

编者按 1905年,20世纪最伟大的科学家爱因斯坦建立了平直时空理论即狭义相对论,改变了人类延续了数百年的牛顿绝对时空观,从此步入了现代物理学蓬勃发展的新纪元.1916年,爱因斯坦提出了满足狭义相对论要求的引力理论即广义相对论,这是人类第一次把时间、空间和物质有机地联系起来的弯曲时空理论.自20世纪二三十年代以来,随着量子力学的诞生与发展,狭义相对论的基本粒子理论得以建立并不断完善.可以毫不夸张地说,没有狭义相对论和量子力学就没有现代物理学的辉煌成就.广义相对论的重要应用在于相对论性天体物理学和宇宙学.时至今日,宇宙学已经成为极为活跃并迅速发展的交叉学科.作为本刊有关世界物理年暨相对论诞生100周年纪念活动的一部分(开辟宇宙学专题栏目),我们将从本期开始,陆续刊登由专家撰写的系列评述文章,从近期的天文观测和理论模型两个方面入手,介绍宇宙学的昨天、今天和明天,以飨读者.

第一讲 微波背景辐射的各向异性、偏振及宇宙电离的历史*

范祖辉[†]

(北京大学物理学院天文系 北京 100871)

摘要 文章对微波背景辐射的各向异性、偏振及宇宙电离的历史给出了评述性介绍.从大爆炸理论的预言,到观测的发现,到其各向异性及偏振的探测,微波背景辐射(CMB)向人们揭示了丰富的宇宙学信息.文章在对基本理论作了简单介绍后,着重讲述了最新的CMB的观测结果及其物理意义.特别对微波背景各向异性探测器(Wilkinson Microwave Anisotropy Probe, WMAP)的偏振观测及其对宇宙重新电离的限制给出了较详细的叙述.

关键词 宇宙学,微波背景辐射,宇宙再电离,大尺度结构

Anisotropy and polarization of the microwave background radiation, and the reionization of the universe

FAN Zu-Hui[†]

(Department of Astronomy, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract We describe the basics of the cosmic microwave background radiation (CMB), and the physics of its anisotropy and polarization. CMB observations have provided us abundant information about the evolution of the universe, including the big bang cosmological model predictions. The most recent observational results of CMB are presented, with emphasis on the polarization detected by Wilkinson Microwave Anisotropy Probe and its implications for the reionization history of the universe.

Key words cosmology, microwave background radiation, reionization of the universe, large-scale structure of the universe

1 引言

广袤无垠、丰富多彩的宇宙自古至今挑战着人类的智慧.宇宙间万物的起源一直是人类孜孜不倦探寻着的极具挑战性的问题.20世纪初,爱因斯坦广义相对论的问世和星系退行宇宙膨胀的发现^[1]

为宇宙演化理论奠定了理论与观测的基础.为了解释宇宙中元素(如⁴He)含量的问题,20世纪40年代, Gamow 提出了大爆炸宇宙学模型^[2,3].在这一模型中,宇宙早期处于高温高密状态.随着宇宙的膨

* 2004-11-02 收到

[†] Email fan@bac.pku.edu.cn

胀,温度逐渐降低.世间万物便是宇宙冷却过程中演化的产物.大爆炸理论预言了背景辐射场的存在,并给出这一辐射今天的温度为几 $K^{[4-6]}$.这即是宇宙微波背景辐射.此预言在20世纪60年代得到观测的证实^[7].于是宇宙膨胀、微波背景辐射及原初元素丰度构成了大爆炸理论的三大观测支柱,使其成为标准宇宙学模型.

近二十年来,随着观测技术的飞速发展,人类对于宇宙的了解有了长足的进展.20世纪80年代末,装有宇宙背景探测器的COBE(Cosmic Background Explore)卫星的上天,为微波背景的观测带来了革命性的突破.卫星上的远红外绝对分光光度计(Far Infrared Absolute Spectrophotometer, FIRAS)在0.1至10mm波段精确测量了微波背景辐射谱,发现它为精度很高的黑体谱,对应的温度为 $T = 2.726K^{[8-10]}$.这一结果是对大爆炸理论的极大的支持.不仅如此,卫星上的另一个仪器差分微波辐射计(Differential Microwave Radiometers, DMR)第一次探测到了微波背景辐射温度的各向异性,量级为 $10^{-5}[11,12]$.这一微小的不均匀性作为早期宇宙遗留下来的宇宙结构形成的种子,是理论所期待的.它们经过后期的演化,主要体现为引力不稳定性,最终形成宇宙中的星系、星系团等大尺度结构.在COBE观测之后,各种地面设施及携带在气球上的观测仪器对微波背景的各向异性在不同尺度上进行了大量的观测^[13].2003年初,另一探测微波背景各向异性的卫星WMAP(Wilkinson Microwave Anisotropy Probe)的第一年观测数据及结果得以公布.与COBE观测相比,WMAP的灵敏度高出45倍,角分辨率高出33倍.因此,WMAP观测为微波背景和宇宙学的研究提供了高精度的全天的信息^[14].结合其他的观测,WMAP的数据限定了宇宙学的不同重要参数的取值^[15],对早期宇宙的行为提供了限制^[16].除此之外,WMAP观测的非常重要的贡献是定量地测到了强度比温度各向异性低一个量级的微波背景辐射的偏振($\sim 10^{-6}$)^[17].这一偏振是由于光子与自由电子散射所造成的,它包含着丰富的物理信息.将其与温度的各向异性相结合,极大地增加了我们对宇宙的理解.在这篇文章中,我们将重点讨论微波背景辐射的偏振及其所反映的宇宙再次电离的过程.

2 宇宙微波背景辐射

2.1 大爆炸遗迹

大爆炸理论指出,宇宙早期处于高温高密的状态.

那时,我们所能看到的宇宙几乎为一个点.这里应注意,这并不意味着宇宙本身的大小为一个点,宇宙整体可以是无限的.随着宇宙的膨胀,其温度逐渐降低,而我们所能看到的范围也越来越大.宇宙中充满着大爆炸遗留下来的辐射光子,其分布应满足热平衡分布,即黑体辐射分布.对应的温度在宇宙膨胀过程中降低,到今天为几K的量级.我们知道这一温度范围的黑体辐射集中在厘米、毫米波段,这就是微波背景辐射名称的来源.

当宇宙温度高于氢原子的结合能13.6eV(对应的温度为 $\sim 10^5K$)时,高能的光子很多,氢原子极易被打散,宇宙处于电离状态,电子以自由电子的形式存在.由于光子与电子间的频繁散射,光子的自由程非常短,我们不可能看到远处的背景光子.我们称这时宇宙对于背景辐射是不透明的.在宇宙冷却到 $T \sim 3000K$,宇宙年龄约为几十万年时,光子的能量低到不足以电离氢原子,宇宙的中性化发生了,即电子得以与质子结合形成氢原子.宇宙间自由电子数目急剧减少,背景光子基本成为自由光子(称作光子退耦,这时刻称为最后散射面),这使得我们能够观测到背景辐射.因此,我们今天看到的背景辐射反映了宇宙在其年龄约为几十万年时的状况.COBE的观测表明,微波背景辐射谱为极好的黑体谱,对应的今天的温度为 $T = 2.725K$.微波背景辐射在各个方向极其均匀,各向异性程度用温度起伏来表示仅为 $\delta T/T \sim 10^{-5}$.这一结果是对大爆炸理论极大的支持.高精度黑体谱告诉我们,宇宙早期的确经历了高温高密的状态,从而使背景辐射光子达到热平衡分布,温度的具体数值与原初核合成的预言一致,高度均匀性为宇宙学原理提供了观测证据.

2.2 微波背景辐射各向异性

COBE第一次真正探测到微波背景辐射的各向异性,对宇宙学的研究,特别是大尺度结构的起源问题起到了至关重要的作用.我们知道,我们所在的星系为银河系,它含有约 10^{11} 个如太阳一样的恒星.而宇宙中,有大约 10^8 个星系.星系的分布不是均匀的,它们具有成团性.几个或几十个聚集在一起形成星系群,而星系团可以含有成百上千个星系.在更大尺度上,星系的分布呈现网状,有“星系长城”,有空洞.于是宇宙学需要回答的一个十分重要的问题是星系、星系团、乃至更大尺度的结构是如何形成的.

今天的结构形成理论告诉我们,这些结构起源于早期宇宙中物质分布的微小的不均匀性.这一在非常均匀的背景上的小扰动,通过引力不稳定性被

放大,最终塌缩形成不同尺度的结构.这些微小的扰动,必定会在微波背景辐射场中留下痕迹.而 COBE 探测到的 10^{-5} 的各向异性与结构起源所需要的扰动幅度相符,这成为 COBE 的重要贡献之一.下面我们简要讲述微波背景辐射各向异性中所含有的物理信息.

微波背景辐射各向异性可分为大尺度结构 ($>1^\circ$) 与小尺度结构 ($<1^\circ$). 粗略地讲,大小尺度以氢原子复合、光子退耦时的宇宙视界来划分.可观测宇宙的大小直接与光在宇宙年龄内传播的距离相联系,因此视界反映了相互之间可以交换信息的最大范围.在小于视界的尺度上,发生的物理过程会影响微波背景辐射,而在大于视界的尺度上,各向异性来源于大尺度上的物质扰动引起的引力势的起伏.图 1 显示了典型的不同尺度的温度起伏^[18] (摘自参考文献 [18]). 横轴为对角度做球谐展开 Y_{lm} 中的 l , 它与角度的关系大致为 $\theta = 180^\circ/l$. 从左至右 l 变大,角度变小.图 1 中 (a) (b) (c) 形象地表明了不同 l 对应的角度的不同.

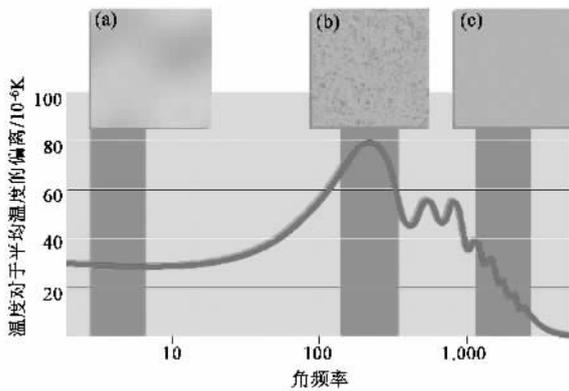


图 1 微波背景辐射各向异性扰动谱示意图

我们看到,在大角度处,各向异性呈现简单的结构,这是由于光子退耦时的引力势扰动以及之前、之后引力势随时间的改变所造成的,即与引力红移直接相关.而在小角度 ($l > 200$) 扰动谱具有周期性行为,它对应着声速视界内的声波振荡.如前所述,当宇宙温度高于 3000K 时,宇宙处于电离状态.光子与电子通过散射紧密地耦合在一起.另一方面,电子与质子通过库仑相互作用联系起来,从而使光子、电子及质子的运动密切相关,可以用单一流体来描述.我们知道,光子具有很强的光压,它与引力抗衡的结果便形成声波振荡.不同频率的声波在光子退耦时留下的痕迹形成了小角度扰动谱的振荡行为,如图 2 所示^[18] (摘自参考文献 [18]). 第一个峰值

所对应的振荡波长为两倍的光子退耦时的声速视界.这里某时刻 t 的声速视界即为声波从 $t=0$ 到 $t=t$ 时所传播的距离.第二个峰对应的波长为一倍的声速视界,第三个峰的波长为 $2/3$ 的声速视界,等等.由此,扰动谱的峰值位置与光子退耦时的声速视界相联系.由于直接观测的是角度,峰值位置还与观测者到最后散射面的距离相关.这一距离直接与宇宙的几何(平坦、球状、马鞍状等)相联系,后者在广义相对论理论中由宇宙中物质的多少决定.而峰值的高低则由宇宙中重子物质(即由质子、中子组成的物质)的多少以及总物质的多少等决定.因此,精确地测量微波背景辐射声波振荡的信号可以给我们提供丰富的关于宇宙组成的信息.这便是 WMAP 观测的重要的科学目的之一.

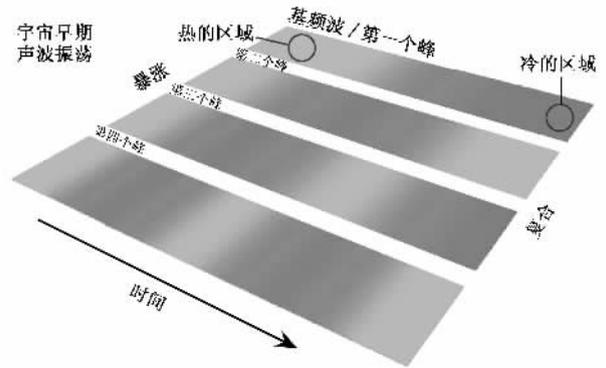


图 2 早期宇宙声波振荡示意图

2.3 微波背景辐射的偏振

上面我们讲述了微波背景辐射及其各向异性,然而这并不是背景辐射场所含有的全部的信息.辐射场含有的另外一个重要的信息就是它的偏振性.微波背景辐射的偏振是如何产生的呢?我们已经知道,在光子退耦前和退耦过程中,都存在着光子与自由电子间的散射.如果宇宙在复合后由于某种原因又重新被电离,则光子在从最后散射面到观测者的途中同样会与自由电子散射.光子与自由电子的散射特征可以用 Thomson 散射界面方程来描述,

$$\frac{d\sigma_T}{d\Omega} \propto |\hat{\epsilon} \cdot \hat{\epsilon}'|^2, \quad (1)$$

这里 σ_T 为 Thomson 散射界面, Ω 为立体角, $\hat{\epsilon}$ 和 $\hat{\epsilon}'$ 代表出射和入射光子的偏振方向(即电场方向).可以看出,对于同一入射方向,不同出射方向的强度是不同的.我们来考虑如图 3 所示的散射过程^[19] (摘自文献 [19]). 假设入射光为非偏振光.首先看从上向下的入射光.我们知道光是横波,两个垂直于传播

方向的电场基矢 $\hat{\epsilon}'$ 如图中虚线所示. 出射方向如图 3 所示, 垂直于纸面从里向外. 只有同时垂直于入射与出射方向的电场能够出现在出射光中(如图 3 所示). 同样, 对于从左向右的入射光, 相同的分析给出出射电场如图 3 中粗黑线所示. 如果两个入射方向的强度相同, 则综合的结果给出各方向电场强度相同的非偏振出射光. 研究表明, 当入射光具有四极各向异性, 则出射光将具有线偏振性. 这就是微波背景辐射产生偏振的物理原因. 因此, 微波背景辐射的偏振包含着扰动源的信息及光传播路径中自由电子多少的信息.

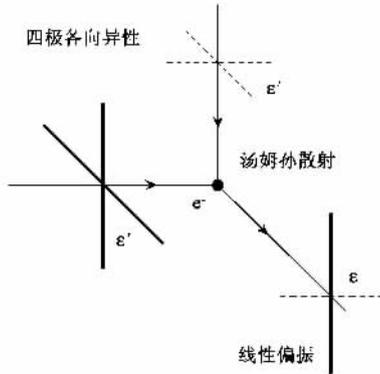


图 3 散射产生偏振的示意图

图 4 显示了理论计算的微波背景辐射偏振的特征. 图 4 上面的曲线 1 是温度扰动谱(如图 1). 曲线 2 为在最后散射面处产生的偏振谱. 我们已知偏振的产生与光子和电子的散射相关, 因此只有在视界尺度范围内才可能有偏振. 这是为什么曲线 2 在大尺度(小 l) 降为零的原因. 正如所期待的, 偏振谱中的振荡现象与温度起伏的振荡是相关的. 曲线 3 所反映的偏振信号是假设宇宙复合后在某时刻又重新被电离. 曲线 3 峰值的位置及高度与重新电离发生的时刻以及此后在光的传播路径上的自由电子密度密切相关. 曲线 4 是温度起伏与偏振信号的交叉相关. 其中虚线表示反相关. 从图 4 可以看出, 偏振程度比各向异性要小一个量级, 幅度为 10^{-6} , 这对于观测来讲是一个很大的挑战. 在 WMAP 观测之前, 在 2002 年, DASI 首次探测到了微波背景辐射偏振的信号^[20-23]. 而 WMAP 的观测才使我们真正可以利用偏振信号进行宇宙学研究.

3 WMAP 观测

WMAP 是继 COBE 之后, 美国国家航空和航天局(NASA)于 2001 年 6 月发射的另一颗探测微波背

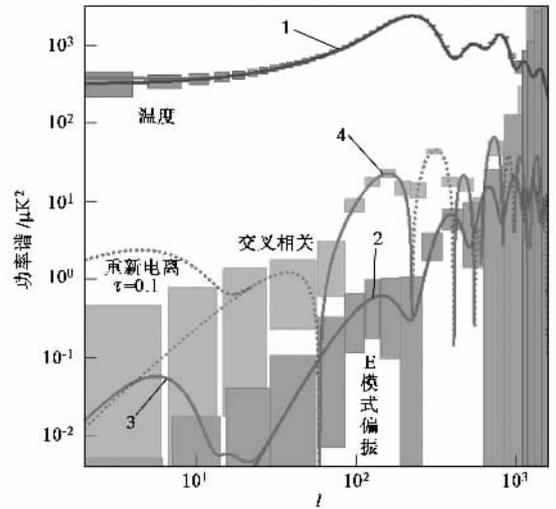


图 4 微波背景辐射温度起伏及偏振谱

景辐射的卫星. 它的灵敏度是 COBE 的 45 倍, 角分辨率为 13 arcmin , 是 COBE 的 33 倍. 它的科学目标是确定宇宙的几何状态、宇宙的物质组成及宇宙的演化.

图 5 是 WMAP 得到的全天温度扰动图. 这里 $T = 2.75 \text{ K}$ 的均匀辐射背景及偶极不均匀性已被扣除, 偶极不均匀性是由于观测者相对于背景辐射的运动所致. 在不考虑各种误差的前提下, 图 5 所反映的不均匀性即为我们今天观测的大尺度结构的种子. 对图 5 作分析, WMAP 组得到下列温度扰动谱及偏振与温度扰动的交叉相关谱.

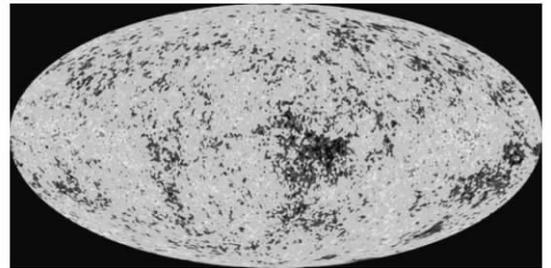


图 5 WMAP 温度起伏全天图(取自 MAP 工作组)

我们先来看温度扰动谱, 其中有误差棒的点为观测数据(WMAP + 小尺度 CBI 及 ACBAR 的结果). 实线为与数据符合最好的理论模型计算结果. 这一模型是在宇宙平坦的假设下, 用一定的统计方法将观测数据与不同的理论模型相比较而得出的^[15], 它被称为 ΛCDM 模型, 而宇宙的重要参数为

$$\Omega_m h^2 = 0.135^{+0.008}_{-0.009} \quad \Omega_B h^2 = 0.0224 \pm 0.0009$$

$$h = 0.71^{+0.04}_{-0.03}$$

其中 h 为以 100 km/s/Mpc 为单位的无量纲的

Hubble 常数 Ω_m 为以临界密度为单位的无量纲物质密度 Ω_b 为以临界密度为单位的无量纲重子物质密度. 放松平坦宇宙的要求, WMAP 数据及其他数据给出

$$\Omega_{\text{total}} = 1.02 \pm 0.02,$$

即宇宙非常接近平坦. 于是, 我们的宇宙的组成为 $\sim 70\%$ 的暗能量(Λ 项), $\sim 30\%$ 的物质, 其中我们熟知的重子物质只贡献全部 Ω 的 $\sim 5\%$, 其他 $\sim 25\%$ 为非重子暗物质. 对于大尺度结构的种子, 观测给出初始扰动谱指数

$$n = 0.99 \pm 0.04 \quad \sigma_8 = 0.9 \pm 0.1,$$

这里 σ_8 为 $8h^{-1}\text{Mpc}$ 范围内物质密度涨落的均方根值, 它反映了原初扰动的幅度. 这些结果对大爆炸模型, 及暴胀宇宙模型^[16] 提供了强有力的支持.

现在我们来分析偏振与温度扰动的交叉相关 (TE) 谱. 小尺度的偏振信号与宇宙复合时的光子与自由电子的散射相关. 我们已经指出, 偏振与光子的各向异性及自由电子数密度相关. 因此, 温度扰动谱中的小尺度振荡行为必然会反映在偏振中. 图 6 (b) 中 TE 谱的小尺度行为与暴胀绝热扰动模型的预言符合得非常好. WMAP 给出的另一具有非常重要意义的结果是大尺度的偏振 ($l < 20$). 如前所述, 只考虑宇宙在年龄为几十万年时 (红移 $z \sim 1100$) 复合前后光子与自由电子的散射, 在超出当时视界范围的角度是没有偏振的. 那么, WMAP 的观测结果意味着什么呢? 大尺度的偏振信号告诉我们, 在离现在不远的过去, 宇宙中重新出现了自由电子, 即宇宙重新被电离. 这时的视界对应的角度远远大于 $z \sim 1100$ 时的视界, 偏振可以出现在大尺度. 根据偏振信号的位置及强弱, WMAP 组给出从重新电离到观测者间的光深

$$\tau = \int_s^{s_0} n_e x_e \sigma_T ds = 0.17 \pm 0.04,$$

其中 a 为宇宙尺度因子, n_e 为总电子数密度, x_e 为电离度, σ_T 为 Thomson 散射截面. 积分沿视向路径. 光深的大小反映了光子被散射而偏离原视线方向的几率. 具体地说, 光子被散射的几率为 $1 - \exp(-\tau)$ 而能够到达我们的光子的几率为 $\exp(-\tau)$.

4 宇宙的重新电离

上面我们指出, WMAP 大尺度的偏振给出 $\tau \sim 0.17$. 现在, 我们作最简单的假设: 宇宙在某一瞬时 (用红移 z_r 表示) 完全被重新电离. 即 $z > z_r$, 电离度 $x_e = 0$, 而当 $z < z_r$, $x_e = 1$. 则从测量给出的 τ , 便可

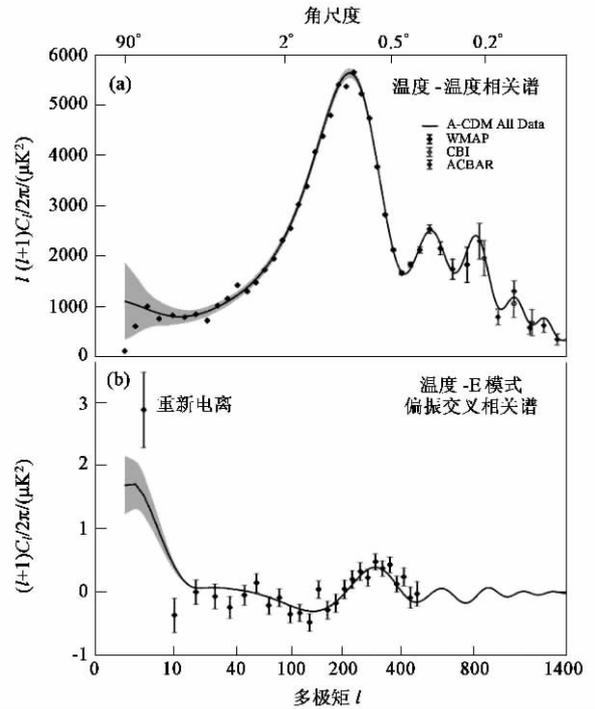


图 6 (a) WMAP 观测的微波背景辐射温度扰动谱 (b) 温度扰动与偏振交叉相关谱

以得出 $z_r = 17 \pm 3$ ^[17]. 然而宇宙的重新电离过程不是如此简单. 对于宇宙的电离状态可以提供限制的另一观测手段为对高红移类星体的观测. 对于在红移 z_s 处的类星体, 它发出的处于其本身 $1y\alpha$ 蓝端的光 (波长为 λ_1 , $\lambda_1 < \lambda_{1y\alpha}$), 在宇宙膨胀的过程中波长变长,

$$\lambda_l(z) = \lambda_l(1 + z_s)(1 + z),$$

则在某一红移 z_1 处, 会有 $\lambda_l(z_1) = \lambda_{1y\alpha}$. 如果在此红移处存在中性氢, 这一波长的光将通过 $1y\alpha$ 跃迁被吸收. 因此, 分析高红移类星体光谱, 可以给我们提供途中中性氢的信息. 星系际中性氢产生的吸收称作 Gunn - Peterson 效应^[24]. 通过此效应, 我们可以研究星系际中性氢的多少及其随红移的变化. 注意, 这里中性氢的多少决定了吸收强度. 当宇宙完全被电离后, Gunn - Peterson 效应将不再存在. 所以, 这一观测给我们提供的是宇宙完全电离前后的信息. 而微波背景辐射的大尺度偏振与宇宙中的自由电子多少相关, 因此可以用它来研究重新电离开始的情况. Gunn - Peterson 效应观测告诉我们, 宇宙的重新电离的完成发生在 $z \sim 6$ ^[25]. 这样, 我们看出上面的最简单的瞬时重新电离模型是不能够同时符合 WMAP 与 Gunn - Peterson 效应的观测的. 重新电离的过程很可能是持续了相当长的时间, 而重新电离开始的时刻很可能在 $11 < z_r < 30$ ^[17].

造成宇宙重新电离的源是什么？宇宙重新电离的详细过程如何？这些问题已成为宇宙学研究的重要的热门问题。宇宙的重新电离必定与宇宙中结构的形成密切相关。而宇宙第一代结构的形成标志着宇宙黑暗时代的结束，从此以后，各种结构逐渐形成，最终构成了我们今天所看到的丰富多彩的宇宙。第一代结构如何形成？它们如何影响后续结构的形成？这些结构如何将宇宙重新电离？所有这些问题尚不清楚，而对它们的研究对于了解宇宙的演化将会起到极其重要的作用^[26]。

5 结束语

随着科学研究的飞速发展，特别是各种观测的极大进展，人类对于宇宙的认识达到了前所未有的深度。宇宙学的研究已经进入了“精确宇宙学”阶段，即宇宙学各种参数可以高精度地被确定下来。与此同时，宇宙向人类展示了更具有挑战性的一面。当前，宇宙学最大的疑难莫过于暗能量问题。暗能量的物理本质是什么？从宇宙学的角度，人们试图用各种观测对它加以限制。而从理论物理的角度，人们探讨它的起因。另外，暗物质是什么，宇宙第一代结构形成，星系中大质量黑洞的形成，星系的形成等等，都是宇宙学、物理学研究的重要的活跃的研究方向。我们相信，在不断的了解、疑惑、再了解的过程中，宇

宙的迷雾将会逐渐被剥离，最终我们将会看到一个清晰透明的宇宙！

参 考 文 献

- [1] Hubble E. Proc. N. A. S. ,1929 ,15 :168
- [2] Gamow G J. Wash. Acad. Sci. ,1942 ,32 :353
- [3] Alpher R A ,Bethe H A ,Gamow G. Phys. Rev. ,1948 ,73 :803
- [4] Gamow G. Phys. Rev. ,1948 ,74 :505
- [5] Gamow G. Nature ,1948 ,162 :680
- [6] Alpher R A ,Herman R. Nature ,1948 ,162 :774
- [7] Penzias A A ,Wilson R W. ApJ ,1965 ,142 :#19
- [8] Mather J C *et al.* ApJ ,1994 ,420 :439
- [9] Wright E L *et al.* ApJ ,1994 ,420 :450
- [10] Fixsen D J *et al.* ApJ ,1996 ,473 :576
- [11] Smoot G F *et al.* ApJ ,1992 ,396 :L1
- [12] Bennett C L *et al.* ApJ ,1996 ,464 :L1
- [13] Hu W ,Dodelson S. ARA&A ,2002 ,40 :171
- [14] Bennett C L *et al.* ApJS ,2003 ,148 :1
- [15] Spergel D N *et al.* ApJS ,2003 ,148 :175
- [16] Peiris H V *et al.* ApJS ,2003 ,148 :213
- [17] Kogut A *et al.* ApJS ,2003 ,148 :161
- [18] Hu W ,White M. Scientific American ,2004 ,Feb. ,44
- [19] Hu W ,White M. New Astronomy ,1998 ,2 :323
- [20] Kovac J *et al.* Nature ,2002 ,420 ,772
- [21] Leitch E M *et al.* Nature ,2002 ,420 ,763
- [22] Carlstrom J E *et al.* New Astronomy ,2003 ,47 ,953
- [23] Church S *et al.* New Astronomy ,2003 ,47 ,1083
- [24] Gunn J E ,Peterson B A. ApJ ,1965 ,142 ,1633
- [25] Fan X. APJ ,2002 ,123 :1247
- [26] Furlanetto S R ,Loeb A. astro-ph/0409656

· 物理新闻和动态 ·

更快捷地测量地球自转

地球的自转矢量涉及角速度和转轴取向二个参量。航天、全球定位系统(GPS)以及地球内部的研究对上述参量的测量精度提出了越来越高的要求。今天的GPS系统可以使巡航导弹的命中精度达到5—10m，而实现这一精度的基础是：转轴取向误差小于1毫弧秒，日长的测量精度不超过0.1ms。

地球的自转轴相对于公转平面法线有一个约23.5°的倾角。月球和太阳的引力作用在椭球状地球上，产生一个将自转轴“搬正”的力矩。这力矩使自转轴进动，进动的周期是26000年，地轴在太空中缓慢地扫出一个圆锥面。此外，地球的北极极点是依据1900—1905年期间地球自转轴的平均取向定义的。今天，自转轴在地球上的位置已经偏离北极点约10m。事实上，上述地球自转轴的摆动包含有多种短周期模式，例如，日摆动、月摆动和435天周期摆动(钱德拉摆动)。

关于自转角速度，从数亿年的时间尺度看，它是减速的。月球对潮汐变形地球的引力力矩使地球自转刹车，而月球本身渐渐远离地球(由于地-月系统总角动量守恒)。不过，上述刹车效应在几十年的尺度上则会被其他影响(大气运动、海流和地震)完全淹没。1976年以来，利用Lageos卫星或天文射电干涉技术，测得的“实际日长”= $86400 + \Delta$ ， Δ 约在1ms到3ms之间。为此，国际时间局每隔一两年就要通令全世界的“标准钟”添加一个闰秒。

天文方法只能给出若干天内参量的平均值。最近，德国和新西兰的一个合作研究组，在地球不同纬度的地下安放了三台世界最灵敏的激光回转仪。在闭合的环路上，二束激光对射；与地球转向相同的一束光“红移”，而另一束光“蓝移”。二束光的相干可给出地球自转矢量的瞬时值，精度优于 $1/10^8$ 。

(戴闻 编译自WWW.arXiv.org/abs/physics/0406156和Phys World,2004(10)3)