

宇宙幼年的照片 ——2006 年度诺贝尔物理学奖*

陆 埏[†]

(中国科学院紫金山天文台 南京 210008)

(粒子-核-宇宙学联合研究中心 南京大学-紫金山天文台 南京 210093)

摘 要 讨论了诺贝尔物理学奖与天体物理的关系,指出 2006 年度诺贝尔物理学奖已经是第 8 个年度、第 11 个天体物理项目、第 14、15 个天体物理学家获得诺贝尔物理学奖(见正文表 1)。这个奖授予宇宙微波背景辐射的黑体谱形和各向异性的发现,强有力地支持了大爆炸宇宙学。文章也讨论了 this 领域近年来的重大成就。

关键词 诺贝尔奖,宇宙微波背景辐射,大爆炸宇宙学,各向异性,黑体谱

A picture of the baby universe——the Nobel prize in physics 2006

LU Tan[†]

(Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

(Physics Department, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

(Joint Center of Particle, Nuclear Physics and Cosmology, PMO - NJU, Nanjing 210093, China)

Abstract The historical relationship between astrophysics and the Nobel Prize in Physics is discussed. The 2006 Prize was the 8th to be awarded for astrophysics, the 11th for astrophysics and was won by the 14th and 15th astrophysicists. It was awarded for the discovery of the blackbody spectrum and anisotropy of the cosmic microwave background radiation, which strongly supports the big bang theory of cosmology. Other great achievements in recent years in this field are also discussed.

Keywords Nobel prize, cosmic microwave background radiation, big bang cosmology, anisotropy, blackbody radiation spectrum

2006 年 10 月 3 日,瑞典皇家科学院宣布,本年度的诺贝尔物理学奖授予马塞(J. Mather, 美国哥达空间飞行中心)和斯穆特(G. Smoot, 美国加州大学伯克利分校),奖励他们对宇宙微波背景辐射的黑体谱形和各向异性的发现。这已经是天体物理领域第 8 个年度、第 11 个天体物理项目获得诺贝尔物理学奖,也是宇宙学领域第 2 次获得诺贝尔物理学奖。

1 诺贝尔物理学奖与天体物理

从历史上看,物理学的发展与天文学(特别是天体物理学)的发展是密不可分的。万有引力作为

物理学的一条基本定律,就直接发源于天文学的研究。诺贝尔奖是从 1901 年开始颁发的。当时,天体物理学家也常被提名为诺贝尔物理学奖的候选人。比如,海尔(George E. Hale)从 1913 年起就频频被提名为诺贝尔物理学奖的候选人。但是,诺贝尔奖委员会内部围绕着如何界定诺贝尔物理学奖范围问题存在着争议^[1],比如,天体物理是否包括在这个奖励范围之内。直到 1923 年,海尔仍是候选人之一。那年,一位重要委员阿伦尼乌斯(S. Arrhenius)说:天体物理的发展非常迅速,以致几乎成了天文学的全

* 国家自然科学基金(批准号:10473023)资助项目

[†] E-mail: l. lu@mail. pmo. ac. cn

部,而诺贝尔奖对象中未设天文学,并以此为由取消了天体物理作为诺贝尔物理学奖的获奖资格.此后,连宇宙膨胀的发现者哈勃(E. P. Hubble)等人也虽频频被提名而最终还是落选.值得注意的是,从1901到1966年,长达三分之二个世纪,没有一个天体物理项目获得过诺贝尔物理学奖.

贝蒂(Hans Bethe)是一位高产的理论物理学家,他的恒星能源学说是一项最有创意的研究.早在20世纪40年代,他就被提名为诺贝尔物理学奖的候选人,但也因为同样的理由而频频落选.直到60年代,越来越多的物理学家一再提名,终于在1967年以“奖给他对核反应理论研究的贡献,特别是他对恒星能源的发现”为由,放了他一马,授予了他当年的诺贝尔物理学奖.这个奖项的措辞似乎要说,虽然是天体物理的项目,但还是因为物理理论本身的研究才获了奖.然而,不管用了什么理由,毕竟实现了零的突破,开了天体物理获诺贝尔物理学奖的先河.此后,犹如山洪暴发,1967年起的40年里,竟有8个年度、11个天体物理项目、15位天体物理学家获得了诺贝尔物理学奖,见表1.还有一位射电天文学家,即汤斯(C. H. Townes),他同时也是物理学家,他1964年获得的诺贝尔物理学奖主要是在物理方面,因此,没有列在天体物理项目中.

表1 天体物理领域获诺贝尔物理学奖的项目

年度	获奖人	获奖项目
1967	H. Bethe	核反应理论研究,恒星能源的发现
1970	H. Alfvén	磁流体力学中的基本工作和发现
1974	M. Ryle	综合孔径技术
	A. Hewish	脉冲星的发现
1978	A. A. Penzias R. W. Wilson	宇宙微波背景辐射的发现
1982	S. Chandrasekhar	恒星结构与演化的理论研究
	W. A. Fowler	宇宙中化学元素起源的理论和实验研究
1993	R. A. Hulse J. H. Taylor	发现一种新类型脉冲星,开辟了引力研究新的途径
2002	R. Davis Jr. M. Koshiba	宇宙中微子的观测
	R. Giacconi	宇宙X射线源的发现
2006	J. C. Mather G. F. Smoot	宇宙微波背景辐射黑体谱和各向异性的发现

为什么1966年以前整整三分之二个世纪内没有任何天体物理项目获得过诺贝尔物理学奖?并不是天体物理没有重要成果.根据弗里德曼(R. M. Friedman)查阅的50年后解密的诺贝尔奖资料^[1],看来这是与诺贝尔奖委员会界定物理学奖的范围有关.但是,此后40年有多达8个年度、11个天体物理项目、15位天体物理学家获奖又是为什么?由于相关资料还没有解密,无法作出直接的判断.

不过,可以猜测,以前的那个界定至少限制了只有物理味道很浓的天体物理项目才有可能获奖,而近年来天体物理中重大发现确实不断涌现.据此,今后的一段时间,天体物理恐还会有不少可能的获奖成果出现.比如,引力透镜现象(类星体多重成像、爱因斯坦弧、爱因斯坦环等已经发现了不少);黑洞问题(天体物理中几乎已经离不开黑洞这个概念,现只差最后确认);引力波(引力波的间接验证已获诺贝尔奖,直接验证的工作正在积极准备);伽玛射线暴(已从20世纪六七十年代由美国监测核爆炸的军事卫星偶然发现的伽玛射线信号发展为一大类可以全波段观测的,并已确认为一种最猛烈的极端相对论运动的遥远天体现象);暗物质、暗能量的发现或确认也还将会是极可能的获奖项目.

2 宇宙学与微波背景辐射

2006年的诺贝尔物理学奖已经是第二次授予宇宙微波背景辐射项目.第一次是1978年授予彭齐亚斯(A. A. Penzias)和威尔逊(R. W. Wilson).微波背景辐射是宇宙大爆炸学说的重要证据.

1915年爱因斯坦发表了广义相对论,为宇宙学的研究奠定了理论基础.1929年哈勃发现宇宙在膨胀,表明宇宙曾经有过一个起点,使伽莫夫(G. Gamow)于1946年提出了宇宙大爆炸学说^[2]:宇宙从一个均匀的高温高密状态经膨胀降温降密演化而来.这个学说简单明了,宇宙的演化历程可以用物理学确切地进行计算.比如,当宇宙膨胀而降温到约 10^9 K时(相当于宇宙年龄约为3分钟),其中粒子的热运动平均动能约为100 keV,正是质子、中子经频繁碰撞而有效生成氘核(^2H),进而生成氦-4(^4He)、氦-3(^3He)、锂-7(^7Li)等轻核的宇宙原初核合成时代,可以明确地算出它们的丰度.由于这4种核素是稳定的,一直留存到今天,可以直接用观测进行检验.仔细的观测研究与计算结果符合得相当好,是对大爆炸宇宙学的有力支持.

当宇宙膨胀而降温到约3000 K时(相当于宇宙年龄约为38万岁),质子会有效地俘获电子而复合生成中性氢原子,氦核俘获电子复合成中性氦原子.宇宙就从质子、氦核、电子等组成的等离子体转化为中性原子气体.在等离子体中,光子会频繁地与带电粒子碰撞,自由程很短;而在中性原子气体中,光子将毫无碰撞地自由运动,直达观测者.这种自由运动的光子就是宇宙微波背景辐射,它们带着复合前最

后一次散射处的信息. 这是人们能直接看到的最早, 也是最远地方的信息. 更早、更远处, 光子与带电粒子频繁碰撞, 每次碰撞就把原来的信息丢失, 换成碰撞地方的新信息. 所以, 所有到达观测者的光子只携带最后一次碰撞处的信息. 这是脱胎于约 3000 K 的高度热平衡且高度均匀的等离子体, 它具有很纯的黑体谱, 且空间上高度各向同性. 随着宇宙的膨胀, 辐射的波长也跟着拉长, 相当于等效能量降低, 到现在黑体谱温度应降到约 3 K. 彭齐亚斯和威尔逊^[3]于 1964—1965 年所发现的微波背景辐射正具有这种性质, 并测定其温度为 3.5 ± 1.0 K, 给了大爆炸宇宙学以直接的、有力的支持(见图 1). 其实, 当初彭齐亚斯和威尔逊的研究只是为了降低他们天线的噪声, 而宇宙微波背景辐射正是扮演了噪声的角色. 当你的电视机在偏离节目时, 屏幕上所显示的雪花噪声, 其中就有约 1% 来自宇宙微波背景辐射. 彭齐亚斯和威尔逊就是在千方百计地排除这种噪声失败后, 才确认它的存在, 而它的宇宙学意义是由普林斯顿大学的迪克(R. H. Dicke)、皮伯斯(P. J. E. Peebles)等人^[4]指出来的.

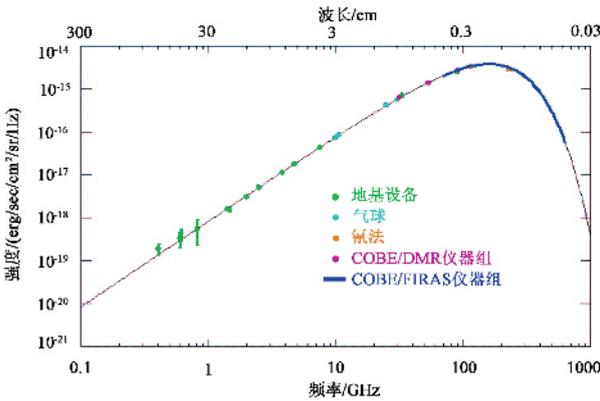


图 1 宇宙微波背景辐射的黑体谱^[5]

值得一提的是, 宇宙演化的极早期, 曾发生过一次十分猛烈的快速膨胀, 为期只有约 10^{-33} 秒, 却膨胀了几十个数量级, 叫做暴胀时期. 这个几乎不可思议的事, 近年来却获得了强有力的观测支持. 它关于宇宙所有物质密度总和等于临界密度的预言已经得到观测确认. 2004 年度的格鲁勃(Peter Gruber)宇宙学奖就是授予上个世纪 80 年代初提出这个暴胀宇宙学的顾斯(A. H. Guth)和林德(A. Linde)两人.

3 COBE 卫星的发现

彭齐亚斯和威尔逊用地面天线只在一个波长 (~ 7 cm) 上进行了测量, 并没有真正得到整个黑体谱. 随后, 有许多人在不同的波长上进行了测量, 支持了黑体谱. 但是, 由于大气条件的限制, 地面设备难于获得高能段(短波段)的数据. 1989 年 COBE (COsmic Background Explorer) 卫星发射升空后, 马塞领导的仪器组(FIRAS - Far IR Absolute Spectrophotometer) 仅在 9 分钟内就测得了微波背景辐射的整个黑体谱, 特别是给出了精确的短波段数据^[5,6], 测定其温度精确到 2.725 ± 0.001 K, 见图 1. 这是首次精确测定的宇宙微波背景辐射的黑体谱.

彭齐亚斯和威尔逊观测到的微波背景辐射空间分布的高度各向同性, 是这种辐射的主要特征. 但是, 如果完全没有各向异性, 就不可能形成今天的星系和星系团这种大尺度结构. 为解释这种大尺度结构, 如果只有普通的可见物质, 可以估计出微波背景辐射温度应有 10^{-3} 量级的各向异性. 但是, 当计及暗物质后, 因暗物质更有利于引力成团效应, 微波背景辐射各向异性的估算值就降低到 10^{-5} . 能否观测到这个量级的各向异性, 就成为重要的检验. 斯穆特^[8]所领导的 COBE 的另一个仪器组(DMR - Differential Microwave Radiometer) 果然测出了 10^{-5} 量级的各向异性, 如图 2(左上)所示, 图中不同的颜色代表略有不同的微波背景辐射温度. 因为这个各向异性是今天的星系和星系团的早期种子, 也是人们所能直接拍摄到的最早、最远的宇宙幼年的照片, 因此, 斯穆特戏称这是看到了“上帝”的脸! 就在 1992 年这个各向异性发表的时候, 霍金(S. W. Hawking)在接受采访时说: “如果不是指所有时代的话, 这至少也是本世纪最伟大的发现”.

4 宇宙加速膨胀的发现

经过 20 世纪后 30 年许多观测宇宙膨胀减速因子的失败, 大幅度改进了 Ia 型超新星标准烛光的标定技术, 1998 年, 珀耳莫特(S. Perlmutter)等人^[9]的超新星宇宙学项目组(SCP)和里斯(A. G. Riess)等人^[10]的高红移超新星研究组(HSST)分别发现宇宙不是在减速, 而是正在加速膨胀. 这是十分惊人的发现. 从来没有人怀疑, 万有引力总是引力, 没有斥力. 在万有引力控制下的宇宙膨胀, 应当减速而决不可能加速! 按照广义相对论, 宇宙的膨胀遵循如下公式:

$$\ddot{R} = -\frac{4\pi G}{3} \left(\rho + \frac{3p}{c^2} \right) R$$

其中 \ddot{R} 就是宇宙膨胀的加速度, 而 ρ 和 p 分别为宇宙的密度和压强, R 为宇宙的尺度, G 为引力常数, c 为光速. 通常, ρ 和 p 总取正值, 因此, \ddot{R} 永远是负的. 就是说, 宇宙的膨胀永远是减速的. 为了得到加速膨胀, 除非存在一种压强为负的物质, 一般称之为暗能量. 实际上, 早在 1917 年爱因斯坦首次提出宇宙模型时就在他的引力场方程中引入了一个宇宙常数 Λ , 这个常数就具有暗能量的性质. 尽管现在暗能量的理论模型已经很多, 从观测数据看, 似乎宇宙常数 Λ 仍是首选, 其压强 (p) 与能量密度 (ρc^2) 之比为 -1 , 即 $w = p/\rho c^2 = -1$. 因此, 宇宙中至少应当存在三种物质, 即可见物质(重子物质)、暗物质和暗能量. 可见物质是地球上我们经常打交道的物质, 暗物质是有引力但看不见的物质, 至今仍不知道它是由什么粒子组成的, 而暗能量则是目前还完全不知道的全新的物质, 它均匀地弥散在整个宇宙, 它的“万有引力”具有斥力性! 这个发现可能会动摇物理学的基础.

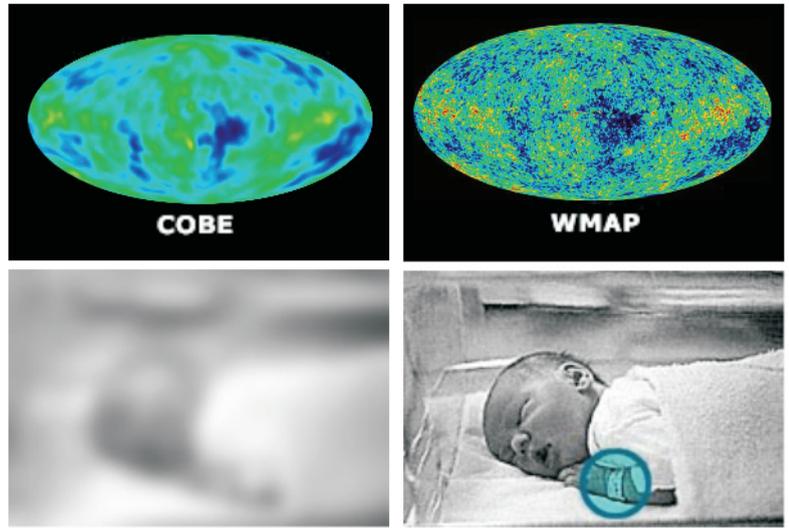


图 2 COBE 和 WMAP 测得的宇宙微波背景辐射的各向异性^[7]

5 WMAP 卫星的贡献

虽然 COBE 首次观测到了宇宙微波背景辐射的各向异性, 但分辨率比较低. 2001 年发射升空的 WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) 卫星比 COBE 有了大幅度的改进, 它所拍摄到的各向异性(图 2(右上))比 COBE(图 2(左上))要清晰得多. 图 2 下面的左和右形象地示意 COBE 和 WMAP 拍摄到的宇宙幼年的两张照片, 清晰程度的比较是显见的. 图右下幼儿胳膊上的布条, 如能进一步放大, 还可显示出出生年月等信息. WMAP 这个精确测量, 使宇宙学真正发展成为精确宇宙学.

根据各向异性的观测数据, 可将微波背景辐射的温度起伏按方向作展开, 并可以计算出相应的各向异性角功率谱^[7, 11]:

$$\frac{\Delta T}{T} = \sum_{l,m} a_{lm} Y_{lm}(\theta, \phi)$$

$$C_l = |a_{lm}|^2$$

图 3 绘出了温度-温度交叉功率谱, 其横坐标为角标度(上标)、多极矩 l (下标), 而纵坐标为 $l(l+1)C_l/2\pi$ (μK^2). 图中观测点主要取自 WMAP 数据, 同

时辅以高多极矩(小角标)的 CBI (Cosmic Background Imager) 和 ACBAR (Arcminute Cosmology Bolometer Array Receiver) 数据.

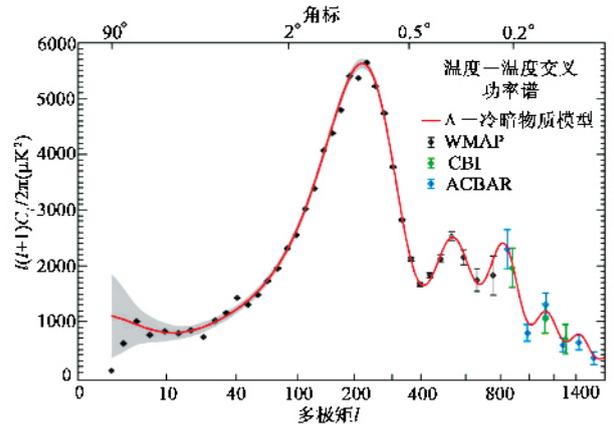


图 3 宇宙微波背景辐射的角功率谱^[7, 11]

直接观测的是不同方向上微波背景辐射的温度起伏, 它与密度起伏密切相关. 因此, 温度各向异性也反映了密度各向异性. 事实上, 当有声波在气体中传播时, 压缩的高密区温度会升高, 稀疏的低密区温度会降低. WMAP 卫星所观测到的微波背景辐射温度各向异性的角功率谱的多峰结构, 实际上反映了声波的特征^[12]. 从宇宙早期的暴胀阶段结束(宇宙年龄约 10^{-33} 秒)到复合时期(宇宙年龄约 38 万岁), 宇宙处于等离子体状态. 暴胀阶段的扰动会在其中以声波的形式一直传播到复合时期. 这里, 会有基波和各次谐波出现. 由于暴胀阶段时间很短, 它的扰动几乎同时进入等离子体传播, 因此, 声波传播的

同步性很好,使多峰结构十分清晰,见图3.图中的主峰相当于声波的基波,它的压缩区和稀疏区在复合时期均达到极大,相应的温度起伏也达到最大偏离.其后诸峰相继为各次谐波所引起的温度偏差.

我们知道,微波背景辐射是在复合时期经最后散射而逃逸出来的.它一方面上承复合前等离子体中的特征,并直接衔接暴胀以来保留的声波信息;另一方面下传直到今天,保留了复合时期的特征和信息.值得注意的是,复合后中性气体经引力不稳定性而形成第一代恒星后,星光将其周围气体再电离,一部分背景辐射就会与再电离产生的带电粒子散射,形成偏振的光. WMAP 发现了这种偏振光,测量表明第一代恒星应当在宇宙年龄约为4亿岁时形成.

不仅如此,微波背景辐射还可以提供宇宙学许多重要信息.比如,可以计算出宇宙的年龄、得到宇宙的物质组成以及宇宙空间的几何性质等.事实上,这几个方面都是有连带关系的.我们知道,宇宙的物质组成包含三个成分,即通常物质(重子物质,如质子、中子等)、非重子冷暗物质和暗能量.重子物质和非重子冷暗物质都具有万有引力,但只有通常物质才有声波压缩和稀疏作用.应当注意,引力是会对压缩区和稀疏区施加不同的影响.声波的基波和各次谐波在复合时期可以有不同的相位,有不同的疏密状态,在微波背景辐射各向异性的角功率谱上就会反映出不同的影响.观测研究角功率谱,比较基波和谐波就可以分别定出宇宙中的普通物质和暗物质的成分.由此定出的组分与从宇宙原初核合成等定出的相吻合.如果再与宇宙大尺度结构作比较,比如利用 Sloan 数字化巡天(SDSS)和 2dF 星系巡天(2dFGRS)等观测数据,还可以相辅相成,得到更多更好的结果.

图4画出了超新星、微波背景辐射和大尺度结构三种观测给出的允许范围,显见三者共同允许的最佳点在重子物质与暗物质密度之和约为30%、暗能量密度约为70%的地方^[13].据原初核合成定出的重子物质密度约为4%,由2006年公布的WMAP的3年数据改进的结果^[14]暗物质密度约为22%,则暗能量密度约为74%.人们还几乎完全不清楚的暗能量居然占了宇宙物质的近3/4.图4中最佳点附近有一小区,那是拟议中的SNAP(Supernova / Acceleration Probe)卫星计划预计会给出的高度精确的允许范围.图中表示平直宇宙的直线几乎与微波背景辐射的窄长的允许区相重合,可见微波背景辐射精确检验了暴胀宇宙所预言的空间几何的平直性.

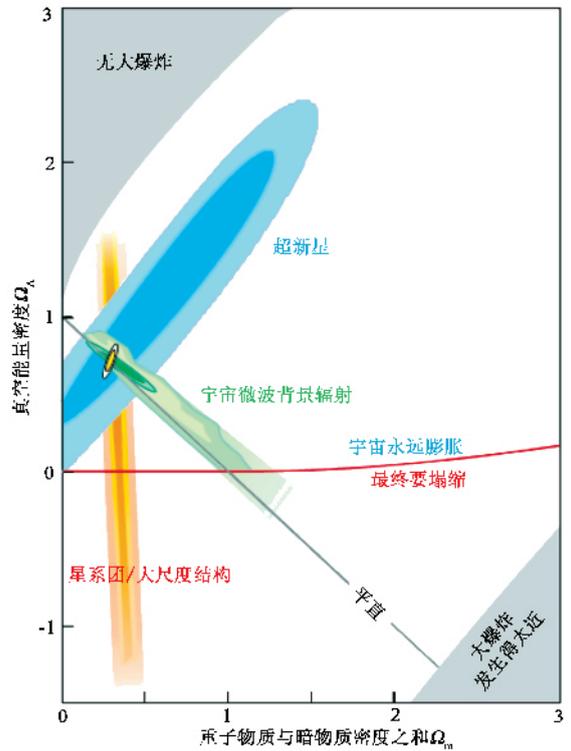


图4 超新星、微波背景辐射和大尺度结构三种观测给出的允许范围^[13]

6 讨论、评论与结语

2006年10月,诺贝尔奖委员会宣布,当年的物理学奖授予COBE卫星在宇宙学上所获得的成果.就在2个月前,2006年8月在布拉格举行的国际天文联合会(IAU)大会上已宣布,将2006年度的格鲁勃(Peter Gruber)宇宙学奖授予COBE卫星在宇宙学上所获得的成果.仅在两个月内,接连两个国际大奖授予同一个项目,只是奖金的分配稍有不同.诺贝尔奖(约100万美元)由马塞和斯穆特平分,而格鲁勃奖(25万美元)把一半奖给马塞,另一半奖给包括斯穆特在内的另外18个人.有趣的还在于,2006年还有一个大奖(即邵逸夫奖,100万美元),授予了发现宇宙加速膨胀的帕耳莫特(S. Perlmutter)、利斯(A. Riess)和施密特(B. Schmidt)3人.近年来宇宙学的迅猛发展正是由这个宇宙加速膨胀项目和微波背景辐射项目共同推动的.看来,这个项目获奖真是众望所归,有非常坚实的基础.

这个项目之所以重要,是因为支持并完善了大爆炸宇宙学,使之可以自恰地描写从宇宙极早期的量子涨落直到今天星系、恒星组成的宇宙大尺度结构,而微波背景辐射的各向异性正是这个宇宙演化

的中转证据. 而微波背景辐射所代表的复合时期的前和后两个阶段演化也已经形成了合理的思路. 这中间最具革命性的发展是暴胀和暗能量的引入. 这里所描绘的整个宇宙自始至终的演化图景是十分诱人的. 生活在宇宙中一个普普通通的星系(银河系) 中的一个普普通通的恒星(太阳) 周围的一颗普普通通的行星(地球) 上的人 , 居然可以如此清晰地描绘出整个宇宙的来龙去脉 , 实在是一件十分了不起的事情.

回顾 19 世纪末 , 开尔文勋爵(Lord Kelvin , 亦即 W. Thomson) 曾指出 , 在当时物理学的晴朗天空中 有两朵乌云 , 一朵是“ 以太 ” , 一朵是“ 黑体谱 ” . 正是这两朵乌云 , 引发了 20 世纪物理学的两大革命 , “ 以太 ” 导致了相对论的创立 ; “ 黑体谱 ” 导致了量子力学的诞生. 如今 , 又出现了暗能量等新的乌云 , 也许它们又将引发新的物理学革命 !

WMAP 是比 COBE 改进了许多的高性能卫星 , 比较图 2 中的两幅图的清晰程度就可以看得很明白. 由于 WMAP 的高灵敏度和高分辨率 , 它的高质量数据使几十个宇宙学参数可以定量地计算出来 , 也使宇宙学内原本存在明显分歧的不同领域得以协调 , 使宇宙学发展成为精确宇宙学与和谐宇宙学. 正是 WMAP 的重大贡献 , 证明了 COBE 发现的意义.

由此促成了 COBE 成果获奖. 许多奖项往往是比指标 , 比性能 , 比水平 , 看哪个好. 与此不同 , 诺贝尔奖不是奖给最好 , 而是奖给最早 , 奖给原创性的成果. 几百年来 的经验事实表明 , 原创性确实是科研工作的灵魂 , 是科学发展最具活力的关键所在.

参 考 文 献

- [1] Friedman R M. The Politics of Excellence(中译本 : 权谋 - 诺贝尔科学奖的幕后. 杨建军译. 上海科技教育出版社 , 2005)
- [2] Gamow G. Phys. Rev. , 1946 , 70 : 572
- [3] Penzias A A , Wilson R W. ApJ , 1965 , 142 : 419
- [4] Dicke R H , Peebles P J E , Roll P G *et al.* ApJ , 1965 , 142 : 414
- [5] http://arcade.gsfc.nasa.gov/cmb_intensity.html
- [6] Mather J C *et al.* ApJ , 1990 , 354 : 137
- [7] Bennett C L. Nature , 2006 , 440 : 1126 ; http://map.gsfc.nasa.gov/m_mm/mr_details.html
- [8] Smoot G F *et al.* ApJL , 1992 , 396 : L1
- [9] Perlmutter S *et al.* ApJ , 1999 , 517 : 565
- [10] Riess A G *et al.* AJ , 1998 , 116 : 1009
- [11] Bennett C L *et al.* ApJS , 2003 , 148 : 1
- [12] Hu W , White M. Sci. Amer. 2004(2) : 44
- [13] Perlmutter S. Physics Today , 2003(4) : 53
- [14] Spergel D N *et al.* arXiv astro-ph/0603449

· 信息服务 ·



Rensselaer

美国伦斯勒理工学院招生信息

Troy , New York , U. S. A.

March , 2007

JOIN OUR GRADUATE SCHOOL IN PHYSICS

Ph. D. in Department of Physics , Applied Physics , and Astronomy
Areas of research : Terahertz Imaging and spectroscopy , Terascale Electronics , Photonic bandgap structures , nanoelectronic quantum structures , Bio-physics , Origins of Life , Astronomy , Elementary Particles Physics. Teaching , research assistantships , and fellowships are available.

Application : <http://www.rpi.edu/dept/grad-services/>

Information : <http://www.rpi.edu/dept/phys/>

Email : gradphysics@rpi.edu