

普朗克卫星与宇宙微波背景辐射

夏俊卿

大爆炸与宇宙微波背景辐射

目前对于宇宙起源的认识主要来自热大爆炸宇宙理论。根据这一理论，在宇宙的极早期，物质以高温高密的等离子体形式存在，并且处于热平衡状态。由于大量自由电子会与光子频繁发生散射，使得光子的平均自由程很短，宇宙处于不透明的状态。随着宇宙的膨胀，其温度不断降低。当宇宙年龄大到 38 万年时，宇宙温度就已降至 3000 K 了，等离子体中的自由电子被质子俘获，形成中性氢原子，宇宙进入复合阶段（recombination）。宇宙中自由电子的数密度急剧减少，光子和自由电子的散射几率明显降低，光子的平均自由程大幅度增加，宇宙变得透明起来。最后，完全失去与自由电子碰撞机会的光子便从热平衡系统中退耦出来，开始自由传播。这便是今天观测到的宇宙微波背景辐射（Cosmic Microwave Background，简称 CMB），它是目前能探测到的最古老的辐射。CMB 携带了丰富的宇宙学信息。这些极早期的信息，可以精确地限制宇宙中物质的组分、宇宙的年龄和几何性质等。因此，CMB 实验是宇宙学研究领域最为重要的实验观测。

1965 年，贝尔实验室的彭齐亚斯（A. Penzias）和威尔逊（R. W. Wilson）在调试一个为回声卫星计划而建造的角形反射天线时，在射电波段意外发现了约为 3.5 K 的过剩天线温度。在排除了辐射来自天线内部或临近环境的可能性后，他们肯定这一各向同性、非极化的、与季节无关的辐射是来自宇宙远处的辐射信号。科学家认为，这就是 CMB 的信号。CMB 的发现无疑是宇宙学发展中最重大的事件之一，它和星际有机分子、类星体、脉冲星被誉为 20 世纪 60 年代天文学的“四大发现”。彭齐亚斯和威尔逊也因为宇宙微波背景辐射的发现而获得了 1978 年的诺贝尔物理学奖。

COBE 卫星

为了进一步研究 CMB 的特性，需要在更多的频率波段上探测其信号，特别是毫米和亚毫米波段。可是在这些波段，地球大气会对测量产生很大的影响，必须将仪器载在气球或者火箭上来进行实验。因此，在 1965 年 CMB 被发现之后，国际上提出了很多实验项目，比如 COBRA、RELIKT-1、BIMA、FIRS、ACME/HACME 等实验。可是这些实验都是在地面上或者是在大气层内进行的，使测量精度受到

限制。

1976 年，美国国家航空航天局（NASA）计划将 3 个实验仪器：探测 CMB 温度涨落各向异性的探测器 DMR，测量 CMB 能谱的分光光度计 FIRAS 和探测星际尘埃辐射的红外多波段探测器 DIRBE 合并到一起，建造宇宙背景探测者卫星（Cosmic Background Explorer，简称 COBE），并于 1989 年 11 月 18 日将 COBE 卫星发射升空。

卫星升空运行后不久，FIRAS 仪器便对 CMB 能谱给出了精确的测量，它精确符合普朗克黑体辐射谱的理论曲线，计算得出今天背景辐射的温度为 $T=2.728\pm 0.004$ K，充分肯定了热大爆炸宇宙理论的正确性。另外，经过 3 年多数据的积累，DMR 仪器在 1992 年首次探测到了与 CMB 温度涨落相关的各向异性数值： $\Delta T/T\sim 5\times 10^{-5}$ ，这一结果与理论预期值非常一致。作为对热大爆炸理论的检验，COBE 实验给出了完美的答案。因此，FIRAS 和 DMR 仪器的主要领导者马瑟（J. Mather）和斯穆特（G. Smoot）获得了 2006 年的诺贝尔物理学奖，以表彰他们对 CMB 黑体谱和温度涨落各向异性的发现。

WMAP 卫星在 COBE 卫星巨

大观测成果的推动下，2001年6月30日，新一代卫星在美国佛罗里达州卡纳维拉尔角的肯尼迪航天中心发射升空，围绕着日-地系统的距离地球约150万km的拉格朗日2点(L2)运行，它的全称是威尔金森微波各向异性探测器，即WMAP，是以CMB研究先驱者威尔金森(D. Wilkinson)命名的。WMAP是继COBE卫星之后的，又一颗以测量CMB为主要科学目标、进行全天空扫描的空间探测卫星。与COBE不同的是，WMAP的精度更高。

作为COBE卫星的继承者，WMAP卫星探测器在精度上提高了45倍，角分辨率提高了33倍，并且在5个频率波段(23、33、41、61和94GHz)上对CMB进行观测，其目标是探测CMB温度之间的微小差异，精确测量CMB功率谱，以帮助检验各类宇宙学模型。WMAP距离地球很远，这当然消除了来自地球的各种干扰；但WMAP还有更多的考虑，即要消除掉来自太阳的干扰。在这个“拉格朗日点”处，WMAP可以(与地球同步地)绕太阳运行，它还能受到地球的遮掩，这就屏蔽掉大量的干扰。分辨率为13角分的新一代WMAP卫星对于CMB各向异性的测量要更加精确，观测到了重要的细节部分，可以从中得到大量的宇宙学信息。

2003年2月份，WMAP实验组公布了卫星运行一年得到的观测数据和物理分析结果。CMB功率谱中丰富的宇宙学信息对于众多宇

宙学参数给出了精确的限制，如宇宙年龄、宇宙各组分等，引起了科学界的广泛关注，并在当年底被美国《科学》杂志评为“世界十大科技进展”之一。此后，WMAP实验组于2006年3月、2008年2月、2010年1月和2012年12月先后公布了WMAP卫星运行3年、5年、7年、9年的观测结果。2010年9月，WMAP卫星被关闭并离开L2点，结束了长达9年的观测生涯。

WMAP实验对CMB各向异性的精确测量结果，已经被应用到宇宙学研究的各个方面，取得了一大批高质量的科研成果，是目前宇宙学研究领域最重要的观测数据。因此，WMAP实验是近10年里最重要的宇宙学观测，其高质量的观测结果极大地推动了宇宙学的发展，使宇宙学成为一门精确的科学，进入了“精确宇宙学”的时代。2010年，邵逸夫天文学奖授予了WMAP实验组的本内特(C. L. Bennett)、佩治(L. A. Page)和斯佩格(D. N. Spergel)。2012年，“彼得和帕特里夏·格鲁伯(Peter and Patricia Gruber)”基金会也将格鲁伯宇宙学奖授予了本内特和WMAP实验组，以表彰WMAP实验对宇宙微波背景辐射的高精度测量，并以此对宇宙的起源、组成、年龄和几何性质等给出精确限制，使得宇宙结构形成的研究成为一门精确的科学。

普朗克卫星

经过了几十年的发展，CMB领域取得了丰硕的研究成果，特别是WMAP卫星的精确观测结果，

在宇宙学研究中起到了至关重要的作用，推动了“精确宇宙学”的发展。为了进一步利用CMB观测来研究宇宙的起源、形成和演化等性质，下一代更高精度的CMB实验被提上了日程。在美国人把WMAP放到太空的同时，欧洲人也制定了自己的探测计划。他们也要发射一颗与WMAP类似的卫星。但这颗卫星要更加昂贵了，费用达7亿欧元，是WMAP的5倍左右。

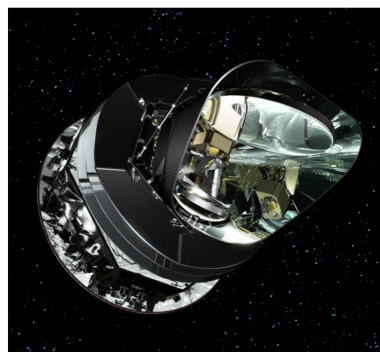


图1 欧洲空间局发射的普朗克卫星

普朗克(Planck)卫星是欧洲空间局(ESA)发射的用于观测CMB温度涨落各向异性的卫星，它是继COBE和WMAP卫星之后的第三代CMB空间实验卫星。在COBE实验取得巨大成功之后，1992年，两个空间CMB实验组(COBRAS和SAMBA)提出进行更高精度空间CMB实验的想法。1996年，ESA将他们合并为实验COBRAS/SAMBA，并把这个探测器以普朗克的名字命名。这是著名的德国物理大师普朗克(Max Planck)的姓氏。目前，普朗克卫星实验是欧空局“Cosmic Visions 2020”项目的一部分。

当WMAP计划接近尾声时，普朗克卫星则盛装登场。它于

2009年5月14日升空，同样是在日-地系统L2点运行。当年8月份就开始工作。普朗克卫星主要由两部分组成：高频组探测器是Bolometer测辐射热计，覆盖100~857GHz共6个频率段，运行温度为0.1K，使用氦3作为冷却剂。在2012年1月14日，氦3冷却剂用光，至此高频组探测器成功地运行了30个月，对全天空的CMB进行了5次高精度的扫描，超出了设计之初预计的2次扫描。而低频组探测器是HEMT放大器，覆盖30~70GHz共3个频率段，运行温度为20K，使用氦4作为冷却剂，计划于2013年下半年停止运行。

普朗克设计寿命是一年半，可喜的是，普朗克超期“服役”一倍的时间。因为氦消耗完后，对应的仪器也就停止工作了。当然，对于不需要低温的仪器仍然在工作着。

比起WMAP，普朗克除了证实WMAP的测量结果，普朗克还达到了更高的测量精度。比如说，宇宙的年龄确定为138亿年。对于宇宙的构成，普朗克的测量结果是可视的物质只占到4.9%，暗物质要多出4倍多，即达到26.8%；关于导致宇宙加速膨胀的暗能量，竟然占到68.3%，比暗物质或暗物质与可视物质的和还要多出1倍多。普朗克比起前二者（COBE和WMAP），除了精度上的数据测量，还有一些重要的发现。

图2显示的是普朗克卫星和WMAP卫星对CMB温度涨落测量精度的比较。相对于WMAP卫星，

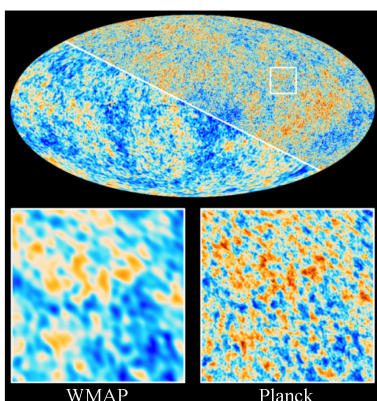


图2 普朗克卫星和WMAP卫星对CMB温度涨落测量精度的比较

普朗克卫星将以10倍于它的高灵敏度和近3倍于它的高角分辨率。可在30~857GHz的9个频率波段上对全天空进行史无前例地精确扫描。从图2中可以发现，普朗克卫星对于CMB温度涨落的测量明显要精确很多，可以观测到更小尺度上温度涨落的结构。高精度的CMB图像可以精确显示CMB温度涨落各向异性的功率谱，特别是在小尺度上，可以对众多宇宙学模型的参数给出精确的限制，特别是宇宙早期的暴涨模型和宇宙大尺度结构的形成。另外，普朗克项目还会通过观测CMB的引力透镜效应和ISW效应，观测河外的射电源和红外源等。

在CMB温度涨落的观测过程中，会受到各类不同前景的污染，比如星际尘埃辐射、同步辐射光，等等。由于CMB的温度本身已经非常低了，测量温度之间的涨落是非常困难的，一点点微小的污染都会影响最终的结果，所以如何有效地去除各类前景污染是CMB实验观测的重中之重。各类前景污染会在不同的频率波段上占主导地位，

可以通过多波段的观测有效地分析这些前景污染，从而从CMB观测中去除这些前景污染，得到干净的CMB温度涨落的图像。这一过程被称为成分分离（Component Separation），这是笔者在普朗克项目合作组的主要工作之一。图3显示的是普朗克卫星数据在去除各类前景污染之后得到的干净的全天空CMB温度涨落图像。图中颜色的深浅代表温度的高低，红色代表温度高于CMB全天空的平均温度，蓝色代表温度低于CMB平均温度。这一图像来自于宇宙极早期，CMB的温度不是完全均匀各向同性的，天区之间存在着微小的温度涨落，而这一微小的涨落恰恰对应着宇宙极早期的原初密度扰动，也就是形成宇宙大尺度结构的原初种子。通过对这一微小的温度涨落的分析可以充分了解极早期的宇宙以及之后宇宙的演化过程。

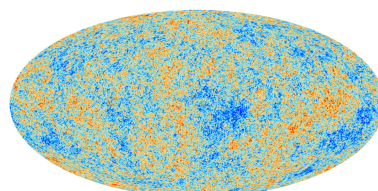


图3 普朗克卫星观测的全天空CMB温度涨落图像

普朗克卫星第一批宇宙学结果

CMB实验最基本的观测量是背景辐射的强度，它是频率(ν)和方向(\hat{n})的函数。因为CMB能谱是一个具有几乎常数温度 T 的标准黑体谱，通常将CMB的观测量表述为温度的涨落。

如果温度涨落具有高斯性，

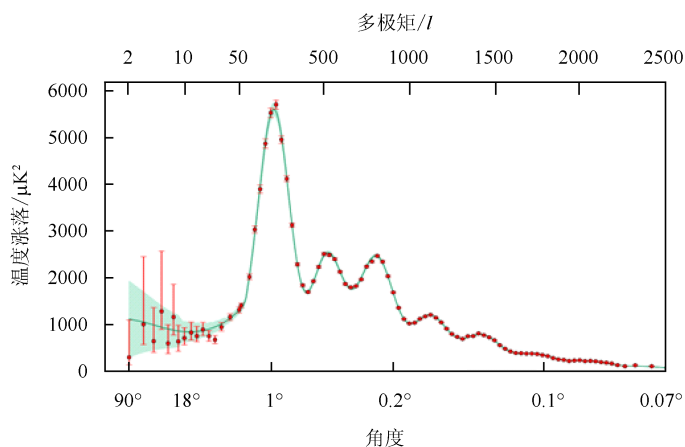


图4 普朗克卫星观测到的 CMB 温度涨落各向异性的功率谱

可以对其进行展开得到温度场的多级矩。在天空中的一小块区域里，因为角波长 $\theta=2\pi/l$ ，所以大的多级矩对应着小的观测尺度。图4显示的是普朗克卫星观测到的最新的 CMB 温度涨落各向异性的功率谱。最大的观测尺度在图的左边，从 90 度开始，往右尺度不断变小，而对应的多级矩 l 显示在图的上方。图中红色的点是观测值及其误差，绿色实线是最佳理论模型的预期值。此外，功率谱的测量受到“宇宙方差”（cosmic variance）的限制，功率谱的测量精度随着 l^{-1} 而变化，例如 $l=100$ 处的功率谱的测量精度为 $\sim 1\%$ ，而 $l=1000$ 处的功率谱的测量精度为 $\sim 0.1\%$ ，如图4中的浅绿色区域所示。可见“宇宙方差”的影响主要在较大的观测尺度上，所以图中大尺度功率谱的观测误差是比较大的，而在小尺度上，普朗克卫星的观测结果和理论模型预期是精确符合的。CMB 温度涨落功率谱和宇宙学模型的众多参数有关联，通过分析 CMB 温度涨落功率谱，可以极高精度地测量各类宇宙学模型的参数，严格限制各类宇宙

学模型，这是此次普朗克数据公布的宇宙学部分的主要科学结果。

暴涨模型

CMB 观测的背景辐射来自于宇宙的极早期，所包含的信息对于研究暴涨模型是非常重要的。在与部分暴涨模型的理论预期进行比较后，可以看出部分暴涨模型已经被目前的数据所排除，还有一些模型也可以给出很好的限制。

暴涨模型还预言原初扰动的统计分布是非常接近高斯分布的。通过测量相对于高斯分布的偏离（即非高斯的），这是检验暴涨模型的非常有效的手段。

宇宙各物质组分

今天的宇宙包含了很多的物质组分，比如冷暗物质、暗能量、

普通重子物质和辐射等。随着宇宙的膨胀，辐射物质在今天宇宙中所占比重已经非常的小，可以忽略不计。暴涨模型预言今天的宇宙是非常平坦的。利用普朗克卫星的数据，说明今天的宇宙是非常平坦的，这与暴涨模型的预言符合得很好。在平坦宇宙的假设下，利用普朗克卫星的数据得出，今天宇宙中重子物质、冷暗物质和暗能量的比重分别为 $\Omega_b h^2=0.02207\pm 0.00033$ 、 $\Omega_c h^2=0.1196\pm 0.0031$ 和 $\Omega_\Lambda h^2=0.686\pm 0.020$ ，已经在非常高的精度上证明了冷暗物质和暗能量的存在。宇宙各物质组分的结果和之前 WMAP 卫星数据得到的结果有一定的出入，如图5所示，暗能量的组分有一定程度的减少，而物质组分有所增加，主要原因来自于对今天哈勃常数的测量存在一定的偏差。普朗克卫星之前，WMAP 卫星对于哈勃常数的测量为 $H_0=70.0\pm 2.2 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ （68% C. L.，即统计上的 1σ 的置信区间），而现在普朗克卫星给出的测量结果是 $H_0=67.4\pm 1.4 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ （68% C. L.），正是这一改变导致了宇宙中各物质组分的比重

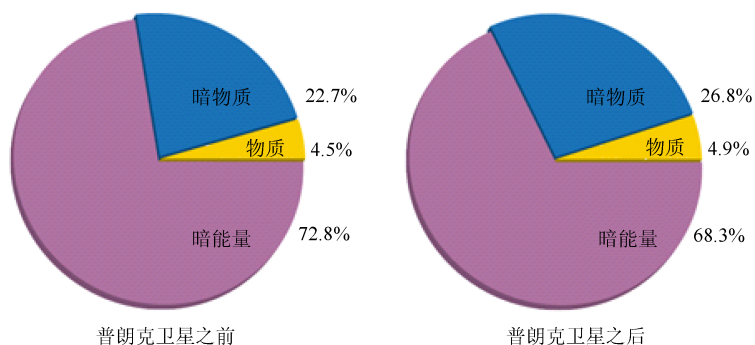


图5 普朗克卫星数据前后宇宙各物质组分比重的结果比较

发生了一定的修改。这一结果和其他宇宙学观测存在着一定的差异，还需要进一步的研究。

由于普朗克卫星数据分析结果显示宇宙中的暗能量比原先认为的更少，而物质的组分变得更高一些，使得宇宙的膨胀速度要比我们之前原先认为的更慢一些，宇宙年龄则比原先的计算结果更古老，达到 138.13 ± 0.58 亿年，这比此前 WMAP 卫星数据给出的约 137 亿年早了大约 1 亿年。

此外，普朗克卫星数据还测量暗能量的状态方程，这是目前研究暗能量性质的主要方法。在平坦宇宙模型的框架下，普朗克卫星的数据显示，目前暗能量状态方程的限制是与宇宙学常数模型自洽的。

中微子性质

中微子质量对于 CMB 温度涨落功率谱会有一些影响，特别是小尺度上的功率谱，不过由于影响不是非常明显，所以利用 CMB 数据对中微子质量和的限制比较弱。普朗克卫星数据给出的中微子质量的 95% 置信区间的上限为 $\Sigma m_\nu < 0.933$ eV。加入其他宇宙学观测数据之后，对中微子质量的限制变为 $\Sigma m_\nu < 0.23$ eV。此外，中微子的有效代数也是目前 CMB 实验的研究热点之一，在标准宇宙学模型中，中微子的有效代数 $N_{\text{eff}} = 3.046$ 。利用普朗克卫星数据可以得出对于中微子的有效代数的限制为 $N_{\text{eff}} = 3.51 \pm 0.40$ (68% C.L.)，结果是与标准 Λ CDM 模型预言的 $N_{\text{eff}} = 3.046$ 自洽的。进一步加入其他宇宙学数据之后， $N_{\text{eff}} = 3.30 \pm$

0.27 (68% C.L.)，误差缩小了将近一倍。结果是与标准模型预言的 $N_{\text{eff}} = 3.046$ 自洽的，在 3σ 的置信度上排除了第四代中微子的存在。

CMB 引力次级效应

普朗克卫星的重要科学目标之一是探测 CMB 的引力次级效应：透镜效应和积分 Sachs-Wolfe 效应（简称 ISW 效应）。

宇宙大尺度结构的引力势阱会对 CMB 的背景辐射产生透镜效应，使其发生偏折，在 CMB 温度涨落功率谱上，透镜效应会导致功率谱在 $1 \sim 2000$ 的尺度上被改变约 10%，同时还会将大尺度的功率谱向小尺度移动，并在 $l > 4000$ 的尺度上成为 CMB 温度功率谱的主要效应。利用普朗克卫星的高精度观测结果，特别是小尺度上功率谱的测量，确认了 CMB 透镜效应的存在。此外，随着宇宙的加速膨胀，CMB 背景辐射在落入引力势阱时获得的能量要大于爬出引力势阱时失去的能量，从而导致光子能量的改变，影响光子温度涨落的各向异

性，产生 ISW 效应。探测这一效应需要利用 CMB 和宇宙大尺度的密度涨落之间的两点关联，是笔者在普朗克项目合作组主要负责的工作。利用斯隆数字化巡天 (SDSS) 和美国国家射电天文台的甚大视场巡天观测 (NVSS) 等巡天观测，我们发现普朗克卫星观测到的 CMB 温度涨落和宇宙大尺度的密度涨落之间的两点关联性质是明显大于零的，在大于 95% 的置信度上确认 ISW 效应是存在的。

反常现象

到目前为止，普朗克卫星的观测结果和标准宇宙学模型的预言符合得非常好，高精度的实验数据对于宇宙学模型的相关参数给出了非常精确的测量。但是，这些数据还发现了一些和标准宇宙学模型不自洽的反常现象，这些反常现象促使我们去思考，是否在标准的宇宙学模型背后还隐藏着更深层次的物理。

在这些反常现象当中，最重要的就是 CMB 温度涨落在大尺度

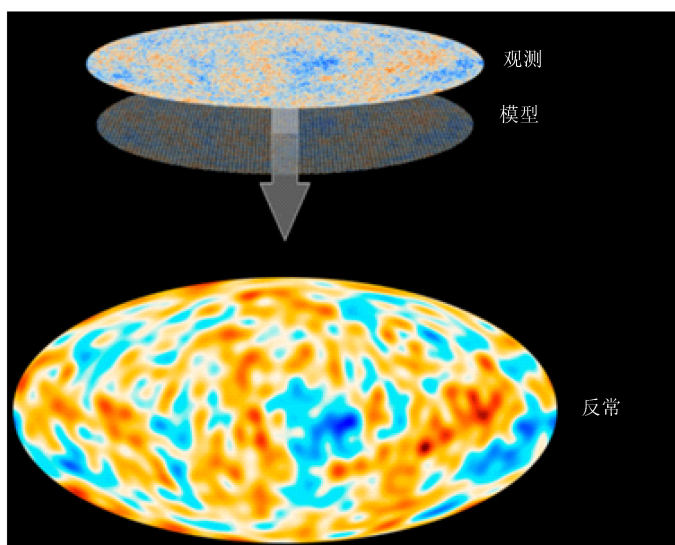


图 6 普朗克卫星数据发现的 CMB 大尺度功率谱的缺失现象

上存在着明显的功率谱缺失现象。在图 6 中，通过比较实际观测到的全天空 CMB 温度涨落图像和最佳理论模型所给出的预期图像，可以得出他们之间的不一致，即图 6 中所示的温度涨落图像。可以发现，在大的观测尺度上，剩余下来的图像还存在着明显的温度涨落现象，这说明实际观测到的 CMB 温度涨落没有理论预言的那么强，这一反常现象从之前图 4 的 CMB 温度涨落功率谱上也可以看出来，功率谱最左边第一个数据点要明显低于标准模型的理论预期。这一结果在最初的 WMAP 卫星观测数据中已经被发现了，国内外众多学者利用众多模型对这一反常现象进行解释，现在更高精度的普朗克卫星也发现了这个反常，这将促使我们去进一步深入研究现有的宇宙学模型。

普朗克卫星数据还发现在 CMB 全天空温度涨落图像的两个半球上 CMB 的信号并不一致。图 7 显示的是 CMB 全天空温度涨落图像，横穿图像的白色实线将图像分为南北两个半球。通过颜色即可发现，南半球的 CMB 平均温

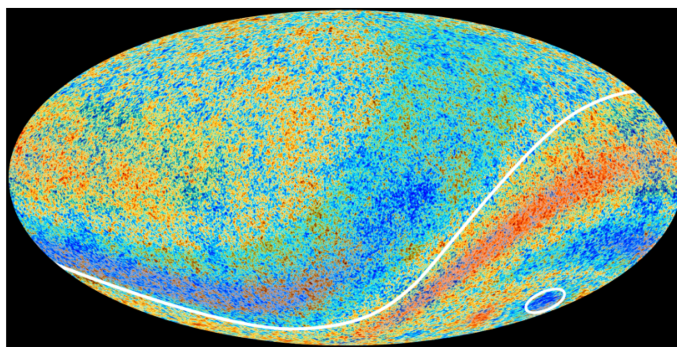


图 7 普朗克卫星发现的半球不对称现象和冷点现象

度要明显高于北半球的平均温度。这一反常现象似乎在暗示宇宙在大的观测尺度上并不是高度的各向同性，部分区域的信号要明显强于全天空的平均信号。此外，普朗克数据还在南部天区发现了一块很大面积的“冷点”(也叫“冷斑”)，其温度要明显低于全天空的 CMB 平均温度。这些反常现象将促使我们回头去重新思考宇宙学研究中的一些最基本的假设，希望借助对普朗克卫星数据的进一步分析将会最终揭开这些反常现象的缘由。

CMB 实验发展方向

现代的宇宙学观测，特别是 CMB 观测，强有力地支持大爆炸宇宙学，并认为宇宙在极早期存在一个暴涨过程。暴涨模型的众多预言都已经被实验观测所证实，比如

宇宙的平坦性等。但是，暴涨模型预言的原初张量扰动，由于其扰动幅度太小并没有被目前的 CMB 实验观测到，即便是目前最高精度的普朗克实验，也很难对原初张量扰动给出非常精确的测量，因为这一微小的信号很容易受到各种系统误差的影响。围绕着探测原初张量扰动，国外已经提出了很多相关的 CMB 极化实验，比如 EBE_x 气球实验、Spider 气球实验、位于智利的 PolarBear 地面实验和位于南极的 QUBIC 地面实验，这些实验的科学目标是精确测量原初张量扰动，高精度检验暴涨模型，从而更好地了解早期宇宙的历史。

(中国科学院高能物理研究所粒子天体物理中心 100049)

科苑快讯

揭秘远距离双星系统

在远距离双星系统中，即使其距离比冥王星与太阳之间的还要远，仍会围绕彼此运转。最近的例子很容易找到，那就是阿尔发人马座。它是太阳最近的恒星邻居，包括一颗亮星和一颗 1/4 光年外的

暗淡恒星。而那颗亮“星”其实就是一个双星系统，所以阿尔发人马座其实有 3 颗独立的恒星。

《自然》(Nature)网站报道，经过计算机模拟发现，双星系统最初开始于三星系统，其中的两颗星联合起来赶走了第三颗星。如果远处的恒星受到另外两颗星的引力束缚(譬如阿尔发人马座)，它将以双星系统为中心在一个高

度椭圆的轨道上运转。维持稳定的关键很简单，就是远处的恒星一定要注意保持距离。或许我们的太阳在出生时也有两个兄弟，不过它没有注意这个忠告，随着两颗恒星逐渐联合，太阳意图加入，却被相处融洽的两兄弟一脚踢了出去。

(高凌云编译自 2011 年 12 月 5 日 www.sciencemag.org)