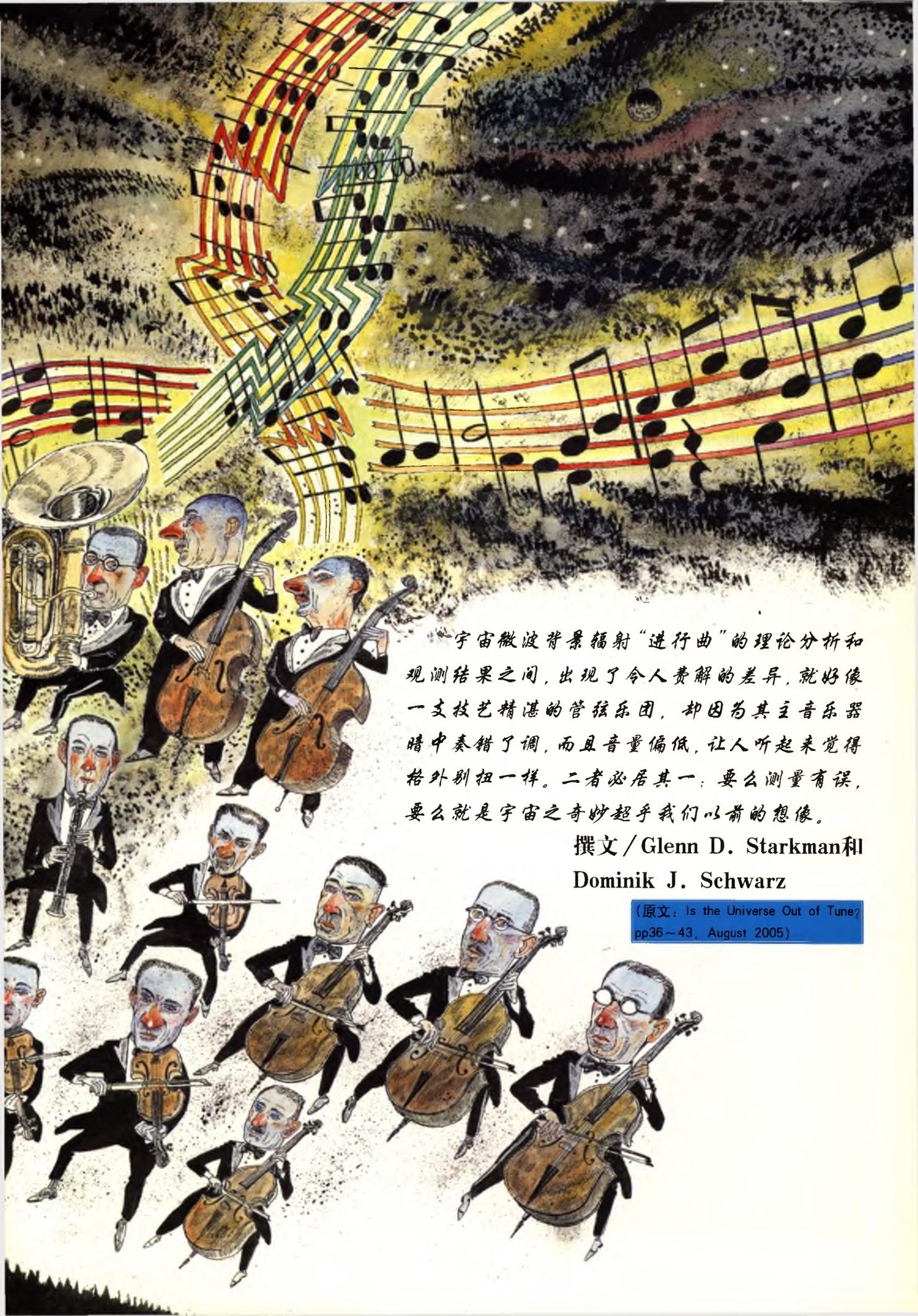


# 宇宙交响乐 跑调了吗？





“宇宙微波背景辐射“进行曲”的理论分析和观测结果之间，出现了令人费解的差异，就好像一支技艺精湛的管弦乐团，却因为其主音乐器暗中奏错了调，而且音量偏低，让人听起来觉得格外别扭一样。二者必居其一：要么测量有误，要么就是宇宙之奇妙超乎我们以前的想像。

撰文 / Glenn D. Starkman和  
Dominik J. Schwarz

(原文: Is the Universe Out of Tune?  
pp36~43, August 2005)

# 试

想像一支大得不可思议的管弦乐团,滔滔不绝地一连演奏了140亿年之久。乍听起来,乐曲的旋律还算和谐,但仔细一听,就会发现有点走调了。原来,乐团的大号和低音大提琴柔和演奏着的竟是不同的曲子,这真让人大跌眼镜。

科学家们在“倾听”宇宙微波背景辐射(CMB)演奏宇宙进行曲时,所遇到的正是这种情况(CMB辐射是我们观测早期宇宙状况最大尺度的窗口)。大爆炸发生之后不久,宇宙的能量密度就出现了明显的随机涨落。这种涨落可能是量子力学的作用造成的,它们的尺度迅速膨胀,最终变成了我们今天观测到的星系团。能量密度的涨落与声波很相似(通常的声波可以看作是空气密度的振荡),而这些140亿年以前在宇宙中回响的“声音”就被记录在CMB辐射中。现今我们看到的CMB温度波动,其实就代表了绘制在天空上的宇宙之音分布图。

同声波相仿,我们在考察CMB波动时,可以把它分解成其谐波分量,也就是把它看成是不同频率单纯音调的组合,说得更形象一点,可以把CMB波动看成是管弦乐队中不同乐器演奏乐音的总合。某些乐器演奏的声音要比预期的低一些。此外,这些乐器的配合也让人看不懂,它们演奏的调子不对头。音调尖常意味着宇宙学标准模型存在着问题(尽管此模型在其他方面大获成功),要不就是观测数据出了差错。

过去数十年间,科学家们建立并证实了宇宙学标准模型。利用该模型科学家们解释了宇宙一系列令人瞩目的特性。例如,这个模型可以解释最轻的几种元素(即氢、氦、锂的各个同位素)的丰度,并给出了宇宙的年龄(140亿年,此年龄与已知的最老恒星的估计年龄相符)。它还预测存在着CMB辐射,并预测这种辐射几乎是均匀的,同时解释了宇宙的许多特性为何恰好就是我们观测到的那种结果。

## 概述 / 不和谐的天

- 一项名为“暴胀 $\lambda$ 冷暗物质模型”的理论很圆满地解释了宇宙的许多性质。但在分析某些数据时,却出现了一些关键的矛盾。
- 这些令人费解的数据是在研究宇宙微波背景辐射(CMB)时获得的。天文学家把CMB温度波动分解为不同的“模式”,就好像把一支交响乐队分解为许多单一乐器一样。沿用这个比喻来说,我们遇到的问题就好像是大号和低音提琴在闹别扭,它们奏出的乐曲音量偏低,而且还跑了调。
- 这些数据可能受到了干扰(例如受到太阳系外侧区域中气体辐射的干扰),但即便如此,CMB数据暴露的问题,依然使本来在其他方面非常成功的暴胀模型开始面临严峻的考验。

宇宙学标准模型称为“暴胀 $\lambda$ 冷暗物质模型”,这个名称来源于该模型三个最基本要素,即暴胀过程,用希腊字母 $\lambda$ 表示的一个量(名叫宇宙常数),以及被称为冷暗物质的不可见粒子。

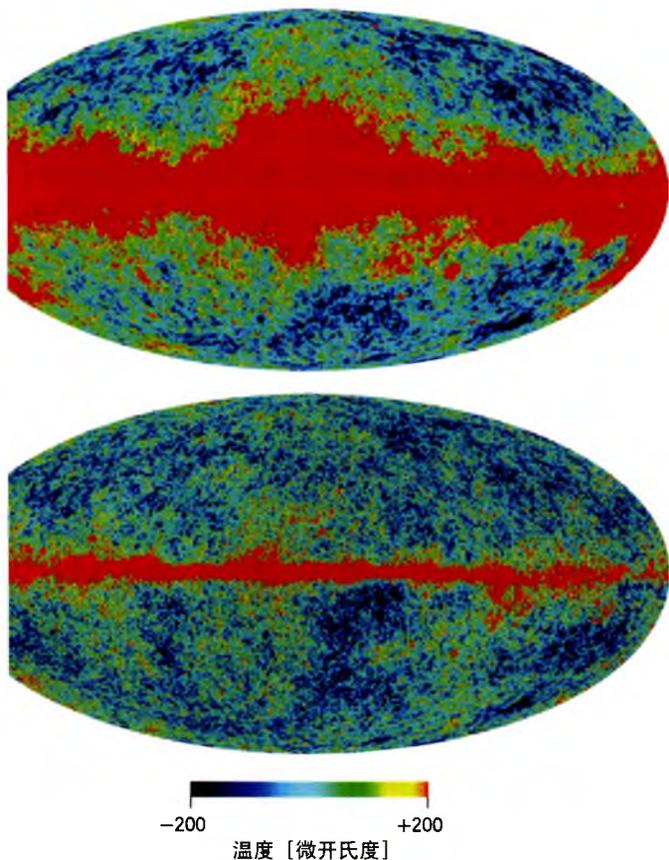
这个模型认为,暴胀是宇宙急剧加速膨胀的一个阶段,此阶段开始于宇宙诞生后的最初时刻,而终结于辐射的爆发。暴胀可以解释宇宙为何如此之大,为何有这样多的物质,为何非常接近于均匀。同时它也可以解释宇宙为什么不是完全均匀的:暴胀使能量密度的随机量子涨落被放大到星系团及更大的尺度。

该模型预测,暴胀结束后,密度偏大的区域在引力作用下向内坍缩,最终形成我们今天观测到的星系和星系团。这一过程必定要借助冷暗物质的一臂之力,此种物质由巨大的粒子云团构成,只有通过其引力作用才能探测到它们的存在。宇宙常数( $\lambda$ )则是一种奇异的反引力,它导致了现今宇宙膨胀的加速[参见本刊2004年第11期Lawrence M. Krauss和Michael S. Turner所著“宇宙常数的变迁史”]。

## 最古老的光

尽管该模型在解释宇宙的上述所有特性时大获成功,但当天文学家测量CMB的温度涨落时,问题便暴露出来了。CMB是宇宙学家探测宇宙大尺度性质最重要的工具。这种电磁辐射是最古老的光,它在大爆炸发生之后仅数十万年就粉墨登场,当时迅速膨胀并冷却的宇宙,开始从稠密而不透明的等离子体转变成透明的气体。因此,这种在空间中进行140亿年之久的CMB辐射今天可以为我们揭示一幅早期宇宙的图景。此图景来自宇宙最遥远的角落,它同时也是宇宙在最大尺度上的一幅快照。1965年,贝尔实验室的Arno Penzias和Robert Wilson最先发现了CMB,并测量了它的温度。后来,考察CMB温度如何随所观测天空区域的不同而变,就成了这项研究的前沿课题。(按专业上的说法,这种温度波动称为温度的各向异性。)天空各处的温度差异反映了宇宙早期的密度波动。1992年,CDBE(宇宙背景辐射探测器)卫星首次观测到了这类波动;随后,WMAP(威尔金森微波各向异性传感器)卫星绘制了高分辨率的CMB温度波动分布图。

$\lambda$ 冷暗物质模型及其他一些类似的模型无法计算出这类波动的确切模式。但它们可以预测这些波动的统计特性,同预测它们的平均尺度以及它们所跨越的尺度范围相仿。其中某些统计特性不仅是 $\lambda$ 冷暗物质模型能够预测,其他许多比较简单的暴胀模型也能够预测(历史上物理学家们曾先后考虑过以这些模型作为暴胀的理论方案)。由于这类特性出现于多个不同的暴胀模型中,因此它们被认为是暴胀的“共同”预测指标;如果暴胀的说



WMAP 卫星在K波段 [23千兆赫, 上图]、W波段 [94千兆赫, 下图] 以及其他三个图中未显示的波段上, 测量了天空的CMB辐射。整个天球被投射成椭圆形, 看起来跟世界地图很相似。水平的红色条带是来自银河系的辐射。这样一种“前景”辐射随波段的不同而变, 因此使它能够被识别出来, 并从数据中减除掉, 而微波背景辐射则没有这种特性。

法正确, 那么无论模型的细节有什么差异, 这些预测都将成立。反之, 如果一项预测被推翻, 那么暴胀的说法将遇到一项科学理论所能遇到的最严重挑战。CMB温度测量的异常结果, 可能就正是这样对暴胀理论将了一军。

为了最恰当地表达这些预测, 我们首先把温度波动分解为一个称作“球谐函数”的模式谱, 恰像声音可以分解为许多不同的音调一样 [见43页]。前面已经指出, 我们可以把尚未发展成星系的密度涨落看成是宇宙中的声波。如果这种把温度波动分解为不同模式的说法显得有点高深莫测的话, 那么不妨再用管弦乐团来比喻: 每种模式可以看作一件具体的乐器, 而横跨天球的整个温度分布图便是管弦乐团奏出的完整乐曲。

暴胀模型关于CMB温度波动作出的第一项共同预测是所谓“统计各向同性”。这就是说, CMB温度波动既不会对应于任何一个已有的优先方向(比如地球自转轴所指的方向), 也不会通过它们本身共同确定一个优先方向。

暴胀模型进一步预测, 每种形式的振幅(仍用管弦乐

团来比喻, 就是每件乐器演奏时发出的音量)是随机的, 存在一个可能的取值范围。具体地说, 振幅概率的分布呈钟形曲线(即高斯曲线)的形状。最可能出现的振幅(即曲线峰值处的振幅)为零, 但一般出现的是非零值的振幅; 振幅值离零越远, 出现的概率就越小。每种模式都有它自己的高斯曲线, 而其高斯分布的宽度(即“钟铃”底部的宽度)则决定了该模式有多大的功率(即有多大声音)。

暴胀理论告诉我们, 所有这些模式的振幅应当具有宽度几乎相同的高斯分布。之所以会如此, 是因为暴胀在使宇宙以指数增长的速度膨胀时, 就像一只无孔不入的宇宙电烙铁一样, 抹掉了所有特征尺度的痕迹。这样产生的功率谱不存在任何突出的特征, 因而被称为“平坦”功率谱。只有在暴胀结束或开始时所产生的模式中才会出现显著偏离平坦的情况。

### 缺失的音调

球谐函数代表了一系列越来越复杂的球面振动方式。当我们更加仔细地考察这类谐波时, 就会发现观测结果同模型的预测之间出现了十分棘手的矛盾。这些振动模式用起来相当方便, 因为我们有关遥远宇宙的全部信息都被投射在一个球面即天空上。最低的音调(用 $l=0$ 表示)是单极, 即整个球面一致地发出脉冲。CMB的单极是它的平均温度——2.725开氏度(即绝对零度以上2.725开, 见43页)。

次低音调(用 $l=1$ 表示)是偶极, 即一个半球上的温度上升, 而另一个半球上的温度下降。偶极以太阳系相对于CMB的运动所产生的多普勒频移效应为主; 在太阳运动的方向上天空的温度要稍稍高一些。

一般说来, 与 $l(0, 1, 2, \dots)$ 中每个值相对应的振荡被称为多极。任何一幅绘在球面上的地图, 无论是CMB的温度还是地球的地形, 都可以分解成一系列的多极。最低的多极是我们的温度分布图面积最大的波动, 即具有大陆和海洋尺度的波动。较高的多极则像面积依次减小的高原、山脉和丘陵(以及地沟河谷等)井然有序地迭加到面积较大的地形上。完整的复杂地形就是所有各个多极之总合。

对于CMB来说, 每个多极 $l$ 都具有一个总强度 $C_l$ ; 粗略地说,  $C_l$ 可看作是与该多极对应山脉和沟谷的平均高度和深度, 或是管弦乐团中该乐器演奏的平均音量。所有不同 $l$ 值的强度合起来称为角功率谱, 宇宙学家通常把这个功率谱表示为曲线图。

因为关于宇宙涨落的真正信息是从 $l=2$ 开始的, 所以功率谱图就从 $C_2$ 开始。第44页图中显示了WMAP测得的角功率谱, 以及同所有测量结果符合得最好的暴胀 $\Lambda$ 冷暗物质模型所预测的角功率谱。 $l$ 值最低的两个多极

(即  $C_2$  和  $C_3$ , 分别称为四极和八极), 其强度的测量值显著低于预测值。COBE 小组最先注意到低  $l$  功率的这种偏低现象, 而 WMAP 小组则在不久前证实了这一发现。对于地形来说, 这种现象就意味着大陆的高度普遍偏低, 而海洋也很浅, 令人难以理解; 对于音乐来说, 这种现象意味着管弦乐队缺大号和低音提琴。

如果我们不是考察总强度  $C_l$ , 而是考察所谓“角相关函数”(angular correlation function, 用  $C(\theta)$  表示), 那么上述现象就更显著了。要了解这个函数, 试想像我们观测天空中角距离为  $\theta$  的两个点, 并考察它们是都偏热(即高于平均温度)还是都偏冷, 或者其中一个偏热而另一个偏冷。 $C(\theta)$  衡量的是这两个点的温度涨落在多大程度上相关; 测定了天空中所有点的这种相关性之后, 其平均值便是  $C(\theta)$  的值。通过观测我们发现, 对于我们的宇宙, 当  $\theta$  大于  $60$  度时,  $C(\theta)$  的值便接近于零。这就意



味着在角距离超过  $60$  度的不同方向上, CMB 温度涨落是完全不相关的。此结果从另外一个角度证明了暴胀模型所预测的宇宙低音调是不存在的。

宇宙背景辐射不存在大角度相关性最先是 COBE 卫星发现的, 而现在 WMAP 卫星也证实了这一点。大角度上  $C(\theta)$  的值近于零不仅意味着  $C_2$  和  $C_3$  非常小, 并且还意味着头几个总强度(至少到  $C_4$ )值之比也相当离谱。大角度功率的缺失, 同所有的一般暴胀模型产生了严重的矛盾。

可以通过三条途径来破解这一谜团。首先, 上述异常结果或许只是一种统计失误, 并不能说明什么问题。特别是, 观测数据的不确定性可能大于原先估计的范围, 这将使得上述观测结果的不可几程度减小。其次, 这些相关性可能是观测假象——某种意外的物理效应造成了这一结果, 而 WMAP 小组在分析他们的数据时, 没有把这一效应考虑进去。最后, 这些异常结果也可能意味着理论存在着更深层的问题。

若干研究人员主张采用第一种解决方案。2003 年, 剑桥大学的 George Efstathiou 首次提出了计算四极强度及其不确定性时使用的统计方法所存在的问题, 并声称数据的不确定性其实要大得多。此后, 其他许多人也考察了 WMAP 小组计算低  $l$  值  $C_l$  的方法, 并认为银河系的辐射所导致的不确定性要比研究人员原先所推算的结果

大。

## 神秘莫测的相关性

暴胀理论面临着严峻的挑战, 为了正确评估上述研究人员对这种严重性所持的怀疑态度, 若干研究小组把目光转移到了  $C_l$ (即一种模式的总强度)所包含的信息之外。除了  $C_l$  外, 每个多极还蕴含着方向信息。例如, 双极的方向就是最热的半边天空的方向。更高的多极具有更多的方向信息。如果强度方面的理论与观测冲突真的只是一种假象的话, 那么从同一批数据中得出的方向信息应该显示正确的共同行为。但情况并非如此。

第一个令人费解的结果出现于 2003 年: 当时在宾夕法尼亚大学的 Angelica de Oliveira-Costa 和 Max Tegmark, 哈佛大学的 Matias Eslarriaga 以及博尔德科罗拉多大学的 Andrew Hamilton 注意到, 四极模式的优先轴和八极模式的优先轴其取向异常接近。这些模式同时也正是功率偏低的模式。一般的暴胀模型预测, 此

## 大角度功率的缺失, 同绝大多数暴胀模型产生了严重的矛盾。

类模式彼此间应当是完全独立的, 不应该出现取向相同的现象。

也是在 2003 年, 挪威奥斯陆大学的 Hans Kristian Eriksen 及其合作者报导的其他一些结果, 同样暗示存在着取向相同的现象。他们用所有各种可能的方式把天空划分为两个半球, 然后考察每一对半球上涨落的相对强度。他们得到的结果同标准暴胀宇宙学理论的预测背道而驰, 各个半球常常具有完全不同的功率值。但最出人意外的发现却是, 功率差异最大的一对半球, 正好就是位于黄道——即地球绕太阳运行的轨道平面——之上和之下的两个半球。这一结果是研究人员找到的第一个证据, 证明 CMB 涨落的起源大有蹊跷, 它原本应该是起源于宇宙深处, 可能混有一些来自银河系的辐射, 但上述结果却表明它还含有来自太阳系的信号, 即含有一种观测假象。

与此同时, 本文作者之一 Starkman 以及 Craig Copi 和 Dragan Huterer(两人当时均在凯斯西部保留地大学)提出了一种用矢量来表示 CMB 涨落的新方法(矢量是有方向的数学量)。借助这种方法, 我们几位研究人员(包括 Schwere, Starkman, Copi 和 Huterer 等)检验了关于 CMB 涨落不会形成宇宙中特定方向的预测。2004 年, 我们不但证实了 de Oliveira Costa 等人的结果, 而且还发现了一些出乎意料的相关关系。部分矢量距黄道面近得

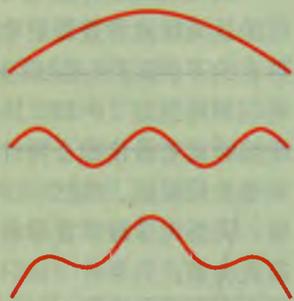
# 探测宇宙进行曲中的泛音



模式中，弦的一半朝某一方向运动，而另一半则朝相反方向运动，如下图所示。如果你唱“多—来—咪—法—索—拉—喜—多”，那么最后一个“多”就是相对于第一个“多”基调的一次谐波。如果一个音调有两个均匀排列的波节，就称为二次谐波，依此类推。



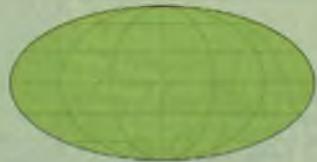
弦的任何一种复杂的振动方式都可以分解为组成它的各个谐波。例如，我们可以把下图中所示的振动看成基调 [n=0] 与四次谐波 [n=4] 之和。注意，四次谐波的振幅比基调低 [也就是它的波形较浅]。用管弦乐团来作比喻，就是说四号乐器演奏得比零号乐器更柔和。一般地说，弦的振动越不规则，它的总和音中所需的谐波就越多。



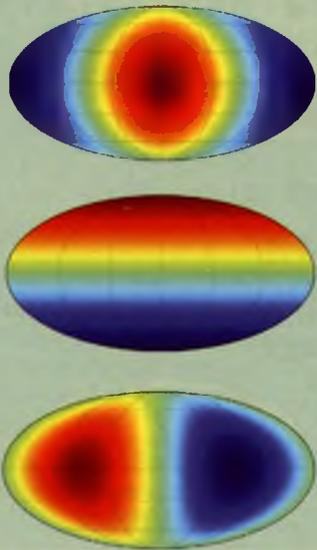
现在我们来考察球谐函数(用  $Y_{lm}$  表示)，也就是在球面状的“鼓”的周围形成的振动模式。由于球面是二维的，因此我们需要用两个数(即  $l$  和  $m$ )来描述球谐函数。 $l$  可取 0, 1, 2, …… 等值；对于每一个  $l$  值， $m$  可取  $-l$  到  $l$  之间的任意整数。

所有具有同一  $l$  值和不同  $m$  值的音调(每一音调都有各自的振幅，用音频的术语来说就是各自的音量)之总和就称为一个多极。

我们不可能像画提琴弦那样轻而易举地画出球谐函数，但可以用一幅球面图来表示球谐函数，该图上每一区域根据其温度高于还是低于平均温度来着色。[球面图的形状是将球面拉平而获得的，颇像教室里挂的世界地图的形状]。单极 [ $l=0$ ] 就是整个球面鼓均匀一致地振动的模式 [见下图]。

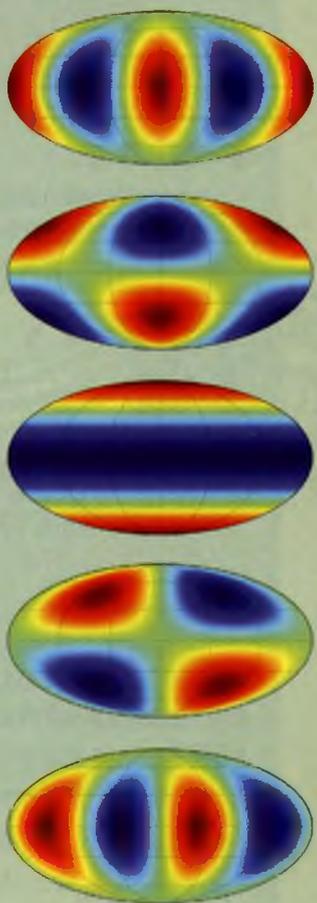


双极 [ $l=1$ ] 则是半边鼓面向外振动 [红] 而另外半边鼓面向内振动 [蓝] 的模式。有 3 种不同的双极模式 [ $m=-1, 0, 1$ ]，分别代表在 3 个互相垂直的空间方向上的振动 [即在垂直于页面的方向上振动，向上和向下振动，以及向左和向右振动]。



绿色区域中的温度为平均温度；这些节线相当于提琴弦上的节点。当  $l$  增大时，节线的数目也随之增加。

四极 [ $l=2$ ] 有 5 种模式，每种模式的振荡情况 [即球面上的温度波动情况] 更加复杂，如下图所示。



就像提琴弦的任何一种振动都可以分解成一系列谐波振荡之和一样，我们也可以把球面上的任何一种温度分布分解成上述球谐函数之和。每一种球谐函数都有特定的振幅，实质上代表了谐波存在的强度，也就是代表了宇宙管弦乐团中每种乐器演奏的音量。

— G. D. S., D. J. S.

**科** 学家们认为宇宙管弦乐图 [即 CMB 辐射] 中的某些乐器演奏时走调，且音量过低，这是什么意思呢？他们又是如何知道的呢？

CMB 研究人员考察太空中所有方向上测得温度的波动情况。他们用一类名为“球谐函数”的数学函数来分析这些波动。试想像一根提琴弦，即使不用手指把它压住使其缩短，它也能弹出无穷多种可能的音调。这些音调可以用  $n$  表示， $n$  是提琴弦奏出某一音调时，弦上处于静止状态点(弦的两个端点除外)的数目(这种点称为波节)。

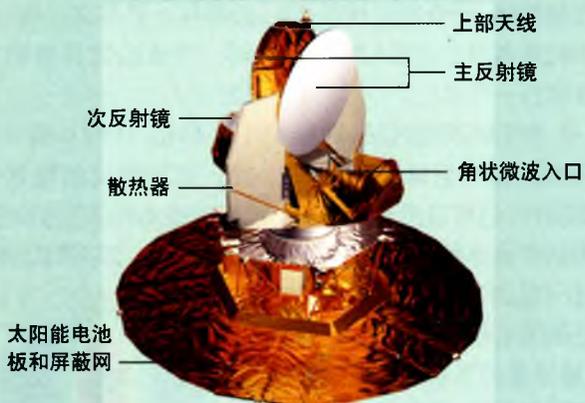
最低的音调称为基调，它没有波节 [ $n=0$ ]。此时整根弦(除两端以外)步调一致地来回振动，如下图所示。



有一个波节 [ $n=1$ ] 的音调称为一次谐波，此波节位于弦的中点。在这种振荡

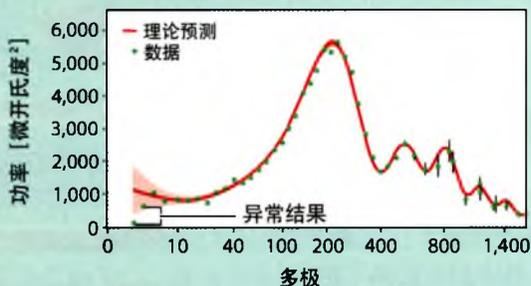
# WMAP 卫星暴出的意外结果

WMAP 卫星测得的数据在三个方面令人大惑不解。



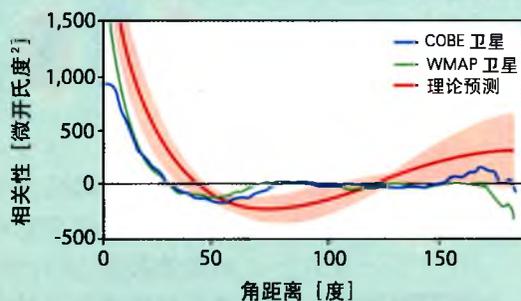
## 1 角功率谱

WMAP 卫星测得的数据绝大部分同早期实验中获得的数据一样，与暴胀  $\lambda$  冷暗物质模型所预测的数值非常吻合。但是前两个数据点 [多极]——分别代表四级与八极——其功率却偏低。



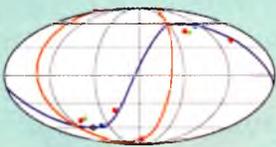
## 2 角相关函数

这一函数建立了天空中相距一定角度的各点上所测得数据之间的关系。COBE 卫星与 WMAP 卫星得出的数据曲线本应遵循理论曲线，但实际上在角距离大于 60 度之后，这两条数据曲线基本上为零了。



## 3 前两种多极的相关性

四级(蓝)和八极(红)本应是随机分布的，但实际上它们却聚集在二分点(空心圆圈)和太阳系的运动方向 [双极, 绿色] 附近。它们分布的位置也集中在黄道面(紫)上。有两个位于超星系面 [桔黄色] 上，银河系及多数邻近星系与星系团均在超星系面中。这些相关关系偶然出现的概率低于万分之一。



令人吃惊。而在黄道面内，这些矢量距二分点之近，也是研究人员始料未及的(二分点是地球赤道在天空的投影与黄道面相交的两点)。上述矢量与太阳在宇宙中运动的方向也十分接近，这一结果同样让人觉得很不对劲。另一个矢量则非常接近本超星系团形成的平面(称为超星系平面)。

即使采用比较谨慎的保守估计，上述每一种相关关系偶然出现的可能性均小于三百分之一。虽然它们并不是完全的相互独立，但其合并的偶然出现几率肯定小于万分之一，而且这一计算并没有把低  $l$  值多极的所有奇特性考虑进去。

部分研究人员觉得，所有这些结果均来自整个天空的 CMB 波动分布图总有点不对头。采用全天的 CMB 分布图看起来似乎是个优势，但在环绕天空的一个以银河系为中心的带状区域上，分布的 CMB 温度值或许并不可靠。为了推算出这个带状区域的 CMB 温度，首先必须排除来自银河系的辐射成份。WMAP 小组或其他研究小组用来排除银河系辐射干扰的方法恐怕就不那么可靠。事实上，WMAP 小组提醒其他研究人员不要使用 WMAP 的全天分布图；该小组自己的分析工作使用的仅仅是把银河系排除在外的天空区域。普林斯顿大学的 Uros Seljak 和卢布尔雅那大学的 Anze Slosar 把银河带排除后，结果发现在部分波段上，上述某些相关关系的统计显著性就有所减弱，但他们也发现在另一些波段上，这些相关关系有所增强。我们自己的后继研究表明，相关关系的观测结果不可能用银河系的作用来解释。事实上，如果 CMB 波动与太阳系扯上关系是因为我们对银河系的认识有偏差而造成的，那才真叫咄咄怪事了。

如果我们更仔细地考察一下角功率谱，那么就更有理由认为微波背景辐射和太阳系之间的上述关系是真正存在的了。除了在低  $l$  段上功率偏低之外，研究人员还发现在另外三处 ( $l=22$ ,  $l=40$  和  $l=210$ ) 功率谱的观测结果同时具有最佳拟合特性的  $\lambda$  冷暗物质模型所预测的功率谱大相径庭。虽然不少研究人员早就注意到了这些矛盾，但绝大多数宇宙学家没有注意到这三项差异也与黄道有关系。

## 作者简介

Glenn D. Starkman 和 Dominik J. Schwarz 2003 年在欧洲核子物理研究中心开始首次合作。Starkman 是凯斯西部保留地大学物理学与天文学系、宇宙学及天体物理学教育和研究中心的 Armington 教授。Schwarz 从奥地利维也纳理工大学毕业后，一直从事宇宙学研究。不久前，他应德国 Bielefeld 大学的聘请到该校任教。他的研究方向主要是宇宙的物质及其早期状态。

对于低 $l$ 值CMB信号同太阳系特性之间的这种相关关系,最可能的解释有两种。第一种说法是WMAP仪器的建造或我们对WMAP仪器的认识出了问题,或者是对WMAP数据(即所谓系统数据)的分析有偏差。但是WMAP小组可以说是细心得不能再细心了,而且已经对他们的仪器和分析方法进行了多次的交叉核查。简直无法想像虚假的相关关系如何能够莫名其妙地混入到分析结果中。此外,我们在COBE卫星所摄制的CMB分布图中也发现了类似的相关关系,而COBE小组所使用的仪器和分析方法均与WMAP不同,因此它所获得的系统数据应该基本上是独立的。

一种更可能成立的解释是,有某个人们未曾预料到的微波光子源或吸收体使上述数据受到了干扰。这个新的微波源应当与太阳系有某种关系,说不定它就是太阳系外侧区域中某个未知的尘埃云团。但这种解释并不是没有问题。太阳系的一个微波源所发出的辐射,怎么会恰巧就在CMB的波长附近亮得足以被CMB仪器所发现,而在其他所有波长上,却又暗得至今尚未被探测到呢?我们希望我们将来最终能够充分深入地探究这样一种前

## 这些结果可能把我们打发回早期宇宙的设计阶段。

景辐射源,以排除它对CMB数据的干扰。

### 回到设计阶段?

乍看起来,发现CMB数据中存在着来自太阳系的干扰,似乎解决了大尺度振荡偏低之谜。然而事实上它却是雪上加霜,使这个问题变得更加棘手了。把假设的来自前景辐射源的干扰排除之后,剩下的来自宇宙辐射的CMB成分就比我们原先所认为的更微弱了(如果想得出其他结论,那就要求来自宇宙的辐射和我们所猜测的前景辐射碰巧完全相互抵消)。这样我们将更没有理由宣称低 $l$ 值功率偏低只是偶然的统计偏差。看来暴胀理论遇到了大麻烦。

统计上站得住脚的结论是,在大尺度上功率的实测值小于预期值,这一结论可能把我们打发回早期宇宙的设计阶段。当前提出的一些替代一般暴胀模型的方案都不大被人们看好。一个精心拼凑出来的暴胀模型可以使功率谱正好在恰当尺度上出现异常,从而演绎出我们观测到的大尺度功率偏低的现象,但这种人为策划的暴胀过于牵强附会,超出了我们在构建合理科学理论时所应该遵循的界限,恰如托勒密在天体运行的轨道中添加一

个又一个假想的本轮以使它们符合地心说一样,蓄意制造的成分过于浓厚了。

一种可能性是宇宙具有一种复杂得出人意外的拓扑结构[参见本刊1999年第7期Jean Pierre Luminet, Glenn D. Starkman及Jeffrey R. Weeks所著“太空有限吗?”。如果宇宙是有限的,并且像炸面饼圈或椒盐卷饼那样呈现出种种别开生面的卷绕结构,那么它所允许的振荡模式将会有相应的改变,能够严格反映出它对应的拓扑结构。我们或许能够“听出”宇宙的形状,就像我们可以听出教堂的钟和风铃的差异一样。从这一方面来说,最低的音调,即最大尺度的振荡,应该是最能反映出宇宙形状(和大小)的音调。宇宙可能有一种引人入胜的拓扑结构,但是它所经历的暴胀却又可能只是使这种拓扑结构刚好露出一点点,这样我们不但很不容易看清它的庐山真面目,要想对它进行检验那就更加难上加难了。



有希望摆平这些问题吗?当然,我们期望从WMAP卫星获得更多数据,不仅包括天空温度涨落情况的数据,而且也包括我们接收到的光偏振数据,这类数据或许有助于揭示前景辐射源的存在。欧洲空间局定于2007年发射普朗克卫星;与WMAP卫星相比,此卫星将在更多频段上测量CMB辐射,其角分辨率也将进一步提高。角分辨率的改进不一定有助于搞定低 $l$ 之谜,但是通过多种微波“颜色”来窥测天空,将大大增强我们控制系统数据和前景数据的能力。宇宙学研究还将继续暴出种种令人大跌眼镜的猛料,可千万不要错过了哟。

[武晓岚/译 杨光/校]

### 参考文献

First Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Preliminary Maps and Basic Results. C. L. Bennett et al. in *Astrophysical Journal Supplement*, Vol. 148, page 1; 2003.

The Cosmic Symphony. Wayne Hu and Martin White in *Scientific American*, Vol. 290, No. 2, pages 44-53; February 2004.

The WMAP Web page is at <http://wmap.gsfc.nasa.gov/>

