

时间有起始点吗？

Gabriele Veneziano

弦理论指出，大爆炸并非宇宙的起点，而是其前一存在阶段的结果。



大爆炸真的是时间的起点吗？抑或宇宙在大爆炸之前就已经存在？如果在 10 年前提出这样的问题，那简直是对宇宙学大逆不道了；绝大多数宇宙学家会认为，思考大爆炸以前的时间，就像打听北极以北的地方在哪里一样。然而，理论物理学的发展，尤其是弦论的出现，大大改变了宇宙学家的视角，大爆炸前的宇宙已成了宇宙学的研究前沿。

探索大爆炸之前发生过什么的新思潮，其实只是数千年来的理性钟摆的最新一次摆动。几乎在每一种文明中，终极起源的问题都会让哲学家和神学家忙个没完没了。它所关怀的问题让人应接不暇，其中著名的一个出现在 Paul Gauguin（高更）1897 年的名画中：“我们从哪里来？我们是什么？我们往哪里去？”这幅作品描绘了生老病死的轮回：每个人的起源、身份与宿命，而这份对个人的关怀，直接连系着宇宙的命运。人类可以寻根，追溯自身的血统，穿越世代，回到我们的动物祖先，再溯及生命的早期形式和初始生命，然后回到原生宇宙中合成的元素，再到更早期空间中的飘渺能量。我们的谱系树是否可以这样一直无休止地延伸下去呢？抑或它会终止于某处？宇宙是否也像人类一样，并非永恒的？

古希腊人曾就时间的起源有过激烈的争论。亚里斯多德主张“无”不能生“有”，而站

在了时间“没有起点”的阵营。如果宇宙不能“无中生有”，那它过去必然是一直存在的。基于这些理论，时间必定是朝着过去和未来两端无限延伸。而基督教神学家则倾向于相反的观点。奥古斯丁坚决主张，神存在于空间和时间之外，而且创造了时空和整个世界。有人问道：“神在创造这个世界之前在做什么？”奥古斯丁答道：“时间本身就是神创造的产物之一，所以根本就没有‘之前’可言！”

爱因斯坦的广义相对论，引导当代宇宙学家得出了几乎一样的结论。广义相对论认为，空间和时间是柔软可塑的实体。在大尺度上，空间本质上是动态的，会随时间而膨胀或收缩；它承载物质的方式，就像海浪承载浮物一样。1920年代，天文学家观测到遥远的星系正在彼此远离，从而证实宇宙正在膨胀。接着，物理学家 Stephen Hawking (霍金) 与 Roger Penrose (彭若斯) 在 1960 年代证明，时间不可能一直回溯下去。如果你把宇宙历史一直往回倒退，所有的星系终会挤到一个无穷小的点（称为奇点）上，这与它们掉进黑洞的意思差不多。每个星系或其前身都被压缩到零尺寸，而密度、温度和时空曲率等物理量则变成无穷大。奇点就是宇宙万物的起点，超过这一界限，我们的宇宙谱系树就无法再往前延伸了。

宇宙是均匀的？

这个无法避免的奇点，给宇宙学家带来了令人不安的严重问题。特别是，奇点与宇宙在大尺度上所展示的高度均匀性及各向同性似乎有矛盾。由于宇宙在大尺度上到处都相同，因此在相距遥远的区域之间，必以某种方式传递信息，以协调彼此的性质。然而，这与旧的宇宙学规范相抵触。

具体来说，不妨想一下从宇宙微波背景辐射释放后，这 137 亿年来发生的事情：由于宇宙的膨胀，星系间距离增大了 1000 倍，而可观测宇宙的半径，则增大了 10 万倍之多（由于光速超过宇宙膨胀速度）。我们今天看到的宇宙，有很大一部分是我们在 137 亿年所看不到的。的确，在宇宙历史上，现在那些来自最遥远星系的光，还是第一次到达银河系。

尽管如此，银河系与那些遥远星系的性质，竟然基本上是一样的。这就好比参加一个聚会，发现自己穿的衣服与十多位好友的一模一样。如果只有两人衣着相同，用巧合还可以解释得过去。可是如果十几个人衣着都相同，那八成是他们事先约好了。在宇宙学中，这个数字不是十几个，而是数万个——这是全天域微波背景中的天区数量，它们彼此独立，但统计上却完全等同。

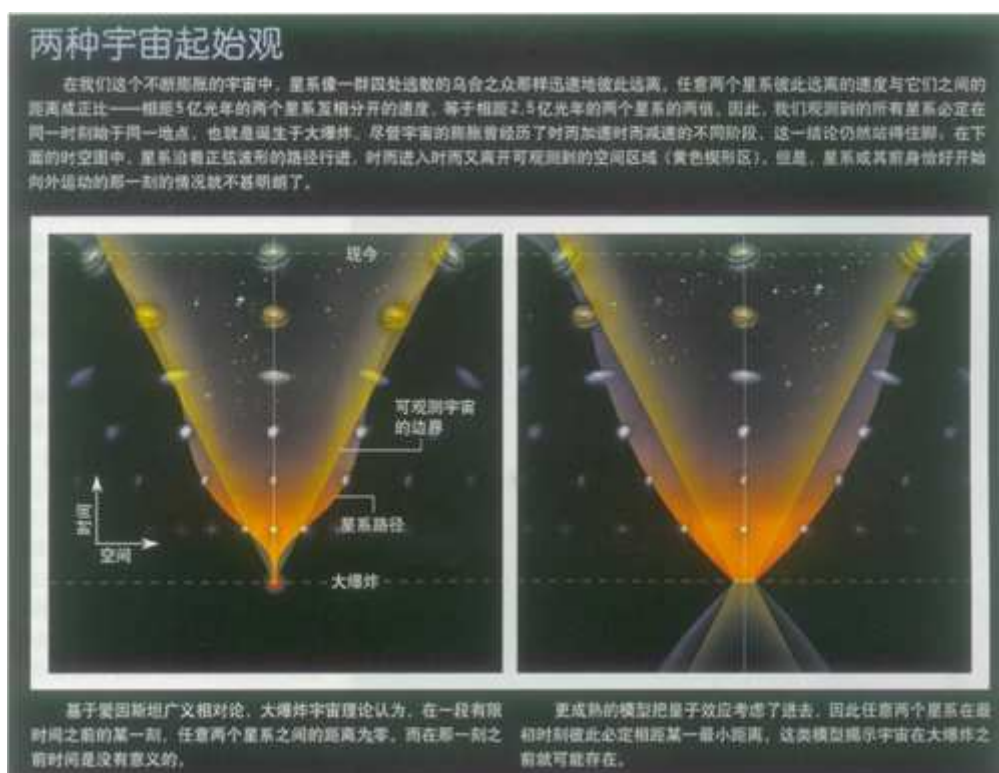
一种可能性是，这些空间区域诞生伊始便被赋予了相同的性质，换言之，均匀性只不过是个巧合。然而，物理学家想出了两种更自然的途径来摆脱僵局：让早期宇宙要么比标准宇宙小得多，要么老得多。任一条件（或者两者一起），都有可能实现各个空间区域之间的相互联系。

当前最流行的是第一种途径。假设宇宙在早期历史中曾经历一次快速膨胀，称为暴胀。在暴胀之前，星系或其前身全都紧密地挤在一起，因此可以容易地协调它们的性质。在暴胀阶段，由于光速赶不上暴胀的速度，它们便彼此失去了联系。暴胀结束后，膨胀速度开始放慢，因此各星系间又逐渐恢复了联系。

物理学家将暴胀所迸出的能量，归因于大爆炸之后约 10^{-35} 秒一个新的量子场“暴胀子”中所储存的势能。势能与静质能和动能不同，它可以产生引力排斥效应。通常的物质引力会减慢宇宙膨胀，但暴胀子却会加速宇宙膨胀。暴胀理论于 1981 年问世，至今已经解释了众多的精确观测结果[参见本刊 1984 年第 9 期 Alan H•Guth 与 Paul J•Steinhardt 所著《暴胀宇宙》和 2004 年第 4 期的专题报道《打开宇宙的四把钥匙》]。不过，还有一系列潜在的理论问题没有解决，首当其冲的是，暴胀场子究竟是什么？以及如此巨大的初始势能从何而来？

第二种途径较不为人所知，那就是避开奇点。如果时间不是始于大爆炸，如果在目前的膨胀开始之前，宇宙就已经存在很长一段时间了，那么物质就有充裕的时间把自己的分布安排得比较平滑。因此研究人员已开始重新检视导出奇点的推导过程。

推导过程中假设相对论始终有效，看来是大有问题的。在接近一般认定的奇点时，量子效应必定越来越重要，甚至起到主导的作用。正统的相对论没有考虑到这类效应，因此，认定奇点不可避免，无疑是过份相信了相对论。要弄清真正发生的情况，物理学家必须把相对论纳入到量子引力理论中。这个任务让爱因斯坦以后的物理学家伤透脑筋，直到 1980 年代中期，进展还几乎等于零。



弦论的革命

如今，有两个好方案出现了。第一个叫“圈量子引力”，它完整保留了爱因斯坦理论的精髓，只是改变了欲符合量子力学条件的程序[参见本刊 2004 年第 3 期 Lee Smolin 所著《量子化时空》一文]。过去几年中，圈量子引力的研究者取得了长足的进展，获得了非常深刻

的认识。然而，或许对传统理论的革命不够深入，因而无法解决引力量子化的根本问题。类似的问题在 1934 年也出现过，当时费米（Enrico Fermi）提出了他的弱核力有效理论，令粒子物理学家大伤脑筋。所有建立量子费米理论的努力，全都悲惨地一无所获。结果真正需要的，并不是新的技巧，而是在 1960 年代后期，格拉肖（Sheldon L•Glashow）、温伯格（Steven Weinberg）和萨拉姆（Abdus Salam）的电弱理论所带来的根本翻修。

第二个就是弦论，我认为比较有前途。弦论对爱因斯坦理论进行了真正的革命性改造，本文将着重讨论；尽管圈量子引力的支持者声称，他们也得出许多相同的结论。

弦论萌生于 1968 年，那是我用于描述核子（质子和中子）及其作用力的模型。尽管在问世之初引起不小的轰动，这一模型最终还是失败了，让位给了量子色动力学。后者用更基本的夸克来描述核子，而弦论就被舍弃了。夸克被禁锢在质子或中子内，彼此就好似用橡皮弦把它们拴在一起。现在回顾起来，最初的弦论其实已经抓住了核子世界中弦的要素。沉寂一段时间之后，弦论又以结合广义相对论和量子理论的姿态，东山再起了。

弦论的核心概念，是基本粒子并非点状物，而是无限细的一维实体，也就是弦。在基本粒子庞大的家族中，每种粒子都有自己的特性，这反映在一根弦有多种可能的振动模式上。这样一个看似简单的理论，如何能够描述粒子及其作用力的复杂世界呢？答案可以在我们所说的“量子弦魔术”中找到。一旦把量子力学套用到振动的弦（与小提琴弦没两样，只不过其上的振动以光速传播）上面，崭新的性质便出现了。所有这些性质，对于粒子物理学和宇宙学具有深刻的启示。

首先，量子弦的尺度有限。如果不考虑量子效应，一根小提琴弦可以一分为二，再一分为二，这样一直分割下去，直至最后变成一些无质量的点状粒子。但是分割到一定程度，海森堡的测不准原理就会介入，防止最轻的弦被分割到 10^{-34} 米以下。这个不能再分割的长度量子，用 l_s 表示，是弦论引入的一个全新的自然常数，与光速 C 和普朗克常数 h 并列。它在弦论的几乎所有方面都起着决定性的作用，为各种物理量设定了上下限，防止它们变成零或无穷大。

其次，就算没有质量的量子弦，也可以有角动量。在经典物理学中，角动量是绕轴旋转的物体所具有的一种性质。计算角动量的公式是速度、质量以及物体到转轴距离三者之乘积，因此无质量的物体不可能具有角动量。但在微观世界中，由于存在量子涨落，情况有所不同。一根微小的弦即使没有任何质量，也可以获得不超过 $2h$ 的角动量。这一性质令物理学家喜出望外，因为它同所有已知的基本作用力载体（如传播电磁力的光子或者传播引子的引力子）的性质不谋而合。回顾历史，正是角动量让物理学家注意到弦论中含有量子引力。

第三，量子弦要求在通常的 3 维之外，还存在额外的空间维度。经典的小提琴弦，不管时空的性质如何，都可以振动，而量子弦就挑剔多了。要使描述量子弦振动的方程能够自洽，时空必须是高度弯曲的（这与观测结果相矛盾），否则它就应该含有 6 个额外的空间维。

第四，物理常数（出现在物理方程中并决定自然界性质，例如牛顿常数与库仑常数）不再具有任意给定的固定值。它们在弦论中以场的形式出现，就如电磁场一样，可以动态地调整它们的数值。在不同的宇宙时期或者在相隔遥远的空间区域，这些场可能取不同的值；即使到了今天，这些常数可能还会有微小幅度的变化。只要观测到任何这类变化，可就是弦

论的一大进展了[相关文章即将在本刊登载]。

这其中的所谓“膨胀子场”是整个弦论的关键，它决定了所有作用力的总强度。弦论学家对膨胀子特别感兴趣，因为它的量值可以重新解释为一个额外空间维的尺度，从而给出一个 11 维时空。

量子弦使物理学家最终认识到，自然界存在新的重要对称，称为“对偶性”(duality)，它改变了我们对尺度极小的微观世界的直觉。我曾提到一种对偶性：通常情况下弦越短便越轻，但如果我们想要把弦的长度缩短到基本长度 l_s 以下，那么弦反而会重新变重。

另一种对称称为 T 对偶性，它指出，额外的维度都是等价的，而与其尺度无关。之所以会出现这种对称，是因为弦的运动方式可以比点状粒子更复杂。试考虑一个圆柱状空间上的一根闭合弦（称为圈），此空间的圆形横截面代表一个有限的额外维。除了振动之外，该弦还能整个地绕圆柱转动，或者缠绕于圆柱一圈或数圈，就象橡皮筋绕在纸筒上一样。

这两种状态下，弦的能量消耗与圆柱尺度有关。卷绕的能量与圆柱的半径成正比。圆柱越大，弦就拉伸得越厉害，因此其卷绕所含的能量也就越多。但是，当整个弦绕圆柱运动时，其能量就与圆柱半径成反比了。圆柱越大，波长就越大（相当于频率越低），因而能量就越小。如果用一个圆柱取代小圆柱，那么两种运动状态就可以互换角色。先前由圆周产生的能量现在改由卷绕产生，而先前由卷绕产生的能量则通过圆周运动产生。外部观测者看到的只是能量的大小而不是其起源。对外部观测者而言，圆柱半径无论大小在物理学上都是等价的。

T 对偶性通常用圆周状空间来描述（这种空间的一个维度即圆周是有限的），但它的一个变种适用于通常的 3 维空间，这种空间的每一维都可以无限地延伸下去。在谈论无限空间的扩展时务必谨慎。无限空间总的大小是不会变化的；它永远都是无限大。但这种空间内所包容的诸如星系之类的天体却可以彼此相距越来越远，从这个意义上说，无限空间仍然能够膨胀。关键的变量不是整个空间的大小，而是它的尺度系数，即衡量星系间距离变化的数值，它表现为天文学家所观测到的星系红移。根据 T 对偶性，尺度系数较小的宇宙等价于尺度系数较大的宇宙。爱因斯坦的方程里不存在这类对称性；弦论实现了相对论和量子论的统一，此种对称性也就自然地脱颖而出，膨胀子则在其中起了关键的作用。

多年来弦理论家曾认为 T 对偶性仅适用于闭弦而非开弦（开弦的端头是松开的，因此这种弦不能卷绕。）1995 年，美国加州大学圣巴巴拉分校的 Joseph Polchinski 意识到，如果在半径出现由大到小或由小到大的转换时，弦端点处的条件也发生相应的变化，那么 T 对偶性就适用于开弦。此前物理学家所假定的边界条件是弦的端点不受任何力的作用，因此可以自由地甩来甩去。而 T 对偶性则要求这些条件变成所谓 Dirichlet 边界条件，即端点处于固定状态。

任何给定的弦可以兼有两类边界条件。例如，电子所对应的弦其端点或许可以在 10 个空间维的 3 维中自由运动，但在其余 7 维中却是固定的。这 3 个维构成了一个名为 Dirichlet 膜（D-膜）的子空间。1996 年，加州大学伯克利分校的 Petr Horava 和美国普林斯顿高级研究所的 Edward Witten 提出，我们的宇宙就位于这样一种膜上。电子和其他粒子只能在一部分维中运动，这就说明了我们为何无法领略空间的整个 10 维风光。