

2006 年诺贝尔物理学奖简介

张新民

2006 年度诺贝尔物理学奖授予了在宇宙学研究领域取得杰出成果的美国科学家约翰·马瑟和乔治·斯穆特。他们发现的宇宙微波背景辐射的黑体谱和各向异性强烈支持了大爆炸宇宙学模型并开启了“精确宇宙学”时代的大门。COBE 之后宇宙学研究取得了一系列重大进展。近年 WMAP、SDSS 等天文观测更加坚实有力地支持了大爆炸宇宙学模型，并对物理学提出尖锐的挑战，诸如什么是暗物质、暗能量的物理本质是什么。

2006 年 10 月 3 日，瑞典皇家科学院秘书长贡纳尔·厄奎斯特和诺贝尔委员会主席佩尔·卡尔森宣布，本年度诺贝尔物理学奖将授予美国科学家约翰·马瑟(John C. Mather)和乔治·斯穆特(George F. Smoot)。他们是因为“发现宇宙微波背景辐射的黑体谱和各向异性”而荣获该奖的。这个发现被认为是支持大爆炸宇宙学的有力证据，并开启了“精确宇宙学”时代的大门。

约翰·马瑟生于 1945 年，在加州大学伯克利分校获物理学博士学位。随后在纽约戈达德学院(Goddard College)从事宇宙学方面的博士后研究工作，在此期间他提出了关于探测宇宙微波背景辐射的建议。1976 年，他在 NASA 所属的戈达德航天中心得到研究科学家(study scientist)的职位，随后成为项目科学家(project scientist)，并在此取得宇宙微波背景辐射领域的突破性成果。从 1995 年起，他成为韦伯空间望远镜的资深项目科学家。斯穆特生于 1945 年，1970 年在麻省理工学院获物理学博士，随后在加州大学伯克利分校成为一名科研工作者，开始大爆炸宇宙学方面的研究。他在加州大学工作至今，目前参与“普朗克探测器”计划，该计划将更精密研究宇宙微波背景辐射，并将于 2008 年初发射升空。

宇宙微波背景辐射

大爆炸宇宙学模型告诉我们，大约 137 亿年前，



大爆炸发生的那一刻，宇宙处于一个极致密、极高温的状态，之后宇宙逐渐膨胀、冷却并演化至今。在此过程中，宇宙经历了原初轻元素合成、光子退耦和中性原子形成、第一代恒星形成等几个重要时期。

宇宙微波背景辐射产生于大爆炸发生之后大约 35 万年。那时宇宙的温度非常高，宇宙气体处于高度热平衡，发出的辐射光子带有明显特征，高度符合普朗克的黑体谱。之后随着宇宙的持续膨胀，其温度逐渐降至今天的 2.7K。这就是宇宙微波背景辐射。

早在 20 世纪 60 年代，美国贝尔实验室的两位工程师阿尔诺·彭齐亚斯(Arno Penzias)和罗伯特·威尔逊(Robert Wilson)就发现了宇宙微波背景辐射，并因此获得 1978 年诺贝尔物理学奖。而针对宇宙微波背景辐射的探测工作一开始都是在地面上进行，由于大气层的影响，很难做到精确测量。

1974 年，马瑟提出宇宙微波背景探测卫星(Cosmic Background Explorer, COBE)计划，并和斯穆特展开合作。在 COBE 项目中，马瑟负责总体协调，斯穆特则主要负责测量宇宙微波背景辐射的各向异性。参与项目的研究队伍非常庞大，共有 1000 人之多。由于种种原因，这颗卫星直到 1989 年才得以升空。3 年后，研究成果首次公布。整个项目花费约 2 亿~3 亿美元。

在投入运行后不久，COBE 就记录了宇宙微波背景辐射谱，它非常精确地符合温度为 $2.728 \pm 0.004\text{K}$ 的黑体辐射谱。COBE 的这一发现比阿尔诺·彭齐亚斯和罗伯特·威尔逊的工作更令人信服，确证了大爆炸宇宙学模型。

COBE 还有更重要的发现。宇宙微波背景辐射大致上应该是均匀的，但是在这种单调的背景中也应该存在微小的变化，其幅度大约只有 $1/10^5$ ，科学家称其为各向异性。目前公认的理论认为，这个温

度涨落起源于早期宇宙的暴涨过程(Inflation)的量子涨落,正是这一原初涨落造成了宇宙物质分布不均匀,最终得以形成诸如星系团等的宇宙结构。

COBE的工作开启了“精确宇宙学”时代的大门。自COBE以后,特别是1998年以来,宇宙学取得了一系列重大进展。例如1998年通过超新星发现宇宙在加速膨胀,揭示了暗能量的存在;2000年Boomerang和MAXIMA气球实验对宇宙微波背景辐射温度功率谱第一峰位置的测量揭示宇宙是平坦的;2002年DASI第一次发现宇宙微波背景辐射的极化;特别是2003年以来威尔金森微波各向异性探测器(Wilkinson Microwave Anisotropy Probe,简称WMAP)对宇宙微波背景辐射的精确测量以及斯隆数字巡天(SDSS)大尺度结构的观测等也坚实有力地支持了大爆炸宇宙学模型。

即将升空的普朗克卫星将更精密地测量宇宙微波背景辐射,并检验暴涨理论。同时用宇宙微波背景辐射测量可取得新的物理成果。例如,2006年由中国科学院高能物理所和国家天文台的中青年科学家组成的研究小组,设计出一种用宇宙微波背景辐射偏振检验电荷-宇称-时间反演(CPT)对称性的新方法,使检测灵敏度大大提高。在用这种方法分析美国WMAP卫星和Boomerang南极气球实验发表的最新数据后,该小组发现存在CPT对称性破缺的迹象。如果这一发现被未来实验进一步证实,将大大加深人类对自然界对称性的认识。

精确宇宙学和物理学新挑战

近年各种天文观测对宇宙学参数的精确测量不仅证实了大爆炸宇宙学模型,同时对物理学也提出了挑战。今年初WMAP公布了对宇宙微波背景辐射精确测量3年的结果,它告诉我们,宇宙中普通物质只占4%,20%的物质为非重子暗物质、76%是暗能量。结合SDSS及超新星观测数据的整体拟合分析也给出类似的结果。从物质基本结构的观点出发,普通物质,如树木、桌子以及我们人类本身,都是由分子、原子构成。然而分子、原子不是最基本的,目前已知的的基本粒子是由粒子物理标准模型所描述的夸克和轻子以及传递相互作用的规范玻色子。什么是暗物质呢?暗物质是不发光的,但是它有显著的引力效应。比如,对于一个星系考虑距其中心远处的旋转速度,如果物质存在的区域和光存在的区域是一样的话,由牛顿引力定律可知,距离中心越

远,速度应该越小。可是天文观测事实不是这样的,这就说明当中有看不见的暗物质。目前各种天文观测和结构形成理论强有力地支持宇宙中约1/4的物质是暗物质。中微子是一种暗物质粒子,但WMAP和SDSS等的结果说明,它的质量应当非常小,在暗物质中只能占微小的比例,绝大部分应是所谓的冷暗物质。它们究竟是什么,目前还不清楚。理论物理学家猜测,至少有两种可能性,一种是轴子(Axion),另一种是中性伴随子(Neutralino)。轴子是由罗伯特·派切(Roberto Peccei)和海伦·奎因(Helen Quinn)为解决强相互作用中的电荷共轭-宇称(CP)破坏问题而引进的。中性伴随子是超对称理论中最轻的超对称伴随子,它是稳定的,在宇宙演化过程中像微波背景光子一样被遗留下来。另外,这种暗物质粒子也可由一些超重粒子或宇宙相变过程产生的一些拓扑缺陷(如宇宙弦)衰变而产生。目前世界各国科学家,例如中国和意大利科学家合作组DAMA,正在进行各种加速器和非加速器实验,试图找到这种暗物质粒子。

暗能量是近年宇宙学研究的一个里程碑性的重大成果。一种可能性是宇宙学常数,它是1917年爱因斯坦为建立一个静态的宇宙模型而引进的。当他得知哈勃关于宇宙膨胀的结果后称,宇宙学常数是 他一生中最大的错误。需要指出的是,在当今宇宙学研究中宇宙学常数有更深层的意义,它包含真空能。在量子场论中“真空”是不“空”的。根据协变性要求,真空的能-动量张量正比于度规张量,等效于爱因斯坦引进的宇宙学常数。在实验测量中,二者不可区分。这种能量在日常生活和科学实验中感觉不到,却支配着宇宙的演化,驱动宇宙的加速膨胀。而目前量子场论的理论预言值远远大于观测值。如果认为爱因斯坦广义相对论和粒子物理标准模型在普朗克尺度以下都有效的话,理论计算的真空能将比观测值大 10^{120} 倍。这一理论与实验的冲突,即宇宙学常数问题,是当代物理学面临的一大挑战。

暗能量也是一种随时间变化的动力学的能量。最简单的是一个具有正则动能的标量场,在文献中它被称为“Quintessence”(精质),直译为“第五元素”。在古希腊哲学中,宇宙由水、火、土、空气及第五种元素组成。除此之外,目前国内外科学家还提出多种暗能量的物理诠释,例如Phantom(幽灵)、Quintom(精灵)、Tachyon(快子),基于高维空间理

现代物理知识

论或全息原理等的模型。

目前天文观测显示宇宙学常数作为暗能量与实验数据基本一致,但动力学暗能量模型没有被观测排除,而且数据略微支持精灵暗能量模型。

暗能量的本质决定宇宙的命运。如果加速膨胀是由真空能(即宇宙学常数)引起的,那么宇宙将永远延续这种加速膨胀的状态。宇宙中的物质和能量将变得越来越稀薄,星系之间互相远离的速度将变得非常快,新的结构不可能再形成。如果导致当今宇宙加速膨胀的暗能量是动力学的,那么宇宙的未来将由暗能量场的动力学决定,有可能会永远加速膨胀下去,也有可能重新进入减速膨胀的状态,甚至可能收缩。然而目前已知的理论都不能圆满解释暗能量,而且存在灾难性的宇宙学常数问题。解决这个问题需要新的理论,这样的理论一旦被找到,很可能是人们长期追求的包括引力在内的各种相互作用统一的量子理论。这将是一场重大的物理学革命。

我国探测暗物质和暗能量的可能性

在暗物质和暗能量的理论研究方面,我国科学家近年来取得了一定成果。在实验探测方面,羊八井地面观测站和 LAMOST 天文望远镜具有探测暗物质和研究暗能量的一定潜力。

目前人们主要通过两种方案来探测暗物质粒子:“直接探测”实验,探测的是地球周围暗物质与探测器物质发生碰撞所产生的信号;“间接探测”实验,探测暗物质粒子湮灭的产物,如高能伽马射线、中微子、反质子和正电子等。

羊八井地面观测站位于西藏羊八井海拔 4300 米处,兼有地热资源和交通便利等有利条件,已成功开展了 15 年的宇宙线观测。随着羊八井实验的升级和灵敏度的提高,其宇宙线观测能用来寻找暗物

质粒子湮灭所产生的信号,从而间接探测暗物质。

大天区面积多目标光纤光谱天文望远镜(LAMOST)是一架横卧于南北方向的中星仪式反射施密特望远镜。应用主动光学技术控制反射施密特改正板,使它成为大口径兼大视场光学望远镜的世界之最。LAMOST 具有 4 米口径和 5 度视场。焦面上放置多达 4000 根光纤,将遥远天体的光分别传输到 16 台光谱仪中,同时获得它们的光谱,成为世界上光谱获取率最高的望远镜。大量天体光学光谱的获得为解决天体物理和宇宙学诸多前沿问题提供了关键信息。LAMOST 将对上千万个星系、活动星系核以及恒星进行光谱巡天观测,它将为研究宇宙中的暗物质、暗能量、大尺度结构、星系的形成和演化、银河系的形成、结构和演化等当代天文学和物理学的重大科学问题做出独特贡献,使我国在大视场、大样本天文学研究上居于国际领先地位。

近年来,随着一些新技术的出现和天文学的发展,国际上正在酝酿建设新一代射电望远镜。作为国际平方千米阵列(Square Kilometer Array, SKA)的一种概念设计,我国天文学家对利用贵州的喀斯特地貌建设大型固定式球面天线进行了长期研究,目前已解决了许多工程技术方面的关键性问题,并提出建造 500 米大口径天线(FAST)的计划。一旦建成,将大大提高对弱源的观测灵敏度,可用于研究星系的大尺度分布,这将提供物质分布和暗能量演化信息,寻找黑暗星系,同时也可研究类星体(大质量黑洞)的演化、脉冲星的性质等。

(中国科学院高能物理研究所 100049)

此文转载于 2006 年第 6 期《自然杂志》。

(上接 48 页)发展,操作精度从微米量级缩小到纳米量级。光镊也为分子生物学、细胞生物学等生命科学及介观物理学、微机电系统提供了一种有效的研究手段。可以预见,光镊在生物、物理、化学等多个领域必将得到越来越广泛的应用,并帮助人类揭示生命奥秘,促进人类向光子时代和生物时代进发。

(山东省泰安市泰山学院物理与电子科学系 271021)

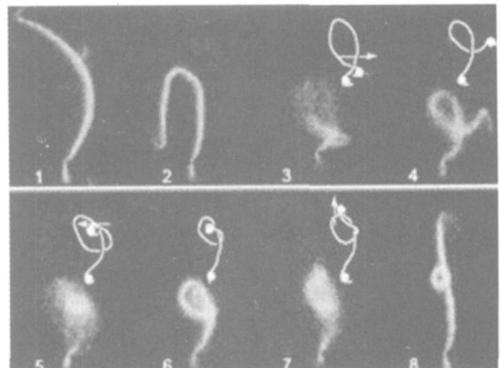


图 3 双光镊对肌动蛋白进行打结示意图

* 当温度接近绝对零度时,杂乱无章的原子会突然束聚于一个最低的单一量子态的状态,这叫做玻色-爱因斯坦凝聚。