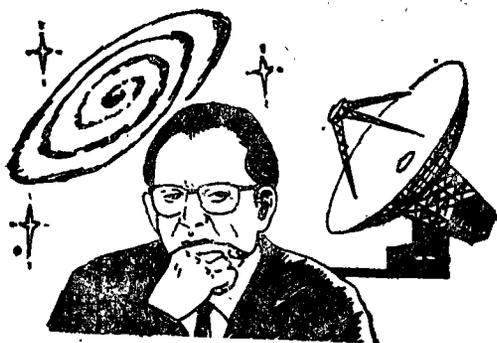


从暴胀论到纹理新说

何 常



一、宇宙观测新发现

在过去一个长时期里，人们普遍认为星系在广阔的天空中分布成均匀的闪烁光点。可是事实不然。近几年来，天文学家极目观察最遥远的宇宙区域，发现宇宙的总结构实际上是群集的；它们聚集成层块，层块结集成板片，板片又挨次卷曲成泡状空心球，球的直径长达3亿光年；空心球又垒在一起成了被称为“宇宙泡沫”的东西，充斥于宇宙。不仅如此，他们还发觉星系和类星体（年轻星系的高能核心）在宇宙间蓦然出现的时间是在大爆炸后的10—25亿年。这比标准大爆炸模型所提议的时间要早得多。

这些新的观察结果打破了人们的本来看法，大大动摇了流行的宇宙理论，以致一些传播媒介宣称大爆炸理论无效。但头脑冷静的人认为这种极端结论并不正确。他们认为，宇宙起源理论的失误不在大爆炸本身，而在大爆炸的炽热灾变之后怎样形成现在观察到的那种宇宙结构。

支持大爆炸理论的基本证据是现今观察到的宇宙膨胀（expanding），不是指宇宙结构生成的暴胀（inflation）。远处星系比近处星系更红，意味着宇宙在膨胀，星系在远移，它的光波拉长了。照此回溯，宇宙确实发轫于极其炽热和密集的状态。最近宇宙背景探测器（COBE）卫星发现现今弥漫于宇宙间的微波辐射背景的能谱与大爆炸预言完全吻合，背景辐射确实是早期宇宙余留下来的，它奇迹般证明初期宇宙的炽热和密集。更引人瞩目的是大爆炸理论精确地

预言了现代宇宙中轻元素（氢、氦、氘、锂）的相对丰度。宇宙学家从这些预言出发推断出基本粒子家族最多有四个；最近实验已经证明，基本粒子家族实际上只有三个。这些激动人心的成就使大多数物理学家和天文学家相信大爆炸理论的正确性。

宇宙创生的理论站住了，但是宇宙结构的创生和形成问题则有待解决。这是当今科学面临的最重大的挑战之一。

二、暴胀论受到挑战

原来的宇宙结构形成学说中最为流行的是暴胀理论。它由量子力学法则出发推导出宇宙中最大的构造。它认为最早的宇宙经历了一场短暂的非常急剧的暴胀事件。暴胀时局部块体膨胀得非常巨大，因此宇宙在大尺度上是非常均匀的。与此同时，微量量子涨落也会扩展和放大成宏观密度变动，以促使大尺度结构的生长。这样，最微小的亚原子粒子就产生出宇宙中最大的构造。这一理论与所观察到的中等尺度的星系（数万光年）和星系间宇宙结构的空间间隔（数千万光年）相一致，从而取得巨大成功。但是它是基于星系的均匀分布假设为基础的，既不能解释星系何以在大尺度上是块集的，也不能解释类星体何以存在。在理论上，由于典型的量子涨落太大，特定的参量必须求助于难以置信的微小值以使这一理论体系连贯。这未免齟齬足履。

在这样的背景下，关于宇宙结构形成的纹理（texture）新说应运而生。这一理论是由普林斯顿大学年轻物理学家N.托罗克于1989年首先提出的，现已成为众多物理学家和宇宙学家共同的研究课题，它包容暴胀论的合理部分，回答暴胀论不能回答的宇宙新发现。

新的宇宙结构生长理论必须说明现今所观察到的可见物质和暗物质的块集性怎样同由微

波背景证明了的早期宇宙的平滑性相统一，也就是说，必须说明在初始平滑而炽热的宇宙中产生大尺度的成块结构究竟是一种怎样的物理过程。对上述要求，最有前途的回答不是来自研究遥远星系的天文学家，而是来自微小的亚原子粒子的研究者们。纹理学说就是他们的研究成果。

三、纹理机制

粒子物理学认为，按照“大统一”理论，弱电力和强力结合，电子、中微子和夸克的性质相互联系；在甚高温下，物质进入无破缺对称相，这时粒子和力的对称有理想的表现。弱电理论指出，温度超过 10^{15}K 时，电子的表现与中微子等同，弱力和电磁力之间也无法区别。大统一理论还预示，温度超过 10^{28}K 时，电子和中微子的行为与夸克等同，弱电力融合在强力之中。最后，家族对称理论认为，粒子的三个家族在上述温度下变得无法辨认。

创生时宇宙异常炽热，处于完全无破缺对称状态。但在膨胀中它冷却了，这时一种叫对称破缺的基本作用决定着物质基本粒子的不同性质和电荷，从而区分出它们赖以相互作用的四种力。对称破缺导致宇宙平滑性的偏离。这样，物理状态经历了一系列称为相变的急剧变化。每次相变，力和粒子间的某些对称关系受到破坏，宇宙就从包含着统一的力和等同粒子的状态蜕变成现在我们所熟悉的区别了各种力和粒子的状态。

相变在许多我们熟悉的地方也在发生。水冷冻成冰，或煮沸为蒸汽，其物理性质的突然改变就是相变的例子。液态水是高度对称的，它从任何角度看都是相同的；冰比水就较少对称，因为它由有明确界限的晶体结构所组成，只有在结构移动特定的分立距离或者旋转特定的分立角度时才显得相同。如果让水突然冷冻，它就形不成理想的晶体，晶体中会布满缺陷。冷却得越快形成的缺陷越多。正如冰会产生裂缝和断纹这样的细微缺陷一样，在钻石、盐和液晶中，也会产生其分子形不成精致排列的地方。

宇宙学上一般承认：当宇宙年龄是亿万分

之一秒时，它的四种基本力（电磁、强、弱、引力）原本是结合成单一的始祖力的。但经那短暂的一瞬之后，演变中的宇宙产生了一种“结晶”过程。这时对称性被破坏了，形成一种特定的秩序——“晶体”和“晶体”中的缺陷。

70年代后期，英国皇家学院教授 T. 吉倍尔就提出，大爆炸后宇宙暴胀和冷却时可能已经留下缺陷的痕迹。有一种缺陷是宇宙弦，它是高度密集的质能细长线，是大爆炸火球的实际余留物。它绝不会融化消失在早期宇宙的炽热等离子体浓雾中。吉倍尔以及其后的许多人推测，散布在宇宙中的弦环，以其引力吸聚了庞大的物质群，充当了最初星系和星系团的种子。但是后来计算机模拟说明，即使弦存在，由于它太小，无法承担任何星系的构造任务。计算机模拟做得越好，就有越多的宇宙弦性能消失掉。

随后的粒子物理学家严格审查了四种拓扑缺陷，这就是弦、界壁、单极和纹理。最后认定只有纹理在宇宙学体现中能够说明宇宙会怎样产生类似的缺陷。

要想象出纹理并非易事，因为它不是定义为分立的物体，而是定义为一种场内的配合失准。物理学中到处谈到场，如电磁场支配着荷电粒子的运动方向，告诉我们正负电荷粒子的区别；引力场控制着小到鹅卵石大到行星等物体的运动。至于同纹理相关的场则是希格斯场，它是粒子物理学家的推断，用以承担特定的作用，如从电子中区分夸克，赋予每种粒子以特定质量等。纹理来源于希格斯场的四维指向，虽然无法把它在纸上画出来，但是画出纹理的二维切片是办得到的。

希格斯场存在于整个宇宙之中，它同样不是处处均匀的。在希格斯场线处于不良状态的太空粗糙球形区域上形成纹理。换句话说，这里的本地场同宇宙的整个其余部分的希格斯场线并不十分衔接。不妨把纹理想象成一种透明晶体的云状斑纹，斑纹处的原子没有同它们井然有序的邻居们对准看齐。在宇宙模型中，纹理缺陷把应力应变引入时空结构。

这样的纹理终究要发生变化。为了便于理解，可以把它设想成两块作相对运动的地壳板块，它们相互又推又拉，最后突然发生错动，重新调整自己的排列，并以隆隆作响的地震形式释放出应变能。宇宙纹理最后同样要松解开来，将它那里的场线同宇宙的其余部分场线对准，缺陷从而消失。这时，纹理释放出巨大的能量脉冲，宇宙学家把它叫作宇震。这种能量充当了高能触发器，使之在大爆炸后的10亿年就创造出星系结构来。这比过去理论推断的实现时间要早得多。

实现的基本进程是：在大爆炸后 10^{-35} 秒时进入宇宙诞生期，宏大而统一的对称性碎呈破缺，出现了从微观到天文学尺度的纹理缺陷。纹理没有大小的偏爱，小的以毫米计，大的以光年计。一旦形成，便以光速收缩成亚原子大小，在这一点处，希格斯场松解开来重新连接成平滑的构造。最小的纹理最先重新校准，然后由小到大，逐次松解。纹理释放出来的能量都保存在间隔处，直到大爆炸后3万年的一瞬间，物质而不是辐射开始支配起宇宙的事业。只有到这时，宇宙的包容物：质子、中子和电子的高温等离子体才迅速遭到来自松解纹理的冲击。这种从小到大的冲击波推动物质形成星系、星系团和超星系团。

组织物质的最大纹理那时的宽度有3万光年，这就是可见宇宙的大小，也就是我们所看到的大爆炸3万年后的那部分宇宙。根据普林斯顿研究组的计算，这个3万光年宽度的扰动按规律随宇宙膨胀而增大。150亿年后的今天，膨胀了的宇宙已比那时增大了1万倍以上，象一只充着气的气球，由纹理产生的结构现在应当具有直径3亿光年的广袤。值得注意的是，这正好是宇宙星系分布图上标示的最大空泡的大致尺寸。这可能是巧合，但也可能是150亿年前松解纹理清扫这些区域的所有物质，就从那时起空泡持续增大。

现在，研究的成果已经扩展到同某些类星体的早期状态相联系。类星体是中心为黑洞的星系，它在吞噬宇宙物质时猝发活力。有些模

型——如宇宙弦和物质分布的随机涨落——产生星系物质的凝聚进程过于缓慢，不能解释新近发现的早期类星体，然而计入纹理作用之后，因纹理提供了额外的冲击而引起星系核心物质的坍塌就快得多了。

四、模拟和观测检验

对小于星系间平均间距的范围内暴胀论结合冷暗物质模型所得出的星系集聚程度与观察结果一致。在同样的间距范围内应用纹理论对引力集聚作详细计算，它的答案也与观察结果非常一致。但对大尺度的宇宙结构，暴胀论预示与观察结果相抵触。然而这时由纹理预示的角关联函数与观察结果仍然非常接近。再者，在暴胀模型中，早期宇宙的密度涨落遵循高斯分布；而在纹理论中，密度变化的统计性质则迥然不同，它具有大批高密度峰值，说明形成星系的时间比暴胀论要早得多。在暴胀论里，至少在宇宙年龄为几十亿年之后才开始坍塌成星系尺度的物体；然而在纹理扰动的宇宙中，宇宙创生后仅仅1千万年星系就开始形成了。新近发现的若干类星体，它们发出的光高度红移，意味着在宇宙年龄只有10亿年时它们就在璀璨发光了。这说明一些引力束缚物体是紧接大爆炸之后就开始急速形成的。这些类星体的发现使纹理论预言身价倍增。

天文学家向来认为星系和暗物质的分布基本上是相同的。他们据此对星系团的质量测量作这样的估计：宇宙密度大约是临界密度的十分之一（临界密度是最终停止宇宙膨胀的密度）。但纹理研究者在计算机模拟中鉴别了星系的形成，然后测定出它们的整体分布，结果是：星系聚集得比暗物质更为紧密。这一发现非同小可。因为过去测量到的只是暗物质的一小部分，这样就大大低估了宇宙的密度。这一模拟表明：暗物质的分布比星系更平滑，它们占宇宙物质的大部分；被巨大的星系板片所包围着的区域内几乎没有星系，区域的大小和形状恰好与哈佛-史密斯天体物理中心观察大星系时发现的“长城”和空泡相似。模拟中已看到大于3亿光年的结构。几个工作组正在检验它

惰性气体对声致发光的影响

杨 揆 一

当一个强声束穿过水时，水中的微小气泡能够发射出一连串的闪光——一种与声波的频率和强度有关的闪烁。研究者们从本世纪三十年代就知道了这种称之为声致发光的现象，但是对于气泡怎么能够把声波能量集中到亿万倍并激发原子和分子产生闪光，至今还没有一套完整的、令人信服的解释。

强的声束穿过水时，产生一个个极细微的腔(气泡)，腔中充满着从液体中分解出来的气体。这些腔先后不一致地胀大，并在声波的压力下缩小。气泡消失的过程是那末急猛，以致可以集中足够的声能使得泡内的气温升高超过10000K。炽热的气体在50微微秒的短暂时间内放出非常明亮的可见光和紫外光的闪烁。一连串的闪烁形成光线和紫外线。

最近，加利福尼亚大学的物理学家 R. 席勒, K. 温尼格, S.J. 普特曼以及 B. P. 巴比尔做了一系列的有关实验。他们发现，如果使水中的氮气泡中增加少量的惰性气体，那末单个气泡的声致发光强度，光谱密度以及气泡运动的稳定性都有本质上的变化。他们在1994年10月14日的《科学》杂志上阐述了这些发现。它给声致发光机理的研究提供了一个方面的依据。

的真实性。

研究者还认为，纹理应当在宇宙背景辐射中有可辨认的特殊效应。背景辐射是大爆炸的余留物，它泼溅能量，弥漫于宇宙。由于大爆炸向所有方向释放的能量大体相等，微波背景在天空中应当是处处均匀的。但是松解纹理打破了这种均匀性。如果事实确是如此，证据应当是观察得到的。美国航天局和普林斯顿MIT观察者不久前分析了1989取得的数据，发现空中确有与上述相当的扰动。1992年4月，“宇宙背景探测器”卫星在宇宙边缘附近发现了巨大的物质波纹，它们产生于150亿年前，这类辐射一直以光速传播到地球。

具体地说，当水中的氮气泡内增加1%的氩气时，气泡所产生的声致发光强度将增加大约30倍。在氮气泡中增加同样比例的氦或氩时，也有大体相仿的结果。有趣的是，这个1%的惰性气体含量(相当于空气中的自然含量)所引发的闪光强度比纯粹的惰性气体或纯粹的氮气所引发的闪烁都强。

气泡内的惰性气体对于单个气泡所发射的光谱密度也有引人注目的影响。例如，含氩2%的氮气泡所激发的紫外光，其谱密度峰值产生在280毫微米的波长处。而含氩1%的氮气泡所激发的谱峰值波长为200毫微米，且辐射密度低于前者。值得注意的是，如果腔内气体是纯粹的氩、氦或氩，它们所激发的光辐射密度都明显地低于混合气体所引起的。

在气泡运动的稳定性方面，含1%惰性气体的氮气泡也都优于纯氮或纯惰性气体的气泡。

席勒及其同事的这些实验结果说明：用不纯的气体改善对放射光线的控制是可能的。虽然有些现象奇怪得难以解释。

显然，进一步的研究需要更详细地解释声致发光是如何产生的。这些实验给了人们新的启发。

再者，已经得到另一种宇宙辐射的初步结果，这就是整个太空中X射线的散射背景。在60年代首次发现X射线时，天文学家断定，一半X射线是类星体引起的，另一半则来历不明。研究人员把纹理输入宇宙早期演变的计算机模拟中去，发现在早期宇宙中能产生巨大的引力阱，宇宙气体会“掉”进阱里。气体受压缩被强烈加热，因而释放出强大的能量洪流。这一结果足以解释所有来历不明的X射线。

上述资料已初步表明纹理是一种有效的奇异物理学。纹理播种宇宙结构这一问题涉及许多复杂的物理现象，需要作更加深入的研究和探索，科学界正热切期待着它的新成果。