

# 宇宙的来源

Stephen W. Hawking

**编者按** Stephen W. Hawking 是剑桥大学教授、国际著名理论物理学家。他在弯曲时空中的量子力学、量子宇宙学、时空和宇宙的创生等一系列基本问题上作了大量开创性的工作。他在 1986 年曾访问我国。1988 年 3 月他在美国加州大学伯克利分校就宇宙起源、小宇宙和黑洞的后裔以及时间的方向等问题作了一系列讲演。在讲演中介绍了当前引力物理和宇宙学研究中的最新进展和有关概念。内容深入浅出。本刊将对这三次讲演陆续报道,以飨读者。

宇宙的起源有点象那个古老的“怪圈”:是鸡生蛋,还是蛋生鸡?换句话说,是什么力量创生了宇宙,又是什么创生了那个力量?也许,宇宙或创生宇宙的力量永恒地存在着,不必被创生出来。直到最近,科学家们一直对这类问题不屑一顾,以为这是属于形而上学或宗教的,不属于科学的范畴。然而,几年前科学家开始意识到,科学定律也许在宇宙的创生时还有效。这样的话,宇宙可以是自持的,完全由科学定律决定。

有史以来,人类就一直在争论着,宇宙有没有开始,及宇宙是怎样开始的。大体上说,有两大学派。早期犹太教、基督教和伊斯兰教都相信宇宙是在相当近的时期内创生出来的。Usher 主教将圣经旧约中人的年龄加起来,算出宇宙是在公元前 4004 年创生的。用来支持宇宙近期起源说的事实是,不论在文化方面还是在技术方面,人类在显而易见地进化。我们记得第一位创下功绩或发明技术的人。因此,有理由说,人类不可能存在了那么久,不然人类应该进化到更高的程度。事实上,根据圣经推算出的创生时间与第四纪冰川的末期差不多。这似乎是现代人出现的时期。

另一方面,有些人如古希腊哲学家亚里士多德,不喜欢宇宙有开始的学说。他们感觉到,宇宙的开始意味着神的介入。他们宁愿相信,

宇宙已经存在,并将永恒地存在下去。比起需要被创生的东西来,永恒存在着的東西更完美些。关于人类进化的问题,他们的答案是,周期性的洪水或自然灾害反复地把人类置回到起始点。

两大学派都认为,宇宙本质上不随时间改变。要么宇宙在创生出来时就是现在的样子,要么宇宙象今天这样永恒地存在着。这在当时是很自然的信条,因为人的一身,甚至整个有记载的历史,是这样的短暂,其间宇宙并不发生明显的改变。在静止不变的宇宙中,宇宙是永恒地存在着还是在过去有限的时间内创生出来的,这确实是形而上学或宗教的事情,两学派的学说都能描述这样的宇宙。哲学家康德在 1871 年在那本不朽但晦涩难懂的书《纯粹理性的批判》中给出了这样的结论:对相信宇宙有或没有开始,都存在同等有效的论据。正如其书名所示,他的结论纯粹基于推理,没有考虑任何对宇宙的观测。那么,在不变的宇宙中,究竟什么东西是可以观测到的呢?

在十九世纪,地球和宇宙的其他部分随时间改变的证据开始累积起来。一方面,地质学家们认识到,岩石及岩石中化石的形成需要几亿甚至几十亿年的时间。这远远长于创世论者所相信的地球年龄。另一方面,德国物理学家玻耳兹曼发现了热力学第二定律。这个定律

说，宇宙的无序量(由熵来度量)总是随时间增长。象有关人类进化的争论一样，这个定律指出，宇宙只可能已演化了有限的时间，否则宇宙已退化到完全无序的状态，这时宇宙中所有的一切都处于同样的温度。

静态宇宙观的另一难题是：根据牛顿的万有引力定律，宇宙中每个星体都受到其它星体的吸引。这些星体怎么能够保持相互间的距离不变？它们会落到一起去！牛顿意识到了这个问题。在他给同时代杰出哲学家 Richard Bentley 的信中，牛顿同意，有限数目的星体不可能静止不动，它们会掉落至某个中心点，但是他认为无限数目的星体集合便不会掉落到一起，因为没有一个是可以落去的中心点。人们在讨论无限系统时可能会遇到难以觉察的陷阱，牛顿的推理便是一例。宇宙中的星体能够保持相互间的距离不变吗？用不同的方法将星体所受来自无穷多其它星体的力加起来，会得到不同的结论。现在我们知道正确的处理程序是：先考虑一个有限区域的星体，然后增加更多的星体，这新增加的星体大致均匀地分布在这区域之外。这有限数目的星体会落到一起去。根据牛顿的万有引力定律，在这区域外增加星体并不会停止星体的聚落。因此，无限数目的星体集合亦不能保持静止的状态。如果这些星体不相对运动着，星体之间的吸引力会使它们相互靠近。也可能，这些星体相互远离而去，而引力则减慢它们远去的速度。

尽管静态不变宇宙观遇到了这样的困难，在十七、十八、十九甚至二十世纪初，都没有人提出宇宙可能随时间演化。牛顿和爱因斯坦都错失了良机，没有能预言宇宙应该在膨胀，或者收缩。人们不该为此责备牛顿，因为他生活在发现宇宙膨胀之前 250 年。但是，爱因斯坦应该知道得更多些。然而，当他建立广义相对论来调和牛顿的理论和他的狭义相对论时，他却增加了一个所谓的“宇宙常数”，这个常数有着排斥引力的作用，可平衡宇宙中的引力效应。这样，一个静态的宇宙模型便是可能的了。

爱因斯坦后来说，宇宙常数是他一生中最大

的错误。这是哈勃发现之后的事情了。哈勃发现：遥远的星系在远离我们而去，其速度正比于与我们的距离。换句话说，宇宙不是静止的，它在膨胀。星系之间的距离在随时间增长。

宇宙膨胀的发现彻底改变了关于宇宙起源的讨论。如果由宇宙现在的运动状态，反演到 100 多亿年前的某个时刻，这些星系似乎该相互紧紧地挨在一起。这时宇宙的密度和时空的曲率都是无穷大，人们称此为“大爆炸”。在这样的条件下，所有我们已知的科学定律都失效了。这对科学来说是一场灾难，它意味着，仅仅靠科学是不能预言宇宙是怎样开始的。科学能表明的仅仅是：宇宙现在是这样，是因为宇宙过去是那样。但是，科学不能够解释为什么宇宙在紧接着“大爆炸”后是那样。

自然，这个结论令许多科学家不高兴。有几个理论试图避免“大爆炸”。其一是稳态理论：随着星系相互远离，物质不断地被产生出来，新的星系在空间中由这些物质形成。宇宙或多或少地以今天这样的状态一直存在着，并将永恒地存在下去。

稳态理论要求对广义相对论作些修正，以使宇宙能够持续膨胀，新物质能不断创生出来。所需的创生率是相当低的：每年每立方公里一个粒子，因此不会与观测矛盾。这个理论还预言，不论在空间中还是在时间上星系和类似的星际物体的平均密度该是常数。剑桥大学的 Martin Ryle 和他领导的小组调查了河外星系的电磁波源。Ryle 的调查表明，宇宙中弱的电磁波源比强的电磁波源多许多。一般地说，电磁波源愈弱，源离我们愈远。有两种可能性：要么我们处于宇宙中这样一个区域，在这个区域中强源出现的频率较平均的低；要么源的密度在过去更高些。这两者都与稳态理论不相容，稳态理论预言电磁波源的密度在空间和时间上都应是常数。对稳态理论的致命一击是 1965 年发现的微波背景辐射，微波背景辐射具有热体辐射的特征。这里“热”这个词并不合适，因为其温度只在绝对零度以上 2.7K。宇宙

的确是个寒冷黑暗的地方！在稳态理论中不存在合理的机制来产生这样的辐射谱。这个理论便被抛弃了。

另一个力求避免单极的理论是由两个俄国科学家 Lifshitz 和 Khalatnikov 提出来的。他们认为，只有星系在相互正对着靠近或远离时，无穷大密度的状态才可能出现。只有这样，星系才会相遇于过去的某一点。然而，人们会期望当星系在相互靠近或远离时有一些侧向速度。因此，有可能宇宙经历了早期的收缩阶段，其中星系却避免了相撞。然后，宇宙又再度膨胀，却没有经历无穷大密度的状态。

当 Lifshitz 和 Khalatnikov 提出他们的理论时，我正在寻找题目来完成我的博士论文。在此之前两年，医生诊断出我患有 ALS 或运动神经元疾病。医生告诉我，我只能再活两三年了。在这种情况下，似乎不值得作我的博士论文，因为我不期望能完成它。然而，两年过去了，我的身体并没有坏下去多少。此外，我那时订婚了。为了结婚，我必须有一份工作。为了得到工作，我必须完成我的论文。

其时，我对是不是存在“大爆炸”单极很感兴趣。这是理解宇宙起源的关键。和 Roger Penrose 一道，我们发展了一套新的数学方法，来处理这个及类似的问题。我们证明，如果广义相对论是正确的，则任何合理的模型都必须从单极开始。这意味着，科学只能预言宇宙有始点，却无法预言宇宙该如何开始。这只好留给上帝了。

观察人们对单极的态度的变化，是很有趣的。在我还是研究生时，没有人把单极当回事。现在，作为单极理论的结果，几乎所有的人都相信宇宙是从一个单极开始。但是，我却改变了主意，我仍相信宇宙有始点，不过始点不是单极。

广义相对论是一个经典理论，它没有考虑到这样的事实：粒子的位置及速度并不精确，而是弥散在一个很小的由量子力学测不准原理决定的区域。在通常的情况下，这没有什么影响，因为时空的曲率半径相对于粒子位置的不

确定性来说非常大。然而，单极原理指出，在宇宙膨胀阶段的始点，时空扭曲得非常厉害，只有极小的曲率半径。这时，测不准原理就很重要了。因此广义相对论预言了单极，却导致了它自身的崩溃。为了讨论宇宙的始点，我们需要一个能将广义相对论和量子力学结合起来的理论。

我们还不知道正确的量子引力理论的确切形式。目前最好的是超弦理论，但仍有些待解决的困难。有些特征，我们期望包含于任何可以生存下去的理论中。其一是爱因斯坦的想法：引力效应可由弯曲的或扭曲的时空来代表，时空的弯曲或扭曲是由其中的物质及能量引起的。在这弯曲的时空中，粒子努力以直线方式趋向邻近物质。然而，时空是弯曲的，物体的路径看起来也是弯的，象是由引力场引起的一样。

在最高理论中应该有的另一个特征是费因曼 (Richard Feynman) 的理论，即量子力学可以表达为“对粒子所历状态的求和”。按最简单的说法，粒子在时空中有各种可能的路径或历态，每个路径或历态都占有一定的取决于路径形状的几率。这个理论要能行得通，我们必须认为这些历态发生在“虚”时间，而非我们感觉到的实时间中。虚时间听起来象科学幻想中的东西，但它确是定义得很好的数学概念。在某种意义上，我们可以认为虚时间是垂直实时间方向的时间。我们先将所有具备某种性质的粒子历态（比如在某时通过某点的路径）相加起来，然后外推所得结果，回到我们生活的实时空中来。这种量子力学方法不为大家熟悉，但它给出了与其它方法一样的结果。

考虑量子引力的情形，按费因曼“对历态求和”的方法，需要对宇宙的各种可能的历态求和，即对各种不同曲率的时空求和，我们必须指定，什么样的弯曲空间簇应该包含在求和之中。对这些空间簇的选取决定了宇宙处于什么样的状态。如果定义宇宙状态的这个弯曲空间簇包含有单极，这空间簇的几率便不会由理论本身决定，而由某种任意的的方法指定。这意味着，科

学无法预言时空中这些单极历态的几率，因而不可能揭示出宇宙怎样行为。然而，有可能宇宙处于这样的状态，这个状态仅由那些不含单极的弯曲空间决定。在这种情形下，科学定律将完全地决定宇宙：人们不再需要宇宙之外的什么力量来决定宇宙如何起源。宇宙状态仅由非单极历态之和决定的想法，有点象一个醉汉在路灯下寻找他丢失的钥匙：钥匙可能不在这儿，但这是唯一他可能找到钥匙的地方。与此类似，宇宙可能并不处于仅由非单极历态之和决定的状态，但这是唯一可能由科学来预言其行为的状况。

1983年，吉姆·哈特尔（Jim Hartle）和我假定，宇宙的状态该由特定的历态簇之和给出，这个簇包含弯曲的空间，但不含单极。这些空间的体积有限，没有边界或边缘，就象地球表面，但比地球表面多二维。地球表面的面积有限，却没有任何单极、边界及边缘。我用实验证实过这一点：我环球旅行，并没有掉下去。

可以将哈特尔和我的假设表述为：宇宙的境界条件就是宇宙没有边界。只有宇宙处于“无边界”的状态，科学定律本身才能决定各个可能历态的几率。因此，只有在这样的情况下，已知的科学定律才能决定宇宙的行为。假如宇宙处于任何别的状态，在“对历态求和”中的弯曲空间簇就一定包括含有单极的空间。为了决定这些单极历态的几率，我们不得不求助已知科学定律以外的原则。这个原则将是我们宇宙之外的什么东西，我们不可能从宇宙内部推演出它来。另一方面，如果宇宙处于“无边界”的状态，从原则上说，我们能够完全决定宇宙的行为，精确至测不准原理所规定的界限。

如果宇宙处于“无边界”的状态，这对科学来说是件十分惬意的事情。我们怎么能知道宇宙是不是这样的呢？答案是，无边界的假设对宇宙的行为有确切的预言，如果这些预言同观测不一致，我们便知宇宙不是处于“无边界”的状态。因此，按照哲学家卡尔·波珀（Karl Popper）的说法，“无边界”假设是一个好的科学理论：它能由观测证伪。

如果观测与预言不一致，我们就知道，在可能的历态中一定含有单极。这便是我们所能了解的全部了。我们不能计算单极历态的几率，因此没有能力预言宇宙的行为。如果这种不可预见性只发生在一百多亿年前的“大爆炸”，你或许以为，这种不可预见性并不那么重要。但是，如果可预见性在“大爆炸”时极强的引力场中失效，那么当星体坍塌时可预见性也一样会失效。只是在银河系中，星体的坍塌每周便发生好几次。即使按天气预报的标准来看，我们的预见能力也太差了。

当然，人们也许并不关心对遥远星体的可预见性的丧失。然而，按照量子理论，任何不被禁戒的事情可能并且一定会发生。如果可能历态中有含单极的空间，那么这些单极可能发生在任何地方，不仅仅是在“大爆炸”或星体的坍塌。这意味着，我们不能预知任何事情。事实正相反，我们能够预知，这支持宇宙“无边界”的假设，而不支持单极。

“无边界”假设能预言些什么呢？首先，宇宙所有可能的历态在广度上是有限的，任何用来度量时间的量都有最大和最小值，因此宇宙既有始点，也有终点。然而，始点并非单极，有点象地球的北极。如果取地球表面的纬度来类比时间，可以说地球表面从北极开始，然而北极是地球表面上完美的平常点，没有任何特殊之处，和地球表面上其它任何一点一样，遵循同样的定律。类似地，我们选作为“宇宙始点”的事件，应当是时空中的一个平常点，象其它任何点一样，科学定律在始点和其它任何一点都同样地有效。

类比于地球表面，宇宙的终点应该与它的始点相似，就如地球的北极与其南极相象。然而，北极和南极对应宇宙历态的始点和终点，这是在虚时间中，而不是在我们所经历的实时间中。如果把“对历态求和”的结果从虚时间外推至实时间，那么在实时间中宇宙的始点和终点可能会很不一样。很难从细节上弄清楚无边界假设对宇宙的始点和终点作出怎样的预言。这两个原因。第一，虽然我们已知道引力的大

概形式和许多应该具备的特征，但是还不知道精确的量子引力定律。第二，即使知道了精确的定律，我们仍不能作出准确的预言，因为精确地求解这些方程更是困难得多的事情。然而，对无边界假设隐含着什么得到大致的概念，似乎是可能的。Jonathan Halliwell 和我作过近似计算，把宇宙看作一个光滑、均匀的背景，在这背景上有些密度上的微扰。在实时间上，宇宙从它的最小半径开始膨胀。膨胀的初期称为暴胀，此时宇宙的大小在极小的分数秒内增加一倍，就象有些国家的物价每年翻一翻。经济膨胀的世界冠军可能要算第一次世界大战后的德国：一条面包的价钱在数月内从不到一马克涨到数百万马克。但这和早期宇宙的暴胀比较起来，实在算不得什么：宇宙在极小的分数秒内增大了  $10^{30}$  倍。

这种暴胀是件好事情，它产生了这个大尺度上光滑均匀的宇宙，并且以刚好能避免重新坍陷的临界速率膨胀。暴胀还产生了宇宙中所有的物质，从无到有。当宇宙还是一个点时，象地球的北极，它里面一无所有。然而在我们能够观测到的这部分宇宙里，至少有 10—80 个粒子（在多大的空间体积内？——译者注）。这些粒子来自何处？答案是，相对论和量子力学允许物质以粒子反粒子对的形式从能量中创生出来。那么创生物质的能量从何而来？答案是，能量是从宇宙引力能那儿借来的。宇宙欠有巨量的负引力能债务，来精确地平衡物质中的正能量。在暴胀期，宇宙从引力能中大量地借债，来支持物质的创生。结果，便是“里根经济学”的胜利：一个生气勃勃、膨胀的宇宙，里面充满了实在的物体。巨大的引力能债务要等到宇宙终结时才须偿付。

早期宇宙不可能精确地均匀和各向同性，因为这将违背量子力学的测不准原理。应该有些对均匀密度的偏离。无边界假设意味着密度

上的差异在基态时便有了。这差异对应于测不准原理，是极微小的。然而，在暴胀期，差异会放大。暴胀结束后，宇宙在有的地方就会比别处膨胀得稍为快一些。在膨胀稍慢的区域，引力对物质的吸引进一步地减缓膨胀速度。最终，这个区域会停止膨胀，收缩形成星系和星体。因此，无边界假设能描述我们看到的复杂结构。此外，它还预言整个簇的可能历态及各历态的几率。这也是一个可能的历态，在这个历态里瓦尔特·蒙代尔（Walter Mondale）赢得了上次美国总统大选，尽管其几率很低。

无边界假设深刻地暗示了上帝在宇宙事务中扮演什么角色。一般地，人们接受这样的说法，宇宙按着既定的定律演化。或许，这些定律是由上帝制定的，但似乎上帝并不干涉宇宙中的事情，并不违背他自己制定的律法。直到最近，人们一直以为，这些定律不适用于宇宙的始点。这是上帝的事情：上帝给时钟卷紧发条，然后让宇宙按他想要的方式运行下去。宇宙处于现在的状态，是上帝选择初始条件的结果。但是，如果无边界假设成立的话，情形就大不一样了。这时，物理定律在宇宙的始点还有效，上帝便没有选择初始条件的自由了。当然，上帝还可自由地选择宇宙遵循的定律。但这已没有多大的选择余地了。或许，只存在为数不多的自洽的定律，能够衍生出象我们这样复杂的人类——我们能够问：上帝的本质是什么？即便只有一套独特的定律，那也只是一组方程而已。是什么给这组方程注进了魔力，并造出宇宙来供它们支配？最高的大统一理论真的那样令人信服，能够衍生出它自身的存在？或许，科学能够解决宇宙怎样开始，却永远无法回答这样的问题：宇宙为什么要存在？恐怕只有上帝知道。

（敬克兴根据 Stephen W. Hawking 于 1988 年 3 月 21 日在伯克利加州大学的讲演稿译，戚大海校）

（上接第 64 页）

90-33. 活躍的光盘物理学. (宫岡千里). 日本物理学会誌[日], 44(1989), No. 3, 169—173. 参 2.

90-34. 光盘光学. (小倉磐夫). 日本物理学会誌 [日], 44(1989), No. 3, 173—179. 参 19. (李国栋)