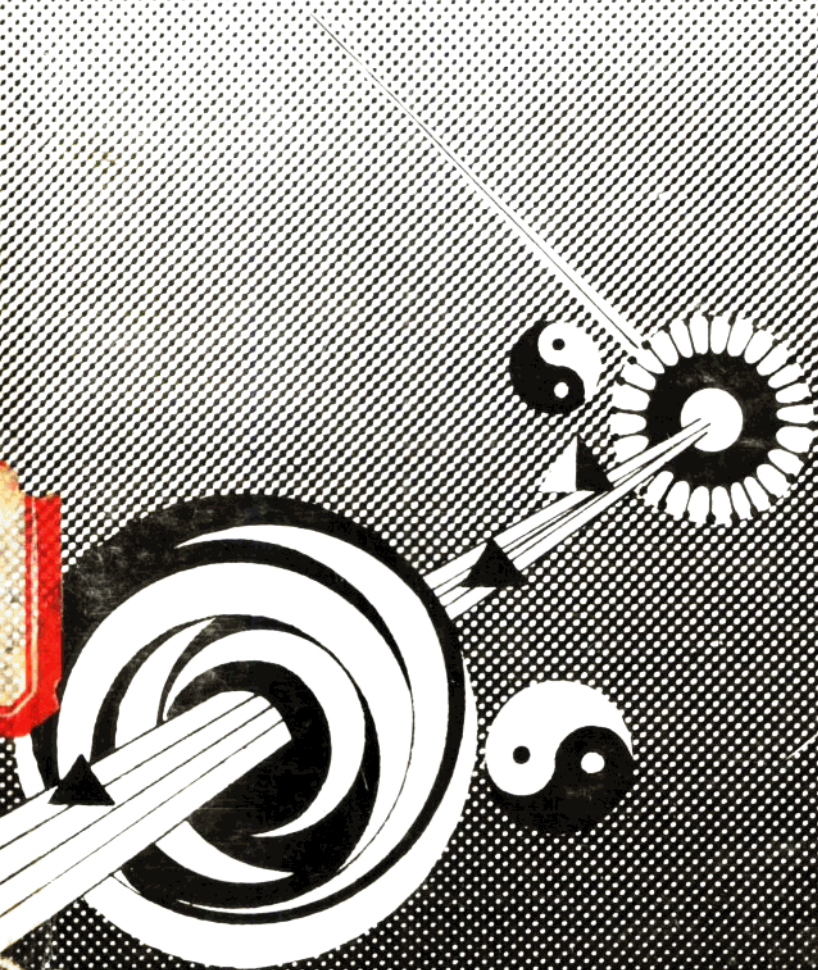


惊讶·思考·突破

——物理学史中的佯谬



目 录

导论·····	1
神行太保为什么追不上乌龟·····	14
一个奇迹，但不足为怪·····	25
到底谁落得快一些·····	37
小球为什么不下落·····	52
夜色为什么是黑的·····	63
阿拉果之谜·····	74
麦克斯韦妖·····	88
开尔文的第二朵乌云·····	103
迈克尔逊—莫雷实验佯谬·····	118
热力学第二定律与时间箭头之谜·····	136
紫外灾难·····	159
波粒二重性佯谬·····	174
双生子佯谬·····	191
电子之谜·····	208
象鬼魂一样的粒子·····	226

$\theta-r$ 之谜.....	244
负能态之谜.....	262
爱因斯坦和玻尔争论中两个著名的佯谬.....	275
后记.....	291

导 论

在科学中，奇秘现象必须是思想被应用于感觉的结果，是解释所积累知识的结果。一当这个奇秘的来源被搞清楚了，它就被称为“科学佯谬”。有许多著名的例子，其中科学家的惊异（被作为一个佯谬而提出的）曾引起一场科学革命。

——A. Б. 米格达尔

在物理发展史中，最吸引人而又令人绞尽脑汁的大约应该首推五花八门的物理佯谬（或悖论）了。它们象深藏在浓云密雾中的奇花异葩，既使人感到扑朔迷离，又使人感到它有一种令人无法抗拒的美的吸引力，促使每个时代最杰出的物理学家以令人肃然起敬的智慧和毅力去摘取它们，让它们那深邃的美和无穷的奥秘展现在人类面前。

物理学（或者说科学）史上，最早出现的佯

谬，大约首推公元前五世纪爱利亚学派的代表人物芝诺（Zeno，约公元前490—430）提出的“芝诺佯谬”了。在古希腊，佯谬（或悖论）被称为“疑难”，在希腊文里这个词是“*αποροζ*”，它的意思是“无路可走”，转义则是“四处碰壁，无法解决”。古希腊可以说是佯谬（或悖论）的故乡。聪慧的哲人常常提出一些极幽默、风趣的难题使你真假难分。例如《虚伪的山王》就是一则脍炙人口的悖论。

“山中之王老虎好不容易从母狐怀里抢走一只狐崽，老虎可是‘正人君子’，从来也不无缘无故地残害生灵。于是他说：‘你放心好了，我不会吃掉你的宝贝的，只要你对我的提问回答得对就行。现在我问你：我会不会吃掉你的孩子呢？’母狐迟疑了一阵子，忽然喊道：‘天哪，你是要吃掉我的孩子的’。”

“老虎心想：我要是把狐崽吃掉，她的话岂不是答对了？我原是该放了她的孩子的；如果她没有答对，那就是说，我不会吃掉她的孩子的，也该放走那只小崽子。”¹

狡猾的狐狸在这里利用了山中之王老虎虚伪的弱点，成功地保护了自己孩子的性命。

开始，这些佯谬（或悖论）大约是作为茶余

1 转引自傅钟鹏：《数学的魅力》，1985，福建科技出版社，第63—64页。

饭后的谈资，并没有受到多大重视，但到后来，一些哲学家开始利用佯谬（或悖论）所造成的两难困境来为自己学派的理论进行辩护了。例如上面提到的芝诺就曾提出了四项有关运动的佯谬（或悖论）来证明运动是不存在的，“存在”是单一的、球状的和静止不动的。

到了近代，佯谬（或悖论）的重要性就越来越受到人们的重视了。那么，到底什么是佯谬？佯谬和悖论有没有什么区分？在英语里，佯谬和悖论都是一个单词“paradox”，大约正是因为这个原因，在不同的书里，同一个疑难有时被称为佯谬，有时又被称为悖论，似乎它们之间是没有什么区分的。有的书上也表示了这种看法，例如，有的书上认为：“从某一前提出发推出两个在逻辑上自相矛盾的命题，或从某一理论、观点中推出的命题与已知的科学原理产生的逻辑矛盾就叫悖论。……在物理学上的悖论常译作佯谬。”^①这种看法很通行。在郑易里、曹成修编的《英华大辞典》（商务印书馆，1984年版）第1003页“paradox”条目下就这样注释：①似非而可能是的论点；②反面议论，反论，悖论；疑难；③自相矛盾的话；奇谈，怪论；前后矛盾的事物；④〔物〕佯谬。但也有人指出，佯谬和悖论之间

^①《自然辩证法讲义》，人民教育出版社，1979年，第327页。

是有差异的，例如陈昌曙同志在《自然科学的发展与认识论》一书（人民出版社，1983年版）中提出如下的看法：“但如果略细区分，佯谬的概念与悖论的概念不仅有科学使用上的差异，也还有内涵的不同。佯谬（如玻尔兹曼佯谬、双生子佯谬、引力佯谬、光度佯谬）通常是指：人们从某种假说出发进行逻辑推理，却导出了同事实（或可设想的事实）不符的结论，但一时又难以确定问题的所在——是作为出发点的假说有错误，错在哪里；还是推理过程不够正确，有什么缺陷。……至于悖论，它通常是从一种或一些观点、原理出发，合乎逻辑地导出两个互相矛盾的判断。悖论有时也是科学研究中碰到的疑难，在这种情况下又可称为佯谬。例如，数学上集合论的罗素悖论亦可叫做罗素佯谬。但是，在许多情况下，悖论却不是佯谬，不是科学面临的困惑，而是作为一种反驳和证明的形式。……从逻辑上讲，佯谬与悖论亦不一样，前者是逻辑推理的结论与事实有矛盾，后者是逻辑推理导致两个互相矛盾的结论。”

应该承认，上面说的这种区分是有道理的，也可以为人们接受。但在实际上，人们并没有注意这种“略细区分”。如伽利略（G. Galileo, 1564—1642）提出的“落体悖论”按陈昌曙同志的意见，“是作为一种反驳和证明的形式”的典型

悖论，但在国内有关书籍和杂志上，却多称之为“落体佯谬”。由于我们在本书只讨论物理史上一些著名的 paradox，故暂时随目前通行的称谓统称之为“佯谬”。

下面我们将进一步探讨佯谬是怎样产生的，以及佯谬在物理发展史上起过什么样的作用。

佯谬的出现是科学发展所不可避免的，因而也是科学发展所具有的正常的特征。这一特征在二十世纪物理发展史中表现得特别突出。但在本世纪之初，包括一些非常杰出的物理学家，并没有自觉地认识到这一点。那时，一些物理学家认为经典物理学得到了迅速而稳固的发展，经典力学、热力学和电磁学已经发展到了登峰造极的地步，它们的基本原理已经足以解释所有已知的现象。开尔文爵士 (Lord Kelvin, 即 William Thomson, 1824—1907) 就曾经非常乐观地说过：“牛顿力学和麦克斯韦的电磁学已经把一切问题都解决了，以后物理学家的任务只是把实验搞得更精密些。”普朗克 (M. Planck, 1858—1947) 在1932年一次宴会上的讲话，证实了物理学界在上世纪末和本世纪初的这种盲目乐观情绪。他回忆说，当年他决心献身于理论物理时，他的老师约里 (P. von Jolly, 1809—1884) 劝告他说：“年轻人，你为什么要断送自己的前途呢？要知道，理论物理学已经终结。微分方程已经确立，

它们的解法已经制定，可供计算的只是个别的局部情况。可是，把自己的一生献给这一事业，值得吗？”这种盲目乐观的情绪，当年不仅在物理学界中有，数学界也同样有。例如法国著名大数学家彭加勒（H. Poincaré, 1854—1912）于1900年在巴黎召开的国际数学家大会上表示了他对当时数学进展极为满意的看法：“今天我们可以说，绝对的严格已经取得了。”

正当科学界中的某些人陶醉于已取得的成绩时，经典物理和数学基础的矛盾——佯谬就接踵而至，暴露出了深刻的科学危机。物理学中被开尔文称为的“两朵乌云”（其实就是两个佯谬）以及数学中著名的“罗素佯谬”，拉开了科学革命时代到来的帷幕。由于科学家们缺乏思想准备，以致数学家弗雷格（G. Frege, 1848—1925）惊呼“算术的基础动摇了”，而物理学家洛伦兹（H. A. Lorentz, 1853—1928）更哀叹自己没有早死几年，否则就不会遇到这种可怕的危机了。危机暴露后的形势，如果用歌德在《诗歌和真理》中的话来形容大约是十分恰当的：“这非常惊人的事，几乎震动了整个安宁和平的世界。”

佯谬之所以是科学发展中不可避免的，那是因为科学理论总会包含有内在的逻辑矛盾，想一劳永逸地消除这种内在的逻辑矛盾，事实已经一再证明是不可能的。例如，科学理论总想穷尽所

有的（亦即无限多的）对象，然而创建理论的人又永远只能研究有限的对象，用有限个研究过的对象去穷尽无限多的对象，这本身就是矛盾。为了解决这个矛盾，科学家常用的法宝就是把适用于有限研究对象的结论外推到无限多的对象上去。这当然是一种很自然的尝试，然而正是这种外推的应用，带来了理论的自身的矛盾。1894年，德国天文学家西利格尔（Zeeliger，1874—1906）提出的“引力佯谬”（又称“西利格尔佯谬”）就是一个典型的例子。

经典宇宙学认为：①星体占据的空间是欧几里得空间，而且是无限的；②宇宙中有无限多星体，均匀分布在无限的空间里，因而宇宙中的物质密度处处都不等于零；③牛顿的万有引力定律适用于整个宇宙。

在以上三点假定之下，牛顿的万有引力理论将导致引力场中任一点的场强为无穷大，因而每一个物体都将具有无限大的加速度和速度。但事实上并没有出现这种情况。

这一佯谬产生的根源，就是因为运用有限的理论外推，来描述无限的宇宙的结果。一般说，外推当然是允许的，但应明确的是这种外推只能是一种近似的描述，而佯谬正是这种近似性的表现，它反映了有限理论的应用范围。恩格斯曾经正确地指出：“物质世界的有限性所引起的矛盾，

并不比它的无限性所引起的少，正象我们已经看到的，任何消除这些矛盾的尝试都会引起新的更坏的矛盾。”¹

综上所述，佯谬的出现归根结底是在于人类认识自身的矛盾，是现有理论不完备的征兆，是现有理论局限性的暴露，也是认识在进展的标志。随着人类认识的深化，佯谬的出现有它自身的必然性。每个历史时代，都有新的佯谬出现，向人类提出挑战。正确地认识到这一点，我们就既不会在佯谬未出现前趾高气扬，忘乎所以地幻想佯谬最终消失了，也不会在它出现后，惶然不知所措，甚至谦卑地匍伏在自然奥秘面前，承认自己无能为力。我们将会积极地迎接这一挑战，去开拓新的研究领域。真正的科学家从不把认识过程看成是有最终答案的，认识有如广阔无垠的大自然，是永恒的、不间断的，而且是永无止境的！

佯谬除了有它产生的必然性以外，它对物理学（或科学）的发展还起着重要的作用。对此进行探讨，是十分必要的。

首先，佯谬是科学发展的直接动因之一。在物理发展史上，我们可以找到许多著名的例子，证明物理学家的惊异（常被作为一个佯谬而提出）常常引起物理学的巨大进展，甚至曾经引起一场

¹ 《马克思恩格斯选集》第三卷，人民出版社，1972年，第90—91页

科学革命。例如，从伽利略时代以来，人们就知道不论任何物体，在地球的引力作用下产生的加速度都是相等的。这也就是说，由牛顿第二定律和牛顿的万有引力定律

$$m_{\text{惯}} a = m_{\text{引}} \frac{GM}{R^2}$$

得出的 $\frac{m_{\text{引}}}{m_{\text{惯}}} = a \left(\frac{R^2}{GM} \right)$

是一个普适常数。上式中 $m_{\text{惯}}$ 和 $m_{\text{引}}$ 分别表示物体的惯性质量和引力质量， M 是地球的质量， R 是物体距地心的距离， G 是万有引力常数， a 是物体的加速度。

我们对这一真理是如此之习惯，以至于根本不觉得它有什么值得人注意的地方。但爱因斯坦 (A. Einstein, 1879—1955) 却对此觉得万分奇怪，他曾经这样说：“在引力场中一切物体都具有同一加速度。这条定律也可以表述为惯性质量同引力质量相等的定律。它当时就使我认识到它的全部的重要性。我为它的存在感到极为惊奇，并猜想其中必定有一把可以更加深入地了解惯性和引力的钥匙。”^① 爱因斯坦用一个佯谬的形式表示了他的惊奇：为什么任何物体的引力质量和惯性质量之比是一个普适常数，而与具体物体的性

① 《爱因斯坦文集》第一卷，商务印书馆，1979年，第320页。

质无关？他相信，这一佯谬的解决，一定可以揭示惯性力和引力之间必然存在的更深刻的联系。在这一信念的激励下，爱因斯坦终于创立了最杰出的物理理论——爱因斯坦引力理论。

其次，佯谬作为一种推理方式，在物理发展史上起过多方面的作用。在许多情况下，佯谬起着反驳和证明的作用，例如伽利略为了反驳亚里士多德（Aristotle，公元前384—322）关于物体自由下落时，物体越重，下落越快这一错误结论，他提出了“落体佯谬”。他问道：一个重物与一个同质料的轻物组成的连体在自由下落时，比重物单独下落时落得快一些还是慢一些？伽利略从亚里士多德的结论出发，推出了两个截然相反但又都十分合理的答案：轻物既然落得慢一些，那么在连体时必然影响重物而拖它的后腿，故连体下落时应比重物单独下落为慢；但从另一种观点看，连体的总重量比重物单独时重一些，所以连体作为一个整体来看，应该下落得比重物单独下落得快一些。结果，亚里士多德的结论在这一佯谬面前，就显得苍白无力，几乎没有反击的力量。

反驳本身就含有证明的力量。伽利略的“落体佯谬”不仅反驳了亚里士多德的错误理论，而且也为自己的正确理论的确证铺平了道路。我们还可以举爱因斯坦建立狭义相对论的过程说明这

一点。爱因斯坦在他的《自述》中曾回忆说：“经过十年沉思以后，我从一个悖论中得到了这样一个原理，这个悖论我在16岁时就已经无意中想到了：如果我以光速 c （真空中的光速）追随一条光线运动，那么我就应当看到这样一条光线就好像一个在空间里振荡着而停滞不前的电磁场。可是，无论是依据经验，还是按照麦克斯韦方程，看来都不会有这样的事情。”^①

爱因斯坦在这里提到的就是物理学史上著名的“追光佯谬”。如果根据牛顿（I. Newton, 1642—1727）的经典力学，以光速追随光线运动的人看到的是一个停滞不前的电磁场，但根据麦克斯韦（J. Maxwell, 1831—1879）电磁场理论，不可能有停滞不前的电磁场存在。因此，爱因斯坦说：“这个悖论已经包含着狭义相对论的萌芽。”

最后，佯谬对建立物理学新的理论，具有方法论的功能。

法国资产阶级启蒙运动思想家卢梭（J. J. Rousseau, 1712—1778）说过，通向谬误的道路有千百条，通向真理的道路只有一条。要发现哪一条道路能通向真理，人类是要付出极大的代价的。但人类在探索真理的过程中，总希望能走一条最

① 《爱因斯坦文集》第一卷，商务印书馆，1976年，第24页。

小耗散值的路径。物理发展史告诉我们，佯谬的提出和解决，可以使物理学家有希望通过捷径获得真理。这是因为佯谬常常是以极尖锐的形式向探索者提出迫切需要作出解释的二难问题。提出问题本身就是极有价值的事情。正如德国伟大数学家希尔伯特(D. Hilbert, 1862—1943)所说：“只要一门科学分支能提出大量问题，它就充满着生命力；而问题缺乏则预示着独立发展的衰亡或中止。”^①他甚至把提出问题看作是“通向那隐藏真理的曲折的道路上，……指引我们前进的一盏明灯，最终并以成功的喜悦作为我们的报偿。”^②更何况佯谬提出的问题还不同一般的问题，因为它或者指出了理论逻辑上的矛盾、不完备，或者指出了理论与实际自然现象的不符。这实际上就暗示：新的理论必需要以能够消除这一佯谬为前提。因而，佯谬提出的问题就具有某种程度的方法论功能。

例如，光度佯谬提出了一个人们长期无法解释的难题：如果我们假定星体均匀遍布于宇宙，根据计算，宇宙中星体的总光强应与地球周围半径 R 成正比。如果宇宙是无限的，那么天空将无比明亮，即使晚上也应如此。这样，光度佯谬对于原有的宇宙理论显然是一个严重的挑战，并迫

①②《希尔伯特》，上海科技出版社，1982年，第93、94页。

使物理学家和天文学家以这一佯谬为科学研究的新起点，去寻求新的宇宙学理论。这一新的宇宙学理论能否成立有一个极重要的条件，那就是它必须能够消除光度佯谬。当然，想消除光度佯谬的理论方案也不止一个，但毕竟比毫无边际的探索要容易得多了！

物理佯谬是一个很少人涉猎的领域，但我相信，这一领域是值得人们去探索的，通过对物理佯谬的产生和消除的分析，我们将看到物理学家们在创造性的思维过程中，如何寻找矛盾、建立佯谬，如何从错误转化为正确，从失败转化为成功。

神行太保为什么追不上乌龟

这种形式或那种形式的爱利亚的芝诺佯谬，引起了几乎整个关于时间、空间和无限的理论，这些理论从他那时起到今天，一直在被人们发展着。

——B. A. W. 罗素

这篇文章的标题也许会使你想到一个老掉牙的儿童故事：乌龟和兔赛跑。不过我想当你读了前面罗素（B. A. W. Russell, 1872 — 1970）的一段话以后，你大约又会想到，神行太保与乌龟赛跑的事怎么与法国大数学家罗素搅在一起了？

两千多年前，古希腊哲学家、数学家芝诺曾经提出过四个非常古怪的佯谬，其中有一个佯谬名叫阿基里斯（Achilles，希腊的神行太保）和乌龟赛跑。据亚里士多德在他所著的《物理》上的记载，芝诺是这样叙说的：“阿基里斯永远追不