



前言 · 21 世纪第二个十年的宇宙学

宇宙学研究在最近的十余年里获得了迅速的发展, 人们对宇宙有了全新的认识, 近期“精确宇宙学”被《科学》杂志评选为 21 世纪第一个十年中重大的科学成就之一(“Insights of the Decade”). 以此为契机, 2011 年 3 月 18 日至 3 月 19 日, 中国科学院国家天文台、中国科学院高能物理研究所、北京大学、清华大学、中国高等科学技术中心等单位联合举办了“21 世纪第二个十年的宇宙学”的学术研讨会. 这次会议着重探讨了粒子物理和天文交叉学科领域的三个主题: 粒子物理和宇宙学、暗物质、暗能量. 参加这次会议的代表分别来自我国各个高等院校和研究单位, 不仅包括了我国宇宙学领域的著名学者, 还有很多年轻学者和学生前来参加. 这次会议回顾了宇宙学近十年来的研究状况、主要成就与进展, 并探讨了我国今后十年宇宙学研究的重点方向.

“在过去十年中, 研究人员非常精确地推测出宇宙物质的成分是普通物质、暗物质和暗能量. 同时, 他们阐述了将这些成分组成宇宙的方法. 这些进展将宇宙学转变成为一种有着标准理论的精确科学, 而留给其他理论的活动空间已十分狭小.” 这是《科学》杂志对精确宇宙学所做的评述, 这段文字原是英文的, 翻译虽不是很专业但还是比较完整地表达了其涵义, 我将就宇宙学的观测和标准理论两个方面做进一步的阐述.

在过去的十余年间, 在观测宇宙学方面的研究取得了很大的进展: 具有里程碑意义的工作是 1998 年 Riess 和 Perlmutter 利用超新星观测发现宇宙在加速膨胀(此工作获得 2011 年诺贝尔物理学奖), 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 WMAP 对宇宙微波背景辐射的精确测量、SDSS 对大尺度结构的观测以及更大样本的超新星等观测, 对于推动宇宙学的研究具有划时代的意义, 有力地支持了大爆炸宇宙学模型. 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% 为暗能量, 暗物质和暗能量问题对粒子物理学提出了重大的挑战. 值得强调的是在精确宇宙学方面, WMAP 的贡献是巨大的, 为此 2010 年 WMAP 获得了邵逸夫奖.

我非常赞同《科学》杂志对宇宙学理论研究工作所给予的评价: “这些进展将宇宙学转变成为一种有着标准理论的精确科学, 而留给其他理论的活动空间已十分狭小”. 在粒子物理研究领域, 经过 19 世纪几十年的发展, 理论体系是完整的, 这就是粒子物理的标准模型. 在宇宙学领域, 最基本的出发点是爱因斯坦引力和宇宙学原理以及引力扰动结构形成理论. 关于这方面的理论工作由于严格求解的困难性, 国际上已编成了各种不同形式的程序, 例如 CAMB/CosmoMC 程序可以用于直接与观测进行比较, 确定宇宙学参数. 精确宇宙学体现在对于来自于 CMB, LSS, SN 等各种天文观测的数据, 在这样一个理论框架下, 10 个左右的参数(最基本的只有 6 个)就可以很好的拟合. 相比之下, 粒子物理的标准模型中有 18 个自由参数, 例如粒子的质量、规范耦合常数、混合角, 如果考虑有质量的中微子, 参数的数目会更多. 就此意义上讲, 宇宙学的标准模型所获得的成功可与粒子物理的标准模型相媲美. 另外, WMAP 的贡献在一定意义上很类似于 19 世纪 90 年代 LEP 对于粒子物理标准模型精确化的推动和检验. 两个理论家 Veltman 和 t'Hooft 因此获得了诺贝尔奖, 他们的主要贡献是关于标准模型理论的可重整性. 大家知道, 有质量的弱规范玻色子理论在计算时, 结果是无穷

的、发散的。通过引进 Higgs 场, Veltman 和 t'Hooft 证明理论是可重整的, 没有发散的。这样使得粒子物理的标准模型能够开展精确的检验。当然至今 Higgs 粒子并没有在实验上发现, 寻找 Higgs 是目前 LHC 的重要科学目标。宇宙学中的线性扰动理论在没有涉及动力学暗能量的传统的研究中不存在类似的发散问题。不过当研究动力学暗能量时, 当其状态方程越过宇宙学常数线时, 扰动量是发散的, 计算结果也是无穷的。为了解决这个问题, 同样需要引进新的自由度和 Quintom 场。

精确宇宙学对粒子物理学提出了一些重大的挑战。从物质的微观结构的观点出发, 普通的物质都是由分子、原子构成的。然而分子、原子不是最基本的, 目前已知的基本粒子是由粒子物理的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。然而从宇观出发, 我们发现这些已知的基本粒子构成的物质只占 4%, 而 96% 是物理性质不清楚的暗物质和暗能量。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。寻找暗物质粒子, 研究暗能量的本质等, 结合粒子物理和宇宙学, 极小与极大的研究已成为 21 世纪物理学和天文学的一个重要趋势。近年, 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, 特别是在以我国为主的实验研究方面, 与世界先进水平还相差甚大。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路线图。

关于 21 世纪第二个十年的宇宙学研究的重点主要体现在三个方面: 暗物质、暗能量和 CMB 极化。

(1) 暗物质: 大家普遍预期今后十年内会有大的进展。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的或温的暗物质。那么这些暗物质粒子究竟是什么呢? 目前还不清楚。理论物理学家有多种猜测, 例如, 惰性中微子(Sterile Neutrino)温暗物质、引力微子(Gravitino)温暗物质、轴子(Axion)冷暗物质等。在文献中一种比较流行的是弱作用重粒子(Weakly Interacting Massive Particles, 简称 WIMPs), 例如, 超对称理论中最轻的超对称伴子——中性伴随子(Neutralino)。取决于产生机制, WIMPs 可以为冷的也可以为温的暗物质。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 WIMPs 暗物质粒子。在国内, 近几年对暗物质暗能量问题大家表现了很高的热情, 就暗物质而言, 计划中的实验项目包括羊八井暗物质粒子间接探测实验、空间小卫星、空间站暗物质粒子间接探测实验以及在四川锦屏山隧道建设的世界上埋深最大的地下实验室的暗物质直接探测实验。另外, WIMPs 粒子可以在欧洲核子实验中心(CERN)的大型强子对撞机(LHC)上直接产生被检验, 值得指出的是中国科学院高能物理研究所的正负电子对撞机实验可以通过测量稀有衰变来探测轻的 WIMPs 及其相关的粒子。另外, 关于暗物质性质的研究与天文研究紧密相关, 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研究紧密结合。在这方面, 我国的 LAMOST 望远镜, 特别是南极 DOME A 大型望远镜, 空间站大光学望远镜将起重要的作用。

(2) 暗能量: 一般认为暗能量的解决需要更长的时间。这种说法有它的合理性, 但也是片面的。就整个问题而言, 的确需要很长的时间。实际上, 1998 年以前宇宙学常数问题就已是一个令人十分关注的难题, 至今也没有得到很好的答案。但是就唯象研究而言, 十年内在确定暗能量状态方程、区分动力学暗能量与宇宙学常数的问题上将会有大的进展。其原因是目前国内外已有一些重要的暗能量实验。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(DOME A)具有得天独厚的观测条件, 在南极昆仑站建一个大型光学/近红外望远镜有望实现一个由中国主导的下一代暗能量巡天的项目. 目前正在考虑的空间站大光学平台和天籁计划等对暗能量的研究都是十分重要的. 值得指出, 暗物质和暗能量的研究需要理论和实验的结合, 更重要的是物理学和天文学等多学科的交叉研究. 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, 我们才能不失时机的参与国际竞争, 为人类文明科技发展做出应有的贡献.

(3) CMB 极化: CMB 研究对于宇宙学的发展和推动至关重要, 已两次获得了诺贝尔奖. 过去十年精确宇宙学的发展中 WMAP 贡献很大, 期待 Planck 将对暴涨宇宙模型检验、暗能量性质研究及在 B-mode 探测引力波方面出现好的成果. 值得指出, 近年我国科学家提出的利用 CMB 极化检验 CPT 的工作备受欢迎, 模拟显示 Planck 将可能发现 CPT 的破坏或在更高的精度上检验自然界的一个重要的对称性.

总之, 在过去的十年中, 宇宙学发展是很明显的. 我国科学家抓住了这个机遇, 在计算宇宙学(数据分析处理、数值计算整体拟合、N 体模拟等)及理论模型研究方面都取得了重要的成果; 在以国际合作为主的实验研究及天文观测方面也做出了应有的贡献, 中国科学家对近年来“精确宇宙学”的贡献是不可忽视的. 另一方面, 暗物质和暗能量是 21 世纪重大的科学问题, 我国科学工作者已绘制了开展该方向的探测研究“上天入地到南极”的路线图. 更重要的是经过十多年的努力, 我国已形成了一个物理天文理论与实验观测紧密结合的研究气氛, 我相信十年后的中国宇宙学将会有更大的发展.

张新民

中国科学院高能物理研究所

2011 年 11 月