

普朗克卫星:揭开宇宙深层次的秘密

马寅哲*

(英国曼彻斯特大学物理和天文系 Jodrell Bank 天体物理中心 英国 M13 9PL)

2015-02-10收到

† email:mayinzhe@manchester.ac.uk

DOI: 10.7693/wl20150301

Planck: discovering insight of the Universe

MA Yin-Zhe†

(Jodrell Bank Center for Astrophysics, School of Physics and Astronomy, The University of Manchester, Manchester M13 9PL, United Kingdom)

摘要 文章对宇宙微波背景辐射这一学科做了简单的介绍,并根据普朗克卫星2015年的主要宇宙学结果,重点阐述了测定宇宙学参数、测量引力透镜、测量B-模式极化及其与南极BICEP实验的关系、检验宇宙暴胀模型、检测暗能量模型,以及寻找“丢失的重子物质”等问题,并对观测宇宙学未来的发展进行了展望。

关键词 宇宙微波背景辐射, 大爆炸宇宙学, 引力波, 暴胀模型, 暗能量

Abstract This article is a brief introduction to the observations of the cosmic microwave background radiation, with particular emphasis on the Planck 2015 results on cosmological parameters, gravitational lensing, B-mode polarization with its relation to BICEP experiment, constraining inflation models, constraining dark energy models, and detecting the missing baryons. Finally, a prospective view to the future observational cosmology is presented.

Keywords cosmic microwave background radiation, Λ CDM cosmology, gravitational wave, inflation, dark energy

1 引言

从1990年代起,观测宇宙学作为现代天体物理学的重要分支开始迅猛发展。1989年美国宇航局发射上天的COBE卫星,在1992年公布的强度与频率图中,第一次证明了宇宙微波背景辐射(cosmic microwave background radiation,简称CMB)随频率的变化精确地符合温度等于2.73 K的黑体辐射谱^[1],因此证明了当今宇宙一定来源于一个高温高密的极早期态。这一成果使得COBE的领导人获得2006年诺贝尔物理学奖,而史蒂芬·霍金称它为“20世纪最重要的科学发现”。紧随其

后,美国宇航局1999年发射上天的威尔金森微波各向异性探测器(Wilkinson Microwave Anisotropy Probe,以下简称WMAP)则更加精确地测量了CMB在各个方向上的温度涨落,而此温度的各向异性图对于限制宇宙组分起到了关键作用。2003年,WMAP研究组发布了第一年的结果^[2],从而确定了标准宇宙学模型(Λ CDM模型,代表爱因斯坦宇宙学常数 Λ 和冷暗物质“Cold-Dark-Matter”)和它的组分:70%左右的暗能量,25%左右的暗物质和不到5%左右的可见物质,并探究了130多亿年前宇宙暴胀的物理学,这无疑令人兴奋的科学进展。这一成果使得人类进入了精确宇宙学时代,同时也意味着宇宙中至少有95%的东西我们并不知其物理本质。普朗克卫星(以

*代表全体 Planck 项目组, 本文已通过 Planck 编委会审查

纪念德国物理学家 Max Planck, 简称 Planck) 则是步 COBE、WMAP 后尘的第三代 CMB 观测卫星¹⁾。下面我们将简要介绍它的工作模式、数据压缩过程、以及究竟 Planck 在测量什么信息; 然后对 Planck 2015 年 2 月发布的结果(这是 Planck 卫星最主要的数据和结果发布)进行仔细讨论, 即研究它究竟捕捉到了什么样的来自遥远宇宙的微弱信号, 这些信号揭开了哪些深层次的宇宙秘密; 最后回顾宇宙学发展的过去、现在以及展望未来。

2 Planck 计划的目标和过程

2.1 Planck 卫星如何工作

2009 年 5 月 14 日, 欧洲宇航局在圭亚那法属领地将 Planck 发射上天, 2009 年 7 月抵达绕转日地系统的第二拉格朗日点的轨道上, 在 2009 年 8 月 12 日, 高频(6 个频段分别为 875 GHz, 545 GHz, 353 GHz, 217 GHz, 143 GHz, 100 GHz)与低频(3 个频段分别为 70 GHz, 44 GHz, 30 GHz)两个探测器同时展开观测, 15.5 个月之后已完成 2.5 次全天空巡天。而到 2012 年 1 月, 即开展工作后的

29 个月已完成 4.8 次全天空巡天。至此, 高频段探测器的低温液体 ^3He 已全部耗完, 随后低频探测器又持续工作了 21 个月, 直到 2013 年 8 月整个卫星在完成工作以后完全失去控制电力。之后 Planck 便偏离了绕转第二拉格朗日点的轨道(不稳定轨道), 给未来的 Euclid, JWST 等卫星让出空间²⁾。

那么 Planck 卫星是如何扫描整个天空的? 上面提到的 Planck 高频与低频的 9 个频段的探测器位于一个聚焦平面上, 而这个聚焦平面与卫星自转轴的夹角是 85° (见图 1)。卫星绕自转轴每分钟扫描天空 1 圈, 基本上近于一个大圆。这样的扫描持续 45—80 分钟, 也就是说, 大约每 60 分钟重复扫描出接近大圆的一圈。但是为了补偿没有扫描过的(与大圆的) 5° 差³⁾, 自转轴会有 7.5° 的进动(卫星反向喷气产生的动量, 非引力产生), 而每 6 个月自转轴的进动转完 360° 。同时由于地球绕太阳公转, 该进动的中心轴在日地公转平面里大约每天绕动 1° 。所以, 6 个月的时间内 Planck 完成一次全天空扫描。因此, 2013 年 3 月 Planck 发布的数据是基于 15 个月的扫描结果(2.5 个全天空), 而 2015 年的数据则是基于高频探测器 29 个月(4.8 个全天空)和低频探测器 50 个月(8 个全天空)的扫描结果^[3]。更多的数据则会导致更大的信噪比, 从而致使每一个参数的测量误差变小。

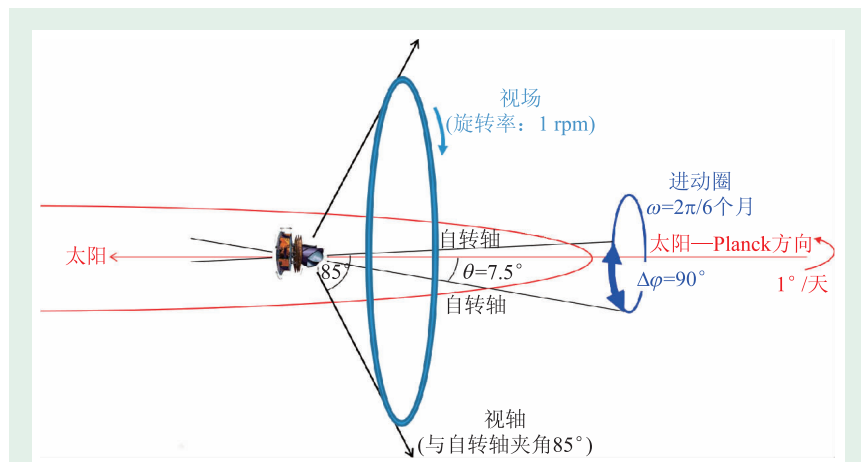


图1 Planck 卫星扫描技术

2.2 数据压缩过程

望远镜在每时每刻都会扫描天空的某一个点, 即得到一个时序数据列, 那么如何将时序信号转变为有用的宇宙学信息呢? 这里面有着一系列的“信号压缩”过程(见图 2)。第一步是先把 9 个频段的时序数

1) 其实, Planck 卫星的最初策划时间是 1993 年春天, 比 WMAP 还要早。

2) 在 Planck 停止工作后的 2012 年 12 月, 英国利物浦望远镜观测到了已经成为“人造彗星”的 Planck 望远镜。

3) 由于聚焦平面与自转轴之间的夹角为 85° , 因此如果卫星的自转轴不动, 该卫星将永远扫描不到黄极。而正由于自转轴的进动, Planck 图上的南北黄极被扫描的次数最多, 赤道面被扫描的次数最少, 而每一个像素点的噪音与它被扫描的次数的开方成反比。

据转变为各个频段的观测天图，表1显示了噪音和角分辨率比较低的3个低频和4个高频段的天图信息。可以看出，分辨率最好的是217 GHz和353 GHz两个波段，它们的角分辨率比第二代卫星WMAP小2.7倍。另外，实际的仪器噪音与2006年Planck项目蓝皮书上给出来的预言噪音差得不多，这说明Planck达到了预期的设计水平。得到这些不同频段天图后，利用原初CMB(来自宇宙早期的要测量的信号)与其他污染源(比如尘埃和同步辐射等)不同的频率依赖性将原初CMB分离开来，这一步称作“成分分离”。分离之后的CMB可以计算其温度场和极化场的功率谱，然后利用这些数据拟合可以得到宇宙学参数，也可以将CMB天图或者其他大尺度结构数据做互相关统计，从而得出宇宙学或天体物理学参数的相关信息。

2.3 CMB观测主要在测量什么？

通过成分分离我们可以得到原初CMB信号图，究竟这里面蕴含着什么信息？在宇宙的婴儿时期(即宇宙年龄小于38万年，现在的宇宙年龄为138亿年)，光子、电子以及原子核混合在一起，宇宙被这样的等离子体所充斥，那么宇宙密度的微小扰动传播的速度就非常接近于等离子体的传播速度，这个过程称为“重子声波震荡”(宇

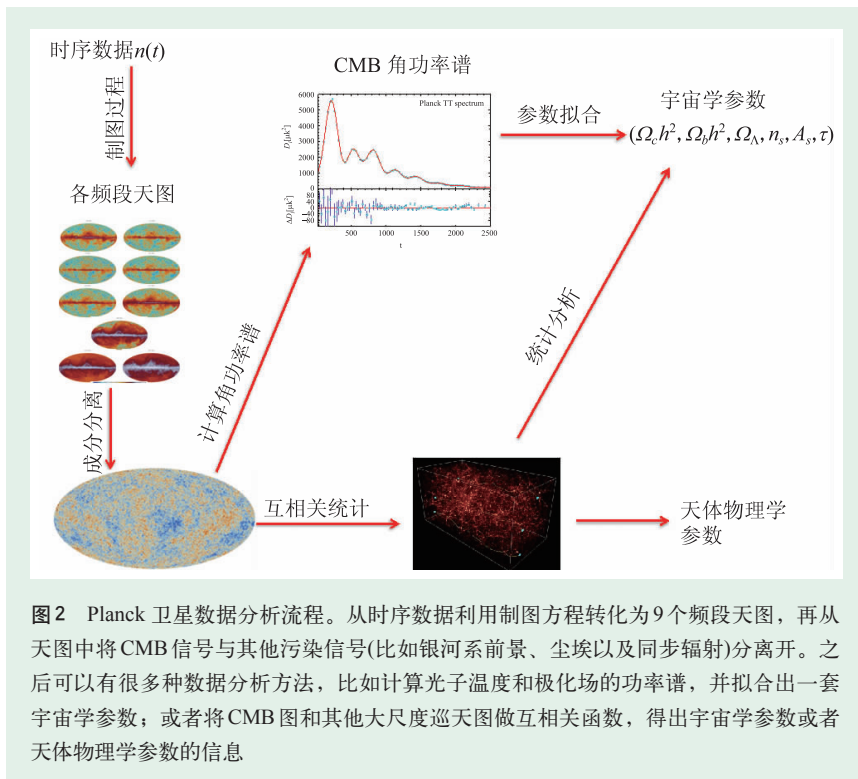
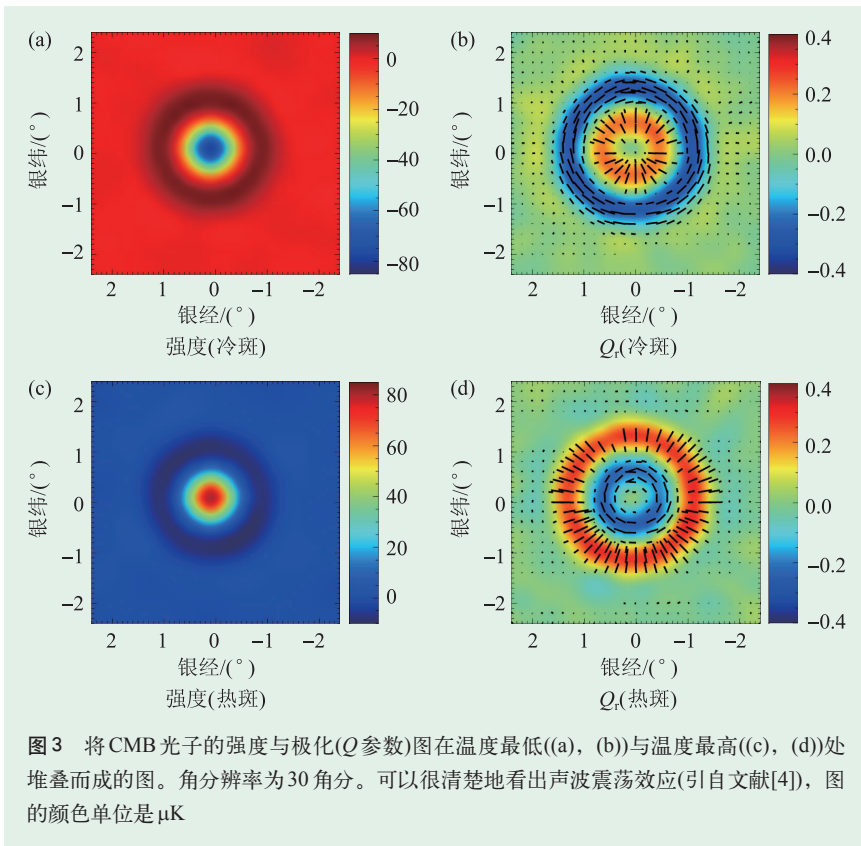


图2 Planck卫星数据分析流程。从时序数据利用制图方程转化为9个频段天图，再从天图中将CMB信号与其他污染信号(比如银河系前景、尘埃以及同步辐射)分离开。之后可以有很多种数据分析方法，比如计算光子温度和极化场的功率谱，并拟合出一套宇宙学参数；或者将CMB图和其他大尺度巡天图做互相关函数，得出宇宙学参数或者天体物理学参数的信息

宙学中的重子物质包括原子核和电子)。由于宇宙越来越大，光子与电子的康普顿散射概率越来越低，以致于在宇宙38万年之际，光子完全失去了和电子的相互作用，作为背景光子留下来，而电子与原子核结合为中性氢原子。因此这一时刻，即宇宙38万年之际又称为“最后散射截面”，即光子统计上最后一次被电子所散射。由于在每一个时空点，重子—光子混合的等离子体都在38万年的时间里传播了有限的一段距离，那么在这个距离上可以看到最后散射截面上的CMB光子具有的特征温度。这就好比在平静的湖面放入一颗石子会泛起涟漪，我们可以直接看到这个“泛起的涟漪”：在图2中分离干净的CMB温度和极化图上，每一个热斑(红色点，温度较高)周边取下一小块，然后叠加起来，就得到图3(c)，(d)两个

表1 低频探测器(30—77 GHz)与4个高频探测器(100—353 GHz)的部分仪器参数

频率段/GHz	30	44	77	100	143	217	353
实际频率/GHz	28.4	44.1	70.4	100.0	143.0	217.0	353.0
角分辨率/角分	33.2	28.1	13.1	9.7	7.3	5.0	4.9
实际测量噪音 $\Delta T/T/(\mu K/K)$	1.9	2.6	4.8	3.0	1.8	3.2	11.6
2006年蓝皮书预言噪音	2.0	2.7	4.7	2.5	2.2	4.8	14.7



子图, 对冷斑做同样处理, 则得到图3(a), (b)两个子图^[4]。

在图3中可以明显地看到重子声波震荡效应。即在每一个热斑周围都会有一个特征冷环, 而在每一个冷斑周围都会有一个特征热环。特征环对应的物理距离就是等离子体在宇宙38万年传播的距离, 称为声学尺度。因此, 观测CMB的温度和极化的各向异性主要测量的是重子声波震荡效应, 它在天图上的分布记录了宇宙演化的诸多信息。

3 2015年主要宇宙学结果的讨论

3.1 再测宇宙学参数

前面提到, CMB的主要信号是重子声波震荡效应, 当我们把Planck测量到的CMB的温度场做出一个功率谱, 则得到了图4(a)^[5]。它显示的是CMB温度各向异性场(以下简称“温度场”)的角功率谱。蓝色点是Planck 2015年的测量值, 红色曲线是根据 ΛCDM 模型的最佳拟合值给出的预

言。可以看出, ΛCDM 理论预言与测量值在 $l > 30$ 精确地符合一致, 尤其是高 l 区间的重子声波震荡(平直坐标区间)。而在低 l 区间(对数坐标区间)理论预言的红色曲线比数据点系统性的约高10%左右, 但多数点处于68%置信区间的误差棒以内。

光子除了携带强度信息以外还携带极化信息, 而极化可以分解为E-模式(有源无旋)和B-模式(有旋无源)两种。对于极化的测量则是Planck比它的前一任WMAP卫星的主要增进之处。WMAP卫星的温度—E-模式极化互相关功率谱(C_l^{TE})只测到 $l < 800$ 的前2个峰值; 而E-模式极化自相关功率谱(C_l^{EE})则只测量到了这个区间的前3

个峰值^[6], 尽管如此, WMAP测量出的 C_l^{TE} 在 $100 < l < 200$ 区间的反相关性以及 $200 < l < 400$ 区间的正相关性已经是宇宙早期暴胀过程发生的强有力的证明^[7]。Planck则精确地测量到了 C_l^{TE} 的前6个峰值($l < 2000$)和 C_l^{EE} 的前5个峰值($l < 1500$)^[3]。在图4(b)和图4(c)中, 蓝色点代表测量值, 红色曲线则是利用图4(a)中的温度场角功率谱数据测量出的 ΛCDM 理论预言, 图中可见两者基本上在 $l < 2000$ 区间内符合一致, 但是数据点与理论线的残差(ΔC_l^{TE} , ΔC_l^{EE})与零线并不完全在68%置信区间内吻合, 这意味着数据中微小的系统误差仍然存在(也许来自于望远镜的孔径在测量温度场和极化场上有微小的不一致)^[5]。

Planck最主要的任务是, 利用它的温度场和极化功率谱来拟合宇宙学参数。我们将其2015年与2013年的结果放在表2中进行比较。可以看出2015年与2013年的结果十分相洽, 而由于2015年使用了4.8个高频探测器全天空巡天结果, 相当于比2013年的2.5个全天空巡天多了一倍数据, 因此每个参数的误差棒(68%置信区间)近似

于2013年结果的 $1/\sqrt{2}$ 。在这里我们讨论其物理意义。

(1) $\Omega_b h^2$ 与 $\Omega_c h^2$ 分别是对重子物质密度、冷暗物质密度与哈勃常数平方的联合限制。这两个参数直接导出了重子物质密度和冷暗物质密度, 以及总物质密度 $\Omega_m = \Omega_b + \Omega_c$ 。 Ω_Λ 是宇宙暗能量占全宇宙的密度比例。Planck 2015年给出的结果是, 重子物质、冷暗物质以及暗能量分别占宇宙密度的4.92%, 26.47%以及68.44%。这三个数值加在一起非常接近于1, 因此贡献于宇宙密度的空间曲率项就非常小。事实上, Planck 与其他数据结合在一起给出空间曲率的最强限制是 $\Omega_k = 0.000 \pm 0.005$ (95%置信度)^[5], 这说明宇宙3维空间非常平坦, 非常接近于欧式几何⁴⁾。

(2) θ_s 为声学视界的角尺度, 即观测者看到的图3中特征环的角尺度大小。这个参数是CMB角功率谱最敏感的一个参数, 从拟合给出的中心值和误差棒来算, 它测量的信噪比已经达到了3200个标准偏差, 而这个参数的精确测量标志着CMB温度场的角功率谱在 $l < 2000$ 已做到了宇宙方差极限(宇宙方差指的是, 在各个尺度上测量CMB只能获得有限的模式数, 因此带来的各个尺度上测量的本征不确定性), 所以未来的CMB巡天(见表3)无论噪音如何低也不会对Planck温度场在这个区间内的测量有太大改进。

(3) H_0 是哈勃常数, 是宇宙

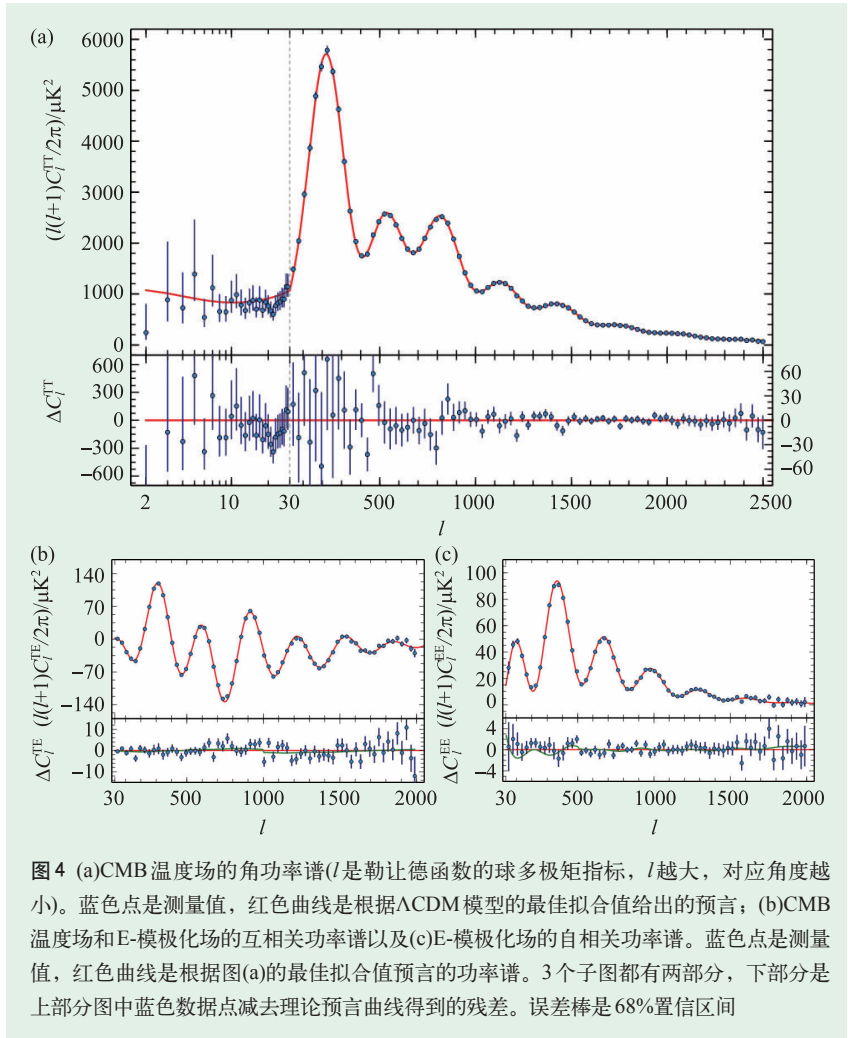


图4 (a)CMB温度场的角功率谱(l 是勒让德函数的球多极矩指标, l 越大, 对应角度越小)。蓝色点是测量值, 红色曲线是根据 Λ CDM模型的最佳拟合值给出的预言; (b)CMB温度场和E-模极化场的互相关功率谱以及(c)E-模极化场的自相关功率谱。蓝色点是测量值, 红色曲线是根据图(a)的最佳拟合值预言的功率谱。3个子图都有两部分, 下部分是上部分图中蓝色数据点减去理论预言曲线得到的残差。误差棒是68%置信区间

表2 宇宙学参数表(Planck 2013年和2015年限制结果)*

参数		TT(2013)+WP	TT, TE, EE(2015)+lowP
基本	$\Omega_b h^2$	0.02205±0.00028	0.02225±0.00016
	$\Omega_c h^2$	0.1199±0.0027	0.1198±0.0015
	$100\theta_s$	1.04131±0.00063	1.04077±0.00032
	τ	0.089 ^{+0.012} _{-0.014}	0.079±0.017
	n_s	0.9603±0.0073	0.9645±0.0049
	$\ln(10^{10} A_s)$	3.089 ^{+0.024} _{-0.027}	3.094±0.034
导出	H_0 [km s ⁻¹ Mpc ⁻¹]	67.3±1.2	67.27±0.66
	Ω_Λ	0.685 ^{+0.018} _{-0.016}	0.6844±0.0091
	Ω_m	0.315 ^{+0.016} _{-0.018}	0.3156±0.0091
	σ_8	0.829±0.012	0.831±0.013
	z_{re}	11.1±1.1	10.0 ^{+1.7} _{-1.5}
	Age[Gyr]	13.817±0.048	13.813±0.026

* 前6个参数是观测限制的基本参数, 后6个参数均为导出参数。表中数字均引自文献[5, 8]。(TT: 温度场自相关功率谱; TE: 温度场—E-模式极化互相关功率谱; EE: E-模式极化相关功率谱; WP: WMAP极化低级矩($l < 23$); lowP: Planck极化低级矩($l < 29$)功率谱)。表中2015年的某些参数误差棒大是由于2013年结果中存在微小系统误差

4) 提醒读者不要混淆空间曲率和时空曲率。这里讲的是3维空间, 4维时空仍旧是弯曲的。

表3 正在进行的、建设中的以及计划中的宇宙学巡天*

	项目名称	站址	进行状态	频段或波段
CMB巡天	ABS	智利	进行中	射电: 150 GHz
	ACTPol/AdvACT	智利	进行中	射电: 30, 40, 90, 150, 230 GHz
	POLARBEAR	智利	进行中	射电: 90, 150 GHz
	CLASS	智利	计划中	射电: 40, 90, 150 GHz
	BICEP/Keck Array	南极	进行中	射电: 90, 150, 220 GHz
	SPTPol	南极	进行中	射电: 90, 150 GHz
	QUBIC	南极	建设中	射电: 90, 150, 220 GHz
	MuSE-Multimoded	南极	计划中	射电: 44, 95, 145, 225, 275 GHz
	QUIJOTE	西班牙	计划中	射电: 11—20, 26—36, 37—47 GHz
	B-machine	美国	建设中	射电: 40 GHz
	阿里实验	中国(西藏)	计划中	射电: 95GHz
	PIXIE	太空L2	计划中	射电: 30 GHz—1 THz共400频段
	LiteBIRD	太空L2	计划中	射电: 60, 78, 100, 140, 195, 280 GHz
	SPIDER	气球(南极上空)	进行中	射电: 100, 150 GHz
	EBEX	气球	进行中	射电: 150, 250, 210 GHz
PIPER	气球	建设中	射电: 200, 270, 350, 600 GHz	
星系巡天	BOSS (SDSS-IV) (光谱)	美国	进行中	光学: 350—1040 nm
	DESI (光谱)	美国	建设中	光学: 360—980 nm
	Euclid (光谱与测光)	太空L2	计划中	光学: 550—900 nm, 红外: 920—2000 nm
	WFIRST (光谱与测光)	太空L2	计划中	光学: 400—1000 nm, 近红外: 700—2000 nm
	LAMOST—郭守敬(光谱)	中国(河北兴隆)	进行中	光学: 370—900 nm
	TAIPAN (光谱)	澳大利亚	计划中	光学: 370—870 nm
	DES (测光)	智利	进行中	光学与近红外: 400—1000 nm
	HSC (测光)	美国夏威夷	进行中	光学与近红外: 300—1200 nm
	KiDS (测光)	智利	进行中	光学与红外
	Pan—Starrs (测光)	美国夏威夷	进行中	光学: 400—1000 nm
LSST (测光)	智利	建设中	光学: 320—1060 nm	
21 cm 中性氢巡天	BINGO (单口径成像)	未定	计划中	射电: 960—1260 MHz
	FAST (单口径成像)	中国(贵州)	建设中	射电: 70 MHz—3GHz
	CHIME (干涉)	加拿大	建设中	射电: 406, 473, 710, 789 MHz
	天籁计划 (干涉)	中国(新疆)	建设中	射电: 400—1420 MHz
	HIRAS (干涉)	南非	计划中	射电: 400—800 MHz
	BAOBAB (干涉)	美国	建设中	射电: 600—900 MHz
	SKA (成像与干涉)	澳大利亚和南非	计划中	射电: 50 MHz—14 GHz

* 1) 第三列中“太空L2”指的是日地系统的第二个拉格朗日点。在第五列中,射电项目往往用频率来表征,而光学和红外项目用波长来表征;

2) 光谱巡天指的是测量星系的光谱以推算红移,而测光巡天是测量天体的亮度;

3) 在关于21 cm中性氢巡天中,成像指的是单口径望远镜直接做天图成像,干涉指的是几个接收机之间做相关器处理;

4) 中国FAST项目的主要科学目标是脉冲星巡天,其次是21 cm中性氢巡天;

5) SKA射电望远镜还包括分别位于南非和澳大利亚的两个预备实验(MeerKAT和ASKAP);

6) 中国西藏阿里地区的CMB观测项目目前处于初步计划阶段,名称待定。

膨胀率的参数。宇宙膨胀最早由天文学家哈勃于1929年通过观测星系的退行速度而发现⁵⁾，即 $v=H_0d$ (d 是距离)，越远的星系退行速度越大。这意味着宇宙整体在膨胀，而每个星系之间的距离都在拉大。那么倒推回去，宇宙一定来源于一个高温高密的状态，这便是热大爆炸宇宙学的观念。在观测数据贫乏的1990年代以前，“哈勃膨胀”是热大爆炸宇宙学的三大实验支柱之一。从这个意义上来说， H_0 是一个非常基本的物理量，值得精确地测定。但是在整个20世纪，各派天文学家对于 H_0 的测量相互出入非常大，甚至相差几倍到十倍^[10]。随着WMAP和Planck精确宇宙学时代的到来， H_0 的测量误差越来越小，从表2中可以看出Planck 2015年限制的误差已经达到了 $0.66 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ 。

利用不同类的观测数据检验 Λ CDM模型，看一套宇宙学参数是否可以描述所有实验现象是检验宇宙学的主要途径。在Planck 2013年数据发表之后，人们发现它给出的 H_0 (见表2)数值要比2011年Riess等人利用近邻的造父变星给出的 $H_0 = 74.8 \pm 3.1 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ ^[11]小，两者在95%的置信度上不相洽。Planck 2015年的结果再次验证了2013年给出的数值。这究竟意味着Planck观测有错误，还是近邻造父变星的测量有问题，亦或是两者皆对而是宇宙学模型需要修改？这个问题在宇宙学界有很多争论。去年Efstathiou利用微波激射重新测量了NGC 4258星系的距离，并在重新分析文献[11]中造父变星的数据后给出了一个偏小的数值^[12]， $H_0 = 70.6 \pm 3.3 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ ，此数值与Planck结果在68%置信度上相洽，没有大到可以找出新物理。这意味着文献[11]中的一些造父变星的距离测定也许有未考虑的系统误差^[12]。

(4) A_s 是宇宙结构形成之始的密度扰动的平方，它是CMB的直接观测量，其开方就是原初密度扰动的大小，这个数约为 10^{-5} 。按照结构形成理论可以推算出当今宇宙的密度涨落大小，这便是导出参量 σ_8 。它就是当今宇宙在8个百万秒差距上(Mpc)的扰动大小。当然，也可以从观测

星系等大尺度结构来直接测量 σ_8 ，事实上，通过观测弱引力透镜、星系团数目统计给出的 σ_8 却比CMB给出的数值低95%置信度左右，即 $\sigma_8 \approx 0.79$ 。这也许意味着亮物质(星系和星系团)与暗物质之间的分布有某种尚未知晓的偏离^[5]。

(5)在前面我们提到，宇宙年龄为38万年时，光子失去了与电子的相互作用而“退耦”，而电子与原子核结合形成了中性氢原子。随着宇宙的演化到了1.5到10亿年之间的某个时期(尚未完全确定)，由于宇宙已经形成了第一代恒星，恒星内部温度很高的热核反应及其他高能的天体物理过程会再次把中性氢电离为氢核和电子，这个过程称之为“再电离”。Planck测定了再电离时刻的红移为 $z_{re} = 10$ ，即宇宙大爆炸之后4.7亿年(要注意的是，当今宇宙红移为零，红移越大，时间越早，这里的红移反映的是宇宙的膨胀，而不是多普勒效应)。这里要注意，这个结果假设了宇宙从中性到电离性的过程是一步完成的，即依赖于“一步电离模型”。如果换另一个模型，此参数的测量值会不同。

电离出的自由电子可以再次“康普顿散射”CMB光子。 τ 参数称为“光学深度”，是CMB光子被电离出来的电子重新散射的概率，Planck 2015年给出的结果是7.9%。这个结果比WMAP给出的结果(8.8%)要小^[13]，也更可靠。原因在于，确定此参数最敏感的观测量是温度场—E模式极化互相关功率谱以及E模式极化自相关功率谱(图4(b)，(c))的低级矩部分($l < 29$)，然而要测量光子极化必须扣除观测视场里的尘埃。WMAP没有针对观测尘埃的高频段观测图，因此它在成分分离(见图2)那一步采用的是一个尘埃模型，而Planck则使用353 GHz频段图(图5)作为清理尘埃影响的模版，比WMAP的尘埃模型精确得多。

从这里我们已经可以看出测量极化尘埃的重要性。下文中我们还会重点讨论极化尘埃对于探测原初引力波问题的重要性。

(6)宇宙的年龄为138.13亿年。这并不来自于直接测量，而是通过CMB功率谱拟合暗物质和

5)当然，对于究竟是谁第一个发现了宇宙膨胀这个历史问题，还是存在着一些争议^[9]。

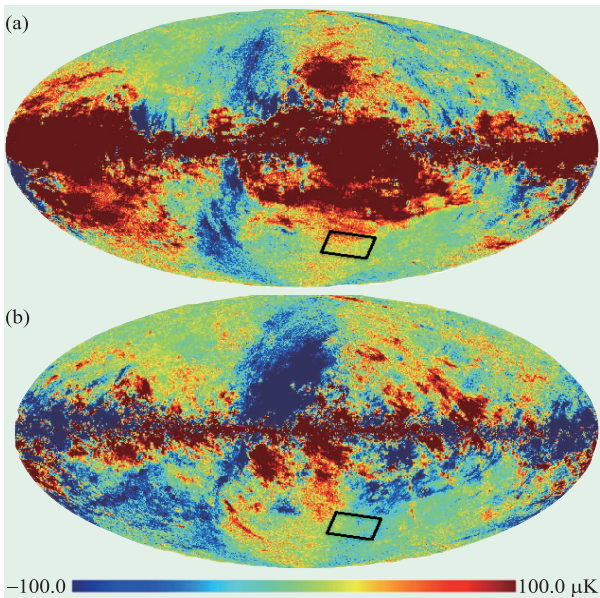


图5 (a)Planck 353 GHz 极化 Q 参数图; (b)Planck 353 GHz 极化 U 参数图。小方框表示BICEP观测视场。图中可见银河系的尘埃扩散到BICEP观测区域里,因此极化尘埃效应不可忽略

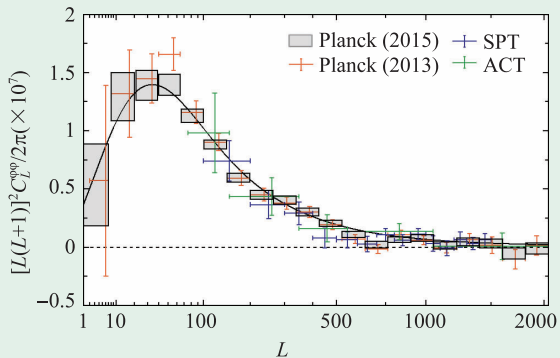


图6 引力透镜势能的功率谱(引自文献[3])

暗能量的密度从而推导出的年龄。

(7) 对于 n_s (原初扰动的谱指数), 在下面的“限制暴胀模型”中会有讨论。

3.2 测量引力透镜

爱因斯坦的相对论预言了光线偏折效应, 即大质量天体造成了周边时空的弯曲从而导致经过它的光线发生偏折, 这种效应也是验证相对论的最早证据之一^[14]。对于宇宙学, 暗物质组成的大尺度结构提供了引力势阱, 使得经过它们的CMB

光子路径发生偏转, 因此称为“引力透镜”。利用CMB温度场的4点相关函数, 文献[15]利用阿塔卡马宇宙望远镜(Atacama Cosmology Telescope, 简称ACT, 位于智利北部)第一次在4个标准偏差(4σ)的置信度上检测到了CMB的引力透镜效应。

如果没有由于引力透镜导致的光线偏折效应, CMB温度场和极化场会满足高斯分布, 即功率谱(两点相关函数的傅里叶变换)就可以描述整个统计学性质。但是有了引力透镜效应, 高阶修正项不为零, 即温度场会稍微偏离各向同性。Planck将原图做滤波之后, 利用二次方估计的统计学办法, 算出了引力透镜势阱的功率谱函数。图6中灰色框就是Planck 2015年给出的结果, 每个框代表1个标准偏差的测量。Planck 2015年一共给出了40个标准偏差的非零测量, 大大增进了2011年ACT实验组(绿色点)给出的4个标准偏差的首次测量值。

随着CMB巡天的不断深入(表3中列出了正在进行和未来的项目), 对于引力透镜的测量还会越来越精确, 今后会达到 100σ 甚至 200σ 置信度的测量。这将对限制暗物质的成团性, 尤其是限制中微子的总质量非常重要。

中微子震荡实验说明, 不同味的中微子可以互相转换, 即中微子的味觉本征态之间有混合角, 这意味着中微子并不是标准模型预言的零质量粒子。太阳中微子实验的先驱Davis与日本超级神冈实验的领导人小柴昌俊因此获得了2002年的诺贝尔物理学奖^[16]。最近的中国大亚湾核反应堆中微子实验则发现了另一种中微子震荡效应, 并以前所未有的精度测量出了其混合角^[17, 18]。然而这一系列中微子震荡实验都只给出了质量本征态之间的质量差, 而对中微子质量之和并不敏感。若要区分质量本征态的分布, 即究竟中微子的三个质量本征态是二低一高还是二高一低, 需要让中微子总质量的测量精度达到 0.1 eV 以下^[19]。宇宙学在这个问题上起了关键作用。由于中微子质量越大, 在物质结团尺度(宇宙学称之为金斯尺度)以下抹去越多的暗物质形成的大尺度结构越多, 因而对引力势阱的功率谱的影响越大(图6)。

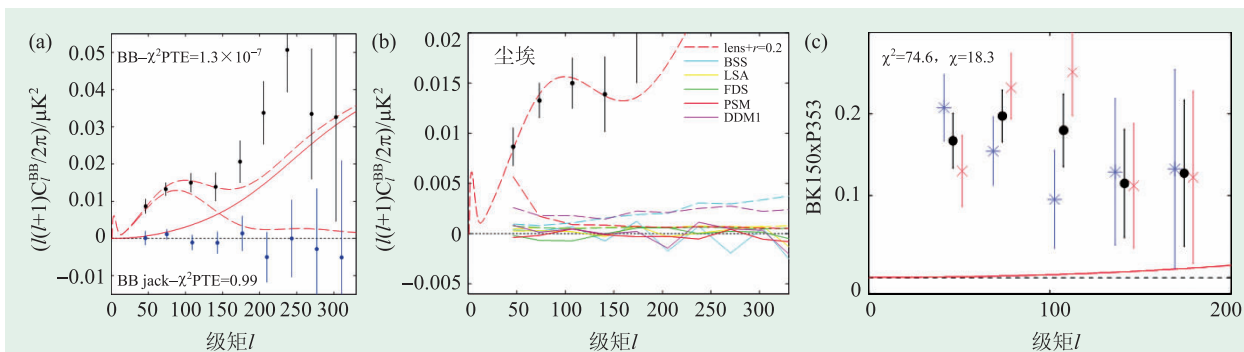


图7 (a)BICEP在150 GHz频段上做B-模式极化的自相关功率谱。黑色点为数据点,红色虚线是张量与标量比为 $r=0.2$ 的理论模型所预言,而红色实线是理论预言的引力透镜导致的B-模式极化。因此数据在 $l < 150$ 与 $r=0.2$ 的理论模型看起来很符合;(b)接近零的若干条线是几个简单重构的极化尘埃图的自相关功率谱(虚线)以及与观测场的互相关功率谱(实线)。尘埃模型看上去都比最上面的真实测量值(黑色点)要低很多,看上去只有 $r=0.2$ 的理论模型才符合(红色虚线);(c)利用BICEP与Keck(与BICEP非常相近的地面CMB实验)150 GHz数据与Planck 353 GHz频段做互相关检测,可以看到相关信号很强。蓝色点、红色点和黑色点分别为BICEP与Planck、Keck与Planck,以及BICEP+Keck与Planck做互相关。红色实线是 $r=0.2$ 的理论预言值。可见,尘埃的效应比宇宙张量扰动要大得多,因此(a)和(b)的BICEP信号为尘埃所致,图(b)中的若干近于零的“尘埃模型”线都没有真正反映尘埃的贡献((a),(b)引自文献[21],(c)引自文献[22])

目前, Planck 温度场功率谱+低级矩极化功率谱+引力透镜+星系的重子声波震荡数据给出带质量中微子的质量上限为 $\sum m_\nu < 0.145 \text{ eV}$ (68%置信度)^[20]。未来的CMB巡天将会进一步测量CMB的引力透镜效应,给出总质量的更强限制,有望达到0.1 eV这个在物理上敏感的区域。

3.3 引力波之谜

位于南极的BICEP实验组在2014年3月17日宣布发现了CMB光子的B-模式的极化。前面提到,光子的极化可以分解为E-模式(有源无旋)和B-模式(有旋无源)两种。理论可以证明,大角度(低级矩)CMB的B-模式的极化只源于宇宙早期的张量扰动,而与密度扰动无关。而小角度上的B-模式极化则源于暗物质形成的引力透镜将一部分E-模式极化光子转化为B-模式极化。因此观测的总效应是,原初张量扰动和引力透镜产生的B-模式极化两部分之和。通过拟合数据(图7(a)),BICEP 2014年3月份给出的结果是宇宙原初扰动的张量与标量之比($r = P_{\text{张量}}(k_0)/P_{\text{标量}}(k_0)$),即“张标比” $r=0.2$ ^[21]。如果这个结果是正确的,那将强烈地意味着时空度规的张量扰动,即广义相对论预言的引力波被探测到。

但是问题在于, BICEP 实验组在天空视场范围(图5中小方框区域)内,由尘埃导致的光子极化是不可忽略的,若想真正检测到引力波,必须扣除这部分尘埃对于CMB光子极化的影响。BICEP组的局限性在于只有1个150 GHz频段的观测,因而无法非常精确地做出“成分分离”。后来BICEP组进一步增加了仪器的探测器数目,即Keck阵列项目(在图7和图8中简称为K),而这个仪器的观测频率也是在150 GHz。图7(a)是BICEP在150 GHz频段上做B-模式极化的自相关功率

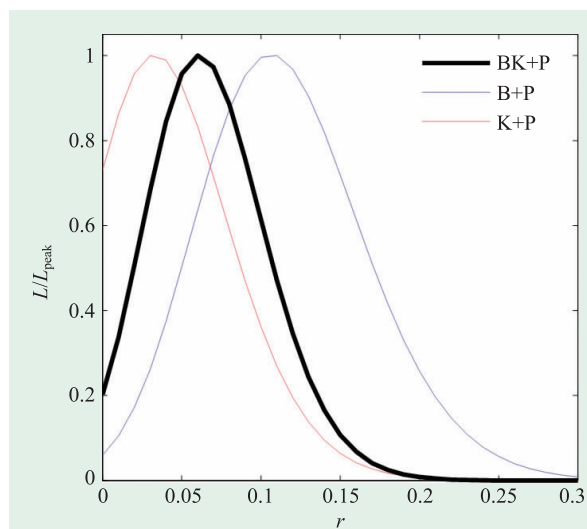


图8 扣除了BICEP视场区域的极化尘埃,对于原初扰动张标比 r 的限制(引自文献[22])

谱。黑色点为数据点，红色虚线是由张量与标量比 $r=0.2$ 的理论模型所预言，红色实线是理论预言的引力透镜导致的B-模式极化。因此数据在 $l < 150$ 与 $r=0.2$ 的理论模型(红色实线加上虚线)“看起来”很符合。而Planck的优势在于它有9个频段，而在353 GHz频段(图5)极化尘埃的效应很强。因此，将BICEP的150 GHz图与Planck 353 GHz图在重叠区域(图5中的小方框)做一个互相关统计(图7(c)中的蓝色点)，则可以看出两者的相关性很强，并且远远高于原初扰动 $r=0.2$ 的预言值。因此图7(a)中看似很强的信号则实则来自于尘埃。

扣除了尘埃的影响， r 的数值究竟有多大？Planck和BICEP联合研究组的做法是，将353 GHz的BICEP区域的天图回推到150 GHz频段，来扣除BICEP视场中尘埃的影响，进而得到一张干净的天图。然后做出这张图的B-模式极化功率谱，并从此限定张标比 r 的大小^[22]。图8显示了Planck的结果：B+P，K+P，BK+P意味着用Planck来清除BICEP，Keck，BICEP+Keck视场中的尘埃。对于BICEP+Keck联合结果，尽管概率函数在 $r=0.05$ 附近有一个极大值，但是这个最大值仅仅比 $r=0$ 的概率函数数值大4.1倍，完全不能排除 $r=0$ 。因此，目前Planck，BICEP以及Keck的联合结果只能在95%的置信度上给出一个上限 $r < 0.13$ ^[22]，所以CMB B-模式极化，即原初引力波目前并无确凿证据。但这并不排除 r 的真实数值是不为零的，只是目前的实验没有到很高的精度。

现在我们再回头来看为什么BICEP组在2014年3月份之前没有检查出来观测视场中的尘埃影响？在图7(b)中可见^[21]，BICEP组也意识到了检查尘埃的影响乃必须的步骤，然而由于仪器只能观测150 GHz这个频段，他们选用了几个重构的尘埃图来与极化图做互相关检测。由于当时还没有Planck 353 GHz的极化图，BICEP组构造了当时认为最贴近真实的“尘埃图”，即用Planck 2013年发布的353 GHz的温度场图来重构极化尘埃图。可问题在于，重构的时候BICEP假定光子的极化方向都是朝一个方向的，即极化图中没有

假设太多内部结构。因此用这样的尘埃模型图做出来的自相关功率谱与互相关功率谱都比真实的测量值要低(图7(b))，这是导致BICEP组2014年的结果低估尘埃效应而确定“原初引力波”的原因。但是从后来发布的真实的Planck 353 GHz的极化图直接测量结果上看(图5)，极化图有很复杂的内部结构，与银河系的丝状结构等都相关，而且影响到BICEP观测区域，这些都是BICEP组构造的尘埃模型图所没有的。所以在文献[21]中，利用简单重构极化图与观测极化图做出的互相关统计并没有检测出这是尘埃效应。当然，这在当时是很难的问题，因为当时确实没有高频段的尘埃极化图可以直接利用。

这个事情告诉我们，将来CMB实验的观测目标是那些极其微弱的信号，必须将其从星际尘埃、同步辐射、以及自由-自由发射等互相关联且复杂的前景信号中分离开才行，这依赖于可靠、精确和优化的数据分析技术。

3.4 检验宇宙暴胀模型

观测表明，在观测宇宙的范围內，宇宙空间看起来很平坦，而且各个方向上的密度涨落处于一个量级(各向同性)。如果将经典的宇宙大爆炸模型往前推，在宇宙早期，空间必须非常平坦才能使得今天宇宙的空间曲率很低，这样的对早期宇宙空间曲率的微调称之为“平坦性疑难”。另外，在CMB天图上以 1.2° 以上分离的两片区域回推到光子退耦时期应该没有任何因果联系，而在天图上我们看到温度场的分布十分均匀，起伏(即各向异性)只在 10^{-5} 量级，即超视界的均匀性从何而来，这便是所谓的“视界疑难”^[10]。1980年代以后，粒子物理学家们提出了暴胀过程，意在解释这些疑难，即在宇宙甚早期有一段剧烈膨胀过程，使得宇宙的尺度变得非常大，因此在我们观测宇宙的这个小区内看上去很平坦。另外，我们当今观测宇宙在各个方向上的性质基本相同，是因为在暴胀之前它们本来处于同一个区域，而暴胀过程把它们之间的距离瞬间拉大，因而“看

似”毫无因果联系。为了在更基本层次上解释暴胀机制，1980年代以后粒子物理学家构造了很多不同的标量场模型。

CMB观测所给出的限制是原初的密度扰动，而密度扰动是由不同标量场的“元激发”叠加而成，因此CMB实则在测量这些“元激发”的等效声子模式。如果假定密度扰动只由一个标量场的元激发产生，则可以根据这个标量场的势能函数计算出它的张量($P_{\text{张量}}(k)$)以及标量扰动谱 $P_{\text{标量}}(k) \sim k^{n_s-1}$ ，并以张标比 $r = P_{\text{张量}}(k_0)/P_{\text{标量}}(k_0)$ ，以及谱指数 n_s 作为刻画扰动谱的基本参数。人们常说的标度不变谱指的是 $n_s = 1 \Rightarrow P_{\text{标量}}(k) \sim \text{常数}$ ，即标量扰动在各个尺度上的强度均相等。

图9显示了Planck 2015年对 (r, n_s) 的联合限制，以及一些单场暴胀模型的预言比较。图中最强的蓝色区域限制来自于Planck温度场+低级矩极化场+大尺度结构重子声波震荡数据+Planck清除BICEP以及Keck视场尘埃的联合限制，而深颜色(浅颜色)代表68%(95%)置信区间。对于张标比和谱指数，上面的“最强组合”给出的限制分别为 $r < 0.08$ (95%置信区间)， $n_s = 0.9638 \pm 0.0048$ (68%置信度)^[23]，即在大于5个置信度上排除了标度不变谱($n_s=1$)。图中不同颜色的小线段代表不同的势能模型的预言。小线段的两个端点代表暴胀究竟让宇宙膨胀了多少个指数倍(N_s ，在专业领域称为 e -叠数)，理论认为这个数介于50到60之间。可以说，势能 $V \propto \phi^3$ 的模型基本已被排除在95%置信区间之外，有趣的是， $V = m^2 \phi^2/2$ 这样的标准二次方势能模型也预言了比目前限制稍大的 r ，如果未来的CMB观测会进一步加强 r 的限制，这个模型可能被排除掉。

在目前的Planck观测限制下，图9中蓝色区域

($0 < r < 0.06$, $0.95 < n_s < 0.98$)中的数值目前还是被数据所允许的。而这些部分参数倾向于势能函数是凹形的。目前以及未来国际上将进行很多的CMB巡天项目，会进一步探测B-模式极化以及限制 n_s 的大小，因而会对这个区域的模型进行检验。

3.5 检测暗能量

通过测量Ia型超新星的光度曲线，1998年美国的两个研究组宣布发现了宇宙在加速膨胀，即遥远的超新星不但距离我们远去，而且加速远去。这个重大发现随即于2011年获得诺贝尔物理学奖。所谓暗能量，指的是驱动宇宙加速膨胀的一切(目前还不清楚的)物理机制，而它的物理本质一直以来被认为是物理学中最重要的未解之谜。各种解释暗能量的理论模型，预言了不同的暗能量的特征量——状态方程参数 $w = P/\rho$ (P 是压强， ρ 是能量密度)。对于标准模型，即爱因斯坦的宇宙学常数 Λ 模型(认为加速膨胀来源于一个微小的密度不变的真空能)中，暗能量 ρ 为常数，并与压强 P 反号，因此 $w = -1$ 。同时也有其他基于粒子物理学的标量场暗能量模型被构造出来，认为加速膨胀是由宇宙中某种演化的真空能驱动^[25]。这些模型都预言了不同的状态方程参数

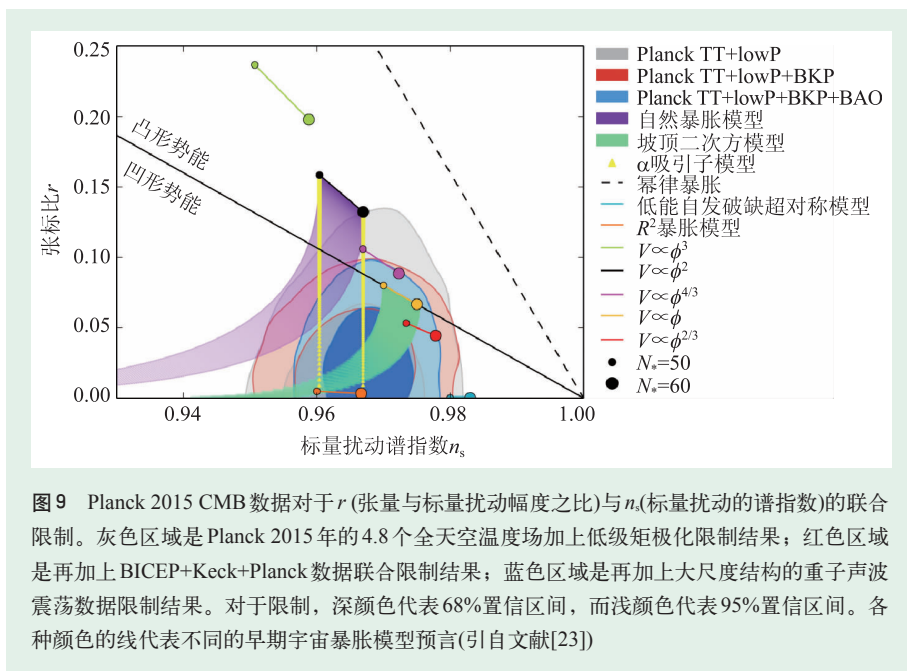


图9 Planck 2015 CMB数据对于 r (张量与标量扰动幅度之比)与 n_s (标量扰动的谱指数)的联合限制。灰色区域是Planck 2015年的4.8个全天空温度场加上低级矩极化限制结果；红色区域是再加上BICEP+Keck+Planck数据联合限制结果；蓝色区域是再加上大尺度结构的重子声波震荡数据限制结果。对于限制，深颜色代表68%置信区间，而浅颜色代表95%置信区间。各种颜色的线代表不同的早期宇宙暴胀模型预言(引自文献[23])

的演化, 即 w 随宇宙演化的关系。因此探究暗能量的物理性质, 首要的是限制暗能量的状态方程参数^[25, 26]。

CMB 的温度和极化场的各向异性对于限制暗能量的状态方程参数提供了有用信息, 这主要通过两种效应: 一是因为不同的 $w(a)$ 函数可以影响宇宙的膨胀, 因此改变了观测者与最后散射截面之间的物理距离。因此, 利用 CMB 的温度和极化的功率谱可以测定这样的物理距离大小, 从而限制 $w(a)$ 函数。另外, 随着宇宙膨胀, 暗物质逐渐被稀释掉, 而暗能量的密度保持不变。因此尽管宇宙从 1 万年左右一直到 47 亿年期间的主要组分是暗物质, 但 47 亿年以后到今天 (138 亿年), 暗能量的密度逐渐压倒暗物质。这样的相变过程导致引力势阱在 47 亿年左右发生变化, 因此一部分 CMB 光子掉进引力势阱中获得的动能, 与爬出引力势阱所失掉的动能不一致, 从而造成了光子波长的变化。这称为“积分萨克斯—沃尔夫”的效应正是主导 CMB 温度场功率谱 (图 4(a)) 在 $l \leq 300$ 区间的效应, 而不同的暗能量演化方程对于积分萨克斯—沃尔夫效应非常敏感。

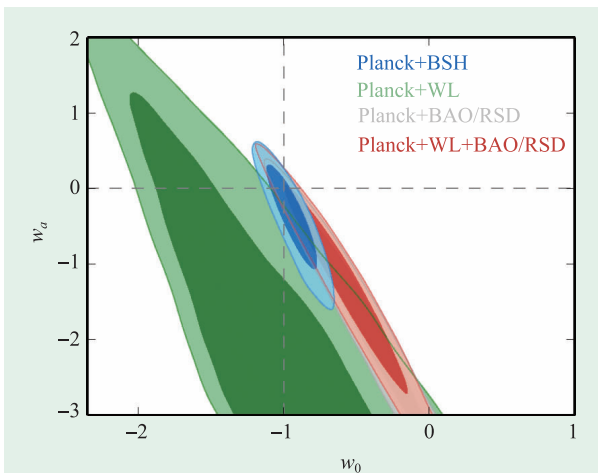


图 10 Planck 数据与其他数据对于 (w_0, w_a) 参数的联合限制。图例中 Planck 代表 Planck 温度场功率谱和低级矩 $l < 29$ 的极化场功率谱。BSH 代表大尺度结构的重子声波震荡数据 (BAO)、超新星数据、以及哈勃望远镜对于哈勃参数测量的组合数据, WL 代表弱引力透镜数据, RSD 代表大尺度结构的红移畸变数据。可以看出, 爱因斯坦的宇宙学常数与各种数据都很符合, 目前没有暗能量动力学演化的证据 (引自文献^[24])

在数值拟合中, 经常把暗能量的状态方程参数化为 $w(a) = w_0 + (1-a)w_a$, 其中 a 是宇宙的尺度因子。爱因斯坦宇宙学常数模型对应于 $(w_0, w_a) = (-1, 0)$, 其他暗能量演化模型则对应于不同的 (w_0, w_a) 数值, 因此压强和密度会随时间变化。图 10 显示了 Planck 和其他数据对于 (w_0, w_a) 参数的联合限制。对于不同的数据组合, 宇宙学常数模型, 即十字虚线交叉点总是符合得很好, 因此目前没有任何证据表明暗能量在演化。当然我们要注意到, 这种数据拟合结果是依赖于具体的参数化形式的。随着星系巡天和 21 cm 中性氢强度映射技术的发展, (w_0, w_a) 限制范围会进一步压缩, 进而真正检测暗能量的物理本质^[25]。

3.6 二阶 CMB 效应

Planck 的角分辨率、低噪音以及多频段观测, 使得它不仅测量到最后散射截面上的 CMB 信息, 而且可以分离开星系和星系团等大尺度结构对于 CMB 的影响。这些效应比最后散射截面上的 CMB 各向异性小几倍, 因此称之为“二阶 CMB 效应”。前文讨论的 CMB 引力透镜就是一个二阶效应的例子。而另一个比较重要的二阶效应是苏尼阿耶夫—泽尔多维奇效应 (Sunyaev—Zeldovich, 简称 SZ 效应)。SZ 效应指的是, 当 CMB 光子从最后散射截面传播到观测者时, 有一部分会被星系团中心和周边的温度高的或者运动的电子重新散射。这种散射效应会微小地改变原初 CMB 光子的黑体辐射谱。通过将各个频段的 CMB 图结合起来, 我们可以将这种微小的 SZ 效应分离开来, 从而得到星系团周边电子的信息。这些散落在星系团周边的电子, 由于温度比星系团中心的热电子低很多, 因此通常的星系巡天是观测不到的 (被称为“丢失的重子物质之谜”)。我们通过这种分离办法, 第一次直接地寻找到了散落在星系团核心区之外的热气体的信息, 即“丢失的重子物质”。这对于了解星系的形成过程, 以及暗物质与重子物质在星系形成过程中的相互作用, 提供了观测上的支持。

4 精确宇宙学的未来

4.1 目前认识到的宇宙

以上我们简要地介绍了 Planck 卫星 2015 年给出的最新结果,这也是精确宇宙学发展的最前沿的一些结论。现在归纳一下,我们的宇宙(哈勃视界内的“可观测宇宙”)究竟有哪些基本特征:

(1)宇宙3维空间接近于平坦,空间曲率很小^[5];

(2)原初扰动的高斯性。如果宇宙原初扰动的统计学性质可以完全用两点相关函数(功率谱的傅里叶变换)描述清楚,那么这样的扰动就称为高斯场。通过计算温度场的三点相关函数, Planck 2015 年的结果进一步限制了原初扰动的“非高斯性”参数的大小^[27],结果显示原初扰动非常接近于高斯随机场,目前没有任何证据显示原初扰动的非高斯性;

(3)宇宙各向同性。除了南北半球在扰动幅度上的轻微不对称性(偶级各向异性),宇宙在高阶矩的不对称性非常之小^[3];

(4)原初扰动谱在大于5个置信度上偏离标度不变谱。由于 $n_s < 1$,扰动强度在大的尺度上比在小尺度上大^[23];

(5)爱因斯坦的宇宙学常数仍旧与观测符合得很好,目前没有暗能量演化的确凿证据。暗能量目前约占宇宙总密度的68%,重子物质约占不到5%,而冷暗物质约占26%^[5, 24];

(6)Planck 温度场+极化场+大尺度声波震荡数据给出的中微子的种类数为 $N_{\text{eff}} = 3.04 \pm 0.18$ (68%置信区间),完全符合宇宙学标准模型 $N_{\text{eff}} = 3.046$ 的预言^[5],中微子质量的上限为 $\sum m_\nu < 0.145 \text{ eV}$ (68%置信度)^[20];

(7)原初扰动以绝热扰动(重子物质与辐射以同一种密度波扰动)为主,等曲率扰动(重子物质与辐射以相反密度波扰动)模式的成分很低^[5]。

前面我们已经看到, Planck 已经将 CMB 的温

度场功率在 $l < 2000$ 以下测到了宇宙方差极限,进一步测量温度场不会带来太多新的信息,那么究竟未来 CMB 研究的空间何在?

(1)进一步寻找原初张量扰动,即原初引力波,无疑是所有目前以及未来 CMB 项目(见表3)的首要目的;

(2)对原初标量扰动谱指数的更强限制,对于排除和检验各种暴胀模型实为关键;

(3)进一步加强中微子质量的限制。下一阶段的 CMB 观测将更精确地测量 CMB 引力透镜、CMB 极化场的角功率谱,因此会进一步压低中微子质量的上限,有望区分中微子质量本征态的分布;

(4)进一步限制暗能量的状态方程参数和偏离爱因斯坦广义相对论的效应。表3中列举的星系巡天和 21 cm 中性氢的测量也会大幅度提高暗能量模型的检验精度;

(5)再电离历史。目前的 Planck 观测给出了即刻再电离模型的红移以及光学深度 τ ,但再电离的具体物理过程尚未确定下来。未来的 CMB 观测与类星体吸收线的数据相结合,可探究具体的再电离过程;

(6)进一步寻找等曲率扰动模式(非绝热扰动)的大小;

(7)丢失的重子物质。Planck 给出了散落在暗物质晕之外的重子物质的信号,未来的角分辨率更强、信噪比更高,以及多频段的地面 CMB 观测将得到更精细的 SZ 效应图。这将对寻找那些未处于星系团之中的温热气体提供帮助。

4.2 正在进行和未来的观测宇宙学项目

表3中,我们列出了正在进行的和未来的 CMB 巡天、星系巡天以及 21 cm 中性氢巡天项目,对于国际上正在或者将要进行的 CMB 观测,其主要的科学目标是测量极化场,尤其是 B-模式极化,用以寻找原初的张量扰动,以及研究上面列举的各种问题。值得注意的是, CMB 的

6) 这里给出的等效相对论性粒子种数,比标准的中微子种类数 $N_\nu=3$ 多出0.046,这主要是由于中微子在宇宙温度为 1 MeV 左右并没有完全与宇宙等离子体退耦,因此正负电子的湮灭会轻微加热电子中微子 ν_e 。

观测越来越难，因为未来的实验需要捕捉越来越微小的信号。比如：WMAP和Planck卫星测量的CMB温度场，其信号在高银纬区域比银河系的污染噪音高，而且理论可以预言其大小。那么就算是“成分分离”这一步做得不完美，一样可以得到很高的信噪比结果。然而将来的CMB巡天将测量的B-模式极化场，其理论预言完全不确定⁷⁾，而且比银河系的尘埃污染的强度低很多，因此难度很大。

表3中还列举了正在进行的、正在建设的以及计划中的星系巡天项目和21 cm中性氢巡天项目。与CMB情况类似，理论虽然可以预言中性氢21 cm辐射的大小，然而银河系以及其他河外电源的污染比它的真实信号至少高 10^4 倍，因此整个观测和数据分析过程必须去除掉 10^4 的污染才能捕捉其信号。好在在频率空间，银河系等污染信号比21 cm辐射平滑很多，因此有望通过滤波办法去除污染信号。另外，大范围的深度星系巡天也不容易，望远镜的光学系统、大气层的点扩散函数以及星系的内秉形状等都是导致它存在很大系统误差的因素。然而挑战与机遇并存，这两方面的观测有望提供比CMB观测更多的信息。这是因为CMB天图是红移为1100(即宇宙年龄为38万年)这一时刻的“最后散射截面”，即它是一个二维球面。而星系巡天尤其是21 cm中性氢巡天得到的是三维立方体的涨落信息，即每一个红移截面都是一个二维球面，都包含着宇宙扰动每一个宇宙演化时期的信息。因此原则上，深度星系巡天和21 cm中性氢巡天可以比CMB提供更多的信息量，将更精确地检测宇宙原初扰动、暗物质和暗能量的性质。

这是一个国际竞争的时代。在接连取得一系列重要宇宙学进展后，斯隆数字巡天项目已于

2014年下半年开始了它的第四期巡天任务(SDSS-IV)；2015年1月，位于南极上空的Spider气球项目刚完成其第一个周期(16天)的观测，并开始数据分析；而在2015年3月初，平方公里望远镜阵项目(SKA)正在商讨阵列构型，并与11个成员国就出资问题展开谈判，准备2018年开工上马。

5 结束语

回顾历史，宇宙学的发展走过了黄金十五年(1999—2014)。这十五年见证了宇宙加速膨胀的发现，见证了WMAP和Planck卫星给出宇宙学参数的越来越精确的测量，也见证了如斯隆数字巡天、CFHT引力透镜巡天以及星系速度场等大尺度结构的观测迅猛发展。这些越来越精确的观测不仅基本确立了我们的宇宙是一个以暗物质和暗能量为主要物质组分的、各向同性的、加速膨胀的宇宙，而且可以逐渐地将宇宙的几何、原初扰动、中微子、大爆炸核合成、再电离过程、引力透镜、星系团热气体等更详尽的宇宙细节测定下来。这无疑是基础物理学的一大进步。

展望未来，宇宙学的观测变得越来越难，但也越来越精彩。难就难在容易测的已经都测量出来了，而未来实验必须捕捉更加微弱的信号。然而机遇也正在如此，因为这些极其微弱的信号可以带来比现在Planck卫星多很多倍的宇宙学信息，可以揭示更深层次的宇宙秘密。因此，宇宙学的发展将强烈地依赖于更好的观测设备，以及更加精准和优化的数据分析技术。发现宇宙奥秘的惊心动魄之旅，也许才刚刚开始。

7) 关于CMB B-模式极化的理论预言值一直有很大争议。基于单个标量场暴胀模型的预言，张标比 r 在0.01到0.1之间，这虽然比银河系尘埃的污染低很多，但还是处在可测范围内。然而弦理论的“膜绘景”图像预言其值为 $r=10^{-5}$ ，如此小的数值已经低于了测量极限。

参考文献

- [1] Mather J C *et al.* *Astrophys. J.*, 1994, 420: 439 (本文虽发表于1994年,但是CMB黑体辐射的结果已于1992年在多个宇宙学会议上发布)
- [2] Spergel D N *et al.* *Astrophys. J. Suppl.*, 2003, 148: 175
- [3] Planck 2015 results I. Overview of Scientific Results. ArXiv: 1502.01582
- [4] Planck 2013 results I. Overview of Scientific Results. 2014, *A&A*, 571:1
- [5] Planck 2015 results XIII. Cosmological Parameters. ArXiv: 1502.01589
- [6] Larson D *et al.* *Astrophys. J. Suppl.*, 2011, 192: 16
- [7] Dodelson S. *AIP Conf. Proc.*, 2003, 689: 184
- [8] Planck 2013 results XVI. *A&A*, 2014, 571: 15
- [9] Block D L. *Astrophysics and Space Science Library*, 2012, 395: 89, ArXiv: 1106.3928; Shaviv G *et al.* 2011, ArXiv: 1107.0442
- [10] 余允强. *物理*, 2009, 38(8): 531
- [11] Riess A G *et al.* *Astrophys. J.*, 2011, 730: 119
- [12] Efsthathiou G. *Mon. Not. Royal. Astron. Soc.*, 2014, 440: 1138
- [13] Hinshaw G *et al.* *Astrophys. J. Suppl.*, 2013, 208: 19
- [14] Dyson F W, Eddington A S, Davidson C R. *Phil. Trans. Roy. Soc. A*, 1920, 220, 291
- [15] Das S *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2011, 107: 1301
- [16] 钱永忠. *物理*, 2013, 42(7): 468
- [17] Daya Bay Collaboration. *Phys. Rev. Lett.*, 2012, 108: 171803
- [18] Daya Bay Collaboration. *Phys. Rev. Lett.*, 2014, 112, 061801
- [19] Lesgourgues J, Pastor S. *Phys. Rept.*, 2006, 429: 307
- [20] Planck 2015 results XV. Gravitational Lensing. ArXiv: 1502.01591
- [21] Ade P A R *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2014, 112: 1101
- [22] BICEP2/Keck, Planck collaboration. 2015, arXiv: 1502.00612
- [23] Planck 2015 results XX. Constraints on inflation. ArXiv: 1502.02114
- [24] Planck 2015 results XIV. Dark Energy and modified gravity. ArXiv: 1502.01590
- [25] 张新民. *物理*, 2011, 40(1): 8
- [26] 范祖辉. *物理*, 2014, 43(4): 263
- [27] Planck 2015 results XVII. Constraints on primordial non-Gaussianity. ArXiv: 1502.01592

The banner features a stylized sun logo with a circuit-like pattern, the text 'ILOPE-2015', the website 'www.ilope-expo.com', and the phone number '垂询电话: 010-8460 0344'. It also includes QR codes for Weibo and WeChat, and social media icons. The main title is '北京国际光电产业博览会暨第二届中国国际激光·光电子及光电显示产品展览会', held at '北京·中国国际展览中心(三元桥)' from '2015年10月14日-16日'.

主办单位 中国国际展览中心集团公司 中国光学光电子行业协会	支持单位 中国工业和信息化部 中国物理学会 北京光机产业基地 韩国光产业振兴会	中国科技部 中国兵器工业集团公司 中国图形图像学学会 财团法人光电科技工业协进会	中国科学院 北京生产力促进中心 日本光产业技术振兴会 新加坡光学与光子学学会
承办单位 中国光学光电子行业协会 中展集团北京华港展览有限公司	展品范围 激光与红外产品及设备 光电材料与元件	光电显示及照明 光学元件与材料	LED & OLED & FPD 光通讯设备