



(五) 张 端 明

泡沫状的宇宙在剧烈膨胀……

峰回路转，柳暗花明。

1981年古斯发表了他的暴涨宇宙论，给大爆炸学说注入了新的活力，新的生命。看来解决所谓视界问题和正、反物质不对称问题，有了希望。这一回又是粒子物理帮了宇宙学的忙。粒子物理学家向天体物理学家提供了“暴涨”机制的合乎逻辑的基础。

根据六十年代，尤其是七十年代蓬勃发展起来的规范场理论，真空有所谓对称真空和对称破缺的真空。当温度高于某临界温度，现实世界处于对称真空，而低于此温度，现实世界就过渡到非对称的真空，这个过渡就是所谓对称破缺的相变，这个问题下面还要详细谈到，这里就只谈这么多了。

古斯的暴涨论是和所谓 $SU(5)$ 大统一理论(简称GUT) 联系在一起的。相应的对称破缺相变临界温度 $T_c \sim 10^{16} \text{GeV}$ 。

古斯所描绘的创世纪的图象大致如下：大爆炸伊始，直到 10^{-43} 秒，温度约 10^{32}K (10^{19}GeV)，此时是以辐射为主的时期，环宇之中，由单一的力——量子引力主宰，宇宙处于对称的真空。宇宙膨胀跟原来大爆炸学说预言的一样，按半径 $a(t) \sim t^{1/2}$ 的规律进行，随着宇宙的进一步膨胀和冷却，终于到达 $T_c \approx 10^{28} \text{K}$ ，即GUT 相变转折温度。由于对称破缺的真空能量低于对称真空的能量，所以现实世界趋于对称破缺的“假”真空。此时能量以与时间无关的真空能占优势，物质处于德塞特超冷相。

这个相变并非立即发生。开始时，对称真空与非对称真空由于隔着一段位垒，尽管后者能量低，宇宙仍处于对称相。由于此刻 T 已低于 T_c ，故称超冷相。这是一个亚稳状态。当温度进一步降低，位垒变小，宇宙终于进入对称破缺相。相变发生了，大量的相变潜热，也就是对称相与非对称相能量差猛然放出，宇宙被重

新加热，急剧地以指数规律膨胀。如果膨胀由 10^{-35} 秒延续到 10^{-32} 秒，则宇宙“半径” R 将增大到 $\sim 10^{25}$ 倍，而按标准大爆炸模型，则只增大十倍，这种剧烈的增长，人们称之为暴涨。

人们发现，如果暴涨时间 $\tau > 6.5 \times 10^{-33}$ 秒，视界问题，平坦性问题似乎迎刃而解了。

由于有了一段暴涨时期，暴涨前的观测宇宙大小就不会小于视界了。因此，视界问题就不成其问题了。

宇宙的平坦程度，我们可以认为这个宏大的宇宙是由一颗均匀的微小“种子”暴涨而来，所以其性质：如温度、能量密度几乎处处相同。

但是，这里我们要指出，平坦性问题的解决，似乎是形式的。因为在追溯暴涨机构中有一个重要前提，就是假定宇宙在甚早期是严格平坦的，否则暴涨压根儿就不会出现。你看，这里是不是出现逻辑混乱：先假设宇宙是严格平坦的，所以有暴涨，然后再利用暴涨学说解释平坦性问题。看来，要解决平坦性问题，还得另辟蹊径。

暴涨宇宙论解决反物质问题就漂亮得多了。它认为，在大爆炸极早期阶段($t < 10^{-35}$ 秒)，温度在 10^{28}K 以上，弥漫于空间的超重 X 粒子会衰变为质量较小，同等数量的正、反粒子。温度到达 10^{25}K 以后， X 粒不再产生，但是由于温度极高，宇宙基本上处于热平衡状态，只是由于重子数 B 不守恒的作用的存在，使得重子数稍微超过反重子数，大概每 10 亿对重子-反重子中，才多一个重子没有配对。但到 10^{28}K 左右，热平衡状态开始发生显著偏离，到温度降至 10^{13}K ，正、反重子成对湮灭，但是它们之间的比值一直没有变化，即重子对反重子的不对称程度不过是 10^{-9} 。

有趣的是，就是物质比反物质多余的这么一点点，产生了宇宙中所有的星系、星云、类星体，以至于我们身体里的所有原子。我们要记住，正是大统一理论中的力，促使重子数不守恒反应的发生，从而造成物质与

反物质的不对称性。我们今天这个瑰丽雄奇世界，难道不可以说是由这个力所产生吗？然而，我们更不能忘记，大统一的力驱使质子衰变，尽管寿命极长，约 10^{31} 年，从某种意义上说，它驱使世界一步步缓慢地走向毁灭的深渊……。当然，这是很久很久以后的事情。

最后，经过暴涨阶段，宇宙完成了“大统一”的相变，开始以较慢的通常的速度膨胀，缓缓冷却下去。

暴涨宇宙演化图景中，最令人不可思议的是大统一的相变机构。实际上这是粒子物理学家早就进行过详尽而深入地探讨过的问题。我们如果仔细考究其中细节，会发现“暴涨”颇象开水沸腾时泡沫不断出现，扩张、并合……。

宇宙，是泡沫状？膨胀，并合？……是的！难道天底下有如此“怪事”吗？是的。

我们已经说过，当宇宙温度冷却到 10^{28}K 以前，此时对称真空的能量比对称破缺真空的能量高，但由于两者有一能量位垒相隔，所以宇宙仍处于对称真空。但是，通过一种名叫瞬子-隧道效应，宇宙的某些部分会完全“偶然”地跃迁到对称破缺的真空相去，而形成一个个的泡。这些奇怪的“泡”沉浸在假真空的背景海洋中。

根据古斯，以及柯勒曼、阿博特、法赫、外斯等人的分析，这些泡状的拓扑结构以光速向外膨胀，而尚未相变处于过冷对称相(假真空)的背景则以指数规律“暴涨”。在“泡沫”形成过程中，背景的真空能量多余部分不断通过隧道效应、转化为泡泡的热能和泡壁的壁能。

由于泡泡不断增生和扩大，最后势必充满整个空间而发生并合，泡壁破坏所放出的潜热(壁能)会使宇宙重新加热。由于壁能带有相当大一部分开始的真空能量，宇宙温度几乎又上升到 10^{28}K 左右。

相变结束以后，宇宙以后的演化又会按标准模型膨胀了。

1981年1月—6月，美国科学基金会在加利福尼亚大学圣巴巴拉分校理论物理研究所聚集许多知名天体物理学家和粒子物理学家集中研讨了早期宇宙问题，尤其是暴涨宇宙理论。大宇宙的探索者与小宇宙的探索者欢聚在一起，兴高采烈地回顾了研究无限大与无限小的汇合处所出现的巨大进展，宇宙之谜的谜底似乎不再是不可思议了。大爆炸学说是一个丰碑，古斯的暴涨宇宙论，又是一个值得称道的进步。

暴涨宇宙论也并非十全十美，就在它诞生伊始，古斯就指出，它不能提供一个现实的宇宙学，一个致命的弱点就是，详尽的计算表明，处于对称破缺相的“泡”的膨胀大致与 $t^{1/2}$ 成正比，比起背景的指数式膨胀慢得多，因此处于新相的“泡泡”非但不会并合，最终形成我们今天观测的宇宙，反倒会“稀释”起来。1983年，古斯与才气横溢的美国物理学家温伯格对这个问题进行过认真分析，结论是泡泡不会渗漏。即相变不会终结，

这个结果自然引人十分不快。

与此相关的另一个缺点是，宇宙空间会过度不均匀，泡泡的形成，既然是随机的，自然形成的时间先后会参差不齐。此外，相变中释放的巨大泡壁能还会产生太大的能量扰动，也是为今天观测所不允许的。这个道理很简单，在暴涨后，泡泡形成，所以泡壁相当于在温度 $T_{GUT} \cong 10^{16}\text{GeV}$ 处的一个向前光锥。它比我们观测宇宙小得多。换言之，大爆炸标准模型出现的问题——不均匀性，换一种提法又出现了。

难怪古斯把他的模型叫做“toy model”(玩具模型)，但是很快，在1982年林德、阿尔贝勒特和斯顿哈特对古斯的理论进行了修正，避免了上述严重困难。因此人们常称古斯的理论为“旧暴涨模型”，而称林德等的方案为“新暴涨模型”。

这一节的内容，读者会感到很新奇，洋洋大观，然而一定也会留下很多的思索：什么自发破坏，什么真实真空，什么假真空，这是怎么回事呢？