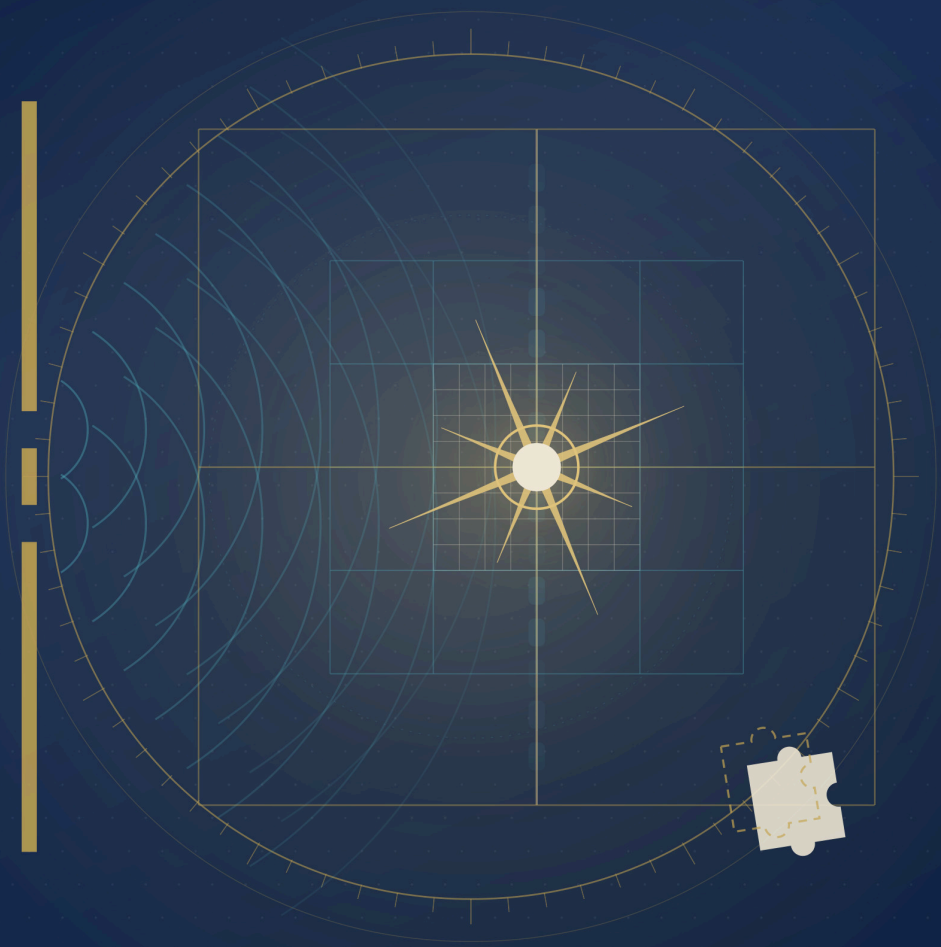
SDE UNIVERSES
德麦国际专著 · 第 394 号

普通人都能明白的

一次闪光是谁的？

量子力学缺的那个本体论



王德生　著

德麦国际出版社
Demai International Press

普通人都能明白的

一次闪光是谁的？

量子力学缺的那个本体论

王德生　　著

德麦国际出版社
Demai International Press · Singapore

出　版　信　息

书名	《一次闪光是谁的？——量子力学缺的那个本体论》
著者	王德生
执笔	复合主体：王德生立题、口述承重命题与裁定，Claude 执笔与统稿
出版	德麦国际出版社（Demai International Press）· 新加坡
编号	德麦国际专著第 394 号
ISBN	979-8-90690-814-8
定价	US$23.00
开本	170 mm × 240 mm（16 开）
字数	约 29 万字（导论至结语约 26 万字）
版次	2026 年 10 月第 1 版
完稿	2026 年 10 月 13 日

AI 协作声明：本书的判断、口径与承重命题由王德生（口述）给出；文字在其指令下由 AI（Claude）协作成稿，并经其审定。部分章节的加厚段落与事实核对，由多个 AI 写作与核查代理协作完成，统稿时逐章合并。

书中所引物理学家与哲学家的话，一律转述大意，不作逐字引文。书中涉及的实验年份、团队与数值，已于 2026 年 10 月逐条对照原始论文、期刊页或研究机构公告核对；仍标〔待核〕处，出处尚未逐字核对，汇总于附录五之末。书中「本书的读法」是诠释，不是对量子力学的修改；凡与标准物理一致、分不出高低的地方，书中都写明「只算相容」。

书中陪读人物林舟、林小满，以及各章出现的其他人物与日常场景，均为虚构。关于健康的章节讲怎样理解一个数，不构成医学建议；身体或心里的难处真的大了，请找医生或心理咨询师。

本书的承重命题由王德生于 2026 年 10 月 13 日口述：实体属性发生学是量子力学需要的知识本体论；SDE 三态与特征律可以回答玻恩规则；稳定是层级迭代的，类似多重网格法。

全书结构：扉页、出版信息、作者介绍、目录；导论与八编四十七章；结语；附录五件（含参考文献）；后记。

版权所有　侵权必究

作者介绍

王德生，SDE（显露·差异序列·特征纠缠）本体论思想体系的创立者，德麦国际（Demai International Pte. Ltd.，新加坡）创始人、首席执行官。

生长于中国农村，1990 年进入湘潭大学。后获中国科学院计算数学博士学位，并在中国科学院完成博士后研究，研究方向包括 Voronoi 图、Delaunay 剖分、质心 Voronoi 剖分与有限元方法。曾任教于英国斯旺西大学与新加坡南洋理工大学，2005 年起定居新加坡。本书第四编借用的多重网格法，正是他早年计算数学训练里的一件老工具。

他的思想体系走过四站：三视角，讲知识的结构和体系（2015 年 7 月至 2021 年初）；经一段酝酿，进入 321 智慧，从知识论向本体论过渡（2021 年 7 月至 2025 年 7 月）；SIO 本体论（2025 年 7 月至 2026 年 1 月）；SDE 本体论（2026 年 1 月至今）。2026 年 8 月，他回看 321 智慧时写下「知识＝现象的特征＝F（主体，客体，互动）」，并指出其中两处亏空：客体究竟是什么，主客是否先于互动。本书就是从这两处亏空出发的。

在德麦国际出版社出版多部专著，包括《SDE本体论入门：世界是如何发生的》《SDE数学导论》《特征律》《超越波普尔》《上帝掷不掷骰子？》《主体发生学的开启》等。

本书是这一系列里，把 SDE 带进量子力学的一卷。

目 录

作者介绍 iii

导论　一个读数是谁的? 1

第一编　亏空：量子力学缺的不是算法，是本体论 **15**

第 1 章　一百年的「谁的属性」之争 16

第 2 章　物理自己排除了两条路 26

第 3 章　风动，幡动，心动：诠释之争是号位之争 36

第 4 章　康德留下的空位子 46

第 5 章　为什么这场架在诠释内部吵不完 56

第二编　底盘：读数和它的主人一起发生 **67**

第 6 章　一个乘号：承载者 × 属性 68

第 7 章　三个号位，总有一个冒在前头 77

第 8 章　属性是什么：哪一种差异偏重着稳了下来 87

第 9 章　三种状态：一锅粥、正在成形、定型 98

第 10 章　特征律：一个差异怎样稳成一个特征 108

第三编　测量：一次特征律的发生 **119**

第 11 章　叠加不是「同时在两处」 120

第 12 章　两种「纠缠」：物理的一种，和本书的土 130

第 13 章　干涉条纹：看得见，却还不是谁的 140

第 14 章　过门槛：测量是什么时候成的 151

第 15 章　退相干：讲对了土，还差路和回写 161

第 16 章　读数和三个号位，一起显出来 171

第四编　层级稳定：一幅千片拼图的读法 **181**

第 17 章　从两程到一圈：稳住不是直线 182

第 18 章　测量链上的四个动作 192

第 19 章　回写：粗处的判断，回头改细处 202

第 20 章　一来一回的配对：平方从哪里来　213
第 21 章　收敛：各层对上，才是事实　223
第 22 章　冗余平台：粗层在物理里的影子　234

第五编　玻恩规则：为什么是概率，为什么是平方　245
第 23 章　为什么是概率：一次性的发生，多次性的账　246
第 24 章　为什么偏偏是平方　256
第 25 章　Gleason 定理证了什么，没证什么　267
第 26 章　三条缝：平方经得起多严的检验　278
第 27 章　各家怎样推玻恩规则：一本对账簿　288

第六编　量子力学的难题，逐个解　299
第 28 章　薛定谔的猫：箱子隔开的是谁　300
第 29 章　实验室里的「猫」：越来越大的叠加　309
第 30 章　维格纳的朋友：两层事实，放进了一张表　319
第 31 章　鬼魅般的超距作用：没有东西飞过去　329
第 32 章　波，还是粒子：两种显露，不是一副面孔　339
第 33 章　延迟选择与量子擦除：过去还没成为过去　349
第 34 章　测不准：两种稳住，挤不进同一层　360
第 35 章　一直看着的锅：回写太勤，路就走不出去　370
第 36 章　没碰到，也能知道：炸弹检测与「没发生的那条路」　380
第 37 章　穿墙：墙，是定型之后才有的　390
第 38 章　为什么记下的总是位置：偏好基与筛子　400
第 39 章　多世界：多出来的，不是世界　410

第七编　检验与可错：把账摊开　421
第 40 章　放大链的账：相容，不算判别　422
第 41 章　弱测量与撤销：层，不能放在哪里　432
第 42 章　可错条款登记：本书押在哪里　443
第 43 章　尚未解决的，和本书最弱的三处　454

第八编　回到人间：一个读数，在日子里　465
第 44 章　知识是谁的：两处亏空补上之后　466

第 45 章　教育：一个孩子「会了」，什么时候算事实　476
第 46 章　健康：一张化验单上的数，是谁的　486
第 47 章　工作与 AI：一台机器的回答，什么时候才算数　497
结语　风动，幡动，心动，与一次闪光　508
附录　520
附录一　数学预备　521
附录二　多重网格入门　525
附录三　术语对照表　528
附录四　可错条款登记表　530
附录五　参考文献　532
后记　540

导论

一个读数是谁的?

◆ 一、暗室里的一次闪光

夜里十点，大学物理楼地下一层。林小满第一次一个人值实验。

屋子是黑的，只有示波器的屏幕亮着一点绿。桌上一只铁盒子，里面装着一支光电倍增管。管子前面是一块很薄的挡光片，挡光片后面，一只衰减得极弱的激光器，每秒只放出寥寥几个光子。

她盯着屏幕。过了几秒，绿线上猛地跳起一个尖峰，又落回去。

一个光子来过了。

她在本子上记下时间，又记下一个数。写完，她忽然停了笔。

这个数是谁的?

是那个光子的吗？可在它撞上管子之前，物理课本说，它没有一个确定的「在这里」。是那支管子的吗？可管子不撞上光子，什么也不会说。是她的吗？可她只是看了一眼屏幕。

她给父亲发了条消息。林舟在县城中学教了二十年物理，这时还没睡。

「爸，我刚记下的这个读数，到底是谁的？」

过了一会儿，回信来了：「这个问题，物理学家吵了一百年。」

本书就从这一次闪光讲起。

◆ 二、一百年没吵完的架

1927 年秋天，布鲁塞尔开了第五届索尔维会议。照片上二十九个人，十七个后来拿了诺贝尔奖。会上吵得最凶的，是爱因斯坦和玻尔。

爱因斯坦说，大意是：月亮在没人看的时候，也在那里。一个粒子的位置，在测量之前就该有个确定的值，只是我们还不知道。

玻尔说，大意是：你不能把粒子从整套实验装置里单拎出来，问它「本来」是什么样子。读数属于整个现象，现象包括仪器。

这场架，表面上吵的是「上帝掷不掷骰子」。底下吵的，正是林小满半夜问的那一句：读数是谁的？

一百年过去，架没有吵完，反而分成了好几家。

有人说，读数本来就在粒子身上，只是藏着，这是隐变量一派。有人说，读数是观察者信念的更新，属于看的人，这是 QBism 一派。有人说，读数只在两个系统的互动里才有，属于那一下互动，这是关系诠释一派。还有人说，每个可能的读数都实现了，宇宙分了岔，这是多世界一派。

你会发现，他们各自抓住了一个位置：客体、主体、互动，或者干脆一个都不选。

这让人想起一桩更老的公案。

◆ 三、风动，幡动，心动

《六祖坛经》里有个故事。广州法性寺，风吹得旗幡飘。一个僧人说是风在动，一个说是幡在动，争个不休。慧能走过去说：不是风动，不是幡动，是你们的心在动。

后来《无门关》又往前推了一步：不是风动，不是幡动，也不是心动。

一千多年来，这桩公案常被读成「都放下吧」。

本书换一种读法。动，是一个属性。风是互动，幡是客体，心是主体。三家各说对了一个，又各少了两个。动这个属性，不是哪一家的；它和风、幡、心三者，一起发生出来。三者互相需要，互为条件，缺一个，动就不成立。

这句话是本书的第一块砖。

把它换回物理：读数是一个属性。粒子在客体的位置，仪器与测量在互动的位置，看表的人在主体的位置。量子力学的各家诠释，各守一个位置。他们的架吵不完，不是因为谁不够聪明，是因为他们都默认了一件事：**属性总得先属于某一个东西**。

本书说：这一条，站不住。属性和它的承载者，是一起发生的。

◆ 四、物理自己已经走到了门口

这个说法，哲学家没有硬塞给物理。物理自己，早就走到了这扇门口。

第一处门口是 1964 年。贝尔证明了一个不等式。如果粒子的属性在测量之前就确定地待在粒子身上，而且远处发生的事不能瞬间影响这里，那么某些实验的统计结果就不能超过一个上限。后来的实验一次又一次表明：超过了。

第二处门口是 1967 年前后。Kochen 和 Specker 证明，你不可能给量子系统的所有属性，预先各分配一个确定的值，又让这些值与「怎么去测」无关。

两件事合起来说的是：**属性不是先待在客体身上、等着被发现的**。

第三处门口更奇特。1976 年，Unruh 算出：在真空里，一个静止的观察者什么粒子也看不到；一个在做加速运动的观察者，却会看到一片热乎乎的粒子。

连「这里有没有粒子」都要看是谁、怎么在动。这说的是：**不光属性不先在，承载属性的那个东西，也不先在。**

物理学家把这些结果称为「量子力学的奇怪之处」。本书说，它们不奇怪。它们只是在告诉我们，旧的本体论接不住了。

◆ 五、亏空在哪里

旧的本体论是什么？说白了，就是一句话：世界先摆在那里，我们去发现它。

这里头藏着两个默认。

第一个默认：客体先在。有一个「本来的东西」，属性长在它身上。康德走到这里，发现我们只认得「现象」，现象背后那个来源，他叫它「物自体」，又说它不可知。门是关上了，可门后那个位子还留着。

第二个默认：主体和客体都先于互动而在。好像先有一个看的人，先有一个被看的东西，然后才有看这一下。

这两个默认，日常生活里不碍事。桌子就是桌子，杯子就是杯子。可到了量子力学的尺度上，两个默认一起出了问题。客体那一头，贝尔和 Kochen–Specker 说属性不先在。主体那一头，观察者问题一直悬着，谁算观察者，一只猫算不算，一台电脑算不算，没人说得清。

两头都悬空了，知识论就悬空了。林小满本子上那个数，就成了一个没有主人的数。

本书把这件事叫作**亏空**：量子力学有一套极好用的算法，却没有一套接得住它的本体论。

◆ 六、本书的说法

本书要补的，是一套知识本体论。它有一个不太好记的名字：实体属性发生学。用大白话讲，三句话。

第一句：属性不是先在的，是发生的。

第二句：承载属性的那个东西，客体、主体、互动，也不是先在的。它们和属性同时发生，中间是一个乘号，不是先后。

第三句：属性的发生，是一场从一锅粥到正在成形、再到定型的过程。差异先在一锅粥里乱撞，撞着撞着自己组织起来，最后有一种差异稳住了。稳住的那个差异，就是我们叫作「特征」「属性」「读数」的东西。

本书管这个过程叫**特征律**：特征的发生，就是差异的稳定性出现。

放回那次闪光。

光子还没撞上管子时，几条可能的路都在走，彼此碰撞，这是一锅粥。光子撞上第一个电极，打出几个电子，这些电子再撞下一个电极，打出更多电子，这是正在成形。一层一层放大下去，到示波器上跳出一个尖峰，到林小满在本子上写下一个数，这一个差异稳住了，定型了。

读数，就在定型的那一刻发生。粒子、仪器、林小满，也在那一刻一起成了「这一次测量」里的粒子、仪器和看表人。

◆ 七、一幅千片的拼图

还有一件事要说在前面：稳住，要一步一步来。

你拼过一千片的拼图吗？没人从左上角第一块开始，一块一块拼到右下角。大家都是先拼边框，再把同一种颜色的片子归到一堆，拼出几大块色块，再往色

块里填细处。填到一半，常常要退回来看一眼全局：这块蓝的到底是天还是湖？看清了，再回去改细处。

先粗后细，细处又回头校正粗处，来来回回。拼图是这样一点点「稳」下来的。

计算数学里有一种方法，叫多重网格法，干的就是这件事。解一个大方程，先在粗网格上把大轮廓解出来，再到细网格上修细节，细网格算出的偏差再送回粗网格校正，一圈一圈，直到各层彼此对得上。

本书要说，测量也是这样稳下来的。它要一层一层地往上传，又一层一层地往下改。光电倍增管里那一级一级的电极，就是一层一层的网格。

这把钥匙，能开一把一百年没开的锁。

◆ 八、那把一百年的锁：玻恩规则

量子力学里有一条规则，人人在用，没人说得清它从哪来。它叫玻恩规则。

量子力学用一个叫波函数的东西描述系统，记作 ψ。玻恩在 1926 年提出：测到某个结果的概率，等于这个结果对应的波函数的绝对值的平方，记作 $|\psi|^2$。

这条规则准得惊人，一百年来没有一次实验推翻它。可它带着两个问号。

第一个问号：为什么是概率？宇宙为什么要掷骰子？

第二个问号：为什么偏偏是平方？为什么不是绝对值本身，不是三次方？

1957 年，Gleason 证明了一个定理：只要承认几条看起来很自然的前提，那么能给量子事件分配概率的方式只有一种，就是 $|\psi|^2$。这让很多人松了口气，好像平方被「证明」出来了。

可本书要指出，那几条前提里藏着一条没写出来的：所有可能的事件，在测量之前就已经整整齐齐地排好了，概率一次性铺在上面。这就是「先在」的老毛病，换了一身数学的衣服。

本书的说法是：Gleason 定理证的，是拼图拼完之后，答案只有一个；它没有证，那些拼图片在拼之前就已排好了位置。$|\psi|^2$ 是一层一层稳下来之后的那个终点。至于平方的来历，多重网格里每一层「往上传」和「往回改」，正好是一对互为镜像的动作，一乘，就是平方。

这些话现在听着还玄。第五编会一步一步讲清楚。

◆ 九、为什么这是一本讲知识的书

你可能会觉得奇怪：一本讲量子力学的书，为什么说自己是一本讲知识的书？

因为林小满那一句「读数是谁的」，换一个说法，就是「我知道的东西是谁的」。

你知道今天下雨，这份知道，是天的，是你的眼睛的，还是你推开窗那一下的？平常没人这样问，因为答案好像不重要：雨就是雨，你知道就行。

可一旦问到底，这个问题会一路追到哲学最老的地方。柏拉图问过，知识和意见有什么不同。笛卡尔问过，我怎样确定我知道的不是梦。康德问过，我们能知道的，是不是只是事物透过我们显出来的样子。

这些问题，哲学家吵了两千多年，一直有个退路：反正科学会告诉我们世界本来什么样。科学是最硬的知识，它的读数总该是世界本身的吧？

量子力学把这条退路堵上了。最硬的科学，最精确的读数，偏偏说不清自己是谁的。

所以本书讲物理，也是在讲知识。物理学家在实验室里撞上的那堵墙，和你在日子里撞上的那堵墙，是同一堵：我们一直以为，知道就是发现一个先在的东西。

本书要说，知道也是一种发生。

这句话放在日常里，会改变很多事：孩子怎样「学会」，医生怎样「诊断」，一个团队怎样「看清」市场，一台 AI 的回答怎样才「算数」。第八编会一件一件地说。

◆ 十、林舟的两个担心

林小满把本书的初稿发给父亲看。林舟读完导论，回了两个担心。

第一个担心：「你们这样讲，学生会不会以为物理不靠谱了？读数都说不清是谁的，那还算什么科学？」

本书的回答是：恰恰相反。量子力学是人类做过最靠谱的一门科学，一百年没错过。本书说的是，它靠谱的原因，和我们以为的不一样。它靠谱，不是因为它读出了先在的东西，而是因为它准确地描述了一层一层稳住的过程。在稳住的那一层上，结果可以重复、可以共享、可以拿来造手机。

第二个担心：「物理学家会不会觉得，你们是外行来指手画脚？」

这个担心是对的，也是本书必须面对的。所以本书守几条规矩：物理的定理，照原意讲，不歪；实验的数，标出处；本书自己的说法，和物理已有的结论分开，写清哪里是本书的、哪里是物理的；凡是本书说不准的，标〔待核〕。

林舟最后又补了一句：「你要是能把薛定谔的猫讲得让我班上的学生听懂，我就服。」

第 28 章，是写给他班上的学生的。

◆ 十一、这本书不打算做什么

本书先把几句丑话说在前面。

本书没有提出新的物理理论。它不改动量子力学的任何一个方程，也不预言一个和现有实验相反的数据。它做的是诠释：给一套已经极好用的算法，补上它缺的那套本体论。

本书也不打算让物理学家改行学哲学。物理学家已经逼出了两个结论：属性不先在，承载者也不先在。本书想做的，是接住它们，再看一百年的几道难题会变成什么样子。

本书还给自己写了「死法」。哪些实验结果一旦出现，本书的说法就要撤回，第七编一条一条写明。一套说法，说不出自己怎样会错，就不值得信。

◆ 十二、全书怎么走

全书八编。

第一编讲亏空：一百年的架是怎么吵起来的，物理自己排除了哪几条路，各家诠释各守哪一个位置。

第二编搭底盘：实体属性发生学是什么，三个位置怎样一起发生，一锅粥、正在成形、定型三种状态是什么，特征律怎样让一个差异稳下来。

第三编讲测量：叠加是什么，量子纠缠和本书说的「土」有什么不同，干涉条纹为什么只是正在成形，测量为什么是一次特征的发生。

第四编讲层级稳定：就是那幅拼图，那套多重网格。

第五编讲玻恩规则：为什么是概率，为什么是平方，Gleason 定理到底证了什么。

第六编最长，十二章，逐个拆量子力学的难题：薛定谔的猫、维格纳的朋友、EPR 与远距纠缠、双缝、延迟选择、测不准、芝诺效应、炸弹检测、隧穿、偏好基、多世界。

第七编讲检验：本书拿什么数据对过账，哪些只是相容，哪一条押了注，自己最弱在哪里。

第八编回到人间：一个读数是谁的，这件事放到教育、健康、工作和 AI 里，会改变什么。

读法有三条路。只有一个下午，读导论、第 3 章、第 28 章薛定谔的猫、第 24 章为什么是平方，再读结语。学物理的读者，可以从第三编直接进，回头再补第二编。只关心知识和人生的读者，读第一、二编，跳到第八编。

◆ 十三、几个词，先用一遍

本书用七个家常词，来自王德生博士的 SDE 思想体系（显露、差异序列、特征纠缠）。就拿那次闪光，把七个词各用一遍。

形状：长出来、能被认出的样子。示波器上那个尖峰，就是一个形状。

路：一串有先后的不同。光子从激光器到管子，电子从第一级电极到最后一级，是一条路。

土：让路能走、形状能长出来的那片缠在一起的地。这片土，有管子的材料、电压、温度，也有实验室、课题、林小满为什么半夜坐在这里。土不是背景，土在推。

回写：长出来的东西，回头改土、改路。读数记进本子，下一次实验怎么调，就变了。

一锅粥：什么都在，还没分开。光子撞上管子之前，几条路都在。

正在成形：形状冒头，还站不稳。电子一级一级在放大，可还没有落成一个读数。

定型：稳住了，认得出，传得下去。屏幕上的尖峰，本子上的数。定型只是一站，后面还有路。

另外有三个硬词，本书会常用。主体、客体、互动，在王德生博士的体系里叫三个「号位」：客体在一号位，互动在二号位，主体在三号位。号位也不是先摆好的椅子。每一次发生，总有一个号位冒在前头，叫「侧重显影」。看表的那一刻，林小满在前头；光子撞管子的那一刻，互动在前头。

◆ 十四、先清三个误会

第一个误会：「读数不属于粒子，那就是人心造的。」不是。本书不说读数是主观的。读数是事实，发生了就改不了。本书反对的是先在，不是事实。

第二个误会：「这是把佛教搬进物理。」不是。风幡公案在这里只作一个旁证，帮你看清「各守一个位置」的样子。本书的论证全靠物理自己的定理和实验。

第三个误会：「多重网格只是一个比喻。」不全是。第 20 章会说明，多重网格里有一个叫 Galerkin 条件的数学结构，和玻恩规则在形式上是同一种东西。哪些是同构，哪些只是类比，附录三的对照表一条一条标清。

◆ 十五、判词怎样才算错

本书的总判断是一句话：

读数和它的承载者一起发生；玻恩规则是这场发生一层层稳住之后的终点。

一句话要站得住，得先说清它怎样会倒。下面几种情况，只要出现一种，本书就要改。

第一，如果有实验确凿地表明，某个量子属性在测量前就有一个与测量方式无关的确定值，那么「属性不先在」就倒了。贝尔和 Kochen–Specker 的实验，至今都站在本书这边。

第二，如果三路干涉实验测出了一个确凿不为零的「三阶项」，那么本书「每一层都是成对的往上传与往回改」的说法就倒了。第 26 章会讲这个实验。

第三，如果发现一个宏观记录，在它的信息还没有被环境多处复制之前，就已经不可撤回了，那么本书「层层稳住才算事实」的说法就要撤回。第 42 章会把这一条写成登记表。

这三条，都是可以拿实验去碰的。

◆ 十六、随身三问

读这本书，可以随身带三个问题。读到任何一个物理难题，拿出来问一遍。

一问：这个读数，在这里被当成了谁的？客体的，互动的，还是主体的？

二问：哪个号位被当成了先在的？如果它不先在，这道题会变成什么样？

三问：这个差异，是在哪一层稳住的？稳住之前，它在一锅粥里，还是在正在成形？

三个问题问完，很多「量子怪事」会安静下来。

◆ 十七、两行小账

每章末尾，有两行小账。

第一行问：这一处，读数是谁的？

第二行问：先在，还是发生？

拿导论本身试一下。

这一处，读数是谁的？林小满本子上的数，光子、管子、她，谁也不能独占；它和三者一起，在定型的那一刻发生。

先在，还是发生？一百年的各家诠释，都默认属性得先归某一个东西，这是先在。本书说，属性与它的承载者一起发生。

后面每一章，都拿这两行算一笔。

> 带 走 的 话
>
> **一个读数不是谁的私产。它和粒子、仪器、看的人，在稳住的那一刻一起发生。**

> 想 一 想
>
> 1. 你最近一次看体检单、看考试分数，有没有想过：这个数，是你的，是仪器的，还是那张试卷的？
> 2. 拼一幅大拼图时，你是从哪里下手的？为什么不从左上角第一块开始？



第　一　编

亏空：量子力学缺的不是算法，是本体论

导　语

这一编五章，讲一百年的架是怎么吵起来的。第 1 章回到 1920 年代，看「读数是谁的」这个问题怎样被提出、又被搁下。第 2 章看物理自己排除了哪两条路。第 3 章把各家诠释排成一张号位表。第 4 章把康德请进来，看知识论的两处亏空在物理里长什么样。第 5 章说明，为什么这场架在诠释内部吵不完。

一句话：量子力学的算法从来没出过错，出错的是我们默认的那张世界地图。

01

第 1 章

一百年的「谁的属性」之争

◆ 一、你一定有过这样的时刻

你去医院量血压。护士给你绑上袖带，打气，放气，报了一个数：一百四十五。

你有点紧张，说：「我平时没这么高。」护士说：「那休息五分钟，再量一次。」第二次，一百三十二。

哪一个是你的血压?

你会说，第二个更准，第一个是紧张出来的。可紧张也是你的。袖带一勒，你心里一紧，血管一缩，数就上去了。量这件事本身，参与了被量出来的数。

日常生活里，我们很少细想这件事。一百四十五和一百三十二差得不多，平均一下，大致知道就行了。

到了原子的尺度，这件事躲不开了。量的那一下，不是「大致」参与，是从根上参与。一百年前，一群最聪明的物理学家，就在这里吵了起来。

◆ 二、一个好用到吓人的算法

先说一件奇怪的事：吵架的人，用的是同一套算法。

1925 年到 1926 年，不到两年里，海森堡写出了矩阵力学，薛定谔写出了波动方程，狄拉克把两者统一起来。到 1926 年夏天，量子力学的数学骨架就搭好了。

这套算法好用到什么程度？沿着它发展出来的量子电动力学，算出的电子磁矩，和实验对上了小数点后十位以上。今天你手里的手机芯片、医院的核磁共振、超市收银台的激光扫描，背后都是它。一百年来，没有一个实验推翻过它的预言。

可这套算法里，有一步一直让人不安。

薛定谔方程描述的，是波函数 ψ 怎样随时间平滑、连续、可以倒着算地变化。它从不跳。可一到测量，读数总是一个确定的值：电子落在屏幕的这一点，不是那一点；自旋朝上，不是朝下。

从平滑的波，到跳出来的一个点，中间发生了什么？

1926 年，玻恩给了一个办法：别问中间，只算概率。某个读数出现的概率，等于波函数在那里的绝对值的平方。他在论文里只用了一个脚注，就把这件事交代了，后来还凭这项工作拿了 1954 年的诺贝尔奖。

算法从此完整了。问题却留下了：概率是谁的？读数是谁的？

◆ 三、布鲁塞尔的早餐桌

1927 年 10 月，第五届索尔维会议在布鲁塞尔召开。据当时在场的人回忆，正式讨论倒不是最精彩的，最精彩的是早餐桌和晚餐桌。

爱因斯坦每天早上带来一个新设计的思想实验，想说明量子力学不完备：粒子的位置和速度，其实可以同时有确定的值，只是这套理论没写出来。玻恩、海森堡、泡利听完，摇头。玻尔一整天都在琢磨，晚饭时给出反驳。第二天早上，爱因斯坦又带来一个新的。

据说爱因斯坦后来对派斯说过一句话，大意是：你真的相信，月亮只在你看着它的时候才存在吗？〔据传记〕

这句话，是这场架的一边。

另一边是玻尔。他在那一年的科莫演讲里，提出了一个后来叫作「互补」的想法。玻尔的话出了名地难懂，大意是：在原子尺度上，你不能把被观察的对象和观察它的仪器截然分开；一个读数，属于整个实验安排，属于「现象」这个整体。〔核：大意〕

这两句话，各自看都有道理。放在一起，就是一道难题。

爱因斯坦把读数交给客体：月亮在那里，粒子的属性在那里，我们只是去发现。

玻尔把读数交给整体：现象包括仪器，读数不能单独归给粒子。

本书在这里先公道地说一句：两个人都对了一半。爱因斯坦对在，读数是事实，发生了就改不了，它不是人心随便造出来的。玻尔对在，读数没法单独归给粒子，测量参与了读数。

他们各自看见的那一半，后面一百年的人还会反复看见。

◆ 四、海森堡的显微镜：量，就是碰

1927 年春天，比索尔维会议早半年，海森堡发表了不确定性关系。他用一个想象的实验来讲它，后人叫它「海森堡显微镜」。

要看清一个电子在哪里，得用光去照它。光的波长越短，看得越准。可波长越短的光，每个光子带的动量越大，撞上电子时，就把电子撞得越狠。于是你越想把位置看准，就越把速度撞乱。位置和速度，没法同时量得都准。〔核：大意〕

这个讲法很直观，影响也很大。直到今天，很多科普书还这样讲不确定性：量的时候碰了它，所以测不准。

可这个讲法里，藏着一个小小的偷换。

它默认电子本来有一个确定的位置和一个确定的速度，只是我们一碰，就把它碰乱了，于是没法同时知道。这是一个「先在」的讲法：属性在那里，测量把它弄乱了。

玻尔当时就不满意这个讲法。他认为，问题不在于测量碰乱了一个本来确定的东西，而在于「位置」和「速度」这两个概念，本来就不能在同一个实验安排里同时有清楚的意义。〔据研究文献〕

后来的物理，大体站在玻尔这边。不确定性关系，现在一般被理解为量子态本身的性质，和测量手段好不好无关。就算你有一台完美的仪器，一个量子态也没有同时尖锐的位置和动量。第 34 章会细讲。

可海森堡那个显微镜，留下了一个真东西：**量，就是碰**。

经典物理里，量可以做到不碰，或者碰得小到不计。量子物理里，量一定是一次碰，而且这一次碰，参与了读数是什么。

海森堡把这一碰，理解成对一个先在东西的扰动。本书要把这一碰，理解成读数发生的那一场互动。两种理解，差的就是「先在」两个字。

◆ 五、冯·诺依曼的链条

1932 年，冯·诺依曼出了一本书，叫《量子力学的数学基础》。他把测量问题写得比谁都清楚。

他说，量子系统的变化有两种。一种是平滑的，薛定谔方程管着。一种是跳的，测量时发生，波函数突然落成一个确定的状态。

那么，跳是在哪里发生的？

冯·诺依曼做了一件很冷静的事。他把仪器也当成量子系统来算。光子撞上探测器，探测器也进入叠加。探测器连着指针，指针也进入叠加。指针被眼睛看见，视网膜也进入叠加。视网膜连着神经，神经连着大脑，一路连下去。

这是一条链。链上每一环，都可以照样用薛定谔方程算下去，算到哪里都不跳。

冯·诺依曼证明：你可以在这条链的任何一处，划一刀，说「从这里开始，算作读数」；划在哪里，算出的概率都一样。

这是一个漂亮的结果。它也是一个让人不安的结果。

它说明，算法本身不告诉你「跳」发生在哪里。那一刀划在哪儿，是一个物理之外的选择。后来伦敦和鲍尔，再后来维格纳，干脆把刀划到了意识上：直到一个有意识的人看见了，跳才发生。〔据研究文献〕

你看，这里又是那三个位置。刀划在探测器上，读数归互动。刀划在粒子上，读数归客体。刀划在意识上，读数归主体。

冯·诺依曼的链，把这道选择题摆到了桌面上。可他没有告诉你，该选哪一个。

◆ 六、1935 年的两道题

1935 年是这场架的又一个高峰。

那年春天，爱因斯坦和波多尔斯基、罗森发表了一篇四页的论文，后人叫它 EPR。他们设想两个粒子先相互作用，再分开到很远。量了这一个，就能确定地知道那一个，而且不碰那一个。他们说：既然不碰它就能确定地知道，那它的属性在量之前就该在那里。量子力学没写出这个属性，所以它不完备。

同年，玻尔回了一篇同名的论文。他的回答大意是：「不碰它」这个说法有问题，因为整个实验安排决定了哪些说法有意义。〔核：大意〕

也是在 1935 年，薛定谔给爱因斯坦写信讨论 EPR，又在一篇长文里放进了一只猫。一只猫关在箱子里，箱子里有一点放射性物质、一个计数器、一瓶毒药。原子衰变，计数器响，锤子砸碎毒瓶，猫死。照量子力学算，打开箱子之前，原子处在衰变与未衰变的叠加里，于是猫也处在死与活的叠加里。

薛定谔举这个例子，本意是讽刺：这多荒唐。

一只猫，一个月亮，两个远隔的粒子。三道题问的都是同一件事：读数，在量之前在不在？它是谁的？

◆ 七、各家怎样卡住

1935 年之后，物理学界大多选了一条务实的路：别吵了，算吧。后来有人把这种态度叫作「闭嘴，计算」。

这条路走得通，因为算法从不出错。可问题没有消失，只是被收进了抽屉。

到了 1950 年代，抽屉又被拉开。

1952 年，玻姆提出了一套理论：粒子始终有确定的位置，由一个「导航波」引着走。读数本来就在粒子身上，只是我们不知道初始位置。这是把读数交还给客体。

1957 年，埃弗雷特提出：波函数从不跳，每个可能的读数都实现了，观察者也跟着分了岔，每个分支里的观察者只看见一个读数。后来这被叫作多世界诠释。这一家，干脆拒绝回答读数是谁的：都是，又都不是。

再往后，还有关系诠释、QBism、自发塌缩、一致历史，等等。第 3 章会把它们排成一张表。

这里先说一句：每一家都在补一个位置。补客体的，要请出隐藏的变量；补主体的，要把概率交给信念；补互动的，要把属性拆成一对一对的关系。每一家都补得很认真，每一家都留着另外两个位置的缺口。

◆ 八、本书的说法

本书不急着判谁对谁错。先看他们共有的那个默认。

爱因斯坦说读数归客体，玻尔说读数归整体，冯·诺依曼说刀可以划在任何地方，维格纳说刀划在意识上。听起来四个人四个答案，可他们都在回答同一个问题：读数属于哪一个先在的东西?

这个问题本身，就带着默认：先有承载者，再有属性；属性总得挂在某一个已经在那里的东西上。

本书要换的，就是这个问题。

血压计那一下，一百四十五这个数，不是先在你的血管里等着，也不是袖带凭空造出来的，也不是护士心里想出来的。你、袖带、那一下勒紧，和这个数，是一起发生的。换一个时刻、换一次勒紧，发生的是另一个数，另一次「你被量了血压」。

属性和它的承载者，一起发生。

这句话，要到第二编才讲得透。本章只先把它放在这里，像一面小旗。

◆ 九、一个完整的例子：冯·诺依曼的刀，在实验室里

回到林小满的暗室。

光子打在光电倍增管的光阴极上，打出一个电子。电子被电压拉向第一级打拿极，撞出六七个电子。这些电子再被拉向第二级，又各自撞出六七个。如此八九级下去，一个电子变成了几百万个，在阳极上汇成一个电流脉冲，传进示波器，画出一个尖峰。林小满看见了，写下了。

冯·诺依曼的刀，可以划在光阴极上，可以划在第三级打拿极上，可以划在示波器上，可以划在林小满的眼睛上。划在哪里，算出的概率一样。

物理学家通常把刀划在「足够宏观」的地方，比如示波器。这样做很好用。可「足够宏观」是多大？没人说得清。

本书要做的，不是找到那一刀该划在哪儿。本书要说：根本没有那一刀。读数是一级一级稳下来的。每一级都是一层，每一层都在往上传、又往回改。到了某一层，各层对上了，读数就定型了。

划刀的问题，是把一个层层稳住的过程，硬压成一个瞬间。第四编会把这件事讲细。

◆ 十、刀划在哪都一样，那还问什么

读到冯·诺依曼的链，一个学工科的读者也许会松一口气。既然刀划在哪里，算出的概率都一样，那划在哪里就无所谓了。算得对，不就行了？

这句话对了一大半。对一个只要预言统计结果的人来说，那一刀确实可以不管。工程师设计一台激光器，不必先想清楚读数归谁。

可「划在哪里都一样」，还能读出另一层意思。

一刀划下去，刀的这一边算「被量的」，那一边算「去量的」。划法一变，同一级打拿极，一会儿在这边，一会儿在那边。它的身份跟着刀走，算出的概率却纹丝不动。

这说明，概率不靠这条分界线撑着。分界线是人后来加上去的，读数在加之前，就已经一层层稳住了。

打个比方。一场接力赛跑完，你可以说第二棒交接得最好，也可以说第三棒跑得最快，怎么分功都行，成绩不变。成绩不归哪一棒，它是整场接力跑出来的。

冯·诺依曼的结论，本书读作一个提示：刀不承重。既然不承重，就不必去找它最该落在哪里。该问的，是那一场接力本身，怎样一棒一棒跑完。

这正是后面几编要做的事。

林舟在课上讲到这里，常会补一句：「找不到那一刀，不是因为看得不够细，是因为那里本来就没有刀。」

◆ 十一、放回日子里

回到那次量血压。

很多人量出一个高数，第一反应是两种。一种是不信：「仪器不准。」把读数推给仪器。一种是全信：「我高血压了。」把读数全归给自己。

还有第三种态度：这个数，是你、仪器、那一下的勒紧，一起发生出来的。所以下一次，换一个时刻，坐稳五分钟，手臂放平，再量一次。多量几次，看它在哪里稳住。

这不是说读数是假的。读数是真的，每一次都是真的。只是一次读数，还没有稳成你的血压。

身体真的有难处，请找医生。这里只说怎样看一个数。

明天能试的一件事：下一次看到一个让你心里一紧的数字，体检单也好，成绩单也好，银行账单也好，先问一句：这个数，是在什么样的一下里发生的？换一下，它还会是这个数吗？

带走的话

一百年的架，吵的是读数归谁。本书要换掉的，是「读数总得归某一个先在的东西」这个问题本身。

小　账

这一处，读数是谁的？爱因斯坦归客体，玻尔归整体，维格纳归意识；本书说，读数和三者一起发生。

先在，还是发生？四家答案不同，共用一个默认：承载者先在，属性挂上去。

想一想

1. 你有没有被一个数「定性」过？一次考试分数、一次体检指标、一次绩效评分。那个数，是在怎样的一下里发生的？
2. 冯·诺依曼说刀可以划在任何地方。如果你来划，你会划在哪里？为什么？

◆

02

第 2 章

物理自己排除了两条路

◆ 一、你一定有过这样的时刻

你给两个朋友各寄了一只手套。一只左手，一只右手，装进两个一模一样的盒子，随手封好，一个寄到北京，一个寄到广州。

北京的朋友打开盒子，是左手。他立刻知道：广州那只，是右手。

这一点也不神秘。手套在封箱那一刻就分好了，左手一直是左手，右手一直是右手。北京的朋友打开盒子，只是「发现」了早就在那里的事实。

1935 年，爱因斯坦心里想的，大概就是这样一副手套。两个粒子分开了，量了一个就知道另一个，那它们的属性一定在分开前就配好了。量子力学没写出这个「配好」，所以它不完备。

这个想法太自然了。自然到你很难想象，它能被实验推翻。

可它被推翻了。

◆ 二、贝尔的那道算术题

1964 年，在欧洲核子研究中心工作的约翰·贝尔，写了一篇不长的论文。他问了一个问题：如果爱因斯坦是对的，属性在量之前就配好了，而且北京发生的事不能瞬间影响广州，那会怎样?

他发现，这样一来，实验数据就得满足一道算术上限。

用大白话讲是这样。北京和广州各有两种量法，比如手套可以量「左右」，也可以量「颜色深浅」。每次各自随手挑一种量法。把四种搭配下的相关程度加

加减减，凑成一个总数。只要属性是事先配好的，而且两边互不影响，这个总数无论如何不会超过 2。

这道题后来有一个更方便做实验的写法，叫 CHSH 不等式，1969 年提出。量子力学算出来的答案是：可以到 2 倍根号 2，大约 2.83。

两个答案，一个说不超过 2，一个说能到 2.83。哪个对，做实验就知道。

◆ 三、实验一次一次地站在量子力学那边

1972 年，克劳泽在伯克利做了第一批实验。1982 年，阿斯佩在巴黎做了更干净的一批，让两边的量法在光子飞行途中才切换，免得两边「串通」。

结果都超过了 2，和量子力学的预言对得上。

后来几十年，实验越做越严。有人担心探测器漏掉了一些光子，有人担心两边的选择不够随机。2015 年，荷兰代尔夫特、美国国家标准与技术研究院、维也纳三个团队，各自做了号称「无漏洞」的贝尔实验，把能想到的退路都堵上。代尔夫特用的是相隔 1.3 公里的两个电子自旋，另两组用的是纠缠光子。

结果依然超过了上限。

2022 年，阿斯佩、克劳泽、蔡林格因为这一系列实验，分享了诺贝尔物理学奖。

◆ 四、这道算术题到底排除了什么

这里要说得很小心。贝尔不等式被违反，排除的不是「一切先在的属性」，而是两条加在一起的假设：

一，属性在测量前就确定了；

二，远处的测量不能瞬间影响这里。

两条只要去掉一条，数据就能解释。

所以有人选择保住第一条，放掉第二条。第 1 章说过的玻姆理论就是这样：粒子的位置一直是确定的，可它受一个遍布全局的导航波引导，远处一动，这里的导航波就跟着变。玻姆理论和所有实验都对得上，代价是承认一种超距的牵连。

也有人选择放掉第一条：属性在测量前没有确定的值。这是大多数物理学家心里默认的态度。

本书在这里先公道地说：贝尔没有证明「属性不先在」。他证明的是，先在的属性，加上局域性，这两样不能同时要。

可这已经足够惊人了。手套的想法，那个最自然的想法，在它最自然的形式下，死了。

◆ 五、第二道题：不管怎么量都一样吗

贝尔的题要两个分开的粒子。还有一道题，只要一个粒子就够。

1967 年，Kochen 和 Specker 发表了一个定理。它问的是：能不能给一个量子系统的所有可测属性，事先各分配一个确定的值，而且这个值不取决于「你是和哪些别的属性一起测它」？

这句话要拆开讲。

你去菜场买西红柿，称了一斤。不管你同时还量没量它的颜色、量没量它的硬度，这一斤就是一斤。重量不取决于你同时还量了什么。这叫「与测量情境无关」，物理里叫非情境性。

Kochen 和 Specker 证明：在三维以上的量子系统里，做不到。你没法给所有属性预先填好一张值表，又让每个值都和测量情境无关。他们最初用了一百多个方向构造这个矛盾，后来别人找到了更简单的构造。〔核：大意〕

这就是说：在量子系统里，一个属性的值，连「和谁一起被量」都脱不开。

2009 年前后，有实验组用囚禁离子等系统，检验了这种情境性，结果和量子力学一致。

◆ 六、两道题合起来说了什么

把贝尔和 Kochen–Specker 放在一起看。

贝尔说：先在的属性加局域性，不能同时要。

Kochen–Specker 说：先在的属性，又要与测量情境无关，做不到。

两道题像两把钳子，从两边夹住同一个想法：属性先待在客体身上，等着被发现。要保住这个想法，就得付出代价，要么放弃局域，要么承认属性的值要看测量情境。

玻姆理论两样代价都付了。它的粒子位置先在，可别的属性，比如自旋，在玻姆理论里也是看测量安排才定下来的。

所以，就算最坚持「先在」的那一家，也只保住了一个属性的先在。

属性在客体身上先在、等着被发现，这条路，物理自己已经走不通了。

这是第一条路。

◆ 七、一次就够：三个粒子的算术

贝尔的题，要靠大量统计才能看出违反。量一万次，算相关程度，再看总数是不是超过 2。

这让有些人心里留了一点余地：统计嘛，总有误差，总有说不清的地方。

1989 年，格林伯格、霍恩和蔡林格找到了一个更狠的版本，后人叫它 GHZ。第二年，默明把它讲得更简单。〔核：大意〕它不要统计。原则上，一次就够。

它用三个纠缠在一起的粒子。每个粒子可以用两种方式去量，姑且叫「甲」和「乙」，每次量出来的结果，不是正一，就是负一。

量子力学给出四条预言。三条说：如果一个粒子量甲、另外两个量乙，三个结果乘起来，一定是正一，不管哪一个粒子量甲都一样。第四条说：如果三个粒子都量甲，三个结果乘起来，一定是负一。

现在，假设每个粒子在量之前，就带着一张小卡片，上面写好了「甲是多少，乙是多少」。这就是手套的想法。

把前三条预言乘在一起。每个粒子的「乙」都出现了两次，正一乘正一、负一乘负一，都是正一，抵掉了。剩下的，正是三个粒子的「甲」乘在一起。三个正一乘起来，是正一。

所以，只要卡片是事先写好的，三个都量甲时，乘积一定是正一。

量子力学说是负一。

这不是统计上「超过一点」，是符号上正好相反。2000 年，潘建伟等人用光子做了这个实验，结果站在量子力学这边。

事先写好的卡片，在一次测量里就会露馅。

这道算术之所以狠，是因为它把「先在」的想法逼到了最简单的形式：每个属性都有一个写好的值。然后用最简单的乘法，让它自相矛盾。

◆ 八、第二条路：连「有没有东西」都不先在

第一条路说的是属性。还有一条更深的路，说的是承载属性的那个东西。

1976 年，加拿大物理学家 Unruh 算出了一个结果。在量子场论里，真空不是空空如也，而是各种场在最低能量状态下的样子。一个静止或匀速运动的观察者，在真空里探测不到任何粒子。可一个在做匀加速运动的观察者，会探测到一片热辐射，好像身处一个有温度的粒子浴里。

温度和加速度成正比。加速度每秒每秒一米，温度只有大约四乘十的负二十一次方开尔文，小到没法测。要让温度到一开尔文，加速度要大到十的二十次方米每秒平方左右。所以这个效应至今没有被直接测到，只在一些类比系统里有间接的迹象。

可它在理论上是量子场论的标准结果，物理学家很少有人怀疑它。

它说的是什么？说的是：同一片「真空」，对一个观察者是空的，对另一个观察者满是粒子。「这里有几个粒子」，这件事本身，要看是谁、怎么在动。

量子场论的教科书常这样说：粒子这个概念，依赖于观察者。

这比贝尔和 Kochen–Specker 走得更远。那两道题说属性不先在。Unruh 说，连粒子是不是在那里，都不先在。

承载者也不先在。

这是第二条路。

◆ 九、最后一条退路：连选择都写好

讲到这里，有心的读者会想起一条退路。

贝尔的算术题，有一个不太起眼的前提。两边用哪个角度去量，是自由挑的，和那对粒子事先写好的卡片无关。要是这一条也不成立呢？要是连实验员拨哪个旋钮、随机数发生器吐哪个数，都在很久以前和那对粒子一起写好了呢？

这样一来，卡片就能处处对上数据，上限也就拦不住它。这条路，物理学家叫它「超决定论」。

先承认它对的地方。它在逻辑上没法被一次实验彻底排除。实验物理学家也认真对待过它。2017 年，维也纳的一个实验组用银河系里恒星发出的光的颜色来决定测量角度，把「事先写好」的时间往前推了约六百年。结果仍然超过上限。

可这条退路，真走下去，是什么样子？

它要求宇宙在开头那一刻，就把每一对粒子的读数，和每一个实验员此后每一次的手怎么动，配成了一套。配得严丝合缝，正好让贝尔实验的统计，看上去违反了上限。

这是把「先在」推到了头。不光属性先在，连去量的那一下也先在，连挑选量法的那双手也先在。整个世界成了一张早就印好的卡片，实验只是把卡片一行一行念出来。

本书不说它一定错。本书只指出它付的价钱。

一个实验之所以能告诉我们什么，是因为换一种量法，可能出现别的结果。超决定论把这个「可能」拿走了。它保住了先在，代价是让一切实验都失去了说话的资格，也包括当初让人相信「属性先在」的那些实验。

这就好比，为了证明手套是事先配好的，干脆说寄手套的人、拆盒子的人都是配好的。连拆盒子那天下不下雨，也是配好的。话圆上了，手套这件事也就不再需要讨论了。

所以，这条退路恰好说明一件事：要在量子尺度上保住「先在」，得把整个世界都押上去。

押上去之后，世界还剩下什么？剩下一部早就写完的书。翻到哪一页，都是事先印好的。物理学家每天做的事，调光路，换角度，等数据，都成了照着念。

本书选另一条路。量法是真的在挑，读数是真的在发生，所以实验才有话可说。

◆ 十、本书的说法

两条路合起来，就是导论里说的那个结论。

旧的本体论默认：先有东西，东西身上有属性，我们去量，量出来的是早就在那里的属性。

物理自己逼出来的是：属性不是先在客体身上的；连那个客体在不在，都得看互动。

可物理学家通常不往下说了。他们把这些结果叫作「量子世界的奇怪之处」，然后回去算。好比一个人摸到了门把手，门也开了一道缝，他却说「这扇门有点怪」，又把门关上。

本书要推开这扇门。门后是一个简单的想法：属性和承载者，一起发生。

回到那副手套。手套的故事之所以不神秘，是因为手套在日常尺度上，早就稳住了：左手是左手，右手是右手，在封箱前就已经定型。量子的「手套」不一样。在两边测量之前，它还在一锅粥里，左右还没分出来。北京一量，广州那一只就同时定下来，不是信号传了过去，是这一对粒子的「左右」作为一个整体，在这一次测量里一起定型。

第 31 章讲 EPR 时，会把这件事讲完整。

◆ 十一、一个完整的例子：一次贝尔实验的读数是谁的

想象一次贝尔实验。

一个晶体把一束激光里的光子，劈成一对一对纠缠的光子。一只飞向左边的探测站，一只飞向右边的探测站，相距几百米。每个站上，一台随机数发生器在光子到来前的最后一刻，决定用哪个角度去量偏振。

左站读到「通过」，右站读到「没通过」。

这一对读数，是谁的?

不是左边光子独有的，因为单看它，「通过」与否要看右站用了什么角度，统计上才对得上量子力学。也不是右边光子独有的，道理一样。也不是两台随机数发生器的，它们只决定了角度。也不是做实验的人的，他们在控制室里喝咖啡，几个小时后才看数据。

这一对读数，和这一对光子、两个角度、两次测量，一起发生。这一对光子，作为「在这一次测量里被测的那一对」，也是在这一次发生出来的。

物理学家会说：这一对读数服从量子力学的概率分布。没错。本书只补一句：服从概率分布的，不是早就在那里的什么东西；是一次一次的发生，在很多次之后显出的样子。

第 23 章会说明，为什么概率是一次性发生在多次之后显出的样子。

◆ 十二、放回日子里

你有没有遇到过这样的事：同一个同事，在会上沉默寡言，在饭桌上妙语连珠。

你可能会想：哪一个才是「真的他」？是不是他在会上压着自己，饭桌上才露出本性?

这个想法和手套的想法一样：假设有一个先在的「真的他」，场合只是把他遮住或露出来。

还有一种看法：会上的他和饭桌上的他，都是真的他。只是「能说会道」这个属性，和饭桌那种场合、那几个人、那一下的气氛，一起发生了出来。换了场合，发生的就是另一种他。

这不是说人没有稳定的性格。性格是在许多次发生之后，稳住的那一部分。只是，把某一次的样子当成「本来的样子」，就会错过别的样子发生的条件。

明天能试的一件事：找一个你觉得「就是这样的人」，想一想，你见过他的几种场合？有没有一种你还没见过的场合，他可能会是另一个样子？

带 走 的 话

贝尔说属性不先在客体身上，Unruh 说连客体在不在都看互动；物理摸到了门，本书推开它。

小　账

这一处，读数是谁的？一对纠缠光子的读数，不归左边，不归右边，也不归角度；它和这一对光子、两次测量一起发生。

先在，还是发生？手套是先在的，量子手套是发生的；区别在于，量之前它定型了没有。

想 一 想

1. 你身边有没有一样东西，你一直以为它「本来就是那样」，后来发现它要看场合？
2. 如果连「这里有没有粒子」都要看观察者，你还会说「世界先在那里」吗？你会怎样改这句话？

◆

03

第 3 章

风动，幡动，心动：诠释之争是号位之争

◆ 一、你一定有过这样的时刻

家里吵过一次架。孩子期末数学考了六十二分。

妈妈说：「是孩子不用心。」她把分数归给孩子。

爸爸说：「是那张卷子出得太难，全班平均才七十。」他把分数归给卷子。

奶奶说：「是你们两口子天天吵，孩子心里乱。」她把分数归给家里的那股气氛，归给孩子和大人之间的那一层。

三个人都有道理，谁也说服不了谁。吵到最后，孩子自己开口了：「我那天发烧了。」

饭桌安静了一下。可很快又吵起来：发烧是孩子的事，还是天气的事，还是你们没照顾好的事?

这场架的样子，你一定见过。一个结果摆在那里，每个人都去找它的「主人」：孩子、卷子、家里的气氛。找到一个，就以为找到了原因。

量子力学的诠释之争，就是这样一场架，只是吵了一百年，吵架的人都是第一流的头脑。

◆ 二、三个位置

先把三个位置讲清楚。

在王德生博士的 SDE 体系里，任何一次发生，都有三个号位。

一号位是客体：被看、被碰、被量的那一方。手里那块石头，试卷上那道题，光电倍增管前的那个光子。

二号位是互动：那一下碰、那一次量、那一场来回。手捏石头的那一下，孩子和试卷之间那一个半小时，光子撞上光阴极的那一瞬。

三号位是主体：看的人、量的人、那个「我」。

号位不是先摆好的三把椅子，等三样东西各自坐上去。号位是在每一次发生里，一起显出来的。可每一次发生，总有一个号位冒在前头，本书管这叫**侧重显影**。你专心解题时，题目在前头；你突然想起「我好紧张」时，「我」在前头；你写着写着忘了自己、也忘了题目，只剩笔在纸上走，那是互动在前头。

有了这三个号位，你再看量子力学的各家诠释，就会看见一件事：每一家都把读数安放在一个号位上，并且把那个号位当成先在的。

◆ 三、一张号位表

诠释	读数归哪个号位	先在的是什么	代价
玻姆的导航波理论	一号位（客体）	粒子的位置	要接受超距牵连
自发塌缩（GRW 等）	一号位（客体）	一条新的物理定律，让波函数自己随机塌缩	要改动薛定谔方程，加新参数
冯·诺依曼—维格纳	三号位（主体）	意识	说不清什么算意识
QBism	三号位（主体）	用量子力学下注的那个行动者	读数成了行动者的经验，世界难以共享
关系诠释	二号位（互动）	一对一对的关系	不同关系里的事实难以拼成一张图
哥本哈根（玻尔）	二号位，封装成「现象」	经典的仪器语言	仪器为什么是经典的，没有说

诠释	读数归哪个号位	先在的是什么	代价
交易诠释	二号位（互动）	出射波与确认波的握手	要接受逆时间的波
多世界	不选任何号位	整个宇宙的波函数	「读数是什么」这个概念本身变得模糊
一致历史	不选任何号位，选「框架」	一族族彼此相容的历史	用哪个框架，没有物理理由

这张表粗了一些，每一家内部还有分歧，第 27 章和第六编会细说。可大势是清楚的。

◆ 四、守一号位的：月亮在那里

玻姆理论是守客体最坚决的一家。它说，粒子在任何时刻都有一个确定的位置，读数只是让我们知道了它。波函数呢？波函数是一个真实的场，像水流引着一片叶子，引着粒子走。

玻姆理论的数学是严整的，它和标准量子力学给出完全相同的预言。它把爱因斯坦那句「月亮在那里」，至少在位置这件事上，保住了。

本书先说它对在哪儿：它坚持读数是事实，不是人心造出来的；它也坚持世界在没人看的时候照样在走。这两点，本书完全同意。

它付的代价，上一章说过：超距牵连，以及除了位置以外，别的属性仍然要看测量安排。为了保住一个号位的先在，它把另外两个号位，悄悄塞进了导航波里：导航波遍布全局，什么都知道，互动和整体，都藏在它身上了。

自发塌缩理论走的是另一条路。它说，波函数会自己随机地塌缩，粒子越多，塌缩越快。所以一个原子可以长时间处在叠加里，一只猫在一瞬间就塌缩

了。这一家把读数交给一条新的自然律，仍然是客体那边的事。它的好处是可以检验，有实验组在找它预言的微小加热效应。

◆ 五、守三号位的：要有人看

维格纳在 1961 年左右写过一篇文章，后来人叫它「维格纳的朋友」。他设想自己的朋友在实验室里测量，自己在门外。朋友已经看到了读数，可对门外的维格纳来说，朋友加实验室仍在叠加里。

维格纳的结论是：意识的介入，才让波函数塌缩。〔核：大意〕

这一家把读数交给了主体。它的困难很直接：什么算意识？一只猫算不算？一台电脑算不算？宇宙在出现第一个有意识的生命之前，难道一直在叠加里？

近二十年兴起的 QBism，守的也是三号位，但很克制。它不说意识让波函数塌缩，它说：波函数从来就不是世界的一部分，它是一个行动者对未来经验下的赌注；测量是这个行动者对世界的一次行动，读数是他得到的经验。

QBism 对在：它把「谁在用量子力学」这件事摆到了台面上。量子力学从来不是一本没有读者的书。

它的代价是：如果读数只是每个人自己的经验，你和我怎么共享同一个世界？QBism 的回答是靠交流、靠一次次的互相印证。这回答很诚实，可它把「事实」压得很薄。

◆ 六、守二号位的：只有关系

1996 年，罗韦利提出了关系诠释。他说，一个系统的属性，只相对于另一个系统才有意义。光子的偏振，只是「相对于这台探测器」才有值；相对于门外的另一个人，可能还没有值。

这一家把读数交给互动。它的好处是干净：不需要新的定律，不需要意识，不需要分岔的宇宙。

本书和关系诠释最近。本书也说，读数离不开互动。可本书和它有一处分歧，而且这一处是承重的：关系诠释把互动当成先在的基本单位，一对一对关系摆在那里，属性挂在关系上。它把「先在」从客体身上挪到了关系身上，可没有拆掉「先在」本身。

于是它也有它的代价：一个人看到的关系事实，和另一个人看到的关系事实，怎么拼成一个共同的世界？关系诠释近年在这一处做了很多修补，承认有些关系事实会「稳定下来」，成为大家共享的。〔据研究文献〕

「稳定下来」，这四个字，本书会接过去。

玻尔的哥本哈根，也是二号位的一家，但他做了一件特别的事：他把互动整个封装起来，叫它「现象」，然后规定只能用经典仪器的语言来描述现象。这是一个聪明的封装，它让物理学家可以放心地算。可封装就是不让人往里看。仪器为什么是经典的？经典和量子的边界在哪？哥本哈根不回答。

◆ 七、哪个号位都不选的：多世界

还有一家，拒绝站队。

埃弗雷特的多世界说：波函数是唯一的实在，它从不塌缩。每一次测量，世界分成好几支，每个可能的读数在一支里实现。在你这一支里，光子落在左边；在另一支里，另一个你看到它落在右边。

这一家的数学最简洁，什么都不加。它把读数既不交给客体，也不交给主体，也不交给互动，交给一个包含一切的波函数。

它的代价也最大。在多世界里，「这个读数发生了」这句话失去了通常的意思，因为所有读数都发生了。那么，为什么我们看到的频率，恰好是 $|\psi|^2$？既然每个分支都存在，概率指的是什么？这个问题，多世界的支持者已经研究了几十年，第 27 章会讲他们的答案。

本书在第 39 章会说：多世界失去的，不是一个世界，而是「事实」这个概念本身。

◆ 八、另外两家：先选框架，再握一次手

表上还有两家，前面没细讲，后面要用到，这里先交代。

一家叫一致历史，八十年代由格里菲斯提出，后来欧姆内斯、盖尔曼和哈特尔发展了它。〔据研究文献〕它不问「这一刻粒子在哪」，而是问「一整串事件，作为一段历史，能不能被赋予概率」。有些成串的事件，彼此之间不干涉，可以像经典的历史那样谈概率；这样的一族历史，叫一个「框架」。

一致历史的诚实之处，在于它承认：你得先选一个框架，才能谈「发生了什么」；不同的框架，彼此可能不相容。

它的难处也在这里：为什么选这个框架，不选那个？一致历史本身不回答，它说那取决于你想问什么问题。

本书会说，框架不是先选好的，是在发生里稳出来的。第 38 章讲偏好基问题时，再回来谈。

另一家叫交易诠释，1986 年由克拉默提出。它借用了电磁学里一个老想法：一个波，可以往未来传，也可以往过去传。〔核：大意〕

在交易诠释里，光源向未来发出一个「提议波」，探测器收到后，向过去回一个「确认波」。提议和确认在中间握手，握成了的那一对，就是一次真实的交

易，也就是一个读数。提议波的振幅是 ψ，确认波的振幅是 ψ 的共轭，两者相乘，正好是 $|\psi|^2$。

交易诠释对平方的来历，给了一个很形象的讲法：平方，是一来一回两程相乘。本书很看重这个讲法，第 24 和 27 章会和它细细对账。

先说一处根本的不同：交易诠释是一次握手，一来一回，只有一层。本书要说的是很多层，层层往上传，又层层往回改。

◆ 九、本书的说法

把这张表从头看到尾，你会看到风幡公案的样子。

守客体的说：是幡在动。守互动的说：是风在动。守主体的说：是心在动。拒绝站队的说：风、幡、心都在动，各动各的，分成了无数个世界。

每一家都抓住了真实的一部分。客体那边确实有东西在，读数确实是事实。互动确实参与了读数。主体确实在用这套理论，看这块表。

每一家的病，都在同一处：**把自己守的那个号位，当成了先在的**。

本书说，三个号位，都不是先在的。它们和读数一起发生；每一次发生里，总有一个号位冒在前头。动这个属性，不归风，不归幡，不归心；风、幡、心与动，一起发生，互相需要，互为条件。

这就是**三属性纠缠**：客体属性、互动属性、主体属性，三种属性的发生，彼此缠在一起，谁也不能单独成立。

这也解释了，为什么每一家诠释都能自圆其说，又都留下一个补不上的缺口。它守住一个号位，就得把另外两个号位的功能，偷偷塞进自己的号位里。玻姆把整体塞进导航波，QBism 把世界的公共性塞进行动者之间的交流，关系诠

释把共同世界塞进「稳定下来的关系」。塞进去的东西，总会在某个角落露出来。

◆ 十、本书会不会是表上的第十行

看完那张号位表，你也许会问：本书说各家都把一个号位当成先在的，那本书自己呢？是不是只是又多了一家，在表的底下添一行？

这个质疑要认真对待。本书也是一种诠释，它不改方程，不预言新数据，这一点和表上各家一样。

不同在于，它动的是哪一列。

表上九家，换的是第二列：读数归客体，归主体，归互动，或者都不归。第三列「先在的是什么」，每一家都填了一样东西。本书不在第二列里另填一格，它把第三列整列划掉。没有哪一样是先摆在那里的，号位和读数一起发生。

划掉一列，不等于白拿好处。第四列「代价」，本书也得照实填。

本书的代价是欠下一笔账。它要把「一起发生」讲成一个能一步一步看的过程，讲清哪一层稳了、怎样稳的。它还要说出，自己在什么样的实验面前会倒。

这笔账，第四编和第五编来还，第七编来对。一种说法要是还不上这笔账，它就真的只是表上的第十行。

读者可以拿这一条，监督本书后面的每一章。每读完一章，问一句：这一章讲出了哪一层怎样稳住？讲不出，就记它一笔欠账。欠账攒多了，本书就该退回到表上去。

◆ 十一、一个完整的例子：同一次闪光，四种讲法

回到林小满的那次闪光。四家诠释各讲一遍。

玻姆派说：那个光子本来就沿着一条确定的轨道走，撞到了光阴极的那一点。读数，是光子的。

QBism 说：林小满按量子力学给这次闪光下了一个赌注，屏幕上跳出尖峰，是她得到的一次经验。读数，是她的。

关系诠释说：相对于光电倍增管，光子在那一刻有了一个值；相对于还没看屏幕的林小满，这个值还没有。读数，是光子和管子之间的那一对关系的。

多世界说：在林小满这一支里，管子响了；在另一支里，另一个林小满面对一块平静的屏幕。读数，在这一支里。

本书说：在那一刻，光子成了「被测到的那个光子」，管子成了「测到它的那支管子」。林小满成了「看到它的那个人」，尖峰成了「这一次的读数」。四样东西，一起发生。你要问读数是谁的，答案是：它是这一次发生的。

◆ 十二、放回日子里

回到那张六十二分的卷子。

妈妈、爸爸、奶奶，三个人吵的，是三个号位之争。卷子是客体，孩子与卷子之间的一个半小时是互动，孩子的心和家里的气氛是主体那边的事。

如果你在那张饭桌上，可以换一个问法。不问「这分数怪谁」，问：「这六十二分，是在什么样的一场发生里出来的？」

那天孩子发烧，卷子偏难，家里吵过架，孩子在第三道大题上卡了大半天。这些不是互相竞争的原因，而是一起发生的条件，缺了哪一个，可能就不是六十二分。

明天能试的一件事：下一次家里为一个结果吵架时，请每个人说一句「我看到的那一部分」，不许说「怪谁」。三个人说完，往往会发现，大家看到的是同一场发生的三个角落。

带走的话

每一家诠释都守住了一个号位，又把它当成先在的；病不在守错了号位，在于以为号位是先在的。

小　账

这一处，读数是谁的？玻姆归客体，QBism 归主体，关系诠释归互动，多世界不归任何一处；本书说，读数归这一次发生。

先在，还是发生？各家把一个号位当成先在的；本书说，三个号位和读数一起发生。

想一想

1. 你最常把一个结果归到哪个号位上？归给东西本身，归给过程，还是归给人？
2. 你能不能想起一次，自己守住一个号位，结果把另外两个号位的事硬塞了进去？

◆

04

第 4 章

康德留下的空位子

◆ 一、你一定有过这样的时刻

冬天的早上，你在厨房煮面，窗户上蒙了一层水汽。

窗外的楼、树、行人，都成了一团团晃动的影子。你用手抹开一块，外面又清楚了。你心里明白：水汽改的是你看到的样子，不是外面那棵树。

可要是那层水汽，你永远抹不掉呢?

你看到的一切都隔着它。你能说的，只是「隔着这层水汽，树是这样的」。至于玻璃外面的树「本来」什么样，你永远没法知道。

两百多年前，康德讲的大致就是这件事。只不过他说的那层隔着的东西，不是水汽，而是人认识世界的整套方式：时间、空间、因果。我们只能隔着它们看世界，看到的叫「现象」。现象背后那个本来的东西，他叫它「物自体」。〔核：大意〕

本书不打算重讲康德。本章只借他一样东西：那个空位子。

◆ 二、知识是一个函数

先把本书的一个式子摆出来。王德生博士在 2026 年 8 月整理三视角与 321 智慧的来路时，写下了这样一句：

知识 ＝ 现象的特征 ＝ F（主体，客体，互动）

用大白话讲：我们知道的东西，是现象显出的特征；而现象的特征，是主体、客体和两者之间的互动，一起算出来的。

这个式子，日常生活里很好懂。同一碗面，饿了的人吃着香，吃撑了的人吃着腻，这是主体变了。同一个人，吃一碗煮了三分钟的和一碗煮了八分钟的，口感不同，这是客体变了。同一碗面、同一个人，就着蒜吃和空口吃，又不一样，这是互动变了。

量子力学的测量，也落在这个式子上。读数是一个现象的特征；它取决于被测的系统、测量的方式、和看读数的那一方。物理学家说得更精确：取决于量子态、测量所选的基、和测量本身。

式子本身不假。量子力学、日常生活、尼采说的「没有事实，只有解释」，三处都指向这三个元素的函数。

问题出在式子的变量上。

◆ 三、第一处亏空：客体是什么

式子里有一个变量叫「客体」。它是什么？

康德走到这一步，看得很清楚。如果知识是现象的特征，那么现象总得有个来源，总得有个什么东西在那里，让现象显出来。这个来源，就是物自体。

可康德紧接着说：物自体不可知。我们能知道的，只是它透过我们的认识方式显出来的样子。

这是一个诚实的结论，也是一个奇怪的结论。他承认那里有一个位子，又说这个位子上坐的是什么，我们永远不知道。

用本书的话说：**亏空被封住了，却没有被补上。**

一百年后，量子力学在这个位子上摸到了真东西。贝尔和 Kochen–Specker 告诉我们：那个位子上，不是一个属性齐备、等着被看的东西。Unruh 告诉我们：连那里有没有一个东西，都要看谁在看、怎么在看。

换句话说，量子力学替康德回答了一半：现象的来源者，不是一个先在的客体。

可量子力学没有往下说：那是什么。它把这个问题叫作「诠释问题」，交给了哲学。哲学又把它交回给物理。来回推了一百年。

◆ 四、尼采的那一步

在康德和量子力学之间，还有一个人走过这条路，他是尼采。

尼采说，没有事实，只有解释；不同的视角，看出不同的世界。〔核：大意〕他用视角，解释了为什么同一个世界在不同的人眼里不一样。

这一步很重要。它把式子里的「主体」激活了：知识不唯一，因为主体的视角不唯一。

可尼采没有动「客体」那个变量。他让视角承担了一切不同，客体就被原封不动地留在了那里，还是那个被各种视角看的东西。

王德生博士在 2026 年 8 月回看自己从三视角到 321 智慧的这段路时，说了一句很重的话：尼采式的答案，「听起来很对，其实是错误的」。照它走一遍，主体从不同角度和客体互动、发生矛盾，得出不同的特征。你就会撞上一个没有地方安放的问题：这份知识是谁的？客体的？主体的？还是那场互动的？〔据作者口述〕

这正是林小满半夜问的那一句。

尼采往前走了一步，可他走的是主体那一侧。客体那一侧的空位子，他没碰。

◆ 五、第二处亏空：主客真的先于互动吗

式子还有一处更深的亏空。它藏在写法里。

F（主体，客体，互动）。主体和客体被写成了自变量，互动被写成了第三个自变量。这种写法默认了：主体和客体，先于互动而在。先有一个看的人，先有一个被看的东西，然后它们碰上了。

这个默认，从来没有被证明过。

日常生活里它不碍事，因为日常的东西早就稳住了。你早上起床，你还是你，杯子还是杯子。可量子力学里，客体在不在要看互动，第 2 章已经说过。主体这一边呢？

近几十年的哲学，做了一件事：把主体打碎。拉康说，「我」是在镜子前、在别人的目光里一次次被构成的。福柯说，「人」这个概念，是近两百年的知识体制造出来的。神经科学说，大脑里找不到一个总指挥的位置。〔据研究文献〕本系列第 156 号《主体发生学的开启》讲过这一段。

于是，式子的两个自变量同时失去了依托。客体那一头，物自体不可知，量子力学说它不先在。主体那一头，哲学和脑科学说它也不先在。

两个自变量都悬空了，函数还怎么算？

这就是知识论的危机：不是哪一条知识错了，是装知识的那个式子，地基松了。

◆ 六、量子力学为什么偏偏撞在这里

你可能会问：这个危机，在日常生活里不碍事，为什么偏偏在量子力学里炸开？

因为量子力学是第一门把「量」这件事写进方程的科学。

经典物理里，测量是透明的。你量一根木棒的长度，尺子贴上去，读出一米，木棒本来就是一米。测量对木棒没有影响，至少可以做到影响小到不计。所以经典物理可以安安心心地默认：属性在客体身上，测量只是读出来。

量子力学不行。测量是方程里的一步，测量方式一变，读数的分布就变。物理学家没法再假装测量是透明的。式子里那个「互动」变量，从一个可以忽略的小量，变成了主角。

互动一旦成了主角，主体和客体是不是先于互动，这个问题就再也躲不开了。

所以，量子力学不是偶然撞上了哲学问题。它是第一门被迫把知识的式子摊开来算的科学。

◆ 七、两个电子，分不出谁是谁

量子力学里，有一件事比 Unruh 效应更日常，几乎每本教科书都写，却很少有人从本体论上去想它：同一种粒子，彼此分不出谁是谁。

两个台球，长得再像，你也可以在其中一个上点一个记号，盯着它滚。滚完之后，你知道哪个是哪个。就算不点记号，原则上你也可以一路盯着它们的轨迹，台球各有各的来路。

两个电子不行。量子力学规定：同一种粒子，交换一下，物理状态要么完全不变，要么只是整体变一个符号。电子属于后一种，叫费米子；光子属于前一种，叫玻色子。

这条规定，不是哲学，是实验逼出来的。它解释了元素周期表为什么长成那样：两个电子不能挤进同一个状态，这就是泡利不相容原理，原子的电子才会一层一层地排开。它也解释了激光为什么能那样整齐：光子偏爱挤进同一个状态。

可这条规定也在说一件奇怪的事：「这个电子」和「那个电子」，在量子力学里没有一个先在的身份。你没法问「刚才在左边的那一个，现在跑到哪去了」。两个电子散射之后，问哪一个是原来左边的那一个，这个问题没有答案。〔据研究文献〕

哲学家为这件事吵过很多年：量子粒子有没有个体性？有人说，它们根本没有个体性；有人说，它们有一种很弱的、靠关系才能分辨的个体性。〔据研究文献〕

本书在这里只取一个最朴素的结论：**「同一个粒子」这件事，不是先在的。**

当一个电子在探测器上留下一个点，这个点是「这一次被测到的那个电子」。它的「这一个」，是在这一次测量里发生的。笛卡尔的蜡，在量子力学里，连「同一块」都要小心说。

◆ 八、一位老中医的「同一个病人」

前面讲两个电子分不出谁是谁，说「同一个粒子」不是先在的。这句话放到人身上，会更扎手。

邵大夫六十三岁，在县城开了三十年中医诊所。有个老病人姓胡，隔两三个月来一趟。

邵大夫说过一句话：「老胡每回来，都是一个新病人。」

这话不是说他记不住老胡。他记得很清楚，老胡怕冷，舌苔常年偏白，左手的脉比右手沉。他说的是，每一回搭上脉，他都不先认定这还是上回那个老胡。他重新看，重新摸，重新问。摸着摸着，上回的那几处差异又一处一处冒出来，稳住了，他才说：「还是老样子。」

有一回，冒出来的不一样。左手的脉浮了起来，舌苔变黄，人也瘦了一圈。邵大夫让他去医院查一查，查出了一个早期的毛病。

邵大夫要是先认定「这是老胡，老毛病」，搭脉就成了照着旧档案对答案。那一回的不一样，很可能就被当成了这次没摸准。

「同一个病人」，在邵大夫手下，是每一回重新稳出来的。稳出来了，叫老样子；稳不出来，就是新情况。

这里有一个分寸。邵大夫不是每回都从零开始，他手里有三十年的积累，知道该往哪里摸。积累是粗层，搭脉是细层。粗层指方向，细层说了算。

量子力学里的电子，没有档案，每一次测量都在重新稳出「这一个」。人有档案，可档案也只是许多次稳住之后留下的账，不能代替这一次。

身体或心里的难处真的大了，请找医生或心理咨询师。

◆ 九、本书的说法

本书对这两处亏空，各给一个回答。

第一处，客体是什么？客体不是一个先在的东西。客体是一号位在某一次发生里冒在前头，是一号位的侧重显影。光子作为「被测的那个光子」，是在测量这一次发生里显出来的。

第二处，主客先于互动吗？不先于。主体、客体、互动，三个号位都和属性一起发生。

这样一改，式子就要重写。它不再是「三个先在的东西，一起算出一个特征」，而是：**一次发生里，承载者和属性一起出现。**　承载者是哪一个号位冒在前头，属性是哪一种差异稳住了，两件事中间是一个乘号，不是先后。

这就是第二编要讲的实体属性发生学。

康德留下的那个空位子，本书不往上放东西。本书说：那个位子本来就不该先摆在那里。

◆ 十、一个完整的例子：一块蜡

笛卡尔讲过一块蜡。刚从蜂巢里取出来，它有蜂蜜的香味、花的颜色，敲一下会响。把它放到火边，香味散了，颜色变了，软了，敲也不响了。他问：这还是同一块蜡吗？他的回答是，是；我们靠的不是感官，而是心灵的判断，认出它还是那块蜡。〔核：大意〕

本书换一种问法：「同一块蜡」，是什么时候发生的？

它不是先在那里的。蜂巢里的蜡和火边的蜡，是两次不同的发生，各有各的特征：香、硬、响；软、淡、哑。把它们认成「同一块」，是又一次发生。一个人在两次碰触之间，让某些差异稳住了，比如「这是我刚才拿着的那个」。这个稳住的差异，就成了「同一块蜡」这个特征。

笛卡尔说靠心灵判断，对了一半：主体参与了。可他把「同一块蜡」当成了心灵发现的东西，好像它早就在那里，等着心灵去认。本书说，它是在主体、蜡和那几次碰触之间，一起发生出来的。

量子力学里的「同一个粒子」，也是这样。第 1 章说过，Unruh 效应让「有没有粒子」都要看观察者。「同一个光子从激光器飞到管子」这句话，在日常语言里自然得不能再自然，在量子力学里，却要小心地说。

◆ 十一、删掉物自体，会不会只剩幻象

读到这里，熟悉哲学史的读者会皱眉。

康德留着物自体，不是因为他糊涂。他留着它，是要守住一条底线：现象总得是「某物」的现象。要是背后什么都没有，现象就成了凭空的影子，世界就塌成了梦。后来有些哲学家删掉了物自体，一路滑到「世界只是我的表象」。本书说那个位子不该先摆在那里，会不会也滑下去？

这个担心是对的，而且是要害。

本书的回答分两步。

第一步：本书删掉的是一个「先在的来源者」，不是「来源」这件事。读数不是凭空冒出来的。没有光子打在光阴极上，没有电压，没有那支管子，什么尖峰都不会有。读数有来处，来处是一场正在发生的互动。

第二步：防住幻象的，不是背后一个不可知的东西，而是层层对上。林小满的读数，示波器认，本子认，隔壁组用另一台仪器测，也认。一年后换一个学生来做，还认。一个读数被这么多层接住、对上，它就不是谁的梦。

康德用一个够不着的物自体，给现象托底。本书用一层层的回写和对上，给读数托底。前者在现象背后，后者在现象之中。

你会问：靠对上托底，靠得住吗？大家一起对错了呢？

会有这种时候。一整个领域，几十年都把某个结论当成事实，后来被推翻。可推翻它的，也不是谁忽然看见了物自体，是新的一层数据和旧的几层对不上了，于是一路改回去。

所以，托底的东西不必躲在背后、永远不可知。它就在这一圈一圈的对上与对不上里，看得见，也查得到。

第 21 章讲收敛，第 22 章讲冗余，会把这件事讲细：客观，是冗余回写出来的。

◆ 十二、放回日子里

你有没有过这样的经验：你以为自己很了解一个人，后来发现，你了解的只是他在你面前的样子。

这是康德式的发现：你只认得现象，物自体你够不着。很多人在这里会生出一种怅惘：原来我永远不能真正了解另一个人。

本书给一个不那么怅惘的看法。你了解的那个他，不是物自体的一个影子，而是你们之间一次次发生出来的那个他。它不假，它就是你们的关系里真实存在的那个人。他在别人面前，发生的是另一个他，也同样真实。

所以，想多了解一个人，不必去找一个「真正的他」。可以换一个场合，换一种相处，看看会发生什么样的他。

明天能试的一件事：和一个你以为很熟的人，做一件你们从没一起做过的事，比如一起修个东西，一起去一个陌生的地方。看看会冒出一个什么样的他，和一个什么样的你。

带 走 的 话

康德封住了物自体的位子，尼采激活了主体却没碰客体；本书说，那个位子本来就不该先摆在那里。

小　账

这一处，读数是谁的？在知识的式子里，读数是现象的特征；本书说，它和承载它的号位一起发生，不需要一个物自体来托底。

先在，还是发生？康德的物自体、尼采的视角，各留了一个先在的变量；本书把两个都改成了发生。

想 一 想

1. 你有没有一件东西，一直觉得它「本来就是那样」，后来发现，你只认识它在你面前的样子？
2. 如果主体也不是先在的，那么「我认识世界」这句话，你会怎样改写？

◆

05

第 5 章

为什么这场架在诠释内部吵不完

◆ 一、你一定有过这样的时刻

小区里两家人为一面墙吵了三年。

墙在两家院子中间，裂了一道缝。东家说墙是西家的，该西家修。西家说墙是东家的，该东家修。物业翻出图纸，图纸上只画了一道线，没写归谁。请了律师，律师说各有各的理。

三年里，两家都请人测过墙，测出来的东西都一样：墙高一米八，裂缝长四十公分，地基往东边沉了两厘米。数据从来没有分歧。分歧在于：这面墙是谁的?

后来一个老师傅来看了一眼，说：「这墙是你们两家当年一起砌的吧？它不归谁，它就是你们两家之间的那道墙。修，得两家一起修。」

两家人愣了半天。他们吵了三年，从没想过「不归谁」也是一个答案。

◆ 二、一百年，数据从没分歧

量子力学的诠释之争，有一个很少被拿出来讲的特点：各家诠释，对所有已经做过的实验，给出完全一样的预言。

玻姆理论和哥本哈根算出的干涉条纹一模一样。多世界和 QBism 算出的贝尔实验统计一模一样。关系诠释和交易诠释算出的原子光谱一模一样。

只有少数例外，比如自发塌缩理论改动了薛定谔方程，会预言一点点额外的热，那是可以检验的。可主流的几家，在数据上分不出高低。

这就像那面墙：测出来的数据都一样，分歧在「归谁」。

既然数据分不出高低，靠什么吵出一个结果？物理学家的老办法是：做一个新实验，让两家给出不同的预言，看数据站在哪边。这一招在诠释问题上失灵了，因为诠释本来就是「对同样的数据，讲不同的故事」。

◆ 三、一百年后的一次民意调查

2025 年，是海森堡写出矩阵力学的一百年。《自然》杂志为此做了一次调查，向一万五千多位研究者发了问卷，收回一千一百多份。

最受欢迎的是哥本哈根诠释，约 36%。多世界约 15%。玻姆理论约 7%。把量子态看成知识或信念的那一类诠释，包括 QBism，加起来约 17%，比 2016 年一次调查时高了不少。

最耐人寻味的一个数是：只有大约 24% 的人说，他们认为自己偏好的那个诠释是真的。其余的人说，它好用，或者在几个选择里毛病最少。

一百年了。第一流的头脑，对自己天天用的理论在说什么，四分之三的人没有把握。

这不是物理学家的失职。这是问题本身的结构使然。

◆ 四、结构一：每家都守一个号位

第 3 章说过，每一家诠释都把读数安放在一个号位上，并且把那个号位当成先在的。

这件事有一个后果：每一家都必须把另外两个号位的工作，塞进自己守的那个号位里。

玻姆守客体，就得让导航波包办整体的联系，于是导航波要遍布全宇宙、瞬间响应。QBism 守主体，就得让行动者之间的交流包办世界的公共性，于是「我们共享一个世界」要靠一次次的互相印证来撑。关系诠释守互动，就得让「稳定下来的关系」包办共同的事实，于是要解释关系为什么会稳定下来。

塞进去的东西，就是这一家的软肋。另一家看得一清二楚，抓住就打。被打的一方修补一下，修补的地方又成了新的软肋。

这是一场可以无限吵下去的攻防，因为每一家都在用自己守的号位，去打对方没守好的号位。

◆ 五、结构二：各家共用一个默认

更深的一层是：各家吵得再凶，都共用着一个默认。

这个默认就是：**读数总得属于某一个先在的东西。**

玻姆说它属于粒子，QBism 说它属于行动者，关系诠释说它属于一对关系，多世界说它属于整个宇宙波函数的某一支。他们给出的东西不同，可都在回答「属于哪一个先在的东西」这道题。

一道题，如果它的出题方式本身带着毛病，那么所有答案都会带着同一种毛病。只在答案之间比来比去，是比不出结果的。

这就是为什么，这场架在诠释内部吵不完。要走出来，得退一步，去看题目本身。

◆ 六、结构三：缺的是一个「怎么来」

退一步看，各家诠释都在讲读数「是什么」、「归谁」，很少讲读数「怎么来」。

多世界是一个例外，它讲了：波函数平滑地演化，分出很多支。可它讲的「来」，是从一个包含一切的总波函数分出来，仍是从一个先在的总体出发。

退相干理论也讲了一部分「怎么来」。它说，系统和环境纠缠在一起，叠加的干涉项会在极短的时间里变得看不见，系统看上去就像落在了一个确定的状态里。这是一个了不起的成果，第 15 章会细讲。可退相干的研究者自己承认：它解释了为什么看不到叠加，没解释为什么只看到一个结果，也没解释为什么是那个概率。〔据研究文献〕

也就是说，在最关键的那一步，一个读数从一锅粥里稳住的那一步，物理学一直缺一个「怎么来」的讲法。

本书管这个讲法叫**发生学**。

◆ 七、发现学与发生学

这两个词，王德生博士用了很多年。

发现学的问法是：那里本来有什么？我们怎样把它找出来？它的前提是，东西先在，属性先在，我们去发现。

发生学的问法是：它是怎样发生出来的？在什么条件下，经过哪些步，稳成了现在这个样子？它的前提是，东西和属性都在发生里出现。

经典物理是发现学的胜利。木棒有长度，行星有轨道，我们去量，去算，去发现。在稳住了的世界里，发现学好用得很，而且在很长的时间里，它都是对

的。本书不反对发现学。本书只说：发现学是发生学在稳住之后的样子。东西稳住了，你就可以把它当作先在的来处理，处理得又快又准。

量子力学偏偏把我们带到了「还没稳住」的地方。在那里，发现学的前提失效了，属性不在那里等你。可物理学家仍然用发现学的问法去问：读数本来属于谁？于是怎么问都问不出结果。

诠释之争吵不完，是因为它在用发现学的问法，去问一个只有发生学才答得了的问题。

◆ 八、「闭嘴，计算」的功与过

1989 年，物理学家默明在一篇专栏里写了一句话，后来流传极广：如果要我用一句话概括哥本哈根诠释，那就是「闭嘴，计算」。〔核：大意〕这句话常被安到费曼头上，其实出自默明。

这句话有一层自嘲，也有一层真实的智慧。

它的功劳很大。二十世纪的物理学家，没有被诠释问题拖住。他们闭上嘴，去算原子光谱、去算半导体、去算核反应、去算超导。晶体管、激光、核磁共振，都是在这种态度下做出来的。如果每个人都先要把「读数是谁的」想清楚才肯动笔，今天你手里可能还没有手机。

本书完全承认这份功劳。在稳住了的世界里，发现学的问法又快又准，「闭嘴，计算」就是发现学在量子时代最务实的样子。

它的过错，是在关键的地方，让问题停住了。

一个学物理的年轻人，第一次问老师「测量时到底发生了什么」，常常会听到一句：这个问题没意义，算就是了。问的人多半不再问了。一代一代下来，问题没有被回答，而是被训练成了不问。

到了今天，问题又自己回来了。量子计算机要在叠加里保住信息，测量什么时候发生、怎样发生，成了工程上的硬问题。宏观叠加的实验，把「猫」越做越大，经典和量子的边界在哪，成了实验室里天天碰的问题。

「闭嘴」已经闭不住了。

本书的态度是：继续算，也开始问。只是问的方式要换，不问「属于谁」，问「怎样稳住」。

◆ 九、既然预言都一样，换题有什么用

读到这里，一个务实的读者会问：你说各家数据上分不出高低，那你这一家呢？本书也不改方程，也不预言新数据，换了一道题，答案还是那些数。这不就是又一种讲故事吗？

这个质疑很硬，本书先认下它对的部分。在已经做过的实验上，本书的讲法和各家一样，挑不出错，也赢不了谁。

可换题，换的不只是讲法。它换的是你接下来会去看哪里。

问「读数属于谁」，你的眼睛会盯着两头：粒子那一头，看的人那一头。中间那一段，从光子打上光阴极到写下一个数，只是一根传话的管子，没什么可看的。

问「读数怎样一层层稳住」，你的眼睛会落到中间。哪一层先稳，哪一层后稳，层与层之间怎么传、怎么改，稳住要多久，层数多了会怎样。这些都是可以动手去量的东西。

换句话说，题目决定了实验室里哪一段值得花钱。

物理学史上有过这样的事。原子论在很长的时间里，被不少人看成一种讲法：用不用它，化学反应的配比都算得出来。后来有人顺着「原子真的在那里」这道题去问，问出了布朗运动该怎样抖、抖多大。再拿显微镜去量，对上了。〔核：大意〕一种讲法，因为换了一道题，长出了新的可量之处。

本书不敢说自己会有这样的运气。本书只说，换题之后，有几处地方可以拿去碰实验。导论最后说过的三条死法，就在这里。第一条，属性在测量前有没有与量法无关的确定值。第二条，三路干涉有没有确凿不为零的三阶项。第三条，宏观记录能不能在被环境多处复制之前，就已经撤不回来。

这三条，问「读数归谁」的人，多半不会想到去问。

所以，换题的用处，不在于马上给出一个新数，而在于让人去看一个一直被跳过的地方。一个吵不完的问题，往往不是答案不够好，是眼睛一直看错了地方。

◆ 十、本书的说法

所以，本书不打算加入这场架，去为哪一家站台。

本书要做的，是换一道题。不问「读数属于哪个先在的东西」，问「读数和它的承载者，是怎样一起发生出来的」。

换了题，各家的成果都可以留下，只是换一个位置。

玻姆看到的确定轨道，是稳住之后的样子。QBism 看到的行动者，是三号位在发生里冒到了前头。关系诠释看到的关系，是二号位的发生。多世界看到的分支结构，是一锅粥里同时在走的几条路。退相干看到的环境纠缠，是让一锅粥走向定型的那片土。

每一家看到的，都是真实的一角。病只在于，把那一角当成了先在的整体。

就像那位老师傅对两家人说的：墙不归谁，它是你们之间的那道墙。

◆ 十一、一个完整的例子：一次读数，用发现学和发生学各问一遍

还是林小满那次闪光。

发现学这样问：这个读数，在光子撞上管子之前，是不是已经在那里了？如果是，它在哪里？如果不是，它是在哪一刻被谁造出来的？

问到这里就卡住了。说已经在那里，贝尔不答应。说是在某一刻被造出来，又得找那一刀，冯·诺依曼说那一刀划在哪里都一样，等于没有答案。

发生学这样问：从光子出发，到林小满写下那个数，中间经过了哪几层？每一层上，有哪些差异在乱撞，哪些差异稳住了？各层是怎样对上的？

光阴极上，一个电子被打出来，这是第一层的一次差异。第一级打拿极上，几个电子被撞出来，这一层的差异被放大了一点，也稳了一点。往后每一级，差异都被放大、被稳住一些。到阳极上，几百万个电子汇成一个脉冲，这个差异已经很稳了。示波器上一个尖峰，林小满眼里一个亮点，她手下一个数，一层比一层稳。

这样问，就没有那一刀要找了。读数是一层一层稳下来的，不是在某一刻被造出来的。

这样问，也不需要那个先在的主人了。光子、管子、林小满，都在这个一层层稳住的过程里，成了这一次测量的参与者。

发生学的问法，会让问题变得具体。它不再是「属于谁」这个吵不完的问题，而是「怎样一层层稳住」这个可以细细去讲的问题。后面几编，就是在细细地讲。

◆ 十二、物业办公室里的一张时间表

再回到那面墙。

老师傅说完「两家一起修」，事情并没有就此完了。东家的赵阿姨六十出头，退休前是会计。她不服：「一起修可以，钱怎么分？总不能一家一半吧，裂缝是往东边沉的。」

这是一句很在理的话。说墙不归谁，不等于说两家什么都一样。

物业的小吴二十六岁，刚来一年。他没再去翻图纸，翻的是这三年的维修记录。哪一年西家在墙根种了一排竹子，哪一年东家在院里挖了一个鱼池。哪一年夏天雨水多，墙脚泡了半个月。他把这些事按年份排在一张纸上。

排完一看，两家人都沉默了。竹根往墙下钻，是一回事；鱼池漏水泡软了东边的地基，是另一回事；那个多雨的夏天，谁也管不着。裂缝是这几件事一起长出来的。

小吴的办法，就是发生学的办法。他不问墙归谁，问裂缝是怎样一步步长成今天这样的。问清了，钱怎么分也就有了依据：竹子的那一份，鱼池的那一份，雨水的那一份，摊开来算。

这说明，发生学不是和稀泥。它不说「都有责任，算了吧」，它让每一份责任落在它真正起作用的那一段路上。

读数也一样。说读数不归哪一个先在的东西，不等于说粒子、仪器、看的人可以随便替换。哪一层出了什么力，一层一层都查得到。

◆ 十三、放回日子里

你在单位里，大概见过这样的会。一个项目没做成，开复盘会。产品说是技术拖了，技术说是需求变了，销售说是市场不行，老板说是团队不够拼。

每个人都说得有数据，有道理。会开了三个小时，谁也没说服谁，最后不了了之。

这是发现学的复盘：失败本来属于谁？

发生学的复盘，换一个问法：这个项目，是怎样一步一步走到没做成的？在哪几个节点上，本来还在一锅粥里的东西，稳成了一个后来改不动的样子？

这样问，人们就不用急着护住自己那个号位了。大家一起往回看那条路，往往会发现，没做成这件事，是在好几个人、好几个环节之间，一起长出来的。

明天能试的一件事：下一次开复盘会，在白板上画一条时间线，只许往上贴「那一天发生了什么」，不许贴「这是谁的问题」。贴满了，再看。

带 走 的 话

诠释之争吵不完，是因为它用发现学的问法，去问一个只有发生学才答得了的问题。

小　账

这一处，读数是谁的？各家都在回答「属于哪个先在的东西」；本书换题，问读数和承载者怎样一起发生。

先在，还是发生？发现学默认先在，在稳住的世界里好用；量子力学把我们带到了还没稳住的地方，这里要用发生学。

想 一 想

1. 你经历过的争吵里，有没有一次，大家其实共用一个默认，所以怎么吵都吵不出结果？
2. 你能不能挑一件你身边「本来就是那样」的事，试着用发生学问一遍：它是怎样一层层稳成这个样子的？

◆

第 一 编 · 总判断

量子力学的算法从来没错；错的是那道题——读数属于哪一个先在的东西。换成发生学的题，一百年的架就有了出口。

第二编搭底盘：本书拿什么去答这道新题。



第　二　编

底盘：读数和它的主人一起发生

导　语

这一编五章，搭本书的底盘。第 6 章讲一个乘号：承载者发生，乘以属性发生，中间没有先后。第 7 章讲三个号位，和每一次发生里总有一个冒在前头。第 8 章讲属性是什么：是哪一种差异偏重着稳了下来。第 9 章讲三种状态：一锅粥、正在成形、定型，以及量它们的一个数。第 10 章讲特征律：一个差异，怎样从乱撞里稳成一个特征。

一句话：属性不挂在一个现成的东西上；东西和属性，在同一次稳住里一起出现。

06

第 6 章

一个乘号：承载者 × 属性

◆ 一、你一定有过这样的时刻

周末，林舟去学校值班。同事老周泡了一壶新茶，给他倒了一杯。

林舟喝了一口，皱了皱眉：「有点苦。」

老周自己喝了一口：「不苦啊，回甘。」

两个人对着一壶茶，一个说苦，一个说甜。

你会怎么判？说茶本来是苦的，老周舌头不灵？说茶本来是甜的，林舟不会喝？还是说，苦和甜都是各人心里的感觉，跟茶无关？

老周又给林舟续了一杯，说：「你刚吃了糖吧？」林舟想起来，进门时吃了学生塞给他的一颗奶糖。

半小时后，林舟再喝，果然不那么苦了。

这一口茶的「苦」，是谁的？

◆ 二、最常见的回答：属性挂在东西上

最常见的回答是这样的：茶有一种成分，叫茶多酚，是它让茶发苦。这是茶的属性。林舟刚吃了糖，舌头对苦更敏感了，这是林舟的状态。两者一碰，林舟尝到了苦。

这个回答很好，大部分时候也够用。它背后的图景是：先有茶，茶身上有成分；先有林舟，林舟身上有舌头和状态；两样东西碰一下，碰出一个感觉。

本书把这种图景叫「挂钩式」：东西是挂钩，属性是挂在钩上的衣服。苦挂在茶上，敏感挂在舌头上，感觉是两件衣服碰在一起的声音。

挂钩式的好处是好记、好用。厨房里、药房里、实验室里，我们天天都在用它，用得又快又准。

它的毛病，在于它假定了钩子先在。茶先在，林舟先在，然后才有那一口。

第 2 章和第 4 章已经说过，在量子尺度上，这个假定不成立。属性不先在客体身上，连「这一个粒子」都不先在。钩子没有了，衣服挂在哪里？

◆ 三、换一种图景：一个乘号

本书给出另一种图景。

一次发生里，有两件事同时出现。

一件是**承载者的发生**：在这一次里，是哪一个号位冒到了前头，成了「有这个属性的那个东西」。

一件是**属性的发生**：在这一次里，是哪一种差异稳住了，落在了哪一块地上。

两件事之间，是一个乘号，不是先后。

写成一个式子，大致是这样：

> **这一次的「某某有某属性」 = 承载者发生 × 属性发生**

乘号的意思是：缺了任何一边，乘积都是零。没有承载者冒出来，属性无处安放，它就只是一团没主的差异；没有属性稳住，承载者也冒不出来，它就只是一锅粥里的一个可能。

属性不是先发生、后找主人；主人也不是先在那里、等属性挂上来。两件事，同时成。

回到那口茶。林舟说「这茶苦」的那一刻，发生了两件事。一件是「这茶」冒到了前头，成了有苦味的那个东西；另一件是「苦」这个差异，在茶、舌头和那一口之间稳住了。两件事一起，才有「这茶苦」。

半小时后，糖味退了，同一壶茶，再喝一口。这一次，「苦」没有稳住，稳住的是「回甘」。「这茶」也照样冒在前头，可它这一次成了「回甘的那个东西」。

你会说：可它明明是同一壶茶。

是的，在日常尺度上，这壶茶早就稳住了，它的颜色、分量、放在桌上的位置，一次次地被看见、被碰到，稳得很。本书不否认这一点。本书只说，「同一壶茶」也是一种稳住，是许多次发生之后稳出来的；它不是先于一切发生、坐在那里的钩子。

◆ 四、这个乘号，在物理里是什么样子

回到林小满的暗室。

光电倍增管响了一下，林小满记下「第 37 号脉冲，到达时间 12.4 微秒」。

这个读数里，有一个承载者：「一个光子」。也有一个属性：「在这个时刻到达了这里」。

按挂钩式，应该先有一个光子，从激光器飞出来，一路飞过来，身上带着「我将在 12.4 微秒到达」这个属性，然后撞上管子，属性被读出来。

可第 2 章说过，光子在被测到之前，没有一个确定的到达时间等着被读。第 4 章说过，「这一个光子」在量子力学里也不是一个先在的身份。

按乘号式，事情是这样的：在光阴极被打出第一个电子、一层一层放大、到示波器上跳出尖峰的过程里，两件事一起稳住了。一件是「一个光子到了」，承载者冒到了前头；另一件是「12.4 微秒」，这个差异从许多可能的到达时间里稳了下来。

你没法把两件事拆开，问哪个先。它们是一次稳住的两面。

这也解释了一个让物理学家头疼的现象：在有些实验里，你没法说「到底来了几个光子」。比如在某些量子光学的状态里，光子数本身就是不确定的，测量之前，它并不是一个确定的整数。〔据研究文献〕挂钩式在这里会说：总有确定的几个光子在那里吧，只是我们不知道。乘号式会说：「几个光子」这个承载者，和「到了」这个属性，是在测量里一起稳出来的。

◆ 五、属性落在哪一块地上

属性的发生，还有一个要交代的地方：它落在哪一块地上。

王德生博士的体系里，有三块地，叫三界：现实界、理念界、自我界。

用大白话讲，现实界是手上能碰到的：一块石头的重，一壶茶的烫，光电倍增管上的一个脉冲。理念界是脑子里想的：一个定理，一个方程，一个「概率是 $|\psi|^2$」的规则。自我界是心里的「我」：我紧张，我得意，我觉得这茶苦。

同样一个「苦」，可以落在不同的地上。

林舟说「这茶苦」，落在现实界：茶和舌头之间，一个味道稳住了。

林舟说「我不爱喝苦茶」，落在自我界：在他和许多次喝茶之间，一个「我」的偏好稳住了。

林舟在课上说「苦味来自茶多酚」，落在理念界：在化学知识和许多次实验之间，一个解释稳住了。

三个「苦」，字是一个字，落的地不同，发生的条件也不同。

量子力学里的读数，主要落在现实界：一个脉冲，一个光斑，一个计数。可是「这个读数的概率是 $|\psi|^2$」，落在理念界；「我测到了」，落在自我界。第 16 章会说，一次完整的测量，三块地上都有东西在稳住，彼此还要对上。

王德生博士举过两个例子。「我的腿力强大」，这个属性落在现实界；「我有思考的创造力」，这个属性落在理念界，同时还要有一个「我」在自我界冒到前头。〔据作者口述〕两个句子形式一样，都是「我有某某」，可属性落的地、冒在前头的号位，都不一样。

◆ 六、一个完整的例子：同一个电子的三个「属性」

做一个思想实验。一个电子，打在屏幕上，留下一个亮点。

物理学家会说出关于它的好几句话。

第一句：「电子落在了屏幕的这一点。」

第二句：「电子的自旋是向上的。」

第三句：「这个电子和刚才在另一个探测器上被测到的那个电子，是纠缠的。」

三句话，都是「电子有某属性」。按挂钩式，它们是挂在同一个钩子上的三件衣服：位置、自旋、纠缠。

按乘号式，三句话是三次不同的发生，各有各的承载者，各有各的属性。

第一句里，冒在前头的是「落下的那个电子」，稳住的是一个位置。这次发生，落在现实界，侧重于形状：一个点。

第二句里，冒在前头的是「穿过磁场的那个电子」，稳住的是一个方向。这次发生，要靠一套磁场装置和电子的一次互动；换一个方向的磁场，稳住的就是另一个方向的自旋。

第三句里，冒在前头的不是一个电子，而是「一对电子」，稳住的是两边读数之间的一种关系。这次发生，承载者本身就是一对，不是一个。

三句话里的「电子」，不是同一个钩子。日常语言把它们说成一个，是因为日常语言习惯了挂钩式。

本书不是说，日常语言错了。在许多次发生之后，「这个电子」确实可以作为一个稳住的东西来谈，就像「这壶茶」一样。本书只是提醒：**在最细的那一层，钩子本身也是稳出来的。**

◆ 七、乘号式的三个好处

换掉挂钩式，有什么好处？本书说三个。

第一个好处：它不再需要那一刀。冯·诺依曼的链上，刀划在哪里，是挂钩式逼出来的问题：属性总得在某个点上挂到某个钩子上。乘号式里，属性和承载者在一层层稳住的过程里一起成，没有一个点要划刀。

第二个好处：它能解释为什么不同的测量，给出「不同的承载者」。量位置时，冒出来的是一个粒子；做干涉实验时，冒出来的像一列波。第 32 章讲波粒二象性，会说这是两种不同的稳住，不是同一个钩子换了两件衣服。

第三个好处：它把「主观」和「客观」的老问题，换成了「在哪一块地上稳住」的问题。林舟的苦是主观的吗？不全是，它在现实界有茶多酚、有舌头。是客观的吗？也不全是，换个时刻、换颗糖，它就不稳了。乘号式说：苦，是在这一次里、在现实界和自我界之间稳住的一个差异。

◆ 八、王德生博士为什么说这是新典范

2026 年 10 月，王德生博士在给《属性纠缠论》定题时，把这个乘号式说得很重。他说，不是「属性先发生，后有主人」，而是两种纠缠同时发生：承载者发生乘以属性发生，中间是一个乘号，不是先后。〔据作者口述〕

为什么一个乘号这么要紧?

因为西方哲学两千多年，一直在挂钩式里打转。亚里士多德把世界分成实体和属性，实体是主语，属性是谓语；属性依附于实体，实体不依附于任何东西。〔核：大意〕这就是挂钩式最早、最有力的版本。后来的哲学，有人说实体不可知，有人说只有属性没有实体，有人说实体是一束属性，可都在实体和属性的先后里争。

量子力学是第一次在实验上逼着人问：要是钩子不先在呢?

本书的回答，是把先后拿掉，换成乘号。

这是一个小小的符号变化。可它让一百年的几道难题，有了新的走法。

◆ 九、我们的语法，是挂钩式的

挂钩式之所以这么顺手，有一个很深的原因：它藏在语法里。

英语、德语、法语这些欧洲语言，一个完整的句子，几乎都要有一个主语，再跟一个谓语。The tea is bitter：茶是主语，苦是谓语里的表语。下雨了，英语也要说 It rains，硬塞进一个什么都不指的 it，好让「下雨」有个主人。

亚里士多德的逻辑，就是在这样的语法里长出来的。主语对上实体，谓语对上属性。一句话的结构，被当成了世界的结构。

汉语稍有不同。汉语常说「这茶，苦」，前面是一个话题，后面是一句说明，话题和说明之间，不一定是主人和衣服的关系。「下雨了」，汉语不需要找一个主人。「今天，人多」，「人多」也不是挂在「今天」身上的一件衣服。语言学家把这叫作话题—说明结构。〔据研究文献〕

本书不是说汉语更高明，也不是说汉语就没有挂钩式。汉语的书面语，在近一百年里，大量吸收了欧洲语法，主语、谓语、宾语，早就是课本里的标准分析。本系列有一篇专栏，专门讲过这件事对中文思维的影响。

本书只取一点：挂钩式不是世界本来的样子，它有一部分，是语法的样子。

物理学家用来描述测量的语言，是挂钩式的语言：「粒子有一个位置」，「电子的自旋是向上的」。语言先把一个主语摆好，再把属性挂上去。量子力学的方程本来没有这样说，是我们翻译成句子的时候，把钩子装了进去。

所以，换掉挂钩式，有时候只需要换一种说法：不说「光子到达的时间是 12.4 微秒」，说「12.4 微秒，一个光子到了」。前面是一个时刻、一个话题，后面是在这个时刻稳住的一件事。

◆ 十、没读出的，不算藏着

乘号还有一层意思，前面没说透：一边是零，乘积就是零。

做个小实验。林小满把光电倍增管的高压关掉，激光照旧开着，光子照旧打在光阴极上。屏幕上一片平静。

挂钩式会这样说：光子照样来了，每一个都带着自己的到达时间，只是管子没开，没读出来。那些到达时间，在某处排着，没人去看。

乘号式不这样说。高压一关，「被这支管子测到」这一边是零。没有一个电子被拉出来放大，没有一个差异被稳住。那些「没读出来的到达时间」，并不在哪里排着等。在这支管子这里，什么读数也没发生。

这不是说光子什么也没碰。它们打在金属上，变成一点热，也许还打出几个没被收走的电子。那是另几场发生，承载者和属性，换了一批。

所以，乘号式不许你在账本上记一笔「本来有、只是没读」的数。没发生的读数，不是藏起来的读数。

◆ 十一、放回日子里

你一定说过这样的话：「我这个人就是没耐心。」

这句话是挂钩式的：「我」是钩子，「没耐心」是挂上去的衣服。说多了，它就成了你的一部分，好像你生来就带着它。

换成乘号式，可以这样想：「没耐心」这个属性，是在某些场合、某些事、某个时刻，和一个「我」一起冒出来的。等公交车、排长队、辅导孩子作业的时候，它常常冒出来。读一本好小说、修一件喜欢的东西的时候，它就不冒出来，冒出来的是另一个能坐三个小时的你。

这不是说你没有「没耐心」这回事。它是真的，每一次都是真的。只是它不是一件焊在你身上的衣服。

明天能试的一件事：下一次你说「我就是某某」的时候，在后面补半句：「……在什么时候？」比如：「我就是没耐心，在等人的时候。」看看那件衣服，是不是只在某些地方才会穿上。

带走的话

东西和它的属性，不是钩子和衣服；它们在同一次稳住里一起出现，中间是乘号，不是先后。

小　账

这一处，读数是谁的？「一个光子在 12.4 微秒到达」，光子和到达时间一起稳住；读数不挂在一个先在的光子上。

先在，还是发生？挂钩式假定钩子先在；乘号式说，钩子和衣服一起发生。

想一想

1. 你身上有没有一件「衣服」，你一直以为是焊死的，其实只在某些场合才会穿上？
2. 「同一壶茶」是许多次发生之后稳出来的。你能想到一样东西，它还没有稳成「同一个」吗？

◆

07

第 7 章

三个号位，总有一个冒在前头

◆ 一、你一定有过这样的时刻

林小满小时候学钢琴。

刚开始，她眼睛盯着谱子，一个音一个音地找：这是哆，那是咪。谱子在前头，琴键是被找的东西。

练了半年，她不怎么看谱了。手指自己在走，有时候她会突然意识到：「我在弹琴」，然后一下子就弹错了。那一刻，「我」冒到了前头，手就乱了。

再后来，有那么几次，她弹着弹着，谱子没了，自己也没了，只剩下琴声在屋子里走。弹完了，她才回过神，发现窗外天都黑了。

三种时刻，你大概都有过。盯着一样东西的时候；意识到「我在做」的时候；做着做着忘了自己、也忘了对象的时候。

本书说，这三种时刻，是三个号位轮流冒在前头。

◆ 二、三个号位

第 3 章已经介绍过三个号位，这里再细说一遍，因为后面每一章都要用。

一号位，客体：被看、被碰、被量的那一方。谱子上的音符，手里的茶杯，光电倍增管前的光子。

二号位，互动：那一碰、那一来回、那一场正在走的事。手指和琴键之间，舌头和茶之间，光子和光阴极之间。

三号位，主体：看的人，做的人，那个「我」。

王德生博士给三号位还有一个更细的说法：主体是分布、场、美三者的一种组合。〔据作者口述〕用大白话讲，「我」是一种分布：我的经验、我的习惯，是怎样排开的；「我」是一个场：我在一个地方，周围的东西被我牵动；「我」是一种美：我被什么吸引，我往哪里去。这一层，本书只在第八编用到，这里先放一句。

号位，不是三把先摆好的椅子。它们是在每一次发生里一起显出来的。可它们显出来的时候，不是平均的。

◆ 三、总有一个冒在前头

每一次发生，三个号位都在，可总有一个冒在前头。

这个冒在前头，王德生博士叫它「侧重显影」。显影，是照相里的词：底片上本来什么都有，药水一泡，有一部分先显出来。

林小满盯着谱子找音的时候，客体冒在前头：谱子、音符，是被显出来的那部分。她自己、她和琴之间的那一来回，都在，只是暗着。

她突然意识到「我在弹琴」的时候，主体冒到了前头：「我」被显了出来。这一显，手和琴之间那一来回反而被打断了。

她忘了自己、也忘了谱子的时候，互动冒在前头：那一来回，琴声本身，被显出来了。心理学家契克森米哈赖管这种状态叫「心流」。〔核：大意〕王德生博士的说法是：心流往往是互动侧重，人「进入互动里面了」。〔据作者口述〕

这里有一个要点：总有一个冒在前头，这不是「恰好」。三个号位不会平分秋色，平分了就什么都显不出来。王德生博士在纠正早先一个说法时，特别强调

过这一点。他原先说，心流时没有哪个号位显影；后来改成，总是有某个号位显影侧重，心流是互动那一个。〔据作者口述〕

◆ 四、冒在前头，不等于其他两个不在

侧重显影，有一个容易误会的地方：冒在前头的那一个，好像就是全部。

不是。林小满盯着谱子时，她的手在动，她的心在跳，她和琴之间的来回一直在走。只是这些没有被显出来，像底片上还没泡出来的那一部分。

你有过这样的经验吗：肚子饿了，可是你在忙，完全没意识到。直到忙完，突然觉得：「我好饿。」

饿一直在那里，在身体里，在胃和血糖之间。可「我饿了」这个意识，要等主体冒到前头才发生。王德生博士用的正是这个例子：肚子饿了，并不每次都会发生「我饿了」的意识。〔据作者口述〕

所以，三个号位一直都在发生，只是在每一刻，显影的侧重不同。

这一点到量子力学里很要紧。第 3 章那张表里，每一家诠释都守一个号位，它们其实是在说：那个号位冒在前头的时候，读数是怎么回事。玻姆说的是客体冒在前头时的样子，QBism 说的是主体冒在前头时的样子，关系诠释说的是互动冒在前头时的样子。

它们都没说错那个号位冒在前头时的样子。它们错在，以为那个号位冒在前头，另外两个就不在了，或者不要紧了。

◆ 五、风、幡、心，重读一遍

现在可以把导论里那桩公案，读得更细一点。

僧人甲看着幡说：「幡动。」这一刻，客体在他那里冒在前头：幡被显了出来。

僧人乙感觉着风说：「风动。」这一刻，互动在他那里冒在前头：风和幡之间那一推一摆，被显了出来。

慧能说：「心动。」这一刻，主体冒在前头：争论的人心，被显了出来。

《无门关》说：都不是。这是想把三个侧重都撤掉，回到一个什么都没显影的地方。

本书说：三个人都说中了一次显影，又都把这一次显影当成了全部。动，是一个属性。它要发生，三个号位都得在：没有幡，动没有承载；没有风，幡无从摆；没有心，「动」这个差异没有被谁稳住、说出。三者互相需要，互相关联，互为条件，互相影响。

王德生博士把这叫作三属性纠缠：客体属性、互动属性、主体属性，三种属性的发生，彼此缠在一起。他说，这是对《无门关》的超越。〔据作者口述〕《无门关》把三个都否掉；本书把三个都接住，只是说清它们不是三个先在的主人，而是在每一次发生里一起显出、轮流在前。

◆ 六、一次测量里，号位是怎样轮换的

回到暗室，把一次测量放慢来看。

第一个瞬间：光子撞上光阴极，打出一个电子。此刻冒在前头的是互动：一次碰撞，一次互动。光子和光阴极都还暗着，「这一个光子」还没有成形。

第二个瞬间：电子在打拿极之间一层一层地放大。冒在前头的仍是互动：一次又一次的碰撞，一层又一层的互动，差异被越放越大。

第三个瞬间：示波器上跳出一个尖峰。此刻，客体冒到了前头：「一个光子到了」，客体被显了出来。在这之前，物理上虽然一直在发生，可「那个被测的光子」没有作为一个东西站出来。

第四个瞬间：林小满看见了，写下一个数。此刻，主体冒在前头：「我测到了」。

第五个瞬间：她把这一夜的数据汇总，算出一条曲线，和 $|\psi|^2$ 的预言对上了。此刻冒在前头的又是客体，只不过这一次的客体，是「这个实验系统」，在理念界里稳了下来。

一次测量，号位轮了好几轮。每一轮，冒在前头的那一个，都把另外两个带在后面。

你会注意到一件事：在最早的那几个瞬间，冒在前头的是互动。客体，那个「光子」，是后来才被显出来的。

测量是从互动开始的，客体是在互动里被显出来的，主体是最后才冒到前头的。

这个次序，和挂钩式正好相反。挂钩式说：先有光子，再有测量，最后有人看。本书说：先有那一碰，光子在那一碰里成形，人在最后才冒出来说「我看到了」。

◆ 七、维格纳为什么卡住

有了号位轮换，维格纳的朋友就好懂一些了，第 30 章会详细讲，这里先打个底。

维格纳的朋友在实验室里测量，他看见了读数。此刻在他那里，主体冒在前头：「我看到了」。

维格纳在门外，没看见。对他来说，实验室里是一团还没显影的东西，朋友和仪器和粒子，统统暗着。

维格纳问：朋友的读数，到底定下来了没有?

挂钩式会说：读数总得在某个先在的东西上定下来，要么在朋友那里，要么在维格纳那里，两者只能选一个。

本书说：在朋友那一层，读数已经稳住了，主体在那里冒在前头。在维格纳那一层，还没有。两层不是在争同一个读数，是两层各自在稳。等维格纳推门进来，问朋友一句「你看到什么了」，两层就对上了。

这就引到第四编的话题：稳住，是一层一层的。

◆ 八、号位与物理里的「系统、仪器、观察者」

物理学家讲测量，习惯用三个词：系统、仪器、观察者。

这三个词，很像三个号位：系统像客体，仪器像互动，观察者像主体。

可两套说法有一个关键的不同。物理学里的系统、仪器、观察者，是先划分好的：你先说这是系统，那是仪器，那个人是观察者，然后再算。这一划分，本身就是挂钩式的：先有三个钩子。

本书的三个号位，不是先划分好的。它们在每一次发生里显出来，而且同一个东西，可以在不同的时刻处在不同的号位上。

一个例子：光电倍增管，在林小满测光子时，是互动，是仪器。可当工程师在检修这支管子时，它是客体，是被测的客体。当它坏了、林小满对着它发火时，它又在主体的场里，成了「我那支不争气的管子」。

同一样东西，在不同的发生里，冒在不同的号位上。

号位不是东西的身份，是东西在这一次发生里冒出来的位置。

冯·诺依曼说刀可以划在任何地方，从本书看来，正是因为系统、仪器、观察者的划分，本来就不是先在的。你划在哪里，就是你把哪一段当成了客体，哪一段当成了互动。划法会变，可读数的统计不变，因为读数是在那一层层稳住的过程里出来的，跟你怎么划无关。

◆ 九、谁冒在前头，不由你按开关

读到号位轮换，你可能会生出一个念头。既然总有一个号位冒在前头，那「我想让哪一个冒头，它就冒头」吗？我盯着题目，客体就在前；我想着自己，主体就在前。号位岂不是由我来定？

这个念头对了一点：你的注意力，确实参与了哪一个冒头。

可它也错了一大块。你想让谁冒头，你这个「想」，本身也是一次发生，它也落在某一个号位上。冒在前头的那一个，是三个号位一起推出来的，不是由其中一个说了算。

林小满学琴那几年，最想要的是心流那种时刻。她试过很多次，坐下来就对自己说：「这一次，忘掉自己。」越这样说，「我」越冒在前头。忘掉自己这件事，没法靠主体下命令来做到。

后来她发现，有一个办法管用：挑一首比自己的水平稍微难一点的曲子。太简单，手指自己走完了，心就飘到别处，冒在前头的是一个走神的「我」。太难，处处卡住，冒在前头的是谱子，是一个个找不到的音。难度正好的时候，手和琴之间那一来回，才会自己走起来。

这里是谁定的侧重？是曲子的难度，是她手上的功夫，是两者碰在一起时的那个分寸。三个号位一起，把互动推到了前头。

测量也是这样。物理学家不能下一道命令，让客体在某一刻冒到前头。他们能做的，是搭一套装置：选材料，定电压，调光路，隔开干扰。装置搭好了，光子打上光阴极的那一下，互动自己冒在前头；放大到一定的层，客体自己被显出来。

所以，侧重不是谁按的开关。它更像那个难度正好的分寸：你能去调它的条件，不能直接命令它的结果。

这一点，第 9 章讲正在成形时还会再用。土缠得正好，新的样子才能冒出来；你能去调土，不能直接把样子按出来。

从这里也能看出，为什么守三号位的那几家诠释，总让人觉得哪里不对劲。它们说读数要等主体来定，好像主体握着开关。可主体自己能不能冒到前头，也要看另外两个号位给不给它这个位置。维格纳的朋友能说「我看到了」，是因为仪器先把读数稳到了他眼前。

主体不握开关，客体也不握，互动也不握。开关这个想法，本身就是挂钩式留下的影子。

能做的，是照看条件。老师给学生挑题，教练给运动员定强度，实验员给管子定电压，都是在照看条件。照看好了，该冒头的那一个，自己会冒出来。

◆ 十、实验物理学家的一天

号位轮换，在实验室里天天发生，只是没人这样叫它。

上午九点，林小满到实验室，第一件事是校准光电倍增管。她用一个已知强度的标准光源照它，看它的读数准不准。这时候，管子不是仪器，是被测的东西，冒在前头的是客体。

十点，校准完毕，开始正式测量。管子退回到仪器的位置，冒在前头的是光子和管子之间的那一碰，是互动。

下午两点，她发现数据有点不对，一整段的计数偏高。她开始怀疑：是光源不稳，是管子漏光，还是自己哪里操作错了？这一下午，冒在前头的常常是主体：「我是不是哪里弄错了。」

傍晚，她找到了原因：挡光片有一道细缝，漏进了走廊的灯光。这一刻，挡光片冒了出来，成了客体。在这之前，它一直在土里，没人注意它。

一天之内，同一支管子、同一块挡光片、同一个林小满，在不同的号位上来回。

物理学家对此习以为常，称之为「系统误差排查」「仪器校准」。本书只是指出：在实验的实际做法里，从来就没有一个固定的划分，谁是系统、谁是仪器、谁是观察者，都要看此刻在做什么。测量理论里那个「先划好三个钩子」的图景，在实验室里，一天都撑不过去。

◆ 十一、放回日子里

带孩子写作业，你一定见过这三种时刻。

孩子盯着题目发呆，一个字一个字地看，看不懂。客体在前头，题目大得像一座山。

孩子写着写着，突然说：「我好笨。」主体冒到前头，题目反而不见了，只剩下一个笨的「我」。

孩子写顺了，一题接一题，嘴里念念有词，你叫他吃饭他都没听见。互动在前头，他进入互动里面了。

大人最容易做的，是在第二种时刻添一把火：「你就是不用心。」这句话，把孩子的主体推得更前，题目和他之间的那一来回，就更接不上了。

本书给一个小办法：孩子说「我好笨」的时候，别讨论他笨不笨。把题目拿过来，和他一起读第一句，读出声，问他：「这一句里，你认识哪几个词？」让客体重新冒出来，再让那一来回慢慢走起来。

明天能试的一件事：留心自己一天里三种时刻各有多少。盯着事情的时候，想着「我」的时候，忘了自己也忘了事情的时候。第三种时刻，往往是你一天里最好的那一段。

带走的话

三个号位每一次都在，可总有一个冒在前头；测量从互动开始，客体在互动里显出来，主体最后才冒到前头。

小　账

这一处，读数是谁的？一次测量里，号位轮换了好几轮；读数不归哪一个号位，它在轮换里一层层稳住。

先在，还是发生？物理学先划好系统、仪器、观察者；本书说，号位在每一次发生里显出来，同一样东西可以冒在不同的号位上。

想一想

1. 你今天哪一段时间，是「忘了自己也忘了事情」的？那时你在做什么？
2. 你身边有没有一样东西，在不同的时候，处在不同的号位上？

◆

08

第 8 章

属性是什么：哪一种差异偏重着稳了下来

◆ 一、你一定有过这样的时刻

林舟班上有个学生叫陈默，物理考试常常八九十分，偶尔会掉到五十几分。

家长会上，陈默的妈妈问林舟：「我们家孩子，物理到底算好还是不好？」

林舟想了想，说了三句话。

第一句：「他的卷面很干净，公式写得一丝不乱。」

第二句：「他进步得很快，从高一到现在，一直在往上走，只是中间有几次掉下来。」

第三句：「他跟同桌一起做题的时候，做得特别好；一个人在家，常常卡住。」

陈默妈妈听完，有点糊涂：「那他到底是什么样的学生？」

林舟说：「这三句，都是他。」

你看，同样是说一个学生的「属性」，三句话说的东西很不一样。第一句说的是一个样子，稳稳的，摆在卷面上。第二句说的是一条路，有先有后，在变。第三句说的是一片地，他和同桌之间缠着的那一片。

本章要说：属性，不止一种。

◆ 二、物理里的属性，也不止一种

物理学家说到一个粒子的属性，最先想到的是位置、动量、自旋、电荷。这些都是「是什么样」的属性：这一刻，它在哪，朝哪，带多少电。

可是物理里还有另外两类属性，同样实在，只是很少被放在一起想。

一类是「怎样走」的属性。一个放射性原子核，有一个半衰期。碳十四的半衰期大约五千七百年。这不是它在某一刻的样子，而是它在时间里走的一条路：在一段时间里，有多大的机会衰变。一个激发态的原子，有一个寿命；一次跃迁，有一个速率。这些属性，说的都是过程。

另一类是「和谁缠着」的属性。两个电子处在一个总自旋为零的纠缠态里，单看一个，它的自旋朝哪都说不准；可两个合起来看，它们的自旋总是相反。这个「总是相反」，不属于任何一个电子，属于这一对。物理学家管这叫关联，或者纠缠。

三类属性：是什么样的，怎样走的，和谁缠着的。

本书说，这三类，正好对上三个词：**形状、路、土**。

◆ 三、三个维度：形状、路、土

导论里介绍过这三个词，这里再讲细一点。

形状，在王德生博士的体系里叫显露，记作 S。它是长出来、能被认出的样子。一个读数，一个光斑，一个位置，是形状。

路，叫差异序列，记作 D。它是一串有先后的不同，会修正，会收拢。衰变的过程，跃迁的过程，光子从发出到被测到的过程，是路。

土，叫特征纠缠，记作 E。它是让路能走、形状能长出来的那片缠在一起的地。纠缠的那一对电子之间的关联，一块晶体里原子之间的牵连，一个实验室里仪器、电压、温度、规程缠在一起，都是土。

三个维度，在每一次发生里都在，缺一不可。可是，和上一章的号位一样，在每一次发生里，总有某一维、某几维偏重着显出来。

一个属性，就是某一种差异，在某一维或某几维的偏重下，稳了下来。

位置这个属性，是在形状这一维的偏重下稳下来的：一个点。

半衰期这个属性，是在路这一维的偏重下稳下来的：一条衰减的曲线。

纠缠这个属性，是在土这一维的偏重下稳下来的：一对读数之间的牵连。

王德生博士在 2026 年 10 月给这个说法做过一次扩展。他原先说，属性是 D 与 E 两维的侧重组合；后来改成：属性是 SDE 整个体系里各种元素偏重发生，不只是 D 与 E，而是三维的偏重，以及维度之间的关联。〔据作者口述〕本书照扩展后的说法写。

◆ 四、三个方程：三维怎样互相推

三维不是各管各的。它们互相推，王德生博士把这写成三个方程：

> **S = F（D，E）**
> **D = G（S，E）**
> **E = H（S，D）**

用大白话读：

形状，由路和土推出来。一个读数，是那一条测量的路，在那一片实验室的土上走出来的。

路，由形状和土推出来。一个原子接下来怎么走，取决于它此刻显出的样子，和它所处的环境。

土，由形状和路推出来。一个实验室之所以是现在的样子，是因为过去许多次读数、许多条测量的路，回过头来改了它：标准定了，仪器换了，规程写进了手册。这就是回写。

三个方程说的是：三维谁也不先在，谁也不是谁的原因，它们彼此推着，一起转。

你可能会问：这三个方程，能算吗？在本书里，它们首先是三句话，说明三维的依赖关系。第 53 号《SDE数学导论》给它们做过数学化的尝试，本书第 9 章会借用那本书里的一个数。至于方程在做事时怎样用，王德生博士的方法论里还有六路径和三原理，第 212 号《三视角方法论与实践应用》讲过，本书第八编才会用到。

◆ 五、量子力学里的三类属性，各自落在哪个方程上

把三个方程放到量子力学里，会看到一件有意思的事。

第一个方程，形状由路和土推出：这就是测量。一个读数（形状），是在测量的过程（路）里，在仪器和环境（土）的条件下稳出来的。玻恩规则管的，就是这个方程的输出：哪一个形状，以多大的概率稳出来。

第二个方程，路由形状和土推出：这就是演化。薛定谔方程描述的是量子态怎样随时间走，它的走法取决于系统的哈密顿量，也就是系统自身的结构和所处

的环境。第 35 章讲量子芝诺效应时会看到，频繁地让形状稳住，会把路改掉：一直被看着的原子，迟迟不衰变。

第三个方程，土由形状和路推出：这就是纠缠和退相干。两个粒子相互作用之后，缠在了一起，土变了。系统和环境不停地碰，碰出来的东西，回过头改了系统周围的土。第 15 章讲退相干，就是这个方程在大尺度上的样子。

量子力学的教科书，通常把这三件事分在三个章节里讲：测量假设、薛定谔方程、纠缠与退相干。很少有人说它们是一回事的三面。

本书说，它们是三维互相推的三个方程。

◆ 六、属性是偏重，不是归属

把属性理解成「偏重」，和理解成「归属」，差别很大。

归属式说：位置属于粒子，半衰期属于原子核，纠缠属于那一对粒子。每个属性都有一个主人。

偏重式说：位置是形状偏重着稳下来的差异，半衰期是路偏重着稳下来的差异，纠缠是土偏重着稳下来的差异。每个属性都是一种稳法，不是一件归某人所有的东西。

偏重式有什么好处?

好处在于，它能解释同一个东西为什么会显出很不同的属性，而且这些属性彼此还会打架。

物理里最著名的打架，是位置和动量。你让位置稳得越尖，动量就稳得越散；反过来也一样。归属式会说：粒子同时有确定的位置和动量，只是我们没法同时知道。第 2 章说过，这条路走不通。

偏重式会说：位置和动量，是两种不同的稳法，它们要的偏重不一样。让形状在「点」这一种样子上稳住，和让路在「朝哪走、走多快」这一种样子上稳住，两种偏重不能在同一层上同时做到极致。第 34 章讲不确定性原理时，会把这件事说完整。

◆ 七、一个完整的例子：一块放射性矿石

想象一块含铀的矿石，放在一台盖革计数器旁边。

计数器每隔一会儿响一声。你可以说出关于这块矿石的很多属性。

「这块石头重三百克。」形状偏重：一个稳得很牢的数，称一万次都一样。

「这块石头里的铀，半衰期约四十五亿年。」路偏重：这是一条慢得出奇的衰减曲线，单看任何一个原子核，你说不准它什么时候衰变；看大量原子核，曲线稳得像铁轨。

「这块石头和这台计数器，每分钟大约响六十下。」这一句，偏重在土上：它说的不是石头单独的属性，也不是计数器单独的属性，是石头、计数器、两者的距离、计数器的效率缠在一起，稳出来的一个数。把计数器挪远一米，数就变了。

「刚才那一声响，是一个铀原子核衰变了。」这一句最有意思。它的承载者是「那一个原子核」，它的属性是「在那一刻衰变了」。按上一章的乘号式，这个原子核作为「刚才衰变的那一个」，是和那一声响一起稳出来的。在响之前，没有哪一个原子核顶着「我将在下一秒衰变」的牌子。

一块石头，四句话，四种稳法。日常语言把它们都说成「石头的属性」，本书说，它们是四次不同偏重的发生。

◆ 八、守恒：土里最稳的账

说到偏重在土上的属性，物理里最硬的一类，是守恒量。

两个电子从一次衰变里飞出来，总自旋为零。单看一个，它的自旋朝哪说不准；两个合起来，自旋总是相反。这个「总是相反」，归不到任何一个电子身上。它是这一对的属性，是它们出生时共同的那片土里记下的一笔账。

能量守恒、动量守恒、电荷守恒，都是这样的账。它们说的不是某一个东西「有多少」，而是一群东西之间，不管怎样碰、怎样分，总数不变。

物理学家常把守恒量当作最基础的东西。诺特在 1918 年证明了一个漂亮的定理：每一种守恒，背后都对应一种对称性。能量守恒对应时间上的对称，动量守恒对应空间上的对称。〔核：大意〕

本书读这个定理，会多说一句：对称性，是土的一种稳住；守恒量，是这片土上最稳的那几笔账。它们稳到什么程度？稳到一百多年来，所有的实验，没有一次查出账对不上。

可是，守恒量也是在关系里的。一个孤零零的电子，谈不上「总自旋为零」。一对电子在一起，这笔账才有意义。

所以，土偏重的属性，有一个特点：它的承载者，常常不是一个东西，而是一群东西。第 6 章说过，承载者和属性一起发生。在纠缠里，一起发生的承载者，是那一对。

◆ 九、三个方程，会不会只是换了个说法

讲到三个方程，学物理的读者也许会不太舒服。

测量、演化、纠缠，在教科书里各有一套严格的数学。本书把它们说成三维互相推的三个方程，听上去整齐。可整齐有什么用？这会不会只是把三个熟悉的东西，换上三个新名字?

先承认这个质疑对的地方。三个方程在本书里，首先是三句话，不是三个能代进数去算的式子。物理学家手里的薛定谔方程，能算出氢原子的谱线。本书的 D = G（S，E），算不出任何一条谱线。

那它做什么用?

它做的是一件教科书不做的事：把三件事放到一张图上，看它们彼此咬在哪里。

教科书的章节是分开的。学生先学薛定谔方程，算一学期的势阱和谐振子。再学测量假设，背下「测量后波函数塌缩」。再往后，也许到研究生阶段，才碰到退相干和纠缠的系统理论。三件事各占一块地盘，很少有人问：它们为什么要分成三块？哪一块在推哪一块?

三个方程给出一个看法。测量输出的形状，会回过头改路，这就是第 35 章要讲的芝诺效应：一直被看着，就走不动。演化走出来的路，会回过头改土，两个粒子一碰，就缠上了。土一变，下一次测量能稳出什么形状，也跟着变。

三件事不是三个模块，是一个转着的圈。

这个看法，推出了一个可以拿去问的问题。如果三维互相推，那么一个实验里，只调其中一维，另外两维也该跟着动。比如只改土，不碰被测的系统，读数的分布也该变。

量子力学里，这样的事是有的。把一个原子放进一个很小的反射腔里，原子本身没动，周围的电磁环境变了。它自发辐射的快慢就跟着变，可以变快，也可

以变慢。物理学家管这叫珀塞尔效应。〔核：大意〕在本书的图上，这是改了土，路就跟着改，后面的形状也跟着改。

本书不说这个效应是三个方程预言出来的，它早就被物理学家用电动力学算清楚了。本书只说，它在三个方程的图上，落在一个说得通的位置。

一个看法有没有用，要看它能不能让分开的东西连起来，能不能让人想到去问原来不会问的问题。三个方程，本书只要求它做到这两件。

◆ 十、本书的说法

本章的说法收成一句：

属性，是某一种差异，在形状、路、土某一维或某几维的偏重下，稳了下来。

这句话和第 6 章的乘号式合起来，就是实体属性发生学的骨架：

一次发生里，有一个号位冒在前头，成了承载者；有一种差异在某种偏重下稳住，成了属性；这个属性落在某一块地上，现实、理念或自我。三件事同时成，中间是乘号。

量子力学的读数，在这个骨架里，是这样的一件事：互动先冒在前头，一层层地放大差异；形状偏重的稳住在最后出现，落在现实界；客体在这个过程里被显出来，成了「被测的那个」；主体最后冒到前头，说「我测到了」。

◆ 十一、一碗米饭的四种好

周日晚上，林小满在家吃饭。父亲问她：「这米好不好？」

她扒了一口说：「好。」

林舟笑了：「你说的是哪一种好？」

第一种好，是形状上的。米粒饱满，颗颗分明，蒸出来泛着光。这一种好，端上桌就看得见，摆在那里，稳稳的。

第二种好，是路上的。这袋米是十月新收的，从田里到碾米厂到超市，走了不到一个月。新米的香，是这条短短的路走出来的。同样的米放到明年夏天，香味就淡了。好不好，要看它走到了哪一步。

第三种好，是土里的。这米配奶奶腌的酸豆角，特别下饭。单吃米，没那么香；单吃酸豆角，又太咸。两样放在一起，好才冒出来。这一种好，不在米身上，也不在豆角身上，在两样缠在一起的那一口里。

还有第四种。林舟说，这米是他小时候那个村子种的，他一吃就想起奶奶的灶台。这一种好，落在他的自我界里，在林小满那里就没有。

一碗饭，四种好，各有各的偏重，各落各的地。

林小满说：「那我刚才说的『好』，到底是哪一种？」

林舟说：「你自己都没分清。不过你筷子伸向酸豆角那一下，已经替你答了。」

日常说话，大家都用一个「好」字装下这四种。平常够用。可一到要改进的时候，就得拆开。米农想把米种得更好，要管的是形状和路。做菜的人想让饭更香，要管的是土。想让孩子长大后也记得这个味道，要管的，是一次次在饭桌上发生的那一点回写。

◆ 十二、放回日子里

回到陈默的妈妈。

她问的是一个归属式的问题：「我家孩子，物理到底好不好？」好像「物理好」是一件挂在陈默身上的衣服，要么有，要么没有。

林舟的三句话，其实是三种偏重。卷面干净，是形状偏重的稳住；一路在进步，是路偏重的稳住；跟同桌一起做题特别好，是土偏重的稳住。

三种偏重放在一起，就能看出陈默掉到五十几分的那几次，可能是怎么回事：可能那几次，他一个人在家复习，土变了；可能那几次，考的是新章节，路还没走稳。

明天能试的一件事：评价一个人的时候，不只说他「是什么样」，也说一句他「怎样在走」，再说一句他「和谁在一起时会不一样」。三句说完，那个人在你眼里，会立体得多。

带走的话

属性不是挂在主人身上的东西，是某一种差异在形状、路、土的某种偏重下稳了下来；三维互相推，谁也不先在。

小　账

这一处，读数是谁的？位置是形状偏重，半衰期是路偏重，纠缠是土偏重；三种读数，三种稳法。

先在，还是发生？归属式给每个属性找一个先在的主人；偏重式说，属性是一种稳法。

想一想

1. 你最常用哪一种偏重去看人？看他是什么样，看他怎样在走，还是看他和谁在一起？
2. 你能不能在自己身上找出三个属性，各自偏重在一维上？

◆

09

第 9 章

三种状态：一锅粥、正在成形、定型

◆ 一、你一定有过这样的时刻

林舟的老家在湖南乡下。小时候过年，奶奶要做豆腐。

头天夜里泡黄豆，第二天一早磨浆。磨出来的豆浆倒进大锅，烧开，白白的一锅，什么都搅在一起。

奶奶舀一勺石膏水，沿着锅边慢慢倒下去，一边倒，一边用勺子轻轻推。过一会儿，锅里起了变化：一团一团白絮冒出来，飘着，碰着，又散开一点，又聚起来。这时候最不能乱动，奶奶说，一搅就散了。

再等一会儿，白絮连成了一片，成了豆花。奶奶把豆花舀进铺了纱布的木框，压上石头。第二天揭开，一整块方方正正的豆腐。

豆浆，豆花，豆腐。

林舟后来教物理，常常想起奶奶那口锅。一锅粥一样的豆浆，正在成形的豆花，定了型的豆腐。

本章要讲的，就是这三种状态。

◆ 二、三种状态

王德生博士的体系里，有三种状态：混沌、介生、秩序。本书用三个家常词：一锅粥、正在成形、定型。

一锅粥：什么都在，还没分开。豆浆里有蛋白质、有水、有油，可你分不出哪一块是哪一块。

正在成形：形状冒头了，还站不稳。豆花一团一团，能看出个样子，可一搅就散。王德生博士常说，这是最有创造、也最危险的一段。〔据作者口述〕有创造，是因为新的样子在这里长出来；危险，是因为它随时可能散回去，或者长歪。

定型：稳住了，认得出，传得下去。一块豆腐，可以端上桌，可以切，可以卖。

要提醒一句：定型只是一站。豆腐放久了会馊，会再回到一锅粥的样子；豆腐也可以再做成豆腐乳、做成冻豆腐，长出新的样子。三种状态不是一条单行道，是可以来回转的。

◆ 三、三个维度，各有三种状态

上一章说，每一次发生有三个维度：形状、路、土。现在要说：三个维度，各自都有这三种状态。

先说路。

路的一锅粥，是许多条可能的路同时在走，彼此碰撞，分不出哪一条是哪一条。豆浆里，无数个蛋白质分子在乱撞。

路的正在成形，是某几条路开始聚拢，彼此带着走，可还会散。点了卤之后，蛋白质开始一团团聚起来。

路的定型，是一条路稳了下来，走出了确定的先后。豆花压成豆腐，整个过程收拢成一个结果。

再说形状。

王德生博士特别提醒过：形状也有三种显露，稳定显露是最后的。〔据作者口述〕

形状的一锅粥，是一种模模糊糊的显：你知道锅里有东西，可说不出它是什么样。

形状的正在成形，是一种冒头了、可还站不稳的显：豆花的白絮，看得见，摸不住。

形状的定型，就是稳定显露：一块豆腐，四四方方，谁看都是豆腐。

最后说土。

土的三种状态，看的是缠得怎么样。

缠得太散、太宽，什么都和什么搭着，却搭不出个样子，这是土的一锅粥。豆浆太稀，石膏太少，怎么等也凝不起来。

缠得正好，彼此牵着、共振着，新的样子能在上面长出来，这是土的正在成形。第 53 号《SDE数学导论》里有一句话：正在成形，就是纠缠共振。

缠得太死，什么都锁住了，不再有新东西长出来，这是土的定型。豆腐压得太久太狠，成了一块硬邦邦的石头，再做不出别的菜。那本书里也有一句：纠缠不足，系统锁死在定型里，失去活力；纠缠范围过广，系统进入一锅粥，失去秩序。

◆ 四、量子测量的三种状态

现在把三种状态放进量子测量。

光子还没撞上光阴极的时候，它的路在一锅粥里。物理学家说它处在「叠加态」：几条可能的路同时在走。第 11 章会说，叠加不是「同时在两个地方」，而是几条路还没分开。

光子在双缝后面、还没被任何探测器记下的时候，屏幕上会慢慢积出一片干涉条纹。这片条纹，是形状的正在成形：看得见明暗，可单个光子落在哪，说不

准；而且只要有人在缝边上放一个探测器去看「走了哪条缝」，条纹就散了。第13章会细讲。

光子撞上光阴极、电子一级级放大、示波器上跳出尖峰、林小满写下一个数，这是一层一层地走向定型。读数，是稳定显露。

而那片土，光电倍增管的材料、电压、温度，激光器的稳定，实验室的规程，在整个过程里，一直缠在那里。它缠得好不好，决定了这一次测量能不能稳出一个读数。电压不稳，土就太散；管子老化，土就太死。

◆ 五、量一量「状态」：一个数

三种状态之间，有没有一条可以量的界线？

第53号《SDE数学导论》给过一个尝试，叫SDE数，写作：

> **N_SDE = r · ω ／（v · T_c）**

四个字母，大白话讲是这样的。r是一处缠着的东西能伸多远，那本书管它叫「伞」的半径。ω是伞和伞之间搭得有多重，叫重叠度。v是消息在伞与伞之间传得多快。T_c是这个系统自己的特征时间，也就是它做一件事要多久。

分子上，是「缠得多远、搭得多重」；分母上，是「在一件事的时间里，消息能走多远」。

这个数小，意思是：缠着的范围不大，搭得也不重，消息早就走遍了，大家都对齐了。系统在定型里。

这个数大，意思是：缠着的范围很大，搭得很重，消息还来不及传，大家各自乱撞。系统在一锅粥里。

这个数在一附近，是两边的拉扯正好相当，系统在正在成形里。那本书把这一段叫作临界区，说它是正在成形的温床。书里还设了两道门槛，叫 N_1 和 N_2，数跨过门槛，状态就换了。

本书要说清楚：这个数，本书借的是它的形状，不是它的数值。在量子系统里，r、ω、v、T_c 各对应什么物理量，怎样去测，还没有做出来。第 43 章会把它列为本书尚未解决的三件事之一。

可它的形状，已经能帮本书说清一件事：测量，就是让这个数越过一道门槛。

光子在叠加里，缠得开、搭得重，消息来不及对齐，数是大的。撞上光阴极，被一层一层放大，和越来越多的电子、电极、导线缠上，消息一层层对齐，数越来越小，越过门槛，进了定型。第 14 章会细讲这个「过门槛」。

◆ 六、三种状态和各家诠释

有了三种状态，再看第 3 章那张诠释表，会看出另一层意思。

玻姆理论，把粒子的位置一直放在定型里：从头到尾，粒子都有确定的位置。它不承认一锅粥。

多世界诠释，把整个宇宙一直放在一锅粥里：波函数从不塌缩，所有的路都在走。它不承认定型，至少不承认有一个唯一的定型。

哥本哈根，承认一锅粥（量子态），也承认定型（经典仪器的读数），可它把中间那段正在成形，封装成了一个黑箱，叫「测量」。

自发塌缩理论，看到了中间那段，给它加了一条新的物理定律，让一锅粥按一定的速率自己定型。

退相干理论，是把中间那段讲得最细的一家，它讲了土怎样一步步把一锅粥里的干涉抹掉。第 15 章会说，它讲的是土这一维的正在成形，没讲路和形状那两维。

各家诠释的分歧，有一大半，是对正在成形那一段的分歧：有人不承认它，有人封住它，有人给它加定律，有人只讲了它的一维。

本书要做的，是把正在成形那一段，三维都讲出来。

◆ 七、为什么正在成形最容易被跳过

你可能会问：正在成形这一段这么要紧，为什么大家都绕着它走？

因为它最难看见。

一锅粥，好描述：什么都在，用一个统计分布就能说清。定型，更好描述：一个确定的值，写下来就是。正在成形，是两头都不靠的一段：它既不是统计分布，也不是确定的值；它在变，变得快，还会散。

量子力学的数学，正好擅长两头。薛定谔方程把一锅粥描述得精确无比；测量假设把定型描述得干脆利落。中间那段，教科书一句话带过：「测量时，波函数塌缩。」

可是，物理学家这些年做的实验，越来越多地往中间钻。弱测量，是轻轻地碰一下，让系统只走一点点正在成形，再看会怎样。连续测量，是一点一点地看着系统从一锅粥走向定型。量子擦除，是在正在成形的半路上，把已经冒头的差异再抹掉。

这些实验，都在告诉人们：正在成形，是一段有内容、有结构、可以被细看的过程。第 41 章会用到其中一部分结果。

◆ 八、正在成形的两种死法

正在成形最有创造，也最危险。危险在哪？它有两种死法。

第一种，散回一锅粥。豆花冒头了，你一搅，它散了，又成了豆浆。在量子力学里，这就是正在成形的样子被抹掉。量子擦除实验里，路的信息本来已经开始冒头，被人有意抹掉之后，干涉条纹又回来了。第 33 章会细讲。

第二种，过早定型，长歪了，或者锁死了。豆花还没聚好，你就急着压，压出来一块松松垮垮、一碰就碎的豆腐；或者你压得太狠，压出一块石头。量子力学里，也有过早定型的样子：你不停地去看一个原子，每看一次，它就被拉回一个确定的状态，它想走的那条路，根本走不出去。这叫量子芝诺效应，第 35 章会讲。

两种死法，一个是太乱，一个是太早。

正在成形要活下来，土要缠得正好：既不太散，让新的样子能聚起来；也不太死，让它有地方长。第 53 号《SDE数学导论》说，正在成形就是纠缠共振，说的就是这种「正好」。

物理学家在造量子计算机时，天天在和这两种死法较劲。量子比特要在叠加里待得足够久，不能被环境过早地拉到定型，这是防第二种死法；可它们之间又要缠得够紧，才能算出东西，不能散成一锅粥，这是防第一种死法。工程师们说的「相干时间」「保真度」，说的都是正在成形能活多久、活得多好。

◆ 九、三维不同步：路定了，土还在一锅粥

上面那张表，三个维度大致是一起往前走的。真实的发生，常常不是这样。三个维度各走各的步子，一个维度定型了，另一个维度还在一锅粥里。

林舟的同事邓老师，三十八岁，教化学。去年他调到一所新学校，带一个新班。

开学第二个月，他的课已经定型了。讲什么，先讲什么，哪里停下来让学生动手，他闭着眼都能走一遍。这是路的定型。

学生对他的印象，也定型了。「讲得清楚，不太笑，作业多。」一个月里，这几个差异一次次出现，稳住了。这是形状的定型。

可他和这个班之间的土，还在一锅粥里。学生不知道问他问题会不会挨批评，他不知道这群孩子哪些是真懂、哪些是装懂。课代表还没选出来，家长群里没人说话。彼此牵着，又牵不紧。

结果是，课讲得再好，考试成绩始终上不去。

邓老师起初以为是路出了问题，把课又改了一遍，没用。后来他做了一件看起来和教学无关的事：每周五下午留半小时，不讲课，让学生随便问，问什么都行。

两个月后，土慢慢缠紧了。学生开始在课上插嘴，他开始知道谁卡在哪里。成绩跟着上来了。

这个故事说的是：三个维度可以各在一种状态里，而且一个维度的状态，会卡住另外两个。路定型了，土还在一锅粥里，形状就稳不出新样子来。

量子测量里也有这种不同步。

一台光电倍增管，电压、放大级数、读出电路，都调好了，路定型了。可要是管子刚从冰箱里拿出来，内部的温度还没平，材料里的杂散电荷还在乱跑，土就还在一锅粥里。这时候测，读数会飘，暗计数会偏高。有经验的实验员都知道，管子要先通电预热一段时间，等它「安静下来」，再开始正式测。〔核：大意〕

这段等待，就是在等土从一锅粥走到正在成形。路早就好了，土还没跟上。

所以，问一件事处在哪种状态，不能只问一句。要分三维各问一句：形状到了哪一步，路到了哪一步，土到了哪一步。三句答案常常不一样。

卡住的地方，往往就在最慢的那一维。

各家诠释在这里也露出一个习惯：它们多半只盯着一维问状态。问波函数塌没塌，是在问形状；问薛定谔方程怎么走，是在问路；退相干问的是土。三维各在哪一步、谁在等谁，很少有人一起问。

本书的账，要三维一起记。一个读数稳出来，是最慢的那一维也跟上了的那一刻。

◆ 十、一个完整的例子：一次读数的三种状态，三个维度

把这一章的东西合起来，用一次测量画一张表。

阶段	路	形状	土
光子在路上	一锅粥：几条路同时在走	一锅粥：说不出它在哪	激光器、空气、挡光片缠着
撞上光阴极，打出电子	正在成形：一条路冒头	正在成形：一个微小的电流	光阴极材料、电压开始起作用
打拿极一级级放大	正在成形到定型：路越收越拢	正在成形：脉冲越来越大	电极、导线、电源缠得越来越紧
示波器上的尖峰	定型	稳定显露	仪器整体稳住
林小满写下一个数	定型	稳定显露，落进理念界	本子、实验记录、课题一起回写

这张表的每一格，都可以再细说。可它已经说明了一件事：读数的稳住，不是某一刻的一跳，而是三个维度、一层一层，从一锅粥走到定型。

◆ 十一、放回日子里

想一想你学会一件事的过程。比如学开车。

刚上车的时候，一锅粥：方向盘、油门、刹车、后视镜、教练的话，全搅在一起，你分不清先管哪个。

练了几次，正在成形：你能开一小段了，可一到路口就慌，一慌就全乱。这段最难熬，也最要紧。教练在这时候骂一句，你可能就散了；鼓励一句，你可能就稳了。

再后来，定型：你上车就开，不用想。

很多人在正在成形那一段放弃，觉得「我就是学不会」。其实那一段的乱，正是新东西在冒头。

明天能试的一件事：找一件你正在学、还没学成的事。别问「我学会了没有」，问「我现在在哪一段」。如果是在正在成形，就给自己留出一点「别乱搅」的时间，像奶奶点豆花那样，让它自己聚一会儿。

带走的话

一锅粥、正在成形、定型，三个维度各有这三种状态；各家诠释吵的，大半是怎样对待正在成形那一段。

小　账

这一处，读数是谁的？读数是三个维度一层层从一锅粥走到定型的那个终点；它在正在成形那一段里长出来。

先在，还是发生？玻姆把位置放进永远的定型，多世界把宇宙放进永远的一锅粥；本书说，状态是走出来的。

想一想

1. 你最近有没有一件事，卡在了正在成形那一段？你是在乱搅，还是在等它聚？
2. 豆腐会馊，冻豆腐会长出新样子。你身上有没有一样定型了的东西，正在慢慢回到一锅粥，或者长出新样子？

◆

10

第 10 章

特征律：一个差异怎样稳成一个特征

◆ 一、你一定有过这样的时刻

林小满刚上大学时，宿舍楼下有一只橘猫。

开学第一周，她只觉得楼下有「一只猫」，黄的，有时在台阶上，有时在花坛里。她分不清它和隔壁楼那只黄猫。

第二周，她发现这只猫左耳缺了一小块。从那天起，她一眼就能认出它：缺耳朵的那只。

第三周，她给它起了个名字，叫「豁豁」。室友们也跟着叫。豁豁成了宿舍楼的一员。

后来有一次，豁豁打架，右耳也伤了。林小满第一眼差点没认出来，愣了一下，才发现：还是豁豁，走路一颠一颠的样子没变。

「豁豁」这个特征，是什么时候有的?

不是开学第一天。那时它只是一团黄。是左耳那个缺口，一次次地被看见，每一次都在同一个地方，稳稳的，这个差异才被认了出来，成了「豁豁」。后来右耳也伤了，缺口不再是唯一的记号，可走路的样子、在台阶上趴的位置，这些差异也稳了很久，于是「豁豁」还在。

本章要讲的，就是这件事：一个特征，是怎样从一团差异里稳出来的。

◆ 二、特征律

王德生博士把这件事写成了一条律，叫**特征律**：

> **特征的发生，是差异的稳定性出现。**

这句话要拆开读。

「差异」：先得有不同。一团黄里，左耳有个缺口，这是一个差异。没有差异，什么特征都长不出来。

「稳定性」：这个差异，要一次次地出现，而且出现在差不多的地方、差不多的样子。只看见一次缺口，你会以为是看错了；看见十次，每次都在左耳，它就稳了。

「出现」：稳定性不是一开始就在的，它是在一次次的碰里冒出来的。

本系列第 238 号《特征律》专门讲过这条律。它说要有三个条件：差异存在，差异稳定，再加上一套能让差异稳住的复杂机制。三者齐备，一个「同一的东西」就会被认出来。

这里有一个和日常想法相反的地方。日常想法是：先有一只猫，猫身上有缺耳朵这个特征，我们去发现它。特征律说：缺口这个差异一次次稳住，「这一只猫」才作为一个特征被认出来。不是先有猫、再有特征；是差异稳住了，特征和那只猫一起出来。

这正好是第 6 章那个乘号：承载者和属性，一起发生。

◆ 三、比较，不是工具

你可能会想：认出缺耳朵，不就是比较吗？拿这只猫和别的猫一比，看出不同，就认出来了。

王德生博士对「比较」有一个不太一样的说法。他说，在日常的想法里，特征是「露出」的，比较只是一个工具，把本来就在的特征照出来。可实际上，比较是两个差异过程的纠缠。你看这只猫的那一串差异，和你看那只猫的那一串差异，缠在一起；在缠的过程里，某个差异稳住了，特征才发生。〔据作者口述〕

说得家常一点：你不是拿一把尺子去量一个现成的东西。你是在一次次地看这只、看那只的过程里，让某个不同自己稳了下来。

这有什么要紧?

要紧在于，它说明特征不是一个人在桌子前「发现」的。特征是在许多次碰里，在看的人、被看的东西、看的那一下之间，长出来的。

量子力学里，这件事格外明显。一个读数，是在系统和仪器一次次的碰里，一层层地稳出来的。没有先在的读数，等着仪器去比较、去照出来。

◆ 四、从一锅粥开始：碰撞、自组织、涌现

王德生博士给特征律补过一句话：特征的发生，开始是从混沌碰撞、自组织、涌现来的。〔据作者口述〕

这三步，用上一章的话讲，就是从一锅粥到正在成形、再到定型的路。

第一步，混沌碰撞。一锅粥里，许多差异同时在，彼此乱撞。豆浆里的蛋白质分子，开学第一周林小满眼里那些黄色的影子。没有一个差异站得住。

第二步，自组织。撞着撞着，有些差异开始彼此带着走。豆浆点了卤，蛋白质一团团聚起来；林小满注意到左耳那个缺口，之后每次看到黄猫，眼睛自己就往左耳上找。没有谁在指挥，是差异自己聚了起来。

第三步，涌现。聚着聚着，一个新的样子整个冒了出来，比任何一个零件都大。豆花连成一片，成了豆腐；那些零零碎碎的「左耳缺口」「台阶上」「一颠一颠」，忽然合成了一个「豁豁」。

碰撞、自组织、涌现，是一个差异从一锅粥里稳成特征的三步。

◆ 五、一次测量的三步

把这三步放到光电倍增管里。

混沌碰撞：光子还没被测到时，几条可能的路同时在走，它们彼此干涉，这就是碰撞。物理学家说它处在叠加里。

自组织：光子撞上光阴极，打出一个电子；电子撞上第一级打拿极，撞出几个；这几个又撞出几十个。这是一个自己放大自己的过程：一个差异一旦冒头，就带出更多同样的差异，没有谁在外面指挥。物理学家管这叫雪崩、叫级联放大，它在结构上，就是自组织。

涌现：几百万个电子汇成一个电流脉冲，在示波器上画出一个尖峰。这个尖峰，不是任何一个电子的样子，是它们一起涌出来的一个新形状。它已经大到、稳到，谁来看都是那个尖峰。

所以，一次测量，就是一次特征律的发生。读数，就是那个稳住了的差异。

本书在这里把一句话说定，它是全书的母题：

测量，是一次特征律的发生：叠加是一锅粥，放大是自组织，读数是涌现出来、稳住了的差异。

◆ 六、稳，是怎样确认的

特征律里最要紧的两个字，是「稳定」。在量子测量里，稳定怎样确认?

物理学里有一个现象，可以当作确认。一个理想的测量，测完之后立刻再测一次同样的量，得到的结果和第一次一样。教科书管这叫测量的可重复性。

这就是稳。第一次测出自旋向上，紧接着再测，还是向上，再测，还是向上。这个差异，稳住了。

可是要注意：这种重复，是同一层上的重复。真实的测量，稳不止发生在一层上。

光电倍增管的每一级打拿极，都是一层。每一层上，差异被放大，也被确认一次。上一层送来的那一点电流，在这一层被放成更大的电流。如果上一层是噪声，到了这一层往往就被淹掉了；只有真的差异，才能一层层地被放上去。

示波器是一层，林小满的眼睛是一层，她的实验记录是一层，她的课题组拿这些数据画出的曲线又是一层。每一层都在确认下一层送上来的东西，也在回过头来，让下一层的确认更有意义。

稳，不是在一层上一次完成的，是层层确认、层层回写的结果。

这就引到了第四编。把稳说成「去一程、回一程」，像握一次手，是一个常见的说法，第 3 章讲的交易诠释就是这样。这个说法太扁了。稳是层级迭代的：往上一层层地传，往下一层层地改，来来回回，直到各层对上。王德生博士在讨

论中特别纠正过这一点：稳定是层级迭代的，不是线性两程，类似多重网格法。〔据作者口述〕

第四编会用整整六章，把这件事讲透。

◆ 七、特征律和另外两律

在王德生博士的体系里，特征律不是单独一条，它和自由律、幸福律合称意义三律。本书主要用特征律，可另外两律，在量子测量里也露了一点脸，这里先提一句。

自由律，大致说的是：在许多可能里，走出一条来。叠加里有许多条路，测量走出了一条，这里有自由律的影子。

幸福律，大致说的是：一股张力，在转换中得到释放。光子带着的能量，在光阴极上释放成一个电子，再一级级地释放成一个脉冲，这里有幸福律的影子。

王德生博士在讲创造力时说过一句话：创造力不是一律单独运行的结果，而是三律一起跑、由特征律收口。〔据作者口述〕读数也是这样：三律都在跑，可最后让它成为一个读数的，是特征律的那一收：一个差异稳住了。

这一层，本书不再展开。它是本书的旁证，不是本书的论证。

◆ 八、一个完整的例子：盖革计数器的一声响

一块放射性矿石，一台盖革计数器。

计数器的管子里，装着稀薄的气体，两极之间加着几百伏电压。

一个原子核衰变，放出一个粒子。在这一刻之前，哪个原子核会衰变、什么时候衰变，是一锅粥：每一个原子核都在叠加里，衰变和不衰变的路都在走。

粒子飞进管子，撞上一个气体分子，打出一个电子。这是第一个冒头的差异。

这个电子在电场里加速，撞上别的分子，又打出电子；新打出的电子再加速、再撞。几微秒之内，管子里的电子成了一场雪崩。这是自组织：一个差异，带出了无数个同样的差异。

雪崩汇成一个电流脉冲，推动喇叭，「咔」的一声。这是涌现：一个人人都听得见的声音。

这一声响，作为一个特征，稳住了。它被录进计数器的读数，被你听见，被你在本子上记成「第 61 下」。

那个原子核，作为「刚才衰变的那一个」，也是在这一声响里才被显出来的。在响之前，它只是矿石里亿万个原子核中，说不清的某一个。

◆ 九、稳住了，就不会再变吗

特征律说，特征是差异的稳定性出现。读到这里，你会生出一个疑问：既然是「出现」，那它会不会「消失」？一个特征稳住了，是不是从此就一劳永逸?

先说一个日常的答案：会消失。

豁豁后来老了。毛色淡了，耳朵上的缺口被新长的毛盖住了一半，走路也不再一颠一颠，而是慢吞吞的。林小满大三那年回宿舍，在台阶上看见一只老猫，愣了很久，才认出是它。

那几秒钟的愣，就是特征在晃。原来稳住的那几个差异，一个一个变淡了，「豁豁」这个特征差点没能再稳出来。最后让她认出来的，是它看见她时，照旧往她脚边蹭的那个动作。旧的差异淡了，一个新的差异接了班。

所以，特征的稳，不是一次稳住就锁死了。它是要一直被续着的。差异一次次地再出现，特征就续上；差异不再出现，特征就慢慢散掉。

这和第 9 章说的一致：定型只是一站，不是终点。

可量子测量里的读数，好像不一样。林小满记下的「第 37 号脉冲，12.4 微秒」，过一百年，它还是那个数。它不会像豁豁那样变老、变淡。

这里要分清两件事。

一件是「那一次读数」。它发生过了，就改不了。这是事实。本书反复说，发生学反对先在，不反对事实。一次读数一旦定型、被记下、被别人看过，它就成了过去，过去不会再变。

另一件是「那个被测的东西现在怎样」。林小满测到的那个光子，早就被吸收了，变成了一点热。读数还在本子上，它的承载者已经不在了。

豁豁的故事里，这两件事是缠在一起的。「那一次认出」是事实，改不了。可「豁豁现在还是不是豁豁」，要靠每一次重新认出来续着。

量子的读数，把这两件事分得很开。读数作为事实，永远留下了；读数的承载者，往往在读完之后就散了。

于是，特征律在这里多出一层意思。稳住了的事实，会一直留着。可那个特征背后的东西，要不断地重新稳，才能一直被认作「同一个」。

日常里的杯子，看上去从不需要续。下一节会说，那是因为它每一秒都在被空气和光续着，续得太密，你感觉不到。

哪天续断了，比如杯子摔碎，「这只杯子」这个特征就散了。可它曾经在那张桌上放过三年，这件事不会散。

◆ 十、为什么读数「看起来」先在

你可能会问：既然读数是一层层稳出来的，为什么我们日常感觉不到？为什么桌子上的杯子，看上去就是先在那里的?

因为在日常的尺度上，稳住得太快、太多了。

一只杯子，每一秒钟，都被数不清的空气分子撞着，被数不清的光子照着。每一次撞、每一次照，都是一次碰，都在让杯子的位置这个差异稳一次。物理学家估算过：一粒灰尘大小的东西放在空气里，它的位置叠加，会在短得难以想象的时间里被环境抹掉，短到比光穿过一个原子核的时间还短得多。

这么多次碰，这么快地稳住，层层叠叠，你看到杯子的时候，它早就在无数层上对齐了。发生的过程，被压在了你看不到的地方，你看到的只有定型。

于是，杯子「看起来」先在。

这不是错觉。杯子确实稳住了，它就是一个事实。只是这个事实，是被密密麻麻的发生撑着的。好比一条看上去纹丝不动的河面，底下的水一直在流。

量子力学的实验之所以「奇怪」，是因为物理学家费尽力气，把一个系统和环境隔开，让它少碰、慢碰。于是，那段平时被压住的正在成形，才被拉长到人看得见的地步。

量子不是另一个世界。它是我们这个世界，被放慢了来看。

◆ 十一、放回日子里

你认人的本事，就是一次次特征律。

一个新同事刚来，你只记得「新来的那个」。过了几天，你注意到她说话尾音往上挑，每次都这样。又过几天，你发现她写邮件总爱用破折号。这些差异一次次地出现、稳住，有一天，你看到一封没署名的邮件，就知道是她写的。

人也是这样被你「认出来」的，不是一眼看透，是差异一次次稳住。

这也意味着：你对一个人的印象，是在你们之间那一次次的碰里稳出来的。你只在开会时见她，稳住的是开会的她；你和她一起出过一趟差，稳住的可能是另一个她。

明天能试的一件事：想一个你自以为很了解的人，写下三个你凭它认出他的特征。然后问自己：这三个特征，是在什么样的场合里稳住的？有没有一个场合，你从没和他一起待过？

带走的话

特征的发生，是差异的稳定性出现；一次测量，就是一次特征律：叠加是一锅粥，放大是自组织，读数是涌现出来、稳住了的差异。

小账

这一处，读数是谁的？读数是那个在碰撞、自组织、涌现里稳住的差异；承载它的那个粒子，和它一起被显出来。

先在，还是发生？日常想法说特征先在、比较把它照出来；特征律说，特征在比较的纠缠里发生。

想一想

1. 你是凭什么认出你最熟悉的那个人的？那些特征，是哪些年、哪些场合里稳下来的？
2. 你有没有过「认错」一个人的经历？那一次，是哪个差异没有稳住？

◆

第 二 编 · 总判断

东西和它的属性一起发生；属性是某种差异在形状、路、土的偏重下稳住；稳住的过程，是从一锅粥经正在成形到定型的特征律。一次测量，就是一次特征律。

第三编把这副底盘放进实验室：叠加、纠缠、干涉条纹、过门槛、退相干、读数，一样一样地看。



第　三　编

测量：一次特征律的发生

导　语

这一编六章，把第二编的底盘放进实验室。第 11 章问叠加是什么。第 12 章把两种「纠缠」分开：物理的量子纠缠，和本书说的土。第 13 章讲干涉条纹为什么是正在成形。第 14 章讲测量怎样「过门槛」。第 15 章讲退相干：它讲对了什么，又少了什么。第 16 章讲读数和三个号位怎样一起显出来。

一句话：测量不是把一个藏着的值揭开，是让一锅粥里的差异，一层层地稳成一个读数。

11

第 11 章

叠加不是「同时在两处」

◆ 一、你一定有过这样的时刻

夏天傍晚，林小满在公园的池塘边坐着。

有两个小孩一左一右往水里扔石子。两圈水波从两个地方荡开，在池塘中间碰上了。

她看了一会儿，发现一件有意思的事：两圈波碰到的地方，有的地方浪头更高了，有的地方反而平了，平得像没有波一样。高一道，平一道，排成一条一条的纹路。

这是中学课本里的波的干涉。两列波碰在一起，峰碰峰，叠得更高；峰碰谷，抵消了。

她忽然想起白天课上，教授讲的「叠加态」。教授在黑板上写了一个式子：一个电子，处在「这里」和「那里」的叠加。下面有同学问：「那它到底在哪？是同时在两个地方吗？」

教授笑了笑，说：「这是最常见的误解之一。」

可他没往下说，下课铃响了。

本章要接着往下说。

◆ 二、最常见的讲法：同时在两处

很多科普书这样讲叠加：一个量子粒子，可以同时处在两个状态。电子可以同时在这里和那里；猫可以同时死和活；量子计算机的一个比特，可以同时是 0 和 1。

这个讲法好记，也有一点道理：在数学上，叠加态确实是把两个状态加在一起。

可它有一个大毛病：它把叠加讲成了一种「多出来的存在」。好像电子本来该在一个地方，量子力学让它多了一份分身，同时出现在两处。

如果真是这样，你去测，应该能在两处都测到半个电子，或者在两处各测到一个。

可实际上，你每次测，都只在一处测到一个完整的电子。从来没有半个，也从来没有两个。

所以「同时在两处」，至少是一个容易误导的说法。

◆ 三、叠加和你怎么问有关

叠加有一个性质，科普书很少讲，可它是理解叠加的关键：**一个态是不是叠加，取决于你用哪一种方式去问它**。

拿电子的自旋来说。一个电子，自旋沿竖直方向向上。你沿竖直方向去量它，它百分之百给你「向上」。在竖直方向上，它不是叠加，它是一个确定的态。

可同一个电子，你沿水平方向去量它，它有一半的机会给你「向左」，一半的机会给你「向右」。在水平方向上，它是「向左」和「向右」的叠加。

同一个电子，同一个态。问竖直方向，它是确定的；问水平方向，它是叠加。

物理学家说，叠加是相对于「基」而言的，基就是你选来问它的那一组可能的答案。〔核：大意〕

这件事很要紧。它说明叠加不是电子身上的一件衣服，不是电子「多出来」的一种存在方式。叠加说的是：如果用某一种方式去碰它，会有几种可能的读数，彼此还没分开。

换成本书的话：**叠加，是几条路相对于某一种碰法，还在一锅粥里。**

它是一个关系，不是一个东西。

◆ 四、路在碰撞：会抵消的可能

可是，叠加也不只是「几种可能还没定」。如果只是还没定，那它和掷骰子之前没什么两样：骰子落地之前，六个面都有可能，没人说骰子处在六个面的叠加里。

叠加和骰子，差在一件事上：叠加里的几条路，会互相碰撞，会抵消。

骰子的六种可能，各占六分之一，加起来是一，谁也不会让谁变小。概率只会相加，不会相减。

量子力学里的可能，不是用概率直接相加，而是用一种叫「振幅」的东西相加。振幅可以是正的，可以是负的，还可以是复数。两条路的振幅加在一起，可能变大，也可能互相抵消，变成零。

这就像池塘里的两圈水波：峰碰峰，更高；峰碰谷，平了。

所以，叠加里的几条路，不是安安静静地排队等着被选中。它们在碰撞，在互相加强、互相抵消。这正是第 10 章说的「混沌碰撞」：特征律的第一步。

叠加，是一锅粥里几条路在互相碰撞、互相加强或抵消，还没有一条稳住。

◆ 五、一个完整的例子：一台干涉仪

物理学家有一种很干净的装置，叫马赫—曾德尔干涉仪，可以把这件事看得一清二楚。

一束光射到一块半透半反的镜子上，一半透过去，一半反射出去，分成两条路。两条路各走一段，经过两面全反射镜，又在第二块半透半反的镜子上汇合。汇合之后，有两个出口，各放一个探测器，叫甲和乙。

现在把光调得极弱，一次只放一个光子进去。

如果光子只是「随机走了一条路」，那么它走哪条都一样，到了第二块镜子，又随机被透过或反射，结果应该是甲、乙各一半。

可实验的结果是：只要两条路的长度调得正好，每一个光子，都从甲出来。乙那边，一个也没有。

为什么？因为两条路在第二块镜子上碰撞了。通往乙的那两份振幅，正好一正一负，抵消了；通往甲的两份，加强了。

这个实验，把叠加的两个特点都展示了出来。

第一，叠加不是「走了一条路，只是我们不知道哪条」。如果是那样，就不会全从甲出来。

第二，叠加也不是「同时走了两条路，各走半个」。因为你如果在其中一条路上放一个探测器，去查光子走没走这条路，你永远只会测到一整个光子，或者什么都没测到。

那叠加是什么?本书说:在第二块镜子之前,两条路都在,还在一锅粥里,它们在镜子上碰撞,碰撞的结果是一条路被稳住:通往甲的那条。

注意,这里的稳住,没有经过「测量」。第二块镜子不是探测器,它不记录任何东西。可两条路的碰撞,本身就让一个结果稳了下来。

差异的稳住,不一定要靠测量;碰撞本身,就会让某些差异加强、某些差异消失。

测量要做的,是让这个稳住,再往上传几层,传到一个宏观的记录里。

◆ 六、在一条路上放一个探测器

接着做一个变化。在干涉仪的一条路上,放一个能记录「光子走过这里」的探测器,可它不吸收光子,只是记一笔,再放光子走。

这时候,结果变了:甲、乙各一半。干涉消失了。

为什么记了一笔,干涉就没了?

挂钩式会说:探测器扰动了光子,把它碰乱了。这是海森堡显微镜的讲法,第 1 章说过它的毛病。

本书会说:那个探测器记下的一笔,让「走了这条路」这个差异,往上传了一层,稳了一些。一旦它在探测器里稳住,两条路就不再处在同一锅粥里了:一条路已经被记了,另一条没有。它们在第二块镜子上,就碰不成了。

换句话说,干涉需要两条路都还在一锅粥里。只要有一条路的差异,在任何一层上稳住了,碰撞就失去了对手。

这件事有一个很漂亮的推论，第 33 章会讲：如果在光子出来之前，把探测器记下的那一笔抹掉，让「走了这条路」这个差异重新回到一锅粥里，干涉会回来。这就是量子擦除。

◆ 七、各家怎样讲叠加

把各家诠释对叠加的讲法排一下。

多世界说：叠加是真实的，两条路都走了，后来世界分成两支。可在马赫—曾德尔干涉仪里，两条路在第二块镜子上又碰回去了，没分成两支，多世界要解释什么时候分、什么时候不分，它的回答是：看有没有和环境缠上。

玻姆说：光子始终只走一条路，可导航波走两条路，导航波在第二块镜子上干涉，把光子引到甲。叠加是导航波的，不是光子的。

QBism 说：叠加态是你对可能结果下注的方式，干涉是赌注之间的一种相关。

关系诠释说：相对于第二块镜子之后的探测器，光子在两条路上没有确定的值；相对于那个记录的探测器，有。

这些讲法，都和实验对得上。本书的讲法也和实验对得上，它只是换了一个看的角度：不问「光子到底在哪」，问「哪些差异还在一锅粥里，哪些已经稳住了，稳在哪一层」。

◆ 八、量子比特：哪个方向都可能是「确定」

量子计算机的基本单位，叫量子比特。科普书常说：普通比特要么是 0，要么是 1；量子比特可以同时是 0 和 1。

本章前面已经说过，「同时」这个说法容易误导。这里用量子比特，把「叠加和你怎么问有关」再讲透一点。

物理学家有一个画法：把一个量子比特所有可能的状态，画成一个球面上的点，叫布洛赫球。北极是 0，南极是 1。球面上任何一个点，都是一个合法的状态。

赤道上的一个点，比如正东方向，按「0 还是 1」去问它，一半一半，它是 0 和 1 的叠加。

可是，如果你换一个问法，按「东还是西」去问它，它百分之百给你「东」。在这个问法下，它是确定的，一点也不叠加。

球面上的每一个点，都是这样：总有一个方向，沿着这个方向去问，它是确定的；换别的方向去问，它就成了叠加。〔核：大意〕

所以，没有一个量子比特「天生就是叠加的」。叠加，永远是相对于某一种问法。

量子计算机的本事，就在这里。它让一串量子比特，在某个问法下处在叠加里，让许多条路在一锅粥里同时走、互相碰撞，碰撞让错的答案互相抵消、对的答案互相加强；最后，换一个问法去读，让对的答案稳出来。

这和马赫—曾德尔干涉仪是同一个道理：一锅粥里的路在碰撞，碰撞让某些差异稳住。量子计算，是把这件事做成了工程。

◆ 九、叠加和「不知道」，怎样分得开

读到这里，你也许还会嘀咕：说来说去，叠加不就是「还不知道」吗？只是不知道的方式复杂一点。

这一句，物理学里有人认真主张过，本书先给它一个公道。说波函数代表人的知识，而不是世界本身，这一路诠释由来已久，QBism 是其中一支。它们的出发点很朴素：概率本来就是讲知识的，掷骰子之前你不知道是几，波函数也是这样。

可是，有一件事，单靠「不知道」讲不通。

不知道，是可以拆开来算的。你不知道一个骰子是几，就把六种情况各算一遍，按各自的机会加起来。每一种情况算出来的东西，都是正数，只会往上加。

前面那台干涉仪不是这样。要是光子「其实走了某一条路，只是你不知道」，你也可以拆开算。走上路，到乙的机会是一半；走下路，到乙的机会也是一半。合起来，乙那边该有一半的光子。实际上，一个也没有。

拆开算，算错了。两条路一起算，振幅一正一负，抵掉了，才对上数据。

这说明，叠加里的两条路，在第二块镜子之前，不是「有一条是真的，你不知道是哪条」。它们得一起在场，才能撞出那个结果。

再拿一个日常的场景对一对。

林舟的学生李想，十七岁，高三。他晚上在两所大学之间犹豫，父母不知道他会填哪一所。父母的「不知道」，对李想自己选哪一所，没有一点影响。他们知不知道，他最后都只会填一所。

叠加里的两条路，彼此会影响。一条路长了一点，另一条路的结果就跟着变。乙那边是全黑，还是一半亮，要看两条路的差。这种互相影响，是「不知道」给不出来的。

所以，知识派的诠释要说清楚振幅为什么会抵消，就得给「知识」加一条普通知识没有的规矩。这条规矩是：两份知识可以互相抵消。QBism 等派别的确在做这件事，给概率加上新的约束。〔据研究文献〕

本书的看法是：与其给「知识」加上一条奇怪的规矩，不如承认，叠加里的路是真的在碰撞。它们还在一锅粥里，可这锅粥是真的在翻，不是你脑子里的一团糊涂。

这也不是说，知识和叠加毫无关系。第 10 章说过，特征是在许多次碰里稳出来的，看的人也在这些碰里。只是，看的人进来，是在后面那几层。在第二块镜子那一层，路的碰撞在没有任何人知道的时候，就已经让乙那边一片漆黑了。

叠加不是一种无知，是一锅还在翻的粥。无知是你和粥之间的事，翻是粥自己的事。

这里说「粥自己」，不是说粥先在。那锅粥离不开光源、镜子、两条路的长度，换一套装置，翻出来的就是另一锅。它不归你的脑子，也不归光子单独所有，它是这一套装置里正在发生的碰撞。

◆ 十、本书的说法

收成三句话。

第一，叠加不是「同时在两处」，也不是「在一处只是不知道」。它是几条路相对于某一种碰法，还在一锅粥里。

第二，叠加里的路在互相碰撞，会加强，会抵消。这是特征律的第一步，混沌碰撞。

第三，碰撞本身就能让某些差异稳住；测量，是让这个稳住一层层往上传，传到宏观的记录里。

第一句说明叠加是一个关系；第二句说明它和普通的「不确定」有本质的不同；第三句说明从叠加到读数之间，有一段可以细看的路。

◆ 十一、放回日子里

你一定有过这样的时候：一件事有两个方向，你还没决定。比如周末，是陪父母去郊外，还是留在家里把拖了很久的报告写完。

这时候，两个方向在你心里不是安安静静地排着队。它们在碰撞：想到父母上次说想出去走走，陪父母那一边变重了；想到周一要交报告，留在家那一边又变重了。有时候，一个念头会让一边整个消失：你突然想起报告其实下周才交。

这和叠加不一样，人的犹豫不是量子叠加，本书不想把两者混为一谈。可它们有一点相似：可能性之间会碰撞，碰撞会让某些可能加强、某些可能消失，最后有一个稳下来。

明天能试的一件事：下一次犹豫不决时，别急着用一张优缺点清单去「选」。先让几个方向在心里多碰一会儿，看看哪个方向，在碰撞里自己冒得更高。很多时候，答案不是选出来的，是碰出来的。

带走的话

叠加不是同时在两处；它是几条路相对于某一种碰法还在一锅粥里，彼此碰撞、加强、抵消，还没有一条稳住。

小　账

这一处，读数是谁的？在干涉仪里，「全从甲出来」不归哪条路，是两条路碰撞出来的；在探测器里稳住一笔，碰撞就失去了对手。

先在，还是发生？「同时在两处」把叠加讲成多出来的存在；本书说，叠加是几条路的一锅粥，是相对于碰法的关系。

想一想

1. 你能不能找出一样东西，用一种方式去看它，它是确定的；换一种方式去看，它就不确定了？
2. 你最近一次「碰出来」的决定，是在哪两条路的碰撞里稳住的？

◆

12

第 12 章

两种「纠缠」：物理的一种，和本书的土

◆ 一、你一定有过这样的时刻

林舟的父母结婚五十年了。

过年回家，林舟发现一件事：两位老人吃饭时，几乎不用说话。母亲伸手，父亲就把醋瓶递过去；父亲刚咳一声，母亲已经起身去倒水。他们的动作，像是一个人的两只手。

林小满在旁边看着，开了个玩笑：「爷爷奶奶这是量子纠缠了吧。」

一桌人都笑了。

林舟后来想，这个玩笑其实有点意思，也有点不对。

有意思的是：两位老人之间，确实有一种分不开的牵连。单看父亲，你猜不准他下一秒要什么；单看母亲，也猜不准。可把两人放在一起看，他们的动作总是一递一接，咬得严丝合缝。

不对的是：物理学家说的量子纠缠，是另一回事。两位老人之间的默契，是五十年一天天磨出来的，每一递一接，都是看见了、听见了才做的。量子纠缠里，没有谁看见谁，没有谁听见谁。

本书前面多次用了「纠缠」这个词，后面还要更多地用。本章要把它分清楚：哪一种是物理的，哪一种是本书的。

◆ 二、物理里的量子纠缠

先说物理。

两个粒子相互作用过之后，它们的状态可能会变得没法分开描述。你没法说「这一个处在某个状态，那一个处在某个状态」，只能说「这一对处在某个状态」。物理学家管这叫纠缠态。

用数学的话讲：一对粒子的状态，如果不能写成两个各自状态的乘积，就是纠缠的。〔核：大意〕

纠缠有几个硬性质，每一个都有严格的数学和大量的实验撑着。

第一，纠缠的关联，可以强过任何事先配好的关联。这就是第 2 章讲的贝尔不等式被违反。两位老人的默契再好，也是「事先配好」的一种：五十年里磨出来的习惯，藏在两个人各自的身上。量子纠缠的关联，超过了任何藏在各自身上的东西所能给出的上限。

第二，纠缠不能用来传消息。北京这边量出什么，广州那边单看自己的数据，看不出任何变化；只有把两边的数据拿到一起比，才看出关联。物理学家管这叫无信号定理。〔核：大意〕

第三，纠缠是专一的。如果甲和乙纠缠到了极致，甲就没法再和丙纠缠。物理学家管这叫纠缠的一夫一妻性。〔据研究文献〕两位老人可以和全家人都默契，量子纠缠不行。

第四，纠缠是脆弱的。一对纠缠的粒子，只要其中一个和环境多碰几下，纠缠就散到环境里去了，这一对之间的牵连就看不见了。第 15 章讲退相干，讲的就是这件事。

这四条，是量子纠缠的身份证。凡是不满足这四条的，就不是物理学家说的量子纠缠。

◆ 三、本书说的土

再说本书。

本书的「土」，在王德生博士的体系里叫特征纠缠，记作 E。它说的是：让路能走、形状能长出来的那片缠在一起的地。

它比量子纠缠宽得多。

两位老人五十年的默契，是土。一个实验室里，仪器、电压、温度、规程、几代学生留下的笔记缠在一起，是土。一门语言里，词和词之间的搭配、意思和意思之间的牵连，是土。一块晶体里，原子和原子之间的键，是土。一对纠缠的光子之间的关联，也是土。

第 53 号《SDE数学导论》说过一句话：特征纠缠包括但不限于量子纠缠。

所以，两者的关系是：量子纠缠，是土的一种，是在最小尺度上、满足那四条硬性质的一种。土，是一个大得多的说法，包括许多和量子毫无关系的牵连。

◆ 四、同在哪里

两种纠缠，有一个共同的地方，本书要用它。

它们说的，都是一种归不到单个东西身上的属性。

量子纠缠里，「这一对的自旋总是相反」，归不到任何一个粒子身上。第 8 章说过，这是土偏重的属性，承载者是一对，不是一个。

两位老人的默契，「一个伸手、一个递瓶」，也归不到任何一个人身上。单看父亲，他只是递了一个瓶子；单看母亲，她只是伸了一下手。默契在两人之间。

这一点，是本书把量子纠缠放进「土」里的理由：它和别的土一样，是在关系里、在一群东西之间稳住的属性。

◆ 五、异在哪里

可是两者的差别，也要说透，不然本书会犯一个大错：把物理学的严格概念，拿来当比喻随便用。

第一个差别：来路不同。两位老人的默契，是一次次看见、听见、碰到之后，一层层回写出来的，它的每一步，都靠消息在两人之间来回传。量子纠缠的关联，不靠两边之间的消息来回，它在两个粒子分开之前就埋下了，在测量时显出来，而且显出来的方式，超过了任何靠消息或事先约定所能做到的。

第二个差别：强弱不同。两位老人的默契，可以很强，可它的强度，永远不会超过贝尔不等式的那条上限。只有量子纠缠，能越过那条线。

第三个差别：专一与否。土可以同时连着很多东西，一个人可以和全家人默契。量子纠缠是专一的。

第四个差别：数学不同。量子纠缠有一套严格的数学，可以算，可以测量它有多强。本书的土，目前主要是一个本体论的说法；第 53 号书给它做过一些数学化的尝试，可还远没有量子纠缠那样严整。

所以本书守一条规矩：说到物理，「纠缠」专指量子纠缠；说到本书的体系，用「土」或「特征纠缠」，不说光秃秃的「纠缠」。

林小满那个玩笑，按这条规矩，应该改成：「爷爷奶奶之间，土缠得很深。」不如原话好笑，可是准确。

◆ 六、一张对照表

本书的说法	物理学的说法	关系
土、特征纠缠	关联、相互作用、环境、纠缠	本书的说法更宽
一对粒子之间的土	量子纠缠	量子纠缠是土的一种，有四条硬性质
土太散	系统和环境缠得太广、纠缠扩散到环境里	大致对上退相干

本书的说法	物理学的说法	关系
土缠得正好	可控的纠缠，相干保持	量子计算要的状态
土太死	系统被频繁测量、锁在一个状态	大致对上量子芝诺效应
回写	测量记录改变后续的实验安排、反馈控制	本书的说法更宽

表里的「大致对上」，意思是两者在结构上相像，可本书不主张它们是同一回事。附录三会把全书的对照，一条一条标清「同构」还是「类比」。

◆ 七、没见过面，也能缠上

量子纠缠还有一个更奇特的性质，叫纠缠交换。它对本书的「承载者是发生的」，是一个很好的旁证。

设想有两对纠缠的光子：甲和乙是一对，丙和丁是一对。甲和丁，从来没有见过面，也从来没有相互作用过。

现在，把乙和丙放到一起，做一种特别的联合测量。测完之后，甲和丁，这两个素不相识的光子，变成了纠缠的一对。〔核：大意〕

1998 年，潘建伟、蔡林格等人在实验上做出了纠缠交换。后来，它成了量子通信网络里「中继」的基本操作。

这件事说明了什么?

它说明，「这一对」作为一个承载者，不一定来自两个东西的直接接触。甲和丁成为「纠缠的一对」，是在乙和丙那一场测量里发生的。那一场测量之前，甲和丁只是各自的一锅粥里的一员，没有「它们这一对」。那一场测量之后，「它们这一对」显了出来，带着一个属性：总是相反，或者总是相同。

用第 6 章的话：承载者「甲丁这一对」，和属性「它们的关联」，在乙丙那一场测量里，一起发生。

挂钩式在这里会很难受。它要问：甲丁之间的关联，是挂在哪个钩子上的？甲身上没有，丁身上没有，它们之间也从没有过任何联系。

乘号式就简单得多：钩子和衣服，在那一场测量里，一起长出来。

◆ 八、为什么量子纠缠对本书这么要紧

既然量子纠缠只是土的一种，本书为什么花这么多笔墨在它身上？

因为它是土这个说法，在物理上最硬的证据。

本书的核心说法之一，是有些属性归不到单个东西身上，只在关系里稳住。在日常生活里，这个说法总可以被怀疑：两位老人的默契，说到底，不就是两个人各自的习惯吗？拆开来，各自身上都能找到。

量子纠缠把这条退路堵上了。贝尔不等式被违反，说的就是：这种关联，拆开来，在各自身上找不到。它不是两份各自的属性凑在一起，它是一份只属于这一对的属性。

量子纠缠是「属性可以只在关系里」最干净的实验证明。

本书借的，就是这一点。

◆ 九、专一的土，和宽松的土

第五节说，量子纠缠是专一的，土可以同时连着很多东西。这一条差别，本书还想再往下挖一层。

专一和宽松，不是两种互不相干的东西，它们是一笔账的两头。

物理里，这笔账算得很清楚。一对光子缠得越紧，它们各自和外面的东西就缠得越少。一旦其中一个和空气、和光纤、和一粒灰尘多碰了几下，这一对之间的那份专一，就被分走了。分到哪里去了？分进了环境里，分成了光子和许许多多别的东西之间的一点点牵连。牵连的总账没有消失，它从「一对之间很深」，

变成了「一大片之间很浅」。第 15 章讲退相干，讲的就是这笔账怎样从一头流到另一头。

日子里，土也有这样一笔账，只是算得没那么严。

林舟有个大学同学，姓周，四十五岁，在一家外贸公司做了二十年业务。他认识的人极多，过年的祝福短信一发就是几百条，哪个城市都有人能帮他办事。可他有一次喝了酒，对林舟说：「我认识的人多，能半夜打电话的，一个也没有。」

他的土，宽而浅。

林舟的父母正相反。两位老人一辈子没离开过县城，认识的人不多，可彼此之间，一个伸手、一个递瓶。他们的土，窄而深。

本书不说哪一种更好。本书只说，这两种土不能同时拉满。一个人的时间、注意、心力有限，分给一大片人，每一处就浅；集中在少数几个人身上，别处就薄。这和量子纠缠的一夫一妻性不是一回事，物理的那一条是严格的数学，日子里的这一条只是经验。可两者长着同一种形状：缠的总量有限，专一和宽松要互相让。

这个形状对本书的用处，是提醒你：土不是越多越好。本章的对照表里有一行，「土缠得正好」。正好的意思，就是在专一和宽松之间，找到这一件事要的那个位置。量子计算要的是极专一，几个比特之间缠得极深，和外面几乎不缠。一份读数要被大家共认，要的却是极宽松，它在环境里留下成千上万份浅浅的记号，第 22 章会细讲。

同一种土，用在不同的事上，正好的位置不一样。

◆ 十、一个完整的例子：一对纠缠光子的一生

一束紫外激光，打进一块特殊的晶体，偶尔会有一个紫外光子分裂成两个红外光子。这两个光子，偏振是纠缠的：一个横，另一个就竖；一个斜向左，另一个就斜向右。可在测量之前，单看任何一个，它的偏振是什么都说不准。

两个光子飞向两边的探测站。

在路上，它们之间的土缠得正好：没有和空气、和光纤多碰，纠缠一直保着。这一段，是正在成形的一锅粥，两边的偏振都没稳住，只稳住了「两边相反」这一份关系。

左边的探测站先量了，量出「横」。在左边，一个读数稳住了。

右边的探测站随后也量了，量出「竖」。在右边，也稳住了一个读数。

两个读数，拿到一起比，正好相反。这一份关系，在两边各自稳住之后，又在比对的那一层上稳住了一次。

如果在路上，一个光子撞上了一粒灰尘，和它缠上了，那么这一对之间的纠缠，就散到了灰尘那里去。两边再量，读数之间的关联会变弱，甚至消失。这一对之间的土，被环境的土冲淡了。

◆ 十一、拿四条身份证，验一验市面上的纠缠

第五节立了一条规矩。这一节，拿这条规矩去用一用。

林小满放暑假回家，母亲给她看手机上的一则广告：一条手链，说里面封着「量子纠缠能量」，戴上之后，人体和宇宙「同频共振」，能改善睡眠、调理气血。价钱不便宜。

母亲问：「你学物理的，这东西是真的吗？」

林小满没急着说假。她说：「妈，我们拿四条身份证验一验。」

第一条，关联要强过任何事先配好的关联。要验这一条，得有两个东西，分开测，再把数据拿到一起比，看关联有没有越过贝尔不等式的那条线。手链和人体之间，谁测了，比了什么，线在哪里？广告里一个字也没有。

第二条，纠缠不能用来传消息。广告说手链把「宇宙的能量」传给人体。可无信号定理说，单靠纠缠，连一个比特的消息都传不过去，更别说传能量了。〔核：大意〕这一条，广告不但没满足，还正好说反了。

第三条，纠缠是专一的。广告说这条手链能和「每一个戴它的人」都缠上，还能和宇宙缠上。按一夫一妻性，缠得越广，每一处就越浅。

第四条，纠缠是脆弱的。实验室里，要把一对光子的纠缠保住，得小心隔开空气和杂光。一条在常温下、贴着皮肤、整天晃来晃去的手链，里面的纠缠能保住多久，可想而知。

四条一条都没对上。

母亲听完，说：「那它说的纠缠，到底是什么？」

林小满想了想，说：「它借了一个物理的词，去说一种土。」

这句话，是本节想留给你的。市面上很多「量子」，说的其实是土：人和东西之间的某种牵连，某种感觉上的相通。这种牵连可能真有，比如一条手链陪你久了，戴上它你心里会安定一些。可那是土，是习惯和心情一层层回写出来的，不是量子纠缠。

把土说成量子纠缠，错的不是「有牵连」这一半，错的是把一个有四条硬性质的物理词，拿来给一种没有这四条性质的东西撑腰。

本书守那条规矩，也是为了这个：词用准了，你才分得出，哪里是物理在说话，哪里是广告在借物理说话。

◆ 十二、放回日子里

你和一个老朋友之间，大概也有过这样的时刻：多年不见，见面一开口，就像昨天才分开。

那份默契，是你们之间的土。它不全在你身上，也不全在他身上，在你们之间。

可它也会散。各自的生活里，缠上了新的人、新的事，两个人之间的土，慢慢被冲淡了。有一天见面，聊了一刻钟就没话了。

这不是谁变心了。是土在变。

明天能试的一件事：想一个你们之间土正在变薄的人。别等着它自己回来，主动约一次，做一件你们以前常一起做的事。土是要一次次碰，才能缠回去的。

带 走 的 话

量子纠缠是土的一种，是在最小尺度上、强过一切事先约定的那一种；它是「属性可以只在关系里」最干净的证明。

小　账

这一处，读数是谁的？「这一对总是相反」归不到任何一个光子，它是这一对的；读数之间的关联，在关系里稳住。

先在，还是发生？说默契是两份各自的习惯，是把关系拆回先在的个体；量子纠缠说，有些关系拆不回去。

想 一 想

1. 你和谁之间的土缠得最深？那份默契，你能说清它在你身上，还是在他身上吗？

2. 本书守的那条规矩，说到物理用「纠缠」，说到体系用「土」。你在日常说话里，有没有把一个严格的词，当成了比喻随便用？

◆

13

第 13 章

干涉条纹：看得见，却还不是谁的

◆ 一、你一定有过这样的时刻

林舟的学校门口有一块草坪，草坪那头是食堂。学校在草坪边上修了一条水泥路，可学生们嫌绕远，总是斜着穿过草坪走。

开学第一周，草坪上什么也看不出来。每个学生踩一脚，草弯一下，又直起来。

一个月后，草坪上出现了一条淡淡的痕迹。

一个学期后，痕迹成了一条光秃秃的小路，从草坪这头斜到那头，弯的地方都一模一样。

这条小路，是谁踩出来的?

不是哪一个学生。任何一个学生的脚印，都只是草坪上的一个点，换个学生、换一天，脚印落的地方都不一样。可是千百个脚印叠在一起，一条路冒了出来。

而且，这条路也不是谁设计的。没有人说「我们沿着这条线走」。它是自己长出来的。

量子力学里，有一样东西，和这条小路很像。它叫干涉条纹。

◆ 二、一次一个电子

1989 年，日本日立公司的外村彰团队，做了一个后来常被人称为「最美的物理实验」之一的实验。

他们让电子一个一个地穿过一个双缝装置，打在后面的屏幕上。电子流极弱，一次只有一个电子在装置里，前一个打到屏幕上，下一个才出发。

屏幕上，每来一个电子，就亮起一个小点。

一开始，小点东一个、西一个，看不出任何规律，像是随手撒上去的。

几百个点之后，屏幕上开始有一点疏密之分。

几千个点之后，疏密排成了一条一条：密的一道，疏的一道，密的一道。

几万个点之后，屏幕上清清楚楚地显出一组明暗相间的条纹。和光的双缝干涉条纹一模一样。

这组条纹，就是那条草坪上的小路。

◆ 三、条纹是谁的

条纹是谁的?

不是哪一个电子的。每一个电子，都只在屏幕上留下一个点，一个干干净净的点，从来不是一片模糊的条纹。

也不是双缝的。双缝不会自己画条纹，没有电子穿过，它什么也不留下。

也不是屏幕的，也不是看实验的人的。

条纹，是千万个单独的点叠在一起之后，冒出来的一个形状。它看得见，你可以拍下来，可以量出条纹的间距，可以拿去和理论比，对得一丝不差。可是你没法指着任何一样东西说：这条纹是它的。

这正是第 9 章说的，形状的正在成形：看得见，可还不是谁的属性。

而每一个电子打出的那个点呢？那是稳定显露。一个点，干干净净，落在屏幕上某一处，谁看都是那一处。

所以在双缝实验里，两种显露同时在：

每一个点，是稳定显露；千万个点叠出的条纹，是正在成形的形状。

物理学家通常不这样分，他们说：单个电子的落点是随机的，条纹是它们的概率分布。这个说法没错。本书只是补上一层：概率分布，是一种正在成形的形状。它冒出来了，可它不落在任何一个承载者身上。

◆ 四、条纹的形状，是谁定的

你可能会问：条纹虽然不是哪个电子的，可它的样子是确定的，间距多宽、哪里亮哪里暗，算得一清二楚。这个样子，总是由什么定的吧?

是由路和土定的。

路，是电子从源头出发、穿过两条缝、到达屏幕的那几条可能的路。第 11 章说过，这几条路在一锅粥里，互相碰撞，加强或抵消。哪里加强，哪里就亮；哪里抵消，哪里就暗。

土，是整套装置：两条缝隔多远，缝离屏幕多远，电子的能量多大，周围有没有杂散的电磁场。把缝的间距改一改，条纹就变疏或变密；装置里漏进一点磁场，条纹会整体挪一挪。

这正是第 8 章的第一个方程：形状 ＝ F（路，土）。条纹的形状，由路在土上碰撞的方式推出来。

这个方程算得极准。量子力学最了不起的地方，就在这里：它能把正在成形的形状，在它还没冒出来之前，就精确地算出来。

可是方程算出的，是条纹，是那条小路的形状；它不告诉你下一个电子落在哪。下一个电子落在哪，是一次稳定显露，要等它真的落下来才发生。

◆ 五、一看，条纹就散了

第 11 章说过，在干涉仪的一条路上放一个探测器，干涉就消失了。双缝也一样。

在两条缝旁边各放一个探测器，记下每个电子走的是哪一条缝。屏幕上就不再有条纹，只剩下两团模糊的亮斑，一条缝对着一团。

物理学家管这叫「路径信息破坏干涉」。

本书用正在成形来讲：条纹是一种正在成形的形状，它要靠两条路都还在一锅粥里、能在屏幕上碰撞，才长得出来。一旦每个电子走哪条缝，在缝边就稳住了，两条路就不再碰撞，条纹这个正在成形的形状，就散了。

这就是第 9 章说的正在成形的第一种死法：散回去。只不过这一次，不是散回一锅粥，而是被过早地拉成了另一种定型：「走了左缝」「走了右缝」。

还有一个更细的事实：探测器不必很灵。只要它记下的那一笔，原则上能分辨出走了哪条缝，条纹就散。如果它只记下一笔模糊的、分不太清的信息，条纹就半散不散，明暗对比变弱，可还在。物理学家精确地算过，路径信息知道得越多，条纹就越淡，两者此消彼长。〔据研究文献〕

用本书的话：哪一条路在缝边稳住得越多，屏幕上那个正在成形的形状就越弱。

◆ 六、越来越大的「电子」

双缝实验不只对电子灵。中子、原子、分子，都做出过干涉条纹。

1999 年，维也纳大学的阿恩特和蔡林格等人，让足球烯分子穿过光栅，也看到了干涉条纹。足球烯有六十个碳原子，像一个小足球。〔核：大意〕后来，更大的东西也做出来了：2019 年是两千来个原子的大分子；2026 年初，维也纳的实验组已经让含有七千多个原子的钠团簇显出了干涉。

这些实验，物理学家拿来回答一个问题：量子行为在多大的东西上还看得见？目前的答案是：只要你能让它和环境隔得够开，碰得够少，再大的东西，原则上都行。

本书读这些实验，会多看一层：东西越大，和环境碰的机会越多，路就越容易在半路被稳住，条纹就越难长出来。实验物理学家要做的，是把一个越来越大的东西，放进一片越来越安静的土里，让它的几条路在一锅粥里多待一会儿，好让正在成形的条纹，有机会冒出来。

这也说明了一件事：正在成形，不是微观世界独有的。它只是在大东西身上，平常被压得太快、太死，看不见。

◆ 七、一个点，是怎样落下的

条纹是千万个点叠出来的。那么每一个点，又是怎样落到屏幕上的？

外村彰的实验里，屏幕不是一块普通的荧光板，而是一套能探测单个电子的装置。电子打上去，激发出一点微光；微光被一套像夜视仪一样的东西放大，再被摄像机记下来，成为屏幕上的一个亮点。〔据研究文献〕

你看，又是放大。

一个电子落在屏幕上，起初只是一个极小的差异：某一处的一个原子被激发了一下。这个差异，要被放大很多倍，越过门槛，才成为一个谁都看得见的亮点。

早年的双缝实验，用的是照相底片。一个电子打在底片上，让一粒溴化银里的一个银离子变成银原子；显影时，这一个银原子周围的成千上万个银离子被一起还原，成了一粒看得见的黑点。这也是放大。

所以，双缝实验里有两种「长出来」，叠在一起。

一种是每个点的长出来：一个电子，一次落下，一层层放大，越过门槛，成了一个稳定显露。

另一种是条纹的长出来：千万个点，一次次叠加，叠出一个正在成形的形状。

前一种是纵向的，在一次测量里，一层一层往上稳。后一种是横向的，在许多次测量之间，一点一点往外叠。

第四编讲的「层」，主要是纵向的那一种。第五编讲的「概率」，主要是横向的那一种。两者交在一起，就是玻恩规则。

◆ 八、各家诠释怎样讲条纹

玻姆说：每个电子都有确定的轨迹，穿过一条缝；可导航波穿过两条缝，在后面干涉，把电子引到亮纹的位置。条纹，是导航波的形状。

多世界说：每个电子在两条缝之后，处在叠加里；它落在屏幕上时，世界分支，每一支里电子落在一个点上。条纹，是各支的权重分布。

哥本哈根说：问「电子走了哪条缝」，在没有测量的情况下，没有意义。条纹是现象的一部分。

关系诠释说：相对于屏幕，电子在落点上有值；相对于缝，它在走哪一条缝上没有值。

本书说：每个点是稳定显露，条纹是正在成形的形状。条纹不属于任何一个电子，它是千万次稳定显露叠出的形状，由路在土上碰撞的方式推出。

各家的讲法，都能和实验对上。本书的讲法，多做了一件事：它给了条纹一个本体论的位置，一种「看得见、还不是谁的」形状。

◆ 九、本书的说法

本章收成一句：

干涉条纹是正在成形的形状：看得见，算得准，可不属于任何一个承载者；它由路在土上的碰撞推出，一旦某条路在半路稳住，它就散了。

这句话也给第四编留了一个口子。条纹是千万次单个测量叠出来的。那么，每一次单个测量，是怎样从一锅粥里稳出一个点的？条纹那样的正在成形，和单个点的稳定显露，中间隔着什么？这就是「层」的问题。

◆ 十、条纹能不能倒推回一个电子

读到这里，有人会提一个很自然的质疑。

条纹既然算得那么准，那么反过来想：每个电子身上，是不是早就带着一张「落点地图」？条纹不过是千万张小地图摊开之后的样子。这样一说，条纹又回到了每个电子身上，成了它们各自属性的平均。

这个质疑有它对的地方。统计学里，很多分布确实是这样来的。一个班的身高分布，就是每个学生各自身高的汇总。每个学生的身高，在量之前就有，量只是把它读出来。拿身高去想条纹，顺理成章。

可是条纹和身高，有一处不一样。

身高的分布，你可以拆。把班上一半的学生请出去，剩下一半的分布，还是原来那个形状的一半，只是矮一截。每个人带走了自己那一份。

双缝的条纹，拆不开。把一条缝堵上，不是条纹少了一半，是条纹整个没了，屏幕上只剩一团亮斑。再把那条缝打开，让两条缝都开着，条纹又回来了。亮纹和暗纹的位置，不是「左缝的那一份」加「右缝的那一份」，它是两条路在屏幕上碰撞出来的。暗纹那里，单开哪一条缝都有电子落，两条都开反而没有了。

这就是说，暗纹那一处的「没有」，不属于任何一个电子从任何一条缝带来的东西。它只在两条路同时还在一锅粥里时，才长得出来。

所以，本书对这个质疑的回答是：条纹不是千万张小地图的汇总。每一个电子出发时，带不着一张写好的落点地图；它带着的，是几条还在碰撞的路。落点地图那样的东西，只能在许多次稳住之后，在屏幕上叠出来。

这一点，和第 2 章讲的贝尔不等式，是同一个方向。那里说，纠缠的关联拆不回两个粒子各自的属性。这里说，条纹的明暗拆不回每个电子各自的路线。两处都在说：有一种形状，你没法把它分到单个的承载者身上，然后再加回来。

拆不开，正是正在成形的一个记号。一个已经定型的属性，能被拆开、带走、各算各的。一个正在成形的形状，靠的是几条路之间的碰撞，你把其中一条拿走，剩下的那一条，长不出原来的样子。

这也给你一个小办法，去分辨一个形状是定型了，还是还在正在成形：试着拆它。拆了，各部分还各自成立，它多半定型了；一拆，整个就散，它多半还在路和路的碰撞之中。

◆ 十一、一个完整的例子：林小满的一夜

林小满那一夜的实验，其实也是在攒一组「条纹」。

她要测的是光电倍增管在不同时刻收到光子的计数分布。每一个光子来，示波器上跳一个尖峰，这是一次稳定显露。一夜下来，几万个尖峰，被程序按时间排开，画成一条曲线。

第二天，导师看了曲线，说：「很好，和理论一样。」

那条曲线，是谁的?

不是哪一个光子的。每一个光子，只贡献了一个尖峰。也不是光电倍增管的，管子只是一个个地把它们记下。也不是林小满的，她只是值了一夜班。

那条曲线，是千万次稳定显露，在一夜的土上，叠出的一个正在成形的形状。它很快会被写进论文，在理念界里稳住，成为一个定型的结论。到那时，它就有了一个承载者：「这个实验系统」。

可在那一夜，它还只是一条在屏幕上慢慢长出来的曲线，像草坪上那条小路。

◆ 十二、条纹也是一封土写来的信

第四节说，条纹的样子由路和土定。这句话反过来读，也成立：看条纹，能读出土。

物理学家早就这样用了。两束光走两条路，再碰到一起，出一组条纹。只要其中一条路上的土变了一点，路长了一丝，温度高了一点，条纹就整体挪一挪。这种挪动极灵敏，比任何尺子都细。用光的干涉去量长度、量平整、量极小的震动，是实验室里很常见的做法。〔据研究文献〕探测引力波的大型装置，用的也是这种干涉的思路。〔核：大意〕

这件事对本书有一层意思：正在成形的形状，虽然不归任何一个承载者，却在替土说话。它还没稳成谁的属性，可它已经把土的样子，一笔一笔地写在了屏幕上。

日子里，你也常读这样的信。一个家里，饭桌上的气氛，不是谁一个人的；可你坐下吃一顿饭，就读得出这家人最近的土，是松了，还是紧了。

◆ 十三、放回日子里

一个团队的风气，也很像一组干涉条纹。

你没法指着任何一个人说：这个团队踏实，是因为他。每个人每天做的事，只是一个个点：按时交了一份报告，加班改了一个错，开会时多问了一句。可是一年下来，这些点叠出了一个样子：这个团队靠得住。

风气，看得见，说得出，可它不是谁的。

而且它会散。来了一个人，处处抢功，每一件事都要分清「这是我的」。一件件事的路，在半路就被稳成了「谁的功劳」，大家之间那种不分你我的碰撞没了，风气这个正在成形的形状，也就淡了。

明天能试的一件事：这一周，做一件不需要记在你名下的小事。帮同事查一个数，顺手把公共的文件理一理。看看这样的点，叠多了，会叠出什么。

带 走 的 话

每个点是稳定显露，千万个点叠出的条纹是正在成形的形状；看得见，算得准，却不属于任何一个承载者。

小　账

这一处，读数是谁的？单个落点在那一次稳住；条纹不归任何一个电子，是千万次稳住叠出的形状。

先在，还是发生？说条纹是电子的概率分布，没错；本书补上：这个分布本身，是一种正在成形的形状，不挂在任何先在的东西上。

想 一 想

1. 你所在的家庭、班级或单位，有没有一种「看得见、却不是谁的」样子？它是怎样叠出来的？
2. 有什么样的事，会让这种样子散掉？

◆

14

第 14 章

过门槛：测量是什么时候成的

◆ 一、你一定有过这样的时刻

林舟在年级群里发错了一条消息。

本来要发给妻子的一句「晚上不回来吃饭」，发进了一百多人的年级教师群。他手一抖，按了撤回。

两分钟之内，撤回成功。群里只剩下一行灰字：「林舟撤回了一条消息」。

他松了口气。

可是第二天，教务处的老张见了他，笑着问：「昨晚又加班啊？」

原来，老张那一刻正好在看群，消息还没撤回，他就看见了。老张又顺手跟办公室的两个人说了一句。

这条消息，在群里是撤回了；在老张那里，没撤回；在办公室那两个人那里，更撤不回了。

你看，一条消息「发出去了」，不是一个瞬间。它在不同的地方，一层一层地稳住。在群的服务器里，两分钟之内，它还能撤回；在老张的眼睛里，它稳住了；在老张的嘴里、别人的耳朵里，它又稳了一层，再也没人能把它收回来。

一次测量，也是这样。

◆ 二、测量到底是哪一刻成的

量子力学的教科书里，测量是一个瞬间：「测量时，波函数塌缩。」

可是，第 1 章讲过冯·诺依曼的链：光子、光阴极、打拿极、阳极、示波器、眼睛、大脑，每一环都可以当作量子系统来算。塌缩到底发生在哪一环?

物理学家的实际做法，是在「足够宏观、足够不可逆」的地方，算它成了。

这个说法里，有两个关键词：宏观，不可逆。

惠勒说过一句很有名的话，大意是：任何一个基本现象，在它被记录下来之前，都还不是一个现象；而它被一个不可逆的放大动作封口了，才算记录下来。〔核：大意〕

不可逆的放大。这五个字，把测量从一个瞬间，拉成了一个过程。

本章要说：这个过程，就是越过一道门槛。

◆ 三、门槛前后

第 9 章借过第 53 号《SDE数学导论》里的一个数，SDE 数：

> **N_SDE = r · ω ／（v · T_c）**

分子是「缠得多远、搭得多重」，分母是「在一件事的时间里，消息能走多远」。这个数大，系统在一锅粥里；在一附近，正在成形；小，定型。

本书在第 9 章说过，借它的形状，不借它的数值。现在用它的形状来看一次测量。

光子在路上的时候，它的几条路在一锅粥里，缠得开，搭得重，没有一处把差异对齐，数是大的。

光子撞上光阴极，打出一个电子。这是第一层：一个微小的差异，在一小块金属里冒头。这一层上，差异还很弱，周围的热运动、电子的随机发射，都可能把它淹掉。这一层，大致在门槛附近。

电子被拉向第一级打拿极，撞出六七个电子。这一层，差异被放大了几倍，也和更多的电子缠上了。消息开始在更多的粒子之间对齐。数在变小。

第二级、第三级，往后每过一级，差异被放大几倍，和越来越多的电子、金属、电场缠在一起，对齐得越来越多。到第八、第九级，一个光子带来的差异，已经成了几百万个电子的一次齐步走。

这几百万个电子，再和导线、示波器、空气、屏幕的光缠上。差异已经被千百万个粒子同时记着，再也没有办法把它们一一找回来、让它们一起退回去。

门槛越过了。

测量成，是在差异被放大到无数粒子同时记着、再也收不回来的那一层。

◆ 四、不可逆，是什么意思

「不可逆」这个词，物理学家用得很多，值得多说几句。

薛定谔方程本身是可逆的：你知道了现在的态，原则上可以倒着算回去。

那为什么测量不可逆？

答案藏在「无数粒子同时记着」里。一个差异，如果只被一个粒子记着，你只要对那一个粒子做个精巧的操作，原则上就能把差异抹掉，让系统退回去。差异被两个粒子记着，难一些，还做得到。被一百个粒子记着，要对一百个粒子同时做精巧的操作，很难，可在实验室里，物理学家真的做到过类似的事。

被几百万、几亿亿个粒子记着呢？你要找到每一个，对每一个都做精巧的操作，还要让它们一起退回去。原则上不违反物理定律，可实际上，宇宙里没有这样的手。

所以，不可逆不是一条新的物理定律，它是「记着的粒子太多」的结果。物理学家在热力学里讲熵增，讲的也是这件事。

用本书的话：**差异在越多的层上稳住、被越多的东西记着，就越撤不回来。**

林舟那条消息，在服务器那一层，只被一个系统记着，两分钟内撤得回；在老张眼睛里，多了一层；在老张嘴里、办公室三个人的记忆里，又多了几层。层数一多，就撤不回了。

◆ 五、门槛在哪里，不是一个点

你可能会追问：门槛到底在第几级打拿极？是第三级，还是第五级？

本书说：没有一个精确的点。

就像水烧开，你没法说是哪一个水分子先开的。温度一点点升，气泡一点点多，到某个时候，整锅水翻滚起来。水「开了」，是一个看得见的转变，可它不在某一个分子、某一个瞬间。

测量也是这样。差异一层层放大、一层层对齐，越过门槛是一段区间，不是一个点。在这段区间之前，差异还有可能被撤回；在这段区间之后，就撤不回了；在区间之中，是正在成形。

这正好解释了冯·诺依曼那个让人不安的结果：刀划在哪里，算出的概率都一样。因为刀只要划在门槛之后，划在第五级还是第九级，都在「已经撤不回」的那一侧，结果当然一样。

刀如果划在门槛之前呢？划在光阴极上，在第一个电子刚刚冒头的地方？那时，差异还没稳住，原则上还能撤回。物理学家在一些精巧的实验里，真的在门槛之前把差异撤回过，第 33 章讲的量子擦除，就是这样的实验。

所以，冯·诺依曼的刀，不是哪里都能划。它只在门槛之后能随便划。

◆ 六、测量和放大是什么关系

讲到这里，你会发现，本书说的测量，和放大几乎是一回事。

这不是本书的发明。物理学家很早就注意到，所有能记录一个量子事件的仪器，都有一个共同点：它们都把一个微小的差异，放大成一个宏观的差异。光电倍增管、盖革计数器、雪崩光电二极管、照相底片里的银粒、云室里的水珠，莫不如此。

照相底片里，一个光子让一个银离子变成银原子；显影时，这一个银原子周围的银离子被一起还原，变成一粒看得见的银粒。这是放大。

云室里，一个带电粒子飞过，在过饱和的蒸汽里留下一串离子；水汽以这些离子为核，凝成一串看得见的水珠。这是放大。

放大，在结构上就是第 10 章说的自组织：一个差异冒头，带出越来越多同样的差异，没有谁在外面指挥。

测量，就是一个差异的自组织放大，一直放大到越过门槛。

◆ 七、测量也可以很轻

到这里，你可能会以为，测量总是一次猛烈的放大，一下子就越过门槛。

其实，物理学家还发明了一种很轻的测量，叫弱测量。

弱测量的意思是：让仪器和系统只轻轻地碰一下，碰得非常弱，弱到每一次测量，只从系统身上带走一点点差异。单看一次，读数几乎全是噪声，什么也看不出来。可是对许多个同样的系统，各做一次这样的轻碰，把读数平均起来，就能看出一点东西。〔据研究文献〕

弱测量对本书很有意思。它说明，越过门槛，不必是一次到底的。你可以只让一个差异冒一点头，冒到门槛之前，就停下。

在这种情况下，系统的叠加只被扰动了一点点，还能在一锅粥里接着走。实验物理学家甚至做到过，在一次弱测量之后，再用一个精巧的操作，把那一点点冒头的差异抹回去，让系统几乎回到原样。第 41 章会讲这一类实验，它们对本书是一个约束：本书说的「层层稳住」，不能放在单个系统的测量强度上，否则会和这些实验冲突。

现在先记住一点：测量有轻有重。重的测量，一口气越过门槛；轻的测量，只走到门槛之前，或者门槛之中。越过门槛，是一段区间，弱测量正好让人在这段区间里，停下来看一看。

◆ 八、各家怎样讲测量成在哪里

哥本哈根说：测量成在经典仪器那一侧。可经典和量子的界线在哪，它不说。

冯·诺依曼—维格纳说：测量成在意识那里。

多世界说：测量从不「成」，它只是让世界分支；分支一旦和足够多的环境缠上，各支之间就再也碰不回去了。这一点，其实和本书的门槛很像，只是多世界说门槛之后，所有分支都在；本书说，门槛之后，只有一个差异稳住了。

自发塌缩理论说：粒子越多，自发塌缩越快；一个宏观的仪器，在极短的时间里就自己塌缩了。它给门槛加了一条物理定律。

退相干理论说：测量成在系统和环境缠上、干涉看不见的时候。下一章会细说。

本书说：测量成在差异被放大到无数粒子同时记着的那一段区间里，那是一道门槛，不是一个点。

◆ 九、没有光子，门槛也会被撞开

光电倍增管有一个让实验员头疼的毛病，叫暗计数。

屋子全黑，激光器关掉，管子前面什么光也没有。可示波器上，隔一会儿，还是会跳出一个尖峰。

这是怎么来的？光阴极是一块金属，金属里的电子一直在热运动。偶尔，一个电子碰巧攒够了能量，自己跑了出来。它被拉向第一级打拿极，撞出六七个电子，后面一级一级照样放大。到了示波器上，它跳出的尖峰，和一个光子打出来的，几乎一模一样。〔据研究文献〕管子冷一些，暗计数就少一些，这也是很多实验要给探测器降温的原因之一。〔核：大意〕

暗计数对本章，是一个很好的反面例子。

它说明，门槛越过了，读数稳住了，可读数说的那件事，「一个光子来过了」，不一定对。越过门槛的，是一个差异：第一个电子冒头，层层放大，被几百万个粒子记着，撤不回来。这个差异，是真的；那一声「咔」，是一个谁也改不了的事实。可它的来头，是光子，还是一个热起来的电子，门槛本身不管。

反过来也有。一个光子真的打在了光阴极上，却没打出电子，或者打出的电子半路被吃掉了，雪崩没起来。光子来过，读数没有。物理学家管这个叫探测效率不到百分之百。〔核：大意〕

这两件事合起来，把一件常被混在一起的事分开了。

「越过门槛」，让一个差异成了事实。「这个差异是什么的读数」，是另一件事，要在更粗的一层上定。实验员怎么分辨暗计数和真光子？靠的不是那一个尖峰，是一夜的统计：关着激光器，数一数每秒多少个尖峰；开着激光器，再数一数；两者一减。也就是说，「这一个尖峰算不算光子」，要等许多次稳住叠成一个形状之后，回头去判。

这正是第 17 章那位要确认异常读数的林小满，后来做的事。

所以本书说的「读数和它的承载者一起发生」，在这里多了一层细处：门槛定下的，是「有一个差异」；承载者是谁，光子还是热电子，往往要到上面几层收敛的时候，才一起定下来。

◆ 十、一个完整的例子：雪崩光电二极管

现在很多量子光学实验，不用光电倍增管，用一种更小的探测器，叫单光子雪崩二极管。

它是一小块硅片，上面加着比击穿电压略高一点的电压。平时没光，它安安静静。一个光子打进来，在硅里打出一对电子和空穴。电子在强电场里加速，撞出更多的电子和空穴；它们再加速、再撞。一小片区域里，载流子像雪崩一样，在一纳秒上下的时间里，从一对变成上百万对，汇成一个能被电路读出来的电流。〔据研究文献〕

这里的「雪崩」两个字，是物理学家自己起的名字。

雪崩开始的那一瞬，只有一对载流子，它可能在电场里跑丢，可能被材料里的缺陷吃掉，雪崩也就起不来。这是门槛之前。

雪崩起来了，几十对、几百对，这时还有可能因为偶然的涨落熄灭。这是门槛之中。

雪崩汇成了一个电流脉冲，被电路记下，这时再也收不回来。这是门槛之后。

有意思的是，雪崩建立的时间，主要取决于倍增区有多厚，和这块硅片的横向面积关系不大。第 40 章会用到这个事实。

◆ 十一、门槛之后，门还有好几道

本章一直在讲一道门槛：差异被放大到无数粒子同时记着，撤不回了。

可是第 16 章会讲，一次读数要稳住，不止在手上碰得到的那块地上。它还要在心里的我那里稳住，在脑子里的道理那里稳住。

这就是说，门槛不止一道。

光电倍增管那一道，过得极快，几纳秒到十几纳秒。林小满看见尖峰、心里一动「来了」，是第二道，要几百毫秒。她第二天把一夜的数据和理论比对上，导师点头，是第三道。论文发表，别的实验室重复出来，是第四道。

每一道门槛，各有自己撤得回、撤不回的那一段。

物理那一道一旦过了，尖峰谁也收不回。可在林小满心里那一道之前，她还可以没看见；在理论那一道之前，这一夜的数据还可以被判为管子出了毛病。第 21 章会说，各道门槛都过了、都对上了，一个读数才成为大家都认的事实。

这个看法，能帮你避开两个相反的错。

一个错是：把第一道门槛当成最后一道。示波器上跳了一下，就说「发现了」。第 21 章那个超光速中微子的故事，就是在物理那一道上稳住了，在道理那一道上没有过去。

另一个错是：觉得第一道门槛不算数，要等人看见了才算。这就滑向了「意识创造读数」。第 16 章会说，本书不同意。物理那一道过了，就是一个事实，人睡着了它也在。

两个错，都是把好几道门槛压成了一道。

日子里也是这样。一句话出口，是一道；对方听进去，是一道；他在心里给你记一笔，是一道；他跟别人说起，又是一道。本章「放回日子里」说要趁早道歉，说的就是在后面几道门槛之前，把那句话接住。

◆ 十二、放回日子里

你有没有在气头上说过一句不该说的话?

话出口的那一刻，对面的人脸色一变。你想收回，已经晚了。

其实，话出口和话收不回，中间还隔着几层。话出口，是第一层：一个差异冒头。对面的人听见了，是第二层。他心里一沉，把这句话和过去的几件事连了起来，是第三层。他第二天跟别人说了，是第四层。

在第一、第二层，你立刻道歉，有时还收得回来。到了第三、第四层，那句话已经被他心里很多东西记着了，就难了。

明天能试的一件事：下一次说错话，别等。在它还只是一个刚冒头的差异时，立刻接一句：「我刚才那句话说得不对，我重新说。」趁门槛还没越过。

带 走 的 话

测量成，不在某一刻，而在一个差异被放大到无数粒子同时记着、再也收不回来的那一段区间；那是一道门槛，不是一个点。

小　账

这一处，读数是谁的? 读数在越过门槛的那一段区间里稳住；它被千百万个粒子同时记着，不归其中任何一个。

先在，还是发生? 教科书说测量是一瞬间的塌缩；本书说，测量是一次放大，越过门槛是一段区间。

想 一 想

1. 你经历过的「收不回来」的事，是在第几层上收不回来的?如果早一层，会怎样?
2. 冯·诺依曼的刀，你现在会划在哪里?为什么只能划在门槛之后?

◆

15

第 15 章

退相干：讲对了土，还差路和回写

◆ 一、你一定有过这样的时刻

林小满小时候练毛笔字，一不小心，一滴墨掉进了洗笔的清水杯。

她看着那滴墨。刚落下去时，它是一团黑，边界清清楚楚，像一朵小小的乌云，在水里慢慢翻。过了一会儿，乌云的边散开了，变成几缕黑丝，在水里拉长、打卷。再过一会儿，黑丝也看不见了，整杯水变成了淡淡的灰色。

那滴墨去哪了？

它没有消失。墨里的每一粒炭黑都还在杯子里。只是它们散到了整杯水的每一个角落，和水分子缠在了一起，你再也看不出那一团黑的样子了。

如果你想把那滴墨重新聚回一团，原则上不违反任何物理定律，可你得把每一粒炭黑都找回来，让它们一起回到原来的位置。实际上，做不到。

量子力学里，有一个很重要的理论，讲的就是一件很像墨滴散开的事。它叫退相干。

◆ 二、退相干说了什么

1970 年，德国物理学家泽赫提出了一个想法；八十年代，美国的楚雷克，和德国的约斯、泽赫等人，把它发展成了一套理论。〔据研究文献〕

想法的核心是这样的。

一个量子系统，从来不是孤零零的。它周围有空气分子、有光子、有热辐射。系统和这些环境里的东西，一刻不停地碰。

每碰一次，系统的状态就在环境里留下一点痕迹。比如一个尘粒，在左边和在右边，被它反射出去的光子，走的方向就不一样。于是，「尘粒在左边」和「尘粒在右边」这两种可能，各自在环境里刻下了不同的记号。

一开始，系统处在「左」和「右」的叠加里，两种可能能在一起干涉，就像双缝后面的两条路。可是，环境里刻下的记号越来越多，「左」带着一大堆环境的记号，「右」带着另一大堆，两大堆记号截然不同。这时候，「左」和「右」再也碰不到一起了：要让它们干涉，你得把环境里那一大堆记号全找回来、对齐，就像把墨滴重新聚回一团。

于是，对于只看这个系统、不看整个环境的人来说，干涉消失了。系统看起来，就像要么在左、要么在右，和一个经典的东西没两样。

这就是退相干：**系统和环境缠上，叠加里的干涉散到了环境里，从系统身上看不见了。**

◆ 三、快得惊人

退相干有多快？物理学家算过一些例子，数字大得让人吃惊。

一个尘粒大小的东西，在空气里，它的位置叠加被环境抹掉的时间，短得难以想象，比光穿过一个原子核的时间还要短很多个数量级。放在空气里，按约斯和泽赫一类的估算，大约是十的负三十一次方秒。就算放在星际空间里，只有宇宙微波背景辐射在碰它，大约一秒钟也就抹掉了。

这就是为什么，你从来看不见一只处在「左」和「右」叠加里的杯子：它还来不及处在叠加里，环境就已经把干涉抹掉了。

退相干还有一个好处：它不是空想。1996 年，法国阿罗什的团队，在一个精巧的实验里，让一个原子和一个腔里的光场缠在一起，制造出一种小小的「猫态」，然后亲眼看着这个猫态随着时间一点点退相干。〔据研究文献〕阿罗什后来因为这一类实验，获得了 2012 年诺贝尔物理学奖。

退相干，是一个被实验看见过的过程。

◆ 四、退相干讲对了什么

本书先公道地说退相干的功劳。

第一，它解释了为什么宏观世界看起来是经典的。我们从来看不到叠加着的杯子，不是因为量子力学到了大尺度就不灵了，而是因为大东西和环境碰得太多、太快。

第二，它不需要新的物理定律。它只用了标准的量子力学，只是认真地把环境算了进去。这一点干净得很。

第三，它解释了一部分「挑选」：为什么记录下来的，往往是位置，而不是别的什么。因为环境碰系统，最常是通过位置在碰，空气分子撞的是尘粒在哪，光子反射的也是尘粒在哪。于是位置的叠加最先被抹掉，位置成了最稳的读数。楚雷克管这叫环境诱导的挑选。第 38 章会细讲。

用本书的话：**退相干讲的，是土。**

系统和环境缠上，是土在长。叠加里的干涉散到环境里，是土太宽、太散，把一锅粥里本来能碰在一起的路，隔开了。被挑出来的那种读数，是土在推。

第 8 章说过第三个方程：土　＝ H（形状，路）。退相干，是这个方程在微观和宏观之间的样子，讲得精确、算得出来、有实验撑着。本书完全接受它。

◆ 五、退相干没讲什么

可是退相干的研究者，大多很诚实地承认，它没有讲完。〔据研究文献〕

它没讲的，第一件是：为什么只有一个结果。

退相干之后，从系统身上看，干涉没了，系统看起来「要么在左、要么在右」。可是在整个系统加环境的大图景里，「左」和「右」两支都还在，只是各自缠着各自的环境，彼此碰不到。退相干没有说，为什么你看到的是其中一支，而不是两支。

这正是多世界诠释接过去的地方：两支都在，你只在其中一支里。

它没讲的，第二件是：为什么是那个概率。

退相干之后，「左」的权重是多少，「右」的权重是多少，这个权重还是要靠玻恩规则给。退相干本身，推不出玻恩规则。有些物理学家试过用退相干去推，可推导里往往已经偷偷用了玻恩规则的某种形式。〔据研究文献〕

用本书的话：**退相干讲对了土这一维，没有讲路这一维的稳住，也没有讲回写**。

路这一维：在许多条路里，是哪一条稳成了读数。退相干只说，土把几条路隔开了，没说哪一条稳住。

回写这一维：稳住的那个读数，怎样回过头来，把各层对齐。退相干讲的，是一程，是从系统往环境散出去的那一程。它没有讲从环境回到系统、从粗处回到细处的那一程。

◆ 六、只走一程，为什么不够

这里要说得细一点，因为第四编和第五编都要接着这里讲。

墨滴散进清水，是一程：从一团到一杯。这一程走完，你只看到一杯灰水。你看不到的是：哪一粒炭黑去了哪里。

退相干也是一程：从系统到环境，干涉散出去。这一程走完，你看到的是：系统要么在左、要么在右，各占一个权重。你看不到的是：这一次到底是左还是右。

要从「各占一个权重」走到「这一次是左」，还要再走一程：从环境回来，从大处回到小处，把「左」这个差异，在每一层都对齐、都确认。

散出去是一程，稳回来是另一程；退相干只讲了散出去。

而且，后面会看到，稳回来也不是一程就够的，是很多层、来来回回的许多程。

◆ 七、退相干和时间的箭头

退相干还有一层意思，和一个古老的问题有关：为什么时间只往一个方向走？

物理学的基本方程，几乎都是可以倒着走的。把一段台球碰撞的录像倒着放，你看不出哪里违反了力学。可是，把一滴墨在水里散开的录像倒着放，你一眼就看出不对：墨不会自己从一杯灰水里聚回一团。

这就是热力学第二定律：孤立系统的熵，只增不减。

退相干，是这条定律在量子尺度上的一个表现。系统和环境缠上，干涉散进环境里，散进去容易，聚回来难，难到实际上做不到。叠加里的那些干涉，就像那滴墨，一旦散进了一杯水，就回不来了。

所以，测量之所以不可逆，退相干之所以不可逆，墨滴之所以不可逆，背后是同一件事：差异被太多的东西记着了，没有手能把它们一一找回来。

本书在这里多说一句。时间的箭头，不是写在方程里的，是在一层层的稳住里长出来的。一个差异，被越来越多的东西记着，越来越稳，越来越撤不回，这个「越来越」，就是时间往前走的样子。

这一点，本书不展开，它涉及的物理太深，本书没有把握。可它提示了一个方向：时间，可能也是发生出来的。

◆ 八、一个替退相干说话的人

本章说退相干只讲了一维。一个熟悉退相干的读者，很可能会站出来，替它说几句话。

不妨让这位读者有个样子。他叫老韩，五十二岁，在一所大学教了二十多年量子光学。他读完前面几节，大概会这样说。

「你们说退相干没讲『哪一个结果』。可那是因为物理不需要讲。退相干之后，系统的状态，在任何能做的实验里，都和一个『要么左、要么右、各占多少』的经典混合，分不出来。分不出来的东西，物理学家就当它是一样的。你们非要再问『这一次到底是哪一个』，这是哲学的瘾，不是物理的病。」

老韩说的，有一大半是对的。

对的第一处：在一切实际能做的实验里，退相干之后的状态，确实和经典的混合分不出来。这一点，退相干的研究者算得很仔细，本书不打折扣。

对的第二处：物理学家日常做实验，确实不需要回答「这一次为什么是左」。他们要的是统计，统计由玻恩规则给，玻恩规则一百年没错过。

不过，「分不出来」和「是同一回事」，中间还隔着一步。

一锅粥分不出来里面哪粒米是哪粒米，你可以说「对喝粥的人来说，没区别」。可你不能说「所以里面没有米」。退相干之后，从系统身上看，左和右分不出干涉了；可在系统加环境的大图景里，两支都还在。老韩那句「当它是一样的」，是一个很好用的约定，物理学家常叫它「就一切实际目的而言」。〔核：大意，英文常写作 FAPP〕约定好用，不等于问题没了。

而且，林小满每天晚上记下的，不是一个统计，是一个数。「12.4 微秒」这个数，是这一次的。她本子上不写「左占多少、右占多少」，她写的是落下来的那一个。老韩说的统计，是千万个这样的数叠出来的账。账的来历，第 13 章讲过；可每一笔是怎样落下来的，退相干那一程不负责。

所以，本书和老韩的分歧，不在物理上。两边算出来的东西，一模一样。分歧在于：一个读数是谁的，这件事要不要回答。

老韩说不用。本书说，物理可以不用，知识不行。你问一张化验单上的一个数是谁的，问一份考卷上的分数是谁的，问的都是这一次，不是统计。第八编会一件一件说，这个问题放到日子里，是躲不开的。

本书愿意和老韩约好一件事：退相干那一维，按他说的算，一个字不改。本书只在旁边补两维：路怎样在一锅粥里稳住一条，稳住的那一条怎样回写到各层。补的东西，不和他的算法冲突，只是接着他停下的地方往下走。

第 17 章开始，本书就往下走。

◆ 九、各家怎样用退相干

几乎每一家诠释，都把退相干收进了自己的讲法里。

多世界最喜欢它：退相干正好说明了，世界为什么分成了一支一支、彼此不干涉。

一致历史也用它：退相干让某些历史成了「一致的」，可以谈概率。

玻姆理论里，退相干说明了为什么导航波的那些空的分支，对粒子不再有影响。

哥本哈根的现代版本，常把退相干当作「经典仪器为什么是经典的」那个解释。

本书也收它，放在土这一维。本书只多说一句：收它的时候，别以为它讲完了。它讲完的，是三维里的一维。

◆ 十、看起来散了，和真的散了

墨滴散进清水，回不来。可有一种「散」，是回得来的。物理学家要分清这两种，本书也要。

核磁共振里有一件老事。一群核自旋，一开始齐步转，像一队人同时起跑。可是每个自旋所在的地方，磁场强弱差一点点，转得有快有慢。过一会儿，队伍散了，有的跑在前，有的落在后，合起来的信号也就没了。看上去，这和退相干很像：齐步的样子，散了。

可是，如果这时打一个特别的脉冲，把每个自旋「掉个头」，让跑得快的从后面追，跑得慢的从前面等，再过同样一段时间，队伍会重新聚齐，信号又冒了出来。这叫自旋回波，是 1950 年哈恩发现的。〔核：大意〕

为什么这一次散了还回得来？因为每个自旋的快慢，是由它所在的那一处磁场定的，这份「快慢」只记在自旋自己和那片固定的磁场里，没有被别的东西拿走。差异还在系统手里，只是排乱了。掉个头，就能排回去。

真正的退相干不一样。左和右的差异，被空气分子、光子带走，散进了一大片环境里，系统自己手里已经没有了。你掉多少次头，也追不回那些已经飞走的光子。

用本书的话：前一种，差异只在一层里排乱了，没有往上送，也没有被很多东西记下；后一种，差异已经被许多东西记着，越过了第 14 章的那道门槛。

这条分界很要紧。它说明「看不见干涉」本身，还不算稳住。要看差异被谁记着、被多少东西记着。只记在自家手里的，还能撤回；被一大片土记下的，就撤不回了。

◆ 十一、一个完整的例子：一个分子的退相干

第 13 章说过，维也纳的实验组让富勒烯分子穿过光栅，看到了干涉条纹。

2004 年前后，他们还做了一个变化：用七十个碳原子组成的富勒烯分子，先把它们加热，再让它们穿过光栅。加热之后的分子，会往外辐射光子，像一块烧红的炭。

分子越热，辐射出的光子越多。每辐射一个光子，分子「走了哪条缝」就在环境里刻下一点记号。温度升到一定程度，干涉条纹开始变淡；再高，条纹就消失了。〔据研究文献〕

这是一个教科书级的退相干实验：土在长，干涉在散。

用本书的话把这一个实验讲一遍。

分子在光栅前，几条路在一锅粥里。温度低时，土缠得正好：分子和环境碰得少，几条路能在屏幕上碰撞，条纹这个正在成形的形状长了出来。温度高时，分子自己往外辐射光子，土一下子变宽、变散，几条路在半路就各自缠上了不同的环境记号，碰不到一起了，条纹散了。

可是，就算条纹散了，屏幕上每一个分子，仍然只落在一个点上。那一个点落在哪，是另一件事，是路在土上稳住的那一程。退相干管得了条纹散不散，管不了这一个点落在哪。

◆ 十二、放回日子里

一个团队里的分歧，也有一个「退相干」的过程。

两种方案，开会时摆在桌上，大家争，争着争着，有时会碰出一个第三种方案，比原来两种都好。这是两条路在一锅粥里碰撞。

可要是两种方案，各自有一拨人支持，两拨人会后各自开小会、各自找领导、各自写材料，两种方案就各自缠上了各自的人和事。到了下一次开会，它们已经碰不到一起了，只能二选一。

这就是退相干：分歧散进了组织里，各自缠上了各自的土，碰撞的机会没了。

明天能试的一件事：下一次团队里有两种意见，先别让它们各自去找支持者。安排一次只有两个方案提出人参加的讨论，让两条路在还没缠上太多东西之前，碰一碰。

带走的话

退相干讲对了土：系统和环境缠上，干涉散出去；它没讲路这一维哪一条稳住，也没讲稳回来的那一程。

小　账

这一处，读数是谁的？退相干说明了为什么看不到叠加；这一次读数落在哪，它没说。读数要在散出去之后，再稳回来。

先在，还是发生？退相干没有假定先在，这是它的好处；它的不足，是只讲了一维的发生。

想一想

1. 你见过哪一种分歧，是因为各自缠上了太多东西，才碰不到一起的？
2. 墨滴散进清水，你还能想到哪些「散出去容易、聚回来难」的事？

◆

16

第 16 章

读数和三个号位，一起显出来

◆ 一、你一定有过这样的时刻

林舟的表妹小禾去年结婚。

领证那天，林舟陪着去的。民政局的窗口前，工作人员核对了身份证，让两人在表上签字，盖上钢印，把两本红色的小本子递了出来。

小禾接过来，翻开看了一眼，忽然红了眼睛。

出了门，她对林舟说：「哥，奇怪，我们在一起五年了，可就在刚才那一下，我才觉得我们是夫妻了。」

林舟后来常想起这句话。

那一下，发生了什么？

一样东西冒了出来：两本红本子，上面印着两个人的名字，这是一号位，一个看得见、摸得着的客体。

一场互动走完了：核对、签字、盖章，这是二号位。

一个「我们」冒了出来：小禾心里，「我们是夫妻了」，这是三号位。

而「夫妻」这个属性，在那一下，稳住了。

你很难说，是红本子让他们成了夫妻，还是签字让他们成了夫妻，还是小禾心里那一下让他们成了夫妻。四件事是一起来的。

本章要说：一次测量的读数，也是这样，和三个号位一起显出来。

◆ 二、读数这一刻，有几样东西同时冒出来

第 7 章说过，一次测量里，号位是轮换的：先是互动冒在前头，然后客体被显出来，最后主体冒到前头。

现在要把这件事说完整：读数稳住的那一段，三个号位，各自都有东西稳住了。

一号位，客体：「一个光子来过了」。在此之前，没有一个确定的光子，作为「这一次被测到的那个」站出来。

二号位，互动：「这一次测量」。在此之前，光电倍增管一直开着，可「这一次」作为一个有始有终的事件，还没有被划出来。

三号位，主体：「我测到了」。在此之前，林小满一直坐在那里，可「测到这个读数的我」，还没有冒出来。

属性：「第 37 号脉冲，12.4 微秒」。在此之前，只有一锅粥里许多可能的到达时间。

四样东西，在同一段稳住里，一起出现。

读数不是挂在一个先在的光子身上，被一个先在的我看见；读数、光子、这一次测量、测到的我，一起显出来。

这句话，是第二编那个乘号，放进了实验室。

◆ 三、三块地上，各稳住一样

第 6 章讲过三块地：现实界、理念界、自我界。一次完整的测量，三块地上都有东西在稳住，而且要彼此对上。

现实界：示波器上的尖峰，本子上的数，硬盘里的一行数据。这是手上碰得到的。

理念界：「这个读数服从 $|\psi|^2$ 的分布」「这一夜的数据和理论对上了」。这是脑子里想的。

自我界：「我测到了」「我这一夜的班没白值」。这是心里的我。

三块地上的稳住，不是一回事，也不是同时完成的。现实界的尖峰，在一纳秒之内就稳了；林小满看见它、心里「我测到了」，要晚几百毫秒；她把一夜的数据画成曲线、和理论对上，要到第二天；导师点头、写进论文，要几个月以后。

可它们最后要对上。尖峰对不上理论，林小满会怀疑仪器坏了；理论对不上她的经验，她会怀疑自己哪里理解错了。三块地，互相确认，互相回写。

这里已经有了「层」的影子：同一个读数，在现实界一层、自我界一层、理念界一层，各自稳住，又彼此对齐。第四编要讲的，就是这样的层。

◆ 四、维格纳的朋友，换一种讲法

第 3 章和第 7 章都提过维格纳的朋友。现在可以把它讲得更清楚一些，第 30 章再讲它的现代版本。

朋友在实验室里，测量一个粒子，看到了读数。

在朋友那里，四样东西已经一起显出来了：粒子作为「被测的那个」，这一次测量，「我测到了」的朋友，还有那个读数。

维格纳在门外。对他来说，实验室里那一套，还没显出来。他没有看到读数，没有和朋友说话，实验室和他之间，还没有一场互动。

维格纳问：朋友的读数，到底定下来了没有？如果定下来了，那对我来说，实验室应该处在一个确定的状态；可按量子力学算，实验室加朋友，对我来说，还在叠加里。

挂钩式会说：读数总得在某个先在的东西上定下来。要么在朋友那里定了，要么在维格纳那里才定。只能选一个。

本书说：在朋友的那几层里，读数已经稳住了，三个号位都显出来了。在维格纳的那一层，还没有。这不是两个人在争同一个读数，是两层在各自稳住。

等维格纳推门进来，问一句「你看到了什么」，朋友答一句，两层之间多了一场互动。在这场互动里，维格纳这一层也稳住了，而且和朋友那一层对上了。

对上，是正常情况下一定会发生的，因为朋友那一层早已越过了门槛，被无数粒子记着，维格纳问到的，只能是那个已经稳住的读数。

◆ 五、为什么不会对不上

你可能会担心：要是两层对不上呢？朋友说看到了「上」，维格纳一测，实验室里记录的是「下」？

物理上，这种事从没发生过。在所有实际的实验里，只要读数越过了门槛，后来的任何人去查，查到的都是同一个读数。

本书解释这件事，靠的是第 14 章的门槛：越过门槛之后，读数被无数粒子同时记着，后来的人去查，碰到的只能是这些记录里的一部分，而这些记录都一样。

楚雷克有一个叫「量子达尔文主义」的说法，讲的正是这个：一个读数，被环境复制了无数份，每一份都一样；不同的人，各自从环境里取一小份，取到的都是同一个读数。〔据研究文献〕第 22 章会细讲它。

所以，对不上，在门槛之后不会发生。在门槛之前，确实可能出现各层不一致的情况；第 30 章讲的弗劳希格—伦纳悖论，就是在一个精心设计的、让各层都还没越过门槛的思想实验里，逼出了不一致。

◆ 六、读数要不要一个有意识的人

维格纳的说法，引出了一个流传很广的看法：量子力学说明，意识创造了现实。没有人看，月亮就不在。

本书要在这里把话说清楚：本书不同意这个看法。

读数的稳住，主要发生在现实界：光阴极、打拿极、导线、示波器，一层层地放大，越过门槛，被无数粒子同时记着。这些层，不需要任何人在场。林小满如果那一夜睡着了，示波器照样记下了尖峰，硬盘里照样多了一行数据。第二天她醒来去查，查到的就是那一行。

所以，读数作为一个现实界里的事实，不需要意识。

那么主体那一位呢？主体是在读数被人接过去的时候，冒到前头的。「我测到了」，是在林小满看见那一行数据时，在自我界稳住的。「这个读数服从 $|\psi|^2$」，是在她和导师把数据画成曲线时，在理念界稳住的。

三块地上的稳住，不是一回事。现实界的读数，早在门槛那里就稳了；自我界和理念界的，要等主体冒到前头，才稳住。

维格纳把现实界的稳住，和自我界的稳住，混成了一件事，所以他觉得非要意识不可。本书把它们分在三块地上，各自稳住，彼此对上。

这样一分，就不用说「意识创造了现实」。可也不用说「意识与读数无关」。读数成为一个事实，不需要意识；读数成为「我的知识」，需要一个主体冒到前头。

◆ 七、各家怎样讲「谁在看」

哥本哈根，对「谁在看」通常不讲，只说要有一台经典的仪器。

冯·诺依曼—维格纳说：最后要有一个意识。

QBism 说：每一个用量子力学的人，都是一个行动者，读数是他的经验。朋友有朋友的经验，维格纳有维格纳的经验。

关系诠释说：读数相对于朋友有值，相对于维格纳还没有，这两件事都对，不矛盾。

本书和关系诠释、QBism 都很近。它多说的一点，是三个号位都在显出来，不只是主体；而且各层之间要对上，对上的方式是回写。

◆ 八、没人在场的那一夜，三号位在哪

第六节说，林小满睡着了，示波器照样记下尖峰。读数作为一个事实，不需要意识。

这句话一说完，一个追问就跟着来了：既然读数稳住时，三个号位都要显出来，那么没人在场的那一夜，三号位在哪里？主体那一位，是不是空着？

这个追问很好，它逼本书把「主体」说得更细一些。

先说本书不打算怎样答。本书不打算说，示波器就是主体，硬盘就是主体。那是把三号位硬塞给一台机器，等于换了个地方，又找了一个先在的「看的人」。

本书的答法是：三号位在那一夜，是侧着的，没冒到前头，可它没缺席。

它在哪里？在土里。示波器为什么在那个时刻开着，触发电平为什么调在那个数，硬盘为什么按那种格式记，这些都不是机器自己定的。它们是林小满、她的导师、几代学生，一次次回写进实验安排里的。主体不在场，主体的回写在场。那一夜示波器划出「这是一个脉冲、那不是」的那条线，就是一个主体早先画下、留在土里的线。

所以那一夜的读数，客体一位、互动一位都冒在前头，三号位侧着，以早先回写的样子缠在土里。第 7 章说过，冒在前头，不等于其他两个不在。这里是同一个道理，换到了主体那一位。

第二天早上，林小满打开数据，三号位才冒到前头。「我测到了」在她的自我界里稳住。这时候她不是第一次给读数一个主体，她是把自己早先留在土里的那个主体，接了回来。

这个说法有它的边界。它能说明实验室里的读数，因为实验室里的土，本来就是人一层层回写出来的。可一颗星星发出的光，在没有任何人造仪器的地方，打在一块石头上，留下一点痕迹，那一处的三号位在哪？本书目前的回答是：那一处，三号位可能真的还没显出来，只有客体和互动在前头；那一点痕迹，是一

个正在等人接的差异。至于它算不算一次完整的「读数」，本书不急着下结论，标一个〔待验〕。

◆ 九、本书的说法

本章收成一句：

> **读数稳住的那一段，客体、互动、主体三个号位，各自都有东西显出来；三块地上，各自都有东西稳住；各层之间，靠回写对上。**

这一句，接住了第一编的那个问题：读数是谁的？

它不是光子的，不是仪器的，不是看的人的。它是这一次发生的。在这一次发生里，光子、仪器、看的人，和读数一起显出来。

◆ 十、一个完整的例子：一张核磁共振片子

把实验室换成医院。

一个人做了一次核磁共振。他躺进那台大机器，机器里的强磁场，让他身体里氢原子核的自旋排了排队；一阵阵射频脉冲打进来，自旋被翻转，又慢慢弛豫回去，放出微弱的信号。线圈接住信号，电脑把信号算成一张张断层图。

这一过程，层层都有量子力学：核自旋是量子的，射频激发是量子的，信号的放大、读出，是一次次越过门槛。

片子出来了。放射科医生看了一眼，说：「左膝半月板有一处撕裂。」

这一句话里，有几样东西一起显出来？

客体：「左膝半月板的那一处撕裂」。在此之前，那个人只知道膝盖疼，那一处撕裂，作为一个被看见的东西，还没有站出来。

互动：「这一次检查」。

主体：医生的「我看到了」，病人的「原来是这样」。

属性：「撕裂」。

它们一起显出来。而且三块地都有：现实界里，是片子上的那一道影子；理念界里，是「半月板撕裂」这个诊断名词；自我界里，是病人心里那一沉，或者那一松。

这张片子，不是在「读出」一个早就在那里、等着被看见的诊断。诊断，和那一处被看见的撕裂、这一次检查、看片子的医生、听诊断的病人，一起发生。

身体真的有难处，请找医生。本书只是借这个例子，说明读数是怎样发生的。

◆ 十一、一声哨响，四样东西一起落地

把实验室换成球场，再走一遍本章的判断。

县中学的足球联赛决赛，林舟是副裁判之一。下半场，一名前锋在禁区边上倒地。主裁判哨子一响，手指点球点。

那一声哨响里，有几样东西一起显出来?

客体：「一次犯规」。在哨响之前，场上只有两个人撞在一起，撞得算不算犯规，在一锅粥里。

互动：「这一判」。裁判的位置、角度、跑动，和两名球员那一下碰撞，碰成了一次判罚。

主体：裁判的「我判了」，也是两边球员、教练、看台上家长的「判了」。

属性：「点球」。

四样一起落地。

可是这一次，事情没完。防守一方的教练冲到场边，说是在禁区外倒的。主裁判走过来问林舟。林舟当时站的位置正好看得清，他说：「禁区外，半步。」

主裁判想了想，改判任意球。

这一改，在本章的读法里，是什么?

第一声哨，在现实界里已经稳住了，谁都听见了，撤不回。可「点球」这个属性，在规则那一层，也就是理念界里，还没和别的层对上：倒地的位置这一层，和「禁区内才有点球」这一层，对不上。副裁判那一句话，是另一层送上来的读数。各层一对，点球改成了任意球。

改的不是哨声，是属性。

这和第 21 章要讲的收敛，是同一件事的小样子：一声哨响冒出一个差异，各层还没对齐之前，它挂着的那个属性还能改；各层一对上，属性才真的落地。

明天你看比赛时，留意一下这种时刻。裁判的手势、回放的画面、规则的条文、看台的喊声，几层东西在几十秒里来回对。最后落下的那个判罚，不是哪一个人的，是那几十秒里一起长出来的。

◆ 十二、放回日子里

回到小禾的那一句话：「就在刚才那一下，我才觉得我们是夫妻了。」

很多人会觉得，这只是一种心理感受，法律上那一刻才算夫妻，感情上早就是了。

本书说，那一刻，确实有一些东西稳住了，而且不只是心理的。红本子在现实界稳住了，婚姻关系在法律和社会的理念界里稳住了，「我们」在小禾的自我界里稳住了。三块地上的稳住，在那一刻对上了。

所以那一刻会让人红了眼睛。

明天能试的一件事：想一件你人生里「就在那一下」稳住的事。毕业典礼、第一份工资、孩子第一次叫你。回想那一刻，三块地上，各有什么稳住了？

带 走 的 话

读数稳住的那一段，客体、互动、主体三个号位一起显出来，三块地上各有东西稳住；读数不是谁的，是这一次发生的。

小　账

这一处，读数是谁的？维格纳的朋友那一层，读数已经稳住；维格纳那一层还没有；推门一问，两层对上。

先在，还是发生？挂钩式要读数在一个先在的地方定下来；本书说，读数在层层稳住里，和三个号位一起显出来。

想 一 想

1. 你人生里有哪一刻，是「就在那一下」稳住的？那一下，三块地上各稳住了什么？

2. 有没有一件事，在你那一层已经稳住了，在别人那一层还没有？后来是怎么对上的？

◆

第 三 编 · 总 判 断

测量是一次特征律的发生：叠加是一锅粥里几条路的碰撞，干涉条纹是正在成形，放大越过门槛，退相干讲对了土这一维，读数和三个号位在层层稳住里一起显出来。

第四编要讲「层」本身：稳住是怎样一层层来回完成的，那幅千片的拼图，那套多重网格。



第　四　编

层级稳定：一幅千片拼图的读法

导　语

这一编六章，讲本书最核心的一件事：稳住，是一层一层、来来回回完成的。第 17 章从拼图讲起，说明为什么稳住不是一程过去、一程回来。第 18 章把计算数学里多重网格法的四个动作，放到测量链上。第 19 章讲回写：粗层怎样回头改细层。第 20 章讲一个数学条件，它让玻恩规则的平方有了来历。第 21 章讲收敛：各层对上的那一刻，读数才成为事实。第 22 章讲物理学家已经发现的一个现象，它像是粗层在物理里的影子。

一句话：读数不是在某一层上一次稳住的，是各层往上传、往回改，改到彼此对上。

17

第 17 章

从两程到一圈：稳住不是直线

◆ 一、你一定有过这样的时刻

春节假期，林小满在家拼一幅一千片的拼图，图上是一片秋天的湖，湖边一排红枫，远处几座山，天上几朵云。

她没有从左上角第一片开始拼。没有人会这样拼。

她先把所有带直边的片子挑出来，拼出一个框。然后把片子按颜色分成几堆：红的是枫叶，蓝的是湖和天，灰绿的是山，白的是云。她先把红的拼成一大块，再拼蓝的。

拼到一半，她遇到了麻烦：蓝色的片子太多，湖和天都是蓝的，分不清。她停下来，退后一步，看了看盒子上的原图，发现湖面的蓝里映着红枫的倒影，天上的蓝里没有。于是她回到蓝色那一堆，把带一点红的挑出来，归给湖。

再往下拼，细处一点点填满。有几片她放错了，一开始没发现，直到周围几片都拼上了，对不上，她才拿出来重放。

最后一片按下去，整幅图对上了。

林舟在旁边看了一晚上，后来对女儿说：「你拼图的办法，跟我们解大方程的办法，几乎一样。」

林小满问：「什么办法？」

林舟说：「多重网格法。」

◆ 二、拼图里有几个动作

先把林小满拼图的过程拆开看。

第一个动作：先拼局部，把相邻的几片对上。两片的边一咬，这是最细的一层，看得最清楚，对得最快。

第二个动作：把局部归成大块。红的归一堆，蓝的归一堆，拼出几大块色块。这是粗一层。在这一层上，你不管单独一片，管的是「这一块大概在图的哪里」。

第三个动作：退后一步，看全局。这是最粗的一层：湖在下，天在上，山在远处。在这一层上，一眼就能看出蓝色哪些归湖、哪些归天。这件事，在细层上一片一片地看，怎么也看不出来。

第四个动作：带着全局的判断，回到细处去改。把带红的蓝片归给湖，把放错的片子取出来重放。

然后，再拼细处，再归大块，再看全局，再回去改。一圈一圈，直到最后一片按下去，各层都对上。

稳住，是在细处和粗处之间来回许多圈完成的。

◆ 三、为什么不能只拼细处

你可能会问：为什么不能只在细处拼？一片一片地对边，总能拼完吧？

能，可是慢得出奇。

一片只能看到自己的四条边。它知道左边那片和它咬不咬得上，却不知道自己该在整幅图的哪里。两片蓝色，在细处看，各自都能和好几片咬上，看不出谁对谁错。只在细处一片片试，你会在蓝色里转上好几天。

问题出在：细处的信息，只管得了近处的差异；远处的、大范围的差异，细处看不见。「这片蓝属于湖还是属于天」，这是一个大范围的差异，要退到粗处才看得出来。

反过来，只在粗处看也不行。盒子上的原图告诉你湖在下、天在上，可它不告诉你这一片该放在哪个格子里。粗处管大范围，管不了细节。

所以要两头都用，来回地用。

◆ 四、解方程也是这样

林舟说的多重网格法，是计算数学里一种解大方程的方法。

物理和工程里，常要解一种方程：给定一块区域的边界条件，求区域里每一点的温度、电势或者压力。电脑解这种方程，先把区域切成一个个小格子，叫网格，然后让每个格子的值，和邻居的值对齐，一遍一遍地调，调到各处都满足方程。

这种一遍遍的调，叫迭代。它有一个让人头疼的毛病：近处的误差，几遍就调平了；可是大范围的、缓慢起伏的误差，要调成千上万遍才平。网格越细，这种大范围的误差就越难消。

就像拼图只在细处拼：近处的边很快对上，大范围的「这片该在哪」，迟迟定不下来。

二十世纪六十年代，苏联数学家费多连科提出了一个想法；七十年代，以色列数学家布兰特把它发展成了一套完整的方法。〔据研究文献〕这就是多重网格法。

想法很简单：既然大范围的误差在细网格上难消，那就换到粗网格上去消。

在细网格上调几遍，把近处的误差调平。剩下那些大范围的误差，搬到一套粗得多的网格上。在粗网格上，原来大范围、缓慢起伏的误差，变成了近处的、急促的误差，几遍就能调平。调完了，把粗网格上算出的修正，搬回细网格，加上去。再在细网格上调几遍，把搬回来时带进的小毛刺磨平。

一圈下来，近处的误差、大范围的误差，都消了不少。再来一圈，再消一些。几圈之后，整个网格上的值，各处都对上了。

这一圈，因为画在纸上，像一个英文字母 V：从细到粗，往下走；再从粗到细，往上走。所以人们叫它 V 循环。

多重网格法有一个惊人的性质：不管网格多细，它需要的圈数，差不多是一样的。网格细十倍，圈数不用多十倍，几乎不变。这让它成了解这类方程最快的方法之一。〔核：大意〕

◆ 五、本书为什么要借这把钥匙

讲到这里，你可能会问：一本讲量子力学的书，为什么要讲一个解方程的方法？

因为第三编讲测量时，反复撞上同一件事：读数是一层一层稳住的。

光子打出一个电子，是一层；第一级打拿极，是一层；后面每一级，都是一层；示波器，是一层；林小满的眼睛和本子，是一层；她的课题组画出的曲线，是一层；写进论文的结论，又是一层。

第 10 章说过，每一层都在确认下一层送上来的东西，也在回过头来，让下一层的确认更有意义。第 16 章说过，同一个读数，在现实界、自我界、理念界三块地上各自稳住，又要彼此对上。

这种「层层确认、来回对齐」，物理学家从没给它起过一个名字。可它在计算数学里，有一个现成的、被研究得很透的样子：多重网格法。

本书借这把钥匙，是因为它把三件事讲清楚了：为什么要分层；层与层之间做什么；什么时候算稳住。

◆ 六、两程为什么不够

在本书形成的过程里，有过一个更简单的讲法：稳住，要两程。客体那一侧走一程过去，互动那一侧回写一程回来，两程一合，差异站住。

这个讲法，和第 3 章讲的交易诠释很像：提议波走过去，确认波走回来，握一次手。

两程的讲法，抓住了一个真东西：稳住要有回写，只走一程不够。第 15 章说的退相干，就是只走了一程，散出去了，没有稳回来。

可是两程的讲法太扁了。它只有一层：过去一次，回来一次，完了。

真实的测量不是这样。一个光子带来的差异，要经过八九级打拿极、一台示波器、一双眼睛、一个本子，才成为一个读数。每一级之间，都有往上的传递，也都有往回的约束。上一级的电压，管着下一级的电子往哪跑；示波器的触发电平，管着什么样的脉冲才被记下；林小满的实验方案，管着哪些数据被留下、哪些被当作噪声扔掉。

这是许多层，每一层都有上行和回写，而且来回不止一次。

王德生博士在讨论这件事时，明确地纠正过两程的讲法：稳定是层级迭代的，不是线性两程，类似多重网格法。〔据作者口述〕

两程，是一个 V 循环被压扁之后的影子。

◆ 七、一圈和一程有什么不同

一程和一圈的不同，不只是次数的多少，还在于方向。

一程，是一条直线：从甲到乙。

两程，是一来一回：从甲到乙，再从乙到甲。

一圈，是一个 V：从最细的一层，一层层往上，到最粗的一层；再从最粗的一层，一层层往下，回到最细的一层。每经过一层，都做一点事。

在一圈里，每一层都既接收下面送上来的东西，又接收上面送下来的东西。它是一个交汇处，不是一个中转站。

这一点，后面几章会反复用到。

◆ 八、物理学家早就在用「层」

把「层」放进物理，不是本书的发明。物理学家自己，早就在用层看世界，只是用在别处。

二十世纪六十年代，美国物理学家卡达诺夫想了一个办法，研究磁铁在临界温度附近的行为。〔据研究文献〕一块磁铁里，有无数个小磁针，每个小磁针都和邻居互相牵着。直接算所有小磁针，算不动。

卡达诺夫的办法是：把相邻的几个小磁针，合成一块，看这一块总体上朝哪；再把相邻的几块，合成更大的一块；一层一层地合上去。他发现，在临界温度附近，每合一层，磁铁的样子都很像上一层，只是参数变了一点。

七十年代，美国物理学家威尔逊把这个想法发展成了一套完整的理论，叫重整化群，并因此获得了 1982 年诺贝尔物理学奖。〔核：大意〕

重整化群说的是：物理世界在不同的尺度上，有不同的样子；从细的尺度到粗的尺度，可以一层一层地走过去；每走一层，细节被合掉，留下的是大尺度上要紧的东西。

这和多重网格法，几乎是同一件事的两面。实际上，布兰特在发展多重网格法时，就注意到了它和重整化群的亲缘。〔据研究文献〕

所以，物理学家并不陌生于层。他们用层看磁铁，看流体，看粒子物理里的耦合常数怎样随能量变化。

本书只是把层，用到了一个物理学家很少用它的地方：测量。

◆ 九、一个完整的例子：林小满怎样确认一个异常读数

有一天夜里，林小满的数据里出现了一个奇怪的脉冲：比平常的高出三倍。

她怎样确认这是一个真的读数，还是噪声?

第一层：她看示波器上那一个脉冲的形状。上升沿陡不陡，宽度对不对。这是最细的一层，看的是这一个脉冲本身。形状看着像真的。

第二层：她查同一时刻前后几毫秒的数据。有没有别的脉冲，基线有没有抖动。这是粗一点的一层。基线很平，前后都干净。

第三层：她查这一夜所有数据的统计。高出三倍的脉冲，一夜出现了几次，符不符合两个光子同时到达的概率。这是更粗的一层。一夜出现了四次，和两光子同时到达的估算对得上。

第四层，最粗的一层：她想起导师说过，这批光电倍增管在高计数率下，偶尔会有一种叫「后脉冲」的现象。她翻出管子的说明书，后脉冲的时间特征，和她这个脉冲对不上。

然后她往回改。

带着第四层的判断，回到第三层：把可能的后脉冲从统计里剔掉，重算一遍，四次里有一次其实是后脉冲。带着修正后的统计，回到第二层：再看那三个真的高脉冲前后的基线。回到第一层：再看它们的形状。

一圈下来，三个脉冲被确认为两光子同时到达；一个被确认为后脉冲。

这就是一个 V 循环：从细到粗，一层层往上查；再从粗到细，一层层往回改。读数，在这一圈里稳住了。

◆ 十、为什么网格再细，圈数也差不多

上面说过，多重网格法有一个惊人的性质：网格细十倍，圈数几乎不变。

为什么？

因为多一层细网格，只是在最底下多加了一层。每一圈，在这一层上磨光几遍就够了，不用为它多转几圈。网格细十倍，大约只多出一两层；一圈的工作量多了一点，圈数却不变。

这个性质，放到测量上，会给出一个有意思的推测：一个读数稳住所需的时间，主要取决于有多少层，而不是被测的东西有多大、有多少细节。

光电倍增管正好可以拿来对一对。一支八级打拿极的管子，增益大约三百万倍，从光子打进来到阳极上出一个脉冲，大约五纳秒多。每一级，大约贡献同样多的时间。时间大致跟着层数走，跟着增益的对数走，不跟着增益本身走。增益翻十倍，只要多一两级，时间只多一两纳秒。

第 40 章会把这个账细算一遍，也会老实说明：这个结果，用普通的级联放大物理就能解释，它只能说明本书的读法和数据对得上，不能说明本书的读法比别的读法更对。

◆ 十一、粗层也会看错

前面的拼图和异常脉冲，粗层都帮了忙。可粗层不是不会错。退后一步看全局，也可能看错。

林小满拼那幅秋湖时，有过一段小插曲。她一开始以为，远处那几座灰绿的山，倒映在湖里。于是她把一批灰绿片子，往湖的下半部塞。塞了二十多片，越塞越别扭，边缘处处对不上。

问题出在最粗的一层。她看原图时，看错了。那片灰绿不是山的倒影，是湖对岸一排矮树。

细处的「对不上」，一层一层往上送，送到最粗的那一层，把它推翻了。她重新看原图，改了全局判断，再一层层改回去。

多重网格里，这也是有的。粗层上的方程，是从细层「限制」上去的，它只是细层的一个粗略模样。粗层解出来的修正，搬回细层，不一定全对。所以每一圈之后，细层还要再磨，再把剩下的误差送上去，下一圈的粗层，就在改过的基础上重新解。

粗层管方向，可它的方向，也要被细层一圈圈地校。哪一层都不是最后的裁判，各层对上了，才算数。

这正是两程讲法缺的那一块。两程只有一个来回，回来的那一程说了就算。一圈套一圈，粗层的话，也要被细层追问。

◆ 十二、放回日子里

你读一本难懂的书，大概也是这样读的。

第一遍，一句一句地读，每句都懂，合起来不知道在说什么。这是只在细处。

于是你跳到目录，看各章的标题，大致知道这本书在讲什么、分几块。这是到了粗处。

带着这个大致的图景，回到正文，原来不懂的段落，有一些忽然通了。这是回到细处去改。

读到后面，有一章怎么也读不懂。你又回到目录，回到前言，重新看作者到底想说什么。再回到那一章。

一本难书，往往要这样来回好几圈，才算读懂。

明天能试的一件事：读一本你卡住的书，别从卡住的地方硬读下去。先花十分钟看目录、前言、每章的最后一段，搭一个粗的图景，再回到卡住的地方。

带 走 的 话

稳住不是一程，也不是两程，是在细处和粗处之间来回许多圈；两程，是一圈被压扁之后的影子。

小　账

这一处，读数是谁的？林小满那个异常脉冲，是在细处查形状、粗处查统计、最粗处查仪器、再一层层改回来的一圈里，才稳成一个读数的。

先在，还是发生？只在细处找，等于假定答案就在那一片里；一圈的读法说，答案是在各层对上时发生的。

想 一 想

1. 你最近解决的一个难题，是在细处一步步磨出来的，还是退到粗处看了一眼才通的？

2. 你有没有一次，带着粗处的判断回到细处，发现原来以为对的地方，其实放错了？

◆

18

第 18 章

测量链上的四个动作

◆ 一、你一定有过这样的时刻

林舟的学校每年要评一次「优秀班集体」。

评法是这样的。先是每个小组内部，同学之间互相打分，把吵吵嚷嚷的意见先磨一磨，磨出一个小组的分数。然后，各小组的分数报到班委，班委把八个小组的分数汇总成全班的一个分数。年级组把十二个班的分数放在一起，排出名次，定下谁是优秀。

定下之后，事情还没完。年级组会把结果发回各班，附一句评语：「三班的卫生拖了后腿。」班主任拿着这句评语回到班里，找到卫生打分最低的那个小组，组长再去找那几个总是忘了值日的同学。

于是第二年，三班的卫生好了。

你看，一个「优秀」，经过了几个动作：在最小的地方先磨一磨；把磨好的东西往上报，越报越粗；在最粗的地方定下来；再把定下来的东西一层层发回去，改最细的地方。

这四个动作，正好是多重网格法的四个动作。

本章要把它们放到测量链上。

◆ 二、多重网格的四个动作

上一章说了多重网格法的大意。这一章把它的四个动作，一个一个讲清楚。

第一个动作，磨光。在一层网格上，让每个格子和邻居对齐，调几遍。这几遍调下来，近处的、急促的误差，很快就被磨平了。磨光之后，剩下的误差，是那些缓慢起伏的、大范围的。

第二个动作，限制。把细网格上剩下的误差，搬到粗网格上。搬的办法，是把细网格上相邻的几个格子，合成粗网格上的一个格子。细节丢了，可大范围的起伏，被保留了下来，而且在粗网格上，它们变成了近处的、急促的起伏。

第三个动作，粗层求解。在粗网格上，把这些误差解掉。粗网格格子少，解起来快；而且原来大范围的误差，在这里成了近处的，几遍磨光就平了。如果粗网格还不够粗，就再往下一层，一直到最粗的一层，在那里直接解。

第四个动作，延拓。把粗网格上算出的修正，搬回细网格，加到细网格的每个格子上。延拓会带进一点小毛刺，所以延拓之后，再在细网格上磨光几遍。

磨光，限制，粗层求解，延拓。一圈下来，是一个 V。

◆ 三、磨光：细层上的乱，先自己平下去

把这四个动作放到光电倍增管上。

光子撞上光阴极，打出一个电子。在这一刻，光阴极那一小块金属里，发生了许多细小的事。电子从晶格里挣脱，周围的原子振了一下；邻近的几个电子被扰动了一下，表面的电荷分布晃了一下。

这些细小的晃动，大多在极短的时间里，就被周围的金属自己平掉了。热运动把它们摊开，晶格把它们吸收。最后留下的，是一件大范围上看得出来的事：一个电子，离开了光阴极，朝第一级打拿极飞去。

这就是磨光：细层上的乱，在局部自己平下去，剩下一个能被更粗一层接住的差异。

物理学家对这种过程有一个统称：局部弛豫，或者局部的热化。〔核：大意〕它们快，它们就在近处，它们不管大局。

◆ 四、限制：粗粒化，往上送

那一个电子，被电场拉向第一级打拿极，撞出六七个电子。这六七个电子，再被拉向第二级。

在这个过程里，发生了一件很要紧的事：物理学家不再关心每一个电子的细节了。他们关心的，是「这一级打拿极上，有多少电子被打了出来」，是一个总数，是一团电荷。

这在物理学里有一个专门的名字，叫**粗粒化**：把许多细小的自由度，归成少数几个大的量。温度、压力、电流、电压，都是粗粒化之后的量。

粗粒化，正是多重网格里的限制：把细层上相邻的许多个格子，合成粗层上的一个格子。细节丢了，大范围的差异留了下来。

光电倍增管的每一级打拿极，都是一次限制：上一级的一小团电子，被归成下一级的一个更大的量。到了阳极，几百万个电子，被归成一个量：一个电流脉冲的大小。

放大，在结构上是一次次的粗粒化，一层层的限制。

◆ 五、粗层求解：在最粗的地方定下来

到了最粗的一层，示波器上的一个尖峰，林小满本子上的一个数。

在这一层上，「来了一个光子，在 12.4 微秒」，是一件定下来的事。它不再是一锅粥里的许多可能，也不再是正在成形的一团电荷，而是一个确定的、谁看都一样的读数。

为什么在最粗的一层，它就能定下来？

因为在这一层上，那个差异已经被无数粒子同时记着，第 14 章说过，这是越过了门槛。粗层上的一个格子，代表的是细层上千千万万个格子的总和。千千万万个格子里，就算有一些还在晃，它们的晃，也在总和里互相抵掉了。

这正是多重网格法的道理：在细层上难以平下去的大范围误差，到了粗层，变成了一两个格子的事，一下子就平了。

在测量里，在细层上难以定下来的「到底来了没有」，到了粗层，变成了一个电流脉冲的事，一下子就定了。

◆ 六、延拓：定下来的东西，回到细处

到这里，教科书通常就停了：读数出来了，测量完成。

可是多重网格还有第四个动作：延拓，把粗层的结果，搬回细层。

测量里，有没有这第四个动作？

有，而且它就是教科书里那个最让人困惑的东西：**塌缩之后，系统处在和读数一致的那个状态里。**

量子力学的测量假设说：测量得到某个读数之后，系统就处在那个读数对应的状态里。测出自旋向上，系统此后就是自旋向上；立刻再测一次，还是向上。

这条假设，物理学家用了一百年，很少有人问它为什么是这样。

本书的读法是：这是延拓。粗层定下了「向上」，这个结果被搬回最细的一层，搬回到那个被测的粒子身上。粒子此后的状态，被粗层的结果改写了。

物理学家常说塌缩是「波函数突然变了」。本书说，它不是突然变的，是粗层的结果，一层层回写下来，把细层改成和粗层一致。只是在大多数实验里，这一层层的回写太快，看起来像是一瞬间。

塌缩，是粗层的结果回写到细层；它是多重网格里的延拓。

◆ 七、一圈之后，再磨一遍

延拓之后，多重网格还要在细层上再磨光几遍，把搬回来时带进的小毛刺磨平。

测量之后，有没有这个再磨一遍?

有。被测的粒子，在被粗层改写之后，又和周围的环境碰，又在局部弛豫。比如测出一个原子处在某个能级，测量之后，那个原子还会和周围的电磁场碰，可能发光、可能跃迁，这些都是细层上的再磨光。

而且，下一次测量，又是新的一圈。林小满一夜要测几万个光子，就是几万圈。每一圈之间，细层、粗层，都在磨、在送、在定、在改。

◆ 八、塌缩为什么看起来是一瞬间

如果塌缩是一层层的回写，为什么物理学家一百年来，都把它当成一瞬间?

因为它太快了。

一个光子从打上光阴极，到阳极上出一个电流脉冲，五纳秒上下。五纳秒，是五十亿分之一秒。光在这段时间里，只能跑一米半。

在这五纳秒里，八九层的上行和回写，全部走完了。对于一个用示波器看数据的人来说，这就是一瞬间。

而在更宏观的东西上，回写更快。第 10 章说过，一粒灰尘在空气里，它的位置叠加被环境抹掉、各层对齐，快到比光穿过一个原子核还短得多。

所以，教科书把塌缩写成一瞬间，是一个很好用的近似。它省掉了中间那几层，在绝大多数情况下，省掉了也不会算错。

可是，近似就是近似。当实验物理学家有意把中间的几层放慢，弱测量、连续测量、量子擦除，一瞬间就被拉开了，中间的那几层就露了出来。第 9 章说的正在成形，就在这被拉开的一段里。

塌缩看起来是一瞬间，是因为回写跑得太快；放慢来看，它是一圈。

◆ 九、这四个动作，哪些是同构，哪些是类比

到这里，要老老实实说一句：本书把多重网格的四个动作放到测量链上，哪些是结构上真的一样，哪些只是像。

限制和粗粒化，是结构上真的一样。两者都是把许多细的自由度合成少数粗的量，都会丢掉细节、保留大范围的差异。物理学家和数学家用的数学工具，也相通。

磨光和局部弛豫，大体一样。两者都是近处的、快的过程，都把急促的、局部的差异平掉。可是多重网格里的磨光，是人设计的算法；物理里的弛豫，是自然发生的，它的细节和材料有关，没有一个统一的算法。

粗层求解和越过门槛，结构相像。两者都是在粗的一层上，把一个差异定下来。可是多重网格里，粗层求解有一个精确的方程要满足；测量里，粗层上定下

来的，是哪一个读数，这个「哪一个」，多重网格里没有对应。这一点，第五编讲概率时会接着说。

延拓和塌缩后的状态，是本书最大胆的一个读法。结构上，两者都是粗层的结果改写细层。可是量子力学里，塌缩后的状态是由读数唯一决定的，这条规律，本书目前是借来解释的，不是推出来的。

附录三会把这四条一条一条标清楚。

◆ 十、一个完整的例子：一台量子计算机的读出

现在的超导量子计算机，读出一个量子比特，大致是这样的。

量子比特是一个小小的超导电路，它的状态会稍稍改变旁边一个微波谐振腔的频率。工程师往谐振腔里打一束很弱的微波，看反射回来的微波，相位偏了多少。偏左，是 0；偏右，是 1。

可是反射回来的微波太弱了，弱到几乎被噪声淹没。于是，它要先经过一个贴近芯片的、几乎不加噪声的量子放大器，再经过一个低温放大器。然后是室温的放大器，再进数字化的电路，最后在电脑里被判成一个 0 或者一个 1。〔据研究文献〕

一层，一层，又一层。

最细的一层，量子比特和谐振腔之间那一点频率差，是磨光之后剩下的差异。

每一级放大器，都是一次限制：把上一级的信号，归成下一级一个更大、更粗的量。

电脑里判出的 0 或 1，是粗层求解：在最粗的一层，一个读数定了下来。

判完之后，量子比特此后处在和读数一致的状态里；很多量子计算机，还会根据这个读数，立刻对量子比特做下一步操作。这是延拓，是回写。

工程师们没有用多重网格的词，可他们造的这条读出链，正是一个 V。

◆ 十一、第四个动作做砸了，会怎样

上一节讲读出链时，延拓是最后一步：读数定了，量子比特此后处在和读数一致的状态里。可要是这一步做得不干净呢？

量子计算机的工程师，最怕的就是这种情况。读出说是 0，可量子比特在被读的过程中，悄悄跳到了 1。或者读出本身把量子比特搅乱了，读完之后它既不是 0，也不是干干净净的 1。这时候，粗层定下的结果，和细层的实际状态对不上。〔核：大意〕

工程师管这叫读出引起的态泄漏，或者读出不保真。他们要用很多办法把它压下去：读出的微波不能太强，读出的时间不能太长，读完还要立刻再查一遍。

再查一遍，就是再磨一遍。查出对不上，就再来一圈。

这件事给本书的读法加了一道检验。如果塌缩真是延拓，那么延拓做得不好时，就该出现粗层和细层对不上的情况。电脑里记的是一个数，粒子身上是另一个样子。在工程里，这样的情况确实有，而且工程师正是用「再来一圈」的办法去修它。

教科书里的塌缩，是一次做完、永远做对的。真实的读出链，第四个动作会做砸，砸了要补。

日子里也一样。年级组那句「三班的卫生拖了后腿」，要是一路发回去时被传歪了，传成了「三班的纪律不好」。班主任就会去抓纪律，卫生照旧没人管。下一年的评比，会再一次把卫生的问题送上来。

送上来，再发回去，这一次说清楚一点。

延拓的好坏，决定了下一圈要不要再转。一个读数真正稳住，不只在于粗层定下了什么，还在于定下来的东西，有没有被原样带回到细处。

只往上报，是前三个动作；报上去再原样带回来，才是一圈。

◆ 十二、你自己，在测量链的哪一层

读到这里，你可能会觉得，测量链是实验室里的事，和你隔得很远。

其实你每天都站在许多条测量链上，只是你在其中的某一层。

你早上称体重，体重秤里的传感器是细层，屏幕上的数字是一层，你心里「又胖了」是一层，你决定今天少吃一点，是回写。

你在单位里写一份周报，你手头的具体事务是细层，周报是一层，部门汇总是一层，公司的季度报告是一层。季度报告里的一句话，可能一层层回写下来，改了你下一周要做的事。

你在哪一层，决定了你看到的是什么。在细层，你看到的是一件件具体的事，看得清，可看不到大局。在粗层，你看到的是一个个总数，看得到大局，可看不到细节。

物理学家在测量链上，往往只看最粗的那一层：示波器上的尖峰，电脑里的数据。中间那几层，他们知道在那里，可很少去想它们在做什么。

本书想请你做的，是把整条链都看一遍：你在哪一层，你的上面是谁，你的下面是谁；你往上送的是什么，从上面回写下来的又是什么。

◆ 十三、放回日子里

回到优秀班集体的评选。

很多学校的评比，只有前三个动作：小组磨一磨，往上报，在年级组定下来。定下来，就贴在公告栏上，完了。

这样的评比，一年一年地评，班里不会变好。因为第四个动作，延拓，没有做。粗层定下来的东西，没有回到细处去改。

三班之所以第二年卫生好了，是因为那句评语，一层层发了回去，一直发到那几个忘了值日的同学那里。

一个读数，只往上报、不往回改，就只是一个排名。往回改了，才成了一次稳住。

明天能试的一件事：你所在的单位，有没有一项考核，是只往上报、从不往回改的？想一想，它的第四个动作该怎样做：定下来的结果，该一层层发回到哪里？

带走的话

磨光、限制、粗层求解、延拓，四个动作一圈；放大是一次次的限制，塌缩是粗层结果回写到细层的延拓。

小　账

这一处，读数是谁的？读数在最粗的一层定下来，又一层层回写到被测的粒子；粒子此后的状态，是被这个读数改写的。

先在，还是发生？教科书说塌缩是波函数突然变了；本书说，塌缩是粗层的结果回写下来，是发生在一圈里的延拓。

想一想

1. 你经历过的哪一项评价，只做了前三个动作，没做第四个？
2. 你能不能想起一次，一个「最粗一层」的判断，一路回写，改掉了你身上一个很细的习惯？

◆

19

第 19 章

回写：粗处的判断，回头改细处

◆ 一、你一定有过这样的时刻

林小满上高中时，有一本错题本。

最开始，她把做错的题抄下来，写上正确答案，就算完了。一个学期下来，本子抄满了，同样的错，还在犯。

高二换了一个数学老师。老师看了她的错题本，说：「你这是在存档，不是在改。」

老师让她换一种做法。每次抄完一道错题，不急着写答案，先往上问一层：这道题错在哪一类？计算粗心，概念没懂，还是审题漏了条件？再往上问一层：这一类错，最近犯了几次？是不是某一章的东西整个没理顺？

问到最上面一层，她发现，她很多错，根子在同一处：对函数的定义域，一直没当回事。

然后，老师让她往回走。回到函数那一章，把定义域重新理一遍。再回到那一类题，专门挑定义域容易出事的做几道。最后回到每一道错题，重新做一遍，看看现在会不会再错。

一个学期后，她的错题本薄了很多。

这个「问到最上面一层，再一层层往回改」，就是本书说的回写。

◆ 二、回写不是存档，不是反馈

本书的七个词里，「回写」最容易被误解。

它常被当成「存档」：做过的事记下来，放进档案。林小满原来的错题本，就是存档。东西都在，可没有改任何东西。

它也常被当成「反馈」：做完一件事，得到一个评价。考试发下卷子，分数就是反馈。可分数本身，不改你的学法。

回写比这两样都多走一步：**长出来的东西，回头改土、改路。**

错题本的新做法，就是回写：从一道道错题里，长出一个上层的判断，「定义域没当回事」；这个判断回过头，改了她学函数的路，改了她做题的习惯，改了她的土。

上一章说，塌缩是多重网格里的延拓，是粗层的结果回写到细层。本章要把回写本身讲透，因为本书后面的许多说法，都靠它撑着。

◆ 三、物理学里，有一个现成的回写

量子物理里，有一个技术，几乎就是回写在实验室里的样子。它叫量子纠错。

量子比特很脆弱。它要和环境隔开，才能保住叠加；可它总会被环境碰到，被碰一下，状态就出一点错。一台量子计算机，要算很长的步骤，如果每一步都出一点错，算到后面，就全乱了。

怎么办？

工程师们想了一个办法：不用一个物理量子比特来存一个比特的信息，而是用许多个物理量子比特，合起来存一个比特的信息。这个合起来的比特，叫逻辑比特。〔核：大意〕

然后，每隔一小段时间，对这些物理比特做一种特别的测量。这种测量很巧，它不去看逻辑比特本身是 0 还是 1，那样会把叠加破坏掉；它只看物理比特之间是不是彼此一致。如果有一个物理比特出了错，和邻居不一致了，这种测量就会报一个信号，告诉你：大概在哪里，出了什么样的错。

这个信号，叫症状。

拿到症状，一台经典的电脑，叫解码器，根据所有的症状，判断最可能的错是什么。然后，把这个判断送回去，对相应的物理比特做一个修正操作，把错改掉。

然后，再测症状，再解码，再修正。一圈一圈，不停地转。

◆ 四、量子纠错就是一个 V

把量子纠错放到多重网格的四个动作里看。

物理比特，是细层。它们一直在被环境磨着，出各种小错。

症状测量，是限制。它不看每个物理比特的全部状态，只看它们之间的「不一致」，把许多个物理比特的细节，归成少数几个症状。这正是粗粒化：丢掉细节，留下要紧的差异。

解码器，是粗层求解。在症状这一层，它把「最可能出了什么错」定下来。

修正操作，是延拓，是回写。粗层的判断，被送回到细层，改写具体的物理比特。

然后，再一圈。

量子纠错，是物理学家亲手造出来的一台回写机器。

而且，这台机器的目的，正是让一个东西稳住：让逻辑比特，在一群不停出错的物理比特之上，稳稳地待着。

◆ 五、逻辑比特：一个靠回写才站得住的东西

逻辑比特，是一个很值得想一想的东西。

它不在任何一个物理比特上。你去看任何一个物理比特，都找不到它。它在一群物理比特之间，在它们彼此一致的那种关系里。

它也不是一造出来就稳的。如果不做纠错，不一圈圈地测症状、解码、修正，它很快就会被错误淹没，散掉。

它之所以能稳住，是因为一圈圈的回写，在不停地把它撑住。

近几年，物理学家在实验上做到了一件里程碑式的事：用更多的物理比特来组成一个逻辑比特，逻辑比特的错误率，不升反降。2024 年，谷歌团队在一块叫 Willow 的芯片上，把纠错码从三乘三扩到七乘七，码每大一档，逻辑错误率大约减半。这说明，在回写转得够快、够准的时候，层数越多，稳得越牢。

逻辑比特是第一个人造的、靠一圈圈回写才站得住的「东西」。

◆ 六、日常的东西，也是这样站住的吗

这里，本书要提出一个大胆的说法。它目前只是一个提法，没有证明，可它值得放在这里，供你想一想。

一只杯子，看起来就那样待着，不需要任何纠错。

可是，第 10 章说过，这只杯子每一秒钟，都被数不清的空气分子撞着，被数不清的光子照着。每一次撞，每一次照，都在环境里留下一份「杯子在这里」的记号；第 22 章会说，这些记号多到成千上万份。

这些记号，会不会也在起着纠错的作用？杯子的某一个原子，被热运动扰了一下，偏了一点；可周围的原子、照在它上面的光、撞它的空气分子，都还「记得」杯子在这里。这些记号合起来，像症状一样，把那一点偏差纠回去。

如果这个说法对，那么日常世界里那些看起来先在的东西，桌子、杯子、石头，其实都是靠环境不停的回写，才稳稳站住的。它们是自然界的逻辑比特。

本书在这里标一个〔待验〕。它不是物理学的标准说法，也还没有人把它算清楚。可它和第 22 章要讲的量子达尔文主义，方向是一致的。

◆ 七、回写不只在粗层到细层之间

前面讲的回写，都是从粗层到细层。还要补一句：回写也会改土。

林小满确认了那个异常脉冲是后脉冲之后，她没有只把那一个数据剔掉。她在实验记录里加了一条：这批管子在高计数率下有后脉冲，以后的数据处理，要加一道筛选。她的导师看到了，又在课题组的操作手册里加了一行。

这是回写改了土。下一次，课题组里的任何人做实验，都在一片改过的土上做。

第 8 章的第三个方程，土　＝ H（形状，路），说的就是这个：土是由过去的形状和路回写出来的。

物理学的每一次进步，都有这样的回写。一个实验结果，改了理论；理论改了下一个实验的设计；新的设计，改了仪器；新的仪器，又改了能测出什么。这是一个大尺度上的、几十年一圈的 V 循环。

◆ 八、回写太慢，层数越多越糟

量子纠错里，有一个被称为「阈值定理」的结论，对本书很要紧。〔核：大意〕

它说：如果每个物理比特出错的速度，低于某个阈值，那么用更多的物理比特、更多的层来组成逻辑比特，逻辑比特就会越来越稳，错误率随层数增加而迅速下降。

可是，如果物理比特出错的速度，高于这个阈值，那么用更多的物理比特，反而越来越糟。因为每多一个比特，就多一份出错的机会；回写转得不够快，跟不上出错的速度，错误越积越多。

对常用的一种纠错码来说，这个阈值大约是百分之一。

这条定理，说的是回写和出错之间的一场赛跑。回写赢了，层数越多越稳；回写输了，层数越多越乱。

用本书的话讲：稳住，不是层数多了就自动发生的。它要求每一层的回写，跑得比细层的乱快。

这一点，也许能帮我们理解，为什么有些东西层层叠叠，却总是稳不住。一个组织层级很多，可每一层的回写都慢，下面出的问题，上面要几个月才知道，知道了又要几个月才改回去；这样的组织，层级越多，越乱。

◆ 九、回写太狠：一直盯着的那口锅

回写太慢，层数越多越糟。那回写太快、太狠，又会怎样？

俗话说：盯着的锅不开。

物理学里，真有这样一件事。一个原子，本来过一会儿会自己跃迁到另一个能级。可是如果你频繁地去测它，测得够勤，每测一次，粗层就定下「它还在原

来的能级」，这个结果一回写，原子就被拉回原来的状态。它想走的那条路，每次刚迈出一点，就被拉回去。测得越勤，它越走不出去。

这叫量子芝诺效应，第 35 章会细讲。

用本书的话：回写太狠，细层就被锁死了。它在一锅粥里刚冒出一点新的差异，还没来得及正在成形，就被粗层的判断一把按了回去。

第 9 章说，正在成形有两种死法：散回一锅粥，或者过早定型。回写太慢，是第一种；回写太狠，是第二种。

所以，稳住要的，不是回写越快越好，而是回写的快慢，和细层的变化，配得正好。量子纠错的工程师们，天天在调的，就是这个配合：症状测量太稀，错误积起来；太勤，又会干扰逻辑比特本身。

◆ 十、回写也会写错

本章讲到这里，回写好像总是对的：粗层看清了，往回一改，细处就稳了。

可是回写也会写错。

量子纠错里，这件事有一个很直白的样子。症状只告诉你「哪里不一致」，不直接告诉你「哪里错了」。同一组症状，常常可以由几种不同的错误造成。解码器要猜：最可能是哪一种？大多数时候它猜对了。偶尔猜错，它送回去的那个修正，非但没改掉原来的错，还和原来的错合在一起，把逻辑比特整个翻了个面。〔核：大意〕

这时，每一个物理比特之间又彼此一致了，症状全消，看上去一切正常。可逻辑比特已经从 0 变成了 1。

这是回写最危险的一种失败：它不留痕迹。细层被改得服服帖帖，粗层的判断也自洽，各层对上了，对上的却是一个错的东西。

林小满高中那本错题本，也差点出过这种事。

起先，她把好几道错题归成了「粗心」。粗心是一个很顺手的上层判断：它好像解释了所有的错，又不用改什么，下次细心点就行。她带着这个判断回去，每道题多检查一遍，错还是照样出。

后来换了老师，老师把那几道题重新排了一遍，指出它们的根子不是粗心，是定义域。这才是对的那个粗层判断。

「粗心」那一回，也是一次回写。它把一个错的粗层判断，写回了她做题的习惯里。她越检查越觉得自己只是不够细心，越不去碰真正的根子。

这件事给本章的说法加了一条边界：回写能让一个东西稳住，可稳住的不一定是对的。

那怎么防？量子纠错的工程师有两个办法。一个是让症状更多、更细，让不同的错误留下不同的症状，猜错的机会就少。另一个是让粗层多看几圈，不凭一次症状下判断。〔核：大意〕

放到日子里，也是这两样。一个上层判断太顺手、什么都能解释时，多看一眼细处，看看有没有它解释不了的那一道题。下判断之前，多转一圈，别让第一眼的那个粗层，直接写回去。

第 20 章还会说，上行和回写要用同一把尺子。回写写错，很多时候，是上行时用了一把太粗的尺子，把不同的错，收进了同一个格子。

◆ 十一、本书的说法

本章收成一句：

回写，是粗处长出来的判断，回头改细处的状态，也改下一次的土和路；没有回写，就没有稳住。

在测量里，回写有三种样子：塌缩之后，系统处在和读数一致的状态里，这是改细处；读数改了实验记录和操作手册，这是改土；读数改了下一次测量怎么做，这是改路。

量子纠错，把第一种回写做成了工程。逻辑比特，是靠回写才站得住的东西。日常的东西，也许也是。

◆ 十二、一个完整的例子：一次校准

林小满所在的实验室，每个月要校准一次光电倍增管的增益。

校准是这样做的：用一个亮度已知的标准光源，照着管子，记下它的输出；和上个月比，看增益漂了多少。

如果漂了，就调高压电源，让增益回到原来的数。

这是一个回写：管子的输出，往上汇总成一个增益值，这是限制；和标准比，定下「漂了百分之三」，这是粗层求解；调高压，改了管子里每一级打拿极的电场，这是延拓，回写到了最细的一层。

有一次，校准发现增益漂得很厉害。林小满查了一圈，发现是实验室的空调坏了，温度升了五度。她没有只调高压，还报修了空调，又在校准记录里加了一条：每次校准，同时记下室温。

这一次的回写，改了细处，也改了土。

◆ 十三、一个靠回写站着的身体

第六节提了一个大胆的说法：日常的东西，也许是靠回写才站住的。这个说法在杯子身上还只是〔待验〕，可在一样东西身上，它几乎是生物学的常识：你的身体。

你今天的皮肤，不是一年前的皮肤。表皮的细胞，一层层从下往上长，旧的在表面脱落，新的在下面补上，大约每隔几周就换过一遍。骨头也不是一块死的石头，一边有细胞在拆，一边有细胞在建，一年下来，换掉的部分不少。

可你照镜子，还是那张脸。

这张脸为什么稳得住？因为有一份「该长成什么样」的粗层判断，一直在往回写。细胞分裂时，照着 DNA 的样子复制；复制错了，有一套修复的机器去对、去改。〔核：大意〕组织里少了一块，周围的信号会催着它补回原来的形状。一层一层，往下改。

你的身体，是一个比逻辑比特老得多、也复杂得多的回写机器。

它也有第八、第九节说的两种毛病。回写跟不上出错，修复的速度慢过损伤的速度，年纪大了，许多小错积起来，人就老了。回写太狠，或者写错了，身体的防守把自己的组织当成了敌人，也会出病。〔核：大意〕

本书不讲医学，只借这个例子看一眼：你最熟悉、最觉得「就在那里」的那样东西，其实每天都在被一圈圈地重新写一遍。身体或心里的难处真的大了，请找医生或心理咨询师。

◆ 十四、放回日子里

回到那本错题本。

很多孩子的错题本，是存档。很多家长的「复盘」，是反馈：「这次考得不好，下次努力。」

存档和反馈，都只走了半圈。

明天能试的一件事：和孩子一起翻一次错题本，只做三件事。第一，挑三道错题，往上问一层：错在哪一类？第二，再往上问一层：这一类的根子在哪？第三，带着这个根子，回到课本里那一节，重新读一遍。三件事做完，才算走完一圈。

带走的话

回写不是存档，不是反馈；是粗处长出来的判断，回头改细处、改土、改路。量子纠错，是一台人造的回写机器。

小　账

这一处，读数是谁的？逻辑比特的「0」，不在任何一个物理比特上，在一圈圈回写撑住的那种一致里。

先在，还是发生？逻辑比特看起来像一个东西，可它是靠回写一圈圈撑出来的；日常的东西，也许也是。

想一想

1. 你身边有哪样东西，看起来一直在那里，其实是靠许多人、许多次的「回写」才撑住的？
2. 你做过的复盘里，哪一次真正走完了一圈，改了土？

◆

20

第 20 章

一来一回的配对：平方从哪里来

◆ 一、你一定有过这样的时刻

林舟当年读大学时，班上玩过一个游戏，叫「传话」。

第一个人在第二个人耳边说一句话，第二个人再传给第三个人，一直传到第十个人。第十个人大声说出他听到的话，大家一对，常常笑成一片。

有一年，班长改了玩法：传到第十个人之后，不揭晓，让第十个人把听到的话，再一个一个往回传，传回第一个人。第一个人听完，说出来，和自己最初说的那句比，看还剩多少。

那一次，林舟是第一个人。他说的是：「明天下午三点在图书馆二楼开会。」

传回来的是：「明天下午在图书馆开会。」

「三点」和「二楼」丢了，「明天」「下午」「图书馆」「开会」留了下来。

后来，林舟学了量子力学，想起这个游戏，觉得它碰巧说中了一件事：一句话，经过一来一回之后，还剩多少，可以当作它「稳不稳」的一个量度。

本章要讲的，就是玻恩规则的平方，和这种一来一回之间的关系。

◆ 二、玻恩规则的平方，一直是个谜

先把问题再摆一遍。

量子力学用一个叫波函数的东西描述系统，记作 ψ。它的值，一般是复数。玻恩规则说：测到某个结果的概率，等于这个结果对应的那一部分波函数，取绝对值，再平方。

为什么要平方?

物理学家给过很多答案，第 27 章会一家一家讲。这里先说一个所有答案都绕不开的事实：平方，可以写成一个数乘以它自己的共轭。一个复数 a，它的共轭记作 a*，那么 a 的绝对值的平方，就是 a 乘以 a*。

所以，玻恩规则里的平方，在数学上，是「一个东西，乘以它的共轭」。

共轭是什么？大白话讲，是把一个复数「翻过来」，实部不变，虚部变号。在更一般的情形里，一个向量的共轭转置，一个算子的伴随，都是这种「翻过来」的推广。

本章要说：这个「翻过来」，正好是多重网格里，回写和上行之间的那种关系。

◆ 三、多重网格里有一个配对规则

第 18 章讲了多重网格的四个动作。这里要讲其中两个动作之间的一个配对规则。

上行，是限制：把细网格上的东西，搬到粗网格上。记作 R。

回写，是延拓：把粗网格上的东西，搬回细网格上。记作 P。

R 和 P，各有各的做法。可是，在多重网格里，有一种做法被认为是最自然、最稳的，它叫伽辽金条件：**上行，取回写的转置**。〔核：大意〕写成符号，是 $R = P^{T}$。如果处理的是复数，就取共轭转置，$R = P^{\dagger}$。

为什么这样配最稳?

用大白话讲：回写是怎样把粗处的东西摊到细处的，上行就照着这个摊法，反过来，把细处的东西收回粗处。两边用的是同一把尺子，一个往下摊，一个往上收。这样配，粗层上算出的修正，搬回细层时，恰好是在「最省力」的意义上最好的修正。对于物理里常见的那一大类方程，数学家证明了这一点。〔据研究文献〕

在这种配法下，粗网格上要解的方程，是 $P^{\mathsf{T}}\ A\ P$：先回写下去，在细层上作用一下，再上行收回来。这个式子，是一个二次型：P 出现了两次，一次正着，一次翻过来。

◆ 四、把测量写成上行和回写

现在，把这个配对规则放到测量上。

设想测量有一个读数 k，比如「光子到了」。这个读数，对应着细层上的一部分状态：所有会让粗层显出「光子到了」的那些细节状态。物理学家把这一部分叫作读数 k 对应的子空间。

从粗层看，读数 k 只是一个格子，一个「到了」或「没到」。

回写，是从这个粗格子，摊回细层：「到了」这件事，对应细层上的哪些状态。这是 P。

上行，是从细层，收回到这个粗格子：细层上的一个状态，有多少落在「到了」这个格子里。按伽辽金条件，这是 P 的共轭转置，$P^{\dagger}$。

现在问：一个细层上的状态 ψ，经过一次上行、再经过一次回写，一来一回之后，和原来的 ψ 还有多少重合？

写成式子，是：

$$\psi^{\dagger} \cdot P \cdot P^{\dagger} \cdot \psi$$

从右往左读：先上行，P† ψ，把 ψ 收到粗格子里；再回写，P，摊回细层；最后和原来的 ψ 比一比，ψ†，看重合多少。

这个式子，在数学上，恰好就是玻恩规则：读数 k 的概率。〔核：标准量子力学中，P P† 即读数 k 对应的投影算子，ψ† Π ψ 即玻恩概率〕

而且，它可以再写成：

> $\| P^\dagger \psi \|^2$

也就是：上行之后的那个东西，长度的平方。

玻恩概率，就是一个状态经过上行、再经过回写，一来一回之后，和自己的重合；也就是上行之后剩下的那一份，长度的平方。

这就是林舟那个传话游戏：一句话传上去，再传回来，还剩多少。

◆ 五、为什么要说「一来一回」

你可能会说：这只是把一个已知的公式，换了一种说法。玻恩规则写成 ψ† Π ψ，教科书上本来就有。

是的。本章的数学，没有一行是新的。

新的是读法。

教科书读这个式子，是这样读的：Π 是一个投影算子，它把 ψ 投到读数 k 的子空间上；概率是投影之后的长度的平方。至于为什么是长度的平方，不是长度本身，教科书说：这是公设。

本书读这个式子，是这样读的：Π　不是一个先在的投影，它是一次上行、加一次回写，是稳住的一来一回。概率之所以是平方，是因为稳住需要一来一回，而一来一回之间，上行和回写必须用同一把尺子，一个正着、一个翻过来。

也就是说，**平方里的那个共轭，就是回写。**

第 3 章讲过克拉默的交易诠释：提议波 ψ 走过去，确认波 ψ* 走回来，相乘得到 $|\psi|^2$。本书的读法和它是亲戚。可是有两处根本的不同。

第一，交易诠释把 ψ* 讲成一列真实的、往过去传的波。本书不需要往过去传的波，只需要上行和回写这一对配对的动作。

第二，交易诠释只有一层，一来一回就完了。本书有许多层。

◆ 六、许多层的时候，还是平方吗

这是一个要紧的问题。如果稳住是许多层、来回许多圈，那么概率还是简单的平方吗？会不会变成四次方、八次方？

答案是：只要每一层的上行和回写都按伽辽金条件配对，许多层叠起来，还是平方。

用数学的话讲：从最细的一层到最粗的一层，要经过许多次回写，P_1、P_2、P_3，一直下去，把它们一个接一个地乘起来，是一个总的回写 P。每一层的上行，都是那一层回写的共轭转置；把它们一个接一个地乘起来，正好是总回写的共轭转置 P†。于是，概率还是 ψ† P P† ψ，还是平方。〔核：要求每层的回写保持长度，即在数学上是等距映射〕

这一点，对第 26 章很要紧。那里要讲一个实验，它检验的正是：概率是不是严格的平方，有没有多出来的「三次项」。按本书的读法，只要每层都是成对的一来一回，就不会多出三次项。

◆ 七、这里有什么，没有什么

本书要把这一章的分量说准。

这里有的：一个严格的数学对应。玻恩概率，在数学上，正是一个上行和一个与之配对的回写所组成的一来一回之后的重合。多重网格里的伽辽金条件，要求上行是回写的共轭转置；量子力学里，投影算子正好是一个等距回写和它的共轭转置之积。这两件事，形式上是同一种结构。

这里有的：一个新的读法。平方的来历，可以读成稳住需要一来一回，而一来一回之间的配对，要求一个正着、一个翻过来。

这里没有的：一个从更基本的原理推出玻恩规则的证明。本书没有说明，为什么自然界要按伽辽金条件来配对上行和回写。在多重网格里，这样配，是因为它在某种意义上最好；在量子力学里，本书目前只能说，它和量子力学要求的「保持长度」是一致的。为什么要保持长度？这又回到了量子力学的基本假设。

所以，本章给的是一个诠释，不是一个推导。它把平方从一个孤零零的公设，放进了一套关于稳住的图景里，在这套图景里，平方有了一个位置、一个来历。

第 25 章讲 Gleason 定理时，会说明这个诠释和那个定理是怎样分工的。

◆ 八、要是两把尺子不一样

第三节说，伽辽金条件要求上行取回写的共轭转置，两边用同一把尺子。这一节反过来问：要是两把尺子不一样，会怎样？

这不是一个空想的问题。多重网格里，真有人这样做。上行用一种做法，回写用另一种做法，彼此不是转置。数学家管这叫彼得罗夫—伽辽金方法。〔核：大意〕在一些方程上，它很好用，甚至比同一把尺子更好用。

不过，它丢了一样东西。同一把尺子的时候，粗层上算出来的修正，在某种意义上是最省力的那一个，一圈比一圈稳，不会越改越偏。两把尺子不一样的时候，这个保证就没了。它有时收敛得快，有时会来回晃，要靠别的办法去看住它。

把这件事放回测量，会更清楚。

如果上行用的不是 P†，而是另外一个 R，那么一来一回之后的重合，就成了 ψ† P R ψ。这个式子，一般说来，连是不是一个正数都保证不了。〔核：一般的 R 下，该量可为负或复数〕它可能是负的，可能带着虚部。一个负的概率，一个带虚部的概率，说不出「一百次里有几次」。

换句话说，只有两把尺子是同一把、一正一反的时候，一来一回剩下的那一份，才一定是一个不小于零的数，才能当成「有多少」来数。第 24 章会接着说另一半：在能朝任何方向转的空间里，这些数加起来还要正好是一，那就只能是平方。

这给本章的读法又添了一条理由。平方里的共轭，不只是数学上一个顺手的写法。它是「一来一回之后剩下的，能被数成一个份额」的条件。尺子一换，剩下的就不再是份额，也就不再能叫概率。

日子里，你也见过两把尺子带来的那种晃。上面按一套标准派活，下面按另一套标准报账。账报上来，数字有时比实际多，有时比实际少，甚至会出现「完成了负的工作量」这种怪账。不是谁算错了，是上下用的不是同一把尺子。一来一回剩下的东西，没法当成一个能数的份额。

林舟后来把这一层讲给班上的学生听。他拿传话游戏打比方：往上传的人，按「时间、地点、事情」三格去记；往回传的人，却按「谁说的、语气怎样」去记。传回来的东西，和最初那句话对不上格子，你连「还剩多少」都没法问。

一个学生举手说：「那就是没法打分了。」

林舟说：「对。尺子不配对，连剩多少都数不出来。」

所以，两把尺子一正一反，不只是为了稳，也是为了让剩下的那一份，数得清。

◆ 九、一个完整的例子：偏振片

拿一个最简单的例子，把这一章走一遍。

一个光子，偏振方向和竖直方向成 30 度角。它遇到一块竖直的偏振片。偏振片后面有一个探测器。

问：光子穿过偏振片、被探测到的概率是多少?

教科书的答案：概率是 30 度的余弦的平方，约等于 0.75。

本书的读法：

粗层只有两个格子：「穿过了」和「没穿过」。

回写 P：「穿过了」这个粗格子，摊回细层，对应的是竖直偏振的状态。

上行 P†：细层上的光子状态，和竖直偏振的重合有多少，收进「穿过了」这个格子。30 度的光子，和竖直方向的重合，是 30 度的余弦，约 0.87。

一来一回：上行收进 0.87，回写摊回竖直方向，再和原来的光子状态比一比，又是 0.87。两个 0.87 一乘，约 0.75。

两个 0.87，一个是上行，一个是回写。它们是同一把尺子，一个正着用，一个翻过来用。

◆ 十、三块偏振片

有一个很简单、你在家里就能做的实验，能把一来一回的读法，看得更清楚。

找两副偏光墨镜，或者两块偏振片。把一块竖着放，另一块横着放，叠在一起，对着光看：黑的，一点光也透不过来。

这很好理解。竖着的那块只放竖直的光过去；横着的那块只放水平的光过去；竖直的光，在横着的那块上，一来一回，重合是零。

现在，拿第三块偏振片，斜着 45 度，插在前两块的中间。

你会看到：光透过来了。

这是一件让很多人吃惊的事：多加了一块挡光的片子，光反而透过来了。

用本书的读法，这件事是这样的。

光过了第一块，是竖直的。到了中间那块斜 45 度的，上行收进 45 度余弦那么多，约 0.71；回写摊回 45 度方向，又是 0.71。一来一回，剩下一半。

现在光是斜 45 度的了。到了最后那块横着的，上行收进 0.71，回写摊回水平方向，又是 0.71。一来一回，又剩下一半。

一半的一半，四分之一。光透过来了。

没有中间那块，竖直和水平之间，一来一回是零。有了中间那块，就多了一层；每一层都和它的上下有重合，一层层对过去，光就过来了。

多加一层，改变了能稳住什么。

这个小实验，对单个光子也成立：一个光子穿过三块偏振片的概率，正好是这样一层层算出来的。

◆ 十一、放回日子里

回到传话游戏。

那次传话，「三点」和「二楼」丢了，「明天」「下午」「图书馆」「开会」留了下来。为什么留下来的是这些?

因为这些词，在往上传和往回传的时候，用的是同一把尺子。大家都熟悉「明天下午开会」这种说法，往上传时照着这个说法收，往回传时照着这个说法摊。「三点」「二楼」这些细节，在这把尺子里没有位置，一来一回就丢了。

一个团队里，一个决定能不能稳住，也是这样。领导定了一个方向，往下传；底下的人执行，往上报。如果往下传和往上报用的是两把尺子，上面说的是「提高质量」，底下报的是「完成数量」，一来一回，那个方向就散了。

明天能试的一件事：你下一次向别人交代一件事，交代完，请他用自己的话复述一遍给你听。听听一来一回之后，还剩多少。剩下的，才是真的稳住了的。

带 走 的 话

玻恩规则的平方，可以读成一来一回：上行收进多少，回写再摊回多少，两者用同一把尺子，一个正着、一个翻过来，相乘就是平方。

小　账

这一处，读数是谁的? 30 度偏振的光子穿过竖直偏振片的 0.75，是上行和回写各 0.87 相乘得来的，它不归光子，也不归偏振片。

先在，还是发生? 教科书把平方当作公设，摆在那里；本书把它读成稳住所需的一来一回。

想 一 想

1. 你有没有一次交代事情，一来一回之后，发现对方听到的和你说的不一样？丢掉的是什么?
2. 「上行和回写要用同一把尺子」，在你工作的地方，有没有哪一处，两把尺子用错了?

◆

21

第 21 章

收敛：各层对上，才是事实

◆ 一、你一定有过这样的时刻

林舟住的小区，去年选业主委员会。

投票那天，每栋楼设一个票箱。晚上，各栋楼的志愿者先在楼下点票，点完，把数字报给居委会。居委会把十二栋楼的数字加起来，排出名次。

第一轮加完，有一个问题：三号楼报上来的总票数，比三号楼的住户还多了两票。

居委会没有直接公布。他们把这个疑问发回三号楼。三号楼的志愿者重新点了一遍，发现有两张票被重复算了。改完，再报上来。

居委会重新汇总，又发现七号楼的数字，和签到表上的人数差了一票。再发回去。七号楼查了，是一位老人投完票忘了签到，补上签名，对上了。

第二轮汇总，各楼的票数、签到人数、总户数，全部对上。

第二天早上，结果贴在了小区门口。

贴出去之后，就再没人争了。不是因为大家都满意，是因为每一层都对上了：每张票对得上每个签名，每栋楼对得上居委会的汇总，汇总对得上贴出去的那张纸。

贴出去的那张纸，是一个事实。

这一章要讲：一个读数，什么时候成为事实？

◆ 二、多重网格什么时候停

多重网格法一圈一圈地转，什么时候停?

数学家用一个叫「残差」的东西来判断。残差，是把当前算出来的值，代回原来的方程，看还差多少。差得越少，说明各处越对得上。

一圈转完，残差小了；再转一圈，又小了。当残差小到某个预先定好的界限以下，就说：收敛了，停。

收敛的意思，不是「找到了一个早就在那里的答案」。它的意思是：各层之间，细网格和粗网格之间，每个格子和它的邻居之间，都对上了，再转一圈，也改不了多少了。

居委会的点票，也是这样：各栋楼和居委会之间，票数和签名之间，反复对，对到再查一遍也查不出差错，就收敛了，可以贴出去了。

◆ 三、读数什么时候成为事实

把收敛放到测量上。

一个光子来了，光电倍增管里一级一级地放大，示波器上跳出一个尖峰。这个尖峰，是不是已经是事实了?

按本书的读法：当各层对上的时候，它就是事实了。

光阴极上打出的电子，和第一级打拿极收到的电子，对得上；第一级和第二级对得上；一直到阳极上的电流，和示波器上的尖峰，对得上；尖峰和硬盘里的那一行数据，对得上；那一行数据和林小满本子上的数，对得上。

各层都对上了，再查一遍，也查不出差错。这时，「12.4 微秒，一个光子到了」，就是一个事实。

事实，是各层收敛之后的读数。

◆ 四、收敛之前，可以撤回

这个说法，有一个要紧的推论：在收敛之前，读数还不是事实，原则上还可以撤回。

这件事，实验物理学家真的做到过。

第 14 章说过，在门槛之前，差异还没被无数粒子记着，原则上能被一个精巧的操作抹掉。第 11 章说过，干涉仪里，如果在一条路上记了一笔、又把那一笔抹掉，干涉会回来。第 33 章要讲的量子擦除，就是这一类实验。一个「走了哪条路」的读数，在它还没有收敛、还没有往上稳到宏观的那一层之前，被抹掉了。于是，它从来没有成为事实。

还有一类实验，物理学家叫它「测量的撤销」。在超导量子比特上，先做一次很弱的测量，读数只冒了一点头；然后，用一个精心设计的操作，把这一点冒头抹掉，让量子比特几乎回到测量之前的状态。第 41 章会讲它对本书的约束。

这些实验，都在说同一件事：读数，在冒头和成为事实之间，隔着一段路。在这段路上，它还能被撤回。

发生学反对的是先在，不是事实。读数在收敛之前，还不是事实；收敛之后，它就是事实，谁也改不了。

◆ 五、事实有没有程度

你可能会追问：既然收敛是残差小到某个界限以下，那界限定在哪里？事实是不是有程度的，有的事实「更事实」一些？

在多重网格里，界限是人定的。界限定得严，就多转几圈；定得松，就少转几圈。

在物理里，没有人去定这个界限。可是，第 14 章说过，一个宏观的读数，被无数粒子同时记着，层数多到天文数字。它的「残差」，小到任何人、任何仪器都查不出差错。这样的事实，在实际上，就是绝对的。

而一个只在最细的一两层上冒头的差异，层数很少，残差还大，它就离事实还远。

所以，本书的回答是：在原则上，事实有程度；在实际上，越过门槛、被宏观记录记下的读数，稳到了不可能再撤回的程度。

这和日常经验一致。一句刚说出口的话，还能收回；一份签了字、盖了章、存了档、发了文的决定，就几乎不可能收回了。不是因为它在某一刻突然变成了「绝对」，是因为它在太多层上被记下了。

◆ 六、收敛与可重复

第 10 章说过，理想的测量有一个性质：测完立刻再测一次同样的量，得到同样的结果。

在本书的读法里，这是收敛的一个检验。

测完之后，粗层的结果已经回写到了细层，粒子处在和读数一致的状态里。立刻再测一次，再走一圈 V 循环，各层的残差已经很小了，粗层求出的还是同一个结果。

这就像多重网格收敛之后，你再多转一圈，答案几乎不变。

可重复性，是收敛留下的指纹。

◆ 七、为什么不同的人看到的是同一个事实

还有一个问题，第 16 章碰过：为什么不同的人去看同一个读数，看到的总是同一个？

在本书的读法里，这是因为事实是收敛的结果，而收敛是各层都对上，包括每一个后来去看的人那一层。

林小满看到 12.4 微秒；她的导师第二天看数据，也看到 12.4 微秒；三年后，一个审稿人翻出原始数据，还是 12.4 微秒。每一个后来的人去看，都是又加了一层；这一层要和已经收敛的那些层对上，只能对上同一个数。

如果有人看到了不一样的数呢？那就说明，某一层出了差错，残差又大了，要像居委会那样，把疑问发回去，再对一遍。

科学的「可重复」「可检验」，在本书的读法里，就是这件事：任何人、任何时候，加进来一层，都和已经收敛的那些层对得上。

◆ 八、收敛得太快，是另一种错

本章一直在说收敛的好处。这一节要说它的坏处：有时候，东西收敛得太快了。

多重网格里，有一种情形让算题的人很头疼。残差降得飞快，几圈就到了界限以下，程序报「收敛了」。可拿结果去和别的办法比，发现差得很远。〔核：大意〕

这是怎么回事？残差只量「代回方程，还差多少」。如果某一层的格子太粗，把一种要紧的细节整个漏掉了，那这种细节在残差里根本不出现。残差很小，是因为它没看见，不是因为它对上了。

这种「假收敛」，比收敛不了更危险。收敛不了，你知道出了问题；假收敛，你以为没有问题。

日子里，这样的事很常见。

林舟所在的县中学，前几年评过一次「优秀班级」。学校定了几条指标：出勤率、卫生评分、平均分。每个班把三个数报上来，学校一汇总，一个班三项全优，很快就定了。各层都对上了，没有一个数对不上。

可是林舟知道，那个班的出勤率高，有一部分是因为班主任让生病的孩子也来上课。这一层，指标里没有。它没在残差里出现，因为指标这把尺子，根本没有给它留格子。

结果收敛了，收敛到一个漏了要紧东西的样子。

这一点和第 19 章说的「回写写错」，是一对。那里说，一个太顺手的粗层判断，写回细处，会把错稳住。这里说，一把太粗的尺子量残差，会把漏稳住。两样都是：各层对上了，可对上的东西有缺口。

那怎么分辨真收敛和假收敛?

多重网格里，常用的办法是换一种问法再查一遍。把格子加细一层，或者换一把尺子去量残差。真收敛的结果，换了问法，还是对得上；假收敛的，一换就露馅。〔核：大意〕

物理学的事实，之所以那么牢，正是因为它被许多种不同的问法查过。同一个读数，有人用光电倍增管测，有人用雪崩二极管测，有人从别的现象倒推，各条路都对上。第 22 章要讲的冗余平台，是这件事在环境里的样子：许多份彼此独立的记号，都说同一件事。

所以本书在「各层对上，才是事实」这句话后面，补一个小注：对上的层，要彼此不同。同一把尺子量十遍，只算一层；十把不同的尺子都量出同一个数，才算十层。

那个优秀班级，如果学校当年多加一把尺子，去问一问孩子们自己，收敛的结果，可能就不一样了。

◆ 九、过去，能不能被改写

收敛的说法，还能回答一个让很多人着迷的问题：量子力学里，过去能不能被改写？

第 33 章要讲的延迟选择实验，常被描述成：你现在做的选择，决定了光子在过去「走了一条路」还是「走了两条路」。好像现在能改写过去。

本书的回答是：不能。

已经收敛的事实，谁也改不了，不管是现在的选择，还是将来的选择。

延迟选择实验里，那个「过去」，从来没有收敛过。光子在干涉仪里的那一段，它走了哪条路，在任何一层上都没有稳住，没有被记下，没有回写到任何地方。那一段「过去」，在你做选择之前，就不是一个事实。

你后来做的选择，不是在改写一个已经收敛的过去，而是在决定，那一段还没收敛的东西，最后以什么样子收敛。

所以，与其说「现在改写了过去」，不如说「过去还没有成为过去」。

这一点要紧。它守住了一条很朴素的常识：发生过的事，改不了。本书完全同意这条常识。本书只补一句：要算「发生过」，得先收敛。

◆ 十、一个完整的例子：一个被撤回的「发现」

科学史上，有过不少「发现」在收敛之前被撤回的例子。

2011 年，意大利一个叫 OPERA 的实验组，发布了一个惊人的结果：他们测到的中微子，比光跑得还快一点点。〔核：大意〕

如果这是真的，爱因斯坦的相对论就要改写。

结果发布之后，世界各地的物理学家开始一层一层地查。实验组自己也在查。几个月之后，问题找到了：一根光纤接头没插紧，加上一个时钟的偏差，两处小毛病合起来，造成了那一点点「超光速」。〔核：大意〕改正之后，中微子的速度和光速对上了，没有超过。

这个「发现」，从来没有成为事实。

用本书的话：它在最细的那几层，冒出了一个差异；可往上一层层对的时候，对不上。理论这一层，和其他实验这一层，都和它对不上。残差很大。于是，有人把疑问发回到最细的那一层，发回到那根光纤接头，找到了差错。

这是一个完整的 V 循环：细层冒出一个差异，往上送，粗层发现对不上，往回改，改到细层，找到差错，残差消了，收敛了。只是收敛的结果是：没有超光速。

◆ 十一、收敛了的事实，会被新的一圈改写吗

你可能会问：科学史上，不是有很多「事实」后来被推翻了吗？牛顿的力学，被爱因斯坦改写了。那些收敛了的东西，不也被改了？

这里要分清两样东西：读数，和对读数的解释。

牛顿时代，天文学家测到的行星位置，那些读数，到今天一个也没有被改。它们收敛了，就是事实。爱因斯坦改写的，是理念界里对这些读数的解释：行星为什么在那里，是引力在拉，还是时空在弯。

读数，在现实界里收敛，收敛了就不改。解释，在理念界里收敛，它也会收敛，可它收敛的那一层，比读数粗得多、高得多，它要和很多读数同时对上。当新的读数出现，比如水星近日点那一点点进动，老的解释对不上了，理念界的残差又大了，就要再转一圈。

所以，科学的进步，不是推翻事实，是在理念界里，为越来越多的事实，找一个能同时和它们都对上的解释。每一次改写，都是新的一圈。

事实不改；改的，是理念界那一层的收敛。

◆ 十二、一份病历的两种收敛

再把本章的判断，放进一个更常见的场景。

一位六十八岁的退休工人，姓杜，胸口闷了两天，到医院看病。心电图做了，血化验做了，医生看完说：「心脏这边，暂时看不出大问题。」病历上写下了一行。

这一行，在本书的读法里，是一个读数。它在心电图那一层、化验单那一层、医生的判断那一层，都对上了。它收敛了。

几天后，老杜又去了另一家医院复查，结果相同。又对上了一层。这一行，就更像一个事实了。

可是，假如过了半个月，他在家里爬楼时又闷了一次，这一次被查出了问题。前面那一行病历，是不是错了？

按本章的说法，要分两件事看。

那两天的心电图和化验，那些读数，没有错。它们在当时收敛了，就是事实，谁也改不了。改了的，是「心脏暂时没有大问题」这个判断。这个判断在理念界那一层，它要和很多读数同时对上。当时对上了；新的读数来了，对不上了，就要再转一圈。

这和本章前面讲的牛顿与爱因斯坦，是同一个结构，只是从几百年缩到了半个月。

这样分清楚，对病人和医生都有用。病人不用觉得「之前全白查了」：之前的读数还在，它们是新判断的一部分。医生也不用觉得「之前判错了，我失职了」：在当时的读数上，那个判断是收敛的；新的读数来了，再转一圈，是正常的事。

真正要提防的，是另一种情形：新的症状来了，却因为「之前已经查过了」，不肯再转一圈。这是把理念界那一层的收敛，当成了现实界那一层的事实，当成改不了的了。

身体或心里的难处真的大了，请找医生或心理咨询师。

◆ 十三、放回日子里

回到小区的选举。

如果居委会在第一轮汇总之后，就把结果贴出去，三号楼多出的那两票，就会成为一个「事实」，而且之后很难再改。说不定，还会为此吵上好几个月。

多对一轮，是一件很小的事。可它让一个读数，在成为事实之前，有机会被纠正。

明天能试的一件事：你下一次要发布一个结论，不管是工作上的一份报告，还是家里群里的一条消息，先别急着发。找一个人，从最细的一层帮你对一遍：数字对不对，日期对不对，名字对不对。一个结论，在收敛之前被改掉，比在成为事实之后再撤回，容易得多。

带走的话

事实，是各层收敛之后的读数；收敛之前，它还能被撤回，收敛之后，谁也改不了。发生学反对先在，不反对事实。

小　账

这一处，读数是谁的？「超光速中微子」在细层冒了头，可各层对不上，没有收敛，从来没有成为事实。

先在，还是发生？发现学说事实早就在那里，等着被找到；本书说，事实在各层收敛的那一刻发生，发生了就改不了。

想一想

1. 你经历过的哪一个「事实」，后来被证明是一个还没收敛的读数？
2. 你在发布一个结论之前，通常会对几层？

◆

22

第 22 章

冗余平台：粗层在物理里的影子

◆ 一、你一定有过这样的时刻

县城里新开了一家面馆。

开张第一天，只有几个过路的人进去吃了。第二天，其中一个人跟同事说：「东街那家新开的面馆，牛肉面不错。」第三天，同事去吃了，回来又跟另外几个人说。

一个月后，林舟在学校里随便问一个老师：「东街那家面馆怎么样？」对方都会说：「牛肉面不错。」

有意思的是：你不需要问遍全县城的人，才知道那家店的牛肉面不错。随便问三五个，就够了。再多问二十个，你得到的，还是同一句话，不会多出什么新东西。

「牛肉面不错」这句话，在县城里被复制了很多份，存在很多人的嘴里。每一份都一样。你随便取一小份，就拿到了全部。

物理学家在量子力学里，发现了一件和这很像的事。

◆ 二、环境是一个见证人

本书前面一直在讲环境：第 15 章讲退相干，环境把干涉抹掉；第 19 章提了一个大胆的说法，环境可能在给日常的东西纠错。

美国物理学家楚雷克，从二十一世纪初开始，提出了一个看环境的新角度。他说：环境不只是一个把干涉抹掉的垃圾桶，它还是一个见证人。〔核：大意〕

一粒尘埃在这里，从它身上反射出去的光子，每一个都带着一份「尘埃在这里」的消息，飞向四面八方。成千上万个光子，就是成千上万份副本。

你要知道尘埃在哪里，不需要去碰尘埃本身。你只要截住其中一小部分光子，看一眼，就知道了。我也截住另一小部分，也知道了。我们截住的光子不一样，可得到的消息一样。

楚雷克给这套看法起了一个名字：量子达尔文主义。〔核：大意〕名字的意思是：在环境里，那些能被复制最多份的状态，像生存竞争里的赢家一样，被留了下来，成了大家都能看到的「客观」状态。

◆ 三、一条平台

楚雷克和他的合作者，用量子信息论的工具，把这件事算得很清楚。

他们问：如果你只截住环境的一小部分，你能知道多少关于系统的消息？

把截住的比例，从零一点一点往上加，算你得到的消息有多少。得到的曲线，有一个很特别的形状。〔据研究文献〕

一开始，截住的比例很小时，消息随着比例增加，蹭蹭往上涨。

涨到某个值，涨不动了。这个值，正好是系统那个经典读数所包含的全部消息，比如「尘埃在左还是在右」，这一份消息。从这里开始，再多截住环境的一部分，消息也几乎不再增加。曲线平了，成了一条长长的平台。

这条平台一直延续，直到你几乎截住了整个环境，最后那一点点，曲线才又陡然往上翘，翘到一个更高的值。那个更高的值，包含的是系统和环境之间完整的量子关联，只有把整个环境一个不落地截住，才能拿到。

物理学家管中间那一段，叫**经典平台**。平台越长，说明系统的那份经典消息，在环境里被复制的份数越多。楚雷克用复制的份数来量这件事，叫冗余度。〔核：大意〕

2018 到 2019 年，罗马、中国科大的光子实验和乌尔姆的金刚石色心实验，都看到了这条平台。

◆ 四、平台，是粗层站住了

楚雷克的平台，用本书的话来读，是这样的。

那条长长的平台，是**粗层站住了**。

在平台上，你截住环境的哪一部分都行，拿到的都是同一份消息：「尘埃在左」。这份消息，不在任何一个特定的光子上，它在许许多多光子之间，在它们彼此一致的那种关系里。这正是粗层的样子：一个格子，代表千千万万个细格子；千千万万个细格子，对这个粗格子说的是同一句话。

而平台最后那一点陡然上翘，是**细层**。要拿到那一部分，要把环境里的每一个光子都截住、都对齐，那是最细的一层，是完整的量子关联。它在原则上存在，可实际上谁也拿不到。

所以，量子达尔文主义的平台，是本书「粗层」在物理里的一个影子。不是比喻：它是用量子力学的标准工具，一行一行算出来的。

◆ 五、冗余，是多处回写

平台的长短，由冗余度决定：「尘埃在左」这份消息，在环境里被复制了多少份。

本书读冗余度，是这样读的：**每一份副本，是一次回写**。

第 19 章说，回写是粗处的判断，回头改细处。尘埃在左，这个粗层的状态，通过每一个反射出去的光子，写进了环境里的一小块：那个光子的方向，被「尘埃在左」改写了。

一个光子，是一次回写；成千上万个光子，是成千上万次回写。

回写的次数越多，粗层站得越牢。哪怕有几个光子被别的东西吸收了，丢了，剩下的副本还多得很，粗层纹丝不动。

这就把第 19 章那个大胆的说法，往前推了一步。日常的东西之所以稳，之所以看起来先在，是因为它们的粗层状态，在环境里被回写了天文数字那么多份。这些副本，像一个巨大的纠错码，护着它。

◆ 六、平台，也解释了「客观」

还有一件事，平台解释得很漂亮：为什么不同的人看到的，是同一个世界？

第 16 章和第 21 章，都碰过这个问题。本书的回答是：事实是各层收敛的结果，每一个后来的人，都是又加了一层，这一层要和已经收敛的层对上。

楚雷克的平台，给了这个回答一个物理的样子。

你和我，各自截住环境里不同的一小部分，各自看一眼。因为我们都在平台上，我们拿到的，是同一份消息。我们不用商量，不用互相印证，各看各的，看到的就是同一个尘埃在同一个位置。

这就是物理学家说的「客观」：许多个彼此独立的观察者，不打招呼，看到同一个结果。

本书说：客观，不是因为有一个先在的世界摆在那里，大家去发现它。客观，是因为粗层在环境里被回写了足够多份，多到每个人随手一取，取到的都是同一份。

客观，是冗余回写出来的。

◆ 七、平台从哪里开始，是一道门槛

最后一个问题：平台是从哪里开始的？

曲线一开始蹭蹭上涨，涨到某个比例，平了。这个比例，就是平台的起点。

在本书的读法里，这个起点，就是第 14 章说的门槛。

在平台起点之前，环境里的副本还不够多，消息还没稳住，你截住一小部分，拿到的消息是残缺的。这一段，是正在成形。

越过平台的起点，副本够多了，粗层站住了，你截住哪一部分，拿到的都是完整的经典消息。这一段，是定型。

这给第七编留下了一条可以拿去碰实验的说法。第 42 章会把它写成一条登记：**如果有一天，发现一个宏观记录，在环境里还没有形成冗余平台的时候，就已经不可撤回了，那么本书「层层稳住才算事实」的读法，就要撤回。**

这是本书押的一注。

◆ 八、能抄成许多份的，只有一种消息

平台上那份消息，为什么总是「尘埃在左还是在右」这样的经典消息？为什么从来不是尘埃完整的量子状态?

量子力学里有一条定理，叫不可克隆定理。它说：一个未知的量子态，没法被完整地复制成两份。

用大白话讲：你手里有一个光子，不知道它的偏振朝哪个方向。你造不出一台机器，吐出两个和它一模一样的光子。

不过，有一种情形能复制。如果事先约好，只在几个彼此垂直的方向里挑，比如只问「竖还是横」，那么「竖」可以抄成很多份，「横」也可以。抄出去的，只是它落在哪一格，不是它完整的样子。

环境做的，正是这种抄法。光子从尘埃身上弹开，带走的是「左还是右」这一格。尘埃在左右之间的那一份相位，它带不走。

本书这样读：回写，只能回写粗层的格子，不能回写细层的全部。粗层能被抄成千万份，细层一份也抄不走。

这就把平台最后那一点上翘，说得更清楚了。细层的那一份，不是藏在哪个角落里，是根本没法分到许多小块上去，它只活在整体里。要拿它，只能把整片环境一块不落地收回来。

楚雷克也是从这里讲起的：系统的哪几种状态，能在环境里留下许多份，是由系统和环境怎样碰来挑的。〔核：大意〕

它还回答了一个常被问的问题：为什么没人见过一只杯子处在「这里」和「那里」的叠加？不是叠加被什么定律禁止了，是叠加这种样子，抄不出副本。能站上平台的，只有抄得出副本的东西。

物理学家管这些东西叫经典。

经典，是世界上能被抄成许多份的那一部分。

◆ 九、一个完整的例子：一颗卫星的位置

一颗卫星，在几百公里高的轨道上飞。

它的位置，是怎样成为一个「客观的事实」的？

太阳光照在它身上，反射出去的光子，飞向四面八方，每一个都带着一份「卫星在这里」的消息。地面上的雷达发出电波，打在它身上，反射回来。它自己也在发射信号，被许多个地面站同时收到。

每一份光子、每一次雷达回波、每一个地面站收到的信号，都是一份副本，一次回写。

于是，南半球的一个天文爱好者，用望远镜看到它；北半球的一个雷达站，测到它；一个地面站，收到它的信号。三方从来没有商量过，可他们算出来的位置，一致。

这颗卫星的位置，在环境里被回写了天文数字那么多份。它稳到了任何人随手一取，都取到同一个答案。

◆ 十、平台太长，也会锁死

冗余越多，粗层越稳。那是不是冗余越多越好?

不全是。

第 9 章说过，土有三种状态：太散，正好，太死。冗余平台太短，粗层站不住，是土太散；冗余平台太长，长到粗层被回写了天文数字那么多份，就没有什么能再改动它了，是土太死。

在物理里，这正是日常的东西「看起来先在」的原因：它们的平台长到了任何扰动都撼不动的地步。一只杯子，你没法让它处在叠加里，因为它的位置被回写了太多份。

这在物理里是好事：我们需要一个稳的世界，才能在上面生活。

可是，放到人的世界里，就不一定了。

一个看法，在一群人里被反复转述，被回写了很多份，它就成了这群人的「客观事实」。如果这个看法是对的，这是好事；如果它错了，它也同样稳，同样难改。

很多人说的「信息茧房」，用本书的话讲，就是一个平台长得太长、而且只在一小群人之间回写的读数。〔据研究文献〕每个人随手一取，取到的都是同一份；没有人想到，去平台外面看一看。

物理学家造量子计算机时，要的是平台短一点：让量子比特的状态，不要太快地被环境回写太多份，好让它在一锅粥里多待一会儿。做研究、做学问，有时候也要这样：给一个新想法，留一点还没被回写成定论的空间。

◆ 十一、月亮在不在那里

现在可以回到第 1 章那句话了。爱因斯坦问：你真的相信，月亮只在你看着它的时候才存在吗？

本书的回答是：月亮在那里，不是因为它先在，而是因为它在环境里被回写了天文数字那么多份。

每一秒钟，太阳光照在月亮上，反射出去的光子，有一部分落在地球上，有一部分飞向太空深处。每一个光子，都带着一份「月亮在这里」的消息。宇宙微波背景辐射，也在一刻不停地碰它。月亮的引力，在拉着地球的海水。

就算这一刻地球上没有一个人抬头看，月亮的位置，也已经在环境里被复制了不知多少亿亿份。它的平台，长得无边无际。

所以，爱因斯坦说对了：月亮在那里，不需要你看。

玻尔也说对了：月亮在那里，不是一个脱离了一切互动的、先在的东西；它在那里，是因为它和整个宇宙的环境，一刻不停地在互动、在被回写。

两个人吵了一辈子的那件事，在冗余平台上，各自对了一半，也各自合上了。

◆ 十二、为什么要把目击者分开问

县城东环路口，一个傍晚，一辆电动车和一辆面包车擦了一下。交警老吴赶到时，路边站着五六个看见的人。

老吴做的第一件事，不是问，是把这几个人分开。一个站在路这头，一个站在路那头，一个请到警车边上。分开之后，再一个一个问：车从哪边来，灯是红是绿，谁先拐的。

年轻的辅警问他：「一起问不是快些？」

老吴说：「一起问，问到的是一句话。分开问，问到的才是五句。」

这句话，正好说中了冗余平台的一个条件：每一份副本，都得是从事情本身直接抄来的，不能是从别的副本抄来的。

光子从尘埃身上弹开，每一个都亲自碰过尘埃。它们之间不商量，也不互相抄。所以你截住这一小份、别人截住那一小份，拿到的一致，才说明尘埃那一格真的站住了。

如果五个目击者先凑在一起聊了十分钟，后面四个人说的，可能都是第一个人的版本。看起来有五份，其实只有一份，被转了四遍。这时候的平台，是假的。

第 21 章说，事实是各层对上。对上有一个前提：每一层都是自己去碰过的。照抄来的那一层，对得再整齐，也不添一分稳。

所以老吴分开问，是在护着副本之间的独立。五个人的话，如果在灯的颜色上对得上，在谁先拐上对不上，他就知道：灯的颜色站上了平台，谁先拐还在正在成形，还得去调路口的监控。

监控，是又一份直接从事情本身抄来的副本。它不听任何一个目击者的话。

◆ 十三、放回日子里

回到那家面馆。

「牛肉面不错」这句话，之所以成了县城里的一个「客观评价」，是因为它被复制了很多份。你随便问三五个人，就站在了平台上。

可是，如果这家店只有一个人吃过，只有一个人说好，那么这句话就还在平台的起点之前，还在正在成形。你问到那一个人，觉得不错；问不到他，就什么也不知道。

很多「口碑」，就是这样一份一份回写出来的。

明天能试的一件事：下一次你听到一个评价，问自己一句：这个评价，是站在平台上的，还是还在平台起点之前？我听到的，是被很多人独立说过的，还是只是一两个人的话，被反复转述？前者是冗余，后者只是回声。

带 走 的 话

量子达尔文主义的经典平台，是粗层在物理里的影子；冗余是多处回写，客观是冗余回写出来的，平台的起点就是门槛。

小　账

这一处，读数是谁的？「尘埃在左」不在任何一个光子上，在千千万万份彼此一致的副本里；你我各取一份，取到的是同一个读数。

先在，还是发生？发现学说客观是因为世界先在；本书说，客观是冗余回写出来的。

想 一 想

1. 你相信的哪一个「客观事实」，其实是你从平台上随手取到的？你能想到它最初是怎么被回写出来的吗？
2. 有没有一个评价，你以为是平台上的，后来发现只是一两个人的回声？

◆

第 四 编 · 总 判 断

读数是一层层稳住的：磨光、限制、粗层求解、延拓，一圈一圈，直到各层收敛；放大是限制，塌缩是延拓，量子纠错是人造的回写机器，冗余平台是粗层在物理里的影子，客观是冗余回写出来的。

第五编回到那把一百年的锁：玻恩规则。为什么是概率，为什么是平方，Gleason 定理到底证了什么。



第　五　编

玻恩规则：为什么是概率，为什么是平方

导　语

这一编五章，回到导论那把一百年的锁。第 23 章问：宇宙为什么要掷骰子？第 24 章问：为什么偏偏是平方？第 25 章重读 Gleason 定理，看它证了什么、没证什么。第 26 章讲一个检验平方的实验，叫三缝干涉。第 27 章把各家对玻恩规则的推导排在一起，和本书对一笔账。

一句话：一次读数，是一次一次性的发生；概率，是许多次一次性发生之后的定型；平方，是每一层上行与回写的配对。

23

第 23 章

为什么是概率：一次性的发生，多次性的账

◆ 一、你一定有过这样的时刻

林舟的学校门口有一个十字路口，红绿灯很长。

每天早上七点十分，林舟骑车到路口。有时候正好绿灯，一溜就过去了；有时候正好红灯，要等一分半。

他算过一学期：大约三成的早上碰上绿灯，七成碰上红灯。

可是，每一个早上，他碰上的，要么是绿灯，要么是红灯。没有哪一个早上，他碰上了「三成的绿灯」。

三成，是一学期一百多个早上的账；每一个早上，都是一次只来一回的事。

这没什么稀奇，谁都知道。

不过，量子力学的概率，恰恰卡在这里。它说：一个光子穿过偏振片的概率是 0.75。可是每一个光子，要么穿过，要么没穿过。没有哪一个光子，穿过了 0.75。

0.75 是谁的，是这一个光子的，还是许多个光子的?

◆ 二、两种概率

哲学家吵了很久，概率到底是什么。大致有两派。

一派说，概率是频率。掷一万次硬币，正面五千次左右，概率就是二分之一。概率是许多次之后的账，说的是一群事件，不是某一个事件。〔核：大意〕

这一派的麻烦在于：单独一次的事，没有概率可言。明天会不会下雨，只有一个明天，怎么谈频率？一个光子会不会穿过偏振片，只有这一个光子，怎么谈频率？

另一派说，概率是倾向。硬币本身，有一种「一半一半」的倾向；光子本身，有一种「四分之三穿过」的倾向。这一派里，最著名的人是波普尔。他在二十世纪五十年代提出倾向说，一个重要的动机，正是为了说清量子力学里的单次概率。〔核：大意〕

这一派的麻烦在于：说不清倾向是什么，也说不清它藏在光子身上的哪里。如果它是光子的一种属性，那么它就是一种先在的属性，而第 2 章说过，量子力学不喜欢先在的属性。

本书第 226 号《超越波普尔》讲过一件事，这里正好接上：波普尔的科学，向能重复的事负责；可人生里，有很多事只来一回。〔据研究文献〕烧水能再烧一遍，求婚只来一回。

本书在这里要说：**量子测量的每一次读数，都是一次只来一回的事。**

◆ 三、每一次读数，都是一次性的

说每一次读数都是一次性的，理由是这样的。

因为它是一次发生。第 10 章说过，一次测量，是一次特征律：叠加是一锅粥，放大是自组织，读数是涌现出来、稳住了的差异。这一次稳住，是在这一个光子、这一块光阴极、这一串打拿极、这一刻的电压和温度里发生的。它发生了，就成了事实，改不了；它也不会以同样的方式，再来一遍。

下一个光子来，是另一次发生。光阴极上被打出电子的，是另一处；打拿极里的电子，是另一批；那一刻的热噪声，也不一样了。

所以，林小满一夜测到的几万个读数，不是同一件事重复了几万次，而是几万次各自只来一回的发生。

◆ 四、那为什么会有稳定的频率

问题来了：既然每一次都是一次性的，为什么几万次下来，频率会那么稳？穿过偏振片的比例，总是 0.75 上下，从来不会跑到 0.5，也不会跑到 0.9？

本书的回答是：因为那几万次一次性的发生，是在同一片土上发生的。

光源一样，偏振片一样，探测器一样，实验室的温度、电压、规程都一样。土是稳的。在稳的土上，一次次各自只来一回的发生，虽然每一次的结果说不准，可许许多多次叠在一起，会叠出一个稳的形状。

第 13 章说过，干涉条纹是千万个单独的点，叠出的一个正在成形的形状。频率也是这样：它是千万次一次性的读数，在同一片土上叠出的形状。叠够了次数，它从正在成形走向定型，成了一个稳稳的数：0.75。

概率，是许多次一次性的发生，在同一片土上叠出来、定了型的那个形状。

这句话，把两派的道理都收了进来。

频率派说得对：概率是许多次的账。可它说不清为什么账会稳。本书说：因为土稳。

倾向派说得对：单独一次的事，也和概率有关。可它说不清倾向藏在哪。本书说：倾向不藏在光子身上，它在土里，在光子、偏振片、探测器、整套装置缠成的那片地里。换一片土，倾向就变了。

◆ 五、为什么每一次说不准

还有一个问题：既然土稳，每一次为什么还是说不准，为什么不能在光子出发之前，就说出它这一次会不会穿过？

古典的回答是：因为我们不知道全部的细节。如果知道光子的每一个细节、偏振片的每一个原子，原则上就能算出它这一次穿不穿。说不准，是因为无知。

第 2 章说过，这条路，贝尔和 Kochen–Specker 已经堵上了一大半。在不付出超距牵连的代价下，不存在一组事先写好的细节，能决定每一次的结果。

近十几年，物理学家甚至把这件事做成了一种技术，叫「器件无关的随机数」。他们利用违反贝尔不等式的实验，生成一串数字，并且能证明：这串数字不可能被任何事先写好的东西决定，哪怕造仪器的人想作弊也不行。〔据研究文献〕

本书的回答是：每一次说不准，是因为每一次都是一锅粥里的碰撞。第 11 章说过，叠加里的几条路，在互相碰撞、加强、抵消。哪一条在这一次碰撞里冒头、被放大、越过门槛，不是事先写好的；它是在这一次碰撞里发生的。

说不准，不是因为无知，是因为在稳住之前，本来就没有一个答案。

◆ 六、宇宙为什么掷骰子

爱因斯坦有一句很有名的话：上帝不掷骰子。〔核：大意，原话见他 1926 年给玻恩的信〕

他的意思是：说不准，只是因为我们的理论还不完整。完整的理论，会告诉我们每一次的结果。

本书对这句话，有一个两面的回答。

一面是：上帝确实不掷骰子。没有一个先在的骰子，摆在那里，被谁拿起来掷。

另一面是：每一次读数，确实说不准。不是因为骰子被掷了，而是因为在稳住之前，答案还没有发生。

掷骰子的图景，本身就是一个先在的图景：骰子先在，六个面先在，掷是一个动作，结果是六个面中的一个。本书的图景是：在测量之前，连「有哪几个面」都还在一锅粥里，要看你用哪一种方式去碰它；碰了之后，一个面在层层稳住里冒出来，同时，「这一个骰子」「这一次掷」也一起冒出来。

所以，与其说宇宙在掷骰子，不如说：**宇宙在一次一次地发生，每一次只来一回；许多次之后，留下一本稳稳的账。**

◆ 七、概率是哪一层上的事

用第四编的话，还可以把概率放到层里去看。

一次读数，是纵向的：在一次测量里，从光阴极一层层往上稳，稳到示波器上的一个尖峰。这一条是一次性的。

概率，是横向的：在许多次测量之间，一个个尖峰叠在一起，叠出一个比例。这一条是多次性的。

纵向那一条，管的是「这一次稳住了什么」；横向那一条，管的是「许多次稳住的东西，叠成了什么形状」。

第 13 章说过，两者交在一起，就是玻恩规则。现在可以说得更细：玻恩规则给的，是横向那一条的形状，0.75；可这个形状为什么是 0.75，而不是 0.5，

要看纵向那一条里，每一层的上行和回写，是怎样配对的。这就是下一章的题目。

◆ 八、土稳不稳，靠什么知道

读到这里，一个细心的读者会追问：你说频率稳，是因为土稳。可你怎么知道土稳？不就是看频率稳不稳吗？这不是绕了一个圈？

这个质疑，对了一大半。

在实验室里，物理学家确实常靠频率来查土。一夜的计数，前半夜七成五，后半夜掉到六成，他们第一个反应是：土变了。激光器热了，探测器的电压漂了，有人碰了一下光路。频率一晃，就是土在报信。

所以，频率和土，确实是互相查的。

本书不觉得这是一个坏的圈。第 18 章说过，多重网格就是这样：粗层的结果拿去校细层，细层的偏差又拿回来校粗层。哪一层都不是单独站住的，是彼此对上了才站住。

频率和土，也是两层。频率是叠出来的那一层，粗一些；光源、偏振片、电压、温度是另一层，细一些。频率稳，是土往上走的一次上行；看到频率晃，回去查电压，是一次回写。查到哪里漂了，修好，再测，频率回到七成五，两层又对上了。

不过，这个圈不是空转。土那一层，除了频率，还有别的查法：温度计、电压表、光功率计。它们各自直接去碰土，不靠频率。几样查法都说土没变，频率又稳，这才算两层都收敛了。

所以「概率是在同一片土上叠出来的」这句话，不是同义反复。它给出一个能做的检查：频率一晃，去找土的哪一处变了。找得到，说明这套读法在干活。

如果频率莫名其妙地晃，土的每一处都查不出变化，那就是一个要认真对待的信号。要么土里还有一处没被看见，要么这一章的读法要改。

◆ 九、一个完整的例子：放射性衰变的计数

一块放射性矿石，旁边一台盖革计数器。

每一声「咔」，是一个原子核衰变了。哪一个原子核，什么时候衰变，没人说得准，第 8 章和第 10 章都说过。

不过，林舟在实验课上带学生做过这个实验：数一分钟，记下计数；再数一分钟，再记下；数一百分钟。

一百个数字，有大有小，五十几，六十几，偶尔七十几。可它们围着一个平均数，大约六十，排成一个漂亮的钟形。物理学家管这叫泊松分布，它的形状，完全由那个平均数决定。〔核：大意〕

学生问林舟：「每一个原子核都是随机的，为什么排出来这么规矩？」

林舟当时的回答是：「大数定律。」

后来，他读了本书的初稿，换了一个回答：「每一个原子核衰变，都是一次只来一回的事。可是它们都在同一块石头里，同一片土上。土稳，许多次只来一回的事叠在一起，就叠出一个稳的形状。」

学生又问：「那如果把石头加热呢？」

林舟说：「对这种衰变，加热几乎不改变它的速率，土里管它的那一部分，在原子核深处，外面的温度够不着。可如果你换一块不同的矿石，土换了，形状就变了。」

◆ 十、概率在三块地上

第 16 章说过三块地。概率，在三块地上，各有一个样子。

在现实界，概率是频率：林小满一夜测到的几万个读数里，穿过偏振片的占了七成半。这是硬邦邦的计数，写在硬盘里。

在理念界，概率是一条定律：玻恩规则，$|\psi|^2$。它在课本里，在论文里，在物理学家的脑子里。它说的不是某一夜的计数，而是在这样一片土上，任何一夜都会叠出的那个形状。

在自我界，概率是一种期待：林小满在打开示波器之前，心里大概知道，一百个光子里，会有七十五个左右穿过。如果某一夜只穿过了五十个，她会皱眉，会怀疑哪里出了问题。

三块地上的概率，各自稳住，又要彼此对上。现实界的计数，对上理念界的定律；理念界的定律，对上自我界的期待。

第 3 章说的 QBism，把概率主要放在自我界：它是一个行动者对未来经验的期待。频率派把概率主要放在现实界。教科书把概率主要放在理念界。

本书说：三块地上都有，而且要对上。对上了，我们才说：玻恩规则「成立」。

◆ 十一、降水概率百分之七十

林舟家楼下住着何红，五十二岁，在县气象台做了二十多年预报。

有一年秋天，学校要开运动会，林舟拿着手机去问她：「明天降水概率百分之七十，到底下不下？」

何红笑了：「你一个物理老师，来问我这个。」

她说，百分之七十，她们的意思大致是：过去天气形势和明天很像的那些日子里，十天里大约有七天，县城下了雨。

林舟问：「那明天呢？」

「明天只有一个。它要么下，要么不下。」

「那你们这个百分之七十，对明天有什么用？」

何红想了想，说：「我们最怕的，不是那三成。是形势看着像，其实不一样。一股冷空气早到半天，一片云团偏了几十公里，明天就不是那七成里的一天了。我们天天盯的，是明天的这片天，和那本账里的天，还是不是同一片。」

林舟回家后，把这段话记在了本子上。

这正是本章的说法，从另一头讲了一遍。百分之七十，是许多个只来一回的日子，在相似的土上叠出来的账。明天，是一个只来一回的日子。账能借给明天用，前提是明天的土和账里的土是同一片。

预报员的功夫，一半在算账，一半在看土。

第二天上午，运动会开到一半，下起了小雨。林舟没有说「果然」。他知道，那不是百分之七十应验了，是明天这一次，在它自己的土上发生了。

◆ 十二、放回日子里

你一定听人说过：「这件事成功的概率只有一成。」

这句话，在一次性的事情上，说的是什么？

如果它是频率派的意思：一百个人做这件事，十个成功。那它说的是那一百个人，不是你。

如果它是倾向派的意思：你身上有一种「一成会成功」的倾向。那这种倾向，藏在你身上的哪里？

本书的说法是：一成，是在某一片土上，许多次一次性的事叠出来的形状。你这一次，是在你自己的土上，只来一回的发生。

你的土，和那一百个人的土，未必一样。如果不一样，那一成，对你未必是一成。

而且，你还可以改你的土。一件事的成败，不是一个藏在你身上的先在倾向；它是在你、事情、和那一刻的条件缠成的土上发生的。

明天能试的一件事：下一次有人告诉你一个概率，问一句：这是在什么样的土上，叠出来的？我的土，和它一样吗？哪一处，我能改？

带 走 的 话

每一次读数都是一次只来一回的发生；概率，是许多次一次性的发生在同一片土上叠出来、定了型的形状。宇宙不掷骰子，它一次一次地发生。

小　账

这一处，读数是谁的？ 0.75 不是这一个光子的；这一个光子，只来一回，要么穿过，要么没穿过。0.75 是许多次在同一片土上的账。

先在，还是发生？ 倾向派把概率放进光子身上，是先在；本书说，倾向在土里，每一次的结果在稳住时才发生。

想 一 想

1. 你听到过的哪一个「概率」，其实是在一片和你不同的土上叠出来的？
2. 你人生里有哪一件「只来一回」的事？那时候，你是把它当成一次掷骰子，还是当成一次发生？

◆

24

第 24 章

为什么偏偏是平方

◆ 一、你一定有过这样的时刻

林舟教初二的时候，有一节课讲勾股定理。

他在黑板上画了一个直角三角形，两条直角边，一条三，一条四。他问：斜边多长?

学生们拿尺子量，五。

他又画了一个，直角边五和十二，斜边量出来十三。

他说：「三的平方加四的平方，九加十六，二十五，是五的平方。五的平方加十二的平方，二十五加一百四十四，一百六十九，是十三的平方。不管你怎么画，只要是直角，两条边的平方加起来，总是斜边的平方。」

一个学生问：「为什么是平方？为什么不是两条边直接加起来？」

林舟说：「你走过去试试。从教室这个角，走到对面那个角，沿着墙走，要走三米加四米，七米；斜着走，只要五米。两条边直接加，是绕远路的长度，不是斜边的长度。」

学生又问：「那为什么偏偏是平方，不是三次方？」

林舟愣了一下。那天他没答上来。

许多年后，他在读玻恩规则的时候，想起了这个问题。

◆ 二、玻恩规则的平方，和勾股定理的平方

先说一件事：玻恩规则的平方，和勾股定理的平方，是同一个平方。

第 20 章说过，一个量子态，可以看成一个箭头，有方向，有长度。测量时，你选一组彼此垂直的方向，叫一组「基」，每一个方向对应一个可能的读数。把这个箭头，投到每一个方向上，得到它在每个方向上的那一段。

玻恩规则说：读数 k 的概率，是箭头在第 k 个方向上那一段的长度，再平方。

勾股定理说：一个箭头的长度的平方，等于它在每个彼此垂直的方向上那一段长度的平方之和。

两条放在一起：箭头的长度定为一，那么各个读数的概率加起来，正好是一。

平方，是唯一能让「分到各个读数上的份额」不多不少、正好加成一的办法。

如果用长度本身，不平方，三角形三四五：三加四是七，不是五。份额加起来，比整体多。

如果用三次方，二十七加六十四，是九十一，不是一百二十五。份额加起来，比整体少。

只有平方，九加十六，正好二十五。

◆ 三、而且，要对每一种分法都成立

你可能会说：这只是凑巧。我可以发明一种别的规则，在某一组方向上，份额也正好加成一。

是的，对某一组方向，可以。

可是第 11 章说过，叠加和你怎么问有关。同一个量子态，你可以用无数种不同的方式去问它：竖直方向，水平方向，斜 30 度，斜 45 度，任何一组彼此垂直的方向，都是一种问法。

每一种问法，都把那个箭头，分到一组不同的方向上去。

现在要求：不管你用哪一种问法去分，份额加起来，都正好是一。

这个要求，就很强了。对一个箭头来说，能让它在每一种垂直分法下、份额之和都不变的量，只有长度的平方。〔核：这是欧几里得空间与其复数推广中的标准结论〕

这就是勾股定理的那个「为什么」：在一个可以朝任何方向转的空间里，唯一不随你怎么转而变的总量，是平方之和。

◆ 四、换一种平方之外的规则，会怎样

物理学家阿伦森，在 2004 年前后写过一篇很有意思的文章，问了一个和林舟的学生一样的问题：量子力学为什么偏偏用平方？如果用别的次方，会怎样？〔核：大意〕

他发现了一件事。

如果概率用一次方，也就是用各个份额直接相加，那么能保持「总份额不变」的变换，只有一种。它是把份额在各个格子之间挪来挪去，像把豆子从一个碗倒进另一个碗。这就是经典的概率论，掷骰子、洗牌，都是这样。

如果概率用二次方，那么能保持「总份额不变」的变换，是一大家子：箭头可以朝任何方向连续地转。这就是量子力学。

如果概率用三次方、四次方，或者任何别的次方，那么能保持「总份额不变」的变换，就少得可怜了。只剩下把几个方向互相调换、再各自乘一个符号这么几种。箭头没法连续地转。〔核：大意〕

也就是说：在所有的次方里，只有一次方和二次方，能给出一个「能动起来」的世界。一次方给出经典世界，二次方给出量子世界。别的次方，世界几乎是僵死的。

◆ 五、本书怎样读这件事

阿伦森的结果，用本书的话来读，是这样的。

第 18 章和第 20 章说，稳住，要一层层地上行和回写。每一层，都要把细层上的东西，分到粗层的几个格子里去；再从粗层，摊回细层。

这一分一摊，要满足一个最起码的条件：不能凭空多出东西，也不能凭空丢掉东西。分出去多少，摊回来就有多少。否则，一层层叠上去，误差就会越积越大，什么也稳不住。

可是，每一层用哪一组格子去分，是不固定的。第 7 章说过，号位不是先摆好的椅子；第 11 章说过，叠加和你怎么问有关。测量链上的每一层，可以用不同的方式去分：光阴极那一层，按电子出没出来分；打拿极那一层，按电荷多少分；示波器那一层，按电压高低分。

要让每一层、每一种分法，都不多不少，唯一的办法，就是平方。

一次方也能不多不少，可它只允许把东西从一个格子挪到另一个格子，不允许转。在一次方的世界里，第一层的分法和第二层的分法，必须是同一种分法，或者只是格子换了个顺序。层与层之间，没有任何真正的转换。

而真实的测量链上，层与层之间，分法是在转的：从电子的位置，转到电荷的多少，转到电压的高低，转到一个数字。

所以，平方不是一个孤零零的约定。它是「层与层之间能转、又能不多不少」的唯一办法。

◆ 六、平方里的共轭，就是回写

第 20 章已经说过一半，这里把另一半补上。

量子态的那个箭头，它的分量一般是复数。复数的「长度的平方」，是这个复数乘以它的共轭。

为什么要乘共轭，而不是乘它自己?

因为乘它自己，结果可能是一个复数，甚至是负数，没法当份额。乘共轭，结果总是一个非负的实数。

用本书的话：上行，把细层上的东西收进粗格子，用的是一把尺子；回写，把粗格子摊回细层，用的是同一把尺子，翻过来。一来一回，乘出来的总是一个实实在在的、非负的量。

这就是第 20 章说的伽辽金配对：上行是回写的共轭转置。

所以平方的完整来历，有两半：

一半是勾股定理：在一个能朝任何方向转的空间里，唯一不变的总量，是平方之和。这是为什么是「二」次方。

另一半是伽辽金配对：上行和回写用同一把尺子，一正一反。这是为什么平方里有一个共轭。

◆ 七、这是不是先把答案放进去了

读到这里，学过一点线性代数的读者，会提一个尖锐的问题。

你一开头就说，量子态是一个箭头，有方向，有长度，可以朝任何方向转。可「长度」这个词本身，就是用平方定义的。箭头的长度，是各个分量平方之和再开方。你先把平方放进了空间，再从空间里把平方取出来，这不是兜了一个圈吗？

这个质疑，是对的。

量子力学选的那种空间，数学上叫希尔伯特空间，它的长度从一开始就是平方式的。本章的论证，确实是在这样一个空间里做的。如果有人问「为什么偏偏是这种空间」，本章没有回答。

不过，这个圈并不空。

阿伦森那一节，其实换了一个问法。他没有先假定空间，他问的是：如果份额用某个次方来算，那么能保住总份额不变、又能连续地转的变换，有多少？答案是，次方选成二，变换才多到能连续地转。〔核：大意〕也就是说，「能转」和「平方」是绑在一起的：要一个，就得要另一个。

本书接住的，正是这一条绑定。本书多说的一句是：「能转」不是空间先给的，是测量链上一层一层的分法本来就在变。光阴极、打拿极、示波器，各按各的格子分。分法一变，就要求转；要求转，又要求不多不少，就只剩平方。

所以本章的分量，可以说得更准一点。它没有从零推出平方。它把平方绑在了另一件事上：层与层之间的分法在转。如果你承认这一件，平方就跟着来了；如果有一天发现，层与层之间其实从来不转，只是挪，那本章这条绑定就松了。

第 20 章说过，这是诠释，不是推导。本节只是把这个诠释的接缝，指给你看。

◆ 八、这一章证了什么，没证什么

这一章的分量，要说准。

它没有从更基本的原理，推出玻恩规则。它用的每一条，勾股定理、阿伦森的分析、伽辽金配对，都是已有的数学。

它做的，是把这几条串起来，放进本书的图景里：稳住是一层层的上行与回写，层与层之间的分法会转，每一层都要不多不少。在这个图景里，平方不再是一个外加的公设，而是这个图景要求的东西。

可这个图景本身，是本书的诠释。如果你不接受「稳住是一层层的上行与回写」，那么这一章的论证，对你就只是一个漂亮的说法。

第 25 章会说，Gleason 定理从另一个方向，也到了平方；那个方向和本书的方向，是怎样分工的。

◆ 九、一个完整的例子：同一个光子，换三种问法

一个光子，偏振方向和竖直方向成 30 度。

第一种问法：竖直，还是水平?

竖直那一段，是 30 度的余弦，约 0.87；水平那一段，是 30 度的正弦，0.5。平方：0.75 和 0.25，加起来是一。

第二种问法：斜 45 度，还是斜 135 度？

光子和 45 度方向，差了 15 度；和 135 度方向，差了 105 度。15 度的余弦约 0.97，平方约 0.93；105 度的余弦约　负 0.26，平方约 0.07。加起来，还是一。

第三种问法：斜 30 度，还是斜 120 度？

光子正好和 30 度方向重合，那一段是一，平方是一；和 120 度方向垂直，那一段是零，平方是零。加起来，还是一。

三种问法，三组完全不同的份额：0.75 和 0.25，0.93 和 0.07，1 和 0。每一组，加起来都正好是一。

如果不用平方，用长度本身：第一种问法，0.87 加 0.5，是 1.37；第二种问法，0.97 加 0.26，是 1.23；第三种问法，1 加 0，是 1。三种问法，加出三个不同的数。份额和整体，对不上了。

只有平方，让每一种问法，都对得上。

◆ 十、为什么非得是复数

还有一个问题，常被跳过：量子态的那个箭头，为什么非得用复数？用实数，不行吗？

用实数，平方照样不多不少，勾股定理照样成立。复数的共轭，好像只是一个技术上的麻烦。

很多年里，物理学家也觉得：说不定实数就够了，复数只是方便。

2021 年前后，有理论物理学家设计了一种实验，可以把「只用实数的量子力学」和「用复数的量子力学」区分开来；随后，几个实验组在光子和超导电路上做了这个实验，结果站在复数一边。

这件事，用本书的话来读，很有意思。

如果只用实数，共轭就是它自己，「翻过来」和「正着」没有区别。上行和回写，用的是同一把尺子，连方向都不用翻。

用复数，上行和回写，虽然是同一把尺子，可一个正着、一个翻过来，确实不一样。

实验站在复数一边，说的是：在一些情形下，翻过来这一下，是真的有作用的。回写，不是上行的简单重复，它是上行的伴随。

本书不敢说，这个实验证明了本书的读法。本书只说：它和本书的读法，方向一致。

◆ 十一、当年那个学生，后来做了测绘

林舟没答上来的那个学生，叫周航。

十几年后，周航在县里的测绘队上班，二十九岁。有一年春节，他来给林舟拜年，说起自己的活。

「我们测一块地，坐标有好几套。」他说，「一套是国家的，横轴朝东，纵轴朝北。一套是工地自己的，横轴顺着厂房的墙，跟正东偏了二十几度。」

同一根电线杆，在两套坐标里，写出来的数完全不一样。往东多少米，往北多少米；顺着墙多少米，垂直于墙多少米。

林舟问：「那你们怎么知道没测错？」

周航说：「看两点之间的距离。不管用哪套坐标，算出来的距离得一样。两个数各自平方，加起来，开方。换哪套坐标，这个数都不能变。一变，就是哪里抄错了。」

他停了一下，又说：「林老师，您当年没答上来的那个问题，我后来在工地上自己想通了。为什么是平方？因为只有平方加起来，换了坐标还不变。」

林舟笑了。

这正是本章第三节说的那件事，只不过周航是在泥地里看懂的。坐标系的两根轴，就是一种分法。工地上的人和国家的图纸，用的是两种分法。分出来的数各不相同，距离却要对得上，不然图纸就和地对不上。

量子力学里，每一种问法，也是一套坐标。竖直和水平是一套，斜 45 度是一套。份额各不相同，加起来却都要是一。

周航那一句「一变，就是哪里抄错了」，说的还是第 21 章的收敛。几套坐标算出同一个距离，这块地的测量才算稳住。玻恩规则也是这样，几种问法的份额都加成一，那个量子态才算在每一层上都对得上。

那年春节，林舟在本子上补了一行字：平方，是换个角度看，整体不变的那个算法。

◆ 十二、放回日子里

回到那节勾股定理的课。

很多学生记住了公式，三的平方加四的平方等于五的平方，可不知道为什么是平方。

其实，平方说的是一件很朴素的事：一样东西，你可以从很多个角度去分它，从哪个角度分，分出的各份，加起来都得是那样东西本身。能做到这一点的，只有平方。

你分配一笔家用，也会遇到这种事。同样一个月的工资，你可以按「吃、住、行、杂」分，也可以按「必需、想要、储蓄」分。两种分法，分出来的数完全不同，可加起来，都得是那个月的工资。

明天能试的一件事：把你上个月的开销，按两种完全不同的方式各分一次。看看两种分法，各自让你看见了什么，又各自藏住了什么。不同的问法，分出不同的份额，可整体，是同一个。

带 走 的 话

平方有两半来历：勾股定理说，能朝任何方向转、又不多不少的，只有平方；伽辽金配对说，上行和回写用同一把尺子一正一反，所以平方里有共轭。

小　账

这一处，读数是谁的？ 30 度的光子，换三种问法，分出三组份额，每组都加成一；份额随问法而变，它们不是光子先在的属性。

先在，还是发生？ 把平方当公设，是把它当成一条先在的规矩；本书说，平方是层层稳住、又要层层转得动所要求的。

想 一 想

1. 你能不能想到一样东西，从不同角度分它，分出的各份不同，可加起来总是同一个整体?

2.「层与层之间能转、又能不多不少」，你所在的单位里，层与层之间的分法，是在转，还是只是把东西从一个格子挪到另一个格子?

◆

25

第 25 章

Gleason 定理证了什么，没证什么

◆ 一、你一定有过这样的时刻

林小满高考那年，数学最后一道大题，她做出了答案，可心里不踏实，因为她是蒙着方向一步步凑出来的。

考完，她和同学对答案。同学用的是另一种方法，完全不同的路，最后得出的数，和她一模一样。

她一下子踏实了。

第二天，数学老师讲这道题，说：「这道题，不管你走哪条路，只要每一步都对，答案只有一个。」

林小满后来想，这句话里其实有两层意思。

一层是：答案只有一个。这是唯一性。

另一层是：你得先走到答案那里去。这是怎么走。

唯一性，告诉你终点在哪；它不告诉你，从起点到终点的路是什么样的，也不告诉你，起点本身是怎么来的。

这一章要讲的 Gleason 定理，就是一个关于唯一性的定理。

◆ 二、Gleason 证了什么

1957 年，美国数学家格里森发表了一个定理。用大白话讲，是这样的。〔核：大意〕

假设你要给量子系统的每一个可能的读数，指派一个概率。你提出几条看起来很自然的要求：

第一，每一个读数，都对应着空间里的一个方向，概率是指派给这个方向的一个数，在零到一之间。

第二，一组彼此垂直的方向，对应一次测量的全部可能读数；这组方向上的概率，加起来正好是一。

第三，一个方向的概率，只看这个方向本身，不看它和哪些别的方向凑成一组。物理学家管这叫非情境性。

第四，空间至少是三维的。

格里森证明：满足这四条的指派方式，只有一种，就是玻恩规则。概率等于态在这个方向上那一段长度的平方，或者更一般地，写成一个密度矩阵的形式。

这个定理，在数学上很漂亮，也很硬。它让许多物理学家觉得：玻恩规则不是随便定的，它是在那几条自然的要求下，唯一可能的规则。

后来，有人把定理推广了：如果允许更一般的测量，二维的情形也成立。〔据研究文献〕

◆ 三、四条要求，一条一条过

本书要一条一条看这四条要求。

第一条，概率指派给方向。这一条，本书没有意见：读数对应一个方向，这是量子力学的标准语言。

第二条，一次测量的全部读数，概率加起来是一。这一条，本书完全同意，上一章用勾股定理讲过它。

第四条，空间至少三维。这是数学上的技术条件，本书不谈。

最要紧的，是第三条，非情境性：一个方向的概率，不看它和谁凑成一组。

许多人以为，本书要挑战的，就是这一条。毕竟第 2 章说过，Kochen–Specker 定理说明，属性的值是情境性的；那概率为什么不能也是情境性的？

本书的回答是：**不挑战这一条**。

理由有二。

一是，这一条有实验撑着。在纠缠的系统里，如果概率是情境性的，一边换一种测量方式，另一边的统计就会变，这就能用来超光速地传消息。第 12 章说过的无信号定理，和概率的非情境性，是紧紧连在一起的。迄今所有实验，都站在无信号这一边。〔据研究文献〕

二是，本书的读法，自己就能给出这一条，不需要挑战它。这一点，第五节再讲。

◆ 四、藏在四条后面的一条

那么，本书对 Gleason 定理，有什么话要说？

本书要指出的，是四条要求后面，还藏着一条没写出来的。

Gleason 定理的出发点，是一个函数：它给空间里的**每一个**方向，都指派一个概率。不是只给这一次测量用到的那几个方向，是给所有的方向，一个不落。而且，这个指派，是一次性给出的，在任何测量之前，整张表就已经在那里了。

这就像第 2 章说的那张「事先写好的卡片」，只不过卡片上写的，不是每个属性的值，而是每个方向的概率。

格里森问的是：这样一张整整齐齐、一次给齐的表，长什么样？他证明了：只能长成玻恩规则的样子。

可是，本书要问的是：这张表，是先在的吗?

◆ 五、事件格，是一层层长出来的

物理学家把所有可能的读数，连同它们之间「哪些能一起测、哪些不能」的关系，叫作事件格。Gleason 定理默认：事件格是先摆好的，概率一次性铺在上面。

本书说：事件格不是先摆好的，它是一层层长出来的。

第 7 章说，号位在每一次发生里显出来，不是先摆好的椅子。第 11 章说，一次测量用哪一组方向去分，是看你怎么碰它。第 18 章说，测量链上每一层的分法，都在转：光阴极按电子出没出来分，打拿极按电荷多少分，示波器按电压高低分。

一次具体的测量，长出来的，是一组具体的方向，一组具体的粗格子。下一次测量，换一种碰法，长出来的是另一组。所谓「所有方向的整张表」，是把无数次可能的测量，叠在一起想象出来的东西。它在理念界里是一个很好的工具；可它不是在任何一次测量之前，就已经铺在那里的。

那么，为什么每一次测量长出来的那几个方向，概率都恰好符合 Gleason 那张表?

因为每一次测量，都是在同一片土上、用同样的上行与回写，一层层稳出来的。第 20 章说过，读数 k 的概率，是 $\psi^\dagger\ P\ P^\dagger\ \psi$：一次上行，一次回写，和原来的自己比一比。

这个式子里，只有两样东西：态 ψ，和读数 k 对应的那个粗格子 P。它不看别的格子。

所以，非情境性，在本书的读法里，不是一条外加的要求，而是一来一回的结构自己带出来的：一个粗格子的那一来一回，只和它自己有关。

◆ 六、唯一性定理，和怎么走

现在可以说清，Gleason 定理和本书是怎样分工的了。

Gleason 定理是一个唯一性定理。它说：如果有一张整整齐齐、满足那几条要求的概率表，它只能是玻恩规则。

本书讲的，是怎么走到那里：每一次测量，怎样一层层上行、回写，稳出一个读数；许许多多次测量，怎样在同一片土上叠出一个比例。

回到林小满那道数学题。Gleason 定理像那位老师说的：「答案只有一个。」本书像林小满和同学各自走的那两条路：从起点出发，一步步走到答案。

两者不矛盾，而且彼此需要。唯一性告诉你，不管从哪条路走，终点都是玻恩规则；本书告诉你，那些路是什么样的，起点又是怎么来的。

本书用第四编的话，再说一遍：**Gleason 定理证的，是收敛之后的解只有一个；它没有证，事件格在收敛之前就已经排好了。**

◆ 七、Gleason 和 Kochen–Specker 的关系

还有一件事，值得在这里交代。

第 2 章讲过 Kochen–Specker 定理：不可能给所有属性，事先填好一张与情境无关的值表。

其实，Kochen–Specker 定理，可以从 Gleason 定理推出来。〔据研究文献〕道理大致是这样：如果有一张与情境无关的值表，每个方向的值不是零就是一，那它也是一种概率指派，只不过概率只取零和一。可是 Gleason 定理说，与情境无关的概率指派，只能是玻恩规则；而玻恩规则的值，是连续变化的，不可能只取零和一。矛盾。

这件事有一层意思，本书很看重：同一个定理，一方面说「概率只能是玻恩规则」，一方面说「值不能事先写好」。

用本书的话：概率可以与情境无关，因为它是一来一回的结构带出来的；值不能事先写好，因为它是在每一次测量里，一层层稳出来的。

非情境的是概率，情境的是读数。 前者是许多次叠出来的账，后者是每一次只来一回的发生。

◆ 八、一个完整的例子：一张不可能的表

想象你想给一个三维量子系统，事先填好一张表：空间里每一个方向，写一个零或者一，表示「沿这个方向去测，读数会是是还是否」。规矩是：任何三个彼此垂直的方向，恰好有一个写一，另外两个写零。

你开始填。填了几个方向，没问题。填到几十个，开始出现麻烦：某个方向，在一组垂直方向里需要写一，在另一组里却必须写零。

Kochen 和 Specker 证明：不管你怎么填，总会撞上这样的麻烦，填不完。他们最初用了一百多个方向来展示这个矛盾，后来有人把方向数减到了二三十个。〔据研究文献〕

这张表填不完，说明读数不能事先写好。

可是，如果你换一张表，每个方向不写零或一，而写一个零到一之间的数，那就能填完。比如写这个方向和某个固定方向夹角余弦的平方，处处都对得上。这张表，就是玻恩规则。

一张填不完，一张填得完。填不完的那张，是读数；填得完的那张，是概率。

◆ 九、二维里，表可以乱填

Gleason 定理的第四条要求，空间至少三维，本章前面说「是技术条件，不谈」。其实这一条，值得多看一眼。

在只有两维的空间里，比如单个光子的偏振，只问竖横、斜 45 度这样的问题，每一个方向，只和一个方向垂直。竖直只和水平凑成一组，斜 45 度只和斜 135 度凑成一组。各组之间，没有共用的方向。

于是，你可以每一组各填各的。竖直填 0.9，水平就填 0.1；斜 45 度填 0.3，斜 135 度就填 0.7。只要每一组加起来是一，各组之间互不牵扯，你几乎可以随便填。这样填出来的表，大多不是玻恩规则。

到了三维，事情就变了。一个方向，可以同时属于好几组彼此垂直的方向。它在这一组里填了一个数，在那一组里也必须是同一个数，这就是非情境性。组和组之间，通过共用的方向，被拴在了一起。拴得多了，能填的办法就只剩一种。

用本书的话读：唯一性，不是从哪一组方向自己长出来的，是从各组方向之间的共用关系里长出来的。

这正是一张网的样子。第 18 章说，多重网格靠层与层之间的连接，才把一个解定下来；单独一层，什么也定不住。Gleason 的表也是这样：单独一组，随你填；许多组互相共用、互相拴住，表才被定成了玻恩规则。

那么，在二维里，玻恩规则还靠什么定下来？本章第二节提过，允许更一般的测量，二维也能证出来。〔据研究文献〕更一般的测量，等于在两维里又加进了许多组互相牵扯的格子。拴住它的，还是关系。

所以，Gleason 定理里，最有分量的那一部分，恰恰不在「一次给齐」，而在「彼此共用」。本书反对的是前一半，接住的是后一半。概率之所以只有一种填法，是因为每一次测量长出来的那几个格子，都和别的测量长出来的格子，共着边。

◆ 十、数学为什么喜欢一次给齐

你可能会问：Gleason 是一位数学家，他为什么要从「一张一次给齐的表」出发？

因为这是数学最擅长、也最习惯的出发方式。

数学定义一个函数，通常是在一整个空间上定义它：对每一个点，都给一个值。数学证明一个定理，通常是对所有的情形，一次说完。这种「先把整个空间摆好，再在上面做事」的办法，在数学里极其有力，几千年来，帮人类证明了无数定理。

用本书的话：数学的这种习惯，是发现学的习惯。先有一个完整的空间，再去发现它上面有什么。

这不是数学的毛病。数学本来就是在理念界里，把许多次稳住的东西，收成一个完整的形状，让人可以一次看清全貌。Gleason 的表，就是许多次测量收成的那个形状。

本书只是提醒：这个完整的形状，是收成之后的样子。在每一次具体的测量里，长出来的只是其中的一小块。把收成之后的全貌，当成测量之前就铺好的东西，就把发生，当成了发现。

本系列第 344 号《意义数学的诞生》，讲过数学自己的这种「伞收成一个点」的样子，可以对着读。

◆ 十一、两个孩子，各走各的

林小满的表妹苏晴，那年读初三，十四岁。春天，她母亲带她来找林小满补数学。

第一次补课，林小满出了一道题：一个长方形，周长二十，面积最大是多少。

苏晴埋头算。她先列了一张表：长 1 宽 9，面积 9；长 2 宽 8，面积 16；长 3 宽 7，面积 21。一直列到长 5 宽 5，面积 25，再往下，面积又小了。她说：「25。」

林小满问：「你怎么知道没漏掉 4.5 和 5.5 之间的什么？」

苏晴愣住了。

林小满没急着讲公式。她让苏晴把表里的数，画在纸上，横轴是长，纵轴是面积。点连起来，是一条拱起来的弧，顶上在 5。苏晴看了一会儿，说：「它在 5 那里拐弯。两边都比它低。」

后来，林小满才把配方的办法写出来。面积写成一个式子，配成「25 减去一个平方」，平方最小是零，面积最大就是 25。

苏晴看着这一行式子，说：「这个好快。可我要是一上来就看这个，我不知道它在说什么。」

这一句话，正好落在本章的分工上。

配方那一行，像 Gleason 定理：一次说清，答案只有一个，不管长取多少，面积都超不过 25。苏晴那张表、那条弧，像本书讲的一层一层：先试几个，看出形状，再找到顶点。

没有那张表，配方是一句没有来历的话。没有配方，那张表永远担心漏了什么。两样东西，一样给安心，一样给来历。

那天走之前，苏晴在本子上写了一句：先列表，后配方。林小满看了，没有改。

如果你家里也有一个在做题的孩子，下一次他卡住，别急着把标准解法给他。让他先列几行，画个图，看出形状。然后再给他那一行漂亮的式子，他会知道那一行在说什么。

◆ 十二、放回日子里

回到那道数学题，和那句「答案只有一个」。

很多人只记住了唯一性：标准答案只有一个，对了就行。于是只背答案，不管路。

可是在人生里，很多事不是考试题，没有一个先摆好的标准答案。你要先走，路是走出来的，终点也是在走的过程里，一层层稳出来的。

唯一性定理，是走完之后，回头看时的一份安心：不管当初怎么走，只要每一步都对，终点就是这里。它不能替你走。

明天能试的一件事：找一件你一直在等「标准答案」的事，比如该选哪个专业、该不该换工作。别只问「答案是什么」，问一句：我现在能迈出的第一步是什么？走了这一步，下一层会长出什么？

带 走 的 话

Gleason 定理证的，是收敛之后的解只有一个；它没有证，事件格在收敛之前就已排好。非情境的是概率，情境的是读数。

小　账

这一处，读数是谁的？读数在每一次测量里稳出来，是情境的；概率是许多次叠出来的账，是非情境的。

先在，还是发生？Gleason 定理默认一张一次给齐的概率表；本书说，那张表是许多次测量在理念界里叠出的样子。

想 一 想

1. 你有没有一次，靠「答案只有一个」获得了安心，却其实没弄清自己是怎么走到答案的？

2. 「非情境的是概率，情境的是读数」，你在生活里，能不能找到一件事，它的统计规律很稳，可每一次的结果都要看那一刻的情境？

◆

26

第 26 章

三条缝：平方经得起多严的检验

◆ 一、你一定有过这样的时刻

林舟家里三个人：他，妻子，女儿林小满。

有一年暑假，林舟想了一个办法，弄清家里的电费都花在哪了。

他先一个人在家住了一周，看电表走了多少。然后，妻子和他两个人住一周，再看。然后，三个人都在，住一周，再看。中间还试了妻子一个人、女儿一个人、他和女儿两个人、妻子和女儿两个人，每种情形各住一周。

一个暑假下来，他得出一个结论：两个人在家的电费，大约等于两个人各自单独在家的电费之和，再加上一点「两个人在一起」多出来的部分。比如晚上一起看电视，空调开得久一点。

三个人在家呢？他本来以为，三个人在一起，会有一种「三个人才有」的额外用电。可是算下来，三个人的电费，正好等于各种「两个人在一起」的那些多出来的部分加起来，再加上各自单独的部分。没有多出一份「只有三个人凑齐才有」的东西。

妻子笑他：「你一个物理老师，算个电费也搞成实验。」

林舟说：「这个实验，物理学家真做过。只不过他们算的不是电费，是光子。」

◆ 二、干涉是「两两之间」的事

第 11 章和第 13 章讲过干涉：两条路，在一锅粥里碰撞，加强或抵消，在屏幕上画出条纹。

有一个问题，很少有人问：三条路一起碰撞，会怎样？

如果三条路的干涉，只是三对「两条路之间的干涉」加起来，那么，三条路一起，就没有「只有三条路凑齐才有」的额外干涉。

如果有，那就说明，干涉不只是两两之间的事。

1994 年，美国物理学家索金把这个问题，写成了一个很清楚的式子。〔核：大意〕

用三条缝，甲、乙、丙。测七种情形下屏幕上的光强：只开甲，只开乙，只开丙；开甲乙，开甲丙，开乙丙；三条全开。再测一种：三条全关，作为本底。

然后，按一个规定的加减法，把这八个数凑在一起：三条全开的，减去三种「两条开」的，加上三种「一条开」的，再减去全关的本底。

如果玻恩规则成立，概率是振幅的平方，那么这个凑出来的数，一定严格等于零。

为什么？因为平方，只会产生「两两之间」的交叉项。甲加乙加丙，整体平方，展开来，只有甲乙、甲丙、乙丙这样两两的交叉，没有甲乙丙三个一起的交叉。

如果概率不是平方，而是三次方，那么展开来，就会有甲乙丙三个一起的交叉项，凑出来的数就不是零。

所以，这个数，叫索金参数，是检验「是不是严格的平方」的一把尺子。

◆ 三、实验测出了什么

2010 年，加拿大和奥地利的一个实验组，做了这个实验。〔核：大意，实验发表于《科学》杂志〕

他们用单个光子，穿过一块刻了三条缝的板子。七种开法，一种全关，一种一种地测。

结果：索金参数，和零之间的差，小于两条缝干涉强度的百分之一左右。

后来，别的实验组用别的办法，把这个上限压得更低。有的用五条路径的干涉仪，有的用核磁共振，最紧的上限，已经压到约十万分之三。

迄今为止，没有一个实验，测出确凿不为零的索金参数。

玻恩规则的平方，在这一把尺子下，站住了。

◆ 四、一个小插曲：弯弯绕的路

这件事里，有一个很有意思的小插曲，值得讲一讲，因为它说明了物理学家有多仔细。

2014 年前后，有理论物理学家指出：就算玻恩规则严格成立，在三缝实验里，索金参数也可能不严格为零。〔据研究文献〕

为什么？因为光子不一定只走「从一条缝直直穿过去」那三条路。它还可能从甲缝钻出去，绕回来，再从乙缝钻过去，最后到屏幕。这种弯弯绕的路，在三条缝全开时存在，在只开一条或两条时，有一些就不存在了。

这样一来，按那个加减法凑出来的数，就会多出一点点，不是因为平方错了，而是因为「只开两条缝」时的路，并不是「全开」时的路的一部分。

后来，实验组在特意设计的装置里，测到了这种弯弯绕的路带来的效应，和理论对上。

这件事，用本书的话来读，很有意思：「三条缝全开」时一锅粥里有哪些路，和「只开两条」时一锅粥里有哪些路，不是简单的加减关系。开了第三条缝，长出来的不只是一条新路，还有一些原来没有的、绕来绕去的路。

这正是第 7 章说的：号位，路，都不是先摆好的，要看这一次怎么碰。

把这些弯弯绕的路算进去之后，平方依然严格成立。

◆ 五、本书为什么在乎这个实验

讲到这里，你可能会问：这是物理学家检验玻恩规则的实验，和本书有什么关系？

关系很大。这是本书押在实验上的第一注。

第 20 章说，概率是 $\psi^\dagger P P^\dagger \psi$，是一次上行、一次回写的一来一回。第 24 章说，平方，是每一层上行与回写的配对。

本书的读法里，稳住是一层一层的。那么问题来了：会不会在某一层，稳住需要的不是「两两配对」，而是「三个一组」？比如，某一层上，一个差异要稳住，需要三个方向的东西同时对上，而不是一来一回？

如果有这样的层，那一层上，就会出现三个一组的交叉项，索金参数就不会是零。

本书的判断是：**没有这样的层**。　每一层的稳住，都是上行和回写的两两配对；第 20 章说过，许多层叠起来，只要每一层都这样配对，总的还是平方。所以，本书预言：索金参数，在任何实验条件下，都严格为零，扣掉弯弯绕的路之后。

这条预言，和现有的实验对得上。

可它是一条能被推翻的预言。如果有一天，在某种条件下，有人测到了一个扣掉弯弯绕的路之后、仍然确凿不为零的索金参数，比如在第 9 章说的正在成形

那一段，在很大的分子或者很特殊的装置里，那么本书「每一层都是两两配对」的读法，就要撤回。

第 42 章会把这一条，正式写进可错条款的登记表。

◆ 六、这条预言的分量

本书要老实说：这条预言，分量有多重。

它不是一条「本书独有、别家没有」的预言。标准的量子力学，也预言索金参数为零。所以，就算实验一直测出零，也不能说明本书的读法比标准的量子力学更对，只能说明本书的读法和标准的量子力学一样，经得起这把尺子。

它的分量在反面：如果测出不为零，标准的量子力学要改，本书的读法也要改，而且本书会知道该改哪里：某一层的稳住，不是两两配对。

所以，这条预言是本书的「死法」之一，不是本书的「独门武器」。导论说过：一套说法，说不出自己怎样会错，就不值得信。这一章，就是说出一种怎样会错。

◆ 七、更高阶的干涉

索金还把这个问题往上推了一层：四条缝，五条缝，会不会有「四个一组」「五个一组」的交叉项?

他证明了：如果三个一组的交叉项是零，那么四个一组、五个一组的，也都是零。〔核：大意〕反过来，如果概率是三次方，会有三个一组的，但没有四个一组的；如果是四次方，会有四个一组的。

这形成了一个阶梯：经典的概率，连两两的交叉都没有，它在第一阶；量子力学，有两两的交叉，没有三个一组的，它在第二阶；如果有更怪的理论，它会在更高的阶。

用本书的话：经典世界，是一次方，层与层之间只能挪，不能转，所以连两两的交叉都没有；量子世界，是二次方，层与层之间能转，每一层一来一回，所以有两两的交叉、没有三个一组的。

干涉的阶，就是稳住时每一层配对的方式。

◆ 八、经典的波，也只有两两

有一件事，讲三缝实验的书常常略过：索金参数为零，并不是量子力学独有的。

一盆水，水面上同时放下三根手指，激起三圈水波。水波在某一处叠在一起，那一处晃得多厉害，看的是三圈波的高度加起来之后，再平方。平方一展开，也只有两两之间的交叉，没有三个一组的。

光作为经典的电磁波，也是这样。屏幕上的亮度，是三束波的电场加起来，再平方。三缝的加减法凑出来，照样是零。

那么，量子力学在这里多了什么？

多的是一件事：一个一个来的光子，也守这条规矩。

经典的波，平方算的是能量，一大片光一起照上去，亮度就是它。量子力学里，光子是一个一个打到屏幕上的，每一个只留下一个点。平方算的，变成了这一个光子落在这里的概率。千万个点叠起来，才叠出那幅亮度图。

所以，三缝实验用单个光子做，检验的是：一次一次只来一回的读数，叠出来的账，是不是也只有两两之间的交叉。

本书这样读这件事。经典的波，是一片大土上的一次整体的稳住，它的平方，是能量那一层上的一来一回。量子的读数，是许多次各自只来一回的稳住，

每一次都在层层上行和回写。两件事，在最后那幅图上长得一样，是因为每一层的配对方式一样：都是一正一反，两两成对。

这也说明，平方不是量子世界的一个怪癖。凡是「先加起来、再一来一回」的地方，都只会有两两。量子力学的特别之处，不在平方本身，在于它把平方从一片波的能量，搬到了一次读数的概率上。

第 23 章说，概率是许多次一次性的发生叠出来的账。三缝实验把这句话变成了一个能测的数：叠出来的账，和一大片经典波的亮度，在两两这件事上，分毫不差。

◆ 九、一个完整的例子：设想一次三缝实验的数据

为了让你看清那个加减法，设想一组整齐的数据。〔以下数字为示意〕

只开甲：屏幕上某一点，计数 100。只开乙：100。只开丙：100。

开甲乙：计数 300。比 100 加 100 多出 100，这多出的 100，是甲乙之间的干涉。

开甲丙：250。多出 50，是甲丙之间的干涉。

开乙丙：150。少了 50，是乙丙之间的干涉，在这一点上是抵消的。

三条全开：按玻恩规则，应该是三条各自的计数加起来，300，再加上三对干涉，100 加 50 减 50，共 400。

如果测出来是 400，索金参数是零：三条全开，没有多出任何「三个一组」的东西。

如果测出来是 410，扣掉本底和弯弯绕的路之后还是 410，那就多出了 10，这 10 就是三个一组的干涉。

真实的实验，数据要乱得多，误差要大得多，要一点一点扣掉各种干扰。可道理就是这个道理。迄今为止，扣到最后，都是零。

◆ 十、如果真测出了三个一组

不妨设想一下：如果有一天，真测出了确凿的「三个一组」的干涉，会怎样？

物理学家会非常兴奋。因为这意味着，量子力学不是最终的理论，自然界里还有一种更怪的东西。理论物理学家早就准备了一整套语言，叫广义概率论，专门描述这种「高阶干涉」的理论可能长什么样。〔据研究文献〕

本书会怎样？

本书会去找：是哪一层的稳住，需要三个一组？

按本书的图景，最可疑的地方，是正在成形那一段，是土缠得最复杂、最接近临界的地方。第 9 章说过，正在成形是纠缠共振；也许在某种共振里，一个差异要稳住，不是一来一回就够，而要三方同时对上。

本书目前没有任何理由相信这样的层存在。可如果它被测出来，本书知道该往哪里找。

一套说法，不只要说出它怎样会错，还要说出错了之后该改哪里。这一章，两件事都说了。

◆ 十一、调音师的毛毡条

林舟家那台旧钢琴，每隔两年，要请县城的调音师钱伯来一趟。钱伯六十出头，调了四十年琴。

有一年，林小满放假在家，蹲在边上看他调。

钢琴中音区的一个键，后面不是一根弦，是三根。三根弦调成同一个音，听起来才饱满。钱伯手里有一根长长的毛毡条，他先把毛毡塞进弦之间，压住其中两根，只让一根响，把它调准。然后抽出一截，放出第二根，两根一起响。

两根弦只差一点点的时候，会听见声音一强一弱地起伏，嗡，嗡，嗡。钱伯说这叫拍。他慢慢拧弦轴，拍越来越慢，最后听不见了，两根就对上了。

最后放出第三根，再和前两根对。

林小满问：「为什么不三根一起调？」

钱伯说：「三根一起，耳朵乱。两根两根对，拍听得清。两两对上了，三根自然就齐了。」

林小满后来想，这句「两两对上了，三根自然就齐了」，差不多就是索金那条式子的白话。三根弦一起响时，起伏的拍，全是两两之间的拍，没有一种只有三根凑齐才有的拍。所以钱伯能一对一对地调，不会漏掉什么。

如果世界不是这样，如果三根弦一起响时，会冒出一种两两之间都没有的起伏，那调音师就没法一对一对地调了，他得同时听三根，耳朵根本分不清。

钱伯调了四十年，从来没碰到过这种事。物理学家用三条缝找了几十年，也没碰到过。

调完琴，钱伯按了一个和弦，说：「好了，稳了。」

你身边要是有一件要几方都对齐的事，不妨学一学钱伯：先两两对。两两都对上了，再看整体还差不差。多数时候，你会发现，已经齐了。

◆ 十二、放回日子里

回到林舟家的电费。

三个人在家，没有多出一份「只有三个人凑齐才有」的用电。这说明，在用电这件事上，家里的「交叉」，都是两两之间的。

可是，家里有些别的事，也许不是这样。

比如，一家三口一起吃年夜饭的那种感觉，是不是等于「爸爸和妈妈在一起的感觉」加「爸爸和女儿在一起的感觉」加「妈妈和女儿在一起的感觉」？很多人会说，不止，三个人凑齐，有一种多出来的东西。

量子世界里，迄今没有发现「三个一组」才有的东西。人的世界里，也许有，也许那只是我们没把两两之间的东西算清楚。

明天能试的一件事：想一想，你身边哪一件事，是「三个人凑齐才有」的？它真的是多出来的，还是两两之间的东西加起来？这个问题，物理学家用三条缝问了几十年；你可以用一顿饭问一问。

带走的话

三缝干涉检验平方：平方只有两两的交叉，没有三个一组的。本书押一注：每一层的稳住都是两两配对，所以三个一组的干涉永远为零；测出不为零，本书就撤回这一条。

小　账

这一处，读数是谁的？三条缝全开时的读数，等于各条单独的、加上两两之间的，没有多出一份只属于三条一起的。

先在，还是发生？弯弯绕的路说明，开不开第三条缝，长出来的路不同；路不是先摆好的，要看这一次怎么碰。

想一想

1. 你生活里，有没有一件「三个人凑齐才有」的事？它真的多出来了吗？
2. 本书给自己写了一条死法。你自己相信的某个看法，你能说出它在什么情况下会错吗？

◆

27

第 27 章

各家怎样推玻恩规则：一本对账簿

◆ 一、你一定有过这样的时刻

林舟的学校，每年年底要对一次账。

财务室的老陈，拿着一本总账；后勤处、教务处、每个年级组，各自拿着一本分账。大家坐在一间会议室里，一笔一笔地对。

对账的时候，有一件事林舟印象很深：每个部门的分账，都对得上总账的数，可每个部门记账的办法不一样。后勤处按物品记，教务处按项目记，年级组按班级记。同一笔钱，在后勤处的账上是「三十把椅子」，在教务处的账上是「期中考场布置」，在年级组的账上是「初二三班」。

数都对得上。看法不一样。

老陈说：「对账，不是要大家改成一种记法。是要看看，每一种记法，各自记清楚了什么，又各自漏了什么。」

本章就是一次对账。量子力学一百年里，有好几家人，各自用自己的办法，推出了玻恩规则。数都对得上：都是平方。办法不一样。本章要看看，每一家各自记清楚了什么，又各自漏了什么；本书的办法，又多记了一笔什么。

◆ 二、第一本账：公设派

最早的一本账，是玻恩自己的，也是大多数教科书的：玻恩规则是一条公设，不推导，直接写下来，用就是了。

这本账的好处，是干净。它不假装知道自己不知道的东西。一百年来，量子力学靠这条公设，算对了一切。

它漏的，是「为什么」。它把平方，当成一条先摆在那里的规矩。

◆ 三、第二本账：Gleason 的唯一性

第 25 章细讲过。Gleason 说：如果有一张给所有方向一次指派好概率的表，满足几条自然的要求，那它只能是平方。

这本账记清楚的，是唯一性：在那几条要求下，没有别的选择。

它漏的，是那张表从哪来。本书在第 25 章说，它默认事件格是先在的。

◆ 四、第三本账：楚雷克的「对称」

第 22 章讲过楚雷克的量子达尔文主义。他还有一个推玻恩规则的办法，叫环境辅助的不变性，简称 envariance。〔核：大意〕

大意是这样的：一个系统和环境纠缠在一起。如果系统的两个状态，振幅一样大，那么你在系统这边把两个状态对调一下，再在环境那边也对调一下，整体就复原了。因为环境那边的操作，碰不到系统，所以系统这边的两个状态，在任何意义上都是平等的，它们的概率必须一样。

从「振幅一样大，概率就一样大」出发，再把振幅不一样大的情形，拆成许多个振幅一样大的小份，就推出了平方。

这本账记清楚的，是环境，是纠缠，是第 12 章说的土。楚雷克的推导，靠的正是系统和环境缠在一起的那种对称。

它漏的，是一些推导里默认的前提：比如概率只取决于系统本身的状态，比如概率可以按小份相加。有学者指出，这些前提里，已经藏着一点玻恩规则的影子。〔据研究文献〕

本书和这本账很近。本书也说，读数的稳住，离不开土。本书多记的一笔，是层：楚雷克的推导，是在一层上做的对称；本书说，稳住是许多层的上行和回写，每一层都要配对。

◆ 五、第四本账：多世界里的理性下注

第 3 章说过，多世界诠释有一个大难题：所有读数都成真了，概率是什么意思?

1999 年，英国物理学家多伊奇，后来又有华莱士，给了一个回答。〔核：大意〕

他们说：设想你是一个理性的人，生活在一个会分岔的宇宙里，要为将来的分支下注。你会怎样分配你在各个分支上的关心？他们用决策理论证明：一个理性的人，必须按振幅的平方，来分配他的关心。概率，就是理性下注的权重。

这本账记清楚的，是主体，是第 7 章说的三号位。概率，在这里成了一个理性的「我」，面对分岔的世界时，不得不采用的权衡方式。

它漏的，是那个「理性的我」从哪来。决策理论的那几条公理，都默认了一个先在的、理性的主体。批评者也指出，有些公理在多世界的背景下，并不像看起来那么自然。〔据研究文献〕

本书在第 16 章说，主体是在读数被接过去时，才冒到前头的。概率的稳住，主要发生在现实界，不需要等一个理性的我来下注。

◆ 六、第五本账：从公理重建

二十一世纪初，有一批物理学家走了另一条路。他们不从量子力学出发，而是从几条关于「信息怎样处理」的基本要求出发，看能不能把整套量子力学，连同玻恩规则，一起重建出来。〔据研究文献〕

哈迪在 2001 年做过一个版本。后来，马塞内斯和穆勒，奇里贝拉、达里亚诺和佩里诺蒂，各自做出了更完整的版本。

他们的要求，大致包括：两个系统合在一起，可以用各自的局部测量拼出整体的状态；任何两个纯态之间，都可以通过一个连续的、可逆的变换，从一个转到另一个；等等。

在这些要求下，他们证明：唯一满足要求的理论，就是量子力学，概率必须是平方。

这本账记清楚的，是「连续可逆的转换」。第 24 章讲阿伦森的结果时说过：只有平方，能让箭头连续地转、又不多不少。公理重建派，把这一点放到了最基础的位置。

它漏的，是那些公理为什么成立。它们被当作关于信息的基本事实，摆在那里。

本书和这本账也很近。本书在第 24 章说，平方是「层与层之间能转、又能不多不少」的唯一办法。本书多记的一笔，是那个「转」从哪来：层与层之间的分法会转，是因为每一层的号位、每一层的碰法，都是在这一次发生里显出来的，不是先摆好的。

◆ 七、第六本账：交易诠释的握手

第 3 章讲过，克拉默的交易诠释：提议波 ψ 往前走，确认波 ψ* 往回走，相乘得平方。

这本账记清楚的，是一来一回。它是所有账里，和本书的第 20 章最像的一本。

它漏的，有两笔。一是层：它只有一次握手，一来一回就完了。二是往回走的那列波的身份：它要接受一列从未来往过去传的波，这让很多物理学家不舒服。

本书的回写，不需要往过去传的波。它是测量链上，粗层的结果回到细层；时间上，回写发生在上行之后，不是之前。

◆ 八、一张对账表

把六本账，加上本书这一本，排在一张表里。

账本	平方从哪来	它靠的是	它默认先在的	和本书
公设派	规定	经验	规则本身	本书给规则一个来历
Gleason	唯一性	一张全表	事件格	本书说事件格是层层长出来的
楚雷克	纠缠的对称	土（环境）	概率按小份相加	本书加上层
多伊奇—华莱士	理性下注	主体（三号位）	理性的我	本书说概率稳在现实界，不等主体
公理重建	连续可逆	路能转	信息公理	本书说转来自号位的发生
交易诠释	一来一回	往返的波	逆时的确认波	本书用多层回写，不用逆时波
本书	每层上行与回写配对	层级稳住	无先在的事件格与承载者	诠释，非推导

这张表最后一行，本书写的是「诠释，非推导」。这不是客气话。本书没有从更少的前提里推出玻恩规则，它做的是把几家已有的推导，放进一个图景里，看清它们各自抓住了哪一维。

◆ 九、各家抓住的，正好是三维

看这张表，你会发现一件事。

楚雷克抓住的，是土，是纠缠，是 E。

多伊奇和华莱士抓住的，是主体，是那个下注的我，是三号位。

公理重建派抓住的，是转，是路能连续地走，是 D。

交易诠释抓住的，是一来一回，是回写。

Gleason 抓住的，是收敛之后的唯一性，是稳定显露那一端的形状，是 S。

各家推导，各自抓住了稳住的一维；本书要做的，是把这几维放回同一场发生里。

这和第 3 章那张诠释表，是同一种样子：每一家守一个号位，或者守一个维度。它们都没错，它们都只是一部分。

◆ 十、本书这一本账，漏了什么

老陈对账，有一条规矩：每个部门说完自己记清楚了什么，还得说自己漏了什么。本书给六本账都写了「漏的」，轮到自己，也不能免。

本书这一本，至少漏了三笔。

第一笔，是配对本身。第 20 章说，上行取回写的共轭转置，这叫伽辽金配对。在多重网格里，这样配，是因为它在某种意义上最好。可自然界为什么要按这种方式配？本书只说，它和量子力学要求的「保持长度」一致。为什么要保持长度，本书没有往下挖。这一笔，本书是从量子力学那里借来的，借了，就要记在账上。

第二笔，是层的样子。本书说，稳住是许多层的上行和回写。光电倍增管的打拿极，读出链的放大器，都能一层一层指出来。可是在一次具体的测量里，层与层的边界画在哪里，往往没有一条干净的线。本书的读法，在层分得清的地方很好用；在层糊成一片的地方，它还说得不够细。

第三笔，是复数。第 24 章说，复数让「翻过来」有了实际的作用。可为什么世界用的是复数，而不是别的更大的数系，本书没有答案。公理重建派在这一点上，走得比本书远。〔据研究文献〕

这三笔漏账，不是客气话，是本书往后要还的债。

还有一层，值得说清。本书在表的最后一行写「无先在的事件格与承载者」，意思是本书不默认那几样东西先在。可它默认了另一些东西：配对的方式，保持长度，复数。这几样，本书是当作已经站住的物理事实来用的。

第 21 章说过，事实是收敛之后的读数。本书借用的这几样，在物理学里都已经收敛得很好，拿来用，不算偷懒。只是要记着：它们是借的，不是本书自己长出来的。

一本账，敢把借款写明，才算对得清。

◆ 十一、这么多本账，为什么对得上

最后，值得停下来想一想：六本账，起点不同，办法不同，靠的东西不同，为什么最后都得出平方？

一种回答是：因为平方是真的。它是自然界的事实，从哪条路走过去，都会碰到它。

本书同意这个回答，只补一句：「真的」，在本书里，意思是「收敛了的」。

第 21 章说，事实是各层收敛之后的读数。玻恩规则在理念界里，也是这样一个事实：许多条推导的路，从不同的起点出发，一层层往上推，推到最后，对上了同一个形状。每多一条路对上，这个事实就稳一分。

所以，六本账对得上，本身就是一次收敛。它不是证明了某一本账是对的，而是证明了：在理念界里，平方已经站在了一条很长的平台上，从哪里去取，取到的都是它。

第 22 章说，客观是冗余回写出来的。玻恩规则的「客观」，也是。

◆ 十二、银行流水那一本

那年年底，学校的账对完了，各部门的分账和老陈的总账，一笔一笔都对上了。

过了一个月，县教育局派了审计的人来。审计员姓梁，三十多岁，戴一副黑框眼镜。

她没有看各部门的分账，也没有先看老陈的总账。她开口要的第一样东西，是银行流水。

老陈有点不服气：「我们内部都对过了，一分不差。」

梁审计说：「内部对得上，说明大家记账的口径一致。银行流水是钱真正走过的路，它不听任何一个部门的。你们的账，最后得跟它对上。」

那天下午，她把总账和银行流水并排摊开，对了三个小时。对上了。她在审计单上签了字。

林舟听老陈讲这件事，想起了本章。

六本推玻恩规则的账，再加本书这一本，都是在理念界里记的。它们彼此对得上，说明大家在「平方」这件事上口径一致。第 22 章说，一份消息被许多份独立的副本记着，才站上平台。这七本账，起点各不相同，算得上是彼此独立的副本。

可还有一本账，它们都得对上：实验。

几十年来，单光子的偏振计数，原子的能级跃迁，第 26 章的三缝干涉，一夜一夜在实验室里记下的读数，就是物理学的银行流水。它不听任何一家诠释的。哪一家推得再漂亮，和它对不上，就得改。

所以，各家推导之间对上，是一层收敛；各家推导和实验对上，是更深的一层。本章前面说，平方在理念界站上了一条长平台。这条平台之所以站得住，是因为它底下，还接着现实界那一本流水。

梁审计走的时候，跟老陈说了一句：「内账对得再齐，也是你们自己的话。流水对上了，才算数。」

本书愿意把这句话，记在自己这一本账的扉页上。

◆ 十三、放回日子里

回到年底的对账。

老陈说：对账，不是要大家改成一种记法，是要看看每一种记法，各自记清楚了什么，又各自漏了什么。

很多单位的对账，变成了「谁的账是对的」。后勤处说自己的对，教务处说自己的对，争来争去，最后总账上的那个数，谁也说不清它到底是怎么来的。

本书在这一章里，学的是老陈的办法。

明天能试的一件事：下一次你和别人对一件事的看法，先别争谁对。先各自说一句：我这一本账，记清楚的是什么；我这一本账，可能漏了什么。说完再看，两本账放在一起，是不是比任何一本都完整。

带 走 的 话

各家推玻恩规则，各自抓住了稳住的一维：楚雷克抓住土，多伊奇—华莱士抓住主体，公理派抓住路能转，交易诠释抓住一来一回，Gleason 抓住收敛的唯一性。本书把这几维放回同一场发生里。

小　账

这一处，读数是谁的？在各本账里，概率分别被放在环境、下注的人、信息公理、往返的波、一张全表上；本书说，它在层层稳住的那一场发生里。

先在，还是发生？每一本账，都默认了一样先在的东西；本书这一本，想做到一样都不默认，所以只敢说它是诠释。

想 一 想

1. 你和别人争得最凶的一次，你们是不是各自记清楚了一维，又各自漏了别的维？

2. 本书说自己是「诠释，非推导」。你觉得，一本书这样说自己，是削弱了它，还是让它更可信？

◆

第 五 编 · 总判断

每一次读数，是一次只来一回的发生；概率，是许多次一次性发生在同一片土上叠出来的账。平方有两半来历：勾股定理说只有平方能转又不多不少，伽辽金配对说上行与回写一正一反。Gleason 证的是收敛之后的唯一性；三缝实验检验每一层都是两两配对；各家推导各抓一维，本书把它们放回一场发生。

第六编，带着这副底盘和这把钥匙，去拆量子力学的十二道难题，从薛定谔的猫开始。



第　六　编

量子力学的难题，逐个解

导　语

这一编十二章，是全书最长的一编。前五编搭好了底盘、磨好了钥匙；这一编拿着它们，去开量子力学一百年里最有名的十二把锁。

每一章，走同一个路线：先把难题原样摆出来；再看各家怎么卡住；然后用三个号位和三种状态，诊断它卡在哪；接着用层层稳住的读法，给出一个解；最后写明，这个解在什么情况下要撤回。

第 28 章是薛定谔的猫。第 29 章是今天实验室里真做出来的「猫」。第 30 章是维格纳的朋友和它的现代版本。第 31 章是爱因斯坦说的「鬼魅般的超距作用」。第 32 章是波粒二象性。第 33 章是延迟选择和量子擦除。第 34 章是不确定性原理。第 35 章是一直看着的那口锅。第 36 章是没碰到也能知道的炸弹。第 37 章是隧穿。第 38 章是偏好基问题。第 39 章是多世界。

一句话：这十二道难题，大多卡在同一处：把还在正在成形的东西，当成了已经定型的；或者把已经定型的东西，当成了还在一锅粥里的。

28

第 28 章

薛定谔的猫：箱子隔开的是谁

◆ 一、你一定有过这样的时刻

周一早上，林舟抱着一个快递纸箱进了教室。

纸箱上贴着胶带，他放在讲台上，问全班：「箱子里有一只猫。猜猜，它现在是活的，还是死的？」

教室里一阵笑。有人说：「活的，不然你不会抱进来。」有人说：「老师，这是薛定谔的猫吧，又死又活。」

林舟说：「好。说『又死又活』的，举手。」

半个班举了手。

林舟把箱子打开，里面是一只毛绒玩具猫。全班又笑。

他说：「今天这节课，不讲课本。讲这只猫。我答应过一个人，要把它讲到你们能听懂。」

导论里那个「一个人」，是他的女儿。

◆ 二、难题原样

1935 年，薛定谔写了一篇长文，讨论量子力学当时的处境。文中有一段，后来成了量子力学最有名的一段话。〔核：大意〕

他设想：一只猫，被关在一个钢做的箱子里。箱子里还有一套装置：一小块放射性物质，量极少，少到一个小时之内，也许有一个原子衰变，也许一个也没有，两种可能各占一半。旁边是一个盖革计数器。如果有原子衰变，计数器就会响，响声带动一个小锤，砸碎一个装着剧毒的玻璃瓶，猫就会死。

一个小时后，按量子力学的算法，原子处在「衰变」和「未衰变」的叠加里。计数器跟着处在「响了」和「没响」的叠加里。锤子、毒瓶，都跟着叠加。猫，也就处在「死」和「活」的叠加里。

直到有人打开箱子看一眼，叠加才塌缩成一个结果：要么死猫，要么活猫。

薛定谔写这一段，本意是讽刺：你们看，把量子力学的算法照搬到猫身上，结论多荒唐。一只又死又活的猫，谁见过？

可是，九十年过去，这个讽刺，成了一道真正的难题。因为没有人能说清楚：从原子的叠加，到猫的死或活，中间那一刀，到底在哪里？

◆ 三、各家怎样卡住

哥本哈根说：盖革计数器是经典仪器，叠加在计数器那里就结束了。可是，经典仪器和量子系统的界线在哪？计数器也是原子组成的，为什么它就是经典的？哥本哈根不回答。

冯·诺依曼—维格纳说：要等到一个有意识的人打开箱子，叠加才结束。那么猫的意识算不算？如果算，猫自己就能让叠加结束；如果不算，为什么人的意识就特殊？

多世界说：猫从不塌缩。打开箱子的那一刻，世界分成两支，一支里你看到活猫，一支里你看到死猫，两支里的你都觉得自己看到的是唯一的结果。这个回答不需要那一刀，可它要接受一个不停分岔的宇宙。

玻姆说：原子在任何时刻都有确定的状态，只是我们不知道。猫从头到尾都是确定的，要么死，要么活。这个回答也不需要那一刀，可它要接受第 2 章说的超距牵连。

自发塌缩理论说：猫是由许许多多原子组成的大东西，它会在极短的时间里自己塌缩，根本等不到你打开箱子。这个回答需要给量子力学加一条新定律。

每一家都给了一个回答。每一个回答，都要付出一点代价。

◆ 四、诊断：箱子隔开的是谁

用本书的三个号位，来诊断这道难题。

难题里有一个关键的东西，常被人忽视：**箱子**。

箱子隔开了什么?

它隔开了你。你在箱子外面，看不见里面。在你这里，三号位冒在前头，你心里有一个问号：「猫怎么样了？」

不过，箱子没有隔开里面的互动。原子和计数器之间，计数器和锤子之间，锤子和毒瓶之间，毒瓶和猫之间，猫和箱子里的空气之间，猫的身体和它自己发出的热辐射之间，都在一刻不停地碰。

箱子隔开的，是主体那一位，是你；箱子没有隔开互动那一位，没有隔开那一串一层层的碰。

薛定谔的论证里，有一步悄悄地把这两件事混在了一起：因为你看不见，所以里面还在叠加。用本书的话：因为主体那一层还没稳住，所以就说所有层都还没稳住。

这一步，是错的。

◆ 五、用层来看这只猫

现在，用第四编的读法，把箱子里发生的事，一层一层地过。

最细的一层：原子。一个放射性原子核，在一锅粥里，衰变和不衰变两条路都在走。

上一层：盖革计数器。如果原子衰变，放出的粒子钻进计数器的管子，打出一个电子，引发一场雪崩。第 14 章说过，雪崩在几微秒之内，就把一个微小的差异，放大成千千万万个电子的一次齐步走。这一层，在几微秒之内，就越过了门槛。

再上一层：锤子和毒瓶。电流推动一个机械装置，锤子落下，玻璃碎了。这是一个宏观的、被无数原子同时记着的事件。

再上一层：猫。毒气散开，猫吸入，倒下。猫的身体，几十亿亿亿个原子，它的死或活，在它和空气、和箱壁、和它自己发出的热辐射之间，一刻不停地被回写着。第 22 章说过，一个宏观的东西，它的状态会在环境里被回写成天文数字那么多份。

最后一层：你。一个小时后，你打开箱子。

现在问：读数，「原子衰变了没有」，是在哪一层收敛的？

是在计数器那一层，在几微秒之内，就越过了门槛。从那一刻起，它被无数电子记着，被锤子记着，被碎玻璃记着，被猫的身体记着，被箱子里的空气记着。各层对上了。它是一个事实了。

你打开箱子的那一刻，只是又加了一层：你这一层。你这一层，要和下面那些早已收敛的层对上，只能对上同一个事实。

猫不是在你打开箱子时才定下死活的；猫的死活，早在计数器那一层越过门槛时，就稳住了。打开箱子，只是你这一层和那些早已收敛的层对上。

◆ 六、那「又死又活」是什么

那么，「又死又活」这个说法，到底说的是什么？

它说的，是一种算法上的处理。把箱子里的一切，原子、计数器、锤子、毒瓶、猫、空气、热辐射，统统当作一个与外界完全隔绝的量子系统，一个分子都不放过地写进同一个波函数里。按薛定谔方程算下去，这个总波函数里，确实有「活猫」和「死猫」两个分支，彼此叠加。

可是，第 15 章说过，这两个分支，各自缠着各自的一大堆环境记号：活猫这一支，空气里的分子是这样撞的；死猫这一支，空气里的分子是那样撞的。两支之间，再也碰不到一起，再也不会干涉。

本书在第 22 章又补了一层：在每一支里，猫的状态都已被回写了天文数字那么多份，粗层早已站住了。

所以，「又死又活」，不是猫此刻的样子。它是把所有层都当成一锅粥、不承认任何一层已经收敛时，算法上才会出现的那种写法。

第 9 章说过，多世界把整个宇宙一直放在一锅粥里。「又死又活」，就是这种看法在猫身上的样子。

◆ 七、猫自己算不算观察者

课上，一个学生问林舟：「那猫自己知不知道自己死没死？」

这是一个好问题，也是冯·诺依曼—维格纳那一家卡住的地方。

本书的回答是：猫知不知道，不影响死活这件事有没有成为事实。

第 16 章说过，读数作为现实界里的事实，不需要意识。计数器那一层越过门槛，事实就稳了，不管箱子里有没有一只能「知道」的猫，也不管箱子外面有没有一个能「知道」的人。

如果箱子里不是猫，是一块石头，事情一模一样：计数器响了没有，锤子落了没有，在几微秒内就稳住了。

猫有没有自己的主体那一位，它在临死前有没有一个「我」冒到前头，这是另一件事，是自我界里的事。它很要紧，可它不是让死活成为事实的那件事。

◆ 八、这个解，在什么情况下要撤回

照第六编的规矩，每一个解，都要写明它在什么情况下要撤回。

这个解的承重点，是一句话：计数器那一层，在几微秒之内就越过了门槛，被无数粒子记着，此后各层收敛。

设想有一天，有实验能把一个像盖革计数器这样的宏观放大器，连同它触发的宏观机械，整个保持在叠加里，并且之后让两支重新干涉、显出干涉条纹。那就说明，这样的宏观层，并没有像本书说的那样收敛。本书对猫的解，就要撤回。

下一章会说，物理学家确实在一步步地往这个方向推：把越来越大的东西放进叠加里。可是，他们能做到，靠的正是把东西和环境隔得极干净、不让它放大、不让它被回写。一旦让它像盖革计数器那样放大一次，叠加就再也保不住了。迄今为止，这条线上的所有实验，都站在本书这边。

◆ 九、一个完整的例子：林舟的课堂实验

那节课，林舟没有用真的放射性物质。他做了一个小实验。

他拿出一个光电门，就是体育课测短跑用的那种：一边发光，一边收光，有东西挡住，计时器就响。他把一个硬币竖着立在光电门中间，用手指轻轻一弹，让它自己倒。

硬币倒向左边，挡住光，计时器响；倒向右边，不挡光，计时器不响。

他用一个纸箱，把光电门、硬币、计时器统统罩住。弹一下硬币，盖上箱子。

他问：「现在，计时器响没响？」

学生们说：「不知道。」

他说：「对。你们不知道。不过计时器知道吗？」

学生们愣了一下，有人说：「它，知道吧。它响了就是响了。」

林舟说：「是。硬币倒下的那一瞬，挡没挡光，就在计时器里稳住了。它记下了。箱子隔开的，是你们的眼睛，不是硬币和计时器之间的那一下。」

他打开箱子，计时器屏幕上显示：响了，0.83 秒。

他说：「薛定谔的猫，就是这个箱子。只不过他把硬币换成了一个原子，把计时器换成了一个盖革计数器，把挡光换成了一瓶毒药，把看屏幕换成了看一只猫。把最底下那一层换成原子，是对的，原子确实在叠加里。可是从计数器那一层往上，跟这个硬币一样，早就稳住了。」

一个学生举手：「那为什么九十年都有人说猫又死又活？」

林舟想了想，说：「因为他们以为，箱子隔开了所有的东西。其实箱子只隔开了一样东西：你。」

◆ 十、那么，毒瓶算不算第一刀

课后，一个叫方远的男生，留下来问林舟。

「老师，您说猫的死活在计数器那一层就稳住了。那如果把计数器拿掉呢？让放射性物质直接对着毒瓶，衰变放出来的粒子直接把玻璃打出一个小眼，不就没有计数器了？」

林舟说：「好。那你说，一个粒子能把玻璃打碎吗？」

方远想了想：「打不碎。太小了。」

「那要打碎一个玻璃瓶，得怎么办？」

「得有什么东西，把那一下放大。」

林舟点点头。

这是本章值得再推一步的地方。薛定谔的装置里，计数器、锤子、毒瓶，看起来是一串零件。可它们干的是同一件事：把一个原子那一下，放大到一只猫那么大。少了哪一个零件，都得有别的东西补上这一级放大，不然原子那一下，根本够不着猫。

所以，「第一刀在哪」这个问题，本书的回答不是某一个零件，是放大开始的那一级。第 14 章说的门槛，就落在那里：差异开始被许多粒子一起记住，开始往外抄副本。

换成什么零件都一样。是计数器，就在计数器里；是一块感光底片，就在底片上第一批被打乱的银原子那里；是一个灵敏得能直接被一个粒子触发的什么装置，就在那个装置开始雪崩的地方。

方远又问：「那如果什么都不放大，原子衰变了，粒子飞出去，谁也没碰到呢？」

林舟说：「那猫就不会死。原子那一下，没走到猫那里。」

方远笑了：「那就不是薛定谔的猫了。」

「对。薛定谔的猫，从头到尾都靠那一级放大。这道题里，真正的刀，薛定谔自己已经放进去了，只是他没有叫它刀。」

那天晚上，林舟在教案边上记了一句：问猫的死活在哪一刻定，不如问放大从哪一级开始。

◆ 十一、放回日子里

你有没有过这样的时刻：一件事已经发生了，可你还不知道结果，于是你心里，它好像还没定。

考试成绩还没出来的那几天。体检报告还没拿到的那个周末。孩子出远门、还没打来电话报平安的那个晚上。

在这些时刻，很多人心里会生出一种奇怪的感觉：好像只要我还没看到，事情就还有转机。

本书说：事情在它自己的那些层里，早就稳住了。卷子已经改完，分数已经录入；检查已经做完，结果已经写在报告上。还没定的，只是你这一层。

这样想，不是让人绝望，而是让人省力。你不必在等待里，替那件早已发生的事使劲。你能使劲的，是你这一层：等结果来了，你怎样接住它，怎样把它回写进你接下来的日子。

明天能试的一件事：下一次你在等一个结果，心里七上八下的时候，对自己说一句：「它已经发生了，只是还没到我这一层。」然后，去做一件你这一层现在就能做的事。

带 走 的 话

箱子隔开的，是看的人，不是箱子里那一串一层层的碰；猫的死活，早在计数器那一层越过门槛时就稳住了，打开箱子，只是你这一层和它对上。

小　账

这一处，读数是谁的？「原子衰变了」这个读数，在计数器那一层就收敛了；猫、锤子、毒瓶、空气，都在它之后对上；你是最后一层。

先在，还是发生？玻姆说猫的死活先在；多世界说它从不定型；本书说，它在计数器那一层发生，此后层层收敛。

想 一 想

1. 你生活里有没有一个「箱子」，你以为它隔开了一切，其实只隔开了你？
2. 那个学生问「猫自己知不知道」。你怎么看：一件事成为事实，和有人知道它，是一回事吗？

◆

29

第 29 章

实验室里的「猫」：越来越大的叠加

◆ 一、你一定有过这样的时刻

林小满大二那年，跟着导师去参观了一个超导量子实验室。

实验室中间，立着一个一人多高的白色圆柱，外面缠满了电缆。导师说，那叫稀释制冷机，里面最冷的地方，只比绝对零度高千分之几度，比宇宙深处还冷。

圆柱的最底下，挂着一块指甲盖大小的芯片。

「芯片上，」带她们参观的博士生说，「有一个小小的超导环。我们能让环里的电流，同时顺时针转、又逆时针转。」

一个同学脱口而出：「那不就是薛定谔的猫吗？」

博士生笑了：「我们实验室就叫它猫。」

林小满想起上一章父亲讲的那只猫，有点糊涂了：父亲说，像盖革计数器那么大的东西，早就稳住了，不会叠加。可眼前这个环，电流里有几十亿个电子，难道不算大？它怎么就能叠加？

◆ 二、难题原样

这一章的难题，是上一章的反面。

上一章说，宏观的东西，早就稳住了，不会处在叠加里。

可是，过去二十多年里，物理学家在实验室里，做出了越来越大的叠加。〔据研究文献〕

2000 年前后，两个实验组让一个超导环里的电流，处在顺时针和逆时针的叠加里。环里的电流，由数以十亿计的电子一起承载。

2010 年前后，有实验组把一块肉眼刚好能看见的机械振子，冷却到量子基态，并让它和一个超导量子比特纠缠在一起。

有实验组让含有两千多个原子的大分子，后来是七千多个原子的金属团簇，穿过光栅，显出干涉条纹。

近几年，还有实验组宣布，让一块十几微克的晶体，处在两种振动状态的叠加里。

这些「猫」，一个比一个大。

那么，本书在上一章说的「宏观的东西早就稳住了」，是不是错了?

◆ 三、各家怎样看这些实验

自发塌缩理论最紧张。它说，粒子越多，自发塌缩越快。所以，越大的叠加，越是对它的考验。这些实验，一直在为它的参数划界：如果它是对的，参数必须落在某个越来越窄的范围里。〔据研究文献〕

多世界和退相干派最轻松。他们说：这些实验恰恰证明了，量子力学在大尺度上也成立；大东西平常看不到叠加，只是因为退相干，而实验物理学家把退相干压住了。

哥本哈根派多少有点尴尬：既然这么大的东西也能叠加，经典和量子的界线，到底画在哪里?

本书怎么看?

◆ 四、诊断：大，不是问题；层，才是

本书的回答，藏在上一章的一个用词里：上一章说的，不是「大的东西早就稳住了」，而是「像盖革计数器那样**放大**过的东西，早就稳住了」。

大和放大，是两回事。

一个超导环里，有几十亿个电子。可这几十亿个电子，在实验里，是作为一个整体在动的：它们一起顺时针，或者一起逆时针。它们之间，没有一层一层地互相记录、互相确认。环和外界之间，也被稀释制冷机、屏蔽层、真空隔得干干净净，几乎不碰。

所以，这个环虽然大，可它只有一层。它就像一个很大的单个粒子。

盖革计数器就不一样了。一个电子打进来，撞出一个，再撞出一个，几十个，几百个，几百万个。每一个新撞出来的电子，都记下了「刚才有一个电子撞了我」。一层一层地，差异被放大，也被记下了无数份。然后，电流推动锤子，锤子砸碎玻璃，玻璃的碎片四散，碎片又撞上空气，一层一层，没有尽头。

计数器虽然可能比超导环还小，可它有许多层，而且每一层都在往上传、往回写。

能不能叠加，不看东西有多大，看它有没有被一层层地放大、被回写成很多份。

这就是本书对这些实验的回答：它们不是在挑战层级稳住，而是在小心翼翼地避免层级稳住。

◆ 五、实验物理学家在防什么

如果你去问做这些实验的物理学家，他们最怕的是什么，他们会告诉你：最怕「信息漏出去」。

超导环里的电流方向，只要有一点点信息漏到环境里，哪怕是一个光子带走了「电流是顺时针」的一丝痕迹，叠加就毁了。所以他们要把温度降到接近绝对零度，要用好几层屏蔽，要把所有导线都做滤波。

用本书的话：他们在防的，正是回写。

只要有一个光子带着「顺时针」的痕迹飞出去，就是环境里多了一份副本，就是一次回写。回写一多，粗层就站起来了；粗层一站起来，叠加就散了。

第 22 章说，冗余平台是粗层站住的样子。实验物理学家做的，就是让冗余平台永远长不起来：不让任何副本形成。

所以，这些「猫」能活下来，恰恰是因为它们被隔绝在了一个没有回写的世界里。

◆ 六、读出的那一刻，猫就死了

这些实验，还有一个共同的结局，值得注意：每一个实验，最后都要读出结果。

超导环的电流方向，最后要被测量，才能知道实验成没成功。怎么测？用一个放大器，把那一丝微弱的信号放大，送到室温的电子设备里，变成电脑里的一个数字。

第 18 章讲过这条读出链：一层，一层，又一层。

读出的那一刻，叠加就结束了。不是因为有一个人看了一眼，而是因为读出链把那个差异，一层层地放大、回写，让它在无数粒子上稳住了。

所以，实验物理学家能做到的，是让叠加在读出之前活着。读出本身，永远是一次层层稳住。

这和薛定谔的猫，是同一件事的两面。薛定谔的箱子里，有一个盖革计数器，在几微秒里就完成了读出，于是猫的死活早就定了。实验室里的「猫」，被小心地放在一个没有计数器的箱子里，只有在实验最后，才接上读出链。

◆ 七、这些「猫」，有什么用

你可能会问：物理学家费这么大劲，做这些又冷又小的「猫」，图什么？

一个用处，是检验量子力学在越来越大的尺度上，还成不成立。这对自发塌缩理论那一类的猜想，是直接的检验。

另一个用处，是造量子计算机。

一个量子比特，就是一只小小的「猫」：它要在 0 和 1 的叠加里，待得足够久，才能参与计算。超导量子计算机里，那些小小的超导电路，正是这一章开头那种环的近亲。

近几年，还有一种做法，叫「猫码」：用一个超导腔里两种不同的光场状态，叠加在一起，来存一个量子比特。〔据研究文献〕工程师们直接把它叫作猫态，是在向薛定谔致敬。

用本书的话：量子计算，是一门让正在成形活得久一点的工程。它要的，是在需要回写之前，尽量不回写；在需要回写的时候，比如第 19 章说的纠错，又要回写得又快又准。

◆ 八、一个能分出高低的检验

讲到这里，本书要说一件对自己很要紧的事：在这些越来越大的「猫」身上，本书和自发塌缩理论，会给出不同的预言。

自发塌缩理论说：波函数会自己随机地塌缩，粒子越多、质量越大，塌缩得越快。这条规律，和有没有放大、有没有回写，没有关系。一个足够大的东西，就算被隔绝得干干净净，没有任何一份副本写出去，它也会自己塌缩。

本书说：塌缩，是层层回写的结果。一个东西，不管多大，只要被隔绝得干干净净，没有被放大，没有被回写，它就不会塌缩，它的叠加就能一直保持，直到别的什么东西把它碰了。

这是两个能分出高低的说法。

如果有一天，实验物理学家把一个足够大的东西，隔绝到几乎没有任何环境的碰撞，然后发现，它的叠加还是按某个和质量有关的速率，自己散掉了，而且散掉的速率，正好是自发塌缩理论预言的那个，那么，本书「没有回写就没有塌缩」的说法，就输了。

反过来，如果隔绝得越来越干净，叠加就保持得越来越久，看不到任何和质量有关的自发塌缩，那么自发塌缩理论的空间就越来越小，本书的说法，就多了一份支持。

近些年，有实验组用地下实验室里极安静的探测器，去找自发塌缩理论预言的、微弱的自发辐射，结果没找到，排除了这类理论的某些版本。

这场检验还在进行。本书把它记在第 42 章的登记表里，作为本书押的又一注：**没有回写，就没有塌缩**。

◆ 九、和退相干派，差在哪一句

读到这里，熟悉退相干的读者会说：这一章讲的，不就是退相干吗？信息漏到环境里，叠加就散；隔绝环境，叠加就保住。物理学家几十年前就这样讲了，本书换了个说法而已。

这个质疑，对了很大一块。

本章关于实验的说法，几乎每一句，退相干理论都会同意。隔绝环境，叠加活得久；信息漏出去，干涉没了。本书在这一点上，没有和物理学家争什么，只是借了他们的结论。

差别在后面一句。

退相干理论讲完「干涉没了」，常常停在这里。干涉没了，剩下的是几个互相再也碰不到的分支。至于为什么最后只看到其中一个，退相干自己不回答。多世界派说，每一支都在；哥本哈根派说，此时可以当它塌缩了。第 15 章说过，退相干解释了为什么看不到叠加，没解释为什么看到的是这一个。

本书往下多走了两步。

第一步，是把「信息漏出去」读成回写，读成粗层在环境里被抄了许多份。抄得越多，粗层越稳。这一步，第 22 章借着楚雷克的平台，已经走过。

第二步，是说在各层收敛的那一刻，读数发生，这一个结果成了事实。不是几支并排还在，也不是外加一条塌缩规则，是层层对上之后，一个差异定了型。

这两步，退相干理论没有走，也不一定反对。它们是本书的诠释。

所以，本章和退相干派，在实验上一致，在「为什么看到这一个」上分开。前面那个和自发塌缩理论分高低的检验，退相干派会站在本书这一边。而本书和多世界派的分歧，要到第 39 章才摊开讲。

退相干给了这本书一条物理的地基，本书在地基上，盖的是另一层楼。

◆ 十、本书的说法

本章收成一句：

实验室里越来越大的「猫」，不挑战层级稳住；它们能活着，正是因为被隔绝在没有回写的地方。能不能叠加，不看东西多大，看它有没有被一层层放大、被回写成很多份。

这句话，也给第 28 章的那个解，加了一道保险。上一章说，如果有一天，能让一个宏观的放大器连同它触发的机械，整个保持在叠加里，本书对猫的解就要撤回。这一章的实验，说明了这件事有多难：难的不是大，难的是放大之后，不让回写发生。而放大，本身就是回写。

所以，本书押的这一注，押在一个很深的地方：**放大而不回写，做不到。**如果有一天，有人做到了，本书认输。

◆ 十一、一个完整的例子：两种「大」

做一个对比。

第一种「大」：一个超导环，直径大约几微米，环里的电流由数以十亿计的电子承载。它被冷到千分之几开尔文，屏蔽在好几层金属罩里。它的电流方向，可以处在顺时针和逆时针的叠加里，保持一小段时间。

第二种「大」：一粒灰尘，直径几微米，和超导环差不多大。它飘在你书房的空气里。它的位置，不可能处在「这里」和「那里」的叠加里，哪怕只有一瞬。

两者差不多一样大。为什么一个能叠加，一个不能?

因为灰尘每一秒钟，被空气分子撞上无数次，被光子照上无数次。每一次撞，每一次照，都把「灰尘在这里」回写进环境里一份。第 22 章说，它的冗余平台，长得没有尽头。

而那个超导环，被隔得干干净净，几乎没有一份副本被写出去。它的平台，一直长不起来。

一样大，一个只有一层，一个有无数层。

◆ 十二、稀释制冷机前的一个下午

参观那天，林小满没有当场把糊涂说出来。回宿舍的路上，她给父亲打了个电话。

「爸，你说盖革计数器早就稳住了，不会叠加。可我今天看见一个比计数器里那些电子还多的环，就在叠加。」

林舟在电话那头问：「那个环，接不接读出线?」

「接。可是只在最后接。中间他们说，最怕有一个光子跑出去。」

「那你说，环在叠加的时候，有没有谁在一层一层地记它？」

林小满想了一会儿：「没有。他们费那么大劲，就是为了不让任何东西记它。」

「那它就不是计数器。」林舟说，「计数器是个专门负责记的东西。一个电子进去，几百万个电子跟着记。这个环，是被人捂着嘴，不让它被记。」

林小满在宿舍楼下站住了。

她想起博士生说的一句话：他们每天最花时间的，不是做实验，是查漏。查哪一根线没滤好，哪一处屏蔽有缝，哪一个元件发了一点热。一处漏了，叠加就没了。

现在她懂了：他们查的每一处漏，都是一个可能被抄出去的副本。

「爸，」她说，「那他们其实是在跟回写打仗。」

「对。不过最后，他们还得自己接上读出线，让回写赢一次。不然，实验做完了，谁也不知道结果。」

挂了电话，林小满在笔记本上画了两只箱子。一只箱子里是计数器，箭头往外，密密麻麻；一只箱子里是那个环，四周是一圈一圈的屏蔽，箭头一根也没有，只在最底下留了一个小口，标着「读出」。

她在两只箱子下面写了一行字：一只箱子忙着记，一只箱子忙着不被记。

◆ 十三、放回日子里

你有没有过这样的经验：一个还没想成熟的想法，你只在心里转，没跟任何人说。它可以同时是好几个样子，今天这样想，明天那样想，都还活着。

可是，你一旦把它说出来，写进邮件，在会上讲了，别人记下了，传开了，它就定了一个样子。你再想改，就难了。

这和实验室里的「猫」很像。想法在你心里，是只有一层的；说出去，就开始被一层层地回写。

这不是说，想法永远不该说出去。说出去，才能被检验，才能成为事实。只是，有些想法，需要先在心里多活一会儿，在一锅粥里多碰几次，等它有了一个值得定下来的样子，再接上读出链。

明天能试的一件事：找一个你正在琢磨、还没成熟的想法，先别急着在群里发。给它一周时间，只在纸上写，只在心里转。一周之后，再决定要不要把它读出来。

带 走 的 话

实验室里的「猫」能活着，是因为被隔绝在没有回写的地方；能不能叠加，不看多大，看有没有被一层层放大、回写成很多份。放大而不回写，做不到。

小　账

这一处，读数是谁的？ 超导环的电流方向，在读出链接上之前，还没有成为谁的读数；读出链一接，层层回写，它才稳住。

先在，还是发生？ 说大东西天生是经典的，是把经典当成先在；本书说，经典是层层回写出来的，隔绝了回写，大东西也能叠加。

想 一 想

1. 你有没有一个想法，是在「说出去」之后才定型的？说出去之前，它是什么样子？
2. 「放大而不回写，做不到」，你在生活里，能找到一个反例吗？

◆

30

第 30 章

维格纳的朋友：两层事实，放进了一张表

◆ 一、你一定有过这样的时刻

林舟年轻时在县城教书，学校里有过一场风波。

一位老教师，周五下午把一份成绩单锁进了抽屉。周末，消息传开了：有人说，看见那份成绩单上，某个学生的分数被改过。

周一，校长把几个人叫到办公室，一个一个问。

甲说：「乙告诉我，他看见了。」

乙说：「我没看见成绩单，是丙跟我说，他看见老教师在改东西。」

丙说：「我只看见老教师在桌前写字，我以为他在改成绩单，后来才知道他在写教案。」

校长听完，说：「你们每个人说的，在你们自己那里都是真的。甲确实听乙说了，乙确实听丙说了，丙确实看见老教师在写字。可是你们把三句话串起来，串出了一件没有发生过的事。」

最后，校长打开了抽屉。成绩单好好的，一个字没改。

◆ 二、难题原样

第 7 章和第 16 章，已经讲过维格纳的朋友：朋友在实验室里测量，看见了读数；维格纳在门外，没看见。对维格纳来说，朋友加实验室，还在叠加里。那么，朋友的读数，到底定了没有？

2018 年，两位瑞士物理学家，弗劳希格和伦纳，把这个老故事改造成了一个更锋利的版本。〔核：大意〕

他们设想了四个人：两个朋友，各在一间封闭的实验室里；两个外面的人，各自守在一间实验室的门外。

第一个朋友，抛一枚量子硬币，根据结果，制备一个粒子，送给第二个朋友。第二个朋友测量这个粒子。然后，两个外面的人，各自对整间实验室，做一种特别的测量。他们不是问朋友「你看见了什么」，而是把朋友、仪器、粒子作为一个整体，用一种量子力学允许的方式去测。这种测量，会让实验室里的叠加显出干涉。

每个人都用量子力学推理，而且每个人都相信别人的推理：「我知道，她会推断出，他已经看见了某个结果。」

一层一层推下去，推到最后，出现了一个矛盾：按某条推理链，某个结果是确定会出现的；可按量子力学直接计算，那个结果出现的概率不是零，甚至在某一轮里真的出现了，和推理链的结论相反。

他们的论文标题，大意是：量子理论不能一致地描述它自己的使用。

◆ 三、各家怎样卡住

这个悖论，让物理学界热闹了好几年。

弗劳希格和伦纳指出，推出矛盾，要靠三条假设：每个人都可以用量子力学推理；每个人的推理可以合在一起，彼此信赖；每一次测量，只有一个结果。三条不能同时都要，至少得放弃一条。〔核：大意〕

多世界派说：放弃第三条。每一次测量都有许多结果，各在一个分支里。

QBism 和关系诠释派说：放弃第二条。每个人的「事实」是相对于自己的，不能随便拿来和别人的「事实」合在一起推。

玻姆派说：在玻姆理论里，推理链在某一步不成立，因为外面那个人的测量，会通过导航波影响里面朋友的记录。

还有人说：放弃第一条。量子力学不能用来描述一个正在使用量子力学的人。

2019、2020 年，有实验组用光子「扮演」朋友，做了这一类悖论的变体实验，结果和量子力学的预言一致。不过，他们检验的是一组相近、却不完全相同的假设；他们说明的是，在那一组假设里，至少有一条得放弃。

◆ 四、诊断：朋友的事实，收敛了没有

用本书的读法来诊断。

关键在于，外面那个人做的那种「特别的测量」。

这种测量，要让朋友加实验室的叠加显出干涉。第 11 章和第 15 章说过，要显出干涉，两条路必须还都在一锅粥里，还能碰到一起。如果朋友看见读数的那一刻，读数就已经被无数粒子记着、被回写成天文数字那么多份，那么外面的人要让它显出干涉，就难了。他得把这天文数字那么多份副本，一份一份找回来、对齐、抹掉。

第 14 章说过：原则上不违反物理定律，可实际上，宇宙里没有这样的手。

所以，弗劳希格—伦纳的设想，要能成立，必须有一个前提：朋友看见的那个读数，并没有越过门槛。它只在很少的几层上冒了头，没有被放大成宏观的记录，没有被回写成很多份。只有这样，外面的人才有可能把它「倒回去」。

也就是说，在这个思想实验里，朋友的读数，从来没有收敛。

◆ 五、两层事实，放进了一张表

现在，悖论的毛病就看清了。

推理链里，有一步是这样的：外面的人推断，「朋友已经看见了某个结果，那是一个事实」，然后把这个事实，和自己的测量结果，放在一起推。

可是，朋友的那个「事实」，是一个没有收敛的读数。它在朋友那一两层上冒了头，在朋友的自我界里，「我看见了」稳住了一下；可它在现实界里，没有越过门槛，没有成为一个各层都对上的事实。

外面的人自己的测量结果呢？外面的人测完之后，读出链一接，层层放大，那是一个越过门槛、收敛了的事实。

推理链把这两样东西，一个没收敛的、一个收敛了的，当成同一种「事实」，放进同一张表里，一起推。

矛盾，就出在这里：把不同层、不同收敛程度的读数，放进了同一张事件格里。

第 25 章说过，Gleason 定理默认事件格是一次给齐的；本书说，事件格是一层层长出来的。弗劳希格—伦纳悖论，是这个默认在推理链上出的事：它默认所有人的读数，都已经整整齐齐地排在一张表里，可以随便拿来互相推。

就像县城里那场风波：甲、乙、丙三句话，每一句在各自那里都是真的，不过丙看见的，是「老教师在写字」，这是一个已经稳住的事实；他推断出的「老教师在改成绩单」，是一个没收敛的猜想。三句话串起来时，把猜想当成了事实，串出了一件没有发生过的事。

◆ 六、把朋友的记忆倒回去，代价是什么

弗劳希格—伦纳的设想，有一步很少被人停下来细看：外面那个人对整间实验室做测量，测完之后，里面的朋友怎么样了？

按量子力学的算法，外面的人要让朋友加实验室显出干涉，就得把朋友看见读数之后留下的一切痕迹，统统倒回去。仪器上的记录要倒回去，朋友脑子里的那一下记忆，也要倒回去。

倒回去之后，朋友不会记得自己看见过什么。

这一点，许多讨论这个悖论的文章都提到过。〔据研究文献〕它带出一个本书很看重的推论。

如果朋友的读数被倒回去了，那它就从来没有成为一个事实。它不是「发生了，又被抹掉了」，而是「冒了头，没收敛，退回去了」。第 21 章说过，收敛之前的读数可以撤回，撤回之后，它不算发生过。

可是，推理链里，外面的人用的那一句「朋友已经看见了某个结果」，恰恰是在倒回去之前说的。等外面的人测完，那一句话所指的事实，已经不存在了。

换一句话说，推理链用了一份被撤回的口供。

县城那场风波里，丙后来改口了：他看见的只是老教师在写字，不是在改成绩单。如果校长把丙改口之前的那句话，和成绩单拿出来之后的事实，放在一起推，也会推出矛盾。毛病不在校长的推理，在于他用了一句已经被撤回的话。

这里还有一层边界，要说清。本书不是说朋友的经验不真。在朋友那一两层上，「我看见了」确实稳住过一下，这是自我界里的事。本书只说，这一下没有越过门槛，没有被回写到足够多的地方，所以它能被倒回去。

而一个真人看见读数之后，几乎立刻就会被回写到千万个地方：呼吸，体温，神经元的放电，空气里的声音。要把这些全倒回去，比把一颗卫星的位置倒回去还难。

所以，悖论里的「朋友」，只能是一个记录极薄的朋友。他越像一个真人，悖论就越推不动。

◆ 七、本书和关系诠释、QBism 的同异

本书的这个诊断，和关系诠释、QBism 放弃第二条假设，很像：都说，不能随便把每个人的「事实」合在一起推。

区别在于理由。

关系诠释和 QBism 说：每个人的事实，本来就是相对于自己的，所以不能合。

本书说：事实能不能合，看它们有没有收敛。收敛了的事实，各层都对上了，被回写成了很多份，任何人去查都查到同一个。这样的事实，完全可以合在一起推，日常生活和科学研究天天都在这样做。没收敛的读数，只在很少的几层上冒了头，它还不是一个可以拿出来和别人合的事实。

所以，本书不是笼统地放弃「推理可以合」，而是给它加了一个条件：**合之前，先看收敛了没有**。

这个条件，在日常生活里，几乎总是满足的，所以我们从来不用想它。只有在弗劳希格—伦纳这种精心设计、专门让读数不收敛的思想实验里，它才露出来。

◆ 八、这个解，在什么情况下要撤回

这个解的承重点是：外面的人能做那种「特别的测量」，前提是朋友的读数没有越过门槛。

设想有一天，有实验证明：一个读数，已经被宏观地放大、被环境回写成很多份、形成了冗余平台，外面的人却仍然能把它连同全部副本一起「倒回去」，让它显出干涉。那么本书的诊断就要撤回。

那也就意味着，第 22 章的那一注，「平台的起点就是门槛」，输了。

这两条，在第 42 章的登记表里，会合成一条。

◆ 九、一个完整的例子：用光子扮演朋友

为了把这件事说具体，看一看实验物理学家是怎样「做」维格纳的朋友的。

他们当然不能把一个真人关进实验室，再对整间实验室做量子测量。他们用的是光子。

一个光子的某一种属性，比如偏振，扮演「被测的粒子」。同一个光子的另一种属性，比如它走的路径，扮演「朋友」：朋友「测量」偏振，就是让偏振和路径纠缠起来，路径记下了偏振的结果。

然后，外面的人对「偏振加路径」这个整体，做一种特别的测量，让它显出干涉。

在这个实验里，「朋友」的记录，只有一层：它记在同一个光子的另一种属性上。没有放大，没有回写到环境里，没有冗余。

所以，外面的人能把它倒回去。实验结果，和量子力学的预言一致。

本书怎么看这个实验？它很好地展示了，当「朋友的记录」只有一层的时候，会发生什么。它没有，也不可能，展示当朋友的记录是一个真人的记忆、被

写在大脑的千亿个神经元里、被说出口、被写在本子上时，会发生什么。那时，朋友的读数早已收敛。

◆ 十、量子力学能不能描述它自己的使用

弗劳希格和伦纳的论文标题，大意是：量子理论不能一致地描述它自己的使用。

本书对这个标题，有一半同意，一半不同意。

同意的一半是：如果你把所有人的读数，不管收敛没收敛，统统当成同一种事实，放进同一张表里，一起用量子力学推理，那么，确实会推出矛盾。在这个意义上，量子力学不能「这样」描述它自己的使用。

不同意的一半是：量子力学完全可以一致地描述它自己的使用，只要你分清，哪些读数已经收敛、哪些还没有。

收敛了的读数，越过了门槛，被回写成了很多份，它们是可以合在一起推的事实。没收敛的读数，只在很少的几层冒了头，它们还在正在成形，不能拿来和别人合。

日常的科学研究，天天都在用量子力学描述它自己的使用：实验物理学家用量子力学设计仪器，用仪器测量，用测量结果检验量子力学。这个循环从来没有出过矛盾，因为在这个循环里，每一个被拿来推理的读数，都早已收敛。

所以，本书的说法是：**量子力学能描述它自己的使用，前提是分清层。**

◆ 十一、一张已经发出去的通知

林舟当上教研组长那年，遇到过一件小事，后来他常拿来讲这一章。

周四下午，教务处的小罗在年级群里发了一条通知：周六上午补课。发完不到五分钟，副校长打电话给她，说周六另有安排，补课取消。

小罗赶紧点了撤回。群里的消息没了。

可是周六上午，还是有三个学生背着书包到了学校。

一问才知道：一个学生在消息撤回之前，截了图，发给了同桌；另一个学生的家长，看到消息就把闹钟改了；第三个学生，把这件事写进了自己的周计划本里。

小罗那一下撤回，撤掉的只是群里那一份。可在那五分钟里，这条消息已经被抄成了好几份，散到了截图里、闹钟里、本子上。

林舟后来跟组里的年轻老师说：「消息撤回，要看它被抄出去了多少份。刚发出去，还没人看，撤了就是没发。有人截了图，你撤的就只是你自己那一份了。」

这正是本章那条规矩的另一面。

弗劳希格—伦纳的朋友，像是一条刚发出去、还没有一个人看到的消息，外面的人能把它整个撤回。真人的经验，像一条已经被截了图、改了闹钟、记进了本子的消息，撤回按钮只管得着一份。

所以，本书说「合之前，先看收敛了没有」，也可以反过来用：想撤回之前，先看它被抄出去了多少份。

周一，小罗在群里补发了一条：「周六补课已取消，请转告截图的同学。」这一次，她等每个班的班长都回了「收到」，才放下手机。

这一回，取消这件事，也被抄成了许多份。它收敛了。

◆ 十二、放回日子里

回到县城那场风波。

校长最后说的那句话，值得记住：「你们每个人说的，在你们自己那里都是真的。可是你们把三句话串起来，串出了一件没有发生过的事。」

我们每天都在串话。听同事说了一件事，又听另一个同事说了一件事，在心里把它们串起来，得出一个结论。大部分时候，这样串没问题，因为那些事都已经收敛了，是实打实的事实。

可是，有时候，你串进去的，是一个还没收敛的东西：一句猜测，一个推断，一个「我觉得他是在算计我」。串进去，就可能串出一个从来没有发生过的「事实」。

明天能试的一件事：下一次你听到一个传言，把它拆开，问三个问题。这一句，是谁亲眼看见的？他看见的，是事情本身，还是他推断出来的东西？这件事，有没有在别的地方留下记录？三个问题问完，你就知道，它收敛了没有。

带 走 的 话

弗劳希格—伦纳悖论，把一个没收敛的读数和一个收敛了的事实，放进了同一张表里一起推；合之前，先看收敛了没有。

小　账

这一处，读数是谁的？朋友的读数，在朋友那一两层冒了头，没有越过门槛；外面那个人的读数，层层收敛了。两者不是同一种事实。

先在，还是发生？悖论默认所有人的读数都整整齐齐排在一张先在的表里；本书说，事件格是一层层长出来的，没收敛的不能入表。

想 一 想

1. 你有没有一次，因为把一句猜测当成了事实，串出了一个错误的结论？
2. 「合之前，先看收敛了没有」，这条规矩，在你做判断时，能不能用上？

◆

31

第 31 章

鬼魅般的超距作用：没有东西飞过去

◆ 一、你一定有过这样的时刻

林小满上大学后，和高中的好朋友周雨一个在南方，一个在北方。

高考填志愿前，两个人约定过一件事：各自买一本新日记本，从开学第一天起，每天写一句话，不许互相看。等到寒假见面，再一起打开。

寒假，两个人在老家的奶茶店里，把两本日记本并排摊开，一页一页地对。

对到第十二页，两个人同时叫了起来：同一天，林小满写的是「今天第一次下雪」，周雨写的是「今天第一次想家」。

那一天，南方没下雪。林小满写下雪，是因为她在北方。周雨写想家，是因为那天她在南方的宿舍里，听见室友在给妈妈打电话。

对完一整本，她们发现，有好几处，两个人在同一天写的话，像是在互相回答。

周雨说：「我们这是心灵感应吧。」

林小满想了想，说：「不是。我们各自写的时候，谁也不知道对方写了什么。是今天，我们把两本并排放在一起，这些对得上的地方，才出现的。」

◆ 二、难题原样

第 2 章和第 12 章，已经讲过纠缠和贝尔不等式。这一章要正面对付的，是爱因斯坦最不能接受的那一点。

两个粒子纠缠在一起，分开到很远。左边一测，右边那个粒子的状态，好像立刻就跟着定了，不管两边相隔多远，比光还快。

爱因斯坦后来在给玻恩的信里，管这个叫「鬼魅般的超距作用」。〔核：大意〕

他不能接受，是因为他的相对论说：没有任何东西能比光跑得快。如果左边一测，右边立刻就变，那就是有某种东西，比光还快地从左边跑到了右边。

一百年来，实验一次次证明，纠缠的关联是真的，强过任何事先配好的关联。第 2 章说过，2015 年的三组无漏洞实验，把能想到的退路都堵上了。后来，中国的「墨子号」卫星，把纠缠的光子对，分发到了相距约一千二百公里的青海德令哈和云南丽江两个地面站，关联依然在。

那么，到底有没有东西，比光还快地跑过去?

◆ 三、各家怎样卡住

玻姆说：有。导航波遍布全局，左边一测，右边的导航波立刻变了。这是真的超距牵连，只是它没法被用来传消息，所以和相对论在实际上不冲突。

哥本哈根说：左边一测，整个双粒子的波函数塌缩了。至于塌缩算不算一种「作用」，它不深究。

多世界说：没有任何东西跑过去。左边一测，左边的观察者分成两支；右边一测，右边的观察者分成两支；等到两边的观察者碰头，各个分支才配上对。

关系诠释和 QBism 说：左边的读数，只相对于左边的观察者；右边的读数，只相对于右边的观察者。在两边碰头之前，问「两边的读数是不是对上了」，没有意义。

◆ 四、诊断：关联，是在哪一层稳住的

用本书的读法来诊断。

先分清三件事：左边的读数，右边的读数，两边读数之间的关联。

左边的读数，在左边的探测站，一层层地放大、回写，越过门槛，收敛了。这是一个事实，在左边。

右边的读数，同样在右边的探测站收敛了。这是一个事实，在右边。

那么，两边读数之间的关联呢？「左边是横，右边是竖，正好相反」，这个关联，是在哪里、哪一层稳住的？

它不在左边。单看左边的数据，一长串的横和竖，看起来完全是随机的，看不出任何关联。

它也不在右边。单看右边的数据，同样完全随机。

它是在两边的数据被拿到一起、并排对比的那一层，才稳住的。

这就是第 12 章说的：纠缠是土偏重的属性，它的承载者是「这一对」，不是任何一个。而「这一对」作为一个承载者，和它的属性「总是相反」，要在两边的读数被放到同一层上对比时，才一起显出来。

就像林小满和周雨的日记本：各自写的时候，谁也不知道对方写了什么，每一本单看都只是一本普通的日记。那些对得上的地方，是在奶茶店里，两本并排摊开时，才出现的。

◆ 五、没有东西飞过去

现在可以回答爱因斯坦的问题了。

左边一测，有没有东西比光还快地跑到右边?

没有。

左边一测，左边的读数在左边收敛。右边一测，右边的读数在右边收敛。两边各自收敛，各自是一个事实。在这个过程里，没有任何东西从左边跑到右边。

那么，「右边那个粒子的状态，立刻就跟着定了」，这句话错在哪?

错在它把「两边的关联」，当成了「右边那个粒子身上的一个属性」。它想：左边测出横，那右边的粒子身上，就有了「竖」这个属性，而且是立刻有的。

可是，第 6 章说过，属性不挂在一个先在的承载者身上。「右边的粒子是竖的」这个属性，要等右边测量、层层收敛，才发生。而「左横右竖、正好相反」这个关联，要等两边的数据被拿到一起，才在比对的那一层稳住。

比对，需要把数据从一边传到另一边，或者传到同一个地方。这个传，靠的是电话、网络、快递，最快也只能是光速。

所以，关联是在比对的那一层稳住的；而比对，从来不比光快。

第 12 章说过的无信号定理，在这里有了一个本书的读法：单看一边，看不出任何东西，是因为关联本来就不在任何一边，它在两边对上的那一层。

◆ 六、那为什么关联会那么强

你可能会追问：就算关联是在比对那一层才稳住的，可它为什么会强过任何事先配好的关联？贝尔不等式被违反，总得有个原因吧？

这是一个好问题。本书的回答，要分两步说。

第一步：强过事先配好的关联，说明这份关联，不是两边各自带着一份先在的属性、比对时一凑就出来的。第 2 章说过，「事先写好的卡片」，在一次测量里就会露馅。

第二步：那它是什么？本书说，它是「这一对」作为一个承载者，在一锅粥里就已经有的土。两个粒子在分开之前，相互作用过，缠在了一起，这片土，不在左边，也不在右边，在这一对之间。这片土，决定了：等两边各自稳住、再拿到一起比的时候，会比出什么样的关联。

这片土，是一种不局限在一个地方的东西。物理学家说纠缠是「非局域的」，说的就是这个。

可是，非局域的土，不等于超距的作用。土不跑，它只是在那里缠着；它不传任何消息，它只是决定，比对的时候会比出什么。

非局域的，是那一对之间的土；不超光速的，是任何一次读数和比对。

◆ 七、这片土，是不是导航波换了个名字

读到这里，学物理的读者也许会皱眉。非局域的土，决定比对时会比出什么。这听起来，和玻姆的导航波很像。导航波也遍布全局，也不在左边、不在右边。本书是不是给它换了个家常的名字？

这个质疑，有一半是对的。两家都承认，有一种东西不局限在一处。贝尔的定理逼着每一家都面对这一点，玻姆面对得最早，也最坦白。在这一处，本书和玻姆站在同一边；那些想把关联全部说成「事先配好」的人，站在另一边。

不过，两家在三处分了手。

第一处，导航波托着一个先在的粒子。玻姆的粒子，在测量之前就有确定的位置，读数只是把它揭开。本书的土，不托任何先在的读数。左边的「横」，要在左边的探测站一层层放大、回写，才发生。土里没有藏着一张答案。

第二处，导航波会被一次测量当场改写。左边一测，导航波整个变了样，右边的粒子立刻换了走法。这是真的「那边一动，这边跟着动」，只是动得没法拿来传消息。本书的土，不因左边的一次测量，在右边变样。单看右边，左边测没测，右边那一侧的统计一模一样。土没有被拨动，它只是一直缠在那里。

第三处，导航波要一个全宇宙公用的「此刻」。左边一测，右边「同时」变，这个「同时」，总得有个标准。本书不需要这样一个标准，本章后面再说。

所以，本书和玻姆共有一个判断：有不在一处的东西。可本书多拒绝了一件事：不在一处的东西，会在一瞬间推动远处。土缠着，不推远处的读数；它只在两边被拿到一起时，显出自己是什么样子。

◆ 八、这个解，在什么情况下要撤回

这个解的承重点，是两句话：关联在比对那一层才稳住；单看一边，看不出任何东西。

第二句，就是无信号定理。设想有一天，有实验证明，只看一边的数据，就能知道另一边用了什么方式去测。也就是说，纠缠可以用来比光还快地传消息。那么本书的解就要撤回。

那也意味着，量子力学本身要改，相对论也要改。迄今为止，所有的实验都站在无信号这一边。

◆ 九、一个完整的例子：一千公里外的两个读数

设想一次卫星实验。

一颗卫星，在几百公里高的轨道上，每秒钟向地面发出成千上万对纠缠的光子。每一对，一个飞向甲站，一个飞向乙站，两站相距一千多公里。

甲站的探测器，随机选一个角度，测每一个到达的光子的偏振，记下：横，竖，竖，横，横，竖，一长串，看起来像抛硬币。

乙站也一样：竖，竖，横，横，竖，横，也像抛硬币。

一夜下来，两站各有一大串记录。在这个时候，两站的记录，各自都是收敛了的事实，各自都完全随机。

第二天，两站把数据传到同一台电脑上。电脑按时间，把两串记录一对一地配上，按两站当时选的角度分组，算出关联。

关联出来了，强过任何事先配好的关联，贝尔不等式被违反。

这个关联，是在那台电脑里，在两串数据被配上对的那一刻，在比对那一层稳住的。在那之前，甲站不知道乙站，乙站不知道甲站，那份关联，只作为那一对对光子之间的土，在那里缠着。

而从两站到那台电脑，数据走的是光纤或者无线电，不比光快。

◆ 十、谁先测，其实说不清

塌缩的讲法，有一个常被略过的麻烦：它要一个「先」。左边先测，整个波函数塌了，右边才跟着定。可要是两边离得很远、测得又几乎同时，谁先谁后，相对论说，没有一个所有人都认可的答案。

这是相对论里一条站得很稳的结论。两件事相隔太远，远到光在它们之间来不及跑一趟，那么，一个朝一个方向飞的人，会看到左边先测；一个朝反方向飞的人，会看到右边先测。两个人都没有算错。〔核：大意〕

塌缩的讲法碰到这里，就得挑一个人的钟当标准，说「以他为准」。可挑谁，物理里找不到理由。

本书的读法，不需要挑。左边的读数，在左边一层层收敛；右边的读数，在右边一层层收敛。两件事各在各的地方，各自定型，用不着排谁先谁后。关联，要等两边的数据被拿到一起才稳住。拿到一起的那个地方，比如那台电脑，在两次测量之后，而且是在每一个观察者看来都在之后。数据得跑过去，跑不过光。

所以，在本书这里，谁先测，问不出一个答案，也不需要一个答案。真正有先后的，只有一件事：比对，一定在两次读数之后。

这一点，和多世界有一处相近。多世界也说，等两边碰头，才配上对。不同在于，本书的两边，各自已经定型，是两个事实，不是两棵各自分了叉的树。

这一点，也回到本章开头。林小满和周雨，谁的那一页先写，对那些对得上的地方毫无影响。要紧的，只是两本日记，后来被并排摊在同一张桌上。

林舟在课上讲到这里，一个学生问：「那要是两边的人都不说，数据永远不拿到一起呢？」

林舟说：「那两边各有一串事实，都是真的。那份关联，就一直作为那一对之间的土，缠在那里，没有在任何一层上显出来。」

学生又问：「那它算不算有过？」

本书的回答是：土是有过的，它在每一对光子分开之前就缠上了；关联这个读数，没有发生过。土和读数，要分开记。

◆ 十一、一对，可以隔着一千公里

这一章还有一层意思，值得单独说一说：「这一对」作为一个承载者，可以隔着一千公里。

日常生活里，我们习惯了承载者是一个地方的东西：这块石头在这里，那只杯子在那里。一个东西有属性，那个属性也在它在的地方。

纠缠的「这一对」，打破了这个习惯。它的属性，「正好相反」，不在左边，不在右边，也不在中间某个地方。它是一种没有地址的属性。

第 12 章说过纠缠交换：两个从没见过面的光子，因为别处的一次测量，变成了纠缠的一对。在那一刻，「这一对」作为一个承载者，就这样诞生了，跨着它们之间的距离。

本书在第 6 章说，承载者不是先在的，它和属性一起发生。纠缠告诉我们更多一点：承载者也不一定是局域的。它可以是一个摊在很大的空间里的「这一对」，甚至「这一群」。

用第 7 章的话：一号位，那个客体，不一定是一个点，它可以是一个关系。

这件事，在日常生活里也不陌生。一个家庭，一个团队，一份婚姻，作为一个「承载者」，它的很多属性，「和睦」「默契」「靠得住」，不在任何一个人身上，也不在某个地方。它们没有地址，可它们是真的。

◆ 十二、放回日子里

回到林小满和周雨的日记本。

周雨说那是心灵感应。林小满说不是。

其实，两个人都说对了一半。不是心灵感应，因为没有任何东西，在她们写日记的时候，从北方飞到了南方。可是，那些对得上的地方，也不是巧合。她们

从小一起长大，一起经历过很多事，两个人之间，有一片缠得很深的土。这片土，决定了她们在相隔千里的同一天，会被什么样的事触动，会写下什么样的话。

那些对得上的地方，是在奶茶店里、两本日记并排摊开的那一刻，才显出来的。

明天能试的一件事：和一个很久没见的老朋友，约定做一件小事：各自在同一天，写下一句当天最想说的话，不许互相看。过一个月，再一起打开。看看你们之间的那片土，会在比对的那一刻，显出什么样子。

带走的话

纠缠的关联，不在左边，也不在右边，在两边被拿到一起比对的那一层才稳住；非局域的是那一对之间的土，不超光速的是任何读数和比对。

小　账

这一处，读数是谁的？左边的读数在左边，右边的读数在右边，「正好相反」这个关联，是这一对的，在比对那一层才稳住。

先在，还是发生？爱因斯坦以为右边的属性先在、被左边的测量瞬间改了；本书说，右边的属性在右边收敛时才发生，关联在比对时才发生。

想一想

1. 你和谁之间，有过一种「各自在不同的地方，却对上了」的经历？那些对得上的地方，是什么时候显出来的？
2. 「非局域的土，不等于超距的作用」，你能在人与人之间，找到一个例子吗？

◆

32

第 32 章

波，还是粒子：两种显露，不是一副面孔

◆ 一、你一定有过这样的时刻

林舟的老家门口有一条小河，河上有一座石桥，桥下有三个桥洞。

小时候，他常趴在桥栏上看河水。上游的水流到桥前，分成三股，从三个桥洞里穿过去，到了桥下游，又汇在一起。汇在一起的地方，水面上有一道一道的纹，有的地方浪高，有的地方平。

夏天，大人们在上游放鸭子。一群鸭子游到桥前，有的钻左边的洞，有的钻中间的，有的钻右边的。到了下游，鸭子各走各的，不会汇出什么纹来。

很多年后，林舟在课上讲双缝实验，讲到「电子既像波、又像粒子」，突然想起了那座桥。

水过桥洞，下游有纹；鸭子过桥洞，下游没有纹。电子过双缝，有时候像水，有时候像鸭子。

它到底是水，还是鸭子？

◆ 二、难题原样

费曼在他的物理讲义里，说过一句很有名的话，大意是：双缝实验，包含了量子力学唯一的奥秘。〔核：大意〕

这个奥秘是这样的。

电子一个一个地穿过双缝，打在屏幕上。每一个电子，在屏幕上只留下一个点，像一只鸭子。可是千万个点叠起来，叠出一组干涉条纹，像水波。

如果你在缝边放一个探测器，看每个电子走哪条缝，每个电子都只走一条，像鸭子；而且条纹消失了，屏幕上只剩两团亮斑，也像鸭子。

如果不看，条纹回来，像水。

于是物理学家说：电子有「波粒二象性」。它既是波，又是粒子；你怎么测它，它就显出哪一面。

玻尔把这个叫作互补：波和粒子，是同一个东西的两种互相排斥、又互相补充的面貌，你没法在同一个实验里同时看到两面。〔核：大意〕

那么，电子「本来」是什么？是一个时而穿着波的衣服、时而穿着粒子的衣服的东西吗？

◆ 三、各家怎样卡住

玻姆说：电子本来就是粒子，有确定的轨迹；波是导航波，引着它走。所以它是「既有粒子，又有波」，两样东西同时都在。

哥本哈根说：问电子「本来」是什么，没有意义。波和粒子，是两种经典的描述方式，在不同的实验安排下，用不同的方式。

多世界说：电子的波函数，从来就是一个波；「粒子」，是这个波和探测器纠缠之后，在某一个分支里看起来的样子。

这些说法，都让「本来是什么」这个问题，悬在那里。

◆ 四、诊断：不是一副面孔，是两种显露

本书的诊断，在第 6 章和第 13 章已经铺好了。

波粒二象性的说法里，有一个挂钩式的默认：有一个先在的电子，它是钩子；波和粒子，是挂在钩子上的两件衣服，测的时候，换一件穿。

本书说：没有那个先在的钩子。

在双缝实验里，有两种不同的显露：

一种是点。每一个电子打在屏幕上，留下一个点，一层层放大，越过门槛，稳住了。这是稳定显露。和这个点一起显出来的承载者，是「这一次落在这里的那个电子」。

一种是条纹。千万个点，在同一片土上叠出的明暗相间的样子。这是正在成形的显露。第 13 章说过，它看得见，算得准，可不属于任何一个承载者。

粒子，是稳定显露那一侧的样子；波，是正在成形那一侧的样子。它们不是一个先在的东西的两副面孔，是两种不同的稳住。

那么，在缝边放一个探测器，为什么条纹就没了，每个电子都像粒子？

因为探测器让「走了哪条缝」这个差异，在缝边就越过了门槛，稳成了一个点：「从左缝过」。和这个点一起，显出了一个承载者：「从左缝过的那个电子」。这样一来，两条路不再都在一锅粥里，在屏幕上碰不到一起，条纹这个正在成形的形状，也就长不出来了。

鸭子之所以不汇出纹，是因为每只鸭子在桥洞那里，就已经是一只「从左边洞钻过去的鸭子」了：它在桥洞那一层，早就稳住了。

水之所以汇出纹，是因为水在桥洞那一层，没有分成「这一滴从左边洞过」「那一滴从右边洞过」，三股水，在下游还能碰到一起。

◆ 五、不是全有全无：一条此消彼长的线

波粒二象性，常被讲成全有全无：要么看到波，要么看到粒子。

其实，物理学家后来发现，中间有一大片过渡。〔据研究文献〕

如果缝边的探测器，不是很灵，只能模模糊糊地分辨电子走了哪条缝，比如它对的时候只有七成，那么屏幕上的条纹，不会全消失，只是变淡了。探测器分辨得越清楚，条纹就越淡；分辨得越模糊，条纹就越清楚。

1996 年前后，物理学家把这条此消彼长的关系，写成了一个很干净的不等式：路径的可分辨度的平方，加上条纹的清晰度的平方，不超过一。〔核：大意〕

这是一个漂亮的结果。它说明，波和粒子，不是两个开关，而是一条连续的线上的两头。

◆ 六、本书怎样读这条线

用本书的话，这条线是这样的。

「走了哪条缝」这个差异，可以在缝边稳住一部分，也可以只稳住一点点，还可以完全不稳。

它在缝边稳住得越多，越多的那一部分就变成了稳定显露，变成了「从某条缝过的电子」；剩下还在一锅粥里的部分就越少，在屏幕上能碰撞出的正在成形的条纹就越淡。

它在缝边稳住得越少，大部分还在一锅粥里，屏幕上的条纹就越清楚。

同一个差异，不能在缝边那一层稳住，又在屏幕那一层保持一锅粥。分给前者多少，就从后者那里拿走多少。

这个「分给」，就是那个不等式。平方相加不超过一，第 24 章说过，平方之和，正是勾股定理的那个「不多不少」。路径在缝边稳住的份额，和条纹在屏幕上的份额，一起分着同一个整体。

◆ 七、没人去读，条纹也会淡

讲到这里，常有人追问一句：缝边的探测器记下了路径，可要是记录存进硬盘，谁也不去打开，条纹还会不会消失？

会。

这是双缝一类实验里，让很多初学者意外的一件事。条纹淡不淡，要看路径记录「原则上」能不能把两条路分开，不看有没有人去读它。〔核：大意〕探测器记得清，哪怕那份记录锁进抽屉、永远没人看，屏幕上的条纹照样淡下去。

用本书的话，这件事不难懂。第 28 章说过，箱子隔开的只是看的人。这里也一样。「走了哪条缝」这个差异，在缝边那一层稳没稳住，是探测器和电子之间那一碰的事，是互动那一位的事。你去不去读，是看的人那一位，又加上的一层。你不读，那一层没长出来；可下面那一层，早就稳住了。

反过来，有人以为，只要探测器「动了一下」，条纹就一定没了。也不对。第 33 章会讲，如果那份路径记录只被带在一个光子、一个原子的某个属性上，没有放大，没有被回写成很多份，那它还没越过门槛。在恰当的安排下，它可以被抹回去，条纹又能在分组之后显出来。

于是，路径那一侧有三种情形，可以排成一行。没人记：差异全在一锅粥里，条纹最清楚。记了一笔，只记在一处：差异冒了头，还没定型，条纹淡了，可还有办法找回。记了一笔，又被放大、被回写成很多份：差异定型了，条纹再也找不回来。

这一行，比「看了就是粒子、不看就是波」细得多。决定电子在屏幕上像水还是像鸭子的，不是有没有一双眼睛，是那个差异在缝边那一层，走到了哪一种状态。

◆ 八、互补，换一种读法

玻尔的互补，本书很看重。它说出了一件真东西：在同一个实验里，你没法把「走了哪条路」和「干涉条纹」都看得一清二楚。

可是玻尔把它讲成了两种「描述方式」的互补，好像问题出在我们的语言、我们的经典概念上。

本书换一种读法：互补，是两种稳住在同一个差异上的分配。同一个差异，要么在缝边那一层稳住，长出「粒子」；要么留在一锅粥里，到屏幕那一层碰撞，长出「波」；或者两边各分一部分。

它不是语言的问题，是层的问题：一个差异，在哪一层稳住。

这样读，互补就不再神秘。你在日常生活里，天天都在做这样的分配。

◆ 九、那电子到底是什么

读到这里，你也许还是不甘心。两种显露，两种稳住，都好。可总得有个什么在显露吧？那个东西，到底是什么？

这个不甘心是有道理的。日子里，你说「这是一只杯子」，杯子不会今天是杯子、明天是一摊水。你也想要电子这样。

本书的回答，不是「什么也没有」，是换一个地方去找。

电子身上，有一些读数，不管你用什么实验去测，都得到同一个值。

它的电荷，在双缝里、在云室里、在老式电视机的显像管里，都一样。它的质量也一样。这些读数，在千千万万种不同的安排里，一次次稳住，又一次次对上。第 22 章说过，客观，是冗余回写出来的。电子的电荷和质量，是全世界的实验室在一百多年里回写了无数遍的东西，是最厚的那一层平台。

物理学家叫作「电子」的，就是这一束在所有安排里都稳得住、都对得上的特征。

可是，「从哪条缝走」「此刻落在哪里」，不在这一束里。换一种安排，它们就稳成另一个样子，甚至稳不住。所以，问「电子本来是波还是粒子」，等于把这些随安排而定的读数，硬塞进那一束不随安排而变的特征里。它们本来就不在那里。

这样看，电子不是一个光秃秃的钩子，也不是一团没有主人的显露。它是一束在所有层里都收敛了的特征，外加一圈要看这一次怎样碰、才稳成什么样的读数。前一束，你可以放心叫它「电子」。后一圈，要和这一次的缝、这一次的屏幕一起，才说得出是谁的。

这也守住了第 6 章那句话：承载者不先在。那一束特征，也是一次次稳住、一次次回写，才厚成了今天的样子。它稳得太久、太厚，厚到人们忘了它也是长出来的。

杯子也是这样，只是它那一圈太窄，窄到你从来没注意过。

◆ 十、这个解，在什么情况下要撤回

这个解的承重点是：粒子是稳定显露，波是正在成形的显露；两者分着同一个差异，此消彼长。

设想有一天，有实验在同一个电子身上，同时得到了完全清楚的路径信息，又得到了完全清楚的干涉条纹，也就是那个不等式被违反了。那么本书的解就要撤回。

不过，那个不等式，可以从量子力学的标准规则里推出来。〔据研究文献〕要违反它，量子力学本身就要改。

◆ 十一、一个完整的例子：一台可调的探测器

设想一台能调灵敏度的路径探测器，放在双缝的左缝边上。〔以下为示意〕

灵敏度调到零：它什么也不记。屏幕上，条纹清清楚楚，明处和暗处对比鲜明。

灵敏度调到一半：它有时候能记下「从左缝过了」，有时候记不下。屏幕上，条纹还在，可明暗对比淡了，暗纹不再是全黑，明纹也没那么亮。

灵敏度调到最高：每一个从左缝过的电子，它都记下。屏幕上，条纹没了，只剩两团亮斑。

在这台可调的探测器上，你可以亲眼看到，那个差异，是怎样在缝边那一层和屏幕那一层之间，一点一点地被重新分配的。

◆ 十二、这只是换了个说法吗

一个认真的读者，读到这里，可能会说：玻尔讲互补，本书讲两种稳住；玻尔讲描述方式，本书讲层。听起来只是把一套词，换成了另一套词。实验结果一个也没变。

这个质疑，前一半要认。本书在导论里就说过，它不改任何一个方程，不预言任何一个和量子力学相反的数。在双缝这里，它算出来的，和教科书算出来的，一模一样。

不过，换一套词，不一定只是换衣服。好的说法，会让你在新的情形里，知道该问什么。

拿前面那一行三种情形来说。如果你只记得「看了就是粒子、不看就是波」，碰到「记了一笔、可没人去读」的安排，你会犹豫：算看了，还是没看？碰到「记了一笔、后来又被抹掉」的安排，你更不知道该怎么想。

用层的读法，问题只有一个：那个差异，在缝边那一层，走到了哪一种状态？是还在一锅粥里，是冒了头还没定型，还是已经被回写成很多份、定了型？三种情形，答案各不一样，条纹的样子，也就跟着各不一样。

这个问题，不靠谁在看，靠的是那一碰有没有被放大、有没有被回写。它把一个关于眼睛的问题，换成了一个关于层的问题。后一种问题，可以拿实验去量。

所以，说法换了，实验没换；可下一次面对一个没见过的安排，你手里多了一把尺子。本书要的，就是这把尺子。

◆ 十三、费曼为什么说这是唯一的奥秘

费曼说，双缝实验包含了量子力学唯一的奥秘。为什么是双缝，不是别的？

本书的回答是：因为双缝实验，把两种显露，放在了同一块屏幕上。

在别的实验里，你往往只看到一种。测一个原子的能级，你看到的是一个读数，是稳定显露。看一块晶体的衍射图样，你看到的是一个图案，是正在成形的显露。

双缝实验的屏幕上，两种同时在：每一个点，是稳定显露；点叠出的条纹，是正在成形。你可以看着一个一个的点落下，又看着条纹一点一点长出来。

而且，在缝边放一个探测器，你还能亲眼看到，同一个差异，怎样在两种显露之间被重新分配。

所以，双缝实验是一扇窗：从这扇窗里，你能同时看到读数是怎样一次次只来一回地稳住，又是怎样在许多次之后叠出一个形状。第五编讲的纵向和横向，在这里交在一起。

所谓「唯一的奥秘」，就是两种显露，在同一块屏幕上相遇。

◆ 十四、放回日子里

回到桥下的水和鸭子。

你带一个团队做一个项目。一种管法，是每一步都盯死：谁做了什么，每天汇报，每件事都记在某个人名下。这样，每件事在一开始就稳住了，责任清清楚楚，像鸭子。不过，人和人之间的那种碰撞、那种一起想出一个谁也没想到的办法的可能，就少了，汇不出纹来。

另一种管法，是先放开，让大家一起碰，不急着把每个想法记在谁名下。这样，容易碰出新东西，像水。可是，到最后，谁做了什么，常常说不清。

两种管法，不是一个对、一个错。它们是同一个差异，在两层之间的分配。

明天能试的一件事：想一想你手头的一件事，它现在更像水，还是更像鸭子？它需要更多的「在一开始就稳住」，还是更多的「先在一锅粥里碰一碰」？调一调那台探测器的灵敏度。

带 走 的 话

波和粒子不是同一个东西的两副面孔，是两种稳住：粒子是在缝边那一层稳住的点，波是在屏幕那一层叠出的正在成形；同一个差异，分给一边多少，另一边就少多少。

小　账

这一处，读数是谁的？屏幕上的每个点，是那一个电子的；屏幕上的条纹，不是任何一个电子的。

先在，还是发生？二象性默认一个先在的电子换两件衣服；本书说，粒子和波是同一个差异在两层上的两种稳住。

想 一 想

1. 你的工作或家庭里，哪一件事更像「水」，哪一件更像「鸭子」？
2. 你有没有过一次，把一件事盯得太死，结果错过了本可以碰出来的东西？

◆

33

第 33 章

延迟选择与量子擦除：过去还没成为过去

◆ 一、你一定有过这样的时刻

林舟的母亲七十多岁了，喜欢翻老相册。

有一张照片，拍的是林舟十岁那年夏天，一家人在河边。照片里，林舟站在中间，脸上有一点委屈。

母亲每次翻到这张，都说：「这是你考了满分，我们带你去河边玩，你高兴得不得了。」

有一年，林舟的姐姐回家，翻到这张照片，说：「不对吧，那天他考砸了，爸骂了他一顿，他一路哭着去的河边。」

母亲愣了一下，仔细看照片里林舟的脸，说：「好像……是有点委屈。」

那一天到底是高兴，还是委屈？林舟自己也记不清了。

照片是一个事实，它就在那里，一个十岁的孩子站在河边。可是照片里那个孩子的心情，那一天是高兴还是委屈，好像要等到后来的人翻相册、讲故事时，才被说定。

有时候，后来的一句话，像是改写了过去。

◆ 二、难题原样

1978 年，美国物理学家惠勒设想了一个思想实验，叫延迟选择。〔核：大意〕

一个光子进入干涉仪，分成两条路。在两条路汇合之前，你可以选择：放上第二块半透半反的镜子，让两条路碰撞，看干涉，那么光子就像「走了两条路」的波；或者不放镜子，在两条路的尽头各放一个探测器，看它走了哪条路，那么光子就像「走了一条路」的粒子。

惠勒的花招在于：这个选择，等到光子已经进入干涉仪、已经过了第一块镜子之后，才做。

那么，光子在第一块镜子那里，「决定」走一条路还是两条路的时候，它怎么知道你后来会怎么选?

如果你后来选看干涉，它就得已经走了两条路；如果你后来选看路径，它就得已经走了一条路。好像你后来的选择，改写了光子过去的行为。

惠勒甚至把它放大到宇宙的尺度：一个遥远的类星体发出的光，被一个星系的引力弯成两条路，几十亿年后到达地球。你今天怎么测，似乎决定了几十亿年前，那束光走了一条路还是两条路。

2007 年，法国罗克、阿斯佩等人的团队，真的做了延迟选择实验，用量子随机数在光子飞行的途中，决定第二块半透镜起不起作用。结果和量子力学的预言完全一致：选看干涉，就有干涉；选看路径，就有路径。

◆ 三、还有一个更怪的：量子擦除

延迟选择之外，还有一类实验，叫量子擦除。〔据研究文献〕

想法是这样的：在双缝实验里，给每条缝做一个「标记」，让光子走哪条缝，在某个别的地方留下一份信息。有了这份信息，条纹就消失了，第 11 章和第 32 章说过。

可是，如果在光子到达屏幕之后，再把这份信息「擦掉」，让它再也分不出走了哪条缝，会怎样?

实验结果是：条纹回来了。

更怪的版本，叫延迟选择量子擦除。那份路径信息，被带在另一个光子身上；这另一个光子，走一条更长的路，在第一个光子早已打到屏幕上之后，才被测量。测量它的方式，可以选择「读出路径」，也可以选择「擦掉路径」。

结果：只要你按后来那另一个光子的测量结果，把屏幕上的点分组，选择「擦掉路径」的那一组，显出了条纹；选择「读出路径」的那一组，没有条纹。〔核：大意〕

好像屏幕上那些早已落下的点，在知道了后来的选择之后，才决定自己属于哪一组、要不要排成条纹。

◆ 四、各家怎样卡住

很多科普文章，把这些实验讲成「未来改写了过去」「意识能回到过去」。物理学家大多不同意这种说法，可他们给出的解释，各家也不一样。

哥本哈根说：在测量之前，问光子「走了哪条路」，本来就没有意义。所以谈不上改写过去。

多世界说：光子两条路都走了，后来的测量，只是决定了你处在哪个分支。

交易诠释说：确认波确实是从未来往过去传的，所以未来确实参与了过去的握手。

玻姆说：光子从头到尾有确定的轨迹，导航波一直在两条路上，后来的选择，改变的是导航波，不是光子的过去。

◆ 五、诊断：过去，收敛了没有

第 21 章已经给过本书的回答。这一章，把它用到这两类实验上。

本书说：已经收敛的事实，谁也改不了。延迟选择和量子擦除，改的不是收敛了的过去，而是那一段还没收敛的东西。

先看延迟选择。

光子过了第一块镜子之后，「走了左路」还是「走了右路」，在任何一层上都没有稳住。它没有被任何探测器记下，没有被放大，没有被回写到环境里。两条路，都还在一锅粥里。

所以，光子「过去走了哪条路」，在你做选择之前，不是一个事实。没有一个已经收敛的过去，摆在那里等着被改写。

你后来做的选择，决定的是：这一锅粥里的东西，最后以什么样子收敛。放上第二块镜子，它在第二块镜子上碰撞，收敛成「全从甲出来」，这是第 11 章讲的干涉。不放镜子，它在两个探测器上各自放大，收敛成「从左路来」或者「从右路来」。

不是现在改写了过去，是过去还没有成为过去。

惠勒自己，其实也是这样理解的。他有一句话，大意是：任何一个基本现象，在它被记录下来之前，都还不是一个现象。〔核：大意〕第 14 章引过这句话。延迟选择，正是这句话最锋利的演示。

那几十亿年前的类星体的光呢？它在路上走的几十亿年，没有和任何东西碰撞到让路径稳住的地步，宇宙空间太空旷了。所以，它走了哪条路，在几十亿年

里，一直没有收敛。直到今天，在地球上的望远镜里，它才第一次被放大、被记录。

◆ 六、诊断：擦除，擦的是什么

再看量子擦除。

给缝做了标记，路径信息被带在某个东西上。如果这份信息被放大了，被回写成了很多份，越过了门槛，那它就是一个收敛了的事实，再也擦不掉。

量子擦除实验能成功，前提是：那份路径信息，**没有**被放大，没有被回写成很多份。它只被带在一个光子、一个原子的某个属性上，只有一层。第 30 章说过，只有一层的记录，原则上可以被倒回去。

所以，量子擦除擦掉的，不是一个事实，是一个还没收敛的差异。它把这个差异，从「快要在路径那一层稳住」，推回到「还在一锅粥里」。差异回到一锅粥里，两条路又能碰到一起，条纹就回来了。

第 9 章说，正在成形有两种死法：散回一锅粥，或者过早定型。量子擦除，是有意地让「过早定型」那一边，散回一锅粥。

◆ 七、诊断：那些早已落下的点

最怪的，是延迟选择量子擦除里，那些早已落在屏幕上的点。它们是收敛了的事实，每一个都被放大、被记录了。它们怎么会「后来才决定」自己要不要排成条纹？

答案在一个很容易被忽略的步骤上：**分组**。

屏幕上的点，如果不分组，全部叠在一起看，是什么样子？

没有条纹。一团模糊。〔核：这是这类实验的一个关键事实〕

条纹，只有在按另一个光子后来的测量结果，把屏幕上的点分成几组之后，才在某几组里显出来。

这就和第 31 章讲的纠缠关联，是同一件事了。屏幕上的每一个点，是一个收敛了的事实，在屏幕那里。另一个光子的每一个测量结果，是一个收敛了的事实，在另一个探测器那里。两边各自收敛，各自完全随机。

条纹，是在把两边的数据拿到一起、配上对、分好组的那一层，才稳住的。

屏幕上的点，没有一个改变过。改变的，是比对那一层上，它们被怎样分组。

所以，没有任何一个已经落下的点，后来改了主意。只是比对这一层，要等另一边的数据到了，才能做。

◆ 八、能不能借它，给过去捎句话

延迟选择量子擦除，常被人拿来做一个梦。既然后来的选择，能决定屏幕上显不显条纹，那能不能借它，给过去捎一句话?

做法好像很简单。让后面那个光子，按约好的暗号，在「读出」和「擦掉」之间去选。读出代表「否」，擦掉代表「是」。守在屏幕边的人，看有没有条纹，就收到了这句话，而且收在选择之前。

这个梦，落空在前面说过的分组那一步。屏幕上的点，不分组，什么也看不出。守屏幕的人，手里只有一团模糊。不管后面选的是读出，还是擦掉，这一团模糊都一模一样。他要分组，就得拿到另一边的测量结果。那份结果，要靠光纤、靠无线电，从另一边送过来，不会比光快，更不会倒着跑回过去。

这和第 31 章是同一个结构。单看一边，看不出任何东西；东西只在两边对上的那一层稳住。在第 31 章，两边隔的是一千公里；在这里，两边隔的是一段时间。空间上没有东西飞过去，时间上也没有东西倒着飞回来。

本书把这两章合成一句：凡是只在比对那一层才稳住的东西，都没法抢在比对之前拿来用。一句话要能用，得先在某一边单独稳住；可一旦单独稳住，它就成了那一边自己的事实，不再听另一边后来的选择。

林小满有一回在手机上刷到一个标题：「科学家证明，未来可以改变过去。」她截了图，发给父亲。

林舟回了一句：「你去看看，他们的屏幕上，没分组之前是什么样子。」

林小满去翻那篇论文的图。没分组的那一张，是一团平平的亮斑，什么纹也没有。条纹，只出现在按另一边结果拆开的那几张小图里。她回了父亲两个字：「看到了。」

这类标题，错不在实验，在于把比对那一层才稳住的东西，说成了屏幕上早就有的东西。

◆ 九、这个解，在什么情况下要撤回

这个解的承重点有两条：被擦掉的路径信息，从来没有越过门槛；延迟选择量子擦除里的条纹，只在分组之后才出现。

第二条，是这类实验里已经确认的事实。

第一条，和第 22 章、第 30 章押的是同一注。设想有一天，有实验证明，一份已经被宏观放大、被环境回写成很多份的路径信息，仍然能被擦掉，让条纹回来。那么本书的解就要撤回。

◆ 十、过去有厚有薄

这两类实验，还逼出一个日子里很少想到的区分：过去，不是按钟点排队的，是按稳住的程度排队的。

一个盖革计数器，几微秒前响了一声，这件事已经是过去了。它被千千万万个电子记着，被电路、被空气里的热记着，回写成了很多份。它是厚的过去。

那束类星体的光，在路上走了几十亿年，可它走了哪条路，至今不算过去。按钟点，它比那一声计数器的响老得多；按稳住的程度，它连一层都还没越过。它是还没成为过去的东西。

厚薄之间，还有一档：只记了一笔、只记在一处的过去。它是薄的。量子擦除擦掉的，就是这一档里最薄的那一种：一笔只带在一个光子身上、连一丝热都没漏出去的记录。

这里要防一个误读。日子里的薄记录，比如一张烧掉的字条，不能照量子擦除去想。字条烧了，可写字的那个晚上，笔尖蹭过纸，台灯照过手，你心里起过的念头，早已散进周围，回写成了很多份，只是没人收齐。字条没了，事情还在。量子擦除能成，靠的是那笔记录薄到一丝都没漏出去；在日常的尺度上，这几乎做不到。

所以，本书说「过去还没成为过去」，只说那一段一丝都没漏出去的东西。凡是漏出去了，哪怕没人收齐、没人记得，它都已经是过去，谁也擦不掉。

这样分，日子里反倒踏实。你不必担心哪一句后来的话，会把一件早已漏出去的事改掉；你也不必把一件从没说出口、从没被谁接住的心事，当成已经定死的过去。前一种，是要接住的；后一种，还可以慢慢去讲。

◆ 十一、一个完整的例子：一份没寄出的信

想一个日常的类比，帮你记住这件事。

你写了一封信，表达对一个人的不满。写完，放在抽屉里，没有寄。

一周后，你冷静下来，把信撕了。

这封信，有没有「发生过」？

写信这件事，发生过，是一个收敛了的事实：你写了，花了一个晚上。不过，「你对他表达了不满」这件事，没有发生，因为信没有寄出去，没有被他读到，没有被回写进你们之间的关系里。它只在你这一层冒了头，没有越过门槛。

撕掉那封信，不是改写了过去，是让一件还没收敛的事，回到了一锅粥里。你们之间的关系，后来怎么走，还有别的可能。

可是，如果信已经寄出去了，他已经读了，已经跟别人说了，你再撕掉手里的底稿，就擦不掉了。

延迟选择和量子擦除，就是那封没寄出的信。

◆ 十二、放回日子里

回到林舟母亲的老相册。

照片里那个孩子，那一天的心情，是高兴还是委屈？

照片是收敛了的，它就在那里。可是，照片里那个孩子的心情，在那一天，也许并没有在任何一层上完全稳住：他也许在去河边的路上还委屈着，到了河边又高兴了；他也许自己都没想清楚。几十年过去，那份心情，没有被写进日记，没有被谁问过，没有被说出口。它一直在一锅粥里。

后来，母亲讲一个版本，姐姐讲一个版本。每讲一次，那份心情就在讲的那一层上，稳一点。

这不是改写过去。是那一段过去，本来就还没有成为过去。

明天能试的一件事：翻一张你小时候的照片，问问家里人，那一天发生了什么。听听每个人的版本。你会发现，有些事是收敛了的，大家说的一样；有些事，一直在一锅粥里，每个人讲出来的都不同。后者，是你们一家人现在，还可以一起去讲的。

带 走 的 话

延迟选择和量子擦除，没有改写过去；被选择、被擦掉的，是一段从来没收敛的东西。已经落下的点没有改主意，改的只是比对那一层上的分组。过去还没成为过去，就谈不上改写。

小　账

这一处，读数是谁的？ 屏幕上的点，各自收敛在屏幕上；条纹，在和另一边的数据比对、分组的那一层，才稳住。

先在，还是发生？ 「未来改写了过去」默认过去先在；本书说，没收敛的过去，本来就还不是过去。

想 一 想

1. 你生命里有没有一段「还没成为过去的过去」？它为什么一直没有收敛？
2. 你有没有一封「没寄出的信」？如果寄出去了，现在会怎样？

第六编前半总判断

薛定谔的猫早在计数器那一层就稳住了，箱子只隔开了看的人；实验室里的「猫」能活，是因为被隔绝在没有回写的地方；维格纳的朋友那一层没有收敛，不能入表；纠缠的关联在比对那一层才稳住，没有东西飞过去；波和粒子是同一个差异在两层上的两种稳住；延迟选择和擦除，改的不是过去，是还没成为过去的东西。

第六编后半，接着拆另外六道难题：测不准、一直看着的锅、没碰到也能知道的炸弹、穿墙、偏好基、多世界。

◆

34

第 34 章

测不准：两种稳住，挤不进同一层

◆ 一、你一定有过这样的时刻

林小满小时候学过几年钢琴，后来又在学校乐队里打过鼓。

打鼓的时候，她注意到一件事：鼓槌在鼓面上「咚」地一敲，又短又脆，你一下子就知道它是什么时候敲的，可你很难说出这一声是什么音高。它像是很多个音挤在一起。

钢琴上按住一个键不放，一个长长的音，「嗡——」，你很容易听出它是哪个音，是 A，还是 C。可你很难说出它「是什么时候」响的，它从开始到结束，拖了好几秒。

一声短促的鼓点，时间准，音高不准。

一个悠长的琴音，音高准，时间不准。

她问过音乐老师：「有没有一种声音，又短又准？」

老师想了想，说：「越短，音高就越含糊。这不是乐器的毛病，是声音本身就是这样。」

后来她学了物理，才知道，音乐老师说的这句话，就是量子力学里那条最有名的原理，换了一身衣服。

◆ 二、难题原样

1927 年，海森堡提出：一个粒子的位置和动量，不能同时测得都准。位置越准，动量就越不准；动量越准，位置就越不准。两者的不准，乘起来，有一个下限，和一个叫普朗克常数的极小的数有关。〔核：大意〕

同一年，肯纳德把它写成了一个严格的不等式。两年后，罗伯逊把它推广到任何两个「不对易」的物理量：只要两个量在量子力学里不能交换次序，它们就有这样的不准关系。〔据研究文献〕

这条原理，后来成了量子力学最广为人知的一条，常被叫作「测不准原理」。

难题在于：它到底说的是什么？

是我们的仪器不够好，一测就把粒子碰乱了，所以测不准？

还是粒子本来就没有同时确定的位置和动量？

如果是后者，那「粒子」到底是什么东西，连在哪里、往哪走都没有？

◆ 三、各家怎样卡住

第 1 章说过，海森堡最初用显微镜来讲这条原理：用光去照电子，光越能看准位置，就越把电子撞得狠，动量就越乱。这是「扰动」的讲法：粒子本来有位置和动量，测量把它碰乱了。

玻尔不满意这个讲法。他说，问题不在碰乱，在于「位置」和「动量」这两个概念，不能在同一个实验安排里同时有清楚的意义。

后来的物理，大体站在玻尔这边。肯纳德和罗伯逊的不等式，说的是量子态本身：就算一次测量也不做，一个量子态，也不能同时在位置和动量上都尖锐。这叫「制备的不确定性」。

可是，「测量会扰动」这件事，也不是假的。二十一世纪初，日本物理学家小泽正直等人，仔细区分了「测量的误差」和「测量带来的扰动」，写出了新的关系式，并在中子和光子实验里得到了检验。结果发现，海森堡最初那个「误差乘扰动」的说法，在某些情形下可以被突破，而小泽的修正版本成立。

所以，「测不准」至少包含两件事：一个态本身，不能同时在两个量上都尖锐；测量一个量，会扰动另一个量。两件事有关，可不是一回事。

◆ 四、诊断：两种稳住，要的格子不一样

用本书的读法来诊断。

第 8 章说过，属性有三类偏重。位置这个属性，偏重在形状上：一个点，稳在一个地方。动量这个属性，偏重在路上：往哪个方向走，走得多快。

让位置稳住，是让差异在「点」这种样子上，越过门槛：在这里，不在那里。

让动量稳住，是让差异在「走向」这种样子上，越过门槛：往这个方向，以这个速度。

第 24 章说过，每一次测量，都要用一组格子去分：每个格子，对应一个可能的读数。量位置，用的是一格一格的「地方」；量动量，用的是一格一格的「走向和快慢」。

关键在于：**这两组格子，彼此是斜着的。**

一个在「地方」这组格子里很尖的态，比如稳稳地落在一个格子里，放到「走向」那组格子里去看，它就摊在许多个格子上，一点也不尖。反过来也一样。

这就是钢琴和鼓点。一声短促的鼓点，在「时间」这组格子里很尖，落在一个时刻；放到「音高」这组格子里去看，它摊在许多个音高上。一个悠长的琴音，在「音高」这组格子里很尖，落在一个音上；放到「时间」那组格子里，它摊在很长一段时间里。

位置和动量，不是两件挂在同一个钩子上的衣服，被测量碰乱了；是两种稳住，要用两组斜着的格子，挤不进同一层。

◆ 五、为什么是「斜着的」

你可能会问：为什么位置的格子和动量的格子，偏偏是斜着的?

物理学家的回答，藏在一个数学工具里，叫傅里叶变换。〔核：大意〕一个在空间里很窄的波包，要用许多种不同波长的波叠加出来；而波长，在量子力学里，就对应着动量。所以，位置越窄，要叠加的波长种类越多，动量就越散。

音乐里也是一样：一个很短的声音，要用许多种不同频率的振动叠加出来，所以它的音高就含糊。

用本书的话：形状和路，在量子的尺度上，是彼此纠缠着的两种显露。一个差异，在形状上稳得越尖，它在路上就摊得越开。这不是测量的失误，是形状和路之间那片土的样子。

第 8 章说过三个方程。形状由路和土推出，路由形状和土推出。位置和动量的不准关系，是这两个方程在最小尺度上，彼此牵制的样子：形状稳了，路就散；路稳了，形状就散。

◆ 六、那测量的扰动，又是什么

上面讲的，是一个态本身不能同时在两组格子里都尖。那「测量会扰动」又是怎么回事？

第 18 章说过，测量的最后一步，是延拓，是回写：粗层的读数，回写到细层，把被测的东西改写成和读数一致的样子。

你测了位置，读数是「在这里」。这个读数回写下来，粒子就被改写成一个在位置上很尖的态。这个态，放到动量那组格子里看，就摊开了。

所以，测量位置之后，动量变得不确定，是回写的结果。不是因为仪器粗手粗脚把粒子撞乱了，而是因为你让位置这一边稳住了，回写下来，就把动量那一边推回了一锅粥。

扰动，是一边的稳住，回写之后，把另一边推回一锅粥。

小泽的修正，在本书的读法里，也有一个位置：误差，是你这一次测量在位置那组格子里稳得有多准；扰动，是回写下来之后，动量那一边被推开了多少。两者有关，可不是同一件事，所以它们的关系，比海森堡最初那个简单的乘积，要复杂一些。

◆ 七、那粒子到底在哪里

现在回到那个让人不安的问题：如果粒子没有同时确定的位置和动量，它到底是什么?

本书的回答，在第 6 章就给过：粒子，不是一个先在的钩子。

你测位置，和「在这里」这个读数一起显出来的，是「在这里被测到的那个粒子」。你测动量，和「以这个速度往这边走」一起显出来的，是「以这个动量被测到的那个粒子」。

这两个「粒子」，是两次不同的稳住里显出来的两个承载者。它们之间，没有一个先在的、同时带着确定位置和确定动量的「真正的粒子」，等着被我们看清。

这听起来很怪。可想想那声鼓点和那个琴音：你不会问「那个声音，到底是什么时候响的、又是什么音高?」你知道，短促的声音和悠长的声音，是两种不同的声音，各有各的准。

◆ 八、为什么一只篮球测得准

你也许会问：既然位置和动量挤不进同一层，为什么日子里，从来没人觉得测不准?一只篮球，在哪里、往哪飞，裁判看得清清楚楚。

答案在那条下限有多小。不准关系的下限，和普朗克常数连在一起，而普朗克常数小得出奇。对一个电子，这条下限要紧，因为电子太轻。一只篮球的质量，是电子的千万亿亿倍以上。同样的下限摊到篮球身上，位置和速度的不准，小到任何尺子、任何秒表都量不出来。〔核：数量级〕

用本书的话，那两组格子，在任何尺度上都是斜着的。可在篮球那一层，格子画得很粗，一格就有一指宽，速度一格就是每秒一厘米。在这么粗的格子里，那一点斜，被埋在一格之内，看不出来。位置和走向，可以在同一层上，都稳到「够尖」。

这和第四编那幅拼图是一个道理。先拼边框和大色块的时候，某一片是天还是湖，往往不要紧；要到填细处，那一点含糊才露出来。测不准不是在粗层上没有，是粗层用不着看见它。

这也说明，测不准不是电子的毛病。它是一切东西的样子，只是越往细里去，越躲不掉。日子里的「准」，靠的正是你站在一个够粗的层上。

◆ 九、这个解，在什么情况下要撤回

这个解的承重点是：位置和动量，是两种稳住，用的是两组斜着的格子，不能在同一层都稳到尖。

如果有一天，有实验在同一个量子态上，同时测得位置和动量都比肯纳德的下限更准，那么本书的解就要撤回。

不过，那条下限，是量子力学数学结构的直接推论；要突破它，量子力学本身就要改。迄今为止，所有实验都守在这条下限之内。

◆ 十、分给，和挤不下

第 32 章也讲过一条此消彼长的线：路径看得越清，条纹越淡。这一章的位置和动量，也是此消彼长。两件事放在一起，很容易被当成一件。

它们不是一件。

第 32 章那条线，是同一个差异，在两层之间的分配。「走了哪条缝」，要么在缝边那一层稳住，要么留到屏幕那一层去碰。分给缝边多少，屏幕那边就少多少。那是一笔账，在两层之间挪。

这一章的不准，是两种稳住，想挤进同一层。位置要一组格子，动量要另一组斜着的格子；同一层上，只能照一组格子去分。不是一笔账被分走了，是一张桌子摆不下两套餐具。

两件事都有一条越不过的线。不同在于，前一种问的是「这个差异，放在哪一层稳」；后一种问的是「这一层，装得下几套格子」。前一种，挪一挪层，就换一种分法。后一种，挪不动，同一层上只能挑。

把两件分清，有一个用处：遇到此消彼长，先问一句，它是哪一种。

日子里两种难处都有。一件事是在这一步就定死，还是留到后面一步再定，这是分给，可以商量层。一件事要同一刻又快又精，这是挤不下，只能挑一边先稳。把挤不下当成分给，你会一直以为再挪一挪就能两全；把分给当成挤不下，你又会过早放弃一个本来可以错开的安排。

◆ 十一、能量和时间：短命的东西，颜色不纯

不准关系，不只在位置和动量之间。还有一对，和开头那声鼓点更像：能量和时间。

一个原子被激发到一个高能级，过一会儿会跳回来，放出一个光子。这个光子的颜色，对应着两个能级之差。

物理学家发现：如果那个高能级很「短命」，原子在上面待不了多久就跳下来，那么放出来的光，颜色就不那么纯，光谱上那一条线，会有一定的宽度。如果高能级「长寿」，原子能在上面待很久，放出的光颜色就很纯，谱线很窄。〔核：大意，物理学家叫它谱线的自然宽度〕

这和鼓点、琴音，是一回事。短促的，音高含糊；悠长的，音高纯正。

用本书的话：一个状态待的时间，是路上的一种稳住；它放出的能量，是形状上的一种稳住。路上稳得越短，形状上就摊得越开。

激光之所以能有那么纯的颜色，原子钟之所以能那么准，靠的都是找到那些「长寿」的能级，让能量那一边，稳得尖一点。世界上最准的原子钟，用的就是这种格外「长寿」的能级。

◆ 十二、先测一个，再测一个，行不行

林小满在大一的习题课上，被一个同学问住过。

那个同学说：「同时测不准，那我分两步。先把位置测得很准，记下来；紧接着，再把动量测得很准，也记下来。两个数都在本子上，不就都准了吗？」

这个办法，本子上确实会有两个数，而且每个数单看，都可以很准。

可是，第二个数，说的已经不是第一个数说的那个东西了。

第一次测位置，读数「在这里」稳住，回写下来，把粒子改写成一个在位置上很尖、在动量上摊开的态。第二次测动量，用的是另一组斜着的格子。这一次稳住的「以这个速度往这边走」，回写下来，又把粒子改写成一个在动量上很尖、在位置上摊开的态。前一个「在这里」，被这一次回写抹平了。

于是，本子上那两个数，各自是两次稳住里显出来的两个承载者的读数。它们一前一后，不是同一个粒子在同一刻的两张脸。你要是把两个数凑成一对，说「这个粒子此刻在这里、又以这个速度走」，就是把两层上的事实，硬放进了一层。第 30 章说过，两层事实，不能随便放进一张表。

那个同学不服：「那我再测一次位置，看它还在不在原处。」

林小满说：「你试试。它多半已经不在了。」

这一回答，本书照单收下。测完动量再测位置，位置那一边，已经被推回一锅粥，重新摊开。你能得到一串很准的数，可得不到一个同时在两组格子里都尖的粒子。

◆ 十三、一个完整的例子：一束激光穿过一条窄缝

一束激光，穿过一条很窄的缝，打在后面的墙上。

缝越窄，光在穿过缝的那一刻，位置就越确定：它一定在那条窄缝里。

可是你会看到：缝越窄，墙上的光斑反而越宽。光穿过缝之后，向两边散开了。

为什么？因为光在缝那里，位置被稳得很尖；它的走向，就摊开了，有的往左偏，有的往右偏，于是墙上的光斑变宽。这就是物理课上讲的衍射。

用本书的话：缝那一层，让位置这一边稳住了；回写下来，走向那一边，就被推回了一锅粥，散开了。

缝越窄，位置越尖，走向越散，墙上的光斑越宽。林舟在课上做这个实验时，学生们常常吃惊：明明是想让光更集中，缝开得越窄，光反而越散。

◆ 十四、放回日子里

回到鼓点和琴音。

你在生活里，也会遇到这种「两种准挤不进同一层」的事。

你想把一件事的时间定得很死：下周三下午三点，准时交。时间定死了，事情做成什么样，就常常没法精雕细琢。

你想把一件事做得很精：反复打磨，一点一点改。事情精了，什么时候能交，就说不准。

这不是你不够努力。时间上的准，和质量上的准，有时候用的是两组斜着的格子。你让一边稳住得越尖，另一边就摊得越开。

明天能试的一件事：你手头有一件事，同时被要求「快」和「好」。别硬挤。先问清楚：这一次，哪一边更要紧？让那一边稳住，另一边，给它留一点散开的余地。

带走的话

测不准，不是仪器把粒子碰乱了，是位置和动量要用两组斜着的格子，挤不进同一层；测量的扰动，是一边的稳住回写下来，把另一边推回了一锅粥。

小　账

这一处，读数是谁的？「在这里」和「以这个速度往这走」，是两次稳住，各自显出一个承载者；没有一个同时带着两者的先在粒子。

先在，还是发生？显微镜的讲法默认粒子本来有确定的位置和动量；本书说，两者是两种发生，不能在同一层都稳到尖。

想一想

1. 你生活里，有没有两样你都想要、却总是此消彼长的「准」？
2. 鼓点和琴音，你更喜欢哪一种？你的工作，更像哪一种？

◆

35

第 35 章

一直看着的锅：回写太勤，路就走不出去

◆ 一、你一定有过这样的时刻

林舟的妻子周末在厨房炖汤，嘱咐他：「你看着点锅，水开了叫我。」

林舟站在灶台边，盯着锅。一分钟，两分钟，水面一点动静也没有。他忍不住掀开锅盖看了一眼，又盖上；过了一会儿，又掀开看一眼。

五分钟过去，水还是没开。

妻子从客厅喊：「你别老掀盖子，一掀，热气就跑了，更开不了。」

俗话说：盯着的锅不开。〔核：这句话在英语里也有同样的说法〕在日常里，这句话大半是一种心理感受：你越盼，时间越慢。可是林舟那天掀锅盖，是真的让水开得更慢了：每掀一次，热气散一次，锅里刚攒起来的那点劲，又泄掉了。

量子力学里，有一个效应，和这口锅出奇地像。只不过那里，让锅开不了的，不是热气散了，而是「看」本身。

◆ 二、难题原样

1977 年，两位印度裔物理学家，米斯拉和苏达山，从量子力学的规则里推出了一个奇怪的结论，并借用古希腊哲学家芝诺的名字，叫它「量子芝诺效应」。〔核：大意〕

芝诺有一个有名的悖论：飞着的箭，在每一个瞬间，都停在某个位置上；既然每个瞬间都是停着的，那箭怎么能飞?

米斯拉和苏达山的结论是：一个本来会自己衰变、或者自己跃迁的量子系统，如果你很勤地地去测量它，看它变没变，那么它就几乎不会变。测得越勤，它越动不了。极限情况下，一直看着，它就永远停在原处。

1990 年，美国国家标准与技术研究院的一个实验组，用大约五千个被困住的铍离子，做出了这个效应。他们让离子在两个能级之间慢慢转，同时用激光频繁地「看」它们在哪个能级。看得越勤，离子转过去的就越少。

难题在于：「看」为什么能让东西不动？看，不是只是看吗？

◆ 三、各家怎样卡住

教科书的解释是这样的：每测一次，波函数就塌缩回原来的状态。在两次测量之间，系统刚刚开始变，变化的那一点点概率，大约和时间的平方成正比。时间间隔越短，这一点点就越小。测量又把它拉回原处。于是，测得越勤，累积的变化越少。

这个解释，在算法上无懈可击。可它把「塌缩」当成了一个现成的、一瞬间的动作，不问它是什么。

多世界派会说：每测一次，世界分岔一次，在「没变」的那一支里，你一直看到它没变。

玻姆派会说：测量仪器和系统的相互作用，改变了导航波，让粒子停在原处。

◆ 四、诊断：回写太勤

用本书的读法来诊断。

第 18 章说，塌缩是延拓，是粗层的结果回写到细层。第 19 章说，回写太狠，会怎样：盯着的那口锅。

现在可以说得更细。

一个本来会跃迁的离子，处在一锅粥里：「还在原能级」和「已经跃迁」两条路，都在走。随着时间推移，「已经跃迁」那条路，一点一点地冒头。

如果你很久才测一次，这条路有足够的时间冒得很高，测的时候，它有不小的机会在粗层上稳住，回写下来，离子就跃迁了。

如果你很勤地测，每一次，「已经跃迁」那条路才刚冒了一点点头，就被一次测量拦住了。粗层上，绝大多数时候稳住的是「还在原能级」；这个结果回写下来，把离子改写成一个完完全全在原能级的态。那一点点刚冒头的「已经跃迁」，被一把按回了一锅粥的起点。

然后，新的一轮又从起点开始。

测得太勤，就是回写太勤：每一次回写，都把细层上刚冒头的新差异，按回起点。

这正是第 9 章说的，正在成形的第二种死法：过早定型。差异还没来得及正在成形，就被定成了「没变」。

◆ 五、为什么是「时间的平方」

教科书解释里，有一个关键的细节：刚开始变的时候，变化的概率和时间的平方成正比，而不是和时间本身成正比。

这一点，为什么要紧?

如果变化的概率和时间成正比，那么把一段时间切成很多小段，每一小段测一次，总的变化概率，就是各小段之和，和不切一样。看得勤不勤，没有区别。

正因为是时间的平方，切成小段之后，每一小段的变化概率小得多，加起来，总和就比不切的时候小。切得越细，总和越小。

这个「平方」，在本书里有一个来历：第 20 章和第 24 章说过，概率是一来一回的平方。刚开始变的时候，振幅和时间成正比；一来一回一乘，概率就和时间的平方成正比。

芝诺效应能发生，恰恰是因为概率是平方。 如果概率是一次方，就不会有芝诺效应。经典的世界里，盯着的锅照样开，热气不跑的话。

所以，这个效应，和第五编讲的玻恩规则，是连在一起的。

◆ 六、反过来：看得恰到好处，反而更快

芝诺效应还有一个反面，叫反芝诺效应。〔据研究文献〕

在某些系统里，如果你测量的频率不是极高，而是恰到好处，正好配上系统自己变化的某种节奏，那么系统反而会变得更快。

用本书的话：回写太勤，把新差异按回起点；回写恰到好处，配上了细层自己的节奏，反而帮新差异更快地稳住。

这和第 19 章讲量子纠错时说的，是同一件事：稳住要的，不是回写越快越好，而是回写的快慢，和细层的变化配得正好。

这件事的应用，近些年也越来越多。物理学家用频繁的测量，把一个量子系统「关」在某个子空间里，不让它跑出去，这叫芝诺动力学，可以用来保护量子信息。〔据研究文献〕也有人反过来，用恰到好处的测量，加快某些想要的过程。

◆ 七、盯着计数器，样品会衰变得慢吗

读到这里，你也许想做个试验：守在盖革计数器旁边，眼睛一刻不离屏幕，看那块放射性样品会不会衰变得慢一些。

不会。

先说物理的一面。芝诺效应要起作用，两次「看」之间的间隔，得落在系统刚开始变、变化还跟着时间的平方走的那一小段里。对多数放射性原子核，这一小段短得惊人，远远短过任何仪器能做到的间隔。

过了这一小段，衰变就照人们熟悉的老样子往前走，看得勤不勤，再不相干。物理学家要在不稳定的系统里做出芝诺效应，得专门挑这一小段拉得较长的系统，费了很大力气。

再说本书的一面。你盯着屏幕，回写到了哪一层？到了你这一层。屏幕亮没亮，你看见了，记住了。可这一眼，没有伸进原子核那一层，没有在那里把「已经衰变」那条刚冒头的路按回去。第 28 章说过，箱子隔开的，只是看的人。这里也只是看的人：你看得再勤，勤的只是你自己那一层。

所以，芝诺效应里的那个「看」，不是眼睛的看。它要回写真的落到正在变的那一层，而且落得比那条路冒头还快。两个条件，缺一个，锅照样开。

这也让那句俗话分出了两半。「盯着的锅不开」，大半是心理上的：你那一层被拉长了，锅那一层并没有被你碰到。只有像林舟掀锅盖那样，手真的伸了进去，盯着才变成了按着。

◆ 八、本书的说法

本章收成一句：

量子芝诺效应，是回写太勤：每一次测量都把刚冒头的新差异按回起点，路就走不出去；它能发生，是因为概率是一来一回的平方。

这一章，也给第 9 章说的「土太死」，一个物理上的例子。第 12 章那张对照表里，「土太死」对上的，正是量子芝诺效应。

◆ 九、这个解，在什么情况下要撤回

这个解的承重点，是两条：芝诺效应来自回写太勤；它能发生，靠的是概率是平方。

第二条，和第 26 章押的是同一注。如果概率不是严格的平方，芝诺效应的强弱会变。

第一条，有一个可以看的地方：芝诺效应的强弱，应该取决于测量有没有真的回写，也就是测量有没有越过门槛，而不只是取决于「有没有人在看」。如果有实验发现，一个只在最细一层轻轻碰一下、没有放大、没有回写的「测量」，也能产生和强测量一样强的芝诺效应，那么本书的读法就要修改。

已有的研究表明，芝诺效应的强弱，确实和测量的强度、和系统与仪器缠得多深有关。〔据研究文献〕这和本书的读法一致。

◆ 十、一个完整的例子：用频繁的「看」，保住一个量子比特

量子计算机的工程师们，天天在和量子比特的「漏」较劲。一个量子比特，本来应该只在 0 和 1 两个状态之间，可它有时候会漏到第三个、第四个更高的状态里去，那里不该去。

有一种办法，是频繁地去检查：「它有没有跑到不该去的地方？」不去看它是 0 还是 1，只看它是不是还在 0 和 1 这两个状态的范围里。

每检查一次，结果几乎总是「还在」；这个结果回写下来，就把量子比特刚刚开始漏出去的那一点点，按了回来。〔核：大意〕

这是芝诺效应被拿来做了一件好事：用回写，把一个东西关在它该待的范围里。

注意，这种检查，只问「在不在范围里」，不问「是 0 还是 1」。所以它只把漏出去的那条路按回去，不碰 0 和 1 之间的叠加。这是一次很精细的回写：只回写一部分，留下另一部分继续在一锅粥里走。

◆ 十一、天天扒开土看豆子

林舟八岁那年春天，在院子角上种了一排黄豆。

奶奶说，过五六天就出芽。林舟等不及。第二天一早，他扒开土，看豆子有没有动静。豆子还是那颗豆子，只是胀了一点。他把土盖回去。第三天，又扒开。第四天，又扒开。

一个星期过去，邻居家孩子种的豆子，已经冒出了弯弯的小芽。林舟那一排，一棵也没出来。

奶奶蹲下来，扒开一颗给他看。豆子底下，刚长出的白根须，断在土里了。「你每扒一回，它刚扎下去的那点根，就叫你带出来了。它得从头再扎。」

这件事，和那口锅不全一样。锅是掀一回，热气跑一回；豆子是扒一回，根断一回。可两件事有一处一样，这一处正是本章要说的：每一次查看，都不只是看，它把刚冒头的那一点，改写回了起点。

奶奶后来教了他一个法子：不扒土，只看土面。土面上鼓起一个小包，裂开一道缝，就是芽要出来了。看土面，不碰根。

这个法子，和前面那群量子计算工程师做的事，路数相近。他们只问量子比特「还在不在该待的范围里」，不问它是 0 还是 1。奶奶只问「土面鼓没鼓」，不问「根长了多长」。两边都只回写一小部分，把最要紧的那条正在成形的路，留在土里，让它接着走。

查看的本事，不在看得勤，也不在看得少，在于选好看哪一层。看土面，是在粗层上看；扒开看根，是把手伸进了细层。

林舟后来当了老师，批作业也守着这一条。一个学生的作文写到一半，他只看提纲站不站得住，不去逐句改。提纲是土面，句子是根。根还在扎的时候，先别扒。

◆ 十二、芝诺的箭，和量子的锅

这个效应借了芝诺的名字，值得回头看一眼芝诺。

两千四百多年前，古希腊的芝诺说：一支飞着的箭，在每一个瞬间，都占据一个和自己一样大的位置，在那一瞬间，它是静止的。既然每一瞬间都是静止的，箭怎么能动？〔核：大意〕

后来的数学家，用极限和微积分，解开了这个悖论：一个个静止的瞬间，加起来，可以是运动。

本书读芝诺的箭，会多说一句：芝诺的悖论，是把运动切成一个个瞬间，每一个瞬间都问一次「它在哪」，于是每一次的回答都是「停在这里」。他把每一个瞬间，都当成了一次稳住。

在经典的世界里，这样切，不影响箭本身：箭照样飞，你怎么切都行。

在量子的世界里，这样切，会影响：每一次「问它在哪」，都是一次测量，一次回写，真的会把它按回去。米斯拉和苏达山用芝诺的名字，正是因为在量子力学里，芝诺的那种切法，第一次变成了真的。

经典世界里，切是看；量子世界里，切是碰。

◆ 十三、一天量十次血压

何大姐五十二岁，在一家小公司做了二十多年会计。去年体检，医生说她血压有点偏高，让她回家自己量一量，记一记。

她买了一只电子血压计。起初早晚各量一次。后来，只要觉得头有点沉，就再量一次。量出来高了，心里一紧，过十分钟再量；还是高，又紧一下，再量。到最后，一天量十来次，本子上密密麻麻。

数字没有降，反而更乱了。

复诊时，医生翻了翻本子，说：「量得太勤了。你每量一次，心里就紧一回，这一紧，下一次就量高。」〔核：大意，测量时紧张会让读数偏高，这是常见的事〕

医生让她改成每天早上起床后、晚上睡前，各坐下歇五分钟再量，一天两次，其余时候不量。一个月后，本子上的数稳了下来，也比原先低了一点。

这件事，和那口锅、和那排豆子，又不全一样。何大姐的血压计，没有把手伸进血管里。可她自己那一层，被一次次的读数改写：每一个高的数，回写成一阵紧张，这阵紧张，又推着下一个数往上走。看得太勤，看的人和被看的东西，缠成了一个转不出去的小圈。

本书说「回写太勤」，在这里有了一个家常的样子：读数回写进你，你又回写进读数，来回太密，路就只在原地打转。

医生给的法子，是把回写的节奏放慢，又把每一次「看」，放在一个固定的、安静的位置上。这和前面讲的「回写的快慢，要配得上路自己的节奏」，是同一句话。

身体或心里的难处真的大了，请找医生或心理咨询师。怎样量、多久量一次，听医生的安排。

◆ 十四、放回日子里

你一定见过这样的家长：孩子写作业，他坐在旁边，每过两分钟就问一句：「写到哪了？」「这道题会不会？」「怎么又发呆？」

每问一次，孩子刚刚进入的那一点状态，就被打断一次。第 7 章说，孩子写顺了，是互动冒在前头，他进入互动里面了。每一次问，都把孩子的主体那一位拉到前头：「我是不是又被说了。」那条刚走起来的路，被按回了起点。

一晚上下来，作业没写多少，大人孩子都累。

这就是家里的芝诺效应：看得太勤，路就走不出去。

可是，完全不看也不行。孩子在一道题上卡了半小时，没人问一句，他可能一直卡下去。

明天能试的一件事：下一次孩子写作业，约好一个节奏：每二十五分钟，你过去看一次，只问一句「有没有卡住的？」中间不问。看看这个节奏，是让路走得更远，还是还要再调。

带走的话

一直看着的锅不开：测得太勤，就是回写太勤，每次都把刚冒头的新差异按回起点；它能发生，是因为概率是一来一回的平方。回写的快慢，要配得上路自己的节奏。

小　账

这一处，读数是谁的？频繁测量下，「还在原能级」一次次地稳住，又一次次地回写；离子的「没变」，是被回写撑出来的。

先在，还是发生？教科书把塌缩当成一瞬间的现成动作；本书说，它是回写，回写太勤，就锁死了路。

想一想

1. 你身边有没有一件事，是因为「看得太勤」反而做不成的？

2. 「只回写一部分，留下另一部分继续走」，你在带孩子或带团队时，能不能做到？

◆

36

第 36 章

没碰到，也能知道：炸弹检测与「没发生的那条路」

◆ 一、你一定有过这样的时刻

林小满的室友养了一只很胆小的猫。

有一天，室友出门前说：「我不确定猫在不在床底下。你帮我看看，但千万别把它吓着，它一受惊就会抓人。」

林小满想了想，没有趴下去看。她拿了一个小皮球，从床的这一头，贴着地板滚进床底，看它从另一头出来。

皮球顺顺当当地滚出来了，方向一点没偏。

她对室友说：「床底下中间没有猫。要是有，球会撞上它，要么停下，要么拐弯。」

室友问：「那它要是在角落里呢？」

林小满说：「那我再滚一次，换个位置。」

她始终没有碰到猫，也没有看到猫，可她知道了猫不在那里。这件事很平常：你知道一个东西不在某处，是因为你派过去的东西，没有被它挡住。

可是，量子力学里有一个实验，比这怪得多：你能知道一个东西**在**某处，而你派过去的东西，一次也没有碰到它。

◆ 二、难题原样

1993 年，以色列物理学家埃利策和韦德曼，提出了一个思想实验，后来叫「炸弹检测问题」。〔核：大意〕

设想有一批炸弹，有的是好的，有的是哑弹。好炸弹装着一个灵敏得出奇的引信：只要有一个光子碰到它，它就爆炸。哑弹的引信是坏的，光子碰到也不会炸。

问题是：怎样挑出好炸弹，而且不让它爆炸？

按常识，这做不到。要知道引信好不好，你得碰它；一碰，好的就炸了。

埃利策和韦德曼的办法，用的是第 11 章讲过的马赫—曾德尔干涉仪。把炸弹放在干涉仪的一条路上，让它的引信挡在那条路上。

如果是哑弹，它挡不住光子，干涉仪照常工作。第 11 章说过，两条路调好之后，每一个光子都从甲口出来，乙口一个也没有。

如果是好炸弹，它的引信像一个探测器，挡在一条路上。一个光子进来，有一半的机会走炸弹那条路，碰到引信，炸了。还有一半的机会，走另一条路。走另一条路的那一半里，因为炸弹那条路被「挡」了，两条路碰不到一起，干涉没了，于是光子有一半机会从甲口出来，一半机会从乙口出来。

关键是：**只要乙口响了，你就知道，那条路上有一个好炸弹。**　因为如果是哑弹，乙口永远不会响。

而那个从乙口出来的光子，走的是另一条路，它从来没有碰过炸弹。

1995 年，有实验组用光子做出了这个实验的原理。后来，他们还把它和第 35 章的芝诺效应结合起来，让「不碰就知道」的成功率，在原理上可以接近百分之百。〔据研究文献〕

◆ 三、各家怎样卡住

这个实验，被叫作「无相互作用测量」。它让很多人吃惊：没有相互作用，怎么能测量？

哥本哈根会说：光子走了哪条路，在测量之前没有意义；问「它有没有碰炸弹」，也就没有意义。

多世界会说：在另一个分支里，光子碰了炸弹，炸弹炸了；在你这个分支里，光子没碰，可你通过分支之间的关系，知道了炸弹在那里。

玻姆会说：光子走了另一条路，可是导航波两条路都走了，导航波「碰」到了炸弹，所以改变了光子的去向。

◆ 四、诊断：互动，不等于能量交换

用本书的读法来诊断。

「无相互作用」这个名字里，有一个偷换：它把「相互作用」，等同于「能量或者动量的交换」。光子没有把能量交给炸弹，炸弹也没有把能量交给光子，所以叫「无相互作用」。

本书的二号位，互动，比这宽。

第 7 章说过，互动，是那一碰、那一来回、那一场正在走的事。第 11 章说过，叠加里的几条路，是相对于某一种碰法，还在一锅粥里。

一个好炸弹，挡在一条路上，它改变了什么?

它改变了那一锅粥里，有哪些路。

没有炸弹，或者是哑弹，两条路都在一锅粥里，在第二块镜子上碰撞，稳出「全从甲口出来」。

有好炸弹，那条路上，多了一个会把差异一下子放大、一下子越过门槛的东西：如果光子走那条路，它会在引信上稳住，回写成一场爆炸。于是，那条路，不再是一条安安静静、能回来和另一条路碰撞的路。它是一条「一走就稳住」的路。

另一条路上的光子，在第二块镜子那里，找不到能和它碰撞的伙伴了。干涉没了，它有一半机会从乙口出来。

炸弹没有和这一个光子交换能量，可它改变了这一锅粥的土。这就是互动：不是碰到了，而是改变了能碰出什么。

◆ 五、「没发生的那条路」，为什么算数

还有一个更深的问题：从乙口出来的光子，「没有走」炸弹那条路。一条没走的路，凭什么影响结果？

日常的想法是：没发生的事，就是没发生，不该有任何影响。

本书说：在一锅粥里，没稳住的路，不等于不存在的路。

在光子到达第二块镜子之前，两条路都在一锅粥里，谁也没稳住。炸弹那条路，是一条「一旦走、就会被炸弹稳住」的路。它的这种性质，是这一锅粥的土的一部分，不管这一次光子最后是不是在那条路上稳住。

光子从乙口出来，是在乙口那一层稳住的。它稳在乙口，说明了这一锅粥的土，是「有一条会被稳住的路」的那一种土。于是，你知道了炸弹在。

用林小满滚皮球的那件事来比：她知道猫不在床底中间，是因为皮球没被挡。炸弹检测更进一步：你知道炸弹在，是因为光子「本可以被挡」，这个「本可以」，改变了光子在别处的样子。

没稳住的路，也是土的一部分；它改变了别的路能稳成什么。

◆ 六、这不就是排除法吗

有读者会说：这有什么奇怪。林小满滚皮球，是排除法；炸弹检测，也是排除法。光子没走炸弹那条路，那它就走了另一条，而另一条的结果告诉你，炸弹在。

这个看法，有一处是对的：从乙口出来的那个光子，确实没走炸弹那条路。这一点，本书前面也说了。

可它漏了一件事。排除法要成立，得有一个前提：没走的那条路，对走了的这一条，不起任何作用。皮球滚过床底中间，不管角落里有没有猫，它都从同一头出来。猫在角落，影响不到中间那条路上的球。

炸弹检测不是这样。哑弹和好炸弹，都待在同一条路上，光子都没走那条路。可是，从另一条路上来的光子，在出口那里的样子不一样。哑弹时，它一定从甲口出来；好炸弹时，它有一半机会从乙口出来。

也就是说，同样走了另一条路的光子，因为没走的那条路上放着什么，自己的去向变了。这一点，排除法给不出来。在经典的世界里，你在一条路上放什么，不会改变另一条路上的球从哪里出来。

所以，炸弹检测不是「没走那条，所以走了这条」的推理。它是那条没走的路，作为土的一部分，改了这一条能稳成什么。乙口那一声，是一个经典的排除法里，根本不会出现的读数。

这也正是本章开头那句话的分量。林小满知道猫不在中间，靠的是球没被挡；你知道炸弹在，靠的是一个在没有炸弹时，绝不会出现的读数，出现了。

◆ 七、和芝诺效应合在一起

第 35 章讲了芝诺效应：测得太勤，路就走不出去。

物理学家把它和炸弹检测合在一起，做了一件很巧的事。

他们不是让光子一次穿过干涉仪，而是让它在一个装置里绕很多圈，每一圈，都只让它往「炸弹那条路」偏一点点。

如果是哑弹，每一圈的一点点偏，会一圈圈地累积，最后光子整个转到炸弹那条路上去，从一个出口出来。

如果是好炸弹，每一圈，炸弹都在那条路上「看着」：光子往那边偏的那一点点，就像芝诺效应里刚冒头的新差异，被按回了起点。绕了很多圈，光子几乎一点都没转过去，从另一个出口出来。光子碰到炸弹的机会，每一圈都很小，加起来，也可以小到接近零。

于是，你几乎可以百分之百地，不碰炸弹，就知道它在。

用本书的话：好炸弹在每一圈，都是一次潜在的回写；这些潜在的回写，像芝诺效应一样，把光子关在了离它远的那一边。

◆ 八、一半炸了，还算「没碰到」吗

把前面那笔账再算一遍，你会皱眉。

一颗好炸弹放进去，打一个光子。一半的机会，光子走炸弹那条路，炸了。剩下一半里，又是一半从甲口出来，一半从乙口出来。四次里，两次炸，一次甲口响，一次乙口响。只有乙口响的那一次，算「不碰就知道」。

甲口响了，说明不了什么，哑弹也会让甲口响。那就把这颗炸弹再测一次。这样一遍遍测下去，好炸弹里，最多也只有三分之一被认出来又没炸，其余的，还是炸了。

你会问：炸掉一大半，还好意思叫「没碰到」？

这个质疑，把一件容易混的事挑明了。「没碰到」，说的不是这一批炸弹，是这一次读数。乙口响的那一次，那一个光子，确实没有走炸弹那条路，否则炸

弹早炸了。这一次读数，和它的承载者「那条路上有一颗好炸弹」，是在没有能量交换的情况下，一起显出来的。

可是，这一次读数，是从一锅粥里稳出来的。同一锅粥，换一种稳法，就是爆炸。你不能只要乙口那一声，不要另外那几声。它们是同一片土上，几种稳住的分配。

这和第 32 章那条此消彼长的线，是一家人。炸弹那条路「一走就稳住」得越彻底，另一条路上的干涉就越没处去，乙口响的机会越大，炸的机会也越大。分给一边多少，另一边就少多少。

前面讲的那个绕圈的法子，妙就妙在它改了这个分配。每一圈只偏一点点，让「走到炸弹那条路」的份额每次都小到可以不计，靠很多圈攒出结论。代价没有消失，是被切碎了，碎到每一片都近乎零。

这样，这里的「没碰到」，就有了一个准确的意思：不是这件事不花代价，是这一次读数的承载者里，没有那一下能量交换。账要记在整锅粥上，读数要记在这一次上。两本账，别记混。

◆ 九、本书的说法

本章收成一句：

无相互作用测量，没有交换能量，可有互动：炸弹改变了这一锅粥里有哪些路、哪条路一走就会被稳住；没稳住的路，也是土的一部分，它改变了别的路能稳成什么。

这一章，补全了第 7 章对二号位的说法。互动，不只是一碰；它还包括「能碰出什么」的那一片可能。

◆ 十、这个解，在什么情况下要撤回

这个解的承重点是：炸弹的作用，是让一条路变成「一走就稳住」的路，于是改变土。

如果把炸弹换成一个不会放大、不会回写的东西，比如一个只是轻轻地、可逆地记下一笔的小装置，那么，按本书的读法，它让那条路「一走就稳住」的程度会弱很多，干涉不会完全消失，乙口响的机会也会小很多。第 32 章那条路径可分辨度和条纹清晰度此消彼长的线，会在这里出现。

如果实验发现，一个完全不回写、可以完全倒回去的小装置，和一个真正会放大、会回写的炸弹，在这个实验里效果完全一样，那么本书的读法就要修改。

◆ 十一、哪些没走的路才算数

本章说，没稳住的路也是土，它改变了别的路能稳成什么。这句话很容易被说过头，好像一切没走的路、一切「本可以」，都在暗暗起作用。

不是。

炸弹检测有一个前提，做实验的人都知道：两条路得能重新碰到一起。干涉仪的两臂，长短要调得很匀。差得太多，超过了光自己能保持步调的那一段长度，两条路在第二块镜子上，就碰不出干涉了。〔核：大意，物理学家叫它相干长度〕这时候，就算是哑弹，乙口也照样会响，炸弹检测就失灵了。

用本书的话：没走的那条路要算数，它得还在同一锅粥里，还能和走了的那条路碰上。一旦两条路各自在别处稳住，或者各走各的、再也对不上步子，那条没走的路就只是「没走」，不再改变什么。

这也给第 33 章补了一笔。那里说，一丝都没漏出去的东西，还没成为过去。这里说，还在同一锅粥里的路，才能从没走的位置上起作用。两句话说的是同一个边界：还在锅里，和已经出锅。

这条边界，放回日子里，也是一条好用的分界。

一条你二十岁时没走的路，比如没去学医。它后来还算不算数？要看它还在不在你今天这一锅粥里。如果你今天还常为身边人的病揪心，还会在书店的医学架前站一会儿，它就还在，还在改变你走的这一条能稳成什么样子。如果它早已在你心里定了型，说起来只是一句「当年也想过」，那它就只是没走，不再推你。

没走的路分两种：还在锅里的，和已经出锅的。只有前一种，还在土里。

◆ 十二、一个完整的例子：不照它，也能拍到它

炸弹检测的想法，不只是一个思想实验。物理学家想过把它用在成像上：给一个怕光的东西拍照，用的光，大部分不直接照到它。〔据研究文献〕

比如，有些生物样品，被强光一照就坏了。如果能用「无相互作用」的办法，让光子绝大多数时候走另一条路，只通过「这里有没有东西挡着」来改变干涉，就能在几乎不照到它的情况下，知道它的形状。

这类技术还在探索里，离日常应用还远。可它说明了一件事：「没碰到也能知道」，不是一个文字游戏，是一种可以拿来用的东西。

◆ 十三、放回日子里

回到林小满和室友的猫。

很多时候，我们知道一件事，不是因为我们碰到了它，而是因为它让别的东西变了样。

一个团队里，有一个人从来不在会上说话。可每次他请假，会就开得特别乱。你从来没有「碰到」他做了什么，可他在那里，改变了这个团队能碰出什么。

一个家里，奶奶每天只是坐在客厅。可她住院的那一周，全家人吵了三次架。她在那里，是这个家的土的一部分。

没稳住的路，也是土。在的人，哪怕什么也没做，也在改变别人能稳成什么样子。

明天能试的一件事：想一个你身边「什么也没做」的人。问问自己：如果他不在了，你们之间，会少了什么？那个少掉的东西，就是他一直在做的事。

带 走 的 话

没碰到也能知道：炸弹没有交换能量，可它让一条路一走就稳住，改变了这一锅粥的土；没稳住的路，也是土的一部分。互动不等于能量交换。

小　账

这一处，读数是谁的？乙口那一声响，是光子在乙口稳住的；它说出「炸弹在」，是因为这一锅粥的土里，有一条会被炸弹稳住的路。

先在，还是发生？「无相互作用」默认互动就是交换能量；本书说，互动是改变了能碰出什么。

想 一 想

1. 你身边有没有一个人，什么也没做，却一直在改变你们之间能长出什么？
2. 「没发生的那条路，也算数」，你人生里有没有一条没走的路，一直在影响你走的这一条？

◆

37

第 37 章

穿墙：墙，是定型之后才有的

◆ 一、你一定有过这样的时刻

林舟小时候，村口有一道土坡，坡那边是邻村的果园。

孩子们要去果园，得爬过土坡。土坡不高，可对一个七八岁的孩子来说，爬上去要使出全身的力气。有时候跑得不够快，冲到半坡，就滑下来了。

林舟记得，有一回他冲了三次，都没上去。坐在坡底喘气的时候，他想：要是能直接穿过去就好了，不用爬。

当然，他穿不过去。人不能穿过土坡，这是谁都知道的事。

很多年后，他在大学里第一次学到「隧穿」这个词：一个电子，遇到一堵按经典力学来说它绝对翻不过去的「墙」，却有一定的机会，出现在墙的另一边，好像从墙里穿了过去。

他想起了那道土坡，和那个坐在坡底喘气的孩子。

◆ 二、难题原样

在经典力学里，一个球滚向一个坡，如果它的能量不够爬上坡顶，它就一定会滚回来，绝对到不了坡的另一边。

量子力学说：不一定。一个粒子，能量不够翻过一堵「势垒」，也有一定的概率，出现在势垒的另一边。这个概率，随着墙变厚、变高，迅速变小，可不是零。

这不是一个稀奇的理论猜想，它是许多现象的根。

1928 年，伽莫夫用隧穿解释了放射性原子核为什么会放出阿尔法粒子：阿尔法粒子被原子核紧紧拴着，能量不够冲出去，可它会隧穿出去。〔核：大意〕太阳之所以能发光，核聚变之所以能在太阳内部的温度下发生，也要靠隧穿：两个原子核的能量不够克服彼此的排斥，是隧穿让它们碰到了一起。〔核：大意〕

八十年代，物理学家利用隧穿，造出了扫描隧道显微镜：一根极细的针尖，悬在样品表面上方，不碰它；电子从针尖隧穿到样品上，形成微弱的电流，电流随距离的变化敏感得出奇，于是人类第一次「看」到了一个个原子。发明者因此获得了 1986 年的诺贝尔物理学奖。〔核：大意〕

你手机里的闪存芯片，存储数据，靠的也是电子隧穿过一层极薄的绝缘层。〔核：大意〕

2025 年的诺贝尔物理学奖，颁给了克拉克、德沃雷和马蒂尼斯三位物理学家，表彰他们在一个由许许多多电子组成的超导电路里，观察到了宏观的量子隧穿和能量的量子化。第 29 章讲的那些实验室里的「猫」，和这项工作是近亲。

难题在于：粒子到底是怎么「穿过」墙的？它在墙里面的时候，是什么样子？它在墙里待了多久？

◆ 三、各家怎样卡住

教科书的回答，是数学的：波函数在墙里不是零，而是迅速衰减；墙的另一边，还剩一点点；这一点点的平方，就是隧穿的概率。

可是，「粒子在墙里面」，这句话是什么意思？在经典力学里，墙里面是一个禁区，粒子在那里，动能是负的，这在经典世界里没有意义。

玻姆说：粒子有确定的轨迹，它沿着导航波的引导，真的穿过了墙；导航波给了它在墙里需要的那份「量子势」。

物理学家还为一个问题争了几十年：隧穿要花多长时间？粒子在墙里，待了多久？有人算出的时间极短，有人甚至算出「比光穿过同样厚度的真空还快」。〔据研究文献〕2020 年，多伦多大学斯坦伯格的实验组用一种巧妙的办法，测了原子隧穿过一堵光做的墙所花的时间，得到了一个有限的、不超光速的数。

◆ 四、诊断：墙是定型之后的划分

用本书的读法来诊断。

「穿墙」这个说法里，有一个默认：墙先在那里，墙这边、墙里面、墙那边，三个地方是先划分好的。粒子从这边，经过里面，到那边。

本书说：墙这边、墙里面、墙那边，这种划分，是定型之后的样子。

在经典的、定型了的世界里，一个球滚向一个坡，它的位置一刻不停地被环境回写，它在每一刻都稳稳地在某个地方。于是，「它现在在坡这边」「它现在在坡上」「它现在在坡那边」，每一刻都是一个收敛了的事实。坡顶，就是一道真实的分界：能量不够，就过不去。

在量子的、还在一锅粥里的世界里，一个电子还没有被测量，它的位置在任何一层上都没有稳住。「它现在在墙里面」，不是一个收敛了的事实，而是一锅粥里的一条路，和「它在墙这边」「它在墙那边」，一起在走。

墙里面，对一个在一锅粥里的电子来说，不是一个它必须先经过的禁区，而是一锅粥里一条很弱、却没有断的路。

那条路在墙里越走越弱，因为在墙里，按能量来说，它是「不该在」的地方。可它没有断。到了墙的另一边，还剩一点点。这一点点，在另一边被测量、被放大、越过门槛，就稳成了「电子在墙那边」。

所以，隧穿不是「穿过」。它是一锅粥里，一条在墙的那一边也有一点点的路，在那一边稳住了。

◆ 五、那在墙里待了多久

现在可以回答那个争了几十年的问题：粒子在墙里，待了多久？

本书的回答是：在不测量的时候，问「粒子在墙里待了多久」，就像第 33 章问「光子过去走了哪条路」：那一段，从来没有收敛，本来就不是一个事实。

你要知道它在墙里待了多久，就得在墙里放一个「钟」，让「在墙里」这个差异，在某一层上稳住。

2020 年前后那个实验组，用的正是这样一种「钟」：他们利用原子的一种内部状态，让它在墙里时慢慢地转一点点，出来之后，看它转了多少，就知道它在墙里待了多久。这种「钟」，转得极轻，不会把隧穿本身破坏掉，是第 14 章说的一种弱测量。

测出来的，是一个有限的时间。

用本书的话：在墙里放了一个很轻的钟，让「在墙里」这条路，在钟那一层上，轻轻地稳住了一点点。于是，「在墙里待了多久」，才成了一个可以谈的事实。没有那个钟，就没有这个事实。

问一段没收敛的路花了多久，得先让它在某一层上稳住一点点。

◆ 六、为什么人穿不过土坡

那么，为什么林舟穿不过那道土坡？

不只是因为他太重、墙太厚，隧穿的概率小到天文数字分之一。更根本的，是他从来不在一锅粥里。

一个孩子，每一刻都在被空气、阳光、地面回写着他的位置；他的冗余平台，长得无边无际，第 22 章说过。他在每一刻，都稳稳地在某个地方。「他在土坡里面」这条路，在他还没靠近土坡时，就已经被无数次回写按回了起点，像第 35 章那口一直看着的锅。

一个电子之所以能隧穿，是因为在它穿过的那一小段时间里，它和环境隔得足够干净，它的位置没有被一层层地稳住，那条穿过墙的路，才能一直走到墙的另一边。

隧穿，是一锅粥的特权；一个被无数次回写的大东西，没有这份特权。

2025 年那项诺贝尔奖的工作，正是把一个由大量电子组成的超导电路，隔绝到让它重新拿回了这份特权，于是在一个宏观的电路里，看到了隧穿。

◆ 七、本书的说法

本章收成一句：

墙这边、墙里面、墙那边的划分，是定型之后才有的；对一个还在一锅粥里的粒子，墙里面是一条很弱、却没断的路。隧穿不是穿过，是这条路在墙的那一边稳住了。

◆ 八、这个解，在什么情况下要撤回

这个解的承重点是：隧穿要求那一小段路不被回写；一旦在墙里有强的回写，隧穿就会被压住。

这其实可以检验。如果在墙里放一个很「重」的探测器，强到每次都能把「在墙里」这个差异放大、回写，那么按本书的读法，隧穿会被大大压住，像芝诺效应一样。

物理学家确实研究过「测量对隧穿的影响」，结果大致是：墙里的测量越强，隧穿越被抑制。〔据研究文献〕这和本书的读法一致。

如果有一天，发现在墙里发生强烈的、不可逆的回写，隧穿的概率却一点也不受影响，本书的读法就要撤回。

◆ 九、「墙里那条路」是不是又一个先在

读到这里，一个细心的读者会皱眉。

他会说：本书一路反对先在，可这一章却说「墙里面有一条很弱、却没断的路」。这条路，是不是又被当成了一个先摆在墙里的东西？电子没测之前，你怎么知道墙里有一条路？

这个质疑，对了一半。

对的那一半是：如果把「墙里那条路」读成一根细细的线，电子顺着它一点一点往前挪，那就真成了先在。那样读，和玻姆的轨迹只差一步，本书也就失掉了自己的立场。

本书说的不是这个意思。

「墙里那条路」，不是电子身上带着的一样东西，也不是墙里藏着的一条通道。它是一种说法，用来讲一锅粥里还有什么在走。电子没有被测，没有任何一

层把「在墙里」这个差异稳住。这时说「有一条路」，只是说：这条路没有被回写按掉，它还在一锅粥里，还能在墙那一边留下一点点。

你可以这样想。一场雪下了一夜，第二天早上，你看见院墙外头的雪地上有一串脚印，院墙里头也有一串，接得上。你会说：有人翻墙过去了。可你没有看见他翻，墙头上也没有留下任何印子。那「翻墙」这一段，是你事后拿两头的脚印接出来的。

隧穿比这还要干净一点。墙那一边的那个读数，是真的稳住了；墙这一边的电子源，也是真的在那里。中间那一段，没有脚印，也不该硬说有一个人一步一步走过。本书叫它「一条很弱的路」，是在提醒你：这一段只能从两头去读，不能被单拎出来当成一件已经发生过的事。

所以，本书不说电子「本来就在墙里」。本书说的是，墙里那一段，在没有钟的时候，不是一个事实；它在一锅粥里，是一条还没有被按掉的路。

第 33 章说过同样的话：光子「过去走了哪条路」，在没有收敛之前，不是一个可以问的问题。墙里这一段，是同一类。

这样读，还有一个好处：它不需要回答「电子在墙里时动能是负的，这算什么」。动能是负的，是把「在墙里」当成一个已经稳住的位置，再去给它配一个经典的能量账。位置没有稳住，这笔账就不必在那一层上去记。

发生学反对先在，不反对事实。墙这边的电子源是事实，墙那边的读数是事实。中间那一段，本书不给它安一个先在的身子。

◆ 十、一个完整的例子：针尖下的原子

扫描隧道显微镜的针尖，悬在一块金属表面上方，大约一纳米高，也就是几个原子的厚度。针尖和金属之间，是真空，是一堵墙。

针尖上的电子，能量不够跳过这一纳米的真空。可它们会隧穿过去，形成一个微弱的电流。

针尖往下挪一点，哪怕只有一个原子直径的十分之一，电流就会大好几倍。针尖往上挪一点，电流就小好几倍。〔核：大意〕

所以，让针尖在表面上方一行一行地扫过去，记下每个地方的电流，就能画出表面上一个个原子的起伏。

用本书的话：每一个电子，在针尖和金属之间，那一纳米的路，都在一锅粥里；它在金属那一侧稳住了，就成了一份电流。千千万万个电子在那一侧稳住，叠出一个电流的大小。这个大小，随着那一纳米的厚薄变化，就把原子的样子，一点一点地显了出来。

人类第一次「看到」原子，靠的是一锅粥里的路。

◆ 十一、林小满手机里的那层薄墙

有一天晚上，林小满在宿舍整理手机里的照片，存储空间快满了。

她顺手查了一下，手机里存照片的那块芯片，是怎么记住东西的。查到的说法大意是这样：芯片里有许许多多小格子，每个格子里有一块被绝缘层包住的「浮栅」。写数据的时候，加一个电压，让电子穿过一层极薄的绝缘层，进到浮栅里；电子关在里面，这个格子就记下了一个状态。〔核：大意〕

她给父亲发消息：「爸，我的照片是靠穿墙存进去的。」

林舟回：「那它们为什么不穿回来？」

这一问，问到了本章的另一面。

写进去的时候，电压一加，墙变得又薄又斜，一锅粥里那条穿过去的路，变得不那么弱了。成群的电子穿过去，在浮栅里稳住。这一步，是隧穿在干活。

写完以后，电压撤掉，墙恢复了原来的样子。浮栅里关着的，不是一个电子，是很多很多电子。「这个格子里有电荷」这件事，已经不是一锅粥里的一条路，而是一个在粗层上站住了的读数：读出电路一次次去问，问到的都一样，手机里的相册、云端的备份，又把它回写成了很多份。

这时，单个电子还是有机会穿回来，一个一个地漏。听说放得太久、温度太高的芯片，数据会慢慢变得不可靠，原因之一就是这种漏。可是，漏几个电子，不足以把「这个格子里有电荷」这件事推倒。粗层的读数，由许多电子一起撑着。

所以，这块芯片里同时有两件事。细层上，单个电子仍然有隧穿这份特权，能穿过去，也能漏回来。粗层上，那个「存了一张照片」的读数，已经定型，不靠哪一个电子。

这正是本章说的那条界线，换了一个地方出现：隧穿发生在还没有稳住的那一层；一旦许多份一起撑住，墙就重新变成了墙。

林小满后来删了几百张重复的照片。删的那一刻她想到：删除，也是让成群的电子再穿一次墙。一张照片在不在，取决于粗层上那个读数有没有被改写；单个电子的进出，从来决定不了它。

◆ 十二、放回日子里

回到村口那道土坡。

成年人的世界里，有很多「墙」：资历的墙，学历的墙，行业的墙。很多人在墙前面停下，觉得自己能量不够，翻不过去。

隧穿给人一个很诱人的想象：也许能直接穿过去。

本书不想给你一个廉价的鼓励。人穿不过土坡，因为人每一刻都被回写着。可是本书想提醒你一件事：很多墙，是在「定型」之后才划分出来的。墙这边、墙那边，是一种被许多人、许多次回写出来的划分。

在一锅粥还没定型的地方，比如一个刚刚起步的新行当，一个还没有人划过线的新领域，墙常常还没有长出来。那里的路，还没有被划分成「这边」和「那边」。

明天能试的一件事：想一堵你觉得翻不过去的墙。问自己：这堵墙，是早就定型了的，还是在某个领域里，它还没有长出来？有没有一个地方，那条路还在一锅粥里？

带走的话

墙这边、墙里面、墙那边的划分，是定型之后才有的；隧穿不是穿过，是一锅粥里一条很弱、却没断的路，在墙的那一边稳住了。隧穿，是一锅粥的特权。

小　账

这一处，读数是谁的？「电子在墙那边」是在墙那边稳住的；它在墙里待了多久，要等墙里放了钟、在钟那一层稳住一点点，才成为事实。

先在，还是发生？穿墙的说法默认墙这边、里面、那边是先划分好的；本书说，划分是定型之后的样子。

想一想

1. 你面前有没有一堵「墙」，其实是被许多人回写出来的划分？
2. 你知道哪个领域，墙还没有长出来，路还在一锅粥里？

◆

38

第 38 章

为什么记下的总是位置：偏好基与筛子

◆ 一、你一定有过这样的时刻

秋收的时候，林舟的爷爷在打谷场上筛谷子。

一大堆刚打下来的谷子，里面混着稻草、谷壳、小石子、泥块。爷爷端起一个竹筛，倒进去一簸箕，两手一晃一晃地摇。

摇一会儿，细的灰土和碎壳，从筛眼里漏下去了；粗的稻草和石子，留在筛子上，被爷爷一把一把拣出去；饱满的谷粒，留在中间，越摇越干净。

林舟小时候问过爷爷：「为什么谷子留下来，土就漏下去？」

爷爷说：「筛眼就那么大。比筛眼小的，摇着摇着就漏了；比筛眼大的，摇着摇着就浮到上面了。谷子正好，摇多久都在。」

摇多久都在。这四个字，林舟后来在量子力学里，又碰到了一次。

◆ 二、难题原样

第 11 章说过：一个量子态是不是叠加，取决于你用哪一组方向去问它。一个在竖直方向上确定的自旋，在水平方向上是叠加。量子力学的数学里，任何一组彼此垂直的方向，都是平等的，没有哪一组更特殊。

可是，日常世界里，我们看到的东西，几乎总是在某一组方向上确定的。杯子总是在某个**位置**上，不会处在「这里」和「那里」的叠加里。指针总是指着某个**刻度**，不会处在两个刻度的叠加里。

为什么偏偏是位置？为什么偏偏是刻度？

在数学上，你完全可以换一组方向，把一个「在这里的杯子」写成许多个奇怪状态的叠加。为什么自然界不用那些奇怪的方向，偏偏挑中了位置？

这叫偏好基问题。多世界诠释对它格外头疼：如果世界在测量时分岔，它沿着哪一组方向分岔？为什么分出来的总是「指针指这里」和「指针指那里」，而不是这两者的某种奇怪的叠加？〔据研究文献〕

◆ 三、各家怎样卡住

哥本哈根说：是我们选择用经典仪器去测，经典仪器只能显示位置和刻度。可经典仪器为什么只能显示这些，它不说。

一致历史说：你得先选一个框架，才能谈发生了什么。可选哪个框架，它也说是看你要问什么问题。

多世界早期的版本，干脆把偏好基当作一条额外的假设，写进理论里。

◆ 四、楚雷克的筛子

二十世纪八十年代起，楚雷克给出了一个很漂亮的回答，叫环境诱导的超选择，简称 einselection。〔核：大意〕

第 15 章讲退相干时提过它。这里讲细一点。

一个系统，一刻不停地和环境碰。不同的状态，经得起碰的程度不一样。

有些状态，一碰就和环境缠成一团，很快就散了，变得面目全非。

有些状态，碰来碰去，自己基本不变，只是在环境里留下一份份关于自己的副本。

楚雷克把这种「碰来碰去基本不变」的状态，叫作指针态。他还给了一个找指针态的办法，叫「可预测性筛子」：把所有可能的状态，放进环境里摇一摇，看哪些摇过之后，还最能被预测，还最像原来的自己。留下来的，就是指针态。〔核：大意〕

为什么指针态往往是位置？因为环境碰系统，最常见的方式，是空气分子撞它、光子照它，这些碰撞，都是在「它在哪里」上做文章。一个在确定位置上的东西，被空气分子撞了，还在那个位置附近；一个处在「这里」和「那里」叠加里的东西，被撞一下，两个位置就各自缠上了不同的空气分子，叠加就散了。

所以，在环境的筛子里，位置留了下来。

这就是爷爷那个竹筛：筛眼的大小，决定了留下什么。环境碰系统的方式，决定了哪些状态留下来。

◆ 五、本书怎样读这个筛子

楚雷克的回答，本书几乎全盘接受。本书只是用自己的话，再读一遍，补上一层。

本书说：**偏好基，是互动的样子挑出来的。**

第 7 章说，三个号位，在每一次发生里一起显出来；第 18 章说，测量链上每一层用哪一组格子去分，不是先摆好的。

现在可以说清：每一层用哪一组格子，是由那一层的互动，二号位，挑出来的。

空气分子撞杯子，这一场互动，是在「位置」上做文章。于是，在这一场互动里，被稳住、被回写成很多份的，是杯子的位置。位置，就成了这一层的格子。

磁场推电子，这一场互动，是在「自旋朝哪」上做文章。于是，在斯特恩—格拉赫那样的实验里，被稳住的，是电子沿磁场方向的自旋。那个方向，就成了那一层的格子。

所以，偏好基不是自然界先挑好的一组特殊方向，也不是我们任意选的。**它是这一场互动的样子，在许多次回写之后，稳出来的。**

楚雷克说的是土这一维：环境怎样把某些状态筛出来。本书补上的，是二号位：筛眼的大小，就是互动的样子；筛眼不是先在的，它是那一场碰撞本身。

◆ 六、指针态，就是能在平台上站住的状态

第 22 章说，冗余平台，是粗层站住的样子。

现在可以把偏好基和平台连起来。

为什么指针态能被大家看到？因为它在环境里被回写了很多份。一个在确定位置上的杯子，空气分子、光子，每碰它一次，就记下一份「杯子在这里」，而且记下的都一样。于是，「杯子在这里」这份消息，在环境里长出了一条长长的平台。

一个处在奇怪叠加里的杯子呢？它被碰一次，环境里记下的，不是一份一致的消息，而是两份互相矛盾的、各自缠在不同空气分子上的消息。它长不出平台。

指针态，就是能在环境里长出冗余平台的那种状态。

这样，偏好基、退相干、冗余平台、客观性，在本书里成了一件事的几面：互动挑出了一组格子；在这组格子里，状态能被一层层回写成很多份；回写得多，平台就长；平台长，大家看到的就一样。

◆ 七、筛子替多世界答了一半

本章开头说过，多世界对偏好基格外头疼。下一章要专门谈多世界，这里先把两章接上。

多世界的难处是：世界要分岔，总得沿着某一组方向分。数学上所有方向都平等，凭什么分出来的总是「指针指这里」和「指针指那里」？

楚雷克的筛子，替多世界答了这道题的一大半。现代的多世界讲法，大多借用退相干：环境碰出了哪一组指针态，世界就沿着那一组分岔。〔据研究文献〕这样，多世界不必再把偏好基当一条额外的假设写进去。

本书接受这个回答里物理的部分。可本书和多世界，在同一个筛子上，读出了不同的东西。

多世界读到的是：筛子定下了分岔的方向，筛完之后，每一个格子里的结果都在，各占一支。

本书读到的是：筛子定下了哪一组格子能长出冗余平台。筛完之后，这一次真正站上平台的，只有一个格子里的结果；别的格子，没有长出平台，留在理念界里，是一种可能。

同一个筛子，同一套数学，两种读法。区别不在筛眼，在筛完之后，没留下的东西去了哪里。这是第 39 章要接着讲的事。

这里只先记下一句：偏好基这道题，筛子答的是「沿哪组格子」；它没有答，也不必答「格子里的东西是不是都算数」。后一半，正是本书和多世界分路的地方。

◆ 八、为什么偏好基不是永远一样

这个读法，有一个推论：偏好基不是永远固定的。换一种互动，就换一组格子。

在日常环境里，空气和光碰的是位置，所以宏观世界的偏好基，是位置。

可是在一个被隔绝得很干净的实验里，环境几乎不碰，物理学家可以自己设计一种互动，挑出一组完全不同的格子。超导量子比特，偏好基是电荷或者磁通，看工程师怎么设计读出电路；囚禁离子，偏好基是能级。〔据研究文献〕

这说明，偏好基不是自然界的一条死规矩，它是互动的产物。谁来碰、怎么碰，决定了哪一组格子会稳住。

◆ 九、筛子是谁做的

这一章说，偏好基是互动挑出来的。读到这里，有人会追问一句：那互动又是谁挑的？空气为什么偏偏撞的是位置？这是不是把先在，从系统身上挪到了环境身上？

这一问，问得好。它对的地方在于：如果本书说「环境先在那里，带着一套固定的碰法，再去筛系统」，那确实只是把先在换了个地方存放。

本书的回答分两层。

第一层，在物理上，环境怎么碰，确实有它的来历。空气分子和光子跟一个杯子打交道，靠的是彼此之间的力，而这些力大多跟距离有关。离得近，就碰得重；离得远，就碰得轻。所以，环境「问」得最多的，是东西在哪里。这一点，楚雷克一派讲得很清楚，本书照收。〔核：大意〕

第二层，在本书的读法里，这份来历不是一张先写好的规定，而是一层更粗的定型。空气为什么是空气，光为什么这样传，力为什么随距离变，这些在宇宙这一层上，早已稳住了很久，被无数次回写过。它们对一个杯子来说，像是先在的；可它们本身，也是在某一层上稳住的结果。

这就是第 22 章说的那件事：平台一层托着一层。一层的筛眼，是下面一层已经定型的东西。粗层站得越久，越像一个背景；可它不是背景，它在推。

所以，本书不说筛子是从天上掉下来的，也不说是谁随手做的。筛子是许多层定型叠起来的样子。你在这一层看到的「环境偏爱位置」，是下面若干层已经稳住的力和材料，在这一层上的回写。

这样讲，也给偏好基的问题划了一条边界。本书能说清的，是「互动挑出格子」这一步。至于最底下那一层的力为什么是这个样子，本书不打算回答，那已

经出了量子测量的范围，也出了本书的范围。第 43 章会把这类问题记成尚未解决的事。

还有一个推论，可以顺手记下。既然筛眼是下面一层定型的东西，那么，只要下面一层被人为地改掉，这一层的筛眼也会跟着改。本章前面说，实验室里的工程师能让偏好基变成电荷、磁通或能级，正是这件事：他们先把环境隔开，再亲手搭一层新的互动，替自然界原来那层托底的东西，换了一块底。

◆ 十、本书的说法

本章收成一句：

偏好基不是自然界先挑好的，也不是我们任意选的；它是互动的样子，在许多次回写之后稳出来的那一组格子。指针态，就是能在环境里长出冗余平台的状态。

◆ 十一、这个解，在什么情况下要撤回

这个解的承重点是：偏好基由互动的样子决定。

如果有一天，发现在某种系统里，环境和系统的互动明明是在某一种量上做文章，可是稳住、被大家看到的，却是另一种和互动毫无关系的量，那么本书的读法就要修改。

迄今为止，楚雷克的筛子在各种系统里的预言，都和实验对得上。〔据研究文献〕

◆ 十二、一个完整的例子：一台老式收音机

林舟家里有一台老式收音机，有一个旋钮，拧一拧，就换一个电台。

空气里，同时有几十个电台的电波，混在一起，是一锅粥。收音机里的那个调谐电路，有一个固有的频率；拧旋钮，就是在改这个频率。

调到某个频率，收音机里的电路，就只和这个频率的电波「碰」得最起劲。别的频率的电波，碰一下就过去了，留不下什么。于是，这一个电台的声音，在收音机里被放大，从喇叭里出来，稳住了。

是谁挑中了这个电台？

不是电波自己。几十个电台的电波，在空气里是平等的。

也不是你凭空挑的。你只是拧了旋钮，可你拧到的那个位置，决定了电路和哪个频率碰得最起劲。

是那一场互动：收音机的电路和空气里的电波之间，怎样碰。

偏好基，就是那个旋钮拧到的位置。自然界里，环境替大多数东西拧好了旋钮，拧在「位置」上。在实验室里，物理学家可以自己去拧。

◆ 十三、一个老中医的手指

林舟有个高中同学，姓周，在镇上开了一家中医诊所，今年四十六岁。

有一回，林舟陪母亲去看病。周医生搭着脉，眯着眼，不说话，过了好一会儿才开口。林舟在一旁看着，忽然想起本章的筛子。

周医生的三根手指，按在手腕上，是一场互动。这场互动在什么上做文章？在跳动的快慢、轻重、深浅上。于是，被他的手指一次次稳住、被他记进脑子里的，是这几样。

换一个医生，带着一台血压计来，这是另一场互动。它在血管里的压力上做文章，被稳住、被写进病历的，是两个数。

再换一台验血的仪器，又是另一场互动。它在血液里某几种东西的多少上做文章。

同一个人，同一个下午，三种碰法，留下三组不同的格子。哪一组是「她身体本来的样子」？本章的回答是：都不是她身体先摆好的样子，都是那一场碰法挑出来、又被回写成病历、处方、复诊记录的格子。

这样说，不是在说哪一种更对。三组读数，各在自己那一层上稳住，各有用处。脉象帮周医生定方子，血压帮另一位医生定药量。它们不冲突，只是筛眼不同。

麻烦出在把某一组格子，当成了全部。只信仪器的人，会觉得脉象是玄的；只信手指的人，会觉得化验单是死的。两边都忘了，自己手里的，是一个筛子留下的东西。

林舟后来问周医生：「你摸了二十多年脉，手指是不是越来越准？」

周医生笑了：「不是越来越准，是越来越知道自己摸不到什么。」

这句话，像是本章的一个注脚。知道筛眼的大小，就知道哪些东西会漏下去。漏下去的，不是不存在，是这一场碰法不在它们上面做文章。

身体或心里的难处真的大了，请找医生或心理咨询师。多看几种筛子留下的东西，常常比只守着一种，更接近你要的那个答案。

◆ 十四、放回日子里

回到爷爷的竹筛。

人的世界里，也有很多筛子。

一所学校，用考试去筛学生。考试这一场互动，是在「答题对不对」上做文章，于是，被稳住、被记下、被一次次回写成档案的，是分数。分数，成了学校的偏好基。

可是，一个孩子身上，还有很多别的东西：好奇，耐心，动手的本事，对人的体贴。考试这个筛子，筛眼不对，这些东西，摇着摇着就漏下去了，不是因为它们不存在，而是因为这一场互动，不在它们上面做文章。

换一种互动，换一个筛子，留下来的就不一样。

明天能试的一件事：想一想，在你的单位或你的家里，哪一个筛子在决定「什么被记下来」？有没有什么好东西，因为筛眼不对，一直在漏？能不能换一种互动，让它留下来？

带 走 的 话

偏好基是互动的样子挑出来的：谁来碰、怎么碰，决定了哪一组格子会稳住；指针态，就是能在环境里长出冗余平台的状态。筛眼，就是那一场碰撞本身。

小　账

这一处，读数是谁的？杯子的位置，是在空气和光的那一场场碰撞里稳住的；换一种碰法，稳住的会是别的。

先在，还是发生？说自然界先挑好了位置，是先在；本书说，位置是互动在许多次回写之后筛出来的。

想 一 想

1. 你所在的地方，用的是什么「筛子」？它漏掉了什么？
2. 你有没有自己拧过一次「旋钮」，换了一种和人相处、和事打交道的方式，结果留下来的东西完全不一样？

◆

39

第 39 章

多世界：多出来的，不是世界

◆ 一、你一定有过这样的时刻

林小满高三那年，填志愿填到半夜。

两个学校，一个在北方，学物理；一个在南方，学金融。她在表格上来回改了三次，最后填了北方。

交表之后，她躺在床上睡不着，想：如果填的是南方呢？那个学金融的林小满，现在会在干什么？她会不会也躺在床上，想着那个学物理的自己？

上了大学，她在一本科普书里读到「多世界诠释」：每一次量子测量，宇宙都会分岔，每一个可能的结果，都在一个分支里实现。书上说，也许在另一个分支里，真的有一个去了南方的你。

她把这段话拍下来发给父亲。

林舟回了一句：「那么，哪一个才是你？」

◆ 二、难题原样

1957 年，美国研究生埃弗雷特，在博士论文里提出了一个大胆的想法。〔核：大意〕

他说：量子力学里那条最让人不安的规则，测量时的塌缩，根本不需要。波函数永远只按薛定谔方程平滑地演化，从不塌缩。

那么测量时发生的事，是这样的：被测的系统和仪器、和观察者纠缠在一起。每一个可能的结果，对应着一个分支：在一个分支里，仪器显示「上」，观察者看到「上」；在另一个分支里，仪器显示「下」，观察者看到「下」。两个

分支都是真的，都存在。每个分支里的观察者，都以为自己看到的是唯一的结果。

后来，德威特把这个想法叫作「多世界诠释」，推广开来。〔核：大意〕近几十年，以牛津的一批哲学家和物理学家为代表，多世界有了一个严整的现代版本。

多世界的吸引力很大。它不加任何新的规则，只保留薛定谔方程；它不需要塌缩，不需要观察者有特殊的地位，不需要那一刀。它在数学上最简洁。第 5 章那次调查里，大约每七个物理学家，就有一个偏好它。

可它也带来了几道难题。

一，宇宙在不停地分岔，分出天文数字那么多个世界，这些世界在哪里？

二，第 27 章说过，如果每个结果都成真了，「概率」是什么意思？为什么我们看到的频率，恰好是 $|\psi|^2$？

三，第 38 章说过，世界沿着哪一组方向分岔，也要另作交代。

还有一个更奇特的推论，叫「量子自杀」：一个人反复参加一个一半机会会死的量子实验。在多世界里，总有一个分支，他活下来了；而他只能在活着的分支里有经验。于是，从他自己的角度看，他永远不会死。〔据研究文献〕大多数物理学家认为，这个推论说明的是多世界的某种古怪，而不是一个可以去试的事。本书完全同意：这件事绝不能试。

◆ 三、多世界对在哪里

本书先公道地说，多世界对在哪里。

第一，它坚持薛定谔方程处处成立，拒绝在测量时加一条特别的规则。本书在第 18 章说，塌缩不是一瞬间的特殊动作，是层层回写；在这一点上，本书和多世界站在同一边：没有一条额外的、神秘的塌缩定律。

第二，它不给观察者特殊地位。本书在第 16 章说，读数作为现实界的事实，不需要意识。这一点，本书和多世界也一致。

第三，它把退相干收进了自己的讲法里，用退相干说明为什么分支之间不再干涉。第 15 章说过，退相干讲对了土这一维。

多世界是一套严肃的、内在一致的理论。本书不说它错了。本书要说的，是它把哪一维，当成了全部。

◆ 四、诊断：拒绝定型

第 9 章说过一句话：多世界，把整个宇宙一直放在一锅粥里。

现在可以说得更准。

在多世界里，路这一维，永远在一锅粥里：所有的路都在走，没有一条被选中、被稳住。分支之间不再干涉，是因为土把它们隔开了；可是在整个宇宙的波函数这一层上，所有的路都还在。

多世界不承认的，是定型。在它那里，没有一个读数，是在「只有这一个」的意义上收敛的。每一个读数，都只是「在这个分支里」的读数。

用本书的话：**多世界是一种路的中心主义：它让路这一维永远在一锅粥里，拒绝形状这一维的定型**。

这样做，有一个代价，这个代价，就是本章的题目。

◆ 五、多出来的，不是世界，少掉的是事实

很多人批评多世界，说它多出了太多世界，太奢侈。

本书不从这个角度批评。多出多少个世界，在一个数学上简洁的理论里，未必是缺点。

本书要指出的是：多世界多出来的，其实不是世界；它少掉的，是「事实」这个概念本身。

第 21 章说，事实，是各层收敛之后的读数，收敛了就改不了，任何人去查都查到同一个。

在多世界里，没有一个读数，在这个意义上收敛。「电子自旋向上」，只在一个分支里是真的；在另一个分支里，「电子自旋向下」也是真的。哪一个是「事实」？多世界的回答是：两个都是，各自相对于自己的分支。

可是，「相对于分支」的事实，还算不算事实？

林舟问女儿：「那么，哪一个才是你？」这正是问题所在。在多世界里，那个学物理的林小满，和那个学金融的林小满，都是真的。「你是谁」这个问题，在多世界里，没有一个收敛的答案。

这也是第 27 章说的概率难题的根：如果每个结果都发生了，「这个结果发生的概率是四分之三」，说的是什么？多伊奇和华莱士用理性下注来回答，可那是在一个已经没有唯一事实的世界里，重新造一个「该怎样关心」的规则。

多世界守住了路的完整，代价是放弃了事实的唯一。

◆ 六、本书怎样安放多世界的那个总波函数

那么，多世界里那个包含一切分支的总波函数，在本书里放在哪里？

本书说：它在理念界。

第 6 章说三块地。一个总波函数，写下了宇宙里所有可能的路，它是一个很有力的理念：用它，物理学家可以算出任何一层上的统计规律。可它不是现实界里的一个读数。现实界里，每一次测量，都只稳住一个读数，越过门槛，被回写成很多份，在一条冗余平台上站住。

多世界把理念界里那个总波函数，当成了现实界的全部。于是，现实界里一次次只来一回的稳住，被看成了「只是某个分支里的样子」。

本书把两块地分开：理念界里，总波函数完整地写着所有的路；现实界里，每一次，只有一个差异稳住。两块地各自稳住，又要对上：现实界里许多次稳住的频率，对上理念界里总波函数给出的 $|\psi|^2$。

这样，多世界的数学可以全部保留，它的那份「路的完整」，留在理念界；现实界里，事实依然是唯一的。

◆ 七、「你这只是换了个名字」

多世界的支持者读到本书安放总波函数的那一节，多半会回一句：你把总波函数放进理念界，把其余分支叫作「可能」，这不过是换了个名字。数学一样，预言一样，你凭什么说你的「可能」比我的「分支」更好?

这一句，有它对的地方，本书得先认下来。

在所有已知的实验里，两种讲法给出的数，一个都不差。下一节会说，这一章的分歧，主要不在实验上。如果「更好」只指「算得更准」，那本书的读法并不更好，多世界也不更好，两家打平。

可是，换名字，有时不只是换名字。

一个名字，会决定你接下来能问什么。把没稳住的路叫「另一个世界」，接下来很自然要问：那个世界里的人在干什么，他和我是什么关系，我该不该替他操心。这些问题，多世界的哲学家确实在认真地问。第五节说的那份「该怎样关心」的规则，就是从这里长出来的。

把没稳住的路叫「理念界里的一种可能」，接下来要问的，就换了一批：这份可能，会在下一次怎样回来；它在土里留下了什么；它的分量，和现实界里许多次稳住的频率，怎样对得上。这些问题，直接连着第 24 章的平方和第 42 章的登记表。

第 9 章说过，多世界把整个宇宙一直放在一锅粥里。这句话也可以从名字上看出来。「分支」这个词，带着树的样子，每一枝都长着叶子，都一样真；「可

能」这个词，带着路口的样子，路口有好几条路，可脚下只踩着一条。名字不同，画在人心里的形状就不同。

所以，本书不说多世界错了，只说两种叫法，把人的注意力引向了两个方向。本书选的方向，能把「事实」这个词留住，也能把概率留在「许多次稳住的频率」这件平常事上，不必再为它另造一套关心的规则。

还有一处，两家并不只是换名字。多世界说，那些分支「在」，和这一支一样实在。本书说，现实界里只稳住了一个，其余的不在现实界。这一句，在原则上是可以碰实验的，就是下一节和第 42 章第二条押的那一注。只要那一注还没开奖，两家就都只是在讲法上占优；本书不打算把讲法上的好处，说成实验上的胜利。

◆ 八、这个解，在什么情况下要撤回

本书对多世界的这个读法，承重点是：现实界里，每一次测量只稳住一个读数。

多世界和本书，在所有已知的实验里，给出完全一样的预言。这一章的分歧，主要是本体论上的，不是实验上的。

不过，有一个方向，也许能让两者分出高低：如果有一天，有人能把一个已经越过门槛、被回写成很多份、站在冗余平台上的宏观读数，和它的「另一个分支」重新干涉起来，显出干涉条纹，那就说明，那个「另一个分支」在现实界里依然在，只是被隔开了。那时，本书「现实界里只稳住一个」的读法，就要撤回，多世界就赢了。

这和第 28、30、33 章押的是同一注。它们合在一起，是本书最重的一注。

◆ 九、一个完整的例子：一次抛硬币，两种讲法

林舟在课上，用一枚由量子随机数控制的「硬币」，做了一个小演示：电脑连着一个单光子探测器，每次按一下按钮，一个光子打向一块半透半反的镜子，透过去，屏幕显示「正」；反射回来，显示「反」。

他按了一下，屏幕显示：正。

多世界的讲法：在这一刻，世界分成了两支。一支里，屏幕显示正，教室里的学生看到正；另一支里，屏幕显示反，另一群一模一样的学生看到反。两支都是真的。

本书的讲法：光子在镜子前，两条路在一锅粥里。透过去那一条，在探测器里被放大、越过门槛，被电脑、屏幕、四十个学生的眼睛、林舟的记录回写成很多份，站在一条长长的平台上。「正」，是一个收敛了的事实。反射那条路，没有稳住，它回到了理念界：它是总波函数里写着的一条路，是「如果再按一次，有一半机会出现」的那份可能。

一个学生问：「老师，那另一个看到『反』的我，在哪里？」

林舟说：「在你下一次按按钮的时候。他不在另一个世界里等着你，他在你的将来里，是一种可能。」

◆ 十、林舟夜里的那道算术

那天晚上，林舟给女儿回完「哪一个才是你」，自己却睡不着了。

他想起二十多年前，师范毕业那年。有一个去省城中学的名额，他犹豫了一个星期，最后留在了县里。后来他结了婚，有了林小满，在县中学一教就是二十年。

如果当年去了省城，会怎样?

他拿出一张纸，想算一算。可算到一半，他发现这道算术没法做。省城那个林舟，教的是另一批学生，娶的也许是另一个人，那个人家里也许就没有一个叫

林小满的女儿。他越往下想，那个人离他越远，远到最后，只剩一个名字和一个年纪是一样的。

本章的话，在这里换了一种样子。没走的那条路，在理念界里是一种可能。可这种可能，不是一个现成的人，在另一个地方好好地活着，等着你去比较。它只是一个很粗的轮廓，越往细处推，越推不下去。因为细处，要靠一天一天地回写才长得出来，而那条路没有被回写过。

这也是多世界和本书在日子里的分别。如果另一支真的在，那个省城的林舟就和他一样细，一样有血有肉，比较起来，难免有一种失落：他在那边，也许过得更好。如果另一支只是理念界里的一条路，那它从一开始就没有细处，没有什么可以拿来跟今天的日子一项一项地比。

林舟把那张纸折起来，夹进了备课本。

第二天早上，他在早读课上看见前排一个学生在打瞌睡，就走过去敲了敲桌子。那个学生抬起头，冲他不好意思地笑了一下。

这一下，是这边才有的细处。省城那条路，长不出这样一个早晨。

带着没走的路过日子，不必假装它不存在，也不必替它过一遍。它在你的土里，是一个轮廓；今天的日子，才是被一层层回写出来的样子。

◆ 十一、放回日子里

回到林小满那张志愿表。

那个去了南方、学金融的林小满，在哪里？

多世界说：在另一个分支里，真实地活着。

本书说：她在理念界里，是一条没有走的路。她不是假的，她是你曾经可能成为的样子，她让你在填表的那一夜，真的犹豫过。可是在现实界里，你只稳住了一个：北方，物理。这一个，被你这几年的每一天，一层层回写成了你现在的样子。

没走的那条路，不在另一个世界里过着另一种人生。它在你心里，是一种可能；有时候，它还会回来，变成你下一次选择时的一点参考。

第 36 章说过：没稳住的路，也是土的一部分。

明天能试的一件事：想一条你没走的路。别问「如果当初怎样」，问一句：那条路，现在还在我的土里吗？它让我今天的选择，有了什么不同？

带 走 的 话

多世界守住了路的完整，代价是放弃了事实的唯一；多出来的不是世界，少掉的是事实。本书把总波函数放回理念界，让现实界里的每一次，只稳住一个。

小　账

这一处，读数是谁的？「正」，在现实界里稳住了，是唯一的；「反」，在理念界里，是总波函数写着的一条路。

先在，还是发生？多世界让所有的路永远在一锅粥里，不承认定型；本书说，路在理念界里完整，在现实界里每次只稳住一条。

想 一 想

1. 你人生里那条没走的路，现在在哪里？它在你的土里，还是只在你的想象里？
2. 林舟问：「哪一个才是你？」你怎么回答？

◆

第 六 编 · 总判断

十二道难题，大多卡在同一处：把还在正在成形的东西，当成了已经定型的；或者把已经定型的东西，当成了还在一锅粥里的。猫早已稳住，朋友那一层没收敛，关联在比对时才稳，过去还没成为过去，芝诺是回写太勤，炸弹改了土，墙是定型之后的划分，偏好基是互动筛出来的，多世界把路的完整当成了全部。

第七编把账摊开：本书拿什么数据对过账，哪些只是相容，哪几注押在了实验上，自己最弱在哪里。



第　七　编

检验与可错：把账摊开

导　语

这一编四章，是本书给自己的体检。第 40 章拿光电倍增管和雪崩二极管的数据，对一笔账，并老实说明这笔账只算相容、不算判别。第 41 章讲弱测量和测量的撤销，看本书的「层」，不能放在哪里。第 42 章把全书押在实验上的几注，排成一张登记表。第 43 章写本书还没解决的事，和自认最弱的三处。

一句话：一套说法，说不出自己怎样会错，就不值得信；本书在这一编，把怎样会错，一条一条写出来。

40

第 40 章

放大链的账：相容，不算判别

◆ 一、你一定有过这样的时刻

林舟当了二十年物理老师，批过无数实验报告。

有一个学生，做单摆实验，测重力加速度。报告最后写：「测得 9.79，与理论值 9.80 符合得很好，证明了牛顿力学是正确的。」

林舟在旁边批了一行字：「符合，说明你的实验没做错；证明，还差得远。」

学生来问：「老师，对上了，为什么不算证明？」

林舟说：「因为另一套理论，如果也能算出 9.80，你这个数，就分不出谁对。你得找一个地方，两套理论算出来不一样，再去测。那才叫判别。」

本章要做的，是给本书的一笔账，批上同样一行字。

◆ 二、这笔账是什么

第 17 章说过，多重网格法有一个惊人的性质：网格细十倍，圈数几乎不变；圈数主要由层数决定，而层数大约随网格的细度取对数增长。

本书借这把钥匙读测量，自然会推出一个说法：**一个读数稳住所需的时间，主要取决于有多少层，而不是被放大的东西有多大。** 层数大约随放大倍数取对数增长，所以，稳住的时间，应该随放大倍数的对数增长，而不是随放大倍数本身增长。

这是一个能拿数据去对的说法。

◆ 三、光电倍增管的数据

光电倍增管，是最干净的分层放大链：每一级打拿极，就是一层。

一份公开的教学讲义里，给了两个例子。〔据研究文献〕

第一个：一支八级打拿极的小型管子，在一千伏电压下，总增益大约三百二十万倍。每一级的增益，大约六点五倍：六点五自乘八次，正好是三百二十万左右。从光子打上光阴极，到阳极上出一个脉冲，总渡越时间大约五点四纳秒。

第二个：一支九级打拿极的管子，加两千伏电压，均分到十个加速间隙，每个间隙两百伏。每一段加速，大约一点二纳秒，总共大约十二纳秒。

讲义里说得很清楚：总渡越时间，就是各级之间渡越时间的总和。

把这几个数摆在一起看：

总时间，大约等于层数乘以每层的时间。

总增益，等于每层增益的层数次方。

所以，总时间，大约和总增益的对数成正比。增益从三百万翻十倍到三千万，只需要多一两级打拿极，总时间只多一两纳秒，而不是变成十倍。

时间跟着层数走，跟着增益的对数走，不跟着增益本身走。

◆ 四、雪崩二极管的数据

单光子雪崩二极管，是另一种放大链。它没有一级一级的打拿极，雪崩是在一小块硅里连续发生的。

一篇 2024 年发表的研究论文，测了一种这样的器件。〔据研究文献〕论文里汇总了前人的结果：倍增区的厚度在零点一到一微米之间时，雪崩建立的时间，大约在零点二到三纳秒之间；薄的器件，最快可以不到零点一纳秒。

论文作者还讨论了器件尺寸的影响。他们的器件，比之前一种五十微米直径的器件小，他们原以为这会让雪崩横向扩展得更快，可实测发现，这种影响很小。建立时间，主要由倍增区有多厚决定，和器件横向有多大，关系不大。

用本书的话：雪崩建立的时间，取决于「层」，也就是电子在倍增区里要经过多少次碰撞、放大多少代；不取决于这块硅有多大。

◆ 五、相容

两组数据，都和本书的说法对得上：稳住的时间，跟着层数、跟着放大的代数走，不跟着东西的大小、不跟着放大倍数本身走。

这是一笔相容的账。

◆ 六、可是，它不算判别

现在，要批上林舟那一行字。

这笔账，用普通的物理，就能完全解释。

任何一种乘性的放大，不管是一级一级的，还是连续的，都有一个简单的规律：每过一段时间，数量就乘以一个倍数。要放大到 G 倍，需要的时间，就是 G 的对数，除以每段时间的增长率。〔核：这是指数增长的一般性质〕

光电倍增管里，每一级打拿极的渡越时间，由电极的几何形状和电压决定，用经典的电子光学就能算。雪崩二极管里，倍增区的厚度决定了电子要碰撞多少次，用半导体物理就能算。

这些计算，不需要多重网格，不需要层层回写，不需要 SDE 的任何一个词。

所以，就算这两组数据和本书对得上，一个物理学家也完全可以说：这只是打拿极的电子光学和硅的雪崩物理，和测量问题无关。

他说得对。

这笔账，只能说明本书的读法和数据不冲突；它不能说明本书的读法比普通的物理更对。

◆ 七、那它还有什么用

你可能会问：既然不算判别，这一章写它干什么？

有三个用处。

第一，它是一道必须过的关。如果数据显示，稳住的时间随放大倍数本身线性增长，那本书的多重网格读法，第一步就站不住了。它过了这道关。

第二，它让「层」这个说法，在物理里有了一个看得见、数得出的样子。第 18 章说，放大是一次次的限制，是粗粒化。光电倍增管的每一级打拿极，就是一次限制，你可以数出它有几级。

第三，它提醒本书：真正要押注的地方，不在这里。

第 26 章、第 29 章、第 30 章，都说到了本书和别的理论、或者和标准物理会给出不同预言的地方。那些地方，才是本书的判别。下一章和第 42 章，会把它们整理出来。

◆ 八、对上了，也可能是碰巧对上

本章说，放大链的数据只算相容。这里再往深处挖一层：相容，有时连「没被推翻」都要打个折扣。

原因在于，本书的说法和数据之间，隔着一道翻译。

「稳住的时间跟着层数走」，是本书的话。要拿去对数据，得先把「层」翻译成物理里能数的东西。在光电倍增管里，本书把一级打拿极翻成一层；在雪崩二极管里，把电子碰撞放大的一代翻成一层。这两次翻译，都是本书自己挑的。

挑法一多，就容易出事。如果哪一组数据对不上，翻译的人总可以说：「刚才层分错了，换一种分法再试。」这样一来，什么数据都能被说成相容。

这正是一个说法变得「怎么都输不了」的常见路数。它不必改自己的话，只要改翻译。

所以，本章这笔账，要连同它的翻译一起写下来，才算老实。本书在这里先把翻译定死：光电倍增管里，一层就是一级打拿极；雪崩二极管里，一层就是一代碰撞放大。以后再拿别的器件来对，也得先写明哪一样算一层，写在对数之前，不在对完之后。

这样做，相容这两个字才有一点分量。它的意思是：在事先定好的翻译之下，数据没有推翻本书。

还有一层折扣，也要说出来。本章选的两种器件，是本书在写书之前就知道会对得上的。光电倍增管的时间跟级数走，这在物理课上就讲过。一个说法，拿自己早已知道答案的例子去对，对上了，几乎不添什么信用。

真正添信用的，是事先不知道答案的例子。比如，先写下「某一种新器件的稳住时间，应当怎样随层数变化」，再去找人测。测出来对得上，才有一点意思；对不上，就要改。本章没有这样的例子，本书照实写在这里。

科学史上，有一个常被提到的故事：一套理论，事先说出了一个谁都没想到的结果，后来真的被测到了，大家才开始认真对待它。〔核：大意〕本章的账，离这样的故事还远。它是一道门槛，不是一份成绩单。

◆ 九、本书的说法

本章收成一句：

光电倍增管和雪崩二极管的数据，和「稳住的时间跟着层数走」相容；可这个结果，普通的级联放大物理就能解释，它只算相容，不算判别。

◆ 十、一个完整的例子：林舟带学生算一支管子

有一年，林舟带物理兴趣小组，拿一支旧的光电倍增管的说明书，让学生算一笔账。

说明书上写：十级打拿极，总增益约一千万倍，渡越时间约四十纳秒。〔以下为示意〕

林舟问：「每一级增益多少？」

一个学生用计算器算：一千万开十次方，大约五倍。

「每一级用了多少时间？」

另一个学生算：四十纳秒除以十，大约四纳秒。

林舟又问：「如果我想要一亿倍，增益再大十倍，要怎么办？」

学生们讨论了一会儿，说：「多加一两级就行了。五乘五是二十五，多加一级就是五十倍，多加一级半就够十倍了。」

「那时间呢？」

「多一两级，多四到八纳秒。」

林舟说：「好。增益大了十倍，时间只多了一点点。你们记住这件事。然后，你们再想一想：这是因为什么？」

一个学生说：「因为每一级都乘五，乘法长得快。」

林舟点头：「对。这就是物理课本上的答案，它完全够用。」

他没有讲多重网格。他只在心里想：在本书里，这件事还有另一种读法；可是在这间教室里，课本上的答案就够了。

◆ 十一、两套说法处处打平时

讲到判别，林舟的兴趣小组里有个学生，问过一个很难的问题。

「老师，要是两套理论，不管在哪里测，算出来都一样呢？那是不是永远分不出谁对？」

林舟想了一下，说：「有可能。」

这个回答，本书也得照实给。

物理和哲学里，都有这样的情形：两套讲法，在所有能测的地方给出一样的数，只在怎么讲上不同。这时，实验帮不上忙。本书和多世界，在今天的技术下，就近乎这样的一对；本书和标准量子力学的大部分教科书讲法，更是如此。

处处打平的时候，还能比什么？

可以比哪一套讲法，留下的谜少一些。比如，一套讲法要另外造一条规则，来说明概率是什么；另一套不用。这是一种比较，可它不是实验，是讲法上的省与费。

可以比哪一套讲法，能接住更多领域的事。本书第八编把读数的说法放到教育、健康和工作里，就是在试这一条。它接得住，不说明它在物理上更对；它只说明它在别处也有用。

还可以比哪一套讲法，更愿意给自己写死法。说得出「什么结果会让我撤回」的一方，至少让人知道该往哪里去找。

这三种比较，都有用，也都不是判别。本书不打算把它们包装成判别。在本书的用词里，判别只留给一种情形：同一个实验，两家事先写下不一样的数，测完只有一家对。

学生又问：「那要是一直等不到这样的实验呢？」

林舟说：「那就老老实实写『尚未判别』，接着找。」

第 43 章会把本书还在找的那几处，一条一条写出来。

◆ 十二、什么样的数据，才算判别

既然这一章的账只算相容，那么，什么样的数据，才算判别？

一个判别的数据，要满足一个条件：本书的读法预言一个结果，而普通的物理，或者某个对手理论，预言另一个结果。

放大链上，能不能找到这样的地方？

本书想过一个方向，还很粗，写在这里，留给后来的人。

普通的级联物理，只管放大的倍数和时间：每一级乘多少，每一级花多久。它不管放大之后的信号，有没有被复制到环境里、复制了多少份。

本书的读法，管的恰恰是复制：一个读数稳住，要的是被回写成很多份，形成冗余平台。

那么，如果能设计一条放大链，放大的倍数和时间都一样，可是一种情形下，信号被大量地复制到环境里；另一种情形下，信号被严格地关在一个封闭的系统里，不复制出去。普通的级联物理会说：两种情形下，放大一样，稳住的时间一样。本书会说：第二种情形下，读数还没有越过门槛，它在原则上还能被倒回去。

这样的实验，难做得很。可它是把这一章从「相容」推向「判别」的一个方向，本书把它记下，留给以后。

◆ 十三、怎样读一条实验新闻

本章讲的这件事，在读新闻时也用得上。

设想有一天，你在手机上刷到一条标题：「新实验证实，测量不需要观察者」，或者「物理学家首次看到波函数塌缩的全过程」。〔以下为示意〕这类标题，量子力学里隔一阵就会冒出一条。

本书建议你按四步来读。

第一步，找到实验本身做了什么。别看标题，看正文里描述的那一两句：测的是什么系统，变了什么，记下了什么。很多时候，你会发现实验做的事，比标题说的小得多，也具体得多。

第二步，问：这个结果，标准量子力学预言了没有？如果标准理论早就算出了这个数，实验只是测得更准、更干净，那它是一次漂亮的确认。它对所有诠释都一样友好，谁也不靠它赢。

第三步，问：有没有哪一家诠释，会预言一个不一样的数？如果有，这条新闻才可能是一次判别；如果没有，它就只是相容，像本章的放大链一样。

第四步，问：报道里，是谁在说「证实了某某诠释」？是做实验的人在论文里这样写，还是转述的人这样概括？前者也要打问号，后者更要。

林小满有一回把一条这样的新闻转给父亲，标题很响。林舟回了一句：「先别激动，第二步过了没有？」

林小满去查了。那个实验，测的是一个早就算出来的效应，只是第一次在某种新材料上做成了。她回父亲：「过了第二步，没过第三步。」

林舟说：「那就是好实验，不是大新闻。」

这句话，本书也想送给自己。将来如果有一条新闻，看起来站在本书这边，也要先过这四步。过不了第三步，它就只是相容；本书不会拿它当判别来用。

你在别的地方看到「研究证明」四个字，也可以照这四步走一遍。一份研究和你的想法对得上，是一件事；它能把你的想法和别人的想法分开，是另一件事。前者常有，后者少见。

◆ 十四、放回日子里

回到那个单摆实验的学生。

我们每个人，都容易犯同一个错：找到一个和自己想法对得上的例子，就以为证明了它。

一个人相信「早起的人更成功」，找到几个早起的成功人士，就觉得证明了。可是，晚起的成功人士也不少；早起的人里，不成功的也很多。对得上的例子，只说明你的想法没有被这个例子推翻，说明不了更多。

明天能试的一件事：挑一个你很相信的看法。别再找支持它的例子了，去找一个它和别的看法会给出不同结论的地方。只有在那里，你才知道它到底对不对。

带 走 的 话

放大链的数据和「稳住的时间跟着层数走」相容；可普通的级联物理也能解释它，所以只算相容，不算判别。对得上，不等于证明了。

小　账

这一处，读数是谁的？光电倍增管上那个五纳秒稳出来的脉冲，经过了八层；它的时间跟着层数走。

先在，还是发生？这一章不判先在与发生；它只记一笔账，并承认这笔账分不出高低。

想 一 想

1. 你相信的哪一个看法，一直只在用「对得上的例子」支撑？
2. 你能找到一个地方，让你的看法和另一个看法给出不同的结论吗？

◆

41

第 41 章

弱测量与撤销：层，不能放在哪里

◆ 一、你一定有过这样的时刻

林小满第一次谈恋爱，是大二的春天。

有一天晚上，她和男朋友在电话里有点小别扭。她说了一句：「你是不是根本不在乎？」

话一出口，她就后悔了。那边沉默了两秒。

她赶紧补了一句：「我不是那个意思，我是今天太累了。」

男朋友笑了一下：「我知道。」

事情就过去了。

后来她想，那句话，像是说出去了，又像是没说出去。它在电话那头，冒了一点头，在男朋友心里，大概留下了一点点什么，可是还没来得及变成一件「事」，就被她接下来那句话，轻轻地撤了回来。

如果她当时没有补那一句，男朋友挂了电话，第二天跟室友说了，那句话就收不回来了。

一句话，说出去的轻重，和收不收得回来，是连着的。

这一章要讲的，是物理学家在实验室里，怎样把一次测量「轻轻地说出去、再撤回来」。

◆ 二、实验原样

第 14 章提过弱测量：让仪器和系统只轻轻碰一下，每次只从系统身上带走一点点差异。

2008 年，美国加州大学圣塔芭芭拉分校的一个实验组，在一个超导量子比特上，做了一件更进一步的事：先做一次弱测量，再把它撤销。

步骤大致是这样的。

第一步，对一个处在叠加里的量子比特，做一次「部分测量」：只轻轻地问一下它是 0 还是 1，问得不彻底。如果这次测量「没有响」，量子比特的状态会被稍稍推向一边，可是叠加还在，只是变了形。

第二步，对量子比特做一个精心设计的操作，再做一次同样强度的部分测量。如果第二次也「没有响」，量子比特的状态，就回到了第一次测量之前的样子，连叠加的细节都复原了。

第三步，检查。实验结果表明：撤销成功的时候，状态确实复原了。

可是，撤销不是每次都能成功。第二次测量有一定的机会「响」，一响，就撤不回来了。

关键在于：**测量越弱，撤销成功的机会越大；测量越强，撤销成功的机会越小。测量强到彻底的时候，撤销成功的机会降到零。**

而且，从弱到强，撤销的成功率，是平滑地、连续地变小的，没有台阶。

后来，又有实验组在光子上，做了类似的实验，还用它来保护纠缠，不让它被环境破坏。

◆ 三、这对本书是什么

这组实验，对本书很要紧。它是一个约束。

本书说，读数是一层一层稳住的；越过门槛之后，就收敛了，撤不回来；在门槛之前，还能撤回。

如果把这个说法，用在这个实验的单个量子比特上，读成这样：测量的强度，是一级一级的台阶；弱的时候在门槛之前，能撤回；强过某一级，就越过门槛，撤不回。那么，这个读法就和实验冲突了：实验里，撤销的成功率是平滑地变小的，没有台阶，没有一个突然撤不回的点。

所以，**本书的「层」，不能放在单个系统的测量强度上。**

◆ 四、那层，该放在哪里

本书在第 14 章、第 22 章，其实已经说了「层」放在哪里，这一章只是把它说死。

层，不是一次测量的强度刻度，而是测量链上，一个差异被传递、被放大、被回写到越来越多的东西上去的那一级一级。

在这个超导量子比特的实验里，部分测量，是让量子比特和一个读出电路轻轻地碰一下。这一碰，在读出电路上，留下了一点点差异。可是，这一点点差异，在第一步「没有响」的情况下，**没有被放大，没有被传到下一级，没有被回写成很多份。** 它只在最细的那一两层上，冒了一点头。

所以，它能被撤回。

撤销能不能成功，取决于那一点点冒头的差异，有多大。测量越弱，冒头越小，撤回时需要「抹掉」的越少，成功的机会就越大。测量越强，冒头越大，要抹掉的越多，成功的机会就越小。这个大小，是连续的，所以成功率是连续的。

而一旦读出电路「响了」，那个差异就被放大，传到下一级、下下一级，被室温的电子设备记下，被电脑存进硬盘。这时，它越过了门槛，撤不回了。

撤不回的分界，不在测量强度的某一级，在差异有没有被放大、被传出去、被回写成很多份。

这和第 22 章押的那一注是一致的：门槛，就是冗余平台的起点。

◆ 五、挪一挪层的位置，算不算躲

这一章说，层不能放在测量强度上，要放在放大和回写上。一个挑剔的读者会说：这不就是被实验打了一下，赶紧把自己的说法挪个地方吗？下次再被打，是不是再挪？

这个担心，本书认为是对的，而且要认真对待。

一套说法被实验碰了，往后退一步，换一个地方站，这件事在科学史上常有。有时候，退这一步是修正，说法反而更清楚了。有时候，退这一步是躲，说法一退再退，最后退到什么也不说。两种退法，外表很像。

怎样分？本书用两条来分。

第一条，看退到的新位置，是不是事先就写过。第 14 章讲门槛时，第 22 章讲冗余平台时，本书已经说过：撤不回的分界，是差异被放大、被回写成很多份。本章没有发明一个新位置，只是把读者可能有的另一种读法，明白地排除掉。如果新位置是挨了打之后才临时想出来的，那就更像躲。

第二条，看退完之后，说法是变宽了还是变窄了。躲的说法，往往越退越宽，宽到什么结果都能接住。修正的说法，应当越退越窄。本章退完之后，本书能接住的结果少了一类：如果有人发现，一个读数在还没有被放大、没有被复制出去之前，就已经撤不回了，本书就输。这比退之前更容易输。

拿这两条量一量，本章这一步，本书愿意把它算作修正。可这个判断，是本书给自己下的，难免偏心。所以第 42 章把它登记为「自我约束」，写进表里，让读者以后可以拿着去查：本书下一次被实验碰到时，是不是还守着这两条。

如果哪一天，本书为了躲一个实验，把层又挪到一个从没写过、而且更宽的地方，读者可以把这一节翻出来，对着它说：这一回，是躲。

◆ 六、为什么这个约束是好事

一个说法，被实验约束住了，看起来是坏事：它少了一块地盘。

本书觉得这是好事。

第一，它让「层」这个说法，变得更清楚了。在这一章之前，读者可能会以为，本书说的「层」，是一个可以随便往哪里放的比喻。这一章说明了：它有一个确定的位置，就是测量链上的放大和回写；它不能被放到单个系统的测量强度上去。

第二，它让本书的预言，变得更锋利了。本书押的那一注，不是「测量强到某一级就撤不回」，而是「被回写成很多份之后就撤不回」。前者已经被实验否了；后者，迄今为止，所有实验都站在它这边。

第三，它说明，本书的读法，可以被实验纠正。一个说法，能被实验纠正，才是一个值得认真对待的说法。

◆ 七、撤回的时候，抹掉的是什么

撤销实验里，还有一个细节，值得单独说一说。

撤销成功的时候，量子比特回到了原来的状态。可是，第一次部分测量本来带出来的那一点点消息，也一起没了。实验物理学家对这件事讲得很清楚：撤销

成功，意味着你对量子比特的了解，回到了测量之前；你不能一边保住那份消息，一边又把状态复原。〔核：大意〕

这件事放在本书里读，正好合得上。

第一次部分测量，在读出电路上留下了一点差异，那一点差异，就是那份消息。撤销，是把这一点差异连同它在量子比特上留下的那一点变形，一起抹回去。抹回去了，消息也就没了，因为消息从来不在别的地方，就在那一点差异上。

这说的是：一份消息，和它所关于的那个变化，是一起发生的；要撤回变化，就得连消息一起撤。没有一种办法，能把消息先抄走，再把变化抹掉。

如果能抄走，那份消息就已经被复制到别处，回写成了不止一份。按本章的说法，那时就越过了门槛，撤不回了。

所以，「能撤回」和「什么也没留下」，是同一件事的两种说法。

这也可以和第 42 章第一条放在一起看。那一条说，门槛就是冗余平台的起点。撤销实验表明：在消息被复制出去之前，消息和变化同进同退；本书只是说，这和那一条的讲法对得上，不添分量。至于这能不能算判别，本书不认为能。标准量子力学，同样完整地预言了这一切。〔核：大意〕

◆ 八、弱值：一个旁枝

讲弱测量，还有一件事，常被提到，这里顺带交代一下。

1988 年，阿哈罗诺夫等人提出了一个概念，叫「弱值」：先把系统制备在某个状态，做一次弱测量，再在最后挑出某种结果的那一部分，把那一部分的弱测量读数平均起来。〔核：大意〕

奇怪的是，这样得到的「弱值」，有时候会大得离谱，超出这个量本来能取的范围，甚至是负的、复的。

这件事，引起过不少争论：弱值是不是系统的一个真实属性？〔据研究文献〕

本书的看法是：弱值，是一个在比对那一层才稳住的东西，和第 31 章讲的纠缠关联、第 33 章讲的延迟选择擦除里的条纹，是同一类。它要等最后的挑选做完，把数据分组，才显出来。它不是系统在弱测量那一刻就带着的属性。

把它当成系统先在的属性，就会觉得它离谱；把它当成比对那一层上稳住的东西，它就不离谱了。

◆ 九、平滑和门槛，怎样放在一起

读到这里，你也许还有一个疑问没解开：本书一面说撤销的成功率是平滑的，没有台阶；一面又说有一道门槛，越过就撤不回。平滑和门槛，怎么能同时成立？

答案在于，两件事量的不是同一样东西。

撤销的成功率，量的是单个系统上那一点差异有多大。差异可以大一点、小一点，没有最小的一格，所以成功率是平滑的。

门槛，量的是那一点差异有没有被传出去，传了多少份。这件事也不是一个开关。第 14 章说过，门槛不是一个点，是一段。被复制成两份、十份、一万份，撤回的难度一路往上走。

那为什么还叫门槛？因为走到某一段之后，难度涨得极快。复制到环境里成千上万处，要把每一份都找回来、对齐、抹掉，在实际上就做不到了。门槛这两个字，说的是这一段陡坡，不是一道墙。

所以，平滑和门槛，并不打架。在单个系统上看，一切都是平滑的；在复制的份数上看，也是平滑的，只是坡越往后越陡，陡到在实际上回不了头。

这样读，还能看清本书押的那一注到底押在哪里。本书不押「某一份数之后，原则上绝对撤不回」。本书押的是：撤不回的难度，跟着复制出去的份数走，不跟着单次测量的强度走。这只是把第 42 章登记表的第一条和第十二条合在一起说一遍，不是新添的一注。

◆ 十、本书的说法

本章收成一句：

弱测量的撤销，成功率随测量强度平滑地变化，所以本书的「层」，不能放在单个系统的测量强度上；层，是差异被放大、被传出去、被回写成很多份的那一级一级。撤不回的分界，是冗余平台的起点。

◆ 十一、一个完整的例子：一张没洗出来的底片

用一个老派的东西，帮你记住这件事：照相底片。

胶片相机，按下快门，光照在底片上，底片上的一些银盐分子，吸收了光，起了一点变化。这一点变化，肉眼看不见，叫潜影。

如果在显影之前，你把底片拿出来，在强光下晒一下，整卷底片都曝光了，那张潜影，就被盖掉了。你拍的那张照片，等于没拍过。

可是，一旦进了暗房，显影液一泡，潜影周围的银盐被成千上万地还原，变成一粒粒看得见的黑点，照片就定在那里了。你再拿到强光下晒，它也不会消失。

潜影，是一次很弱的「测量」：光在底片上留下了一点点差异，可没有被放大。它能被盖掉。

显影，是放大：一点点差异，被成千上万地复制，越过了门槛。它就盖不掉了。

而潜影能不能被盖掉，取决于光照得多强、留下的变化有多深：照得越轻，越容易盖掉。这是平滑的。真正让它从「能盖掉」变成「盖不掉」的，不是光的强度到了某一级，而是显影这一步：放大。

◆ 十二、林舟用铅笔批作业

林舟批作业，有一个多年的习惯：先用铅笔。

一沓实验报告摊在桌上，他第一遍看，用铅笔在页边上打记号：这里单位写错了，这里数据好像抄串了行，这里结论下得太急。铅笔的印子很淡。

第二遍，他把每一份再看一眼。有些记号，他看着看着，觉得是自己看错了，学生其实没写错，就拿橡皮擦掉。有些记号，他越看越确定，就拿红笔描一遍。

红笔描过的，第二天发下去，学生会改，会记住，会在下一份报告里注意。有几处特别典型的，他还会抄到教案本上，下次上课拿出来讲。到了这一步，那个错，就成了一件全班都知道的事。

林小满小时候问过他：「为什么不一次用红笔？」

林舟说：「红笔下去，就收不回来了。铅笔是给自己留的余地。」

这和本章讲的，是一回事。

铅笔的印子，是一次很弱的测量：林舟心里对这个学生，已经有了一点点判断，可这个判断只在页边上冒了一点头，没有被放大，没有传给任何人。它能擦掉。

擦得掉擦不掉，也是平滑的。铅笔按得轻，一擦就干净；按得重，擦完还留一道印子。没有哪一种力道，是一过就绝对擦不掉的。

真正让它收不回来的，不是铅笔按得多重，是红笔描过、发了下去、抄进了教案。那一刻，那个判断被回写成了很多份：学生的本子上，学生的记性里，全班的课堂上。这时候，即使林舟后来发现自己判错了，也得在课上再讲一遍，才能把它改过来。

做老师、做家长、做上司的人，都常常要对人下判断。先用铅笔，给自己留一点撤回的余地，是一种分寸。等确定了，再用红笔。别把每一个第一眼的印象，都直接描成红的。

◆ 十三、放回日子里

回到林小满那通电话。

那句「你是不是根本不在乎」，说出去的那一刻，是一次弱测量：它在男朋友心里，冒了一点头。她接着那一句「我是今天太累了」，是撤销：她在那一点头还没被放大、还没被回写成很多份之前，把它轻轻地抹了回去。

如果那句话，说得更重一点，比如带着哭腔，比如提起了一件旧事，冒头就大一些，撤回来就难一些。这是平滑的，没有一条明确的线。

真正让它撤不回来的，是放大：男朋友挂了电话，越想越委屈，跟室友说了，室友又说了几句火上浇油的话，第二天两个人见面，谁都记得昨晚那句话。它被回写成了很多份。

明天能试的一件事：下一次你说了一句后悔的话，别等，别想「算了，他应该不会在意」。在它还只是一点点冒头的时候，就把它撤回来。越早，越轻，越容易。

带 走 的 话

弱测量的撤销是平滑的，所以层不能放在测量强度上；层，是差异被放大、传出、回写成很多份的那一级一级。撤不回的分界，是冗余平台的起点。

小　账

这一处，读数是谁的？ 部分测量「没响」时，那一点差异只在最细一两层冒头，没有成为谁的读数，所以撤得回；「响」了，放大出去，就成了。

先在，还是发生？ 这一章修正的是本书自己：层不是测量强度的刻度，是回写的级数。

想 一 想

1. 你有没有一句话，是在它被「放大」之前，及时撤回来的？
2. 本书在这一章，被实验约束住了一块地盘。你相信的哪一个看法，也该让实验约束一下？

◆

42

第 42 章

可错条款登记：本书押在哪里

◆ 一、你一定有过这样的时刻

林舟年轻时，和学校里一位数学老师打过一个赌。

那年县里新修了一条路，数学老师说：「这条路修好，学校门口早上堵车会更厉害，因为原来走小路的车，都会挤到这条大路上来。」

林舟说：「不会，路宽了，车走得快，只会更通。」

两个人争了半天，谁也说服不了谁。最后，数学老师说：「这样，我们写下来。路修好之后，第一个月，每天早上七点半到八点，校门口那个路口，排队的车超过十辆的天数，超过一半，算我赢；不到一半，算你赢。」

两个人把这句话，写在一张纸上，各自签了名，压在教研室的玻璃板底下。

一个月后，数学老师赢了。

林舟后来说，那一次输了，他记了一辈子。不是因为输，而是因为那张纸：把一个说法写成一个能被数出来、能输掉的赌，才算真的说了点什么。

本章，就是本书压在玻璃板底下的那张纸。

◆ 二、为什么要登记

导论里说过：一套说法，说不出自己怎样会错，就不值得信。

前面四十一章，本书在许多地方，说过「这个解在什么情况下要撤回」。这些话，散在各章里，容易被忽略，也容易被悄悄改掉。

所以，本章把它们集中起来，排成一张表，写死。以后，本书或者任何一个读者，都可以拿着这张表，去对照新的实验。

表里分三类：

第一类，**判别注**：本书和某个对手理论、或者和标准物理的某种读法，会给出不同预言的地方。这些是本书真正押的注。

第二类，**相容注**：本书和标准量子力学给出相同预言的地方。实验一直站在这边，说明本书没错，但分不出本书比标准物理更对。如果实验翻了，本书和标准量子力学一起要改。

第三类，**自我约束**：已经被实验修正过的地方，写明本书不再那样说。

◆ 三、登记表

编号	本书的说法	什么结果会让它撤回	类别	见第几章
一	层层稳住才算事实；门槛就是冗余平台的起点	一个宏观记录，在环境里还没有形成冗余平台时，就已经不可撤回	判别注	22
二	已经越过门槛、形成冗余平台的读数，不能连同全部副本被倒回去	一个已被放大、被环境回写成很多份的读数，被完整地倒回，与另一支重新干涉	判别注（与多世界的实际分歧点）	28、30、33、39

编号	本书的说法	什么结果会让它撤回	类别	见第几章
三	没有回写，就没有塌缩	一个被隔绝得极干净、没有任何回写的大物体，叠加仍按与质量有关的速率自行散掉，速率合于自发塌缩理论的预言	判别注（与自发塌缩理论）	29
四	每一层的稳住都是上行与回写的两两配对	三缝干涉在扣除弯绕路径之后，测出确凿不为零的三阶项	相容注	26
五	纠缠的关联在比对那一层才稳住，单看一边看不出任何东西	纠缠可被用来超光速传递消息	相容注	31
六	波和粒子是同一个差异在两层上的分配，此消彼长	同一个对象上同时得到完全清楚的路径信息与完全清楚的干涉条纹	相容注	32
七	位置与动量是两种稳住，不能在同一层都稳到尖	同一个态上，位置与动量同时测得比肯纳德下限更准	相容注	34

编号	本书的说法	什么结果会让它撤回	类别	见第几章
八	芝诺效应来自回写太勤，强弱取决于测量有没有真的回写	不放大、不回写的轻碰，产生与强测量一样强的芝诺效应	判别注（弱）	35
九	炸弹检测靠的是「一走就稳住」的路改变了土	一个完全可逆、不回写的小装置，与真正会放大的炸弹，在实验里效果完全相同	判别注（弱）	36
十	隧穿要求那一段路不被回写	墙内强烈、不可逆的回写，完全不影响隧穿概率	相容注	37
十一	偏好基由互动的样子决定	稳住、被大家看到的量，和环境与系统互动所针对的量毫无关系	相容注	38
十二	层不放在单个系统的测量强度上	已被实验确认，本书不再主张测量强度有台阶	自我约束	41

◆ 四、三注判别

表里最要紧的，是前三条。它们是本书真正和别人分出高低的地方。

第一条和第二条，是一回事的两面。

本书说，事实是在冗余平台上站住的；站住之前，可以撤；站住之后，不能撤。

多世界说，另一个分支一直都在，只是被隔开了。原则上，如果你有一只足够巧的手，能把环境里所有的副本都找回来、对齐，你就能让两支重新干涉。

在现在的技术下，两种说法给出一样的预言：没有人有那只手。可是在原则上，它们不一样。本书说，平台站住之后，「另一支」在现实界里已经不在了，它只在理念界里，是一种可能；多世界说，它在。

随着技术进步，物理学家能操控、能倒回去的系统，会越来越大、越来越复杂。第 29 章说的那些越来越大的「猫」，就是这条路上的一步一步。如果有一天，有人在一个已经形成冗余平台的系统上做到了，本书输。

第三条，是本书和自发塌缩理论之间的。

自发塌缩理论说，大东西会自己塌缩，不管有没有回写。本书说，没有回写就没有塌缩。

这一条，实验物理学家正在一点点地逼近。他们把越来越大的东西，隔离得越来越干净，看它的叠加能保持多久。如果到某个尺度，隔离得再干净，叠加也保不住，而且散掉的速率正好合于自发塌缩理论，本书输。如果隔离得越干净，叠加保持得越久，自发塌缩理论的空间越来越小，本书的说法，就多一份支持。

◆ 五、相容注为什么也要登记

你可能会问：相容注，本书和标准量子力学给出一样的预言，为什么也要登记？

因为本书在讲这些地方时，给了它们一个读法，而这个读法，有它自己的承重点。

比如第四条，三缝干涉。标准量子力学说，三阶项为零，因为概率是平方。本书说，三阶项为零，因为每一层都是两两配对。如果有一天，三阶项不为零，标准量子力学要改；本书也要改，而且本书知道改哪里：某一层的稳住，不是两两配对。

登记相容注，是为了让本书在实验翻转的时候，不能躲在「标准量子力学也错了」的后面，假装自己没事。

◆ 六、弱的判别注

第八条和第九条，本书标了「弱」。

弱的意思是：这两条，本书和标准量子力学的分歧，不是很清楚。标准量子力学里，芝诺效应和炸弹检测的强弱，也和测量与系统缠得多深有关；本书说的「有没有回写」，和标准物理说的「测量有多强、纠缠有多深」，在很多情形下是一回事。

要让它们分出高低，需要设计一种实验，让「缠得深」和「回写得多」分开：一种情形下，缠得很深，却没有放大、没有回写；另一种情形下，缠得不深，却有放大、有回写。本书目前还没有想出一个干净的设计。这件事，留给第 43 章。

◆ 七、表外的那些话

这张表有十二条。全书说过的话，远不止十二条。没有进表的那些，是什么?

本书得把这件事说清楚，不然这张表会给人一个错觉：好像全书的每一句，都能拿去实验里碰。

进不了表的，大致有三类。

第一类，是讲法本身。比如「读数和它的承载者一起发生」，比如「三个号位每次总有一个冒在前头」，比如「总波函数在理念界」。这些话，是本书给量子力学配的一套读法。它们不预言任何一个和标准量子力学不同的数，也就没有一个实验能单独把它们推翻。它们站不站得住，要看它们能不能把各章的难题讲得更顺，留下的谜是不是更少。这是讲法上的比较，不是实验上的比较。

第二类，是本书借来的比方。比如千片拼图，比如竹筛、土坡、收音机。比方帮人看清，不帮人证明。一个比方不贴切，可以换；换了，书的说法不受影响。

第三类，是第八编要说的那些放回日子里的话。教育、健康、工作，本书在那里说的，是这套读法在别处也许有用。有没有用，要在日子里试，不在实验室里试。它们和物理上的输赢，没有连着。

把这三类说出来，不是为了给自己留后路，而是为了不让读者误会。一个读者如果读完这张表，以为本书的整套讲法都押在了实验上，那就把本书看得太硬了。反过来，一个读者如果以为本书什么都没押，只是在讲故事，那又看得太软了。

实情在两者之间：本书大部分是讲法；讲法里有三处，伸出了一只脚，踩到了实验能碰到的地方。那三只脚，就是前面写下的三注判别。

还有一句话要补：讲法虽然不进表，可讲法和那三只脚是连着的。如果三注全输，讲法即使还能自圆其说，也就失掉了它最硬的支点。到那时，本书该做的，不是守住讲法，是回到第一编，重新想亏空到底在哪里。

◆ 八、这张表本身，也是可错的

最后，本书要说一句：这张表，本身也是可以改的。

如果有读者指出，某一条的撤回条件写得太宽，宽到怎么都输不了，那这一条就该改紧。

如果有读者指出，某一条其实不是判别注，标准物理也能给出一样的预言，那它就该降为相容注。

如果有新的实验，落在了表里某一条上，那一条就要更新：赢了，写上「迄今站住」；输了，写上「已撤回」，并且在书里相应的章节，加上一段说明。

这张表，是本书的一次回写：把全书的说法，压成一张能被数出来的纸，交给后来的人去对。

◆ 九、为什么只押三注

林小满第一次看到这张表，给父亲发了一条消息：「十二条里只有三条是真押注，是不是太少了？」

林舟回：「你觉得多少算多？」

这一问，本书也想认真答一下。

押注的多少，不是越多越好。一套说法，如果处处都和标准量子力学不一样，那它多半已经错了。标准量子力学一百年没在实验里输过，导论说过，这是人类做过最靠谱的一门科学。一套新讲法，如果在大多数地方和它给出一样的数，那正是它没有乱说的标志。

一套讲法的分量，也不靠押得多，靠押得实。三注之中，第一条和第二条讲的是同一件事的两面，第三条和自发塌缩理论正面相对。它们都落在实验正在往前推的方向上：更大的叠加，更干净的隔离，更复杂的倒回。这三处，本书写得出撤回的条件，别人也能拿去查。

还有一件事要承认：三注之中，没有一注是今天就能开奖的。第一、二条，要等有人能倒回一个已经站上平台的读数，这在今天的技术下做不到；第三条，实验正在逼近，可还没到能下定论的时候。

所以，这张表现在的状态是：三注未开，相容注迄今站住，一条自我约束已经写明。这个状态，说不上本书赢了，只能说本书还没输，而且把会怎样输写在了明处。

林小满又问：「那要是一直不开奖呢？」

林舟说：「那就一直挂在那里。挂着，也是一种诚实。」

◆ 十、一个完整的例子：怎样用这张表

设想几年后，你在新闻里看到一条消息：某实验组让一个包含一百万个原子的纳米颗粒，处在两个位置的叠加里，保持了一秒钟。

你拿出这张表，对一对。

先看第三条：没有回写，就没有塌缩。如果这个颗粒被隔离得很干净，几乎没有任何回写，它的叠加保持了一秒，没有自己散掉，那么这个结果，站在本书这边，对自发塌缩理论不利，具体要看它的参数落在哪里。

再看第一条和第二条：这个颗粒，在叠加的时候，有没有形成冗余平台？如果它被隔离得很干净，环境里没有它位置的副本，那它就没有形成平台，它还在正在成形，能叠加，和本书一致，不构成挑战。

只有当消息说的是：这个颗粒，在两个位置上，**各自**已经被环境回写成了很多份，形成了平台，却仍然被倒回、重新干涉了，第二条才会被碰到。

这张表的用处，就是让你在看到一条新闻的时候，知道它碰到了本书的哪一条，碰得多重。

◆ 十一、第二条新闻：三缝的消息

前面用一条纳米颗粒的新闻，试了这张表。这里再试一条不一样的，看看相容注碰上新闻时，该怎么读。

设想几年后，你又看到一条标题：「三缝实验精度再提高，未见三阶干涉」。〔以下为示意〕

你拿出表来。这条落在第四条上，类别写的是相容注。

相容注的意思你已经知道：标准量子力学说三阶项为零，本书也说为零。实验又一次没看到它，两家都没事。所以，这条新闻对本书来说，是一个好消息，

可只是一个很小的好消息。它没有让本书比标准量子力学更对一分，只是说明本书在这一条上的读法，又一次没被推翻。

你如果在别处看到有人写：「新实验支持了某某关于玻恩规则的新解释」，就要多想一下。如果那个新解释和标准理论给出一样的三阶项，这个实验对它的支持，和对标准理论的支持，一样多，也一样少。

现在换一种结局。设想标题是：「三缝实验首次测到不为零的三阶项」。

这时，第四条被碰到了，而且是正面碰到。本书不能说「标准量子力学也错了，大家一起改」，就算了事。前面写过，登记相容注，就是为了不让本书躲在别人后面。本书要说清楚，自己哪一句要改：每一层的稳住，都是两两配对，这一句不再成立；第 24 章关于平方来历的读法，要跟着重写。

不过，即使是这样，你也先别急着下结论。第 26 章讲过弯弯绕的路：三阶项要扣除那些路径的贡献之后，才算数。一条新闻说测到了三阶项，第一步要问的，是这一项扣过了没有，是不是被别的组重复测到。〔核：大意〕

所以，同一张表，读两种结局的新闻，读法是一样的：先找到它落在哪一条，再看那一条是哪一类，最后问它碰得有多实。

这三步，比记住任何一个结论都更有用。结论会变，读法可以带走。

◆ 十二、放回日子里

回到教研室玻璃板底下那张纸。

林舟后来常对学生说：一个人要是从来不和别人打这样的赌，他的看法，就永远不会被纠正。

我们大多数人的看法，都没有写在这样的纸上。我们说「我觉得这样更好」，却从不说「如果出现某某结果，我就承认我错了」。于是，不管发生什么，我们都能找到理由，说自己没错。

明天能试的一件事：挑一个你最近很坚持的看法，写一张这样的纸：我的看法是什么；出现什么结果，我就承认错了；一个月后，我来数。压在一个你看得到的地方。一个月后，回来看它。

带 走 的 话

本书押三注判别：冗余平台是门槛；站在平台上的读数倒不回去；没有回写就没有塌缩。其余各条只算相容；被实验纠正的，写明不再主张。

小　账

这一处，读数是谁的？这张表里的每一条，都在等一个读数：那个读数一旦在实验里收敛，就会让某一条站住，或者撤回。

先在，还是发生？这张表本身，是本书的一次回写：把全书的说法，稳成一张能被数出来、能输掉的纸。

想 一 想

1. 你最坚持的那个看法，如果写成一张能输掉的纸，会是什么样子？
2. 你有没有因为「打赌输了」，而真的改变过一个看法？

◆

43

第 43 章

尚未解决的，和本书最弱的三处

◆ 一、你一定有过这样的时刻

林舟的爷爷是个木匠。

林舟小时候，看爷爷打一张八仙桌。桌面拼好了，四条腿装上了，爷爷把桌子翻过来，放在院子里的平地上，用手按按这个角，按按那个角。

有一个角，轻轻一按，桌子晃了一下。

爷爷没说话，拿起刨子，在那条腿底下刨了薄薄一层，再放平，再按。不晃了。

后来，爷爷把这张桌子送给了村里一户人家。交桌子的时候，他特意交代：「这张桌子，左边那条腿，木头里有个疤，我做的时候避开了，可那个地方比别处软一点。头几年要是潮了，可能会松，你们来找我。」

那户人家后来说，那张桌子用了三十年，左边那条腿，真的松过一次。他们找了爷爷，爷爷来紧了紧，又用了二十年。

林舟一直记得爷爷交桌子时那句话。一个好木匠，交活的时候，要说清楚哪里最软。

本章，是本书交活时的那句话。

◆ 二、尚未解决的四件事

先说本书没有解决、甚至还没有好好开始的事。

第一件：多体和量子场论里的层。

本书讲层，用的例子，大多是一个粒子、一条测量链。可真实的物理世界，是无数粒子缠在一起，是量子场在时空里处处起伏。在一块固体里、在一场粒子对撞里、在早期宇宙里，层是怎样分的？哪些是细层，哪些是粗层？上行和回写，在场论里是什么样子？

第 17 章提过，物理学家的重整化群，本来就是一种分层看世界的办法。也许，本书说的层，在场论里，就和重整化群的那些尺度有关。可这只是一个猜想，本书没有把它做出来。

第二件：引力和黑洞。

量子力学和广义相对论，至今没有统一。黑洞会不会吞掉信息，是物理学里争了五十年的难题。〔据研究文献〕

本书说，读数是在冗余平台上站住的，事实是被回写成很多份的。那么，一个掉进黑洞的东西，它的那些副本，还在不在？黑洞的视界，对回写意味着什么？本书完全没有能力回答。这里只把它写下来，作为一个以后可能要碰的地方。

第三件：SDE 数在量子系统里怎样量。

第 9 章借了第 53 号《SDE数学导论》里的 SDE 数：缠得多远、搭得多重，除以消息在一件事的时间里能走多远。本书一直说，借的是它的形状，不是它的数值。

可是，如果这个数真的有用，就应该能在一个具体的量子系统里，把它算出来：伞的半径是多少，重叠度是多少，消息传得多快，特征时间是多少。然后看，测量越过门槛的时候，这个数是不是真的越过了某个界。

这件事，本书没有做。它需要物理学家和 SDE 的研究者坐在一起，一个量一个量地对。

第四件：为什么自然界按伽辽金条件配对。

第 20 章说，玻恩概率可以读成上行和回写的一来一回，上行是回写的共轭转置。第 24 章说，平方是层与层之间能转、又能不多不少的唯一办法。

可本书没有回答：为什么自然界的上行和回写，偏偏要这样配？在多重网格里，这样配，是因为它在某种意义上最好；在量子力学里，本书只能说，它和「保持长度」一致，而保持长度，又是量子力学的基本假设。

这是本书离「推导」最近、也最远的地方。近，是因为只差一步；远，是因为那一步，本书不知道怎么迈。

◆ 三、本书最弱的三处

下面说本书自认最弱的三处。它们和上面四件事不同：上面是没做的事，下面是做了、可是做得不够结实的地方。

最弱的第一处：多重网格，有多少是同构，有多少是类比。

第 18 章，本书把多重网格的四个动作放到测量链上，并且老老实实分了四类：限制和粗粒化是同构；磨光和局部弛豫大体一样；粗层求解和越过门槛结构相像；延拓和塌缩后的状态，是最大胆的读法。

第 20 章的伽辽金条件，在数学上是严格的：玻恩概率确实可以写成 ψ† P P† ψ。

可是，「测量链真的是一个多重网格」，这句话，本书没有证明。本书证明的，是测量链和多重网格有几处结构相同；其余几处，是本书的读法。一个严格的物理学家，完全可以说：你把一个解方程的算法，硬套在一个物理过程上，相像不等于是。

本书接受这个批评。本书目前能做的，是把同构和类比分开标清楚，放在附录三里，让读者自己判断。

最弱的第二处：判别注太少，而且不好测。

第 42 章的登记表里，真正能和别人分出高低的，只有三条，而且三条都很难测：要么要把一个已经形成冗余平台的宏观系统倒回去，要么要把一个足够大的东西隔离得足够干净。以目前的技术，都还做不到决定性的检验。

一个说法，如果它的判别注都测不了，它就有退化成「只是一种说法」的危险。

本书知道这个危险。本书能做的，是把注押得尽量清楚，并且盯着实验的进展。第 29 章说的那些越来越大的「猫」，正在一步步地逼近第三条。

最弱的第三处：三个号位在物理里的样子，还不够清楚。

本书用三个号位，客体、互动、主体，来读测量：互动先冒在前头，客体在互动里被显出来，主体最后冒到前头。这个读法，在讲诠释之争、讲维格纳的朋友、讲炸弹检测时，很有用。

可是，在严格的物理里，「号位」对应什么数学结构？客体冒在前头和互动冒在前头，在态、算子、测量的语言里，各是什么样子？本书没有说清。它更多是一个看问题的角度，还不是一个可以算的东西。

这一处，可能要等《属性纠缠论》那本书，把实体属性发生学本身做得更细，才能回头补上。

◆ 四、说出最弱，是不是给自己留后路

有一种质疑，来得很快，也很有道理。

林小满把这一章的草稿给一个师兄看。师兄读完，笑了一下：「你们先把弱点全说了，别人再来批评，你们就说『我们早就承认了』。这不是认错，这是打预防针。」

这句话，先要承认它对的地方。

确实有这样的写法。有的书在序言里写一句「本书难免有疏漏，恳请指正」，然后正文里一个字也不让。这样的「认弱」，是一层客气的漆，刷在外面，不碰里面的木头。读者批评到哪里，作者都可以说：我早说过有疏漏了。

一句认错的话，如果说不出错在哪一条腿、松了会怎样、该从哪里查，它就只是一层漆。

所以，分别不在说没说弱，而在说得够不够具体。

爷爷交桌子时，没有说「这张桌子难免有毛病」。他说的是：左边那条腿，木头里有个疤，潮了可能会松，松了来找我。这句话指到了一条腿、一种天气、一个后果、一个找人的办法。它不是挡箭牌，它是一张可以拿来对的单子。

本章写的三处最弱，也想做到这样。第一处，指到了第 18 章四个动作里的哪几个是同构、哪几个只是读法。第二处，指到了第 42 章表里的前三条，说清了它们难在哪里。第三处，指到了号位还没有数学样子这一件事。每一处，都说了：要是有人在这里做出了东西，本书要改。

一张这样的单子，不会让本书更安全。它让本书更容易被打中。

师兄还是有点不服：「可你们说了要改，到时候真的改吗？」

这一问，本章答不了。能答它的，只有以后。第 42 章说过，这张表要在实验落下来的时候更新：赢了写「迄今站住」，输了写「已撤回」。一本书改不改，不看它现在怎么说，看那一天来的时候，它怎么做。

本书能做的，是先把那一天会落在哪里，写清楚。

◆ 五、为什么要把这些写出来

你可能会问：一本书，自己说自己哪里弱，不是自砸招牌吗？

本书的想法，和林舟的爷爷一样。

一张桌子，哪条腿软，木匠心里最清楚。说出来，用桌子的人，知道该小心哪里，坏了知道去找谁；不说，桌子在某一天突然晃了，用的人不知道为什么，也不知道该怎么修。

一本书，哪里弱，作者心里最清楚。说出来，读者知道该在哪里多想一想，物理学家知道该在哪里下手去挑战，后来的研究者知道该从哪里接着做。不说，这些地方迟早会被人发现，到那时，不但这一处站不住，别的地方也会被一起怀疑。

把最软的地方说出来，是一种回写：让读者和后来的人，有地方下手。

◆ 六、本书的说法

本章收成一句：

本书尚未解决的有四件：场论里的层，引力与黑洞，SDE 数在量子系统里的量法，自然界为什么按伽辽金条件配对。本书最弱的有三处：多重网格的同构与类比之分，判别注少而难测，号位在物理里的数学样子。

◆ 七、这本书自己，也还在正在成形

本书讲了四十多章的一锅粥、正在成形、定型。到这一章，可以拿这三个词，回头看一看本书自己。

一本书里的话，不是一样稳的。

有一些话，在本书写下之前，就已经定型了。贝尔不等式被实验一再违背，Kochen 和 Specker 的定理，玻恩规则一百年没被推翻。这些是物理自己稳住的，站在一条很长的平台上。本书只是从平台上取了一份，照原意讲。

有一些话，本书自己稳住了一部分。比如第 20 章那一条：玻恩概率可以写成 $\psi^\dagger\ P\ P^\dagger\ \psi$。这在数学上是严格的，任何人拿笔去算，都会算出同一个结果。可是，把这条式子读成「上行与回写一来一回」，是本书的读法。式子定型了，读法还在正在成形。

还有一些话，坦白说，还在一锅粥里。号位在物理里是什么数学样子，SDE 数在一个量子比特上怎么量，场论里的层怎么分。这些地方，本书有方向，有猜想，没有成形的东西。

第四编说过，稳住要一层层来：细层先冒头，往上传，在粗层上对一对，再回写下来改细层。各层收敛，才是事实。

拿这句话看本书，事情就清楚了。本书现在做到的，是在自己这一层上，把能对的对了一遍。它还没有经过物理学家那一层，没有经过实验那一层，也没有经过时间那一层。那几层不对上，本书的大多数说法，就还只是正在成形。

这样看，本章列出的四件未解和三处最弱，不是本书的几个角落。它们正是本书还没收敛的那几层的位置图。下面那份交给研究生的清单，也就不是客气话：它是在告诉后来的人，往哪一层上走，能帮这本书稳住，或者帮它散掉。

两种结果，本书都认。一个还在正在成形的说法，被下一层改掉，也是一次发生。

◆ 八、一个完整的例子：一份交给下一个人的清单

设想有一位年轻的物理学研究生，读完了这本书，想接着做。她可以从哪里下手？

如果她擅长计算，可以从最弱的第一处下手：找一个具体的测量链，比如一个超导量子比特的读出链，把它写成严格的多层模型，看看它的每一层，是不是真的满足伽辽金条件；如果满足，在什么意义上；如果不满足，差在哪里。

如果她擅长实验，可以从最弱的第二处下手：设计一个实验，让「缠得深」和「回写得多」分开，好让第 42 章的第八、第九条，从「弱判别」变成真正的判别。

如果她擅长理论，可以从尚未解决的第三件下手：在一个具体的量子系统里，把 SDE 数的四个量，一个一个定义出来，算一算。

如果她对哲学有兴趣，可以从最弱的第三处下手：给三个号位，找一个严格的数学样子。

这四条路，任何一条走通了，本书都要改，要么改得更结实，要么改掉。

◆ 九、押注和最软处，是两张单子

第 42 章写了一张押注表，本章又写了一张最软处的单子。你可能会觉得，这是一回事说了两遍。

不是。两张单子，管的是两件事。

押注表，是对外面说的：世界要是出现某某结果，本书就输。它等的是一个读数，从实验里来，落在某一条上。

最软处的单子，是对自己说的：在没有任何新实验的今天，本书哪几处，本来就没扣死。它不等外面的读数。它说的是，本书自己这一层，哪里还没对上。

一个说法，可以押注押得很清楚，却在自家的推理里有一处松。也可以推理处处扣紧，却一注也没押。前一种，赌得起，经不起细看；后一种，经得起细看，输不了，也就没说出什么。

两张单子放在一起，才是一份完整的交代。

周三晚上十点，林小满在宿舍写一份实验报告。数据处理完了，结论也写好了：测到的衰减常数，和理论值对得上。

写到最后，她想起这两章，在结论后面加了两段。

第一段，是押注：如果下周换一块样品，重测的数和这次差出两倍的误差棒以上，这份结论就要撤回。

第二段，是最软处：这次的本底，只扣了一次，扣的方法是她自己想的，没跟师兄对过；要是有问题，多半出在这里。

第二天，助教在第二段旁边画了一个圈，写了一行字：本底的扣法，周五来找我，一起看一遍。

周五，两人对了一遍，扣法没大错，有一处要改小一点。改完，结论还站着，误差棒宽了一些。

明天能试的小办法，就是林小满这一晚：交一份东西，结尾写两句。一句写「什么结果出来，我就认这次错了」；一句写「不等任何结果，我自己最没把握的是哪一处」。两句分开写。

◆ 十、放回日子里

回到爷爷交桌子时那句话。

你交一份工作，交一份报告，交一个方案，会不会说一句：「这里，我做得最没把握」？

很多人不说。怕说了，别人觉得自己不行。

可是，你不说，接手的人就不知道该在哪里小心。等到那个地方真的出了问题，他会想：你怎么不早说？

明天能试的一件事：下一次交一份东西，在最后加一段，只写一句话：「这份东西里，我最没把握的是某处，原因是某某，如果出了问题，可以从这里查起。」看看对方的反应。

带走的话

本书尚未解决四件事，自认最弱三处；把最软的地方说出来，是一种回写，让后来的人有地方下手。

小　账

这一处，读数是谁的？本书的每一个判断，都等着后来的读者，在他们那一层上，去对、去稳、去改。

先在，还是发生？一本书，也不是先在的定论；它在读者一层层的回写里，接着发生。

想一想

1. 你最近交出去的一份东西，哪里是最软的？你说了吗？
2. 如果你是那位研究生，你会从哪一条路下手？

◆

第 七 编 · 总判断

放大链的数据只算相容；弱测量的撤销约束了本书，层不放在测量强度上，而放在回写的级数上；本书押了三注判别，其余只算相容；尚未解决的有四件，最弱的有三处。一套说法，说清了自己怎样会错，才配被人认真对待。

第八编回到人间：一个读数是谁的，这件事放到知识、教育、健康、工作和 AI 里，会改变什么。



第　八　编

回到人间：一个读数，在日子里

导　语

这一编四章，把一百年的物理难题，放回日子里。第 44 章讲知识：补上两处亏空之后，「我知道」是什么意思。第 45 章讲教育：一个孩子「会了」，什么时候算事实。第 46 章讲健康：一张化验单上的数，是谁的。第 47 章讲工作和 AI：一台机器给出的回答，什么时候才算数。

一句话：读数和它的主人一起发生，层层回写才稳；这件事，在实验室里是物理，在日子里是知识、学习、身体和工作。

44

第 44 章

知识是谁的：两处亏空补上之后

◆ 一、你一定有过这样的时刻

林小满大四那年，参加了一个读书会。

那天读的是一篇讲气候变化的文章。读完，一个同学说：「我知道全球变暖是真的。」另一个同学说：「你怎么知道？你自己测过吗？」

第一个同学说：「我没测过。可是全世界的科学家都这么说。」

第二个同学说：「那你知道的，是科学家的话，不是全球变暖本身。」

两个人争了起来。主持人让大家想一想：我们说「我知道」的时候，知道的到底是什么？是事情本身，是别人的话，还是我们自己心里的一个想法？

那天回宿舍的路上，林小满想起了导论里那一夜，想起了本子上那个数：这个读数是谁的？

现在，她又多了一个问题：这份知识，是谁的？

◆ 二、知识论的老问题

两千多年来，哲学家对「知识」，有一个流传很广的定义：知识，是被证成的真信念。〔核：大意，常追溯到柏拉图《泰阿泰德篇》〕你相信一件事，这件事是真的，而且你有充分的理由相信它，你就知道它。

这个定义，背后有一张图：外面有一个世界，世界里的事情本来就是那样；我心里有一个信念；如果我心里的信念，和外面的事情对上了，而且我有理由，那就是知识。

本书第 4 章说过，这张图里，藏着两处亏空。

第一处：外面那个「本来就是那样」的世界，客体，它是什么？康德说，它是物自体，不可知。量子力学说，它的属性不先在。

第二处：我，主体，真的先于我和世界的互动而在吗？近几十年的哲学，把主体打碎了；本书第 7 章说，主体是三号位在某一次发生里冒到前头。

两处亏空同时出现，知识的那张图，就悬空了：信念和事情对上，可是事情不先在，信念的主人也不先在。

◆ 三、补上之后，知识是什么

这本书前四十三章，一直在补这两处亏空。现在，可以把补好之后的样子，用在知识上。

第一，知识是一个读数。 不只是实验室里光电倍增管的读数，而是任何一种「我知道」：我知道今天下雨，我知道勾股定理，我知道全球在变暖。每一种「我知道」，都是一个差异，在某些层上稳住了。

第二，知识和它的主人一起发生。 第 6 章说，承载者和属性一起发生，中间是乘号。「我知道今天下雨」，发生的时候，「下雨的今天」作为客体显出来，「推开窗那一下」作为互动显出来，「知道的我」作为主体冒到前头，「下雨」这个属性稳住。四样东西一起。

第三，知识是一层层稳住的。 第四编说，读数要经过许多层的上行和回写，才收敛。知识也是这样：一个人看到雨，是一层；说给家人听，家人也看了

一眼，是一层；天气预报说今天有雨，是一层；气象站的雨量计记下了，是一层。各层对上了，「今天下雨」，就是一个事实。

第四，知识落在三块地上。 第 6 章和第 16 章说，现实界、理念界、自我界，三块地上各有东西稳住，又要彼此对上。「我知道全球在变暖」：在现实界，是温度计的读数、冰川的退缩；在理念界，是气候模型、科学的共识；在自我界，是「我」相信它、为它担心。三块地对上了，它才是一份完整的知识。

◆ 四、回到那场争论

现在回到读书会上那场争论。

第二个同学说：你知道的，是科学家的话，不是全球变暖本身。

用本书的读法，这句话说对了一半。

说对的一半是：第一个同学自己没有测过。在现实界那一层，她没有亲自参与稳住。她的知识，是在理念界和自我界上稳住的：她相信了科学家的话。

说错的一半是：这不等于她不知道。第 22 章说，客观，是冗余回写出来的。全球变暖这件事，在现实界里，被成千上万个气象站、卫星、冰芯、海洋浮标，回写了很多份，站在一条很长的平台上。第一个同学没有亲自去测，可是她从平台上取了一份。从平台上取，取到的，和亲自去测的人取到的，是同一份。

你不需要亲自测过，才算知道；你需要从一条已经站住的平台上取。

而判断一份知识是不是站在平台上，有一个办法：看它是不是被许多彼此独立的来源，各自稳住、彼此对上。第 22 章那个面馆的例子，就是这个意思：随便问三五个人，他们独立地说同一句话，你就站在了平台上。

◆ 五、知识的谱系

本系列第 337 号《知识的谱系发生》讲过一句话，大意是：知识不是人人都一样的认识，而是在某个社区里对效的认识；「我」，是最小的那个社区。〔据研究文献〕

用本书的话，这句话可以读得更细：一份知识，在多大的社区里站住，就是它的冗余平台有多长。

在一个人心里站住，是最短的平台：只有一份。

在一个家里、一个班、一个课题组里站住，平台长了一些。

在一个学科、一个国家、全世界的科学家之间站住，平台很长很长。

平台越长，这份知识越难改，越像「客观」。平台越短，越容易被一次新的读数推翻，也越容易被看成「只是某个人的看法」。

可是，所有的平台，都是从一份开始的。全世界都知道的事，最初，也只在某一个人的一次读数里，冒了一点头。

◆ 六、平台长，就一定对吗

读到这里，你可能会想起一件事。

一千多年里，大多数人都相信太阳绕着地球转。天文学家这样算，教会这样讲，老百姓抬头也这样看。这条平台，够长了吧？可它错了。

这个质疑，说对了一件要紧的事：平台长，不等于不会错。本书不打算躲开它。

先看那条平台是怎么长出来的。很多人说「太阳绕地球转」，可他们大多不是各自去看、各自去算，再碰巧对上的。他们是从同一个源头，一遍一遍转述下来的。一句话被转述一万次，只算一份，不算一万份。

第 22 章讲冗余平台，要紧的是「彼此独立」。面馆那个例子里，三五个人各自说出同一句话，他们之间没有串过。这样的几份，才是几份。

所以，判断一条平台，不能只数它有多少人说，要看它有多少条彼此独立的来路，各自稳住，又对上了。

再看那条平台是怎么倒的。它不是被一个更响的声音压倒的。是天文学家把行星的位置一夜一夜记下来，越记越细，细层上的读数，和粗层上「地球在中间」的那张图，越来越对不上。对不上的地方攒多了，粗层只好改。第四编说过，细层的偏差送回粗层，粗层就要校正。一条平台倒掉，也是这样一次回写。

这样看，平台长和平台对，是两件事。长，是说它被回写了很多份，很难改。对，是说它的各层还在彼此对上。一条很长的平台，细层上一直有对不上的读数冒头，它就是在松。

本书说「你要从一条已经站住的平台上取」，还要补半句：取的时候，也看一眼，细层上有没有一直对不上的东西。有，就别把这一份抓得太死。

还有一层，也别忘了。今天这条站得很长的平台，比如光速那个数，也是这样一次次被细层追问过、没有被追倒，才站到今天。它站得住，不是因为没人敢碰，是因为碰了很多次，各层还对得上。

这不是说什么都别信。是说，信的时候，知道自己信的是哪一条平台，它有几条独立的来路，它的细处还对不对得上。

◆ 七、发现，还是发生

本书在第 5 章说，发现学的问法是「那里本来有什么」，发生学的问法是「它是怎样发生出来的」。

放在知识上，发现学说：知识是发现世界本来的样子。真理在那里，等着被我们找到。

发生学说：知识是在主体、客体、互动之间，一层层稳出来的读数。它是事实，发生了就改不了；可它不是先在那里、等着被找到的。

本书不是说发现学错了。第 5 章说过，在稳住了的世界里，发现学又快又准。你学勾股定理，就当它是被发现的，完全没问题：它在理念界里，已经在一条长得无边的平台上站住了，你从哪里取，取到的都是它。

本书只是说：在知识还没有稳住的地方，在一门新学科刚刚冒头的地方，在一个孩子第一次学一件事的地方，在一台 AI 第一次回答一个问题的地方，发现学的问法会失灵。那里，要用发生学去问：它是怎样一层层稳住的？哪一层还没稳？

◆ 八、本书的说法

本章收成一句：

> **知识，是一个在主体、客体、互动之间一层层稳住的读数，落在三块地上，彼此对上；它在多大的社区里站住，就是它的冗余平台有多长。你不需要亲自测过才算知道，你需要从一条已经站住的平台上取。**

◆ 九、一个完整的例子：林小满怎样知道一个物理常数

林小满的物理课本上，写着光速：每秒二十九万九千七百九十二点四五八公里。

她是怎么知道这个数的，值得追一追。

她没有亲自测过。她是从课本上读到的。

课本上的这个数，来路很长。十七世纪，罗默用木星卫星的蚀推算过光速；十九世纪，菲佐、傅科在地面上测过；二十世纪，物理学家用越来越精密的办法，测了一遍又一遍。1983 年，国际计量大会干脆把这个数定死，反过来用它来定义「米」。〔核：大意〕

这个数，经过了三百多年、无数个实验室、无数次独立的测量，各层对上，站在了一条长到不能再长的平台上。最后，它被写进了「米」的定义里：它从一个被测的读数，变成了一把尺子本身。

这是一个读数，被回写到极致的样子：它不再只是一个事实，它成了土。后来所有的测量，都站在它上面。

林小满从课本上读到它，是从这条平台的最末端，取了一份。她取到的，和三百年前罗默第一次推算时那一点点冒头的差异，是同一件事的两头。

◆ 十、知识的三种稳法

第 8 章说，属性有三种偏重：形状、路、土。知识也一样，有三种稳法。

一种知识，偏重在形状上：一个事实，一个数，一个名字。「光速是每秒约三十万公里」「北京是中国的首都」。它稳在一个样子上，可以被一句话说完。

一种知识，偏重在路上：一种做法，一套手艺，一条推理。「怎样骑自行车」「怎样解一元二次方程」「怎样把一道菜炒得不糊」。它稳在一串有先后的动作上，说不完，要一步一步做出来。

一种知识，偏重在土上：一种关系，一种默契，一种对一个领域的整体感觉。老医生看一眼病人的脸色就觉得不对劲，老农看一眼天就知道要下雨。它稳在许多东西缠在一起的那片地上，很难说出来，可它是真的。

今天的学校，最擅长教第一种，也最擅长考第一种。第二种，要靠练；第三种，要靠在一片土里待得够久。

AI 到来之后，第一种知识，越来越容易从平台上取：你问一句，它就告诉你。第二种和第三种，AI 能帮你，可替不了你：骑车的那一串动作，要你自己的身体去稳；对一个领域的整体感觉，要你自己在那片土里一次次地碰。

所以，在 AI 的时代，一个人要多花力气的，可能正是后两种稳法。

◆ 十一、家庭群里的一条消息

周四晚上九点多，林舟批完作业，拿起手机。

家庭群里，他母亲转来一条消息：「紧急通知，明天起全城停水三天，请大家赶快储水。」后面跟着三个感叹的表情。

母亲又补了一句语音：「你快去接几桶水，楼下超市的桶装水都快卖光了。」

林舟没有马上去接水。他先追了一追这条消息的来路。

第一层，母亲是从哪里看到的？她说是老年合唱团的群里，一位老姐妹转的。第二层，那位老姐妹又是从哪里看到的？母亲去问，回来说：是另一个群里转的，不知道谁发的。追到这里，来路断了。

一条消息，转了好几道手，可每一道都是转述，不是谁亲眼看见。它在很多个手机里都有，算起来，只有一份。

林舟又换一个方向，去找彼此独立的来路。他打开自来水公司的公众号，看了最近的公告：有一条，说的是城东一个片区，下周二白天检修管道，停水八小时。他再去看本地新闻，说的是同一件事。他又问了住在城东的一个同事，同事说小区门口确实贴了通知。

三条来路，各自独立，说的是同一句话：城东，下周二，八小时。这一份，站在了平台上。

「明天全城停水三天」，没有一条独立的来路接得住它。它很可能是那条检修通知，被转了几道手，转走了样。

林舟在群里回了母亲：「妈，查过了，是城东下周二停八小时，我们家不在那一片。不用接水。」

母亲回了一句：「那我跟合唱团的人说一声。」

这一句，是一次回写。一条走了样的消息，在一个群里被改了回来。

明天能试的小办法，就是林舟那晚做的事：收到一条让你着急的消息，先别动手，花五分钟，往回追三层；追不下去的，就去找两条和它无关的来路，看它们说的是不是同一句。对上了，再去接水。

◆ 十二、放回日子里

回到读书会上那场争论。

我们每天知道的事，绝大多数，都不是自己亲自测过的。新闻里的事，书上的事，医生说的事，老师说的事。

这不丢人。没有一个人能亲自测过所有的事。

要紧的，是分清：我知道的这件事，站在一条多长的平台上？它是被许多彼此独立的来源各自稳住、彼此对上的，还是只有一两个人说过，被反复转述？

明天能试的一件事：挑一件你「知道」的事，追一追它的来路。你是从哪里知道的？那个来源，又是从哪里知道的？追三层，看看它站在一条多长的平台上。

带走的话

知识是一层层稳住的读数，和它的主人一起发生，落在三块地上；你不必亲自测过才算知道，你要从一条已经站住的平台上取。

小　账

这一处，读数是谁的？「全球在变暖」，不是某一个人的；它在成千上万个来源之间稳住，任何人从平台上取一份，都是同一份。

先在，还是发生？「被证成的真信念」默认外面有一个先在的事实；本书说，事实是一层层稳出来的，知道，是从平台上取。

想一想

1. 你「知道」的哪一件事，其实只站在一条很短的平台上？
2. 有没有一件事，你亲眼看到了，可它在别人那里还没站住？你是怎么办的？

◆

45

第 45 章

教育：一个孩子「会了」，什么时候算事实

◆ 一、你一定有过这样的时刻

林舟班上有个学生叫小宇，初二。

有一天下午，林舟给他讲浮力。讲完，小宇点头：「懂了。」林舟出了一道题，小宇做对了。

第二天上课，林舟换了一个情境，问：「一艘铁船，为什么能浮在水上？」

小宇愣住了，答不出来。

林舟问：「昨天不是懂了吗？」

小宇很委屈：「昨天是懂了啊。」

林舟想了想，没有怪他。他知道，小宇说的是实话。昨天下午，在那道题、那个情境、那一刻，小宇确实懂了。可是那个「懂了」，只在那一层上冒了一点头。换了一个情境，它没有跟过来。

一个孩子「会了」，到底是什么时候算数的?

◆ 二、教育里的「读数」

学校里，每天都在测量。课堂提问，作业，小测，月考，期末考，中考，高考。每一次测量，都给出一个读数：会，或者不会；对，或者错；八十五分，或者六十二分。

很多大人，把这些读数，当成孩子身上先在的属性：这个孩子「会浮力」，那个孩子「数学不好」。就像第 1 章说的那种血压计：量出一百四十五，就说「我高血压了」。

本书在第 6 章说，属性不挂在一个先在的钩子上。「小宇会浮力」这个属性，和「会浮力的小宇」这个承载者，是在某一次测量里，一起发生的。

在昨天下午那道题里，它发生了。在今天上午那艘铁船前，它没有发生。

两次都是真的。

◆ 三、细层的「会」和粗层的「会」

用第四编的话，「会了」也是一层一层稳住的。

最细的一层：一道具体的题，一个具体的情境。小宇在昨天那道题上，做对了。这是一个读数，在最细的一层冒了头。

粗一点的一层：同一类题。浮力的题，换几个数字、换几种物体，他还会不会？如果会，「会浮力」就在这一层上，稳了一些。

再粗一层：这个概念，在不同的情境里。一艘铁船，一个气球，一个人在死海里漂着，他能不能用同一个想法，把它们都讲清楚？如果能，「会浮力」就在概念这一层上，站住了。

最粗的一层：他能不能把浮力，和别的东西连起来？密度、压强、阿基米德那个洗澡的故事，甚至生活里为什么救生衣是那样设计的。如果能，「会浮力」就在他整个知识的网里，有了位置。

昨天下午，小宇的「会」，只在最细的一层冒了头。它还没有往上传，没有在粗层上站住，也没有从粗层回写下来，去改他对浮力的整个理解。

所以，它在今天那艘铁船前，没有跟过来。

一个孩子「会了」，是各层都对上了；只在一道题上对，是最细一层冒了头。

◆ 四、回写：从粗层回到细层

第 19 章讲过林小满的错题本。那里说，存档不是回写，反馈不是回写；回写，是粗处长出来的判断，回头改细处。

林舟那天下午没有怪小宇。他做了一件事：他没有再讲一遍浮力的公式，而是拿了一个铁碗，放进水盆里，碗浮着；又把碗压扁成一块铁片，放进去，铁片沉了。

他问小宇：「同样一块铁，为什么一个浮，一个沉？」

小宇看了半天，说：「碗，碗里面有空的地方。」

林舟说：「对。那铁船呢？」

小宇忽然笑了：「铁船里面也是空的。它排开的水多。」

这是一次从粗层到细层的回写。小宇在概念那一层，长出了一个判断：「排开的水多，浮力就大」；这个判断回过头，改了他对铁船、对碗、对铁片的看法。

从那以后，小宇的「会浮力」，在各层上对上了。

◆ 五、盯得太勤：家里的芝诺效应

第 35 章讲过，一直看着的锅不开。

教育里，这件事格外常见。

一个家长，每天孩子写作业，都坐在旁边，每过几分钟就问一句：「这道会不会？」「怎么又错了？」「写到哪了？」

每问一次，都是一次测量，一次回写。孩子刚刚开始在一道题上自己摸索，那条刚走起来的路，就被一句「会不会」，拉回了起点。

一晚上测了几十次，每一次读数都是「还不太会」，每一次都把孩子按回那个「还不太会」的状态。

孩子的路，走不出去。

测得太勤，孩子就一直停在「还不会」上；这不是孩子不会，是回写太勤。

◆ 六、一次性的考试

第 23 章说，每一次读数，都是一次只来一回的发生。

中考、高考，是最典型的一次性。一个孩子，在那一天、那一场、那一张卷子上，只来一回。

很多大人，把这一次的分数，当成孩子先在的属性：「他就是这个水平。」

本书说：那一天的分数，是一个真实的读数，是一个事实，发生了就改不了。可它是一次性的发生，是那一天、那一场、那个孩子、那张卷子之间稳住的。它不是孩子身上先挂好的一个数。

第 23 章还说：概率，是许多次一次性的发生，在同一片土上叠出来的形状。一个孩子平时一百次小测叠出来的那个水平，是他在同一片土上的账。考场上那一次，可能高于这本账，可能低于它。

所以，考得好，不必觉得孩子「本来就这么好」；考砸了，也不必觉得孩子「本来就这么差」。那一次，只是一次。

可是，这一次是事实。它要被接住，回写进孩子接下来的日子里：考好了，怎样让它在各层上都稳住；考砸了，哪一层还没对上。

◆ 七、那分数还要不要看

读到这里，一位做班主任的老师可能会皱眉。

「照你们这么说，一次分数只是一次，测多了又会停在『还不会』上。那分数还看不看？考试还要不要考？」

这一问，先承认它对的地方。学校离不开测量。不考，老师不知道这一班走到了哪里，家长不知道孩子卡在哪里，孩子自己也不知道。一个从不测量的课堂，什么也稳不住。第 35 章说过，芝诺效应是回写太勤，可一次也不回写，路也不会落成一个读数。

所以，本书不是说别测，是说测的时候，要知道自己在测哪一层。

一张单元小测，测的多半是最细的那一层：这一类题，这几天，做不做得对。它的读数是真的，用来看最细一层有没有冒头，很合适。拿它去说「这个孩子物理不行」，就是拿最细一层的读数，去顶最粗一层的判断。

一道换了情境的题，像那艘铁船，测的是概念那一层。一次让孩子讲给别人听，测的是他能不能把一个想法往上传。一次让他自己从窗外的鸟、从厨房里的锅找出一个例子，测的是知识网那一层。

不同的测法，落在不同的层上。分数要看，可要看清它是哪一层的分数。

还有一件事，比测哪一层更要紧：测完之后，读数往哪里去。

一个读数，如果只被记进成绩单，它就只是存档。第 19 章说过，存档不是回写。同一个读数，如果被拿来问一句「这一题，是哪一层没对上」，再回头改讲法、改练法，它才回写进了孩子的路里。

所以，回答那位班主任：分数要看，考试要考。只是每看一个分数，多问两句。这是哪一层的读数？它接下来要回写到哪里去？问得出来，这次测量就没有白做。问不出来，这个分数就只是一个挂在孩子身上的牌子。

◆ 八、教育要做的，是让各层对上

用本书的读法，教育要做的事，可以说得很简单：**让一个孩子的「会」，在各层上对上。**

不只在一道题上对，也要在同一类题上对；不只在一类题上对，也要在不同的情境里对；不只在不同情境里对，还要在他整个知识的网里，有一个位置。

而让各层对上，靠的是回写：从细层往上传，从粗层往回改，来来回回，一圈一圈。

本系列第 324 号《SDE教育发生学导论》讲过教育的发生学；第 400 号讲过「我材发生」。〔据研究文献〕本章只从读数的角度，补一句：一个孩子的「会」，不是一次测量就能定下来的属性，是一层层稳出来的事实。

◆ 九、天分，是不是先挂在孩子身上

说到这里，总会有一位家长说：「道理都对。可有的孩子就是聪明，一点就通；有的孩子怎么教都慢。这总不是一层层稳出来的吧，这是天生的。」

这句话，先承认它对的地方。孩子和孩子，确实不一样。有的耳朵灵，有的手巧，有的对数字敏感，有的坐不住。这些不一样，有的在出生时就带着一部分。本书不否认这件事，也不打算说「只要方法对，人人都一样」。

可是，「这个孩子聪明」这句话，说的是什么？

它说的，常常是许多次读数叠出来的一个形状：他这道题答得快，那道题也答得快，一次次叠起来，大人就说，他聪明。第 23 章说过，概率，是许多次一次性的发生，在同一片土上叠出的形状。「聪明」，也是这样一个形状。它是在这个孩子、这些题、这些老师、这个家，许多次碰在一起时，叠出来的。

孩子身上带着的，是一些材料。材料要和土碰，才发生成某一种「会」。同一个对数字敏感的孩子，在一个天天让他算账的家里，和在一个从不碰数字的家里，叠出来的形状，可以差得很远。

所以，「聪明」不是先挂在孩子身上的一个牌子，也不是一句空话。它是一个真的形状，是许多次发生在一片土上叠出来的。

这样看，有一个好处。一个孩子「慢」，也不再是一块挂死的牌子。它是到今天为止，在这片土上叠出来的样子。换一种讲法，换一种练法，换一个能让他往上传、往回改的人，土变了，往后叠出来的形状，也会跟着变。

小宇那个学期，没有换脑子。变的，是林舟给他的那片土：一周考一次，讲给同桌听，被同桌追问。

◆ 十、一个完整的例子：小宇的一个学期

那个学期，林舟对小宇做了一个小小的改变。

他不再每天考小宇，而是每周只考一次。每次考完，不只看对错，还要小宇用自己的话，把错的那道题，讲给同桌听。

讲给同桌听，是一次往上传：从一道题，传到「我为什么这样想」那一层。

同桌听不懂，问他，他再讲，是一次回写：同桌的问题，回过头来，改他自己的理解。

学期末，小宇的物理，从六十几分，到了八十几分。

可林舟觉得，更要紧的不是分数。是有一天，小宇在课间看到窗外一只鸟在水坑边洗澡，突然跑过来说：「老师，那只鸟浮在水上，是不是因为它羽毛里有空气？」

那一刻，浮力在小宇的知识网里，有了位置。它不只在一道题上，不只在课本上，在他的眼睛里。

◆ 十一、三块地上的「会」

一个孩子的「会」，也落在三块地上。

在现实界，是他做对的那道题，写在卷子上，被老师打了勾。这是看得见的读数。

在理念界，是他脑子里，那个关于浮力的想法：「排开的水多，浮力就大。」这是一个理解。

在自我界，是他心里，那个「我会了」，或者「我学不会物理」。这是一个关于自己的判断。

三块地上的「会」，不一定同时稳住。

有的孩子，卷子上做对了，脑子里其实没想通，靠的是背了一个题型；现实界稳了，理念界没稳。换一个题型，他就不会了。

有的孩子，脑子里想通了，卷子上却总出错，粗心，慌张；理念界稳了，现实界没稳。

最难办的，是自我界。一个孩子，如果在许多次测量里，一次次地回写出一个「我学不会物理」，这个判断在他的自我界里，会站上一条很长的平台。从此，就算他在理念界里已经想通了，在现实界里也做对了，他心里那个「我不会」，还是不肯走。

第 22 章说，平台太长，也会锁死。

所以，教育不只要让卷子上的「会」和脑子里的「会」对上，还要小心那个心里的「我」：别让一次次的测量，把一个还在一锅粥里的孩子，过早地回写成一个「学不会的人」。

◆ 十二、一个背乘法表的晚上

周二晚上八点，陈静坐在女儿的书桌边。

陈静三十八岁，在一家物流公司做会计。女儿小禾九岁，读三年级，这周在背九九乘法表。

小禾背得很顺：「七八五十六，七九六十三。」一口气背到底，一个没错。

陈静放心了，随口问一句：「那八乘七是多少？」

小禾愣了一下，掰着手指头，小声从「八一得八」往下数。数到第七个，才说：「五十六。」

陈静差点说出那句「刚才不是背过了吗」。她忍住了。

她想了想，小禾背的，是一串声音。「七八五十六」在那串声音里有一个位置，从头背下来，它会自己冒出来。可是「八乘七」，换了一个说法，在那串声

音里找不到入口。小禾的「会」，稳在了一条路上，就是背诵那条路。它还没有往上传，传到「七个八和八个七是同一个数」那一层。

那天晚上，陈静没有让小禾再背一遍。她从厨房拿来一盒鸡蛋托，一托有八个窝。她摆了七托，让小禾数一共有多少个窝。小禾一托一托地数，数出五十六。

陈静又把鸡蛋托转了个方向，横着看，变成八排，每排七个。她问：「现在呢？」

小禾盯着看了一会儿，忽然说：「还是五十六。是同一堆。」

她又问：「那七乘八和八乘七，是不是一回事？」

小禾点头，又自己补了一句：「那六乘九，也就是九乘六。」

这一句，是她自己长出来的。粗层上的一个判断，「转一下，还是同一堆」，回过头，改了她背过的整张表。一张表，从八十一句声音，变成了一半就够用的东西。

那天，陈静一晚上只问了三个问题，没有每隔几分钟就问「会不会」。

明天能试的小办法，就是陈静这一晚：孩子背得很顺的时候，换一种问法问一次，比如倒过来问，换个说法问。答得慢了，别急着让他再背，拿一样家里看得见、摸得着的东西，让他自己从那里看出来。看出来的那一下，就是一次回写。

◆ 十三、放回日子里

回到那句「昨天不是懂了吗」。

很多大人对孩子说过这句话，带着一点失望，一点责备。

下一次，你可以换一句话：「昨天你在那道题上懂了。我们看看，它能不能走到别的题上去。」

这句话，承认了昨天那个读数是真的；也承认了，它还只在最细的一层。

明天能试的一件事：孩子说「我会了」的时候，别急着出题考他。请他把刚学会的东西，用自己的话，讲给你听，或者讲给一个更小的孩子听。讲的过程，就是一次往上传；你的追问，就是一次回写。

带走的话

一个孩子「会了」，是各层都对上了；只在一道题上对，是最细一层冒了头。测得太勤，孩子就一直停在「还不会」上；教育要做的，是让各层对上。

小　账

这一处，读数是谁的？昨天下午那道题的「会」，是在那一刻、那道题和小宇之间稳住的；它不是小宇身上先挂好的一个属性。

先在，还是发生？「这个孩子就是这个水平」默认属性先在；本书说，「会」是一层层稳出来的事实。

想一想

1. 你自己学会一件事，是什么时候「真的会了」的？那时，哪几层对上了？
2. 你对孩子，是测得太勤，还是测得太少？

◆

46

第 46 章

健康：一张化验单上的数，是谁的

◆ 一、你一定有过这样的时刻

林舟四十四岁那年，单位体检。

拿到报告，他一眼看到一行字下面画着箭头：空腹血糖，六点四。旁边标着：偏高。

那天晚上，他一夜没睡好。上网查了半天，越查越心慌。

第二天，他去找了医院的一位内科医生。医生看了报告，问了几个问题：前一天晚上吃了什么？几点睡的？早上抽血前，是不是赶路赶得急？

林舟想了想：前一天晚上，同事聚餐，吃得很晚，还喝了点酒；早上抽血，差点迟到，一路小跑。

医生说：「一次的数，先别急着下结论。过两周，正常作息，空腹再查一次。必要的话，再做一个别的检查，看看这几个月的平均水平。」

两周后，林舟再查，五点八。后来又做了那个看平均水平的检查，在正常范围的上沿。

医生说：「有点靠近边了，饮食和运动注意一下，半年后再查。」

林舟松了一口气，也记住了一件事：一张化验单上的数，不是一个挂在他身上的标签。

本书在这一章说的，都只关乎怎样理解一个数。身体或心里的难处真的大了，请找医生或心理咨询师。

◆ 二、一个数，是在怎样的一下里发生的

第 1 章讲过量血压：第一次一百四十五，坐了五分钟，一百三十二。量这件事本身，参与了被量出来的数。

血糖也是这样。那一天的六点四，是在林舟的身体、前一晚的聚餐和酒、早上那一路小跑、那一管血、那一台仪器之间，稳住的一个读数。

它是真的。仪器没有坏，林舟那天早上的血糖，确实是六点四。

可是，它是一次性的。第 23 章说过：每一次读数，都是一次只来一回的发生。换一个早上，换一种前一晚，发生的就是另一个数。

医生没有否认那个六点四，也没有把它当成林舟身上的一个标签。他做的，是第 21 章说的那件事：在一个读数成为「结论」之前，多对几层。

◆ 三、诊断，是一层层稳住的

一个诊断，比如「糖尿病」或者「血糖偏高」，在医学里，从来不是由一次化验定下来的。

它要经过好几层。〔核：大意，具体诊断标准请以医生和正规指南为准〕

最细的一层：一次化验的数。

粗一点的一层：不同时间、不同方法的几次化验，是不是对得上。一次空腹血糖高，再查一次还高不高？看几个月平均水平的那个检查，是不是也偏高？

再粗一层：这些数，和这个人的症状、体重、家族、生活习惯，对不对得上。

最粗的一层：医生把这一切放在一起，结合医学上的标准，做一个判断。

然后，是回写：这个判断，回过头来，改这个人的生活：饮食、运动、复查的频率，必要时用药。

所以，诊断不是一张化验单「发现」了一个先在的病。它是在病人的身体、一次次的检查、医生的判断、医学的标准之间，一层层稳出来的一个事实。

一个数，只在最细的一层冒了头；一个诊断，是各层都对上了。

◆ 四、白大褂效应：互动参与了读数

医学里，有一个有名的现象，叫「白大褂高血压」。〔核：大意〕

有些人，在家里自己量血压，一切正常；一到医院，见到穿白大褂的医生，血压就高了。

这个现象，用本书的话，是第 7 章说的互动冒在前头：在医院里量血压，这一场互动，本身就让人紧张，紧张就参与了读数。

那么，哪一个才是这个人「真的血压」，家里的，还是医院里的?

本书在第 2 章说过：会上沉默的同事和饭桌上妙语连珠的同事，都是真的他。血压也是：家里的数和医院里的数，都是真的，是在两种不同的互动里稳住的两个读数。

医学的办法，不是挑一个「真的」，而是让许多次、许多种场合的读数，叠出一个形状。医生会建议有些人在家里每天定时量，记一周，甚至戴一个能自动测二十四小时的血压计。

这正是第 23 章说的：概率，是许多次一次性的发生，在同一片土上叠出的形状。一个人的血压水平，也是许多次读数叠出的形状。

◆ 五、仪器准，读数就全是身体的吗

有人会说：仪器越来越准了。一台好的化验仪，误差很小，测出来的数，总该就是身体的吧？

这一问，对的地方在于：仪器准，很要紧。仪器不准，一个数里混进了太多机器自己的毛病，就像林舟母亲那张贴歪了电极的心电图，那一层就对不上。医院花大力气校准仪器，正是为了让这一层稳。

可是，仪器准，解决的是仪器那一层。它不能让一个数，脱开那一个早上。

林舟那管血，被一台很准的机器，测得很准：六点四。这台机器没有说错。它准确地告诉你的，是那一个早上，在聚餐、那一路小跑之后，那一管血里的样子。仪器越准，它越老实地记下了那一下发生的全部，连那一路小跑也一起记了进去。

所以，一个准的读数，不是一个只属于身体的读数。它是一个把那一次发生，记得很清楚的读数。

第 44 章说过，知识是一层层稳住的。仪器准，是让最细的那一层稳；要看懂一个数，还要往上走几层。这几层，要交给医生，交给更多次的读数，不能只靠一台机器的准。

◆ 六、读数和「我」一起冒出来

第 16 章说，读数稳住的时候，三个号位各有东西显出来：客体，互动，主体。

一张化验单上的数，也是这样。

林舟拿到报告的那一刻，「偏高的血糖」作为客体显了出来；体检这一场互动，作为二号位显了出来；还有一个「我」冒到了前头：「我可能有病了。」

这个「我」，对健康很要紧。

第 7 章说，主体冒到前头的时候，有时会把别的东西挤到后面去。林舟那一夜没睡好，满脑子是「我可能有病」，这个「我」冒得太猛，把别的都挤到了后面：他忘了前一晚的聚餐，忘了早上的那一路小跑。

医生做的，是把这个「我」，轻轻地放回去，让互动那一位重新被看见：前一天晚上发生了什么？早上发生了什么？

这不是说「我」不重要。一个人对自己身体的关心，是健康的一部分。只是，当一个读数让「我」冒得太猛的时候，要记得，它是在一场互动里发生的。

◆ 七、回写太勤，也会伤身

第 35 章讲过，一直看着的锅不开。

健康里，也有这种事。

有的人，拿到一次偏高的数，从此每天量好几次，每次量完都要上网查，查完更紧张，紧张了再量，数又高了。一个读数，被反复测量、反复放大，在他的自我界里，越稳越牢，最后成了一个甩不掉的「我有病」。

这是回写太勤：每一次测量，都把身体刚刚可能回到的平静，拉回那个紧张的起点。

医生常建议这样的人：别量得太勤，按约定的时间量，把记录交给医生看。〔核：大意〕

这和第 45 章说的家长坐在孩子旁边每几分钟问一句，是同一件事。

◆ 八、一次的数，什么时候不能等

这一章一直在说：一次的数，先别急着下结论。这句话，有一个边界，必须说清楚。

有的数，一次就够了。

一个人突然胸口剧痛、喘不上气，医院里测出来的那一个数，医生不会说「过两周再查一次」。一次就够医生马上动手。这一次读数，虽然也只在最细的一层冒了头，可它冒出来的样子，已经足够让医生在粗层上做出判断。

这一点，和本书的说法不冲突。第 21 章说过，要多对几层，可没有说每一层都要等很久才对。急诊室里，几层可以在几分钟里对完：这个数，这个人此刻的样子，医生的经验，医学的标准，一齐压上来，很快就对上了。

也就是说，层多层少，对得快慢，不是一个固定的规矩。它看那一个数在什么样的土里冒出来。

哪个数可以等，哪个数不能等，这件事，本书判断不了，你自己也常常判断不了。它是医生在那一刻、那个病人身上，一层层对出来的。本书说的「多对几层」，是讲怎样理解一个数，不是讲你该不该去医院、该什么时候去。

所以，读完这一章，千万别得出这样一句话：「反正一次的数不算数，我先等等看。」这句话把本书说反了。

本书说的是：一个数，不是一个挂在你身上的标签，也不是一个可以不当回事的东西。它是一个真的读数。它要被接住，交给能对下一层的人。身体有让你不安的变化，别靠这本书，也别靠自己上网，去找医生。

还有一种情形，也值得说一句。有的人，拿到一个偏高的数，心里一慌，干脆不去复查，不去看医生，好像不再测，那个数就不在了。这是另一种回写的毛

病：不是太勤，是一次也不回写。那一个读数，就一直停在最细的一层，既没有被证实，也没有被放下，悬在心里。

太勤和不回，都让一个数稳不住。按约定的时间，交给医生，是让它往上走的那条路。

◆ 九、本书的说法

本章收成一句：

一张化验单上的数，是在身体、那一天、那一场检查之间稳住的一次性读数；一个诊断，是许多次读数在各层上对上之后的事实。读数会让「我」冒到前头，冒得太猛时，要记得它是在一场互动里发生的。

再说一遍：本章只讲怎样理解一个数。身体或心里的难处真的大了，请找医生或心理咨询师。

◆ 十、一个完整的例子：林舟母亲的一次心电图

林舟的母亲，七十多岁。有一次去社区医院做心电图，结果单上写着一行字：「心电图异常，建议进一步检查。」

老人拿着单子，手都抖了。

林舟陪她去了大医院。心内科的医生看了那张心电图，又让她重新做了一次，还做了心脏超声。

医生说：「第一次那张，有一个导联的电极贴得不太好，有干扰。重新做的这张，有一点老年人常见的小变化，超声看心脏结构也还可以。不用太担心，定期复查就行。」

老人松了一口气。

回家的路上，她问林舟：「那第一张，算是假的吗？」

林舟想了想，说：「不算假。那天那个电极，确实贴得不好，机器确实记下了那些干扰。它是那一次的读数。只是那一次，有一层没对上：电极那一层。医生重新做了一次，各层对上了，才是今天这个结论。」

老人说：「那还是多查一次好。」

林舟说：「对。一个读数，在成为结论之前，多对一层，总是好的。」

◆ 十一、身体，也是一层层稳住的

这一章讲的是化验单上的数。其实，身体本身，也是一层层稳住的。

一个人每天的体温、心跳、血糖，时时刻刻都在变。可是，人的身体有一整套办法，把这些变化，稳在一个范围里：热了出汗，冷了发抖，吃多了，胰岛素多分泌一些。医学上管这叫稳态。〔核：大意〕

用本书的话，稳态，是身体里许多层的上行和回写：细胞这一层的变化，往上传到器官，器官往上传到神经和激素，神经和激素做出判断，再一层层回写下去，改细胞。

身体健康的时候，这套回写转得又快又准，各层对得上。

身体出问题的时候，常常是某一层的回写，慢了，或者乱了。血糖的回写慢了，糖就堆在血里；体温的回写乱了，就发烧不退。

本系列第 49 号《互动医学入门》，讲过健康是一种互动、一种调节的能力，而不只是一组达标的数字。〔据研究文献〕本章只补一句：一张化验单上的数，是这套回写在某一刻的一个读数；要看懂它，得看那一刻，回写转得怎么样，而不只看那一个数在不在范围里。

再说一次：身体或心里的难处真的大了，请找医生或心理咨询师。

◆ 十二、手环上的六十二分

周日晚上十一点，周远躺在床上，又看了一眼手腕。

周远三十一岁，在一家软件公司做测试。半年前，他买了一只能看睡眠的手环。从那以后，他每天早上睁开眼，第一件事就是看昨晚的睡眠分数。

这一周，分数一直不好。周一六十八，周三六十五，昨天六十二。

分数越低，他越睡不着。躺下了，脑子里转的是：今晚要是再低怎么办？他翻来翻去，过一会儿就抬手看一眼时间。

他给大学同学林小满发消息，说起这件事。林小满回了一句：「你那个分数，是谁的？」

周远愣了一下：「我的啊。」

林小满说：「它是在你的身体、你的手腕、那只手环的算法、还有你这一周的心情之间，一起稳出来的。你越盯着它，它里面『你的心情』那一份，就越重。」

周远想了想，好像是这么回事。手环怎么算出那个分数，他其实不知道。他知道的，只是这一周，那个分数冒到了前头，比他自己早上起来觉得累不累，还要先被他看见。

第五节说过，读数会让一个「我」冒到前头。周远这一周，冒到前头的，就是一个「我睡不好」。这个「我」，又回写进了他晚上的睡意里。手环一次次地读，他一次次地看，像第 35 章那口一直被看着的锅。

那天晚上，林小满给了他一个小办法，是她从父亲那里听来的。

明天早上醒来，先别看手环。拿一张纸，写一句自己的感觉：精神好，一般，还是累。写完，再看分数。连着记一周。

一周后，周远把纸拿出来对。七天里，有三天，分数不高，可他写的是「精神还行」；有一天，分数很高，他写的却是「累」。

手环的分数，和他自己的感觉，在好几天里对不上。

周远没有扔掉手环。他只是不再把那个分数，当成每天早上的判决。它是一层读数，他自己的感觉是另一层。两层对上的日子，他心里更踏实；对不上的日子，他知道，哪一层也不是全部。

明天能试的，就是这个小办法：醒来先写一句自己的感觉，再看那个数，记一周，看看它们对得上几天。

本书说的，只是怎样看一个数。要是睡不好已经拖了很久，白天也撑不住了，别靠手环，也别靠这本书。身体或心里的难处真的大了，请找医生或心理咨询师。

◆ 十三、放回日子里

你一定也有过拿着一张报告心慌的时候。

下一次，拿到一个让你心里一紧的数，可以先问自己三个问题。

一，这个数，是在怎样的一下里发生的？那一天，那一刻，我的身体，发生了什么？

二，它对上了几层？只有这一次，还是好几次、好几种检查都对得上？

三，现在冒在前头的，是那个数，还是一个慌张的「我」？

问完，带着这三个问题，去找医生。

带 走 的 话

一张化验单上的数，是一次性的读数，不是挂在身上的标签；一个诊断，是各层对上之后的事实。数让「我」冒到前头时，记得它是在一场互动里发生的。

小　账

这一处，读数是谁的？那一天早上的六点四，是在林舟的身体、前一晚、那一路小跑、那一管血之间稳住的；它不是林舟身上的一个标签。

先在，还是发生？「我就是血糖高」默认属性先在；本书说，诊断是一层层稳出来的事实。

想 一 想

1. 你有没有被一张报告上的数吓到过？后来，它在各层上对上了吗？
2. 你身边有没有人，量得太勤、查得太勤，反而越来越紧张？

◆

47

第 47 章

工作与 AI：一台机器的回答，什么时候才算数

◆ 一、你一定有过这样的时刻

林小满读研第一年，导师让她写一份文献综述。

她用一个 AI 助手帮忙，问它：「过去十年，超导量子比特的相干时间有哪些里程碑式的进展？」

AI 很快给了她一份整整齐齐的列表：哪一年，哪个团队，在哪本期刊上，做到了多长的相干时间，每一条都有作者名、论文标题、数字。

她很高兴，把列表抄进了综述。

交上去的第二天，导师把她叫到办公室，指着其中一条说：「这篇论文，我查了，不存在。作者是真的，期刊是真的，标题是编的，数字也对不上。」

林小满脸一下红了。

导师没有骂她。他说：「AI 给你的，是一个读数。你把它当成了事实。中间少了好几层。」

◆ 二、AI 的回答，是一次读数

今天的大语言模型，是怎样给出一个回答的？

用大白话讲，大致是这样：模型读了海量的文字，学会了在一句话之后，下一个词出现的各种可能，各有多大。你问它一个问题，它就一个词一个词地往下接；每接一个词，它都从一个概率分布里，挑一个出来。〔核：大意〕

这个过程，和本书讲的量子测量，有一个很像的地方：在挑之前，下一个词有许多种可能，在一锅粥里；挑的那一下，一个词稳住了，写进了回答；然后，这个词回写下来，改了接下来的可能。

所以，AI 给出的每一个回答，都是一次只来一回的发生。你再问一遍同样的问题，它可能给出一个不一样的回答。第 23 章说过：每一次读数，都是一次性的；概率，是许多次叠出来的形状。

这不是说 AI 和量子力学是一回事。本书只借这个相像，说一件事：**AI 的回答，是一个读数；一个读数，不等于一个事实。**

◆ 三、为什么会编出不存在的论文

那篇不存在的论文，是怎么来的?

人们管这叫 AI 的「幻觉」。

用本书的话：那份列表里，「作者名」「期刊名」「这一年有一篇这个领域的论文」「标题大概是这样」，每一个片段，在模型学过的海量文字里，都有一条很长的平台：确实有这个作者，确实有这本期刊，确实有这类标题。

可是，把这些片段拼成「这一个作者、在这一本期刊、这一年、这一个标题」，这一个组合，在现实界里，从来没有稳住过。它只在模型挑词的那一刻，在最细的一层，冒了头。

它像第 30 章讲的弗劳希格—伦纳悖论：把几个各自站在平台上的事实，和一个从没收敛过的组合，放进了同一张表里。也像第 30 章开头县城里那场风波：每一句话，在各自那里都是真的，串起来，串出了一件没有发生过的事。

幻觉，是一个只在最细一层冒头的组合，被当成了站在平台上的事实。

◆ 四、怎样让 AI 的读数，变成事实

导师说，中间少了好几层。是哪几层？

第一层：去查原文。那篇论文存不存在？如果存在，它说的数字，和 AI 给的对不对得上？这是让读数，和现实界里的记录对上。

第二层：多个来源对照。同一件事，看两三个彼此独立的来源，是不是说的一样。第 22 章说，客观是冗余回写出来的；第 44 章说，知识，要从一条站住的平台上取。

第三层：回到自己的理解。这些数字，和自己学过的东西，对不对得上？一个相干时间，十年里提高了一万倍，这在物理上说得通吗？这是让读数，在理念界和自我界上，也对上。

第四层：交给别人看。导师看了，同行看了，审稿人看了。每多一个人，就是多一层。

各层都对上了，那个读数，才成了一个事实，才能写进综述。

AI 给你的，是最细的一层；后面几层，要你自己去补。

◆ 五、人和 AI，谁做哪一层

第 4 章和第 7 章说，主体、客体、互动，三个号位都不是先在的，在每一次发生里一起显出来。

在人和 AI 一起工作的时候，这件事格外清楚。

一个回答，是在你的问题、AI 的模型、你们之间的那一来一回里，一起发生的。你问得模糊，它答得模糊；你问得具体，它答得具体。这个回答，不是 AI 的，也不全是你的，是这一次互动的。

本系列第 398 号《AI时代的判断力发生学导论》，讲过判断力在人与工具的互动中发生；第 278 号讲过人与 AI 的复合能力。〔据研究文献〕本章只从读数的角度，补一句分工：

AI 擅长的，是在一锅粥里，快速地给出许多个读数：许多种写法，许多种思路，许多个候选。这是磨光，是第 18 章说的细层上的快动作。

人擅长的，是往上传和往回改：把一个读数，放到粗层上去看，看它和别的东西对不对得上；再把粗层的判断，回写下来，改那个读数。

AI 管细层的多，人管层与层之间的对。

把这个分工弄反了，让人去做细层上的苦力，让 AI 去做层与层之间的判断，就会出事。林小满那份综述，就是把「对」这件事，交给了 AI。

◆ 六、一次性的决策，和多次性的统计

工作里，还有一种 AI 的用法：用它来预测。销售会不会涨，这个客户会不会流失，这个项目成功的概率是多少。

第 23 章说：概率，是许多次一次性的发生，在同一片土上叠出的形状。

AI 给出的预测概率，是在它学过的那些数据的土上，叠出来的形状。如果你现在面对的事，和那些数据的土一样，这个概率是有用的。

可是，工作里很多要紧的决定，是一次性的：要不要接这个项目，要不要换这个方向，要不要辞职创业。本系列第 226 号《超越波普尔》说过：烧水能再烧一遍，求婚只来一回。〔据研究文献〕

一次性的事，你的土，和那些数据的土，未必一样。一个「成功率三成」的预测，说的是那些数据里的许多次；你这一次，是在你自己的土上，只来一回。

AI 的概率，是别人的土上叠出的账；你这一次，在你自己的土上发生。

◆ 七、等 AI 不再编了呢

有人会说：今天的 AI 会编论文，是因为它还不够好。再过几年，它会自己查原文，自己核对，幻觉越来越少。到那时，人还用得着去补后面几层吗？

这个说法，对的地方很多。AI 确实在变。有的工具，已经会在回答时附上出处，会先搜一遍再答。这些做法，等于把第四节说的第一层、第二层，搬进了机器里。机器自己多对了几层，它给的读数，站在平台上的成数会更高。本书不打算和这件事争。

可是，有两件事，不会因为机器变好就消失。

第一件，层是可以搬进机器里的，「对」这件事的最后一层，搬不进去。

机器查了原文，查到的原文对不对，谁来对？它对照了三个来源。

可是，这三个来源，是不是彼此独立，还是同一个源头转出来的？第 44 章说过，一句话被转述一万次，也只算一份。机器多对的每一层，都要在更粗的一层上，被另一个人，或另一套彼此独立的东西，再对一次。层可以越加越多，最粗的那一层，总要落在一个用这份东西、为它负责的人身上。

第二件，是第六节说的土。一份综述，一份合同，一个方案，它要用在哪里，给谁看，出了错谁来担，这些是你那一片土上的事。机器读的是很多人的土上叠出来的账。它给你的东西，在大家的土上站得住，不等于在你这一片土上站得住。

所以，机器越好，人要做的事，不是变少，是往上挪。从前，你要自己去查每一个数字。以后，你可能只需要抽查几个，可你要知道抽哪几个，为什么抽这几个。你要知道这份东西落在你的土里，哪一层最容易松。

第 43 章说，一个好木匠交活时要说清哪里最软。用 AI 做事也一样。它越能干，你越要记得问一句：这里面，哪一处，是我自己对过的?

◆ 八、本书的说法

本章收成一句：

AI 的回答是一个读数，只在最细的一层冒了头；幻觉，是一个从没收敛的组合被当成了事实。让它成为事实，要人去补后面几层：查原文，多源对照，回到理解，交给别人。AI 管细层的多，人管层与层之间的对。

◆ 九、你的问法，也在那个回答里

第五节说，一个回答是在你的问题、AI 的模型和那一来一回之间一起发生的。这句话，值得在一件小事上再走一遍。

林小满第一次问的，是「有哪些里程碑式的进展」。这个问法，在它那一边，先要了一个形状：一份整整齐齐的列表，每一条都要有年份、团队、数字。它没有要出处，也没有说可以留空。

这样一问，模型就被推着，要在每一格里都填上东西。填得上的，它填；填不上的，它也填。那篇不存在的论文，有一半，是这个问法推出来的。

这不是在替机器开脱。是说，二号位，那一来一回，本身就参与了读数。第 7 章讲过，每一次发生，总有一个号位冒在前头。林小满那一晚，冒在前头的，是她想要一张整齐的表。表要整齐，空格就不许空。

她后来换的那句话，「每一条都要给出处，我会逐一核对」，改的正是这一来一回。它告诉对面：可以不满，不能乱填。

问法改了，回答的形状也跟着改了。那份候选清单里，有几条，模型自己写了「未能确认出处」。这一句，第一次的列表里一条也没有。

所以，一个读数靠不靠得住，不全看机器，也看你怎么问。问的时候，给它留一个说「不知道」的位置。

◆ 十、一个完整的例子：林小满重写综述

那次之后，林小满换了一种用法。

她先让 AI 给她列一份候选清单，告诉它：「每一条都要给出处，我会逐一核对。」

她拿到清单，一条一条去查原文。有的论文存在，数字对得上，她标上「核」；有的论文存在，数字对不上，她以原文为准，改掉；有的论文不存在，她删掉。

然后，她把核过的那些，放在一起看，画了一张图：横轴是年份，纵轴是相干时间。图画出来，她发现有一年的数字，比前后高出一大截，不太对劲。她又回去查，发现那一条，测的是另一种量子比特，不能和别的放在一起比。她把它单独标了出来。

最后，她把综述交给导师，导师又挑出两处问题，她又改了。

这份综述，经过了 AI 的一层、她查原文的一层、她画图对照的一层、她回头再查的一层、导师的一层。各层对上，才交了出去。

导师看完，说：「这次，每一个数，都站住了。」

◆ 十一、一份周五早上要交的报价

周四晚上九点半，郑红还在办公室。

郑红四十六岁，在一家做五金配件的小厂里管采购。老板让她明早九点前，交一份三家供应商的比价，下个季度的螺丝和垫片，要从这三家里选一家。

三家的报价单，加起来二十多页。郑红累了一天，把三份文件一起丢给 AI，让它做一张对比表，再写一段推荐。

两分钟后，表出来了。整整齐齐，单价、起订量、交货期、付款方式，一样一样排好。最后一段推荐写着：乙厂综合价格最低，交货期最短，建议选乙厂。

郑红差一点就发出去了。

她想起上个月厂里开会，老板讲过的一句话：「用机器可以，交上来的东西，你得说得出哪个数是你自己看过的。」

她决定只抽三个数，亲自对一对。

第一个，乙厂的单价。她翻到乙厂报价单那一页，单价没错。可她在那一行底下，看到一行小字：以上价格不含税。她再去翻甲厂和丙厂，两家都写着含税。表里把三家的数，排在了同一列里。

第二个，乙厂的交货期。表上写的是十五天。原文写的是：首批十五天，之后每批三十天。

第三个，她自己挑的：付款方式。这一条，表上写对了。

三个数，对了一个，错了两个。错的那两个，都不是 AI 编出来的。每一个字，原文里都有。错在它把几个各自没错的片段，放进了一个本来不该这样拼的表里。这就是第三节说的那件事：片段各自站在平台上，组合没有收敛过。

郑红把税额补上，重算了一遍。乙厂不再是最便宜的，和甲厂只差一点。再算上之后每批三十天的交货期，她改了推荐：选甲厂，乙厂作备选。

她在报告最后加了一句：「表格由 AI 初排，单价、税额、交货期三项本人已逐一对过原件。」

这一句话，写得很短。它告诉老板，这份东西的哪几层，已经有人对过了。

周五早上，老板看完，只问了一个问题：「乙厂那个三十天，你在哪一页看到的？」郑红翻给他看。老板说：「行。」

明天能试的小办法，就是郑红这一晚：用 AI 做完一份要交出去的东西，挑出最会影响结论的三个数，回到原件里，一个一个对；对完，在末尾写一句，哪几项是你自己对过的。

◆ 十二、放回日子里

今天，越来越多的人，在工作里用 AI：写邮件，写报告，查资料，做方案。

AI 很快，很能干。它在细层上，能一下子给你许多个读数。

可是，读数不是事实。一个读数，要在各层上对上，才能成为事实。这件事，AI 替不了你。

明天能试的一件事：下一次用 AI 写一份要交出去的东西，交之前，挑出里面的三个具体的事实，一个数字、一个名字、一个日期，亲自去查一查原文。查完，你会知道，你这一次的 AI 读数，有几成站在平台上。

带走的话

AI 的回答是一个读数，不是一个事实；幻觉是一个从没收敛的组合被当成了事实。AI 管细层的多，人管层与层之间的对。

小　账

这一处，读数是谁的？ AI 的那个回答，是你的问题、它的模型和那一来一回之间发生的；它成为事实，要你补上后面几层。

先在，还是发生？ 把 AI 的回答当成先在的知识被「调出来」，是发现学；本书说，它是一次发生，要一层层稳住。

想一想

1. 你用 AI 时，有没有一次，把一个读数当成了事实？后来是怎么发现的？
2. 在你的工作里，哪些事是「细层的多」，适合交给 AI；哪些事是「层与层之间的对」，必须你自己来？

◆

第 八 编 · 总判断

知识，是一层层稳住、从平台上取来的读数；一个孩子的「会」，是各层对上；一张化验单上的数，是一次性的读数，诊断是各层对上之后的事实；AI 的回答是最细一层的读数，人管层与层之间的对。读数和它的主人一起发生，层层回写才稳；这件事，在实验室里是物理，在日子里是知识、学习、身体和工作。

结语

风动，幡动，心动，与一次闪光

◆ 一、又是一个夜里

林小满毕业那年夏天，又一次一个人在地下实验室值夜班。

还是那间屋子，还是那台示波器，还是那支光电倍增管。屏幕上那一点绿，跳一下，落回去，又跳一下。

四年前，她第一次坐在这里，看着一个尖峰，问父亲：这个读数是谁的？

今天，她看着同样的尖峰，心里有了一个回答。

她给父亲发了一条消息：「爸，我知道那个读数是谁的了。」

过了一会儿，林舟回：「谁的？」

她打了一行字：「它不是光子的，不是管子的，也不是我的。它是那一次的。」

◆ 二、全书走过的路

本书从那一次闪光出发，走了八编。

第一编说：量子力学的算法从来没错，错的是那道题，读数属于哪一个先在的东西。一百年的诠释之争，是物理学版的风动、幡动、心动：每一家守一个号位，又把它当成了先在的。

第二编说：东西和它的属性一起发生，中间是乘号，不是先后。属性，是某一种差异，在形状、路、土的某种偏重下稳住。稳住的过程，是从一锅粥经正在成形到定型，是特征律：差异的稳定性出现。

第三编说：测量是一次特征律的发生。叠加是一锅粥里几条路的碰撞，干涉条纹是正在成形，放大越过门槛，退相干讲对了土这一维，读数和三个号位一起显出来。

第四编说：读数是一层层稳住的，像一幅千片的拼图，像一套多重网格。放大是一次次的限制，塌缩是粗层的结果回写到细层。各层收敛，才是事实。冗余平台，是粗层在物理里的影子；客观，是冗余回写出来的。

第五编说：每一次读数，是一次只来一回的发生；概率，是许多次在同一片土上叠出来的账。平方有两半来历：勾股定理说只有平方能转又不多不少，伽辽金配对说上行与回写一正一反。Gleason 定理证的，是收敛之后的唯一性。

第六编拆了十二道难题：猫早已稳住，箱子只隔开了看的人；朋友那一层没收敛，不能入表；关联在比对时才稳，没有东西飞过去；波和粒子是同一个差异在两层上的分配；过去还没成为过去；测不准是两种稳住挤不进同一层；芝诺是回写太勤；炸弹改了土；墙是定型之后的划分；偏好基是互动筛出来的；多世界把路的完整当成了全部。

第七编把账摊开：哪些只是相容，哪几注押在了实验上，自己最弱在哪里。

第八编回到人间：知识，学习，身体，工作，AI。

◆ 三、回到那桩公案

导论里，讲过风幡公案。

一千多年前，广州法性寺，风吹幡动。一个僧人说风动，一个说幡动，慧能说心动。后来，《无门关》说：不是风动，不是幡动，也不是心动。

本书在导论里说：动，是一个属性。风是互动，幡是客体，心是主体。三家各说对了一个，又各少了两个。

现在，读完全书，可以把这桩公案读得更完整一些。

动，是在风、幡、心之间，一层层稳住的一个读数。

在最细的一层，风推幡，幡摆，那是一锅粥里，空气和布之间无数次的碰撞。

往上一层，幡的摆动，被光照着，被僧人们的眼睛接住；在这一层，「幡在动」作为一个形状，稳住了。

再往上一层，僧人们开口说「风动」「幡动」，在他们之间，在寺里的许多人之间，这个读数被说出来、被争论、被回写成很多份。

最粗的一层，慧能那一句「心动」，把主体那一位，推到了前头，让人看见：这场争论，是在人心里稳住的。

一层一层，各有各的稳住；一层一层，又要彼此对上。

动，不是风的，不是幡的，不是心的；它是那一次的。在那一次里，风、幡、心，和动，一起发生。

《无门关》说「都不是」，是想把三个号位都撤掉。本书说：三个号位都在，都是真的，只是它们不是三个先在的主人，而是在每一次发生里一起显出、轮流在前、层层对上。

◆ 四、那幅拼图，拼到了哪里

导论里，本书说过一幅千片的拼图。没人从左上角第一块拼起，大家都是先拼边框，再拼大色块，再填细处，填到一半，又退回来看一眼全局。

本书自己，也是这样拼起来的。现在可以退回来，看一眼全局。

边框，是第一编。一百年的架，各家守一个号位，物理自己排掉了几条路。这几条边一拼上，你就知道，这幅图的大小，是「读数属于谁」这一道题。

大色块，是第二编。三个号位，三种状态，特征律。东西和属性一起发生，一锅粥经正在成形到定型，差异的稳定性出现。这几块颜色一铺开，整幅图的样子就有了。

细处，是第三编到第六编。叠加，干涉，退相干，多重网格，玻恩规则，十二道难题。每填一处，都要回头对一对大色块：这一块，是不是还在「一起发生」「层层稳住」这两种颜色里。

填到第六编，本书一次次退回来看全局。猫那一章，回头看了第 22 章的门槛。远距纠缠那一章，回头看了第 31 章的比对。玻恩规则那几章，回头看了第四编的配对。这就是拼图里那一下「这块蓝的，到底是天还是湖」。细处改了粗处，粗处又回头改了细处。

第七编，是把拼好的图翻过来，看背面。哪几块是严丝合缝扣上的，哪几块是按颜色猜着放的，哪几处还空着。第 42 章列了押注，第 43 章列了最软的三处。一幅图，背面写清哪里没扣死，才算老实。

第八编，是把这幅图，挂到了日子里的墙上。

这幅拼图，还没有拼完。边框和大色块，本书自认拼稳了。细处，有的扣上了，有的还在正在成形。它要等后来的人，在他们那一层上，再拼一遍。

你读这本书，也是在拼一幅自己的图。先抓住那句「一起发生」，再抓住那句「层层稳住」，其余的细处，可以慢慢填，填错了，回头改。

◆ 五、本书最想留下的三句话

如果读者只能带走三句话，本书希望是这三句。

第一句：属性和它的承载者，一起发生。

不是先有一个东西，再有它的属性；是在一次发生里，东西和属性，同时冒出来。在量子力学里，这件事被实验逼了出来；在日子里，它一直都在，只是我们习惯了把东西当成先在的钩子。

第二句：稳住，是一层层来回完成的。

不是一程，也不是两程，是许多层的上行和回写，来来回回，直到各层对上。各层对上，才是事实；事实，发生了就改不了。

第三句：玻恩规则的平方，是每一层上行与回写的配对。

这一句，是本书对那把一百年的锁，给出的一把钥匙。它不是推导，是诠释；它押了注，写了死法；它等着后来的人去试。

◆ 六、四十多笔小账，合成一笔

全书每一章的末尾，都有两行小账。四十多章算下来，是四十多笔。现在可以把它们合成一笔。

第一行问：这一处，读数是谁的？

四十多次问下来，答案没有一次落在某一个号位上。暗室里的尖峰，不是光子独占的。箱子里的猫，不是那个开箱人独占的。远处那一对关联，不是哪一边独占的。课堂上的「会」，化验单上的数，机器的回答，也一样。每一次，读数都在客体、互动、主体之间，和它们一起冒出来，冒在前头的那一位，换来换去。

第二行问：先在，还是发生？

四十多次问下来，每一处被当成先在的，都能找到一个人、一套说法，把某一个号位先摆好了，再让读数去认主。

隐变量先摆好了客体，QBism 先摆好了看的人，多世界先摆好了一条完整的路，「这个孩子就是这个水平」先摆好了孩子。拿掉先摆好的那一位，题目就换了样子：不再问「它本来是谁的」，改问「它是在哪几层上稳住的」。

合成一笔，就是导论里那句判词：读数和它的承载者一起发生，一层层稳住。

这一笔，你可以带走。下一次碰到任何一个数，不必记得这本书的哪一章。只要记得这两行，自己再算一次。

◆ 七、写给林舟班上的学生

导论里，林舟说过一句话：「你要是能把薛定谔的猫讲得让我班上的学生听懂，我就服。」

本书不知道，第 28 章有没有做到。

可是，本书想对那些学生，多说几句。

你们以后，大概不会都去学物理。可你们每个人，都会一次次地面对一个读数：一张试卷上的分数，一张体检单上的数，一份工作的绩效，一台机器给出的回答。

每一次，你们都可以问那两句话：这个读数，是谁的？它是先在的，还是发生的？

问了，你们就不会把一次分数，当成自己身上的标签；不会把一张化验单，当成一个判决；不会把一台机器的回答，当成已经站住的事实。

你们会知道：一个读数，是在那一次、在你和事情之间，一起发生的。它是真的，它也只是一次。要让它成为事实，要一层层地对；要让它改变你，要一层层地回写。

这件事，物理学家用了一百年，在最小的东西身上，看清了。你们可以在自己最平常的日子里，用上它。

◆ 八、随身三问，最后再问一遍

导论里，本书给了你三个随身的问题。读到这里，不妨拿一件你自己的事，最后再问一遍。

比如，上个月你被人说了一句「你这人太急」。

一问：这个读数，在这里被当成了谁的？说的人，多半把它当成了你身上的东西，是客体的。你自己听完，也可能这样收下了。

二问：哪个号位被当成了先在的？是「你」，那个据说本来就急的人。可那一次，你是在一场赶时间的会上，对着一件拖了三周的事。那一场互动，那一片土，都在那句话里。

三问：这个差异，在哪一层稳住的？它只在那一场会上冒了头，还是在许多场合、许多人那里，各自独立地对上了？

三个问题问完，那句话不会消失。它是一个真的读数，那一次你确实急了。只是它从一块挂在你身上的牌子，回到了那一次。

这就是全书做的事。物理那一边，是一次闪光；日子这一边，是一句话、一个分数、一张化验单、一个机器的回答。问法是同一套。

◆ 九、写给那些不同意的人

一定有人不同意本书。

有的物理学家会说：你说的这些，标准量子力学都能算，你只是换了一套说法。

本书同意：在所有已知的实验里，本书和标准量子力学给出一样的预言。本书在第 42 章，老老实实地把能分出高低的地方，只列了三条，而且都很难测。

可是，本书想说：换一套说法，有时候不只是换一套说法。一套说法，决定了你会问什么样的问题，会去做什么样的实验。一百年来，「读数属于谁」这个问法，让物理学家吵了一百年；本书想换的，是这个问法本身。换了问法，也许，就会有人去设计一个新的实验，去碰第 42 章那三注。

有的哲学家会说：你把 SDE 的说法，套到了物理上。

本书同意，本书用了王德生博士的 SDE 体系。可本书在每一处，都尽量先讲物理自己的结论，再讲本书的读法；在附录三里，把同构和类比，一条一条分开。读者可以自己判断，哪些地方是套，哪些地方是对上了。

本书最希望的，是被不同意的人，回写。

◆ 十、林舟没有回的那条消息

林小满那晚发出那句「它是那一次的」，林舟隔了很久，才回了一个「好」。

后来，她才知道，父亲那晚没睡。他坐在县城家里的书桌前，把这几年女儿发来的书稿，从头翻了一遍。

他想起很多事。

他想起自己年轻时，和数学老师压在玻璃板底下的那张赌约。那一回，他输了，记了一辈子。第 42 章，本书也写了这样一张纸。

他想起爷爷交桌子时的那句话：左边那条腿，比别处软一点。第 43 章，本书也说了这样一句。

他想起小宇看着窗外那只鸟，跑来问他羽毛里是不是有空气。第 45 章，本书把那一刻叫作，一个「会」在各层上对上了。

他想起体检那一夜，看着一个六点四，一夜没睡好。第 46 章，本书把那张单子上的数，从他身上的标签，放回了那一个早上。

他想起女儿那份综述，被导师指出一篇不存在的论文，脸一下红了。第 47 章，本书说，那是一个读数，被当成了事实。

这些事，原本各是各的。一场赌，一张桌子，一只鸟，一张化验单，一份综述。它们发生在不同的年份，不同的人身上。

那一晚，林舟把它们放在一起，看出了同一个样子。每一件事里，都有一个读数，在一个人和一件事之间，一起冒出来。

每一件事里，都有一个人，差一点把它当成先在的东西：一个注定的输赢，一张不会坏的桌子，一个「就是这个水平」的孩子，一个「我就是血糖高」的自

己，一份「机器说了算」的答案。每一件事里，最后让它稳住的，都是多对了一层，多回写了一次。

这一个样子，就是本书从导论讲到这里的那一件事。它没有新的东西，只是同一件事，在一个父亲的半辈子里，又稳住了一次。

第二天早上，林舟在去学校的路上，给女儿回了第二条消息：「我班上的学生，下周我讲给他们听。」

这一条，是他那一层的回写。

◆ 十一、发生学不反对事实

全书快要合上，还有一个误会，要最后再清一次。

导论里说过：本书不说读数是主观的。读到第八编，这句话最容易被忘掉。一个读数是一次性的，一个分数不是牌子，一张化验单不是判决，听多了，有人会滑到另一头去：既然都是发生的，那就都不算数了。

本书从头到尾，没有这样说过。

一次闪光，发生了，就改不了。林小满本子上的那个数，那一晚就是那个数。六点四，那一个早上就是六点四。小宇那一天在铁船前答不出来，那一天就是答不出来。这些都是事实。

本书反对的，只是一件事：把这些事实，当成在发生之前就先挂好在某个东西身上的。

先在和事实，是两回事。拿掉先在，事实还在，而且更清楚了：你知道它是在哪一次、哪几层上稳住的，也就知道它还能往哪里走。

◆ 十二、一个读数，交到你手里

最后，回到那一次闪光。

林小满发完那条消息，又盯着屏幕看了一会儿。

一个尖峰，跳起来，落下去。

她想：这一次，又有一个光子来过了。它在那一刻，和这支管子、这台示波器、这间屋子、和她，一起发生了一次。这一次，只来一回。

明天，她会把这一夜的数据，交给导师。导师会把它和别人的数据，放在一起看。几个月后，它会被写进一篇论文。几年后，也许会被写进一本课本。一个读数，会被一层层地回写，站到一条越来越长的平台上。

可是，每一条平台，都是从一次只来一回的发生开始的。

本书，也是一个读数。它在本书写成的这一层，稳住了一点点。它会不会成为事实，要等你们，读者，在你们的那一层上，去对，去改，去回写。

这个读数，现在交到你手里了。

带 走 的 话

一个读数，不是谁的私产；它和粒子、仪器、看的人，在那一次里一起发生，又在一层层的回写里，成为事实。

小　账

这一处，读数是谁的？风、幡、心、动，在那一次里一起发生；林小满的那个尖峰，在那一夜里一起发生；这本书，在你读它的这一刻，又发生了一次。

先在，还是发生？本书从头到尾只问这一句。答案，在你那一层上，还要再稳一次。

◆

附录

附录五件，供查、供对、供核。附录一是数学预备，给想看式子的读者；附录二是多重网格入门，给想弄清第四编那把钥匙的读者；附录三是术语对照，标明每一处是同构还是类比；附录四是可错条款登记，是第 42 章那张表的存档版；附录五是参考文献，附〔待核〕余项。

附录一

数学预备

这一件，把正文里用到的几样数学，用尽量少的式子交代一遍。只想读故事的读者，可以跳过。

◆ 一、状态是一个箭头

量子力学用一个箭头描述系统的状态，记作 ψ。箭头住在一个叫希尔伯特空间的地方。对一个只有两种读数的系统，比如光子偏振，这个空间是二维的；箭头的两个分量，一般是复数。

箭头的长度定为一。长度的平方，等于各分量绝对值的平方之和：

$$\|\psi\|^2 = \sum_k |\psi_k|^2 = 1$$

这就是第 24 章说的勾股定理在量子力学里的样子。

◆ 二、共轭与伴随

一个复数 a 的共轭，记作 a*，实部不变，虚部变号。a 乘 a*，总是一个非负的实数，等于 a 的绝对值的平方。

一个列向量 ψ 的共轭转置，记作 ψ†：先转置成行，再把每个分量取共轭。一个矩阵 P 的共轭转置 P†，叫它的伴随。第 20 章说的「翻过来」，就是取伴随。

◆ 三、测量与投影

一次测量，选一组彼此垂直的方向，叫一组基。读数 k 对应一个子空间；把箭头投到这个子空间上的那个操作，叫投影算子，记作 Π_k。各个读数的投影算子加起来，等于单位算子。

如果读数 k 对应的子空间，由一组正交的单位向量张成，把这组向量排成矩阵 P_k 的各列，那么：

$$\Pi_k = P_k P_k^\dagger$$

◆ 四、玻恩规则

读数 k 的概率：

$$p_k = \psi^\dagger \Pi_k \psi = \psi^\dagger P_k P_k^\dagger \psi = \| P_k^\dagger \psi \|^2$$

第 20 章的读法：P_k † 是上行，把细层的箭头收进读数 k 那个粗格子；P_k 是回写，把粗格子摊回细层；ψ † 是和原来的自己比一比。概率，是一来一回之后的重合，也就是上行之后那一份长度的平方。

这一行式子，是标准量子力学的恒等式；把它读成上行与回写，是本书的诠释。

◆ 五、Gleason 定理（陈述）

设希尔伯特空间的维数至少为三。若函数 f 给每个单位向量指派一个零到一之间的数，并且对任何一组正交基，f 在这组基上的值之和都等于一，那么必存在一个密度算子 ρ，使得对每个单位向量 x：

$$f(x) = x^\dagger \rho \, x$$

纯态时，ρ ＝ ψψ†，这就是玻恩规则。第 25 章说：定理的出发点，是一个对所有方向一次给齐的函数，这是本书指出的那条隐藏前提。

◆ 六、Kochen–Specker 定理（陈述）

在维数至少为三的希尔伯特空间里，不存在这样一种指派：给每个投影算子一个零或一，使得任何一组彼此正交、加起来等于单位算子的投影里，恰好有一个取一，并且每个投影的值与它属于哪一组无关。

它可以从 Gleason 定理推出：零一指派是一种不连续的概率指派，而 Gleason 定理给出的指派是连续的。

◆ 七、贝尔—CHSH 不等式

两边各有两种量法 A、A′ 与 B、B′，每次结果取正一或负一。记 E 为两边结果乘积的平均值。若属性事先写好且两边互不影响，则：

$$S = |E(A,B) + E(A,B') + E(A',B) - E(A',B')| \le 2$$

量子力学允许 S 达到 $2\sqrt{2}$，约 2.83。第 2 章讲的就是这一条。

◆ 八、索金参数

三条缝甲、乙、丙。记 P(甲乙丙) 为三条全开时某点的计数率，其余类推，P(0) 为全关的本底。索金参数：

$$I_3 = P_{ABC} - P_{AB} - P_{AC} - P_{BC} + P_A + P_B + P_C - P_0$$

若概率是振幅的平方，I_3 严格为零（扣除弯绕路径的效应后）。第 26 章讲的就是这一条。

◆ 九、不确定关系

位置与动量：

$$\Delta x \, \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$

一般地，两个物理量 A、B 的不确定度，受它们对易子的约束（罗伯逊关系）。第 34 章讲的就是这一条。

附录二

多重网格入门

这一件，给想弄清第四编那把钥匙的读者。

◆ 一、要解的是什么

物理和工程里，常要解一类方程：给定一块区域和它的边界条件，求区域里每一点的值，比如温度、电势。把区域切成网格，方程就变成一个很大的线性方程组：

$$A\,u = f$$

◆ 二、为什么慢

最简单的办法，是一遍遍地迭代：让每个格子的值，和邻居对齐一点。这种迭代，对近处的、急促的误差很有效，几遍就平；对大范围的、缓慢起伏的误差很无效，要成千上万遍。网格越细，越慢。

◆ 三、四个动作

磨光：在当前网格上迭代几遍，把急促的误差磨平。剩下的误差是缓慢起伏的。

限制：算出残差 r = f − A u，用限制算子 R 把它搬到粗网格上。细节丢了，大范围的起伏留了下来，并且在粗网格上变成了急促的起伏。

粗层求解：在粗网格上解修正方程。如果粗网格还不够粗，就递归地再往下一层，到最粗的一层直接解。

延拓：用延拓算子 P 把粗网格上的修正搬回细网格，加上去；再磨光几遍，磨掉延拓带进的小毛刺。

一圈下来，画在纸上像字母 V，叫 V 循环。如果在粗层多转几次，像字母 W，叫 W 循环。

◆ 四、伽辽金条件

粗网格上的方程该怎么写？一种最自然的选法，是：

$$R = P^{\mathrm{T}}, \qquad A_c = R\,A\,P = P^{\mathrm{T}} A\,P$$

处理复数时，取共轭转置 $P^{\dagger}$。对于对称正定的问题，这样选，粗层的修正在能量的意义上是最优的。第 20 章借的，就是这一条：上行是回写的伴随，粗层算子是一个二次型。

◆ 五、为什么快

多重网格最要紧的性质：在许多问题上，收敛所需的圈数，几乎不随网格变细而增加；总工作量和网格点数同一量级。层数大约随网格的细度取对数增长。第 17 章和第 40 章用到了这一条。

◆ 六、代数多重网格

几何多重网格，事先有一套粗细分明的网格。代数多重网格不预设几何网格，它直接从矩阵 A 本身，看哪些未知量彼此缠得紧，把它们归成粗层的一个点，层级由问题自己长出来。

第四编的待思问题里说过：代数多重网格，可能比几何多重网格更贴近「事件格不是先在的」这个说法。这一点，本书没有做完，留作以后。

◆ 七、和重整化群

物理学里的重整化群，把一个系统在不同尺度上的样子，一层层地合并、比较；多重网格把一个方程在不同粗细的网格上，一层层地解、回写。两者是同一类分层思想的两面，布兰特等人早就注意到这层亲缘。〔据研究文献〕

附录三

术语对照表

本表列出本书用语、物理学用语，以及两者的关系。「同构」指结构上的确是同一种东西，有数学对应；「类比」指结构相像，可没有严格的数学对应；「本书读法」指本书提出的诠释，物理学界没有这个说法。

本书用语	物理学用语	关系	见第几章
一锅粥（路）	叠加态，相对于某组基	本书读法	9、11
正在成形（形状）	干涉条纹，概率分布的累积	本书读法	13
稳定显露	测量读数，宏观记录	本书读法	9、16
土	环境、相互作用、关联	类比	8、12
一对之间的土	量子纠缠	量子纠缠是土的一种	12
碰撞（路在一锅粥里）	振幅相加，干涉	类比	11
门槛	不可逆放大，宏观记录形成	本书读法	14
限制、上行	粗粒化	同构	18
磨光	局部弛豫、热化	类比（大体一样）	18
粗层求解	宏观读数确定	类比（结构相像）	18
延拓、回写	测量后状态（投影假设）	本书读法（最大胆）	18、19
上行是回写的伴随	投影算子 $\Pi = PP^\dagger$	同构（数学恒等）	20
一来一回的重合	玻恩概率 $\psi^\dagger \Pi \psi$	同构的数学，本书读法的意义	20、24
收敛	测量可重复，观察者间一致	本书读法	21
冗余平台	量子达尔文主义的经典平台	类比（结构对应很紧）	22
回写太勤	量子芝诺效应	本书读法	35
互动不等于能量交换	无相互作用测量	本书读法	36

本书用语	物理学用语	关系	见第几章
偏好基由互动筛出	环境诱导超选择，指针态	与楚雷克一致，补号位	38
理念界里的总波函数	多世界的普适波函数	本书读法	39
号位（客体、互动、主体）	系统、仪器、观察者	类比；号位不是先划分的	7
SDE 数 N_SDE	无直接对应	借用形状，数值未操作化	9、43

附录四

可错条款登记表

本表是第 42 章那张表的存档版，增加「截至 2026 年 10 月」一栏。以后每有新实验落在某一条上，就在这一栏更新。

编号	本书的说法	什么结果会让它撤回	类别	截至 2026 年 10 月
一	层层稳住才算事实；门槛就是冗余平台的起点	宏观记录在没有形成冗余平台时就已不可撤回	判别注	未开奖
二	站上冗余平台的读数，不能连同全部副本被倒回去	已被放大、被环境回写成很多份的读数被完整倒回并重新干涉	判别注	未开奖
三	没有回写，就没有塌缩	隔绝极干净的大物体，叠加仍按自发塌缩理论预言的速率散掉	判别注	未开奖；无参数的迪奥西—彭罗斯模型已被排除
四	每层稳住都是两两配对	三缝干涉扣除弯绕路径后测出确凿不为零的三阶项	相容注	迄今站住（上限约十万分之三）
五	纠缠关联在比对那一层才稳住	纠缠可用来超光速传消息	相容注	迄今站住
六	波和粒子是同一差异在两层上的分配	同一对象上路径信息与条纹清晰度同时完全	相容注	迄今站住
七	位置与动量是两种稳住	同一态上两者同时突破肯纳德下限	相容注	迄今站住

编号	本书的说法	什么结果会让它撤回	类别	截至 2026 年 10 月
八	芝诺效应来自回写太勤	不回写的轻碰产生与强测量同样强的芝诺效应	判别注（弱）	未设计出干净实验
九	炸弹改变了土	完全可逆、不回写的小装置与真炸弹效果完全相同	判别注（弱）	未设计出干净实验
十	隧穿要求那段路不被回写	墙内强烈不可逆回写完全不影响隧穿	相容注	迄今站住
十一	偏好基由互动决定	稳住的量与互动所针对的量毫无关系	相容注	迄今站住
十二	层不放在单个系统的测量强度上	已被弱测量撤销实验确认	自我约束	已采纳

附录五

参考文献

本书引用的文献分四类：一、量子力学的奠基与诠释（按年份）；二、正文提到的实验（按年份）；三、数学与多重网格；四、本系列相关卷。外文文献保留原题；凡正文转述的，均为大意。

◆ 一、量子力学的奠基与诠释

1. Born, M. Zur Quantenmechanik der Stoßvorgänge. Zeitschrift für Physik 37, 863 (1926).
2. Heisenberg, W. Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik. Zeitschrift für Physik 43, 172 (1927).
3. Kennard, E. H. Zur Quantenmechanik einfacher Bewegungstypen. Zeitschrift für Physik 44, 326 (1927).
4. Bohr, N. The quantum postulate and the recent development of atomic theory. Nature 121, 580 (1928).
5. Robertson, H. P. The uncertainty principle. Physical Review 34, 163 (1929).
6. von Neumann, J. Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik. Springer (1932).
7. Einstein, A., Podolsky, B., Rosen, N. Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete? Physical Review 47, 777 (1935).
8. Bohr, N. Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete? Physical Review 48, 696 (1935).
9. Schrödinger, E. Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik. Naturwissenschaften 23 (1935).

10. Bohm, D. A suggested interpretation of the quantum theory in terms of "hidden" variables. Physical Review 85, 166 (1952).

11. Everett, H. "Relative state" formulation of quantum mechanics. Reviews of Modern Physics 29, 454 (1957).

12. Gleason, A. M. Measures on the closed subspaces of a Hilbert space. Journal of Mathematics and Mechanics 6, 885 (1957).

13. Wigner, E. P. Remarks on the mind–body question. 收入 The Scientist Speculates (1961).

14. Bell, J. S. On the Einstein Podolsky Rosen paradox. Physics 1, 195 (1964).

15. Kochen, S., Specker, E. P. The problem of hidden variables in quantum mechanics. Journal of Mathematics and Mechanics 17, 59 (1967).

16. Clauser, J. F., Horne, M. A., Shimony, A., Holt, R. A. Proposed experiment to test local hidden-variable theories. Physical Review Letters 23, 880 (1969).

17. Zeh, H. D. On the interpretation of measurement in quantum theory. Foundations of Physics 1, 69 (1970).

18. Unruh, W. G. Notes on black-hole evaporation. Physical Review D 14, 870 (1976).

19. Misra, B., Sudarshan, E. C. G. The Zeno's paradox in quantum theory. Journal of Mathematical Physics 18, 756 (1977).

20. Wheeler, J. A. The "past" and the "delayed-choice" double-slit experiment. 收入 Mathematical Foundations of Quantum Theory (1978).

21. Zurek, W. H. Pointer basis of quantum apparatus. Physical Review D 24, 1516 (1981).

22. Griffiths, R. B. Consistent histories and the interpretation of quantum mechanics. Journal of Statistical Physics 36, 219 (1984).

23. Joos, E., Zeh, H. D. The emergence of classical properties through interaction with the environment. Zeitschrift für Physik B 59, 223 (1985).

24. Cramer, J. G. The transactional interpretation of quantum mechanics. Reviews of Modern Physics 58, 647 (1986).

25. Ghirardi, G. C., Rimini, A., Weber, T. Unified dynamics for microscopic and macroscopic systems. Physical Review D 34, 470 (1986).

26. Aharonov, Y., Albert, D. Z., Vaidman, L. How the result of a measurement of a component of the spin of a spin-1/2 particle can turn out to be 100. Physical Review Letters 60, 1351 (1988).

27. Greenberger, D. M., Horne, M. A., Zeilinger, A. Going beyond Bell's theorem. 收入 Bell's Theorem, Quantum Theory and Conceptions of the Universe (1989).

28. Mermin, N. D. Quantum mysteries revisited. American Journal of Physics 58, 731 (1990).

29. Elitzur, A. C., Vaidman, L. Quantum mechanical interaction-free measurements. Foundations of Physics 23, 987 (1993).

30. Sorkin, R. D. Quantum mechanics as quantum measure theory. Modern Physics Letters A 9, 3119 (1994).

31. Rovelli, C. Relational quantum mechanics. International Journal of Theoretical Physics 35, 1637 (1996).

32. Englert, B.-G. Fringe visibility and which-way information: an inequality. Physical Review Letters 77, 2154 (1996).

33. Deutsch, D. Quantum theory of probability and decisions. Proceedings of the Royal Society A 455, 3129 (1999).

34. Hardy, L. Quantum theory from five reasonable axioms. arXiv:quant-ph/0101012 (2001).

35. Ozawa, M. Universally valid reformulation of the Heisenberg uncertainty principle on noise and disturbance in measurement. Physical Review A 67, 042105 (2003).

36. Zurek, W. H. Environment-assisted invariance, entanglement, and probabilities in quantum physics. Physical Review Letters 90, 120404 (2003).

37. Aaronson, S. Is quantum mechanics an island in theoryspace? arXiv:quant-ph/0401062 (2004).

38. Wallace, D. The Emergent Multiverse. Oxford University Press (2012).

39. Zurek, W. H. Quantum Darwinism. Nature Physics 5, 181 (2009).

40. Masanes, Ll., Müller, M. P. A derivation of quantum theory from physical requirements. New Journal of Physics 13, 063001 (2011).

41. Chiribella, G., D'Ariano, G. M., Perinotti, P. Informational derivation of quantum theory. Physical Review A 84, 012311 (2011).

42. Frauchiger, D., Renner, R. Quantum theory cannot consistently describe the use of itself. Nature Communications 9, 3711 (2018).

43. Schlosshauer, M. Quantum decoherence. Physics Reports 831, 1 (2019).

44. Renou, M.-O. et al. Quantum theory based on real numbers can be experimentally falsified. Nature 600, 625 (2021).

◆ 二、正文提到的实验

45. Freedman, S. J., Clauser, J. F. Experimental test of local hidden-variable theories. Physical Review Letters 28, 938 (1972).

46. Merli, P. G., Missiroli, G. F., Pozzi, G. On the statistical aspect of electron interference phenomena. American Journal of Physics 44, 306 (1976).

47. Aspect, A., Dalibard, J., Roger, G. Experimental test of Bell's inequalities using time-varying analyzers. Physical Review Letters 49, 1804 (1982).

48. Tonomura, A. et al. Demonstration of single-electron buildup of an interference pattern. American Journal of Physics 57, 117 (1989).

49. Itano, W. M., Heinzen, D. J., Bollinger, J. J., Wineland, D. J. Quantum Zeno effect. Physical Review A 41, 2295 (1990).

50. Kwiat, P. et al. Interaction-free measurement. Physical Review Letters 74, 4763 (1995).

51. Brune, M. et al. Observing the progressive decoherence of the "meter" in a quantum measurement. Physical Review Letters 77, 4887 (1996).

52. Pan, J.-W., Bouwmeester, D., Weinfurter, H., Zeilinger, A. Experimental entanglement swapping. Physical Review Letters 80, 3891 (1998).

53. White, A. G., Mitchell, J. R., Nairz, O., Kwiat, P. G. "Interaction-free" imaging. Physical Review A 58, 605 (1998).

54. Arndt, M. et al. Wave–particle duality of C_{60} molecules. Nature 401, 680 (1999).

55. Kwiat, P. G. et al. High-efficiency quantum interrogation measurements via the quantum Zeno effect. Physical Review Letters 83, 4725 (1999).

56. Pan, J.-W. et al. Experimental test of quantum nonlocality in three-photon Greenberger–Horne–Zeilinger entanglement. Nature 403, 515 (2000).

57. Friedman, J. R. et al. Quantum superposition of distinct macroscopic states. Nature 406, 43 (2000).

58. van der Wal, C. H. et al. Quantum superposition of macroscopic persistent-current states. Science 290, 773 (2000).

59. Hackermüller, L. et al. Decoherence of matter waves by thermal emission of radiation. Nature 427, 711 (2004).

60. Jacques, V. et al. Experimental realization of Wheeler's delayed-choice gedanken experiment. Science 315, 966 (2007).

61. Katz, N. et al. Reversal of the weak measurement of a quantum state in a superconducting phase qubit. Physical Review Letters 101, 200401 (2008).

62. Kirchmair, G. et al. State-independent experimental test of quantum contextuality. Nature 460, 494 (2009).

63. O'Connell, A. D. et al. Quantum ground state and single-phonon control of a mechanical resonator. Nature 464, 697 (2010).

64. Sinha, U. et al. Ruling out multi-order interference in quantum mechanics. Science 329, 418 (2010).

65. Erhart, J. et al. Experimental demonstration of a universally valid error–disturbance uncertainty relation in spin measurements. Nature Physics 8, 185 (2012).

66. Kim, Y.-S. et al. Protecting entanglement from decoherence using weak measurement and quantum measurement reversal. Nature Physics 8, 117 (2012).

67. Sawant, R. et al. Nonclassical paths in quantum interference experiments. Physical Review Letters 113, 120406 (2014).

68. Hensen, B. et al. Loophole-free Bell inequality violation using electron spins separated by 1.3 kilometres. Nature 526, 682 (2015).

69. Shalm, L. K. et al. Strong loophole-free test of local realism. Physical Review Letters 115, 250402 (2015).

70. Giustina, M. et al. Significant-loophole-free test of Bell's theorem with entangled photons. Physical Review Letters 115, 250401 (2015).

71. Magaña-Loaiza, O. S. et al. Exotic looped trajectories of photons in three-slit interference. Nature Communications 7, 13987 (2016).

72. Kauten, T. et al. Obtaining tight bounds on higher-order interferences with a 5-path interferometer. New Journal of Physics 19, 033017 (2017).

73. Yin, J. et al. Satellite-based entanglement distribution over 1200 kilometers. Science 356, 1140 (2017).

74. Unden, T. K. et al. Revealing the emergence of classicality using nitrogen-vacancy centers. Physical Review Letters 123, 140402 (2019).

75. Fein, Y. Y. et al. Quantum superposition of molecules beyond 25 kDa. Nature Physics 15, 1242 (2019).

76. Bong, K.-W. et al. A strong no-go theorem on the Wigner's friend paradox. Nature Physics 16, 1199 (2020).

77. Ramos, R., Spierings, D., Racicot, I., Steinberg, A. M. Measurement of the time spent by a tunnelling atom within the barrier region. Nature 583, 529 (2020).

78. Donadi, S. et al. Underground test of gravity-related wave function collapse. Nature Physics 17, 74 (2021).

79. Chen, M.-C. et al. Ruling out real-valued standard formalism of quantum theory. Physical Review Letters 128, 040403 (2022).

80. Bild, M. et al. Schrödinger cat states of a 16-microgram mechanical oscillator. Science 380, 274 (2023).

81. Google Quantum AI. Quantum error correction below the surface code threshold. Nature 638, 920 (2025).

82. Pedalino, S. et al. 金属钠团簇的物质波干涉. Nature 649, 866 (2026).

83. 单光子雪崩二极管建立时间研究：Reducing avalanche build-up time by integrating a single-photon avalanche diode with a BiCMOS gating circuit. Sensors (2024).

84. 光电倍增管与雪崩光电二极管教学讲义：Photomultipliers and Avalanche Photodiodes, USPAS (2010).

◆ 三、数学与多重网格

85. Fedorenko, R. P. The speed of convergence of one iterative process. USSR Computational Mathematics and Mathematical Physics 4, 227 (1964).

86. Brandt, A. Multi-level adaptive solutions to boundary-value problems. Mathematics of Computation 31, 333 (1977).

87. Hackbusch, W. Multi-Grid Methods and Applications. Springer (1985).

88. Briggs, W. L., Henson, V. E., McCormick, S. F. A Multigrid Tutorial, 2nd ed. SIAM (2000).

89. Wilson, K. G. Renormalization group and critical phenomena. Physical Review B 4, 3174 (1971).

90. Kadanoff, L. P. Scaling laws for Ising models near Tc. Physics 2, 263 (1966).

◆ 四、本系列相关卷（德麦国际出版社）

91. 王德生。第 53 号《SDE数学导论》。

92. 王德生。第 156 号《主体发生学的开启》。

93. 王德生。第 205 号《上帝掷不掷骰子？》（与阳涌合著）。

94. 王德生。第 212 号《三视角方法论与实践应用》（与牟军合著）。

95. 王德生。第 226 号《超越波普尔》。

96. 王德生。第 238 号《特征律》。

97. 王德生。第 261 号《SDE本体论入门：世界是如何发生的》。

98. 王德生。第 324 号《SDE教育发生学导论》。

99. 王德生。第 337 号《知识的谱系发生》。

100. 王德生。第 344 号《意义数学的诞生》。

◆ 〔待核〕余项

正文各处〔待核〕已于 2026 年 10 月逐条核对完毕，结果已改入正文。以下几条文献的卷页，是凭知识写下、尚未在原始页面逐一打开核对的，印刷前须再核：第 65、66、76、78、81、82、83 条。

后记

◆ 一、这本书是怎样写成的

这本书，起于 2026 年 10 月 13 日下午的一句话。

那天，王德生博士刚给另一本书定了题，叫《属性纠缠论——实体属性发生学导论》。定完题，他随口说了一句：今天的实体属性发生学，也是量子力学的理论需要的知识本体论。

话说出来，就开始往下走。

先是对号：量子力学一百年的诠释之争，正好落在客体、主体、互动三个位置上，像一场物理学版的风幡之争。接着，他提醒：SDE 有三态，差异序列有混沌、介生、秩序，显露也有三种，稳定显露在最后；这可以回答玻恩规则。又补了一句：特征律，就是差异的稳定性出现，开始于混沌碰撞、自组织、涌现。

然后是 Gleason 定理。讨论到要找出它哪一条前提在发生学里不成立时，王德生博士说：稳定是层级迭代的，不是线性两程，类似多重网格法。

这一句，后来成了全书的总钥匙。多重网格法，是他早年在中国科学院做计算数学时，天天用的一件工具。三十年后，它被拿来读一个物理学家吵了一百年的问题。

当天下午，先做了一次数量级的核对，拿光电倍增管和雪崩二极管的数据，对「稳住的时间跟着层数走」这笔账；结果是相容，却分不出高低。这件事被老老实实写进了第 40 章。

接着列大纲，从七编扩到八编，加进专拆难题的第六编。随后一批一批地写，写到四十七章，再统一加厚、核对、补成书件。

全书由王德生博士立题、口述承重命题、逐处裁定；文字由 AI 协作执笔与统稿。统稿时，加厚段落由几个写作代理分头起草，事实核对由一个核查代理逐条查了原始论文和机构公告，三十多处〔待核〕，四处改正，其余确认。这样的写法，本身就是本书说的那种层层回写：一句话冒头，一层层往上传，一层层往回改，改到各层对上。

◆ 二、要谢的

要谢的，首先是那些物理学家。从玻恩、玻尔、爱因斯坦、薛定谔，到贝尔、格里森、楚雷克，到今天在地下实验室、稀释制冷机旁、卫星地面站里做实验的人。本书没有改动他们的任何一个方程。本书做的，只是接住他们早已逼出来的结论，换一个问法。

要谢的，还有本系列前面那些卷。《SDE数学导论》借来了 SDE 数，《特征律》借来了那条律，《超越波普尔》借来了一次性与多次性，《上帝掷不掷骰子？》先讲过爱因斯坦与玻尔的缝。

书里的林舟、林小满，以及各章出现的那些人，都是虚构的。可他们碰到的事，量血压、等成绩、错题本、一条群消息、一份 AI 写的综述，是每个读者都碰到过的。

◆ 三、请读者回写

一本讲「回写」的书，最希望的，是被读者回写。

如果你是物理学家，请从第 42 章那张表下手，告诉本书，哪一条押得太宽，哪一条其实分不出高低，哪一个实验已经落在了某一条上。

如果你是数学家，请从第 20 章和附录二下手，告诉本书，测量链和多重网格之间，哪些是真同构，哪些只是像。

如果你是一个普通读者，请把那两行小账带回日子里：下一次看到一个让你心里一紧的数，问一句，这个读数是谁的？它是先在的，还是发生的？

你的每一次回写，都会让这本书在你那一层上，再稳一次，或者再改一次。

◆ 四、下一本见

这本书，是《属性纠缠论——实体属性发生学导论》的一个先行的分支。那本书要把这里用到的底盘，承载者 × 属性、三个号位、三属性纠缠，在哲学和心理学里做完整，并用到教育、健康、事业上去。

第 43 章说的那几处最软的地方，尤其是号位在物理里的数学样子，要等那本书把底盘打得更结实，再回头来补。

下一本见。

一个读数，不是谁的私产；一本书，也不是。

判　词

读数和它的主人
一起发生；
玻恩规则，是这场发生
一层层稳住之后的终点。

——本书

一百年来，量子力学的算法从没出过错，物理学家却一直吵不完：屏上那一次闪光，到底是谁的？归光子，归仪器，还是归看的人？

本书说，这道题本身问歪了。属性不是挂在一个先在的东西身上，等人去发现；读数、光子、这一次测量、测到的人，一起发生出来。稳住不是一步到位，而像计算数学里的多重网格法：细层磨光、粗层求解、一圈圈回写，直到各层对上。玻恩规则里的平方，就是这一来一回留下的账。

八编四十七章，从量血压讲到双缝，从薛定谔的猫、维格纳的朋友讲到量子纠错，再回到一张化验单、一个孩子的「会」、一份 AI 写的综述。书里所有的说法都标明是诠释，并把可错条款登记在案。

收敛即事实；客观，是冗余回写出来的。

ISBN 979-8-90690-814-8
9 798906 908148

德麦国际出版社 · Demai International Press
德麦国际专著第 394 号 · 八编四十七章 · 约 29 万字
定价 US$23.00