

现代宇宙学：机遇与挑战

◆ 蔡荣根

宇宙学正处在一个充满机遇和挑战的黄金时期。有关宇宙的物质成分、几何结构与宇宙命运的关系、爱因斯坦的“最大错误”(greatest blunder)等新观念正在取代旧的思想。越来越多、越来越精确的天文观测数据结合高能粒子物理、量子场论、引力理论等基本物理理论的发展,将使人们能破解许多宇宙之谜,了解宇宙的诞生和演化历史,并弄清其最终命运。

宇宙演化与暴胀模型

宇宙学成为一门学科始于爱因斯坦在 1917 年用他刚建立的广义相对论来考察宇宙结构。为了构造静态宇宙学解,爱因斯坦在其引力场方程(通常称为爱因斯坦场方程)中加入了一个常数项,这一常数就是著名的爱因斯坦宇宙学常数。但随后,哈勃关于宇宙正在膨胀的发现使得爱因斯坦承认,引进宇宙学常数是他一生中“最大的错误”。但最近的天文观测证实,宇宙正在加速膨胀,这表明,宇宙能量密度中包含有相当于宇宙学常数的一个成分。这重新引起了人们研究宇宙学常数的兴趣。

直到 1980 年代,根植于人们头脑中的宇宙演化模型是热大爆炸(Hot Big Bang)模型,特别是微波背景辐射的发现及宇宙中轻元素丰度的测定极大地支持了热大爆炸模型。可这一模型存在一些明显的缺陷,如:宇宙演化起源于一个奇点,在那里,所有物理学定律都失效;此模型无法解释宇宙大尺度的均匀性和小尺度的非均匀性;无法解释宇宙空间平坦性;无法解释所谓的视界问题,即现在观测到的均匀宇宙是由早期许多非因果关联区域演化而来,这违背基本物理学定律;无法解释超重质量粒子稀少等问题。

蔡荣根:研究员,中国科学院理论物理研究所,北京 100080。

Cai Ronggen: Professor, Institute of Theoretical Physics, CAS, Beijing 100080.

1980 年古思(A. Guth)提出,宇宙在极早期曾经历过一个极短的(约 10^{-32} 秒)加速膨胀时期。这一所谓的暴胀模型一举解决了大爆炸模型中许多无法克服的困难。这一模型还特别提供了关于宇宙大尺度结构形成的物理机制。自 1991 年美国 COBE (Cosmic Background Explorer) 卫星首次观测到源于宇宙早期密度扰动的各向异性后,越来越多、越来越精确的天文观测支持了暴胀模型。可是正像著名宇宙学家特纳 (M. Turner)所言:“给暴胀模型戴上皇冠还为时尚早。”

机 遇

自热大爆炸宇宙模型之后,宇宙学的重大发展之一就是暴胀模型的提出。可是暴胀模型与其说是一个模型,毋宁说是一种解决问题的方法。暴胀模型通常在爱因斯坦引力框架中假定一个标量场的势驱动宇宙的加速膨胀。然而基本粒子的标准模型中并没有这样一个标量场,超对称和超引力中也没有这样一个合适的标量场。另一方面,自古思提出老暴胀模型 20 多年以来,人们构造了许许多多暴胀模型,可这些模型都存在这样或那样的问题。因此可以公平地说,到目前为止还没有一个完全成功的暴胀模型。

宇宙学常数问题是一个极其困难的问题。量子场论中有一个真空能,其大小通常依赖于理论的标度。在引力理论中,这一真空能体现为宇宙学常数。可是,标准模型中量纲分析得出的宇宙学常数与实际值相去甚远。老的宇宙学常数问题是:为什么宇宙学常数是零?而自 1998 年以来,大量天文观测证实宇宙正在加速膨胀,这表明宇宙学常数并不是零,而是与宇宙临界密度有相同的量级大小。这样,宇宙学常数问题有了新的形式:宇宙学常数为什么不是零,而恰好与现在的宇宙物质密度有相同的量级大小?

大爆炸模型认为,宇宙由一个高温高密状态演化



而来。高能粒子物理、有限温度场论、量子引力等基本物理理论在描述这一系列演化过程中起着极其关键的作用。因此，这些基本理论的发展将推动宇宙学的研究，宇宙学的研究也将反过来进一步促进这些理论的深入发展。近十年来，在理论物理领域已经形成了粒子宇宙学、弦宇宙学等许多交叉学科。粒子宇宙学是将微观世界与宇观世界、高能粒子物理学与天体物理学、天文学相结合，研究早期宇宙高温高密这一极端条件下的物理规律，进而研究其对于形成现今宇宙大尺度结构的物理过程的影响。弦宇宙学则是将量子引力最有希望的候选者——超弦理论应用于极早期宇宙研究的一个交叉学科。

1990年代以来，基础物理理论和天文观测方面都取得了长足的进步。在基础理论方面，人们对引力和时空的本质有了更深刻的理解。始于诺贝尔物理学奖获得者霍夫特(G. 't Hooft)和著名理论物理学家萨斯坎德(L. Susskind)分别在1993年和1994年的工作，人们发现引力不同于其他相互作用的最重要本质是它具有全息性，即一个包含引力的高维理论与一个不包含引力的较低维度的理论等价。一个实现全息性原理的具体例子就是1997年马尔达塞纳(J. Maldacena)大胆提出的反德西特/共形场理论(Anti-de Sitter/ Conformal Field Theory, AdS/CFT)对应性猜测。这一猜测说，AdS空间上的弦理论或M理论与在此AdS空间边界上的共形场论等价。尽管人们还不能严格证明这一猜测，但大量证据显示，此猜测是正确的。对于与暴胀模型紧密相关的德西特空间，人们猜测也有类似的对应性存在。此对应性的进一步发展无疑将对深刻理解暴胀动力学起到极大的推动作用。

最近几年，引力理论的另一重大进展是阿卡尼-海姆德(N. Arkani-Hamed)等人及兰德尔(L. Randall)和森德拉姆(R. Sundrum)分别于1998年和1999年提出的膜(brane)世界绘景。在这一图像里，物理时空是高维的，宇宙是一个嵌入在这个高维时空中的三维膜。标准模型中的物质被禁闭在这一膜上，而引力可以在整个时空中传播。这一膜世界绘景对高能粒子物理、引力理论、宇宙学等具有深刻的影响，也是近几年引力和宇宙学界极其活跃的研究领域。

作为量子引力理论最有希望的候选者——超弦理论在近十年也获得了很大进展。1995年，威滕(E. Witten)等人发现，五种看起来不同的弦理论事实上是等价的，它们之间存在对偶关系。弦理论中除一维弦外还存在着许多高维的、稳定的和不稳定的延展物体。弦理论研究也表明，在小尺度上时空是非对易的。非微

扰弦研究发现，最基本的理论可能是十一维，而不是十维超弦理论。弦理论非微扰性质在解释黑洞熵统计起源方面的成功使人们相信，超弦理论是一个自治的量子引力理论。量子引力理论的另一形式——圈量子引力近几年在黑洞熵的统计起源解释和量子宇宙学方面取得了一定成功。量子引力的这些发展对促进极早期宇宙学研究必将起到至关重要的推动作用。

微波背景辐射隐藏着许多宇宙秘密，记录了早期宇宙演化的指纹。1990年代以来，基于地面、天空(气球)和卫星的微波背景辐射观测、超新星及其他天文观测，人们已积累了许多很精确的宇宙学数据，进入了精确宇宙学年代。1998年对许多遥远超新星的观测发现，宇宙正在加速膨胀，而非人们通常认为的减速膨胀。这是十分惊奇的结果，它显示宇宙有一个相当于宇宙学常数的暗能量成分存在。

2002年，美国DASI(Degree Angular Scale Interferometer)探测仪第一次观测到微波背景辐射的极化。比COBE角分辨率高近70倍的WMAP(Wilkinson Microwave Anisotropy Probe)数据结合其他天文观测显示，宇宙能量密度由4.4%的强子物质(发光物质)、22.6%的暗物质(不发光物质)和73%的暗能量组成。这些年的天文观测强力支持了“暴胀+暗物质+暗能量”宇宙学模型。比WMAP分辨率和精度更高的普朗克(Planck)卫星将于2007年上天。普朗克卫星将能区分不同暴胀模型，并可能观测到宇宙极早期密度涨落产生的原初引力波，从而区分暴胀模型和像循环宇宙的非暴胀模型。美国能源部SNAP(SuperNova/Acceleration Probe)计划和许多探测暗物质、反物质和外维度空间的实验也在进行中。总之，这些基本理论的重大发展结合越来越多、越来越精确的天文观测和实验数据，使人们有足够的理由相信，构造一个精确的宇宙模型，揭开宇宙之谜已为时不远，或许已到了黎明前的最后时刻。

暴胀模型对基础物理的挑战

天文观测给人们带来激动人心的结果的同时，更多的是给基础物理学提出了严峻挑战。暴胀+暗物质+暗能量的宇宙学模型中的三个组成成分就是三个摆在人们面前的严峻的物理问题。

宇宙微波背景辐射的观测强有力地支持了暴胀模型，可是在粒子物理的标准模型里，还未找到能充当暴胀场的标量场，这使理论物理学家不得不打开更广的思路，产生更“疯狂的”(crazy)新思想(著名宇宙学家特纳语)。近十年来，膜世界绘景、外维度、超弦理论中的



稳定和非稳定延展物体(膜)等新思维为构造一个成功的暴胀模型提供了理论基础,这也是近些年构造暴胀模型的主要领域。

与暴胀模型紧密相关的是原初密度谱的计算。现在观测到的微波背景辐射的涨落来源于宇宙暴胀时期的量子涨落,而宇宙暴胀时期是一个极高能物理过程($10^{19}\sim 10^{14}$ 吉电子伏)。在此高能标下,新物理可能会进入高能物理过程。因此,在计算原初密度谱时,应考虑时空非对易性、反常色散关系、违反洛伦兹不变性、超普朗克物理等效效应。此外,暴胀期间时空是准德西特相。德西特空间是最大对称空间,没有空间无穷远,非常不同于 AdS 空间和平坦的闵科夫斯基空间。因此到目前为止,还没有好的方法定义德西特时空中的守恒量。在德西特时空中的量子场论方面,不同真空的选择会严重影响原初密度谱的计算。如何选择与自然相应的真空仍然是待解难题。在这方面,首先研究德西特时空的全息性质可能是有希望的方向。总之,从基本理论出发构造成功的暴胀模型并理解与此相关的物理是摆在人们面前的最大挑战之一。

暗能量形式决定宇宙的命运

宇宙能量密度中的 73% 是暗能量。暗能量的最简单解释是宇宙学常数。如果暗能量是宇宙学常数,一个自然的问题就是:为什么宇宙学常数是如此之小(约为 10^{-29} 克/厘米³,与现在的宇宙物质密度的量级相同)?因为普朗克标度的真空能量密度比现在的宇宙学常数大 10^{120} 倍,比超对称标度大 10^{58} 倍;另一个自然的问题是:为什么宇宙学常数恰好与现在的宇宙物质密度具有相同量级?

许多理论物理学家相信,量子场的真空能一定已被某种目前还不清楚的机制精确地调节为零,或者由于某种原因(譬如自调机制),人们无法观测到这一真空能,现在观测到的微小的宇宙学常数由某种量子现象(如量子真空简并)而来。确实,假如这个暗能量是一宇宙学常数,解决这个问题就需要新的思维,“疯狂的”思想,因为目前,微扰超弦理论还无法容下这一宇宙学常数。或许超弦理论的进一步发展,特别是在非微扰方面,将改变这一状况。

暗能量也可能由被称为“精质”(Quintessence)的缓变标量场提供。要区分暗能量是宇宙学常数还是缓变标量场,关键是要确定暗能量状态方程,而这依赖于对现有的以及将来更多更精确的天文观测数据的仔细分析,特别是对来自高红移超新星的数据分析。在理论方面,如果暗能量由“精质”提供,那么,“精质”是什

么?“精质”与标准模型粒子如何发生作用?如何探测“精质”?“精质”与最近观测到的精细结构常数的变化是否存在联系?这些问题必须由描写宇宙的基本理论来回答。可是像暴胀场一样,人们还未能找到相应于“精质”的标量场。当然,暗能量也可能由其他因素引起,如对广义相对论的修改、规范超引力中的某个标量场等。总之,暗能量的本质是摆在理论物理学家面前的严峻挑战之一,因为不同暗能量形式将导致宇宙不同的命运(宇宙的命运不再由几何决定!)。

暗物质之谜

由于宇宙中近 84% 的物质不发光,人们无法直接观测它,因此,暗物质的构成、性质及如何探测它们是与高能粒子物理紧密相关的课题。冷暗物质的可能候选者是大质量、弱相互作用的粒子,如超对称中性伴随子;另一可能为解决强正反共轭和空间反射(CP)问题而引入的轴子。热暗物质的最佳候选者是中微子,但它们对宇宙能量密度的贡献非常小,约为 0.003~0.10。目前世界上有许多实验正在搜寻暗物质,包括中意合作的 DAMA(Dark Matter)实验组。

物质与反物质在宇宙演化过程中以同等数量产生,但今天宇宙中的物质与反物质是不对称的,因此,这一直是粒子物理学家探讨的焦点。CP 破坏与物质和反物质的不对称性紧密相关,因此,寻找新的 CP 破坏机制已成为当今粒子物理学的重要研究方向。近年理论研究表明,物质与反物质不对称的产生可能与中微子质量有关,这就是轻子数产生(Leptogenesis)机制。中微子像光子一样充满宇宙。像微波背景辐射一样,中微子必定也记录了宇宙演化的许多信息。

最近,大气中微子和太阳中微子实验结果表明,不同种类的中微子之间有振荡,中微子的质量很小但都不等于零。人们正在深入研究中微子质量起源、轻子味混合和 CP 破坏的动力学机制,并期望将有关的理论和唯象模型应用于宇宙学和天体物理中。因此,深入研究超对称标准模型、中微子物理、轴子物理、物质与反物质的反称性、CP 破坏机制等可能是揭开暗物质之谜的有效途径。

天文观测对现代物理学提出的挑战可能是 21 世纪物理学天空上的几片乌云。物理学新的革命也可能由此爆发,新物理(新思想,新理论)由此产生。

致谢:作者感谢中科院理论物理所许多同仁的阅读和宝贵意见。

关键词:宇宙学 暴胀 暗能量 暗物质 基础物理

