

暴涨——宇宙年少时

王 一

热大爆炸宇宙学的成功：宇宙学的标准模型

工业上一种产品的成功，莫过于成为业界的标准。同样地，科学中一个理论的成功，莫过于被誉为标准模型。热大爆炸宇宙学，正是这样一个标准模型。在介绍今天故事的重点——暴涨之前，让我们回顾一下，作为现代宇宙学的标准模型，热大爆炸宇宙学，如何描述宇宙的现状、过去和未来。我们的宇宙，从诞生至今，已经有 137 亿岁了。这相当于人类几千年文明史的几百万倍。宇宙浩瀚无垠，当今科学尚不能确定整个宇宙空间的大小，是有限还是无限。然而，我们能观测到的宇宙总是有限的。这是因为，宇宙中最快信使是光，而光传播的速度是有限的。当我们看太阳，进入我们眼帘的是八分钟前离开太阳表面的光线，因为地球和太阳相距光行走 8 分钟的距离。同样地，我们可以看到最远的疆域，即是光行走 137 亿年的距离，在此之前，宇宙还没有变得透明，光还不能在宇宙中自由穿行。

实验表明，宇宙在膨胀。也就是说，时间越早，宇宙越小。正如压缩气体，气体会变热，时间越早时，宇宙也越热。早期的宇宙正如一锅热汤，各种粒子在热汤里面频繁地碰撞，达到混乱的平衡。随着时间推移，温度降低，宇宙逐渐冷却，从一团“热汤”形成我们今天熟悉的宇宙，这种混乱的平衡才逐渐被有秩序的宁静所取代（图 1）。

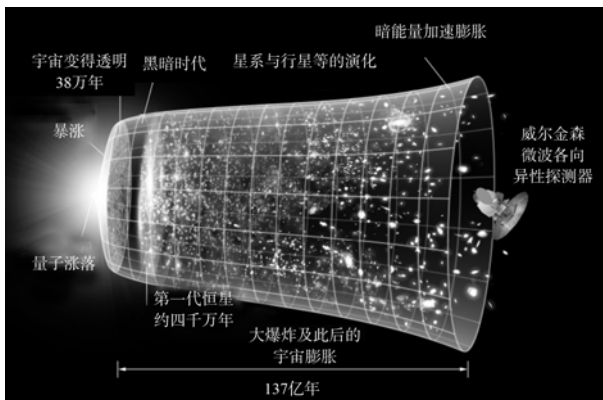


图 1 从左到右，显示了宇宙从暴涨到现在的简要历史
(图片来源：WMAP 实验组官方网站)

当宇宙“诞生”时，极高的温度使得绝大多数

粒子的动能远大于其静止时的能量，于是这些粒子像光一样运动。这时期的宇宙称为辐射为主的宇宙。随着宇宙膨胀，这些辐射成分被稀释得比静止能量为主的“物质”成分更快。于是，宇宙由辐射为主过渡到物质为主。当宇宙变得物质为主时，宇宙已经几千岁了。

宇宙继续膨胀变冷。当宇宙 38 万岁的时候，宇宙“热汤”已经不足以煮烂原子。电子在原子内部安家，于是，电子和光子之间的碰撞不再频繁发生，光子从此可以自由运动，也就是说，从此以后，宇宙变得透明。这个时刻发出的光线，穿越了百亿年浩瀚的时空，到达我们，是我们能看到的 earliest 的光线，是宇宙大爆炸的余辉。这余辉被称为微波背景辐射。“微波”告诉我们当这最早的光线到达我们时，波长在微波波段。“背景”则说明最早的光线从四面八方向我们而来，彼此间只有极其微小的差异。无线电视机收不到节目时，屏幕上呈现的雪花，就有百分之几来自微波背景辐射。

此后，宇宙进入了黑暗年代。除了大爆炸的余辉自由传播，再没有什么为宇宙增添光亮。直到四亿年后，第一颗恒星开始发光，宇宙中又重新变得生机盎然。最后，当宇宙诞生 137 亿年后，有了我们，来探究关于宇宙的话题。

顺便提及，如今，宇宙又进入了一个新的阶段。正如从辐射为主到物质为主的“朝代更替”，如今，一种新的能量形式正在宇宙中发展壮大。我们对这种新能量形式的起源和性质几乎一无所知，只知道它在驱动宇宙晚期的加速膨胀。作为宇宙“热历史”的鲜明对照，宇宙可能面临着加速膨胀的“冷未来”。这股神秘的未知能量叫做“暗能量”。暗能量的“暗”，原本是隐藏，是神秘。而暗能量的“暗”，同样是淡出，是老去。年轻时，看宇宙中的涨落进入视界，形成星系；而今，却将直面旧友依次别离，隐去在天边，化作这世间最黯淡的星辉。如何获得，注定亦将如何失去；曾经的喧嚣，注定亦将归于沉寂。或许，暗能量将是我们宇宙的告别演出。

热大爆炸宇宙学的困惑：巧合还是另有隐情

以寻找宝藏为情节的小说中，我们总是先察觉

种种蛛丝马迹，而后发现，这些暗示不是巧合，事实上，它们背后隐藏着一个巨大的秘密。宇宙学正是这样一部小说。这里首先让我们来找出暗示秘密的各种蛛丝马迹。

微波背景辐射是一张藏宝图 微波背景辐射就是一张藏宝图，里面的种种内在关联，向我们指出宇宙早期的秘密所在（图 2）。图 2（a）是微波背景辐射的“藏宝图”。椭圆形的区域，像世界地图表征整个地球一样，表征整个天空中微波波段的温度涨落。1965 年，藏宝图已经被粗略地绘制出来，然而其中空间不同区域的关联还尚未被揭示。从 1992 年开始，宇宙学家开始从实验上确认暴涨所预言的“大尺度关联”。图 2（b）是宇宙中微波波段温度涨落的大尺度关联与随机涨落的对比。图中波浪形

曲线表示具有大尺度关联的“标度不变谱”，这与实验符合得非常好。直线表示没有关联的随机噪声，已经被实验排除。

打一个比方，一个花瓶摔碎了，我们得到满地碎片。观察一块碎片上有什么花纹固然有趣，但是，我们还可以发现这些碎片的边缘具有规律——它们原来可以严丝合缝的拼接起来。重现一个完整的花瓶，则是一件更有意思的事情。下面，我们来看一看宇宙学中，是不是也有什么被“摔碎”了，因而才产生了我们现在的宇宙。

从微波背景辐射的实验我们可以看到，尽管宇宙大尺度上非常均匀，但是仍然存在着量级为 10^{-5} 的相对涨落。这些涨落随时间演化，形成了今天的宇宙中星系等结构。

实验表明，虽然每个小区域的涨落看起来是随机的，但是如果把不同区域的涨落拿来比较，就会发现不同区域的涨落之间居然有关联。宇宙的不同区域之间存在关联，说明这些区域在宇宙早期是有联系的。这些区域相当于花瓶的碎片，涨落相当于碎片边缘的规律。现在的碎片拼接起来，就可以重现宇宙早期那个完整的花瓶。

读者可能对此并不奇怪：宇宙本来就是膨胀的，所以现在分布于空间各处的涨落碎片在宇宙早期有相互联系看起来并没有什么稀奇。但是，宇宙比花瓶更奇妙之处在于，如果宇宙的早期一直是辐射为主，没有新的物理现象出现，那么宇宙的各大片的碎片之间从来不会有因果联系！没有因果联系的时空区域，就好比不同工匠在互不商量的情况下各自制造出的碎片，它们怎么能严丝合缝地拼成一个花瓶呢？

说得更专业性一点，宇宙一直在膨胀，光也一直在宇宙中传播，在物质为主和辐射为主的时期，由于宇宙减速膨胀，光的传播速度比宇宙膨胀的速度快。换言之，我们能看到的東西一直是越来越多的。于是，随着时间向前追溯，有因果联系，也就是互相能“看到”的宇宙区域将越来越小。所以，我们今天看到的微波背景辐射图上相互距离较远的区域（角度大于约 1 度的区域），都是在物质为主和辐射为主时期不可能有因果联系的。它们真的没有因果联系吗？没有因果联系的区域怎么能出现相互关联的扰动呢？

消失了的遗迹 再举一个例子来类比。我们都

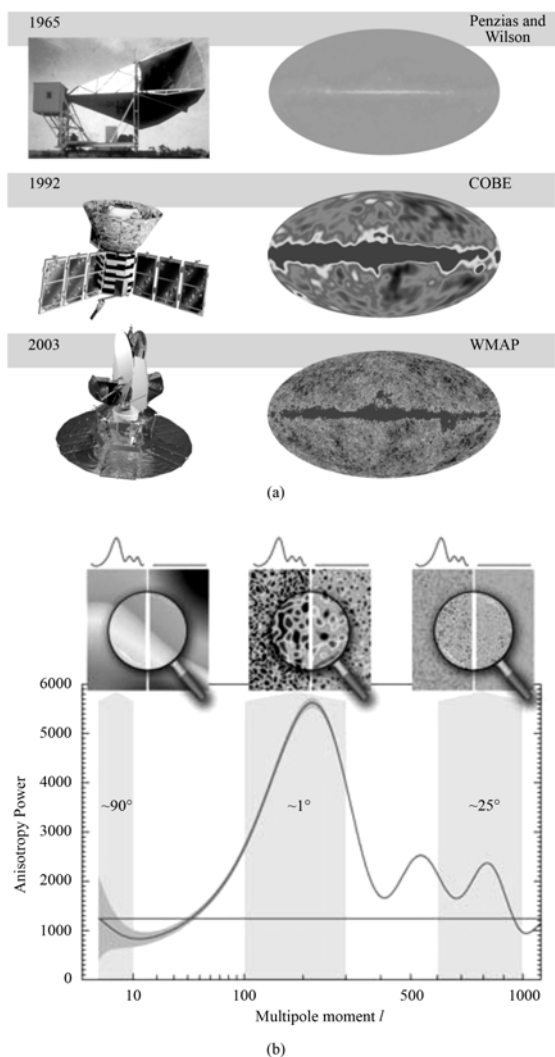


图 2 (a) 微波背景辐射的“藏宝图”；(b) 宇宙中微波波段温度涨落的大尺度关联与随机涨落的对比
(图片来源：WMAP 实验组官方网站)

知道，考古学上出土过很多古人类化石，从中我们能够看到从原始人到现代人一步一步的演化过程。我们可以想象，假如人类从来都没有发现过这些古人类化石，将是多么奇怪的事情。进化论表明，人应该是逐步进化而来的，可是他们的遗迹竟然消失了！我们是不是会想象，有什么秘密的力量，把这些遗迹藏起来了呢？

宇宙学中正是如此！按照热大爆炸宇宙学，早期极高温，极高密度的宇宙明明应该留下一些遗迹。这些遗迹明明应该现在还“在这里”的，但是它们现在居然消失得无影无踪。

这些遗迹叫做“拓扑孤立子”。拓扑孤立子又称拓扑缺陷，可以是一种特殊的粒子（例如磁单极），也可以是一条线（例如宇宙弦）或一个面（例如领域墙）。从量子场论的观点，像电子、光子这样的普通粒子可以看成是相应的场在小范围的激发态。而孤立子则与场的大范围拓扑性质有关，是时空不同区域的场拼接到一起时不能严丝合缝的地方。想象有一条只能容纳一辆车通行的很长的小路，两辆车从相对的方向驶入，当两辆车开到了中间，如果谁都拒绝退让，就只能卡在路中间了。真空也是一样。真空是局部能量最低的状态。在宇宙冷却的过程中，宇宙从一个各种场普遍存在激发的状态向真空态演化。如果一个理论存在多于一种可能的真空态，那么，在宇宙冷却过程中，空间不同地方不一定冷却到同一个真空。这些不同的真空互不相让，在它们相邻的地方就形成了所谓的“拓扑孤立子”。

根据流行的大统一理论，宇宙冷却到大统一的能量标度的时候会产生磁单极。由于每个哈勃体积表示一个因果连通区域，根据上一段的论述，磁单极的数密度约是当时的每个哈勃体积有一个磁单极。这些磁单极应该充满了我们现在所观测到的宇宙。但是，目前我们连一个磁单极都没找到过。它们躲到了哪里呢？

热宇宙幕后的指使者 日常经验告诉我们，新生事物往往最开始的时候是很弱小的。例如人，组成人的单位是细胞。而人最开始就是从从一个细胞（受精卵）经过很多次分裂分化形成的。让我们假想，有一种生物，其最初的受精卵就包括数以亿计的细胞，那么我们一定奇怪这个生物是怎样“一下子”产生出来的。

而宇宙正是这样令人奇怪。组成宇宙的长度单

位是普朗克尺度，也就是 10^{-35} 米，比这个尺度更小的距离下时空的概念不再适用。如果热大爆炸宇宙学不增加新的内容，那么可以计算，宇宙从诞生开始，就至少有 10^{29} 个普朗克尺度这么大。组成宇宙熵的单位是“一”，但是如果热大爆炸宇宙学不增加新的内容，那么宇宙诞生开始，就具有 10^{87} 这么多单位的熵。这样奇怪的现象，如果不是巧合，那么一定暗示着新物理现象的出现。

平坦空间是精细调节了的跷跷板 随便抓来一只猫和一只狗放在一个灵敏的跷跷板的两端，等上一段时间，就会分出谁轻谁重。如果它们站在跷跷板上一整天，而跷跷板仍然没有偏向任何一边，那就很奇怪了。因为这说明我们随便抓来的两只动物居然是精确地一样重。

而宇宙正是如此。爱因斯坦方程告诉我们，物质等于时空弯曲。如果三维空间的弯曲程度是跷跷板，辐射与物质的能量是猫，宇宙的膨胀速度是狗，那么我们等上足够长的时间，应该能够看到三维空间的弯曲。但是我们等了足足 137 亿年，居然跷跷板还是平的！

把三维空间的弯曲程度比作跷跷板是恰当的，因为在辐射或物质为主的宇宙中，三维空间的弯曲程度和跷跷板有一个共同的关键属性，就是会越来越远离平衡。实验看到，在宇宙诞生 137 亿年后的今天，宇宙在三维空间上仍然是很平坦的。这样，可以计算，在宇宙刚诞生一秒钟的时候，跷跷板两边的辐射与物质的能量和宇宙膨胀表征的等效能量密度的差别要小于 10^{-16} 。而如果宇宙更早期一直是辐射为主的，那么在宇宙量子诞生的时候，时间是 10^{-43} 秒，跷跷板两端的差异则要小于 10^{-60} ！物理上，并没有什么原理告诉我们辐射与物质的能量和临界密度导致的时空弯曲要非常接近，它们的差别应该和随便抓来的一只猫和一只狗没什么区别。那么，究竟是巧合还是有什么内在的道理，使得它们的重量如此接近呢？

贪婪的真空，暴涨的宇宙

有一个简单而疯狂的想法，能一举解决前面提出的所有问题。这个想法就是：在宇宙诞生之初，曾经历过一个加速膨胀的阶段。这种加速膨胀叫做暴涨。

正是由于暴涨，两个有因果联系的区域被迅速的膨胀拉开，变得在加速期间不再有因果联系。直

到加速阶段结束后很久，这两个区域才重新能够建立联系。这就解决了仿佛花瓶碎片的微波背景辐射关联问题。

正是由于暴涨，先前产生的磁单极密度被极其迅速地稀释，使得当今空间的磁单极密度小到不能被探测到。这就解决了消失的遗迹这一桩疑案。

正是由于暴涨，在能量密度下降很小的同时，宇宙膨胀如此之快，制造出了一个足够大的宇宙。加速膨胀的末期，推动宇宙加速膨胀的能量衰变成物质，又制造出了足够多的熵。正是加速膨胀的阶段，一手打造了宇宙当今如此巨大的规模。

正是由于暴涨，把三维空间迅速拉得非常平坦，创造了精确一样重的能量猫和膨胀速度狗，使得三维空间弯曲程度的跷跷板直至今日还保持着平衡。

暴涨一个简单的假设，就解决了以上的诸多疑难，可以说是物理学中经济和有效地解决问题的范例。但是，物质和辐射为主的宇宙都是减速膨胀的。怎样才能使宇宙处于加速膨胀状态呢？

宇宙膨胀加速还是减速取决于宇宙膨胀过程中，宇宙组成成分的稀释速度。物质和辐射都不能使宇宙加速膨胀，原因是物质和辐射在宇宙膨胀过程中被稀释的速度都太快了。为了使宇宙能够加速膨胀，我们提出问题：有没有什么东西，在宇宙膨胀过程中稀释得足够慢，甚至不被稀释呢？

想象一个大小可变的密封盒子，里面装上什么东西，才能使得当我们让盒子变大的时候，这种东西的密度仍然保持不变呢？答案是：真空。

读者可能反对说，这怎么算数呢？真空就是代表没有东西嘛，换句话说，真空这家伙不是东西的！但是，让我们来仔细想想，真空真的不是东西吗？

量子场论的研究表明，真空不是空的，真空中充满着正反虚粒子的产生和湮灭。既然真空不是空的，真空就可能具有能量。于是真空也会令时空弯曲。同时，当空间体积被产生出来的时候，真空被原样地产生出来。于是，真空不仅是东西，还正是我们要找的宇宙膨胀时能量密度不变的东西。我们把真空的能量简称为真空能。

于是，真空能起到了推动宇宙暴涨，从而解决宇宙学疑难的作用。但是，真空本身还有一个缺点，就是太难控制了。如果真空任性地暴涨起来没完没了，也产生不了我们现在观测到的宇宙。于是，我们退而求其次，找一个类似于真空的东西，来推动

宇宙的加速膨胀。这个替代品就是标量场的势能。标量场是类似空间中温度分布这样的一个场，在空间每一点上对应一个数。如果标量场的势能够足够平坦，那么就好像一个非常平缓的山坡上，小球的滚动会很慢一样，标量场的能量随宇宙膨胀变化很慢，形成一个有效的真空能。这个有效的真空能，既可以驱动宇宙的加速膨胀，又可以听话地在需要的地方停住脚步，还可以在需要产生其他物质的时候通过自身衰变将物质生产出来。于是，标量场是暴涨的再好不过的推动者。

暴涨中的扰动：创世者的呼吸

创始者的呼吸 即使再狡猾的凶手，作案的时候都会留下痕迹。暴涨时期，宇宙膨胀如此之快，使得宇宙中几乎所有东西都被稀释掉了。可是，再强大的稀释作用，都不能破坏量子力学的测不准原理。测不准原理的刚强个性，使得稀释作用越强，量子涨落越大。暴涨中的量子涨落像创始者的呼吸，在当今的宇宙中留下了暴涨的几乎唯一的痕迹。

量子涨落无处不在，无时不有。为什么偏偏暴涨阶段量子涨落留了下来，而日常生活中，量子涨落却往往不见踪影呢？

原因是，日常生活中的量子涨落往往能够被“平均”掉。但是在暴涨期间，由于宇宙加速膨胀，在 10^{-40} 秒的宇宙特征时间内，宇宙的体积就会膨胀20倍。通过量子涨落产生的虚粒子对还没来得及湮灭掉，就被新生长出来的空间分隔开，彼此远离以至于不再能看见对方。具体的计算表明，这个粒子对被拉开的过程中，粒子数量也有所增加，于是量子的涨落凝固下来，成为了经典的扰动。经典扰动以一个守恒量的形式存在，从宇宙诞生之初，经由38万年时背景辐射产生，直到137亿年后被我们看到。CMB中的温度涨落，就是这个凝固下来的经典扰动。

星系结构形成的种子 当今的宇宙虽然大尺度上近似是均匀的，但又不是完全均匀的。宇宙中存在 10^{-5} 量级的密度涨落，这个密度涨落最终形成了超星系团、星系团、星系这样的宇宙结构。这样的密度涨落，以及宇宙中的结构，是怎么形成的呢？

通常的物质，比如一盆水，放在那里，它不会自发变得有的地方更蓬松有的地方更稠密。这是因为水分子之间既有引力又有斥力，使得分子

不能自发结团。但是，设想一种物质，内部只有引力相互作用，而斥力则可以忽略。那么，这种物质内部只要有一点小的不均匀性，这个不均匀性就会增长，导致大范围的结团。物质为主的宇宙就是这样的物质。这是因为在大尺度上，电磁、弱、强相互作用早已被中和掉了，只有引力起作用，而引力自然是互相吸引的。所以，引力会导致结构的形成。

但是，光有引力还不够，宇宙还要有初始的不均匀性才行。这初始的不均匀性，就是暴涨中凝固下来的扰动。计算表明，正是暴涨中凝固下来的扰动，形成了宇宙的大尺度结构。

永恒暴涨：宇宙外面的宇宙

宇宙“外面”有什么 首先，这个问题有没有意义呢？它是不是和“北极的北边有什么”一样，是一个“伪问题”呢？这个问题是否有意义，取决于什么叫“宇宙”。

前面，我们一直在模糊地、感性地使用宇宙这个概念。“宇宙”这个概念可以有两种理解：历史上，宇宙最早指所有时间和所有空间组成的区域。这也正是宇宙一词的来历。最先创造宇宙一词的是墨子，他用“宇”来指东、西、南、北，四面八方的空间，用“宙”来指古往今来的时间，于是，宇宙包括了“整个”时空。

但是，采用这种宇宙的定义在物理上并不方便。物理上，通常有两个概念和宇宙的定义有关。一个是可观测宇宙，也就是从暴涨结束后到现在我们原则上能看到的整个区域。在辐射或物质为主的宇宙膨胀阶段，可观测宇宙的区域是随着时间增大的。另一个概念是如果我们能等到无穷远的将来，那么我们能看到的空间区域。读者可能会问，如果我们能观测无穷长时间，能等到无穷远的将来，难道还不能观测到所有的时空区域吗？答案是不一定能。因为如果宇宙在整体加速膨胀，那么就会有有的区域对我们来说，“退行”的速度比光速还快（附注：这里的“退行速度比光速还快”，并不与狭义相对论中“物体运动速度不能超过光速”的结论矛盾。狭义相对论所禁止的超光速，要求观测者和运动物体在一个足够小的时空范围内，以至于这个范围内的时空可以近似为平直时空。而这里的“退行速度比光速还快”，则是时空本身生长的结果，需要从广义相对论的角度来理解。可以用一个类比来显示出这两

种情况之间的区别：一只蚂蚁爬行的速度不能超过蚂蚁所能爬行的最大速度。可是，如果这只蚂蚁在一只气球上，而我们正在迅速吹这只气球，则相对于我们而言，这只蚂蚁“退行”的速度则可能超过蚂蚁所能爬行的最大速度。）——也就是说这个区域即使通过向我们发光来试图联系我们，光信号也只能离我们越来越远而不是越来越近。这个区域和我们在无穷长时间中可以观测到的区域的交界称为未来事件视界。在一个加速膨胀的宇宙中，和我们本来可能有因果联系的天体不断地通过未来事件视界跑到不能与我们有因果联系的区域。由此可见，即使我们有耐心、有能力等无穷长的时间，我们也不一定能看到“整个”空间区域。

如果采用第一个定义，宇宙就是可观测宇宙，那么，宇宙外面自然还有空间，在未来我们不断能观测到现在在“宇宙外面”的空间区域。Tegmark甚至计算过，在 10^{28} 米之外（这里，他假设了宇宙在这么大范围内仍然是平坦均匀各向同性的。这个假设在暴涨理论中不一定成立），会存在身体的每一个细胞都和我们一模一样的人。可以说，这个层次上，宇宙外面仍然是空间。不过，这个层次的“宇宙之外”并没有给我们带来多少惊奇，而只是我们早就知道的“天外有天”而已。

然而如果采用第二个定义，宇宙是未来事件视界之内的区域，那么，宇宙外面有其他的宇宙。这些宇宙的总和被称为“多宇宙”。而“多宇宙”，则是“永恒暴涨”的必然产物。

什么是永恒暴涨呢 暴涨期间，在一个哈勃时间内，宇宙的体积变成原来的约20倍。如果不考虑量子扰动，那么这20个新的宇宙区域的能量密度都随时间减小，使得暴涨一步步接近终结。但是前面我们已经看到，暴涨期间会产生扰动，并且暴涨发生的能量越高，扰动越大。对一些暴涨模型而言，在宇宙的足够早期，扰动的大小可以和推动暴涨的场的经典运动大小接近，甚至扰动超过暴涨场的经典运动。这时，在新产生的20个宇宙区域中，就会使有些新区域的能量密度不但不减小，反而变大。在能量密度变大的区域，一方面根据弗莱德曼方程，宇宙更快地膨胀；另一方面，这个区域的量子扰动也更剧烈。这两个方面使得这个能量密度更大的新区域和以前的区域相比，暴涨得更厉害。这个暴涨更厉害的新区域在下一个哈勃时间将产生暴

涨更更厉害的新新区域，依此类推，暴涨便永远地持续了下去。在永恒暴涨当中，暴涨永远也不会整体上结束。

那么从局域上看，假如在暴涨期间就存在一个观测者，那么他看到的暴涨会不会结束呢？答案是会结束。因为对于这个确定的观测者，由于暴涨场的量子涨落方向随机，而经典运动总是朝向暴涨结束，这样，暴涨总是会结束的。也就是说，永恒暴涨在整体上看是永恒的，但是它对每一个观测者来说总会结束。其实这并不奇怪，这就好像一个人终有一死，但是人类社会一直延续了下来一样。

从永恒暴涨整体上的永恒性和局部上的可结束性，我们得到：如果永恒暴涨确实存在，那么我们的宇宙只是一个在永恒暴涨的时空当中，局域上停止了暴涨的小部分而已。我们好比森林中的小动物，利用一棵病死倒下的树做了窝，而森林中绝大多数的树仍然在茁壮成长。这棵树外面的森林，正回答了我们的宇宙外面有什么的问题。

除了上文介绍的量子涨落导致的永恒暴涨外，还有一种永恒暴涨是亚稳态真空导致的，限于篇幅，本文中就不详述了。目前，关于永恒暴涨是否存在，科学界还存在着很大的争议。在“量子引力”的框架下，永恒暴涨会引起各种各样的麻烦。解决永恒暴涨的存在与否的问题，还有待于物理理论和实验的进一步发展（图3）。

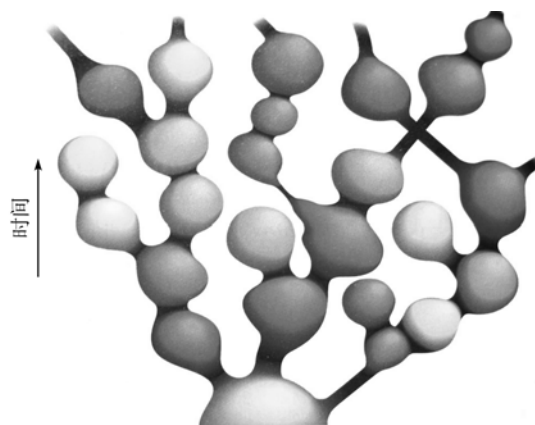


图3 永恒暴涨导致整个宇宙“分裂”成众多的因果不连通区域。不同的宇宙甚至可能拥有不同的物理定律（图片来源：美国斯坦福大学林德教授的个人主页）

结语

可以说，暴涨是宇宙的年少时梦。膨胀的宇宙正如流逝的时光，稀释着空间弯曲，磁单极，以及宇宙年少时近乎所有回忆。然而，暴涨时期穿出视界的扰动，作为微波背景，结构形成，以至你我诞生的种子，则同样一如年少时梦般永不凋零。多少往事已淡出回忆，而这一段时光注定今生铭记——这正是你我的，也是宇宙的，年轻。

（中国科学院理论物理研究所 100190）

本文获“我心目中的现代物理”征文优秀奖



火星上首次发现湖岸线

科苑快讯

美国科罗拉多大学波尔得分校（University of Colorado at Boulder）的迪亚克雷（Gaetano Di Achille）等人在

美国宇航局火星勘测轨道飞行器（Mars Reconnaissance Orbiter, MRO）最近拍摄的照片中发现水流冲刷出一个约48千米长的峡谷，它与一个山谷相连，流水沉淀物形成了一个巨大三角洲。他们已将论文发表于最近的《地球物理学研究快报》（Geophysical Research Letters）。

迪亚克雷说：“这是能证明火星表面存在湖岸线的第一个确凿证据。通过湖岸线的鉴定和其他地质



火星湖模拟图

学证据能计算出该湖的面积和容量，它形成于约34亿年前。”不过康奈尔大学的火星专家贝尔（Jim Bell）说，对于火星上确实有湖的说法，除火星图像外，他还需要其他数据。

（高凌云编

译自雅虎网2009年6月18日科学新闻）