用来给人看病的工具。说它“不存在”，确实说不过去。

这几条都是真的。本书不打算推翻。

可是这套讲法在一个地方停下了：它把三样东西压成了一句“看见了”。

“看见了正电子”这句话里，至少有三样东西：底片上那条白线，是现实里的痕；“一个质量和电子相同、带正电的粒子”，是理念里的说法；安德森和同事们能从千百张底片里挑出这一张、能想到拿铅板判断方向，是沉在他们身上的手艺和眼光。

压成一句“看见了”，那段旁事就讲不通：同样的白线早就躺在别人的底片上，为什么当时没有“看见”？不是现实那一端缺了什么，是另外两端没站稳。

压成一句“看见了”，那一屋子扫描员也没有位置：她们不懂理论，却看得比物理学家还快。她们看见的是什么？

压成一句“看见了”，量子屏上的点就更难讲：点人人都看见了，可是“看见了什么”，一百年还在争。

汉森讲过“观察渗透着理论”，第 2 章已经细讲。本书在这里要多说的是：一个读数里，渗进来的不只是理论，还有沉在人身上的那双眼睛；而且读数本身，在被渗透之前，先作为一道现实里的痕立住了。三样东西是三样，要分开看，再看它们怎样碰在一起。

◆ 九、读数是三界碰头的地方

本书的说法，可以压成四句。

第一句：一个读数，在仪器里是现实符号。

云室底片上的白线，气泡室胶片上的气泡串，光电倍增管送出来的脉冲，LIGO 记下的两条曲线，量子屏上的点：它们都是现实里沉下来的痕。用本书判断符号的

三条标准一筛：它们稳定，记下了就不会自己散掉；它们整体，一条径迹拆成半截就不是那条径迹了；它们独立，能离开实验室，存进档案、存进公开数据库，几十年后被别人重新读。

第二句：同一个读数，被科学家读成“一个粒子”，是理念符号。

“正电子”“反中微子”“两个黑洞合并”，这些说法都是理论里的东西。它们要靠方程、模板、统计和一整套命名才立得住。一个读数被读成什么，取决于理念那一端已经站着什么样的说法。

第三句：同一个读数，被值班员看惯了，是自我符号。

江浩然端起茶杯那一下，扫描员几秒钟挑出“V”那一下，LIGO 那位博士后心里冒出“太干净了”那一下：这些都是沉在人身上的眼光，是一张张、一夜夜看出来的。它不是理论，也不是痕，它是第三样。

第四句：三样之中任两样对不上，就逼第三样变。

本书把这条关系写成三条互相牵制的式子。

理念符号随现实符号和自我符号而变，现实符号随理念符号和自我符号而变，自我符号随理念符号和现实符号而变。

在探测器这里，三条都看得到。

白线和当时人们看惯了的读法对不上。“像电子一样细的线就是电子”，原本是理念里的旧说法，用久了已经沉成眼睛的习惯，成了自我那一端的东西。现实的痕和这份习惯顶起来，逼出了“正电子”这个新说法。这是现实和自我顶起来，理念那一端变了。

“引力波应该长这个样子”的说法，和一群被假信号骗过的人身上的怀疑顶起来，逼着团队去改现实那一端：多装传感器、多查干扰、多等几个月数据。这是理念和自我顶起来，现实那一端被加固了。

LIGO 的数据里有一种短促的干扰，叫“小尖峰”，来历一直不清楚。它太常见，常见到值班的人和分析程序都习惯把它当噪声剔掉。它和“真正的信号该是什么样”顶起来，就逼着人去练新的眼光：项目后来甚至请了大量网上志愿者，帮着给各种干扰分类，一类一类地认。这是现实和理念顶起来，自我那一端变了。

这几条缝都能在事前指认：一张照片、一次注入演习、一种反复出现的干扰。本书用“对不上”解释读数的意义怎样发生，靠的就是这些具体的缝，不是事后补出来的。

还有能量。

现实那一端的痕，要付巨大的代价才能留下。一座挖进山肚子的实验厅，一台四公里长的激光干涉仪，几十年的建造和维护，这是本书说的动能，也就是来回折腾、拆了重接的那股劲。

一个读数被读成“一个粒子”，要靠一张巨大的网托着：成千上万人的合作组，几十年积下的理论，国际上通行的判定标准。这是势能，周围那张网的吸引和拉扯。

一个说法一旦结晶，连着的东西就越来越多，越来越难拆。正电子连着医院的PET-CT，连着教科书，连着后来所有反物质的研究。要拆它，得付出比它连着的这一切更大的力气。这是内能，也就是连接度。

读数结晶以后，还会回过头来改写别的东西。本书把这叫回写：新结晶的东西，回头改写了它出生时的条件。

正电子是最好的例子。1932 年它是一条拐错方向的白线；几十年后，它成了医院里一台机器的工作原理，每天被用来给人看病。理念那一端的说法，又变回了现实那一端的器物，而医生和技师身上那套读 PET 片子的眼光，又是一种新的自我符号。

引力波也一样。第一次测到以后，探测器又升级了好几轮，欧洲、日本、印度的探测器陆续加入或在建，测到的事件从一个变成了几十个、上百个。一个读数站稳了，整个仪器网络就跟着它改了样子。

探测器	仪器里的痕（现实符号）	读成的说法（理念符号）	身上的眼光（自我符号）	逼出新东西的那条缝
云室	一串小水滴组成的白线	α 粒子、电子、正电子	一眼分出粗直线和细弯线	细线往正电荷方向拐
气泡室	胶片上的气泡串	中性粒子衰变成两个带电粒子	扫描员几秒挑出“V”	没有来路的 V 字形
液体闪烁体探测器	先后两圈光电倍增管的脉冲	一个反中微子事例	值班员看一眼就放下茶杯	某一只管子总是先亮

探测器	仪器里的痕（现实符号）	读成的说法（理念符号）	身上的眼光（自我符号）	逼出新东西的那条缝
LIGO	两处干涉仪记下的两条曲线	两个黑洞合并	“太干净了，会不会是注入”	2010 年假信号演习
BICEP2	微波背景里的偏振图样	原初引力波（后撤回）	盼了几十年的期待	尘埃也能产生同样图样
量子双缝	屏上一个一个的亮点	塌缩、分岔等几种读法	实验者对条纹的熟悉	单个点随机，积多成条纹

◆ 十、江浩然的那一夜

回到那天夜里。

凌晨四点二十分，屏幕上的报警灯黄了一下。一个窗口里，短短几秒钟内跳出了十几条记录，每一条都是一圈光电倍增管亮起来。

柯蔚一下子坐直了。“这么多？会不会是超新星？”

培训的时候讲过：银河系里要是有一颗大质量恒星爆炸，几秒钟之内会有一大批中微子穿过地球，探测器里会突然多出一大串事例。这是全世界中微子探测器都盼着的事，几十年才可能碰上一回。

江浩然没说话，把这十几条记录一条一条拉出来看。

看到第五条，他停了一下。他把第一条、第三条、第五条的光电倍增管分布图并排放在一起。

“你看这里。”他指着球面上靠近底部的一个位置，“每一次，都是这一只先亮。”

柯蔚凑近看。确实，每一张分布图上，最亮的那个点都在同一个位置，周围的管子亮度依次往外减。

“真的粒子在液体里，位置是散的，今天在这边，明天在那边。”江浩然说，“每次都从同一只管子开始，八成是这只管子自己在放电，自己发光，把周围的管子照亮了。”

这种事，在别的实验里也遇到过：光电倍增管偶尔会自己“打火”，冒出一点光，看上去就像液体里发生了一件事。

他调出那只管子的电压和电流记录。凌晨四点十八分，电流有一个小小的跳动。

柯蔚松了口气，又有点失望。

江浩然照规程做了三件事：把那只管子临时屏蔽，在值班日志上写下时间、管子编号和现象，再给负责电子学的同事发了一条消息。

写完日志，他转过头，跟柯蔚说了一段话。

“我刚来那年，也遇到过一回差不多的。一串事例，挤在一起。我看了一眼，觉得又是哪只管子打火，没细查，在日志上写了一句‘疑似管子放电’，就过去了。”

“后来呢？”

“第二天分析组查出来，那一串跟管子没关系，是一群高能的宇宙线缪子同时穿透山体，一起钻进了探测器。不是什么大发现，可它是真的，不是噪声。我看惯了，看走了眼。”

他顿了顿。“看惯了，是本事，也是毛病。所以规程上要写日志，所有异常都要交上去，不能值班员自己说了算。”

这一夜，三界的东西一样不少。

现实那一端：十几圈光电倍增管的脉冲，存在硬盘里，明天、明年都还能重新调出来看。它是实实在在的痕。只不过这一回，它是一只管子自己放电留下的痕，不是液体里一个粒子留下的痕。痕本身不会撒谎，它只是需要被读对。

理念那一端：“超新星中微子爆发”是一个现成的说法，柯蔚一看到一串事例就想到它；“管子放电”是另一个现成的说法，江浩然一看就想到它。两个说法都在等着套上去。最后定下来是哪一个，靠的是那只每次都先亮的管子，和那一下电流跳动。

自我那一端：江浩然那双眼睛，几年的夜班一张一张看出来，一眼就看出“每次都是这一只先亮”。这是他身上结实的东西。可是他自己也知道，同样这双眼睛，也让他看走过一回。

还有一样东西，比三界都更值得记住：那本值班日志，和“所有异常都要交上去”那条规程。

它不是理论，也不是哪个人的眼光。它是一个实验站把“对不上”变成制度的办法。值班员看惯了，可能放过真东西；分析组盯着数据，可能想看见自己盼着的东西；日志和规程把每一次对不上都留成一道可以被别人重新读的痕，交给下一双眼睛去碰。

这一夜也有它的能量账。江浩然几年夜班一张张看下来，柯蔚这一夜从激动到失望再到安静，是动能。实验站的规程、分析组、电子学同事、整个合作组的判定标准，是托住他们的那张网，是势能。“每次都从同一只管子开始，多半是管子放电”这句话，从此在柯蔚身上也站稳了一半，这是一点刚刚开始积起来的内能。

天亮以前，又来了两个候选事例，都是先一道光，再一道光。柯蔚看了一眼，没出声，在记录旁边点了一下，继续盯着屏幕。

江浩然注意到了。他想，她明天这个时候，大概也会端起茶杯了。他又想，得找个时候提醒她，端起茶杯以前，先看一眼是哪只管子先亮。

◆ 十一、放回日子里

你家里大概就有一台粒子探测器，只是你没这样叫过它。

不少家用烟雾报警器，里面有一点点放射源，在一个小室里不停地打出离子，形成一股微弱的电流。烟雾一进去，挡住了离子，电流变小，报警器就叫。这正是一个小小的电离室。

半夜三点，它“嘀”地叫了一声。

你从床上弹起来。这一声，在报警器里是一道现实里的痕：电流真的变了，或者电池真的快没电了。它被你读成“着火了”还是“该换电池了”，是理念那一端的事，你心里得有这两个说法可选。你一听就知道是哪一种，是你身上的耳朵：连着叫是火警，隔很久短短“嘀”一声多半是电池。这是自我那一端，是住了几年、换过几回电池才练出来的。

如果有一天，你太熟悉那一声“嘀”，翻个身又睡了，而那一次偏偏不是电池呢？

这就是江浩然那句话：看惯了，是本事，也是毛病。

机场安检的 X 光机，医院的 PET-CT，你手机里的相机感光元件，其实都在做同一件事：让看不见的东西在仪器里留下一道痕。痕本身不骗人。它被读成什么，要看你手里有什么说法，和你身上练出了什么样的眼睛。

下次你面对任何一个读数，警报、报告单、屏幕上的数字，可以分三步问：

仪器里留下的那道痕，本身是什么？换个时间、换台仪器还在不在？

我心里拿来套它的说法，有几个？我为什么先想到这一个？

我是不是已经看惯了它？如果是，有没有一个“日志”，让别人也能重新看一眼？

带 走 的 话

一道闪光，在仪器里是现实的痕，被读成粒子是理念的说法，被看惯了是身上的眼光；读数是三界碰头的地方。

小　账

发现学用一句“看见了粒子”，关上了“一个读数怎样变成一个粒子”这扇门；本书把读数拆成三界，打开了痕、说法、眼光三样怎样互相顶撞又一起结晶的门。

“安德森看到了正电子”这一句，把一条拐错方向的白线、一块铅板、狄拉克的空位、别人底片上被读错的径迹，收成了一下子的“看到”。

想 一 想

1. 你每天面对的读数里（体检报告、银行短信、车上的仪表盘），有没有哪一个你已经“看惯了”、看都不细看了？如果它有一天变了，你会不会错过？
2. 你有没有遇到过：同一个数据，你和别人读出了完全不同的意思？你们各自手里拿的是什么说法？
3. 在你的工作或家里，有没有一种像“值班日志”那样的东西，能让一个人看漏的，被另一个人重新看到？如果没有，可以怎样做一个？

◆



第　四　编

记号与单位：理念刻进现实

导　语

第四编只做一件事：看理念怎样借一个记号、一个公式、一个单位，在现实里留下刻痕。

第 10 章从新加坡一间四年级教室开始。林家乐把二分之一加三分之一算成五分之二，说“这条线骗人”。零怎样挤进账本，等号那两条平行线，莱布尼茨的 d 和牛顿的点，讲的都是：好记号把一张关系网压成一颗粒子，还能展开回去。

第 11 章讲公式。上海网约车司机孟凡胸口印着 $E=mc^2$，后排的物理博士戴文静能把它打开，他只能带着它走。麦克斯韦的二十个式子被亥维赛压成四个，是本章的完整例子。

第 12 章讲单位。西安计量检定员罗振华被女儿一路追问：你的砝码，又是谁检定的？从秦人的方升、量了七年的子午线、巴黎郊外那块金属圆柱，一直到 2019 年千克改由普朗克常数定义，对账的方向翻了过来。

读这一编时，请带着一个问题：一个写在纸上的符号，凭什么管得住现实里的长短轻重？

10

第 10 章

数学记号：好记号是会思考的

这一章的问题

Aiden 把二分之一加三分之一算成五分之二，是他算错了，还是那条横线在“说话”？换一套写法，一门学问真能走得更远吗？

◆ 一、一条横线难住一个班

星期二上午第三节，新加坡东部一所小学的四年级教室。白若琳在白板上写了一道题：二分之一加三分之一。

她三十九岁，教小学数学已经十四年。这道题她教过十四遍，知道会发生什么。

果然，坐在窗边的 Aiden 林家乐第一个举手，答案是五分之二。上面一加一得二，下面二加三得五，干干净净。他说得很有把握，因为整数加法就是这么做的：同样位置上的数，加在一起。

白若琳没有马上说错。她拿出一块圆形的纸板披萨，先切一半，再从另一块切下三分之一。两块叠在一起，她问全班：这块，比半个披萨大，还是小？

全班说大。

她又问：五分之二，比半个大还是小？

这下教室安静了。五分之二比一半小。两个答案摆在一起，一个比一半大，一个比一半小，总有一个出了问题。Aiden 盯着白板上那条横线看了很久，说了一句让白若琳记了很多年的话：

“老师，这条线骗人。它让我以为上下是两个分开的数。”

这句话说对了一半。那条横线没有骗人，可它确实在“说话”。一个分数记号把两个数一上一下地摆着，中间隔一道线，它在暗示一件事：这是一个数，不是两个。上下两个数的关系，才是它的身份。孩子按整数的习惯读它，就读成了两个并排的数。按分数的习惯读它，才读成“把一切成几份，取其中几份”。

同一道横线，两种读法，一个对得上披萨，一个对不上。

本章就从这条横线讲起。它讲的是一件看起来很小的事：数学用什么样的符号来写。一个零，一个等号，一个字母 d，一条横线。很多人以为这些只是数学的“衣服”，穿什么都一样，里面的道理不变。

本书要说的是：衣服和身体没有这么好分。好的记号会替你想一部分事情，坏的记号会替你挡住一部分路。一门学问能走多远，有相当一部分，看它手里的记号连得起多少东西。

这一编的总题是“理念刻进现实”。前一编讲仪器怎样把现实变成可读的符号。这一编反过来，讲理念怎样把自己刻到纸上、刻进公式、刻进一根金属棒里。刻进去以后，它不靠哪一个人的脑子也能站稳。数学记号是最早、也最安静的一种刻法。

◆ 二、零是怎样挤进账本的

先讲零。

今天的小孩写“二百零五”，写成 205。中间那个 0 什么也不数，它只是在说：十位上这一格，空着。

这一格的空，在算盘上一眼就看得见：十位那一档的珠子没拨。可是要把它写下来，人类花了很长时间。

罗马人写二百零五，是 CCV。两个 C 是两百，一个 V 是五。十位空着，就不写，根本不需要一个“空”的记号。罗马数字不靠位置说话，每个字母自己带着自己的大小。CCV 稳稳当当，记账、刻碑都够用。

麻烦出在算上。用 CCV 加 XLVII，你得先在脑子里把它们换成“量”，再换回字母。用 205 加 47，你只要把个位对着个位、十位对着十位，一列一列往下算，满

十进一。前者要你每一步都想清楚“这是多少”，后者让你在相当程度上可以不想，手跟着格子走就行。

这就是位值制。它把“大小”交给了位置，把位置交给了纸面。可它有一个前提：每一格都必须有东西，空格也得占住。否则 25 和 205 和 2005 写出来就分不清了。

零，就是在这里被逼出来的。

先说清楚：这条缝在史料里找得到。巴比伦人用六十进位的位值制，很早就碰到了空位的麻烦。起初是在数字之间留一点空白。后来，一些泥板上出现了一个专门的符号，占住中间的空位，大约在公元前三世纪前后。可这个占位号不放在数的末尾，也不单独当一个数用。玛雅人在历法里也有自己的零号。占位的需要，在好几处地方都撞出过记号。

印度的那一路走得最远。公元 628 年，婆罗摩笈多在《婆罗摩历算书》里给零写了运算规则。一个数加零还是它自己，一个数减去它自己得零，零乘任何数得零。

他在除以零那一条上说得不够稳，后人改过多次。可要紧的是，零在这里不再只是“空着”，它成了一个可以参加运算的数。瓜廖尔一座小庙的墙上，刻着公元 876 年前后的铭文。里面有一个圆圈形的 0，常被举作印度十进位零号的早期实物。

这套写法往西走，经过巴格达。九世纪的花拉子密写过讲印度算法的书。原书阿拉伯文本已失，只有拉丁译本流传。译本开头一句“花拉子密说”，后来变成了“算法”一词的来历。

再往西，到了意大利。1202 年，比萨商人之子斐波那契写成《计算之书》，第一章就教欧洲人认九个印度数字和一个“zephirum”，也就是零。他的理由很实在：他在北非随父亲做生意时，看到这种算法比罗马数字加算盘方便得多。整本书大量篇幅用来算利息、换货币、分合伙利润。

可是方便不等于马上被接受。佛罗伦萨的兑换商行会，据说在 1299 年立了规矩：账本里不许用这种新数字，要用罗马数字或写出文字。理由也实在：一个 0 加

一笔就成了 6，一个 1 加一笔就成了 7，太容易被涂改。罗马数字笨，可是笨得不好改。

从斐波那契到欧洲商人普遍用新数字记账，又走了两三百年。

这两三百年里，两种算法并存了很久。一边是“算盘派”，在算板上摆筹码，算完只把结果用罗马数字记下来。一边是“算法派”，直接在纸上用新数字一步步笔算，算的过程也留在纸上。1503 年德国出版的一部百科书里，有一幅木刻插图画的就是两派比赛。一边的人对着算板，一边的人对着写满数字的纸，中间站着代表算术的女神。

这幅画里藏着一个容易被忽略的差别。算盘派的计算过程，算完就散了，珠子一拨回原位，什么也没留下。算法派的计算过程，留在了纸上，别人可以一行一行检查。

新数字带来的，不只是算得快，还有“算的过程本身成了一个可以被带走、被核对的痕”。账本上的一列竖式，查账的人隔了一年还能重算一遍。这件事后来对复式记账、对商业信用，都有很深的影响。

这一段史料，发现学的讲法是一句话：“欧洲人终于发现了零的价值。”仿佛零早就在那里，只是被一层雾挡着，雾散了，大家看见了。

可是细看会发现，零不是一下子“被看见”的。它是一次一次被逼出来的：巴比伦泥板上分不清的空位，逼出一个占位号。印度算家要让这个占位号参加运算，逼出一套零的规则。欧洲商人记账要快，逼着他们接受一个容易被涂改的记号。这又逼出一套防涂改的办法，比如数字后面加横线、写大写金额。

每一步都有一条在史料里指认得出的缝。每一步也都要付代价：学新写法的时间，改账本的风险，和行会的争吵。

如果要问零的“命名”属于哪一种，本书的系列用四种情形来分：给已经能辨认的东西加个新名。新的区分和新的名字一起，帮着形成一个辨认单位。设立一个制度身份。提出一个理论对象。零的占位号，主要属于第二种。

在它出现之前，“十位上空着”这件事，算盘上看得见，纸面上却没有一个可以被单独指认的单位。记号和这个辨认单位是一起长出来的。到了婆罗摩笈多给零

写运算规则，零又多了一层身份：它成了数系里的一个成员，可以被加、被减、被乘。

四种情形可以交织在一个记号身上，可是不能互相冒充。零进了算术规则，不等于它马上就进了行会认可的账本。后一件事，是另一种“命名”。

◆ 三、两条一样长的平行线

再讲等号。

1557 年，威尔士医生、数学教师罗伯特·雷科德出版了一本代数书，书名叫《砺智石》。书里他嫌一件事麻烦：写方程时，每次都要写一遍“等于”这几个词。拉丁文写 aequales，英文写 is equalle to，一本书写下来，同样的几个词要抄几百遍。

于是他画了两条平行的短线。他给的理由流传很广，大意是：再没有比两条一样长的平行线更相等的东西了〔转述，见《砺智石》1557〕。

他画的线比今天的长得多，几乎有一个词那么长。这个记号在英国慢慢传开。欧洲大陆却有一段时间用别的写法，比如笛卡儿在《几何》里用过一个形似 ∝ 的记号。要到十八世纪，雷科德的两条线才在各地站稳。

一个等号，省的只是几个词吗？

看看它让什么事变得容易了。没有等号之前，一个方程是一句话：“某数的平方加上某数的十倍，等于三十九。”这是一句完整的话，有主语有谓语，你读它，是在读一个陈述。有了等号，再加上字母代替未知数，它变成了一个左右对称的东西：$x^2 + 10x = 39$。

这个东西可以搬动。两边同时减去同一个数，两边同时除以同一个数，左边的项挪到右边换个符号。一个陈述句你很难“搬”。一个两边对称的式子，你可以搬来搬去，像天平两头同时加减砝码，一直搬到 x 单独站在一边。

等号把一个陈述，压成了一个可以操作的物件。

这里要小心，不能把功劳全记在两条线上。字母代数的成形，主要靠韦达等人在十六世纪末系统地用字母代表数。笛卡儿再把今天的 x、y、z 写法定下来。等号

只是这一大套记号里的一颗螺丝。可是这颗螺丝的位置很关键：它是天平的支点。没有支点，字母再多，也只是一串缩写。

等号还有一个今天仍在教室里上演的小故事。不少研究小学数学的人注意到，低年级孩子常把等号读成“答案在后面”的意思：看到 3+4=□，会填 7。看到 □=3+4，或者 3+4=□+5，就不知所措。有的孩子在方框里填 7，有的干脆说这道题写反了。

白若琳在自己的班上也见过。她后来养成一个习惯：每学期总要出几道“等号两边都有算式”的题，比如 8+5=□+6。孩子第一次做，常常填 13。这一下对不上，就是一次机会。她拿出一架小天平，左边放八个和五个积木，右边放六个，问还要放几个才平。

孩子摆一摆就懂了：等号不是一个“去算吧”的命令，是天平的支点，说的是两边一样重。

这件小事和雷科德的那两条线，说的是同一回事。一个记号压进去的关系，不会自动跟着记号走进每个人的脑子。孩子先看到的，是等号在作业本上最常出现的位置——算式的末尾。他就把“末尾”这个位置当成了等号的意思。要把“两边相等、两边可以同步变换”这条关系展开出来，得有一次对不上，得有一架天平。

你可以在自己身上试一下。拿一道小学应用题，用一整句中文写出数量关系，再试着只靠这句话一步步推出答案，不准写算式。你会发现，推到第三步，你就开始在脑子里偷偷画一个等号了。

◆ 四、“记号只是衣服”对在哪里

讲到这里，需要先把另一种看法讲足。

这种看法认为：数学真理在记号之前。三加四等于七，不管你写成 3+4=7，还是写成“叁加肆等于柒”，还是用算盘拨出来，它都等于七。记号只是表达工具，像同一个意思可以用中文说也可以用英文说。换一套记号，定理一个都不会变。

这种看法有很硬的地方，本书要先承认。

第一，它守住了数学的稳定。勾股定理在古巴比伦泥板上、在《周髀算经》里、在欧几里得《几何原本》里，记号各不相同，说的是同一件事。如果每换一套记号就换一套真理，数学就碎了，谁也没法和谁对账。

第二，它守住了数学的可检查。记号是公开的，规则是写明的，一个证明对不对，可以一行一行查，不看证明者是谁、穿什么衣服、说哪国话。这正是第 1 章讲的发现学科学观最可贵的地方：客观、可复验、抗私意。

第三，它在历史上推动了大量真实的工作。十九世纪以来，数学家花了极大力气把记号与推理规则彻底写清楚。弗雷格 1879 年的《概念文字》，罗素与怀特海的《数学原理》，都想造一套没有歧义的记号。有了它，推理就变成机械可查的步骤。这条路后来开出了形式逻辑，也开出了今天的计算机。

这里面藏着一个有意思的地方：越是认真对待“记号只是工具”的人，越是在记号上花力气。怀特海自己写过一句常被引用的话〔转述，见怀特海《数学导论》，1911〕。大意是：好的记号替大脑卸下不必要的劳动，让它去对付更难的问题。美国数学史家卡约里写成两卷《数学记号史》，把每一个符号的来历一个一个查下来。

这说明，即使站在“真理先在”一边的人，也感到了记号不是那么中性。

◆ 五、它停在哪里

“记号只是衣服”这个看法，停在一个它自己解释不了的问题前面：

既然换一套记号定理不变，为什么有的记号能让一门学问一路往前走，有的却让它原地打转？

罗马数字也能表示一切正整数，原则上一切算术都能用它算。可是用罗马数字，你很难让一个普通商人在半小时内学会乘法。中国古代的筹算本身就是位值制，用算筹摆出空位。它的算法极其发达，开方、解方程组都有成熟的程序，《九章算术》里专有“方程”一章。

可是在纸面书写里，空位是用空格表示的。“〇”这个字形，要到南宋秦九韶、李冶等人的算书里才常见。记号的差别，在这里不只是衣服的差别，它连着哪些计算可以交给手、哪些必须交给脑。

发现学的框架里，这个问题只能放在“心理学”或“教学法”那一格：记号影响的是人学得快慢，不影响数学本身。

可是“数学本身”在哪里？如果它在记号之外，我们从未见过它不穿任何衣服的样子。我们见过的，是一代一代人在纸上、在泥板上、在算盘上留下的痕。设想一个定理，从没被任何记号写出来，也从没被任何人算过。再设想另一个，写下来了，被检查过，被一千个学生在作业本上重算过。这两个定理“在”的方式，不是同一种在法。

这不是说数学是随便编的。勾股定理不会因为谁不喜欢就变。本书要说的是另一件事：一个定理稳不稳，和它对不对，是两个问题。对不对，要看它和别的数学结构合不合得上。稳不稳、传不传得开、能不能被拿去建更高的楼，要看它被刻成了什么样的记号，连着多少别的东西。

发现学只问前一个问题，所以说不清后一个。

◆ 六、本书的说法：记号是刻在纸上的粒子

先把几个工作词讲清楚，跳着读的读者可以从这里接上。

本书说的**符号**，是一团关系结晶下来、可以带走的东西，叫它**粒子态**。判据三条：稳定（能重复出现，不随一次解读散掉）、整体（拆开就不再是它）、独立（能离开发生的地方，带去别处）。**结晶**，就是关系从松散变成这样一颗粒子的过程。**对不上**，是两种已经站稳的东西撞在一起，彼此说不通，这是一切新符号的起点。

符号还分三界。**理念符号**是概念、公式、“一个数”。**现实符号**是现实自己沉下来、不需要解释者也立得住的痕，比如踩出的小路、刻出的河床。**自我符号**是沉在一个人身上的习惯，比如手指自动进位的那一下。三界之间会互相改写，新结晶的东西反过来改写原先的条件，这叫**回写**。

用这些词，本书对数学记号的说法有四句。

第一句：一个好记号，是一团承重关系被压成了一颗粒子。

205 这个写法里压了什么？压了“每一位是下一位的十倍”，压了“空位要占住”，压了“从右往左读大小”。这些关系你不用每次都想，它们已经被压进了记号的排列里。你只要会写，关系就跟着走。

等号压的是“两边可以同时做同样的事而不改变相等”。分数线压的是“上下两个数的比才是这个数的身份”。

这几颗粒子都满足三判据：205 写在哪本书上都是 205，稳定。拆成 2、0、5 三个字就不再是二百零五，整体。从印度到巴格达到比萨到今天的新加坡小学，它被带到了无数地方，独立。

第二句：好记号能展开回它压进去的关系，这叫可返回的压缩。

压缩的东西有两种。一种压了就回不去，比如把一篇文章缩成一个标签“好文章”，标签里看不出文章说了什么。另一种压了还能展开：205 可以随时展开回 $2\times100+0\times10+5$，等式可以展开回“左边这个量和右边那个量相等”的完整陈述。

好的数学记号属于后一种。它把关系压进去，你需要的时候，又能按规则把关系一条条拿出来。正因为能展开，它才“会思考”。你在纸上按规则搬动记号，记号里压着的关系就跟着被搬动、被组合。最后展开出来的，是一个你事先没想清楚的新关系。

Aiden 在分数线上卡住，正是卡在“展开”这一步。他把分数线展开成了两个并排的整数。展开错了路，压进去的那条关系就没有出来。

这里顺带说一句本书系列的另一个说法。信息有三种形态：符号像粒子，稳定、整体、独立。逻辑像波，有轨迹、有速度、有黏性。数学像场，讲连接、次序、结构。一个记号是粒子，按规则一步步推演是波，记号背后那张关系结构是场。

三者不是一级一级往上爬的台阶，而是来回互转。场被压成粒子，就是关系写成记号。粒子被推演展开成波，就是一步步算。波走完又回到场里，就是得出新的关系，接进原来那张网。好记号之所以“会思考”，就是它让这一来一回走得顺。

第三句：记号的连接度，关系到一门学问能走多远。

本书讲符号的结实，用一个词：**内能**，指连接度，也就是把它拆开要花多大力气。和它一起用的还有两个词：**势能**，是周围那张关系网对它的吸引和拉扯。**动能**，是关系被拆开、被重接的速度和方向。一个符号的结晶，要消耗动能、依靠势能、建立内能。

放到记号上，连接度有两层意思。一层是向内的：这个记号压进了多少条关系，越多越结实。

一层是向外的：它能和多少别的记号接上，接上以后还能按规则一起被搬动。

罗马数字向内压得少，大小在每个字母里，位置几乎不承重。向外也接得少，它和“乘法竖式”接不上。位值制向内压了进位关系，向外能接上加减乘除的竖式、小数、后来的代数式、再后来的二进制。它的连接度高，所以一门学问拿着它，能一层一层往上盖楼。

这是本章的主命题，要说准。记号的连接度不是一门学问能走多远的唯一原因，资金、制度、人才、问题本身都要紧。可是它是一个常被低估的原因，并且它是可以比的。

第四句：数学记号是理念符号给自己造了一个现实的身体。

“二百零五”这个量，是理念界的东西。205 这三个字写在纸上，是墨迹，是一个现实的痕。光有墨迹，不读的人看不出它是数。可是一套记号一旦被一代代人写下、印进课本、刻进计算器芯片，它就有了一个身体。这个身体不靠任何一个人的脑子也能延续。

更进一步，它还会沉进人身上。一个熟练的会计算竖式，手指自己会进位，不用想“满十进一的道理是什么”。这一下，记号又成了自我符号。

所以一个数学记号站稳，要三界一起站稳：理念上，它压的关系对得上数学结构。现实上，它被写下、被印刷、被造进机器。自我上，它被一代代学生练进手里。缺一角都站不久。佛罗伦萨行会对新数字的抵制，就是现实一角还没站稳：纸上的 0 太容易被改成 6，现实的身体太软。后来人们给数字加横线、写大写金额，就是在给这个身体加固。

下面这张表，把几组记号放在一起比：

记号	压进去的关系	能否按规则展开	向外能接上什么	连接度
罗马数字 CCV	每个字母的大小，加减组合	能展开成量，但无统一位置规则	记账、刻碑；难接竖式乘除	低
位值制 205	十倍进位、空位占位、读向	能，2×100+0×10+5	竖式、小数、代数、二进制	高
文字方程“某数平方加十倍等于三十九”	一个数量陈述	很难，只能整句理解	几乎接不上别的式子	低
$x^2 + 10x = 39$	两边可同步变换	能，移项、配方一步步展开	一切代数运算、函数、图像	高
牛顿流数点 $\dot{x}$	对时间的变化率	能，但对“对谁求导”表达弱	力学中的时间导数	中
莱布尼茨 dy/dx	两个微小增量之比	能，像分数一样可拆可乘	链式法则、换元积分、微分方程	高
分数线 a/b	上下之比是一个数	能，通分、约分	比例、除法、有理式	高

表里最后几行，引出本章要讲的一个完整的例子。

◆ 七、一个完整的例子：一个 d 和一个点

十七世纪后半叶，欧洲有两个人各自走出了今天叫作“微积分”的那套方法：英国的牛顿和德国的莱布尼茨。

先在史料里把那条缝指认出来。两人面对的是同一组老难题。曲线上某一点的切线怎么求？曲线围出的面积怎么求？一个变化中的量，在某一瞬间变得多快？

这些问题古希腊人就在做。十七世纪，费马、笛卡儿、巴罗等人各有一套局部的办法，巴罗还是牛顿在剑桥的老师。可是这些办法各管一类曲线，换一条曲线就得重新想一套。切线问题和面积问题之间有什么关系，也没有一个统一的写法能把它说出来。

一类题一个巧法，题一换就失灵——这就是那条缝。

牛顿的那一路，起于 1665 到 1666 年前后的手稿。他把变化的量叫作“流量”，把它的变化速度叫作“流数”。后来他用在字母上加一个点表示流数：x 上加一点，就是 x 变化的速度。这套点记号在他的书信与后来的出版物里逐步出现。它首次在印刷品里系统亮相，是在 1693 年沃利斯的著作所收的牛顿材料里。

莱布尼茨的那一路，在 1675 年秋天的手稿里已经能看到：他用一个拉长的 S 写“总和”，这就是今天的积分号 ∫。用字母 d 写“差”，dx 就是 x 的一个极小的差。这几页手稿，一般记在 1675 年 10 月底到 11 月。1684 年，他在莱比锡的《学者纪事》上发表了第一篇讲微分的论文，标题里就有“新方法”几个字。

两套记号说的是同一组关系，至少在今天的教科书看来是这样。可是它们压缩关系的方式不一样。

牛顿的点，压进去的是“对时间的变化率”。这个记号很经济，一个点就够了，写起物理来很顺手：位置上加一个点是速度，加两个点是加速度。它的出身是力学，它的想象是一个在时间里流动的量。

莱布尼茨的 dy/dx，压进去的是“y 的微小变化和 x 的微小变化之比”。它看起来就像一个分数。这一点后来被许多数学家批评，因为严格说来它不是一个普通的分数。极小的差到底是不是零，十八世纪一直说不清楚。贝克莱主教还专门写文章，挖苦这些“消逝的量的鬼魂”〔转述，见贝克莱《分析学家》1734〕。

可正是这个“像分数”，让它连得特别多。

看一个例子。y 是 u 的函数，u 又是 x 的函数，问 y 对 x 变化得多快。用莱布尼茨的记号，写成：

$$dy/dx = dy/du \cdot du/dx$$

右边两个 du，像分数一样“约掉”了。这就是今天的链式法则。严格的证明要另写，可是记号本身已经把答案摆在你面前，你几乎是被记号牵着手，写出了正确的东西。

再看换元积分。你要算一个积分，把 x 换成 u 的函数，dx 也要跟着换成 du 乘上一个东西。用 d 记号，这一步几乎是机械的：把 $dx = (dx/du)du$ 代进去就行。用点记号，同样的事要先想清楚“对谁求变化率”，因为点里面并没有写出“对谁”，它默认是对时间。

所以，同一套关系，压进点里，展开的时候常常要你在脑子里补上那个没写出来的“对谁”。压进 d 里，展开的时候，“对谁”就写在分母上，规则可以照着纸面走。

点记号压得更紧，可是展开的路窄。d 记号压得松一点，可是能接的东西多。

接下来是一段很长的历史，这里只讲和记号有关的那一条线。

牛顿与莱布尼茨谁先谁后，在十八世纪初演成了一场激烈的优先权之争。1712 年，英国皇家学会的委员会作出报告，判定牛顿在先。报告连同所附书信在 1713 年初印行，通称《通信集》。这场争吵有学术的成分，也有民族情绪的成分。结果之一是，英国数学家在很长一段时间里坚持用牛顿的点记号。用莱布尼茨的记号，被看作站到了对手那边。

欧洲大陆走了另一条路。伯努利兄弟、欧拉、拉格朗日、拉普拉斯等人，拿着 d 记号和 ∫ 号往前走。微积分被推到了变分法、微分方程、天体力学。欧拉一个人写出的东西，有相当一部分是靠 d 记号在纸面上的灵活搬动做出来的。

这里必须公道地说，英国十八世纪的数学并非一片空白。泰勒 1715 年的《增量法》、麦克劳林 1742 年的《流数论》，都是重要成果。英国在这一时期数学的整体位置，也不能全归到记号上，大学制度、研究风气、和大陆交流的多少，都有关系。数学史家对“英国落后了一百年”这类说法，有许多保留。

可是有一件事很能说明问题。1812 年前后，剑桥的几个年轻学生，巴贝奇、约翰·赫歇尔、皮科克，组织了一个“分析学会”。他们要做的一件主要的事，就是把

大陆的 d 记号引回英国。1816 年，他们翻译出版了法国数学家拉克鲁瓦的微积分教程。巴贝奇在回忆里留下一个双关的俏皮话〔转述，dot-age 兼有“老朽”之意〕。大意是要提倡“纯粹的 d 主义”，反对大学的“点的年代”。

一个学会，专门为了换一个字母而成立。如果记号只是衣服，这件事就很难讲通。

用本书的话把这段历史重新讲一遍：

那条缝，是切线和面积这组老问题，用一题一法的旧办法对不上新曲线。这条缝逼出了两种结晶：一颗是点，一颗是 d。两颗粒子都稳定、整体、独立，都能被带去用。

它们的差别在连接度。点压进的关系里有一条没写出来——“对时间”。这让它在力学里极顺手，到了需要“对任意变量”变来变去的地方，就要人在脑子里补。d 把“对谁”写进了纸面，这条关系就从脑子里搬到了墨迹上。于是它可以被规则机械地搬动，被一代代学生练成手上的习惯。它向外接上了链式法则、换元、偏导、微分方程，一层一层往上盖。

英国长期守着点记号，这本身也可以说是一种“稳定”。可是这种稳定，有相当一部分不是来自“一直在重新检验它好不好用”，而是来自“站在牛顿一边”。第 3 章分过这两种稳定，第 15 章还会完整展开：一种是不断被重新点火、重新检验而稳，叫发生型稳定；一种是没人再去检验而稳，叫锁化型稳定。分析学会做的事，就是让一个锁住的记号，重新被拿出来和另一个记号比一比、对一对。

今天的物理课本里，点记号并没有死。写时间导数时，物理学家仍然常用它，因为在那里它压得最紧、最省墨。两套记号各自找到了自己连接度最高的地方。这也是一种回写：一场争吵之后，两个记号都被重新安放了位置。

◆ 八、好记号为什么“会思考”

说记号“会思考”，不是说纸上的墨迹有脑子。这句话要说准。

它的意思是：一个好记号把一部分本该在脑子里完成的连接，搬到了纸面上，搬进了规则里。你按规则移动记号，记号里压着的关系就跟着动。最后展开出来的新关系，有一部分不是你事先想到的，是记号替你连出来的。

一个日常的例子。你在超市排队，想算一下购物篮里的东西大概多少钱。如果你心里用的是“二十几块加十几块再加五块多”这样的说法，算到第四样就乱了。如果你心里把价格摆成一列竖式，个位对个位，你能多撑几样。竖式就是一个“会思考”的记号：它替你记住了位置，替你管住了进位，你的脑子只要管一列一列往下走。

再举一个例子。棋手记棋谱。今天的国际象棋通行“e4”“Nf3”这样的代数记谱法，每一步都写成一个格子的坐标。有了它，一盘棋可以被写下、被寄出、被一个从没见过对手的人在另一个城市复盘。棋谱让一盘棋从“那天下午那张桌子上发生的事”，变成了一颗可以被带到任何地方去的粒子。后来的开局理论、残局库，都是在这颗粒子上一层层盖起来的。

坏的记号则相反，它会把路挡住。

一个记号如果压进了一条错的关系，或者把一条该写出来的关系藏起来，人就会被它牵着走错路。Aiden 的“五分之二”，就是被整数加法的记号习惯牵着走。整数的竖式让他相信，同一位置上的数可以直接相加。这条关系在整数里是对的，搬到分数线上下就错了。

这里有一个很要紧的分寸：一个记号会不会“骗人”，要看它被拿到哪个场里用。点记号在力学里不骗人，到了一般的变量替换就容易藏起关键信息。整数竖式在整数里不骗人，搬到分数上就骗人。记号的好坏，不是一颗粒子孤零零的属性，是它和周围那张网的关系。

这正是本书说的势能：一个记号能不能结晶、往哪里结晶，看周围那张关系网把它往哪边拉。d 记号在大陆那张欧拉、伯努利、拉格朗日一起用的网里，被拉得越来越结实。在英国那张“站在牛顿一边”的网里，就被拉开了。

还有一件事要说。记号的结晶也要付能量，这一点常被忘记。

一个新记号刚出来时，大家都不习惯。雷科德的等号在大陆被别的写法压了很久，斐波那契的数字被行会挡了很久，d 记号在英国被挡了一百年。每一次记号的更替，都要一代人付出学习的动能。要有学校、课本、学会这样的势能托着。要等它在一代学生手里练成习惯，内能才建起来。

这也解释了为什么好记号一旦站稳，就很难换掉。今天要是有人提出一套比位值制更好的计数法，哪怕它真的更好，也难换上。要换掉全世界的课本、账本、计算器芯片和几十亿人手上的习惯，所需的动能大到难以想象。记号的连接度越高，它越难被拆开。这既是它的力量，也是它的风险。

◆ 九、放回日子里

回到白若琳的教室。

那天下课前，她没有直接告诉 Aiden 正确的算法。她让他回家做一件事。用自己喜欢的方式，发明一个记号，表示“半个披萨加三分之一个披萨”，第二天讲给全班听。

第二天 Aiden 交来一张纸。他把一个圆画成六格，涂了五格，在旁边写了一个“5 of 6”。

白若琳问他：为什么是六格?

他说：因为二和三都能分进六里面。分成六格以后，一半是三格，三分之一是两格，三格加两格就是五格。

这个“5 of 6”不是一个新记号，人类早就有了，叫六分之五。可是对 Aiden 来说，这是他自己在一次对不上里结晶出来的东西。整数加法的习惯和披萨的现实撞在一起，撞出了“先把格子分成一样大”这个关系。这个关系，又被他压进“5 of 6”这个写法里。

几个星期后，他看课本上通分的规则，说了一句：“这不就是我那个六格吗。”

课本上的规则是别人的结晶。他自己的“六格”，是他付过动能、在自己的对不上里长出来的那一颗。有了这一颗，别人的那颗才接得上。

你的生活里，也到处是记号。

记账的人用的表格，是一种记号：它把“钱从哪来、到哪去”压进了一行一列里。做饭的人记的菜谱，是一种记号：“盐少许”和“盐三克”压进去的关系不一

样，展开出来的味道也不一样。孩子画的家务表，用一个勾、一个叉，压进了“这周谁做了什么”。

下次你觉得一件事怎么也想不清楚，可以换个写法试试：把它画成表，写成式子，排成一条时间线。有时候想不清楚，不是脑子不够，是手里的记号连不上那几条关系。换一个记号，路可能就通了。

还有一件小事。你用惯的记号，会悄悄替你想事情。这很好，省力。可是也要偶尔停下来问一句：它替我想的那部分，在这里还对得上吗？Aiden 的整数竖式在分数上骗了他一次。你用惯的某张表格、某个说法、某个“我们一直这么写”，也可能在新的地方骗你一次。

带 走 的 话

好记号把一张关系网压成一颗能带走、还能展开回去的粒子；它连得越多，一门学问往往走得越远。

小　账

发现学把记号当成真理的衣服，关上了“记号为何影响学问走多远”这扇门；本书把记号看成可返回的压缩，用连接度把这扇门打开。

“欧洲人终于发现了零的价值”——一句话把巴比伦的空位、印度的运算规则、佛罗伦萨的账本争吵这一连串被逼出来的结晶，收回成了一次“看见”。

想 一 想

1. 你记账、记事、记菜谱用的写法里，哪一种最让你省心？它替你记住了哪几条关系？
2. 你有没有被一个用惯了的说法或写法“骗”过一次，把它搬到了不该用的地方？
3. 如果让你给自己家里的某件事（比如家务、开销、孩子的作息）发明一个记号，你会把哪几条关系压进去？

◆

11

第 11 章

公式：一个粒子装下一张网

这一章的问题

孟凡胸口印着 $E=mc^2$，却说不出为什么是光速的平方。五个字符凭什么走遍天下？带着它和打开它，差在哪里？

◆ 一、一件印着公式的 T 恤

晚上九点多，上海虹桥火车站的出租车道上排着长队。孟凡把车停稳，后备箱弹开，一位背着双肩包的年轻女乘客坐进了后排。

孟凡二十七岁，开网约车第三年。那天他穿了一件灰色 T 恤，胸口印着五个黑色的字符：$E=mc^2$。

这件衣服是他在网上买的，三十九块九，包邮。他喜欢它，说不清为什么。大概是看上去有点学问，又不至于太装。

车开上延安路高架，后排的乘客忽然笑了一下，问他：师傅，你衣服上那个公式，知道是什么意思吗？

孟凡也笑。他说知道啊，能量等于质量乘以光速的平方。爱因斯坦的。

乘客叫戴文静，在一所大学读物理的博士，刚从外地开完会回来。她又问了一句：那为什么是光速？为什么是平方？

孟凡想了想，说：那我就不知道了。反正印在衣服上，好看。

两个人都笑了。车里安静了一会儿。

这件小事里，有一个本章要讲的问题。

那五个字符，从 1905 年的一篇德文论文里出发，走过一百多年，走到了上海一辆网约车司机的胸口。它被印在杯子上、海报上、明信片上、电影里，被无数个从

没推导过它的人带着走。它没有在路上散掉，没有变成别的样子，E 还是 E，平方还是平方。

可是它在孟凡身上，和在戴文静身上，又不是同一种存在。在孟凡那里，它是一个漂亮的图案，一句可以背出来的话。在戴文静那里，它可以被打开。她能从它推回去，推到一个物体放出一束光、自己就轻了一点点。她也能从它推出去，推到太阳为什么能烧几十亿年。

同一个公式，一个人只能带着它走，另一个人能把它展开。

本章要讲的就是这件事。一个公式为什么能被带到无数地方去？它带走的是什么？为什么有人能把它展开，有人只能把它背着？

本书的回答，先放在这里：**公式是一张关系的网，被压成了一颗粒子。** 这颗粒子能被带走，因为它稳定、整体、独立；它能被展开，因为压缩是可以返回的。可是展开要付代价，不是每个带着它的人都付过。

◆ 二、五个字符从哪里来

先讲 $E=mc^2$ 的来历。这里要把史料讲准。

1905 年，二十六岁的爱因斯坦在瑞士伯尔尼的专利局当三级技术员。这一年他在德国的《物理学年鉴》上发表了几篇论文，后来被称为他的“奇迹年”。其中六月寄出的一篇，讲的是“论动体的电动力学”，今天叫狭义相对论。

那篇论文的开头，先指认了一条缝。

一块磁铁和一个线圈，彼此相对运动，线圈里会产生电流。按当时的电磁理论，“磁铁动、线圈不动”和“线圈动、磁铁不动”要用两套不同的说法来解释。一种情形里有电场，另一种情形里没有电场，只有另一种力。可是实验上，只要相对运动一样，电流就一模一样。

现象只认相对运动，理论却要分出谁在动。两边对不上〔转述，见爱因斯坦 1905 年《论动体的电动力学》开篇〕。

这条缝背后还有一条更大的缝。麦克斯韦的电磁理论里，光速是一个确定的数。牛顿以来的力学里，速度要叠加：你在火车上往前扔球，地上的人看球更快。

光是不是也这样叠加？如果叠加，麦克斯韦的方程换一个运动的观察者就要变形。如果不叠加，牛顿力学的速度规则就要改。

两套都极其成功的理论，在“光速”这一点上撞在了一起。

这是在史料里可以独立指认的缝，不是事后补上去的。十九世纪末到二十世纪初，洛伦兹、庞加莱等人已经在这条缝上做了大量工作。今天叫“洛伦兹变换”的式子，就出自他们之手。这一次对不上，逼出的结晶，是把“同时”这个概念本身熔开。两个地方发生的事算不算同时，要看你在哪个参照系里量。

同年九月，爱因斯坦又寄出一篇很短的论文，只有三页。标题是一个问句：物体的惯性同它所含的能量有关吗？

论文里有一个想象的实验。一个静止的物体，同时向相反的两个方向，各放出一束同样的光。从静止的参照系看，物体放出了一份能量。再从一个匀速运动的参照系看同一件事，用六月那篇论文里的变换去算，光的能量会有一点不同。把两边的账一对，物体在放出能量之后，它的质量必须少掉一点，账才对得平。

少掉的那一点，是放出的能量除以光速的平方。

论文里没有写成今天的样子。他用 L 表示能量，用 V 表示光速。结论写成一句话〔转述，见爱因斯坦 1905 年 9 月论文〕，大意是：物体以辐射形式放出能量 L，质量就减少 L/V^2。今天通行的 $E=mc^2$，换上的是后来物理学界惯用的字母。

这里也要公道。爱因斯坦之前，已经有人在“辐射有没有质量”这个问题上做过计算。庞加莱在 1900 年讨论过电磁辐射的动量。奥地利物理学家哈泽内尔在 1904 年前后算过，空腔里的辐射会让物体显得更重。只是他算出的系数，和今天的不一样。$E=mc^2$ 不是从天上掉下来的。它是一张已经在织的网上，一次结得特别牢的结。

这个结牢在哪里？牢在它和别的东西连得多。

1932 年，英国剑桥的考克饶夫和沃尔顿用加速的质子去撞锂原子核，锂核裂成两个氦核。他们称量了反应前后的质量差，又量了两个氦核飞出来的能量。两个数对上了 $E=mc^2$。

2005 年，美国麻省理工学院和国家标准与技术研究院的一个小组，在《自然》杂志上报告了一次更直接的检验。他们比较了原子核俘获中子时放出的伽马射线能量，和原子质量的变化。两边吻合到了大约千万分之四。

一百年里，这五个字符一次次被推到读数面前对账，一次次对上了。

◆ 三、四个式子背后的二十个

再讲麦克斯韦方程组。今天的大学物理课本里，它是四个式子，常常被印在一页纸上，有人还把它印在 T 恤上，配一句“神说：要有光”。

可是麦克斯韦本人从来没写过这四个式子。

故事要从法拉第讲起。十九世纪三十年代以后，法拉第在伦敦皇家研究院做了大量电磁实验。他没有受过系统的数学训练，用的是一种图画式的想法。磁铁周围布满了看不见的“力线”，铁屑撒上去，就沿着这些线排开。电流变化，力线就跟着动，动的力线又能在旁边的导线里感生出电流。

当时欧洲大陆的主流是另一种想法。电和磁是隔着空间、瞬间作用的力，像牛顿的引力一样，中间什么也不需要。法拉第的力线，在很多人看来只是一种画图的辅助。

麦克斯韦比法拉第年轻四十岁。1855 年前后，他写了一篇论文讨论法拉第的力线，想把这些线翻译成数学。1861 到 1862 年，他又写了《论物理力线》，用一套齿轮和涡旋的力学模型，来想象空间里的电磁作用。

就在这个模型里，他加进了一项新东西，叫“位移电流”。

今天的课本讲位移电流，常用一个电容器来说明那条缝。电流流进电容器的一块极板，在两块极板之间断开了，那里没有导线，没有电荷流过。可是原来的安培定律说，电流周围一定有磁场。那么两块板之间，到底有没有磁场？按原来的式子算，在这里会算出自相矛盾的结果，和电荷守恒对不上。加上位移电流这一项，变化的电场也算作一种“电流”，矛盾就消了。

这里要守一条纪律。课本里这条缝讲得很干净。可是历史上，麦克斯韦是不是从电容器这条缝走到位移电流的，史家有不同的看法。一种常见的说法是：他在涡旋与齿轮的力学模型里，要让介质能“弹性位移”，才引入了这一项。

所以本书在这里只说史料里能确认的。位移电流这一项加进来以后，整套方程能推出一个结论：空间里会有一种自己往前传的电磁扰动。

1864 年，麦克斯韦在英国皇家学会宣读了《电磁场的动力学理论》，次年发表。在这篇论文里，他把力学模型拿掉了，只留下方程。方程一共有二十个，变量也有二十个，写成分量形式，一个方向写一个式子。

这二十个方程推出了一个数：电磁扰动在空间里传播的速度。这个速度可以用两个电磁测量量算出来。1856 年，德国的韦伯和科尔劳施测过这两个量的比值。麦克斯韦拿来一算，得到的速度，和菲佐等人测出的光速非常接近。

这一下对上，在史料里留下了麦克斯韦的一句判断〔转述，见麦克斯韦 1861—1862 年论文〕。大意是：我们很难不推断，光就是这种介质里的横向波动。

一个从磁铁和线圈里长出来的方程组，推出了光。

1873 年，他出版了两卷本的《电磁通论》，篇幅浩大。1879 年，他四十八岁就去世了。他的方程，留在了一大部很难读的书里。

接下来的故事，主角换了。

◆ 四、“公式是自然的语言”对在哪里

先停一下，讲足另一种看法。

这种看法认为：公式就是自然本身的规律，用数学写下来。自然界里早就有电磁规律，有质能关系，物理学家的工作，是把它们读出来、写下来。公式越简洁，越接近自然的真面目。

伽利略有一句被反复引用的话，大意是：自然这本大书是用数学的语言写成的〔转述，见伽利略《试金者》1623〕。这句话的来龙去脉，第 1 章已经讲过。这句话后来成了物理学的一种信念。

这种看法有很硬的地方，本书要先承认。

第一，公式真的能预言。麦克斯韦的方程推出了电磁波，那时还没有人在实验室里见过。1887 到 1888 年，德国的赫兹在实验室里用火花放电产生了电磁波。他还测出了它的反射、折射和速度。一个写在纸上的推论，二十多年后在实验室里亮了一下。这不是凑巧。

第二，公式真的精确。$E=mc^2$ 被验到了千万分之几的精度。如果公式只是人随便编的一种说法，它没有理由在这么多位小数上和读数对得上。

第三，公式真的普遍。同一组麦克斯韦方程，管着收音机、微波炉、手机信号、医院里的核磁共振、天文学家看到的星光。同一个 $E=mc^2$，管着核电站、太阳的燃烧、医院里的正电子扫描。它不挑地方，不挑说话的人。

这三条加在一起，就是第 1 章讲过的发现学科学观最有力的证据：客观、可复验、抗私意。它们是真的，本书不打折扣。

有一位物理学家把这种感受说得很有名。1960 年，维格纳发表了一篇文章，题目大意是《数学在自然科学中不合理的有效性》。他说，数学这样好用，是一件我们既不理解也不配得到的奇妙礼物〔转述〕。

还有一句话常被归到赫兹名下〔转述，出处不明〕。大意是：人们很难摆脱一种感觉，这些公式有自己的存在和智慧。它们比我们更聪明，甚至比写下它们的人更聪明。

这两句话都说出了一种真实的惊讶。

◆ 五、它停在哪里

可是这种看法，停在两个它自己说不清的地方。

第一处：它把“好用”叫作奇迹，然后就停下了。

维格纳说数学的有效性“不合理”，是一份“礼物”。这是诚实的说法，可是它把问题放下了。一个公式为什么能被带到它从没去过的地方，还照样管用？它带过去的到底是什么？发现学的框架里，答案只能是：因为公式写的就是自然本身。可是这句话等于把“为什么好用”换成了“因为它是真的”，路没有往前走。

第二处：它说不清同一个公式为什么会有不同的“在法”。

麦克斯韦的二十个方程，和亥维赛后来的四个式子，按今天的看法，说的是同一组物理规律。可是二十个方程的那一版，几乎没人用得动。四个式子的那一版，进了全世界的课本，进了电报工程师的手里。如果公式只是自然规律的“誊写”，两份誊写说的是一回事，为什么命运差得这么远？

再看孟凡胸口那个 $E=mc^2$。它和戴文静脑子里那个 $E=mc^2$，字母一样，含义一样。可是一个能展开，一个不能。发现学会说：那是孟凡没学过，是教育问题，不是公式问题。

可是这恰恰说明，公式“在”的方式，不只是纸上那五个字符。它还在于有没有人能把它打开，打开以后连得上什么。

归在赫兹名下的那句“公式比我们更聪明”，其实已经摸到了这个地方。它说的是一种很真实的经验。你按规则推公式，推着推着，推出了一个没想到的结果，好像公式自己在想。

可是公式自己不会想。它会“想”，是因为它压进去的关系，比写下它的人当时意识到的还多。你一推，那些关系就被一条条放出来。

发现学停在了惊讶上。本书想往前走一步：把这份惊讶，讲成一件可以讲清楚的事。

◆ 六、本书的说法：公式是场被压成了粒子

先把几个工作词讲清，跳着读的读者从这里接上。

本书说的**符号**，是一团关系结晶下来、能带走的东西，叫**粒子态**，判据三条：稳定、整体、独立。**结晶**，是关系从松散变成这样一颗粒子。**对不上**，是两种已经站稳的东西撞在一起说不通，它是新符号的起点。

本书系列还有一个说法：信息有三种形态。**符号像粒子**，讲稳定、整体、独立。**逻辑像波**，讲轨迹、速度、黏性，一步接一步地推。**数学像场**，讲连接、次序、结构，一张关系的网。

三者不是台阶，不是谁高谁低。它们在一门科学里来回互转，缺了哪一种都走不动，第 3 章借《科学是什么？》说过这层意思〔待核：王德生、牟军《科学是什么？》〕。

用这些词，本书对公式的说法有四句。

第一句：公式是一张关系的网，被压成了一颗粒子。

$E=mc^2$　　背后的网有多大？有相对运动和电磁感应的那条缝，有光速不变，有“同时”的熔开。还有九月那篇论文里一个物体向两边放光的账，有能量守恒和动量守恒。这些关系彼此连着，有次序，有结构，是一个场。

这个场被压进了五个字符。

压成以后，它稳定：写在哪里都是 $E=mc^2$，一百年没变样。它整体：拆掉平方，或者拆掉 c，它就不再是它，也不再对得上读数。它独立：它离开了伯尔尼的专利局，离开了 1905 年的德文期刊，被带到了核电站、天文台、医院、T 恤上。

第二句：好公式能被推导展开回它压进去的场，这是可返回的压缩。

压缩有两种。一种压了就回不去，比如把一部电影压成一句“挺好看”，你从这句话里推不出剧情。另一种压了还能展开，比如一个压缩文件，双击就能还原。

好公式属于后一种。从 $E=mc^2$ 出发，你可以沿着推导，一步一步走回那个向两边放光的物体，走回光速不变，走回电磁感应的那条缝。这一步一步走的过程，就是波：有轨迹，有先后，走得快慢不同，有的地方走得黏、走得难。

走回去以后，你又回到了那个场里。

所以公式在一门科学里的生命，是一个来回。**场被压成粒子，粒子被推导展开成波，波走回场里，又接上新的关系。**　接上新关系的场，可能再被压成一颗新的粒子。

这是一个往返，不是一个阶梯。不是说科学从符号“升”到数学，也不是说哪一种形态比另一种高级。一个物理学家一天之内，可能在这三种形态之间来回走几十趟。看一个公式，是粒子。推几行，是波。停下来想这一推和别的东西怎么连，是场。再写下一个新的式子，又是粒子。

第三句：公式能被带到无数地方去，是因为它是粒子；它在新地方管用，是因为它能在那里被重新展开。

一颗粒子被带走，要靠“独立”：它不依赖发生地。$E=mc^2$　不需要你知道伯尔尼专利局在哪条街，就能被带走。

可是带走以后要管用，还得在落地的地方被重新展开，接上那里的现实。

一位核电站的工程师拿着 $E=mc^2$，要把它展开成每次裂变放出多少能量、燃料要装多少、冷却水要多大流量。一位做正电子扫描的医生，要把它展开成一个正电子和一个电子相遇、湮灭。湮灭放出两束伽马光子，各约五十一万电子伏特，探测器就对准这个能量去接。一位天文学家，要把它展开成太阳每秒钟把多少质量变成光。

同一颗粒子，在三个地方被展开成三张不同的网。每一次展开，都接上了当地的读数。每一次接上，都是又一次对账。

这就是一个公式能被带到无数地方去的原因。它不是因为“写的是自然本身”才普遍，而是因为它压得够紧、能带走，又压得够准、能展开。紧，让它能跑远；准，让它在跑到的地方还对得上。

有一个展开的现场，在史料里留得很清楚。

1938 年底，柏林的哈恩和施特拉斯曼用中子去轰击铀。按当时的想法，铀核顶多掉下一小块，变成和铀相邻的元素。可是他们反复做化学分离，在产物里查出了钡。钡的原子核，差不多只有铀的一半大。

读数和理论对不上。哈恩是化学家，他相信自己的分离做得没错，可是想不通物理上怎么会这样。他写信给已经流亡瑞典的老同事莉泽·迈特纳。

那年圣诞节，外甥弗里施来看迈特纳。两人在瑞典乡间的雪地里散步，一个踩着滑雪板，一个走路。两人坐在一根树干上，在纸片上算。他们想象铀核像一滴被拉长的液滴，一拉就裂成两半。裂开的两半带着正电，彼此猛推，飞出去的能量算下来大约是两亿电子伏特。

这么多能量从哪里来？迈特纳记得原子核质量的数据。她算出，裂开后两块碎片加起来，比原来的铀核轻了一点点，大约是一个质子质量的五分之一。把这一点点质量乘以光速的平方，正好也是两亿电子伏特上下。

两条路算出的数，对上了。

这就是一次展开。$E=mc^2$ 这颗粒子，三十多年前从伯尔尼出发，这一天在瑞典的雪地里，被两个人在一张纸片上打开。它接上了哈恩实验室里一个查不明白的钡，也接上了原子核的质量数据。不久以后，“裂变”这个词被造了出来。

这里要说准一件常被说歪的事。很多人以为 $E=mc^2$ 是原子弹的“配方”，好像有了这五个字符，就有了炸弹。不是这样。$E=mc^2$ 只说质量和能量之间的换算，它不告诉你哪种原子核会裂、怎样让它连锁地裂下去。那些要靠哈恩的化学分离、迈特纳和弗里施的液滴模型、后来大量的中子实验，一样一样对出来。

公式是那张网上一个连得特别多的结。可是网的其余部分，不在公式里，要靠展开它的人在当地一针一针织出来。

第四句：带着公式走，和能展开公式，是两件事；展开要付能量。

孟凡胸口的 $E=mc^2$，是一颗被带走了却没有被展开的粒子。它在他身上，只是一个图案、一句话。

这不是孟凡的错，也不是公式的错。展开一个公式，要付能量。本书讲符号的能量，有三个词。**动能**，是关系被拆开、被重接的速度和方向。**势能**，是周围那张网的吸引和拉扯。**内能**，是连接度，也就是拆开它要花多大力气。

戴文静能展开 $E=mc^2$，是因为她付过动能：大学里推过几十遍洛伦兹变换，熬过夜，卡住过。她身边也有势能托着：课本、老师、同学、一整套物理学的传统。练到后来，推导成了她手上的习惯，那是内能。这个时候，$E=mc^2$ 在她身上不只是理念符号，也成了自我符号。

孟凡没有付过这些。所以那五个字符在他身上，是信息，不是结晶。

这一点很要紧，第 17 章讲 AI 进入科学时还会回来。一个公式可以被零成本地复制、打印、生成。可是它在一个人身上展开，从来不是零成本的。

“独立”还有另一面，也要说一说。

一颗能被带走的粒子，也能被带到它接不上的地方去。$E=mc^2$ 太有名了，它常常被带进和物理毫不相干的场合。有的保健品广告把它印在包装上，说产品里有“能量”。有的励志书拿它比喻“努力乘以坚持的平方”。有的人在辩论里搬出它，只为了显得有学问。

在这些地方，那五个字符还是那五个字符，稳定、整体，一点没变。可是没有人把它展开，也展不开。它压进去的那张网，和广告里的“能量”、励志书里的“努力”，一条线都连不上。它在那里，只是借了一个名气很大的外壳。

这和孟凡的 T 恤不完全一样。孟凡知道自己不懂，他只是喜欢。广告却是在暗示：这个公式替我的产品作了保证。第 19 章讲“科学已证明”式的广告，会回到这件事上。

分辨的办法很简单：问一句，它在这里能被展开吗？展开以后，接得上这里的什么读数？接不上的，就只是一颗被搬过来的粒子，不是一次展开。

下面这张表，把几个著名的公式放在一起看：

公式	压进去的场	回到哪一次对不上	能展开出什么	被带去了哪里
$E=mc^2$	光速不变、同时的熔开、能量与动量守恒	电磁感应只认相对运动，理论却分谁在动	质量亏损、裂变与聚变能量、湮灭光子能量	核电站、太阳物理、正电子扫描
麦克斯韦方程组（四式）	电场、磁场、电荷、电流之间的全部联系	力线与超距作用之争；位移电流项的引入	电磁波、光速、电路与天线	无线电、电力、通信、光学
$F=ma$	力、质量、加速度的比例与方向	地上落体与天上行星是否同一套规律	抛体、轨道、桥梁受力	工程、航天、日常力学
$PV=nRT$	压强、体积、温度、物质的量	卡诺热机要同时动压强、体积、温度，玻意耳、查理等人的定律各管一段接不起来；1834 年克拉珀龙把它们合成一式	气球、轮胎、发动机气缸	化工、气象、潜水

公式	压进去的场	回到哪一次对不上	能展开出什么	被带去了哪里
欧姆定律 V=IR	电压、电流、电阻的比例	伏打电堆的电流时强时弱，同一根导线前后读数对不上；欧姆改用稳定的温差电池，1827 年写出定律	电路设计、保险丝选型	家用电器、电网

表里每一行都有一条“回到哪一次对不上”。这一列要小心填。像 PV=nRT 那一行，克拉珀龙当年写的是 pv＝R（267＋t）一类的式子，常数随气体而定，今天 nR 的写法更晚才定下来；欧姆那一行，他的原式写的是电流和导线长度的关系，不是今天的 V=IR。细节都要回到具体的科学史去查。找不到缝的地方，本书宁可空着，不硬写。

◆ 七、一个完整的例子：从二十个到四个

现在回到麦克斯韦去世以后。

1879 年以后，他的方程躺在《电磁通论》那部大书里。书很厚，方程是分量写的，一个方向一个式子。里面还有一些叫“势”的辅助量，计算起来绕。很多物理学家知道这套理论重要，可是用不动它。

奥利弗·亥维赛是这个故事的下一个人。

他生于 1850 年，伦敦一个贫寒的家庭，小时候得过猩红热，听力受损。他没有上过大学，十六岁离开学校，后来在英国北部一家电报公司当报务员。他的姨父是查尔斯·惠斯通，电报的先驱之一。

在电报线路上工作，让亥维赛撞上了一条很具体的缝。信号在长距离电缆里传，会变形、会拖尾。一个干脆的电码，走到另一头就糊成一团。当时的工程界有一套经验说法来对付它。可是这套说法讲不清信号为什么糊，怎样才能不糊。

他二十四岁辞掉工作，回到家里，靠家人接济，自己读麦克斯韦的书。

读《电磁通论》，对他来说也是一次对不上。书里的理论是对的，他确信这一点。可是书里的写法太重，推一步要写满一页，和他手上电报线的问题接不起来。

从十九世纪八十年代初开始，他在一份叫《电工》的技术周刊上连载文章。他做了几件事。

第一件，他用矢量的写法代替分量的写法。原来三个方向各写一个式子，现在合成一个矢量式子。矢量分析在同一时期，也由美国的吉布斯独立整理出来。

第二件，他把那些“势”从基本方程里拿掉，只留下电场和磁场这两个能直接测的量。

这样一合一删，二十个方程，变成了四个。

这次重写并不是没人反对。麦克斯韦本人在《电磁通论》里用过一些四元数的写法，那是爱尔兰数学家哈密顿发明的一套记号。苏格兰物理学家彼得·泰特（P. G. Tait）是四元数的坚定维护者。十九世纪九十年代，他和亥维赛、吉布斯在期刊上打了好几年笔仗。泰特觉得矢量写法是对四元数的拆散和降格；亥维赛觉得四元数太绕，工程师用不动。

这场争论，和上一章莱布尼茨的 d 与牛顿的点那场争论，形状很像。两种记号说的大体是同一组关系，比的是谁压得更顺手、谁能接上更多的东西。后来矢量写法赢了，进了课本。四元数退到了一些专门的领域里，今天在计算机图形学里描述三维旋转时，又被大量使用。记号的命运，也是一次次重新安放位置。

他用的四个式子，今天被称为“麦克斯韦方程组”的标准形式。在一段时间里，也有人叫它“亥维赛—赫兹方程”。赫兹在差不多同一时期，也独立地写出了相近的形式，见于他 1890 年讨论静止物体电动力学基本方程的论文。

这里要问一个发现学不太问的问题：从二十个到四个，物理变了没有？

按今天的看法，没有变。四个式子能推出的东西，二十个方程原则上都能推出。在这个意义上，亥维赛没有“发现”任何新的自然规律。

可是用本书的话看，变化很大。

麦克斯韦的二十个方程，已经是一颗粒子了：它稳定，整体，能被印在书里带走。可是这颗粒子压得松，向内压进去的关系还摊着，向外能接上的东西不多。很多人拿着它，展不开。

亥维赛把这颗粒子重新压了一遍。压得更紧，紧到能写在一页纸上；压得更准，准到删掉的东西都是推导时可以重新算回来的。这是一次更好的可返回的压缩。

压紧以后，它的连接度变高了。

最直接的例子，是亥维赛自己。他辞职回家后不久，就开始写描述信号在长电缆里怎么传的方程，今天叫“电报方程”。把麦克斯韦的理论重新压紧以后，他拿着这套顺手的写法，回头把那条电报电缆的缝推得更深。他推出一个结论：如果在电缆上每隔一段距离加进一些电感，信号就不容易变形。

这个结论当时没人信。英国邮政系统的权威工程师普里斯，和他有长期的激烈争执。

十几年后，美国的普平等人把“加感线圈”做成了实物，申请了专利。长途电话线路因此大大延长。亥维赛没有从中得到钱。

这一段历史，用三态往返来讲，就是一个完整的来回：

- **场**：法拉第的力线、电荷与电流的全部联系，被麦克斯韦织成了一张理论的网。
- **粒子**：这张网先被压成二十个方程，又被亥维赛重新压成四个式子。
- **波**：亥维赛拿着重新压紧的理论，回到电报方程上一步步推，推出加感的结论。这是沿着一条轨迹走下去的推导，走得很难，很黏，十几年里有人顶着、有人不信。
- **回到场**：推出来的加感结论，接上了长途电话线路的现实。电缆里的信号读数，和推导对上了。这个对上，又织进了电工学这张更大的网里。

这个来回里，有两处对不上，在史料里都能指认。一处是麦克斯韦的理论太重，和电报线的问题接不上，逼出了重写。另一处是长电缆里信号会糊，经验说法说不清，逼出了电报方程。

还有一处能量账，也看得清。亥维赛付了几十年的动能，孤身一人在家里推，没有大学的职位，没有实验室。托住他的势能场很薄：一份技术周刊，几位读得懂他的同行。在英国，菲茨杰拉德、洛奇等年轻物理学家，被后来的史家称作“麦克斯韦派”。他们之间的通信和争论，是亥维赛少有的场。

后来这四个式子进了课本，在一代代学生手里练熟，连接度一层层建起来。今天要换掉它的写法，已经很难了。

一个公式的命运，不只看它说得对不对，还看它压得好不好、有没有人把它展开、展开以后接上了什么。

◆ 八、公式为什么能装下一张网

讲完这个例子，可以把本章标题里那句话说得再准一点。

“一个粒子装下一张网”，不是说那张网被藏进了几个字母里，像魔术师把鸽子藏进帽子。网没有被藏起来。它被压成了一种规则：只要你按规则展开，网就一条条回来。

一个日常的例子。你家里有一本菜谱，上面写着“红烧肉：五花肉一斤，冰糖三十克，酱油两勺，小火一小时”。这一行字，压进去了一位厨师很多年的经验：火大了会焦，糖少了不亮，时间短了不烂。你照着做，那些经验就在你的锅里展开一部分。

可是同一行字，在一个从没进过厨房的人手里，展不开。他不知道“小火”是多小，“两勺”是多大的勺。菜谱能被带走，因为它是一颗粒子。能不能在你家厨房里变成一锅肉，要看你有没有付过一点动能。还要看有没有一个托着你的场，比如小时候在旁边看过妈妈做。

公式是同一回事，只是压得更紧、更准。

还有一个要说清的地方。公式压进去的那张网，不是只在科学家脑子里。它的一部分，在实验室的读数里，在仪器的刻度上，在一代代复现的实验记录里。那张网之所以织得牢，是因为它一次次和现实的读数对过账。

所以一个公式站稳，要三界一起站稳。理念上，它压进去的关系对得上别的理论。现实上，它被印在书里、刻进仪器、写进工程规范，有了一个不靠哪个人的脑子也能延续的身体。自我上，它在一代代学生手里练成了习惯。

这里要防一种滑坡。说公式“被刻进世界”，不是说宇宙里本来就写着 $E=mc^2$ 这几个字母，等着人去读。星星不会写字，电子也不会。公式是人的理念符号。它

刻进世界的方式，是被印进课本、造进仪器、写进反应堆的设计图。并且在每一次运行里，和现实的读数对上。

对得上，它就在那里站着。哪天对不上了，它就要熔开。

这件事在科学史上真的发生过。牛顿的引力公式，在水星近日点那里对不上了，最后让位给广义相对论（见第 5 章）。$E=mc^2$ 今天还没有被任何读数推翻。可是它站得稳，靠的是一直被拿去对账，不是靠被供起来。

◆ 九、放回日子里

回到那辆网约车。

车下了高架，在一个红灯前停住。戴文静从后排探过身来，指着孟凡的胸口，说：我给你讲一个，你就知道它在说什么了。

她说：太阳每秒钟都在变轻，大概每秒钟少掉四百多万吨。少掉的那些质量，变成了光和热，照到你身上。你开车开一天晒的那点太阳，就是太阳自己少掉的一点点身体，乘以光速，再乘以光速。

孟凡愣了一下，说：太阳会越来越轻？

戴文静说：会。只是它太重了，少这么多，几十亿年也少不了多少。

绿灯亮了。车开动以后，孟凡低头看了一眼自己的 T 恤，说：那这个平方，就是两次光速？

戴文静说：对，所以那么一点点质量，能换出那么多能量。

那天晚上，孟凡胸口那颗粒子，被打开了一个小口。只是一个小口，他还推不出那篇三页的论文。可是从那天起，$E=mc^2$ 在他身上，不只是一个图案了。它接上了一样他每天都碰得到的东西：车窗外的太阳。

这一个小口，是他自己的一次对不上撑开的：“太阳会越来越轻？”他原来以为太阳是不会变的。这个旧想法和戴文静讲的现实撞在一起，逼出了一个新的连接。

你身边也有很多这样的公式，被你带着，却没被打开过。

存钱时的复利，体检单上的体重指数，装修时算的面积，导航里的“预计到达时间”。它们都是被压过的网。你可以只带着它们走，那也够用。可是有一天，你会遇到一个它们算不对的地方。复利算出来的钱和实际到账对不上，体重指数说你超重，而你明明很结实。

那一天，是把它打开的好机会。

试着问一句：这个公式压进去的是哪几条关系？它在什么地方管用，到了我这里为什么对不上？这一问，就是在把粒子展开成波，再走回场里。你不一定能走到底，可是只要走了一步，那个公式在你身上，就开始从信息变成你自己的东西。

带 走 的 话

公式是把一张关系网压成一颗能带走的粒子，好公式还能被推导展开回去，展开要你自己付能量。

小　账

发现学把公式的好用叫作“不合理的有效性”，停在了惊讶上；本书用场、粒子、波的往返，把“为什么能带走、为什么在别处还管用”讲成了一件可以讲清的事。

“亥维赛整理了麦克斯韦方程”——一句“整理”，把一次重新压缩、它所接通的电报方程与加感线路、它付出的几十年动能，收回成了一份誊写。

想 一 想

1. 你手机、衣服、杯子上，有没有一个你能背出来、却从没打开过的公式或口号？它压进去的是什么？
2. 你在工作中常用的一个“算法”或“经验公式”，在什么情况下会算不对？那时你是怎么办的？
3. 你有没有过一次，一个早就会背的东西，忽然在某个具体的场合“打开”了？是什么撑开了那个口？

◆

12

第 12 章

单位：从一根铂铱棒到自然常数

这一章的问题

罗振华的砝码一级级往上送检，送到最顶上那一块，又该拿什么去对？一个数，怎么能当砝码？

◆ 一、砝码又是谁检定的

西安城北一个农贸市场，早上七点半，罗振华提着一只银灰色的铝箱走进大门。

他四十九岁，在区里的计量检定所干了二十多年。这天的活儿是例行检定：市场里五十多台电子秤，一台一台过。

铝箱打开，里面是一排排嵌在海绵里的砝码，小的像纽扣，大的像一块砖。他把一个二十千克的砝码放上卖猪肉那家的秤，秤上跳出 20.00。再放一个五千克的，跳出 5.00。他又在秤盘四个角各压一下，看读数会不会偏。都合格，他在本子上记一笔，贴上一张绿色的合格标签。

卖菜的大姐那台秤，二十千克跳出了 20.06。他让大姐先别卖，叫来商户打电话找人修。大姐有点不高兴，说就差六十克，又不是故意的。罗振华说：一天卖三百斤菜，每斤差一点，一年下来就不是一点了。

晚上回家，读大学的女儿罗安放寒假在家，听他讲白天的事，随口问了一句：

“爸，你用砝码检定人家的秤。那你的砝码，又是谁检定的？”

罗振华笑了。他说：我的砝码每年送到市里检定，市里的标准砝码送到省里，省里的送到北京的中国计量科学研究院。

罗安又问：“那北京的呢？”

他说：以前，北京的那一个，要定期拿去和巴黎郊外的一块金属圆柱比。那块圆柱，就是全世界的一千克。

“那块圆柱又是谁检定的？”

罗振华停了一下。这个问题他在培训班上听老师讲过。他说：它不用检定。它就是一千克。它说自己多重，就是多重。

罗安觉得很奇怪：“那万一它自己变了呢？”

罗振华说：它真的变过。所以前几年，全世界把它换掉了。现在的一千克，不再是哪一块金属了，是用一个物理常数定的。

罗安愣了一下，说：一个数，怎么能当砝码？

这一问，就是本章要讲的事。

一根尺、一个砝码、一斤一两，看起来是最朴素、最不需要哲学的东西。可是“一米到底有多长”“一千克到底有多重”，人类为这两个问题，争了两百多年，换了好几次答案。每换一次，都不只是换一根棒、换一块铁。换的是：我们拿什么来担保一个数是真的。

本书要讲的是：单位，是理念刻进现实最直接的一种方式。从一根铂铱棒到一个自然常数，是现实符号和理念符号之间一次很深的回写。

◆ 二、秦人的方升与诏版

先讲一个更早的故事。

上海博物馆里藏着一件青铜器，长方形，带一个短柄，像一只小斗。它叫商鞅方升，是公元前 344 年，秦国在商鞅主持变法时颁发的标准量器，铭文所记年份是秦孝公十八年。它的容积，就是秦国的一升。

这件方升的底部，还加刻了一段字。那是一百二十多年后，秦始皇统一六国时补刻上去的诏书。

秦始皇二十六年的这道诏书，在当时被大量刻在铜权、铜量上，或者做成铜片钉在量器上，叫“诏版”。诏书的大意是：皇帝兼并了天下诸侯，百姓安定，立号

为皇帝〔转述，据秦诏版铭文〕。于是诏令丞相，把那些不统一、有疑问的度量衡标准，全部统一明确。

在那以前，七国各有各的尺、各有各的斗、各有各的斤。一个齐国商人到秦国做生意，同样一袋粟，在两边量出来是两个数。收税的官吏、交税的农民、做买卖的商人，都在这些对不上的数字里吃亏或者占便宜。

这是一条在史料里找得到的缝：疆域合成了一个，度量却还是七套。

秦的办法，是把一个标准的量器做出来、刻上字、发到各地，让各地的量器去和它对。秦律里还规定，官府的衡器、量器要定期校正，误差超过多少要罚，睡虎地秦简《效律》里就有这样的条文。

这套办法有很硬的地方，本书要先说足。

第一，它把“一升”从每个人心里的估量，变成了一件可以拿在手上比的东西。卖粟的人和买粟的人可以不信对方，可是都得认那只方升。

第二，它让度量离开了一时一地。一只方升可以复制，可以发到几千里外的郡县，可以传两千多年，今天还在博物馆里站着。

第三，它把度量和国家的权力绑在了一起。诏书刻在量器上，意思很清楚：这个标准，是皇帝定的，谁也不能私改。

用本书系列的话说，这是一次制度身份的设立。

本书系列把“命名”分成四种情形。

第一种，给已经能辨认的东西加一个新名。第二种，新的区分和新的名字一起，帮着形成一个辨认单位。第三种，设立一个制度身份，比如一部法律规定的标准、一个学会的会员资格。第四种，提出一个理论对象，比如化学里的“氧”。

四种可以交织在一起，可是不能互相冒充。理论对象不会自动得到制度的授权，制度成立了，也不证明哪个理论是对的。

秦的“一升”，主要是第三种。它不需要什么理论来证明一升“应该”是这么大，它要的是：天下只认这一个。

这种单位有一个天生的软肋：它的权威，来自那只方升，和刻在上面的那道诏书。方升会磨损，会被仿造，会在战乱里丢失。诏书背后的那个王朝，也会倒。秦

亡以后，度量又在一代代王朝手里慢慢变样，汉、唐、宋、明的一尺，彼此都不一样长。

一个靠一件实物、一道命令立住的单位，站得稳，可是站不久。

◆ 三、一根子午线量了七年

两千年后，法国人想换一种立法。

1789 年大革命前夕，法国境内的度量衡乱到了极点。一个常被引用的估计是，旧制度下的法国有近八百种不同名称的单位。加上各地大小不同，变体多达二十五万种上下。同一个“尺”，巴黎和里昂不一样长；同一个“斗”，这个领主的和那个领主的不一样大。农民交租、商人交易，都在这些差别里吃亏。大革命前各地呈给国王的陈情书里，有不少就在要求统一度量。

这又是一条找得到的缝：一个要“人人平等”的新国家，连一尺都不平等。

1790 年，法国国民议会委托科学院，设计一套新的度量制度。科学院里聚着当时最好的一批学者：孔多塞、拉格朗日、拉普拉斯、蒙日、博尔达等人。

他们给自己定了一个很高的目标：新单位不能来自哪一个国王的脚长，也不能来自哪一个城市的旧尺。它要取自自然，所有人都能重新找回来。孔多塞留下过一句话，大意是：它要属于所有的时代，属于所有的人民〔转述，常引作“à tous les temps, à tous les peuples”〕。

取自自然的什么？当时有两个候选。

一个是秒摆：一个摆，来回一次正好一秒，它的摆长就当作一个单位。这个想法十七世纪就有人提过，长处是任何地方都能做个摆来复现。

可是这个候选，有一条早已暴露的缝。1672 年前后，法国天文学家里歇到南美的卡宴去观测。他从巴黎带去的摆钟，在那里每天慢了两分多钟。后来人们明白，地球不是正圆，赤道附近的重力稍弱，同样长的摆走得慢一点。秒摆的长度，随纬度变。

一个号称“取自自然、到处都一样”的单位，到了赤道就不一样了。

另一个候选，是地球本身。1791 年 3 月，科学院提出了方案。从北极到赤道、经过巴黎的这一段子午线，取它长度的一千万分之一，定为一个新单位，叫“米”。

接下来就要真的去量。没法从北极量到赤道，就量其中一段：从法国北部的敦刻尔克，到西班牙的巴塞罗那。这一段跨着巴黎，纬度跨度够大，又大部分在法国境内。

1792 年，两位天文学家出发了。德朗布尔往北，从敦刻尔克量起；梅尚往南，从巴塞罗那量起。办法是三角测量。在山顶、教堂尖塔上立起标志，用精密的测角仪器，一个三角形一个三角形地往前推。最后算出两端之间的距离。

这一量，就是七年，到 1798 年才收尾。

这七年正赶上法国最动荡的年月。国王被处死，恐怖统治，战争。德朗布尔在路上被当成间谍抓过。一个人拿着奇怪的仪器在教堂顶上比比画画，又说不清楚自己在干什么，难免让人起疑。梅尚在西班牙，法西开战，他被困在那里回不来。

梅尚的故事里，还有一条更深的缝。他在巴塞罗那附近两个观测点测纬度。两处的结果，和三角测量算出来的距离对不上，差了大约三角秒。三角秒很小，可是对一个要量出“自然之长”的工程来说，它不该存在。梅尚找不到原因，又不敢声张，把这个差异藏在了自己的笔记里。他为此焦虑多年，1804 年，他在又一次测量途中病逝。

这段隐情，要到很久以后才被细查出来。美国史学家奥尔德在 2002 年出版的《万物之尺》里，把这段故事写得很细。今天的分析认为，那个差异更可能来自当时仪器和观测条件的局限，不是梅尚本人的失误。

1799 年，根据测量结果，人们用铂做了一根标准米尺，存放在国家档案馆里，叫“档案米”。它是一根端面尺，两个端面之间的距离就是一米。它和一个标准千克一起，成了新制度的实物标准。

可是后来的测量表明，这根米尺比“子午线的一千万分之一”短了大约五分之一毫米。原因有好几层：地球比当时以为的更扁一些，梅尚那个藏起来的误差也算在里面。

取自自然的那一米，量出来就不是自然的那一米了。

这件事留下了一个很微妙的结果。米本来是“子午线的一千万分之一”，一个理念上的定义。可是真正让全国、后来让全世界去对的，是档案馆里那根铂尺。地球子午线再被量多少次，量出多少新数，那根尺都不改。

定义写着“自然”，担保的却是一件实物。

1875 年 5 月，十七个国家在巴黎签订了《米制公约》，成立了国际计量局，地点在巴黎郊外的塞夫尔。1889 年，第一届国际计量大会批准了新的国际米原器。它是一根九成铂、一成铱的合金尺。截面是一个 X 形，既省料又不易弯曲。尺上刻着两道细线，在冰的熔点温度下，两线之间的距离，就是一米。

同一年，大会也批准了国际千克原器：一个同样用铂铱合金做成的小圆柱，高和直径都约 39 毫米。它被锁在塞夫尔国际计量局地下的保险库里，罩在三层玻璃罩下。

就是罗振华对女儿说的那块圆柱。

◆ 四、“单位只是约定”对在哪里

讲到这里，先停下来，讲足两种对单位的老看法。

第一种看法：单位只是约定。 一米多长、一千克多重，本来就是人定的。你可以把一米定得长一点，也可以定得短一点，只要大家都用同一个，就不会乱。法国数学家庞加莱讨论几何与测量时，有一个很有影响的说法〔转述，见庞加莱《科学与假设》1902〕。大意是：许多看似描述自然的基本原理，其实是方便的约定。

这种看法对在哪里？

第一，它说中了单位的任意性。一米为什么是这么长，而不是长百分之十？没有什么自然的道理。英制的一英尺、中国的一市尺、古罗马的一步，都同样“能用”。

第二，它说中了单位的社会性。一个单位能成立，靠的是大家都认。秦的诏版、法国的法令、《米制公约》，都是约定的工具。

一个日常的例子。你去买鞋，中国的鞋码、欧洲的鞋码、美国的鞋码，三套数字完全不一样。同一双脚，在这边是 40 码，在那边是 7 码，在另一边又是 25 厘

米。三套都能用，没有哪一套“更对”。你只要知道自己在哪一套里，就不会买错。这就是约定的力量。

第三，它防住了一种迷信：以为“米”这个长度本身就藏在自然里，等着被发现。

第二种看法：单位应当取自自然。 这是 1791 年那批学者的梦想。

他们觉得，靠国王的脚、靠一件实物的单位，迟早会坏、会丢、会被人改。只有取自自然的单位，才能“属于所有的时代”。英国物理学家麦克斯韦在十九世纪也说过类似的话〔转述，见麦克斯韦 1870 年在英国科学促进会数理组的主席演讲〕。大意是：真正永久的标准，不应到地球的尺寸里去找。要到原子的波长、振动周期和质量里去找。

这种看法对在哪里？

第一，它说中了实物标准的脆弱。一根棒会弯，一块铁会锈，一只方升会丢。

第二，它说中了一种更深的要求。一个单位，最好任何人在任何地方都能独立复现，不必跑到某个保险库去比一比。

这种看法也有一个日常的影子。老人做衣服，用手一拃、一庹去量布，说“一拃半宽”。手长在自己身上，走到哪里都带着，不怕丢。可是你的一拃和我的一拃不一样长。取自身体，就带着身体的差别；取自地球，就带着地球的不规则。1791 年的学者想要的，是一个连这些差别都没有的“自然”。

第三，它指出了方向。后来单位制的历史，正是沿着麦克斯韦指的这条路走的。

◆ 五、两种看法各停在哪里

可是两种看法，都停在了一个地方。

“只是约定”停在了这里：它说不清为什么约定也会出错。

如果一千克只是一个约定，那块圆柱说自己多重就是多重，它就永远不会“错”。可是历史上，人们真的发现它“变了”。一个约定怎么会变？变了，又是相对于什么而言？

约定论能解释单位为什么可以任意定，解释不了单位为什么需要一次次被检查、被重新担保。

“取自自然”停在了这里：它以为自然里现成摆着一个单位，只要去量。

1791 年的学者以为，子午线的一千万分之一，是一个现成的、等着被量出来的长度。结果量了七年，量出来的那一米，和“自然的那一米”差了五分之一毫米。而且量得越准，差得越清楚。

问题不在测量不认真。问题在于，“子午线的长度”本身并不是一个完全现成摆好的东西。地球不是正圆，子午线各段不一样，海平面怎么算，测量用的尺又靠什么担保。每一层都要人去定，去量，去对。

这两种看法其实共用一个前提：单位要么是人心里的约定，要么是自然里现成的长度。一个在理念那头，一个在客体那头。都没有问：一个单位，是怎样在人的理念和现实的痕迹之间，一次次被对出来、立起来的。

这正是第 2 章说的那个“客体变量没人动”的地方。

◆ 六、本书的说法：单位是理念刻进现实的痕

先把几个工作词讲清，跳着读的读者从这里接上。

本书说的**符号**，是一团关系结晶下来、能带走的东西，叫**粒子态**，判据三条：稳定、整体、独立。符号分三界。**理念符号**，是概念、定义、公式。**现实符号**，是现实自己沉下来、不需要解释者也立得住的痕。**自我符号**，是沉在人身上的习惯。**对不上**，是两种站稳的东西撞在一起说不通。**回写**，是新结晶的东西反过来改写原先的条件。

用这些词，本书对单位的说法有四句。

第一句：一个单位，是一个理念符号，给自己造了一个现实的身体。

“一米”首先是一个理念：一个大家同意拿来比长短的长度。可是光有理念，量不了任何东西。它要有一个身体：一根棒、一块铁、一只方升。

这个身体有一个特点：它一旦做出来，它的长短轻重就自己立在那里，不需要谁去解释它。国际米原器上两道刻线之间的距离，不管有没有人在看，都是那么长。在这一点上，它像一道刻痕、一条河床。

可是要小心：那根棒之所以是“米”，不是它自己说的。它的金属长度是现实的，它“是米”这个身份，是第三种命名：一次制度身份的设立。这两样要分开。

一根棒，金属长度是现实的痕，“米”是挂在它身上的制度身份。

第二句：单位站稳，要三界一起站稳。

理念上，它要有一个清楚的定义。现实上，它要有一个可以去比的实物或装置。自我上，它要沉进千千万万人的手和眼里。罗振华放砝码的手法，卖菜大姐看秤的眼光，你买布时用手一拃估一尺的习惯，都是。

秦的一升，现实上有方升，制度上有诏书，自我上有一代代量粟的手。法国的米，理念上有子午线定义，现实上有档案米和国际米原器。自我上，要花几十年让法国人改掉旧尺的习惯。法国 1795 年就颁布了米制，可是民间反抗很大。1812 年，拿破仑一度允许旧单位回潮。直到 1840 年，才重新强制只用米制。

自我一角站稳得最慢。

第三句：单位的历史，是对账方向的一次翻转。

这是本章要讲的核心。

最早，一个单位的权威在实物上。方升说一升多大，就多大；米原器说一米多长，就多长。别的一切东西，包括光速、包括地球的大小，都要拿这个实物去量。实物是账的这一头，自然是被量的那一头。

后来，人们看到实物会变。实物和实物之间对不上了，实物和自然之间也对不上了。

于是对账的方向翻了过来。现在，是先把一个自然常数的数值定死，再用它去定出单位的大小。光速不再是一个“被量出来”的数，它被规定成一个准确的数；米，反过来由光速去定。

这就是本书说的回写：一个原本拿来量自然的现实符号，被它量出来的理念符号反过来改写了。

第四句：制度身份和理论对象，在这里交织，可是不能互相冒充。

1983 年的米定义里，“光速是 299,792,458 米每秒，一个字都不差”，这是一个制度上的规定，属于第三种命名。国际计量大会投了票，它就成立了。

可是“光速在真空中是一个不变的常数，对任何观察者都一样”，这是一个物理理论的判断，属于第四种命名。它来自狭义相对论，来自一百多年里无数次实验的对账。

两者交织在一起：如果光速不是常数，拿它来定米就没有意义；所以制度身份是建在理论对象上的。

可是两者不能互相冒充。计量大会的投票，不证明光速是常数，那要靠物理学。物理学说光速是常数，也不等于它自动成了法定的标准，那要靠一次国际的制度设立。

将来如果有一天，某种实验真的发现光速在某种条件下会变，物理学会先熔开，制度再跟着改。顺序不能倒过来：不能因为法律规定了光速，就说它不能变。

下面这张表，把单位的几次换法放在一起：

时间	单位怎样定	担保在哪里	逼出更替的对不上	命名属哪一种
前 344 年起	商鞅方升，秦诏版统一度量	一件实物＋皇帝的诏令	疆域合一而度量七套	第三种：制度身份
1791 年	子午线四分之一的一千万分之一	一个理念定义	旧制度单位繁杂；秒摆随纬度变	第三种：法定定义；地球的形状与大小是它依托的测量对象
1799 年	档案米（铂尺）	档案馆里的一件实物	定义需要一个能去比的身体	第三种：制度身份
1889 年	国际米原器（铂铱 X 形尺）	塞夫尔保险库里的实物	各国需要共同的原器	第三种：国际制度身份
1960 年	氪-86 某条谱线波长的 1,650,763.73 倍	原子的光谱	刻线有宽度，实物难复现	第三种，建在第四种（原子谱线）上
1983 年	光在真空中 1/299,792,458 秒内走过的路程	规定了数值的光速	激光测光速的精度已超过米本身	第三种，建在第四种（光速不变）上

时间	单位怎样定	担保在哪里	逼出更替的对不上	命名属哪一种
2019 年	千克由普朗克常数定	规定了数值的普朗克常数	千克原器与复制品之间漂移	第三种，建在第四种（量子常数）上

表里 1960 年和 1983 年两行，分别出自第十一届、第十七届国际计量大会，要补几句。

1960 年，米第一次离开了实物。它被定成氪-86 原子发出的一种橙红色光的波长的若干倍。原子比金属棒稳定得多，任何一个实验室只要有这种灯和干涉仪，都能复现一米。

到了七十年代，激光出现了。用激光测光速，精度越来越高，高到一个尴尬的地步。光速测不准，不是光的问题，而是“米”本身定得不够准。测光速的误差，主要来自那条氪谱线的米。

被量的东西，比量它的尺还稳。

这又是一条找得到的缝。1983 年，国际计量大会把光速的数值固定下来：每秒 299,792,458 米，不再测量。米，反过来定义为光在真空中 1/299,792,458 秒里走过的距离。秒的定义，第 8 章讲过，那是铯原子钟的事。

从这一天起，问“光速到底是多少”，答案是一个规定，不是一个测量。要是今天有人用更精密的仪器去“测光速”，他实际上测的，是他手里那把尺准不准。

这就是对账方向的翻转。

◆ 七、一个完整的例子：一千克的最后一次称量

米在 1960 年就离开了实物。千克却又在那块圆柱上待了五十多年。它是国际单位制七个基本单位里，最后一个还靠实物来定的。

故事先从那条缝讲起。

1889 年，国际千克原器被批准时，同一批还造了几十个复制品，分给各签约国，作为各国的国家原器。另有几个“官方见证件”，和原器一起放在塞夫尔。中国后来也有自己的国家千克原器。

每隔几十年，各国把自己的原器送回塞夫尔，和国际原器比一次。

这种比对，比你想的要麻烦。国际原器平时不许碰，比对那一次才从保险库里取出来。取出来以后，要先清洗。清洗有一套专门的规程：用麂皮蘸着乙醇和乙醚擦拭，再用蒸汽冲洗。不洗，表面吸附的污染会让它重上几微克；洗了，又难保不把它的表面擦掉一点点。

连“它到底有多重”这个问题，都和“洗不洗、怎么洗”绑在一起。一块号称“就是一千克”的东西，它的一千克，要靠一套人定的擦拭手法来维持。这件小事，已经透出那条缝的影子。

这种“定期检定”，历史上大规模地做过几次。1889 年一次，二十世纪四十年代一次，1989 年前后又一次。

到了第三次，比出来的结果让人不安。各国原器和见证件，和国际原器之间，出现了几十微克的差别。一百年里，它们彼此“漂”开了，大约五十微克，也就是五千万分之一。

可是没人能说清，到底是复制品变重了，还是国际原器变轻了。

这正是“只是约定”那种看法最尴尬的地方。按定义，国际千克原器就是一千克，它不会错。如果它真的变轻了五十微克，那么按定义，是全世界其他所有东西都变重了五十微克。电子、原子、地球，都跟着重了一点。

这当然说不通。可是在那套定义里，又没有别的地方可以去申诉。

罗安那句“万一它自己变了呢”，问的就是这条缝。一个只对自己负责的实物，和它的复制品对不上，和整个物理学也对不上。

接下来的二十多年，计量学家走了两条路，要把千克从实物上解开。

第一条路：数原子。

如果能精确知道一块东西里有多少个原子，每个原子多重，就能算出它有多重。德国、日本、意大利等国的计量院合作，用高纯度的硅-28 做成几乎完美的球体，这项合作叫国际阿伏伽德罗协作。球打磨得极圆，有一个常用的比喻：如果把它放大成地球那么大，最高的山和最深的谷相差只有几米。

量出球的直径，再用 X 射线量出硅晶体里原子的间距，就能数出球里的原子数。这条路定出的，是阿伏伽德罗常数。

第二条路：用电来称重。

1975 年，英国国家物理实验室的基布尔提出一种装置，后来叫基布尔天平，以前叫瓦特天平。它的原理，是让一个线圈里的电磁力去平衡一块砝码受到的重力。再用量子物理里的两种效应，把电压、电阻和普朗克常数连起来。这样，一块砝码的质量，就可以用普朗克常数、光速和秒来表示。

美国、加拿大、法国等国的计量院都建了这种天平。中国计量科学研究院走了一条相近又不同的路，研制了“能量天平”。

普朗克常数，是 1900 年普朗克在研究黑体辐射时引入的一个数。柏林的实验家把黑体辐射测到了长波那一头，读数和当时通行的维恩公式对不上。普朗克先凑出一个能对上读数的新公式，再为它找理由，引入了“能量一份一份”的假设，带出了这个常数。他在 1900 年 12 月的一次学会报告里讲出了这个推导。一百年后，这个从一次对不上里结晶出来的理论对象，被拿来给千克当担保。

两条路要互相对账。数原子算出来的普朗克常数，和电天平量出来的普朗克常数，要在极小的误差内一致，才能放心地把它定死。

这一步走得并不顺。在一段时间里，两条路的结果差得比各自声称的误差还大。两边对不上。各国实验室又花了好几年，去查各自的仪器、各自的修正项，一点一点把差距收窄。

到了 2010 年代中期，几个独立实验室、两条独立的路，给出的数值终于对上了。国际上事先立了门槛：至少三个独立实验，相对不确定度都不超过一亿分之五，其中至少一个不超过一亿分之二。

2018 年 11 月 16 日，第二十六届国际计量大会在法国凡尔赛投票。各成员国一致通过，重新定义千克、安培、开尔文、摩尔。普朗克常数被固定为：

6.62607015×10^{-34} 焦耳·秒，一个字都不差。

新定义从 2019 年 5 月 20 日起生效。这一天是世界计量日，《米制公约》签订的周年。

那块在三层玻璃罩下待了一百三十年的铂铱圆柱，从这一天起，不再是一千克的定义。它变成了一块很精密、很珍贵的砝码，它的质量，今后要反过来用普朗克常数去量。它会有一个不确定度，就像世界上任何一块别的砝码一样。刚改定义时，这个不确定度约为十微克。

用本书的话把这个例子从头走一遍：

- **那条缝**：国际原器和它的复制品之间，漂开了约五十微克。实物对实物，对不上。按旧定义，又没有地方去申诉。这条缝，在 1989 年前后的检定数据里，可以独立指认。
- **两条路**：数原子和电天平，各自把千克连到一个自然常数上。两条路之间又出现了对不上，逼着各国实验室再去查自己。
- **结晶**：几个独立的结果对上了，一个数值被定死。新定义稳定，不再随一块金属变。它整体，七个基本单位一起由七个常数定下，彼此连成一张网。它独立，任何一个有足够设备的实验室，都能不去巴黎、就地复现一千克。
- **回写**：原来拿来量一切的那块金属，现在被它量出来的常数反过来量。对账的方向，翻了过来。

这次回写，还有一层能量账，看得很清楚。

几十个国家的计量院，几十年的经费和人力，一代计量学家的职业生涯，都付了进去。这是动能。托住它的，是《米制公约》以来一百多年的国际制度，是量子物理一百年的理论网，这是势能。新定义通过以后，它被写进各国的法律、教科书、检定规程。它要在千千万万像罗振华这样的人手里重新站稳，这是正在建起来的内能。

◆ 八、“一个数怎么能当砝码”

回到罗安的那个问题：一个数，怎么能当砝码？

这个问题问得好，因为它问到了这次回写最容易被误解的地方。

不是说，从此不要砝码了。罗振华的铝箱里，还是那一排排金属砝码。市场里的秤，还是要用砝码去检。

变的是那条检定链的最上面一环。

以前，链的最顶端，是巴黎的一块金属。罗振华的砝码，往上追，追到市里、省里、北京，最后追到那块圆柱。圆柱再往上，就没有了。它不对任何东西负责。

现在，链的最顶端，是一个写进定义的常数，加上能把这个常数变成一块砝码的装置。罗振华的砝码往上追，追到北京以后，再往上，追到的是一台天平、一套量子电学的测量，最后追到普朗克常数。这个常数不放在任何一个保险库里，任何一个有能力的实验室，都能拿它来复现一千克。

这就是为什么一个数能当砝码。不是数字自己变成了一块铁。这个数，被一整张物理学的网托着，被一整套国际制度定着。它又能被装置一次次重新展开，成为一块真的、能放上秤盘的质量。

这和上一章讲的公式，是同一回事。一个常数，压进了一张理论的网，也压进了一套制度。它能被带到任何一个实验室去，也能在那里被展开回一块砝码。

这里也要防一个误会。

有人会说：既然现在单位都由自然常数定了，单位就终于“取自自然”了。1791 年的梦想实现了，单位从此是被发现的了。

不是这样。

普朗克常数的数值，为什么定成 6.62607015×10^{-34}，而不是别的数？因为要让新的一千克，和旧的那块圆柱在当时的精度内一样重。这是一个历史的约定，为的是让罗振华铝箱里的砝码不用全部换掉，让卖菜大姐的秤照常用。

常数是物理学的理论对象，它的数值被定死，是一次制度身份的设立。前者靠物理学的对账，后者靠国际计量大会的投票。两者交织在一起，才有了今天的千克。

单位不是从自然里被拿出来的，也不是人凭空约定的。它是理念和现实一遍一遍对出来、刻进去的。

◆ 九、放回日子里

那天晚上，罗振华和女儿聊到很晚。

罗安在手机上查了查，说：爸，你们那个检定链，现在最上面是普朗克常数。那你算不算也和普朗克连上了？

罗振华想了想，说：算吧。我手里这个砝码，往上一级一级追，最后追到那儿。

他又说：不过，要是我哪天偷懒，一台秤不认真检，那这条链在我这儿就断了。上面定得再准，到了菜市场也没用。

这句话说得很对。一个单位，在巴黎、在北京定得再好，最后要在千千万万个菜市场、加油站、医院、工厂里站稳。那一端，靠的是罗振华这样的人，一台秤一台秤地去对。

这是单位的自我一角。它站稳得最慢，也最容易被忘记。

罗振华自己干的这一行，也有一段离他很近的历史。

他小时候，听奶奶说过“半斤八两”。奶奶那一辈人买东西，一斤是十六两，半斤正好是八两，这句话就是“彼此差不多”的意思。可是到了罗振华上学的时候，一斤已经是十两了。

这个变化，来自 1959 年。那一年，国务院发布命令，统一全国的计量制度。米制定为基本计量制度，市制暂时保留。市制的一斤改为十两，一市斤等于五百克。后来，1984 年国家颁布了法定计量单位，1985 年通过了《计量法》，1986 年施行。罗振华这一行做事的依据，就是从那里来的。

这一次统一，和秦始皇的诏版、法国的米制法令，是同一类事：一次制度身份的设立。它也有同一种难处：制度改了，人手上的习惯不会一夜改。罗振华刚工作那几年，城郊集市上还偶尔能见到老杆秤，秤杆上的星点密密麻麻。这样的秤，他也一杆一杆去查，碰上星点磨花、校不准的，就劝人换掉。

那时候他还不知道，自己劝人换掉的那杆秤，和巴黎地下室里那块圆柱，是同一条故事线上的两头。一头是一个人手上的老习惯，一头是一个国家、一群国家的标准。中间要连起来，靠的就是他手里那只铝箱。

你的生活里，到处是单位。

买菜论斤，喝水论毫升，体温论摄氏度，开车论公里，手机流量论 G。你很少会想：这一斤，凭什么是一斤？你信它，是因为背后有一条长长的检定链，一头连着菜市场的秤，一头连着一个写在定义里的常数。

也有一些“单位”，是你自己身上的。做饭时的“一小勺”，裁衣时的“一拃”，走路时的“十分钟的路”。它们没有法定的定义，可是对你很准，因为你一遍遍用过，它们沉在了你身上。

偶尔你会碰到它们对不上的时候。换了一把新勺子，菜就咸了。换了一双新鞋，“十分钟的路”走了十五分钟。

那一刻，你就站在罗安问的那个问题前面：我这把尺，又是拿什么去对的？

这一问不必让你不安。它只是在提醒：一切的量，都要有一个去对的地方。对的地方越稳，越多人认，越能被重新复现，你手里那把尺就越可靠。两百多年来，人类在单位上做的事，就是挪动这个“去对的地方”。从一个国王的脚、一根金属棒，一步步挪到了一张连着整个物理学的网上。

带 走 的 话

单位是理念给自己造的现实身体；从铂铱棒到自然常数，对账的方向翻了过来。

小　账

约定论关上了“约定为什么会错”的门，取自自然论关上了“自然的那一米为什么量不出来”的门；本书把单位看成三界一起对出来、刻进去的痕，两扇门都打开了。

“人类终于找到了永恒不变的单位”——一句“找到”，把千克原器的漂移、两条路之间的对不上、一次国际投票的制度设立，收回成了一次对自然的发现。

想 一 想

1. 你家里有没有一把“自己的尺”——一把勺、一个碗、一段路——你一直拿它量东西？它上一次和你对不上，是什么时候？
2. 你在工作里信任的某个“标准”，往上追，最后追到哪里？那一环由谁来担保？
3. 如果一条检定链在你这一环最容易断，你会在哪里多花一点力气？

◆



第　五　编

共同体：托住结晶的场

导　语

第五编只做一件事：看一群人怎样托住一次结晶，又怎样在不知不觉中把它锁住。

第 13 章从北京一个实验室的组会讲起。博士后许嘉禾看见电阻曲线上一个小鼓包，一屋子人在同一秒看出“恒温器的老毛病”。弗莱克的思想集体对在哪里、停在哪里，魏格纳的大陆为什么等了五十年，都在这一章。学派是一张有势能的网，同一股力既托住新结晶，也把不合的读数拽回旧形状。

第 14 章坐到南京期刊编辑韩冬梅的桌前，她手里是两份意见相反的审稿单。从奥尔登堡的《哲学汇刊》、加菲尔德的引文索引，到 1936 年那份让爱因斯坦生气的审稿意见，本章把论文、评审、引用看成一套回写装置，各自只对一部分账。

第 15 章回到新加坡。周以宁讲了八年的饼干与萝卜，在学生辛苒预注册的重做里，效应接近零。第 3 章提过的发生型稳定与锁化型稳定，在本章借两座桥完整展开：站得稳，不等于方向对。

读这一编时，请带着一个问题：一个结论的稳，是从哪里来的？

13

第 13 章

思想集体与学派

这一章的问题

一屋子人为什么同一秒看出同一个东西？许嘉禾那道小鼓包，该由谁来接住？

◆ 一、组会上那道小鼓包

许嘉禾三十一岁，在北京一家实验室做博士后。她做的是低温下的材料测量，把一块薄薄的样品降到接近绝对零度，看它的电阻怎么随温度变。

来北京之前，她在南方一所大学读博，跟的是另一个课题组。那边的老师有句口头禅：曲线上任何一个小鼓包，先当它是真的。

到北京的第三个月，她在组会上放了一张图。电阻曲线在零下两百六十多度的地方，鼓起一个小包，很小，不到百分之一。

她刚讲到一半，坐在对面的两个师兄已经笑了。导师傅启明扶了扶眼镜，说：“那是恒温器的老毛病，温度一飘就鼓一下。下一张。”

没有人争论。也没有人觉得需要争论。屋里七八个人，看同一张图，几乎在同一秒看出了同一个东西——一个仪器的毛病。只有许嘉禾看见的是一个信号。

那天晚上她没睡好。让她睡不着的不是被否定，是另一件事：她在南方学了五年，学会的不只是怎么接线、怎么降温、怎么拟合曲线，她还学会了怎么“看”。而北京这一屋子人，学会的是另一种看。两种看，在她一个人身上撞上了。

更让她不安的是，又过了两个月，她再看到类似的小鼓包，第一反应也变成了“温度飘了”。她开始分不清：这是她学到了，还是她被同化了。

这一章要讲的，就是这屋子人的那“同一秒”。一群人为什么会看见同样的东西？这种一起看见，是在托住科学，还是在遮住科学？一个人单枪匹马看见了别人看不见的东西，为什么还得有一张网接住他？

◆ 二、一位医生写下的群体之眼

第 3 章已经借弗莱克讲过：一个科学事实，是在理念符号与现实符号反复对账中结晶出来的。那里用的是他那本书的主例子。本章不再重讲那个例子，只把他书里另一半东西拿出来——人群。

弗莱克的生平和他那本 1935 年的书，见第 3 章。

书里有两个词，是本章的骨架。

第一个词叫“思想集体”。 弗莱克说的不是一个机构、一个学会，而是一群因为相互交流想法、彼此影响而连在一起的人。实验室里一起喝咖啡、一起改论文、一起看图的那七八个人，就是一个小小的思想集体。一个学科、一个时代的某一派人，是更大的集体。

第二个词叫“思想风格”。 弗莱克给它的定义大意是：有方向的知觉，以及对所知觉之物相应的思维加工与客观加工〔转述，出处：弗莱克 1935，第四章〕。说白了，一个集体会养出一种看东西的方式。该看什么，不该看什么；什么算问题，什么不算问题；什么样的答案像样，什么样的答案一看就是外行。

弗莱克自己就是一个活例子。他是医生，又是做细菌学和血清学的实验员，在利沃夫的医院和实验室之间来回走。

他常年在两种集体里干活：一边是看病人的临床医生，一边是看试管的实验员。同一个“病”，医生看见的是一个人身上的一串症状，实验员看见的是一支试管里的一次反应。两边说的是同一个字，指的却不全是同一个东西〔转述〕。本书推想，他后来书里那些关于集体与风格的话，多半和这条夹缝有关。

许嘉禾那一屋子人的“同一秒”，就是思想风格在起作用。

弗莱克还画了一张同心圆。圆心是一小撮专门家，他叫“内圈”；外面是受过教育、关心这门学问的普通人，他叫“外圈”。一个想法会从内往外走，走一圈，变一次样。

最里面是期刊上的科学：句子小心，带着“我们认为”“也许”“在本实验条件下”，作者的名字和个人的犹豫都还看得见。往外一圈，是手册和教科书里的科学：作者的名字没了，犹豫没了，句子变成“某某是某某”。再往外，是通俗读物里的科学：生动、简单、确定，还常常带一个形象的比喻。

越往外，事实越硬。

这一点你在日子里天天见到。一篇论文说“在小鼠身上，某种饮食与某项指标的改善有统计关联”。到了教科书，只剩“某饮食有益某指标”。到了短视频，就成了“吃它就能治病”。每一圈都没有故意撒谎，可每一圈都把前一圈的“也许”磨掉了一层。

弗莱克还写到一种他称为“观点体系的顽固倾向”的东西〔转述〕。一个思想风格一旦成形，和它不合的东西会遭遇几种命运：先是根本想不到会有矛盾；再是矛盾的东西出现了，却看不见；看见了，就不说；不得不说，就花大力气把它解释成例外。最后，人们反而会在现实里看出那些原先就期待的东西——他把这叫作“幻觉的和谐”〔转述〕。

许嘉禾的那个小鼓包，就站在第二步和第三步之间：大家看见了，然后用“仪器老毛病”把它解释掉了。

一个人是怎样进入一种风格的？弗莱克的描述大意是：入门不是先读懂道理再去看，而是先在权威的指点下照着看、照着做，看久了，做久了，道理才跟着来〔转述〕。入门的人一开始是“信”老师的，这份信不是盲从，是一种暂时把自己的眼睛交出去的练习。

医院里一位新来的护士，第一年最常听到老护士说的一句话是：“这个病人不对劲。”她看监护仪上的数字，都在正常范围，看不出哪里不对。老护士说不清，只说“脸色不对，说话的劲儿不对”。两个小时后，病人果然出了状况。

一年以后，这位新护士也会说“这个病人不对劲”了，同样说不清为什么。她并没有学到一条新的规则，她身上长出了一种新的看法。这种看法很宝贵，能救命；它也会让她在某一天，对一个不符合“不对劲”样子的危险病人视而不见。同一种眼睛，两面都在。

可是弗莱克并不悲观。他同时写到：一个人往往同时属于好几个集体。一位医生，又是天主教徒，又是登山协会的会员。想法在不同集体之间走动的时候，会被改写，会走样，会出新东西〔转述〕。新的想法常常就出在这种跨圈子的走动里。

许嘉禾就是这样一个跨圈子的人。

◆ 三、先写足他对在哪里

这本书怎样被库恩读到、怎样慢慢进入书单，见第 3 章；库恩的范式与熔开再结晶，见第 6 章。

弗莱克对在哪里，要先说足。

第一，他把“人群”请进了认识论。 在他之前，讲科学知识怎么来，大多讲一个人：一个观察者，一双眼睛，一个头脑，面对自然。弗莱克说，这个孤零零的观察者是虚构的。没有人是从零开始看的，每一双眼睛都是被一个集体训练过的眼睛。

第二，他说清了“看见”是学来的。 这一条第 3 章说过。放在本章要补的是：练出那双眼睛的不是一个人，是一个集体在一遍遍指点、纠正。

你学开车时也一样。教练说“看后视镜里那辆车在加速”，你看半天只看到一辆车。半年以后，你余光一扫就知道它要超你。

第三，他没有走向“怎么说都行”。 主动的关联与被动的关联，第 3 章讲过：集体可以选单位、选分类、选问题，读数怎么出来却不由它说了算。一个集体再强，也得在这堵墙前面停下。

第四，他看见了学派是一种力量，而不只是一种偏见。 后来的科学史给他的看法提供了大量例证。这里举两个。

哥本哈根。 1921 年，尼尔斯·玻尔在哥本哈根的理论物理研究所开张。此后十几年，这座楼成了量子物理的集散地。海森堡、泡利、伽莫夫、狄拉克等年轻人来来去去，住几个月或一年，再带着想法回到各地。

哥本哈根的风格，是没完没了地谈。玻尔习惯一边走一边说，一句话改几遍，抓住一个矛盾不放。1927 年，海森堡在这里写出了不确定性关系；同年秋天，玻尔在意大利科莫讲出“互补”的想法。这些想法刚出来的时候都很别扭，很多同行不舒服。哥本哈根这张网，托住了它们足够长的时间，让它们磨成后来教科书里的样子。

哥本哈根的风格，在一次两种风格的正面相撞里看得最清楚。

1926 年，量子力学同时有两套写法。一套是海森堡等人在哥廷根和哥本哈根做出的矩阵力学，抽象，不给图像，电子在能级之间是“跳”过去的。一套是薛定谔

在苏黎世写出的波动力学，用的是物理学家熟悉的连续方程，看上去能画出一幅波的图景。两套写法算出来的谱线一样，看世界的方式却很不一样。

那年秋天，薛定谔应邀到哥本哈根。按后来流传的说法，玻尔从早到晚跟他谈，谈到薛定谔病倒在玻尔家里，玻尔还坐在床边继续谈。薛定谔说过大意如此的话：如果还要保留这些该死的量子跳跃，他后悔掺和进量子理论〔转述，据海森堡回忆〕。

这一次相撞，没有谁说服谁。可是两种风格在同一间屋里撞，撞出来的东西留了下来。两套写法在数学上等价，那一年薛定谔等人就给出了论证，更严格的证明要等到几年后冯·诺伊曼的工作；波函数要怎么理解，又引出了玻恩的概率解释和后来几十年的争论。今天的物理学生学的，是两种风格熔在一起之后的那个样子：用薛定谔的方程，讲哥本哈根的话。

一个学派的力量，不只在它自己内部有多和谐，也在它肯不肯把另一种风格请进门来吵。哥本哈根那几年肯吵，这是它的场之所以有势能的一部分原因。

卡文迪许。 剑桥的卡文迪许实验室 1874 年建成，第一任主任是麦克斯韦。到二十世纪上半叶，这里出了一串改变物理学的成果：1897 年 J. J. 汤姆孙测出阴极射线粒子的荷质比；1932 年，查德威克用实验确认了一种不带电的粒子，后来叫中子；同一年，考克饶夫与沃尔顿用加速的质子打碎了锂原子核。

这里要按本书的口径说清一件事：中子这个名字，属于“提出理论对象”那一类命名。卢瑟福在 1920 年前后就设想过原子核里可能有一种中性的粒子；十多年里，它是一个理念符号在等现实符号来对账。查德威克那一年的读数，才让它结晶。命名在先，结晶在后，两件事不能混成一件“发现”。

卡文迪许的风格，是动手、精密、省钱。有一种流传很广的说法，说那里的传统是“用封蜡和细绳做实验”。一个刚来的研究生，会在几个月里学会：什么样的读数算干净，什么样的装置是糊弄自己，一个结果要怎么验才拿得出手。

卡文迪许还有一个常被提起的故事，正好落在两种风格的接缝上。1950 年代初，一个学生物出身的美国年轻人沃森，和一个学物理出身、转向生物的英国人克里克，在卡文迪许的一间办公室里搭档。他们不做实验，只搭模型。

他们手里的关键数据，有一部分来自伦敦国王学院富兰克林等人拍摄的 DNA 的 X 射线衍射照片；他们是怎么看到那些数据的，至今仍有争议，富兰克林本人的贡献长期被低估。1953 年，双螺旋模型发表。

这个故事里，没有哪一个集体单独做成了这件事。国王学院有最好的衍射照片，风格是谨慎、先把数据做扎实；卡文迪许这两个人有搭模型的胆子，风格是先猜一个整体的形状再去对数据。两种风格隔着一座城对不上，又借着人和照片的走动连上了。结晶发生在两张网的接缝处。

这就是学派的力量。一个年轻人身上一个正在成形（介生）的想法，放在荒野里会散掉；放在这样的场里，有仪器、有人懂、有人肯花一下午挑毛病，它就能长成形。

第五，他让人看见了学派的另一面。 同一个卢瑟福，在 1933 年前后公开说，指望从原子嬗变里得到能源是“空谈”。一个最能托住新东西的场，也会在它自己的边上，把另一些新东西拦在外面。

学派托住结晶，学派也拦住结晶。弗莱克把这两面都写进了同一本书。

◆ 四、他停在了哪几处

弗莱克对的地方很多。他停下的地方，正好是本书接着要走的一步。

第一处：集体被写成了新的“主体”。

旧的认识论里，是一个人在认识世界。弗莱克把这个人拆掉了，换上一个集体：是思想集体在“产生”事实，是思想风格在“决定”看见什么。

这一换，前进了一大步，可那个结构没变：仍然有一个发动者在那里，只是从一个人换成了一群人。集体像一个放大了的头脑，事实是它的产品。

本书的口径是：集体也不是先在的。哥本哈根那群人，不是先有一个“哥本哈根学派”，再由它去产生量子力学；是那几年里一次次的争吵、一张张对不上的光谱、一封封来往的信，把那群人和那套理论一起显了出来。学派和它的结论，是同一次发生的两面。

一支街头乐队也是这样。不是先有一个“乐队”，再由它去写出一种曲风；是几个人在地下室里一遍遍地排，有人抢拍，有人跑调，吵了三年，那种曲风和那支

乐队一起成了形。你今天说“这是他们的风格”，好像风格是乐队的一件财产。可是拆开那三年，风格和乐队是一起从那间地下室里长出来的。

这个区分有实际的用处。如果集体是先在的发动者，一个学派出了问题，人们只会想去换人、换领导。如果集体和它的结论一起发生，那么学派的毛病，就要回到那些一次次的对账里去找：哪一类读数，它很久没有认真对过了。

第二处：抵抗从哪里来，他留了一个黑箱。

他说有“被动的关联”，说事实是“抵抗的信号”，这已经摸到了门口。可这抵抗是什么？是谁在抵抗？他没有往下问。思想风格那一头写得很细，现实那一头只剩一个词。

本书把这个黑箱打开：抵抗，是现实符号。仪器读数、样品的颜色、一道感光底片上的径迹，它们在现实里沉下来，不需要哪个集体去解释，也稳稳地在那里。思想集体能决定“问哪个问题”，决定不了“读数是多少”。

第三处：他分不清稳的幻觉和稳的事实。

“幻觉的和谐”这个说法很锋利。可锋利过了头，就有一个麻烦：集体里稳住的错误，和集体里稳住的事实，在他的框架里都是集体的产物，都靠思想风格维持。那么二者怎么分？

弗莱克在这里没有给出一把尺子。这也是后来不少人把他读成相对主义者的原因。

本书的回答在下一节。先说一句判断：

站得稳，和方向对，是两个问题。

谣言也站得很稳。先问它是怎么站稳的，再问它对不对。前一个问题有答案，后一个问题才问得下去。第 15 章会把这一句推到底。

第四处：他没有算能量的账。

一个思想风格为什么有时几十年不动，有时几年就熔开？一个人从一个集体走进另一个集体，要付出什么？一个新想法要被托住，需要这张网出多少力？弗莱克只描写了顽固，没有量顽固。

这几处合起来，是同一个缺口。他有了人群，有了现实的抵抗，有了被训练过的眼睛，三样东西都在书里。可是它们没有被放进同一个三角，也没有一本能量账。

◆ 五、学派是一张有势能的网

先把本章要用的几个工作词讲清，你跳着读也不会迷路。

三界符号：理念符号是概念、假说、公式；现实符号是不需要解释者也立得住的痕，比如踩出来的小路、仪器里留下的读数；自我符号是沉在身上的习惯、手感、看东西的眼光。

对不上：两类已经站稳的符号撞在一起，彼此不合。

结晶：一个新符号站稳了，达到三条判据——稳定（反复出现，不随一次解读散掉）、整体（拆开就不再是它）、独立（能离开发生地，被带去别处）。符号就是这样一个站稳了的“粒子”。

三种能量：内能是连接度，也就是拆开它的难度；势能是周围那张网的吸引和拉扯；动能是连接被拆开、被重接的速度和方向。

回写：新结晶的东西反过来改写原先的条件。

有了这几个词，本书对思想集体和学派的说法，可以压成四句话。

先用一句大白话把这四句话的底子说出来：一个学派，是一片土（特征纠缠）。人、仪器、问题、口头禅、期刊、饭桌上的玩笑，一样样缠在一起，缠得越久越厚。新的东西要长出来，得有这片土；新的东西长不出来，往往也是因为这片土太厚、太板结。

第一句：思想风格，是集体沉在每个成员身上的自我符号。

许嘉禾的“看”，是五年里在南方课题组一次次被指点、被纠正练出来的。它稳定——她换了城市还在；它整体——她不是先看到一根线、再看到一个包、再判断，而是一眼看到“一个值得追的信号”；它独立——她把它从南方带到了北京。

三条都满足。它是一个自我符号。

北京那一屋子人身上，是另一个自我符号。那“同一秒”，是七八个人身上同一个自我符号在同时运转。

第二句：思想集体，是一张势能的网。

势能是网络的吸引和拉扯。一个新读数、一个新念头落进实验室，会被这张网往某个方向拉：往“仪器毛病”那边拉，还是往“新信号”那边拉。网越密，拉力越大。

这拉力有两种用处。

托的用处：一个刚冒头的想法，还在一锅粥（混沌）里，自己站不住。网能把它托住足够长的时间，有人帮它挑毛病，有人帮它借仪器，有人帮它把句子改得像样。哥本哈根托住了矩阵力学最别扭的那几年。

拽的用处：同一股拉力，也会把一个不合的读数拽回旧形状。许嘉禾的小鼓包，就是这样被拽成“温度飘了”的。

这两种用处是同一种力。网不会只托不拽。

把一个学派的能量账摊开，三样都在。

它的内能，是那一套共同想法的连接度。哥本哈根那几条核心说法彼此咬着：不确定性连着互补，互补连着对测量的理解，测量又连着对概率的解释。想拆掉其中一条，另外几条都会跟着晃。连接度越高，越难拆。

它的势能，是那张网对周围的吸引和拉扯。年轻人愿意来，期刊愿意登，别的实验室愿意按它的口径设计实验。一个想法落在这张网附近，就会被吸过去，按它的样子长。

它的动能，是成员每天在干的活：算、测、吵、改。动能是要一直付的。一个学派哪天不再有人去拿它的说法撞新的读数，它的内能还在，势能也还在，动能却没了。那时它看上去还很稳，其实已经从一直被检验而稳，变成了没人再检验而稳。这两种稳的分别，第 15 章细讲。

你在日子里见过同样的三样东西。一家开了三十年的老面馆，配方是内能，几十年没大改，改一样，整碗的味道都会变；熟客、街坊、口碑是势能，新来的学徒一进门就被拉着照老规矩做；老师傅每天凌晨起来和面、吊汤，是动能。老师傅退休，徒弟只照着配方抄，不再尝、不再调，面馆还能开好几年，招牌也还亮着。可是汤已经一年年地走样了，没人知道。

第三句：一个人身上两种风格对不上，是新符号的产地。

弗莱克看到了跨圈子的人会带来新东西。本书把它说得更具体：一个人同时带着两个集体的自我符号，两种看在同一双眼睛里撞上，就是一处对不上，一处势能的落差。落差能做功。

许嘉禾那晚睡不着，正是这处落差在发热。

这里有一个危险。落差会被抹平：她再过半年，完全换成北京的看法，落差就没了。她也可能完全不接受北京的看法，落差也没了，因为她不再把两种看法放在一起比。只有两样都在她身上、都在用，落差才一直在。

第四句：孤立的人也需要一张网，因为结晶要求“独立”。

一个人可以在荒野里想出一个对的东西。可一个理念符号要结晶，要能离开发生地、被带到别处，就要有地方可去。别处要有人懂它、能用它、能拿它去对自己的读数。

没有这张网，它就满足不了“独立”那一条。它可以在发明者的笔记本里稳上一辈子，仍然只是一颗没落地的种子。

这不是说共同体总是对的，孤独的人总是被冤枉。网的拽力有时是有道理的：一个想法缺了要紧的一环，网把它拦住，是网在尽职。下一节的例子，两边都有道理。

下面这张表，把弗莱克和本书放在一起看。

问题	弗莱克的说法	本书的说法
谁在认识	思想集体取代孤立的观察者	集体与它的结论在同一次发生里一起显出，不是先在的发动者
思想风格是什么	有方向的知觉与思维加工	集体沉在每个成员身上的自我符号，满足稳定、整体、独立
现实那一头	“被动的关联”“抵抗的信号”，留作一个词	现实符号：读数、径迹、样品，不需要集体解释也立得住
学派的作用	塑造看见，也造成顽固	势能之网：同一股拉力，既托住结晶，也把不合的读数拽回旧形状
新东西从哪来	想法在不同集体间走动时被改写	一个人身上两种自我符号对不上，形成落差，落差做功

问题	弗莱克的说法	本书的说法
稳的错误与稳的事实	都是集体的产物，难以区分	先问怎么站稳的，再问方向对不对；看它是否一直被现实符号重新检验
能量	不问	拆一个风格要付的动能，须超过它的连接度

◆ 六、魏格纳的大陆，等了五十年

把四句话放进一个完整的例子里。这是二十世纪科学史上最常被讲起的“孤立者”故事之一，也最常被讲歪。

一个外行，带来一处对不上。

1912 年 1 月 6 日，阿尔弗雷德·魏格纳在法兰克福的一次地质学会议上作报告，几天后又在马堡讲了一次。他当年三十一岁，是一位气象学家，研究大气和极地，不是地质学家。三年后，1915 年，他把想法写成了《海陆的起源》。

他的说法是：今天的各个大陆，曾经连成一整块，后来裂开，各自漂移到今天的位置。

先不急着说他对不对。按本书的附闸，先在史料里独立指认那条缝：他拿出来的对不上，是哪几处？

第一处，是海岸线。南美洲东岸和非洲西岸，拼起来像一张撕开的纸。这一处很多人早就注意过，单凭它说明不了什么。

第二处，是化石。同一种生活在淡水或近岸浅水中的小型爬行动物中龙，化石出现在巴西，也出现在南非；同一类叫舌羊齿的古植物，散布在今天隔着大洋的几块南方大陆上。一种不会游过大洋的生物，怎么会同时在两边？

第三处，是冰川痕迹。在今天位于热带的印度、非洲一些地方，岩石上留着古冰川刮擦的痕。热带怎么会有冰川？

这几处都是现实符号：化石在岩层里，冰川擦痕在石头上，它们不需要哪个学派去解释，也稳稳地在那里。

当时地质学的主流对第二处的解释是“陆桥”：大陆之间原先有陆地相连，后来沉到海底去了。可是同一时期，地球物理学里已经站稳了另一个说法，叫“地壳均衡”。大陆的岩石比海底的岩石轻，像木块浮在水上，不会自己沉下去。

陆桥和均衡，是地质学自己的两个理念符号，彼此对不上。魏格纳的想法，正是从这道缝里长出来的：如果陆地不会沉，那么化石两岸分布，就只能是两岸原本连在一起。

这条缝是事前可以指认的，不是事后补出来的。

网拦住了他，也有道理。

魏格纳的书出了几版，一版比一版厚，到 1929 年出到第四版。地质学界的反应，大体是冷的，在英语世界尤其冷。1926 年在纽约召开的一次专门讨论会上，多数与会的地质学家表示反对。

讲这个故事，人们常说：一群守旧的人，围攻一个看见真相的天才。这样讲不公道。

反对者手里有一处实实在在的对不上：魏格纳讲不清是什么力推动大陆。他提出过几种力，包括地球自转带来的一种“离极力”和潮汐力。英国地球物理学家哈罗德·杰弗里斯等人算过，这些力比推动一整块大陆所需的力小得太多，远远推不动〔转述〕。

还有一处：魏格纳引用了格陵兰的经度测量，推算格陵兰每年向西漂移约二十米。这个数字后来被证明大得离谱，问题出在早年经度测量的仪器和观测误差上。

一个讲不出动力、数字又不对的说法，被一张严格的网拦住，这正是网在尽职。按第四句的话说，这股拽力，是有道理的拽力。

他身上缺的，是一张能接住他的网。

可是事情还有另一面。

魏格纳是气象学家，不属于地质学的思想集体。他的想法里，用到大地测量、古生物、古气候、地球物理，横跨好几个圈子；每一个圈子的人，都只看到自己那一块，又都觉得那一块不够硬。

用三判据看他的大陆漂移。

稳定：够稳。他二十年没有放弃，一版版改，越改越完整。

整体：也够。海岸、化石、冰川、均衡，被他连成了一个整体的说法，拆掉一块就不再是它。

独立：不够。这个说法离不开魏格纳本人。地质学家拿着它，回到野外，不知道该多测什么、少测什么；它带不进任何一个圈子的日常工作里去。没有一台仪器在为它出读数，没有一个实验室在为它做对账。

它是一颗没落地的种子，不是一个结晶了的符号。

1930 年，魏格纳在格陵兰的一次考察中去世，年仅五十岁。

就在他去世前后，网上其实已经出现过一个结。英国地质学家阿瑟·霍姆斯在 1920 年代末、1930 年代初提出了一个设想。地幔里的岩石虽然是固体，在极长的时间里却能缓慢流动，形成对流，像一锅慢慢翻滚的粥。大陆可以被这样的对流带着走。这正是魏格纳缺的那一环动力。

可是这个结也没有连起来。地幔对流在当时没有任何读数可以对账，它和魏格纳的说法一样，只是一个理念符号，等着现实符号来。两个都没落地的想法碰在一起，并不会自己落地。一张网，要有结，也要有线；线，是仪器、测量、一次次能拿来对账的读数。

网，后来从海底长出来了。

接住这颗种子的网，几十年后才慢慢长出来，而且是从魏格纳想不到的地方长出来的。

二战之后，声呐把大洋底部第一次大规模地画了出来，人们看到了绵延的海底山脊。五十年代，岩石里保存的古代磁场方向被系统地测量，不同大陆算出来的古磁极移动路线彼此对不上——除非让大陆自己挪过位置。

这一处对不上，比魏格纳当年的那几处都硬，值得多说两句。

岩石在形成时，里面的磁性矿物会顺着当时的地磁场排好方向，冷却以后就固定下来。测出这个方向，就能倒推出那时的磁极大概在哪里。英国的一个研究小组用欧洲的岩石，排出了一条几亿年来磁极“游走”的路线；用北美的岩石，又排出了另一条。

地球只有一个磁极。两条路线却不重合。

要么地磁场在不同大陆上不一样，这说不通；要么是大陆自己挪了。把大西洋合上，让北美和欧洲靠回去，两条路线就大体叠在了一起。

这时，大陆会移动这件事，第一次有了一种能持续出读数的仪器和方法。磁力仪可以带到任何一块大陆上去，任何一个实验室都能复测。这正是魏格纳当年最缺的那根线。

即便如此，地质学界的多数人也没有立刻转过来。古地磁的数据有误差，样品可能被后来的变化扰动过，反对者提出的疑问很多是正当的。网又一次在尽职地拽。要等到海底的数据也连上来，两张网接成一张，结晶才真正发生。

1960 年代初，美国地质学家哈里·赫斯等人提出海底扩张：新的洋底在海岭处生成，向两边推开。1963 年前后，瓦因与马修斯等人把海底岩石的磁性条带解释为扩张时一次次地磁倒转留下的记录，条带在海岭两侧对称排开。

那一道道磁条带，是一种典型的现实符号：岩石在冷却时把当时的磁场方向“冻”了进去，不需要任何解释者，也稳稳地刻在海底。

到 1960 年代末，板块构造的框架站住了。

这里要说清一件事：结晶出来的，不是魏格纳原来那个说法。在他那里，大陆像船一样犁过洋底；在板块构造里，大陆是坐在板块上的，被一整块岩石圈驮着走。他的想法也被熔开了一次，再结晶成一个他本人没见过的形状。

把这个故事放回本章的四句话。

地质学的风格，是集体的自我符号：习惯在野外一块块地测，不相信大尺度的推想。这股风格拦住了他，有理由，也有代价。

他身上同时带着气象学、地球物理、古生物几个圈子的东西，这是落差的来源。

他缺的，是一张网：一套能为他的说法持续出读数的仪器和实践，一个能拿着它去工作的集体。等到海洋测量和古地磁的那群人连成网，这颗种子才被接住，才满足了“独立”那一条。

最后，这个故事不支持“天才对、集体错”。网先拦住了一个讲不清动力的说法，后来又接住了一个讲得清的说法。前后两次，都是网在对账。

◆ 七、放回你的组会上

回到许嘉禾。

那个小鼓包，她没有扔，也没有硬顶。她做了一件不大的事：让样品升温、再降温，反复三轮，每一轮都故意让恒温器的温度在不同地方飘一下。

如果鼓包是温度飘造成的，它应该跟着温度飘的位置走。结果，它两轮跟着走了，一轮没有。那一轮里，鼓包留在原来的温度上，一动不动。

她把三轮的曲线叠在一起，放到下一次组会上。这一次，屋里没有人笑。傅启明看了很久，说：“再换三个样品，看它在不在。”

这句“再换三个样品”，就是网开始托住她了。没有这张网，她一个人在夜里对着一条曲线，可能熬上半年也说不清它是什么；有了这张网，有人知道哪台仪器更稳，有人知道哪一批样品更干净，有人知道这种鼓包在别的材料里有没有人报过。

至于它最后是不是一个新的物理现象，这一章不必知道。重要的是那处落差没有被抹平：她身上南方的眼睛和北京的眼睛，都还在，都在用。

你多半也有过许嘉禾的处境。换了一家公司，换了一个部门，换了一座城市。新地方的人看一份报表、一个客户、一次故障，有他们一眼就看出来的东西；你带来的那双眼睛，看见的是另一样东西。

头几个月最难受。你会发现自己要么想把旧眼睛藏起来，赶紧学会新看法；要么死守旧看法，觉得新地方的人都不懂。

这两条路，都会把落差抹平。

另一条路更费劲：两双眼睛都留着。新地方的看法，你认真学，它是这张网多年对账留下的东西，大多有道理；旧地方的看法，你也不扔，它是你身上最可能长出新东西的地方。遇到两双眼睛看出不同结果的时候，别急着判谁对，去做一次能把两者分开的小检验。

还有一件事要记住。如果你觉得自己看见了一个别人都看不见的东西，不要急着给自己封一个“孤独的魏格纳”。先问两个问题：它缺的那一环是什么？谁能帮我补上那一环？

如果你是带团队的人，处境又反过来：你就是那张网。新来的人带着另一双眼睛进门，在你的会上说了一句“我觉得这里不对”，满屋的人笑了。那一刻，你可

以像傅启明第一次那样说“下一张”，也可以像他第二次那样说“再换三个样品”。

两句话都不难说。前一句守住了网的效率，后一句给了落差一个做功的机会。不必每次都说后一句，那样网会被拖垮；可如果你的团队一年到头只听得到前一句，这张网就在慢慢从托住结晶，变成只会拽回旧形状。

一个想法要结晶，要能被别人带走。能带走它的，是一张网。

带 走 的 话

学派是一张有势能的网，同一股力既托住新结晶，也把不合的读数拽回旧形状。

小　账

弗莱克关上的门：把集体写成产生事实的新主体，又把现实的抵抗留成一个黑箱；本书打开的门：风格是集体的自我符号，集体是势能之网，抵抗是现实符号，三者放进一个三角里算账。

发生被收回为发现的那一下：把魏格纳讲成“天才早已看见真相，集体迟迟不肯承认”。这就把一次五十年才结晶、结晶后又换了形状的发生，收回成了一次被耽误的发现。

想 一 想

1. 你所在的单位或圈子里，有没有一种大家“同一秒”就看出来的东西？它是怎么被练进每个人眼睛里的？
2. 你从上一个地方带来的那双眼睛，现在还在用吗？它和新地方的看法，在哪件事上最常对不上？
3. 你心里有没有一个“别人都不理解”的想法？它缺的是哪一环，谁的网能帮你接住它？

◆

14

第 14 章

论文、评审、引用：科学的回写系统

这一章的问题

韩冬梅进不了梁博的实验室，手里只有一份 PDF 和两份相反的意见，她到底在替谁对什么账？

◆ 一、两份意见相反的审稿单

韩冬梅四十四岁，在南京一家理工类学术期刊做责任编辑，干了十六年。

周五下午四点，她的邮箱里同时到了两份审稿意见，审的是同一篇稿子。作者叫梁博，西部一所大学的青年教师，稿子讲一种新的污水处理材料，说它在低温下的去除率比常用材料高出三成。

第一位审稿人写了半页：选题新，数据完整，建议小修后录用。

第二位审稿人写了整整四页。他把稿子里的一张图放大，指出低温组只做了两次平行实验，误差线却画得比常温组还短；他又翻出作者三年前发的一篇论文，说那篇里用的是另一个批次的材料，测出来的数字低得多。他最后写：结论超出了数据能支撑的范围，建议退稿。

韩冬梅把两份意见并排放在屏幕上，看了很久。

她能做的事其实很少。她不能去梁博的实验室，不能看那台仪器，不能重做那两次实验。她手里只有一份 PDF，几张图，一串数字，和两个她从没见过面的审稿人的判断。

还有一件事让她不太舒服。稿子的参考文献有六十二条，其中十一条是本刊过去两年的文章。她知道这是怎么回事：作者希望投其所好，期刊也确实需要被引用。上个月的编务会上，主编刚说过本刊的影响因子又往下掉了一点。

十六年里，她经手过三千多篇稿子。其中有两篇，在发表几年后被撤了稿：一篇是数据重复使用，一篇是别的实验室怎么做也做不出来，作者最后自己承认样品被污染了。那两次撤稿通知，都是她亲手排进版面的。每排一次，她都要想一想：当初两位审稿人都签了“同意发表”，她也签了。

她给梁博写回信，写了删，删了写。窗外天黑了。

这一章要讲的，就是韩冬梅桌上这三样东西：一篇论文，一份评审，一串引用。它们看上去是科学的文书工作，枯燥、繁琐，常被人骂。可是本书要说，它们是科学最要紧的一套装置：一套把对不上做成制度、让结晶能一次次被回写的装置。

◆ 二、一本期刊，从一摞信开始

1665 年 3 月，伦敦皇家学会的秘书亨利·奥尔登堡，印出了一本小册子，叫《哲学汇刊》。几个月前，巴黎已经出了一本《学者杂志》，内容更杂，兼收书评和法律消息。《哲学汇刊》专登自然知识，后人常把它算作最早的科学期刊之一。

在它之前，欧洲的学者靠写信交流。奥尔登堡本人就是一个巨大的通信枢纽，和欧洲各地的许多学者通信。一封信寄出去，只有收信人和他转给的几个人读得到。

信有一个麻烦：它不公开，也不留一个大家都认的日期。谁先想到一件事，常说不清。那时有人为了占先又不泄密，会把结论写成一串打乱字母的字谜，先寄出去，等时机成熟再公布谜底。胡克在 1676 年公布了一串字谜，1678 年才揭开，意思是“伸长与力成正比”，就是今天课本里的胡克定律。

《哲学汇刊》改变了这件事。一份报告一旦印出来，就有了一个公开的日期，一个固定的文本，一个谁都能去图书馆翻到的位置。荷兰的列文虎克写来的一封封显微镜观察信，就是通过它传遍欧洲的，见第 7 章。

后来研究学术交流的学者回头看这本小册子，替它总结了几样功能〔转述〕。一是登记：谁在哪一天报告了什么，白纸黑字印在那里，占先之争有了凭据。二是传播：一份报告不再只到一个收信人手里，而是到了所有订阅的人手里。三是存档：几十年、几百年后，还能有人把它找出来。四是认可：能登上去，本身就是一种被同行接受的标志，虽然这一条在奥尔登堡时代还很弱。

这几样功能，到今天都还在。你在网上发一条视频，平台给它打上发布时间，推给关注你的人，存在你的主页上，点赞数显示有多少人认可。一本三百多年前的小册子，和一个今天的短视频平台，做的是同一类事。差别在于，科学期刊在这几样之外，后来又加上了一样平台没有的东西：在登出来之前，先让懂行的人对一次账。

奥尔登堡的通信网也给他惹过麻烦。1667 年英荷交战期间，他因为和外国人通信太多，被怀疑通敌，在伦敦塔里关了两个多月。一张跨国的信息网，在那个年代本身就是一件可疑的事。

同一时期，皇家学会里还有一个人，在琢磨另一件事：怎样让没到场的人，也能相信一次实验。

他是罗伯特·玻意耳。他用抽气机做实验，把一只鸟、一支蜡烛、一只钟放进玻璃罩，抽走空气，看会发生什么。当时整个英国能造这种机器的地方屈指可数。别人怎么相信他说的是真的？

玻意耳的办法是写。他把实验写得极细：机器什么样，哪里漏气，做了几次，哪几次失败了，当时在场的有哪些可靠的人。读者读完，像是自己也站在玻璃罩旁边看了一遍。两位科学史家后来把这种写法叫作“虚拟的见证”〔转述，出处：夏平与谢弗《利维坦与空气泵》，1985〕。

写得再细，也有写不进去的东西。荷兰的惠更斯照着玻意耳的描述，自己造了一台抽气机，做出了一个玻意耳那边没有的怪现象；两边书信往来了好几年，最后要靠人亲自跑到对方那里去看机器，才把账对清〔转述，出处同上〕。纸能带走很多，带不走全部。这件事第六节还会再碰到。

今天每一篇实验论文里都有一节“材料与方法”。它的祖先，就是玻意耳那种写法：把一次只发生在一间屋子里的对账，写到别人能在另一间屋子里照着再来一遍。

◆ 三、评审，比你以为的年轻

很多人以为同行评审和科学一样老。其实不然。

奥尔登堡主编《哲学汇刊》的十几年里，没有一套明确的录用标准，登什么、不登什么，大体由他自己定。那时这本刊物甚至是他私人的买卖。

1752 年，经过一番公开的争执，皇家学会接过了《汇刊》的编务和财务，改由一个委员会决定登什么。到十九世纪三十年代前后，请专门的人写一份书面意见、说明一篇稿子是否适合发表，才在学会里成为正式的做法。

即便到了二十世纪中叶，很多有名的期刊仍然主要由编辑自己拍板。《自然》杂志把送外审作为标准流程，是 1973 年前后的事。今天几乎所有科学期刊都要外审，是二战以后科研规模猛增、稿件多到编辑看不过来，才一步步定下来的。

评审对在哪里，先说足。

第一，它挡住了大量的错。 一个计算错了一个符号，一张图的坐标标反了，一个对照组忘了设，一个结论比数据多迈了一步。这些毛病，作者自己常常看不见，在同行眼里却一目了然。韩冬梅那位写四页的审稿人，指出的就是这一类。

第二，它把一个领域的眼光借给每一篇稿子。 第 13 章讲过，一个思想集体会在成员身上养出一双看东西的眼睛。审稿人就是带着这双眼睛来的。一个新入行的人写的东西，经过这双眼睛一过，就被放进了这个集体多年对账留下的标准里。

第三，它让稿子变好。 大多数被评审过的稿子，最后发出来的版本比投来的版本清楚、谨慎、完整。这一点常被骂评审的人忘掉。

第四，它是一种分出去的检验。 一个人自己检验自己，最难。评审让检验的人和被检验的人分开，哪怕不完美，也比没有强。

这就像你写完一封要紧的邮件，自己读三遍都没看出错，请同事扫一眼，他十秒钟就指出你把客户的名字写错了。不是同事比你聪明，是你写的时候脑子里装着你想说的话，读的时候眼睛就跟着脑子走；他脑子里没装那些话，眼睛只看见纸上实际写的东西。

评审也有它的老毛病，同样要说清。

它偏向熟悉的东西。第 13 章说过，一个思想集体的网，既托住新结晶，也会把不合的东西拽回旧形状。审稿人就是这张网伸到每一篇稿子上的手。

科学史上流传着不少“被退稿的名作”的故事。比如有一种说法，克雷布斯 1937 年把后来以他命名的那个代谢循环投给《自然》，被退了回来，只好改投别处。这类故事常被讲得夸张，不能拿来证明评审总是错的；它们说明的是，评审这股拽力，真的会拽到好东西身上。

它的形式也在变。早期多是审稿人知道作者是谁、作者不知道审稿人是谁；后来有了双方互不知道的“双盲”，也有了把审稿意见连同审稿人姓名一起公开的做法。1991 年，物理学家金斯帕格建起了后来叫 arXiv 的预印本网站。物理学家可以先把论文挂上去，让全世界的同行先看、先挑毛病，期刊评审放在后面。

用本书的话说，挂在预印本网站上的稿子，是一个正在成形（介生）的候选结晶，谁都可以上来碰它一下；经过评审、正式发表、进了教科书的结论，才一步步走向定型（秩序）。两种做法各有长短：先挂出来，对账的人多、来得快，可是没对过账的东西也会更早地流出去。

这些变化，说到底都在调整同一件事：对账由谁来对，在什么时候对，对完了怎样让大家看见。

◆ 四、一个人想给科学编一部索引

论文越来越多以后，出现了另一个麻烦：怎么找？

二十世纪中叶，全世界的科学期刊已经多到没人读得完。查文献的老办法是按主题查：你研究什么，就去翻那个主题下的索引。可是主题词是编索引的人定的，一篇讲新东西的论文，往往还没有合适的主题词可以挂。

1955 年，一个叫尤金·加菲尔德的美国人在《科学》杂志上发了一篇短文，提出编一部“科学引文索引”。他的灵感来自法律界：美国律师有一种工具书，可以查到某一个判例后来被哪些判例引用过、是被支持还是被推翻。

加菲尔德的想法很简单：一篇论文引用了另一篇，就说明两者之间有关系。把所有论文的参考文献都录下来，倒过来排，你拿着任何一篇旧论文，就能查到后来有哪些论文引用了它。顺着引用往前走，你就能看见一个想法后来被谁接过去、用到了哪里、被谁质疑过。

他后来成立了公司，1960 年代推出了《科学引文索引》。

按主题查和按引用查，差别有多大？打个比方。你想知道一道家常菜是怎么传开的。

按主题查，你去翻菜谱的目录，找“川菜”“下饭菜”那一栏，可那道菜要是新创的，目录里根本没这一栏。按引用查，你去问：哪些馆子的师傅说过“这是跟

某某学的”？顺着这些“跟谁学的”一路往下问，你就能画出这道菜从哪家馆子出来、走到了哪些城市。加菲尔德要做的，是给科学画这样一张“跟谁学的”地图。

几乎同时，社会学家默顿注意到一种现象。同样的贡献，名气大的人得到的承认更多，名气小的人更少。他借《圣经》里“凡有的，还要加给他”那句话，把它叫作“马太效应”（1968）。科学史家普赖斯则把论文之间的引用当成一张网来画，看出了网上有少数论文被引得特别多，大多数论文几乎没人引（1965）〔转述〕。

引用索引对在哪里，也要说足。

第一，它让人能顺着时间往前查。 一篇 1950 年的论文，后来被谁用了、被谁推翻了，以前很难知道，有了索引就能查。

第二，它画出了一张看得见的网。 哪些论文、哪些人、哪些领域彼此连着，第一次可以被看见。

第三，它把“一个想法有没有被别人接过去”变成了一件可以查验的事。 一篇论文发出来以后，是被几百个后来者当作起点，还是从此无人问津，不再只靠口耳相传。

加菲尔德本人也提出了一个后来影响巨大的数字：一本期刊近两年的文章，平均每篇被引用多少次。这就是“影响因子”。他的本意是帮图书馆决定订哪些期刊〔转述〕。

2005 年，物理学家赫希又提出了一个衡量个人的数字：一个人有 h 篇论文、每篇至少被引 h 次，他的指数就是 h。这个数字简单好算，很快被各地的评审、招聘和晋升拿去用。

从一本工具书，到一组数字，到一张能决定一个人前途的表格，引用这件事在半个世纪里变了好几次身。加菲尔德最初只是想让人找得到文献。

◆ 五、它们停在了哪里

这三样东西都很好用。可是如果用发现学的眼光去看它们，就会被它们骗。

发现学的看法大致是这样的：自然里有一个现成的真相，科学家把它找出来，写成论文；评审是一道关卡，检查这份报告是不是真的；引用是一种记功，一篇论文被引得越多，说明它找到的真相越重要。

这套看法在三个地方停下了。

第一处：评审对的不是现实的账。

审稿人能看到的，只是论文本身：文字、图、表、数字、方法的描述。他拿这些东西去对两样东西。一样是他脑子里的理念符号：这个领域已知什么，什么样的结论站得住。一样是他身上的自我符号：他做这类实验的手感，他一眼看出“这条误差线不对劲”的眼睛。

他没法拿论文去对现实。他不在那间实验室，不碰那台仪器，不重做那次实验。

韩冬梅的困境，正在这里。

2002 年，美国贝尔实验室的一位年轻物理学家舍恩被查出大规模造假。此前两三年里，他在《科学》《自然》等顶尖期刊上发了几十篇论文。论文讲的是有机材料里的超导、分子尺度的晶体管，每一篇都过了评审。最后让事情败露的，不是评审，是读者：有人注意到，他不同论文里讲不同实验的几张图上，噪声的起伏一模一样。

噪声是现实留下的痕。两次不同的测量，噪声不可能一模一样。读者拿两张图里的现实符号互相对了一次账，对不上，事情就破了。

评审拦不住这种事，不是因为审稿人不尽职，而是评审这道工序本来就不对现实的账。拿现实去对账，靠的是另一道工序：别人重做一遍。那一道工序出了问题会怎样，是下一章的事。

第二处：引用量的是势能，不是对错。

一篇论文被引得多，说明很多后来的论文和它连在一起，说明它在网上的位置很中心，拉力很大。可是一篇论文被引，有时候是因为后来的人都在用它，有时候是因为后来的人都在批它，有时候只是因为大家都引它、不引显得不懂行。

一个著名的错误结论，也可以被引上几千次。

影响因子更是如此。它本来是期刊的一个平均数，后来被拿去衡量一位研究者、一篇论文、一个单位，甚至直接和奖金挂钩。数字一旦变成目标，人们就开始往数字上用力：作者被暗示多引本刊，几本期刊之间互相多引，研究者之间结成互引的小圈子。

2012 年底，一批科学家和期刊编辑在旧金山开会时起草了《旧金山科研评价宣言》。宣言 2013 年正式发布，众多科学家和机构联名签署，呼吁不要用期刊影响因子去评价单篇论文和个人。

韩冬梅看到的那十一条本刊文献，就是这股力的一个小小切面。

第三处：论文把发生藏了起来。

一篇论文读起来，几乎都是一条笔直的路：提出问题，设计实验，得到结果，得出结论。好像作者一开始就知道要找什么，一路走过去就找到了。

真实的过程从来不是这样。走错的路、失败的批次、半夜改掉的假设、因为一次意外读数才转向的方向，在论文里几乎全被删掉了。英国生物学家梅达沃 1963 年做过一次广播讲话，题目大意是“科学论文是一种欺骗吗”。他说的就是这件事：论文的写法，系统地误导了人们对科学思维真实过程的理解〔转述〕。

梅达沃没有说论文在撒谎。他说的是：论文这种文体，把一次发生改写成了一次发现。

◆ 六、一套回写的装置

先把本章要用的工作词再讲一遍，你跳着读也接得上。

三界符号：理念符号是概念、假说、结论；现实符号是不需要解释者也立得住的痕，比如仪器的读数、照片上的一道线、噪声的起伏；自我符号是沉在身上的手感、眼光、习惯。

对不上：两类已经站稳的符号撞在一起，彼此不合。

结晶：一个新符号站稳了，满足三条判据——稳定（能重复出现）、整体（拆开就不是它）、独立（能离开发生地，被带到别处）。

三种能量：内能是连接度，即拆开它的难度；势能是周围那张网的吸引与拉扯；动能是连接被拆开、重接的速度和方向。

回写：新结晶的东西，反过来改写原先的条件。

本书对论文、评审、引用的说法，是三句话。

第一句：论文，是把一次对账压成一个可以迁移的现实符号。

一次实验，原本只发生在一间屋子里、一个下午。仪器上的读数、样品的颜色、做实验的人手上的感觉，都留在那里。

论文把这一切压进一个印出来的东西里。它有日期，有固定的文字，有图，有数字，有方法。印出来以后，它就不再随作者的记忆变来变去，不需要作者在场，也稳稳地待在期刊里、数据库里。它离开了那间屋子，可以被带到世界上任何一间屋子里去。

稳定、整体、独立，三条都满足。

这里要分清两层。印出来的论文，作为纸面上的印迹、档案里的一份文本，是能离开作者被带走的现实符号：没有人读它，那些墨迹也还在那里。它承载的论断，“这种材料在低温下去除率更高”，是理念符号，要有懂行的人读进去才成立。说论文是可迁移的现实符号，说的是前一层。

论文里装的，有理念符号（结论、假说），也有现实符号的副本（读数、图、照片）。这就是为什么舍恩的造假能被读者抓到。他造的是理念符号，可他得同时伪造现实符号的副本。而现实符号自带一种很难伪造的东西：噪声。

可是论文的“独立”有一个边界。它能带走理念符号，能带走现实符号的副本，却带不走做实验的人身上的自我符号。

1970 年代，英国社会学家柯林斯跟踪了几个实验室〔转述，出处：柯林斯的 TEA 激光研究〕。他想看的是：这些实验室怎样照着已发表的论文，造一种当时新出现的激光器。他看到的情形是：只读论文的实验室，一个也没造成。造成了的，都是派人去过已经造成的那间实验室，或者那边有人过来，手把手待过一段时间。

论文里写了电路怎么接、气体怎么配。可是没写的那些，留在造过的人手上：导线该多短才算短，某个零件拧到什么程度会漏，读数跳成什么样说明快成了。这些东西不在纸上，在身上。

这一点很要紧，它牵着下一章要讲的事。别人照着论文重做一遍，做不出来，有时是因为原来的结论站不住，有时只是因为那份手感没有跟着论文一起走。两者要分开。

你在日子里也这样用过“论文”。装修师傅给你一张水电改造图，标了每一根管子走在哪面墙里。施工那几天的事，过几年你全忘了，师傅也换了人；可这张图

还在，下一个师傅拿着它，就知道哪面墙不能打钉子。那张图，就是把一次施工压成了一个能带走的东西。

第二句：评审，是一次对账，但只对两本账。

评审对的第一本账，是论文自己内部：结论和数据合不合，图和文字合不合，方法够不够撑起结论。

第二本账，是论文和这个领域已经结晶的东西：它和已有的结果冲突吗？冲突的话，它给了足够的理由吗？它是不是把别人早做过的事当成了新的？

这两本账都很重要。可是还有第三本账，评审对不了：论文里的现实符号副本，和现实本身合不合。

所以评审通过，意思是“这份报告内部自洽、与领域不冲突、值得让更多人看见”，而不是“这件事是真的”。

拿买二手房打个比方。你请一位懂行的朋友帮你看房产证和合同。他能看出合同前后条款有没有矛盾，能看出这份合同和本地常见的写法有哪里不一样。这是两本账。可是房子的墙里有没有渗水，楼板有没有裂缝，他坐在你家客厅里看文件是看不出来的，得有人真去那套房子里敲一敲、看一看。

评审就是那位看文件的朋友。他看得很仔细，很有用。只是别把他签的字，当成房子没毛病的保证。发表，是把一个候选结晶交给整张网，请网上的其他人拿各自的现实去对。

第三句：引用网络，是一张势能地图。

每一条引用，都是一根线：一篇论文把自己挂在另一篇论文上。线多的地方，网就密；网密的地方，拉力就大。一个新结果落在密的地方附近，就会被拉过去，按那里的样子去理解。

这张地图有用。一个刚入行的人，看引用网，就知道这个领域的重心在哪里、哪些问题是热的、哪些人是枢纽。

一座城市的地铁图也是这样。换乘站线路多，人流大，站在那里的店铺生意好，房价也高。看地铁图，你一眼就知道城市的重心在哪里。可是地铁图告诉不了你，哪一站的房子结实、哪一站附近的学校好。它画的是连接，不是质量。

引用网络画的也是连接。这张图画的是势能，不是内能，更不是对错。一个被引了几千次的结论，网很密，拉力很大；它的连接度高不高，要看那几千条线里，有多少是真拿它去对过账、在新读数面前站住了的。被引用和被检验，是两回事。

把三样放在一起，就是一套回写的装置。

论文发表，是一个候选结晶进入网。别人引用它、用它设计新实验，是它开始回写：改写教科书里的一行，改写下一项研究的问题，改写基金申请的方向。

别人用它用出了对不上，就写评论、写反驳、发更正，严重的就撤稿。这也是回写，是网拿新的对不上，反过来改写那个结晶。

回写也有它的难处。一个结晶一旦进了网，被许多人连上，就有了势能；撤稿能把它从期刊上撤下来，却不一定能把它从网上撤下来。

1998 年，英国《柳叶刀》登出一篇只研究了十二名儿童的论文，暗示麻疹—腮腺炎—风疹三联疫苗与自闭症之间可能有关联。此后多年，多国的大规模研究都没有找到这种关联；记者的调查又揭出论文作者存在严重的利益冲突和数据问题。2010 年，《柳叶刀》正式撤回了这篇论文。

撤稿是网在回写。可是那篇论文在撤稿前的十二年里，已经被媒体、家长群、网站转了无数遍。在期刊这张网里，它被拆掉了；在另一张网里，它的连接度早已长得很高，一纸撤稿的动能远远不够拆它。一些地方的疫苗接种率下降，麻疹病例回升。

这件事说明两点。第一，论文这种可迁移的符号，迁移出去就收不回来，所以在它出门之前多对一次账，是值得的。第二，站得稳和对，是两回事：被撤回的结论，在别的网里可以站得比真结论还稳。这一句，下一章接着讲。

本书的全书判词说：科学的力量不在于它找到了现成的真理，而在于它把对不上变成了一种制度。论文、评审、引用、更正、撤稿，就是这种制度最日常的样子。

这套装置也要付能量。审稿人大多不拿报酬，审一篇稿子要花一个晚上到一个星期。全世界每年发表的论文以百万计，审稿人的动能是一笔巨大而看不见的开支。审稿人累了，就只看摘要和图，对账就变薄了。

这就像一个小区的业主委员会。账本每个月都公示，按理说每户都能来查。可是查账要花一个周末，要懂一点会计，还不给钱。头几个月有人认真查，后来大家都忙，公示的账本贴在墙上，没人再看。账本还在，制度还在，对账却已经停了。哪天真出了问题，大家才发现：这几年的“公示无异议”，其实是没人看。

科学的回写装置也会这样老化。论文照登，评审照走，引用照算，每一样都在转；可如果审稿人只是在表格上勾一勾，读者只是看一眼标题就引用，这套装置就只剩下壳。它从一直被重新检验而稳，慢慢滑向没人再检验而稳。下一章要讲的，就是这种滑落被人撞破的时候。

下面这张表，把发现学眼里的三样东西，和本书眼里的三样东西放在一起。

对象	发现学怎么看	本书怎么看
论文	一份关于已找到的真相的报告	把一次对账压成可迁移的现实符号，供别处再对
“材料与方法”一节	交代背景的附属部分	让对账能在另一间屋子里重来一遍的说明书，是论文能“独立”的关键
同行评审	检验真伪的关卡	只对两本账（内部自洽、与领域不冲突），不对现实那本账
发表	真相得到确认	一个候选结晶交给整张网去对
引用次数	记功，越多越重要	势能的读数：连接多、拉力大，不等于连接度高，更不等于对
影响因子	期刊质量的尺子	一个平均势能；一旦变成目标，就开始被人往上用力
更正与撤稿	科学的丑闻	网用新的对不上改写旧结晶，是回写在起作用

◆ 七、一份让爱因斯坦生气的审稿意见

把三句话放进一个完整的例子。

1936 年，爱因斯坦在美国普林斯顿，和年轻的合作者罗森一起写了一篇论文，投给美国的《物理评论》。论文的题目大意是：引力波存在吗？他们的结论是：不存在。

这件事本身就很惊人。二十年前，正是爱因斯坦自己从广义相对论里推出了引力波。现在他要说，仔细算下来，这种波的解里会出现一个“奇点”，一个数学上爆掉的地方，所以它在物理上不可能存在。

按本书的附闸，先把那条缝指认出来：对不上在哪里？在方程的解里。爱因斯坦和罗森手里，一个是“引力波存在”这个理念符号，一个是他们写下的解在某处爆掉的计算结果。两者撞上了，他们选择放弃前者。

《物理评论》的编辑约翰·泰特（John T. Tate），把稿子送给了一位审稿人。审稿人写回了一份长达十页的意见，认为论文的结论不对。那个奇点，很可能不是物理上的，而是他们选的坐标带来的。换一套坐标，它就会消失。

爱因斯坦收到意见，很生气。他回信给编辑，大意是：他把论文寄来是为了发表，不是为了在发表前给什么专家看，他没有授权编辑这么做；他不打算回应那位匿名人士的错误意见，宁愿拿到别处去发〔转述〕。他从此再也没有在《物理评论》上发过论文。

那时在欧洲，很多一流期刊仍然由编辑拍板，不一定送外审。爱因斯坦在德国发论文多年，大概不习惯这一套〔转述〕。

这是评审在第一层上的失败：作者拒绝了对账。

可是故事没有完。

稿子转投给了另一本期刊《富兰克林研究所学报》。就在它付印之前，那位审稿人——相对论专家罗伯逊——碰巧和爱因斯坦新来的助手英费尔德熟识。罗伯逊私下跟英费尔德讲了那个坐标的问题。英费尔德转告了爱因斯坦。

爱因斯坦重新算了。他在校样上改了论文的结论。最后发表的版本，题目和结论都变了：它不再说引力波不存在，而是给出了一类柱面引力波的解。

那位审稿人是谁，当时没人知道。几十年后，科学史家翻查《物理评论》的档案，才确认审稿人就是罗伯逊。

把这个故事放回本章的三句话里看。

论文作为可迁移的现实符号。 爱因斯坦和罗森的计算一旦写成稿子寄出去，就离开了普林斯顿那间办公室。一个他们不认识的人，可以在另一间屋子里一行一行地重算。正是这种“独立”，让对账成为可能。

评审作为对账。 罗伯逊做的，正是第一本账：论文的结论和它自己的数学合不合。他找到了一处对不上：奇点也许是坐标的产物。这一次，评审对的这本账，恰好就是要害。

网作为回写的场。 正式的评审被拒绝了，可是这张网还有别的线：罗伯逊和英费尔德的私交，英费尔德和爱因斯坦的日常合作。对不上沿着另一根线，还是传回了作者那里，在论文印出来之前，把它改写了。

这个故事里有三个值得记住的地方。

第一，即使是爱因斯坦，也会在自己的计算里出错，也需要别人来对账。评审不是对权威的冒犯，它是让权威也得跟别人一样付对账成本的装置。

第二，正式的评审只是网的一部分。一个结晶能不能站稳，要靠整张网的许多根线。最后救下这篇论文的，是一根非正式的线。

第三，一次对账解决不了全部问题。1936 年那一次改稿，只是让论文不再说“引力波不存在”。引力波到底带不带能量、能不能被测到，相对论学界又争了二十多年。按流传的说法，1957 年美国教堂山开过一次会。会上，费曼等人用一个思想实验论证：引力波能把能量传给一根串着珠子的杆。争论这才渐渐平息〔转述〕。

这二十多年里，没有一篇论文是“终审判决”。一篇论文出来，别人挑毛病，再出一篇，再挑。每一篇都是网上的一个结，每一次挑毛病都是一根新线。结晶不是哪一篇论文完成的，是这张网在二十多年里一点点织出来的。

至于引力波本身，它又过了将近八十年，才被激光干涉仪的读数接住，见第 9 章。从爱因斯坦 1916 年推出它，到 2015 年仪器第一次读到它，这个理念符号在网上挂了整整一百年，一直在等一个现实符号来对账。网托住了它一百年，没有让它散掉，也没有让它提前被当成已证实的东西。这正是一套好的回写装置该做的事。

◆ 八、放回韩冬梅的桌上

回到那个周五的晚上。

韩冬梅最后给梁博写的信，很短。她没有简单地按“一票录用、一票退稿”去折中，也没有直接退稿。她把第二位审稿人的四页意见全文附上，请梁博补三件

事：低温组至少补到五次平行实验；解释和三年前那篇论文的数字差别，说明是不是材料批次的问题；如果补完数据，结论站不住“高出三成”，就照实改小。

她还删掉了自己草稿里的一句话。那句话原本是：“另外建议适当补充引用本刊相关文献。”她想了想，觉得这句话会让梁博把精力花在拉线上，而不是花在对账上。

一个月后，梁博的修改稿回来了。五次平行实验，低温下的去除率比常用材料高出一成多，不是三成。他在信里说，三年前那批材料确实有问题，他重新做了表征。结论改小了，可是这一次，每一个数字都站得住。

韩冬梅把稿子再送回第二位审稿人。审稿人只回了一行字：可以录用。

这篇论文以后会不会被很多人引用，没人知道。可它进入网的时候，是一个对过两本账的候选结晶。第三本账——拿它去现实里再做一遍——要等别的实验室来对。

那天晚上回家的地铁上，韩冬梅想起刚入行时带她的老编辑说过的一句话：编辑不是法官，是接线员。

她过去一直没太懂。现在她懂了一点：她判不了梁博的材料到底好不好，那要等现实来判；她能做的，是把对的账接到对的人手上，把该补的线补上，别让一根不该拉的线——比如那句“建议引用本刊”——把整件事拉歪。一本期刊是网上的一个结，她是这个结上的一双手。

你可能不在期刊社上班，可你每天都在用这三样东西。

你写的工作报告、项目总结、事故记录，就是你的“论文”：把一段只发生在你身上的经历，压成别人能拿走的东西。写的时候问自己一句：我把失败的批次也写进去了吗？下一个接手的人，照着我写的，能不能把这件事再做一遍？

你给同事看稿、看方案，就是在“评审”。你能对的，往往只有两本账：它自己说得通吗？它和我们已知的东西冲突吗？别把这两本账对过了，就当成了“这件事是真的”。

孩子拿着作文来问你“写得好不好”，你也在评审。你能告诉他哪句话前后矛盾，哪个词用得不像他这个年纪的人会用的。可他写的那次春游，到底是不是那

样，你没去，你只能问：“那天你真的看见了吗？”这一问，是在提醒他还有第三本账。

你在网上看到“这本书有两万条好评”“这家店评分四点九”，看到的是一张势能地图：很多人连在它上面，拉力很大。拉力大，不等于它对你合适。去看看那些好评里，有几条是真用过、真对过账的。

带走的话

论文把一次对账压成能带走的符号，评审只对两本账，引用画出的是势能，不是对错。

小　账

前人在这里关上的门：把论文当成发现的报告、评审当成真伪的关卡、引用当成功劳簿；本书打开的门：论文、评审、引用、撤稿是一套把对不上做成制度的回写装置，各自只对一部分账。

发生被收回为发现的那一下：论文那条笔直的叙事，删掉了走错的路和半夜改掉的假设，把一次发生改写成了“一开始就知道要找什么”。

想一想

1. 你最近写的一份报告或总结里，有没有删掉那些失败的尝试？下一个接手的人，照着它能把事情再做一遍吗？
2. 你给别人的方案提意见时，通常对的是哪几本账？有没有哪一次，你把“说得通”当成了“是真的”？
3. 你最近一次因为“评分高、评论多”而做的选择，结果怎样？那些评论里，有多少是真对过账的？

◆

15

第 15 章

复现危机：结晶失败的时候

这一章的问题

周以宁讲了八年的那个效应，在辛苒手里做出一个零。它稳了二十年，那份稳是从哪里来的？

◆ 一、一块饼干和一个零

周以宁三十六岁，在新加坡一所大学教心理学，是讲师。

每年开学第三周，她给一年级讲“自我控制”，都会放同一张幻灯片：一间屋子里摆着两盘东西，一盘是刚烤好的巧克力饼干，一盘是生萝卜。实验里，一组人可以吃饼干，另一组人只许吃萝卜、不许碰饼干。然后两组人去做一道其实解不出来的几何题。只许吃萝卜的那组人，放弃得早得多。

她讲这个实验讲了八年。讲到最后，她会说一句：“意志力像肌肉，用多了会累。”台下的学生总会笑，因为每个人都有过加班一整天、晚上回家管不住手点外卖的经验。

这学期，她带的荣誉学位学生辛苒，要做毕业论文。辛苒的英文名叫 Priya，父亲是印度裔，母亲是华人，做事一板一眼。周以宁给她的题目，是把这类“意志力耗竭”的经典实验，在新加坡的大学生里重做一遍。

按现在的规矩，辛苒在收数据之前，先把假设、样本量、分析方法写下来，挂到一个公开的网站上，加了时间戳。这叫预注册。

她招了一百六十多个被试，比原始研究多了好几倍。做了一个学期。

十二月初的一个下午，辛苒抱着电脑来敲周以宁的门，脸色发白。两组人放弃的时间几乎一样。效应量算出来，接近零。

她第一句话是：“老师，是不是我哪里做错了？”

周以宁陪她把流程一步步查了一遍：指导语、计时、任务难度、数据清洗，都按预注册来的，挑不出毛病。

那天晚上，周以宁一个人坐在办公室，把讲了八年的那张幻灯片调出来看。她自己的博士论文里，也引过这个效应三次。她想起教科书上那四个字：“研究表明”。

让她坐不住的，不是一个学生的实验没做出来。是另一件事：这个效应，二十年来被几百篇论文引用、被写进畅销书、被讲进全世界的课堂，它看上去那么稳。如果它是空的，那么“稳”到底是从哪里来的？

这一章要讲的，就是这件事：一个科学结论为什么会稳了二十年，又在一次认真的重做面前散掉。

◆ 二、一场危机是怎样被撞出来的

心理学界后来把 2010 年代初那几年，叫作“复现危机”的开端。这场危机不是某一个人揭发出来的，是几处对不上在几年里接连撞上的。

第一处，是一篇“太正常”的怪论文。 2011 年，美国社会心理学家贝姆在本领域一本顶尖期刊上发表了一组实验。实验一共九个，其中八个得出“人能在一定程度上预感未来”的显著结果。这篇论文的方法、统计、样本量，全按当时的标准来，审稿也走完了。

问题就出在这里。要么人真能预感未来，要么当时公认的那一套方法，能把一个几乎没人相信的结论“证明”出来。大多数心理学家不愿接受前者，于是只能面对后者。

第二处，是一篇示范怎么“证明”荒唐事的论文。

同年，西蒙斯、纳尔逊、西蒙松三人发了一篇论文。他们演示：只要研究者在几个看上去无害的地方留点余地，几乎任何假设都能做出显著的结果。这些余地包括：多收几个被试再看结果，换一种分组，去掉几个“异常”数据，多测几个指标

只报显著的那个。他们还真“证明”了一件荒唐事：听某一首歌，会让人的实际年龄变小〔转述〕。

这篇论文没有说谁造假。它说的是：一整套被当作正常的做法，本身就是一个能把噪声变成“发现”的机器。

第三处，是一个造假的丑闻。 也在 2011 年，荷兰社会心理学家斯塔佩尔被查出长期编造数据，后来撤回了几十篇论文。这件事要和前两处分开：造假是有人故意撒谎，复现失败多数是诚实的人用了不稳的方法。可是它让整个学科不得不问：我们的论文，有多少人真去重做过？

第四处，在别的学科里。 生物医药界也传来了类似的消息。

2011 年，德国拜耳公司的研究者报告，他们在内部试着重复几十项已发表的药物靶点研究，只有大约四分之一的结果和原文大体一致。

2012 年，美国安进公司的研究者说，他们挑了五十三项癌症研究里的“里程碑”论文，只成功重复出六项。更早，2005 年，流行病学家约安尼季斯发了一篇题目很刺耳的论文，大意是“为什么大多数已发表的研究结论是错的”。他用统计推算说明：在样本小、效应小、研究者灵活度大的领域，阳性结论里假的比例可以很高〔转述〕。

最后，是一次大规模的重做。 2015 年，开放科学协作组织在《科学》上发表结果：两百七十位研究者分头重做了一百项发表在 2008 年三本心理学期刊上的研究。原始研究里，约百分之九十七报告了显著结果；重做之后，只有约百分之三十六还显著。重做得到的效应大小，平均只有原来的一半左右。

这几处对不上，每一处都可以在事前、独立地指认出来：一篇方法合规却结论离奇的论文，一个演示方法漏洞的实验，一批重做的读数。它们不是事后找补的理由。

辛苒手里的那个零，是这一串对不上里很小的一个。

这里要停一下，把一个反复出现的词讲白：显著。

心理学实验里说一个结果“显著”，大意是：假如这个效应其实不存在，单凭运气得到眼前这么大差别的可能性很小，按惯例小于百分之五。这个百分之五，就是那条常被提起的线。

拿抛硬币打个比方。你怀疑一枚硬币不公平，抛了二十次，十五次正面。如果硬币是公平的，抛出这么偏的结果，可能性很小，于是你说“显著”，认为硬币有问题。

问题出在哪里？如果你有二十枚完全公平的硬币，每枚都抛二十次，大概会有一枚碰巧抛出很偏的结果。你只把这一枚拿出来报告，说“这枚硬币有问题”，其余十九枚放进抽屉——你报告的这个“显著”，就完全是运气造出来的。

前面那几处对不上，说的都是这件事。一个学科如果只发表那一枚碰巧抛偏的硬币，它的期刊上就会堆满“显著”的结果。而这些结果，有很多重抛一次就没了。

◆ 三、先写足它们为什么看上去那么稳

讲复现危机，最容易犯的错，是把当年做出这些结论的人写成骗子或傻瓜。这不公道，也不对。先把那些结论为什么看上去站得住说足。

拿周以宁讲了八年的那个效应来说。心理学里叫它“自我损耗”。1998 年，美国心理学家鲍迈斯特和同事发表了饼干与萝卜那个实验。它的说法是：自我控制要用掉一种有限的资源，用掉一些，接下来的自我控制就会变差。

第一，它合乎日常经验。 你考完一场大试，晚上特别容易暴饮暴食；你一整天对客户赔笑脸，回家就对家人发火。几乎每个人都能从自己身上找到“意志力被用光”的时刻。

第二，它被重复了很多次。 此后十多年，不同的实验室用不同的方式做了几百项研究：有的让人忍住不笑，有的让人不去想一只白熊，有的让人用不习惯的手刷牙；接下来测的东西也各不相同，握力坚持多久、解题坚持多久、喝多少难喝的饮料。大多数都报告了效应。2010 年一项汇总了八十多篇论文、近两百项检验的分析，算出的平均效应还相当可观。

第三，它有一个机制。 有研究者提出，这种“资源”可能和血糖有关：自我控制消耗葡萄糖，喝一杯加糖的柠檬水就能恢复一些。一个有机制的效应，比一个光秃秃的效应更让人放心。

第四，它连上了很多领域。 消费者为什么在商场逛久了容易冲动购物，运动员比赛后半段为什么容易犯规，法官在午饭前为什么判得更严〔这一项另有争议〕。这些都有人拿自我损耗去解释。2011 年，鲍迈斯特与一位科学记者合写的通俗书《意志力》成了畅销书。

第五，做这些研究的人大多是诚实的。 他们用的方法，是当时整个学科公认的方法：二三十人一组，跑完看结果，显著就投稿，不显著就放进抽屉。他们没有撒谎，只是照着规矩做。

还要说清一件事：复现危机被撞出来、被承认、被认真对待，这件事本身，正是科学在起作用。心理学界没有捂住它，而是自己组织几百人去重做、自己公布难看的结果、自己带头改规矩。很多别的学科后来是跟着心理学学的。

一个领域敢把自己的地基挖开来看，这不是它的耻辱。

这里面最动人的，是一些原作者自己的回应。2010 年，美国三位研究者卡尼、柯蒂、亚普发表了一项研究。研究说，摆出舒展、有力的姿势一两分钟，能让人更敢冒险，体内的激素水平也会随之变化。这项研究后来经过一场演讲火遍全球，叫“高能量姿势”。

2015 年，一个瑞士和瑞典研究者组成的团队，用大得多的样本重做，没有重复出激素的变化，冒险行为的差别也没了。2016 年，原论文的第一作者卡尼在自己的网页上发了一份声明〔转述〕。大意是：她不再相信高能量姿势的效应是真实的。她还坦白列出了当年数据处理里那些留有余地的地方。

一个人公开说“我当年那个结论，我自己现在不信了”，要付很大的代价。可正是这样的声明，让对不上没有被挡在账外。这是一个人身上，从锁化回到发生的一步。

也要说清另一面：并不是心理学的所有结论都晃了。

有一类经典效应：读颜色词时，字的颜色和字义不一致，人的反应会变慢。比如用绿墨水写一个“红”字，让你说出墨水的颜色。这个效应几十年里被无数实验室、无数课堂反复做过，几乎每次都出来。几次大规模的多实验室重复里，也有一部分效应站得很稳。心理学里既有沉默的稳，也有一直被撞、一直站住的稳。本章要做的，正是把这两种稳分开。

◆ 四、“假发现”这个说法停在哪里

发现学怎样看复现危机？大致是这样一套说法。

世界上有一些效应，真实地摆在那里，等着科学家去发现。一个效应要么存在，要么不存在。复现失败，说明原来那个“发现”是假的，世界上本来就没有这个东西，是研究者看错了。补救的办法，是更好的工具、更大的样本，把真的从假的里面筛出来。

这套说法有它的道理：它坚持世界不由人随意说了算，坚持要拿证据说话。可是它在三处停下了。

第一处：它解释不了“稳”。

如果自我损耗从来就“不存在”，那么过去二十年那几百篇论文、那个看上去可观的平均效应、那些从日常经验里来的共鸣，是从哪里来的？

说“都看错了”，等于什么也没说。几百个实验室、几千次实验，一起看错，而且错得那么整齐，这本身就是一件需要解释的事。发现学只问“有没有”，不问“它是怎样站稳的”，所以对这种稳，只能耸耸肩。

第二处：它只有两档。

“存在”和“不存在”之间，还有很多档：效应存在，但比原来报告的小得多；只在某些人、某些条件下出现；在某个实验室的那套做法下稳定出现，换个地方就没了。

开放科学协作的那次重做，大多数结果不是“完全没有”，而是“小了一半”。把这一切都压进“真发现”和“假发现”两个抽屉，丢掉了最要紧的信息。

这就像体检报告上一项指标，医生不会只告诉你“有病”或“没病”。他会说偏高一点、要复查，或者说只有空腹时才高、饭后正常，或者说这台机器测得偏高、换一家医院再测。真实的判断几乎都落在中间那些档里。

第三处：它把“稳”当成了“对”的证据。

这是最深的一处。在发现学里，一个结论被很多研究支持、被写进教科书、几十年没人推翻，就被当作接近真相的标志。稳，几乎就等于对。

复现危机恰恰说明，这两件事可以分开。

◆ 五、稳定不等于对

先把本章用到的几个工作词讲清，你跳着读也接得上。

三界符号：理念符号是假说、概念、结论；现实符号是不需要解释者也立得住的痕，比如被试按下按钮的时刻、仪器里记下的秒数、一份原始数据表；自我符号是沉在身上的习惯、手感、“一看就知道”的眼光。

对不上：两类已经站稳的符号撞在一起，彼此不合。

结晶：一个新符号站稳了，满足三条判据。稳定，能反复出现，不随一次解读散掉；整体，拆开就不再是它；独立，能离开发生地，带到别处还立得住。

三种能量：内能是连接度，即拆开它的难度；势能是周围那张网的吸引与拉扯；动能是连接被拆开、重接的速度和方向。

回写：新结晶的东西反过来改写原先的条件。

有了这几个词，本书对复现危机的说法，是下面几句。

第一句：站得稳和方向对，是两个问题。

谣言也很稳。“吃某种东西能防某种病”的说法，可以在家族群里转十年，每年春节都有人重新提起，从来不散。它稳定、整体、能被带到每一个新的群里去，三条判据看上去都满足。

所以要先问发生学的问题：它是怎样站稳的？靠什么站稳的？然后才问：它的方向对不对？前一个问题答清楚了，后一个问题才问得下去。

第二句：稳有两种。

一种稳，是因为它一直被重新点火、重新检验。每隔一段时间，就有新的现实符号被拿来对它，它一次次地对上了，所以稳。本书叫它**发生型稳定**。

另一种稳，是因为没人再去检验它。它被写进了教科书，被大家引用，被当作常识，再没有新的读数撞上来，所以稳。本书叫它**锁化型稳定**。

拿一座桥打个比方。一座桥每年请人做荷载检测，裂缝、沉降、钢筋锈蚀一项项地测，测了二十年都合格，它的稳是发生型的。另一座桥二十年没人测过，一直没塌，大家天天从上面走，也觉得它很稳，它的稳是锁化型的。

从桥上走过去的那一刻，两座桥感觉一模一样。区别只在：前一座的稳里装着二十次对账，后一座的稳里装着二十年的沉默。

第三句：复现危机里的那些效应，很多是“连接度虚高”。

内能是连接度，是拆开一个符号的难度。看上去，自我损耗的连接度很高：几百篇论文、几千次引用、一个机制、一大串应用。想拆它，似乎要很大的力。

可是它真正的连接度，要看这些连接连向哪里。

大量的连接，是论文连论文、概念连概念：这篇引那篇，这个解释接那个解释，消费者研究借社会心理学的说法，畅销书借论文的结论。这些都是理念符号之间的连接。它们织成了一张很密的网，网密，势能就大，拉力就强。

连向现实符号的那部分，却很薄。几百项研究里，每一项用的任务都不一样：这项忍住不笑，那项不想白熊；这项测握力，那项测解题。每一项都只做了一次，样本二三十人。没有哪一个具体的现实读数，被很多人反复撞过。

于是就出现了一种奇怪的情形：网很密，可是网上的每一个结，都只有一根细线拴在现实上。你从远处看，它像一块整石头；一次认真的、大样本的、事先写好规则的重做，拉一下那根细线，整块东西就晃了。

你在日子里见过这种东西。一家新开的网红店，点评网站上几千条好评，打开一看，很多是同一个月发的，配的是差不多的照片，写的是差不多的话。好评之间彼此呼应，看上去一片热闹；真正自己掏钱、吃过两三次还愿意再来的人，没有几个。你去吃一次，就知道那几千条好评有多结实。

本书把这叫作**连接度虚高**：连接度看上去很高，是因为理念符号之间的连接多；真正把它拴在现实上的连接，很少。它只在一个场里稳定——在原来那些实验室的做法、那套发表习惯、那种分析的余地里稳定。离开这个场，就满足不了“独立”那一条。

第四句：对不上被一层层滤掉了。

一个效应怎么会在一个场里稳了二十年？因为那个场里有几道滤网，把本该撞上来的对不上，在它们写进网之前就滤掉了。这几道滤网，都是可以事前独立指认的。

第一道，是抽屉。做出显著结果的研究投稿发表，做不出来的放进抽屉，没人知道。1979 年，心理学家罗森塔尔就给这个现象起过名字，叫“抽屉问题”。网上只有对上了的读数，对不上的读数都在抽屉里，于是网看上去一致得惊人。

第二道，是分析上的余地。前面那篇演示荒唐结论的论文说的就是这个：多收几个人再看，换一种分法，去掉几个数据，多测几个指标挑一个报。每一处余地都不大，合起来，就能把一次本该对不上的读数，掰成对得上。

第三道，是“概念重复”代替了“直接重复”。每个实验室都换一种任务去做，结果对上了，算作支持；对不上，可以说“是我们这种任务不灵”。对不上永远有地方可推，于是永远不会撞到原来那个结论身上。

三道滤网合起来，让这个场里的对不上进不了账。没有对不上，就没有做功，那个结论也就没有被真正检验过。它的稳，是锁化型的稳，只是穿了一件发生型的外衣：看上去天天有人在重复它，其实没人在撞它。

第五句：一次重做失败，也要先指认它是哪一种对不上。

本书一直守着一道闸：用“对不上”去解释什么，先要在材料里独立地指出那条缝。复现失败也不例外。一个零，可以有三种来路，要分开看。

第一种，原来的结论站不住。效应本来就很小，或者根本是噪声被滤网放大的结果。判断它，要看能不能在事前指出那几道滤网的痕迹：样本小、效应大、只有显著结果被发表、分析方法事后才定。

第二种，手感没有跟着论文走。原研究里有一些关键的做法，没有写进论文，重做的人不知道。判断它，要看原作者能不能在重做之前，就具体说出哪个步骤要紧，而不是在结果出来以后才说“你们没做对”。事前说出来的，是一条可以检验的缝；事后才说的，就要多打一个问号。

第三种，场换了。原研究在 1990 年代的美国大学生身上做，重做在今天新加坡的大学生身上做。年代、文化、被试对实验的熟悉程度都不同。如果一个效应真的只在某种条件下出现，那它不是“假的”，而是“有条件的”，这个条件本身应该被写进结论里。

三种来路，结论完全不同。第一种要拆掉结论，第二种要补全方法，第三种要给结论加上边界。把三种都叫成“复现失败”，又回到了发现学那两档。

一个日常的例子。你按网上的菜谱做红烧肉，做出来又柴又咸。可能是菜谱本身就不行，可能是菜谱没写“要先焯水”这一步，也可能是你买的肉和作者买的不是同一个部位。三种情况，下次的改法完全不同。要分清，得在下锅之前就问清楚：作者用的是哪块肉，哪一步最要紧。

第六句：补救，就是把对不上重新放进账里。

这些年心理学和别的学科推的几样改革，用本书的话说，每一样都在拆一道滤网，加固结晶的条件。

预注册，是在数据来之前，先把理念符号钉死。假设是什么，收多少人，怎么分析，写下来，打上时间戳，公开。数据来了，只能按事先写的去对。这样，分析的余地被收走了，读数对不上，就只能是对不上，没法事后掰过来。

注册报告更进一步。2013 年前后，英国神经科学家钱伯斯等人在期刊《皮层》推动一种新的发表方式。研究者先把研究方案投给期刊，审稿人在数据出来之前审方案；方案通过，期刊就承诺发表，不管结果显著不显著。这一步拆的是抽屉：对不上的读数，第一次有了一条进网的正门。

开放数据与开放材料，是把原始的现实符号副本交出来。别人可以拿着你原始的数据表重算一遍，可以拿着你的指导语、刺激材料、程序原样重做一遍。第 14 章

讲过，论文带不走做实验的人身上的手感；把材料原样交出来，能让带不走的那部分少一点。

多实验室联合重复，是一次专门检验“独立”的试验。同一个方案，同时在十几个、二十几个国家的实验室里做，看它离开原来那个场还站不站得住。

这几样东西加在一起，做的是同一件事：把锁化型稳定，重新拉回发生型稳定。

它们也要付能量。预注册要多花时间写，注册报告要等审稿，开放数据要整理，多实验室合作要协调几十个人。重复别人的研究，在过去几乎拿不到什么名声：第 14 章讲过，引用网络这张势能地图，奖励的是新，不是验。改革的一部分，就是让验也能在地图上占一个位置。

这笔账算起来并不轻松。一个年轻研究者花两年重做一个经典实验，做出来对上了，别人会说“这不是早就知道的吗”；做出来对不上，原作者可能不高兴，期刊可能不愿登。两头都难讨好。所以过去很少有人愿意付这笔动能。

一个家庭里也是这样。老人传下来的一个偏方，谁都不愿第一个去问“这到底管不管用”：问了，像是不孝；试了，万一出事要担责。于是它一代代传下去，没人付那笔检验的动能。不是没人怀疑，是检验的代价落在一个人身上，好处却是大家的。科学里的改革，说白了，是想办法让这笔代价不再只压在一个人身上。

下面这张表，把两种稳放在一起看。

看哪一项	发生型稳定	锁化型稳定
稳从哪里来	一次次被新的现实符号撞过，都对上了	很久没有新的读数撞上来
对不上的读数去了哪里	进账，被公开，被讨论	进抽屉，或被分析的余地掰平
连接主要连向	现实符号：原始数据、直接重复、多地读数	理念符号：论文引论文、解释接解释
能不能离开原来的场	能，换地方、换人还立得住	不一定，常常只在原来的做法里成立
被认真撞一次时	晃一晃，站住，或者小幅修正	可能整块散掉
需要付的动能	持续地付：有人一直在重做、在核	早年付过一次，后来停了

看哪一项	发生型稳定	锁化型稳定
日常的样子	每年检测的桥；每次都尝一口再出锅的老汤	二十年没人测、也没塌的桥；照着配方抄了十年没人尝过的汤

◆ 六、自我损耗：一次结晶的二十年

把五句话放进一个完整的例子。还是周以宁讲了八年的那个效应。按时间走一遍，每一段都问：它此时的稳，是哪一种？

1998 年：在一个场里结晶。

饼干与萝卜的实验发表。它有一个漂亮的设计，一个合乎经验的说法，一个显著的结果。在当时那一代社会心理学的场里，它很快被接住了：有人懂它，有人愿意接着做，期刊愿意登。

此时它是一个刚结晶的理念符号，背后拴着一个具体的现实读数：那一组只许吃萝卜的人，放弃得早。一根线，一个结。

2000 年代：网越织越密。

接下来十年，几百项研究跟进。可是如前所说，每一项都换了一种任务，每一项的样本都不大。网上的结越来越多，每个结拴在现实上的线，仍然都细。

同时，这个结论从内圈往外圈走。第 13 章讲过弗莱克的同心圆。期刊里写的是“在本实验条件下，被试的坚持时间显著缩短”；到了教科书变成“自我控制会消耗有限的资源”，到了畅销书和讲座，就成了“意志力像肌肉，用多了会累”。每往外走一圈，它就硬一层。到了周以宁的课堂上，它已经是一句笑着说出口的常识了。

此时它的稳，主要是势能撑起来的：引用多、应用多、名气大，网把它往“可靠”那边拉得很紧。

血糖机制：一处早期的对不上。

那个“喝糖水就能恢复”的机制，后来受到不少质疑。有人算过，一次短短几分钟的自我控制任务，大脑多消耗的葡萄糖少得可怜，根本不足以造成那么大的效

应〔转述〕。还有研究发现，只要让被试含一口糖水再吐掉，不咽下去，也能出现类似的“恢复”。

这是一处可以事前指认的对不上：理念里的机制，和生理上的现实读数，不合。它没有立刻拆掉整个效应，可是它让这块石头上出现了第一道缝。

2014 年：账本里的缺口被算出来。

两位研究者卡特与麦卡洛重新分析了已发表的自我损耗研究，用统计方法估算“抽屉”的大小。他们看到的是一种典型的形状：样本小的研究，效应偏偏特别大；把发表偏差校正之后，剩下的效应接近零〔转述〕。

这一步很关键。它没有做任何新实验，只是把网上已有的现实读数重新排一排，就看出了那道滤网的影子。小样本里，只有碰巧做出大效应的研究才被发表了。

2016 年：一次认真的重做。

2016 年，由哈格尔等人牵头，二十多个实验室、两千多名被试，按同一套事先注册好的方案，联合重做了一个经典的自我损耗范式。

方案大致是这样：一组人先做一个费神的划字母任务，要按一套别扭的规则决定划掉哪些字母；另一组人做一个简单版本。然后两组人都去做一个需要克制冲动的反应任务。如果自我损耗成立，第一组在后面的任务里应该表现得更差。

汇总下来，效应大小接近零。

这一次，没有分析的余地，没有抽屉，没有“我们换了一种任务”。同一个方案，二十多个场同时撞。

反应：网也在对账。

鲍迈斯特等人回应说，这次重做选的那种损耗任务太弱，根本没能让被试“累”起来，所以不能说明效应不存在〔转述〕。这个反驳不是无理取闹，它指出了一处真实的可能：重做失败，可能是重做没做到位。第 14 章讲过，有些手感带不进论文里。

后来又有研究者组织了新一轮多地点的大规模重复，这一次让原作者参与设计方案，尽量用他们认可的任务。结果报出来的效应，仍然很小，小到远远撑不起“意志力像肌肉”那样宽的说法〔转述〕。

争论今天还没有完全结束。有研究者认为，在某些条件下也许还有一个很小的效应；也有人认为这个概念应该整个重写〔转述〕。本书不替心理学下结论。

用本章的话收一下。

自我损耗在 1998 年确实结晶过，在一个场里。它稳定，在原来的做法里一次次出现；它整体，是一个完整的说法；它在“独立”那一条上出了问题：一旦离开原来的做法、原来的样本量、原来的分析余地，它就站不住了。

它的二十年之稳，大半是锁化型的：网上的连接越来越多，拴在现实上的线却一直那么细；对不上的读数，被抽屉和分析余地挡在了账外。它看上去一直有人在重复，其实很少有人在撞它。

复现危机，是把这些被挡在账外的对不上，一次性地放了进来。这块看上去很结实的结晶，被熔开了。

熔开的那几年，这个领域有一段时间像一锅粥（混沌）。旧的说法不敢再讲，新的说法还没站住；研究者在会上吵，在网上吵；学生不知道教科书哪一页还能信。这一段很难受，可它是再结晶的前一步。一些新的说法正在成形（介生），在预注册的研究里一次次被试；等它们站稳了，会有新的定型（秩序）。

熔开以后，并不是什么都没剩。

结晶出来的新东西有好几样。一个更小、更有条件的效应说法，或者干脆一个重新设计的概念；一整套新的研究规矩，预注册、注册报告、开放数据、多地联合；还有一个心理学界以前不太当回事的词——“复现”本身，从一件没人愿意做的苦差事，变成了一种有名分的工作。

这才是复现危机最该记住的一面：它不是科学的失败，是科学把一块锁化了的结晶，重新拉回了发生。

◆ 七、放回周以宁的讲台上

回到新加坡那间办公室。

周以宁对辛苒说的第一句话是：“你没做错。你做出来的这个零，是一个真的读数。”

辛苒问：“那我是不是白做了？”

周以宁想了一下，说：“你做之前把规则写下来了，做完照规则报了。这个零是打了时间戳的。它以后会被放进汇总分析里，和别人的读数放在一起。过去二十年，像这样的零大多进了抽屉；你的这个，进的是账本。”

她们把预注册、原始数据、实验程序和分析代码一起公开，把论文挂上了预印本网站。

周以宁还做了一件小事。她翻出自己的博士论文，找到那三处引用自我损耗的地方。她用铅笔在页边各写了一行小字：“此效应在 2016 年大规模重复中接近零，见……”那本论文早就印好、存进了图书馆，改不了。可是她想，至少她自己再翻到这几页时，不会再把它当成地基。

她跟辛苒说起这件事，辛苒问：“老师，你难受吗？”

周以宁说：“有一点。我讲了八年的东西松了，等于我自己身上也有一块东西松了。可是如果我继续讲下去，它会在我这里变成一块锁死的石头。我宁愿它松着。”

这句话说的，正是一个人身上的两种稳。她对这个效应的相信，八年里没有被任何新的读数撞过，是锁化型的；辛苒的那个零撞上来，她让它撞了，没有把它推回抽屉。

那个学期结束前，周以宁改了她的幻灯片。饼干和萝卜那张还在，后面加了四张：2014 年的那次重新分析，2016 年那二十多个实验室的结果，原作者的回应，以及辛苒的那个零。

她在课上不再说“意志力像肌肉，用多了会累”。她说的是：“这里有一个讲了二十年的说法。我们来看看，它是怎样站稳的，又是怎样晃起来的。”

台下的学生没有笑。有一个学生举手问：“那我晚上管不住手点外卖，又是怎么回事？”

周以宁说：“这是个好问题。你的累是真的，你的外卖也是真的。只是‘意志力被用光’这个解释，现在没有过去那么稳了。也许是饿了，也许是那天心情不好，也许是你习惯了每天这个时间点外卖。你可以自己记两周，看看到底和什么有关。”

这是一个心理学讲师在讲台上能做的最好的事。不把一个松动了的结论继续当常识讲下去，也不把它一笔勾销，而是把它是怎样稳的、怎样晃的，原原本本交给学生。

你的日子里，也有很多这样的“研究表明”。

你在家族群里看到“研究表明某种食物能抗癌”，在短视频里看到“科学证明每天喝八杯水”，在育儿书里看到“三岁前决定一生”。下一次，先别问“这是真的吗”，先问三个更好下手的问题。

它是怎样站稳的？是一次次被新的读数撞过、都对上了，还是只是被很多人转、很多文章引？

上一次有人认真地重新检验它，是什么时候？是谁？结果怎样？

如果有人检验出对不上，那个结果有地方发表、有人愿意听吗？

你的工作里也有。一个部门里流传多年的“经验”：周一发的邮件回复率低，某类客户一定要先压价，某个供应商的货不能用。这些说法最初多半来自一两次真实的经历，后来一代代新人照着做，没人再去试。照着做，就不会碰到反例；不碰到反例，说法就越来越硬。

哪天有一个新来的人，不知道规矩，照另一种办法做了一次，结果也不坏——那就是你们部门的一次小小的复现。别急着说他不懂规矩，先把他那次的结果记下来。

你自己身上也有这样的结论。“我天生不擅长数学”“我们家的人都不能吃辣”“这个方法对我没用”。它们也很稳，有的稳了几十年。拿本章的两种稳去照一照：它是一直被你的日子重新检验着，还是很多年前定下来以后，再没去碰过？

一个已经很多年没碰过的结论，未必是错的。可它的稳，只是沉默。

一个结论被供奉起来、再也不许人去撞，那就不只是锁化，而是变成了偶像。科学结论也会这样被供奉，那是第 19 章要讲的科学主义。本章只停在前一步：先学会分辨，眼前这个“稳”，是一直有人在撞的稳，还是很久没人去碰的稳。

带 走 的 话

站得稳不等于方向对，一个结论二十年没人撞，它的稳可能只是沉默；补救就是把对不上放回账里。

小　账

前人在这里关上的门：把复现失败读成“当初的发现是假的”，只分真发现与假发现两档；本书打开的门：先问它是怎样站稳的，分出发生型稳定与锁化型稳定，看出连接度虚高与被滤掉的对不上。

发生被收回为发现的那一下：教科书上“研究表明”四个字。它把一个只在某个场里结晶、靠抽屉与分析余地维持了二十年的结论，收回成了一个早已摆在世界里、被人找到的事实。

想 一 想

1. 你最常转述的一条“研究表明”是什么？你知道它最近一次被认真重新检验是什么时候吗？
2. 你身上有没有一个“我就是这样的人”的结论，很多年没有被新的经历撞过？它的稳是哪一种稳？
3. 你在工作里有没有一个“抽屉”，专门放那些对不上、不好看的结果？如果把它打开，会改变哪个已经定下来的说法？

◆



第　六　编

科学的能量账

导　语

第六编只做一件事：给一个科学事实记账，看它花了多少力气，这些力气又存在哪里。

第 16 章在贵州平塘“天眼”的夜班上。运维工程师秦朗答不上妻子杜蕴那一问：一年花那么多钱，就为了听几颗星星？本章把账从钱上挪到事实本身，分出内能、势能、动能三本账。

钱只买来做功的条件。一个事实结不结实，要看它连着多少东西、经得起多少次拆。OPERA 实验那快了六十纳秒的九个月，用来说清两件看似相反的事：事实为什么难推翻，科学又为什么必须允许推翻。

第 17 章到深圳一家 AI 制药公司。算法工程师葛文轩让大模型一晚上写出三十页综述，组长苏芮一个问题就问住了他。同一个星期，一个蛋白质结构预测模型给出的口袋，却让整个组动了起来。

差别不在哪个 AI 更聪明。差别在对不上由谁提供，动能由谁支付，结晶落在哪里。

读这一编时，请带着一个问题：一个事实落在你身上，你自己付了哪一份力气？

16

第 16 章

一个事实要花多少能量

这一章的问题

天眼听到的一颗新星，要花多少力气才能写进星表？花了这么大力气的事实，为什么还得允许别人来推翻？

◆ 一、凌晨三点的那口锅

秦朗今年四十二岁，在贵州平塘的大山里上夜班。

他是一处大科学装置的运维工程师。装置就是人们常说的“天眼”：五百米口径的球面射电望远镜，嵌在一个喀斯特洼地里，反射面大约有三十个足球场那么大。

这天夜里起了雾。贵州的山里常年多雾。秦朗披着雨衣，打着手电，沿着检修道往上走。头顶一百四十米高的地方，悬着一个三十吨重的馈源舱，靠六根钢索牵着，定位要准到毫米。

一根钢索的张力读数，比平时高了一点点。

一点点，不到报警线。他还是上去了。他见过太多次“一点点”后来变成大事。

凌晨三点，他在机房里喝第二杯茶。手机响了，是妻子杜蕴。孩子发烧刚退，她睡不着，随口问了一句：“你们那口锅，一年得花多少钱？就为了听几颗星星？”

秦朗没答上来。

他知道一些数字：这口锅从提出构想到落成，走了二十二年；落成之后，每年的电、人、备件、维修，都是一笔不小的账。他也知道另一些数字：截至今年，它认证的脉冲星已经超过一千颗。

可是把这两组数字放在一起，“一颗脉冲星值多少钱”，他算不出来。

挂了电话，他看着屏幕上的一行记录：一颗新候选体，周期一点几秒，信噪比还不够。它也许是一颗星，也许是附近一辆车的电火花，也许什么都不是。要把它变成星表里的一行，还要很多人、很多夜、很多次核对。

一个科学事实，从来不是被“看见”就有了的。它要花能量，而且花得很多。

这一章要算的，就是这笔账：一个事实到底要花多少能量，花在哪里，存在哪里。算清了，就能回答两个看起来相反的问题——为什么科学事实这么难推翻，又为什么科学必须允许它被推翻。

◆ 二、前人早就在算账

说科学花钱，并不是新话。前人在这件事上看得很清楚，本书先把他们对的地方写足。

第一个要提的，是皮尔斯。

读过本系列别的书的人知道，本书常说皮尔斯的“无限衍义”默认了衍义是免费的。可公道地说，皮尔斯本人是认真算过研究的账的。他早年在美国海岸测量局工作，写过一篇讨论“研究的经济学”的短文。

这篇短文题为《关于研究经济理论的札记》，1879 年随海岸测量局的年度报告刊出。大意是：研究的经费和精力有限，一个问题值不值得再多测一次，要看多测一次能把误差缩小多少，和它要付出多少成本。

这是很了不起的一步。他把“知道得更准”当成要花代价的事来看，而且给了一个可以计算的思路。

可是这笔账，他记在了“探究的经济”里，没有带回他的符号学。在符号学里，一个符号生下一个解释项，解释项再生下一个，仍旧像是不用付钱。这和书二里说到的那个老问题是同一个：发动机放在了别的抽屉里。

第二个要提的，是“大科学”这个说法本身。

1961 年，美国橡树岭国家实验室的主任温伯格在《科学》杂志上发表《大规模科学对美国的影响》一文。他用“大科学”来描述那些要国家出钱、成百上千人一起干的研究。他提的问题很尖：国家拿出这么多钱，凭什么标准决定支持哪一门？

两年后，科学史家普赖斯出了一本小书，书名就叫《小科学，大科学》（1963）。他数了几百年的科学期刊、论文和科学家人数，得出一个让人吃惊的估计：科学文献的总量，大约每十五年翻一番〔转述〕。照这样长下去，科学迟早会撞到社会能承担的天花板。

这两个人的长处很实在：

- 他们把科学放回了社会里。科学不是几个天才在书房里想出来的，要钱、要人、要楼、要电。
- 他们愿意数。普赖斯数论文，温伯格算经费，都是可以拿出来对账的数字。
- 他们提醒了一个真实的危险：科学会越来越贵，贵到每一项都得掂量。

再往前推三百年，也有人算过这种账，只是不用“预算”这个词。

十七世纪玻意耳的抽气机就是一笔这样的账：机器极难造，别人没有机器，凭什么相信他的读数？请人到场、把实验写细、把图样画出来，样样都要花力气。科学史家夏平与谢弗在《利维坦与空气泵》（1985）里，细写过这段历史（见第 14 章）。

这一点前人看得很准：一个读数要变成大家的事实，光有机器不够，还要付“让它走出去”的那份代价。

后来的科学社会学，沿着这条路走得更远。有人研究实验室的日常怎样一步步把一个读数做成一个事实，有人研究一台仪器怎样在少数几个实验室之间流转、怎样被复制〔转述〕。他们都同意一点：事实不是白来的，有人付了账。

这些都对。本书不打算推翻它们。

◆ 三、账记在了钱上面

可是这些账，记在哪里？

温伯格记在国家预算上，普赖斯记在论文数和人数上，后来的社会学记在实验室的人手和关系上。它们算的，都是“投进去多少”。

那么，投进去的东西，最后变成了什么？

这一问，前人很少接着问下去。他们默认，钱和人投进去，出来的是“知识”；知识是一种像书一样摆在那里的东西，多投就多出，少投就少出。投入和产出之间，是一个黑箱。

本书想打开的，就是这个黑箱。

打一个家常的比方。你家装修，花了二十万。这二十万是账，可是账本上写的是“水泥多少、人工多少”。你真正想知道的是另一件事：这房子到底结实不结实，住得住不住人，十年后墙会不会裂。

钱是条件，不是结果。结实不结实，要看水泥有没有真的凝固，钢筋有没有真的连在一起。

科学也一样。

钱买来的是做功的条件；一个事实结不结实，要看那些功最后有没有凝成一个连得很紧的东西。

前人把账记在钱上，于是“事实”本身仍旧像一个被找到的东西：钱是去找它的路费，找到了，它就在那里。一个事实自己有多结实、为什么结实、结实到什么程度才算数——这些问题在他们的账本上没有位置。

发生被收回为发现的那一下，就在这里。账算得很细，可算的是“找”的成本，不是“成”的成本。

这一下还带来一个实际的后果。温伯格当年那个尖问题——国家该支持哪一门大科学——在“找”的账本上很难回答。按“找”来算，只能比谁离宝藏近、谁的路费便宜，而宝藏在哪里，谁也不知道。

换成“成”的账本，问法就变了：这一门里，有没有一条事前就能指认的落差？周围那张网有多大，能不能托住一个新结晶？有没有足够多的人愿意把一生的动能押上去？三问都答得上来，钱才是在买做功的条件；有一问答不上来，钱再多，也可能只是在一潭没有落差的水上修水车。

这并不是说本书能替国家算预算。它只是换了一个看账的位置：从“找到了没有”，换成“结成了没有、结得有多牢”。

◆ 四、一个事实的三本账

本书换一种记法。不记在钱上，记在事实这颗“粒子”上。

先用两句话交代几个词，跳着读的人也能跟上。

本书说，一个符号是一团关系凝成的颗粒：它**稳定**（能反复出现，不随一次解读散掉）、**整体**（拆开就不再是它）、**独立**（能离开发生地，被带去别处）。这三条叫**三判据**。一团关系满足了这三条，本书就说它**结晶**了。科学事实就是一种结晶：一个读数和一个想法反复对账，最后凝成一句别人也能拿去用的话。

结晶要做功。做功要付三种能量。

第一本账：内能，就是连接度，也就是断裂的难度。

一个事实有多结实，就看要多大的力才能把它拆开。拆开它，要推翻多少别的读数，要改写多少别的推导，要让多少已经在用它的人停下来。连得越多，越难断。

日常的例子：你家门口那棵老树。它不是因为“重”才难挪，是因为根扎进了地下的水管、路基、邻居的院墙。挪它，要动的是一整片。

第二本账：势能，就是关系网的吸引和拉扯。

一个新事实能不能结晶、往哪里结晶，看周围那张网把它往哪边拉。网里留着一个空位，四周的连接都朝那个空位使劲，新东西一落进去就站得住。

日常的例子：拼图拼到最后，剩下一块空。你还没拿到那一块，就已经知道它是什么形状。四周的边在“拉”它。

第三本账：动能，就是沿着路拆开、重接的速率和方向。

这里的“路”，指一步接一步、一个差别接一个差别排出来的顺序（差异序列）。动能就是连接被拆开、又被重新接上的那股劲：有方向，有快慢，也会被黏住走不动。

日常的例子：你学骑自行车。车、路、身体，原来是三样不相干的东西。摔一次，拆开一次；扶起来再骑，重接一次。拆拆接接的那个过程，就是动能在花。

三本账之间，还缺一个启动的东西。本书叫它**对不上**。

对不上，就是两张网在拉扯同一处，出现了落差。 想法那张网说应该是这样，读数那张网说实际是那样。落差像水位差：有落差，水才往下流，才能推动水车；没有落差，再多的水也只是一潭。

所以一个事实的发生，全过程是这样的：先有对不上（势能出现落差）。再有一群人花力气把连接一条条拆开、重接（消耗动能）。最后，新的连接紧到不再轻易断（建立内能）。

拿这个记法，去算一笔真实的大账。

希格斯粒子的账

1964 年，几位理论物理学家各自发表论文，提出一种机制，用来回答一个当时的难题：为什么有些基本粒子有质量。先是比利时的恩格勒与布劳特，接着是英国的希格斯，再是古拉尔尼克、哈根与基布尔三人，几个月里先后在《物理评论快报》上发表论文。按这个机制，应当存在一种新粒子。这就是后来叫作“希格斯玻色子”的东西。

按本系列已定的口径，这次命名属于第四种情形：提出一个理论对象。它在纸上有名字，在推导里有位置；可是在现实里，还没有任何一道痕说它在那里。

这个空位，就是势能。

整个粒子物理的标准理论，后来一块块拼起来，几乎每一块都朝这个空位使劲。没有它，一些推导就接不上。网越完整，空位的拉力越大。这正是拼图最后那一块的形状。

可是光有拉力，不会结晶。还要动能。

动能付了四十八年。

欧洲核子研究中心在日内瓦近郊的地下，建了一个周长约二十七公里的环，叫大型强子对撞机。

为了让质子在里面转起来，上千块超导磁铁要冷却到比外太空还低的温度，约零下二百七十一度。建它花了多少钱，口径不同，说法差得很远：只算加速器本体是一个数，算上几台大型探测器、几千人多年的工资和运行电费，又是另一个数。常见的公开估算，从几十亿到一百多亿美元都有。

钱只是条件。真正的动能，花在人身上。

对撞机运行时，每秒有数以亿计的碰撞。绝大多数碰撞什么也不说明。探测器上的电子学系统要在极短的时间里决定，哪一次值得留下，哪一次立刻丢掉。留下来的数据，一年也是一个庞大的数量，要分到全世界许多机房里去算。

两台大型探测器，一台叫 ATLAS，一台叫 CMS，各自有几千名科学家署名。2012 年那两篇论文，作者各约三千人。它们彼此独立：不同的设计、不同的团队、不同的分析。

2012 年 7 月 4 日，欧洲核子研究中心宣布：两台探测器都在大约 125 吉电子伏的质量附近，看到了一个新粒子的迹象。统计显著性达到了物理学界惯用的“五个西格玛”标准。

“五个西格玛”是什么意思？用大白话说：如果其实什么都没有，单凭运气凑出这么强的信号，大约是三百五十万分之一的机会。

这个标准，本身就是一道连接度的门槛。物理学界在吃过几次“三西格玛的信号后来消失了”的亏之后，把门槛抬高了。抬高门槛，就是要求一个新事实在结晶之前，先证明自己连得够紧。

两台独立的探测器都看到，又是一层。它对应的正是三判据里的“独立”：这个结论不只在一台机器、一个团队身上站得住，换一台、换一群人，它还在。

第二年，诺贝尔物理学奖颁给了希格斯和恩格勒。和恩格勒合写论文的布劳特，在宣布的前一年，即 2011 年，已经去世。希格斯本人在宣布那天已经八十三岁。

这一笔，不在任何预算表上。可它是这笔账里最重的一项。

那个鼓包是谁的符号

这里要停一下，分清一件容易混的事。

2012 年夏天公布的图上，有一条横轴是质量、纵轴是事件数的曲线。在 125 吉电子伏附近，曲线上鼓起一个小包。这个鼓包，是三样东西叠在一起。

第一样，在探测器里，它是现实留下的痕：一束光子打在晶体上沉积的能量，一串带电粒子在硅片里留下的径迹。不需要任何人去解释，这些痕也在那里，记在磁盘上，明天调出来还是那样。这是**现实符号**。

第二样，物理学家把这些痕读成“一个质量约 125 吉电子伏的新粒子衰变成了两个光子”。这是**理念符号**。同样的痕，在不懂标准理论的人眼里，只是一堆数字。

第三样，一个在控制室值了几年班的工程师，看惯了这类图，一眼就知道哪种鼓包像真信号、哪种像本底起伏。这种不用推理就有的手感，沉在他身上，是**自我符号**。

三样叠在一处，事实才站得住。只有现实的痕而没人去读，它是一堆存储；只有理念的读法而没有痕，它是一个空位；没有人身上那份手感，痕和读法之间的几千道工序就没人接得住。一个事实的能量账，三界都要付。

科学家一生的动能

一个人一生能付多少动能，是有数的。

一个物理学博士，读下来往往要五六年。一个研究者真正能干活的年头，大约三四十年。一项大科学装置，从提出到建成，常常就要二三十年。天眼从 1994 年提出构想，到 2016 年 9 月落成，用了二十二年；主持这件事的天文学家南仁东，第二年秋天病逝，没能看到它通过国家验收。

这意味着什么？

意味着一个科学家一生，能真正追到底的对不上，不过寥寥几个。他追了这一个，就追不了那一个。他把二十年押在一台装置、一个空位上，那个空位就成了他一生动能的去向。

这件事有两面。

一面是：正因为动能有限，科学家对自己押下一生的那张网，会有很深的牵挂。新的反常一来，他第一反应常常不是“太好了”，而是“一定是哪里测错了”。这不全是固执，也是一种对动能去向的保护。

还要看到那些不上新闻的人。一台探测器里，有人花了十年调一种硅片的读出电路，有人花了八年写一段把噪声剔掉的程序。2012 年的论文上，他们各占作者名单里几千分之一的一行。他们一生的动能，大半就沉在那一个鼓包底下，外人看不见，可少了谁，那个鼓包都立不起来。

另一面是：正因为动能有限，科学作为一个整体，必须有办法把个人的动能接力下去。希格斯没能亲手做实验，几千个年轻人替他接着付。一个人的一生付不完的账，一个共同体可以分期付。

把这一节压成一张表，方便你带走。

账目	它是什么	在希格斯粒子那里	在你家的日子里
对不上	想法与读数之间的落差	理论里留着一个空位，现实里没有一道痕	体检单上一项指标和你的感觉对不上
势能	关系网的吸引和拉扯	整个标准理论朝那个空位使劲	全家人都觉得“该去复查一下”
动能	沿路拆开、重接的速率与方向	四十八年、几千人、数以亿计的碰撞筛选	挂号、排队、复查、再问医生
内能	连接度，断裂的难度	五西格玛，两台独立探测器，后来多年反复测量	复查结果和几次记录都对得上，你才放心
钱	做功的条件，不是功本身	加速器、探测器、电费、工资	挂号费、检查费、请假扣的工资

◆ 五、它为什么这么难推翻

现在可以回答第一个问题了。

科学事实难推翻，常常被说成“因为科学家保守”或者“因为权威压人”。这两样都有，可都不是最要紧的。

一个事实难推翻，首先是因为它连得太多。要拆它，付出的动能得超过它的连接度。

拿狭义相对论里“没有东西比光在真空里跑得更快”这一条来说。它不是孤零零的一句话。它连着粒子加速器的设计：质子被加速到接近光速时质量怎么变，工

程师每天都在用。它连着卫星定位：卫星上的钟要按相对论修正，否则每天会积累可观的误差（详见第 18 章）。它连着几十年里无数次对光速、对粒子寿命的测量。

它还连着一颗遥远的超新星。

1987 年 2 月，大麦哲伦云里爆发了一颗超新星，编号 SN 1987A。地球上几台中微子探测器，在可见光到达之前几个小时，记录到了一阵中微子：日本的神冈、美国的 IMB、苏联的巴克桑三台探测器，合计二十来个事件。这几个小时，理论上能解释：中微子在恒星核心坍缩时就出发了，光要等冲击波冲出恒星外壳才出来。

这一条连接，后面会派上大用场。先记住它。

所以要推翻“光速不可超越”，不是推翻一句话，是要同时解释好几件事。加速器为什么一直按旧算法好用？卫星钟为什么一直按旧修正准时？那颗超新星的中微子为什么和光几乎同时到？

这就是连接度。它不是谁规定的，是一次次对账累出来的。

日常的例子：你家里传了三代的一本老账本，说爷爷当年借过隔壁一袋米。如果只有这一行字，你可以怀疑。可是如果隔壁家的账本也记着，村里的老人也说起过，你爸小时候还亲手去还过半袋——这件事就很难被一句“我觉得没这回事”推翻了。不是谁不让你怀疑，是它连着太多东西。

连接度还可以量。

本书在别的卷里说过：一个信念要多少反证、多少次对不上才会松动，这个数可以拿来测连接度。科学里，这个数常常写在规矩上。五个西格玛是一种；“至少两个独立实验组复现”是一种；“要与已有的全部精密测量相容”又是一种。门槛越高，说明那个领域里的事实连得越紧，要拆它就越要付大价钱。

◆ 六、为什么还必须允许推翻

可是第二个问题紧跟着来了。

既然事实这么结实，为什么还要允许推翻？一项花了四十八年、几十亿美元、几千人一生动能的结论，留着不动，不是最省事吗？

答案也在能量账里。

一个事实的结实，有两种来路。 第 15 章用两座桥讲过：一直有人重新检验而稳，是发生型稳定；没人再去检验而稳，是锁化型稳定。从外面看，两种一模一样。

放回能量账里，区别在于：前一种的连接度，是一次次付了动能、一次次对账挣来的；后一种的连接度，是过去挣的，后来再没有新的对账往里存，它其实在慢慢变成一个偶像（第 19 章会专门讲这种固化）。

允许推翻，就是让每一个事实都继续留在“发生型”那一边。

这又是能量上的道理：一次真正的推翻尝试，不管成不成，都会逼出一轮新的对账。如果推翻失败，旧事实又多了一圈连接，内能更高了；如果推翻成功，一个新的结晶就在旧事实熔开的地方开始。两种结局都不亏。

真正亏的，是第三种：有对不上，却没人敢说出来。落差还在，可是不做功，它就悄悄散掉了。下一个人遇到同样的落差，又从头来一遍。

可是“允许推翻”也有它的账。

如果每一个怪读数都要全世界停下来追，科学的动能很快就会被耗光。一个人一生只有几十年，一个共同体一年也只有那么多人、那么多机时。所以科学并不是对一切对不上都一视同仁，它在门口设了几道筛子。

第一道筛子，是门槛。前面说的五个西格玛就是一种：落差不够大，先别惊动大家，自己再测。

第二道筛子，是误差预算。一个认真的实验组，会把每一个可能出错的环节列成一张表，每一项估一个可能的偏差，加起来看总误差有多大。读数超出了总误差，才算真正的对不上。

第三道筛子，是独立复测。一个组说了不算，要换一台仪器、换一群人。

这三道筛子，不是为了把推翻挡在门外，是为了把有限的动能用在真正的落差上。门槛定得太低，动能被假警报耗尽；定得太高，真落差被挡在门外，事实就慢慢滑向锁化。分寸在哪里，各个领域都在摸索，也常常吵架（心理学在这上面吃过的亏，见第 15 章）。

还有一种亏，在课堂上天天发生。

一个高中生在课本里读到“希格斯粒子的质量约 125 吉电子伏”。这句话在物理学界是结晶过的，连着四十八年、几千人、两台探测器。可是到了这个学生身上，他没有付过一点动能：没有卡住过，没有算过，没有怀疑过。这句话在他那里只是一条信息，考完就可能忘掉。

这不是学生笨。**免费得来的符号结晶不了。** 一个事实在共同体里结晶了一次，到每一个新的人身上，还得再结晶一次，再付一次账，只是付得少一些（第 20 章会专门讲这件事）。下一章要讲的 AI，把这道难题推到了更尖的地方。

为什么难推翻，和为什么必须允许推翻，是同一笔账的两面：前者说的是连接度有多高，后者说的是连接度从哪里来。

下面用一个完整的例子，把这笔账从头走到尾。

◆ 七、快了六十纳秒的那九个月

缝在哪里

先按本书自己守的规矩：用“对不上”讲一件事之前，要先在史料里独立指认出那条缝。这一次的缝，非常好找，它就是一个数。

意大利中部的格兰萨索山底下，有一座地下实验室。那里有一个叫 OPERA 的实验，由来自十几个国家的一百多名物理学家合作。欧洲核子研究中心把一束中微子从日内瓦附近射出来，穿过地壳，大约七百三十公里之后，到达格兰萨索。

OPERA 本来不是为测速度建的。它的主要任务，是看中微子在路上会不会变成另一种中微子。测飞行时间，是顺手做的一件事。

可是这件顺手的事，测出了一个怪数：中微子到得比光还早，早了大约六十纳秒。

六十纳秒，就是六千万分之一秒。放在七百三十公里的路程上，相当于中微子比光快了大约十万分之二点五。

这就是那条缝：一个读数，和一条连接度极高的理论，正面对不上。

为什么几乎没人相信

2011 年 9 月 23 日，OPERA 合作组公开了这个结果。在此之前，他们已经自己查了半年，没找出毛病，统计上用了一万五千多个中微子事件。

他们公布的时候，用词很克制。新闻稿里明说：还需要进一步的审查和独立检验，才能确证或者推翻这个结果。

物理学界的反应，几乎是一边倒的怀疑。

怀疑的人里，当然有人只是凭直觉。可是更有分量的怀疑，来自一笔很具体的账，就是上一节让你先记住的那颗超新星。

如果中微子真的比光快十万分之二点五，那么从大麦哲伦云飞过来的那批中微子，一路走了约十六万多年，就应当比光早到四年多。可实际记录是：只早了几个小时，而且这几个小时有现成的解释。

这里要小心一点：超新星的中微子和 OPERA 的中微子，能量差得很远，种类也不完全一样，所以这笔账不能直接抵消，只能说“很难同时成立”。正因为如此，

没有人说 OPERA 一定错了；大家说的是：要它成立，就要同时拆开一大片已经连得很紧的东西。

用本书的话说：这个读数带来的落差是真的，可是它要拆的那个事实，连接度太高了。要让它熔开，需要的动能远远超过一个实验组、一次测量能付出的。

为什么必须让它说出来

那么，要不要压下这个结果，等弄清楚了再说？

OPERA 组内部，正是在这一点上有过争论。据当时《物理世界》《科学》等的报道，有一些资深成员认为公布得太急，没有在第一版论文上署名。最后的选择是：公开，同时请所有人来挑错。

这一步，在能量账上是对的。

一个实验组自己查了半年，动能已经用到头了。再查下去，同一批人用同一套眼光，很难看见自己的盲点。公开，等于把落差交给整个共同体，请更多的人、更多的动能来一起做功。

接下来的几个月，世界各地的物理学家写了上百篇论文，有的提出理论上的解释，有的指出测量上可能出问题的环节。理论那一侧，美国物理学家科恩和格拉肖在 2011 年秋天提出一个论证。如果中微子真的超光速，它们在路上应当以某种方式辐射掉能量，到达时的能量分布会和观测不符。这又是一条独立的连接，从另一个方向顶住了旧事实。

缝是怎样合上的

2012 年 2 月，OPERA 合作组自己报告了两个可能的误差来源。

一个是一根光纤接头。它连接着接收卫星授时信号的设备和实验的主时钟。接头没有插到位，信号就多走了一点冤枉路，正好让中微子看上去提前到了。

另一个是一块电路板上的时钟，频率比标称值略快，作用方向和光纤正好相反，部分掩盖了前一个问题。

同年 3 月，同一座地下实验室里的另一个实验 ICARUS，用同一束中微子做了独立测量：七个中微子，平均速度与光速相符。同一个月里，实验室的研讨会上确认，采集数据期间那根光纤确实没有完全插好。

2012 年 6 月 8 日，国际中微子物理大会在日本京都召开。会上，欧洲核子研究中心的研究主任宣布：格兰萨索的四个实验，测得的中微子速度都与光速相符。

从九月到六月，大约九个月。

这九个月，账是怎么记的

现在把这九个月放进三本账里。

对不上：一个六十纳秒的读数，与一条高连接度的理论相撞。缝是清楚的，事前就能指认，不是事后硬套。

势能：一边是整个相对论和与它相连的一切，拉着读数往“一定是测错了”那边去；另一边，是物理学界对新东西的胃口，和一个实验组不愿意放过自己读数的认真，拉着它往“也许真的是新物理”那边去。两边都在使劲，落差很大，所以引来了大量的功。

动能：一个组半年的自查，几百篇论文的推敲，另一个实验专门做的复测，加上那个组自己一根根线、一块块板地排查。这是很多人在几个月里，把一条条连接拆开、重接，看到底是哪一处松了。

内能：结局是旧事实没有熔开。“光速不可超越”多了一次扛住正面挑战的记录，又多连上了一条：连在格兰萨索的四个实验上，连在那根光纤上。它的连接度，经过这一轮，比九个月前更高了。

这一次没有新的理论结晶，可是结晶了别的东西。

一个是关于测量本身的结晶：长距离授时、光纤接头、时钟校准，这些原来不太被注意的环节，成了后来做精密计时实验的人必查的项目。现实里的一根接头，经由这次事件，变成了理念里一条操作规矩，又沉进了一批工程师的手上习惯。这是三界之间一次完整的迁移。

另一个，是代价。

2012 年 3 月底，OPERA 的发言人埃雷迪塔托和物理协调人奥蒂耶罗辞去了职务。辞职前，合作组内部有过一次不信任投票，票数不足以强行改选，却显出多数人已经不再支持领导层。奥蒂耶罗说，原因是组内长期存在的分歧，不是测量误差本身；埃雷迪塔托事后公开表示，他辞职是为了帮助组内重建共识，并批评了媒体的炒作〔据当时《自然》新闻博客转述〕。

公道地说，他们没有造假，也没有隐瞒。他们做的，恰恰是本书说的“必须允许推翻”里最难的那一步：把一个自己也拿不准的落差，交给所有人去检验。

可是做这一步的动能，有一部分是从他们个人的职业生涯里支出去的。

这也是科学能量账的一部分：允许推翻，是对整个共同体有利的事；可是付账的，常常是具体的几个人。一个健康的科学共同体，要想让人继续敢于把落差说出来，就得想办法别让说出落差的人独自承担全部的账。

◆ 八、雾里的那根钢索

回到贵州的雾夜。

秦朗第二天早上交班前，把那根钢索的张力读数又看了一遍。还是高一点点。他没有在交班本上写“正常”，写的是“偏高，原因待查”。

接班的同事问他：“不到报警线，写它干什么？”

秦朗说：“不写，下一班就不会看。不看，它就一直是‘一点点’。”

这句话，就是这一章的一个小样。一个读数和你心里的“应该”对不上了，落差就在那里。写下来，是把落差交出去，让下一班的动能接着付；不写，落差也还在，只是不做功了，悄悄地散了，或者悄悄地攒着。

后来查出来，是一个传感器的温度补偿出了一点偏差，钢索本身没事。

没事，可是这一查不白查。那个传感器的补偿参数被改了；交班本上多了一行“雾天注意该型传感器温漂”；新来的徒弟第一次上夜班，就被叮嘱了这一句。一根钢索的“一点点”，在一个运维组里结晶成了一条规矩。

那颗周期一点几秒的候选体，后来也有了下文。

它的路比钢索长得多。天眼周围划了一片半径约三十公里的无线电宁静区，核心的五公里范围内不许带手机，因为一部手机的信号，在这口锅耳朵里就像一声炸雷。即便如此，候选体里还是混着大量的人为干扰：远处的雷达、高空的飞机、某一台设备的电火花。

筛候选体，是一道一道拆开再接上的活。先看它的周期稳不稳，再看它在不同频率上到达的先后符不符合星际介质的规律，再隔几周去同一个位置重听一次。每一道，都有可能让它散掉。

散掉的是大多数。秦朗所在的团队里，管数据的同事有一句玩笑话：一颗星背后，是成百上千个“不是星”。

这一颗没有散。几个月后，它被重新观测确认，有了一个由天球坐标组成的编号，写进了脉冲星星表。据报道，天眼最早认证的那几颗脉冲星，当年还请了澳大利亚的帕克斯射电望远镜做独立的复核。

这个编号，按本系列的口径，属于命名的第三种情形加第一种情形：一个已经能被反复辨认的东西，得到一个制度认可的身份。名字不是它被“找到”那一刻的奖状，是它扛过了一道道拆解之后，才被允许拿走的通行证。从此，它能离开贵州的这口锅，被世界上任何一个研究脉冲星的人拿去用——它独立了。

秦朗下班回家，杜蕴问他：“想好了吗，一颗星值多少钱？”

他说：“算不出来。可是我知道钱花在哪儿了。钱买的是条件：电、钢索、我们这几十号人的班。真正的账，记在那颗星身上。它要被我们这口锅听到，被别的望远镜再听一遍，被写进星表，被后来的人拿去用。每多一个人用它、核它，它就结实一分。”

杜蕴想了想，说：“跟咱们攒的这个家差不多。房子是花钱买的，家不是。”

他们的女儿那天退了烧，睡得很好。体温计上的那个数字，和妈妈手心摸到的额头，终于对上了。

这一章想留给你的，就是那句话：钱能买来做功的条件，买不来结晶本身。

一个事实的价钱，不写在它花了多少钱上，写在它连着多少东西、经得起多少次拆上。 它难推翻，是因为它被很多次付过账；它必须允许推翻，是因为只有继续有人来拆，那份结实才是活的。

你身边每一个“大家都知道”的事，都可以这样问一句：它是被一次次检验过才这么稳，还是只是很久没人去碰了？

带 走 的 话

钱只买来做功的条件；一个事实结不结实，看它连着多少东西、经得起多少次拆。

小　账

前人把科学的账记在钱、人和论文上，关上了“事实本身有多结实”这扇门；本书把账记在事实这颗粒子上，打开了内能、势能、动能三本账。

发生被收回为发现的那一下，在于把投入看成“去找事实的路费”——好像事实早就摆在那里，钱只是找到它的代价。

想 一 想

1. 你心里有没有一件“一直都知道”的事，它到底被多少次独立的经历核对过？还是只是很久没人碰过？

2. 你上一次察觉一个“一点点”的不对劲，是写下来交给别人，还是自己咽下去了？如果咽下去，那个落差后来去了哪里？

3. 你这一生能真正追到底的问题，可能不过几个。你眼下正在付动能的那一个，是什么？

◆

17

第 17 章

AI 进入科学：生成的综述与结晶的发现

> **这一章的问题**
>
> 同一个星期，两个 AI，为什么一个让葛文轩答不上组长的问题，另一个却让整个组动了起来？

◆ 一、一晚上写完的综述

葛文轩三十岁，在深圳一家 AI 制药公司做算法工程师。

公司要立一个新项目，靶点是一种和肺纤维化有关的激酶。组长苏芮让他在周五组会前，交一份这个靶点的文献综述。

周三晚上十点，他打开一个大模型，把靶点名字、几篇关键论文的题目、想要的结构一股脑儿贴进去。到十二点，一份三十页的综述出来了：背景、机制、已有的化合物、动物模型、临床进展，一应俱全，后面列着一百多条参考文献。

他读了一遍，写得真好。比他自己憋一个星期写的，条理还清楚。

周五组会，他放了十分钟幻灯片。苏芮听完，只问了一个问题：“这个靶点在病人肺组织里的表达，和小鼠模型里的表达，对得上吗？”

葛文轩愣了一下。综述里有一段讲小鼠模型，有一段讲病人样本，写得都很顺。可是两段放在一起对没对过，他不知道。他翻了翻文稿，答不上来。

会后他去核参考文献。一百多条里，有两条他怎么也搜不到；还有几条，论文是真的，可是论文里根本没有综述里引它说的那句话。

那天下午，他心里很别扭。

别扭的不只是这件事。就在同一个星期，他用另一个 AI 工具——一个蛋白质结构预测模型——给这个激酶算了一个三维结构。结构图上，在一个原来没人注意的

位置，有一个口袋状的凹陷。做药物化学的同事看了，眼睛一亮，说这个口袋也许能放进一个小分子。

同样是 AI，同样一个星期。一个给了他一份读着很好、却在他身上什么也没留下的综述；另一个给了他一个口袋，让一整个组开始动起来。

差别在哪里？

这一章要回答的，就是这个问题。答案不在“哪个 AI 更聪明”，而在一笔能量账：对不上由谁提供，动能由谁支付，结晶发生在哪里。

◆ 二、它确实做成了一件大事

先把 AI 在科学里做成的事写足。这件事是真的，而且很大。

一个五十年的难题

蛋白质是一串氨基酸连成的链。这条链在细胞里会自己折叠起来，折成一个特定的三维形状。形状决定了它干什么：酶的口袋能抓住什么分子，抗体的尖端能认出什么病毒，都取决于它折成了什么样子。

二十世纪中叶，美国生物化学家安芬森做了一系列实验，让一种酶先散开、再自己重新折回去。实验显示出一个重要的意思：在合适的条件下，一条链会折成什么样子，主要由它的氨基酸序列决定〔转述〕。他因此在 1972 年分享了诺贝尔化学奖。

这句话打开了一个诱人的可能：既然序列决定形状，那只要知道序列，就应当能算出形状。

可是算不出来。

1969 年，美国分子生物学家列文索尔在一次学术会议上提出了一个后来以他命名的难题〔转述〕。一条普通长度的链，可能的折法多到天文数字，如果它一种一种去试，试到宇宙终结也试不完。可是真实的蛋白质往往在极短的时间里就折好了。它是怎么“知道”往哪里折的？

于是有了几十年的笨功夫。

1958 年，英国的肯德鲁用 X 射线晶体衍射，第一次解出了一个蛋白质（肌红蛋白）的三维结构。从那以后，一代代结构生物学家，把蛋白质提纯、结晶、拿去打 X 射线，再从衍射图里一点点反推出原子的位置。一个结构，常常要一个博士生好几年。

1971 年，蛋白质数据库成立，刚开始只收了七个结构。后来，人们又发展出核磁共振、冷冻电镜等方法。到二十一世纪二十年代，这个库里已经积累了二十万个以上实验测得的结构。

每一个结构，都是一次现实与理念的对账：衍射图是现实留下的痕，原子模型是读出来的理念，两者要反复比对、修正，直到吻合得足够好。

一场盲测

1994 年，一群研究者发起了一个两年一次的竞赛，叫 CASP，“蛋白质结构预测关键评估”。规则很简单，也很狠：组织者拿到一批刚刚用实验解出、还没有公开的结构，只把序列发给参赛者；参赛者交上预测，再和实验结果比。

这个规则的妙处，在于它把**对不上**制度化了。你预测得再漂亮，也要拿去撞一个你事先看不到的现实。

这个竞赛由美国结构生物学家莫尔特与菲德利斯等人发起。它的规则，几十年里几乎没有放松过：谁也不许提前看到答案，评分标准公开，结果公开。它本身就是一台制造对不上的机器，而且这台机器归整个领域共有，不归任何一家公司。

此后二十多年，各路方法的成绩一点点往上爬，可是离“和实验差不多准”一直有一段距离。

2018 年，英国 DeepMind 公司的 AlphaFold 第一次参赛，在 CASP13 拿了第一。2020 年，第二代 AlphaFold 在 CASP14 上，预测和实验结构的吻合程度，用竞赛的标准分数衡量，中位数达到了 92.4 分（满分 100），在 97 个目标里有 88 个是全场最好。许多预测已经接近实验本身的精度。

2021 年 7 月，相关论文在《自然》杂志发表，程序代码公开；同月，一个预测结构数据库上线。一年后，库里已经有大约两亿个结构，几乎覆盖了人们已知序列的所有蛋白质。

2024 年，诺贝尔化学奖的一半授予 DeepMind 的哈萨比斯和江珀，表彰蛋白质结构预测；另一半授予做计算蛋白质设计的贝克。

这是一件实打实的事。全世界的实验室在用这些结构设计实验、筛选药物、理解疾病。葛文轩看到的那个口袋，就是这样来的。

它的意义还不止于“算得准”。过去，一个实验室想研究一个没人解过结构的蛋白质，第一步往往就要押上几年；现在，第一步可以先拿一个预测结构来看，看完再决定把力气押在哪里。用上一章的话说，AlphaFold 替无数实验室省下了大量的动能，让他们能把有限的一生，押在更值得追的那几个落差上。

2024 年 5 月，第三代 AlphaFold 发布，开始预测蛋白质和 DNA、RNA、小分子等结合在一起时的结构〔转述〕。这又是一步。可是开发它的人自己也说得清楚：预测要拿去实验里验证，许多复杂情形仍然要靠实验来定〔转述〕。

这句老实话，后面会派上用场。

一个更大的期待

这件事还给了很多人一个更大的期待。

早在 2008 年，美国《连线》杂志的主编安德森就写过一篇很有名的文章，题为《理论的终结》，刊在当年 7 月号上，网络版六月下旬先发。他的意思是：数据多到一定程度，就不再需要先提出假说、再做实验去检验；只要让计算机在海量数据里找相关，答案自己就会浮上来。

这种说法后来被很多人批评，可它不是瞎说。它对在几处：

- 很多问题确实可以从数据里找到人想不到的规律，AlphaFold 就是一例。
- 人的直觉有偏见，机器在一些地方能绕开这种偏见。
- 科学里大量重复、琐碎的工作，确实可以交给机器，省下人的力气。

“AI for Science”今天之所以热，正是因为这几处都在应验。

还有一个更近的例子，是新药研发。

2020 年 2 月，美国麻省理工学院的柯林斯团队在《细胞》杂志上报告了一项研究。他们训练了一个深度学习模型，让它在几千种已有药物和候选分子里，预测哪

些能杀死细菌。排在前面的一个分子，原本是作为糖尿病药物开发、后来搁置了的化合物。团队在培养皿和小鼠身上做了试验，它确实对多种耐药菌有效。他们给它起名叫 halicin。

一个本来要治糖尿病的分子，原来能杀细菌。这个“原来”，是机器先指出来的。

◆ 三、同一个 AI，账记在两处

那么，回到葛文轩的那个星期。为什么一个 AI 留下了口袋，另一个 AI 留下的是一份答不上问题的综述？

先说一个反面的公开例子。

2022 年 11 月，美国 Meta 公司发布了一个专门为科学训练的语言模型，叫 Galactica，宣传说它能写综述、写百科条目、解答科学问题。在线演示上线后，很快就有研究者贴出它生成的东西：语气权威、格式规范，内容却有编造，引用的文献有的根本不存在。三天后，演示被撤了下来〔据《麻省理工科技评论》2022 年 11 月报道转述〕。

公道地说，Galactica 的设计者想做的是一件有价值的事：把浩如烟海的科学文献组织起来，让人更快找到要读的东西。它出事，不是因为语言模型天生不能用于科学。今天，许多研究者每天都在用语言模型查文献、改程序、理思路，用得很好。

它的教训在别处：一个专门写科学文字的工具，被拿来直接产出“像科学”的成品，中间少了一道对账。写出来的东西越像样，少了的那道对账越不容易被看见。

它和 AlphaFold，都是 AI，都是在海量数据上训练出来的。差别在哪里？

差别一：训练它的东西，是不是对过账的现实痕迹。

AlphaFold 学的，是训练时库里的十七万多个实验结构。每一个结构背后，都有一块晶体、一张衍射图、一个博士生几年的挣扎。用本书的话说，它吃进去的，是半个世纪里无数人付过动能、和现实反复对过账的东西。

一个只读文本的语言模型，学的是文字和文字之间怎么接。文字里当然也有对过账的结论，可是对过账的和没对过账的、真的和编的，在文字的接法上看起来一样顺。

差别二：它的输出，有没有被拿去撞一个它事先看不到的现实。

AlphaFold 走进人们视野，靠的不是它自己说自己准，是 CASP 的盲测：预测交上去，和一个它没见过的实验结构比。对不上就是对不上，分数摆在那里。

一份生成的综述，没有这道关。它写得顺，读的人也觉得顺，两边都顺，就没有对不上。

差别三：它自己知不知道哪里不可靠。

AlphaFold 给每一段预测都附一个置信度分数。蛋白质里有些区域本来就是松散、会动的，它在那里给出的分数就低，等于老实说“这里我不知道”。研究者们也很快摸清了它的边界：天生无序的区段、一个蛋白质的多种构象、和别的分子结合时的样子，都是它的弱处〔转述〕。

一份流畅的综述，每一句话的语气都一样笃定。真的和编的，在页面上长得一模一样。

把这三条合起来看，就能看清：

AlphaFold 不是因为“更聪明”才留得下东西，是因为它整个嵌在一套对账制度里——吃进去的是对过账的痕，吐出来的要再去对账，自己还标出哪里没对过。

这也正是“理论的终结”那种说法停下的地方。数据本身不会提供对不上。相关可以从数据里浮上来，可是“这个相关是真的还是凑巧的”，要靠一个事先看不到的现实去撞。halicin 也是如此：模型排出名单，只是第一步；它在培养皿和小鼠身上真的杀死了细菌，名单上的那一行才变成一个事实。机器提供了一个方向，现实提供了对不上，实验室里的人付了动能。

一个预测结构是谁的符号

这里还要分清一件事，否则很容易把 AlphaFold 说过头。

一张预测结构图，到底是什么？它不是现实留下的痕。晶体衍射图是现实的痕：X 射线打在晶体上，底片上留下的斑点，不需要谁去解释也在那里。预测结构没有这样一道痕，它是模型从十几万个对过账的结构里学出规律、再推出来的一个形状。

所以，它是一个**理念符号**，而且是一个候选的理念符号。它有很好的来历，有置信度，在大多数地方和实验很接近；可是对于一个具体的蛋白质，它要变成事实，仍然要和这个蛋白质自己的现实痕迹对一次账。

按本系列命名的四种情形来看，数据库里每一条“预测结构”，更接近第二种：新的区分和新的名字一起，帮着形成一个可辨认、可操作的单位。一个已知的蛋白质，有了一个能反复调出来、能拿来设计实验、能和别的形状比对的候选形状。

它还不是“氧”那样的理论对象（第四种）：它不提出一个新的实体，也不去和一套旧解释比高下。它有名字、有编号、有坐标，可是不会因为进了数据库，就自动成为实验确认的事实。数据库的设计者把置信度和“预测”字样标在每一条上，正是守住了这条界线。

这条界线一旦模糊，偶像就开始长出来：一个人引用预测结构，像引用实验结构一样笃定；下一个人引用他，再下一个人引用下一个人。几轮之后，没人记得那原本只是一个候选。这种稳，是没人再去检验的稳，本书叫它锁化型稳定（见第 15 章；第 19 章专门讲这种固化）。

把这几处放在一张表里看。

对照项	生成的综述	结晶的发现
吃进去的是什么	文字与文字的接法，真的编的混在一起	付过动能、对过账的现实痕迹（如实验结构）
对不上从哪里来	没有，读起来处处都顺	一个事先看不到的现实（盲测、湿实验、病人）
哪里不可靠	不标，句句一样笃定	标出来，低置信处就是要回到实验去的地方

对照项	生成的综述	结晶的发现
动能谁付	机房付了电费，读者一分没付	机房付一部分，实验者和使用者付另一部分
在读者身上留下什么	一份信息，考问一句就散	一个能离开 AI、自己讲得出来的结晶
错了会怎样	很难被察觉，可能被一路转引	撞上下一个现实时暴露，熔开再结晶

表里的右栏，不是“更好的 AI”，是“被放进对账制度里的 AI”。同一个语言模型，放进对账制度里，也可以站到右栏去。这正是下面要讲的。

◆ 四、网和链，要在对话里才发生

先交代几个词

照例先用几句话把本章要用的词交代清楚，跳着读的人也能接上。

本书说的**结晶**，是一团关系凝成了一个站得住的东西。它**稳定**（换个问法、隔一段时间还在）、**整体**（拆开就不再是它）、**独立**（离开发生它的那个地方，还能被带去别处）。这三条叫**三判据**。

结晶要付三种能量：**内能**是连接度，就是断裂的难度；**势能**是关系网的吸引与拉扯；**动能**是沿着路（差异序列）一步步把连接拆开、重接的速率与方向。启动这一切的，是**对不上**：两张网拉扯同一处，出现落差，像水位差一样，有落差才能做功。

上一章算过：一个科学事实，要花掉很多人一生的动能，才结晶得出来。这一章接着问：当机器能替人干掉其中一大部分活的时候，这笔账怎么变？

网与链

本系列的书四《大模型是索绪尔的网、皮尔斯的链：符号在对话中才发生》，专门讲大模型的符号学。它的核心句是：**大模型是索绪尔的网、皮尔斯的链，要在与用户的对话中才最后发生**。

这句话分三截。

第一截，**索绪尔的网**。语言学家索绪尔说过，一个词的价值，来自它和别的词的差别。大模型里每个词的意思，正是从它和别的词怎样一起出现、怎样彼此区别里学出来的。它是一张由差别织成的、极其巨大的网。

第二截，**皮尔斯的链**。哲学家皮尔斯说，一个符号会生出一个解释，解释又成为新的符号，一路往下生。大模型逐词生成，一个词接出下一个词，正是这样一条链，而且第一次被真正跑了起来。

第三截，**要在与用户的对话中才最后发生**。这一截最要紧。网再大，链再长，它们自己都在理念这一界里转：文字接文字，说法接说法。现实里那块晶体、那只小鼠、那个病人的肺，不在网里；用户心里那个卡住的地方，也不在网里。

符号要真的发生，得有现实的痕和人身上的东西进来，和网里的说法撞一下。撞的地方，就在对话里，就在用的人身上。

两本账不能互抵

所以，AI 进入科学之后，能量账要分成两本记。

一本是机房的账。训练一个大模型，要耗大量的电和算力；每生成一段话，也要耗电。这本账是真的，付得也很多。

另一本是人身上的账。一个人读懂一段话、把它变成自己能用的东西，要付他自己的动能：卡住、想、怀疑、核对、重说一遍。

这两本账不能互抵。 机房付了再多电费，也不会替读者把动能付掉。就像健身房的电费交得再多，你的肌肉也不会因此长出来。

葛文轩那份综述，机房那本账付得很足，三十页、一百多条文献，两个小时。可是他自己那本账，几乎是零。他没有卡住过，没有核过哪两段对不对得上，没有自己重说过一遍。

免费得来的符号结晶不了。 那份综述在他身上，只是一条信息。苏芮一个问题，它就散了。

常规科学被接管之后

这件事放大到整个科学，就成了一个更大的问题。

科学史家库恩把科学的大部分日常叫作“常规科学”：在一套公认的框架里解一个个难题，像做填字游戏（详见第 6 章）。查文献、整理数据、写综述、算结构、筛分子、调参数，这些都属于常规科学的活。

今天，这些活正一样一样被 AI 接过去。这是好事，它真的能省下大量的人力。

可是常规科学还有一个不太被说起的作用：它是**对不上的产地**。

一个博士生花三年解一个蛋白质结构，三年里会碰到无数次“不对”：晶体长不出来，衍射图和模型对不上，某个原子的位置怎么摆都别扭。绝大多数“不对”后来被证明是操作问题。可是偶尔，有一个“不对”怎么也消不掉，它就成了一个新问题的起点。上一章说的天眼的候选体、OPERA 那六十纳秒，都是在这种日常的笨功夫里冒出来的。

当这些笨功夫被机器一键完成，问题就来了：**对不上，由谁提供？动能，由谁支付？**

机器在网里转得很顺。它的毛病不是会出错，人也会出错。它的毛病是，它出错的时候常常不疼：没有一块晶体拒绝长出来，没有一只小鼠死给你看。落差还没形成，就被流畅的文字抹平了。

一个科学家如果只拿着 AI 的结果往下走，他就同时丢了两样东西：现实那一头的对不上，和自己身上付动能的机会。

还有一层，是关于下一代的。

一个年轻的研究者，过去要在常规科学的笨功夫里泡上几年，才长出一种手感：哪种数据像是真的，哪种结果“太好了反而可疑”。这种手感是一种自我符号，沉在身上，不用想就有。它是一次次被现实顶回来、一次次付动能才练成的。

如果笨功夫全被机器做完，这份手感从哪里长？一个从来没有亲手解过结构的人，看到一张漂亮的预测图，他有没有能力觉得“这里有点不对”？

这不是要年轻人拒绝 AI，回去做所有的笨功夫。这是说，一个实验室、一个领域，得有意留下一部分让人亲手撞现实的活，像飞行员即使有自动驾驶，也要定期手动起降。对不上的产地，不能全部外包。

它为什么在对话里才发生

现在可以把“要在与用户的对话中才最后发生”说得更透一点。

本书的三角说：理念符号，是现实符号和自我符号对不上时被逼出来的。写成一句话：理念符号由现实与自我共同决定。大模型网里装的，全是理念这一界的东西。现实的痕，它没有；一个人身上卡住的那份别扭，它也没有。三角缺了两个角。

缺的两个角，只有在对话里才补得上：用户带来他的卡住，那是自我这一角；用户带来他的实验读数、他的病人、他的原始数据，那是现实这一角。三个角凑齐，一个新的理念符号才有可能结晶。

所以，同一个模型，对着葛文轩周三晚上那句“写一份综述”，和对着他后来那句“预测的口袋很好，为什么分子结合不上”，是两回事。前一句里，三角只有一个角，链只是在网里顺着往下滚；后一句里，三个角都在，链被一个落差拽住了方向。

不是模型变了，是对话变了。

本书的回答

本书的回答，可以压成三句：

- **对不上，要从网外面来。** 来自现实的痕：实验、观测、病人、原始数据；也来自人自己身上的卡住：我原来以为这样，现在看起来不是。
- **势能，AI 可以给，而且给得前所未有地多。** 它是迄今最大的一张网，能把几十年的文献、无数的说法摊在你面前，告诉你这个问题四周连着什么。网能托住结晶，可是不能代替结晶。
- **动能，必须由结晶发生的那一方付。** 你要在自己身上结晶，就得你自己付；一个领域要结晶，就得这个领域里有人去做那个撞现实的实验。

这里要防一个误会：说“动能要自己付”，不是说 AI 只能让人更慢。

动能是连接被拆开、重接的速率。一个好的对话者，可以让这个速率快很多。你卡在一个地方，自己想要三天才能想到的反例，AI 一分钟摊在你面前；你一个人要翻一周的文献，它一晚上帮你理出线索。拆和接，都快了。

前提只有一个：拆和接要发生在你身上。它摊出反例，你得自己掂量这个反例打不打得中；它理出线索，你得自己顺着线索走一遍。快的是你的动能，不是它替你跑完了你的路。

打个比方：自行车让人跑得比走路快得多，可是脚还得自己蹬。电动车不用蹬，也快，可是骑一年电动车，腿不会变得更有力。AI 可以是你的自行车，也可以是你的电动车，看你怎么骑。

按这三句，AlphaFold 的成功和那份综述的失败，就能放在同一把尺子上量。AlphaFold 的对不上来自实验结构和盲测；它的动能有半个世纪的结构生物学家先付过，有今天用它的实验者接着付；那份综述，对不上没有来源，动能没有人付。

◆ 五、让符号落在人身上的协作

那么，什么样的人机协作，能让符号真的在人身上结晶？

这里说的不是一套操作手册，是几条从能量账里推出来的规矩。每一条都配一个日常的样子。

第一条：先带着自己的对不上来。

打开 AI 之前，先写下一句话：我卡在哪里？我原来以为什么，现在什么东西和它对不上了？

日常的样子：你去看医生，最有用的不是说“我不舒服”，是说“我平时爬五楼不喘，这两周爬三楼就喘了”。后者带着一个落差，医生才有地方下手。问 AI 也一样，带着落差去问，回来的东西才有地方落。

葛文轩第一次写综述，带去的只有一个靶点名字。没有落差，生成得再多，也只是一潭平水。

第二条：让 AI 给场，别让它给结论。

请它把这个问题四周连着的东西摊开：有哪些派别，哪些数据互相矛盾，哪些地方大家还在吵。尤其要请它把反对的意见摆出来，甚至请它专门来驳你的想法。

日常的样子：你要买房，最有用的朋友不是那个说“买吧，肯定涨”的，是那个把这一片的学校、地铁、老小区的毛病都摊开给你看的。前者给你一个结论，后者给你一张网。

第三条：每一句要用的话，都拿去撞一次现实。

引用的文献，亲手打开原文，看那句话在不在；给出的数字，回到原始数据去对；推荐的方向，设计一个最小的实验去试。AI 给出的东西，先当作候选，不当作事实。

日常的样子：导航软件告诉你前面右转，可是前面挂着“道路施工”的牌子。你信牌子，不信导航。牌子是现实的痕。

第四条：自己重说一遍。

读完 AI 的回答，把它关掉，用自己的话、对着一个不懂的人，把这件事讲一遍。讲不出来的地方，就是还没结晶的地方。再回去问，再讲。

日常的样子：学做一道菜，看十遍视频不如自己炒一次。炒糊了的那一次，比看了十遍的那十次都记得牢。

第五条：把撞出来的东西写回去。

每一次 AI 的说法和现实对不上，都记下来：它说了什么，现实是什么，差在哪里。这份记录，会慢慢变成你自己的一张网，下一次你一眼就知道它在哪类问题上靠得住、在哪类问题上要小心。

日常的样子：老司机的本事，不在于会开车，在于心里有一张“哪个路口容易出事”的图。那张图，是一次次差点出事写回去的。

这五条，说到底只是一件事：**让对不上从现实来，让动能从自己身上出，让 AI 站在场的位置上。**

站对了位置的 AI，不是在替人思考，是在给人思考垫一块前所未有的大底座。

这五条说的是一个人。放到一个实验室、一个领域，账也一样要分清。

一个实验室可以让 AI 去做大量的初筛：几百万个分子里先挑出几百个，几千篇论文里先理出几十篇。这是把机房的账用在刀刃上。可是挑出来的那几百个，要有

人真的放进试管；理出来的那几十篇，要有人真的打开原文。组里得有人专门负责“撞”：设计那个最便宜、最能排除东西的实验。

期刊和学会也在摸索。越来越多的地方要求作者说明哪些部分用了 AI、用来做什么，《自然》《科学》等期刊从 2023 年起都定了这方面的规矩〔转述〕。这些规定的用意，用本书的话说，就是把两本账分开记：读者有权知道，一段话的动能是谁付的，它和现实对过账没有。

一个领域里，如果人人都把“撞”的活外包出去，那这个领域的网会越织越大、越织越顺，却越来越少有一个点真正连着现实。它看起来什么都知道，可是一个苏芮式的问题，就可能让一大片说法同时晃动。

◆ 六、那个口袋，后来怎样了

缝在哪里

回到葛文轩。这一次，按本书的规矩，先把那条缝独立指认出来。

那个口袋，药物化学的同事据此设计了一批小分子，送去做结合实验。结果出来：大部分分子和这个激酶结合得很弱，比预想的差了一大截。

这就是缝：一个结构预测说“这里有个好口袋”，一组实验读数说“东西放不进去”。两张网拉扯同一处，落差清清楚楚，写在报告上。

先带着落差去问

这一次，葛文轩没有直接让 AI 写报告。他先在本子上写了一句话：“预测的口袋看起来很好，为什么分子结合不上？”

然后他才去问。他让大模型把可能的原因全部摊开，越全越好，并且每一条都要说明，用什么实验或数据可以检验它。

AI 摊出了六七条：结构预测本身在这一区不准；口袋在真实的蛋白质里会动、会关上；实验条件和细胞里的条件不同；分子本身的溶解性有问题；口袋附近有一段区域，在细胞里会被别的蛋白质占住……每一条后面，都跟着一个检验办法。

这张单子，就是场。它把这个落差四周连着的东西，一下子摊开了。葛文轩自己想，大概只能想到其中两三条。

这里有一个诱惑。

单子上每一条都写得有理有据。葛文轩完全可以挑一条看着最像的，让 AI 展开成一页报告，交上去。报告会很漂亮，组里多半也挑不出毛病。

他差一点就这么做了。拦住他的，是周五组会上那一下愣住。他记得那种感觉：一份写得很好的东西，被一个问题戳破，自己却什么也拿不出来。他不想再来一次。

他把单子打印出来，拿去找苏芮。

苏芮看了一会儿，说：“七条都可能。你打算先查哪条？为什么是这条？”

他说不出为什么。苏芮说：“那就先查最便宜、最能排除东西的那条。”

自己付动能

可是场摆在那里，不会自己结晶。接下来的事，得他自己干。

他先回到结构预测的原始输出，去看那个口袋附近每一段的置信度分数。他以前只看过那张漂亮的彩色结构图，从没细看过这些数字。一看，口袋的一侧，有一段十几个氨基酸长的环，置信度很低。

低，就是模型在老实说“这里我不知道”。

他又去蛋白质数据库里，查这个激酶家族里亲缘相近的几个蛋白质的实验结构。查到两个，里面那一段环，一个是张开的，一个是合上的。

他把这些画在一张纸上。他心里第一次有了一个自己的判断：那个口袋，很可能不是一直开着的。预测给出的，也许只是许多种可能形状里的一种。

撞现实

判断有了，还要撞现实。

他去找公司里做结构生物学的同事，问能不能用实验看一看这段环在溶液里的样子。同事说，做一个完整的结构要几个月，可以先做一个便宜的实验：在环的位置上做个小改动，看结合情况变不变。

三周后，结果回来了。环被“固定”成张开的样子以后，原来那批分子里，有几个的结合明显变强了。

这一回，三样东西对上了：预测里的低置信度、亲缘蛋白质里的两种形状、改造后的结合实验。

结晶在哪里

结晶发生在两个地方。

一个在项目里：组里的设计思路改了。不再把那个口袋当成一个固定的洞，而是当成一扇会开合的门，要设计能把门撑开、或者趁门开时卡进去的分子。这是一个新的理念符号，它从一次对不上里长出来，连着三组读数，站得住。

另一个在葛文轩身上。

他学会的不只是“这个激酶有一段会动的环”。他学会了一件更大的事：**结构预测的置信度低的地方，正是要回到实验去的地方。**　　这句话现在是他的了。它稳定：下个月换一个靶点，他第一件事就是去看置信度。它整体：拆开来，“看置信度”“查亲缘结构”“设计小实验”三步缺一不可。它独立：不用打开任何 AI，他能对着新来的实习生，在白板上把它讲清楚。

三判据都满足。这是一次在人身上的结晶。

这一次，他付的动能不少：翻原始数据的两个晚上，查亲缘结构的一个下午，和结构同事来回讨论的几次，等实验结果的三周。机房那本账也付了，而且 AI 在每一步都帮了大忙：摊开可能性，查文献，解释那些他看不懂的结构术语。

可是对不上来自那组结合实验，动能来自他自己，结晶落在他身上和组里的那张网上。AI 站在场的位置上，站得很好。

回头再看那份综述

最后，他把周三晚上那份三十页的综述又拿了出来。

这一次他不是让 AI 重写，是自己改。他把苏芮问的那个问题，放在了第一节：“病人组织与小鼠模型的表达，对得上吗？”他用一个周末，把相关的几篇原始论文一篇篇打开，把数据表抄出来，放在一起比。

比出来的结果是：大体对得上，可是在一种细胞类型里，小鼠的表达远低于病人。这一处，他标成了“待查”。

那两条搜不到的文献，删了。那几条引用错位的，改成了原文真正说的意思。

新的综述只有十二页。苏芮看完，说了一句：“这份是你的。”

那天晚上，葛文轩算了一笔账。第一份综述，两个小时，三十页，机房那本账付得很足，他自己那本几乎是零。第二份，前后五个多星期，十二页，机房那本账付得也不少，因为他每一步都在问 AI；可是他自己那本，付得满满的。

第一份在他身上什么也没留下。第二份里，有一扇会开合的门，有一个对不上的细胞类型，有一句“置信度低的地方要回到实验去”。这些东西，下一次换一个靶点，他还带得走。

他没有因此少用 AI。他只是换了一个站法：从让它替自己说话，换成让它陪自己撞墙。

◆ 七、放回日子里

这一章的道理，不只属于实验室。

你的孩子用 AI 写作文，你用 AI 写周报，你用 AI 查一个病、问一份合同、学一门新手艺——每一次，都有两本账在同时记。机房那本，越来越便宜；你身上那本，一分也省不掉。

这不是要你少用 AI。恰恰相反，AI 是迄今最大的一张网，不用它，等于放着一座图书馆不进。

举一个家里的例子。一个初二的孩子做物理作业，题目问为什么冬天摸铁栏杆比摸木头凉。他问 AI，AI 给了一段很准的解释：铁导热快，把手上的热带走得多。孩子抄上去，第二天就忘了。

换一种做法：家长先不让他问，让他去阳台上，一只手摸铁栏杆，一只手摸木头花架，再拿温度计量一量两样东西的温度。温度计上两个数差不多，手上的感觉却差很多。这一下，对不上来了。这时候再去问 AI，那段解释就有地方落了，而且他多半会追问一句：“那夏天晒过的铁栏杆为什么比木头烫？”

同一段解释，第一次是信息，第二次是结晶。差的不是 AI，是那一下对不上，和他自己跑去阳台的那几步。

要紧的是站位。你用它之前，先问自己一句：“我卡在哪里？”用它之后，再问一句：“这里面哪一句，我拿去撞过现实？哪一句，我能关上屏幕自己讲出来？”

这两句问得出来，AI 就在帮你结晶；问不出来，它就只是在替你说话。

AlphaFold 之所以能在人类科学里留下东西，是因为它吃进去的是几代人付过动能的痕，吐出来的又被拿去和一个事先看不到的现实相撞。一个人用 AI，也可以照这个样子：喂给它你真实的对不上，把它给你的东西拿去撞你自己的现实。

生成可以免费，结晶从来不免费。 AI 让说出一段话变得几乎不花钱；正因为如此，在一个人身上真的长出一个站得住的东西，变得比以前更稀罕，也更值钱。

带 走 的 话

AI 可以把整张网摊在你面前，可对不上要从现实来，动能要你自己付，结晶才落在你身上。

小　账

发现学的科学观以为机器读完了数据，事实就会浮上来，关上了“对不上从哪来”这扇门；本书把 AI 放回能量账里，指出它给的是场，对不上和动能另有来处。

发生被收回为发现的那一下，在于把一份生成的综述当成“知识已经被找到并装好”——好像知识是现成的货，搬到你面前就归你了。

想 一 想

1. 你最近一次用 AI 得到的答案里，有哪一句是你亲手拿去和现实核对过的？
2. 关上屏幕，你能把它给你的那段话，对着家里一个不懂的人讲清楚吗？讲不出来的是哪一处？
3. 下次打开 AI 之前，你能先写下一句“我卡在哪里”吗？如果写不出来，是不是说明你还没有真正的问题？

◆

第　七　编

科学的偶像

导　语

第七编只做一件事：查一查科学身上最容易长出来的两种偶像。

第 18 章从苏州退休电工曹立新讲起。他照“电流从正极到负极”接了三十年线，没出过一次事，课本却说导线里真正移动的电子方向相反。托勒密的本轮算了一千年，造桥的人不用相对论，卫星上的钟却离不开它。能用，说明它在哪里对得上；经得起，要看它在哪里可能对不上。本章还讲一只球怎样由眼底平面的像合成出来：对象本身，也是一次结晶。

第 19 章回到新加坡淡滨尼。家长群群主吴佩珊看着一张“科学已证明”的图，群里一边把科学当成不许问的牌子，一边把它整个扔掉。女儿吴恩琪的三个问题，落在两边都没碰的地方。波普尔的可证伪对在哪里、停在哪里，莫扎特效应怎样走出实验室，都在这一章。尊重科学，是信那套把对不上变成制度的办法；科学主义，是只留下结论，把那套办法关在门外。

读这一编时，请带着一个问题：尊重科学，和供奉科学结论，分界在哪里？

18

第 18 章

可用不等于证实

这一章的问题

曹立新按“正极到负极”接了三十年线，从没出过错；课本却说电子反着跑，那三十年证明了什么？

◆ 一、用了一辈子的电流方向

曹立新今年五十五岁，在苏州一家国营厂当了三十多年电工，前年退休。

退休以后，他成了小区里的“万能师傅”。谁家跳闸了，谁家插座冒火星了，敲他的门准没错。他有一套从学徒时就背熟的口诀：电流从正极出发，经过用电器，回到负极；火线进，零线出；开关一定要接在火线上。三十多年，他照这套口诀接过的线，没出过一次事故。

一个周六的下午，邻居袁老师拿着孙子的初中物理练习册来找他。

袁老师退休前教语文，看不懂这道题。题目问：金属导线里，真正移动的是什么？往哪边移动？答案写着：自由电子，从负极流向正极，和规定的电流方向相反。

曹立新盯着那行字看了好一阵。

“反的？”他说，“我接了三十年线，都是按正极到负极想的，没错过一回。它要是反的，我那三十年算什么？”

袁老师笑他较真。可曹立新那天晚上没睡踏实。他心里那个“电”，一直是一股从正极往外冒的东西，像水从高处往低处流。现在课本告诉他：真正在动的东西，方向和他想的正好相反。

他想起自己当学徒时，师傅拿水管给他打比方：电压像水压，电流像水流，电阻像水管变细的那一段。这个比方帮他过了考试，帮他排过上千次故障。他一直以为，师傅说的就是电本来的样子。

更让他别扭的是另一件事：既然是反的，为什么他用了三十年都没出错？

这一问，就是本章要讲的东西。

一个想法能用，能用很多年，能用在成千上万个场合里不出事，这算不算证明它是对的？

大多数人的直觉是：算。管用就是硬道理，能算准、能造出东西、能治好病，还要什么证明？

本章要说的是：不算。可用是一件事，证实是另一件事。把两件事当成一件，是科学最常见、也最体面的一种偶像。

这话听着像在贬低科学。不是。下面你会看到，把可用和证实分开，恰恰是科学自己一路走过来的经验；而能把这两件事分开的人，才真正懂得科学的力量在哪里。

◆ 二、能算准的本轮也算了一千年

先讲一个比电流方向老得多的例子。

公元二世纪，住在亚历山大城的托勒密写成了一部天文学巨著，后来阿拉伯人称它《至大论》。书里给出了一整套推算日月五星位置的办法。

这套办法的核心，是本轮和均轮。地球在中央，每颗行星沿着一个小圆（本轮）转，小圆的圆心又沿着一个大圆（均轮）绕地球转。为了让推算更贴近观测，托勒密还把地球从大圆中心挪开一点。他又设了一个辅助点，让行星绕着这个点匀速转动。这个点，就是第 2 章说过的偏心匀速点（equant）。

今天的人常拿“本轮套本轮”当笑话，好像古人蠢到只会往上打补丁。

这是对托勒密的不公道。

先写足它对在哪里。托勒密体系是一项了不起的计算成就。它能相当准确地预报行星的位置、日月食的时刻，对当时的历法、航海和占星推算来说，大体够用。

它被阿拉伯天文学家修订、补充，又传回欧洲，前后用了一千多年。航海、历法、宗教节期，都靠它推算。

一套东西能用一千多年，说明它真的管用。

可是它管用，并不说明行星真的在绕着地球转小圆圈。今天谁都知道，行星绕的是太阳，走的是椭圆。托勒密的本轮能算准，是因为圆套圆的组合在数学上有很强的拟合能力。第 2 章出场的汉森，1960 年专门写文章讨论过这一点：圆套圆在数学上很像后来的傅里叶级数。只要圆够多、参数调得够细，很多周期性的运动都能被它近似出来。

能算准的东西，不一定说出了事情本来的样子。

中国的历法传统里，也有同样的事。历代修历，一项要紧的考核就是日食、月食能不能报准。报准了，这部历就“可用”；报不准，朝中就会议论改历。

元代郭守敬等人编成的《授时历》，1281 年起施行。它取一回归年为 365.2425 日，和今天公历的平均年长相同。明代的《大统历》基本沿用它，前后用了三百多年。

可是历家多半不去争论天到底是什么构造。他们要的是推得准。推得准的历法，不需要先回答宇宙的样子；推不准的那一天，一次日食比预报早了或晚了，才是改历的起点。推动修历的，往往是那一次具体的报不准。

这个道理，古人自己其实也知道。1543 年哥白尼的《天体运行论》出版时，书前有一篇没署名的序言，后来查明出自神学家奥西安德尔之手。序言说，书里的假设只要能让计算和观测相符就够了，这是“拯救现象”的老立场。日心体系刚出来时，推算精度也没有比托勒密好多少。在“可用”这一项上，日心说一开始并没有赢（第 22 章还会拿它试刀）。

那后来是什么让天平倾斜的？不是更好用，是一次对不上。

这里先把“对不上”讲清楚，后面会一直用到它：一个已经站稳的想法，撞上了一个已经站稳的读数，两边合不拢，这条缝就叫对不上。对得上的时候，没人去追问；对不上了，解释才被逼出来。

那条缝，在史料里指认得出来：开普勒拿第谷的火星数据去试圆形轨道，怎么调都差了大约八角分。他不肯把它归给观测误差，椭圆轨道就是被这八角分逼出来的（见第 2 章）。

你看，托勒密体系被替换，不是因为它不能用了，它照样能用；是因为有人把一个更精细的读数推到它面前，它在那一处对不上了。

这就是第一条线索：可用，回答的是“能不能算准”；证实，要问的是“有没有被推到一个它可能出错的地方，而它没有出错”。

◆ 三、造桥的人不用相对论

再看一个离我们近的例子。

今天全世界的土木工程师造桥、盖楼、修大坝，用的力学几乎都是牛顿力学。没有哪个工程师会在算一座斜拉桥的受力时，先去解广义相对论的场方程。

可是你也知道，从二十世纪初起，物理学界已经认定：牛顿力学不是在一切尺度上都成立。速度接近光速时，要用狭义相对论；引力很强时，要用广义相对论。水星近日点的进动，就是牛顿力学对不上的一处（这段历史见第 5 章）。

那么问题来了：一套在原则上被修正了的理论，为什么造桥照样好用？

答案大家都会说：在低速、弱引力的范围里，相对论的结果和牛顿的结果相差极小，小到远远低于钢材强度的波动、施工的误差。工程师用牛顿力学，不是因为它在终极意义上对，是因为在这个范围里，它和更精确的理论对得上，而且算起来便宜得多。

这件事很要紧。牛顿力学的“可用”，在它的普遍性被修正以后，一点都没有减少。

可用和证实，在这里分了家：证实那一头动了，可用这一头没动。

还有一层更细的。牛顿力学在哪个范围里可用，这件事本身，不是造桥造出来的。

造一万座桥，也不会让你知道速度接近光速时会怎样，因为没有一座桥跑得那么快。范围的边界，是靠另一类工作找到的：精密的天文观测、高速粒子的实验、专门去逼近边界的测量。

所以工程师可以放心用牛顿力学，靠的不只是“它一直好用”，还因为物理学家已经把它会在哪里失灵，事先划了出来。

可用之所以可靠，是因为有人在可用之外，付了检验的账。

关于这件事，科学哲学里有两派很老的看法，各有各的道理。本书先把两边都写足。

一派叫工具论。上面那位奥西安德尔是它的远祖，二十世纪初法国物理学家迪昂是它的重要代表。迪昂写过一本书，书名就叫《拯救现象》（1908）。工具论的意思是：理论是一套整理现象、做出预测的工具，好用就行，不必问它是不是在描述“背后真实的东西”。

工具论对在哪里？它诚实。它不替理论多许诺。托勒密的本轮能算准，工具论就承认它好；后来被替换，工具论也不觉得天塌了。它把科学从“一劳永逸地抓住真理”的重担下解放出来，让科学家可以放心地用一个明知不完美的模型。

另一派叫科学实在论。它的看法是：成熟的科学理论，大体上是在描述真实存在的东西，电子、基因、引力场，都不是方便的虚构。

实在论最有力的一个论证，常被称作“无奇迹论证”。美国哲学家普特南在1975 年给过一个有名的说法。大意是：如果理论不是近似为真，那它在预测上的一次次成功就成了一个奇迹。好用得这么离谱，总得有个原因；最好的原因，就是它说中了什么。

这个论证对在哪里？它抓住了一件工具论不太好解释的事：为什么好用的理论往往还能在没设计过的新场合继续好用，甚至预言出从没见过的现象。海王星是被算出来的（见第 5 章），无线电波是从麦克斯韦方程里先推出来的（见第 11 章）。只当它是工具，这些“意外的好用”就成了一连串的运气。

两派都有一半的道理。可它们停在了同一个地方。

工具论停在：它把“可用”当成了理论唯一要交的账。可是科学史上那些最关键的时刻，恰恰不是“更好用”的时刻，而是“在一个精确的地方对不上”的时刻。只问好不好用，就看不见那八角分。

实在论停在：它从“好用”一步推到“说中了真实存在的东西”，中间那一步走得太快。后来另一位美国哲学家劳丹在 1981 年列过一张长长的清单。以太、热质、燃素，都曾经非常好用，都曾经被认真地当作真实存在的东西。后来，它们都被放弃了。好用推不出真有其物。

两派都默认了一件事：理论对面，有一个现成摆在那里的世界。工具论说我们不必去碰它，实在论说我们已经大体碰到了它。

那个“现成摆着的世界”本身，两派都没有去动它。这一点留到第六节再说。

◆ 四、卫星上的钟反过来看

上面两个例子，都是“可用在前，证实另说”：一个理论能用，后来却被修正或替换。

现在看一个方向反过来的例子。你手机上的导航，就藏着它。

全球定位系统，大家习惯叫 GPS。天上有几十颗卫星，每颗卫星上都有极准的原子钟，不停地播报“现在是几点几分几秒、我在哪里”。你的手机同时收到好几颗卫星的信号，比较信号走过来花了多少时间，就能算出你在哪。

这套办法要靠时间算距离。电波每秒走三十万公里，钟差一微秒，距离就差三百米。所以卫星上的钟，必须准到极致。

麻烦在于，按相对论，卫星上的钟和地面上的钟走得不一样快。

一层原因是速度。卫星跑得快，按狭义相对论，它的钟会走得慢一点，每天大约慢七微秒。

另一层原因是引力。卫星离地心远，所处的引力比地面弱，按广义相对论，它的钟会走得快一点，每天大约快四十五微秒。

两相抵消，卫星上的钟每天要比地面快大约三十八微秒。

三十八微秒听着微不足道。换成距离，大约是十一公里。如果不管它，定位误差每天会累积到十公里上下。导航根本没法用。

所以工程师在卫星发射之前，就把星上原子钟的频率调慢了一点点，让它到了天上，刚好和地面的钟走得一样快。

这里，可用和证实的关系反过来了：不是“能用，所以以为它被证实了”，而是“没有这个理论，就根本不能用”。

这一点要先替科学说清楚。GPS 是一个漂亮的例子，说明一个经过检验的理论能撑起多么精密的工程。没有二十世纪物理学家一次次的对账，就没有你手机上那个准到几米的小蓝点。本章后面说的话，没有一句是要削弱这件事。

于是很多科普读物会说：你每天用导航，就是在每天验证相对论。

这话有一半对。另一半，正是本章要细讲的地方。

史料里有一个细节，值得放慢看。1977 年，美国发射了一颗试验卫星，编号 NTS-2，第一次把铯原子钟带上了太空。据物理学家阿什比后来的回顾，星上装了一个可以调节频率的装置，以防万一需要修正。可是它一开始是关着的。

这颗卫星的钟，先在不做任何修正的情况下走了大约二十天。

二十天里，地面测出它比地面钟走得快，快的幅度和相对论的预言相差大约百分之一。之后，那个调频装置才被打开。

为什么要先关着？据阿什比回忆，是因为当时有人并不确信要做这个修正。先关着跑一段，就是在给相对论一个出错的机会：如果它说错了，这二十天的读数会把它当场拆穿。

这二十天，才是真正的检验。

理论被推到了一个它可能出错的地方。读数可以和预言对上，也可以对不上；事前谁也不能保证。结果对上了。

可是请注意，此后发射的每一颗导航卫星，都在出厂前就把频率调好了。修正被做进了系统，成了一道工序。从那以后，你每天用导航，系统每天正常工作，这件事本身已经很难再“检验”相对论了。

为什么？因为修正是照着理论预先做好的。系统正常工作，说明工序没出错；它不再给理论留出一个可以被拆穿的缝。

真要检验，得像那二十天一样，专门留出一个可能对不上的地方，再去看读数。后来物理学家确实还在用卫星钟做各种精细检验。2018 年，两个研究组利用两颗误入椭圆轨道的欧洲伽利略导航卫星，把引力红移测得比以往更准。那是另外设计的实验，不是你手机上的日常导航。

这就是 GPS 把关系反过来看时，露出来的东西：

即便一个理论确实被证实过，此后建立在它上面的“可用”，也不再自动地继续证实它。

检验活在那二十天里，不活在此后的四十多年里。

◆ 五、可用和证实差在哪里

把三个例子放在一起，可以看得清楚了。

托勒密的本轮：能用一千多年，后来被替换。牛顿力学造桥：普遍性被修正，可用丝毫不减。GPS 的修正：先被一次有意留出的机会检验过，之后的可用不再检验它。

三件事指向同一条分界。

可用，是一个想法在某个范围里和现实的读数对得上。

证实，是一个想法被有意推到一个它可能对不上的地方，结果没有对不上。

这两句话的差别，在“有意”和“可能对不上”这几个字上。

用一个日常的例子说。你家楼下有条近路，你走了五年，每次都能准时到地铁站。这条路“可用”。可这五年你都是早上七点出门。有一天你九点出门，发现那条路要穿过的小区大门九点以后就锁了。五年的可用，从来没有替你检验过“九点以后能不能走”这一条，因为你从来没在九点走过。

可用的那五年，是对得上的五年。对得上的时候，没有解释，也没有检验，只有一种越来越牢的习惯。

这里要用到本套书的几个工作词，先讲清楚。

一个想法、一个读数、一个习惯，只要稳得住、拆开就不是它、能被带到别处去，本套书就叫它一个“符号”。稳定、整体、独立，这三条叫三判据。

想法、概念、公式，叫理念符号。仪器读数、路、河床这类现实自己沉下来的痕，叫现实符号。沉在一个人身上、不用想就会的习惯，叫自我符号。这三界符号之间对不上了，新的符号才被逼出来；被逼出来、站稳了，叫结晶。

一个符号结晶以后，要多大的力才能把它拆开，本套书叫它的“内能”，也就是连接度。拆它、重接它所花的力，叫“动能”。把它往某处拉、托住它的那张网，叫“势能”。

用这几个词，可用和证实的差别就能说得更细。

每一次“用了，没出事”，都在给这个想法添一点连接度。它和更多的场合连上了，和更多的人的手艺连上了，和更多的机器、规章、教科书连上了。它越来越难拆。

可是“用了，没出事”并不消耗拆它的动能。没有人在这一次使用里去试它可能出错的地方。连接度涨了，检验没有涨。

这就是可用的陷阱：它让一个符号越来越牢，却不让它越来越可靠。

医学史上有一个很典型的例子。放血疗法在欧洲用了两千多年。几十代医生都亲眼见过：病人放了血，烧退了，人好了。

在他们的经验里，放血是“可用”的。每多治好一个病人，这套做法就和医书、师承、行会的规矩连得更紧一些。

对不上，是从一种新的做法里来的：数。十九世纪三十年代，法国医生路易把肺炎病人按放血的早晚分组，比较他们的病程和死亡，1835 年把结果写成了专著。数出来的结果显示，放血并没有带来人们以为的那种好处。

两千多年的“亲眼见过”，旁边从来没有站着一个不放血的对照组。对照一摆出来，那条缝才第一次被看见。

这件事没有让医学丢脸。它是现代医学讲究对照的源头之一。医学正是在承认“可用不等于证实”的那一刻，开始变得更可靠。

证实不一样。证实要付动能：要设计一个实验，要找出这个想法在哪里最可能出错，要把读数精确到那个程度，还要准备好接受“对不上”。那二十天的卫星钟，那八角分的火星数据，都是这样被付出来的。

下面这张表，把两件事并排放：

	可用	证实
问的是什么	在这个范围里能不能算准、造得出、治得好	被推到可能出错的地方，有没有出错
对不上的位置	被避开，或者被当作误差放过去	被专门找出来，放到最显眼的地方
每一次发生时	连接度上涨，习惯加深	要付动能，结果事前不确定
能撑起什么判断	“在这个范围里可以放心用”	“在这一处，它经住了一次真的对账”
典型例子	托勒密星表、牛顿力学造桥、每天的导航	开普勒的八角分、NTS-2 的二十天
越用越多的结果	越来越牢	越来越可靠，也可能在下一次被推翻
走过头会变成什么	把“一直管用”当成“已被证明”	把“一次经住”当成“永远成立”

表的最后一行要多说一句。证实走过头，也会出偶像。“相对论被 NTS-2 证实了”，只能说在那个轨道高度、那个精度上，它经住了一次对账。科学家后来还在不断地找新的、更精细的地方去试它，就是因为他们知道，一次证实不是一张终身合格证。

这里用得上第 15 章分出的两种稳定：一直被重新检验而稳，是发生型稳定；没人再去检验而稳，是锁化型稳定（见第 15 章）。相对论属于前一种，几十年来一代代实验物理学家换着法子找它的破绽，它一次次经住了。分辨两种稳，只能问一句：最近一次有人认真去试它可能出错的地方，是什么时候？

稳定不等于对。谣言也很稳，可它的稳属于后一种。把可用当证实，就是让一个本可以是发生型稳定的东西，悄悄滑成了锁化型稳定。

一个想法能用，告诉你它在哪里对得上；它是否经得起，要看它在哪里被推到可能对不上。

本套书一直有一句话：对得上，就没有解释。用在这里，它有一层新的意思：可用的日子里，一切对得上，所以没有人去追问；没有追问，就没有新的检验。可用本身，会让人安静下来。

科学最了不起的地方，就在这里：它没有满足于可用。它发明了一整套办法——控制实验、精密仪器、独立复现——专门去找自己最可能出错的地方。全书的判词说：科学的力量，在于它把“对不上”变成了一种制度。

可用不需要这套制度，证实需要。

所以本书说“可用不等于证实”，不是在看低科学，而是在看清科学最贵的那部分。最贵的不是它造出了多少能用的东西，而是它肯花大力气，去给自己找对不上。

◆ 六、一只球是怎样合成的

把“可用”当作“证实”，是本章说的第一种偶像。还有第二种，藏得更深。

它不是在说某个理论对不对，而是在说理论对面那个东西：那个被研究的对象，是不是一直现成地摆在那里，等着被看见、被发现。

先从你眼前一只球说起。

你看着桌上一只皮球，看到的是一个圆鼓鼓的、立体的东西。可是光进入眼睛以后，落在视网膜上的，只是一个平面的像。视网膜是一层弯曲的膜，它收到的是二维的光点分布。你有两只眼睛，就收到两张略有差别的二维像。

那个三维的“球”，是怎么来的?

是合成出来的。两张平面像之间的差别、明暗的过渡、你伸手去摸时手上的感觉、球滚动时形状的变化，这些一起被织在一起，才有了一个“立体的球”。

这件事有一个漂亮的史料。1838 年，英国物理学家惠斯通做了一个叫立体镜的小装置。他画了两张略有错开的平面线条图，让左眼只看左图、右眼只看右图。结

果人看到的，是一个浮在空中的立体形状。纸上明明没有第三个维度，立体感是在看的人那里合成出来的。

合成不是随意的，可它也会出错。心理学里有一个有名的“空心脸”错觉：把一张面具的凹面朝向你，在合适的光线下，你看到的往往仍是一张凸出来的脸。

你的眼睛和多年看人脸的习惯一起，把凹的合成成了凸的。要纠正它，就得换个角度看，或者伸手去摸，让另一路读数进来对账。

这正好说明两件事。立体的物体是合成的结晶，它站得稳，是因为多路读数长期对得上；它被纠正，是因为另一路读数对不上了。

王德生在“科学宗教”这条立论线上〔待核〕，正是用这只球来说话。眼睛只收到二维的像，三维的“球”是合成出来的；客体不是现成摆在那里等着被看见的。

这句话要读准，否则很容易滑到另一个坑里去。

它不是说“球不存在”“球是你想出来的”“你想它是方的它就是方的”。你伸手去抓，它就在那里；你踢它，它就滚。三维的球是一次站得极稳的合成。它稳定，你每次看都还是它。它整体，拆成两张平面像就不再是它。它独立，你闭上眼、转过身、换个房间，它照样能被带着想起。它满足三判据，是一次结晶。

这句话说的是另一件事：这只球不是在你看之前，就以“一只三维的球”的身份等在那里，由你的眼睛去把它取回来。它是在光、视网膜、两只眼睛的差别、手的触碰、多年的习惯这些东西一次次对账里，一起站出来的。

科学的对象，比一只球难得多，可道理相通。

电子不能直接看见。你能看到的，是云室里一道雾迹、示波器上一道偏转的光、一台仪器上的一串读数（读数的事见第 9 章）。“电子”这个理念符号，是在无数这样的现实符号反复对账之后，结晶成一个稳定、整体、可以带到任何实验室去的东西。它站得极稳，稳到今天你家的电视、手机都靠它的性质设计。

可是有人会说：电子从来就以今天课本上的样子，原封不动地等在那里，十九世纪末被人揭开盖子看见了。这样说，就把一次结晶说成了一次揭幕。

把对象当作先在的、只等着被发现的东西，就是本书说的发现学科学观。它在客观、可复验、抗私意上的长处，第 1 章已经写足。可它一旦走过头，就和“把可用当证实”连在一起，成了同一种偶像的两面：

一面说，我们手上的理论这么好用，一定是抓住了真东西；

另一面说，那个真东西一直就在那里，现成的，我们只是找到了它。

两句话合起来，就把科学说成了一次“取货”：货早就摆在仓库里，科学家是取货员，取到了就算完事。这样一来，理论不用再回写，对象不用再熔开——货都取回来了，还检验什么？

王德生把这种状态称作“科学宗教”的风险〔待核〕：把“可用”当作“证实”，把客体当成先在的、被发现的东西。

说它像宗教，不是说科学家在烧香。是说某些结论被放进了一个不再接受对账的位置。这里说的“回写”，指的是新站稳的东西反过来改写原先的条件；一个不再回写的结论，就只剩下被供着。

本套书把这种“凝在对象一端、不再回写”的固化叫作偶像。它和凝在自我一端的“石心”是同一个结构，只是凝在了不同的地方。下一章讲科学主义，会把这两端都摆出来。

这里只先记住一句：

偶像不是科学本身，而是把科学的结晶当成了一次永远不必再对账的揭幕。

◆ 七、一个完整的例子：电流的方向

现在回到曹立新那三十年。这是一个从头到尾都能在史料里指认的例子。

第一步：一个约定的诞生。

十八世纪中叶，美国的富兰克林做了大量电学实验。他的想法是：电是一种流体，物体里电流体多了，就带“正”电；少了，就带“负”电。电从多的地方流向少的地方，也就是从正流向负。正负的叫法，是他在 1747 年前后的通信里提出来的。

这在当时是一个合理的猜想。玻璃棒和丝绸摩擦后，他把玻璃一侧叫正。这个选择本身是任意的：换成另一侧叫正，也说得通。

这里有两样东西搅在一起：一样是“正负怎么叫、方向怎么记”的约定，一样是“有一种流体在流”的理论图像。

前一样是一种约定。在他之前，法国的杜菲已经分出两类电，叫“玻璃电”和“树脂电”。富兰克林给它们换上“正”“负”的新名，再加一条记方向的规矩。用本书的命名四情形说，这接近第一种：给已能辨认的东西加新名。它不是哪个机构授权设立的身份，要到后来写进教科书和工程规范，才带上制度的分量。

后一样是提出一个理论对象。两者能交织在一起，可不能互相冒充。

第二步：约定变得极其好用。

此后一百多年，电学大发展。欧姆定律、基尔霍夫定律、电动机、发电机、电报、电灯，全部建立在“电流从正极流向负极”这个约定上。每一道电路方程、每一张接线图、每一代电工的口诀，都和它连在一起。

它的连接度越来越高。这是可用在不断累积。

第三步：对不上出现了，而且指认得出来。

1879 年，美国的霍尔做了一个实验：让电流通过放在磁场里的金属薄片，薄片的两侧会出现一个微小的电压。这个电压的正负，取决于在导体里真正移动的东西带正电还是带负电。对大多数金属，测出来的结果显示：在动的东西带负电。也有少数金属，比如锌，测出来的符号相反，这要等后来的固体物理才解释得了。

1897 年，J. J. 汤姆孙通过阴极射线的实验，把一种带负电、质量极小的粒子确立下来，后来它被叫作电子。

“电子”这个名字，其实比汤姆孙的实验还早几年。爱尔兰物理学家斯托尼在 1891 年用它来称呼电荷的最小单位。按命名的四种情形说，这是在提出一个理论对象；汤姆孙测出荷质比，才让这个理论对象和一串读数对上了账。名字先到，读数后到，两样东西合在一起，“电子”才站稳。

到这里，两件事被分开看了：在金属导线里移动的，主要是带负电的电子，它们的移动方向和“规定的电流方向”相反。

富兰克林那个“正电流体从正流向负”的理论图像，在金属导线这个场合里，对不上了。

第四步：可用丝毫未减。

接下来发生的事，最值得想一想。

电流方向的约定没有被废除。全世界的电路图、教科书、工程规范，至今仍然用“电流从正极流向负极”。曹立新那套口诀，照样能接好每一根线。

为什么？因为电路计算真正需要的，只是方向前后一致。你把所有的电流都反过来记，方程照样成立，灯照样亮。约定的可用，从来就不依赖“到底是什么在流”这个理论图像。

这正是本章的核心：那一百多年的好用，证明的是约定的一致性和方程的可靠，从来没有证明过“有一种正电流体在流”。只是在很长一段时间里，好用和那个图像捆在一起，人们很自然地以为前者撑着后者。

这种捆绑很难察觉，因为它从不出错。每一次灯亮了、电机转了，都像是在给那个图像投一张赞成票。可那张票其实是投给约定的，图像只是站在旁边，沾了光。

今天的中学课本两样都教：电路图上画规定的电流方向，讲微观时讲电子的移动方向。教得好的老师会专门停下来，告诉学生这两句话为什么都对、各管哪一层。教得匆忙的，就像袁老师孙子的练习册那样，把两句话并排放着，让学生各背一遍。

第五步：熔开以后，又有新的结晶。

故事还没完。到了二十世纪，半导体物理里出现了“空穴”这个概念。在某些半导体材料里，导电的方式可以看作是一个带正电的“空位”在移动，它的方向恰好和规定的电流方向一致。

于是今天的物理课本里，“什么在动”的答案变成：要看材料，金属里主要是电子，某些半导体里还要算上空穴。

富兰克林当年的图像熔开了，新的、更细的图像结晶出来；而那个最初的约定，一直安安稳稳地被用着。

用一张小表把这个例子收起来：

阶段	理论图像（什么在流）	约定（方向怎么记）	可用程度
十八世纪中叶	一种正电流体，从多流向少	正极到负极	刚开始
十九世纪	未被质疑，与约定捆在一起	正极到负极	极高，撑起整个电气工业
1879—1897 年	霍尔效应、电子：金属里动的是负电荷	正极到负极	不变
二十世纪	电子与空穴，按材料而定	正极到负极	不变
今天	写在中学课本里	写在每一张电路图里	不变

最右一列一直不变，最左一列熔开过、再结晶过。

如果你只看最右一列，你会以为一切从来没有变。如果你把最右一列当作最左一列的证据，你就会和曹立新一样，在那一晚觉得“我那三十年算什么”。

◆ 八、放回日子里

后来，曹立新又去找了一次袁老师。

他把那道题想通了，想通的方式很像一个老电工：他拿了一截废电线，在袁老师家的茶几上比画。

“我那三十年没白干，”他说，“我那套口诀管用，因为它是个规矩，规矩只要前后一致就行。可我心里一直以为，这规矩背后真有一股东西从正极往外冒。那一半，是我自己添上去的。”

袁老师问他：那你现在觉得，电到底是什么？

曹立新想了想：“课本说是电子。我信。不过它也是一百多年前才这么说的，说不定以后又细一层。反正我接线的规矩不用改。”

这话说得比很多教科书都准。

过了几天，袁老师的孙子来家里玩。曹立新让他把练习册那道题再讲一遍。孩子讲得头头是道：电子带负电，往正极跑。

曹立新又问他：那你说，电路图上的箭头为什么还画成从正极出来？

孩子愣住了。课本上两句话都有，他各背了一遍，从没想过它们之间是什么关系。曹立新看着他，想起了自己那一夜的别扭。那点别扭，原来是一样有用的东西：它逼着人把“能用”和“是什么”拆开来看。

他分开了两样东西：一样是“能用”，一样是“为什么能用、背后是什么”。前一样，他三十年手艺验过；后一样，他把它交还给那些专门设计实验、专门去找对不上的人。

你的日子里，这样的事情很多。

一个偏方，你吃了，病好了。它可用，在你身上对上过一次。可你没有一个不吃这个偏方的你作对照，你不知道病是它治好的，还是本来就会好。

一个理财办法，用了三年都赚钱。它可用，在这三年的行情里对得上。可这三年有没有出现过它最可能亏钱的那种行情？如果从没出现过，三年的赚钱就没替你检验过它。

一个带孩子的方法，邻居说她家用了很灵。它在她家可用。可她家孩子的脾气、她家的作息、她本人的耐心，和你家一样吗？

还有一种更常见的情形：一句话在家里传了很多年。“感冒了要捂出一身汗”，“吃什么补什么”。它们被很多家庭用了几代人，用的时候大多也没出大事。

可是没出事，和它说的那个道理是否成立，是两回事。老辈人的经验值得尊重，它在某个范围里确实对得上过；只是那个范围有多大，经验自己说不出来。身体上的难处真的大了，还是要去找医生。

遇到这些“管用”，你不必急着怀疑，也不必急着相信。可以先问两个问题：

第一，它在什么范围里对得上过？早上七点的路，还是任何时候的路？

第二，有没有哪一次，它被放到一个可能出错的地方，结果没出错？

问出第二个问题，你就已经站在科学最可贵的那一边了。

带走的话

能用说明它在哪里对得上；经得起要看它在哪里可能对不上——科学的贵处，在后一句。

小　账

工具论与实在论把门关在“好用”与“真有其物”之间；本书打开两扇门：有意留出的对不上，对象本身也是一次结晶。

发生被收回为发现的那一下：把一次站稳的合成（一只球、一个电子）说成它一直现成地等在那里，只是被揭开了盖子。

想一想

1. 你身上有没有一套“用了很多年都没出错”的办法？它有没有被放到一个可能出错的地方试过？
2. 你最近相信的一条“管用”的经验，是在什么范围里对上的？换一个时间、换一个人，它还对得上吗？
3. 你习惯说“这东西本来就是这样”的时候，能不能说出它是在哪几次对账里站稳的？

◆

19

第 19 章

科学主义：一种固化

这一章的问题

家长群里一句“科学已证明”，有人当成不许问的牌子，有人干脆全盘不信，两边各错在哪里？

◆ 一、群里那句“科学已证明”

吴佩珊今年四十八岁，住在新加坡淡滨尼，是女儿吴恩琪班上家长群的群主。

当群主是件累活。群里一百多位家长，每天几百条消息：明天带什么、考试范围、补习老师推荐、谁家孩子发烧了要不要停课。她的手机从早响到晚。

考试周前一个星期，群里有人转来一张图。图上一个戴眼镜、穿白大褂的人，配着一行大字：“科学已证明：考前每天听二十分钟这段古典音乐，孩子专注力提升百分之三十。”下面是一个购买链接，一套音频，九十九新元。

几分钟里，十几位家长回了“收到”“谢谢分享”。有人说已经下单了。

一位家长小心地问了一句：这个研究是哪里做的？百分之三十是跟什么比的？

马上有人回她：“这是科学，人家专家都证明了，你不懂就别问。”

又过了一会儿，另一位家长发了一段长语音。大意是：现在的专家都是收了钱的，什么“科学证明”都不能信；打疫苗也好、吃药也好，都是一样的骗局。

群里一下子吵了起来。

吴佩珊盯着屏幕，觉得两边都不对劲，又说不出哪里不对劲。一边把“科学”两个字当成了一块不许问的牌子，一边把“科学”两个字整个扔掉。她是群主，总得说点什么。

那天晚上，十四岁的吴恩琪看见妈妈对着手机发愁，凑过来看了一眼。

“妈，”恩琪说，“我们科学老师讲过，看一个研究要先问三件事：在什么人身上做的，跟谁比，什么结果会让它不成立。这张图一件都没说。”

吴佩珊愣了一下。女儿这三个问题，正好落在两边都没碰的地方。

这一章就从这三个问题讲起。它要分开两样常被搅在一起的东西：尊重科学，和科学主义。

先把话说在前头：本章不是反科学的。科学是人类迄今最可靠的一套求知办法，疫苗、抗生素、桥梁、你手里的手机，都是它的结晶。本章要说的是另一件事：当科学的结论被供奉起来、不再接受对账的时候，它就从科学变成了偶像。那个变化，本书叫科学主义。

◆ 二、这个词原本在说谁

“科学主义”这个词，在二十世纪四十年代有过一次很有名的使用。奥地利经济学家哈耶克写过一组文章，题为《科学主义与社会研究》（1942—1944）。他用这个词，批评的是一种风气：把自然科学的方法和口气，生搬硬套到社会、经济、历史这些领域里。好像只要用上数字和公式，就自动有了科学的权威。

后来这个词用得越来越宽。今天人们说“科学主义”，大体指两样东西。一是认为只有科学能产生真正的知识，其余都不算数。二是把科学的结论当成不容置疑的定论，用“科学已证明”去结束讨论。

在讲它停在哪里之前，要先写足它的来路对在哪里。科学主义不是凭空长出来的，它背后有一段非常值得尊重的历史。

十九世纪，法国思想家孔德在《实证哲学教程》（1830—1842）里提出实证主义。他的意思是：人类的思想要从神学的解释、形而上的玄想，走到以观察和实验为根据的知识。在一个许多事情仍由权威和传统说了算的时代，这是一股解放的力量：凭什么信？拿证据来。

孔德还讲过人类认识的三个阶段：先用神灵解释，再用抽象的本质解释，最后用观察到的规律解释。今天看，这个排法太整齐了，人类的思想并不是一级级往上爬的。可它背后那个要求一直有效：解释要落到能被观察核对的地方。

用日常的话说，就像村里有人说“井水变苦是因为得罪了井神”，实证主义会说：先去测一测水，看看上游是不是建了什么厂。这一问，救过很多人的命。

二十世纪二三十年代，维也纳一批哲学家和科学家聚在一起，后来被称作维也纳学派。他们想做的事情很清楚：把语言里那些看着深奥、实际上什么也没说的句子清理出去。

一个句子要有意义，必须能被经验检验。这个主张，后来被概括为“可证实原则”。英国哲学家艾耶尔在《语言、真理与逻辑》（1936）里，把这套主张讲得最为通俗。

这套主张对在哪里？它逼着每一句话交出自己的账：你说的这句话，什么样的观察能支持它，什么样的观察能和它相反？很多空话、套话、拿大词吓人的话，在这一问面前现了原形。直到今天，好的科学教育、好的新闻报道，都还在用这一问。

所以，尊重证据、反对独断，本来是科学主义这条思路最可贵的出发点。

可是它在两个地方停下了。

第一处，“只有能被经验检验的话才有意义”这句话本身，能不能被经验检验？很难。它更像是一条规矩，而不是一个观察结果。维也纳学派内部后来也为此争论了很久。一条用来清理别人的尺子，量不到自己身上。

第二处，它把“有意义”和“能被科学检验”画了等号。可是你问“我该不该原谅那个伤害过我的人”“这一生怎样过才值得”，这些问题科学给不出最终答案，它们却一点都不是空话。

科学可以告诉你，长期怀恨对睡眠和血压有什么影响；它可以告诉你，人在什么条件下更容易原谅。这些知识很有用。可“我该不该原谅他”这一问，最后要在你自己的日子里、你和那个人的关系里落地。把它说成“没有意义”，不是更科学，是把一大片人生交出去不管了。

这两处停顿，后来一个被波普尔接过去，一个留在了科学主义里。下面先讲波普尔。

◆ 三、波普尔先对在哪里

卡尔·波普尔出生于维也纳，和维也纳学派是同时同城的人，却一直不肯被算作他们的一员。他的第一本主要著作《研究的逻辑》，1934 年底在维也纳出版，书上印的是 1935 年。英文本到 1959 年才出，题为《科学发现的逻辑》。

他最有名的贡献，是用“可证伪”代替“可证实”，去划分科学和非科学。

这个转身的道理，用天鹅就能讲清楚。

你在欧洲看见一千只天鹅，都是白的。能不能由此证明“所有天鹅都是白的”？不能。第一千零一只可能就是黑的。看到再多白天鹅，也只是“到目前为止没碰到反例”。

可是只要看到一只黑天鹅，“所有天鹅都是白的”这句话就被推翻了。后来欧洲人在澳大利亚真的见到了黑天鹅。

肯定一个全称判断，要无穷多次观察；否定它，一次就够。证实和证伪之间，有一种不对称。

这个难处，十八世纪的休谟早就指出过：太阳每天升起，不能在逻辑上保证明天它还升起。从过去的许多次推出未来的每一次，这一步在逻辑上走不通，这叫归纳问题。

很多哲学家想替归纳找一个担保，都不太成功。波普尔的办法是绕开它：科学本来就不靠归纳来证实什么，科学靠的是大胆猜，再拼命找反例。

波普尔抓住了这种不对称。他说：科学理论的特点，不在于它能被很多事例支持，而在于它冒着被推翻的风险。一个理论说得越具体、禁止的事情越多，它就越容易被推翻，也就越有内容。

他自己讲过一段经历，后来收在《猜想与反驳》（1963）里。1919 年前后，他在维也纳接触过几种当时很流行的学说，也听说了爱因斯坦的广义相对论。

那几种流行学说有一个共同点：它们什么都能解释。一个人做了某件事，能用它解释；他做了完全相反的事，也能用它解释。拥护者把这看作学说的力量：处处得到证实。

波普尔却觉得不安。一套什么情况都能“证实”它的学说，其实什么也没有说，因为没有任何可能的事情会和它冲突。

他后来回忆，自己曾在阿德勒那里做过一段社会工作，拿一个病例去请教。阿德勒用他的理论轻松地解释了这个孩子，虽然他根本没见过这个孩子。波普尔问他怎么这么有把握，大意得到的回答是：凭成千上万次的经验。波普尔心里想，那么这一次，又多了一次“经验”。

这种不安，你在日常里也碰到过。星座运势说“本周你会遇到一点小波折，也会有意外的收获”，不管这一周发生什么，它都对。它从不出错，正是因为它什么也没押上。

爱因斯坦的理论完全不同。1919 年，爱丁顿等人在日全食时观测星光经过太阳附近的偏折。那次观测的精度后来有过不少争论，此后历次更精确的测量都支持了理论的预言。广义相对论事先给出了一个具体的偏折量。如果观测结果明显不符，理论就要认输。它把自己放在了可能被推翻的位置上。

波普尔说，这才是科学的样子：敢于下注，敢于输。

本书第 18 章讲过那颗 1977 年的试验卫星，星上的钟先不加修正跑了二十天，就是在给相对论一个输的机会。那正是波普尔式的检验。

波普尔的这一步，对在哪里？至少有四处。

第一，它把科学从“积累证实”改成了“经受反驳”。科学的权威，不是来自它被多少人相信，而是来自它经住了多少次真心想推翻它的尝试。

第二，它让“可错”成了科学的荣誉，而不是羞耻。一个理论可能错，说明它说了点实在的东西。一个永远不会错的说法，才是真正可疑的。

第三，它给了普通人一把好用的刀。面对任何一个“什么都能解释”的说法，你都可以问：什么情况会让你承认自己错了？说不出来，这个说法就没有交出它的账。

第四，它连着一种社会态度。波普尔后来写了《开放社会及其敌人》（1945），主张一个社会也要像科学一样，允许批评、允许试错、允许纠正。知识要能被推翻，权力也要能被更换。

所以，任何今天谈“尊重科学”的人，都欠波普尔一份情。

吴恩琪那三个问题里的第三个——“什么结果会让它不成立”——就是波普尔留下的那把刀。

◆ 四、可证伪停下的地方

先写足了对在哪里，再看它停在哪里。

本书说的“停下”，不是说它错了。是说它走到某一步，没有再往前走；而它停下的地方，正好是接着要走的一步。

第一处：猜想从哪里来，他交给了别人。

波普尔把科学分成两个环节：先有猜想，再有反驳。他的整套方法论，讲的都是第二个环节：猜想提出来以后，怎么去检验它、推翻它。

至于猜想是怎么冒出来的，他明确说，这不归逻辑管。那是心理学的事、灵感的事、个人天才的事。

这个分工有它的道理：灵感确实没法用一条规则推出来。可是这样一来，科学最要紧的那一下，新的想法是怎样诞生的，被关在了门外。

本套书在这里接着往前走了一步。新的理念符号不是凭空冒出来的。

先把几个词讲清。一个想法、一个读数、一个习惯，只要稳定、整体、能被带到别处去，本套书就叫它一个符号，这三条叫三判据。想法和概念，叫理念符号。仪器读数这类现实自己沉下来的痕，叫现实符号。沉在一个人身上的习惯，叫自我符号。

一个已站稳的想法撞上一个已站稳的读数，两边合不拢，这叫“对不上”。新的猜想，正是被对不上逼出来的。

开普勒的椭圆，是被第谷数据里八角分的对不上逼出来的（见第 2 章）。普朗克的量子假设，是被黑体辐射的读数对不上逼出来的。这条缝事先就能在史料里指认，不必等猜想成功之后再回头去编。

波普尔看重反驳，本书说：猜想本身，已经是一次对不上的产物。

日常里，你也能看到猜想的来路。你每天七点出门，电梯总在一楼等你。有一天它停在十八楼不动。你马上冒出一串猜想：有人搬家？坏了？停电了？这些猜想不是凭空来的，是“电梯该在一楼”这个习惯，和“它在十八楼”这个读数对不上，一下子逼出来的。电梯天天在一楼的日子里，你一个猜想也没有。

第二处：推翻也不是一锤子的事。

波普尔的天鹅讲得干净：一只黑天鹅，推翻一句全称判断。可是在真实的科学里，一个理论很少是单独站着的。它总是和一大堆辅助假设、仪器理论、背景知识连在一起去面对读数。

法国物理学家迪昂早就指出过这一点，后来美国哲学家蒯因又把它推得更远。读数和预言对不上时，你可以怪理论本身，也可以怪某个辅助假设，还可以怪仪器。

天王星轨道对不上牛顿力学，天文学家没有推翻牛顿，而是假设外面还有一颗没看见的行星，后来真的找到了海王星（见第 5 章）。这次“不认输”是对的。水星近日点对不上，同样的办法却没有成功，“祝融星”一直没找到（见第 5 章）。

波普尔自己知道这个难处。他提出过方法上的规矩，反对用临时拼凑的假设去保住一个理论。可是什么算“临时拼凑”，什么算“合理的补救”，事前往往说不准。海王星和祝融星，在提出的那一刻，看上去是一样的。

本套书在这里用能量来说。一个理论结晶以后，和无数实验、仪器、教科书、职业生涯连在一起；要多大的力才能把它拆开，本套书叫它的“内能”，也就是连接度。拆它、重接它所花的力，叫“动能”。

一次对不上，要推翻一个理论，付出的动能就得超过它的连接度。2011 年 OPERA 实验报告中微子“超光速”，最后查出是光纤接头没有插好（见第 16 章）。那次对不上没能推翻相对论，并不是科学家在包庇它，而是一次读数的分量，远远不够拆开一个被检验了上百年的结晶。

日常里也一样。你站上体重秤，比昨天重了两斤。你会先怀疑什么？是怀疑“少吃会变瘦”这条道理，还是怀疑秤没放平、刚喝了一大杯水、衣服穿多了？大多数人会先怀疑后几样，这不是固执，是合理的：那条道理经过了太多次对账，一次读数撼不动它。

可如果连着一个月少吃，秤一直往上走，你就该怀疑别的东西了，也许该去看看医生。什么时候该换掉辅助假设，什么时候该动理论本身，看的是对不上累积的分量，和那个理论的连接度谁大。

所以推翻不是一个逻辑动作，是一笔能量账。波普尔讲了逻辑，没有讲账。

第三处：沼泽上的桩，由谁打。

这一处，是波普尔自己说出来、却没有接着往下挖的。

他承认，用来检验理论的那些观察陈述，本身也不是绝对可靠的。我们最后接受哪些观察陈述，是一种决定。他打过一个有名的比方（《科学发现的逻辑》第 30 节）。大意是：科学像一座建在沼泽上的楼，桩子打下去，并没有碰到坚实的底；只是打到足够撑住楼的深度，就停了。

这个比方极其诚实。可它马上引出一个问题：桩子打到多深算“够了”，由谁说了算？

答案只能是：由做这一行的人们，在他们的规矩、仪器、训练和争论里共同决定。这就是本书第 13 章讲的思想集体，第 14 章讲的评审与引用。本套书把这张托住结晶的网叫作“势能”：周围那张网把一个新想法往哪边拉、托不托得住它。

波普尔看见了桩子停在沼泽里，没有去写那张托住桩子的网。

这个道理，体育比赛里看得最明白。一个球算不算进，规则写在纸上，可最后要有裁判、边裁、录像回放、联赛的仲裁规矩一起托着。规则再清楚，没有这张网，球场上每一个判罚都会吵成一锅粥（混沌）。科学里的“这个读数算数”，也是这样被托住的。

说这张网托着，不是说“大家说算就算”。网托住的是一套事先定好的、可以复查的规矩；谁带着新的读数来，规矩本身也可以被重新对账。

第四处：对面那个世界，他没有动。

波普尔是一位坚定的实在论者。他相信理论在一次次反驳中，会越来越接近真理；他后来还专门讨论过“逼真度”，也就是一个理论离真理有多近。

他晚年还提出过“三个世界”的说法（《客观知识》，1972）。一是物理的世界，二是心理的世界，三是思想内容的世界，比如理论、问题、论证本身。这三个世界，和本套书说的现实、自我、理念三界，乍看很像。

差别在于：波普尔的三个世界是三块地盘，各自摆着各自的东西，那个物理世界在等着被理论去逼近。本套书的三界符号，是在彼此对不上的时候互相逼出来、又互相改写的。新站稳的东西反过来改写原先的条件，本套书叫“回写”。对象不是一直摆在那里等着被逼近，它和理论一起，在一次次对账里站出来。

这一点和第 18 章讲的那只球是一回事：眼睛只收到二维的像，三维的球是合成的结晶。波普尔把理论这一端彻底放开了，可以猜、可以错、可以被推翻；对象那一端，他没有动。

打个家常的比方。你认识一个老朋友二十年，你心里的“他”，是二十年里一次次相处、一次次意外、一次次被他改写过的。如果你认定“他就是那样的人”，从此只用新发生的事去印证这个印象，你对他的了解就停了。对象那一端不动，最后连理论这一端也会慢慢变成印证。

王德生在《超越波普尔》〔待核〕里接着走的，正是可证伪性停下的这个地方。本章只点名，不展开。

把这四处停顿和波普尔对在哪里放在一起看：

	波普尔对在哪里	他停在哪里	本书接着走的一步
科学的标志	可证伪：敢下注、敢输	只讲检验，不讲诞生	猜想被对不上逼出来，缝可事前指认
推翻	一只黑天鹅推翻全称判断	逻辑上干净，真实中拖泥带水	推翻要付动能，须超过连接度
观察的基础	承认是沼泽上的桩	没写桩子停在哪由谁定	共同体是托住结晶的势能之场
对象	理论可错、可逼近真理	对象端默认先在	对象与理论在对账中一起站出来
社会态度	开放社会、允许纠错	未用于分析科学自身的固化	偶像与石心：结晶拒绝回写的两端

最后一行，就是下一节的事。

◆ 五、科学主义是一种固化

现在可以给科学主义一个精确一点的说法了。

科学主义，是科学的结晶被供奉起来、拒绝回写的那种状态。

这里的“结晶”，是本套书的工作词：一个想法经过对不上、经过检验，终于站稳成一个稳定、整体、可以被带走的东西。科学事实就是这样的结晶。它站得稳，可它站稳的方式，是一直允许被再次对账。

科学主义保留了科学的结晶，却扔掉了让结晶站稳的那套制度。它把“科学已证明”当作一句话的终点，而不是一笔账的摘要。

全书的判词说：科学的力量，在于它把“对不上”变成了一种制度。科学主义恰恰要拿掉这个制度，只留下结论。所以，科学主义不是科学太多，是科学不够。

为什么科学主义这么容易流行？也可以用能量来算。

要翻一笔科学的账，得付动能：去找原始研究，看样本、看对照、看有没有人复现过。这很累。说一句“科学已证明”，一分钱力气都不用花，还自带一种站在高处的体面。

免费得来的东西，在一个人身上结晶不了。他只是借来了一个结论，没有付过让它站稳的那份力。借来的结论最怕被追问，因为他自己也翻不出账，只能拿牌子挡。

这种固化，有两端。

凝在对象一端的，叫偶像。

偶像不是一尊泥像，是一个不再接受对账的对象。“科学说了”“研究表明”“专家认为”，这些话本来都是一笔账的简称。后面应该能翻出来：谁做的研究，在什么人身上，跟谁比，什么结果会让它不成立。当这些话被当成一块牌子举起来、背后翻不出账、也不许人去翻的时候，“科学”就成了偶像。

群里那句“科学已证明：专注力提升百分之三十”，就是一块这样的牌子。

凝在自我一端的，叫石心。

石心不是一个对象被供起来，是一个人自己的某种样子被凝固了，再也不肯被对不上改写。

最常见的科学主义石心，是一种身份：“我是相信科学的人。”这句话本身没有问题。问题在于，它一旦成了一个人的身份，任何对某条科学结论的追问，都会被听成对他本人的冒犯。那位回“你不懂就别问”的家长，护的未必是科学，是自己作为“相信科学的人”的那份体面。

镜子的另一面也一样。那位说“专家都是骗子”的家长，同样是一颗石心：“我是不被忽悠的人。”他不肯被任何证据改写，和前一位家长不肯被任何追问改写，是同一种固化，只是凝的方向相反。

科学主义还有一种更体面的石心，常见于读过书的人：把一切都说成“不过是什么什么”。爱情不过是多巴胺，信仰不过是大脑的某种放电，善意不过是基因的算计。

这些说法里，往往有一部分真实的科学：大脑里确实有多巴胺，演化确实塑造了人。可“不过是”三个字，是科学结论里没有的。它把一条在某个范围里站稳的结晶，扩到了它从没被检验过的地方。这一步，恰好就是莫扎特效应传出实验室时走的那一步。

偶像和石心是同一个结构：一个凝在对象那头，一个凝在自我这头，都是不再回写。

石心在科学家身上也会出现。

这一点要公道地说：科学家也是人，科学主义的固化不只发生在广告和家长群里。

十九世纪的英国物理学家开尔文，是那个时代最了不起的科学家之一。他从地球冷却的物理出发，计算地球的年龄。1862 年前后他给出的范围是两千万到四亿年，到 1897 年又收窄到两千万至四千万年。

他的计算在当时极其严谨，是用热力学去回答一个地质问题的大胆尝试。这是他对的地方。

可是地质学家从地层沉积里读出的时间、达尔文的演化需要的时间，都比这长得多。这是一处事前就能指认的对不上：两套读数，摆在同一张桌上，合不拢。

1895 年，开尔文从前的助手、工程师佩里指出了一处漏洞。如果地球内部能比开尔文假设的更有效地往外送热，比如深处的岩石在缓慢流动，算出来的年龄就会

长得多。后来又发现放射性元素在地球内部持续放热。地球的年龄，最后被定在四十多亿年。

2007 年，几位地球物理学家在美国地质学会的刊物上撰文认为，把放射性加进开尔文的算法，并推不翻他的结论；真正推翻它的，是佩里指出的那一条。那条缝在 1895 年就被指认出来了。可在当时，物理学的计算被看作比地质学的读数“更硬”，那条缝被轻轻放过了。

开尔文不是反科学的人，他是科学的巨人。正因为如此，这个例子才说明问题：当某一门学科的方法被当成天然高于别的读数，科学内部也会出现偶像。

也正是科学自己的制度，最后把这个偶像熔开了。地质学家没有停止记录地层，物理学家没有停止研究放射性。新的读数一年年累积，直到旧的结论托不住。科学内部会出偶像，可科学也自带熔开偶像的炉子。科学主义的麻烦，是把结论从炉子里端出来，摆上了供桌。

锁化型稳定和发生型稳定。

一直被重新检验而稳，是发生型稳定，相对论、进化论、原子论都是；没人再检验而稳，是锁化型稳定，一句“科学已证明”在群里被一万个人转发、没有一个人去翻账，就是（见第 15 章）。

科学主义的危险，正在这里：它让一个本该属于发生型稳定的东西，以锁化型稳定的方式被持有。结论可能是对的，持有它的方式却是错的。

稳定不等于对。谣言也很稳。

尊重科学和科学主义的分界。

把三种态度并排放，分界就清楚了：

	反科学	尊重科学	科学主义
对科学结论	一概不信	当作目前站得最稳的结晶	当作已经揭幕、永不再变的事实
常说的话	“专家都是骗子”	“目前证据表明，在这个范围里……”	“科学已证明，别问了”
为什么信或不信	凭感觉、凭立场	能说出它经过了哪些对账	因为是科学说的

	反科学	尊重科学	科学主义
面对一次反常	拿来全盘否定	欢迎，按规矩去查	当作捣乱或无知
谁能提出对不上	谁嗓门大谁说了算	任何带着读数来的人	只有权威
管辖范围	科学什么都不配管	知道科学答得了什么、答不了什么	科学答不了的就没意义
稳定的类型	不肯结晶	发生型稳定	锁化型稳定
凝在哪一端	自我端：我不被忽悠	不凝固，允许回写	对象端成偶像，自我端成石心

表里最要紧的是中间那一列。它不是两头的折中，不是“信一半、疑一半”。它对科学结论的信任，比科学主义更深：它信的是那套能把对不上变成制度的办法，所以它敢问。

尊重科学的人敢问“什么结果会让它不成立”，因为他相信科学经得起这一问。

这里要防一个误会：好像只要说“科学已证明”，就一定是科学主义。不是。

吸烟和肺癌的关系，是一个好例子。二十世纪五十年代起，多尔和希尔等人做了病例对照研究，又从 1951 年起跟踪了大批英国医生，前后五十年。之后各国做了大量研究，动物实验、病理研究、人群数据，几路读数指向同一处。烟草公司花了很多钱去制造怀疑，这些怀疑一条条被查过。

到今天，说“科学已证明吸烟显著增加肺癌风险”，是一句站得极稳的话。它稳，因为后面的账厚得翻不完，而且至今仍然欢迎任何人带着新读数来翻。

同一句“科学已证明”，在这里是一笔厚账的摘要；在那张音频广告里，是一块后面空空的牌子。分界不在说法，在说法后面能不能翻出账，以及肯不肯让人翻。

◆ 六、一个完整的例子：莫扎特效应

现在回到吴佩珊群里那段九十九新元的音频。它有一个很清楚的祖先，从头到尾都能在史料里指认。

第一步：一次范围很窄的结晶。

1993 年，美国加州大学欧文分校的劳舍尔、肖和凯伊在《自然》杂志上发表了一篇很短的研究报告。

实验对象是三十六名大学生。他们分三种情形各待十分钟：听莫扎特的双钢琴奏鸣曲，听放松指导语，或者保持安静。之后，他们做斯坦福—比奈智力测验里的几项空间推理题，比如想象一张折过、剪过的纸展开后的样子。

结果，听了莫扎特的那组，空间推理得分高一些。效果持续大约十到十五分钟就消失了。

这是一个范围很窄、说得很具体的结果：大学生，空间推理，十几分钟。它可以被复现，也可以被推翻。它是一次正常的科学下注。

要替这项研究说句公道话。它本身没有夸大：样本、任务、时长都写得明明白白，它押上了一个可以被拆穿的具体结果。在波普尔的意义上，这是一次好的下注。后来它没能站住，也不丢人；科学里大多数下注都会输，输了的账照样有用。

第二步：范围一层层被剥掉。

接下来几年，这个结果走出了实验室。

报纸的标题变成了“听莫扎特让你更聪明”。1997 年，坎贝尔出了一本畅销书，书名就叫《莫扎特效应》，推荐给婴儿放古典音乐，后来还有了一系列儿童版产品。

1998 年，美国佐治亚州州长米勒提出，每年拨十万五千美元，给州里每一个新生儿送一盒古典音乐磁带或光碟。

你看这一路走了多远：

环节	原来的结晶说的是	传出去以后说的是
对象	三十六名大学生	婴儿、所有孩子、所有人
测的是什么	几项空间推理题	智力、聪明
持续多久	十到十五分钟	长期、甚至终身
跟谁比	放松指导语、安静	不提
什么会推翻它	复现不出来	不提

环节	原来的结晶说的是	传出去以后说的是
说话的口气	“在这个条件下观察到”	“科学已证明”

每往外走一步，就掉下一个限定条件。到最后，剩下的只有“莫扎特”和“聪明”这两个词，以及一块写着“科学”的牌子。

第三步：科学这一头，对不上来了。

就在这个说法在外面越传越广的时候，科学这一头在做它该做的事：复现。

各地的实验室重做这个实验，结果有的能做出来，有的做不出来。1999 年，哈佛的查布里斯在《自然》上发表了一项元分析，把多项研究合起来看。结论是：效果很小，而且不是智力的提高。

还有研究者提出另一种解释：听了自己喜欢、让人兴奋的东西，人在短时间里做题状态会好一点，不一定非得是莫扎特。1999 年，加拿大心理学家南泰斯和谢伦伯格的实验发现，让喜欢听故事的人听一段故事，也能出现类似的效果。

这里有两个词要讲白。“元分析”，就是把很多项做同一件事的研究放在一起，按统一的办法合算，看总的效果有多大。一项研究可能碰巧，几十项合起来，碰巧的成分就小了。

“发表偏差”，是说做出了效果的研究更容易登上期刊，做不出效果的常常被塞进抽屉。只看登出来的，就像只听中了奖的人讲买彩票的经验。

2010 年，维也纳大学的皮奇尼希等人做了一项更大的元分析，合并了三十九项研究。结论有三条。几乎没有证据支持莫扎特效应。和最初团队有关的研究，效果明显更大。还有很强的发表偏差，做出效果的研究更容易被发表。

这一路下来，最初那个窄窄的结晶，被一次次推到可能对不上的地方，结果真的对不上了。它熔开了。

第四步：熔开的消息，没有传回去。

这才是这个例子最该看的地方。

科学的制度，在这件事上运转得很好。一个说法被提出、被复现、被汇总、被修正，前后十几年，账一笔笔都记在期刊上，谁都可以翻。这正是全书判词说的：对不上被做成了一种制度。

可是在外面那一层，广告里、育儿书里、家长群里，“听莫扎特变聪明”这句话一直没有被回写。你要是在哪里碰到“科学证明胎教音乐能开发智力”这一类说法，可以先想一想：它后面，翻得出期刊里那十几年的账吗？

科学那一头已经熔开再结晶了，外面这一头还供着最早那块牌子。

这就是科学主义的完整样子：它从科学那里借来了一个结晶，又把科学让结晶保持活着的那套制度留在了门外。它借的是科学的名，丢的是科学的命。

用本套书的话再说一遍。最初那篇报告，是一个理念符号和一组读数对上了账，在一个很窄的范围里结晶。它传出实验室时，限定条件一个个掉落，结晶被当成了一块可以搬到任何地方的砖。

后来科学那头的复现，是在给它重新对账；对账的结果是熔开。而广告、育儿书、群聊里的那一份，从离开实验室那天起就没再对过账。它的稳，是锁化型的稳：不是经住了检验，是从来没有再被检验。

同一个“莫扎特效应”，在期刊里是一段有起有落的发生史，在广告里是一个定型（秩序）了的偶像。

第五步：用波普尔那把刀，再试一次。

现在拿恩琪那三个问题去问群里那张图。

在什么人身上做的？图上没说。原来的研究是三十六名大学生，不是准备考试的中学生。

跟谁比？图上没说。“提升百分之三十”，没有对照，这个数就没有意义。

什么结果会让它不成立？图上没说，也不会说。因为它根本没打算冒被推翻的风险。

三个问题都答不上来，它就没有交出它的账。这不是在怀疑科学，这恰恰是在替科学把关。

还要分清一件事。那张图不只是科学主义，它还是一则推销。可推销能成功，靠的正是科学主义：它知道“科学已证明”这几个字，在很多人心里是一块不许问的牌子。

如果群里的家长们都习惯问那三句，这块牌子就卖不出九十九新元了。科学主义退一步，伪科学就少一块地盘。

◆ 七、放回日子里

那天晚上，吴佩珊在群里发了一段话。

她没有说那段音频是骗局，也没有说那位提问的家长对、回嘴的家长错。她只是把恩琪那三个问题打了出来，后面加了一句：

“我们都希望孩子好。下次看到‘科学已证明’，我们一起先问这三句，问得清楚就买，问不清楚就先放一放。这不是不信科学，是信科学信得更认真一点。”

群里安静了几分钟。后来，那位最早提问的家长回了一个“赞”。说“专家都是骗子”的那位家长没再说话。回“你不懂就别问”的那位，过了一会儿私信吴佩珊，说自己刚才语气冲了。

睡前，吴佩珊问女儿：你们老师怎么想到教这三句的？

恩琪说：老师讲过一个故事，说有个研究很红，后来很多人重做，做不出来。老师说科学不怕被重做，怕的是没人去重做。

吴佩珊想了想，这话放在家长群里也对。最怕的不是有人问，是一百多个人都不问。

这件事没有让群里的人变成科学家。可它让一百多个家长在一块牌子前面，停下来翻了一次账。

你的日子里，这块牌子随处可见。

保健品广告说“经临床验证”。你可以问：哪项临床试验？多少人？跟安慰剂比了吗？

一篇文章说“研究发现喝咖啡会怎样”。你可以问：是一项研究还是很多项？是在人身上还是在小鼠身上？是看到两件事一起出现，还是证明了一件导致另一件？

一个朋友说“这是科学，你别跟我争”。你可以不跟他争，只问一句：什么样的结果会让你改变看法？他答得出来，你们就有得谈；他答不出来，那块牌子就是一块牌子。

孩子的作业里也有。一份科学课报告写着“实验证明植物喜欢音乐”。你可以陪孩子问：几盆植物？放音乐的和不放的，光照、浇水一样吗？换一批植物再做一次，还一样吗？这样问，不是泼冷水，是让孩子第一次自己摸到科学那套办法。

反过来也一样。当你自己想说“科学已证明”的时候，不妨先问问自己：我能不能说出它经过了哪些对账？如果说不出，你持有它的方式，可能已经是锁化的了，哪怕这个结论本身是对的。

身体上的事，还是要听医生的；真碰到拿不准的健康问题，去找专业的人，而不是去找一块牌子。尊重科学，有一部分就是尊重那些替你把账一笔笔对过的人。

科学的结论值得信任，因为它允许被问；一旦不许问，它就不再是科学，而是偶像。

带 走 的 话

尊重科学，是信那套把对不上变成制度的办法；科学主义，是只留下结论，把那套办法关在门外。

小　账

波普尔把门开在“理论可错”，却把猜想的来路、推翻的代价、托桩的网和对象那一端关着；本书接着打开这几扇。

发生被收回为发现的那一下：“科学已证明”把一笔一直在记的账，说成了一次已经揭幕、永不再翻的事实。

想 一 想

1. 你最近一次说或听到“科学已证明”，背后的那笔账，你能翻出来吗？
2. 你身上有没有一个“我是什么样的人”的身份，让你一听到某种追问就不舒服？
3. 有没有一个你深信不疑的说法，你能说出什么样的结果会让你改变看法？

◆



第　八　编

收束

导　语

第八编只做一件事：把这台对账的机器放回课堂、放回一个国家的科研，最后交出本书自己的可推翻条件。

第 20 章在昆明一间初中实验室。各组交上来的重力加速度整整齐齐，都在 9.8 上下，只有叶子航那一组写着 9.43，旁边一道没擦干净的痕。课本装的是别人的结晶，学生要自己卡住、自己追过，那颗结晶才会在身上再长一次。

第 21 章在合肥一家科研院所。所长助理段承志的表格里，填不进闵悦那条和权威对不上的曲线。迁移别人的结晶是追赶的真本事；原创还要自己的缝、自己的场。屠呦呦与那碗不能煮开的药，是本章的完整例子。

第 22 章在厦门一所大学的教室里。学生谭璐问潘一鸣：如果每个案例都找得到对不上，这个说法是不是怎么说都对？本章写出三条能推倒本书的路，拿伦琴的 X 射线和弗莱明的青霉素来试刀，再押下五个可以去查的预测。

读这一编时，请带着一个问题：一个说法要算数，它肯在哪里认输？

20

第 20 章

科学教育：先让学生卡住

这一章的问题

叶子航测出 9.43，课本上写着 9.8，他该不该把数改掉？课本上的结论，怎样才能在一个学生身上真正长出来？

◆ 一、一个凑出来的九点八

昆明的十一月，下午四点的阳光斜斜地照进实验室。

姜慧敏三十五岁，在一所初中教了十一年物理。这节是每周一次的物理拓展课，她想带学生做一个课本外的小实验：用单摆测本地的重力加速度。器材很简单，一根细线，一个小钢球，一个铁架台，一块秒表，一把卷尺。

二十分钟后，各组的数据陆续交上来。

第一组写的是 9.80，第二组 9.79，第三组 9.81。整整齐齐，像是事先商量过。只有叶子航那一组，纸上写着 9.43，旁边还有一道被橡皮擦过、没擦干净的痕迹。

姜慧敏把叶子航叫到讲台边。男孩十四岁，个子蹿得快，说话却还带着点孩子气。

“老师，我们测了三遍，都是九点四几。”他低着头，“我本来想改成九点八的，课本上写的是九点八。”

“那你为什么没改？”

“改了，又擦了。”他想了想，“因为改了以后，我就不知道我们那三遍是在干什么了。”

姜慧敏回头看那三张整齐的 9.80。她心里清楚，那里面至少有两张，是先写了答案，再倒着凑出摆长和周期的。学生不是坏，是被训练得太好了：他们早就学会，实验课的任务是“得到课本上的那个数”。

那天晚上，她在备课本上写了一行字：全班只有一个人卡住了，可只有他真正做了实验。

这一章要讲的，就是叶子航擦掉又没擦干净的那道痕。它很小，却装着科学教育最要紧的一个问题：课本里的结论是怎样来的，学生又怎样才能让它在自己身上长出来。

◆ 二、课本装的是别人的结晶

先把账算公道。课本是人类最了不起的发明之一。

一个初中生用一个学期，就能学会牛顿用半生理清的运动定律；一个高中生用一节课，就能写出拉瓦锡和他同代人争了几十年才定下来的燃烧反应式。没有课本，每一代人都得从钻木取火重新走起，走到老也走不到伽利略。

十七世纪的捷克教育家夸美纽斯，在《大教学论》里立下一个愿望：把一切知识教给一切人。他设计班级、课时、按年级编排的教材，让一位老师能同时教几十个孩子。今天全世界的学校，大体还是照着这个样子在运转。

这套办法对在哪里，要先说足。

第一，它省能量。一个结论被前人用几十年的力气确认过，后来者不必再付那份力气，直接接过来就能用。这就像城里修好的马路，你不必每次出门都自己开一条路。

第二，它抗私意。课本上的东西，是被许多人反复核对过的。一个孩子觉得“重的东西落得快”，这是他自己的感觉；课本告诉他，不计空气阻力时落得一样快，这是被无数次实验压过的。课本替学生挡住了大量似是而非的个人猜想。

第三，它让人站得高。只有接过前人的结论，才可能走到前人没走到的地方。科学的进步，大半靠的是这种接力。

本书第 1 章讲过发现学科学观的长处：客观、可复验、抗私意。课本正是这套科学观在教育里最成功的样子。它把一个“已经被读出来的自然之书”，整理成一页一页，交给下一代。

可是课本里装的东西，要说准确，是**别人的结晶**。

本书用“结晶”这个词，指的是一件事从晃荡不定变成站得住的那一下。

一个科学结论站住了，有三条判据：稳定，能被反复验出，不随一次实验散掉；整体，拆开就不是它；独立，能离开发生它的那间实验室，被带到别处去用。重力加速度约 9.8 米每二次方秒，就是这样一个结晶：它在无数实验室里被验过，它是一个完整的量，它能被带进每一本课本、每一座桥的计算里。

拿一件家常事比一比。外婆做的红烧肉好吃，她把做法写在一张纸上给你：五花肉多少，冰糖多少，酱油多少，小火炖四十分钟。这张纸就是外婆的结晶，是她几十年炖坏过、炖咸过、炖糊过之后站住的东西。

你照着纸做，第一次多半做得出个样子。可你换了一口锅，换了一种酱油，火力大一点，肉就不对了。你不知道为什么，因为纸上没写“为什么是小火”“冰糖为什么要先炒”。外婆身上有，纸上没有。

直到你自己炖糊过一次，站在锅边闻着那股焦味，回想是哪一步出了岔子，下一次你才真正“会”了。这时候你身上长出的东西，跟外婆身上那颗很像，可它是你自己的，是用你的那锅糊肉换来的。

课本就是那张纸。纸很珍贵，没有它，你连从哪儿下手都不知道。可光有纸，还不等于会做。

这种站得住的东西，本书叫它“粒子态”——稳定、整体、独立，像一颗颗能拿起来、带着走的珠子。符号就是这样的珠子。

结晶有一个特点：它站住之后，就把自己的来历收了起来。

课本上那个 9.8，不会告诉你它是怎样被一次次测歪、一次次修正出来的；牛顿第二定律也不会告诉你，在它之前人们为“力”和“运动”吵了两千年。

库恩早就注意到，教科书习惯把科学史改写成一条笔直的进步线，把弯路和争吵都删掉（见第 6 章）。删掉是有道理的，不删课本会厚得没人读得完。可删掉的，恰恰是那些结论当初结晶时付出的力气。

就拿那个 9.8 来说，它自己也有一段被删掉的来历。

1672 年前后，法国天文学家里歇带着一台走时精准的摆钟，去了南美洲赤道附近的卡宴。到了那里，钟每天慢两分多钟。他只好把摆缩短一点，钟才走准。回到巴黎，再把摆放长回去。

这是一次干干净净的对不上：同一台钟、同一根摆，在两个地方走得不一样快。当时的理念是“摆的快慢只看摆长”，现实的读数却说，换了地方就不一样。牛顿后来在《自然哲学的数学原理》里用上了这条读数，拿它来论证地球不是正圆球，赤道一带稍稍鼓出来，那里的重力略小〔转述〕。第 12 章讲米的定义时，也碰到过这条缝。

到了十九世纪初，英国的卡特又碰上另一个难处：用单摆测重力，最难量准的恰恰是“摆长”——一个有大小的摆锤，摆长该量到哪一点？他设计了一种可以倒过来挂的复摆，绕开了这个难题。

你看，“重力加速度随地方而变”和“摆长量到哪儿才算数”，都是被一次次对不上逼出来的。可课本上只剩一行：g 约等于 9.8。这一行字是对的，是好的结晶。它只是不再告诉你，它是怎么结晶的。

这一节先记下一件事：本章后面那个初中生在昆明撞上的两个难处——本地 g 不是 9.8、摆长没量到球心——恰好是两三百年前科学家撞过的同两处。

◆ 三、前人早已摸到卡住

把“困惑”当成学习的起点，这个想法并不新。

最早说透它的，也许是孔子。《论语·述而》里有一句：不愤不启，不悱不发。意思是，学生不到心里想弄明白而弄不明白、憋得发急的时候，不去开导他；不到嘴上想说而说不出来的时候，不去点拨他。

这八个字对在哪里？它把教的时机，放在了学生卡住之后。“愤”和“悱”，就是一个人身上已有的东西够不着眼前的东西，憋在那里。老师的话要在这时候进去，才进得去；早一步，学生还没有那条缝，话从他身边滑过去。两千五百年前，这已经是一条很精的教学律。

到了宋代，朱熹讲读书，也有类似的意思：读书起初没有疑问，要读到有疑问；有了疑问，再读到疑问解开，才算有长进〔转述〕。他把“有疑”当成读书必须经过的一站，而不是要尽快绕开的障碍。

可是这个好传统，在后来的课堂里常常被倒过来用。老师先把答案讲透，学生连“愤”的机会都没有，自然也就无从“启”。

到了现代，至少又有四位前人，在不同的地方摸到过它。

杜威。 美国哲学家杜威在《我们如何思维》（1910）里说，真正的思考，起于一种“感到的困难”〔转述〕：人在路上走着，碰到一个岔口，不知道往哪走，这才开始想。没有这一下，人只是顺着习惯往前走，谈不上思考。他由此主张“做中学”，让孩子在动手的过程中撞上问题。

杜威对在哪里？他把思考从书本上拉回到人和世界的碰撞里。一个孩子背熟了“水往低处流”，和一个孩子挖沟引水、水偏偏不肯往他挖的方向流，学到的不是一回事。后者身上，有一个真实的岔口。

皮亚杰。 瑞士心理学家皮亚杰讲儿童认知的成长，用了两个词：同化和顺应。新东西能装进旧框子里，叫同化；装不进，框子被撑破、只好改造，叫顺应。推动顺应的，是一种失衡〔转述〕。

他对在哪里？他看见了学习不是往空瓶子里倒水，而是旧结构被新经验撑破、再重建。一个三岁孩子坚信高瘦杯子里的水比矮胖杯子里多，大人怎么讲都没用；要等他自己的经验积累到撑破那个判断，他才“忽然懂了”。

概念转变理论。 1982 年，科学教育学者波斯纳等四人提出，学生要放弃一个旧概念、接受一个新概念，第一个条件是对旧概念“不满”〔转述〕。旧的还够用，新的再好也进不来。接下来才是新概念要可理解、看着合理、用起来有成效。

这一派对在哪里？它把科学课堂里那些顽固的“错误概念”认真当回事。研究者发现，许多学生学完一学期力学，脑子里仍然是“物体运动需要一直有力推着”。老师讲得再清楚，考试答得再对，一到生活题里，旧想法又冒出来。概念转变理论说：因为旧概念从没被学生自己判为不够用。

有成效的失败。 学者卡普尔在新加坡任教时，在当地中学做过一系列研究。他让学生先自己去解一个还没学过方法的难题，多半解不出来，然后老师再讲正规解法。结果显示，这样先失败再学的学生，在理解和迁移上，常常胜过一开始就听讲解的学生〔转述〕。他给这种安排起了个名字，叫“有成效的失败”。

这项研究对在哪里？它把“卡住”从一种不得不忍受的副作用，变成了可以设计、可以检验的教学步骤。

四位前人，从哲学、心理学、科学教育到课堂实验，说的都是同一个意思：**不卡住，就学不进去。**

◆ 四、它们停在了哪里

这些说法都对，本书接着它们往下走。可它们停在了几个地方，正好是接下来要迈的那一步。

第一处：卡住被当成一种心理动机。

杜威的“困难”、波斯纳的“不满”，多半被理解成学生心里的一种状态：他觉得别扭了，所以愿意学。这样一来，卡住就成了一种情绪上的推力，像饥饿推人去找饭吃。

可是卡住不只是一种感觉。它有一个看得见的结构：学生身上已经站住的一个东西，撞上了世界已经站住的另一个东西，两边对不上。叶子航身上站住的是“课本说 9.8”，秒表和卷尺给出的是 9.43。这不是情绪，是两颗已经结晶的珠子撞在一起。

第二处：卡住被当成免费的。

前人讲困惑的好处，很少讲困惑要花多少力气。好像只要制造一个困惑，学习就会自己发生。

可是本书反复讲：任何一个符号的结晶，都要付能量。一个学生卡住之后，要花力气去追：哪里出了问题，是线量错了，还是秒表按慢了，还是公式用得不对。这份力气，他得自己付。他付不起——太累了，太怕了，太没时间了——卡住就只会变成挫败，不会变成结晶。

第三处：课本结论被当成现成的对象。

这一处最深。前面几派虽然重视困惑，可困惑的终点，仍然被设想成“学生终于够到了课本上那个正确的东西”。正确的东西早就在那里，学生只是从错误的位置走到正确的位置。

这是发现学的图景搬进了教室：知识是一个先在的对象，学习是去找到它。本书第 2 章讲过，这个图景里，“客体”那个变量没人动过。

可是一个学生学会了单摆公式，他身上发生的事，不是“找到了一个早就在那里的公式”。是一个新的东西，在他身上长了出来，从此能被他带走、带去用。这个新东西，在课本里没有。课本里只有别人的那一颗。

第四处：错误概念被当成要清除的杂质。

“物体运动需要有力推着”，在概念转变研究里常被叫作“迷思概念”，意思是要被替换掉的错误。

本书换一个看法：这个旧概念不是杂质，是学生身上一颗早已结晶的珠子。它是怎么结晶的？是他从小推箱子、推车、踢球，一万次经验沉下来的。推一下，箱子动；不推，箱子停。它稳定、整体、独立，被他带进了每一个生活场景。它很难被一节课拆掉，不是学生笨，是这颗珠子的连接度太高。

稳定不等于对。谣言也很稳，“运动要有力推”也很稳。可它的稳，是从未被重新检验过的稳。要拆它，付出的力气得超过它攒了十几年的连接度。这就是为什么讲一遍没用，讲十遍也常常没用。

前人	他摸到了什么	他停在哪里	本书往前走的那一步
夸美纽斯与课本传统	结论可以接力传下去，省能量、抗私意	课本把结晶的来历收起，学生只拿到成品	区分别人的结晶与自己的结晶

前人	他摸到了什么	他停在哪里	本书往前走的那一步
杜威	思考起于感到的困难	困难多被理解成心理动机	困难是两颗已结晶的珠子对不上
皮亚杰	失衡推动顺应	讲认知结构，不讲重建要付的能量	重建要消耗动能、依靠场、建立连接度
波斯纳等	先对旧概念不满，新概念才进得来	旧概念被当成要清除的错误	旧概念是高连接度的自我符号，有它的来历
卡普尔	先失败再学，理解更深	侧重教学步骤的效果	说清它为什么有效：对不上、动能、场三件齐了
照方抓药的实验课	让学生动手接触仪器	结果事先知道，对不上被预先填平	实验课要有意制造对不上

◆ 五、学会是自己身上长出一颗

本书的说法，压成几句话。

先把三个词说清。本书把符号分成三界：**理念符号**是概念、公式、定律，存在于语言和思想里；**现实符号**是世界自己沉下来的痕，比如被踩出的小路、河床、伤疤，也包括仪器上一个稳定的读数；**自我符号**是沉在一个人身上、不用想就会的东西，比如习惯、手感、一个人看问题的方式。

第一句：课本上的结论，是别人的理念符号。

牛顿第二定律、单摆公式、9.8，对写课本的人来说是结晶过的。它们在科学共同体里稳定、整体、独立。可它们到学生面前时，还只是一行字。

第二句：学会，是这行字在学生身上长成一颗自我符号。

一个学生真正学会了单摆，表现是什么？不是能背 $T=2\pi\sqrt{(L/g)}$，是看到一座钟摆、一架秋千、一根晃动的吊灯，他身上会自动冒出一个判断：它晃一下的快慢，跟绳长有关，跟吊的东西重不重没关系。这个判断不用想就会，稳定，整体，能被带到任何一个晃动的东西面前。这才是一颗自我符号。

背下来的公式，是理念符号挂在他身上；长出来的判断，是自我符号沉在他身上。这两样，考卷上常常分不出来，生活里一下就分出来了。

美国物理学家费曼讲过一段经历。他在巴西教过一阵书，发现学生能把光的偏振、反射时的偏振规律背得一字不差，可他指着窗外海面的反光问：“拿一片偏振片看过去，会怎样？”学生答不上来。他们背下的是一套漂亮的定义，从没把这套定义和眼前的海水接上过。

那些学生不笨，考试也考得很好。他们身上挂满了理念符号，却几乎没有一颗跟现实对过账的自我符号。费曼把这叫作一种“不是在学物理”的学法〔转述〕。

本书换一个说法：那些知识是借来的，挂在身上，没长进身上。

第三句：自我符号的结晶，要三件东西齐备——对不上、动能、场。

本书第 3 章写过一个三角：理念符号、现实符号、自我符号，任何两类对不上，就逼第三类发生。用在学习上，最常见的一条是：课本上的理念，和实验台上的现实对不上了，被改写的是学生自己。

可只有对不上还不够。

对不上是落差，像水位差。没有落差，水不流，什么也不会发生。叶子航身上有落差：9.8 和 9.43。抄答案的那三组没有落差，他们从一开始就让两边对上了。

动能是追的力气。本书说的动能，是一个人把旧的连接拆开、再接成新的那份速度和方向。落差有了，还得有人去追：线量得对吗？球心在哪？摆角大了会怎样？这些追问，每一个都是拆一次、接一次。没有这份力气，落差只会让人沮丧。

场是托住他的那张网。本书说的势能，是周围那张关系网的吸引和拉扯。学生追到半路，需要有人告诉他“这个方向值得追”，需要有同学一起比对数据，需要有一个不会因为他交了 9.43 就扣分的老师。没有场，再好的对不上也结晶不了，人会退回去，悄悄把 9.43 改成 9.8。

第四句：照方抓药的实验，把对不上提前填平了。

许多学校的实验课，是这样上的：实验步骤印在纸上，一步一步照做；预期结果写在课本上，学生的任务是“验证”它。做出来跟课本一样，满分；不一样，说明操作有误，重做，或者改数。

这样的实验课，学生的手动了，身上没动。对不上还没有形成，就被“预期结果”抹平了。

本书第 4 章讲过：实验是有意制造对不上，把假说推到读数面前对账。科学家做实验，是因为不知道结果；学生做实验，却被要求知道结果。这一下，实验的魂被抽掉了，只剩一个动作。

第五句：免费的符号结晶不了。

一个学生看了十遍别人做单摆实验的视频，读了三遍课本上的推导，他付的动能接近零。那些内容在他身上，只是信息。信息可以背下来，可以考出来，两个月后就散了。

这不是说讲授没用。讲授提供的是场：把一整张连接、次序、结构摊在学生面前。场很重要，没有它，学生追不到方向。可场能托住结晶，不能代替结晶。结晶，只能发生在付了动能的那个人身上。

第六句：学生的旧概念，是要熔开的珠子，不是要扫掉的灰。

拆一颗高连接度的旧珠子，靠的不是“告诉他正确答案”，是让他自己撞上一个旧珠子解释不了的现实。撞得够硬，旧珠子熔开，新的才有地方结晶。

第七句：不是所有的卡住都值钱。

这一句要专门说，免得“先让学生卡住”被用歪。

有一种卡住，是两颗珠子真的撞上了：学生的预测和读数不符，课本的公式和测量不符。这种卡住指向一条可以追下去的缝，追到底，会有东西结晶。

还有一种卡住，只是噪声：秒表坏了，线打了结，题目的字印错了，老师用了一个学生从没见过的记号却没解释。这种卡住也让人难受，可它后面没有缝，只有一个坑。学生在坑里耗的力气，换不来任何结晶，只会换来“我不是学物理的料”。

怎么分辨？一个简单的办法：问一句“这次卡住，追到底能学到什么”。说得出来的，是缝；说不出来的，是坑。好的老师要把坑尽量填平，把缝尽量留着，甚至故意挖开。姜慧敏让学生测三十次而不是一次，就是在填坑。一次摆动只有两秒，手按秒表的反应误差就占了好大一截。学生会被这个坑绊住，看不见摆长、摆角那几条真正的缝。

这里要守一道闸：本书说“对不上”，每一次都要能在事前指认出那条缝。不能事后看见学生学会了，就说“他一定经历过对不上”。叶子航的那条缝是可以指认的：9.8 和 9.43，差了约百分之四。

◆ 六、一节单摆课，从头走一遍

回到昆明那间实验室。

第二周，姜慧敏重新设计了这节课。她没有改器材，只改了顺序。

第一步：先预测，写下来。

上课第一件事，她不讲公式，先发一张纸，上面只有三个问题：

一、把小钢球换成同样大小的木球，摆一次的时间会变长、变短，还是不变？

二、把摆线从一米剪到二十五厘米，摆一次的时间会怎样？

三、把球拉得很高再放（摆角大），和拉得很低再放（摆角小），摆一次的时间一样吗？

每个人先把自己的答案写在纸上，签上名字，不许改。

这一步很要紧。它把学生身上的旧珠子先亮出来，钉在纸上。不钉住，等实验结果出来，人会悄悄告诉自己“我本来就是这么想的”，对不上就溜走了。

全班三十二人，有十九人写“铁球摆得快”，因为“铁球重”。有十一人写“线短一半，时间短一半”。第三题，几乎所有人都写“一样”——有几个读过课外书的，记得“单摆有等时性”。

第二步：动手，各测各的。

她给每组一个铁球、一个同样大小的木球、一根可以调长短的线。要求只有一条：每次测摆动三十次的总时间，再除以三十。为什么测三十次？她不解释，只说：“你们待会儿自己会知道。”

第三步：对不上来了。

第一个对不上，在铁球和木球之间。十九个写了“铁球快”的学生，测出来两个球几乎一样。有人不信，重测，还是一样。有个女生小声说：“那我小时候荡秋千，我爸坐上去也不比我快啊。”

这是旧珠子第一次被撞。撞它的，不是老师的话，是秒表上的数和她自己荡秋千的记忆。

第二个对不上，在线长上。线剪到原来的四分之一，时间没有短到四分之一，只短到一半左右。写“短一半”的十一个人愣住了。有个男生把四组数据排在一起看了半天，说：“线长是一、四分之一、十六分之一的时候，时间好像是一、二分之一、四分之一。”他没学过平方根，可他看出了那个次序。

这一下，场出现了：一个学生摊出的次序，被全班接住，一起往下追。

第三个对不上，最妙。几乎所有人都以为“摆角不影响时间”，结果把球拉到大约四十五度再放，测出来的时间比拉到十度放的长了一点。差得不算多，三十次加起来差一两秒，可每组都测出来了。

叶子航举手：“老师，课外书上说单摆是等时的。”

姜慧敏说：“那你们测的是什么？”

教室里安静了几秒。

这一次的对不上，不是学生的旧珠子撞上现实，是一颗从书上背来的理念符号撞上了现实。答案在物理学里是清楚的：单摆的等时性只在摆角很小时近似成立；摆角越大，周期越长，拉到三十度时大约长百分之一点七，四十五度时大约长百分之四。课本上的公式 $T=2\pi\sqrt{(L/g)}$，是一个“小角近似”。

伽利略据说是在比萨大教堂看吊灯摆动时注意到摆的等时性的〔此为流传说法，史学界有争议〕。不管这个故事真假，他当时用脉搏计时，摆角带来的那点差，他测不出来。叶子航他们用秒表测三十次，测出来了。

第四步：追到底。

现在可以回到上周那个 9.43 了。

姜慧敏让叶子航那组把上周的步骤重演一遍。全班围着看。很快，有人指出两个地方：

一是摆长。他们量的是从悬点到线的末端，没有加上小钢球的半径。球的直径四厘米，摆长就少算了两厘米，大约百分之二。

二是摆角。他们为了让球摆得“明显”，拉得比较高，大约二十度。这会让周期偏长，算出来的重力加速度就偏小，大约又偏了百分之一点五。

两项加起来，大约百分之三点五。9.43 往上补百分之三点五，接近 9.76。

昆明海拔将近一千九百米，纬度大约北纬二十五度，本地的重力加速度比“9.8”略小，大约 9.78。叶子航修正后的结果，跟本地值只差零点几个百分点。

这时，全班才第一次弄明白：那三张整齐的 9.80，不仅是凑出来的，而且凑错了——昆明本来就不该是 9.80。

第五步：结晶，写下自己的话。

下课前，姜慧敏让每个人在预测纸的背面，写一句“我现在知道的”。

不同的学生写出了不同的东西。有人写：“摆一次多久，跟球重不重没关系。”有人写：“线长变成四倍，时间才变成两倍。”有人写：“课本上的公式只在摆得小的时候准。”叶子航写的是：“测得不对的时候，先别改数，先找是哪里不对。”

最后这一句，不在课本里。它是这节课在叶子航身上长出来的一颗自我符号：碰到对不上，先追，不抹平。它稳定，他以后每次做实验都会带着它；它整体，拆开就不是这个意思；它独立，能被他带去做化学实验、写作文、修自行车。

第六步：两周以后。

两周后的一个课间，姜慧敏没打招呼，在黑板上画了一架秋千，问：“大人和小孩各荡一次，谁荡一个来回快？”

这道题课本上没有，也没说过要考。大部分学生几乎没犹豫，说“差不多，看绳长，不看人重”。有个学生补了一句：“大人坐上去重心低一点，绳子等于长一点，可能还慢一点点。”他把“摆长要量到球心”那一条，自己带到了秋千上。

姜慧敏又去隔壁班问了同一道题。隔壁班上学期按讲义做过单摆实验，报告分数都不低。大多数学生答的是“大人重，荡得快”。

两个班学的是同一个公式，背得一样熟。不同的是，一个班的公式在学生身上长了根，一个班的公式只是挂在报告纸上。这两样，期末卷子上未必分得出来，一架秋千就分出来了。

把这节课从头到尾看一遍，能看出三个阶段。

开头，学生交上来的预测五花八门，铁球快、木球快、线短一半时间短一半，全班是一锅粥（混沌）。中间，对不上一个个冒出来，有人摊出线长和时间的次序，有人追摆长量到哪儿，几种想法互相顶着，谁也没完全说服谁，这是正在成形（介生）。最后，每个人写下“我现在知道的”，几句话站住了，可以带走，这是定型（秩序）。

这三段不是一条单向的梯子。定型下来的那几句话，下一次碰到更大的摆角、更精的秒表，还可能被重新搅开。

还可以从另一个角度看这节课。那个男生排出“一、四分之一、十六分之一对应一、二分之一、四分之一”，他摊开的是一个次序、一张连接的网，这是数学的样子，本书叫它“场”。

全班顺着“摆长量到哪儿”“摆角大了会怎样”一步步追下去，有方向、有快慢、有时卡住不动，这是逻辑的样子，本书叫它“波”。最后落在纸上的那一句“线长变成四倍，时间才变成两倍”，稳定、完整、能带走，这是符号的样子，本书叫它“粒子”。三种样子在一节课里来回转了好几次，没有谁在谁之上。

这颗珠子是用什么换来的？一次被橡皮擦了又没擦干净的 9.43，一周的不服气，一节课的追问，一个没有因为他交了“错误答案”就扣他分的老师。对不上、动能、场，三件都齐了。

◆ 七、实验课的真正用处

这节课还让姜慧敏想通了一件事：实验课的真正用处，不是验证课本。

课本上的结论，已经被几代科学家验过无数次，用不着一个初中生再验一次。一个初中生用秒表和卷尺测出来的 9.43，在科学共同体那里一钱不值。

可它在叶子航身上，值很多。

实验课的真正用处，是让学生在一个安全的地方，亲身经历一次科学结晶的全过程。先有一个理念（预测），推到现实面前（测量），对不上（9.43），追（找原因），修正理念（小角近似、摆长要算到球心）。最后，一个新的东西在自己身上站住。

这和科学家在实验室里做的事，是同一个形状，只是规模小得多。

本书把“照方抓药”式的实验课，和“先让学生卡住”的实验课，摆在一起对一下：

环节	照方抓药式实验课	先让学生卡住的实验课
开始前	先讲公式和预期结果	先让学生写下自己的预测并签名
实验步骤	印在纸上，一步不差照做	只给目标和器材，步骤由小组商量
结果与课本不符时	判为操作失误，重做或改数	判为一条缝，全班一起追原因
学生付的动能	接近零，手动身不动	追问、重测、比对、修正，每一步都在付
场的作用	评分标准，管住结果	托住追问，保护“错误答案”
留在学生身上的	一组凑出来的数，两个月后忘掉	一颗自我符号：碰到对不上先追，不抹平
对应的科学观	发现学：结论早就在那里，去够到它	发生学：结论要在你身上再结晶一次

这张表不是说照方抓药全无用处。学生第一次碰天平、第一次用量筒，确实需要一步步照着做，先把手练熟。那是在建立现实操作上的自我符号，也要付动能。问题出在：整个学期的实验课都停在这一步，学生从没经历过一次真正的对不上。

再回头看那三张整齐的 9.80。学生为什么会凑数？

不是因为他们不诚实，是因为他们身处的场，一直在奖励“对上”。实验报告按“结果与理论值的误差”评分，误差小，分数高；考试的实验题，答案只有一个；连中考的实验操作考试，也多半按步骤是否规范打勾。几年下来，学生身上长出一颗很结实的自我符号：实验的目的，是得到课本上的数。

这颗珠子也稳定、整体、独立，而且连接度极高。它的稳，是第 15 章说的锁化型稳定：没人再去检验而稳。和它相对的发生型稳定，是一次次被重新推到读数面前，一次次又站住了。

9.8 在科学共同体那里是发生型稳定的：每一台重力仪、每一次卫星测量，都在重新验它。可它到了学生手里，常常变成了锁化型稳定的：没人去验，只是照抄。同一个数，在两个场里，站得住的方式完全不同。

教育要做的，是把学生身上那颗“实验就是凑数”的锁化珠子熔开。熔开它，靠的不是讲一遍“要诚实”，靠的是让他亲眼看见：凑出来的 9.80 在昆明是错的，而老老实实测出的 9.43，追到底，离真相最近。

还有一处常被误会的地方：先让学生卡住，不等于让学生一直卡着。

卡住是起点，不是目的。卡住之后，场要接住他。姜慧敏那节课里，场在三个地方：同学之间互相比数据；她不急着给答案，却在学生追偏时提一句“你们量的摆长，是从哪儿量到哪儿”；最要紧的，是她让全班看见，交 9.43 的那个人没有被扣分，反而成了全班追问的中心。

没有场的卡住，是折磨。

本系列书二讲过信仰发生的三个入口，其中第三个是：没有外部的大矛盾，是人自己的力气耗尽了。这时候讲什么道理都听不进，要先被托住。

课堂上也一样。一个已经连续熬夜、对物理充满恐惧的学生，你再给他制造对不上，他只会更快地去抄答案。对这样的学生，先补能量：让他睡够，让他做一件一定能做成的小事，让他知道错了不会挨骂。落差要有力气接，才能做功。

◆ 八、放回日子里

把这一章放回你自己的日子里。

如果你是家长，你孩子做作业卡住的时候，你的第一个反应可能是：直接告诉他答案，或者打开手机搜一下。这很自然，你心疼他，也急着睡觉。

可你可以试一次别的做法：先问他，“你觉得应该是多少？”让他把自己的猜想说出来。然后问，“你怎么算的？”让他自己找到哪一步和答案对不上。最后，才是一起看正确的做法。

这样多花十分钟。可这十分钟，是他身上一颗新珠子的价钱。你替他付了，珠子就不长在他身上。

如果你是老师，你可以在下一次实验课前，问自己一个问题：这节课里，有没有一个地方，学生不知道会发生什么？如果没有，这节课就是照方抓药。你可以把预期结果藏起来，让学生先写预测；你可以留一个“故意不准”的条件，比如单摆的大摆角，让他们撞上去；你可以宣布：本节课谁的数据和课本不一样，谁就是今天的主角。

如果你是管考试、定评分的人，可以想一想评分在奖励什么。

实验报告如果只按“误差大小”给分，学生就会学会凑数。可以换一种给法：预测写得清楚，给分；数据与预测不符时，能指出可能原因并设计复测，给分；最后修正后的结果，再按误差给分。分数一换，场就换了。场一换，学生身上长出来的东西也会跟着换。

这不是要降低标准，是把标准放在真正值钱的地方。一个能老老实实交出 9.43、再追到 9.76 的学生，比一个交出 9.80 的学生，离科学近得多。

如果你是学生，你可以记住叶子航那一句：测得不对的时候，先别改数，先找是哪里不对。

还有一件事，在今天格外要紧。

现在的学生，手边几乎都有能一秒给出答案的 AI。一有困惑，立刻得到答案。这很方便，可它在一个地方下了重手：对不上还没形成，就被填平了。落差没起来，水就不会流。

本书第 17 章讲过，AI 进入科学之后，“对不上由谁提供、动能由谁支付”成了新问题；在课堂上，这个问题来得更早。那一章收在一句话上：生成可以免费，结晶从来不免费。

所以，AI 时代的科学教育，更要守住一个顺序：先卡住，再问。先让学生自己撞墙，写下预测，测出对不上，追一阵子；然后，再请 AI 来当那张托住他的网，帮他看清方向。顺序反过来，AI 给得越快，学生身上长出来的越少。

那张被橡皮擦了又没擦干净的纸，姜慧敏后来贴在了实验室的墙上。旁边是她用红笔写的一行字：

这里有一次真正的实验。

带 走 的 话

课本给你的是别人的结晶；只有自己卡住、自己追过，那颗结晶才会在你身上再长一次。

小　账

前人看见了困惑是学习的起点，却把困惑当成免费的心理推力；本书把它摊成一本账：对不上是落差，追问是动能，师生同学是场，三件齐了才结晶。

课本把 9.8 当成一个早就摆在那里、等学生去够的数，学生于是把实验做成“得到那个数”——发生被收回为发现，就在凑出 9.80 的那一下。

想 一 想

1. 你上学时，有没有哪一次实验或作业，你先写好了答案再倒着凑过程？那一次，你身上留下了什么？
2. 你身上有没有一个从小就站得很稳、后来才知道不对的想法（比如“重的东西落得快”）？它是被什么撞开的？
3. 下一次你的孩子或学生卡住时，你能不能忍住十分钟不给答案？你打算用这十分钟问他什么？

◆

21

第 21 章

中国科学的符号能量账

这一章的问题

闵悦那条和权威对不上的曲线，为什么在段承志的表格里找不到一栏可填？擅长追赶的人，怎样才长得出自己的原创？

◆ 一、一张填不进表格的曲线

合肥的十二月，科研院所的楼道里暖气烧得很足。

段承志五十岁，当了八年所长助理。年底是他最忙的时候：五年总结、绩效评估、下一轮项目申报，三件事挤在一起。他的电脑上开着一张表，一列列都是数字——论文数、高被引论文数、专利数、承担的国家项目数、经费总额。五年里，每一列都在往上走，有几列翻了一倍还多。

下午三点，年轻研究员闵悦敲门进来。她三十出头，博士毕业回国第三年，手里拿着一张打印出来的曲线图。

“段老师，有件事想问问您。”她把图放在桌上，“我们复做一篇国外很有名的工作，被引了一千多次的那篇。前面都对得上，可到了低温这一段，我们的曲线总是往下拐，跟他们的不一样。我们换了三批样品，校了两遍仪器，还是拐。”

段承志看了看图。那一段拐弯很清楚，不像是噪声。

“你想怎么办？”

“组里的意思是，先不管这一段，把对得上的部分写出来，跟着那篇做下去，好发。”闵悦停了一下，“可我总觉得，这一段拐弯，说不定比前面那些都要紧。”

段承志没有马上回答。他想起了二十多年前的自己。

那时候他刚进所，所里的大事，是把一台国外的设备“吃透”：拆开、画图、测参数、做出国产的那一台。那几年很苦，也很光荣。做出来的那一天，全组的人在实验室里吃了一顿盒饭，有人哭了。那是一个追赶的年代，他们最擅长的，是把别人已经站住的东西，搬过来，在自己手里再站住一次。

可是今天桌上这张图，不是要搬的东西。它是一个别人那里没有的拐弯。

他看了看电脑上那张表。表里有论文数、专利数、经费数，就是没有一栏，能填进“一条和权威对不上的曲线”。

这一章要讲的，就是这张表和这条曲线之间的距离。

◆ 二、追赶的本事是真本事

讲中国科学，先要把一段了不起的历史讲足。

1949 年的时候，全国从事科研的人员只有几百人，许多学科连一个完整的实验室都没有。七十多年后，中国在论文总量上居世界前列。它还在高铁、超级计算、空间站、大型射电望远镜等领域，建起了世界级的设施。这样的速度，放在世界科学史上也很少见。

这段历史里，有几件事值得一件件看。

两弹一星。 1964 年 10 月，中国第一颗原子弹爆炸成功；1967 年 6 月，第一颗氢弹爆炸成功；1970 年 4 月，第一颗人造卫星“东方红一号”上天。从原子弹到氢弹，中国用了两年零八个月，在当时几个核国家里间隔最短。

人工合成牛胰岛素。 1965 年，中国科学院生物化学研究所、有机化学研究所和北京大学化学系协作。他们在世界上首次用化学方法人工合成了具有完整生物活性的结晶牛胰岛素。

胰岛素的氨基酸顺序，是英国的桑格在 1955 年前后测定的；中国的团队在这个已知结构上，完成了从无到有的全合成。

这里要说公道：胰岛素的全合成并不只是照着做。结构是别人测的，可怎样把五十一个氨基酸一个个接起来、怎样让两条链正确地连在一起，当时世界上没人做成过。路线是中国团队自己一步步试出来的。迁移和原创，在一件事里常常是缠在一起的。本书分开讲，是为了看清账，不是为了给哪件成果贴标签。

高铁。 二十一世纪初，中国从几个国家引进高速列车技术，经过消化、吸收、再创新，十几年里建成了世界上规模最大的高速铁路网。

这几件事背后，还有一张很大的场。两弹一星靠的是举国协作：二十多个部委、一千多家单位，围着一个目标织成一张网。在一个底子薄的年代，把有限的人和钱拧成一股绳，朝一个已经知道做得成的方向使劲，这本身是一种很高明的组织本事。本书把它叫作势能：一张网把力气往同一处拉。

这几件事有一个共同的形状：**别人已经证明某件事可以做到，或者已经给出了关键的结构与原理；中国在自己的条件下，把它重新做出来，而且常常做得更快、更大、更便宜。**

本书把这种本事叫作**迁移别人的结晶**。

“结晶”是本书反复用的词，指一件事从晃荡不定变成站得住的那一下。一个科学结论站住了，有三条判据：稳定，能被反复验出；整体，拆开就不再是它；独立，能离开发生地，被带到别处去用。第三条最要紧：正因为结晶是独立的，它才能被迁移。

迁移别人的结晶，是一种真本事，而且是一种很有道理的本事。道理可以用一本能量账来讲。

本书说，任何一个符号的结晶都要付三样东西：**动能**，就是把旧的连接拆开、接成新的那份力气和速度；**势能**，就是周围那张关系网的吸引和拉扯，托着新东西往哪里长；**内能**，就是结晶之后建立起来的连接度，也就是要多大的力才能把它拆散。

一个原创的科学结论，最贵的部分在哪里？在找到那条对不上的缝。几十个方向里，只有一两个真有缝；一条缝要追十几年，才知道它通向哪里。这份找缝、追缝的动能，常常是一个人一生的力气（见第 16 章）。

迁移别人的结晶，恰恰把最贵的那一段省掉了。缝已经被别人找到，路已经被别人走通，结晶已经被别人确认。后来者知道“这件事做得成”，知道“大致朝哪个方向做”，剩下的是把它在自己手里重新做一遍。

这就像村里已经有人踩出了一条通往井的小路。后来的人不必在荒地里四处乱走，沿着那条路，很快就能走到井边。这不叫偷懒，叫聪明。

经济史家格申克龙在1962年的书里讲过“后发优势”〔转述〕：越是起步晚的国家，越能直接借用先行者已经成熟的技术和组织方式，跳过一些弯路，追得更快。他对在哪里？他看到了落后本身里藏着一种能量上的便宜：别人付过的学费，后来者可以不付。

日本是一个更早的例子。明治维新之后的几十年，日本的大学、实验室、教科书，大量从德国、英国、美国迁移过来。到了1935年，京都的汤川秀树提出介子理论，预言了一种当时没人见过的粒子；1949年，他成为第一个获得诺贝尔奖的日本人。迁移期和原创期之间，隔着大约半个世纪。

所以，追赶期擅长迁移别人的结晶，这不是一个缺点，是一个阶段，也是一笔算得过来的账。

◆ 三、迁移也要自己付力气

可是“迁移”两个字，容易被想得太轻。

一颗别人的结晶，搬到自己手里，并不会自动站住。它得在自己的土上，重新结晶一次。这一次结晶，也要付动能、靠势能、建立内能。

先看一件中国核武器研制史上常被讲起的事。

二十世纪五十年代末，中国的原子弹研制起步时，曾得到过苏联专家提供的一些数据。

其中有一个关键参数，中国的理论组用手摇计算机、算盘反复计算，算出来的结果总和苏联专家给的那个数对不上。他们算了一遍又一遍，前后算了九次，被后来人叫作“九次计算”。最后，理论物理学家周光召用一种物理上的论证，说明了苏联给出的那个数站不住，中国自己的计算是对的。

这件事里，有一条可以独立指认的缝：一个外来的数，和自己算出来的数，对不上。

如果迁移只是照抄，那个外来的数照用就是了。可正是因为迁移的那一方肯付力气，在自己手里把它再算一遍，才撞出了这条缝。也正是这条缝，逼出了一批中国自己的理论骨干。

这件事里还有一张场。理论组的年轻人敢于不信一位外国专家给的数，敢于一遍遍重算，是因为他们身后的那张网允许这样做。场要是只认“专家说的”，第二次计算对不上时，就会有人说“是我们算错了”，缝也就合上了。

这说明一件事：**认真的迁移，本身也会产出自己的对不上。**

高铁的“消化吸收”也是这样。引进来的车，在中国的线路上要跑几千公里，要过高寒、湿热、大风沙的地段。原厂设计里没想过的工况，一个个冒出来，跟设计手册对不上。工程师们追这些对不上，追出了一大批自己的技术。

段承志年轻时“吃透”那台国外设备，也是这样。图纸上的参数和实测对不上，材料国产化后性能对不上，这些对不上一条条被追下去，才有了那台国产设备。那几年的苦，就是这份动能。

拿一件家常事比一比。一个县城里开饭馆的人，看到省城一家网红店的招牌菜卖得火，把菜单、配方、装修整套学了回来。开张头三个月，生意很好，这是迁移的便宜：别人试过错了，他不用再试。

可到了第四个月，他发现本地的客人嫌那道菜太甜，常来的老顾客点得越来越少；本地买不到省城那种辣椒，换了一种，味道总差一点。这两件事，是省城那家店从没碰到过的对不上。他要么硬撑着照搬，要么自己一点点调：减糖，换配法，加一道本地人爱吃的配菜。

调了半年，那道菜成了他店里自己的东西，跟省城那家已经不太一样了。这半年的调整，就是迁移期的动能。没有它，搬来的东西在本地站不住。

所以，迁移期并不是没有对不上。它有，而且很多。

可迁移期的对不上，有一个特点：它们大多出现在**怎样把别人的结晶在自己这里做出来**这一层。问题的题目，是别人出的；终点在哪里，别人已经指出来了；自己的对不上，是在去往那个终点的路上碰到的坑和坎。

原创要的，是另一层的对不上。

◆ 四、原创缺的是自己的缝和场

先把前人的话说足，再说它停在哪里。

讲中国科学，绕不开一个老问题。英国学者李约瑟花了几十年，写成多卷本的《中国科学技术史》，一件件整理出中国古代在天文、数学、医药、工程上的成就。他由此问：既然中国古代有这么多发明，为什么近代科学没有在中国产生？后人把这叫作“李约瑟问题”。

李约瑟对在哪里？他用扎实的史料，把中国古代科技从“无”的偏见里救了出来。没有他，许多西方读者不会知道，印刷术、指南针、火药之外，中国还有那么多精细的观测和计算。

可是这个问题的问法，停在一个地方：它默认“近代科学”只有一条路，各个文明都在这条路上，只有走得远近之分。照这个问法，答案只能是“中国在某处停下了”。

本书不这样问。符号、逻辑、数学是三种形态，在不同的传统里有不同的协作方式，彼此往返，不是一架谁高谁低的梯子。本书要问的，是一个更具体、更能落到今天的问题：**一个原创的科学结晶，需要哪几样东西？今天这几样东西，各在什么地方？**

答案是两样：**自己的对不上，自己的场**。

第一样：自己的对不上。

原创的结晶，起于一条别人还没指出来的缝。这条缝从哪里来？从你自己的现实里来：你自己的病人、你自己的土地、你自己的仪器、你自己的数据。只有你站在那里，你才撞得上它。

闵悦那条往下拐的曲线，就是一条自己的缝。那篇国外文章里没有，因为他们的样品、他们的仪器、他们的测量范围，没把他们带到那一段去。

可是自己的缝，有一个天然的弱点：**它在别人的地图上找不到**。

一条跟着热点走的研究，题目是现成的，同行知道你在做什么，评审知道怎么评，论文知道往哪里投。一条从自己的缝里长出来的研究，开头几年往往说不清它通向哪里，跟谁都对不上号。

第二样：自己的场。

本书说的场，是托住一个新结晶的那张关系网：同行能不能看懂、评价体系认不认、经费给不给、失败了还有没有下一次机会。

迁移期的结晶，依靠的是**别人的场**。一个题目值不值得做，看国外顶尖刊物有没有在讨论；一项成果好不好，看它被国外同行引用了多少次。这样做在追赶期是有道理的：别人的场成熟、标准清楚，借来用，又快又准。

还有一层道理常被忽略：看国际刊物、看引用次数，能挡住人情。一个底子薄、熟人多的学术圈，如果全凭本地几位前辈说好就算好，很容易变成谁跟谁关系近谁就好。拿一把外面的尺子来量，至少人人都量同一把尺。这把尺子替许多年轻人挡住过不公平，这份功劳要记上。

可借来的场有一个限度：它只托得住它认得的东西。一条别人的地图上找不到的缝，在别人的场里是没有位置的。它不会被引用，因为还没人在做；它不像热点，因为它本来就不是热点。

这时候，如果本地也只有一张“借来的场”——评价只看论文数和被引次数，项目只投向已经被国外验证过的方向——那条缝就会被悄悄放下。不是谁不让做，是那张网里，没有地方托住它。

闵悦组里说“先不管这一段，跟着那篇做下去，好发”，说的正是这个。这不是谁目光短浅，是场在拉扯：往对得上的地方拉。

场还管着动能能不能付得出来。一个年轻研究员，聘期常常只有短短几年，到期要看论文、看项目。一条要追五年才可能有结果的缝，他在第一个聘期里付不起。不是他不肯付，是这张网没有给他付的时间。

自己的仪器，是自己的缝最常见的来路。

本书第 7 章讲过：仪器创造新的现实符号。望远镜让木星的卫星第一次成为可读的光点，显微镜让一滴水里的小东西第一次被看见。谁手里有一台别人没有的仪器，谁就最先站到一片别人没站过的现实面前，最先撞上那里的对不上。

迁移期，仪器大多是买来的。买来的仪器，测的是别人已经设计好要测的东西，看到的现实范围，跟别人看到的差不多。所以用买来的仪器，常常只能撞上别人已经撞过的缝。

这些年，中国自己建起了一批大科学装置。合肥就有全超导托卡马克、同步辐射光源等设施；贵州有口径五百米的射电望远镜（见第 16 章）。这些装置的意义，不只在规模大、花钱多，更在于它们把研究者带到了别人还没到过的读数面前。那里才有真正属于自己的对不上。

一台自己的仪器，是一条自己的缝的前提；有了缝，还得有场托住；场托住了，还得有人肯付那几年的动能。三样缺一样，原创都结晶不了。

本书把迁移的结晶和原创的结晶，摆在一起对一下：

账目	迁移别人的结晶	原创自己的结晶
对不上从哪里来	别人已经找到的缝；自己在“怎样做出来”一层撞上坑坎	自己现实里撞出的缝，别人的地图上还没有
场在哪里	借别人的场：国外刊物、国外同行的引用与认可	要有自己的场：能看懂、能容忍、能等的同行与制度
动能谁付、付多少	方向已知，动能集中在工程与组织，可以大兵团作战	方向未知，动能常要一个人或一个小组付很多年
风险	低：别人已经证明做得成	高：大多数缝追下去什么也没有
结晶后的内能	连接在别人的网上，稳定可靠	要自己织网，起初连接度低、易被忽视
适合的评价	数量、速度、规模、指标	能否独立指认那条缝、能否经得起复做与反驳
典型例子	牛胰岛素全合成（在已知结构上）、高铁消化吸收	本章第五节的青蒿素

还要补一句，免得“自己的场”被听歪。自己的场，不是关起门来自说自话。一条自己的缝追出来的结晶，最后还是要拿到全世界的实验室面前去复做、去反驳。青蒿素后来被世界卫生组织采纳、被国外同行反复验证，就是它进了世界的场。

自己的场，管的是“在别人还看不懂的那几年里，有没有人托住它”；世界的场，管的是“它最后站不站得住”。前一张网让结晶有机会发生，后一张网让结晶接受检验，两张都要。

这张表里，没有哪一列是“好”，哪一列是“坏”。迁移和原创是两种结晶，各有各的账。问题只在于：一个阶段的场，长成了只适合左边那一列的样子；等到右边那一列的需要来了，场还没换过来。

◆ 五、一碗不能煮开的药

现在讲一个完整的例子。它发生在中国，发生在一个最艰难的年代，它的每一步都是一次自己的对不上。

在讲它之前，先提一个同一时代的旁例，只说一段。

二十世纪六十年代，袁隆平在湖南安江农校开始研究杂交水稻。

当时的学界有一种流行的看法：水稻是自花授粉作物，杂交没有优势〔转述〕。可是他在稻田里撞见过长势特别好的天然杂交稻株，这跟那个说法对不上。

1970 年，他的助手李必湖等人在海南找到一株花粉败育的野生稻，后来被叫作“野败”；1973 年前后，三系配套成功。

这一段也是一条自己的缝：一个书上的结论，撞上了自己稻田里的植株。下面要细讲的青蒿素，是同一个形状，只是缝更深，账也记得更清楚。

第一条缝：氯喹不灵了。

二十世纪六十年代，东南亚战场上恶性疟疾流行，原有的特效药氯喹，效果越来越差——疟原虫产生了抗药性。这是一条清清楚楚的缝：理念上“氯喹能治疟疾”，现实里病人吃了不见好。

1967 年 5 月 23 日，一项全国协作的抗疟药研究任务启动，按日期代号叫“523 任务”。全国几十个单位、几百名研究人员陆续加入。这是一张很大的场：它把化学合成、中医药、药理、临床各路人马织在一起，朝同一条缝使劲。

1969 年初，中医研究院中药研究所的屠呦呦被任命为所里这个研究组的组长。她那年三十八岁，北京医学院药学系毕业，后来又系统学过中医。

第二条缝：青蒿忽灵忽不灵。

屠呦呦的组走的是从中医药古籍和民间方药里找线索的路。他们收集了两千多个方药，整理出六百四十个可能有效的。他们又从两百多种中药里做出三百八十多个提取物，一个个拿到感染了疟原虫的小鼠身上去试〔转述〕。

青蒿也在其中。它有一次表现不错，对小鼠疟原虫有明显的抑制；可再做，效果就掉下来，忽高忽低，重复不出来。

这是第二条缝，而且是一条很容易被放过的缝。几百个提取物里，大多数无效；一个忽灵忽不灵的，最省事的处理，是把它记成“不稳定”，划掉，去试下一个。

可这条缝里有一个具体的东西对不上：**同一味药，同一种病，为什么时灵时不灵？** 只要它灵过一次，就说明里面有东西；它不灵的那几次，问题可能出在提取的过程里。

第三条缝：古书说“绞取汁”，惯例是高温煎。

屠呦呦回过头去重读古籍。东晋葛洪的《肘后备急方》里，讲治寒热诸疟，有这样一句：

青蒿一握，以水二升渍，绞取汁，尽服之。

这一句里，有一个跟惯例对不上的地方。中药的常规做法，是煎煮：加水，上火，煮开，熬出药汁。这是千百年来中医药的手上习惯，也是当时实验室里提取的常规思路——用热水，或者用沸点较高的溶剂，加热提取。

可葛洪写的是“渍”和“绞”：用水浸泡，然后绞出汁来，喝下去。没有一个字说要煮。

这里要把缝说准。古书上这一句，是一个理念符号，一千六百多年前写下的；“中药要煎煮”是另一颗结晶，沉在几代中药人的手上，是一颗很结实的自我符号；实验室里青蒿时灵时不灵，是现实给出的读数。三样东西放在一起，对不上了。

从这条缝里，可以推出一个猜想：**青蒿里起作用的那个成分，也许怕热。** 高温一煮，它就被破坏了；偶尔一次温度没那么高，它留下来一些，于是“灵”了一次。

这个猜想，是被缝逼出来的。没有“时灵时不灵”，古书上那一句只是一句古话；没有古书上那一句，“时灵时不灵”只是一个不稳定的数据。两条缝撞在一起，才推出了一个能检验的方向。

第四步：换成低温，换成乙醚。

猜想有了，就要推到读数面前去对账。屠呦呦的组改用沸点只有三十多度的乙醚，在低温下提取青蒿。他们还摸索出：有效成分主要在叶子里，不在茎里；采收的时节也有讲究〔转述〕。

1971 年 10 月 4 日，编号为 191 的青蒿乙醚提取物，在小鼠身上对疟原虫的抑制率达到百分之百。这个编号后来常被讲起：前面一百九十个样品，都没有走到这一步。

他们又发现，乙醚提取物里有一部分酸性的东西，对抗疟没有帮助，还带着毒性；把它去掉，留下中性的那一部分，效果好，毒性也低了〔转述〕。

第五步：先在自己身上试。

动物实验成功了，要不要上人？当时，有人担心这种提取物对人有毒性。为了尽快进入临床，1972 年，屠呦呦和组里的几位同事，先在自己身上试服，确认没有明显的毒副作用。

这一步，本书要多停一下。

一个科学结论要结晶，除了要有缝、有场，还要有人付动能。这一份动能，在这里付得特别具体：是用自己的身体去换一个读数。这不是本书提倡的做法——今天的临床研究有严格的伦理规范，不允许这样做。可它让人看清，在那个条件下，一次结晶是用什么换来的。

第六步：海南的病人。

1972 年下半年，青蒿提取物在海南疟区用于临床观察，治疗了二十一名疟疾病人，其中既有间日疟，也有恶性疟，退热和清除疟原虫的效果都很好〔转述〕。

现实的读数，和实验室里的猜想，对上了。

第七步：一颗晶体，和一个不含氮的结构。

1972 年 11 月 8 日，屠呦呦的组从提取物中分离出了有效成分的单体结晶，后来命名为“青蒿素”。之后，在其他单位的协作下，青蒿素的化学结构被测定出来：它是一种带有过氧基团的倍半萜内酯。

这个结构本身，又是一次对不上。以往的抗疟药，从奎宁到氯喹，分子里都含有氮原子，药物化学界多少默认抗疟药“应该”含氮。青蒿素没有氮。它是一类全新的抗疟药，跟原有的整张药物网都对不上号。

这里还有一层不太为人注意的对不上。古籍里叫“青蒿”的那种草，按今天的植物分类，主要对应的是黄花蒿；而植物学上正式叫“青蒿”的那个种，青蒿素含量很低，蒿属里只有黄花蒿含量可观。

同一个名字，在古书里和在植物志里指的不是同一棵草。研究者要是只认植物志上的名字去采药，很可能采错。这条缝，也要靠在两种传统之间来回对账，才看得见。

再回到那个不含氮的结构。它也说明，青蒿素后来能对付抗氯喹的疟原虫，不是偶然：它本来就不在那张旧网里。

“青蒿素”这个名字，属于本书所说命名四种情形里的第二种。一个新的区分（这一颗有抗疟活性的结晶，不同于青蒿里其他成分）和一个新名字一起，帮助形成了一个可以辨认的单位。后来的结构测定，又让这个单位接上了化学的整张网。

第八步：场来得很晚，也来自很远。

在 523 任务里，青蒿素是集体协作的成果。除了屠呦呦的组，云南、山东的研究单位在 1973 年各自提出了有效成分的结晶，当时叫“黄蒿素”；后来又有单位合成出蒿甲醚、青蒿琥酯等衍生物，临床验证也由多家单位分头完成。屠呦呦的组在 1973 年还做出了双氢青蒿素。那个年代，成果多以集体名义、不署个人名字发表。

青蒿素类药物后来成为世界卫生组织推荐的一线抗疟药，挽救了大量生命。2011 年，屠呦呦获得美国拉斯克临床医学奖；2015 年，她与另外两位学者坎贝尔、大村智分享了诺贝尔生理学或医学奖。她在诺贝尔奖相关场合说过，青蒿素是“传统中医药送给世界的礼物”。

从 1971 年的 191 号样品，到 2015 年的诺贝尔奖，隔了四十四年。这四十四年，是一颗原创结晶等待一张足够大的场来接住它的时间。

◆ 六、这碗药里的能量账

把这个例子放回本章的问题里，算一算它的账。

它的对不上，是自己的。 氯喹失效这条缝是全世界共有的；可“青蒿时灵时不灵”和“古书说绞汁、惯例要煎煮”这两条缝，只有站在中医药古籍和中国实验室里的人，才撞得上。

一个只读国外最新文献的研究者，书架上没有《肘后备急方》；一个只按中药惯例熬药的人，手上不会怀疑“煮”。这条缝，是两种传统在一个人身上交叉才露出来的。

它的土，是两种传统交叉出来的。 屠呦呦先学现代药学，后来又系统学过中医。两张网在一个人身上缠在一起，成了她的土（特征纠缠）：现代药学让她会用溶剂、会做动物实验、会讲抑制率；中医让她会去翻《肘后备急方》、会把“渍”和“绞”当一回事。只有一张网的人，那句古话和那组数据，碰不到一起。

它的场，是自己织的。 523 任务是一张在特殊年代、为特殊目标临时织起来的大网。它不看论文数，不看被引次数，只看一件事：药灵不灵。正是这张网，容得下一个“忽灵忽不灵”的提取物被追下去，容得下一百九十次失败。

它的动能，付得很重。 一百九十个样品、几百次实验、自己身上的试服、远赴海南疟区。那几年的条件极差，实验室简陋，没有像样的通风设备，乙醚等溶剂对人体也有损害。据记载，组里有人因长期接触溶剂而患病，屠呦呦本人也曾因此损伤了肝脏。这份动能，是实打实地从人身上支出去的。

它的结晶，经得起反驳。 青蒿素不是一个“说得通”的故事，它是一颗可以复做、可以检验的晶体：任何实验室都可以提取它、测它的结构、在病人身上验它的效果。这颗结晶后来被全世界的实验室反复验过，站住了。

这里要守本书的一道闸：用“对不上”讲青蒿素，必须能事前指认出那条缝，不能看到成功了再倒回去说“那里一定有过缝”。这个例子经得起这道闸：氯喹失效、青蒿时灵时不灵、葛洪的“绞取汁”与高温煎煮，三条缝都能在当时的记录和古籍里独立找到。

它的结晶，也会面对新的熔点。 本书反复讲：稳定不等于终点。二十一世纪以来，东南亚湄公河一带陆续报告了疟原虫对青蒿素类药物反应变慢的现象。这是一条新的缝。

屠呦呦团队晚年也在研究应对的办法。青蒿素站住了，可它站得住的方式，是一直被重新推到病人和疟原虫面前去验，验出问题，再调整用法。这是第 15 章说的发生型稳定，跟没人再去检验的锁化型稳定不同。

本书也不把这个例子讲成一个“古人早就知道”的故事。葛洪并不知道青蒿素，不知道过氧基团，不知道疟原虫。他留下的是一句关于做法的话。

这句话在一千六百多年里，没有自己变成一颗晶体。它要等到一个具体的现代实验室，在一个具体的失败面前，和它撞上，才逼出了一个可以检验的猜想。古籍提供的是一条缝的一边，现代实验提供的是另一边，结晶发生在两边相撞的地方。

◆ 七、AI 进来之后，账还是这本账

最后说一说今天。

人工智能正在大规模进入科学研究：预测蛋白质结构、筛选药物分子、设计新材料、处理天文数据。中国在这个领域投入很大，进展也很快。

作者王德生另有一部著作《中国 AI for Science 的困境》〔待核〕。本书在这里只点到它的名字，不转述它的内容，只说本章与它相接的那一处。本章讲的两样东西——自己的对不上、自己的场——在 AI 时代不会变得不重要，只会变得更显眼。

本书自己的推理是这样的（见第 17 章）。

AI 擅长的，是在一张已经织好的大网里找连接：它读过的文献、它训练过的数据，越多越好。这张网本身，是巨大的势能。可它是一张由已有的结晶织成的网。它能帮你把别人的结晶迁移得更快、组合得更巧。

那么，原创要的那条缝，从哪里来？

还是从自己的现实里来：自己的样品、自己的测量、自己的失败、那条跟权威曲线对不上的拐弯。如果研究的题目来自别人的数据库，训练用的数据来自别人的

实验，评价的标准来自别人的榜单，那么 AI 只是让迁移变得更快，不会自动长出原创。

反过来，如果一个实验室有自己的仪器、自己的数据、自己的难题，AI 就能成为一张很好的网，托住这个实验室撞出的缝，帮它更快地追下去。

这里还有一层：AI 的输出，常常让一切都显得“对得上”。一条往下拐的曲线，交给模型去拟合，模型也许会给出一个平滑的解释，把那个拐弯说成噪声。对不上被提前填平了，缝就没有了。所以 AI 时代，更要有人守住那条缝，先别急着让它对上。

还可以换一个角度看。本书说，符号、逻辑、数学是信息的三种形态：符号像粒子，稳定、完整、能带走；逻辑像波，有轨迹、有快慢；数学像场，讲连接、次序、结构。AI 最强的，是在场里找连接、排次序。

可一颗新的科学结晶，最后要落成一个能被命名、被带走、被别人复做的东西——一颗新的粒子，比如“青蒿素”这三个字和它背后那颗晶体。从场到粒子，中间要有一段逻辑的波，一步步推，一步步验；这段波，起于一条缝。三种形态来回转，缺了那条缝，转不起来。

落到一个实验室的日常，可以有几条很朴素的做法。模型给出的预测和实测对不上时，先把那一条单独记下，不急着当噪声剔掉；训练数据里尽量放进自己实验室测出来的原始数据，包括失败的那些；

评价一个 AI 辅助的项目，除了看它预测得多准，也看它帮人找出了几条原来没注意到的缝。这些做法都不新，只是在 AI 让一切变得“太顺”的时候，更容易被忘掉。

所以，AI for Science 的账，本书只记一句：网可以借，也可以自己织得很大；缝，只能从自己的现实里撞出来。

◆ 八、放回日子里

回到合肥那间办公室。

那天下午，段承志看了很久闵悦那张图。最后他说：“这一段，别丢。”

“可是组里……”

“对得上的那部分，照样写，照样发，那是你们该拿的。”他把图推回去，“这一段拐弯，单独建一个文件夹，把三批样品、两次校准的原始数据全存好。明年所里的自主课题，你写个申请，就写这一段。”

闵悦愣了一下：“这一段，我还说不清它是什么。”

“说不清，才要申请。”段承志说，“说得清的，早就有人做了。”

她走后，段承志在那张五年总结表的最后，加了一栏。标题想了很久，最后写的是：“本所观测到的、与已有结论不符的现象（含未解释的）”。他知道，这一栏明年多半填不了几行，也算不进任何绩效。可他想让所里的人知道，这种东西是被看见的。

他也知道，这一栏里将来填进去的东西，大多数追下去会是空的：是样品的问题，是仪器的问题，是某个没想到的小误差。这没关系。青蒿那三百八十多个提取物里，也只有一个走到了最后。一个所的场好不好，不看这一栏里有几条最后成了大结果，看的是有没有人敢往里填。

这是一个很小的动作。可本书说的“自己的场”，就是由许多这样小的动作一点点织起来的。一栏表格、一个小额的自主课题、一个不因为“跟权威对不上”就把数据丢掉的组会、一个肯等五年的评审。

把这一章放回你自己的日子里。

你不一定在科研院所工作。也许你只是一个家长。

孩子放学回来，说老师讲“月亮自己不发光”，可他昨晚明明看见月亮“亮得刺眼”。

你可以说“老师说得对，别瞎想”，缝就合上了；你也可以说“你这个问题有意思，我们今晚一起看看月亮，再查查书”。后一种说法，就是在家里给他织一张小小的场：让他知道，跟课本对不上的地方，是可以被说出来、被追下去的。一个国家的原创能力，说到底，也是从千万个这样的小场里慢慢长出来的。

可你所在的地方——公司、医院、学校、工厂——多半也经历过一段“迁移别人结晶”的日子：学先进的管理办法、引进成熟的流程、照着行业标杆做。那段日子是值得的，它让你们少走了很多弯路。

可是你也许也碰到过闵悦那样的时刻：你自己的工作里，出现了一个跟“标准做法”对不上的现象。你可以把它当成误差，抹掉，跟着标杆走；也可以把它存起来，追一追。

追下去，大多数时候什么也没有。可偶尔，那里藏着一个只有你站的位置才看得见的东西。葛洪那句“绞取汁”，在书里躺了一千六百多年，等的就是一个肯在失败面前回头去读它的人。

带 走 的 话

迁移别人的结晶是追赶的真本事；原创还要两样：自己撞出的那条缝，和托得住它的自己的场。

小　账

后发优势的说法看见了迁移的便宜，却把原创当成迁移走到头自然会来的下一站；本书指出原创要另付一本账：自己的对不上、自己的场。

把青蒿素讲成“古人早已发现、今人把它找回来”，就是把一次发生收回为发现——那一下在“古书里早有答案”这句话上。

想 一 想

1. 你的工作里，有没有一套“照着标杆做”的做法？它替你省下了什么，又让你错过了什么？
2. 你最近一次碰到跟“标准答案”对不上的现象，是怎么处理的？抹掉了，还是存起来了？
3. 在你所在的单位，如果有人拿着一条“跟权威对不上”的数据来找你，你能给他什么样的场？

◆

22

第 22 章

它怎样才算错

这一章的问题

谭璐问，要是每个案例都找得到对不上，这个说法是不是怎么说都对？它肯在什么情况下认输？

◆ 一、学生举手问了一句

十一月初的厦门，晚上七点半，教学楼四楼只亮着两间教室。

潘一鸣三十八岁，在这所大学教科学哲学。这学期他开了一门选修课，叫“科学是怎样发生的”，选课的有三十来个人，一半是理科生。这天是最后一次课，他照例留了二十分钟提问。

第三排有人举手，是谭璐，化学系大三的学生，平时话不多，作业交得最认真。

她说：“潘老师，这学期您讲了十几个案例，每一个您都说，那里先有一次对不上。我想问，有没有哪一个科学发现，您会说‘这里没有对不上’？如果每一次都找得到，这个说法是不是就跟算命差不多，怎么说都对？”

教室里安静了几秒。有人笑了一下，又收住了。

潘一鸣没有马上答。他转身在白板上写了六个字：“它怎样才算错。”

他后来跟同事说，那天晚上他很高兴。一学期下来，终于有人问到了要害上。

这个问题，你在日子里其实天天碰到。天气预报说“明天可能下雨，也可能不下”，它永远不会错，可你也没法靠它决定带不带伞。一个算命先生说“你今年会遇到一点波折，也会遇到贵人”，几乎套在谁身上都成立，所以它什么也没告诉你。

一个说法要算数，先得说出它在什么情况下会输。

这一章，就是本书给谭璐的回答。

本书的全书判词是：“科学的力量不在于它找到了现成的真理，而在于它把‘对不上’变成了一种制度。”一本书要求科学把对不上制度化，自己却不肯说出在哪里会对不上，那它就把自己放在了科学之外。所以这一章不是谦虚的客套，它是这本书必须交的一份账。

先把几个工作词再讲一遍，方便跳着读到这里的你。

对不上：理念那一边稳下来的东西（一个假说、一套理论、一种预期），撞上现实那一边稳下来的东西（一个读数、一张底片、一道光斑），两边合不拢。本书叫前者理念符号，后者现实符号。

结晶：一个新说法在对不上之后沉下来，满足三条判据——稳定（换人、换地方重做，还是它）；整体（拆掉一块就不成立）；独立（能离开发生地，带去别处用）。这三条，本书叫三判据。

能量：结晶要付代价。要有人熬夜、做实验、造仪器，这是动能；要有共同体、期刊、实验室这张网托着，这是势能；结晶以后，要很大的力才能把它拆开，这份结实叫内能，也就是连接度。

有了这几个词，就可以老老实实地问：什么样的事实一旦被确证，这套说法就站不住？

◆ 二、前人早在问这一句

在科学哲学里，“一个理论怎样才算错”不是新问题。本书在这里先把几位前人的功劳写足。

最响亮的名字是波普尔。他把“能不能被推翻”放在科学与非科学的分界线上：一个说法若是任何观察都不可能与它冲突，它就不属于科学。这把尺子的位置，以及它停下的地方，第 19 章已经专门讲过，这里不再重复。本章要借的是另外两位前人。

第一位是迪昂。　这位法国物理学家在 1906 年出版了《物理理论的目的与结构》。他说了一件实验室里人人有体会、哲学家却常忽略的事：一个假说从来不会单独走到实验面前。它总是和一串东西一起上场——仪器怎么工作的理论、样品是

否纯净的假定、计算用的近似、读数时的习惯。读数对不上的时候，逻辑本身不会告诉你该怪哪一个。

你在厨房里也碰到过这种事。一锅汤咸了，是盐放多了？酱油本身就咸？还是火大了，汤收干了？光尝一口，分不出来。

迪昂对在哪里？他对在诚实。他把“一次实验推翻一个理论”那种干净的故事，换成了实验室的真实样子：推翻总是一整串东西一起受审。后人把这层意思和蒯因的论证并在一起，叫“迪昂—蒯因论题”。

迪昂停在哪里？他说，到底改哪一处，要靠科学家的“良知”或“明断”来定。这句话没错，可它把最要紧的一步交给了一个说不清的东西。什么时候该修补，什么时候该放弃，“良知”从哪里来？迪昂没有往下问。

第二位是拉卡托斯。 他在1970年前后发表的《证伪与科学研究纲领方法论》，把迪昂的难题往前推了一大步。他说，科学里互相竞争的不是一个个孤立的假说，是一个个“研究纲领”。每个纲领有一个硬核，大家默认不动；外面有一圈保护带，读数对不上时就去修补保护带。

关键在于怎样修补。拉卡托斯分了两种：一种修补，事后补上去，还顺带预言了一件新事，后来真被看到了，这叫进步的纲领；另一种修补，只是为了把刚刚出现的麻烦搪塞过去，什么新东西也不预言，这叫退化的纲领。

第5章讲过的两个案例，正好是这两种修补的样子：天王星轨道对不上，有人补上一颗未知行星，算出它在哪里，后来在那里看到了海王星；水星近日点对不上，有人照样补上一颗“祝融星”，却始终没人看到它（见第5章）。同一个动作，一个往前预言了新东西，一个只是在堵窟窿。

拉卡托斯对在哪里？他给“推翻”加上了时间。一个理论不是在某一天突然被一次实验判了死刑，它是在一长串修补中慢慢显出往前走还是往后退。

拉卡托斯停在哪里？他告诉你怎样给一个纲领打分，却不问一个新概念是怎样凝成的。仪器在他那里是背景，记号与单位不进入讨论，共同体只是打分的人。他还坦白承认，所谓进步与退化，往往只能事后判断。

把迪昂和拉卡托斯放在一起，本书从他们那里接过三条规矩：

第一，失败的条件要事先说出来，不能等事情发生了再说“其实我早就想到了”。

第二，一个说法遇到麻烦时可以修补，可修补必须往前预言，不能只往后解释。

第三，一套讲“科学怎样发生”的理论，自己也要拿到科学史面前去对账。它没有资格只做裁判，不做被告。

下面就把本书放上被告席。

◆ 三、三条能推倒本书的路

本书在导读里预告过的可推翻条件，是这样三句：

若重大科学概念的诞生找不到任何可事前指认的反常；若仪器与记号的革新与理论变化无关；若无共同体之场的结晶能长期稳定。

这三句分别打在本书的三根柱子上：实验与反常（第二编）、仪器与记号（第三、四编）、共同体（第五编）。任何一根被打断，本书相应的部分就要改写；三根都断，本书的主张就倒了。下面一条一条讲清楚，它们各自要找什么样的证据，又要防什么样的耍赖。

第一条：找不到可事前指认的反常。

本书说，一个重大科学概念，是在理念与现实对不上的地方凝出来的。这句话若是对的，那么翻开史料，在新概念站稳之前，应当能找到那条缝：某个读数合不上预言，某次实验做不出来，某种现象旧理论说不圆。

这里有三个词要咬住。

“重大”：不是随便一个术语，是进入了教科书、改变了计算、被后人反复使用的概念。氧、近日点进动的新解释、大陆漂移、X 射线、青霉素、基因，都算。

“事前”：这条缝必须在新概念出现之前就有记录，记录者那时还不知道新概念。实验记录本、带日期的书信、已经发表的“异常报告”，都可以作证。新概念成功之后，回头写的回忆录不能单独作证，因为回忆最会替成功补一条来路。

“指认”：要能具体说出是哪个读数、哪次失败、差了多少。笼统一句“当时的理论有一些困难”，不算。

本书愿意押下的赌注是：如果认真翻检档案之后，出现了几个确凿的重大概念，诞生之前什么缝都找不到，本书就要修改这一部分；如果这样的例子成批出现，本书关于“实验是有意制造的对不上”的整个第二编都要推倒重来。

有一类案例，是对这一条压力最大的，本书先把它摆出来：从数学里“算”出来的概念。

1928 年，狄拉克写出了描述电子的相对论方程。方程里冒出了一组负能量的解。1931 年前后，他提出，这些解可能对应一种带正电、质量与电子相同的新粒子。1932 年，安德森在云室照片里看到了它，后来叫正电子。

这像不像“纯从理念里长出来”的概念？看起来很像：先有方程，后有粒子。

可是往前查一步，缝是找得到的。狄拉克方程本身，就是从一处对不上里逼出来的。他 1928 年那篇论文的头一段就写明：当时的量子力学用到原子里的电子上，和实验对不上，观测到的定态数目是理论给出的两倍〔转述〕。已有的相对论性波动方程，他也在文中列出了它的毛病。

负能量的解出现之后，又撞上了另一处现实：电子并没有一个个掉进负能量的深坑里，物质是稳定的。正是这处“方程说该塌、世界偏不塌”的对不上，逼着狄拉克给负能量的解找一个说法。

所以本书对狄拉克的判读是：这不是第一条的反例，可它是一个难例。缝藏在理论与一个人人习以为常的现实（物质稳定）之间，不像斜面、试管那样摆在桌上。本书在做档案编码时，会把这类“数学先行”的案例单独计数。它们若越来越多，而且越查越找不到那条缝，第一条的压力就是实打实的。

第二条：仪器与记号的革新与理论变化无关。

本书第三、四编说，仪器把现实变成可读的符号，记号与单位把理念刻进现实，它们不是科学的外围工具，是科学发生的器官。

这句话若是对的，那么在科学史上，重大的仪器革新与记号革新，应当和理论的变化缠在一起。缠法有三种：要么新仪器带来新读数，新读数撞出对不上，逼出新理论（伽利略的望远镜，见第 7 章）；要么新理论要求新仪器，仪器造出来去对账（引力波探测，见第 9 章）；要么新记号让一类计算第一次变得可做，理论跟着走远（莱布尼茨的 dx，见第 10 章）。

推翻它要什么样的证据？要看到这样的局面成为常态：一种新仪器用了几十年，读数越来越多，理论纹丝不动，也没有因它产生任何新问题；反过来，理论发生了大换班，前后用的仪器、读数、记号却一模一样，没有任何一样新东西参与进来。

这里也要防一种误会。本书不主张每一件小发明都改变了理论。一把更好的镊子，一种更快的离心机，可以只是让活干得更顺。本书说的是“重大”的那些，和理论变化在时间上、在因果上缠在一起。

压力最大的案例，是哥白尼。1543 年《天体运行论》出版时，天文学家手里没有任何新仪器，用的还是肉眼观测和前人的星表。一次理论大换班，好像真的没有仪器参与。

本书的判读分两步。

第一步，哥白尼的方案在 1543 年还只是正在成形（介生），远没有结晶。它的预言精度并不比托勒密体系高多少（见第 18 章）。大多数天文学家拿它当计算工具，不当真实的宇宙图景。

第二步，它真正站稳，要等三件事。第谷用大型观测仪器，把星位精度提高了一个量级；开普勒用这些读数，算出了椭圆轨道；伽利略的望远镜，看到了金星有圆缺。也就是说，从提出到结晶，中间隔了将近七十年，这七十年里，仪器一样不少地进来了。

这个判读是可以争的。有人会说，哥白尼本身就是概念的诞生，不能把“结晶”往后推来躲开反例。这个反驳本书记下来，不搪塞。本书能做的，是把“提出”和“结晶”分开登记，两种算法都摆出来，让读者自己看哪一种更贴史料。

第三条：无共同体之场的结晶能长期稳定。

本书第五编说，科学共同体是托住结晶的场。一个科学事实能稳下来，要靠很多双手：别的实验室复做，期刊登出来，学生学会，教材写进去，下一代人拿它去做别的事。

这句话若是对的，那么一个只有一个人、一个实验室知道的结果，没有人复做，没有人引用，没有人教给下一代，它就不可能长期作为科学事实稳下来。它可以作为一篇论文躺在图书馆里，那是一份现实符号，一道纸上的痕；它却不会作为大家都能带走、都能接着用的事实活着。

孟德尔是一个常被提起的例子。他的豌豆杂交论文 1866 年发表，在三十多年里几乎没人接着做，1900 年前后才被几位植物学家各自重新找到。这三十多年里，论文一直在，那份结果却没有作为科学事实活过。本书把它读成第三条的正面例子：痕还在，场不在，结晶就没有发生。

可是这里有一个陷阱，本书必须先自己点破。

如果本书把“结晶”偷偷定义成“共同体接受了的东西”，那第三条就成了一句废话：没有共同体接受，当然就没有共同体接受。这样的条件永远推不倒，也就什么都没说。

所以本书把“场”和“稳定”分开来量。场，用能数出来的东西衡量：有几个彼此独立的研究组复做过，有多少引用，有没有进入教学，有没有经费与机构托着。稳定，用另一组东西衡量：这个结果在多长时间里被持续使用，重做时是否还是它，是否被带到别的问题上去了。

这样一来，第三条就成了一个可以去查的问题。在同样的时间跨度里，拿两类结果比一比：一类只有一个实验室做过，从没被独立复做；一类被多个组独立复做过。前一类是不是衰退得更快？如果两者一样长寿，甚至前者更长寿，第三条就倒了。第 15 章讲的复现危机，已经给这一条提供了一些材料（见第 15 章）。

还要补一句。第三条说的是“场托住结晶”，不是“场让结晶变对”。一个共同体可以把一个错的东西托得很稳，稳到很多年没人再去检验。这是第 15 章说的锁化型稳定，和一直被重新检验而稳的发生型稳定不同。稳定不等于对。谣言也很稳。先问站得稳不稳，再问方向对不对，这是两步，不能合成一步。

◆ 四、五条老账搬进实验室

本书是王德生“SDE 符号学系列”理论十卷中的一卷。系列的理论总本（书二）给出过五条可推翻条件和一道附闸，是整个系列共用的。科学这一卷，要把这五条搬进实验室，看它们在科学史上分别长什么样。

这五条原本是为一般的符号发生说的。到了科学里，每一条都要换成能去查的样子。下面这张表先给一个总览，后面逐条说几句。

系列条件	在科学上的样子	一块试金石	若被确证，要改哪里
一、纯理念的自生	一个科学概念诞生前后，查不到任何读数、实验或现象上的对不上	“数学先行”的概念，如正电子	改“理念符号由现实与自我的对不上逼出”这一条
二、吻合中的解释	一切读数都对得上、无人惊讶的平稳时期，照样频繁冒出新解释	统计新概念在平稳期与反常密集期的出现率	改“对得上就没有解释”
三、不成粒子的符号	一个科学术语定义每篇都变、拆开照样成立、离开原实验室就失效，却被反复认出、广泛流传	心理学里一度流行的“自我损耗”	改“符号是稳定·整体·独立的粒子”
四、无入口的转向	一位科学家改投新范式，三个入口都不在场	科学家的书信与日记	改转向的三入口说
五、零成本的结晶	一个科学事实不花实验、仪器、评审、复现之力就稳下来；或松动与连接度无关	失败复现的次数与引用网络的关系	改能量律
附闸	对不上不能在事前独立指认	实验记录本、预注册、原始数据存档	用本书方法得出的那条结论作废

第一条，纯理念的自生。 它和上一节的第一条可推翻条件是同一件事的两种说法，只是系列版本更宽：不限“重大”概念。

正电子是它在科学上的试金石，上一节已经说过。本书在这里只加一句：纯数学对象的生成，是另一个问题，系列别的卷会处理；本卷管的是物理世界里的概念。一个讲物理世界的概念，若只因为方程好看就站稳了，从头到尾没有撞过任何读数，那就算一个反例。

第二条，吻合中的解释。 本书说，对得上就没有解释。换到科学里，就是说：在一切读数都乖乖落在预言里的平稳时期，新概念应当很少；新概念应当扎堆出现在反常密集的时期。

你在单位里也见过这个样子。一套流程顺顺当当跑了三年，没有人会去发明一个新名词；出了一次大事故，第二周就冒出三个新说法。

这条可以拿数据去查。把一个学科几十年的文献按年份排开，一边标出反常报告的密度，一边标出新概念进入文献的时间。如果新概念的出现和反常的密度毫无关系，平稳期和动荡期一样多，“对得上就没有解释”就要改。

第三条，不成粒子的符号。 本书说，能被反复认出、跨处流传的符号，一定是稳定、整体、独立的。科学里有没有一个术语，三条都不满足，却到处流传？

“自我损耗”是一个值得拿来试的东西（见第 15 章）。这个说法讲的是，意志力像一块会被用掉的电池，用多了就会疲软。它一度被几百篇论文引用，进了畅销书。后来大规模的复现做不出原来的效应。

它是不是第三条的反例？本书的判读是：不是，可它是一面很好的镜子。作为一个说法，“自我损耗”的定义是稳定的，拆掉“有限资源”那一块它就不成立了，它也被带到了管理、教育、广告里去，三条都满足。不稳的是另一层：它和现实那一边的对账。这正好说明，满足三判据只说明一个符号站得住，不说明它对。一个结晶得很好的说法，可以在对账时一次次落空。

第四条，无入口的转向。 系列里，这一条原本讲的是信仰的诞生。科学当然不是宗教，本书不把两者混为一谈。可科学家个人身上，也有一种自我符号的大转向：一位一辈子用旧理论的人，改投了新理论。

系列给出的三个入口，搬到科学家身上是这样的：入口一，现实是硬的，旧理论碎了——读数一次次打在旧理论上，修补跟不上了；入口二，理论是硬的，现实塞不进去——旧理论不许出现的东西，偏偏在实验里出现了，一个人先拼命抵抗，后来不得不转身；入口三，一个人在旧路上的力气耗尽了——几十年修补不成，心力交瘁，换一条路反而能喘口气。

普朗克晚年留下过一个有名的说法。大意是：新的科学真理取胜，往往不是因为说服了反对者；而是因为反对者老去，新一代从小熟悉它〔转述，出自普朗克《科学自传》〕（见第 6 章）。这句话其实说的是，大多数人终身不转向；转向的人，身上总能看到这三个入口中的一个。

推翻它要什么？要在书信、日记、访谈里找到这样一个科学家。没有任何读数逼他，他手里的理论也没有撞上塞不进去的现实。他在旧路上干得好好的，力气充沛，却毫无来由地换了理论。这样的人若常见，三入口说在科学上就不成立。

第五条，零成本的结晶。 本书说，任何科学事实的结晶都要付能量：做实验、造仪器、写论文、过评审、等复现。一个事实不付这些就稳下来，能量律就错了。

这一条还给出一个可以量的东西。连接度既然是断裂的难度，就可以问：一个科学结论要遭遇多少次失败的复现，才会被放弃？本书预言，一个结论和别的结论连得越多，被引用越多，它所托着的东西越多，就要越多的反证才会松动。

第 16 章讲过的“超光速中微子”，是这个预言的一个样子（见第 16 章）。一次读数显示中微子跑得比光快，可是狭义相对论连着几乎整个现代物理，一次读数远远拆不动它。于是大家先去查仪器，最后查出来是光纤接头没有插好。这不是科学在护短，是连接度在起作用。

如果有一天测出来，结论的松动和它的连接度毫无关系——连得多的和连得少的，一样一推就倒，或者一样怎么推都不倒——能量律就得改。

这一条还有一个推论：疲惫的研究组（没有动能）、孤立的研究组（没有场）、毫无困惑的研究组（没有落差），新概念都会显著变少。这也可以去查。

附闸：对不上必须能在事前被独立指认。 这是本书要自己守住的那道闸。没有它，前面五条都会失效：每看到一个新概念，就回头说“那里一定有过对不上”，这套说法就成了算命先生的话。

科学比别的领域更有条件守这道闸，因为科学有一套留痕的制度。带日期的实验记录本，提交论文时的收稿日期，原始数据的公开存档，都是。现在还有越来越多的预注册：研究还没做，先把假说和分析方法登记下来。这些都是现实符号，是独立于事后回忆的痕。

可这道闸并不总是过得去。下一节的伦琴就是一个例子：他在遗嘱里要求，身后把大部分私人和科学通信销毁。本书在用他的案例时，只能依靠他自己发表的论文和同时代的记述，回忆录里的细节一律当作旁证。找不到痕的地方，就老实写“找不到”。

◆ 五、拿两次意外来试刀

上面的条件写得再细，也只是纸面上的。要看它们管不管用，得拿一个最可能打倒本书的案例来试。

最可能打倒本书的，是所谓“意外发现”。

意外发现的故事，在科普书里讲得最多，也最动人：没有人在找它，它自己冒了出来。如果一个重大概念可以这样毫无准备地冒出来，那第一条就危险了——它

好像没有事前的反常；第三条也危险——一个人在实验室里偶然撞见，好像不需要什么场。

科学史上最有名的两次意外，一次是 1895 年的 X 射线，一次是 1928 年的青霉素。下面把它们一一过一遍。

先看伦琴。

1895 年 11 月 8 日，维尔茨堡。伦琴在实验室里研究阴极射线，用的是当时物理学家常用的克鲁克斯—希托夫放电管。他用黑色硬纸板把放电管包得严严实实，通上电。房间另一头，一块涂了氰亚铂酸钡的荧光屏，微微亮了起来。

那块屏，本来是他准备下一步实验要用的。

缝在哪里？在这一下亮光里，而且可以说得很具体。按照当时对阴极射线的了解，它出不了玻璃管多远，在空气里只能走几厘米，更穿不透黑纸板。放电管被遮住了，屏幕在几步之外，按理应当一片漆黑。它却亮了。

这就是一次能独立指认的对不上：理念那一边是“阴极射线到不了那里”，现实那一边是“屏幕亮了”。

更有意思的是他起的名字。他把这种看不见的东西叫作“X 射线”，X 是数学里代表未知数的那个字母。这个名字本身，就是那条缝的记录：它承认，这是一个还没有被现有理论接住的东西。

照本书对命名的分法，“X 射线”这个名字属于第二种情形：新的区分与新名一起，帮着形成了一个可以辨认的单位。那个新区分，是一种能穿透纸板、不被磁铁偏转的辐射，从阴极射线里分了出来。它那时还不是一个理论对象：X 射线到底是粒子还是波，伦琴不知道。直到 1912 年，劳厄等人看到了 X 射线在晶体上的衍射，它的身份才在理论上落下来。

再看场。伦琴不是一个闯进实验室的门外汉。他身在阴极射线研究的热潮里，前面有克鲁克斯、希托夫、勒纳德一串人造管子、做实验。他用黑纸板遮住管子、在一旁备好荧光屏，都是这个研究圈子里现成的做法和工具。

再看能量。这一下亮光之后，他在实验室里关起门来，接连几个星期反复做：换不同的材料挡，换不同的距离放，拿照相底片去记。大约六个星期后，他拍下了妻子手骨的照片。1895 年 12 月 28 日，论文《论一种新的射线》发表。

接下来发生的事，正好是第三条的样子：几个星期之内，欧美许多实验室都复做出来了。X 射线从一个人的发现，变成了很多双手都能重复、都能带走的事实。这个场接得非常快，因为放电管和荧光屏在当时的物理实验室里到处都有。

现在拿一个对照来看，这个对照是让本书最受益的。

早在 1890 年，美国宾夕法尼亚大学的古德斯皮德和詹宁斯，在放电管附近放过照相底片。底片上留下了几块说不清来由的圆斑，是旁边的硬币留下的影子。他们没有当回事。直到 1896 年读到伦琴的论文，才回过头来意识到，自己六年前拍下的，就是一张 X 射线照片。他们也没有为此争过发现权。

同样的现实符号——底片上的一道痕——1890 年就在那里了。可是它没有成为一次对不上，因为那两个人手里没有一个和它撞得起来的预期。他们没有在等一块“不该亮”的屏幕，所以那几块圆斑只是“底片坏了”。

这个对照把本书的说法磨得更精确了：仪器里的一道痕，是现实自己沉下来的符号，可它单独存在时还不是对不上。对不上是两边已经稳下来的东西撞在一起。痕要撞上一个准备好的预期，才成为缝。

也正因为如此，本书不能把 1890 年的底片回头算作“事前的反常”。那会犯附闸禁止的毛病：拿后来的成功，给当年补一条缝。1890 年的诚实记录是：有痕，没有缝。

再看弗莱明。

1928 年 9 月 3 日，伦敦圣玛丽医院。弗莱明度完暑假回到实验室，看到一叠放在工作台上的培养皿。其中一个培养皿上长着葡萄球菌，也落进了一团青绿色的霉菌。霉菌周围一圈，葡萄球菌的菌落化开了，留出一片空白。

缝在哪里？同样可以说得很具体。一个被霉菌污染的培养皿，在细菌实验室里再平常不过，通常的预期是：霉菌长它的，细菌长它的，最多抢一点地盘，这个培养皿作废，扔掉。可是眼前的读数是：霉菌周围出现了一圈清楚的空白，细菌在那里被溶掉了。

这次对不上，有当时的痕可以作证。弗莱明给这个培养皿拍了照，取了霉菌样本去鉴定，又把培养物用福尔马林保存了下来。1929 年 5 月，他把结果投给了《英国实验病理学杂志》，第二个月就登了出来。这些痕都在新概念站稳之前留下，附闸过得去。

为什么偏偏是弗莱明停下来看了一眼？这里要讲他的场。

早在 1922 年，弗莱明就发表过另一项研究：他在人的鼻涕、眼泪里找到一种能溶解某些细菌的东西，叫溶菌酶。也就是说，“天然存在的、能让细菌化开的物质”这个预期，他已经在身上带了六七年了。别人看到一个污染的培养皿，看到的是“废了”；他看到的，是“又一个能溶菌的东西”。

巴斯德 1854 年在里尔有一句常被引用的话，大意是：在观察的领域里，机遇只偏爱有准备的头脑。这句话在本书的语言里可以说得更具体：机遇给每个人送来同样的痕，只有带着一个能和它撞上的预期的人，痕才成为缝。

他起的名字，也可以按命名的四种情形分一分。

1929 年 3 月 7 日，弗莱明决定把这种霉菌培养液叫作“青霉素”，免得每次都要说“霉菌培养液滤液”。这属于第二种情形：一个新的区分（这种滤液的抗菌活性）和一个新名一起形成辨认单位。它成为第四种情形里的理论对象——一个有确定分子结构的化合物——是十几年以后的事。1945 年前后，多萝西·霍奇金用 X 射线晶体衍射定出了它的结构。伦琴的那道亮光，在这里又回来帮了一次忙。

到这里，第一条和附闸都过了关。可是青霉素的故事，最要紧的部分在后面。

弗莱明没能把青霉素提纯出来。帮他做化学提取的两位年轻助手，克拉多克和里德利，工作没做完就离开了。弗莱明自己不是化学家，实际上放下了青霉素的化学研究。此后差不多十年，青霉素在他的实验室里主要被当作一种工具：在培养基里加一点，把不怕它的细菌筛出来。它没有成为一种药。

也就是说，从 1928 年的那一圈空白，到青霉素作为“能治病的药”结晶下来，中间断了十年。缝有了，准备好的头脑有了，可托住它的场不够——没有化学家、没有经费、没有能大量培养霉菌的设备；推它往前走的动能也不够——一个人、两个助手，耗不起。

转机在 1939 年。

牛津大学邓恩病理学院的弗洛里和钱恩，读到了弗莱明十年前那篇几乎没人注意的论文，用的霉菌，也正是弗莱明当年分送出去的那一株。他们有化学家、有团队、有后来争取到的经费，钱恩想出了冷冻干燥的办法，把青霉素做成了干粉。

1940 年，他们在《柳叶刀》上发表了小鼠实验的结果。随后战时的大规模生产，才把青霉素变成了药房里的东西。1945 年，弗莱明、弗洛里、钱恩三人共同获得诺贝尔生理学或医学奖。

还有一个后来的补充，让这次“意外”显得更意外了。

1964 年起，弗莱明的同事罗纳德·黑尔想重复那个培养皿，屡试屡败，到 1966 年 8 月才做出来。他发现，这个现象只在较低的温度下才容易出现：霉菌要先长起来，细菌要晚一步。他去查了 1928 年伦敦的天气记录：7 月底起有九天左右的凉天，之后才转暖〔待核：凉天的起止日期，各家记载有出入〕。弗莱明那个夏天的培养皿，恰好赶上了这样的天气。

这个补充非但没有削弱本书，反而帮本书说清了一件事。本书从来没有说对不上是计划好的。第 4 章说，实验是“有意”制造对不上；意外，是没有被计划的对不上。两者的区别在于来路，不在于结构：都是一个预期撞上了一个读数。天气偶然，痕偶然；缝能不能成为缝，结晶能不能结下来，却一点都不偶然。

把这两次意外排进一张表里，结果是这样的：

案例	事前可指认的缝	仪器与记号	场	能量	判定
古德斯皮德、詹宁斯，1890	无：底片有痕，手中无可撞的预期	放电管、照相底片	无相关预期的圈子	未投入	有痕无缝，未结晶
伦琴，1895	有：遮住的管子让远处荧光屏发亮	放电管、荧光屏、底片；新名“X”	阴极射线研究圈；数周内多地复做	数周闭门反复实验	缝、场、能俱全，迅速结晶
弗莱明，1928—1929	有：霉菌周围细菌溶开的空白圈	培养皿、照片；新名“青霉素”	溶菌酶研究的预期；缺化学与经费	一人加两名助手，后中断	缝在，结晶停在半路
弗莱明实验室，1929—1938	同上，无新缝	主要用作筛菌工具	场不足	动能不足	作为药物未结晶

案例	事前可指认的缝	仪器与记号	场	能量	判定
弗洛里、钱恩，1939—1940	接过旧缝，加上提纯难题	冷冻干燥、动物实验	团队、经费、期刊、战时需要	大团队持续投入	作为药物结晶

所以，两次最有名的意外发现，都不是本书的反例。不但不是反例，它们还把本书的说法磨出了两处更精确的地方：

第一，一道痕要成为对不上，得撞上一个准备好的预期。仪器能造出新的痕，造不出缝。

第二，从缝到结晶，中间可能隔着十年。缝在，场和能量不在，结晶就停在半路。

这里还要说一句本书对自己不利的话。本章挑出来试的，是两个后来成功了的意外。

真正公平的检验，还应该去找那些没有通向任何地方的意外：多少个培养皿上出现过类似的空白圈，被人扔掉了？有记录的不多。1897 年，法国一位军医学生迪歇纳就在博士论文里记下过青霉菌抑制细菌的现象，可是没有人接下去。只看成功者，会犯幸存者的毛病。本书把这件事列进下面的预测里，不在这里假装已经做完。

◆ 六、本书押下的五个预测

一套理论光说“什么情况下会错”还不够，还要主动说出：如果它对，人们去查的时候会看到什么。下面五条是本书押下的预测。它们都还没有被系统地查过，本书不编造结果，只把怎么查说清楚。

预测一：档案里的缝。 从各学科的教科书里随机抽一批重大概念，请两组科学史研究者分别去翻原始档案。一组只管找“新概念出现前有没有带日期的异常记录”，事先不告诉他们本书的主张。

本书预言：绝大多数概念能找到；找不到的那一小部分，会集中在“数学先行”一类，而且会随着档案翻得更细而减少。如果找不到的比例很高，或者翻得越细找不到的越多，第一条可推翻条件就生效。

预测二：器与论缠在一起。 把一个学科的重大仪器革新、记号革新与理论变化，按时间排在同一条线上。本书预言：它们会扎堆，前后相隔有限；理论大换班前后，几乎总能找到一样新仪器、新记号或新单位参与进来。如果两条线各走各的，第二条可推翻条件就生效。

预测三：单场的结果衰退得快。 拿同一时期发表的结果，分成“只有原实验室做过”和“有多个独立组复做过”两类，跟踪二十年。本书预言：前一类被放弃、被修正、被遗忘的比例明显更高。如果两类一样长寿，第三条可推翻条件就生效。

预测四：意外偏爱有准备的人。 收集一批有记录的“意外发现”，包括成功的，也包括像 1890 年底片那样没有下文的。本书预言：最后结晶的那些，发现者在相邻问题上已经干了多年；同样的痕落在没有相关预期的人手里，大多没有下文。如果意外的结晶与发现者先前的准备毫无关系，本书关于“痕要撞上预期才成为缝”的说法就要改。

预测五：连接度与松动。 用引用网络和“有多少别的结果建立在它上面”来量一个结论的连接度，再统计它被放弃之前遭遇了多少次失败的复现。本书预言：连接度越高，需要的反证越多。同时，疲惫、孤立、没有困惑的研究组，产出的新概念会显著少于有动能、有场、有困惑的研究组。如果这两样都看不到，能量律就要改。

做这些事的人，不必是本书的作者。科学史研究者、科学计量学者、各学科里愿意翻自己领域旧账的人，都可以做。

最后，为了不让这些条件被误用，本书把“什么算推翻”和“什么不算推翻”并排写出来：

本书的说法	会被这样的证据推翻	不会被这样的证据推翻
重大概念诞生于可事前指认的反常	成批的概念，档案翻尽也找不到事前的缝	某个概念后来被证明是错的
仪器与记号是科学发生的器官	重大仪器、记号革新与理论变化长期各走各的	某件小发明没有改变任何理论

本书的说法	会被这样的证据推翻	不会被这样的证据推翻
共同体是托住结晶的场	无人复做、无人引用的结果和多组复做的一样长寿	一个共同体把错的东西托稳了很多年
结晶要付能量	结论的松动与连接度毫无关系	某个结论花了巨大代价，后来还是被推翻了
意外也起于对不上	结晶的意外与发现者先前的准备毫无关系	一次意外的天气条件是偶然的
对不上须事前可指认	本书的案例只能靠事后回忆才找得到缝	某个案例的档案缺失，本书写了“找不到”

右边一栏要多看一眼。本书从来没有说，结晶下来的东西就是对的。一个事实结晶了，后来被推翻了，这正是本书说的“熔开再结晶”，不是本书的失败。本书说的是发生的样子，不是保证每一次发生都对。

◆ 七、放回日子里

回到那间教室。

潘一鸣那天晚上没有给谭璐一个现成的答案。他给全班留了最后一个作业，期末交：

从科学史上任选一个你感兴趣的概念，去图书馆、去数据库里找原始材料，找出它诞生之前的那条缝——哪个读数、哪次失败、哪里差了多少。要有日期，要有出处。如果找了很久还是找不到，就写“找不到”，并写清楚你翻过哪些材料。

他补了一句：“交‘找不到’的，如果材料翻得够细，我给高分。那是这门课最有用的作业。”

谭璐选了一个她自己学过的东西：苯环。她说，课本里讲凯库勒梦见一条蛇咬住了自己的尾巴。她一直觉得这个故事太顺了，它的真假史学界本来就有争议，她想看看梦之前到底有没有缝。

一个月后她交上来的作业，结论写得很克制：梦的故事来自凯库勒 1890 年的一次演讲，离他 1865 年提出环状结构已经二十五年，不能单独作证；可在他提出环状结构之前，苯的分子式和它那些当时理论解释不了的化学性质之间合不拢，在当时的文献里是有记录的。她最后写道：“缝找到了，梦找不到。”

潘一鸣在评语里写了一行字：“你替这门课做了它最该做的一件事。”

这件事，你在自己的日子里也可以做。

你心里一定有几个笃定的看法：某种饮食对身体好，某个孩子就是不爱学习，某种投资稳赚不赔，某个同事靠不住。挑一个出来，拿一张纸，写下一句话：如果看到了什么，我就放下这个看法。

写得出来，说明这个看法还活着，还在跟世界对账。写不出来，或者写出来的条件永远不会发生，那它就可能已经从一个结晶，变成了一块供在那里的石头。

科学把对不上做成了一种制度。一个普通人也可以给自己留一个小小的制度：在每一个笃定的看法旁边，留一行“它怎样才算错”。

带 走 的 话

一个说法要算数，先得说出它在什么情况下会输；连意外发现，也要先找到那条事前的缝。

小　账

迪昂与拉卡托斯关上的门，是只给理论打分、不问概念怎样凝成；本书打开的，是把仪器、记号、共同体一并放上被告席。

发生被收回为发现的那一下，在“意外”二字：仿佛真相自己撞了进来，忘了那道痕要撞上准备好的预期，还要十年的场与能量才结得下来。

想 一 想

1. 你最笃定的一个看法是什么？你能写出一个“看到它我就放下”的具体条件吗？
2. 你经历过的一次“意外收获”，事后回头看，你身上是不是早就带着一个和它撞得上的预期？
3. 你有没有过一个想法，起头很好，却因为身边没人接、自己没力气推，停在半路好几年？

◆

结语

每一个公式都是一道被刻进世界的痕

又是一个夜里。

林晓雯在长沙的家里，把那支电子体温计从抽屉里拿出来，擦了擦，放回原处。额温枪还躺在旁边。朵朵早就退了烧，这会儿睡得很沉，一只脚伸在被子外面。陈屹在客厅收拾白天没洗完的碗。

这本书是从那支体温计开始的。那天夜里，女儿额头发烫，陈屹的额温枪先说了 37.4。她把电子体温计夹进孩子腋下，一分多钟后“嘀嘀嘀”，屏幕上跳出 38.6。两个数摆在灯下，差了一度多。

本书在前言里问过两句：到底哪个是真的？那个 38.6，是谁的符号？

走完二十二章，可以回答得完整一点了。

屏幕上停住的那个数，是现实自己沉下来的痕。感温元件被体热改变了电阻，读数停在一个位置，不需要任何人去解释，它就立在那里。额温枪的 37.4 也是这样立住的，只是它够到的是额头皮肤的热，孩子打寒战、皮肤血管收紧的时候，就偏低。两个读数都是真的痕，回答的不是同一个问题。

她读出那个数字，说出“发烧了”，这是理念那一边的事。“体温”“摄氏度”“正常值”，这些都不是感温元件自己长出来的。它们背后，是华伦海特、摄尔修斯那一代人的温标之争，是一代代医生把千百次测量整理成的“正常范围”，是一套把冷热刻进数字的约定（见第 8 章）。

还有第三样东西。她手一摸孩子额头，就知道“不对”。那是做了五年母亲、做了十来年药剂师，身上沉下来的东西，比两台仪器都快一步。这是一个自我符号。

那天夜里，三样东西在一块小小的屏幕上相会了。

本书说的“科学”，就是让这三样东西反复对账的一套办法。

手的感觉说“烫”，额温枪说 37.4，腋下说 38.6，书上说“正常是多少”。几样对得上，人就踏实，什么也不用想。那天夜里偏偏对不上，林晓雯才开始问：是额温枪坏了，是量的位置不对，还是这次的病不一样？她没有扔掉哪一个数，想通了额温为什么偏低，四点四十又量了一遍：腋下 37.5，额温 37.3，两个数挨近了。那一度多的差，是在一次次重量里被收住的。

科学也是这样走过来的，只是把这一问做成了一种制度。

实验，是有意把一个想法推到读数面前，让它有机会对不上（第二编）。

仪器，是把看不见、摸不着的东西变成可读的痕：望远镜里的卫星，温度计里的那个读数，探测器里的一道闪光（第三编）。

记号与单位，是把想法刻进现实：一个等号，一个公式，一根米尺，一个用自然常数定下来的千克（第四编）。共同体，是托住这些痕的网：期刊、评审、复现、学派（第五编）。这一切都要付能量（第六编）。忘了它们是怎么来的，就会把它们供起来（第七编）。

所以，书名里的“被刻进世界的公式”，说的不是一个比喻。

一个公式，最初是某一次对不上逼出来的。它在一个人的草稿纸上成形，在一群人的争论里站稳，被写进教科书，被造进仪器，被做成桥梁、卫星和药片。到了这一步，它已经不只在人的脑子里。它刻在了钢筋的截面上，刻在了导航卫星的时钟修正里，刻在了一片退烧药的剂量里。

这就是本书说的回写：一个理念上结晶出来的东西，反过来改写了现实的样子。

林晓雯自己就天天站在这样的痕旁边。她在社区医院的药房里配药，药盒上印着“按体重每公斤多少毫克”，说明书上写着“每次间隔不少于几小时”。这些数字背后，是一次次临床试验、一回回不良反应的报告、一版版修订的指南。每一个数字，都是某一次对不上被收住以后留下来的。

她给病人发药时，那些数字已经不需要她再去推导。它们稳定、整体、能带走，从实验室一路走到了长沙一个社区药房的柜台上。可她也知道，说明书隔几年就会改一次，有的剂量调了，有的禁忌加了。数字站得稳，不等于它不会再动。

那支体温计本身，也是一道痕。几百年前，冷和热只是手上的感觉，每个人说的“烫”都不一样。后来有人把液体封进玻璃管，有人在管上刻下刻度，有人争论零度该定在哪里，一百度又该定在哪里。今天她手里那支几十块钱、一分钟出结果的电子体温计，是那根玻璃管的后代，装着好几代人的对不上与争吵。林晓雯那天夜里不需要知道这些，它就在她手里稳稳地工作。

每一个公式，都是一道这样的痕。

痕是实的。踩出来的小路能走人，刻进现实的公式能造桥、能治病、能把人送上天。本书从来不说科学是“随便怎么说都行”。结晶有三条判据：稳定、整体、独立。科学事实是经过千百次对账、付了巨大代价才站住的东西，它值得尊重。

痕也不是终点。河道会改，小路会荒，公式也会在新的对不上面前熔开，再结晶一次。牛顿的公式没有被丢掉，它在新的框架里找到了更准确的位置。科学的可贵，不在于它的每一道痕都永远不变，而在于它肯让自己的痕被重新检验。

本书对自己也是这样要求的。第 22 章写下了它在什么情况下会错。三条是：若重大科学概念的诞生找不到任何可事前指认的反常，若仪器与记号的革新与理论变化无关，若无共同体之场的结晶能长期稳定。这本书本身，也只是一道等着被重新检验的痕。

全书的判词，到这里可以再念一遍：科学的力量不在于它找到了现成的真理，而在于它把“对不上”变成了一种制度。

林晓雯不是科学家。可是那天夜里，她做的事和科学家没有两样：她不只信自己的手，也不只信那个数字，她让两样东西互相对一对。对得上，她就照着做；对不上，她就再量一次，或者带孩子去医院。

这份不肯只信一边的习惯，就是科学留给普通人最好的东西。

它不要求你懂麦克斯韦方程组，也不要求你去过大科学装置。它只要求一件小事：当手上的感觉和纸上的数字合不拢时，别急着把其中一样扔掉。先让它们对一对，再看是谁该改。

下一次你拿起一支体温计、一张化验单、一个手机里跳出来的数字，可以停一秒想一想：这道痕是怎么被刻下来的？它和你身上的感觉对得上吗？对不上的时候，你愿意多问一句吗？

那一问，就是科学在你身上又发生了一次。

◆

参考书目

本书目只列正文点到的著作、论文与报告，每条写作者（外文原名）、中文书名或篇名（原文书名或篇名）、初版年份。收录的标准有两条：正文点出了书名或篇名；或者正文虽未点出篇名，却写明了作者、年份或刊物，能指认是哪一篇论文、哪一份报告。正文只提到某人、没有讲到他的哪一部作品的，不列。中文书名与年份一律照正文；拿不准的年份、原名标〔待核〕。

期刊名、法律与条约、历法名，以及宗教经典与《论语》等通行典籍的章句引用，也不单列。外文著作的中译本信息，本书未逐一核对，故不列出；如需引用中译本，请以各出版社版本为准。

全目分四组：一是经典与原著，二是科学史与科学哲学，三是科学研究论文、报告与科普著作，四是本系列与作者著作。各组内大致按初版年份排列。

一、经典与原著

- 亚里士多德（Aristotle）：《工具论》（Organon），公元前 4 世纪著，后人编集。
- 欧几里得（Euclid）：《几何原本》（Elements），约公元前 300 年；利玛窦（Matteo Ricci）、徐光启译前六卷，1607。
- 徐光启：《刻几何原本序》，1607。
- 《周髀算经》，约公元前 1 世纪成书〔待核〕。
- 《九章算术》，约公元 1 世纪成书〔待核〕。
- 托勒密（Claudius Ptolemy）：《至大论》（Almagest），公元 2 世纪。
- 婆罗摩笈多（Brahmagupta）：《婆罗摩历算书》（Brāhmasphuṭasiddhānta），628。
- 葛洪：《肘后备急方》，东晋（4 世纪）。
- 斐波那契（Leonardo Fibonacci）：《计算之书》（Liber Abaci），1202。

- 哥白尼（Nicolaus Copernicus）：《天体运行论》（De revolutionibus orbium coelestium），1543。
- 雷科德（Robert Recorde）：《砺智石》（The Whetstone of Witte），1557。
- 培根（Francis Bacon）：《学术的进展》（The Advancement of Learning），1605。
- 开普勒（Johannes Kepler）：《新天文学》（Astronomia nova），1609。
- 伽利略（Galileo Galilei）：《星际信使》（Sidereus Nuncius），1610。
- 开普勒：《屈光学》（Dioptrice），1611。
- 培根：《新工具》（Novum Organum），1620。
- 伽利略：《试金者》（Il Saggiatore），1623。
- 伽利略：《关于两门新科学的对话》（Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze），1638。
- 夸美纽斯（Johann Amos Comenius）：《大教学论》（Didactica Magna），拉丁文本 1657。
- 胡克（Robert Hooke）：《显微图谱》（Micrographia），1665。
- 莱布尼茨（G. W. Leibniz）：《一种求极大极小和切线的新方法》（Nova Methodus pro Maximis et Minimis），刊于《学者纪事》，1684。
- 牛顿（Isaac Newton）：《自然哲学的数学原理》（Philosophiae Naturalis Principia Mathematica），1687。
- 洛克（John Locke）：《人类理解论》（An Essay Concerning Human Understanding），1690。
- 英国皇家学会委员会：《通信集》（Commercium Epistolicum），1712 年作出报告，1713 年初印行。
- 贝克莱（George Berkeley）：《分析学家》（The Analyst），1734。
- 柯万（Richard Kirwan）：《论燃素》（An Essay on Phlogiston），1787；拉瓦锡等人的法译附驳本，1788。

· 拉瓦锡、居顿·德·莫尔沃、贝托莱、富克鲁瓦（Antoine Lavoisier, Louis-Bernard Guyton de Morveau, Claude-Louis Berthollet, Antoine-François Fourcroy）：《化学命名法》（Méthode de nomenclature chimique），1787。
· 拉瓦锡：《化学基础论》（Traité élémentaire de chimie），1789。
· 拉普拉斯（Pierre-Simon Laplace）：《天体力学》（Traité de mécanique céleste），1799—1825，共五卷。
· 拉普拉斯：《概率的哲学随笔》（Essai philosophique sur les probabilités），1814。
· 麦克斯韦（James Clerk Maxwell）：《论物理力线》（On Physical Lines of Force），1861—1862。
· 麦克斯韦：《电磁场的动力学理论》（A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field），1864 年宣读，1865 年发表。
· 麦克斯韦：《电磁通论》（A Treatise on Electricity and Magnetism），1873。
· 弗雷格（Gottlob Frege）：《概念文字》（Begriffsschrift），1879。
· 伦琴（Wilhelm Conrad Röntgen）：《论一种新的射线》（Ueber eine neue Art von Strahlen），1895。
· 爱因斯坦（Albert Einstein）：《论动体的电动力学》（Zur Elektrodynamik bewegter Körper），1905。
· 爱因斯坦：《物体的惯性同它所含的能量有关吗？》（Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?），1905。
· 杜威（John Dewey）：《我们如何思维》（How We Think），1910。
· 怀特海、罗素（Alfred North Whitehead, Bertrand Russell）：《数学原理》（Principia Mathematica），1910—1913。
· 怀特海：《数学导论》（An Introduction to Mathematics），1911。
· 魏格纳（Alfred Wegener）：《海陆的起源》（Die Entstehung der Kontinente und Ozeane），1915。

二、科学史与科学哲学

- 孔德（Auguste Comte）：《实证哲学教程》（Cours de philosophie positive），1830—1842。
- 庞加莱（Henri Poincaré）：《科学与假设》（La Science et l'hypothèse），1902。
- 迪昂（Pierre Duhem）：《物理理论的目的与结构》（La théorie physique, son objet et sa structure），1906。
- 迪昂：《拯救现象》（ΣΩZEIN TA ΦAINOMENA: Essai sur la notion de théorie physique de Platon à Galilée），1908。
- 卡约里（Florian Cajori）：《数学记号史》（A History of Mathematical Notations），1928—1929，共两卷。
- 波普尔（Karl Popper）：《研究的逻辑》（Logik der Forschung），1934（版权页标1935）；英文增订本《科学发现的逻辑》（The Logic of Scientific Discovery），1959。
- 弗莱克（Ludwik Fleck）：《一个科学事实的起源与发展》（Entstehung und Entwicklung einer wissenschaftlichen Tatsache），1935。
- 艾耶尔（A. J. Ayer）：《语言、真理与逻辑》（Language, Truth and Logic），1936。
- 哈耶克（F. A. Hayek）：《科学主义与社会研究》（Scientism and the Study of Society），1942—1944。
- 波普尔：《开放社会及其敌人》（The Open Society and Its Enemies），1945。
- 普朗克（Max Planck）：《科学自传》（Wissenschaftliche Selbstbiographie），1948。
- 维特根斯坦（Ludwig Wittgenstein）：《哲学研究》（Philosophische Untersuchungen），1953。
- 科伊雷（Alexandre Koyré）：《一个测量实验》（An Experiment in Measurement），1953。

· 李约瑟（Joseph Needham）等：《中国科学技术史》（Science and Civilisation in China），1954 年起陆续出版。
· 汉森（Norwood Russell Hanson）：《发现的模式》（Patterns of Discovery），1958。
· 库恩（Thomas S. Kuhn）：《科学革命的结构》（The Structure of Scientific Revolutions），1962。
· 格申克龙（Alexander Gerschenkron）：《经济落后的历史透视》（Economic Backwardness in Historical Perspective），1962。
· 普赖斯（Derek J. de Solla Price）：《小科学，大科学》（Little Science, Big Science），1963。
· 波普尔：《猜想与反驳》（Conjectures and Refutations），1963。
· 谢弗勒（Israel Scheffler）：《科学与主观性》（Science and Subjectivity），1967。
· 拉卡托斯（Imre Lakatos）：《证伪与科学研究纲领方法论》（Falsification and the Methodology of Scientific Research Programmes），1970。
· 波普尔：《客观知识》（Objective Knowledge），1972。
· 哈金（Ian Hacking）：《表征与干预》（Representing and Intervening），1983。
· 夏平、谢弗（Steven Shapin, Simon Schaffer）：《利维坦与空气泵》（Leviathan and the Air-Pump），1985。
· 伽里森（Peter Galison）：《图像与逻辑》（Image and Logic），1997。
· 奥尔德（Ken Alder）：《万物之尺》（The Measure of All Things），2002。
· 张夏硕（Hasok Chang）：《发明温度：测量与科学进步》（Inventing Temperature: Measurement and Scientific Progress），2004。

三、科学研究论文、报告与科普著作

- 孟德尔（Gregor Mendel）：《植物杂交实验》（Versuche über Pflanzen-Hybriden），1866。
- 皮尔斯（Charles S. Peirce）：《关于研究经济理论的札记》（Note on the Theory of the Economy of Research），随美国海岸测量局年度报告刊出，1879。
- 狄拉克（P. A. M. Dirac）：《电子的量子理论》（The Quantum Theory of the Electron），《皇家学会会刊 A 辑》，1928。
- 弗莱明（Alexander Fleming）：《论青霉菌培养物的抗菌作用》（On the Antibacterial Action of Cultures of a Penicillium），《英国实验病理学杂志》，1929。
- 爱因斯坦、罗森（Albert Einstein, Nathan Rosen）：投给《物理评论》的论文，原题大意为《引力波存在吗？》（Do Gravitational Waves Exist?），1936 年投稿；改定后以《论引力波》（On Gravitational Waves）刊于《富兰克林研究所学报》，1937。
- 钱恩、弗洛里等（E. Chain, H. W. Florey et al.）：《青霉素作为化学治疗剂》（Penicillin as a Chemotherapeutic Agent），《柳叶刀》，1940。
- 加菲尔德（Eugene Garfield）：《科学引用索引》（Citation Indexes for Science），《科学》，1955。
- 维格纳（Eugene P. Wigner）：《数学在自然科学中不合理的有效性》（The Unreasonable Effectiveness of Mathematics in the Natural Sciences），1960。
- 温伯格（Alvin M. Weinberg）：《大规模科学对美国的影响》（Impact of Large-Scale Science on the United States），《科学》，1961。
- 梅达沃（Peter Medawar）：广播讲话《科学论文是一种欺骗吗》（Is the Scientific Paper a Fraud?），1963。
- 加菲尔德主持编制：《科学引文索引》（Science Citation Index），1964 年起出版。

· 波斯纳等（G. J. Posner, K. A. Strike, P. W. Hewson, W. A. Gertzog）：《科学概念的顺应：走向一种概念转变理论》（Accommodation of a Scientific Conception: Toward a Theory of Conceptual Change），《科学教育》，1982。
· 坎贝尔（Don Campbell）：《莫扎特效应》（The Mozart Effect），1997。
· 鲍迈斯特等（R. F. Baumeister et al.）：《自我损耗：主动自我是有限资源吗？》（Ego Depletion: Is the Active Self a Limited Resource?），《人格与社会心理学杂志》，1998。
· 约安尼季斯（John P. A. Ioannidis）：《为什么大多数已发表的研究结论是错的》（Why Most Published Research Findings Are False），2005。
· 安德森（Chris Anderson）：《理论的终结》（The End of Theory），《连线》，2008。
· OPERA 合作组（OPERA Collaboration）：《用 OPERA 探测器测量 CNGS 束流中微子的速度》（Measurement of the Neutrino Velocity with the OPERA Detector in the CNGS Beam），2011 年 9 月公开，2012 年修订。
· 鲍迈斯特、蒂尔尼（Roy F. Baumeister, John Tierney）：《意志力》（Willpower），2011。
· ATLAS 合作组（ATLAS Collaboration）：《在大型强子对撞机上用 ATLAS 探测器寻找标准模型希格斯玻色子时观测到一种新粒子》（Observation of a New Particle in the Search for the Standard Model Higgs Boson with the ATLAS Detector at the LHC），《物理快报 B》，2012。
· CMS 合作组（CMS Collaboration）：《用 CMS 实验在大型强子对撞机上观测到一种质量为 125 吉电子伏的新玻色子》（Observation of a New Boson at a Mass of 125 GeV with the CMS Experiment at the LHC），《物理快报 B》，2012。
· 《旧金山科研评价宣言》（San Francisco Declaration on Research Assessment），2012 年起草，2013 年发布。

· 开放科学协作（Open Science Collaboration）：《估计心理科学的可复现性》（Estimating the Reproducibility of Psychological Science），《科学》，2015。
· LIGO 科学合作组与 Virgo 合作组（B. P. Abbott et al.）：《双黑洞并合的引力波观测》（Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger），《物理评论快报》，2016。
· 国际计量大会（CGPM）：第 26 届大会关于修订国际单位制的决议，2018 年通过，2019 年生效。

四、本系列与作者著作

· 王德生：《SDE 符号学：超越皮尔斯的三元与索绪尔的二元》，德麦国际出版社（SDE 符号学系列理论卷书二，理论总本）。
· 王德生：《大模型是索绪尔的网、皮尔斯的链：符号在对话中才发生》，德麦国际出版社（理论卷书四）。
· 王德生：《万物皆刻痕：从符号学到发生本体论》，德麦国际出版社（理论卷书十，系列总论）。
· 王德生、牟军：《科学是什么？》〔待核〕。
· 王德生：量子力学专著〔待核：书名与出版信息〕。
· 王德生：《超越波普尔》〔待核〕。
· 王德生：《中国 AI for Science 的困境》〔待核〕。
· 王德生：“科学宗教”立论相关著述〔待核：篇名与出处〕。

附录

附录三件：附录一按年份排列全书用到的科学史案例；附录二把发现学科学观与发生学科学观并排对照；附录三列出三审后仍待核实的条目。

附录一

科学符号大事年表

本表按年份排列全书各章用到的科学史案例，年份都已和各章正文对过；一件事跨若干年的，写起止年份。正文里仍带〔待核〕的细节，见附录三。

年份	事件	本书第几章
公元前 221	秦统一度量衡	第 12 章
628	婆罗摩笈多在《婆罗摩历算书》中给零写出运算规则	第 10 章
1202	斐波那契《计算之书》把印度—阿拉伯数字引入欧洲	第 10 章
1543	哥白尼《天体运行论》出版	第 22 章
1557	雷科德在《砺智石》中引入等号“＝”	第 10 章
1604 前后	伽利略的斜面实验	第 4 章
1610	伽利略《星际信使》报告木星的卫星	第 7 章
1620	培根《新工具》出版	第 1 章
1665	胡克《显微图谱》出版	第 7 章
1665	《哲学汇刊》创刊	第 14 章
1672 前后	里歇的摆钟在卡宴每天慢两分多钟，秒摆长度随纬度而变	第 12 章、第 20 章
1676	列文虎克向英国皇家学会报告水中的“微小动物”	第 7 章
1684	莱布尼茨发表微分学论文，使用 dx 记号	第 10 章
1687	牛顿《自然哲学的数学原理》出版	第 1 章
1724	华伦海特发表他的温标	第 8 章
1742	摄尔修斯提出百分温标	第 8 章
1761—1762	哈里森的 H4 航海钟随船试航	第 8 章
1774	普里斯特利制得“脱燃素空气”	第 6 章
1777 前后	拉瓦锡把这种气体中的成分命名为“氧”	第 6 章
1789	拉瓦锡《化学基础论》出版	第 6 章
1791	法国以地球子午线长度定义米	第 12 章
1814	拉普拉斯在《概率的哲学随笔》中描绘决定论图景	第 1 章

年份	事件	本书第几章
1846	依据天王星轨道反常算出的海王星被观测到	第 5 章
1854	巴斯德在里尔讲“机遇偏爱有准备的头脑”	第 22 章
1859	勒维耶报告水星近日点进动的反常，随后有“祝融星”之说	第 5 章
1859—1864	巴斯德鹅颈瓶实验（1864 年在索邦公开演示）	第 4 章
1865	麦克斯韦《电磁场的动力学理论》发表	第 11 章
1866	孟德尔豌豆杂交论文发表	第 22 章
1880 年代	亥维赛把麦克斯韦方程组改写为四个矢量式	第 11 章
1887	迈克耳孙－莫雷实验	第 5 章
1889	国际米原器启用	第 12 章
1890	古德斯皮德与詹宁斯的底片留下未被认出的圆斑	第 22 章
1895	伦琴报告 X 射线	第 22 章
1905	爱因斯坦提出质能关系，后写作 $E=mc^2$	第 11 章
1906	迪昂《物理理论的目的与结构》出版	第 22 章
1906	瓦色曼反应问世	第 3 章
1911	威尔逊用云室拍下带电粒子的径迹照片	第 9 章
1912	魏格纳提出大陆漂移说	第 13 章
1912	劳厄等人观测到 X 射线的晶体衍射	第 22 章
1915	广义相对论给出水星近日点进动的解释	第 5 章
1928	狄拉克写出电子的相对论方程	第 22 章
1928	弗莱明在污染的培养皿上看到溶菌空白圈	第 22 章
1929	弗莱明把霉菌滤液命名为“青霉素”，并发表论文	第 22 章
1932	安德森在云室照片中看到正电子	第 9 章、第 22 章
1934	波普尔《研究的逻辑》出版（版权页标 1935）	第 19 章
1935	弗莱克《一个科学事实的起源与发展》出版	第 3 章、第 13 章
1940	弗洛里、钱恩发表青霉素动物实验结果	第 22 章
1952	格拉泽发明气泡室	第 9 章
1955	加菲尔德提出科学引用索引的设想	第 14 章
1958	汉森《发现的模式》出版	第 2 章
1962	库恩《科学革命的结构》出版	第 6 章
1965	中国科学家人工合成结晶牛胰岛素	第 21 章

年份	事件	本书第几章
1967	秒改以铯原子跃迁定义	第 8 章
1967	“523 任务”启动，全国协作研究抗疟新药	第 21 章
1970	拉卡托斯《证伪与科学研究纲领方法论》发表	第 22 章
1971	屠呦呦团队第 191 号青蒿乙醚提取物对鼠疟原虫抑制率达百分之百	第 21 章
1972	屠呦呦团队分离出青蒿素单体结晶	第 21 章
1983	米改以光速定义	第 12 章
2011—2012	OPERA“超光速中微子”读数及其查明	第 16 章
2012	大型强子对撞机宣布发现希格斯粒子	第 16 章
2015	开放科学协作发表百项心理学研究复现结果	第 15 章
2015—2016	LIGO 探测到引力波（2015 年探测，2016 年公布）	第 9 章
2015	屠呦呦获诺贝尔生理学或医学奖	第 21 章
2019	国际单位制重新定义，千克改以普朗克常数定义	第 12 章
2020	AlphaFold 在蛋白质结构预测评测中取得突破	第 17 章

附录二

发现学科学观与发生学科学观对照表

左栏是本书第 1 章写足了长处的那幅标准图景，右栏是本书的说法。右栏不是要丢掉左栏：左栏的客观、可复验、抗私意，在右栏里都保留着，只是换了一个来历。

问题	发现学科学观	发生学科学观	主要见
世界	一本早已写好的书，等着被读出来	在理念与现实的反复对账中一层层显出来	第 1、3 章
科学家	读书的人，越不带自己越好	对账的一方，带着预期才撞得出对不上	第 2、22 章
观察	中立地记录事实	渗透着理论，同一读数在不同理论里是不同符号	第 2 章
读数	世界直接说出的话	仪器里的现实符号，被读成概念时成为理念符号	第 9 章
实验	向自然提问，取回答案	有意制造对不上，把假说推到读数面前	第 4 章
控制变量	排除干扰，让真相露出来	把对不上收窄到一处，使它能被指认	第 4 章
反常	测量误差或待清除的噪声	结晶的起点，科学的对不上	第 5 章
理论更替	更接近真理的一步	旧结晶熔开，再结晶	第 6 章
仪器	延长感官的工具	把现实变成可读符号的器官，会造出新的痕	第 7、8、9 章
数学记号	表达思想的外衣	会思考的记号，其连接度决定一门学问走多远	第 10 章
公式	自然规律的写照	把一张网压成一个可带走的粒子	第 11 章
单位	约定俗成的尺子	理念刻进现实；2019 年改定是一次深层回写	第 12 章
科学事实	被找到的现成之物	一次结晶：稳定、整体、独立，可熔可再结晶	第 3 章
共同体	认可发现的评委	托住结晶的场，是势能	第 13 章
论文与评审	发布与把关	可迁移的现实符号与一道对账手续	第 14 章

问题	发现学科学观	发生学科学观	主要见
复现失败	个别人的失误	结晶失败，或连接度虚高	第 15 章
代价	不进入知识论	实验、仪器、评审、复现都要付能量	第 16 章
AI 生成的综述	更快地找到已有知识	生成不等于结晶，对不上与动能仍须有人提供	第 17 章
技术可用	理论被证实的标志	可用不等于证实	第 18 章
科学的权威	已证明的结论不容置疑	尊重结晶，拒绝供奉；拒绝回写即固化	第 19 章
科学教育	把正确结论传给学生	让学生自己经历对不上，结晶才在他身上发生	第 20 章
原创	天才的灵光	自己的对不上加上自己的场	第 21 章
意外发现	真相自己撞了进来	痕撞上准备好的预期才成为缝，还要场与能量才结晶	第 22 章
理论怎样算错	由观察判定真伪	事前写明可推翻条件，对不上须事前独立指认	第 22 章

附录三

引文核验总表

本书送审稿标〔待核〕的年份、人名、引文、数据与细节共 464 项，经初审、补核、复审、终审逐条核对，绝大多数已据可靠来源核清或改正。本表列出三审后仍未能核实的各项，以及须由作者方确认的本人著作信息，供付印前最后核对。正文中对应处仍以〔待核〕标出。

第 3 章　发生学的科学观（1 项）

1. 王德生、牟军《科学是什么？》书名与“三大规范工具”“名词百科／形式空转／争论叙事”的表述

第 4 章　实验是什么（1 项）

1. 王德生、牟军《科学是什么？》中“三大规范工具”一说的原文

第 9 章　探测器：一道闪光是谁的符号（2 项）

1. 扫描员挑出“V”字的速度
2. 作者量子力学专著书名

第 11 章　公式：一个粒子装下一张网（1 项）

1. 王德生、牟军《科学是什么？》引语

第 18 章　可用不等于证实（1 项）

1. 王德生“科学宗教”立论线的著作名称与出处

第 19 章　科学主义：一种固化（1 项）

1. 王德生《超越波普尔》书名与出处

第 21 章　中国科学的符号能量账（1 项）

1. 《中国 AI for Science 的困境》书名

第 22 章　它怎样才算错（1 项）

1. 1928 年夏伦敦凉天的起止日期

后记

这本书是王德生“SDE 符号学系列”理论十卷中的第九卷。

系列的理论总本是第二卷《SDE 符号学：超越皮尔斯的三元与索绪尔的二元》。那一卷讲的是符号一般怎样发生：符号是关系结晶后的粒子，稳定、整体、独立；它分在理念、现实、自我三界；三界之间对不上，才逼出新的符号；每一次结晶都要付能量；符号会固化，也会熔开再结晶。

其余各卷，是把这套说法带到不同的地方去试。它被带进释经，带进一场著名的哲学争论，带进大模型，带进婴儿的第一个符号，带进文明的刻痕、中国的易学、人心的困境。

本书把它带进了科学。

科学是这套说法最难过的一关，也最该去的一关。说它难，是因为科学有自己极其严格的规矩，有几百年的方法论传统，有培根、牛顿以来那幅深入人心的图景：自然是一本书，科学家把它读出来。在这里说“发生”，很容易被听成“随便怎么说都行”。说它该去，是因为符号学若讲不清一个读数、一个公式、一根米尺是怎么来的，它对世界的解释就缺了最硬的一块。

所以本书给自己定了几条规矩，写作中一直守着。

第一，不贬低科学。科学事实是千百次对账、付了巨大代价才站住的东西。本书讲它怎样发生，不是为了说它不可靠，而是为了说清它为什么可靠，以及可靠到哪里为止。

第二，公道对待前人。培根、牛顿、拉普拉斯、汉森、弗莱克、库恩、波普尔、迪昂、拉卡托斯，每一位都先写足他对在哪里，再写他停在哪里。本书的许多说法，是站在他们停下的地方往前多走一步，不是把他们推倒。

第三，不搞相对主义。“发生”不是“怎么说都行”。结晶有三条判据，理论有可推翻条件。本书在第 22 章写下了自己在什么情况下算错，并把最可能打倒自己的意外发现拿来试过一遍。

第四，案例讲准。科学史的年份、人物、实验细节，本书尽量核对；核不实的，一律标出〔待核〕，汇总在附录三。读者若发现错处，那正是本书最欢迎的对不上。

书名《被刻进世界的公式》，取的是全书最后落下来的那层意思。一个公式最初只是一次对不上逼出来的想法，在一个人的草稿纸上成形，在一群人的争论里站稳。

后来它被造进仪器、写进单位、做成桥梁与药片，就不再只在人的脑子里，而是刻进了世界的样子。本书把这个过程叫回写。科学之所以有力量，正在于它的理念能这样一次次回写到现实里去，又一次次接受现实的检验。

本书还守着系列已经定下的一条口径：符号、逻辑、数学是信息的三种形态，分别像粒子、波和场，三者往返协作，不是一级级往上爬的台阶。一个公式被记成一个名字，是场压成了粒子；一个名字被推理展开，是粒子化成了波。科学里这三种形态时时互转，本书第 10、11 章用记号与公式专门讲过。没有哪一门科学、哪一个文明，只停在其中一种形态上。

全书以一支体温计开头，也以它结尾。选它，是因为它最普通。几乎每个家庭都有一支，几乎每个人都在某个夜里盯着它看过。冷和热怎样从手上的感觉变成玻璃管里的刻度，又变成电子屏上的读数，再变成医生口中的诊断？这一段路程，就是本书想讲的科学的全部样子，缩在一件几十块钱的器物里。

前言里那位长沙的药剂师和她发烧的女儿，是为了让读者在进入科学史之前，先认出自己的日子。

本书与系列其他各卷的分工，也在这里交代一句。

科学史的案例集中在本卷：氧与燃素、水星近日点、木星卫星、米与千克的定义、X 射线与青霉素，其他各卷都不再用作主例。本卷第 17 章讲人工智能进入科学，接的是第四卷《大模型是索绪尔的网、皮尔斯的链：符号在对话中才发生》的

结论；第 19 章讲波普尔，第 18 章讲“科学宗教”，第 21 章讲中国科学的能量账，分别接作者另外几部著作中的立论，本书只点到为止，不代替那些著作说话。

系列最后一卷《万物皆刻痕：从符号学到发生本体论》，会把十卷的说法收拢起来。它要问一个更大的问题：如果符号是一次次局部的结晶，那么世界本身是否也可以这样看。本书在科学这一关留下的材料，会是那一卷的重要依据。

本书的写作，得益于许多人的讨论与质疑，尤其是那些追问“它怎样才算错”的人。一本讲对不上的书，最需要的就是对不上。

书中所有的错误，由作者承担。

科学的力量，
不在于它找到了
现成的真理，
而在于它把“对不上”
变成了一种制度。

一根温度计，一架望远镜，
一个等号，一根铂铱棒。
这本书问：一个“科学事实”
是怎样被刻进世界的？
它凭什么站得稳，
又凭什么必须允许被推翻？

实验，就是有意制造对不上。　　——本书

德麦国际出版社 · Demai International Press
德麦国际专著第 407 号
定价：US$23.00

ISBN 979-8-90690-407-2
9798906904072