中国科学: 物理学 力学 天文学 2011 年 第 41 卷 第 4 期: 478 ~ 482
SCIENTIA SINICA Phys, Mech & Astron www.scichina.com phys.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

清华大学百年校庆专刊 · 论文

微波背景观测与早期宇宙研究

李惕碚[①②③*]

① 清华大学物理系、清华大学天体物理中心, 北京 100084;
② 清华大学工程物理系、清华大学天体物理中心, 北京 100084;
③ 中国科学院高能物理研究所, 北京 100049
*E-mail: litp@thinghua.edu.cn

收稿日期: 2011-01-14; 接受日期: 2011-01-25
国家自然科学基金资助项目(批准号: 11033003)

摘要 微波背景观测与早期宇宙研究尚处于学科发展的初期阶段, 对探测方法、背景(前景)处理、系统误差及结果可靠性的认识都有待深入. 发现微波探测卫星 WMAP 公布的宇宙微波背景辐射温度图存在严重的系统误差后, 几年来我们重新进行了数据分析, 修正了时钟同步、天线旁瓣误差导致的伪偶极信号, 得到的背景辐射温度图和功率谱与 WMAP 发布的结果有重大差异, 引起了广泛关注, 讨论和争论. 本文概述有关工作及论争的过程与现状, 及其对于早期宇宙研究的影响.

关键词 观测宇宙学, 微波背景辐射, 早期宇宙

PACS: 98.80.Es, 98.70.Vc, 98.80.Bp

2001 年美国宇航局发射了威尔金森宇宙微波背景各向异性探测卫星 WMAP[1]. WMAP 组发布的宇宙微波背景(CMB)温度各向异性分布图及其角功率谱[2]是现今宇宙学研究最重要的实测基础. WMAP 的宇宙学结果有力地支持了标准宇宙学模型——暴胀 Λ冷暗物质模型: 通过拟合 WMAP CMB 功率谱精确地限定了描述宇宙几何、构成和演化的宇宙学参数的数值[3], 使宇宙学步入精确科学的新时代. 但是, WMAP 得到的大尺度温度涨落存在令人困惑的异常: 与暴胀期原初随机密度涨落尺度无关的预期不符, 各向异性低阶多极矩明显地沿着黄道面取向[4]; 此外, 还发现 CMB 各向异性存在南北不对称等.

1 CMB 温度图系统误差

我们从 2003 年 WMAP 公布第一年观测结果和发现大尺度异常开始, 根据 WMAP 实验的两个特点——差分观测及扫描不均匀, 认真地考察了温度图上可能存在的系统误差.

1.1 温度与观测次数的相关

WMAP 微波天线每年对全天扫描一遍, 其曝光图是不均匀的: 对某象素 i 的观测次数 M_i 在黄极区域最大, 黄道面最小[5]. WMAP 的曝光图(M_i 分布图)和所得到的 CMB 温度涨落图两者的四极矩成分很相似[6], 提示应当认真审视 WMAP 测得的大尺度异常只是观测效应的可能性.

对于 WMAP 发布的 CMB 全天温度涨落图, 我们计算它同 WMAP 天线的角度响应函数(beam profile)的互相关, 在黄道坐标系中标出互相关值大于 3 倍标准偏差的象素, 得到图 1(a); 图上的"微波点源"显示出沿黄道面的分布. 但是, 对每个象素 i 的温度涨落

引用格式: 李惕碚. 微波背景观测与早期宇宙研究. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2011, 41: 478–482
Li T P. CMB observation and early universe (in Chinese). Sci Sin Phys Mech Astron, 2011, 41: 478–482, doi: 10.1360/132011-53

值乘以M_i/M(M为全天总观测次数)后, 互相关的黄道面结构消失(图 1(b)), 表明黄道面区域的虚假分立源信号起源于观测的不均匀性. 图 1 直观地显示出 WMAP 发布的 CMB 全天温度涨落图没有消除巡天扫描不均匀性的后果.

对一个新天文波段, 由于探测技术和背景知识不足, 初期结果中存在系统误差是不奇怪的. 例如, COS-B 是γ射线波段的第二颗天文卫星. 1981 年 COS-B 组发布了有 25 个分立源的γ射线源表, 其判定分立源的标准为: 强度分布与探测器点源分布函数(PSF)的互相关大于 4.9 倍标准偏差[7]. 1982 年, 我们指出: COS-B 组在估计背景涨落时使用了平滑的银盘γ辐射模型, 而简化的平滑背景会导致高估表观源的统计显著性, 使 COS-B 源表里有一半是虚假源[8]. 经过数年争论后, COS-B 组从γ射线源表中删去了虚假源; 其后, 取代简化的背景假设, γ天文卫星都采用更符合实际的宇宙线与星际介质产生弥散背景结构的模型. 对于微波波段, WMAP 也只是第二颗天文卫星; 但是, WMAP 组和不少学者坚持 WMAP 的结果无可质疑, 甚至把它作为讨论问题和判断是非的前提, 以至于我们多年前得到的关于 WMAP 误差应当引起重视的结果(包括图 1)至今未能发表.

为了定量地估计观测不均匀性对温度图的畸变, 我们计算了天空的温度与观测次数的相关系数, 其平均值以接近 5σ的显著性超出标准宇宙学模型预期, 而且有明显的南北不对称[9]. WMAP 巡天的不均匀性通过温度与观测次数的相关必定导致温度图的畸变, 特别是大尺度上的畸变, 需要进一步检查处理.

1.2　差分观测导致的温度畸变

按观测时间顺序排列的 WMAP 原始数据(TOD)是天空相距 141°两点的温度差, 由 TOD 通过数学方法成图(map-making,求解出天空各点的温度). 我们发现高温前景源的温度同与其角距 141°环上的平均温度值呈强烈的负相关, 高温前景源系统地压低了对远离它 141°区域的温度测量值[10]. 上述结果已被 Aurich 等的工作证实[11]. WMAP 组使用前景模板(Foreground Mask)扣除前景区域, 但前景通过差分观测对其他区域造成的系统误差无法用模板扣除, 必然引起发布的 CMB 温度图被畸变.

2　WMAP 数据的重新分析

微波背景温度系统误差的发现和大尺度的反常促使我们重新分析 WMAP 的原始数据. WMAP 组开放了数据, 但没有公开分析软件, 必须自己建设. 按照 WMAP 组数据处理的流程[12], 我们建立了自己的分析系统. 利用自己的程序从 WMAP 的 TOD 数据计算 CMB 温度图和角功率谱, 得到的结果同 WMAP 组有重大差异: CMB 的四极矩成分几乎消失(见图 2), 宇宙学参数的值也显著改变[13].

我们的结果于 2009 年 7 月公布后, 引起强烈关注和争议. 我们进一步指出, WMAP 发布的温度图与原始数据不自洽, 黄道方向的四极矩信号并不存在于原始数据中, 而是数据处理过程中产生的噪声: 因此, WMAP 数据系统存在严重问题[14]. WMAP 组的数据处理和分析的系统是众多专家长期工作的结果, 而我们的系统建设与检验, 在中国科学院高能物理研究所宋黎明、聂建赢提供技术支持和帮助下, 几乎由刘浩一人在博士和博士后期间独立完成. 美国 Carnegie Mellon 大学 Freeman 教授领导的小组也独立建设了 WMAP 分析软件包(但从原始数据产生用

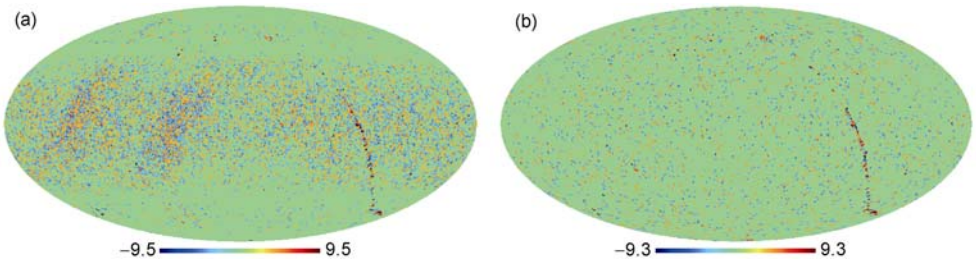


图 1　温度涨落与天线角度响应函数互相关高于 3 倍标准偏差的点(黄道坐标)

(a) 用 WMAP 发布的 W4 波段第一年 CMB 温度图得出, (b) 对温度作 M_i/M 修正后得出

Figure 1　Cross-correlation map in ecliptic coordinates. Points show pixels with $c \geqslant 3\sigma_c$, c is cross correlation of beam profile and sky temperature, σ_c is standard deviation of c. (a) From WMAP3 W4-band map; (b) from modified W4-band map with multiplying temperatures by M_i/M.

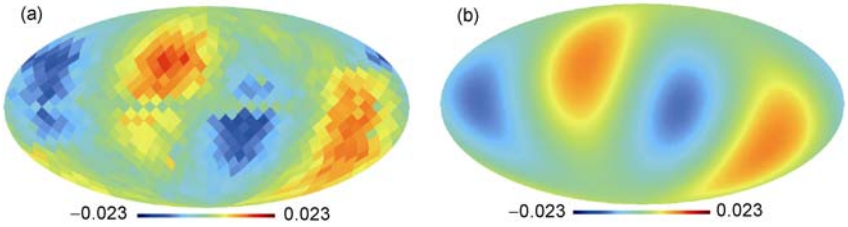


图 2　新温度图的四极矩成分几乎消失

(a) Q1 波段 5 年观测, WMAP 发布的与我们的 CMB 温度图之差; (b) WMAP 组 CMB 温度图上的四极矩成分. 温度标注的单位为 mK

Figure 2　The quadrupole component almost disappears in the new CMB map. (a) The difference between the official WMAP5 Q1-band map and the new map; (b) the quadrupole component of the official WMAP5 CMB map. The temperature is in units of mK.

于成图数据的四元插值程序由 WMAP 组提供), 其结果与 WMAP 组一致[15]. 从 2009 年 9 月至 2010 年 3 月, 刘浩和 Freeman 通过邮件按分析流程逐项对比程序输出, 结果表明, 两个程序包仅四元插值程序输出有不同: 对同一次观测, 两者得出的天线指向有约半个像素(~7′)的差别. 其后从事中国天文卫星 HXMT (硬 X 射线调制望远镜)标定工作的博士生熊少林发现, WMAP 原始数据的时间标定存在系统误差, 卫星指向数据与温度测量数据的时钟不同步: 每一个天线指向数据的记录时刻都落后于对同一观测的温度差分数据 25.6 ms[16]. WMAP 组的插值程序没有考虑时钟的不同步, 导致了计算天线~7′指向误差.

WMAP 组承认没有在文章和系统文件里宣布的 25.6 ms 时间误差确实存在, 但坚持说在实际的数据处理过程中已经修正了该误差, 因而发布的结果没有错误. 在清华天体物理中心网站开放数据库上我们公布了使用的程序[17], 供各国学界检验和应用. 波兰学者 Roukema 利用我们的开放程序库, 研究时间误差对成图后温度涨落的影响, 结果以高统计显著性否定了 WMAP 组的说法, 证明 WMAP 组的数据处理过程中确实存在没有被修正的 25.6 ms 时间误差[18]. 在 Roukema 工作的启发下, 我们直接研究成图前的温度差分数据, 找出时间误差使 WMAP 组在数据校正过程中对多普勒偶极信号的计算值产生错误[19].

3　伪偶极信号

卫星相对 CMB 运动会产生多普勒偶极信号

$$T_d = \frac{T_0}{c}\boldsymbol{v}\cdot\boldsymbol{n},$$

式中 $T_0 = 2.725$ K, c 为光速, v 为卫星相对 CMB 的运动速度, n 为天线指向. 多普勒偶极信号(幅度~3 mK)比 CMB 温度涨落(~50 μK)强得多. 指向误差$\Delta\boldsymbol{n}$ 将产生计算结果中的伪偶极信号

$$T_d^* = \frac{T_0}{c}\boldsymbol{v}\cdot\Delta\boldsymbol{n},$$

仅约 7′的指向误差$\Delta\boldsymbol{n}$ 会导致~10~20 μK 的伪偶极信号. WMAP 数据处理过程中, 需要利用对于不同观测时间计算出的偶极信号强度标定天线增益; 而在产生温度图之前, 还需要扣除原始数据中的偶极信号: 对温度图的直接影响可以忽略的指向或时间误差, 通过伪偶极信号将使成图结果产生重大畸变. 我们按照 WMAP 的扫描模式计算$\Delta\boldsymbol{n}$=7′产生的伪偶极信号数据, 其温度图同 WMAP 官方温度图四极矩成分的性状(图 2(b))高度一致[16], 即: 毋需任何 CMB 信号, 仅由伪多普勒信号+不均匀扫描, 就可以产生 WMAP 发布的大部分(约 66%)四极矩; 因此, 令人困惑的 CMB 沿黄道面的四极矩来源于 WMAP 未校正的观测误差和不均匀的空间扫描.

伪偶极信号的另一来源是天线的旁瓣效应. WMAP 组 K 波段第一年观测的旁瓣增益不确定度约 30%, 对于测得温度的直接影响可以忽略[20]; 但旁瓣增益的误差会在偶极计算中引入等效的指向误差$\Delta\boldsymbol{n}$(与 30%旁瓣增益误差相应的等效$\Delta\boldsymbol{n}$>10′), 从而产生不可忽视的伪偶极信号. 旁瓣引起的等效指向误差$\Delta\boldsymbol{n}$ 难以准确测定, 但已知扫描模式, 可以计算出单位指向误差(包括等效指向误差)引起的伪四极矩图样(模版), 通过优化计算消除成图结果中与模版相符的伪四极矩; 由此估计出 WMAP 温度图的绝大部分四极矩(约 86%)起源于伪偶极信号[21].

偶极信号效应是微波背景实验的一个共同的关键性问题, 其重要性尚未得到充分认识和重视. 虽然 Planck 卫星采用了不同的探测模式, 灵敏度和分辨率比 WMAP 有很大提高, 但如果仍然没有适当消除伪偶极信号, 它的大尺度各向异性的结果将仍然是不可靠的[22]. 对早期γ射线卫星 COS-B 结果的再分析及其争议, 促进了γ天文对结构背景问题的正确处理; 我们相信, 对 WMAP 结果的再分析和正在进行的争议, 将会促进正确认识和处理偶极信号效应这一重要的观测宇宙学问题.

4 早期宇宙演化

4.1 初始密度涨落

宇宙学界普遍地宁可相信沿黄道面四极矩的宇宙学古怪起源, 也不愿意接受消除伪偶极信号噪声后四极矩几乎消失这一干净的结果, 原因在于它似乎违背了标准宇宙学模型的一个基础: 初始密度扰动幅度与尺度无关. 实际上, 大尺度 CMB 功率谱被初始密度扰动所决定这一被普遍接受的原则, 只有在被观测尺度穿出视界时扰动已经发生的前提下才能成立. 如果 90°左右的尺度在真空相变及再加热发生之前就穿出视界, 则对应于一个极低温的僵硬宇宙, CMB 的零四极矩是一个很自然的结果, 并不违背标准宇宙学模型.

如果最大尺度微波背景涨落确实很小, 则微波背景大尺度涨落将是研究极早期宇宙演化的有效窗口: 多极矩阶数从 l=2 到 l≈20 的大尺度区域的背景功率从小到大的演变过程包含着暴涨过程中密度涨落发生和发展的信息. 对于用微波背景功率谱研究极早期宇宙物理, 传统的球谐函数展开不是一个合适的数学工具. 传统功率谱只有 l 为整数的功率值, 在大尺度区域的间隔太大, 例如从 l=2 的 90°一下跳到 l=3 的 60°, 可能会损失掉重要的谱结构. 类似于时变分析中的时域功率谱[23], 需要发展能对任何特定角度求出涨落功率的算法.

4.2 宇宙学参数

伪偶极信号对高阶矩(小尺度)区域功率谱的影响也不可忽视. 在 l=200~675 区间新功率谱的平均功率比 WMAP 发布值小约 13%, 两个声学峰更符合 BOOMERANG 的观测结果, 从而引起 WMAP 宇宙学参数拟合值的显著变化[13]: 暗能量密度减少, 暗物质密度增加, 对大尺度结构形成有重要影响的参数, 如 $8h^{-1}$ Mpc 处涨落幅度σ_8、再电离光深τ也有明显改变. 宇宙学参数变化的一个值得注意的特点是都向着更接近于超新星和大尺度结构观测结果的方向改变; 所以, 通过改进微波背景观测有希望得到与其他独立的宇宙学观测更加一致的宇宙图景.

消除伪偶极信号后, 我们从 WMAP 数据得到了微波背景的新温度图; 但是, 本文第一节所述的两类系统误差仍然存留在新温度图上, 迄今还未能找到消除它们的办法. 所以, 宇宙学参数值还可能进一步变化. 由于系统误差的存在, 对于 WMAP 微波背景温度图上存在的异常结构或非高斯性, 例如冷斑和热斑[24,25]、环状结构等[26,27], 无论其统计显著性如何, 在作宇宙学的解读时都需要非常谨慎: 在对 CMB 实验系统误差有更深入的认识和适当的修正之前, 就宣称发现“宇宙空洞”[25]或“大爆炸前的宇宙”[27]都言之过早.

参考文献

1 Bennett C L, Bay M, Halpern L, et al. The microwave anisotropy probe mission. Astrophys J, 2003, 583: 1–23

2 Hinshaw G, Sperger D N, Verde L, et al. First-year WMAP observations: The angular power spectrum. Astrophys J Supp, 2003, 148: 135–159

3 Komatsu E, Smith K M, Dunkley J, et al. Seven-year WMAP observations: Cosmological interpretation. Astrophys J Supp, in Press. arXiv: 1001.4538

4 Cho A. A singular conundrum: How old is our universe? Science, 2007, 317: 1848–1850

5 Hinshaw G, Nolta M R, Bennett C L, et al. Three-year WMAP observations: Temperature analysis. Astrophys J Supp, 2007, 170: 288–334

6 Liu H, Li T P. Systematical and statistical errors in CMB maps. arXiv: 0806.449

7 Swanenburg B N, Bennett K, Bignami G F, et al. Second COS B catalog of high-energy gamma-ray sources. Astrophys J Lett, 1981, 243,

69–73
8 Li T P, Wolfendale A W. Discret sources of cosmic gamma rays. Astron Astrophys, 1982, 116: 95–100
9 Li T P, Liu H, Song L M, et al. Observation number correlation in WMAP data. Mon Not Roy Astron Soc, 2009, 398: 47–52
10 Liu H, Li T P. Systematic distortion in CMB maps. Sci China Ser G-Phys Mech Astron, 2009, 52: 804–808
11 Aurich R, Lustig S, Steiner F. Hot pixel contamination in the CMB correlation function? Class Quantum Grav, 2009, 27: 095009
12 Hinshaw G, Barnes C, Bennett C L, et al. First-year WMAP observations: Data processing methods and systematic error limits. Astrophys J Supp, 2003, 148: 63–95
13 Liu H, Li T P. Improved CMB map from WMAP data. arXiv:0907.2731
14 Liu H, Li T P. Inconsistence between WMAPdata and released map. Chin Sci Bull, 2010, 55: 907–909
15 Freeman P E, Genovese C R, Miller C J, et al. Examining the effect of the map-making algorithm on observed power asymmetry in WMAP data. Astrophys J, 2006, 638: 1–19
16 Liu H, Xiong S L, Li T P. The origing of the WMAP quatrupole. arXiv:1003.1073v2
17 http://dpc.aire.org.cn/data/wmap/09072731/release_v1/source_code/v1/
18 Roukema B F. On the suspected timing-offset-induced calibration error in the WMAP time-ordered data. arXiv:1007.5307
19 Liu H, Li T P. Diagnosing timing error in WMAP data. Mon Not Roy Astron Soc, 2011 (in press). arXiv:1009.2701
20 Barnes C. First-year WMAP observations: Galactic signal contamination from sidelobe pickup. Astrophys J Supp, 2003, 148: 51–62
21 Liu H, Li T P. Pseudo-dipole signal removal from WMAP data. Chin Sci Bull, 2011, 56: 29–33
22 Liu H, Li T P. Observational scan induced artificial CMB anisotropy. Astrophys J, in press. arXiv:1101.2720
23 Li T P, Muraki Y. Power spectra of X-Ray binaries. Astrophy J, 2003, 578: 374–384
24 Vielva P, Wiaux Y, Martínez-González E, et al. Alignment and signed-intensity anomalies in WMAP data. Mon Not Roy Astron Soc, 2007, 381: 932–942
25 Cruz M, Turok N, Vielva P, et al. A cosmic microwave background feature consistent with a cosmic texture. Science, 2007, 318: 1612–1614
26 Liu H, Li T P. A special kind of local structure in the CMB intensity maps: Duel peak structure. Res Astron Astrophys, 2009, 9: 302–306
27 Gurzadyan V G, Penrose R. Concentric circles in WMAP data may provide evidence of violent pre-Big-Bang activity. arXiv:1011.3706

CMB observation and early universe

LI TiPei[1,2,3*]

[1] *Department of Physics and Center for Astrophysics, Tsinghua University, Beijing 100084, China;*
[2] *Department of Engineering Physics and Center for Astrophysics, Tsinghua University, Beijing 100084, China;*
[3] *Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

Recent years we have found there notably exist systematic errors in published WMAP temperature maps, which pushed us forward to reprocess the WMAP raw data. After removing the pseudo-dipole signal generated by the asynchronous between the attitude and science data and the antenna sidelobe response to the Doppler signal, we have obtained improved CMB maps and angular power spectrum, which are significantly different with WMAP releases and induce widely intention and debating. In this paper we introduce their development and current status and discuss possible influence on the study of the early universe.

observational cosmology, cosmic microwave background, early universe

PACS: 98.80.Es, 98.70.Vc, 98.80.Bp

doi: 10.1360/132011-53