

# 粒子物理和宇宙学中的两片乌云\*

——谈暗物质和暗能量

张新民<sup>†</sup>

(中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

**摘要** 宇宙暗物质和暗能量是 21 世纪粒子物理和宇宙学研究中的两个重大的科学问题. 文章首先简述了宇宙学研究的历史和现状以及对粒子物理学提出的新的挑战, 接着较详细地介绍了暗物质、暗能量和反物质相关的科学问题以及在国际上这个研究领域近年来所取得的进展, 最后展望了中国在暗物质和暗能量实验探测研究方面的前景.

**关键词** 暗物质, 暗能量, 粒子宇宙学

## Dark clouds in particle physics and cosmology: the issues of dark matter and dark energy

ZHANG Xin-Min<sup>†</sup>

(Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** Unveiling the nature of dark matter and dark energy is one of the main tasks of particle physics and cosmology in the 21st century. We first present an overview of the history and current status of research in cosmology, at the same time emphasizing the new challenges in particle physics. Then we focus on the scientific issues of dark energy, dark matter and anti-matter, and review the recent progress made in these fields. Finally, we discuss the prospects for future research on the experimental probing of dark matter and dark energy in China.

**Keywords** dark matter, dark energy, particle cosmology

### 1 宇宙学研究简述和粒子物理新挑战

探索宇宙起源及演化的奥秘是物理学和天文学研究的一个最基本的问题. 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. 大爆炸宇宙模型的一个重要预言是宇宙微波背景辐射(CMB). 它产生于大爆炸发生之后大约 38 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很明显的特征, 并高度符合普朗克的黑体谱. 之后, 随着宇宙的持续膨胀, 它的温度逐渐降低至今天的 2.7K. 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的存在, 并因此获得了 1978 年诺贝尔物理学奖. 上世纪 90 年代, 美国科学家约翰·马瑟(John C Mather)和乔治·斯穆特(George F Smoot)研究团队, 利用 COBE 卫星观测在更高精度上发现了宇宙微波背景辐射的黑体谱, 进一步证实了大爆炸宇宙学模型, 更重要的是他们还发现了微波背景辐射上幅度大约只有十万分之一的各向异性. 为此, 约翰·马瑟和乔治·斯穆特获得了

\* 国家自然科学基金(批准号:10975142)、国家重点基础研究发展计划(批准号:1J2007CB81540002)、中国科学院知识创新工程资助项目

2010-11-03 收到

<sup>†</sup> Email: xzmzhang@ihep.ac.cn

2006年的诺贝尔物理学奖. 这个小的温度涨落, 根据目前的流行理论, 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的不均匀性, 最终得以形成诸如星系团等的宇宙结构.

自 COBE 之后, 特别是 1998 年以来, 宇宙学的研究取得了一系列重大的进展, 具有里程碑意义的是, 1998 年超新星观测发现宇宙在加速膨胀<sup>[1]</sup>, 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, 揭示了宇宙是平坦的; 2002 年, DASI 第一次发现了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)<sup>[2]</sup>对宇宙微波背景辐射的精确测量, 斯隆数字巡天(SDSS)<sup>[3]</sup>大尺度结构的观测以及更大样本的超新星观测等, 都坚实有力地支持了大爆炸宇宙学模型, 同时对粒子物理学也提出了一些重大的挑战. 这些精确的天文观测告诉我们, 宇宙中普通物质只占 4%, 而 22% 的物质为非重子暗物质, 74% 是暗能量.

从物质的微观结构的观点出发, 粒子物理的标准模型告诉我们, 自然界的基本组成成分为三代夸克和轻子, 其相互作用由规范玻色子传递. 但从宇宙出发, 我们发现这些已知的基本粒子构成的物质只占 4%, 而 96% 是暗物质和暗能量. 那么, 什么是暗物质组成成分? 暗能量的物理本质是什么? 另外, 就 4% 的普通物质而言, 在暴涨宇宙学中, 物质与反物质在初期以同等数量产生, 但是, 众所周知, 在我们可观测宇宙的范围内, 还没有发现反物质存在的区域, 那么反物质到哪里去了呢?

暗物质和暗能量问题是现代物理科学中两朵新的乌云, 对它们的研究将极有可能孕育出新的物理学和天文学重大发现乃至科学上的革命, 对于未来的科学发展具有难以估量的重要作用. 在新的世纪, 寻找暗物质粒子, 研究暗能量的物理本质, 探讨反物质丢失之谜等, 结合粒子物理和宇宙学, 极小与极大的研究已成为物理学和天文学的一个重要趋势. 目前世界各国都在集中人力、物力和财力组织攻关, 开展这一方向的研究.

## 2 什么是暗物质?

早在 70 年前, 天文学家通过天文观测已经推测

到暗物质的存在. 之后, 尤其是在过去的三十余年间, 大量的天文观测不断积累数据证实了暗物质的存在. 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. 从粒子物理的观点出发, 有质量的中微子是一种暗物质粒子, 但它是热暗物质. WMAP 和 SDSS 等天文观测的结果说明, 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. 那么冷暗物质粒子究竟是什么? 目前还不清楚. 理论物理学家有多种猜测, 其中一种是轴子(axion), 另一种是弱作用重粒子(weakly interacting massive particles, 简称 WIMP), 例如中性伴随子(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子, 它是稳定的或长寿命的, 在宇宙演化过程中像微波背景光子一样被遗留下来, 此过程称为热产生(thermal production); 或者由一些超重粒子或宇宙相变过程中产生的一些拓扑缺陷(如宇宙弦)衰变而产生, 此过程称为非热产生(non-thermal production). 目前世界各国科学家, 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.

暗物质粒子的实验探测方法大致可以分为两类: 一类为直接探测实验, 即采用高灵敏度的探测器直接探测暗物质粒子和探测器物质发生碰撞后所产生的信号; 另一类为间接探测实验, 其主要任务是探测暗物质粒子自湮灭或衰变的产物, 如  $\gamma$  射线、中微子、正电子、反质子等. 另外, 高能对撞机(如大型强子对撞机 LHC)可能会直接对撞产生出暗物质粒子.

在暗物质粒子的直接探测方面, 中国和意大利科学家合作的 DAMA 实验, 12 年的连续积累得到了  $8.2\sigma$  的年调制效应, 但需要其他实验组的证实和物理上的理解. CoGeNT 实验组观测到了一些疑似暗物质的信号, CDMS 实验组也看到了一些迹象, 但都需要进一步的验证. 2010 年 5 月份, XENON100 实验组公布了新的结果, 没有发现暗物质存在的事例. 在暗物质粒子间接探测方面, 近年来也取得了一些引起广泛关注的成果. 2008 年, PAMELA 卫星实验发现宇宙线中的正电子比例明显超出了宇宙线的背景<sup>[4]</sup>, 另外 ATIC 气球实验<sup>[5]</sup>、费米卫星实验、HESS 切连科夫实验等, 也在宇宙线电子能谱的测量中发现了异常现象. 这些迹象显示了可能的暗物质的湮灭或衰变的信号, 引起了国内外科

学界广泛的兴趣,并大大推动了近年暗物质理论的研究发展。

另外,暗物质是“冷”的还是“温”的,这将决定暗物质的粒子性质,对于暗物质的理论模型构造具有重要的意义.在天文研究领域,大家知道,冷暗物质模型在大尺度上取得了很大的成功,但在小尺度上存在着一定的疑难.国内外科学家已提出了温暗物质作为解决这一问题的可能方案.通常的温暗物质粒子(如惰性中微子)很轻,但非热产生的 WIMP 温暗物质是大质量的<sup>[6]</sup>.观测表明,强引力透镜效应为确定小尺度暗物质分布提供了一个重要手段。

在暗物质研究领域,我国科学家在理论研究、数值模拟以及基于国际合作的实验研究方面都已取得了一些显著的成果。

### 3 什么是暗能量?

1998年,两个 Ia 型超新星(SN)小组发现了宇宙在加速膨胀<sup>[1]</sup>,由此揭示了暗能量的存在,这一成果被美国 Science 杂志选为当年的世界十大科技进展之首.之后暗能量一直成为物理学界和天文学界关注的焦点.暗能量的基本特征是具有负压,在宇宙空间中,(几乎)均匀分布且不结团。

暗能量的一种可能是宇宙学常数或真空能.这种能量在日常的生活和科学实验中感觉不到,但却支配着宇宙的演化,驱动宇宙加速膨胀.但是目前量子场论的理论预言值远远大于观测值.如果认为爱因斯坦的广义相对论和粒子物理的标准模型在普朗克尺度以下都是有效的,理论计算的真空能可比观测值大  $10^{120}$  倍.这一理论与实验的冲突,即宇宙学常数问题是对当代物理学的一大挑战。

暗能量的另一种可能是随时间变化的动力学场的能量.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”(译为精质)<sup>[7]</sup>.除此之外,目前国内外科学家已提出了多种暗能量的物理解释.就唯象研究而言,不同的模型可由其状态方程(或对于修改引力等模型而言的有效状态方程)  $w$ (定义为  $p$  和  $\rho$  之比)来分类.例如:对于上面谈到的宇宙学常数,  $w$  不随时间而变,并且  $w = -1$ ;而对于动力学模型而言,  $w$  随时间可变,并且可以是  $w > -1$ (quintessence),  $w < -1$ (phantom,译为幽灵)<sup>[8]</sup>或越过  $-1$ (quintom,译为精灵)<sup>[9]</sup>.由此可知,认识暗能量物理本质的首要任务是天文观测,并通过数据拟合来测量暗能量的状态方程。

值得指出的是,动力学暗能量不同于宇宙学常数,它将带来一系列有趣的物理现象.例如,quintessence 场与电磁场的相互作用  $QF_{\mu\nu}F^{\mu\nu}$ (其中  $F_{\mu\nu}$  是电磁场张量)将会导致精细结构常数的改变;又如,quintessence 场与中微子的耦合将导致中微子质量不是一个常数<sup>[10]</sup>,而在宇宙演化过程中发生变化.更有意义的是,动力学暗能量场可导致宇宙学的 CPT(电荷-宇称-时间反演)对称性破坏,给出 CMB 极化新的特征.这一点是近年国际上 CMB 理论和实验研究的一个新课题,并且中国科学家在这一领域做出了重要的贡献<sup>[11]</sup>。

暗能量的本质决定着宇宙的命运.如果加速膨胀是由真空能引起的,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,特别是在精灵暗能量框架下,宇宙将有可能是振荡的。

目前的天文观测(CMB+LSS+SN等)显示,在  $2\sigma$  范围内宇宙学常数可以很好地拟合数据<sup>[12]</sup>,但动力学模型没有被排除,而且数据略微支持  $w$  越过  $-1$  的精灵暗能量模型.虽然目前的数据已经给暗能量的理论模型的参数空间很大的限制,但是不足以精确地检验这些模型.为此,国内外科学家正积极地策划下一代地面和空间的大规模巡天项目,以提高测量精度,充分检验暗能量理论。

### 4 我国暗物质、暗能量探测的可行性及挑战

探测暗物质粒子、探索暗能量的本质是当代物理学和天文学中最重大的两个科学问题,其解决将导致人类对自然界认识的飞跃.目前世界各国都在集中人力、物力和财力组织攻关,开展这一方向的研究.近年来,在暗物质、暗能量理论研究方面和基于国际合作的实验研究方面,我国科学家已取得了一些显著的成果.但就整体水平而言,特别是在以我为主的实验研究方面,与世界水平还相差甚大.但十分可喜的是,经过多年的研究和探讨,我国科学家通过认真调研国际在这一领域的研究现状和发展趋势,特别是结合我国的具体情况,已初步绘制了我



国开展暗物质、暗能量探测的“地面、地下、空间、极地”的路线图。

暗物质暗能量的研究需要理论和实验,更重要的是开展物理和天文等多学科的交叉研究,同时要开展国际合作(如 DAMA, AMS, LSST, LHC 等国际合作组)。这是一个系统工程,只有多学科多部门的合理协调、统筹安排及科学规划,我们才能不失时机地参与国际竞争,为人类文明科技发展做出应有的贡献。

在暗能量探测方面,国际上有代表性的下一代暗能量观测项目包括 LSST, WFIRST, Euclid, BigBOSS 等。在我国已建成的 LAMOST 望远镜可以探测暗能量,但有一定的局限性。在光学和近红外成像巡天方向,我国的南极昆仑站(DOMEA)具有得天独厚的观测条件,在南极建一个大型光学/近红外望远镜,有望在昆仑站实现一个由中国主导的下一代暗能量巡天的项目。

在暗物质粒子间接探测方面,国际上在未来的几年内,空间的实验有 FERMI 和 AMS02 实验,地面的实验有 IceCube 实验和大型  $\gamma$  射线探测器 HESS, Veritas, Magic 等实验,预期会取得更多的数据。我国西藏的羊八井宇宙线地面观测站,随着实验的升级和灵敏度的提高,特别是未来 LHAASO 项目的开展,在间接探测暗物质粒子方面将具有一定的潜力。在空间暗物质粒子间接探测方面,我国空间站暗物质粒子探测项目以及较近期的,由紫金山天文台等单位提出的小卫星暗物质实验,都将预期对暗物质的研究做出重要的贡献。

在暗物质的直接探测实验方面,世界各国已广泛开展,例如 CDMS, XENON, ZEPLIN, Edelweiss, DAMA, PICASSO, COUPP, KIMS 等实验,而且其灵敏度在不断提高。在这方面,我国四川锦屏山隧道将有望建成为世界上埋深最大的地下实验室,对于开展高精度的暗物质直接探测实验具有重要的意义。

关于暗物质性质的研究与天文学研究紧密相关。比如,对于暗物质的直接探测和间接探测,其信号的预言或解释都依赖于暗物质的密度及空间分布,因此,这些研究必须和天文学研究紧密结合。在这方面,我国的 LAMOST 望远镜,特别是南极 DOMEA 大型望远镜将起重要的作用。

## 5 宇宙中的反物质是怎样丢失的?

70 年前,理论物理学家狄拉克提出了反物质的

概念。在微观物理研究领域,每个粒子都存在着一个反粒子,例如电子的反粒子是正电子,质子的反粒子是反质子。然而至今在浩瀚的宇宙空间还没有找到由反质子、反中子和正电子构成的反物质。那么,反物质到哪里去了?

宇宙学家通常用  $\eta = (n_B - n_{\bar{B}})/n_\gamma$  来定义物质与反物质不对称的度量(其中  $n_B$  和  $n_{\bar{B}}$  分别为重子和反重子的数密度,  $n_\gamma$  为光子的数密度,大约为  $400/\text{cm}^3$ )。直观上,一个没有反物质的宇宙会告诉我们  $\eta$  不为零。目前宇宙早期核合成理论和近年的微波背景辐射的研究给出  $\eta$  大约为  $10^{-10}$ 。

从理论上讲,这种正反物质不对称性可能是原始宇宙就有的。然而,近代宇宙学研究表明,宇宙在早期经历了一个暴涨阶段。暴涨解决了经典宇宙学中的平坦性、均匀性等问题,但同时剧烈的膨胀使得原始的重子数密度趋近于零。在暴涨宇宙学中,物质在暴涨后的再加热过程(reheating)中产生,所以物质与反物质的不对称也必须是宇宙演化的结果。

1967 年,前苏联科学家萨哈洛夫(Sakharov)指出了产生正反物质不对称(Baryogenesis)所需要的三个条件<sup>[13]</sup>:条件一是重子数需不守恒。这一点很显然,如果重子数守恒,正反物质对称的宇宙将永远是对称的;条件二是 C 和 CP 对称性的破坏。C 不对称是粒子反粒子不对称,CP 不对称是粒子反粒子、左和右联合的不对称。只要 C 或 CP 中的任意一个对称性存在,重子数破坏的反应过程就会产生相同数量的重子和反重子;第三个条件是脱离热平衡。因为在热平衡时,重子与反重子满足玻尔兹曼分布,由 CPT 定理(T 是时间反演)可知,正反粒子质量相等,所以重子与反重子的密度相等。但是,如果宇宙早期发生了 CPT 破坏的话,情况就会大不一样。

自上世纪 80 年代末以来,人们认识到粒子物理的标准模型可以满足萨哈洛夫的三个条件。在标准模型中,经典拉氏量具有重子数和轻子数对称性,但在量子层次,反常效应和非阿贝尔规范场真空的特殊性破坏了重子数和轻子数。然而这种效应在零温时是微不足道的,所以质子是稳定的。但当温度高于弱电标度,即在温度大约为  $100\text{GeV}$  左右时,重子数破坏作用将处于热平衡中。决定这一反应率的一个重要因素是 sphaleron,它是标准模型的一个经典解,它导致的重子数破坏实现了萨哈洛夫的第一个条件。在标准模型中,C 和 CP 对称性是破坏的。萨哈洛夫的第三个条件由弱电一级相变来实现。但定量计算表明,标准模型给出的正反物质不对称  $\eta$  远

远小于  $10^{-10}$ . 其主要原因有两个:一是卡比玻—小林—益川(CKM)机制给出的 CP 破坏量不够;另外一个是基于目前 Higgs 质量的实验下限,标准模型不能给出足够强的一级相变. 这一问题说明,虽然粒子物理的标准模型完美地解释了实验室中的物理现象,但它不能解答宇宙中正反物质不对称疑难.

正反物质不对称疑难的研究促进了对超出标准模型新物理的探讨. 目前在弱电标度正反物质不对称产生机制的研究领域,人们分别考虑了多个希格斯(Higgs)模型、左—右对称弱电统一模型及有效理论方法等,但关注的焦点是超对称标准模型,在这个模型中,有新的 CP 破坏源,有丰富的希格斯粒子. 是否超对称模型破解了反物质丢失之谜有待于实验上的验证. 这需要发现超对称粒子和新的 CP 破坏现象.

近年来,由于中微子振荡物理的推动,轻子数不对称的产生机制(leptogenesis)倍受关注. 在标准模型中,重子数与轻子数分别由 Sphaleron 过程破坏,但二者之差却是守恒的. 这就将重子数的改变与轻子数的改变连在了一起.

同样,轻子数不对称的产生机制需要轻子数破坏过程、轻子部分的 C 和 CP 破坏以及非平衡态的实现. 这些条件在一般的、描述有质量中微子的模型中都可以实现. 比如对于简单的跷跷板(See-Saw)模型,中微子是马约拉纳(Majorana)型,破坏了轻子数对称性,重的右手中微子退耦提供了非平衡条件. 在这一理论中,中微子部分的 CP 破坏是一个重要的预言,它可以由长基线中微子振荡实验来检验. 一旦找到,将是一个重大的发现.

前面谈到了狄拉克理论中的一个重要概念——反物质. 在狄拉克的理论中,另一个重要概念是真空不“空”. 与这两个概念相联系的反粒子的存在和真空极化、真空涨落等效应,在粒子物理实验中都得到了证实,然而在宇宙中却没有找到反物质,人们也无法理解如此之大的真空能. 描述微观世界的成功与在宇观世界中的疑惑,使得人们猜测正反物质不对称疑难和暗能量之谜可能存在着一些内在的联系. 近年来,我们在这方面作了一个尝试,出发点是暗能量由动力学场如 quintessence 场来描述,在这

个模型里,quintessence 场与标准模型中的基本粒子有相互作用  $\partial_\mu Q J^\mu$ <sup>[14]</sup>. 在宇宙演化过程中,quintessence 场充满着宇宙空间,沿着特定的轨迹运动,驱动今天宇宙的加速膨胀. 同时,当 quintessence 场滚动时,它的时间导数  $\dot{Q}$  不为零,导致 CPT 的破坏,以此产生正反物质的不对称,此模型统一地解释了正反物质不对称疑难和宇宙的加速膨胀. 更重要的是,这个 CPT 破坏可由 CMB 极化进行检验<sup>[15]</sup>. 此外,我们的研究也表明,quintessence 场的超对称伴子 quintessino 可以作为一个冷暗物质粒子的候选者<sup>[16]</sup>. 这样我们的模型有可能统一地描述宇宙中的重子物质、暗物质和暗能量.

### 参考文献

- [1] Riess A G *et al.* Astron. J., 1998, 116: 1009; Perlmutter S *et al.* Astrophys. J., 1999, 517 : 565
- [2] Spergel D N *et al.* Astrophys. J. Suppl., 2007, 170: 377
- [3] Tegmark M *et al.* Astrophys. J., 2004, 606: 702; Phys. Rev. D, 2004, 69: 103501
- [4] Adriani O *et al.* Nature, 2009, 458: 607
- [5] Chang J *et al.* Nature, 2008, 456: 362
- [6] Lin W *et al.* Phys. Rev. Lett., 2001, 86: 954; e-Print: astro-ph/0009003
- [7] Zlatev I, Wang A M, Steinhardt P. Phys. Rev. Lett., 1999, 82: 896; Wetterich C. Nucl. Phys. B, 1988, 302: 668; Ratra B, Peebles P J E. Phys. Rev. D, 1988, 37: 3406
- [8] Caldwell R R. Phys. Lett. B, 2002, 545: 23
- [9] Feng B, Wang X L, Zhang X M. Phys. Lett. B, 2005, 607: 35
- [10] Gu P H, Wang X L, Zhang X M. Phys. Rev. D, 2003, 68: 087301; e-Print: hep-ph/0307148; Fardon R, Nelson A, Weiner N. JCAP, 2004, 0410: 005; e-Print: astro-ph/0309800
- [11] Feng B, Li H, Li M *et al.* Phys. Lett. B, 2005, 620: 27; Feng B *et al.* Phys. Rev. Lett., 2006, 96: 221302
- [12] Komatsu E *et al.* (WMAP collaboration), arXiv:1001.4538; Xia J Q *et al.* Phys. Rev. D, 2008, 78: 083524
- [13] Sakharov A D. Pis'ma Zh. Eksp. Teor. Fiz., 1967, 5: 32
- [14] Li M, Wang X, Feng B *et al.* Phys. Rev. D, 2002, 65, 103511
- [15] Xia J Q *et al.* Phys. Lett. B, 2010, 687, 129; Komatsu E *et al.* arXiv:1001.4538
- [16] Bi X J *et al.* Phys. Rev. D, 2004, 69: 123521