

图书在版编目 (CIP) 数据

宇宙逍遥 / (美) 惠勒著; 田松, 南宫梅芳译. —北京: 北京理工大学出版社, 2006. 4

(盗火者译丛)

ISBN 7 - 5640 - 0659 - 5

I. 宇… II. ①惠… ②田… ③南… III. ①宇宙学 - 普及读物
②科学哲学 - 普及读物 IV. ①P159 - 49 ②N02 - 49

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 016566 号

北京市版权局著作权合同登记号 图字: 01 - 2003 - 0422 号

Translation from the English language edition:

At Home in the Universe by John A. Wheeler

Copyright © 1996 Springer-Verlag New York, Inc.

Springer-Verlag is a company in the Bertelsmann Springer
publishing group

All Rights Reserved

出版发行/ 北京理工大学出版社

社 址/ 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编/ 100081

电 话/ (010) 68914775(办公室) 68944990(批销中心) 68911084(读者服务部)

网 址/ [http:// www. bitpress. com. cn](http://www.bitpress.com.cn)

电子邮箱/ [chiefeditor@ bitpress. com. cn](mailto:chiefeditor@bitpress.com.cn)

经 销/ 全国各地新华书店

印 刷/ 北京圣瑞伦印刷厂

开 本/ 850 毫米 × 1168 毫米 1/32

印 张/ 14.75

插 页/ 2

字 数/ 362 千字

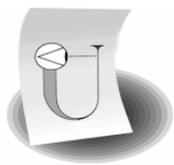
版 次/ 2006 年 4 月第 1 版 2006 年 4 月第 1 次印刷

印 数/ 1 ~ 5000 册

定 价/ 34.00 元

责任校对/ 陈玉梅

责任印制/ 吴皓云



先知七女：探索真理的佑助

3 当我把某些致统一的概念 (unifying concept)^①推广到我自己的领域之外时，我总是感到非常犹豫；我更不敢轻言它们在人类其它知识领域中的应用。和别人一样，我根本算不上什么专家。我们不妨回忆一下专家的定义，所谓专家，就是一个凭借他辛苦得来的经验，了解自己领域中几乎所有可能错误的人。我们的全部问题就是让这些错误尽可能快地显现出来，并识别它们。

一个领域中的致统一概念能否应用于其它领域？我想借七位西碧尔^②之口来表示我的肯定，如果她们不介意的话。

七位西碧尔如是说

1. 未知者可知
2. 在试错中进步
3. 测量与理论一体
4. 类比给出洞察
5. 新旧理论相承

① Unifying concept 是指能够把本来不同的研究领域联结起来乃至统一起来的概念。比如能量就曾经把热学和力学联结起来。不过 Kenneth Ford 教授在给译者的信中指出，惠勒在这里所要讨论的还不只是“概念”，而且是能够把不同的学术领域，包括科学外的学术领域联合起来的“理念” (idea)。这里遵从戈革先生的建议，译为致统一概念。——译者注

② 西碧尔，古希腊或者古罗马的女预言家，共有七位。一般译为先知，本书音译为西碧尔。标题采用戈革先生译法，先知七女。——译者注

6. 互补 (complementarity^①) 化解矛盾

7. 蚁穴溃堤，星火燎原

但是如果没有第一项“未知者可知”，其余六项将流于空谈。

如果没有奋斗的动力，奋斗的韬略就没有用武之地。如果真的存在某种能够应用于人类所有知识领域的致统一概念，还有什么能比“所有黑暗都将照亮”这句话的心气更高呢？

信念：自然是可理解的

“Raffiniert ist der Herr Gott, aber Boshaft ist er nicht.” 爱因斯坦⁴的这句话就刻在斐恩楼 (Fine Hall)^②教授会议室的壁炉上。字面上的意思是说：“上帝是深奥的，但他并无恶意。”狭义地理解，爱因斯坦是在告诉我们这样一个信念：神秘的时间和空间、物质和能量，虽然它们现在似乎难以理解，但总有一天会现出它的谜底。但是，从更宽泛的意义上说，他否认，在自然或者人类知识的任何领域会存在一个花衣笛手 (Pied Piper)^③，能够引导人们穿过无尽的轮环和无穷的深穴，穿过没有尽头的世界，走向一条通往洞悉轮中之轮、轮中之秘的道路。从历史的意义讲，他是又一位先知，提醒我们不要忘记我们得自启蒙时代的遗产：相信人类的理性具有解答人和自然奥秘的力量。

① Complementary, 玻尔哲学的重要概念，亦译为“并协”。两种译法各有所长，各有所失。这里采用戈革先生采用的译法。——译者注

② 普林斯顿大学的一座教学楼。——译者注

③ 典出德国童话。传说在德国普鲁士的一座小镇 (Hamelin) 曾发生鼠疫，居民束手无策。一位身穿红黄相间及地长袍的魔笛手来到这里，自称能铲除老鼠。小镇居民答应给他丰厚的财宝，花衣笛手便吹起魔笛，全镇的老鼠都跟着他跑到了河里。但是镇里人却不肯兑现承诺。花衣笛手又吹起笛子，全镇的小孩都跟着他走了，无影无踪。——译者注

抗辩：自然与人均不可知

然而，无论这些话语在我们今天怎样招人喜欢，其中所包含的小道理（minor truth）并不是显而易见的，尼尔斯·玻尔（Niels Bohr）用这个词指那些否命题明显错误的陈述。而未知的可知性，在其否命题同样为真的意义上，按照玻尔的说法，则无疑是一个大道理（great truth）：有更多的东西我们永远也不会知道！但是，这完全不是说理性的规则有什么局限。我们不难想象，曾几何时，人类的起源被认为是永不可知的神圣秘密。而难以想象的是那样一个时代，人们相信天体的运转需要外在的推动。但是，我们仍然生活在这样一个时代，人们普遍认为，人类的行为是超出理性所能分析的范围之外的。格鲁鲍姆（Grünbaum）¹最近认真地驳斥了那些否定人类的行为存在因果关系的论点。在此，且让我引用一些反方的论点，这些论点来源多样，代表了古往今来各个国家关于“未知者不可知”的典型信念。

（1）人类行为不诉之以因果描述，所以是不可预测的，因为每一个个体都是独特的，不可能与他人完全相仿。

（2）即使在人类行为的现象中存在着因果序列，也因其过于复杂而永远不能发现。

（3）在物理科学中，现在的事件总是由过去的事件决定，但是在人类行为中，现在的行为则指向未来的目标，因而是由未来的目标所“决定的”。

5 （4）如果人类行为是因果性的序列事件的一部分，因而原则上可以预测的话，那么，在善与恶之间的选择就将失去意义，并且……让人对自己的行为负责也是没有意义的……

先不必急于反驳。这些论点显示，理性主义（rationalism）观念并未传达到所有人的头脑中，尽管随着牛顿的伟大发现，太阳系变成极简单的机器，理性主义已飞快地扩展到各个领域。

理性规则适用于所有的知识领域，在某种意义上，我们的日本同事比我们认识得更清楚。退回到科学一词更古老更本真的含义上，他们的国家科学院不仅像我们一样包括心理学，而且还包括历史、文学和艺术。更一般地说，在这种宽泛的意义上，我们能够同意科学包括一切涉及到“扩展人类经验的范围并使之纳入到某种次序之中”（尼尔斯·玻尔语）的活动吗？

探索的内驱力：为生存而奋斗

一切秘密都将揭开，这当然不是一个可以从逻辑上推出来的定理，而是一个信仰，只能由它自己的结果检验。我们都知道，这个理念是行之有效的——这就是它自身价值的证明，也是我们可能拥有的全部证据。我们看到，可知性原则（principle of knowability）已经成为个人和国家发展中的积极因素，从一个领域到又一个领域不断地发挥着作用。没有人会觉得自己能够忽视它。它不是继承下来的美德，也不是比别人更强的推理能力，因为攻克未知的冲动就在人的内心之中。我们对于理性的信念不是来自童年教育、学校教育以及日常生活中的点点滴滴吗？如果发现的冲动不是那些为了生存而奋斗的代代祖先——通过我们的文明——传承给我们的生存素质中的一部分，它又会来自何处？我怀疑达尔文主义者（Darwinian）^①是否能够把我们和那些出生在森林里，让父母反复叮嘱别在林中迷路的野兽区分开。要么了解真理，要么灭亡！这种冲动已经足够了。

① 达尔文主义者认为人与动物在解剖结构、生理功能甚至心理行为上有着密切的联系，并没有人所“独享”的语言和智力。在此，作者认为人与动物是不同的，虽然人和动物都能识别森林中的道路，但是动物只是被父母告知，而没有自己了解未知的能力。即，人与动物的区别就在于是否具备“know”的冲动。——译者注

热核危机

强烈的求知欲望远远不是来自于书本，来自于逻辑，而是来自于生存本身，1949年末到1950年初的氢弹危机证实了这一点。那场论战涉及到许多领域，有道德的、政治的，也有科学的。然而，在我看来，分歧非常简单。它发生在这样两伙人之间，一伙人认为：要实现热核爆炸不知要用多少年，而且很可能根本就不划算；另一伙人则认为：虽然我们不知道怎样造一个出来，但是一定有办法让能量释放出来，我们无力承担不去探索真相的代价，所以要全力以赴。从某个层面上讲，这个分歧表现为这样一个问题：是否应该全力投入对热核反应的探索。而在更高的层面上——如果我们同意特威兹穆尔爵士（Lord Tweedsmuir）^①的说法，政治是人类活动的最高形式——这个问题会以很多种形式出现，其中之一就是：西方世界是不是要否认自己依靠强力而获得和平的政策。这需要一个有勇气的政治领导人作出回答。换句话说，他要说的非常简单：为了生存，我们必须了解热核爆炸理论。

几个月以后，我与原子能委员会军事应用部（A. E. C. Division of Military Applications）的优秀负责人詹姆斯·麦考马克（James McCormack）将军谈到热核计划的进展及其存在的问题时，提到洛斯阿拉莫斯（Los Alamos）^②的研究速度和华盛顿的压力与支持之间的关系，我问：如果他的办公室和委员会的人不再做这件事，会怎么样？他的回答快捷简短：美国人民会

① 这种说法古已有之，并非 Tweedsmuir 所发明。Tweedsmuir 是英国的男爵头衔，惠勒所指大概是第一位 Tweedsmuir 男爵约翰·巴肯（John Buchan, 1875—1940），苏格兰政治家、历史学家和惊险小说作家，曾任加拿大总督（1935—1940）。——译者注

② Los Alamos，美国制造原子弹的曼哈顿计划的重要基地之一。惠勒当时也曾在此工作。——译者注

把我们赶下台去。

在真理的探索中，生存动力并不总是像这两件事那样表现得那么清楚。这提醒我们，这不是为了真理的真理，而是为了生存的真理——一个人、一个工厂或者一个国家的生存。研究人员之所以得到工资，是因为公众想要知道，而不是由于研究人员自己要知道。换句话说，因为研究人员的研究需要有人为他付账。

“为真理而真理”比“为生存而真理”更加动听

幸运的是，人类的心灵能够抓住“为生存而真理”这块硬石头，并在上面镶嵌一颗“为真理而真理”的珍珠。这颗珍珠比未经装饰的石头吸引了更多的大脑为它服务，而文明的胜利常常因口号的改变而获得。但是，尽管对纯粹真理的追求也有很强的动力，但与生存相比，往往要放在第二位——无论这种生存关乎他的病人、他的职位，还是他的国家。

求知动力的强弱因人而异，就如生存意志也有强弱。这种差别像性格差别一样，可以简述如下：他投入，或者不投入；或者他投入，但是还不够。

费米的探索动力

就探索的动力而言，我可以给出一个例子。人物，恩里科·费米（Enrico Fermi）；时间，1994年夏天的一个下午。场景：一条灌溉渠，湍急的哥伦比亚河水（Columbia river）流淌在陡峭的水泥堤坝中，有四分之三满；几位在渠中游泳的朋友，他们是为了逃避汉福德（Hanford）^①的酷热；几条拦河拉起的绳索，游泳的人

① Hanford，美国原子能研究的重要中心，位于华盛顿州南部。惠勒所述的故事显然发生于曼哈顿工程进行期间。——译者注

可以抓住它，把自己拉上来，以免被冲到几英里之外。费米的问题：假设绳索断裂，能否自救？在被冲到绳子外面之前，大家反复尝试着向上爬了几次，然后，所有人都说不能。这时费米说：“看着。”费米一跃而入，他转过身来对抗急流，冲向潮湿的水泥坡，他试图找到手和臂的着力点，却一再被急流扯开，冲走，费米再一次向堤岸冲来，他不顾一切向那个光滑的斜坡发起冲击，一会儿抓住，一会儿又被冲开，最后，他终于逃出了水的魔爪，爬上来了。他的双臂和双腿流着血，但是脸上带着微笑。要想说明费米的求知**动力**，他怎样寻找未知事件的答案，我不知道还有什么例子比灌溉渠事件更好。在某种意义上，每一个致力于为神秘的事物寻找答案的人都具有同样的精神。

探索真相的技艺

我们的主题不是灌溉渠，而是存在于很多领域之中的致统一概念的能力——现在是这样的理念和信念：我们能够发现未知事物。这个信念使我们有可能迈出逃离水渠的第一步；而此后的任何步伐都与此完全不同，因为那些是建立在知识之上的。同样的信心也注视着塞纳河（Seine）上闪烁的微光，并宣布，一定可以找到一种办法，把这个景象记录下来，然后才有了发现的努力。而修拉⁸（Seurat^①）的追随者则不需要“未知者可知”这样的理念。引力质量和惯性质量的等值是能够理解的，这个信念使爱因斯坦获得了广义相对论，但学生们则完全可以从书本中学到，一点儿也不需要未知可知性怀有战斗的信念。守成与创业不可同日而语！

活泼灵动的诗的精灵所赋予人的最奇妙的启示之一来自于沉思冥想，“对灵魂和精神之本质的全力追索”，“我生命中最深刻的

① 指乔治·修拉（Georges Seurat, 1859—1891），印象派画家，点彩法的发明者。以《大碗岛的星期日》知名。印象派画家试图描绘物体转瞬即逝的光影效果，塞纳河是印象派画家喜爱的主题。——译者注

事物”。A.E.^①告诉我们：“以诗的形式向我显现，我深深地思索它出现的每一种情形，力求发现它最原始的根源。”在这里，他再一次敦促，探索者必须奋斗。

“并将与混沌搏杀，直到这位安那其（Anarch^②）向光明膜拜。”如果这是真的，按照他的说法，探索者的“收获将取决于他们渴望的程度”，那么，他自己的著作，《歌与歌泉》（*Song and Its Fountain*）就是这个道理的明证。

在诗歌中，在绘画中，在物理学中，以及在所有的知识领域中，都至少有一个致统一原则，一个信念：“人们可以在所有的领域拓展人类经验的范围，并将经验归之为秩序”；或者用一句谶语作为总结：“未知是可知的，不可能是可能的”；归根结底是一个词：“征服！”这就是追求真理的动力；那么，方法是什么呢？

格斗：试与错

我想我们很多人都愿意把试错法作为一切方法的根本——这是第一个普适的理念。我们还记得引擎的发明者约翰·克利斯（John Cris）的话吧：“把它发动起来，看看它为什么不转。”这种傻大胆和经验主义者惯用的手段常能奏效；或者如浮士德（Faust）所说：“路在哪儿？没有路；只要进入未知！”——“Wohin Der Weg？”

① 本名 George William Russell（1867—1935），A.E.是他的笔名，爱尔兰诗人、画家、记者、编辑、社会活动家，神秘主义者，其代表作 *Song and Its Fountains* 是一部探索心灵的著作。——译者注

② anarch 的译法很多，一般译为无政府主义（者），早期音译为安那其，邓文初先生《博览群书》2003年第9期的一篇文章中做过一些分析，并列举了若干译法，如无治主义。安那其不仅无政府，而且还要无婚姻、无宗教、无法律……反对一切秩序，这正是混沌。这里采用音译，不妨理解为混沌之神的名字。——译者注

Kein Weg; ins Unbetretene!” 我们还记得巴斯德 (Pasteur)^①吧，他应召拯救法国的蚕业，当他看到第一个蚕茧时，就抓起它，举到耳边，晃动，看它是否有动静。从头到尾自始至终，人们能够感受到他竭尽全力，一试再试的劲头。在这个过程中，他努力让所有可能的错误都表现出来，从而在试错中获得进步，所以最重要的就是：让错误尽快地，尽可能地显现出来。我们可以回想一些大作家的例子，他们是研究生活的科学家，他们一遍遍地试图用最清晰最准确的词语描述人格的微妙差别；还有同样致力于记录真相的艺术家，他们是形状、形式和色彩的科学家。雅克·马利夏 (Jacques Maréchal) 一位年轻的法国画家，曾邀请我参观巴黎美术学院 (Ecole des Beaux Arts)，一个一个地把他的同事指给我看，让我留意他们敏锐的目光和敏锐的思维，但是他最着重强调的是，他们对于完整和准确的坚持。他由衷地说：“我们彼此之间的观察和了解比我们自己家人间的了解还要准确。怀着一种对于真的激情，一个人可以创造出识别和记录的技巧来；而如果没有理想，技巧就什么用也没有。”在这样的动力激发之下，试错法怎么能不引导人们发现伟大的方法呢？

在乐观与怀疑之间摇摆

科学的怀疑态度赫赫有名，但是其乐观主义则不那么广为人知。甚至可以说，与大多数人类活动相比，创造性工作是多种多样的，或者充满希望，或者倍受挑剔；可能会迅速地添枝增叶，也可能要耐心地精挑细拣。不同的人因其个性和工作方式不同，所表现出来的程度也有所不同。我所认识的最伟大的思想家也是在大起大落之间摇摆。或一日，一些新的想法蜂拥而现，某些旧

① 指 Louis Pasteur (1822—1895)，法国化学家和微生物学家，现代微生物学的创始者，发明了巴氏杀菌法，并且改进了炭疽、狂犬病和禽霍乱的疫苗。——译者注

的理念枯木逢春，冒出新芽，各种想法就像开了锅一样，让人欢欣鼓舞；一种分析思路聚合起来，不由自主地一讲再讲，同时竖起耳朵，满怀希望地倾听关于这个新鲜想法的所有微妙的弦外之音和私密耳语。或一日，一切都轰然崩塌，不再能经得起深入批评的考验。我们需要一个新的《快乐者》（*L'Allegro*）和《幽思者》（*Il Penseroso*）^①去描写这种大悲大喜。要经过不知多少个这样的回合，才能生发出重要的成果。此种情况下，为了开动和激发创造的机制，没有什么比悖论更好了：让这个新主意的逻辑一致性出点儿什么问题。如果既没有悖论，又没有问题，也没有明显的矛盾，这个星期就太悲哀了！那怎么能取得进步呢？

设计大脑（Design for a Brain）是F·莫斯特勒（F. Mosteller）和罗伯特·布什（Robert Bush）²在一本奇妙的新书中讨论的主题，他们当时是普林斯顿的优秀物理学毕业生。一个能够从零开始，从其自身所处的环境中学习的机器该是什么样子的？有两个基本的设计原则是非常重要的：首先要能够持续地探索外部世界，深入到环境之中；其次要有一种手段来判明环境对此装置的反应是正的还是负的。布什和莫斯特勒向我们阐明：怎样才能设计出一个这样的电子回路系统，不论把它放到什么样的环境，都能做出合理的反应，并在不断的试错过程得到完善，甚至，如果把它放到一个新的环境中，它还能够重新学习。

“测量”：测量对于理论的依赖

作为一种常见的结构原则，试错法在许多知识领域均有效；10
而测量，则是另一种致统一概念。开尔文爵士（Lord Kelvin）宣称：如果你不能测量它，你就不知道自己在说什么。让我们回忆

① 英国大文学家约翰·弥尔顿（John Milton，1608—1674）早期的两首著名诗篇。——译者注

一下泰勒（Taylor）^①的著名测量：作为工作量与休息时间长度函数的劳动生产率及其对产业合理化所发挥的作用，但我们也会想起在芝加哥附近的西方电气公司（West Electric Company）所属的霍桑（Hawthorne）工厂进行的关于产量与光照和其他工作条件关系的研究及其惊人的结论。光照迥然不同的各个小组产量相同，而同样光照的各小组产量却不同。在物理环境的任何理性变化和结果之间并无可靠的关联。甚至更惊人的是，对于任何给定小组在任何给定条件下所做的研究越深入，那一组的产量增加就越多。结论很明显，光照和其他物理变化与被称为团队士气的神秘因素相比，都是次要的。被人研究这件事情本身就有助于士气的增加。而作为一个个体被人欣赏，更使士气大增。对于士气这种人性因素的考察，要求研究者彻底改变以往的研究方案和测量理论。今天，霍桑研究的结果在工厂管理中依然引发着革命性的变化。但是，对我们来说，教训是更普遍的：如果对所测量的事物没有一个合理的理论，测量就毫无意义。

测量依赖理论，很久以前，亨利·彭加勒（Henri Poincaré）就在他那本美妙的小书《科学的价值》（*La Valeur de la Science*）³中以动量的测量为例予以指出。早期工作者把这个量定义为质量与速度的乘积， mv 。这必然会使他们随即获得动量守恒定律——可以看到，在这个定义下，两个物体的动量之和在碰撞前后是守恒的。然后，一旦物体的运动速度可以与光速 c 相比时，麻烦就来了。前所定义的动量不再守恒。这个概念就不得不做出改变。于是，动量被定义为 $mv [1 - (v^2/c^2)]^{-1/2}$ 。该新的理论图景的**起点**是动量守恒定律，由此出发才**导出**动量这个守恒矢量的定义。

① 指 Fvederik W. Taylor (1856—1915)，古典管理学家，科学管理的创始人，他的理论后来被福特发展为福特汽车流水线。下面所述的霍桑实验是另一位管理学家 E. Mayor (1880—1949) 进行的，由此提出了管理学的人际关系理论。惠勒是想说明，这两种不同的管理学理论，与其测量方法是相互关联，同时出现的。——译者注

有人会问，如果动量守恒定律是由于对动量作了如此定义才保持为真，那它还有什么价值呢？彭加勒反过来让我们考虑这样一种情况，一个台球般的物体不断被其他物体所碰撞。在第一次碰撞中，我们可以利用守恒定律算出或者定义几个未知物体的动量。而随后的碰撞则不然。那里的动量是已知的了。这时，动量守恒定律为真，不是由于定义，而是由于这个世界的内在运作机制。彭加勒强调，所有的物理定律和理论都有这种深邃而微妙的性质，因为它们既为我们定义了必要的概念，也对这些概念的关系做出了陈述。反之，如果理论、定律和原理的某个部分有所缺失，将使我们失去定义，甚至失去使用某些概念的恰当方法。无论是霍桑的生产率研究还是彭加勒对动量的分析都提醒我们，那种动不动就把“动手之前先定义术语”挂在嘴边的科学观何其陈旧。它们也比以往更清楚地提醒我们，在人类知识的任何前进步伐中，真正的创造性活动必然具有这样的性质：理论、概念、定律和测量方法是永不可分的，也是同时问世的。

测量的理论和规则构成了一个不可分的整体

在现代物理学的伟大论文中，有一篇出自几位优秀物理学家之手的文章指出了电磁理论的不一致性（inconsistency）^①。他们指出，理论自身已经否认了测量该理论核心物理量的可能性。相反，玻尔和罗森菲尔德（Rosenfeld）⁴则在其 1935 年的高深论文中强调：如果没有理论，测量规则将毫无意义；如果可能的定量检查不能充分地与之相符，理论也不会被接受。他们解决了一个又一个明显的悖论。最后他们证明，量子电磁理论，在对其研究对象做精确的限定之后，是一个包括理念（ideas）、测量和测量可能性在内

① 应该是指爱因斯坦、波多尔斯基和罗森合作的著名的 EPR 论文，《能认为量子力学对物理实在的描述是完备的吗？》。但文中电磁理论应为量子理论。下面所说的则是同样著名的玻尔的同名论文。——译者注

的逻辑自治体系。他们的分析是完美逻辑结构的典范，我们希望有一天在所有科学分支中都能看到这一点。

为看到这幅图景的另一侧面，不妨对某些赝科学（pseudoscience）^①，那些建立在生造的概念和定义以及成堆毫无意义的测量之上的玩艺儿，做个考察，这个工作可以让我们稍微放松一下。

为了说清楚一件事情，不论好事坏事，不管是一支新牙膏还是一个新账单，在我们今天这个时代，都有足够的动机让我们把理念和数字联系起来。随后，数字就会愈演愈烈。这个致统一概念现在已经延伸到从科学到推销术的所有领域！如果没有数字做保证，人们都是天然的怀疑论者，每天都会被扭曲失真、半真半假和模模糊糊的事情所困扰。

谁能不说，数字这种语言有时为交流提供了一个起码的统一标准？如果没有数字，人类在某些方面的合作将会是白费力气？

关注过土地测量、天文学和物理学史的人，没有谁可以忽视它们给我们的教导：怎样将数字和这个世界联系起来。沿着这些线索深入自然内部，我们拥有了多么神奇美妙的财富啊！今天，我们可以测量一个穿过不可见空间的同样不可见的无线电波的强度，给出它的强度为 1.7 微伏每米，或者进一步预言某种前所未见的核装置所可能产生的不可思议的爆炸过程，这是多么辉煌的成就啊！

一只大雁能飞多远？

把数字与理念、周围的事件以及各种力钉在一起，这个想法是如此新颖，以至于我们无法把这种纯粹的喜悦和惊奇表达出来。有一所重要的大学通过一门专门的分析课程进行了很好的尝试。

① pseudoscience，一般译为伪科学。但是中文“伪科学”一词具有很强的意识形态色彩，这里采用郝柏林先生的译法。——译者注。

我的一个朋友查尔斯·库珀（Charles Cooper）告诉我，那门课的期末考试只有一个问题：“一只大雁能飞多远？”学生只能根据自己掌握的常识来回答这个问题。例如，你可以把大雁的重量作为你的出发点，首先估计出大雁的重量，根据考试规则，你还要给出这个估计的误差范围。然后，你可以估计一下它的脂肪含量（10%？25%？），由此——已知热功当量——推断可能支持其运动的热量，就得到了其能量储备的上限和下限。另一方面，你还可以估计一下无动力滑翔所需要的能量。这样，将各种思路汇聚起来，你可以给出在没有食物补充的情况下，大雁所能飞行的距离在 1 000 或者 2 000 英里的量级，与观察相当一致。

现在，有一个公司试图招收能够用这种思维方法作出快速估算的员工。公司用类似的问题考察未来的新雇员：“在美国有多少个药房？”（在这次谈话之后，其中一位受试者安排了一个赌局，由于众所周知的原因，应赌者输了钱。）

偶然事件也可以用这种办法进行估计，比如过马路时被杀死的可能性可以根据常识计算，就像计算大雁的飞行距离一样，太显而易见了，以至于无需提示。同样，我们无需做操作性分析就可以知道，量化的方法正在越来越多地应用到战争、商业，以及几乎人类所有行为的策略之中。不需要太多的口舌，我们就可以得到这个结论，“测量！”是一个伟大的致统一概念。

类比激发创造

“类比！”如果有人想为第四位西碧尔缝一面旗子，应该把旗子的三个角缝在一起。剩下的一个角象征着挑战。核物理学给出了这样一幅图示（图 1）。原子核有结构，各个部分由某些力维系在一起，这两个性质让人联想到液滴。而液滴的表面会产生微小波纹。那么，原子核是否也有类似的效应？如果有，是什么？对这个问题的研究已经成为近年来核物理学发展的一个重要部分。

虽然光谱学家已经发现，某些核实际上已经不能算是球形。所以这种液滴类比必须慎用。尽管如此，这种类比还是颇有成果的。

一个典型的类比	
一个已知领域	一个正在研究的领域
水滴——近乎球形；具有表面	核——接近球形
液滴表面有微小波纹	?

图 1

另一个类比	
多原子分子——一个振动得过于缓慢而不能释放作为其构成物的电子的系统	核——一个比作为其构成物的单个中子和质子更重的系统
电子激发和振动激发截然不同	?

图 2

14 一个多原子分子同样具有结构。它能为原子核提供某些合理的类比吗（图 2）？在分子中，电子的运动是由原子中心的力来控制的，电子的快速运动和原子中心的缓慢振动截然不同。这两种运动能够在原子核中找到类比吗？我们可以把原子核的运动分为两类——个体粒子的快速运动和界定了原子核自身边界的缓慢集体振动吗？我们很难给核物理学的这一部分起一个名字，它在今天的研究比这个类比要活跃得多。

半导体物理和电子对物理

其他类比也在丰富着物理学的其他部分。比如把半导体与真空进行比较。在这两种情况里，电磁能的吸收都会产生一对带有相反电荷的对象。对半导体而言，一个是自由电子，一个是空穴；

对真空而言，一个是正电子，一个是负电子。人们可以用半导体做很多巧妙的事情，新颖别致的袖珍收音机和助听器就是明证。而对于真空，同样兴致勃勃的人们会拿它做什么呢？对于这个充满诱惑的问题，人们连答案的十分之一都不知道。

液体与恒星大气的不稳定性

把一大片水银铺在一池水的上面，这是不稳定的。水银更愿意呆在下面。这两种液体的界面不论起初多么光滑，多么水平，都必然会产生畸变。水银的凸起很快就会向下运动，演变成一个个尖刺。然后突然，这些尖刺会一下子把重的液体从水面传送到水底。这个著名的瑞利-泰勒不稳定性(Rayleigh-Taylor instability)能够在恒星上找到类比吗？我们知道，恒星上的气体也有轻重之别。莱曼·斯皮策(Lyman Spitzer)向自己提出了这个挑战。他发现恒星上存在这样的事件：灼热明亮的较轻气体推开冰冷阴暗的较密气体，恰好造成了同样的逆转效应。流体动力学的不稳定性在这种巨大的尺度上给出了明暗相间、变动剧烈然而符合规律的混沌图纹(pattern)，完全符合类比的结果。

在更高的哲学层面上，我们会想起欧文·朗缪尔(Irving Langmuir)^①在各种各样的物理过程和社会过程之间做出的发人深省的类比，他把某些关系称为**收敛**(convergent)，把另外一些关系称为**发散**(divergent)。

孔夫子的挑战

15

从一种类比到另一种类比，说的总是，如果 X 之于 A 就如 B

① Irving Langmuir (1881-1957)，美国化学家，1932 年的诺贝尔奖得主。收敛和发散这两个概念在本书旁码第 247 页还有详细阐述。——译者注

之于 C，问的则是，X 意味着什么，这让我们突然明白了孔夫子这番话的意思：“我只能给学生看三个角，如果他不能自己发现第四个角，我也就不重复了。”^①这可不是一个轻松的任务！但是，对于一个新的主题，有什么法则能比类比更快地引导我们获得一个尝试性途径呢？这就是今天，乐观、创造的日子。不必理会明天的批评和价值重估。

仙境 (Xanadu) 之路

类比是否能凭空产生？一个领域的问题，是否因为借鉴了来自问题所属领域的另一种思想，或者来自完全不同的另一个领域的思想，便如被魔力点化一般，迎刃而解？只有魔力还不够，但是魔力会丰富有准备的头脑，弗莱克斯纳 (Flexner) 这样提醒我们。我们还记得，这位工业领袖为了获得一份可行的研究性实验室的组织方案，前往理特咨询公司 (Arthur D. Little)^②的时候，带了一本约翰·利文斯通·洛斯 (John Livingstone Lowe) 的《仙境之路》(*The Road to Xanadu*)^③。在哪儿能够找到比这部柯勒律治 (Coleridge) 研究更好的例证来说明，想象的宝藏就贮存在聊天、

① 参见《论语·述而第七》，子曰：“不愤不启，不悱不发。举一隅不以三隅反，则不复也。”西方人对于中国经典的翻译也常常含有此类误读。这里依英文译出，不做回译。——译者注

② Arthur D. Little，中文全称为“理特管理顾问有限公司”，是美国著名咨询公司。——译者注

③ Xanadu 的含义非常丰富。英国浪漫主义诗人 Samuel Taylor Coleridge (1772—1834) 在传说于梦中写下的著名诗篇《忽必烈汗》(Kubla Khan) 中对忽必烈的宫殿 Xanadu 进行了无限的赞美。此后，评论家 John Livingstone Lowe (1876—1945) 在 *The Road to Xanadu: A Study in the Ways of the Imagination* 中又对此进行了评论。Xanadu 成为西方文学中梦境、桃源的象征。Xanadu 的原型当为元上都，最早由马可·波罗介绍到西方。元上都为元朝的夏都，位于今内蒙古金莲花草原，现在已成废墟，但都城轮廓尚存。这里直接译为仙境。Coleridge 也常被译为柯立芝。——译者注

讲故事、翻书和东张西望之中？看似微不足道的环境造就所有的差异——比如：一小时的自由阅读；间歇茶点时定期与邻近领域优秀人士的 20 分钟自由交谈，就如奥本海默（Oppenheimer）^①所说：“互相解释自己不明白的问题”，热切地倾听隔行之山的奇迹；加入一个常有高水平讨论的文学团体，等等。

人选择了何所造人

霍默·史密斯（Homer Smith）^②在他那部关于肾脏演化的迷人著作中指出，我们这些鱼的后代一度沐浴在周遭多盐的环境之中。那个器官对血液成分的精妙控制正是我们的生命和健康所依赖的基础。但是，是什么中介为我们选择心智（mind）所需要的营养：是我们有过的谈话，我们记录的思想，我们阅读的书籍，还是我们执迷的期刊？这些滋养思想的源泉之丰富比血液的构成成分要复杂得多，也会产生更大的影响。人选择了使自己成为人的那些东西。所以不必奇怪，无边的联想也受制于这样的变化；也不必奇怪，不同人群的不同测量会产生迥然不同的类比。

探究类比的冲动

当我们面对一个非常陌生的、从来没有人遇到过的问题时，类比就会表现出极大的优点。人们经常会碰到这样的事儿，一点点外界的推动就会让自己陷入一个战场，和某种未知进行最激烈的格斗，不期然地让自己冒出几滴肾上腺素（adrenalin）^③来。比

① 美国物理学家，美国曼哈顿工程的组织者，被誉为原子弹之父。

——译者注

② 指 Homer W. Smith (1895—1962)，美国生理学家，肾生理学的开创者，著有 *From Fish to Philosopher*。——译者注

③ 当人处于紧张状态会过多分泌肾上腺素。——译者注

如当你接待一位深陷课题苦苦挣扎的学生的時候。当然，你可能被另一个研究所、工厂或者政府请去做某一个问题的顾问，你也可能为自己工作的总结性论文制定一个最后期限。又或者，你可能不得不就某个主题不清的问题发表演讲。在自己被视为“高手”的场合，被理所当然地认为应该给出答案的时候，人们常常会格外兴奋——此人性使然！在这个世界上的某个角落，学生们看到他们的教授全身披挂，刻意打扮，如其所料，是为了引人注目。那或许是一个大道理的一个侧面，不过，它的另一面是否与我们所讲的内容关系更大？难道不是教授的身份使他们承受更多的压力，去探索未知的混沌，去把握那些鲜活实在的新事物吗？但是，不论是出于什么样的动机，与新问题的格斗开始了。这是怎样的冒险啊！冲锋不息是多么的重要啊！尝试一个又一个类比，描绘出每一种类比冲击问题的方式，分析每一种类比与所讨论问题的异同，这又该是怎样的刺激啊！当你看到一个问题的某些新性质从迷雾中呈现出来，昭示一次进攻的胜利，这又该是怎样的满足啊！在这样的问题中，类比自己就会跑出来。

新与旧的对应：玻尔的原子

我们需要用类比让思想的轮子转动起来，但是，要判断哪一条路径更好，我们需要问一下第五位西碧尔。她的回答是：现在与未来都是过去的孩子；她的神谕只有一个词：“对应”（correspondence）。坚实的17 新理念必须与坚实的旧理念有丰富的肌体关联。对于这种关联结构的探索将会导致更多的进步。我们不妨回想一下玻尔获得神秘的原子定态的方法。没有什么比 1910 年代的**哲学杂志**（*Philosophical Magazine*）把他的方法发挥得更加充分了，从中我们可以看到各种观念的自由碰撞。一位作者把原子作为带电液体进行处理，另一位作者造了一个流体动力学模型，还有人改造了电磁辐射定律，解释为什么稳定的原子没有辐射。相反，玻尔采纳了基础牢固的点电荷作用力定

律，利用了通常的力学原理，并承认电磁辐射定律是远程作用的。正是对这些原理的坚持使他比那些新理念的发明者更容易意识到，理解原子稳定性所需要引入的新的概念，相对于我们已知的内容来说，不应该有根本上的冲突，而只应该是个补充。这种新的观念并不是凭空而来的。玻尔终生寻找更大的统一，寻找全部物理学的一个和谐图景，这使他非常清楚普朗克（Planck）的量子所具有的基本性质。没有哪个概念如此深入，在物理学的所有分支都产生了影响。找出这些影响在原子范围的表现，这个任务不可避免地落在了玻尔身上。作为一个勇敢的保守主义者（conservatism），他的判断和勇气，他的大胆持重，使他获得了这些美妙的结论，而这些结论是自由的创造（free invention）所力不能及，难以为继的。

新科学和旧科学的平行性（parallelism）是非常重要的，它已经成为物理学家的一个指南，物理学家给出了一个定义明确的数学公式，并命名为对应原理（correspondence principle）^①，这已成为物理学家们的日常工具。

历史：作为现在与过去对应的轨迹

然而，对于现在的观念与过去的观念相对应的原则，西碧尔并不仅仅诉诸于数学，通过贝奈戴托·克罗齐（Benedetto Croce）^②之口，我们在更广阔的语境中听到了她的声音。克罗齐说：“我们是过去的产物，我们沉浸在弥漫于我们的过去之中。如果不摆脱过去——不把我们自己置身于过去之上，我们怎么能迈向新的生

① 本书旁码第 139 页对此原理有简洁的表述。——译者注

② 贝奈戴托·克罗齐（Benedetto Croce, 1866—1925），意大利史学家，主张“一切历史都是当代史”，对后世史学影响颇深。下面所引出自克罗齐《作为思想和行动的历史》，下面的引文来自两个段落，参见田时纲的中译本，中国社会科学出版社，2005 年第一版，第 25~26 页；第 28~29 页。——译者注

活，创造新的活动？除了通过思想的道路，再无其他道路。思想并未切断与过去的联系，但是在理念上超越了它，并使之转化为知识……只有历史的判断能够把精神从过去的压力中解放出来；

18 它保持自身的中立，只是为了提供光亮——仅凭这一点，就有可能确定实践的目的；并开创一条继续行动的道路。”

本真的人性不是靠书本确定的，而是在与那些把我们带到我们所处之地的人和观念的战斗中确立的，这个信条尤其会被那些我们认为古怪疯狂的人物（cranks and nuts）所欣赏，要知道，在某种意义上，我们都是古怪疯狂的人。我们推翻以往相信的全部真实，或者至少其中一半，至于在新理念与旧理念的对应过程中将会发生什么，是我们最后才予以考虑的事情！怎样提醒这样一个热情的心灵，告诉他将不得不建立注定要来的新理念，不得不带领他的同伴，继续开辟走出过去的道路？

新理念必须对应旧理念、必须包含旧理念、必须超越旧理念，这个原则是一个多么奇妙的理念分拣员啊！

互补：防卫矛盾的超级卫兵

互补，我们的第六位西碧尔，在一定意义上，是这个时代最具革命性的哲学概念。只要对玻尔的原话⁵稍作修改，就可以作出这样的表述：“在对自然的描述中，对某些概念的使用会自动地排除其他概念的使用，尽管这些概念对于描述现象的另一种关系同样必要。”为了说明这个思想，不妨看一看哥本哈根大学（University of Copenhagen）在1939年纽约世界博览会（New York World Fair）上展出的大型装置（图3）。在这里，你可以采用一种实验方法测量电子的动量（在这个模型中相当于把滑箱拉到右边），也可以采用另一种实验测量电子的位置（相当于滑箱在左边）。但是实际上，你不可能把这两部分实验仪器组合在一起（甚至不能表示出来），使之同时测量电子的两种性质；这两组设备就是不能在同一时刻

安装在同一个地方。更有甚者，说电子在同一时刻同时拥有位置和速度竟然是没有意义的。一个性质的不可预知正是由于对另一性质的观察。该模型中，这些结果形象地演示了，对一性质的观察，导致另一性质如同随机扔出的骰子。我们获得了一个全新的自然观。测量装置与被研究客体的相互作用永远不能消除。伴随着这种不可预测性，这种耦合还将使被分析的物理现象的互补属性之间永远存在着不能跨越的界限。

互补概念的扩展：缓慢然而不可抵挡

由于其微妙难解，互补的观念扩展得比较缓慢。我们仍然可以发现物理学教科书中会说到“非决定论的危机”，或者强调“物质波粒图景根本性的不自洽”，或者期待某一天能够“斩断量子的乱麻”。实际上恰恰相反！互补性经受了战斗的考验。没有人知道还有其他可行的选择。这种新观念已经成为这一代物理学家中大多数人的工作态度的一部分。很难找到哪部分科学分支比量子原理建设得更好，遭受的自洽分析更为彻底，能够解释的经验范围更加难以置信。互补性既已问世，便无法收回！

拓展互补的意义

下一步如何呢？玻尔所说的互补原理在物理科学之外能走多远？他已经给出了很多例子，证明这种观念可以应用的范围极为宽广，并能够解决那些若非如此便有逻辑悖论的难题。图 3 的文字说明中提到了几个例子，其中自由意志和因果性的两难就是其一。但玻尔所强调的是，这并非两难。因为允许一个主体展示其自由意志的实验条件，与使之得以做因果分析的实验条件，在物理上不兼容。在一个分析中，人们可以说，未来是完全由过去决定的，只要你能够测量大脑中所有的电化学势，并且全面彻底地

进行一个滴水不漏的定量生化分析。此方法并非无稽之谈，因为这种解剖在原则上是完全可以想象的——但是它却跟主体的正常存在无法相容，而且排除了自由意志的作用。换言之，自由意志和决定论是一对互补的，而不是矛盾的概念；它们永远也不会同时使用。照此，互补思想显然可以应用到所有的思想领域之中。的确，随着一种应用到另一种应用，我们发现，在很多情形下，除了互补的话语，完全没有其他的合乎理性的方案。我们永远也不会放弃这种使人得以清楚地思考和表达的全新手段。对我来说，它最为神奇的部分是，人类具有发现人类所知之局限的能力。

滑梯骰子装置详图

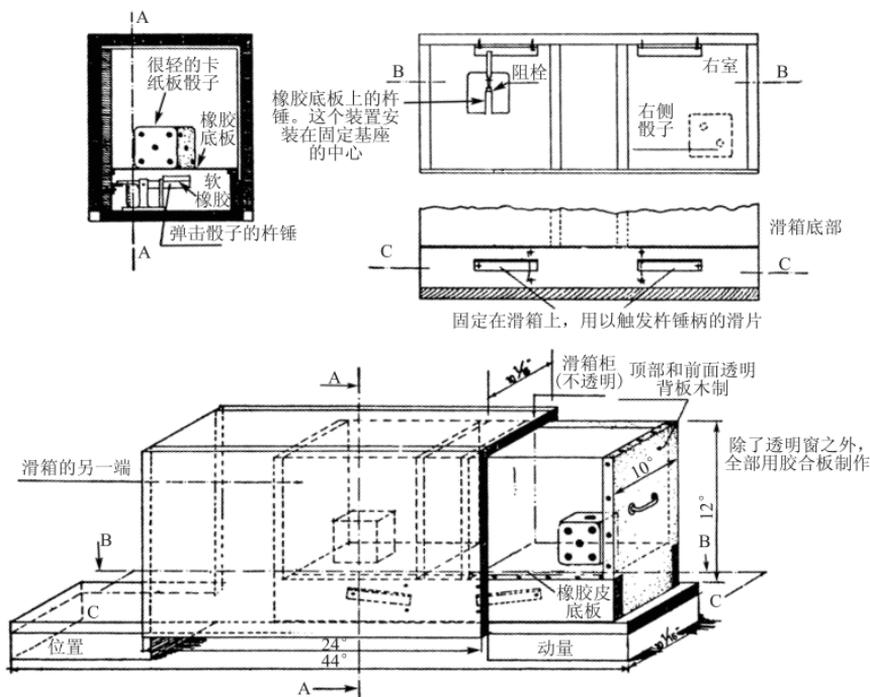


图3 说明互补性的模型。滑梯的前面和上面是透明的，里面装有两粒象征互补性的骰子，但一次只能看见其中的一粒。推动右边的把手，可以把滑梯沿着木轨道推到三个位置中的任何一个：右边，如图所示，可见右骰子；中间，两个骰子都看不见；左边，只能看见左骰子。令左骰子的点数代表电子的位置，右骰子的点数代表电子的动量值；那么，如果你想看“动量骰子”，就将滑梯从中间拉出来，你永远可以看到同样的数字。然而，如果你把滑梯推出去，使得“位置”被观察一次，再把滑梯拉回中间，情况就发生了变化。滑梯在穿过中间位置时，会触发橡胶底板下面的杵锤，使之猛然弹动。这一下就会让右骰子在它那半边打一个滚。现在，如果你再把滑梯拉到右边，对“动量”进行观察，结果将是不可预测的。换句话说，对“位置”的观察导致了一个难以名状的变化，它导致我们以前了解的关于动量的信息完全没有意义了。类而比之，大自然不允许我们以任何方式同时观察一个现象的互补性质。如果说电子“的确”同时具有位置和动量，只不过我们不能测量，这同样是不可接受的——这与我们从这个模型中得到的印象恰好相反。在这个模型中，我们还可以把掩盖着内在机制的木轨挪开。然而，大自然并没有任何木盖板，也没有什么藏在下面。在这个模型中，我们也可以把左右两侧所象征的内容替换成任何一对互补的概念，如：

L.1 位置	R.1 动量
L.2 时间	R.2 能量
L.3 对物质的波动属性进行的观察	
R.3 对物质的粒子属性进行的观察	
L.4 使用一个词交流信息	R.4 分析这个词的意义
L.5 自由意志	R.5 决定论
L.6 公平 (Justice)	R.6 爱 (love)

这个演示模型是 (Harold Waage) 在 1955 年设计制造，是以哥本哈根大学在 1939 年纽约世界博览会展出的成比例放大的火柴盒模型为基础的。

“高与低”

让我们带着这样的信心走向第七位西碧尔：重大的效应和复杂的现象能够以平凡的原因和简单的理由予以解释；简而言之，就是“高与低”的问题。解释山峰与山谷，能否不用太初创世，而用长期累积的渐变？这个思想是太过大胆，太过质朴了，没有经年的战斗无法让人接受。然而，还有什么比地貌的真正历史更为壮观的事情吗？我们都知道，这件事情对达尔文（Darwin）产生了多么大的诱惑。而最让人惊讶的是他居然进而要去发现人类的起源之谜。我总是在想，当云开雾散，他第一次看到大自然的真容，面对这个神奇的世界，他一定浑身战栗。这种用简单的原因对大自然的复杂性作出的解释，是多么美妙啊！为什么要去寻找更神奇的起源呢？

22 当你把手伸到火苗上，那种温度感和灼伤感，显然与天地间的任何东西都无相似之处。我们怎么能责备发明了热的燃素理论的那些人呢？同样，当人们看到，所有这些奇异的效应可以归因于数量巨大、快速运动的小粒子动力系统——而再无其他——的时候，我们也无需责备他们的大惊小怪！然而，现在有谁会不同意热与动能在本质上的一致呢！

大数目的抽象产生了性质完全不同的新属性，这些属性我们刚刚从博弈论的新进展中看到了。在很多游戏者加入进来的时候，从数学上考虑的最优策略必然是分组；我们甚至可以看到组还要继续分级。如果我们相信，我们将会从这些研究中获得对团队忠诚的新的理解，是不是太傻呢？——这样做并不是轻视团队精神的重要性，相反，是高度凸显了它们在这个复杂世界中的不可或缺。最近有人在剑桥大学的就职演讲就用了这样一个标题，“作为道德哲学工具的博弈论”⁶，恐怕不是偶然的吧！

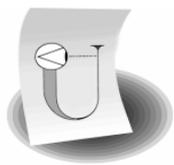
地质变化、自然演化、热现象还有分组结群之类的例子提示

我们，简单的思想是怎样通向神奇丰富的结果，我们这个世界最壮丽的景象来自最为简单的源头。

七位西碧尔的共同体？

现在，我们已经把全部西碧尔的神谕介绍完毕。这些伟大的概念把我们追索真相的各种繁多芜杂的方式统一起来，人们会问，是否还有什么更一般性的原则能够将这些概念系统化？或许有，或许没有。或许，使用这些我们已知的原理会比将某些人为的分组强加于其上更加无用吗？当我们周游世界的时候，我们会遇到神奇的丛林，其中随处可见神奇的鸟儿、风景和声音。我们发现，只有不多的几条小路允许我们从丛林的一角通到另一角。如果这时就去寻找小路的规律，或许是太早了。我们的确已经有了几条小路，这些伟大的致统一概念，并且我们能够与他人交流，这已经足以让我们感到幸福了。

改编自 1955 年 12 月 30 日在普林斯顿大学毕业校友第五届年会主办的研讨会上的报告，会议讨论了这样的问题：“一个领域中的致统一概念能够用到另一个领域吗？”



创世与观察

创世 (Genesis) 之谜无解吗?

23 距离 1859 年 11 月 24 日《物种起源》的出版还有近四年的时间，查尔斯·达尔文 (Charles Darwin¹, 1863) 就在写给约瑟夫·道尔顿·胡克 (Joseph Dalton Hooker)^① 的信中说：“这不过是些垃圾，身处今天而想象生命的起源，还不如去想象物质的起源。”现在，关于生命的起源，我们已经可以勾画出一幅精制入微、栩栩如生的场景了²，这当然首先要感谢达尔文本人。那么，是否有一天，我们能对物质起源这个更艰深的问题有所了解呢？

对此，莱布尼兹有句名言：“为何 (why) 有物而非无物？”威廉·詹姆斯 (William James)³ 把“为何”解释成意味更深的“何以” (how)，曰：“世界何以如是……？”

今天我们问：“宇宙如何进入存在 (come into being)？”^② 那是因为我们充分地意识到，怎样恰当地提出问题也是问题的一部分。我们甚至应该相信，只有当我们知道了答案，才能用正确的词句描述问题。然而，一定有一个答案吗？创世的神秘是否永远

① Joseph Dalton Hooker (1817—1911)，英国博物学家。——译者注

② come into being，这个说法以及类似的说法如 bring into being 在本书经常出现。惠勒认为，物并非从无穷的过去到无穷的未来一直存在，而是有始有终的，是在某一时刻“进入存在”，“成为存在”的。偶尔采用一种比较哲学的译法：“呈在”。与之对应，fade from being 之类的说法则译为“遁出存在”，“隐出存在”。——译者注

无法言传？

今天的探索者不能甘心让这么一个重要的问题像那种没有结果的橄榄球比赛（*indecisive games*）一样总是飘忽不定悬而不决。要么规避它，要么解决它：这是他们的信条。或者，这个问题可能因为没有意义而将被规避——比如量子力学排除了同时了解一个电子的位置和动量的任何可能性；或者，这个问题可能将被某件法则断定认为不可判定——就如哥德尔（Gödel）^①所证明的某些命题的不可判定性。但是现在，既然我们没有明确的线索足以确断这个问题的无意义或不可判定，我们就必须正视这个问题，把相关的证据找出来。

四条线索

24

如果在一场谋杀案的调查中，没有两个侦探会发现同样的线索，那么，对于创世这样一个远未解决的大问题，或许没有哪两个调查者甚至会对同样的几个证据是否与案件相关达成共识。然而，至少在今天，任何一位调查者对文献的搜索，与同事的讨论总会归结到这样四个关键点，这或许就是问题的核心所在：

（1）爱因斯坦的广义相对论宇宙理论将导致大爆炸（*big bang*）或大爆缩（*big crunch*）或两者兼有——不是周期性的，不是大爆炸、大爆缩然后再膨胀（*re-expansion*）；也不是大爆炸、大爆缩然后“再搬演”（*reprocessing*）⁴，而是只有大爆炸和大爆缩；或者大爆炸或大爆缩或两者兼有，这两种情况都符合物理定律的变易性（*mutability*）。

① Kurt Gödel, 20 世纪最伟大的逻辑学家之一，长期工作于普林斯顿大学，爱因斯坦晚年的朋友。哥德尔最重要的发现是哥德尔定理，它证明，对于一个严格的逻辑系统，如果它的基本前提是自治的，则系统内必然存在既属于该系统，又在该系统内无法判断真假的命题。这就是不可判定性。简单地说是：如果完备，则不自洽；如果自洽，则不完备。——译者注

(2) 没有哪一个物理定律不能从对称原理中找到最经济的导出方式。然而，对称原理把作为该定律基础的深层结构遮挡得严严实实，无论哪种情形我们都看不到变易性何以发生。而且，还没有哪一项研究揭示了终极基础的一点影子，无论从物理上还是从数学上，都没有表现出哪怕最微小的一点希望——给出多层物理定律塔的基础原理。人们因此怀疑，这样的想法可能是错误的：随着他们不断地进入更深的物理结构，他们将会发现物理结构在第 n 层达到了终点。人们也担心，这样的想法可能也是错的：物理结构会不停地深入下去，一层一层，永无休止 (infinitum)。人们发现自己在绝望中自问：是否结构最终能以某种相互依赖的封闭循环回到观察者自身，而不是要么终止于某一个最小的客体或者最基本的场，要么无穷无尽、没完没了？接下来的两点为这种思想提供了支持。

(3) 亨德森 (Henderson) 的著作⁵ 和狄克 (Dicke)⁶、卡特 (Carter)⁷ 以及柯林斯 (Collins) 和霍金 (Hawking)⁸ 的论文证明，某些物理常数或初始数据的重大改变，不仅使得我们所熟知的生命和意识不再可能产生；甚至行星和重于氢的元素也不会产生，而这对于几乎所有能够想象出来的生命形式都是必不可少的。这种推理方式引发了一个关键性的问题：是否宇宙必须保证能够在其将要存在的时间内，在某一个地方产生出“观察”(observership) 来，它本身才能够进入存在？是否“观察者”(observer) 就是封闭了互赖循环 (the circle of interdependence) 的那个环节？

(4) 大卫·休谟 (David Hume)⁹ 问：“那个被我们称之为思想的大脑的小小骚动有什么特殊之处，使我们能够拿它作为整个宇宙 25 的范本？”与此断言相对应，长期以来，人们一直认为观察者实际上是隔着 10 厘米厚的玻璃板来观察实在的，并没有直接的接触。相比之下，量子力学指向了相反的方向。对于电子这样微小的物体，如果不把玻璃板打碎，用适当的测量仪器作用于它，我们甚至不可能对它进行观察。而且，把仪器按照测量电子位置坐

标 x 的方式配置，就会自动地排除在同一个区域同时配置测量其速度或动量 p 的仪器的可能性。反之亦然。这个测量行为必定会导致电子的状态发生不可预测的变化。这个变化随着人们测量位置或者动量的不同而不同。这就是量子力学的奇异特征，为此，玻尔说¹⁰：“当一个人第一次了解量子的行为时，如果他没有感到困惑，他肯定一个字都没听懂。”人们做出的将要观察什么的选择，对于他的观察结果有着不可挽回的影响。观察者从“观察者”上升为“参与者”（*participator*）。那种以往的哲学曾经有过的想法，量子力学的核心特性今天以更加令人瞩目的方式告诉我们：在某种奇特的意义上，这是一个参与的宇宙（*participatory universe*）。^①

如果“参与”是宇宙最奇特的性质，那么这是否可能也是我们所拥有的关于宇宙创生的最重要的线索（第四点）？物体的位置（或者动量）只有通过观察的参与行为才能获得一个实际的意义。是否物体自身也必须通过观察才能获得一个实际的意义？量子力学的微言大义何在？怎样把“观察”这两个大字一笔一画地写出来？写出来，没错，我们必须写出来，它的前三笔将是：

（1）引力大爆炸或者大爆缩或者两者兼有都对这样的观点予以支持：只要有足够极端的条件，所有的物理规律都将被超越（“变易性”）。

（2）每一个定律，尽管具有变易性，都可以轻而易举地以最简洁的方式从一个不变的对称原理中推导出来，这个对称原理遮蔽了使之变易的机制。无论从物理上还是从数学上，都没有发

① *Participatory universe* 是惠勒提出的概念，是说我们所了解的宇宙并不是独立于作为观察者的我们之外的，而是由观察者的参与共同创造的。这个词有时被译为“参与者的宇宙”，不够确切。*Participatory* 意为“可参与的”、“允许参与的”，并没有直接说到“者”。“参与的宇宙”也是一个勉强的译法。或许还有一个更好的译法：“互渗的宇宙。”法国人类学家列维-布留尔在其《原始思维》（商务印书馆，1986）中，提出“神秘互渗”为原始人思维心理的重要特征，相信在人与物之间有神秘的关联。“互渗”在英译本中即为 *participation*，其形容词正是 *participatory*。但是考虑到本书的内容，“互渗”这个神秘的词未免过于怪异。——译者注

现有任何“终极基础”的迹象。这是否意味着，物理结构根本就没有什么“底”，转了一圈最终还是要回到作为其起点的观察者？

(3) 没有什么原因能够说明，为什么某些常数和初始条件恰好具有它们应有的值，若非如此，如我们所知，任何观察之类的事情都将是是不可能的。

四个乐章中的四个节拍；一个 核心的主题和论点

让我们再看一下：(1)“变易性”；(2)“无终极基础”(no ultimate underpinning)；(3)“观察为创世之前提”，亦即下面狄克和卡特提出的著名的“人择原理”(anthropic principle)^①；还有(4)“观察—参与者(observer-participator)即实在之定义者。”不过，我们且在此稍停一会儿，考虑一下，能否把这四个中心论点放在一起，获得关于某些更核心的论题(theme)和问题的线索呢？如果这样，尽管这些问题曾经且必然长久存在，我们也有可能把这四点结合起来，找到某种有一定希望的方式，把它们整合起来。

那么，除了问宇宙是否是一个“自激回路”(self-excited circuit)之外，我们就没有其他的办法能把这四个不同类别的证据紧密地结合起来吗？是否宇宙生成了观察，而观察赋予宇宙以实际(或者实体、实在)的意义呢？是否我们只能希望有一天通过对“观察”角色的适当认识而理解“创世”(genesis)呢？是否存在(existence)的结构就是如此，只有通过“观察”，宇宙才能获得进入存在的途径呢？

人类的集体知识聚成了一个庞大无比的金字塔，但是我们并不能一眼看到它的哪一块石头比物理学更加直接地承担着“宇宙怎样创生”这个问题。甚至物理学本身也是一个由观察、理论和

^① 也被译为“人存原理”。——译者注

实验组成的巨大结构；然而，在此之外，我们不知道还有什么证据比我们所了解的这四个领域，比我们今天针对其中每一项进行的积极工作与创世的关系更加密切。要把这些结果和这个工作连接起来使之协调一致，我们需要一个核心的论题（theme）和论点（thesis）。我们能够而且必须找到一个这样的结构方案。然而，迄今为止，根据已有的线索还没有产生出任何一个模型，除了这一个：把量子力学解释为创世与观察相联系的证据。

探索的第一步是校正方向，向前迈步

在此，我的目的既不是鼓吹“创世来自观察”这个论点，也不是批评这个论点。因为它太脆弱，经不起吹捧，也经不起批评。我的目的毋宁说是要探索这个论点。

至少有四种理由反对对“宇宙如何进入存在”这个问题的探索²⁷，大致如下：（1）问题没有意义，因而没有答案，所以应该取消；（2）思想家们在莱布尼兹和贝克莱（Berkeley）之前之后已经就“实在论”（realist）和“唯理论”（idealist）的实在观争论了几百年，就算到了今天还是争不出个头绪来，把这个老掉牙的问题重新拎出来，能有什么价值呢？（3）物理学定律永远存在——所以问它们是“怎么来的”，毫无意义；（4）不论怎样深究“观察者”这个概念或者与它差不多的“意识”概念，最后总会迷失在漫无边际的神秘沼泽中，不会有好的结果。因而对于我们的探索，每种类型的反对者给出的都是同样的忠告：“算了吧！”而且，我们不得不面对这种局面，这些反对理由之中的任何一个都可能都是对的——甚至可能都是对的。然而，面对一个神秘的问题无动于衷，也不符合科学的脾气。今天，在这个领域最需要做的还是继续寻找更多的证据，尽量理清它的脉络。在摸索研究方案的问题上，没有什么比引擎的发明者约翰·克利斯的话更能表达科学的手法了：“把它发动起来，看看它为什么不转。”这里的“发动起来”

已经超出了我们的能力，因为我们甚至不能确定，我们是否已经掌握了这个“引擎”的所有部分，更不知道怎样把它们装配起来。然而，尽管我们面临的形势极为不利，我们却显然不比引擎发明人所处的局势更糟。他不知道他的引擎是否能够发动起来，而我们却知道，我们的引擎“正在转”。

为了把对“引擎”的探索继续下去，最好的办法莫过于把这四个中心论点再认真仔细地梳理一遍。

论点一：引力坍塌要求物理定律的变易性

关于宇宙最初几分钟所处的超高密度、超高温度的状态，我们今天已经有了丰富的证据。这是 20 年前的人们不敢奢望的。在几厘米波长范围工作的近一米长的射电望远镜给我们带来了所谓的原始宇宙火球辐射的证据，或曰“辐射遗迹”（relic radiation），它来自远比今天更小更热的早期宇宙。通过对元素及其同位素的丰度测量与对原子核素（nuclear species）形成机制的分析，我们对大约 10×10^9 年前的情况的了解，比我们对此时此地我们自己的生化结构的了解还要多。弗里德曼（Friedmann）根据爱因斯坦 1915 年的理论和现在的标准引力几何理论作出的大爆炸预言，现在得到了这一证据的强力支持。20 年前我们对银河系尺度的估计是错误的，现在我们知道，有 6 次幂因子的误差。把整个误差带来的影响加以校正之后，我们就将在“物质持续创生”（the continuous creation of matter）和“稳恒态宇宙”（steady state universe）这两种宇宙观中进行选择了。

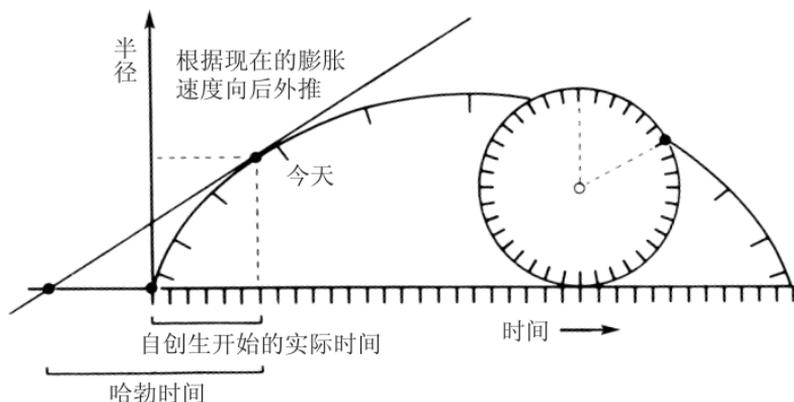
与爱因斯坦引力理论相一致的最简单的宇宙学是以“大爆缩”或者“大爆炸”为特征的。在这个模型中，星系与星系之间的密度涨落被理想化为平滑连续的；空间几何被处理为同质均一、各向同性的，所有方向所有地方都以同样的大小弯曲。爱因斯坦曾经论证¹¹ 这个弯曲将足够巨大，乃至于使空间封闭起来，使空间

的几何成为“三维球”(3-sphere)^①，这是对于我们所熟悉的地理球(geographic sphere)的三维类比。如果当时他把封闭的必要条件表述为方程，“封闭”早晚会成为广义相对论内在的边界条件和必要部分。然而，他却只把它们停留在词语上，而另一种观点，宇宙是“开放的”则受到了更多的光顾。

空间的弯曲与物质的密度成正比。然而，今天我们在星系中所**看到的**物质的量与爱因斯坦理论所要求的封闭条件要差 30 个数量级¹²。因此，奥斯特里克(Ostriker)和皮布尔斯(Peebles)¹³的发现是一个重大的进展，他们的发现使我们有理由相信：在星系的边缘含有 3~20 倍于从前人们归因于星系可见部分的物质。现在，人们开展了大规模的调查，寻找星系外轮中的暗星或者其它天体的直接观察证据。人们可以相信可见的物质是不完全的，也可以相信宇宙是开放的，并且将一直膨胀下去。然而，如果目前正在进行的研究能够发现“失去的物质”，封闭条件得以证实，那将是爱因斯坦广义相对论理论的又一个激动人心的确证。在此，图 1 给出了预期的宇宙半径随时间改变的定量示意图。坍缩或者“大爆缩”是与大爆炸相对称的。

极端形态的奇点(singularity)或者大爆炸和大爆缩模型也应运而生，包括所谓的“呜咽”(whimper)奇点¹⁴和“从空间封闭到时间封闭的跃迁”等¹⁵，与弗里德曼的简单宇宙中的奇点性质²⁹迥然相异。然而，所有已知的证据¹⁶表明，弗里德曼的奇点描述最接近于一般情况(generic case)¹⁷下遇到的极端条件。此外，³⁰当一团物质坍缩成一个黑洞，并立即在此时此地产生一个奇点，

① 高维空间中的球。圆可以看作是“一维球”，它的定义是到定点(圆心)距离相等的点的集合，只需一个坐标就可以表示圆周上的点。我们熟悉的普通的球体是“二维球”，同样是到定点(球心)距离相等的点的集合，需要 2 个坐标来描述球面上的点。“三维球”比“二维球”多一维，同样是到定点距离相等的点的集合，不过需要 3 个坐标来描述“球面”上的点。依此类推，还可以定义更高维度的球。——译者注



示意值据此推出：

从创生到现在的时间	10×10^9 年
哈勃时间	20×10^9 年

现在的哈勃膨胀速度	$49.0 \frac{\text{千米/秒}}{\text{兆秒差距}} \dots\dots$
现在的半径增长速度	0.66 光年/ 年
现在的半径	13.19×10^9 光年
最大半径	18.94×10^9 光年
全部时间，从头到尾	59.52×10^9 年
现在的密度	14.8×10^{-30} 克/厘米 ³
物质总量	5.68×10^{56} 克
对应的重子数	3.39×10^{80}

图 1 弗里德曼模型的同质均一各向同性的“星尘” (stardust filled)¹ 宇宙示意图。后面的 8 个数是根据爱因斯坦的标准引力理论推出来的，假定前面框中的两个数 100% 精确——尽管现在每个数的不确定程度达到 30% 的量级：(1) 根据恒星和星团的演化速度推算的宇宙实际年龄；(2) 宇宙的外推年龄或“当有” (would-be) 年龄或哈勃年龄，亦即，按照各星系现在被观测到的退行速度，各星系到达现在的离散程度所需要的时间（由于引力的持续作用，今天的退行速度慢于当初的退行速度）。

这个奇点在拓扑学的意义上不但与最终的宇宙奇点¹⁸无法区分，而且是它不可缺少的一部分。（见图 2）因而，如果宇宙是封闭的——爱因斯坦就是这样主张的，根据现有的证据，你可以相信，也可以不相信——我们只有一个这样的选择，或者冲向最近的黑洞，从而在不远的未来遇到一个奇点；或者等上几十个 10^9 年，按部就班地走向奇点。逃？那显然无路可寻。因为大爆炸、黑洞和 31 大爆缩标志着**时间之门**（The Gates of Time）。

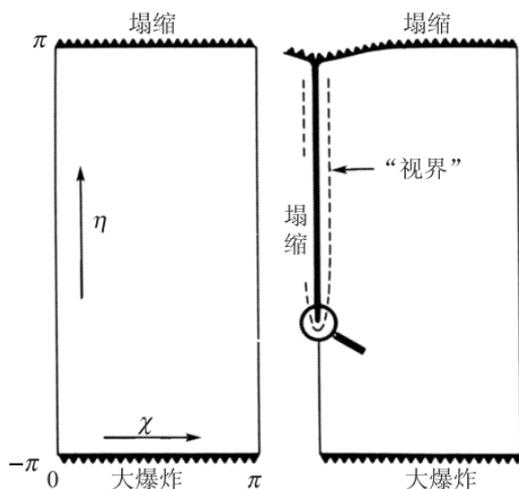


图 2 黑洞作为最终的宇宙奇点的一部分，也与该奇点不可分离。左，理想弗里德曼宇宙模型的空时（spacetime）^①。右（仅为示意图），在宇宙的历史行进到全程的三分之一时，由于黑洞的形成（由恒星或云气的坍缩造成的）而导致的空时形变。（图中左侧，角坐标可以比直角坐标更方便地标识空间中的点； $\chi=0$ 位于三维球的“北极”； $\chi=\pi$ 在“南极”；时间参数 η 的定义使得光线〔图中未示〕在图中的行进方向为 45° 。最后的终点用粗黑线标识，根据经典广义相对论，空时几何出现奇点，引力场的潮汐作用分量则达到无穷大。）

怎么才能在更大的框架里看到引力坍缩——无论大爆炸、黑

① 见本书旁码第 60 页注。——译者注

洞还是大爆缩？没有哪个概念比“变易性”¹⁹有更大的力量脱颖而出。为了总结引力坍塌给我们带来的信息以及物理学的其他部分，我们把物理学演进用图 3 的阶梯来表示。每一个横板标志着一个新的定律。每一个竖板象征着要推翻那个定律所应达到的充分极端的条件。密度（第一个横板）似乎是一个保守的量，但是后来人们发现，足够的压力会改变密度（图 3 中紧邻的竖板）。化学价（第二个横板）在非常广泛的领域中得到了应用，但是后来人们发现，温度上升到足够的高度（紧邻的竖板）会使化学价的概念变得毫无用处。物理学已经发展到可以为每一个原子核分配电荷数和质量数的程度，这是原子性质千古不易的古老思想的结晶。但是很快又到了这么一天，在前所未遇的条件下，原子核嬗变，从而改变了电荷数和质量数。

由于更高能量的出现，人们有可能闯进基本粒子物理的世界。没有什么原理能够比粒子数守恒更为可靠了：在所有的反应中，重粒子或重子的总数（粒子数减去反粒子数）都是守恒的，同样守恒的还有净轻子数（图 3 的阶梯中有表示）。然而，黑洞物理学“超越”了粒子数守恒定律。²⁰ 根据现有的全部证据，一个宏观尺度的黑洞所拥有的全部性质，只需要用质量、电荷和角动量便可以描述，再不需要别的参数（图 4）。假如有三个黑洞，质量相同、电荷相同、角动量相同，分别由物质、反物质和原始辐射形成，我们没有任何方法能够对它们作出区分，甚至原则上也不能。重子数守恒定律并没有被违背，但是完全用不上了。这就是超越。我们每次迈过（图 3）定律楼梯的一个台、一个阶，就有一个定律被超越了。质-能守恒、电荷守恒和角动量守恒（下一个台）规定了黑洞的演变及其与其他黑洞的相互作用。然而，所有这些本应守恒的性质，当我们从有限系统进入到一个封闭宇宙时，都失去了用武之地²¹。例如，所有确定系统总质-能的方法都将归结为或者等效于这样的方法：把一颗行星放在那个系统的轨道上，测量轨道的周期和大小，然后应用开普勒定律，

$$M = \left(\frac{2\pi}{T} \right)^2 R^3$$

（其中 M 是质量， T 是周期， R 是半径。均以厘米为单位）^①

然而，对于一个封闭宇宙而言，根本就没有一个地方可以把行星放进轨道。空间也不能提供一个渐近平坦的区域用来做“空间平移”（translation in space）或“时间平移”（translation in time）。或者说，在数学的意义上，如果把能量守恒定律应用到一个封闭宇宙（图3的又一阶），将给出一个毫无意义恒等式， $0=0$ 。在一个封闭宇宙的物理学中，我们熟悉的这三个定律全都被超越了。或者，用依然有更多有效性的术语来说，我们最后所能关心的是，启动大爆炸的能量“从何而来”。

现在，我们终于来到了这个台阶的最后一层。从来没有一个物理学定律的陈述不需要“空间”和“时间”。然而，随着引力坍缩的到来，我们也来到了时间的终点。如果没有广义相对论的引力方程，谁也不会发现一丁点儿证据来支持“再膨胀”或“循环宇宙”，以及除了终结之外的任何东西。进一步说，在引力坍缩中——无论大爆炸、黑洞还是大爆缩——坍缩的并非只有物质。物质所在的空间也坍缩了。随着空间和时间的坍缩，我们称之为物理学定律的一切框架（framework）都轰然倒塌了。

最后剩下的不是定律，而是变易性。除此之外，似乎还没有显而易见的办法能够把引力坍缩这个信条安放到更有前途的形式之中。物理学似乎在大声呼喊：“找一个办法，描述每一个使定律遁出存在的定律！”

① 在某种特殊的单位制下，可以让时间、长度和质量有相同的单位。令 $c=1$ ，可使时间与长度有相同的单位，再令 $\hbar=1$ ，可以让质量的单位与之相同。

——译者注

论点二：定律源自对称性；但对称性隐匿了变易性的机制

在所有的物理学定律中，弹性定律是最古老的定律之一。没有哪个定律能比它更加生动地说明这个双重论题：物理定律源自对称性，而对称性遮蔽了物理定律的深层结构。一块同质均匀各向同性的固体，产生微小形变，所储存的能量等于两项之和：其中一项正比于形变张量平方的迹（trace）^①，另一项正比于迹的平方。乘在各项前面的比例常数——两个“弹性常数”——就可以完全刻画微小形变下固体的行为，而根本没有安放其他常数和参数的地方。简而言之，这就是弹性，根据以变换群（groups of transformation，这里是转动和平移）的数学理论为基础的标准观点，这个定律来自固体的对称性。

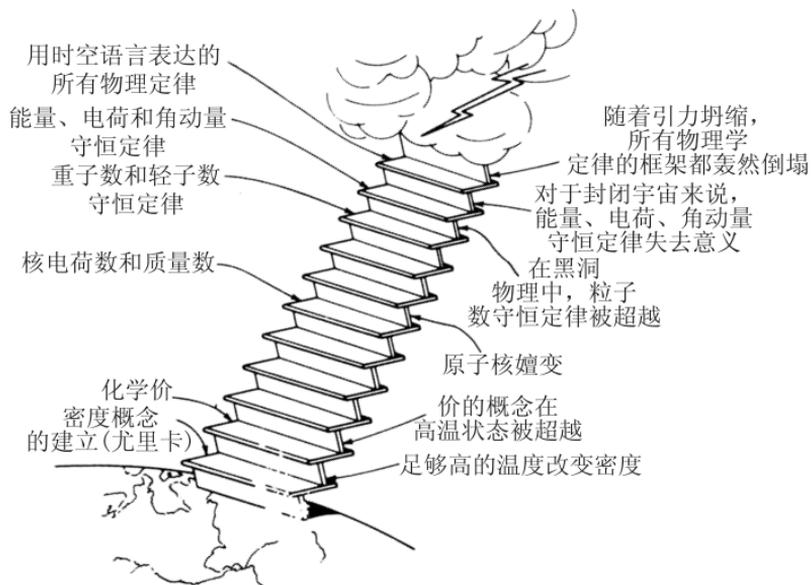
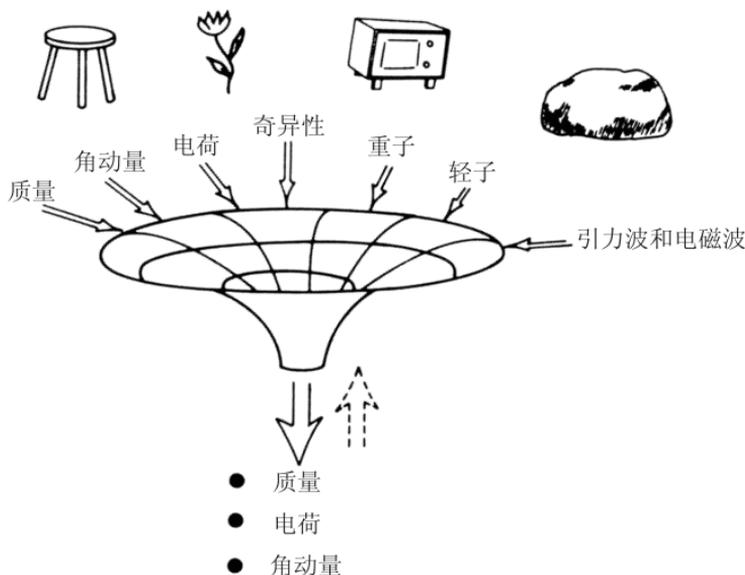


图3 “变易性”：物理定律及其被超越的阶梯

要了解弹性常数的根源，我们不能停留在弹性本身，必须深

① 迹，矩阵对角线各项之和。——译者注

入到弹性所隐藏于其中的结构的水平——原子和分子。每一种相互作用都可以用一条复杂的分子势能曲线来描述。对所有相互作用势能的二阶导数，分别乘以恰当的方向余弦（direction cosines），然后相加，便得出弹性常数。这两个常数包含的信息实在是太多了，我们甚至无法根据它们讨论原子的存在，更不用说它们之间的相互作用了。



34

图4 一个宏观尺度的黑洞消除了进入其中的物体的所有性质。在经典水平上，最终只剩下了质量、电荷和角动量，再无其他参数。（一个小尺度黑洞能够蒸发粒子^{II}，因而有可能出现额外的非经典参数，或者“化学势”^{III}。然而，在这两种情况之中，都没有可能将其内的总粒子数与其外的总粒子数进行比较^{IV}。一个大黑洞本质上需要无限的时间才能蒸发。一个小黑洞则以可数的速率发出粒子。然而，除了原始大爆炸，没有什么明显的方法能够产生这样的天体，大爆炸这个事件使得“进入的粒子数”这个词失去了任何可观测的意义。

“弹性”被超越了，弹性定律遁出了，当我们撕开固体，揪出原子，使之错位或者蒸发，我们就要寻找一种新的描述方式。接下来，我们不得不采用这种建立在原子和原子间力这对新概念之上的新型分析模式，或者叫“化学物理”。化学力的种种规则性和对称性早已广为人知，在此不赘。对于我们这个主题来说，重要的是这个：化学中的上百个规则，无论哪一个都把支撑它们的更深层结构遮蔽得丝毫不显。关于化学价的定律遮蔽了使化学价在高温下失去意义的机制。而作为化学价根源的电子结构，则被那些定律和对称性遮蔽得更深更甚。刘易斯（Lewis）、朗缪尔、海特勒（Heitler）、伦敦（London）、鲍林（Pauling）^①等人告诉我们，我们根本就没有办法要求，也没有权利尝试，把每一个复杂的化学键都用一个相应的复杂原理予以解释。只要将薛定谔方程用在35 一个带有正负电荷的质量系统中，就可以对每一个化学键作出解释，简单得不可思议。然而，只有在薛定谔方程的帮助下，我们才能理解，当温度或者压力无限升高的时候，关于价的各个定律是怎样失灵的。

100 年的弹性研究从来没有发现过化学键；100 年的化学键研究也从来没有发现过薛定谔方程。理解的方向不是从上层结构到下层结构，而是从下层到上层。定律之变易性的基础隐藏在该定律所在的结构之中。

空间，和弹性一样，爱因斯坦告诉我们，不仅是物理学的舞台，而且是物理学的一个角色（participant）。根据完美对称的几何动力学（geometrodynamic）定律，空间的几何是动态的，随时间变化的。多年以来，爱因斯坦场方程已经得到了很多推广，但是没有哪一个比侯曼（Hojman）、库哈尔（Kuchař）和泰特尔鲍姆（Teitelboim）²² 的推广更为紧凑，更具穿透力。然而，这些推广的完美之处就在于，它们又一次拒绝了我们深入了解这些定律在大

① 这几位都是化学键理论的提出者和研究者。——译者注

爆炸之初和大坍缩之末怎样遁出的任何企图。

既然其他物理学定律也具有变易性，既然引力坍缩是必然的结局，空间自身也难于逃避这样两个结果：（1）只要有足够极端的条件，空间的动力学定律也必然是可变易的，也必然是可替代的，也必然是可超越的；（2）其下必然存在着深层的结构，不论是叫做“前几何”（pregeometry），还是叫别的什么。

为了构想这个深层结构，我们不由自主地像一个侦察兵那样，一个一个地检视我们在物理世界和数学世界里曾经见过的所有结构，从晶格到驻波，从波莱尔集（Borel sets）到命题演算（calculus of propositions）。然而，在我们巡视的所有结构中，还没有哪一个能以其简洁性和包容性²³让我们欣然接受。物理学没有提供充分的模型，数学也没有提供可以作为核心的独特结构。可以想象，那些为了寻找作为空间——以及全部物理学——基础的“前几何”结构，在物理学和数学之中上下求索的人们，还缺少足够的想象力，而必要的模型可能就在咫尺之间。然而，我们也可以想象，迄今为止，人们一直在错误的领域寻找这个关节点。难道量子一直在试图向我们揭示这个答案？难道量子力学的**观察**就是物理学³⁶定律——因而也是时间和空间的终极基础？

论点三：观察作为创世的前提，或狄克和卡特的“人择原理”

人和宇宙在线度上要差 10 的 26 次幂，没有什么理由比它能够更有力地说明，“观察者”与物理学的蓝图毫无关系；也没有什么比它能够更雄辩地说明，生命和意识无非是在遥远的不相干的空间之中产生的一个无关紧要的演化结果。而当我们把注意力从距离尺度转移到时间尺度，就会有完全不同的评价。没有什么方法比狄克²⁴的思考能够更直接地把我们引到这个思路上来。

换了一个角度，狄克问：“宇宙”这个说法，如果没有什么人能够意识它，能有什么意义呢？然而，有意识就要有生命；而要有生命，每个人都能想到，就要有重元素。要从原始的氢中产生

重元素，就要有热核燃烧。而热核燃烧又需要在恒星内部有几倍于 10^9 年的预热时间。但是，一个能够提供几倍于 10^9 年时间的宇宙，根据广义相对论，必然具有几倍于 10^9 光年量级的空间尺度。于是，为什么宇宙会有如是之大？因为有我们在这里！

换一种论证方式也许能看起来不那么荒谬。为什么需要一个如此巨大的宇宙才能使意识和观察者在有限的时间长度和有限的空间区域内出现？全部 $\sim 10^{11}$ 个星系，每个星系 $\sim 10^{11}$ 个恒星，难道都是为了让其中一个星系中的一颗恒星的一颗行星上产生生命吗？为什么不能经济一点！指望把 $\sim 10^{22}$ 整个因子全部省下来那是太多了，但是至少可以省掉 10^{11} 的因子啊！这样“削减预算”仍然会剩下数量无比庞大、足以创造一个星系的物质。难点不在于最后的线度大小，而在于最后时间尺度的缩减。如果宇宙从大爆炸到大结局之间没有 $\sim 10^{11}$ 年而只有 ~ 1 年，则不足以产生恒星或者行星，更不用说生命了。从这个角度看，宇宙现在的这个尺度完全没有任何奢侈之处。

宇宙的“人择”（anthropic）要求，即必须持续足够长的时间以使生命得以出现，被狄克和卡特表述成数字。在他们的思考中，联系观察者和宇宙的最为关键的量是典型“主序”星的寿命。如卡特所说：“在远晚于这个时间 [典型恒星寿命] 的时候，[宇宙] 将只有数量较少（并且大部分非常弱）的产能恒星（energy-producing stars）；而在远早于这个时间的时候，重元素（它的出现对于生命似乎是必要的）还没有形成。”太阳是一个典型的主序星，其质量为 1.989×10^{33} 克。太阳通过热核反应所能提供的质—能只占其总量的 1%， $\sim 2 \times 10^{52}$ 尔格^①。太阳的光度为 3.9×10^{33} 尔格/秒。因而太阳寿命大致在 $\sim (2 \times 10^{52} \text{ 尔格}) / (4 \times 10^{33} \text{ 尔格/秒})$ ， $\sim 5 \times 10^{18}$ 秒或 $\sim 10^{11}$ 年的数量级。根据狄克和卡特的“人择原理”，从大爆炸到生命诞生所需要的时间应该具有相同的数量

① 尔格，能量单位。1 尔格 = 10^{-7} 焦耳。——译者注

级， $\sim 100 \times 10^9$ 年，这不是没有道理的。但是，是否宇宙活过了那么长时间，甚至更长，乃至永恒，他们保持开放的态度；对于宇宙是开放还是封闭，他们也不做断言。然而，如果我们严肃地考虑一下爱因斯坦的封闭论证，考虑一下“经济”的概念，我们大致可以认为，宇宙从大爆炸到大坍缩所需要的时间也具有相同的量级。这种思考提供了一个对图 1 中生成摆线的圆轮尺度进行量级估计的方法。

卡特把人择原理应用于宇宙的第二性质，这次不是一个“初始条件”（图 1 中的创世轮的大小），而是最著名的“物理常数”之一，即所谓精细结构常数的倒数。

$$\alpha^{-1} = \frac{(\text{角动量量子}) \times (\text{光速})}{(\text{基本单位电荷})^2} = \frac{hc}{e^2} = 137.036$$

他的推导思路是这样的，从 α^{-1} 推到恒星大气的对流，从对流推到作为生命平台的行星的形成。卡特注意到，行星形成的物理机制²⁵ 还不十分清楚，但是角动量无疑是一个重要参数。在太阳系中，行星的质量只占总质量的 1%，但是却拥有 99% 的角动量²⁶。恒星怎样释放出它的大部分角动量并形成行星？在演化史中的某一段——可能在它进入主序星之前——恒星应该拥有强烈对流的大气：这就是卡特提案的要点。为了支持这个提案，他注意到，这是一个“经验事实，更大的恒星 [其中能量从内部到表面对流传递与辐射流相比是第二位的] 比那些类似太阳的恒星 [能量 38 传输主要依靠对流] ……保持了更多的角动量。”他进一步表明，对流和辐射流哪一个更为重要是由因子 $\alpha^{-1} = hc/e^2$ 的高次幂决定的。因而，如果这个物理常数的值比“137”哪怕稍稍高出一个百分比，将使主序中的恒星全部变成辐射的蓝星，对流相对减少，产生行星的可能性就微乎其微了。

其他物理常数和初始条件对生命的出现有什么影响吗？雷杰

(Regge)²⁷ 讨论了这样一种可能性：质子和电子的质量比对于生物复制的某一个微妙的步骤——如果不是对于其可靠性的话——具有举足轻重的作用。其他物理学结论对于生命的可能性，从水的特殊性质到二氧化碳的特殊性质，从海洋的调节作用到碳、氢、氧的化学性质，都在亨德森²⁸ 的一本声名久闻的著作里有所概括。这本书在重印时又加入了乔治·沃尔德 (George Wald)^① 一篇极为有趣的介绍。

讨论物理常数和初始条件的变化将改变生命的性质是一回事，而明确地确立这种说法，即任何一个参数在任何一个方向上的实质性改变——比如在一个尺度太小、时间太短模型宇宙里，或者 $\eta c/e^2$ 的值比 137 大的情况下——都将取消任何一种生命出现的可能性，则完全是另一回事了。今天的人择原理已经不再是模糊得经不起分析的猜想，而是容许并能够在诸多前沿方向对之深入研究的假说。今天对这个主题的最新表述已经引出了一个重大的问题。

如果有一个人择原理，**为什么一定要**有一个人择原理？是否如卡特的设想，生命和意识在其中只占极少份额的“一个宇宙系统” (an ensemble universe) 是可能的？或者如我们现在所问的，如果宇宙不能保证会在其将要发生的历史中的某一个阶段产生生命、意识和观察，它根本就不会成为存在吗？

论点四：参与的观察作为一切意义之源

要么承认：“宇宙，无论是否毫无意义，都将进入存在，并按照自己的道路运行，即使物理常数和初始条件永远取消了生命和意识的出现。生命只是宇宙机制中的偶然和意外。” 要么就从人择原理再往前走一步，承认这个针锋相对的观点更为接近真理，即：宇宙，通过某种过去与未来的神秘耦合，要求未来的观察者赋予过去的创世以力量！

① George Wald (1906—)，美国生物学家。因其对人眼的研究而和他人共获 1967 年诺贝尔医学奖。——译者注

没有什么比这更让人对量子力学感到震惊了，它竟然允许人们从完全不同的基础出发，严肃地考虑同样的观点：若无观察，宇宙亦无（nothing）；就如没有电，马达将会死寂一样。

是否观察就是激发创世的“电”？量子力学在“实在”的定义中怎样安排观察者的位置？这个新生的“电”科学可能依然停留在莱顿瓶（Leyden jar）^①和蓄电池阶段，但是在爱因斯坦—波多尔斯基—罗森实验（Einstein-Podolsky-Rosen experiment）²⁹中，它已经有了自己的富兰克林风筝钥匙实验。

图5d是EPR实验在概念上最为简化的版本。一个非常轻的原子，由一个正电子和一个负电子构成，在零角动量的基态湮灭，释放出能量相同，角动量和自旋相反的两个光子。“自旋相反”是此问题的核心。无论右侧的探测器记录到哪个方向的自旋（或上或下，或左或右，或其他正交方向），可以保证，只要左侧的检偏器调整到相反的极化方向，就会让另一个光子通过。即使右侧的探测器在5光年远的一端，左侧的探测器在5光年远的另一端也没有关系。即使守在探测器边上的人在最后一刹那才作出决定，是把右边的极化器调到接受上下极化的光子的状态还是接受右旋极化的光子的状态，也没有关系。无论做出什么选择，只要有一个光子通过了极化器，就立即决定了另一个，那个现在已经处在10光年之外的光子，要具有相反的极化方向。对于爱因斯坦、波多尔斯基和罗森来说，这个结果与任何合理的实在概念都是矛盾的。在他们看来，“物理学力图从概念上按照实在之所是来把握实在，与它是否被观察没有关系”。相反，玻尔则坚持，在任何关于实在的恰当定义中，需要考虑的不只是系统本身（在这里是两个光子），而必须是系统加上测量仪器构成

① 莱顿瓶是18世纪电学研究早期发明的一种贮存或者测量电荷的容器，因发明于荷兰的莱顿而得名。电（electricity）的研究经历了很长的经验事实的积累阶段。1752年，富兰克林用一只风筝通过钥匙环把雷电（lightning）引到莱顿瓶中，从而证明了lightning与electricity是一回事儿。这是物理学史上的一个非常有名的事件，也是电学发展的一个里程碑。——译者注

的更大单元。他继续强调：“……对于任何可以恰当使用‘物理实在’这个术语的现象，它们的〔实验〕条件都是现象描述的内在属性。”不可避免地，他的结论是：“彻底放弃因果律的经典理想，并在根本上修正我们对物理实在问题的态度。”要想对科学史上这场伟大的争论有更多了解，可以看玻尔的总结、雅默（Jammer）相关章节的细节描述，以及玻尔的《1958—1962 文选：关于原子物理和人类知识》，这是玻尔对此问题最为成熟的论述³⁰。如果想要简单地了解这几个实验的最新情况，看看量子力学预测的情况，可以读弗雷德曼（Freedman）^①和霍尔特（Holt）的文章³¹。

在光子从光源到接收器这 5 年里，“实在”是什么？这段时间里它们有什么样的自旋？这完全没有意义，对于这个问题，我们不得不这样说，完完全全没有意义。我们不妨换一个问题：光子的自旋是在什么时候“成为存在”的？在发射的瞬间？在它们中的“第一个”（根据狭义相对论，这个概念很难定义）通过检测器的瞬间？在其中一个探测器“第一次”记录到光子的瞬间？没有哪一个答案是可靠的，甚至问题本身也不可靠。关于这些光子，最大的问题是，什么样的问题能够使提问本身有意义？幸运的是，量子力学的数学形式体系正是以使我们能够提出完全有物理意义的问题的方式设置的。而且，迄今为止，我们对于这个形式体系已经有了充分的阐释，而不会被表象所误导。虽然有时波函数会表现异常，比如在一个洛伦兹协变的惯性参照系中，如果其运动速度使得光子在右侧的计数器被记录的时刻比左边的计数器早一年，则在形式上，左侧光子处于是这种状态还是那种状态的几率幅表现得似乎是能够同时根据新获得的信息调整自己。一眼看去给人这样的印象，任何信息都不能以超过光速的速度传递这个基本原理被违背了。但是这样的缺陷只存在于量子力学特定形式体

① 此人并非是利用广义相对论提出了宇宙膨胀解的 Friedmann（弗里德曼）。
——译者注

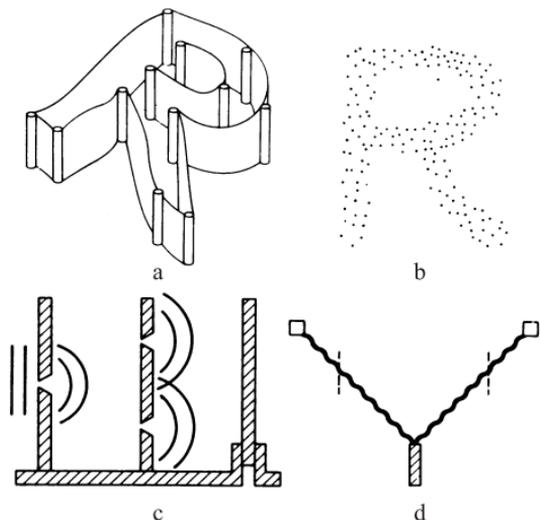


图5 四种示意图，表示观察在“实在”(R)定义中的角色。(a)观察和实验的结果 [通过它们我们才能“以平白的语言”……“告知他人”……“我们做了什么，知道了什么”]^v相当于实在的铁柱，其间的部分则由塑形纸 (papier maché) 填充其中^①。(b) 视网膜中“R”的形象是根据单个光子造成的点阵图案想象而成的。(c) 右侧的感光板^{vi}是记录波的双缝干涉条纹还是告诉我们光子来自哪个狭缝，取决于这样一个选择——理论上，这个选择可以拖到最后时刻——是固定右侧的接收屏还是测量光子作用在上面的动量垂直分量。这两种选择无法同时进行。做一种观察，就必然不能做另一种观察，两者不相容(“互补性”)。(d) 一个用空时图表示的 EPR 实验(空间坐标的方向向右，时间向上)。世界线自下而上，先是表示原子(e^+ , e^-)的历史，然后它分裂成两个光子。光子的世界线在图中都沿着 45° 方向向上。每一个光子都被一个探测器(小方框)所记录，证明它通过了极化检偏器(虚线)(参见正文中的讨论)。

① Papier maché, 法语, 一种特殊的纸张, 可以用作手工材料。这个实在图示 R 惠勒经常使用, 在另外的场合, 惠勒有这样的解释: 观察是实在的铁柱, 其间的部分则是由理论和想象填充的。——译者注

系的中间阶段，而对于实验结果的最后预言，并没有这样的问题。而且，维格纳（Wigner）^{32①}还给出了一种新的形式，它的预言与通常的波动力学的结果相同，并且在任何地方都不会产生任何非物理效应。这个过程再一次强调了玻尔对薛定谔态函数的评论：“我们这里要处理的纯粹的符号过程、最后要给出的不能模棱两可的物理阐释，都要涉及到整个实验的设置。”他又说：“只要保留‘现象’一词用来指代不模糊的可交流信息，所有与日常语言和日常逻辑的背离全部可以避免。”

42 在量子世界中，没有比这个奇异耦合更让人瞠目结舌的性质了，它缠结了过去与未来，缠结了（1）光子在路上的两年里，人们将要选择的检偏器的极化方向，和（2）然后人们才可以讨论已经——由我们现在判断——在三年前诞生的光子。其中包含这样的意思：已经上路两个光子，它们的极化“已经被”观察者或已经或将要对极化检偏器做出的设置所引入存在（brought into being）。而且，光子的发射和它的被探测之间是经过了5年；还是一个纳秒——就如当人们看一个一尺远的东西；或者是 10^{10} 年——就如人接收的或直接或间接地从大爆炸最初几秒发出的辐射的证据；在原则上是没有差别的。无论哪种情况，人们选择的提问方式（例如对极化检偏器的设置）构成了这个现象不可分割的一部分，而这个现象，在从前的观念中，一向被认为是“已经发生”的。在这个意义上，观察者毋庸置疑是创世的参与者。

从风筝钥匙实验到后来拥有了自己的定量测量、自己的单位制和包罗万有的理论结构的电磁学，是经过了漫长的道路才完成的。甚至我们可以相信，在EPR实验的阐释中，今天的量子力学在它的迢迢长路上只走了很少一段。如果电磁学需要很多年才从定性的思想如“强度流”（intensity currents）和“数量流”（quantity

① Eugene Paul Wigner (1902—1995)，美国人，因其原子核和基本粒子理论研究获得1963年诺贝尔物理学奖。——译者注

current) 发展到定量的概念如感应系数和电容等, 那么, 量子力学要发展成深邃自足的理论框架 (参见 Wigner³³), 由其自身定义何谓“观察者”, 何谓“观察”, 则需要更长的时间。维格纳强调, 一个测量只有在其结果被意识到的时候才算完成。玻尔更进一步: 一个观察, 只有在人们能够把结果用平易的语言与人交流时才是一个观察。或者, 考虑观察在意义界定中的角色, 这是当今时代的哲学思想中的核心命题, 我们可以用弗勒斯达尔 (Føllesdal)³⁴ 在伟大的牛津所做的关于意识和语言的演讲中所采用的表述为代表: “意义就是进行交流的人们可以获得的所有证据的合成 (joint product)。” 我们怎样能把这些定性的思想转换成定量的概念呢?

在量子力学与量子原理之间, 在预言物质和辐射性质的形式体系, 与定义何者能够测量以及观察者如何参与到使其所测得以呈现的更大的思想框架之间, 有必要加以区分。这两者中的一个得到了很好的发展, 而另一个似乎还处在类似于电学在 200 年前的原始状态。在两个学习量子理论的学生之间, 有过这样的对话, 我在这里叙述一遍, 它多少可以说明其中的诸多疑惑。A. “波动方程不描述电子, 它描述观察者关于电子的知识的状态。” B. “这我同意, 所有人都同意。” A. “因而, 那个电子有多少个观察者, 就有多少个波函数 (或者密度矩阵)。” B. “噢, 不。没有人会接受这种说法。” A. “嗯, 的确如此。但是我们别无选择, 逻辑上就是这样。” B. “电子处于什么样的态函数, 是由对电子的最后测量所决定的, 是由一个实验决定的。但是只有当结果表达为可以交流的知识, 可以分享的知识, 这个实验才算得上是一个实验。那就是为什么那个电子只有一个波函数, 而不是有许多。” A. “哦, 现在我明白了; 我同意。” 我们也是这样!

那么现在, 什么是“观察”? 要回答这个问题还为时过早。那么, 为什么是这个词? 现在的关键是找一个词, 它还没有定义, 并将永远没有定义, 直到有一天, 人们可以比现在 (除了前述明

显的例子)更清楚地看到,所有的参与者,过去的、现在的、将来的,他们的观察怎样联合起来定义我们所说的“实在”。沿着这个线索,未来的发展呈现了一幅激动人心的景象,量子力学的形式体系正如它曾经呈现的那样,将继续给予我们以可信的指导。

人们不必先了解麦克斯韦的电动力学才能想象一个霹雳;人们也不必追述“观察”与知识、意义和量子理论的最深刻问题之间的难以置信的复杂联系,才能接受这种奇特的意象,不管愿意还是不愿意,只能接受,现在的观察参与了对过去的实在的定义:观察直接地卷入到创世之中。

人们常常会问这样的问题,一个观察者的存在或者不存在,对于宇宙的存在能有什么影响吗?难道我们不知道宇宙在生命诞生之前已经经历了 10^9 年之久的天体物理演化吗?恐怕我们也无法回答这首古老的打油诗(Knox,³⁵ 日期不详):

有个青年这样说:

上帝他呀,
一定觉得太稀奇
如果他看到这棵树
总是总是在这里
即使无人在院里
回答

我的先生亲爱的

你的惊奇才稀奇
有我一直在院里
所以这树才能够
一直一直在这里
因为看着它的是
你忠诚的

老上帝^①

如果我们把这首打油诗稍稍改动几个词，无非是说，“观察”允许并促进了对通常的时间次序的超越。无论今天我们提出的创世通过观察而发生的概念有多么难以理解，但是我们更难以看到其他值得探索的线索。其他的创世方式在哪儿？

完全对立的观点也经常出现：生命的诞生对于万物的进程来说是偶然的，不重要的。在此，回顾一下生命自发产生的古老观点是很有意思的，比如罗杰（Roger）³⁶就说：拿一个玻璃缸，装一半谷子，缸口堵一件脏衬衫。把它放到屋角 21 天。生命就会以老鼠的形式出现！再对比一下今天的“生命偶然说”：拿一个宇宙，装上 $\sim 10^{80}$ 个粒子，扔在一边 $\sim 10^{10}$ 年，生命就会诞生！我们能否相信，这种新的生命配方比旧配方有更好的基础？量子力学引导我们严肃地看待并研究与之截然相反的观点：观察者之于宇宙的创生，正如宇宙之于观察者的创生，是必不可少的。

在量子的故事中还缺什么

今天，量子被认为是一切物理学分支的核心原理。然而，在其诸多性质如非决定性、互补性、几率幅的干涉性之中，常常会有一些看起来很怪异的东西，似乎是莫名其妙地从外界强加在这个无意志的物理世界上的。如果这个东西能够得到充分的理解，它在宇宙结构中的必然性还不能明白无误地表现出来让所有人看到吗？它和它所有的数学上层建筑，就不能从某个非常简单的第一原理中导出吗？在我们获得这个基础理念之前，我们甚至可以说，我们还没有领悟量子原理的首要之处，这个根本机制正是我

① 罗素《西方哲学史》中评述贝克莱的那一章也引述了这首诗。参见商务印书馆 1976 年第一版下卷 182 页。——译者注

们的量子故事所缺失的。

如果这种情形提出了一个挑战和一个问题，那么，观察者在量子力学中的核心地位不会成为我们回答这个问题的最重要线索吗？除了说观察者使宇宙进入存在，还有什么方式能够让我们理解这个线索呢？

“这个世界上发生的所有事情都仿佛是一个巨大的游戏，除了规则，没有什么是预先确定的。”艾根（Eigen）和温克勒尔（Winkler）^{①37}在他们那部关于偶然性在生物演化中的作用的优秀著作中这样说。但是，如果没有盲目随机的变异和自然选择在这条路上产生出生命、意识和观察，宇宙也不能预先进入存在，根据我们现在探索的观点：将是无物而非有物。

结 论

我们回顾了这样一些内容：（1）宇宙确曾进入存在的大爆炸的证据；不仅空间，而且所有的物理结构和定律都可变易的证据；（2）在每一个定律适用的范围内，每一个定律都可以最为紧凑地阐释为对称的效应，而对称却遮蔽了下一层的结构。无论是在数学上还是在物理上，都没有丝毫“终极”结构层次的线索显现出来。人们不禁要问，是否结构的一个层面和下一个层面之间的相互联系，不会没完没了地继续下去，而是会在观察者自身这儿停下来，不再周而复始地绕圈子。关于这个论点，最强的说法是（3）卡特和狄克的人择原理，和（4）参与的观察者在定义任何有用的实在概念时不可或缺的地位——量子力学作证。除了借助于“通过观察的创世”这个观点，没有其他明显的办法能够把这些思考

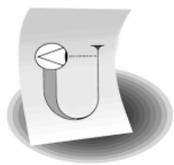
① Manfred Eigen（1927—），德国化学家，因在高速化学反应方面的研究获1967年诺贝尔化学奖。后转向生命起源问题研究。2005年6月曾来中国北京参加“第十四届生命起源国际会议”，并前往CCTV.com与网友就生命起源问题进行在线交流。Ruthild Winkler，数学家。——译者注

联结成更大的统一体。

关于宇宙何以进入存在，在这个世纪里已经有了很多深入的思考，尽管如此，显然还没有哪个人敢于根据他个人的判断宣称哪个故事是正确的——如果有这么个故事的话；就算真的有人那样做了，显然也没有多少人相信他。在创世的分析中，需要的不是个人的判断，而是公众的判断——那就是说，科学。一个判断应该考虑到所有相关因素，并对各个因素的权重给予评价，科学显然要包含这个属性，并且还应具有：可证伪性（falsifiability）。不仅沿途的每一步探索要经受详细的分析，最后的总体图景也应该如此。用卡尔·波普尔（Karl Popper）的话说：“把自己暴露在炮火之下。”也就是说：它应该能够给出新的可以验证的预言。分析和验证都是公开的。任何合格的分析者，无论来自哪里，都有对某一个分析链条的逻辑环节以自己的方式逐一审核、检验的民主权利；任何合格的观察者，无论来自哪里，都有以自己的方式进行实验、做出观察的民主权利——无论是否与某一个预言相吻合。46

对于这样的逻辑分析和观测验证，人们借用了宇宙学的许多片段和量子故事中的许多部分，但是迄今为止，还没有一个整体的创世图景，无论好坏都没有。“创世通过观察而发生”这个命题将会经得起检验和证伪，开花结果吗？那么首先，我们相信，前提条件是，有人发现了怎样从这个概念**推导**出量子原理。

本文最早曾以此标题收入：R.Butts and J.Hintikka eds. *Foundational Problems in the Special Science*, pp.3~33 (1977)



我们的宇宙：已知与未知

47 我们生活在一个什么样的宇宙？一个奇怪的宇宙，是的。但是它的奇异之处都在哪儿？在于已现？还是未见？现在，台球正在击打球桌，我们该将注意力集中在台球上吗？我们能否问游戏如何开始，并将如何结束？

有谁会不先看一眼这个游戏呢？如果这时有一个更深刻的问题闯入脑海，有谁能阻止我们的追问呢？

我们的宇宙之有趣是任何台球游戏都无可比拟的。新星的形成、旧星的爆发，如此浩瀚的太空，如此巨大的能量，胜过任何人在他最狂野的梦里所能想象出来的最灿烂的焰火表演。

一颗著名的超新星

拿起望远镜，指向蟹状星云（Crab Nebula）。约一千年以前，那儿并没有蟹状星云。那时，欧洲的天文学还处于很低的水平，而中国则不然。那里的天文学家定期巡视天空，并记录他们的观察。1054年7月，他们报告发现了一颗新的恒星，其亮度一天天增强。几天之后，就亮过天空中所有的星星。然后黯淡下来，亮度一周少于一周。按照我们现在的命名，这颗新星（nova）或者超新星（supernova），可以把它每天的亮度与相邻的某颗恒星进行比较。根据我们的中国同行在很久以前做出的比较，我们现在可以画出一条亮度曲线。这个亮度曲线与超新星爆发的亮度曲线十分相似，后者是我们现在利用功能强大的望远镜对遥远的星系进

行连续观察而得到的。只有在望远镜视野所及的，数目巨大的星 48
系中，今天才有可能经常地看到这样的事件。而对于某一个星系
来说，比如我们的银河系，这样的事件平均 300 年才能发生一次。

宇宙之中还有比超新星爆发更为壮观的事件吗？1963 年发现的被称为类星体的天体比超新星更亮，但是它们也更加遥远，更难以研究。因而，没有什么令人信服的证据表明，在这个宇宙之中，从单个的戏剧性过程来说，还有什么事件能够比超新星的爆发更激动人心。那么，由超新星这个奇特的宇宙事件，我们能够获得什么启示呢？

在我们看到过的所有超新星事件的残骸中，没有哪一个比 1054 年 7 月那次爆发被人研究得更加深入了。这次爆发产生了一片膨胀的明亮的星云，即蟹状星云（图 1）。今天，900 多年后，它的边界已经移动到距离爆发点 3 光年远的地方了。很容易理解，其亮度分布并不均匀。它就像在星云之中的一只章鱼，章鱼缠绕着、舞动着手爪就是一束束磁力线。以这些磁力线为中心，电子沿环形和螺旋形轨迹运动。电子的能量比人类已经建成的和计划中的任何加速器的最高能量都要超出十的多次幂。一个被俘获的电子绕环形轨道运转，忽而在磁力线的这边，忽而在磁力线的那边，往复不止，就像所有在无线电发射天线里被驱动着以极高频率跑上跑下忽来忽往的电子一样。它还辐射着电磁能量。蟹状星云里的电子所辐射的电磁波有 X 射线、可见光和无线电波。分布在几个国家的众多研究者对辐射的亮度图案、绝对强度、光谱结构和极化方向等进行观察，并对测量结果进行了研究，现在已经能够给我们展示出这个章鱼手爪的解剖结构、磁力线的一般性质，以及电子的轨道。除此之外，人们还了解了很多别的性质，比如它所释放的总能量是如此巨大，达到了 10^{49} 尔格的量级。

超新星事件的明显特征是爆炸。一颗恒星爆炸了，向太空喷撒出物质。但是，我们观测到的磁场是怎么回事儿呢？它的来源倒是不难找到：就是原来的恒星本身。人们能够详细研究的恒星

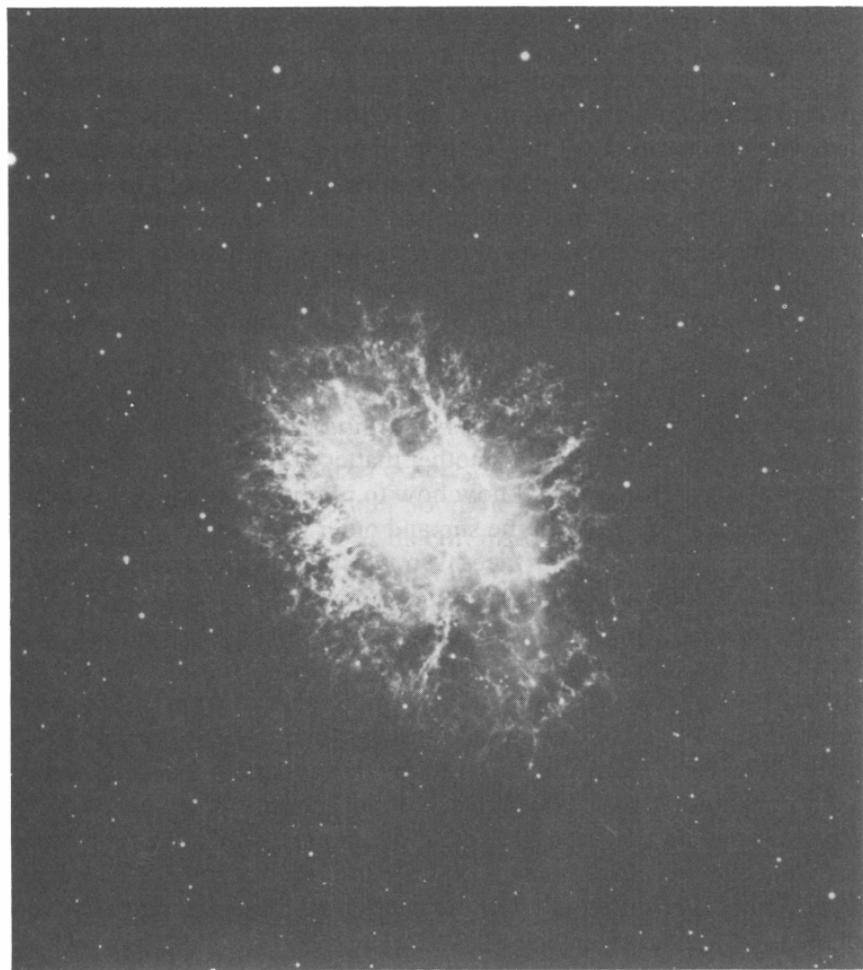


图1 蟹状星云（距离：3 000~5 000 光年）

没有任何一颗没有与之相关的磁场。而且，电离物质中的磁力线没有别的选择，只有随着物质的运动由此及彼，就像警察的警戒线被骚乱的民众冲击的时候，原来的直线很快就会随势就弯，并且越来越弯。就这样，物质影响着场，场也影响着物质。今天至少有两个研究中心正在积极研究这种动态耦合。但是到现在为止，

还没有哪个中心对这个持续了 900 年的流体动力学湍流进行了充分全面的研究，以至于能够细致入微地解释这条章鱼的结构和它现在的扭转速度。我们很难了解这个结构，因为湍流是一门艰难的科学，而磁流体动力学湍流更是一门难上加难的科学分支。

因而，爆炸的后果呈现出复杂的景象——就我们所能判断的范围来说，这种复杂是非实质性的 (inessential)，但仍然是复杂的。那么，爆炸本身又如何呢？

引力坍缩

人们普遍相信，超新星爆发是某一类恒星天体物理演化过程中的正常阶段，这类恒星具有几百倍于太阳的质量，而密度已经压缩到比太阳大 100 万倍甚至更大的程度。并且其密度随着演化的进行还会越来越大。根据牛顿的引力平方反比定律，线度减少 1%，会导致引力增加 2%。因而，密度的增加意味着牛顿引力权重的增加。最后，引力压倒了一切抵抗压缩的力量，恒星便开始坍缩。起初较慢，然后越来越快。在预计不到 1/10 秒的时间里，中心的坍缩就完成了，而传到恒星外层的能量在 900 年后依然为残存的螃蟹状星云提供活力。

我们有什么理由相信，我们能够构想出一个可以信赖的坍缩过程呢？分析太阳这样近乎静态的恒星是一回事儿，而预报超新星的神奇演化，是否就是完全不同的另一回事儿呢？我们知道怎样精细入微地预测太阳和其他恒星内部发生的核反应，以及从恒星表面辐射出的能量，我们能否以同样的信心讨论一颗正在经历激烈内部运动的恒星呢？

第一次有一点儿星星降临到地面上，那是在新墨西哥州的阿拉莫戈多 (Alamogordo)，1945 年 7 月 16 日，首次原子弹实验。历史上没有哪一个事件能够比它更为突出地证明人类对于自然运行机制的理解能力。仅仅一次设计，没有试验和纠错，人们就在

地球上获得了比以往所见任何温度都要高上千万倍的温度，可以与太阳的中心温度相匹敌。一个计算出来的装置产生了一个计算出来的压力冲击，其威力远远超出以往地球上或地球内部发生的任何冲击力量。一个与以往人类任何经验都迥然相异的事件被预言出来，而且是被正确地预言出来。

51 在加利福尼亚的利弗莫尔（Livermore），加利福尼亚大学的劳伦斯放射性实验室（Lawrence Radiation Laboratory）里，有一台令人难忘的计算机。它预言了比阿拉莫戈多装置远为复杂的裂变和聚变炸弹。斯特林·科尔盖特（Stirling Colgate）、迈克尔·美（Michael May）和理查德·怀特（Richard White）在1964年用过它，并且最近又用它预言了一颗超新星的流体动力学性质。其他研究给出的计算也都证实和拓展了利弗莫尔预言的场景。该计算机能够生成一种电影画面，可以呈现恒星内部发生的事件。当然，就像原子弹里发生的事件一样，这都超出了直接观察的能力范围。

由于恒星具有球对称性，可以进行简单可靠的分析——可以想象的最简单的原子弹也是球对称的。在一种情况下，物质的聚集是由于向外作用的巨大爆炸产生的压力，在另一种情况下，物质的聚集是由于受到了来自内部的引力作用，但是对于计算机和为它们设计程序的人来说，这是一个无关紧要的差异。同样，是人类的倒计时决定压力作用于核装置外部的时刻，还是天体物理演化和恒星收缩的缓慢过程决定引力收缩在星体内部占据上风的时刻，也没有多大的不同。在这两种情况下，用以描述力的逆转从而产生运动的是同一个定律，辐射流的公式也大同小异，核物理学的原理更是相同的。所以毫不奇怪，在核物理领域工作的人以相当充分的信心预言了超新星的很多性质。

开始时，恒星物质以越来越快的速度集体向中央运动，越来越紧。很快，星体内核的坍缩速度超过了外围部分的坍缩速度。对于这个收缩的内核，越来越强的引力产生了越来越强的挤压。内核的物质在突如其来的强力压缩下，也被加热到极高的温度。

是继续坍缩下去，还是坍缩成中子星为止

超密的内核将面临两种截然不同的命运，这取决于它的质量是高于还是低于临界值。临界值大体上相当于太阳的质量。

一个少于临界质量的内核将在核力的作用下停止坍缩。它们成功地抵消了引力的推压，但这只有当内核已经被挤压到密度可以与原子核自身相比的状态时才能发生。这个密度比原来恒星的密度要高 100 万倍以上，尽管恒星本来的密度已经比太阳的密度——或者水的密度——要超出 100 万倍以上了。这个灼热的内核，这个 10 或 100 千米的核物质球，这个巨大的原子核，这个封装的中子星，由于它超乎寻常的温度和输出的辐射，就像是一颗炸弹填充在这颗恒星无比巨大向外延伸的残骸中心。这颗炸弹突如其来冲击力阻止了外壳的坍陷。不止如此。它还驱使外壳以不断增加的速度远离。让我们从头到尾地回想一遍，我们看到，这颗恒星给我们展现了一幅激动人心的画面：先是安安静静的，然后到处缓慢地坍陷，再后内核迅速爆聚（implosion），而后骤然而止，最后，外壳迅速膨胀。

每一层外壳都发现其他层的外壳阻碍了自己由内向外的飞行。哪一层遭受的这种阻碍越少，它获得的速度越高。处于外壳最外面的部分，最暴露的十万分之一质量，被推到了比光速稍小的速度。如此高的能量使得这一层的每一个单个原子都挣脱了所有的束缚。每一个都开始了它穿越空间的漫长的孤独之旅。按照这个思路，科尔盖特和约翰逊（Johnson），小野（Ono）、坂下（Sakashita）和大山（Ohyama）对于穿过我们银河系的宇宙射线产物提出了一种解释。随后，科尔盖特和怀特还有其他研究者发现，这个超新星的加速机制不仅能够解释我们观测到的光谱为什么按照宇宙线粒子的能量分布，还能解释绝对强度的数量级。恒星世界和粒子世界之间的联系实在是太神奇了！

如果一颗恒星的质量超过临界质量，在更强大的引力作用下，内核的坍缩在它达到原子核的密度时也不会停止。内核的物质从所有的方向急速向内倾泻，就像一千个尼亚加拉瀑布（Niagara Fall）从天而降，倾注到极小极小的体积内。当它达到核物质的密度时，它的确慢了一下，就像一辆特快列车，当它呼啸着经过一个小镇时，稍微停止一下加速，随后它的速度就越来越快。在不到 1/10 秒的时间，坍缩到头了。没有一个剩下来的内核可以作为填充在星体中心的炸弹。也就没有一个冲击力把星体的残骸驱散到太空之中。它的外壳顶多有一个微弱的热核反应炉短暂地闪烁了几下，顶多驱散了很少一点物质，根据两个工作组迄今为止的计算结果，也就不会有一颗超新星在那儿闪亮登场。

53

于是我们不由得要对恒星之中发生的两种坍缩进行预期，在时间的长河中，它们缓慢地发展到超密的状态。在一种类型的情况下，内核超过临界质量，坍缩将进行到底，即使有什么东西能被我们看到的话，也不会有多少。在另一种类型的内核坍缩中，天赐其质量小于临界质量，它将终结为中子星，于是我们看到了超新星。

我们有什么理由认为会发生完全坍缩呢？对于密度超过核密度的物质的行为，我们究竟知道什么，以至于我们敢于说，在通向完全坍缩的道路上不再有下一个中途车站？我们知道的虽然不多，但是只要有这个就够了：物质的刚度（rigidity）存在一个上限。物质的刚度越强，其中传播的声速越高。最大的刚度给出的声速等于光速。更高的刚度是不允许的。否则声速将超过光速，经过了彻底验证的狭义相对论原理就被违背了。然而，这个临界弹性实在不足以阻挡坍缩。

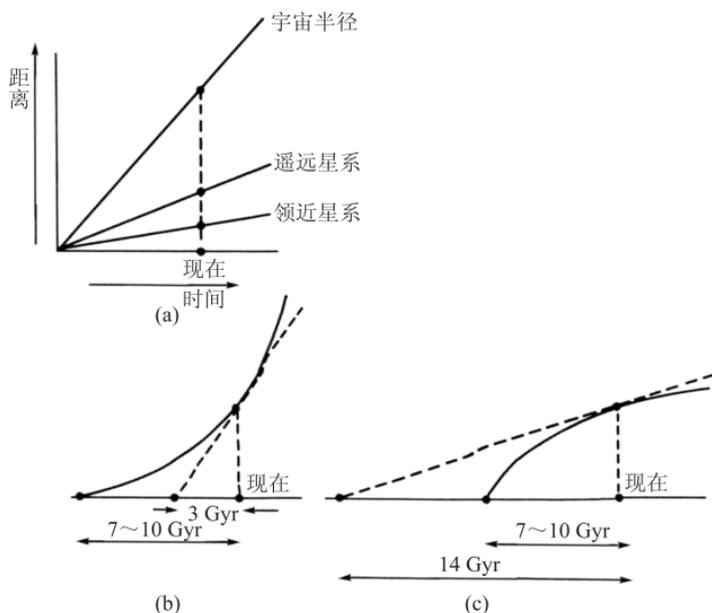
坍缩是不可避免的，预言的应验也是不可避免的。给出这个预言的不仅是关于物质弹性上限的原理，还有极端条件下引力如何作用的爱因斯坦理论。然而，我们有什么理由可以假设，爱因斯坦 1915 年伟大的标准引力几何理论，他的“几何动力学”，在

这些条件下依然能够成立呢？

与宇宙的膨胀和再收缩相关的坍缩

在对爱因斯坦理论的诸多验证中没有哪一个比宇宙自身的坍缩更加引人注目了，也没有哪一个理论比爱因斯坦理论与坍缩现象的距离更近。相对论的其他三个验证已经广为人知：水星近日点的进动；光线被太阳造成的弯曲；引力导致的光谱红移。第四种效应在 1922 年被人推算出来，但非来自爱因斯坦本人，而是来自弗里德曼。最初，爱因斯坦甚至质疑这个预言：一个密度大致均匀的封闭宇宙将不可避免地膨胀，达到最大尺度，然后再收缩，最终以彻底的引力坍缩而告终，就像起初微小而迅速的膨胀一样迅速而彻底。相比之下，爱因斯坦一直相信，整个世界也这样相信，宇宙将永远保持现在的大小。爱因斯坦不肯相信弗里德曼的预言，尽管这个预言是直接从他自己的理论中推导出来的，但他 54 发现这个计算结果是无法避免的，只好不情愿地接受了这个完全意想不到的结论。此后，爱因斯坦犹犹豫豫地半信半疑地找到一个改造他那无可置疑的理论的方式，他引入了一个所谓的宇宙项 (cosmological term)。只有这样，他才有可能让宇宙保持静止，并符合他所理解的经验。5 年后，哈勃 (Hubble) 发现宇宙正在膨胀。爱因斯坦自此正式放弃了宇宙项，说，那是“我一生中最愚蠢的错误”。假如爱因斯坦坚持自己最初的理论，那么，哈勃的发现如果不被看作几何动力学最激动人心的验证，又能是什么呢？

讨论宇宙的膨胀可能有什么意义呢？如果万事万物——包括宇宙、星系和我们所有的米尺——都以同样的方式膨胀，那么，谁还能说是真的在发生什么膨胀吗？然而，米尺没有膨胀，地球轨道半径没有变化，星系的尺度也没有增长，这些测量标准仍然保持稳定。增长的是一个星系和另一个星系之间的空隙。这样一个爆炸模型每个人都可以想象一下。我们在一个半胀的橡皮气球



(图中 Gyr 表示 10^9 年 = 10 亿年)

图 2 空间膨胀。(a) 均匀膨胀，速度随时间保持常数。退回到过去的某一个时刻，所有的距离都只有现在值的一半。继续向回退，退到更早的时刻，但仍然是在一个共同的时刻，所有的距离都退归为零。因而，这些距离中的任何一个——例如，宇宙的半径——都足以表示其他距离如何随时间变化。(b) 加速膨胀；宇宙半径是时间的函数。退回到膨胀起点的实际时间（大约 $7\sim 10\times 10^9$ 年，是根据每个恒星和星团的计算年龄估计出来的）超出了 1930 年代根据当时的空间膨胀速度估计的时间（虚线；画一条曲线的切线，回推到零点，即“哈勃时间”，约 3×10^9 年）。这样一个加速的膨胀速度违背了爱因斯坦 1915 年的标准相对论，于是产生了“物质连续创生”理论。(c) “哈勃时间”的新值，膨胀起点的回推时间（虚线， 14×10^9 年）与 20 世纪 30 年代发生了变化，因为在这段时间里，对天体物理距离的标尺作了一次很大的校正。这个时间超出了从膨胀起点开始的实际时间（大约 $7\sim 10\times 10^9$ 年），这意味着膨胀正在减速，这与“物质连续创生”理论相矛盾，而符合爱因斯坦的理论（各个部分的引力效应导致了整体膨胀的减速）。

表面粘满硬币，然后我们继续吹胀气球。没有哪个硬币的大小会发生变化，但是硬币之间的距离增加了。对于一个指定的硬币，它到相邻硬币的距离会以某一个确定的速度增长（图 2），它到两倍远处硬币的距离，也会以两倍的速度增长。每一个硬币都可以认为自己处在膨胀的硬币云的中心。它们都是对的——因为气球本身在膨胀。

如果说，预言、怀疑、证实，是几何动力学宇宙奇异历史的第一个循环，这不是最后一个。爱因斯坦的理论预言：像成千上万个石头一样扔向太空的各个星系应该彼此远离——但是远离的速度将随着时间的推移而越来越慢，因为它们之间存在引力的吸引——而最终会停下它们前进的步伐，掉过头来聚向一起，由慢到快，越来越快。据此，宇宙今天的膨胀速度应该比几十亿年前慢得多。换句话说，退回到膨胀开始时的实际时间应该比我们按照现在的膨胀速度回推得到的时间（“哈勃时间”）要短（图 2c）。然而，当时的观测却给出了（图 2b）相反的数据。1930 年代的很多研究者都在琢磨这个难题，其中不止一位一度对爱因斯坦的理论失去了信心。那是一个“物质连续创生”（continuous creation of matter）理论的时代，而随后就进入了“理论连续创生”（the continuous creation of theories）^①的时代。

后来证明，在估计遥远星系的距离时，有一个基本的天体物理 56 的长度标准出了错误。所以距离就错了，但是退行速度（velocities of recession）因为是根据对红移的观测给出的，还是正确的。回推到膨胀起点的旧时间值 35 亿年，因为是根据当时普遍相信的数值推出来的，也错了。现在，在膨胀速度的预言和观测之间，再也找不到任何矛盾了。而且，关于宇宙的膨胀、宇宙的再收缩或星体的引力坍塌，在预言和观测之间也不再有任何原则

① “物质连续创生”是当时出现的一种宇宙学理论，“理论连续创生”则是惠勒开的小玩笑，指当时不断出现了各种宇宙学理论。——译者注

上的重大差异了。

黑 洞

如果引力坍缩之于星体是不可避免的，正如几何动力学之于宇宙是不可避免的，那么，如果没有并发的外壳干扰，坍缩的内核看起来会是什么样呢？灼热的内核光芒夺目，一开始，会在观察者的望远镜中强烈地闪耀。然而，由于越来越快的坍陷，它也越来越快地从观察者的视野中消失。它的光谱向红色方向移动。每一毫秒都变得更暗，在不到一秒的时间里就暗得无法看见了。一颗星星的内核看不到了，会是什么样呢？这个核就会像柴郡猫（Cheshire cat）^①一样，遁出视野，柴郡猫留下的只有微笑，而核留下的只是引力吸引。是的，引力吸引；不是光。连光都没有，更何况其他粒子。并且，即使有偶然来自外面的光和粒子进入黑洞，也无非是增加了黑洞的质量和引力。黑洞有大小吗？从一方面看，有；从另一方面看，没有。什么也看不到。当然，可以想象，把一根米尺扔向吸引中心，它总会“到底”。然而，强烈的潮汐力会把它以及所有的东西统统撕碎。没有哪一种常规的尺度测量是可能的。甚至在任何常规的意义讨论物体的长度都是不可能的。不过，我们可以向黑洞发射一条光线，不是直接射向它，而是尽可能地偏离中心，射向这一边或者另一边，使得光线刚好可以避免被黑洞俘获——最后出现在一个遥远的光子探测器中。按照这个定义，黑洞的“直径”在10千米的数量级，精确的数值取决于坍缩的内核质量。这就是众所周知的经过长期发展的标准理论的预言。

57 我们有望观察一个黑洞吗？一个质量稍少、由于内核不完全

① 在著名的童话《爱丽斯漫游仙境》中，爱丽斯看到了一只怪异的柴郡猫，猫离开的时候，身子慢慢地隐去，最后猫不见了，猫的微笑还在空中。这是一个理论物理学家非常喜欢的故事。——译者注

坍缩而形成的中子星呢？前者将是完全彻底的黑暗，后者或比烛光还要黯淡，这使我们几乎无望找到孤立的黑洞和中子星^①。尽管一试再试，没人曾用望远镜在蟹状星云中心附近探测到可确认为超新星爆发残骸的东西。幸运的是，孤立的单体并非所有恒星的普遍状态。很多恒星拥有伴星，而伴星常常是不可见的。它的存在只有通过可见的那颗在几小时或者几年之中的周期性往返运动才能表现出来。可见部分的运动幅度足以使我们估计不可见部分的质量。有时，伴星质量只有行星量级。但如果其质量可与太阳本身的质量相比，在这种情况下，就可以解释为一个黑洞或一颗中子星了。在任何情况下，你都不要指望能够在那颗明亮的星星上看到坍缩核掠过星盘时有一个可以探测的暗点。直径 5 000 千米的水星在经过太阳时也没有留下可以检测到的暗点；而黑洞或中子星的有效直径还要小 100~1 000 倍。肖克洛夫斯基（Schklovsky）指出，可见的恒星会发射出物质，这些物质的一部分会掉进中子星中，巨大的冲击下会激发出可观的 X 射线来。于是，现在戈博尔（Goebel）以及其他正在寻找在 X 射线源和具有不可见部分的双星系统之间的关联。发现这样的关联是一回事，但是要证实 X 射线源随着双星系统的周期发生变化，则是极为艰难的。而一个 X 射线探测器从地面打到空中，只能在大气层上停留 5 分钟。

① 就在惠勒发表此篇演讲之前四天，1967 年 12 月 25 日，剑桥大学的射电天文学女研究生 Jocelyn Bell 记录到了第二个发出规则脉冲信号的天体，即脉冲星。两个月后，她和导师 Antony Hewish 在 *Nature* 杂志上发表文章，把脉冲星解释为高速自旋的中子星。1974 年，Hewish 为此获得了诺贝尔物理学奖，Bell 则榜上无名，此事成为诺贝尔奖历史上的一大公案。这是题外话。这个发现大大支持了当时关于黑洞和中子星的理论，而惠勒在演讲时显然还不知道这件即将引起轰动的大事。1980 年代，脉冲星又有了新的解释，超弦理论家 Edward Witten 认为可能由夸克构成。该问题尚无定论。感谢本书责编范春萍提醒我注意到这个问题。——译者注

丢失的物质

我们可以看到一个单个黑洞的效应，我们也可以讨论分布在空间的大量黑洞的引力影响。

如果说，在爱因斯坦的几何动力学和观测宇宙学的冲突中，我们已经经历了两轮预言、怀疑和确认的循环，那么，我们正在开始第三个吗？如果爱因斯坦的理论是正确的，他的进一步推论是有效的，比如宇宙是封闭的，是近似的球形等统统成立，那么，宇宙不仅将要达到最大尺度，还将再度收缩。此外，宇宙还必须58 有足够的物质，使得它的引力能够减缓现在的膨胀，并使之停下来。这样一来，预期的物质密度就比我们能够在星系的尘埃和恒星中找到的密度——想象它们被磨碎了分布到太空之中——超出了 10~100 倍。有好几位研究者正在积极地寻找这种“丢失的物质”（missing matter）。不止一位研究者设想：在星系之间的空间中，填满了大量的电离状态的氢（ionized hydrogen）。诺维科夫（Novikov）和泽尔多维奇（Zel'dovich）^①提出了完全不同的建议：适当数量的黑洞散布在太空之中，贡献了大部分的宇宙质量。我们很难在天体物理中为这些研究者找一个比寻找丢失的物质更有挑战性的课题了！

仅仅去寻找更好地探测已存在的黑洞和中子星的方法还不够。人们还希望获得新天体创生的信号。在引力坍缩的所有信号中，没有什么比引力辐射更有代表性。爱因斯坦早在 1918 年就证明，任何一种随时间改变质量分布的非对称物质都会发出引力辐射；在一个旋转的扁平的恒星的引力坍缩中，人们自然而然地会把一个质量足够大、变化速度足够快的部分视为引力辐射源。

① 这几位是俄罗斯物理学家。惠勒的学生基普·索思（Kip Thorne）在《黑洞与时间弯曲》中，对他们的故事有较多的描写。中译本已经收入“第一推动丛书”，湖南科技出版社出版。——译者注

自 1966 年起，韦伯 (Weber)^①在马里兰 (Maryland) 的大学城 (College Park) 拥有了一个引力辐射探测器。在一年多一点的时间里，他已经探测到了十几个事件。这些事件是引力辐射导致的吗？现在人们还不能确定。韦伯比任何人都清楚地知道，从测得“事件”到做出证明，证明引力辐射脉冲正在降临地球，这期间的道路有多么漫长；而确定一个这样的脉冲源就更遥远了。困难之巨大令人生畏。然而，无论如何，这种引力坍缩探测的新方法，是一个充满希望的开始。

经典预言：有限时间中的无限密度

一个黑洞和一颗普通恒星环绕其共同的引力中心旋转；黑洞贡献了整个宇宙的大部分质量密度；黑洞在形成中产生引力辐射脉冲：所有这些效应都发生在坍缩质量的外部。而其内部发生的事情更加惊心动魄。内部的时间尺度与外面截然不同。根据广义相对论，远离陷落物质的标准时钟和位于陷落物质内部的标准时钟的时间步伐会有巨大的差异。从外面看，黑洞将万世长存。但是，在一位飘在坍缩物质球上随之向内陷落的观察者看来，密度的增长越来越快，预计不到一秒钟就会到达无穷。如果有一台计算机试图提前计算坍缩物质每时每刻的流体动力学状态，它很快就会因为要处理的数据无比巨大而不得不停下来。事实上，计算机都冒烟了。由于这个无穷密度的预言，经典理论走到了尽头。一个无穷大的预言不是一个预言，一定是哪儿错了。在 1965 年伦敦引力物理学国际会议 (London International Conference on Gravitation Physics) 上，引力坍缩成了最引人注意的主题。没有哪个主题得到了如此大的重视，也没有哪个主题产生了如此多的分歧。问题是简单的。对球形的微小偏离是否能够使坍缩系统免

① Joseph Weber，曾加入惠勒的广义相对论研究小组。——译者注

于达到无穷大的密度？卡拉特尼科夫（Khalatnikov）和栗弗席兹（Lifshitz），提出了第一个假说，他们提出，无穷大密度——也就是无穷大的空间弯曲——只有在完美对称的情况下才能达到。然而，霍金、彭罗斯（Penrose）和迈斯纳（Misner）给出了强有力的论证，论证对球形的微小偏离为什么不能使系统免于到达奇异态（singular state）。会后，霍金、彭罗斯和格罗赫（Geroch）在爱因斯坦的理论框架之内继续工作，他们放弃了球对称，采纳了一组又一组关于运动何以发生的简单条件，证明奇异条件的产生是必然的。泽尔多维奇用另外的方法得到了同样的结论。这样一个图景似乎是很诱人的，我们把恒星内核的物质，或者宇宙自身坍缩最后阶段的物质想象成一个不断收缩的、盘旋扭转剧烈翻腾的物质球，但其线度并非无穷小——再往下，便再度膨胀。然而不，不会是这样的。这个法子太廉价了。这个无限只有人们停留在经典理论的语境内部才是无限。无限是一个信号，意味着有某种重要的物理效应被遗落在我们的思考之外了。这个新物理学的根不需要到远处去找。它就是作用量子（quantum of action）。

几何动力学和量子

爱因斯坦早年为量子原理的建立做了大量工作，但是到了晚年却排斥量子理论。正是爱因斯坦与卢瑟福（Rutherford）和索迪（Soddy）一起，第一次让跃迁几率的概念问诸于世，但到了最后，他却是不接受它的唯一一位物理学领袖。晚年，他试图把量子原理从相对论中清除出去，而不是把它融入到相对论之中。今天已经很难找到哪位物理学家会同意这种观点。相反，对立的观点成为 1950 年以来理论物理最重要进展之一的核心：爱因斯坦广义相对论或几何动力学的量子化——为这项事业做出贡献的有安德森（Anderson）、伯格曼（Bergmann）、狄塞（Deser）、德维特（DeWitt）、狄拉克（Dirac）、费曼（Feynman）、希格斯（Higgs）、洛伊特维勒

(Leutwyler)、迈斯纳、皮拉尼 (Pirani)、罗森菲尔德、席尔德 (Schild)、施温格 (Schwinger)、温伯格 (Weinberg), 等等。如果量子论和相对论是 20 世纪物理学的两个最高原理 (overarching principle), 那么, 我们现在在“量子化广义相对论”或者“量子几何动力学”中实现的这两个原理的结合无疑是一个激动人心的知识领域。除了引力坍塌, 哪儿也找不到这样的领域了。可想而知, 人们在摸索量子几何动力学数学形式的过程中要遇到多大的困难, 在爱因斯坦离世后的这些年里, 一个简单的概念难题就给我们造成了巨大的麻烦。相对论把时间作为与其他三维坐标相并列的第四维, 使得我们对自然的描述达到了一个全新的统一。爱因斯坦让我们用空时 (spacetime)^① 替换了空间。从空时回到时间? 没有什么比理解这种替换的必要性更难的事了。空间是动态的实体, 是几何动力学讨论的主题: 三维空间。而四维的空时则不是动态的客体。当空间随时间发生变化时, 空时提供了空间的历史 (图 3), 而产生这些变化的客体则是空间。

迄今为止, 人们一直认为空时是物理学的舞台。所有事件, 我们能够想到的事件, 过去的、现在的、未来的, 都在我们称之为空时的永远不变的巨大结构中有自己的位置。经典几何动力学适合用空时描述, 我们可以用这种方式予以清楚的说明, 空时的所有类空剖面 (spacelike slice) 都能告诉人们空间随时间的动态变化可能采取的所有位形 (configuration)。但是量子几何动力学则不然。它挣脱了空时的束缚。它从自身出发, 提出了一个新的舞台: 超空间。

① spacetime, 这是一个词, 而不是两个词的简单相加。即 $\text{spacetime} \neq \text{space} + \text{time}$ 。以往常被译为 (四维) 时空, 但在中文语境中容易理解成时间加空间的简称。后被人译为空时。本书采用空时的译法。——译者注

超空间

超空间 (superspace) 中的每一个“点”都代表着一种完整的三维几何。既然人们能够根据形状把一个土豆和另一个土豆区分开来，那就不会感到奇怪，超空间中的一个点能够与另一点区分开来。一个点，就是一种“形状” (shape)，或者是一种“三维一几何” (three-dimensional-geometry)；另一个点，就是另一种形状。

61 100万个点，就是100万种形状。超空间的容量是多么庞大啊，它包含了所有可能的形状！和超空间无比宽阔的领地相比，空间的经典历史就显得惊人地局促狭窄了。只有很少一类三维几何能够呈现出来。只要我们以某种方式从某个特殊的空时中切下来一个类空剖面，就能获得这些形状（图3，右上）。如果这些几何可以称为“是”三维一几何 (“yes” three-geometry)，那么“否”三维一几何就有无穷多的数量。遵循着经典几何动力学确定性规则的空间一旦切入超空间，则处处要慎之又慎。

而遵循真实世界量子物理原理的空间则大胆得多。它不再需要对“是”“否”这两种位形作出区分。相反，空间只存在处于这种、那种或它种三维一几何中或大、或小、或中的几率。经典物理实际上是在超空间中划出了一小块空间，然后说：“呆在这儿。”可是为什么？因为我们在超空间这个有限区域中所遭遇到的形状、三维一几何和位形可以套装起来，有点儿像小孩子的十二色套盒，一个套一个，最终建造起一个美妙坚固的经典结构——空时。但是量子物理全非如此！那儿没有严格的“是/非”规则。相反，我们只有一个在超空间中传播的几率（图3，超空间，象征性地用波纹代表）。如果说这个扩展波的轨迹遵循着超空间中经典几何动力学的是一非规则，那就像一个狂放的画家用一把超宽的画刷描摹铅笔的细线。

这个“超空间中波的扩散”对于时间的本质、小尺度空间的

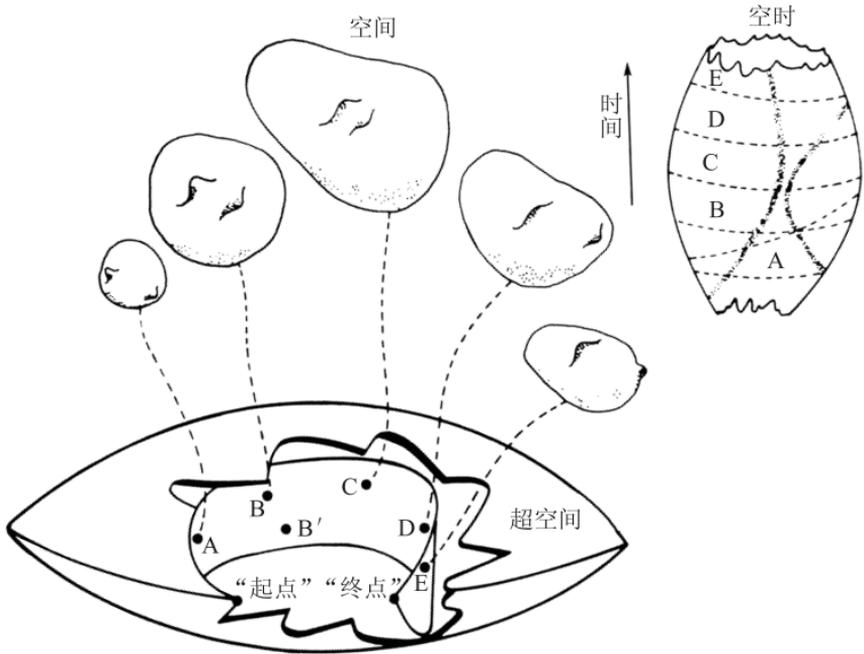


图3 空间、空时和超空间的示意图。左上：五个位形的范例，截取自空间膨胀和再收缩的过程之中（三维—几何为A、B、C、D、E）。两个凸起象征空间在邻近两颗恒星处的弯曲，为了简化图示，其他恒星略去。这两颗恒星随着空间自身的膨胀和再收缩在空间中移动。空间实际上是三维的，这里为了方便画成了二维（“土豆表面”）。右上：空时，空间的经典历史。一个空时的截面，如A，给出了一刹那的空间位形^I。令宇宙沿一个可行的动力学历史演进，特定的空时代表一种特定的历史。这种空时可以视为类空剖面，或者“是”三维—几何，不仅包括A、B、C、D、E这样的三维—几何，还包括其他如B'这样的三维—几何。如果一个人穿过某个给定空时的剖面，他将不能历经大部分可以想象的三维—几何。所以将它们称为“否”三维—几何。“是”三维—几何构成了全部三维—几何的一个很小的子集^{II}。下：超空间，空间历经其动力学演化的舞台（真实的超空间是无限维的，这里表示为二维）。超空间中的每一个“点”（如A）都代表一个完整的三维—几何（也可以用左上的“土豆”表示）。“是”三维—几何构成了超空间的一个子流形

63 (submanifold)^{III}。在一个经典的动力学历史中，空间严格地被限定在这样一个子流形中，这个历史有着严格准确的起点和终点。而在量子物理的真实世界中则不是这样。在那里，动力学表示为一个有着一定延展的波。图中表示了一系列波峰。动力学的波动性质（1）导致了空间几何在小尺度上的涨落；（2）使人无法使用诸如“空时”、“时间”，以及“前”“后”这样的概念，除非是在经典物理的近似中；（3）完全改变了引力坍缩最后阶段的性质；（4）不可避免地导致了与其他备选宇宙历史的耦合（持续穿过超空间区域的波代表“终点”）。

I 空时是四维的，但是表示为二维（“蛋的表面”），这是因为纸墨的限制。同样的限制使我们不得不把 A，一个实际上的三维，在这个特定的图示中表示为似乎只有一维（沿着蛋壳的虚曲线）。两颗恒星穿过空时的轨迹表示为两条纵纹（“世界线”，“蛋壳”上的阴影）。

II 给定这些“是”三维几何，我们就拥有了重建整个空时或者四维几何的资本。空时是“刚性的”：它界定了一个事件到另一个事件之间的确定的时间关系。当我们讨论一个随机的三维几何的集合时，我们不能定义这样的时间关系，甚至“前”“后”这样的词都没有意义。相反，“是”三维几何是可以确认的，因为可以把它们重新安装成那个被用以说明的特定的四维几何或者空时。

III 这个超空间的子流形，和超空间本身一样，是无穷维的，因为有无穷种方式把一个“是”三维几何与另一个之间区分开来。然而，“是”三维几何的无穷，与全部三维几何的无穷相比，是低一阶的无穷。因而“是”三维几何的集合在图中只表示为一个有维度的区域，只有绘图员能够分配给超空间本身范围的一半——这个区域是一个横截二维纸面的一维平滑曲线！

性质和引力坍缩的最后阶段有着决定性的结果。

结果一：以可观测的几率呈现的空间位形比能够被套装起来灌注在任何一种空时中的位形要多得多。诸如“此”空时流形（“the” spacetime manifold）之类的概念将不复存在。随着空时的遁形，时间也遁而无形。把一个事件放在另一个事件的前面或者后面，这种古老的描述方式也将消失了。“前”“后”之类的术语失去了意义。对于“随后发生了什么”这样的问题，不再有明确的定义。

只有在一定的近似的意义上，只有在不大认真的情况下，我们才能继续使用“空时”、“时间”，以及“前”“后”之类的术语。

第二个结果是几率波在超空间中扩展的方式使得小尺度的空间几何不再有确切的定义。小尺度上的空间也不再具有欧几里得想象的那种理想的平滑和完美。取而代之的是，它只拥有处于这种、那种或它种几何的几率。换句话说，空间在一个位形和另一个位形之间“涨落”。这些几何的涨落在日常观察的尺度范围完全是观察不到的。甚至在原子和核子的尺度范围内也可以彻底忽略。只有在观察的尺度非常非常窄的时候，这种涨落才能现形。而到了那种不可思议的小尺度 10^{-33}cm ——所谓的普朗克长度（Planck length）或者临界距离（critical distance）——时，这种涨落会变得举足轻重。在这样的尺度下，根据量子几何动力学，你根本不可能想象空间具有任何理想的、天赐的、欧几里得的完美。恰恰相反，这些空间的几何们都有着相当大小的几率，彼此之间天差地别，而每一个又都尽可能地让自己扭曲变形。空间就像铺在地板上的一层泡沫地毯，除此之外真是找不到什么比喻了。乍一看，这层泡沫地毯还很平滑。但是凑近了，就看到它是由几百万个微小的泡泡构成的，再近一点，又看到这些泡泡还在不断地爆裂，又不断地有新的泡泡产生。理论的预言就是这样！

如果你不能领会标准量子电动力学对电场涨落的旧预言，你就无法领会标准量子几何动力学对于空间几何涨落的最新预言。给你一个彻头彻尾的虚空，这些电场的涨落就会扰动每一个原子中的每一个电子的运动。此外，它也改变了电子的预期能量。第二次世界大战以来物理学激动人心的全部历史之中，没有比这更伟大的成果了——预言了这些效应，并且以精度出奇的微波测量发现并证实了它们。那么，人们怎么会怀疑，预言的涨落同样会在空间的几何自身中发生呢——毫无疑问，这是关于基本粒子性质和结构的重要成果！

宇宙的“终点”没有“之后”

如果没有小尺度空间的“这个”什么几何，那么，同样也没有大尺度的“这个”什么宇宙。超空间中传播的波冲出了经典理论得以指派任一“宇宙”历史于其中的狭小区域。对此，我们可以换一种稍稍不同的说法：我们不能说宇宙有一个独一无二的历史，而只能说，宇宙有一定的这个、那个或者它个历史的几率。通常，这种历史的几率，这种不可避免的量子力学不确定性，这种非决定论，都是极其微小的，除非我们关心的是普朗克长度范围内发生的事情。然而，在宇宙的初期阶段，就像在恒星的引力坍缩或者宇宙自身的引力坍缩的后期阶段一样，相应的物理尺度被这种坍缩自身的物理机制压缩到可以与普朗克长度相比的程度。在这种情况下，非决定论现象不仅要侵扰小尺度几何，而且要支配整个坍缩现象本身。在坍缩的后期阶段，宇宙的一种历史将不可避免地与另一种可能的历史耦合起来（图3中标记“终点”之点附近的波）。这样的一种说法不是要回答关于坍缩的那个老问题，那个“后来怎么样了？”这样的问题，我们现在知道，那相当于啥也没问。原因很简单：因为“前”、“后”、“接下来”这样的词已经彻底失去了意义。空间的“新”历史们在“终点”（End）附近结合起来，并与宇宙的“旧”历史有着非常强烈的耦合，但是无论哪两个之间都没有交流信息的时间。几率波导致的量子力学耦合，是；历史连续性，否。在这个耦合点上，“时间”这个词在其通常意义上的任何应用都是不可能的。

在宇宙膨胀、再收缩的一个循环和另一个循环之间全无历史连续性，这使我们要问，基本粒子的数量和它们的性质在一个循环和另一个循环之中是否也有所不同？我们已经习惯了化石分子（fossil molecules）和化石原子核（fossil atomic nuclei）的观念。我们也会习惯于化石基本粒子（fossil elementary particles）这样的观念吗？

我手里的这块木头是几年以前由二氧化碳和水在一棵树里制造出来的。它的分子是最新产生的“化学化石”，而其中的碳原子和氧原子的原子核要追溯到几十亿年以前的久远时期——恒星进行热核燃烧的时候。它们是“核化石”。在另外一种化学环境中，二氧化碳和水可能会结合成一种与纤维素完全不同的分子。核物质在不同的恒星中焚烧不同的时间长度，也可能会给我们留下更多的铁和更少的氧作为它的化学遗产。我们是否同样该期望基本粒子的性质乃至其数量在宇宙的一个循环和另一个循环之间会有所不同呢？

说引力坍缩把超巨世界和超微世界连在了一起，是否只是说说而已？是否粒子本身就是这种联系的活生生的证据？是否任何关于基本粒子构成的理论都注定是不完备的，因为它们不能辨识某种类型的基本粒子是否在宇宙的一个循环中有一个质量，而在另一个循环中有另一个质量？爱丁顿（Eddington）、狄拉克和约尔丹（Jordan）很久以前就曾指出，狄克和早川（Hayakawa）最近又重新提出，有很多迹象表明，在巨世界和微世界之间存在着直接而神秘的所谓“大数”（large numbers）关联。基本粒子的特征尺度除以普朗克长度有 10^{20} 的因子，宇宙在膨胀到最大阶段的估计半径除以基本粒子的特征尺度是 10^{40} 的因子，两个粒子之间的静电力除以引力也是 10^{40} ，宇宙粒子的估计数目在 10^{80} 的量级。这四个“大数”的每一对之间都有着明显的关联。狄拉克指出，只用偶然不能解释如此巨大的数字之间如此简单的联系，其中一定有因果联系。 66

狄拉克认为，假设这些大数在宇宙的演化中随着时间有缓慢的变化，这是比较自然的。然而，在这些年来，并没有发现公认的证据能证明这种变化，而这四个数中最容易测量的那个倒是以越来越高的精度证明它没有变化。这些大数在观察上的一致性，加上其中众所周知的保持为常数的那一个所具有的精度，喻示着粒子在任何一个宇宙循环中都保持着它的性质，它是来自其锻造之火的忠诚化石，在这个宇宙循环中自始至终都保持不变，再无其他。随“时间”

而变？与我们目前所知并不相容。在宇宙的一个循环和另一个循环之间有所改变？可以想象，与我们目前所知没有矛盾。

如果基本粒子质量没有什么“普适”值——粒子的性质在宇宙的一个周期和另一个周期之间有所不同——我们倒是没有什么可以奇怪的。但是毫无疑问，总会有一天——如果爱丁顿的自然观是正确的——我们将会重新理解粒子，不是把它作为一个来自空间之外的神秘的不速之客，而是作为一个“由空间构造出来”的物体。今天，我们所有人都远远谈不上对这个构造原理的理解。我们顶多是把爱因斯坦的观点表述为今天的术语，比如把粒子说成是“动态几何的量子激发态”，但是怎样计算几何的量子激发态则仍付诸阙如。然而，我们知道一件事情：在讨论“虚”空的动力学，纯粹的量子几何动力学时，我们从未涉及任何普朗克长度 10^{-30}cm 之外的尺度。而根据这些数字，没有任何方法能够构造任何一个类似基本粒子尺度的长度，除非是乘上一个巨大的因子。在纯粹的量子几何动力学中，没有地方能够给出这样的因子，除非是来自我们长期以来所熟悉的所谓“初始条件”——即在这个宇宙循环中，空间的初始形状和膨胀的初始速度。这时我们发现，我们到达了一个新的基础。

初始条件：巨大的未知

物理学从来没有给出一个方法，告诉我们宇宙以什么样的初始条件开始。物理学清楚地告诉我们，什么是物理学的对象，什么不是。运动方程，是；遵循那个运动方程的客体的初始位置和速度，否。谁都不会忘记拉普拉斯（Laplace）^①的著名论断：“一种智慧，如果知道给定时刻所有赋予自然以生机的力，知道所有

① Laplace, Pierre Simon, Marquis de (1749—1827), 法国天文学家、数学家。拉普拉斯这段话代表物理学家追求终极解释的一个宏大理想，也是科学主义的重要思想资源。——译者注

物体的相对位置，如果他还拥有足够的能对全部信息进行分析，将宇宙中最为巨大的物体和最轻的原子纳入一个公式，那么，对它来说，没有什么是不确定的，未来就像过去一样，展现在它的眼中。”如果 1814 年的读者能够根据拉普拉斯的话，预言进步会通过运动定律的学习而实现，那么他是对的。但是，如果他认为能够发现初始条件的理论解释，那他就错了。对于动力学系统的各个部分怎样以及为什么以这样的位置和速度启动运行，今天的人们一点儿也不比当时知道得更多。我们可以想象，在超空间的某一个区域中动态运行的空间，给出了一个具有某一数目粒子和某一种粒子质量组合的宇宙；而在超空间的另一个区域动态运行的空间，则会给出具有另一种粒子数和另一种粒子质量组合的宇宙。但是，为什么我们会恰好生活在我们发现自己处于其中的那部分超空间呢？

没有哪一个深入思考了这个超验问题的人会忽视狄克意味深长的，半是玩笑半是认真的建议。他问，在我们说到一个宇宙的时候，如果宇宙中没有智慧生命的存在，它有什么意义呢？但是智慧意味着大脑，而大脑不可能脱离生命而存在。作为生命的基础，没有哪位生物化学家发现有什么东西能够替代 DNA，但是 DNA 的结构中需要碳，而碳则来自恒星中的热核燃烧。热核燃烧需要数十亿年的时间。但是根据广义相对论，一个宇宙如果能提供数十亿年的时间，必然也有数十亿光年的尺度。所以从这点来看，不是宇宙支配了人，而是人决定了宇宙的大小！

今天我们还不能为狄克的思想找到合适的位置。然而，每个人都会想到这一点。如果思维之存在的必要性决定了这个宇宙在这个循环中的尺度，如果宇宙的尺度反过来决定粒子的数量和大小，那么，指望能有一个简单而神奇的公式一劳永逸地给出质子和电子的质量，肯定是无功而返。

人们接受这样的思想，提出这样的看法，并不指望能够给出答案，而是不由自主地要想：我们面对的问题是多么深刻，我们有可能以怎样的方式着手去解释这个问题。这些问题十分深刻，

甚至更像是神学问题，如果超空间的概念没有成为随手可得的讨论框架，它们仍然是我们现在乃至将来也无法处理的问题。

超空间，空间经历其动力学过程的舞台：没有什么结果比量子原理和爱因斯坦广义相对论的结合更具有革命性了，也没有哪一项结果更能影响到从基本粒子物理学到宇宙动力学的全部物理学。薛定谔于1925年奉献给世界的“波动方程”是简单的、确定的，他很快就从中发现了氢原子的能级。最初，他——以及任何人——都完全没有发现，他的方程在物理学的心脏里埋下了一颗定时炸弹。它的爆炸带给我们一些革命性的概念，诸如“几率幅”、“几率流”、“不确定性原理”（uncertainty principle）^①和“互补性”，等等。薛定谔本人曾说，如果他知道这个方程会引出这么多后果，他宁可自己与它无关，但玻尔则对他说：“然而，我们所有人都要感谢你！”如果没有薛定谔方程，今天的化学、冶金、核物理以及通讯科学不知有多少内容还在我们的掌握之外！

一个有着革命性后果的定时炸弹

如果薛定谔方程是一个定时炸弹，量子几何动力学是不是一个超级定时炸弹？我们已经看到了一些革命性的后果：超空间；时间观念在小尺度范围的失效；空间几何的量子涨落；引力坍缩最后阶段“宇宙不同历史之间的耦合”等。但是这个诱使我们问到初始条件的问题似乎注定要迫使我们面对更具革命性的概念。在量子几何动力学的核心放着一个动力学方程，在关于其形成的精确细节所残存的不确定性得以澄清的时候，我们不妨称之为“爱因斯坦—薛定谔”方程。这个方程就像所有的方程一样，也包含着初始条件。然而，对于任何把注意力局限在这个宇宙的一个动力学历史中的人来

^① 在物理学界已经约定俗成成为“测不准关系”，但容易引起误解，认为不确定性是由测量导致的。近年来逐渐有人译为“不确定性原理”。——译者注

说，对初始条件进行恰当的细分是不可能的。必要的时候，为了让可行的空间位形具有更大范围的多样性，他不得不放弃几率幅，使他能够在波动方程的帮助下，预言全部超空间中任何一个部分的动力学演化。用这种方式细分初始条件可能有什么意义吗？我们还不能问这样的问题，如果我们不能认识到，初始条件问题尽管在量子几何动力学中具有了新的形式，它所造成的问题仍然远远超出我们今天能力所及的范围，这与拉普拉斯时代并无二致。

如果这些有关初始条件的问题更适合作为“神学”问题，那么，我们仍然不能回避这样一个事实，神学思想对于人类的行为具有它们应有的影响。1952年，我的一位故交穿过最大的南亚诸国之一旅行，他看到了很多孩子的夭折，而如果有天花接种，这些孩子本来是不应该死的，他忍不住向教育部长表达了他的失望。那个官员极为冷漠。“不管怎么说，反正要投胎，有什么区别呢？”我的同事牟复礼（Frederick Mote）^①对中国历史和哲学素有研究，在最近的一个演讲中，他把中西方的世界观和价值观差异的最核心部分归结为宇宙观上的差异。他说，中国的宇宙观里没有造物（creation），没有造物主（creator），所进行的“是一个所有阶段同时展现的过程”，主导它的是“是一系列逻辑的，而不是编年的关系”。如果我们要看西方思想中超越物理色彩的视角是怎样的，我们不妨借用威廉·詹姆斯（William James）^②的话：“实在（actualities）似乎是漂浮在一个可能性的宽阔海面上，这些可能性都在等待被选择；自由意志论（indeterminism）说，这样的可能性存在于**某个地方**（somewhere），而且构成了部分的真理。”

因而，如果不对很久以前的激烈争论加以回顾，我们甚至不能

① Frederick Mote，美国汉学家，普林斯顿大学东亚学系教授。曾师从萧公权先生。牟复礼为其中文名字。——译者注

② William James，美国哲学家、心理学家。他认为意识是一条连续不断的“思想流”或“意识流”，意识经验是个统一的整体，既不能分割为各个元素，也不能划分为不同的阶段。——译者注

碰到“神学”的皮毛。我们也不能忘记，正是它们最终打开了现代科学的大门，而现代科学却要求我们用一种可以理解的词语彼此交流，摆脱一切神秘主义。当巴黎大主教（Bishop of Paris）^①在 1227 年裁决，否定上帝有能力按照他的意愿造出多个世界的言论是错误的，他没有阻止争论；他把争论扩大了。100 年后，“有史以来最具毁灭性的批判思想家之一”，奥坎姆的威廉（William of Ockham）^②说：“上帝的意志依然是最后的裁决；但这只是因为无法界定范围，所以有必要注意，根据测量和观察……我们可以知道哪些东西……能用来作为实际知识的基础。”戈登·莱夫（Gordon Leff）^③接下来提醒我们注意：“最终，物理、力学、数学计算和几何，都在 14 世纪和 15 世纪开放出崭新的花朵。”

我们已经看到了撞击球桌的台球。关于起点和终点，我们发现自己正在问一个新的问题。感谢在爱因斯坦去世之后的日子里诸多研究人员的工作，现在我们手中已经有了量子几何动力学的全新的概念框架，对于这些问题的研究已经达到了前所未有的程度，这是一个建立在 20 世纪物理学两大基础原理之上的新理论。随着我们探索这个概念框架的更新更具革命性的内容，我们就是在坚定地不惜一切代价地牢牢握紧西方科学几百年的传统。

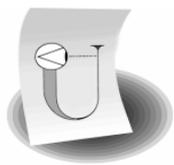
根据在 Phi Beta Kappa-Sigma Xi 十周年纪念时的同名演讲改编。美国科学促进会（American Association for the Advancement of Science），纽约，1967 年 12 月 29 日。

① 这位大主教同时宣判了 219 篇神学和哲学文章有罪。——译者注

② William of Ockham (1285—1349)，英国人。提倡唯名论，反对唯实论，认为只有单独的、个别的、特殊的事物，并没有所谓的“共相”、“观念”之类的存在。最著名的是他提出了“如非必要，切勿增加实体”的奥坎姆剃刀原则。——译者注

③ Gordon Leff，英国学者，在中世纪思想史问题上有大量著述，Kennith Ford 教授认为此段引文出自其 *Medieval Thought: St. Augustine to Ockham* (1959 年)。——译者注

第二部分 热忱与士气



研究者的士气

73

“谁会在乎你今天是不是，”我问，“没有把全部精力投入到氢弹必需的氢、锂同位素的分离中去？”“非常简单，”小詹姆斯·麦考马克将军，当时（1951年）的原子能委员会军事应用部的主管答道，“美国人民在看着，他们会把我赶出办公室。”

詹姆斯将军想要说明和表达的意思是，做研究工作的人通常都拙于言词，但是感觉敏锐。在洛杉矶阿拉莫斯科学实验室或者劳伦斯利弗莫尔实验室工作的任何高层梯队人员都会让我们看到，在两种不同的情况下，一种是当他们感到美国人民需要他们的时候，一种是当媒体和批评家数落他们，让他们滚蛋的时候——这种情况时有发生——他们的士气和成果会有多么大的差别。研究人员不是香肠制作机，只要转动曲柄就能自动地生产出又好又新的发现。他或她可能隶属于政府或者工厂，也可能隶属于某个独立的研究机构或者大学。但是不论在哪儿工作，他或她的工作都是一个需要想象力的工作，他或她的动力就来自于被需要和被欣赏的感觉。

普通人可能只是觉得这种或者那种新的发现、新的经营方式、新的药品、新的历史、新的发动机、新的材料“不过是出现了”。但是实际上，没有什么比他们的态度是漠不关心还是强烈支持，是敌视还是同情，更能延缓或者加速这些新事物的到来。他对那些想要推动世界向前的人们持有什么样的态度，表现在他把钱花在哪里，他支持或反对哪些立法委员，他听信哪家媒体，以及他对自己的家庭和朋友强调的是什。

为什么对研究人员的“关心和爱护”是每个人的事情？最近布鲁金斯研究院（Brookings Institution）^①的一项调查表明，技术的变化在过去 30 年里为美国经济提供了“最大的增长”。等我们的下一代到了我们这个年龄，如果我们的经验还有用的话，那么，大多数工作都将是新型的工作，而大部分将要制造的东西都将是 74 以全新的方式制造的。今天增长尤其迅速的就是以科学为基础的产业对于科学的需要。

在世上所曾有过的所有企业中，没有哪一个处于当代技术先锋的公司能比今天的 IBM 做得更大。在计算机领域没有任何一家公司能够在技术上十年不变而不被淘汰。没有任何一个领域能够像计算机存储装置领域那样，新的物理思想吸引了如此众多的人才，并且能够如此迅速地燃成熊熊大火。谁会知道接下来的会是什么？单个分子本身将会成为最终信息存储单位吗？没有任何证据能证明这不可能发生。通往成功的压力是巨大的。受到威胁的不是几千个工作机会，而是**几十万个工作**和整个国家极为可观的一部分财富。这只是一个产业。而以科学为基础的产业还有很多。通用汽车公司的研发主管查尔斯·F·凯特林（Charles F Kettering）常说：“我感兴趣的是未来，因为我的余生要在未来度过。”对于未来的形成，没有什么因素会比我们在以最佳方式利用研究人员——并欣赏他们——的时候表现出来的关心和智慧有更大的影响了。

企业完全清楚这两种利用科研人员的不同方法的差异。一种是这样，从高层管理者层层下达事先安排好的工作。流程的最后是最终的合成品，或电子装置或计算机程序或附送产品，最后是包装清单：这种科研人员和管理阶层的关系非常遥远。另一种是这样，高层科研人员与高层决策者定期碰面，一起就新产品和新

① 美国慈善家 Robert Somers Brookings（1850—1932）于 1927 年创建的非营利性研究机构，下设几个研究所，致力于经济、政治和外交策略等方面的研究。——译者注

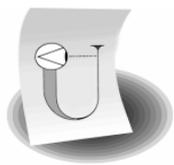
工序进行思想碰撞。这样日复一日，你来我往，各种想法聚在一起。每个想法都要证明自己的价值，否则就会被废弃。各种思想迅速得到检验。一个令人激动的未来战略就从中凸显出来。这是那些各自为政的科研人员和管理阶层所无法想象的。这样就很容易看出哪家企业的研究者会感到自己更被需要，更被欣赏，从而为社会贡献出更多的科学应用。

大学是科学的家园。当这些未来的父母、立法者以及各种精英以最大的热情支持“大学理念”，就给大学的领袖地位创造了极好的氛围！对于他们来说，最大的收获并不在于老师在课堂上传授的知识涵盖（covered）了多大的范围，而在于发现（uncovered）他们渴望参与到发现的过程之中；那种由作为参与者的学生，与作为指导者和同事的学者老师一起，突破已知的极限，向未知发起冲击的发现。在更大的范围内，拥护大学理念的有识之士都知道，很多一流的教学来自研究，很多一流的研究来自教学。

大学推重“开辟新路”，而企业关心的是“特殊用途的知识”。大学里的科研人员“视物如其所是——然后讨论为什么”；而在企业里，他或她“视物如其最佳可能——然后讨论为什么不”。这两个不同环境的人——以及在我们的大型研究机构中的人——都知道“没有狂热的推动，就不会有进步”。他们都相信安东尼奥·马查多（Antonio Machado）^①的话：“旅行者，这里没有路。路是人走出来的。”他们都知道“我们生活在一个神秘海洋中的知识之岛上。知识之岛越大，通向神秘的海岸线就越长”。他们都属于遍布全世界的那个伟大的研究者群体：他们都知道自己是在为一个更大的集体服务；他们都把被人需要、被人欣赏作为最大的成就。

原发表于 *Discovery: Research and Scholarship at the University of Texas at Austin* (1977)。

① Antonio Machado (1875—1939)，西班牙诗人，戏剧家。——译者注



付出最多，做到最好

优秀就是要去赢。正如橄榄球教练文斯·伦巴第（Vince Lombardi）所说：“赢不是最重要的——而是唯一的。”同样，我们称之为科学的人类活动，如果没有对新的事物有所揭示或者发现，就不是科学。赢需要什么呢？我们只要看一位优秀体育作家的专栏就会知道，它需要这样一些素质：要有挑战的勇气，要有赢的决心，要有一些天赋，要乐观、勤奋，还要有决心不让场上的任何缺陷因不被发现而得不到改正。但是科学上的优秀还需要更多。它需要好奇心；它需要对未解之谜或者没有得到解释的矛盾有一种不由自主的困惑，并要像一个非要把洞挖开看看兔子究竟在不在里面的狐狸那样具有顽强的韧性；它需要对所致力于其中的领域所出现的最优秀思想有最及时的了解。最重要的是，正如丹尼尔·科伊特·吉尔曼（Daniel Coit Gilman）^①很早以前说过的，它需要一种素质。

科学与体育所不同的是，它不是人与人之间的对抗，而是人与自然之间的对抗。科学家的工作不是要压制对手，而是要把战线向前推进。像其他所有行业一样，达成优秀也要遵守同样的格言：付出最多，做到最好。

我首先要阐述的科学精神是得益于同阿尔伯特·爱因斯坦的散步和交谈，也得益于跟随尼尔斯·玻尔揭示原子及其内核的伟

^① Daniel Coit Gilman (1831—1908)，美国教育家，约翰·霍普金斯大学第一任校长。——译者注

大秘密的过程。或者我还可以举出一个近在眼前的优秀例证，假设你们在想象中神游德克萨斯大学，与这里的同行和学生闲聊，他们发现这里比全世界任何地方都有更多的维生素^①。我可以告诉你们杰拉德·德·沃库勒尔（Gerard De Vaucouleurs）和安托万内特·德·沃库勒尔（Antoinette de Vaucouleurs）夫妻以及他们年轻的合作者们是怎样在德克萨斯大学天文系和麦克唐纳天文台（McDonald Observatory）年复一年地用天文望远镜进行极为艰苦的观测，他们的成果使很多天文学家们不得不修正一些根深蒂固的观点，并严肃地考虑这样一种可能性：宇宙的可能只有以前我们所认为的一半那么大。难怪今天大家都怀有极大的兴趣采用越来越大的望远镜把他们的研究推向尚未探索的宇宙深处。或许我会给你们一种德克萨斯大学处在世界领先水平的感觉，他们已经成立了自己的国家聚变理论中心。或许我会向你们介绍马尔科姆·布朗（Malcolm Brown）和他的植物学同事，他们已经掌握了怎样让细胞自行组成新材料的方法，从而预示着制造业的一次革命。或许我会带你们领略一下迈克尔·迪尤尔（Michael Dewar）对化学过程的深刻理解，他为此获得了英国皇家学会的汉弗莱·戴维奖章（Humphrey Davy Medal）。或许我会告诉你们卡尔·福克斯（Karl Folkers）和他的同事是如何掌握了“辅酶 Q”，并把它制成一种革命性的新武器来治疗先天性心脏病。

我最最想告诉你们的是这项事业人性的一面，这种探险的感觉：要有一种信念，相信取得进步的最好方式往往是尽快犯错——并尽快认识它们；要有前线战士的素质，在很多研究中都需要有此精神，年轻的研究者能够用鹰一般的眼睛进行长达 36 个小时的关键性实验；也常需要与同事进行相关的咨询，无论他相隔多远，或者在半夜三更冲进资料室，为了解决一些令人困扰的矛盾而寻

① Kenneth Ford 指出，这是惠勒的小幽默。因为有好几种维生素是该校教授 Esmond Emerson Snell 在 1940 年代发现的。——译者注

找资料。最重要的，我认为科学——以及任何一种伟大的人类活动——取决于它对于年轻人的意义，他们是未来的希望：

我所看到的是他们的眼睛
我深深地凝视
当我漫步在校园的时候。
那明亮的眼睛感动着我。
它带来一个信息
不需要言语的表达：
我正行进在人类的前沿。

为什么科学要求的是优秀呢？为什么在这个以发现为事业的活动中我们要赢呢？因为我们想要人们有更长、更健康的生活和工作——好的工作；因为我们想要有竞争力强的企业，还有，最重要的是，一个向上的、进取的社会。

健康、工作和企业，我们自己的生存，不论是军事的，还是经济的，都前所未有地取决于科学。没有优秀的科学，就不可能有一个优秀的国家。

首先是科学家，然后才是公民？据我所知，没有哪一位伟大的科学家不首先是公民，然后才是科学家的。但是这种责任是双向的。每个想成为真正公民的人，每个想领导他或她的社区远离危险，走向机遇的人，在我们这个时代都必须跟上科学的伟大潮流，尤其是那些希望成为有责任心的领袖或者政治家的人。我们从来没有像今天这样，更清楚地听到了这样的召唤，要有远大的抱负。

我们如何能在科学中做到优秀？对于两大不同的科学领域，回答是截然不同的。一种是开创新路，另一种是特殊需要的知识。一般来说，当然也不是绝对的，大学做的是开创新路的工作，而企业——及其实验室——和研究所则把科学知识转化为特殊的应

用。很少有哪一套方法能够把一种创新的理念贯彻到整个应用过程之中。我们国家最大的财富是那些不以营利为目的的研究机构，比如巴特尔研究院（Battelle Memorial Institute，^①世界最大的研究院），斯坦福研究院（Stanford Research Institute）^②，还有正在健康、茁壮成长的圣·安东尼奥东南研究院（Southwest Research Institute of San Antonio）。这类研究机构从科学世界中获取思想，并加以转化，使之有益于社会。要使某些新的思想具有可操作性，现有的公司或者做不到，或者做得艰难，而这样的研究机构经常能够做到。很多几乎流产的好主意——比如静电复印术——现在已经成长为繁荣的高效益企业，这都应该归功于这些不为营利的研究机构。在非营利研究机构中，就像企业的实验室一样，要达到优秀，首先需要好的员工——包括几个活跃分子——和好的管理，还有那个常被遗忘的因素，就是在平日里时常关注需求和可行的结合。

没有好的环境，大学的创新科学是不可能优秀的。这个好的环境里要有学生，至少要有符合詹姆斯·布赖恩·科南特（James Bryan Conant）^③定义的学生，即没有成见（uncommitted mind）充满好奇的人。他们是最后的决策者。他们渴望了解年长的同事所谈论话题的背景。他们喜欢提问。诺贝尔奖获得者爱德华·珀塞尔（Edward Purcell）曾经在一个本科生课堂上讲解量子力学的一个难点。学生们没有明白。他用另一种方式又讲了一遍，学生们还是不明白。他又用第一种方式讲了一遍。“然后，”他告诉我们，

① 全球最大的私立研究机构，有员工 1.6 万余人，研究领域涉及能源、环境、风险评估等重大问题。中文译名有多种，这里采用了最简单的一种。

——译者注

② 美国著名的非营利研究机构，1946 年创立，接受政府、企业、基金会的研究委托，涵盖领域几乎无所不包，现已更名为 SRI International。

——译者注

③ James Bryant Conant，美国著名教育家。1933—1953 年任哈佛大学校长。他认为，教育首先要培养对民主社会负责的公民。——译者注

“神奇的事情发生了。我自己明白了。”我们的俄罗斯朋友们忍受着，他们自己也知道，忍受着大学和研究所的隔离。斯大林时代伟大的物理学家彼得·卡皮查（Peter Kapitsa）在一份手稿中指出，⁷⁹所有的人才都在研究所，而只把三流的人留在了大学教书。这些人怎么能去激发一流的学生对科学的兴趣呢？结果，苏联的研究机构无法获得优秀青年的补充，难以加强主动脉的循环。

我们做的要好得多。在任何一个领先的美国大学中，高水平的科学教育被普遍认为是全世界都无法超越的。在这个国家，这种教训是不言自明的：最好的科研来自教学；而最好的教学又来自科研。

如果有什么东西能够表现对科学的巨大威胁，据我所知，是我们的中学和小学教育现状。菲利普·汉德勒（Philip Handler）^①，国家科学院院长，曾经提出振聋发聩的警告：“我们看到，”他说，“我们未来的领导者们在人文修养和科学素养两方面都在下降，而从中学出来的未来劳动力则是一群毫无准备的科学盲……凭着这样没有素养的劳动力，我们的国家如何在国际市场上竞争呢？……目前的情形使我们看到明日的景象，‘两种文化’（two cultures）的分裂会更加鲜明——一个这样的美国：大约 250 万科学家和工程师习惯于使用科学和技术的语言……而另外 2 亿人则既不懂得也不喜欢科学，他们把所有技术都看成是难以解密的黑匣子，他们开始拒绝科学和技术，憎恨它们，而且把这种拒斥带进政治领域。这是一幅可怕景象……唯一可以防止或者减缓这种情况发生的，就是，下定决心，努力让中学教育跟上科学的发展。”——噢，我可以补充一句吗？是用英语进行的教育——“这是我们大家要共同分担的责任。很有可能，这是我们为了保证国家的未来质量所能做的最重要的事。”

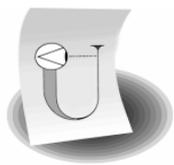
① Philip Handler (1917-1981), 美国生物化学家, 1969-1975 年任美国国家科学院院长。——译者注

这个国家必须要采取行动来应对这个可耻而危险的局面。我们必须阻止美国教育的退化。我们必须提高公立学校教师的薪水。但是这远远不只是钱的问题，我看不出有什么理由，为什么小学和中学教师不应该被邀请到那些大人物的家里，使他们也能得到一点其他可敬的公民所曾得到的礼遇呢？

这个国家富有天才，它比地球上的任何其他国家都有着更适合科学发展的自由和冒险的氛围。

80 有一种动力，在成就科学之优秀方面超越了任何国家需要的理由。那就是人类长期以来的渴望，渴望了解我们这个奇妙的美丽世界的内在奥秘，渴望了解我们在万事万物中的位置。任何一位懂得了一点儿、为这个探索做出了一点儿贡献的人，都想要懂得更多、做得更多。在这一点上，谁能比开创了现代科学的尼古拉斯·哥白尼更能代表对优秀科学的迫切渴望？

在奥斯汀（Austin）德克萨斯大学的公开演讲，Opening Day Centennial Symposium，“The Imperative for Excellence in American Society”，1983年2月4日。



致尼古拉斯·哥白尼

让我们现在缅怀他：我们的朋友哥白尼。他和所有将在科学 82 之园耕耘的，我们未来的忠实朋友们，都给我们传达了一个简单的信息：付出最多，做到最好。

让我们缅怀这个人，就过去 500 年科学事业的开创，我们应该赋予他以最多的荣誉：

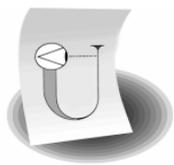
哥白尼，你是你时代的守望者
你告诉我们，这颗行星
围绕太阳运行的道路。
你让科学后人机敏的目光
更加深邃
正是他们，为全人类守望着
前面的危险和机遇。
你照亮了我们探索的上百个天空
从复制的遗传控制
到分子工程，
从这个星球的地质学
到求进社会（achieving societies）^①的社会学。
你发现并解决了多少人

① 意为追求成就的社会。美国心理学家 David Mcleuand（1917—1998）曾著有 *The Achieving Society*（《追求成就的社会》，1961），认为犹太人具有追求成就的动力。——译者注



尼古拉斯·哥白尼 (Nicolaus Copernicus, 1473-2-18, Torun-1543-5-24, Frombork)。哥白尼手里拿的花对他自己来说象征着药, 对于我们来说, 可以用来象征今天的谜中之谜: 未来对于生命和思维的要求在这个从大爆炸诞生并将从大坍缩隐退的物理世界中, 起着多大程度的作用? 宇宙和生命的关系是不是相当于花瓶和花?

从来不觉得神奇的运动的秘密。
你每日提醒我们，最伟大的万物之谜是
为什么有物而非无物。
你用数字来检验理念
告诉我们神奇的数学
终将揭开宇宙的谜中之谜
我们将看到所有的事物，无论大小
闪烁着新的光亮和意义。
你提醒我们，再没有其他的宇宙
如我们这个宇宙一般，拥有思想和人类
这个宇宙，是我们的家园。



致约瑟夫·亨利

84

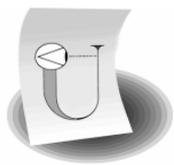
你来自卑微的家庭，
提醒我们从每一张新面孔中寻找思想的闪光
你没有伟人的引导
但是告诉我们，做伟大的读者，一本书能使我们每个人
与自己心仪的伟人相伴。
是你发现了自感应定律，这个电磁学
伟大的定律，视像和声音飞翔的载体。
提醒我们这个宇宙闪闪发亮的中心机制
仍然等待着 我们揭开它的面纱。
是你拒绝为你早期的电报申请专利
提醒我们，科学是社会的仆人。
是你创立了美国第一个国家科学基金，
为这个新生的国家
注入了科学的生命，
是你帮助我们在各个精心选择的领域
使每个科学中心成为世界的领袖。
对来自各行各业的学生，你总是试图
对自己的课题做一个一致性的叙述，并且
在这个过程中，发现通向未知领域的
新的大道。
你教导我们从讲授中领悟研究的主题。
你，你那个时代最伟大的美国科学家，

为了祖国的召唤放弃了自己的事业，
提醒我们，每个人首先是一位公民。

85



摘自 1968 年 10 月 4 日为纪念纽约州立大学（阿尔巴尼）约瑟夫·亨利
物理大楼落成的演讲。



普林斯顿的合作精神

86 对于这个主题，我最想说的是我所看到的普林斯顿大学的本科生、研究生和新老教师在科学上的合作精神。那种年轻人和年长者、学生和研究者之间的紧密联系，那种探索新的真理并使之融入国家整体生活之流的激情，在我看来，就是这些构成了一个大学的精神。

有一次，有一位来访者要离开了，他说：“普林斯顿确实是个伟大的地方，但是你们不要自欺欺人了，它根本不能算是一所大学。没有医学院，就连法学院也没有。芝加哥大学才是大学，”他接着说，“哈佛也是大学，但普林斯顿不是。”他的话让我有些不安，直到我了解了“大学”一词从中世纪传下来的含义。我发现与这个词有关的并不是专业或者大楼，而是人。一所大学，并不意味着把一定数量的知识类别聚集起来，而是要把各种程度的合作者聚集起来。在中世纪，“铜匠大学”指的就是一个活跃的铜匠组织，包括刚开始学打铜的新手、学徒工，以及有经验的工人和行业大师，他们为了彼此的利益和社会的利益联合在一起。“木匠大学”和“理发师大学”也是这样——当然，那些以知识为工作对象的人组成的大学也不例外。因此，我明白了很多人早已明白的一个道理：大学是一个联合体，包括刚开始接触知识的初学者，知识组织中的学徒，以及有经验的工人和探索真理的专家。

如果你认为这种对于大学的定义现在依然成立，那么我必须说的是，对于这种合作精神，在任何一个时代、任何一个国家，我不知道在哪里能看到比此时此地普林斯顿的科学系所发挥得更

加充分的地方，也不知道在什么地方，低年级学生、研究生、有经验的教师和专家学者之间比这里联系得更加紧密。在这里，我们所有的同事一起探索，寻求真理。正是这种高质量的合作造就了这所大学和所有伟大大学的精神。

那么，这种合作精神是怎么表现的呢？让我来举几个例子，我亲身经历的就不胜枚举。首先，我看见在很多系所安排的下午茶时间里，本科生、研究生和教师互相交谈，对此，我的一位同事罗伯特·奥本海默曾有过这样的定义：“喝茶就是为了让彼此解释自己不明白的问题。”

其次，我见得最多的是两座科学大楼之间的走廊，墙上的黑板好像是教室之外所有人的领地。一天里会有 20 多次，你会看见两个、三个或者更多的脑袋聚在那里争论着，试图解决某个疑难问题。有多少是本科生，有多少是研究生，有多少是教师，都是巧合，这要看在大厅里谁碰见了谁。

第三，晚上去物理文献俱乐部 (Physics Journal Club) 转一转，你会看见低年级和高年级的学生聚在一起，听某一位高年级学长讲述他的学年论文项目。约翰·考德文 (John Caldwell) 给大家讲他如何曾经用激光发射器制造三维图像。查尔斯·马丁 (Charles Martin) 讲述他在普林斯顿弗尔斯托中心 (Princeton's Forestall Center) 的普林斯顿-宾州大加速器 (Princeton-Penn accelerator)^① 做的实验，和几星期之前他在那儿得到的有关中子截面令人激动的最新结果。保罗·斯戴拉 (Paul Stella) 描述他正在做的对遥远恒星闪烁的测量。他向大家解释，他的实验如何能够确定地球大气中局域涨落的频率。如果有人发现有四分之一到一半的普林斯顿高年级学生的讨论发表在科学文献里，那也是不足为奇的。常常那些进入课程较慢的学生们在听了高年级同学的学年论文项目之后会感到精神振奋。有一位学生在带领另一个大学的朋友参观

① 是普林斯顿大学和宾夕法尼亚大学联合投资的一个加速器，设在普林斯顿的弗尔斯托中心。——译者注

时，骄傲地告诉他说：“在普林斯顿学物理，就像拿着消防水管子喝水。”当你听到他话语中对自己工作的那种骄傲和热情，你就会明白为什么一位普林斯顿的毕业生会说，做学年论文是他最重要的教育经历。你就会明白为什么高年级的学生论文经常会比研究生按部就班的论文更加有独创性，也许这是因为他们有一个更大的合作团队，能够从更多领域的院系中汲取资源。这样的例子唾手可得，比如卡尔·拉普（Carl Rapp）在做关于有限战争的学年论文时，就曾把伍德罗·威尔逊学院（Woodrow Wilson School）^①和物理系用到了一起。

第四，让我们看一看那些常找研究生闲聊的本科生，或者某位已经与他们开展合作的女同学。看看她怎么得到他们的建议，设置自己的实验设备。他们或者去旁听一两个小时的课，这种时间某些人是不会轻易付出的。或者看看一位年长的学生，他也许会在向别人解释一个复杂问题的时候忽然发现他自己有了意外的收获。或者去看看大卫·梅尔泽（David Meltzer）和安东尼·西（Anthony Zee），虽然还是低年级学生，却早已开始独立研究中子星的震动了。要不然看一下他们与一位研究生吉普·索恩（Kip Thorne）^②的合作，他让每一位本科生都有了达到发表水平的论文。

第五，请注意普林斯顿长期传统中对微分几何学、空时和相对论的兴趣，再回忆一下被邀请去梅塞（Mercer）大街 112 号^③喝下午茶的那个普林斯顿班。学生们，有些是本科生，有些是研究生，跟他们的导师一起，围坐在那位著名的主人的饭桌旁，很可惜，阿尔布雷希特·丢勒（Albrecht Dürer）^④不在那里，没有记录

① 普林斯顿的公共和国际事务学院。——译者注

② 这是惠勒的得意门生，与惠勒本人有过多合作。所著《黑洞与时间弯曲》详细地讲述了黑洞物理学的前前后后。——译者注

③ 爱因斯坦的住所。——译者注

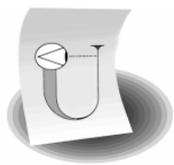
④ Albrecht Dürer (1471–1528)，文艺复兴时期的艺术大师，德国人。创作了很多以科学活动为题材的版画作品。——译者注

下这个场景：年轻人充满敬畏和渴望的脸庞，伟大的爱因斯坦布满皱纹的面孔和他随风飞舞的头发，生动变化的表情。在场的人都不会忘记爱因斯坦孩子气的大笑、他的机敏、他的认真，还有他回答问题时缓慢而优美的表达，关于宇宙的未来、电的本质、他本人在量子理论中的地位，不一而足。

第六，作为初学者和成熟研究者漫长的合作传统的一个范例，让我来说说我从科学史家查尔斯·韦默（Charles Weimer）那里知道的我们的约瑟夫·亨利被亚伯拉罕·林肯召到华盛顿之前的故事。为了让他普林斯顿的学生们清楚地理解他的课程，亨利不仅向他们演示使他刚刚获得最新发现的实验，还会向他们介绍他刚刚收到的法拉第的英格兰来信中说到的最新发现——同样是在还没有正式出版之前。

在结束这篇关于大学合作精神的评论，以及关于普林斯顿漫长光荣的科学传统的报告之前，我必须再说一件与科学有关的事情，它同样繁荣在普林斯顿的传统之中。在这里，科学从一开始就不被作为一种孤立的、而是其他所有探索领域的伙伴，在一个宏大的共同的事业中，一起去更好地理解这个美妙的世界，以及我们在这个世界中的恰当角色。这个事业在不同的时代曾被 89 用不同的词语表达过。让我来引用伟大的美国天文学家沃尔特·明托（Walter Minto）在 1788 年——那时外界一度谈起科学和神学的冲突——就任数学和自然科学主席时的讲话：“的确，我认为一个学习科学的学生……就像投身于一个持续的献祭活动之中……这个无限的、美丽的、变化多端的宇宙是一本书，由那只全知全能（Omnipotence）之手写成，让每一位用心的观看者为之赞美。”

以“合作的品质——一个大学的核心”提交给“普林斯顿的科学教学”研讨会上的报告，普林斯顿大学校友日，1966 年 2 月 19 日。



尼尔斯·玻尔与核物理学

没有人能够在看到尼尔斯·玻尔 (Niels Bohr) 对核物理的贡献 93 文献时不会马上想起他发表的第一篇论文：“利用喷气振荡法对水的表面张力的测定¹”。这篇论文发表于 1909 年，当时他 24 岁。第二年，他又就同一主题发表了第二篇论文²，两篇论文标志着玻尔在其一生的早期阶段对液滴及其振动的兴趣。28 年后，振动的液滴球在他手中得到了新的应用，他将其用作了核激发的模型³。30 年后，又成了他的核裂变模型⁴。

然而，对于核物理的基础来说，更重要的是他在 1936 年与液滴模型同时提出的通过复合原子核状态而发生核反应的概念，和战后对于集体激发 (collective excitation) 概念、对于原子核的集体模型或统一模型的贡献。

玻尔的液滴模型在他关于毛细现象的工作中已现出端倪，所以在他的复合核概念与核激发集体模型的想法背后，有着关于原子构造、共振现象，以及原子过程中由绝热状态向非绝热状态跃迁等工作的丰富背景。在原子物理和原子核物理中，吸引他注意的与其说是相互作用粒子的性质，不如说是相互作用的机制。从束缚机制和激发机制的角度对原子、原子核与液滴进行比较和对照，于他而言，是解决核物理问题的必然途经。

如果说原子物理构成了玻尔后来核物理工作的背景，核物理也同样为他早期在原子构造上的决定性工作提供了一个环境。穿过物体的阿尔法粒子、它们失去的能量，及其所兆示的电子在原子中的束缚状态，成为玻尔关于阻止本领 (stopping power) 的第

94 一篇论文的主题⁵。这个主题玻尔一生都很关注。在波动力学出现后它又成为新话题的焦点。关于这些问题，以及这些问题的解决，费利克斯·布洛赫（Felix Bloch）^①为我们做出了精彩的描述。⁶

当玻尔 1912 年 4 月前往曼彻斯特（Manchester）加入卢瑟福的队伍，他与核物理的难解难分就是命中注定的了。玻尔回忆说：⁷“我到实验室的最初几个星期，按照卢瑟福的建议，在经验丰富的盖革（Gerger）、马考沃（Makower）和马斯顿（Marsden）等人的指导下，学习放射性研究实验方法的入门课程，这是为学生和新来的访问者安排的。然而，我很快被新原子模型中的一般性理论内涵所吸引。”^②——此后，他再也没有说起过实验工作！

玻尔仍保持着对原子核及绕之旋转的电子的兴趣。“因而，”他说，“当 [1912 年初] 我知道，已经确认的稳定元素和衰变元素的数目超出了门捷列夫（Mendeleev）的著名表格所能提供的位置，我忽然想到，这些在化学上无法分离的物质，就是索迪先提醒大家注意其存在，后来名之为‘同位素’的东西。它们拥有相同的核电荷，只在核的质量与内部结构上有所不同。[对此，我认为]直接的结论是，元素通过放射性衰变，将在周期表中下移两位或上移一位，分别对应于因阿尔法射线或贝塔射线辐射而引起的核电荷数的减少或增加，而与原子量的任何改变完全无关。”

“我去找卢瑟福，想了解他对这些想法的意见，一如既往，他对任何有希望的简单性都表示了敏锐的兴趣，但是他以其特有的慎重告诫我，不要过分看重原子模型的功效，在实验证据还比较贫乏的情况下就进行外推。”⁸ 所以玻尔没有发表他的想法；几个月后，随着更多的实验证据出现，索迪和法扬斯（Fajans）发表了

① Felix Bloch (1905—1983)，美国物理学家，生于瑞士，在原子物理方面贡献颇多，曾参加曼哈顿工程，因其磁共振能谱研究，于 1952 年与珀塞尔（本书旁码第 78 页说及此人）同获诺贝尔物理学奖。——译者注

② 这里以及下面部分参考了戈革先生的译文。见“1958 年度卢瑟福纪念演讲”，《尼耳斯·玻尔哲学文选》，商务印书馆，1999 年，第 268、269 页。——译者注

同样的位移定律 (displacement law)。

返回哥本哈根之后，玻尔继续对核物理发展的密切关注，组建了理论物理研究所，并在 1921 年搬到了新的办公楼。20 世纪 20 年代，在那里以及其他地方，对于原子结构和量子力学理解的增进扫清了通向核物理学的一条新路。随着中子、正电子和感生放射性 (induced radioactivity) 的发现，这个领域的发展越来越快。

我本人非常荣幸地从 1933—1934 年跟随格雷戈里·布赖特⁹⁵ (Gregory Breit) 做了一些核物理学方面的工作，并在他的全力支持下，申请第二年去哥本哈根。我写了一封信给国家研究委员会 (National Research Council)，说我想跟玻尔一同工作，因为对于尚未解决的物理问题，他比我知道的任何人都看得更深更远。

我 1934 年 9 月到达哥本哈根，正赶上一个悲伤的时刻。玻尔刚刚失去了在航海事故中丧生的长子。由于这个原因，一开始任何人都很难有机会和他说些什么。然而几个星期之后，在每周一次的讨论班上冒出来一个新话题。很快，所有人的注意力都被这个核物理问题吸引过去了，这个问题预示着介子的发现。

博特 (Bothe)、罗西 (Rossi) 的实验和其他人在宇宙射线方面的工作表明，穿透了厚厚铅板的不仅有带正电的粒子，还有带负电的粒子。是把这些粒子认定为电子，违背当时所了解的量子电动力学，还是把它们认定为某个新粒子家族中带负电的成员？当时，人们普遍认为，量子电动力学的身上笼罩着很多疑团，特别是，人们没有理由相信它在高于电子静止能量 137 倍的能量范围上做出的预言。由于这个原因，人们通常假设，宇宙射线中的电子能量恰好违背了量子电动力学定律的预期。而预言本身则是明确无疑的。贝特 (Bethe)^① 计算了电子穿过原子核库仑场过程中

① 这两位名字相似，一位是 Walther Bothe (1891—1957)，德国实验物理学家，1954 年因其原子物理方面的工作获得诺贝尔物理学奖；一位是 Hans Albrecht Bethe (1906—2005)，德国出生的美国物理学家，1967 因其原子物理和恒星能量研究获得诺贝尔物理学奖。本文出现的人物有相当一部分都是诺贝尔奖得主，正所谓物以类聚。下面不再一一作注。——译者注

的能量辐射率。在铅中，电子失去一半甚至更多能量的平均自由程被预期小于一厘米。如果这个理论是正确的，那么，接下来的结论是，人们观察到的具有穿透性的负电粒子不可能是电子。

量子电动力学这个重要的预言会是正确的吗？这是一个引人入胜的课题。关于这个问题，做出重要贡献的不仅有冯·外札克尔（Von Weizsäcker）和研究所其他的偶然来访者，更有 E·J·威廉斯（E. J. Williams），这是玻尔的一位活跃的合作者，多次来哥本哈根做长期访问。

在他们的讨论中，有人采用了相对性的视角。不是把这个碰撞看作电子相对于原子核的移动，而是看作铅原子核相对于电子的移动。有人从“等效谱”（equivalent spectrum）的角度分析原子核的力场对电子的作用。认为，在核对电子的预期效应中，其主要部分与相当于电子静止能量数量级的能量，即 50 万电子伏特能量上的“等效光子谱”有关。我们知道，电动力学定律在这些能量上符合得非常好，不仅在理论上符合，而且经过了最结实最认真的电子 X 光散射实验的检验。于是我们可以得到这样的结论——这是玻尔大力强调的——在运动参照系中，必然地不可避免地会有微弱的能量转移到被散射的辐射中。同样的辐射，从实验室参照系看具有极高的能量。因而，一个宇宙线动量的电子在铅板中必然以极大的速率失去其能量，所以它的平均自由程不到一厘米。这个至关重要的——但是此前还被怀疑的——观点可以视为⁹这个最简单、最牢固的物理学原理的一个必然结论。

在这个得到了决定性支持的理论的基础上，卡尔·安德森（Carl Anderson）得以推进他根据动量测量对宇宙线粒子穿透本领（penetrating power）的研究。他强烈坚持人们正在讨论的是一类新的粒子，从而把介子写进了物理学教科书中。

在 1934—1935 年间，第二个备受关注的事件与原子核导致的伽马射线反常散射和德尔布吕克（Delbrück）效应有关。格雷（Gray）和塔兰特（Tarrant）的实验与迈特纳（Meitner）和霍普菲

(Hupfeld) 的实验表明，一个铅块把高能量伽马射线散射出了很大的角度，超出了我们根据原子中的电子或者原子核散射能量所计算的结果。莫非是有一种新的机制在起作用？

德尔布吕克已经指出，电动力学为新现象的发生提供了可能。一束伽马射线通过一个核的电力场，能够在那里产生一对虚拟的正电子和负电子。这两个粒子随后又能重新结合，向一个新的方向发射出具有原来能量的伽马射线。计算这一过程的反应截面以便与观察结果相对比，是量子电动力学最难的问题之一。这个工作甚至超出了德尔布吕克的能力。因而，也就没有一个很好的可与观察对比的理论结果。

幸运的是，人们发现了另外几项工作有助于填补理论和观察之间的鸿沟。一方面，可以根据色散理论 (dispersion theory) 对这种散射进行估计。然而，估计值非常之小，以至无法把德尔布吕克效应作为观察到的非正常散射的合理原因。另一方面，有可能对在大块铅板中发生的复杂的二级效应进行更深入的考察——尤其是与 E·J·威廉斯和恩斯特·普莱斯特 (Ernest Plesset) 的工作结合起来。入射的伽马射线在一部分铅中可能产生或者一个光电子，或者一个康普顿电子，或者一对正负电子。由这三种机制产生的二级粒子在铅中遭受了巨大的散射。这些电子发射出新的具有穿透性的辐射——韧致辐射 (bremsstrahlung)——其方向与原来的方向有巨大的偏移。此外，正电子还将湮灭并释放出更强的光子。韧致辐射和湮灭产生的辐射这两者都可以对神秘的非正常散射做出一个简单、基本的解释，并不需要引入新的效应。

到这时为止，人们的注意力还没有被吸引到核对光的相干散射 (coherent scattering) 上来。对于已知的过程，为了从反应截面的角度描述这种散射，采用熟悉的色散公式是非常自然的。一份采用了这种思路的未发表手稿在研究所里的小圈子被传看着，玻尔是其中的一个活跃分子。他告诫大家，我们不能确定色散方法是正确的。所以，什么也没有发表。三年后，克勒尼希

(Kronig) 独立给出了一个成熟的证明，证明色散公式成立，甚至在高能量上也同样成立，这不过是因果原则的一个结果——从此打开了色散公式对于各种高能过程的应用之门。

在 1934—1935 年间引起研究所广泛注意的三个效应中，给人印象最深、结果最丰富，并且最为神秘的，既不是快电子的韧致辐射，也不是伽马射线的反常散射，而是中子的共振俘获 (resonance capture)。摩勒 (Møller) 在 1935 年的春天访问了罗马，他带回来费米及其同事得到的一个神秘结果的细节。一个原子核在拦截中子时表现出来的横截面怎么会比它的几何截面大上几百倍？这个问题成了哥本哈根讨论的热点。但是在他们得到结论之前，我不得不离开了。

我记得就在第二年，1936 年，出现了两项有助于理解中子共振俘获的关键步骤，它们几乎同时发生，完全独立。一项是玻尔在哥本哈根做出的 (1936 年 1 月 27 日¹⁰ 致丹麦科学院，2 月 11 日于伦敦¹¹)，另一项是布赖特和维格纳在麦迪逊 (Madison) 做出来的 (文章“慢中子俘获”，*The Physical Review* 1936 年 2 月 13 日收到¹²，亦即美国物理学会 1936 年 2 月 21—22 日会议上的第 30 号论文)。布赖特和维格纳设想一种机制，能够俘获入射粒子和一个束缚核之间的能量交换。在这种基础上，他们提出了一个著名的公式，将截面作为窄幅共振 (narrow resonance) 相邻能量的函数。这个共振公式原来用于一个入射粒子和一个束缚粒子间的能量交换中，他们证明，这个公式还能应用到更大的环境范围中。

玻尔并没有以这样的方式考虑共振理论，甚至也没有认真考虑过共振的具体形态。他更看重从观测到的能级宽度和能级间隔中透露出来的关于核结构和核反应性质的信息。从他的分析得出的一个原理性结论可以概括在**复合核** (compound nucleus) 这个概念中：这个思想——粗略地说就是——入射的共振能量辐射撞击靶核，形成一个系统，它能够存在足够长的时间，以至于对于其形成的机制没有任何记忆。于是，这个复合核可以以最直截了当

的方式与卢瑟福及其同事深入研究过的放射性原子核的任何一种相比较。共振态可以被阿尔法粒子的入射打破；或者可以经过贝塔衰变，放射出一个光子；或者发出一个中子或一个质子——于是转变为一个新的量子态——这些截然不同的过程各有其每秒发生的几率，或曰放射性转变常数，这些过程不仅彼此相互独立，而且不依赖于转变机制。因而，玻尔虽然没有给出某些明确的数学细节，但是在最一般的意义上提出了相同的思想。布赖特和维格纳独立地发展了这个思想，并且给出了数学上充分完整的共振理论——尽管只是对于特定的双粒子能量交换的物理机制。

从中可以得到非常多的结论。(1) 观测到的激发态，其自然的能级**宽度小于** (width small) 到下一个能级的距离。那么，关于这个实验证据的另外两项重要的附加性质又如何呢？(2) 在一个给定的核中，一个慢中子共振与另一个非常**类似**，不论其发射伽马射线的几率，还是其重新发射一个中子的放射性转变常数。(3) 因而，在相似的能级中，平均**间距要小于**我们根据核子近似独立移动穿过有效平均力场的情况作出的预期值达十的几次幂。在这种情况下，核的激发态与原子的激发态非常不同，在原子中，99任何电子都可以被很好地近似看作是穿过一个有效的平均原子力场。因而在核与原子之间，必然存在着性质上的巨大差异，至少在超出粒子发出能量极限的状态上是这样的——比如我们在粒子轰击实验中研究的那些状态。

因而，玻尔试图寻找一个与每个粒子都有很长平均自由程的行星模型截然相反的原子核模型。他把核与液滴进行比较，在液滴中，每个分子所具有的平均自由程与系统的线度相比都非常短。这个液滴模型显然比复合核的概念还要狭窄。不过，它有一个巨大的优点，可以让我们形象地描述这个确切无疑的机制，借此，一个核在 10MeV 的激发能量上保持的时间可以超出一个粒子从系统一端到另一端所需要时间的 100 万倍。在早期关于这个课题的报告中，我们在通信中就此做过讨论¹³，玻尔用一组被一个轻微凹

陷的小坑聚集在一起的台球作比。另一个台球从外面打过来，带着远远超出足以把凹陷中的任何一个台球打出来的能量。然而，它却反而被这个凹陷给俘获了。把这个模型用到核子上，玻尔强调：“入射中子的额外能量迅速分配到所有的核子上，于是一段时间后，没有任何一个粒子能够拥有足以逃出这个核的动能。”

了解核的液滴模型的人，如果去读玻尔本人字斟句酌的关于中子俘获和核结构的那篇著名的五页文章，会感到十分有趣¹⁴。想到液滴模型，人们必然想到其中意味着核子的平均自由程要比核的半径小很多。这也是后来第一次处理核振动和核裂变时最有用的观点。然而，玻尔却小心翼翼地没有把任何事情说得这么直白。这篇论文是以非常一般性的术语表达的。直到今天，当我们知道与核的线度相比，平均自由程并不是非常短，也不是非常长，而是与之相当的时候，这篇文章依然成立。就我们今天所知，这篇论文中的公式还将在很长时间内被作为清楚无误的典范。这种思想的平衡是怎么来的？

100 那些曾与玻尔肩并肩地为某个鲜活的物理问题共同奋斗过的人，没谁会忘记他们不可开交的争论，此起彼伏，从某个观点的一个极端到另一个极端，也没有人会忘记玻尔这句富有说服力的口头禅：“当这个这个已经如此**绝对地**清楚的时候，我们怎么还可能相信这个这个观点呢？”当他对某个思路可能产生的多种结论进行总结时常常这样说。在讨论中，一个又一个模型，无论是单粒子模型（individual model），还是液滴模型，或者其他什么模型，都会用鲜明的图示画在黑板上，然后把它们推到其可预言能量的极限。但是，所有这些丰富的细节和特殊的观点，在最后的论文中常常无迹可寻。在尝试过各种极限之后，人们知道，真相必定在各个极限之间。由于这些极限常常如此宽泛，这种措辞在初涉此道了解不深的读者看来，似乎是云里雾里。我们可以从这篇关于中子俘获的论文¹⁵中找出几句话来说明这一点。

在对核结构和原子结构进行新的比较时，玻尔是这样说的：

“利用这种碰撞计数分立的原子粒子并研究其性质的可能性，首先依赖于所涉及系统的空旷性（openness），这种空旷性使得相互分离的组分粒子不大可能进行能量交换。然而，考虑到在原子核中这些粒子被紧密地束缚在一起，我们必须有所准备，恰恰是这样的能量交换在典型的核反应中起着至关重要的作用。”^①在读最后一个句子的时候，我们必须仔细一点才能认识到，在说到平均自由程的时候，玻尔所采用的说法是怎样的小心谨慎，怎样的合理适度。这位作者从来没有把话说得这样斩钉截铁：“平均自由程小于核的线度。”尽管从这个简单的假设中可以得到诸多合理的结果，而他已经进行过某些详细的研究，但是他却从未表露。

另一个能够说明他的谨慎的例子来自同一篇文章¹⁶，是关于是否所观察到的来自核外又进入核内的粒子具有自由粒子的性质。他说起过一个理由，说贝塔粒子是在衰变过程中产生的，而不是作为核的组成部分预先存在的。在考虑核的时候，他说：“尤其是这个事实，所有的原子核质量在初级近似下都是近乎等于中子质量的一个单位质量的整数倍，这使得这样的想法是合理的：把具有如是质量的粒子视为核内的力学实体。然而，考虑到中子质量和质子质量之间的微小差异，……假设核中的粒子具有与自由中子和质子同样的电性质和磁性质，似乎就有更多的假说成分了。”

在这篇文章的后面，在分析为什么处于激发态的核所具有的能级间隔，较之于原子中类似的单粒子激发态的情况要小得多时，101他说：“诸如 α 射线能级或者质子能级这种表述，就像在这些效应[α 射线共振嬗变]的一般讨论中所使用的那样，由于建立在把激发归因于单个核粒子的出发点上，从而失去了全部意义。”——然后，他谨慎地打了个补丁：“从这里采用的核激发的角度来看。”

最后，在这篇导向了原子核结构的现代视野的奠基性论文的

① 这里及后面的引文参照了戈革先生的译文，见《尼耳斯·玻尔集（第九卷）》，科学出版社，1993年，第177、178、185、186页。另外，引文中的中括号中的文字均为惠勒所加。——译者注

结论中，又出现了这样的句子：“……尽管核构造问题的确缺少作为原子结构力学特征的那种特别的简洁性，这种简洁性极大地方便了…… [原子结构的明晰] ……无论如何……，就各原子核特征性质的全面阐释而言，它提供了……特殊的便利，它使我们能够把核反应分解成划分明确的各个阶段，以至于与原子的力学行为没有直接的相似。”

就如玻尔这篇文章的结尾，亦如他此后讨论核反应的论文，都是从这个概念出发：把核反应分解成划分明确的各个阶段，其中第一个阶段是让粒子构成复合核，第二个阶段是这个能量的各种分配模式之间的竞争。

在此后关于这个问题的文章中，玻尔和考卡尔 (Kalckar¹⁷) 1937 年对核构造模型的应用是最重要的文章之一。这篇文章试图根据当时已经获得的信息，对核束缚和核激发做一个一般性的分析。文章涉及到了单个核子的动能、核物质的可压缩性以及核的膨胀模式。还深入探讨了这些激发模式，我们可以将它们与一个不可压缩液滴的振动进行比较。文章简洁地讨论了核旋转的问题。然后对这些独立模式中的若干个同时激发时的总能量进行了统计分析。就核激发的能级密度趋势给出了一个合理的结论。最后，根据布赖特和维格纳的基本共振公式，文章不仅分析了发生共振现象的低能区域，而且分析了能级彼此重叠的高能区域的核反应截面与能量的变化关系。

这篇 1937 年的论文也触及到很多当时没有解决的问题，比如怎样解释伽马射线在共振态密集的能量上吸收的反应截面。对这个问题的清楚说明要到 1939 年才在玻尔、派尔斯 (Peierls) 和普拉切克 (Placzek)¹⁸ 的一篇基础性文章中出现。他们证明，这个截面，就如最初的考虑所估计的那样，要乘上一个很大的因子，这个因子取决于能级宽度和能级间隔之比。

这就是 1939 年 1 月 16 日星期一，瑞典—美国航班 *Gripsholm* 号到达纽约，玻尔走下甲板时人类对核构造和核反应的知识状态。

直到他在欧洲安全上船，弗里希 (Frisch) 和迈特纳 (Meitner) 才敢把哈恩 (Hahn) 和斯特拉斯曼 (Strassmann) 的发现和他们对这个发现的初步看法告诉他。他们担心，在他们自己有机会充分领会这个发现的意义之前，他过于爽快地把这个新的概念泄漏给每一个人。我们可以好好想象一下这次穿越大西洋的旅行，所有的思想都是从哪里出现的！我还记得当时的兴奋，就在我们见面几个小时之后，我被告知了铀的裂变。

玻尔在普林斯顿度过了春季学年的大部分时间。他和我立即沉迷在对新效应的分析中。此前三年到来的核构造理论为此提供了一个理想的背景。十分自然，一个新的领域出现了。它们为复合核的概念和更特殊的液滴模型提供了应用和检验，也为原子核构造和反应速度理论的新性质的产生提供了一个思想框架。

最初遇到的问题是裂变中释放的能量。这里，指导性的思想来自伽莫夫 (Gamow) 和外扎克关于核质量的一个半经验计算。为了描述偶-偶核和奇-偶核之间的质量差，需要一个附加项，在分析 U^{235} 和 U^{238} 之间完全不同的裂变性质时，这个差异在另一个阶段的计算中极为重要。在半经验质量公式中，还不得不引入另一个附加项，以确定核稳定性曲线的拐点。只有这样，我们才能渐进准确地确定核在分裂成一个或另一个相关质量的碎片时所释放出来的能量。接下来，就像现在这样，在这种能量释放中，没有发现任何东西表明非对称裂变比对称裂变更容易发生。除了裂片的动能之外，我们还能根据校正过的质量公式，计算出任一给定裂片此后每一次贝塔衰变所释放能量的近似值。比较这母核的衰变能量与子核中的中子束缚能量，我们可以得出这样的结论，在非常罕见的衰变产物中，在经过贝塔衰变辐射出一个中子之后，子核获得了充分的激发。这样，我们可以理解接下来对于裂变后逸出的衰变中子作出的依然令人困惑的观察。

然而，根据对核质量的半经验分析，裂变中最主要的量不是

这些转换能 (transformation energy), 而是复合核在裂变前的静电能和表面能。为了计算触发分裂所必需的临界能量, 需要以此作为出发点——这个量显然要比裂变中**释放**的能量小得多。在这个计算的第一阶段, 我们 (多次) 在斐恩楼中三步并作两步, 从办公室赶到图书馆, 参考瑞利爵士 (Lord Rayleigh)^① 的《论文集》(Collected Paper)。在那些年里, 玻尔在各种场合表达过对瑞利爵士的智慧和物理学洞察力的钦佩。从一个球形液滴的表面能出发, 考虑偏离球形的一个小的偏差, 根据瑞利的工作, 我们可以立即得到表面能二阶小量的变化。瑞利并没有想到过要去考虑一个均匀带电液滴的静电能, 但是他和其他人已经分析了同样的量——即球体微小的潮汐形变导致的引力能, 只是差了一个符号。

这样我们就知道了会因微小形变而改变的两种能量——静电能和表面能。每一种能量的绝对值都可以从半经验质量公式中得到。相对原球体的相应值而言, 每种能量的**改变** (change) 都可以用一个表示为该形变二阶量的系数进行量度。就铀而言, 计算出来的代表所致表面能增加的正系数大于代表微小形变中电能减少的负系数。换句话说, 根据计算, 铀的稳定性可以抵抗小的形状变化, 这个结论显然是与经验相符合的。

对于其他核来说, 计算出来的稳定性取决于这个比例: Z^2/A , 电荷数的平方与质量数的一次方之比。从稳定性核到非稳定性转变的 Z^2/A 临界值, 对于比铀重两倍的核来说已经非常之小。在这种情况下, 对于为什么我们在自然界中没有找到很重的原子核, 我们获得了一个自然的解释 (胜于阿尔法不稳定性)。

104 以往我们检验稳定性, 只考虑微小的形变, 现在我们不得不
对更大的形变进行分析。为此, 有必要从瑞利的二阶项再进一步。

① Lord Raileigh, 即 John William Strutt (1842—1919), 1904 年诺贝尔物理学奖得主。——译者注

对形变的三阶项和四阶项进行计算。这个能量最初随着形变的增大而上升，随后又降了下来。最大值的位置确定了裂变的势垒。毋庸置疑，要实现裂变，必须给核提供达到这个临界值的能量，否则就只好通过量子隧道机制穿过势垒了。一旦越过势垒，核就会被拉长，并越长越快，最终被撕裂成两块。

于是，慢中子俘获是否会使裂变以很大的几率发生，就变成这样一个问题，额外的中子释放出来的凝结能（energy of condensation）是否能够越过裂变势垒。对于足够高电荷的核来说，永远都会是这样，而对于普通的轻核来说，永远都不会这样。铀，显然是接近临界点的核——但是有多近？

当时，玻尔在拿骚俱乐部（Nassau Club），罗森菲尔德也在，他陪着玻尔，总是让玻尔考虑电磁场定量测量的艰难问题。2月初的一个早晨，乔治·普拉切克（George Placzek）来与他们共进早餐¹⁹。谈话自然地转到了在裂变机制的理解上取得的进展。普拉切克断言，存在着理论不能解释的观察结果。铀的中子俘获截面表明，在大约 10eV 处存在一个共振态，然而，裂变反应截面，主要是热能，表明，在 10eV 处没有共振态。钚在低能量处也有一个俘获共振态，但据拉登堡（Ladenburg）的观察，裂变截面一直到中子能量达到约 1.5MeV 时才变得明显。玻尔坐不住了，离开餐桌，陷入深思，他和罗森菲尔德一直走到了斐恩楼，一句话也不说，只是在黑板上勾画出了据此理论所作出的完整解释。

对钚来说，我们已经知道，裂变势垒一定在 1.5MeV 附近，比所吸收的中子释放出来的能量要高。所以在这里，应该只有快中子能够导致裂变。慢中子共振只能导致俘获，而非裂变。

在铀中出现的类似的共振态排它性地导致了俘获，同样意味着，裂变势垒必然很高。因而，这里还是这样，只有快中子才有能力引发裂变。那么，热中子（thermal neutron）^①如何能够在天然

① 这里指处于常温下只具有随机热能的中子，即慢中子。——译者注

105 铀中也诱发出适量的裂变呢？显然，唯一的渠道是，假设这些适量的慢中子裂变是发生在稀少的同位素 U^{235} 中的。慢中子在这个奇数核中的俘获产生了一个复合核，它的激发态远高于在 U^{238} 中产生的复合核。它的各个能级聚在一起，非常接近，以至于发生了重叠。因而，在慢中子导致的天然铀的裂变中——是由在天然铀混合物中占 1/139 的 U^{235} 导致的——并没有共振态。

这个理论发展到这个时候，我们已经能够得到这样的结论： U^{235} ，如果分裂，将会对慢中子极其敏感。对于这个新的结论，我们每个人都有警觉，它意味着我们可以利用铀作为能源，只有普拉切克表示怀疑。普拉切克是一个正直本分妙不可言的人，他对于新思想常常既是满心欢喜，又是彻底怀疑，那时他尤其怀疑的是， U^{235} 能否为天然铀中的裂变负责。为此，我和普拉切克打了一个赌，我以 18.46 美元对他 0.01 美元，这个比例正是质子和电子的质量比。一年后，1940 年 4 月 16 日，就在 U^{235} 发生慢中子裂变的实验证实刚刚做出之后，我收到了普拉切克 0.01 美元的电汇单，电文只有一个词：“祝贺。”

比裂变阈值更深刻的问题——随着我们对普遍性理论的推进——是裂变速度问题。越过势垒的机制酷似单分子转移 (monomolecular transformation)，借此机制，一个复杂分子得以通过所谓的“过渡态” (transition state)。在那里，我们已知温度，求知反应速度。就核问题而言，我们已知能量，求知能级宽度。为了估计这个量，有必要把核在穿过裂变势垒前的相空间与裂变势垒自身峰值处的相空间的元的数目进行比较。由此出发，下一步必然是计算当时所谓的 N_f ，“鞍点处可进入裂变态的激发态的数目”。现在我们用了一个短一点的术语，“裂变渠道数” (number of fission channel)。根据统计分析，我们对能级宽度和能级间隔之比给出了一个极其简单的表示，即裂变渠道数除以 2π ：

$$\Gamma_f/D=N_f/2\pi$$

当现有的激发超出裂变势垒只有一点点的时候，根据这个公式，裂变宽度就是能级间隔的一个微小部分。另一方面，在强激发的情况下，可以达到的裂变渠道数几乎是以能量的指数率增长。据此可以解释，为什么 U^{238} 和 Th^{232} 的裂变截面，在最开始几乎随中子能量的指数率上升，然后才达到一个近乎稳定的状态。

在反应截面上升最快的区域，新渠道蜂拥而至。在那些日子里，人们认为量子力学效应将会淘汰这些渠道的独立性。现在，根据兰菲尔 (Lamphere) 和格林 (Green) 的精密实验以及奥格·玻尔 (Aage Bohr) 的理解进行推导，我们知道，每一个新的渠道都在作为能量函数的反应截面曲线上产生其独有的特征性阶梯。因而，对于过渡态中的核，我们可以对其跃迁到任意激发态的状态数做直接的计算，并能赋予数字 N_f 以一个定义明确的实验意义。

这个分析还引发了许多别的问题。我只提出其中很少一部分来说明玻尔对裂变过程的复杂性的深刻领会。一个慢中子共振态在发生裂变的半衰期内，与另一个慢中子共振态会有很大的不同吗？这个问题常常引起讨论，玻尔倾向于认为其差别不大。然而，渠道概念在那时还没有得到实验证实，也没有发展出充分的理论细节能够使人对这项变化表达明确无疑的立场。

自发裂变也有很多问题。从观察到的抵抗裂变的未激发铀的半衰期出发，有可能对伽莫夫关于裂变势垒的穿透积分给出一个“实验”值。这个值在量级上与我们根据液滴模型的计算是一致的。在那个模型中，人们分析了液滴在穿过势垒过程中由球形到相关联的最低两级微扰之间的连续构形 (configuration)。然而，认真地说，用这种方法推导出来的穿透积分要比通过解释观测结果得到的值小两个数量级。关于这一点，玻尔在 1939 年 7 月给我的信中了他的困惑，当时我们合作的一篇关于裂变机制的论文已经送交出版，但是校样还没有收到。现在我们知道，根据斯维亚特基 (Swiatecki) 和他的合作者在高速计算机的帮助下多年来对液滴模型的研究，理想化的裂变势垒并没有如人们根据幂级数的

前三项所预期的那样迅速下降，超出峰值，而是恰恰相反，它保持了一定的高度，表现了复杂的结构，并能产生相对巨大的形变。

107

随着更多的实验结果的出现，另一个深受关注的问题是裂变碎片的质量分布，这个永恒的谜题是：为什么两个裂变碎片的质量总是有非常大的差异？对于这个重要而复杂的问题，现在我们已经有了很多新的观测证据，不过在这个场合不宜多说。玻尔对这个问题的兴趣表现在 1939 年末他给我的一份简短的手稿中，他认为我们应该做得再深入一些。其核心思想是，把表面能作为形变的函数，函数中有一对鞍点，每一个鞍点或者势垒峰值都对应着一种非对称裂变形态。然而，对于这个图景我们了解得越深，就让人有更多的疑问，裂变中的非对称是否真的与鞍点位形自身的性质有任何简单的联系。现在，人们不得不承认，这里正在讨论的是裂变动力学中的一个非常深刻的方面。

战争为裂变物理学带来了巨大的应用。然而，在此我们不必讨论核能及其各种后果，包括玻尔对战后相关的政治事务保持的强烈关注²⁰。相反，这里倒是可以谈谈战后玻尔对于核结构和核反应的看法。

到 1949 年，已经有丰富的证据表明核并不是在所有方面都可以比作液滴。相反（并且以比人们从前所知更多的方式），它有很多与原子相似的地方。在某种近似下，人们不得不承认，单个的核子都对应着单个的态，每个态都有一套特有的量子数。这是核物理学的奇迹，核子穿过核物质的平均自由程与核的线度是如此接近，以至于一方面，在平均自由程较短的理想情况下，液滴模型是有效的；而在另一方面，在平均自由程比核的线度大的理想情况下，单粒子模型则更有预言能力。关于核构造的这两种大相径庭的看法给出了相互冲突的预言，这引出了这样一个重要课题：如何协调这两种观点，把它们融合在一个统一的核构造图景中。

玻尔在 1948 年的信中表示，我们应该更深入地讨论这些问题。在 1949 年的最后一季和 1950 年的第一个月，我们又有可能碰到

一起了，此后不久就出现了氢弹防御的呼声。我们进行了大量的讨论。核心思想是单个核子与核表面相互作用的概念，涉及到单粒子行为与集体运动的统一。显而易见，我们所要做的就是把玻尔在 1936 年的思想，核“激发态对应着所有核粒子运动的某种量子化集体模式”，推向深入，使之发展完善。在仔细考虑了玻尔对于核子与表面相耦合的生动概念之后（当时正在前往巴黎的火车上，行前在哥本哈根参加了一次激动人心的讨论会），我不由自主地沿着这个思路，为某些基态原子核神秘的大规模四极运动（quadruple motion）提出一个解释。

液滴及其球形的平衡形态当然无法解释这样的运动。把它作为球对称力场中运动的单个粒子的电四极矩（electric quadruple moments）考虑，同样无法作出解释。然而，如果考虑到核子对于核表面施加的非球形对称压力及其导致的形变，根据液滴模型的计算，我们就会获得具有正确数量级的四极运动。这个结果正好与玻尔关于粒子集体运动和个体运动统一的思想相一致。在 1949 年 12 月 24 日，在与林哈德（Lindhard）讨论过这个问题之后，他写给我这样一段话：“你告诉我，你考虑了一个核子的四极矩，这个核子带有一个粒子，该粒子位于一个无此粒子则为空的壳层中，这个想法在我们看来是非常漂亮、非常可信的，按照我们的理解，问题的关键在于，由于这个粒子的存在而导致的核的形变，就意味着在闭壳层中的粒子具有相当大的四极矩。”^①

詹姆斯·雷恩沃特（James Rainwater）也独立地得到了同样的结果，发表在一篇漂亮并且重要的文章中。²¹

玻尔继续对形变的动力学问题发表评论，如下问题也引起了他的特别关注：“然而，至于从单个粒子图景出发对受激核子振荡所做的处理，我们不能确定已充分理解了你的思考。这个处理方

① 这里参考了戈革先生的译文，见《尼耳斯·玻尔集（第九卷）》，科学出版社，1993 年，第 694、695 页。——译者注

式无疑是非常直接的，但是在我看来，似乎不能事先就十分明白，人们怎么能如此一般性地分析核形变及其时间导数的效应。

“似乎是这样，实际的物理问题毋宁说是考察与整个核的振荡形变相与俱来的单粒子束缚的半浸渐变化 (semiadiabatic change)，而对于这个问题，常见处理方式的合理性应该是在某一类型的核的全部能量上，增加若干与液滴的毛细振荡相对应的附加项。”

109 作为统一单粒子观点和液滴观点的尝试，我们已经在核构造和核反应问题上做了很多工作，为了获得进一步的成果，玻尔加了一句：“所以，如果你能在 1 月 14 日到 21 日这个星期来一趟，那就再好不过了。”

在那次访问中，卡尔斯堡 (Carlsberg) 是生活和工作的中心。对于玻尔家庭的其他成员，以及此前和此后的合作者来说，一直如此。早餐的时候，我们有一小会儿和玻尔夫人安静相处的时间，我们会仔细阅读两份报纸，讨论最近的政治形势。早餐后，一直到黄昏后一个小时，我们几乎可能在任何一个地方进行讨论；从晚上 10 点到午夜，讨论继续，或者在天井，或者在相邻的工作室，就这样日复一日。天井是 U 字型的，穹顶玻璃天花板，带着廊柱的走道，是这座美丽宫殿的建造者和捐赠者雅各布森 (Jacobsen)，从庞贝 (Pompeii) 拷贝过来的。这是玻尔非常喜爱的散步式讨论的理想场所。有时，为了在细节上展开讨论，我们会回到工作室的黑板前。每当讨论有所结论的时候，这个小屋子就派上了用场。不是我写，就是玻尔口述。

这个地方符合玻尔对工作室的定义：“一个任何人都忍不住要工作的地方。”这个屋子最让人愉快的优点之一是一组抽屉，大约 25 个，每个可能有一英寸厚，里面装着与这个或者那个物理学问题相关的手稿。每一个课题的成熟都是从一个手稿到另一个手稿——有时要经过几年——一直到最后，达到玻尔认为可以发表的程度。在这些其基本思想可以追溯到遥远过去的手稿中，原子和原子核转换过程中的角动量及其交换是最值得赞叹者之一。它从

来没有达到发表的程度。然而，像抽屉里的其他手稿一样，它也明确了结论，陈述了问题，并为新思想的发展提供了出发点。

在 1949 年春天，我收到玻尔寄来的一份这样的手稿，名为“对于原子与原子核构造的初步看法”。它为我们从那时开始的工作提供了一个出发点。1 月，在哥本哈根这个高强度的一周里，我们向论文的形成推进了一大步，形成了一个结合了单个粒子运动和集体振动的核的集体模型，并沿着这个思路解释了核的裂变现象，尤其解释了不同裂变方式从给定质量数的裂片中离开的光子数的差异。

在 1 月末这段时间的几次早餐里，我们谈到了苏联在 1949 年 110 秋天的核实验，谈到了就美国是否应该发展热核装置所展开的这场跨越大西洋的争论。不管是什么原因，玻尔马上作出了直接的反应，他讲述了他对于**开放世界**（The Open World）的长期理想²²。与此同时——如他一直以来对于政治现实的警惕——他又一次强调了他以前经常说的一句话：“如果美国没有造出原子弹，西欧怎么可能在二战之后保持自由与和平？”

就在这次讨论之后短短几天，西方世界也产生了热核防御的要求，一下子打断并消除了我和玻尔从 1950 年 2 月到 1953 年 3 月这段时间里进一步合作的任何可能。我们的分析，包括自此为止我们已经做出的那些，加上戴维·希尔（David Hill）和我本人就裂变和单个核子与核表面间的耦合所做的其他工作，都表现在 1952 年交给玻尔的一份手稿中。从他的回信看，显然他觉得还有很多问题有待于进一步的理解，并且期望着一段更为深入的合作。然而，这是不现实的，我们每个人都心知肚明。考虑到环境因素，他建议关于集体模型报告由希尔和我发表，尽管其中很大一部分是他自己的工作。最后文章发表的时候就是这样。²³

对于核的集体模型或统一模型的发展来说很幸运的一件事是，奥格·玻尔——当时在哥伦比亚——完全独立地从根本不同的角度被吸引这个课题中来。他已经认识到，原子核的转动态可以从单个核子的量子态与变形、旋转的核所具有的转动势能之间

的相互作用获得解释。他发现自己已经在与转动相关的集体运动和与单个核子运动相关的外赋激发 (extrinsic excitation) 之间做出了区分。这项工作对于核物理学此后发展的重要性已经广为人知，这里无需再提。在我们对于核构造与核转化的不断成熟的理解中，哥本哈根那些人，尤其是奥格·玻尔和本·莫特森 (Ben Mottelson) 所获得的成就，给人以这样的信念：尼尔斯·玻尔的精神一直活在那些受他影响的人们的事业中。

111 在后来一次对哥本哈根访问中，在一次星期日早晨的散步中，玻尔谈到，那些伟大的宗教领袖——比如耶稣、老子、孔夫子以及佛祖——是怎样慰藉那些身遭巨痛的人们，并因为这样的能力而产生影响。他谈到了那个古老的故事，一个老妇人失去了他唯一的孩子，一个优秀杰出的小伙子。老妇人陷入悲伤之中，几近疯狂。月复一月，她的情况毫无好转。后来，她的丈夫和朋友请求佛祖帮助她重新过上正常人的生活。佛祖对她说：“我能够治好你，不过有个条件，你要给我找六颗芥菜种子——这些种子必须是那些从来没有经受过任何悲痛的人给你的。”她急切地询问她遇到的第一个村民，那人很热心，给了她六颗芥菜种子。她拿走了六颗芥种，忽然想了还有别的条件，于是返回去问：“哦，不过，你是否有过悲伤呢？”听到了那人的回答，老妇人只好把种子还了回去，伤感地走了。这样的事情发生了多次之后，她回到佛祖那里，她好了。玻尔本人对于人类问题的深刻理解，以及他对于身边那些人的强大影响，使我们相信，像耶稣、老子、孔夫子和佛祖这样的人，真的活着。

原为在美国物理学会 (American Physical Society) 春季会议的尼尔斯·玻尔百年纪念会上的讲话，华盛顿特区，1985年4月26日。