

大宇宙 与 小宇宙

张端明

(六)

隐藏的对称性与泡沫状的宇宙的爆胀

我们已经看到，不管是旧膨胀论，还是新爆炸说，有一个关键的概念，就是对称性的自发破缺。这大概要从隐藏的对称性谈起。

谈起对称性，恐怕再也没有什么别的概念，引起物理学的巨大革命了。爱因斯坦的奇妙无比的广义相对论，精妙奥秘的巴丁、库柏和施里弗的超导理论，以及蔚为现代理论的滔滔主流——杨振宁-米尔斯非阿贝尔规范理论，等等，莫不与对称性密切相关。

但是什么是对称性呢？按照英国“韦氏国际辞典”的定义：“对称性乃是分界线或中央平面两侧各部分在大小、形状和相对位置的对应性”。这实际上只是所谓“几何对称性”罢了。它又说，对称性“适当或平衡的比例，由这种和谐产生的形式美”。这句话略略涉及对称性的美学属性。对称性，是极难准确定义的一个概念。在近代物理中，它几乎成了规律和和谐的同义语。要而言之，与时空有关的对称性，叫几何对称性。反之，则称为内禀对称性。物质场所遵循的基本方程，实际上都取决于不同的对称性原理。

但是，日本物理学家南部和英国物理学家基勃尔

等人在铁磁理论中发现的隐藏对称性，具有重大意义。铁磁质具有转动对称性。就是说，对于一个磁化的铁棒，它的一端无论是N极，还是S极，铁棒的自由能总是相同的。图1表示，在高温下，能量与磁化强度曲线，

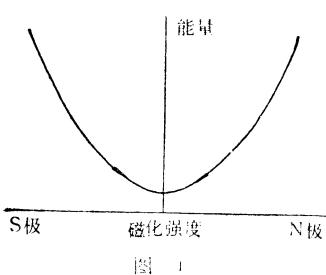


图 1

相同的。图1表示，在高温下，能量与磁化强度曲线，

它果然具有转动不变性。平衡态，即U形底的最低能态，相应的磁化强度为零。它具有转动不变性。

但是，温度降低时，情况就不同了。从图2可以看出，平衡态移到磁化强度不为零的一个态

(当然也可能移到右边相应状态)。此时尽管自由能曲线在南北之间完全对称，但对于平衡态而言，则无任何转动对称性可言。设想生活在此状态的居民，他们根本不会察觉这一对称性。不过从旁观者看来，就整体而论曲线依然保持转动不变性。

这样，严格说来，平衡态所“失去”的对称性是“隐藏”起来了。我们通常称这种情况叫做对称性的自发破缺。由于系统的真空态，往往就是能量最低态，亦即上面所说的平衡态，所以系统的真空自发破缺的概念，与上面机制极其类似。

在现代理论物理中，宇宙能量密度是一种奇怪的黑格斯场的函数。黑格斯（P. Higgs）是英国爱丁堡大学的教授。黑格斯场是人们为了解释真空中自发破缺的特殊场。Higgs粒子自旋为零。迄今为止，它还只是想象的场，尚未为人们所发现。尽管近年来，时而来发现它的消息，但认真复核，不过空喜一场。

我们看图3、4，这便是膨胀宇宙演化时大致的情况。旧膨胀宇宙演化相当于图3。如果没有热激发，对应于黑格斯场为零值的状态，也就是宇宙当初所处的状态，不存在旋转对称的自发破缺。我们称宇宙处于假真空状态，它具有的能量密度约每立方厘米 10^{25} 尔格，即一个原子核能量的 10^{30} 倍。现代膨胀宇宙论的基本理论框架是哈佛大学的H. 乔治、S. 格拉肖在1974年提出的大统一理论。按这种理论预言，当温度下降到 10^{22} 度时，热起伏促使黑格斯场平衡值为零，从而引起宇宙向对称相演化。

当然，我们必须假定，至少在某些气体区域，在早期宇宙其温度高于此相变温度(10^{22} 度)。在此区域，黑格斯场有一个零值。随着膨胀引起温度下降，在热力学上就有使黑格斯场取得非零值的趋势，从而出现对称破缺相。

由于相变进行得异常缓慢，宇宙介质可冷却到 10^{22} 度以下，而黑格斯场依然保持零值不变。此类过冷现象，我们在自然界经常看到。例如，在一定条件下，水可以冷却到负20多度，就是所谓过冷水。宇宙介质的这种持续过冷状态，就是所谓假真空。

图3表示，假真空态周围有能量势垒。从经典物理来看，黑格斯场没有足够能量“跨越”势垒，所以假真

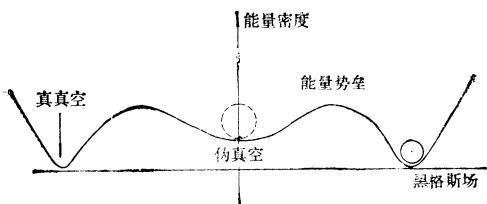


图3 旧爆胀宇宙论的能量密度曲线

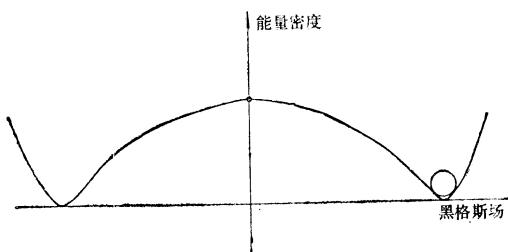


图4 新爆胀宇宙论的能量密度曲线

空状态是绝对稳定。形象地看，宇宙的演化能够用在曲线(从立体看是曲面)上滚动的球来表示。球置于假真空凹部，是不会“自己”滚过势垒的。

但是量子理论中早就发现一种奇异的隧道效应。原来在微观世界中，粒子可以“穿过”比它所具有能量高的势垒，似乎可以从势垒中打开一个“隧道”溜掉，这真是妙不可言。我们当然无法设想，一个陷于深井的人，能通过所谓隧道效应跑出来。其间奥秘就在于，微观粒子具有波动性。

哈佛大学的 S. R. 柯勒曼指出，量子起伏所引起的隧道效应，使得黑格斯场穿过能量势垒而进入能量密度较小的真实真空。形成对称破缺的一些“气泡”。由于真实真空的能量密度较小和假真空的负压力所引起的引力效应，“气泡”急剧增大，其速度接近光速。形成“气泡”的快慢由大统一理论中未知参数而定。一般认为形成“泡沫”的速率(即相变速率)很小。

假真空必须具有负压力，这似乎是相当显而易见的事实。原因是真实真空压力为零。在真实真空中的“气泡”要不断膨胀，这表明泡壁内的压力必然大于周围介质(假真空态)的压力。换句话说，假真空的压力一定是负值。泡内负压力的贡献超过泡内物质的贡献，产生了一种奇怪的负引力！负引力就是排斥力。

由于这个负引力效应，使得气泡膨胀加速。其范围呈指数增长，大约每隔 10^{-34} 秒，气泡直径增长一倍，这种猛烈进行的爆胀时期约持续 $10^{-30}—10^{-31}$ 秒。在此期间，宇宙直径增加 10^{10} 倍以上。从而实现宇宙向真实真空的相变。假真空的能量密度被释放出来(或说释放巨大相变潜热)，重新将宇宙加热到 10^{27} 度，同时产生大量粒子。

这样，我们看到爆炸宇宙中的观测宇宙，是从直径小于标准模型 10^{10} 倍以上的一个小区域开始。爆胀

以前，这个区域大大小于视界。爆胀结束，它便约与视界相当。

由麻省理工学院副教授居斯(A. H. Guth)等所提出的这个“爆胀”机制，实际上完全借鉴小宇宙中“自发破缺”这个人们常常遇到的现象，真是“大中有小，小中见大”呵！

爆胀宇宙自然解决了视界问题，平恒度问题。然而，却有一个无法避免的严重缺陷：相变本身会产生很大的不均匀性。我们已经知道，对称性破缺相的气泡是完全随机形成的。它们留在有限的彼此分离的团(Clusters)簇中。团内几乎所有的能量，都集中在最大的气泡表面上。宇宙以后的演化，也不会使能量均匀分散开来。这种情况，与今日宇宙中所观测到的大范围内宇宙结构的均匀性，毫无共同之处。

出路何在呢？

新爆胀宇宙论

大约在 1981 年年底，苏联列别捷夫物理研究所的林德、美国宾夕法尼亚大学的阿尔勒乞特和斯忒恩哈德等提出了新爆胀宇宙论，似乎找到新道路了。

这种理论的显著特点是，假真空处于相当平坦的顶面上。它周围没有能量势垒。类似的机制，首先是哈佛大学的柯勒曼和诺贝尔奖金获得者温伯格提出的。具体演化过程，大概如图 4 所示。

早期宇宙开始温度极高，高于相变温度 10^{27} 度。由于热起伏，黑格斯场的平均值为零。亦即对称性未破缺。随着宇宙膨胀，温度下降，应发生相变。但由于冷却速度大大高于相变速度，宇宙介质的一些区域就会过冷到相变温度以上，但黑格斯场依然保持为零。对称性未破缺，区域仍处于假真空态。以上情况，与旧爆胀论没有多大区别。以后演化情况就有很大的不同了。

我们仍然用小球的滚动形象说明以后的相变。量子起伏和热起伏，都会使区域偏离假真空，黑格斯场慢慢由零增加。由于假真空附近能量密度曲线很平缓，所以区域相变进行得很缓慢。这如同小球在坡度很小的斜面上滑动的情况一样。所以人们常称这种相变机制叫做缓慢滚动机制。跟旧爆胀论一样，区域会加速膨胀，当黑格斯场到达曲线较陡部分，膨胀会停止加速。此时，对称破缺相(真实真空)的区域已增长到足以包括整个观测宇宙了。当黑格斯场到达能量密度曲线的凹槽部，放出大量相变潜热，再加热宇宙。宇宙的温度大概会重新上升到相变温度的 $1/2—1/10$ 。

当然，相变的实际的情况，比这里说的要复杂得多。

我们提请大家注意的是，旧理论中的气泡被宇宙中一些区域代替了。慢滚动的区域不再是被假真空所包围，而代之以被同样是是对称破缺的其它区域所包围。它们不会趋于球形，每个区域都在爆胀，最后所产生的

巨大的空间，完全能装下我们观测的宇宙。

旧爆胀理论的根本困难就这样被克服了。

1982年夏天在奈斐尔德举行了极早期宇宙讨论会上，许多理论物理学家济济一堂，兴奋地展视新爆胀宇宙论所取得的成就，感到前途大可乐观。

我们决不会忘记，爆胀理论的基石放在小宇宙中，没有近代规范场论的巨大发展，会有爆胀论的产生吗？没有大统一理论的发展，爆胀论的出现是可以想象吗？我们在同人类智慧的彩笔描绘“创世纪”的壮丽情景时，不会忘记我们用的色彩和彩笔，是得自于小宇宙中辛勤的园丁！多么奇异的自发破缺相变呵！

我们不禁想起，1979年诺贝尔奖金获得者温伯格说的一句话：“一个理论可能具有高度的、在我们日常生活中又是隐而不见的对称性，我认为在物理学中再没有比这样一个想法更有希望了。”

然而，事情总是有两重性的，大宇宙的理论汲取了小宇宙研究中的甘露，同时也带来小宇宙的忧患！

风靡一时的大统一理论，遇到真正的危机。它的主要预言，质子会衰变，当然寿命很长，大约 10^{31} 年。然而，尽管人们付出极大努力，从宇宙射线，从地下深阱，寻找衰变质子的踪迹，却是“上穷碧落下黄泉，两处茫茫都不见”！看来乔治·格拉肖提出的简单SU(5)大统一理论有问题。在小宇宙辛勤耕耘的理论物理学家，正在探索更为复杂的大统一理论，其中包括脍炙人口的超对称理论。

大统一理论，用它作为基石的爆胀宇宙论势必将进行相应修改。

如果再探寻近代非阿贝尔规范场的价值，人们都会由衷赞叹，规范不变原理这一个基本原理，作为世界物质运动基本运动规律，这不正是二千五百年前希腊哲人早就怀有的梦想么？我们这个世界的运动规律，只由少数对称原理所支配。然而，正始巴基斯坦著名理论物理学家萨拉姆在二十届高能物理会议上就谈过，规范理论中自发破缺机制也许只是唯象理论，黑格斯粒子很可能是复合粒子，各种动力学破缺机制正在为人们所设计着。借用爱因斯坦的比喻，我们可以说，在规范理论的主体——规范不变原理是用大理石建筑的宏伟大厦，但其中的自发破缺机制不过是木板搭成的活动棚房罢了。

不难论证，从这种意义上说，爆胀宇宙论只能算是未来严格理论的雏形罢了。

我们还应强调，在大统一理论遇到麻烦，超对称大统一理论缺乏有力的直接实验证据的情况下，暴涨宇宙论的问世，以及它对平坦性、均匀性问题的圆满解释，应该说是，对大统一理论及其修改方案的难能可贵的支持。当然，这是间接的支持。但是，大宇宙的“友谊”之手，此刻此时，对于小宇宙的探索者来说，真是天外“福音佳音”呵！