

超弦宇宙学

孙佳睿 黄 鹏 李 淼

(中山大学天文与空间科学研究院 510275)

宇宙是检验物理学基本原理的天然实验室。例如，在历史上，很多元素是在恒星中发现的，后来才在地球上发现。广义相对论是一个典型的例子，它的三大验证都是通过天文学观测检验的，后来，引力透镜更是需要遥远的星系和星系团来检验。宇宙学本身就建立在广义相对论的基础上，没有时空弯曲概念，现代宇宙学是不可能的。宇宙学还检验了轻元素的合理论，对中微子的种类和质量给出限制。如何利用宇宙学检验超出广义相对论的理论以及超出粒子物理标准模型的理论，就成为过去几十年宇宙学家以及粒子物理学家共同的研究课题。

从爱因斯坦开始，物理学家就试图统一自然界的基本相互作用，即追求所谓的终极理论，现代粒子物理标准模型已经能够把自然界四种基本相互作用中的电磁相互作用、弱相互作用和强相互作用较好地统一起来，但要引力和其他三种相互作用力统一起来，则似乎不可避免地需要将引力量子化，这仍然是当今理论物理中的一个超级难题。弦理论由于弦的振动谱中自然的包含了自旋为 2 的引力子，因而它是一个包含量子引力的理论，同时由于弦理论在理论体系上是量子场论的进一步发展，它也被当今物理学界看作是大统一理论的最有力候选者之一。

超弦理论自诞生之日起经过近五十年的发展已取得重要进展，期间经历了两次重要的革命，第一次革命发生在 20 世纪 80 年代至 90 年代初，代表性工作有杂化弦理论的发现，弦理论的卡拉比-丘紧致化方案的发现，镜像对称性的提出，D 膜的发现以及将全息原理引入弦理论中，等等。第二次革命自 1995 年开始，以 I 型，IIA 型，IIB 型，E8×E8 杂化和 SO(32) 杂化弦五种 10 维的超弦理论被 11 维的 M 理论统一，矩阵理论的提出，弦理论中黑洞微观熵的计算，Anti-de Sitter/Conformal Field Theory(AdS/CFT)

对偶的发现等为代表。

除了弦理论自身理论框架的发展，和它相关的唯象学研究也同等重要。因为要成为自洽的大统一理论，弦理论必须要能够描述我们已知的物理世界，例如，如何从弦理论衍生出 4 维时空的粒子物理标准模型，由于超弦理论是 10 维时空 (M 理论 11 维时空)，这就需要利用紧致化的方法来构造出 4 维时空的低能有效理论，尽管弦理论家们已经能够推导出一些类似于标准模型的理论，但离真正的目标还有很长的距离。此外更重要的，它要能够描述已有的物理理论所不能描述的区域，如超出粒子物理标准模型的新物理，并能够将来为实验所验证或证伪。对于后者，当今世界能量最高的粒子物理加速器欧洲大型强子对撞机 (LHC) 所能达到的能标为 14TeV (到 2015 年已达到 13TeV)，还远远小于粒子物理大统一能标 10^{16}GeV ，而且到目前为止，物理学家们所期待的额外时空维度以及超对称也未能够在 LHC 上被发现 (超对称的发现可以对超弦理论给出间接的支持)。此外由于弦能标的不确定性 (其可能介于大统一能标至普朗克能标之间，若弦理论中存在较大的额外时空时，约化的弦能标可以远低于大统一能标)，尽管 LHC 会进一步升级，但似乎在将来较长一段时间内，利用地球上的实验装置来直接验证超出标准模型的预言以及弦理论的效应仍然相当困难。这样，人们自然将目光伸向广袤的太空，那里有着天然的实验室，特别是在早期宇宙时期当能标接近弦能标时，纷繁复杂的物理现象有希望对弦理论模型进行检验 (事实上人类对宇宙的好奇和探索从人类仰望星空的那一刻就已经开始，而且对宇宙射线特别是超高能宇宙射线的研究可以作为地面实验的重要补充)。如何准确分辨出弦理论所预言的信号并不是一件容易的事情，因为这些信号也很可能是某些低能的有效场论效应所产生的。不过，弦理

纪念广义相对论创立 100 周年

论中的某些现象并不会完全与低能标的物理退耦，其中一个重要的例子就是宇宙弦。宇宙弦既可以是超弦自身，亦可以由类希格斯机制所形成的基本弦或涡旋，它可以看成是时空中的拓扑缺陷，因而可以在宇宙暴涨之后被保留下来，有机会被当今的实验所探测。

的确，近年来各类宇宙学观测发展迅猛，以宇宙背景探测器（COBE），斯隆数字巡天（SDSS）卫星，威尔金森微波各向异性探针（WMAP）卫星，Ia型超新星计划，普朗克卫星等为代表的宇宙学观测实验将我们带入了令人激动的精确宇宙学时代。其中一些重要的观测结果如宇宙学暴涨，宇宙加速膨胀，暗能量和暗物质的存在等与标准宇宙学模型的理论预测很好地相符，但同时也对现有的宇宙学模型提出了新的挑战。由于标准宇宙学模型是基于广义相对论和量子场论的框架构造的，故而它不是一个紫外完备的理论，例如不能描述普朗克能标相关的物理现象（在其中量子引力效应将不可避免）。再者如暗能量问题，在标准宇宙学模型之下也不能很好的解决。那么，作为一个紫外完备的、包含量子场论和量子引力的、潜在的大统一理论，弦理论自然不能回避这些困难，而且她被自然的预期能够成为更完善的宇宙学模型。接下来的篇幅里我们将列举这些当前宇宙学的重要问题并介绍弦理论对解决这些问题的尝试，即弦宇宙学模型。

宇宙学暴涨 宇宙暴涨机制是为了解决热大爆炸宇宙学中两大疑难：平坦性疑难和视界疑难所提出的（当然还有磁单极疑难等）。它由古斯（A.Guth）于1980年首先提出，随后林德（A.Linde）、阿尔布雷克特（A.Albrecht）和斯坦哈特（P.Steinhardt）也分别提出了推广的暴涨宇宙模型。平坦性疑难指的是，当今的观测表明我们的宇宙空间部分是接近于平坦的，按照标准宇宙学模型的计算，这就需要在宇宙大爆炸的初始时刻，由宇宙的质量密度和哈勃常数这两个独立参数所组成的宇宙密度参数 Ω （定义为 $\Omega = \frac{\rho}{\rho_c}$ ，其中 ρ_c 称为宇宙学临界密度）与1的偏离仅仅只有 10^{-58} 的量级，如此相当于对宇宙的初始条件有一个非常精细的调节，这是一件很不自然的且不可思议的事情。因为它意味着宇宙自诞生到现在都几乎是平直的，这便是平坦性疑难。视界疑难是指，宇宙微波背景辐射

的观测结果表明CMB具有高度各向同性（全空间温度的涨落仅为 10^{-5} ），即对太空中各个方向观测到的CMB辐射谱具有高度一致性。这个结果预示着在不同的方向上（例如以地球为中心建立极坐标系），夹角很大的空间区域也存在着因果关联（即能够通过光信号交换信息）。然而根据标准宇宙学模型计算得到的能够存在因果关联的空间区域所张开的极角仅为1度左右，远远小于观测结果。这就是视界疑难。古斯首先提出，通过引入合适的动力学标量场，使得宇宙在诞生之后迅速经历一个剧烈加速膨胀的阶段（其中刻画宇宙空间尺度大小的宇宙尺度因子按照时间的指数增长），如此，原本有因果关联的区域由于空间的剧烈膨胀被拉出了视界之外，同时也使得宇宙空间的外曲率半径暴增，即空间趋于高度平坦，如此上述两大疑难便能得到合理的解答（同时，由于空间尺度的剧烈增大，使得可能残留的磁单极密度变得极小，从而也缓解了磁单极没有观测到的疑难）。最初的暴涨模型受到了粒子物理对称破缺机制的启发，是标量场加上合适的势能项的模型，其中的一个标量场就作为暴胀子来产生暴涨。虽然场论中的暴涨模型能够较好的解释当前宇宙学的实验观测，但宇宙暴涨过程已不可避免的涉及高能区域的物理，在其中有效量子场论的描述可能失效。另外，目前所知的基于有效场论构造的暴涨模型均存在一个所谓的精细调节问题，即有效作用量中的参数的选择要使得暴涨过程能够产生合适的功率扰动谱，从而与观测结果相符。因此，只有找到一个紫外完备的暴涨理论才能够弄清楚其中更基本的物理机制。那么利用弦理论来构造暴涨模型成为了很自然的选择。

弦理论中的暴涨模型 弦理论中实现暴涨可以归结为，如何构造弦紧致化之后的四维低能有效理论使之能够产生暴涨并与当前的实验观测相符。这其中有两个主要的困难，一个是moduli问题，另一个是 η （慢滚参数）问题。弦理论的紧致化会诱导出多个（几十甚至上百个）产生引力耦合的被称之为moduli的标量场，且通常这些标量场都会对四维的标量势有贡献，这就比有效场论中的单标量场暴涨模型复杂很多。为了构造出暴涨模型，理论上可以从众多标量场中选出

一个质量相对最小的作为暴涨子，并在场位型空间选取一条合适的路径，使得余下的标量场所产生的有效势能对于该标量场来说是接近平坦的（此种处理方式类似于凝聚态多体系统中平均场论的方法），以满足暴涨要求的慢滚条件。这可以通过赋予其他标量场大质量（一般要求 $m^2 \gg H^2$ ，其中 H 是哈勃常数）的方式来实现，这被称为 moduli 稳定化。 η 问题是指，暴涨机制要求暴涨子在早期时刻所处的势能很大但较平坦，使得暴涨子能够沿着势慢慢滚到极值点（可以设想为一个小球沿着一个很高的缓坡滚下），这需要 $\eta \ll 1$ 。然而在弦理论暴涨模型中，各种对暴涨子势能的修正会导致 $\eta \sim 1$ 。相较而言， η 问题对弦理论暴涨模型给出了一个很大约束。

弦暴涨模型可以按照其中的暴涨子的起源分类。在开弦理论中的模型通常称为膜或者 D 膜暴涨模型，其中暴涨子来自于刻画开弦端点在 D 膜上横向运动的标量场。D 膜暴涨模型近年来被较多的讨论，且主要集中在 IIB 型超弦理论中，例如有 D3-反 D3 膜暴涨模型，D3-D7 膜模型。在两者中，它们之间的相对距离都被解释为暴涨子，但它们的 moduli 及其稳定化不同。此两种模型是考虑对暴涨子势能的适当调节以实现暴涨。另外一种实现暴涨的方式是不修改暴涨子势能，而是通过动力学来减缓标量场的运动，即 DBI 暴涨，值得注意的是 DBI 暴涨模型可以实现慢滚暴涨。闭弦理论中的模型则被称为 moduli 暴涨模型，其中的暴涨子来自于一个闭弦振动模式。此外，类似于 D 膜暴涨模型，在 M 理论中也有利用 M5 膜实现暴涨。

微波背景辐射的观测中不仅发现 CMB 有很小的各向异性，同时也发现它有偏振现象，这是由于 CMB 被宇宙中的自由电子散射所产生的。研究这些偏振效应有很多重要的意义，其中一个便是探测暴涨时期所产生的原初引力波。按照宇宙学模型中的扰动理论计算，可以把 CMB 的偏振分为所谓的 E 模式（也叫电场模式）和 B 模式（也叫磁场模式），其中 E 模式只和标量扰动有关，而 B 模式由张量扰动来贡献。为了描述它们之间的相对强度，可以定义一个叫张标比的参数 r 。暴涨宇宙学模型预言在暴涨时期产生的原初引力波将贡献 B 模式，但 r 的值很小。因此在实验上

观测原初引力波的信号显得极为重要（引力波是爱因斯坦广义相对论的重要预言之一，也是到目前为止实验上尚未发现的现象）。最近的宇宙河外偏振背景成像（BICEP2）就希望能够探测到这种信号，不过由于观测数据的处理困难，目前尚无确定的证据表明发现了原初引力波，相关的后续改进实验正在进行当中。弦理论中的一些暴涨模型会给出很小的原初张标比 r ，例如膜暴涨，而另外一些模型会给出较大的 r ，如轴子模型。那么接下来新的观测结果也将会对不同的弦理论暴涨模型给出限制。

宇宙弦 前面我们提到，弦理论预言宇宙中存在宇宙弦，有可能在当今的宇宙中留下可观测的遗迹。而我们已知，弦能标具有不确定性，若它的能标在大统一能标 10^{16} GeV 之上，那么宇宙弦不能在暴涨之后产生，它将会由于暴涨导致的宇宙空间尺度剧增而被稀释，此种情况类似于磁单极问题。若弦能标应该足够小，使得宇宙弦在暴涨的末期或者暴涨之后才产生，那么宇宙弦则可能保留下来而具有可能的观测效应。在具体的弦宇宙学模型构造中，卷曲的几何起到关键的作用，因为它可以让弦能标产生引力红移而降低，弦理论中可以实现此效应的卷曲几何有例如 Klebanov-Strassler 管。

暗能量问题 此问题和宇宙的膨胀有关，关于宇宙随时间演化是膨胀还是收缩，可以追溯到爱因斯坦广义相对论建立的早期。爱因斯坦于 1917 年最早得到的宇宙学解是动态解，受限于当时物理学界主流的静态宇宙观点，他在爱因斯坦方程中加上了一个常数项以产生斥力来抵消宇宙收缩，从而得到一个静态宇宙学解，这一项便是著名的宇宙学常数。不过 1929 年哈勃便发现了河外星系的特征谱线红移和其距离成正比的哈勃关系，证实宇宙并不是静态的，而是在膨胀。爱因斯坦为此非常懊恼，并称引入宇宙学常数是他一生最大的错误，为此错过了理论物理预言宇宙膨胀现象的机会。不过有趣的是，现在看来，宇宙学常数的引入未必是爱因斯坦的错误，反而可能是一大成功，因为按照量子场论的观点，宇宙学常数起源于真空能，而它则很有可能就是神秘的暗能量。哈勃当时的观测局限于小红移的星体（红移 $z \sim 10^{-2}$ ），而为了得

到大红移 $z > 0.1$ 时的红移 - 距离关系, 则需要找到更好的量天尺, Ia 型超新星由于其物理特性正好成为了这样的“标准烛光”。1998~1999 年间的美国两个独立的观测研究小组超新星宇宙学计划和高红移超新星搜寻组以 Ia 型超新星作为测量距离的标准尺, 将其亮度距离作为红移的函数的观测结果与理论模型作比较, 发现宇宙的减速因子为负数, 即表明我们现在的宇宙不仅在膨胀, 而且在加速膨胀, 同时, 对实验数据的最佳拟合都表明宇宙中除了存在物质, 还存在占总能量密度约 70% 的真空能, 其物态方程满足 $p = -\rho$ (其中 p 是压强, ρ 为能量密度), 通常也把它称为暗能量。总之, 暗能量的一个重要特点就是产生负压 (类似于斥力), 使得宇宙加速膨胀。除了对 Ia 型超新星的观测之外, 宇宙中暗能量占大部分的结论也为宇宙微波背景辐射实验 COBE 和 WMAP 等证实, 这些实验的测量结果与所谓的宇宙学常数加冷暗物质的理论模型 (Λ CDM) 符合得很好。暗能量的发现所带来的巨大困难是, 它的能量密度为何会如此之小? 因为若暗能量就是宇宙学常数, 其给出的暗能量的能量密度约为 $6 \times 10^{-9} \text{erg} \cdot \text{cm}^{-3}$, 可是按照量子场论, 宇宙学常数的微观起源应该为真空能, 而据此估算出来的暗能量的能量密度约为 $10^{115} \text{erg} \cdot \text{cm}^{-3}$ (即便考虑超对称效应使得玻色子和费米子对真空能的贡献抵消, 但由于超对称在 TeV 的能标下并未探测到, 如此估算出的真空能仍然远大于观测结果), 这意味着理论计算结果比实验观测结果高出了约 120 个量级! 不过若暗能量的能量密度一直保持为 $10^{115} \text{erg} \cdot \text{cm}^{-3}$, 其所产生的巨大斥力将使得宇宙加速膨胀极其迅猛, 从而导致恒星、星系和当前的宇宙大尺度结构无法在引力的作用下形成。物理学家们提出各种暗能量理论模型, 大致可以分为: 对称性模型、人择原理、调节机制、修改的引力理论、量子引力、全息原理、反作用机制和唯象模型等。我们将简要介绍和超弦理论相关的暗能量模型。

(1) 人择原理。此种观点是认为暗能量的大小是随机的, 观测的结果之所以如此小是因为人类的存在。这需要假设物理学中的某些常数在不同时空区域可以具有不同的值, 尽管可能显得不那么自然, 但弦

理论中例如 M 理论和 IIA 弦理论中确实可以实现人择原理, 即所谓的弦汇景 (String Landscape), 首先由萨斯坎德 (L. Susskind) 提出, 在此模型中, 弦理论具有很多真空, 每一个真空都是一个局域极小, 类似于一大群山脉中的某个山谷, 因而宇宙学常数可以有多种值, 或者说我们生活在多重宇宙当中。不过, 关于人择原理能否给出精确预言仍然存在有争论。

(2) 全息原理。全息原理的提出很大程度上受到黑洞热力学和利用规范场研究量子色动力学的启发, 最早由著名物理学大师特霍夫特 (G. 't Hooft) 于 1993 年提出, 后来萨斯坎德于 1995 年最先讨论了全息原理和弦理论的关联。全息原理可以简单表述成: 一个时空中包含引力的理论与该时空边界上的另一个物理理论 (通常不含引力) 是等价的, 而且时空边界上每一普朗克面积 (10^{-70}m^2) 上至多包含 1 比特信息。全息原理在超弦理论中的第一个具体实现就是 AdS/CFT 对偶, 其中的一个重要性质就是所谓的紫外 / 红外关系。用到宇宙学模型当中, 这预示着场论中零点能对应的紫外截断不能任意小, 而应该由宇宙中的某个红外的尺度来决定。李森最先指出, 若将紫外截断选取为未来事件视界半径的倒数, 则由此建立的暗能量模型能非常好地与当前实验观测相符, 这被称为全息暗能量模型。

弦论中第一次具体实现了全息原理, 却在特殊的背景时空之下, 其中一部分是反德西特时空。在宇宙学中, 并没有具体的技术实现, 我们只能应用全息原理的物理图像。这个原理认为小尺度的物理 (紫外截断) 与大尺度的物理 (红外截断) 存在对应关系, 具体来说, 一个系统可以由它的边界上的自由度给出完全描述。类似地, 如果认为暗能量来自于紫外截断导致的真空零点能, 那么一个区域的暗能量总和不能超过与此区域相同大小的黑洞的质量, 这里, 黑洞的视界尺度就是红外截断。根据全息原理, 一个自然的推断是暗能量可以通过一个恰当的大的尺度作为红外截断来加以描述。基于这种思想发展而来的全息暗能量模型, 不但对数据拟合的非常好, 而且可以避免之前所述的宇宙学常数问题。

在上述的全息暗能量模型中, 暗能量的大小和演

她用物理的情趣，引我们科苑揽胜；
她用知识的力量，助我们奋起攀登！

欢迎投稿，欢迎订阅

《现代物理知识》杂志隶属于中国物理学会，由中国科学院高能物理研究所主办，是我国物理学领域的中、高级科普性期刊。

为进一步提高《现代物理知识》的学术水平，欢迎物理学界的各位专家、学者以及研究生为本刊撰写更多优秀的科普文章。投稿时请将稿件的 Word 文档发送至本刊电子信箱 mp@mail.ihep.ac.cn，并将联系人姓名、详细地址、邮政编码，以及电话、电子信箱等联系方式附于文章末尾。

所投稿件一经本刊录用，作者须将该篇论文各种介质、媒体的版权转让给编辑部所有，并签署《现代物理知识》版权转让协议书（全部作者签名），如不接受此协议，请在投稿时予以声明。来稿一经发表，将一次性酌情付酬，以后不再支付其他报酬。

《现代物理知识》设有物理知识、物理前沿、科技经纬、教学参考、中学园地、科学源流、科学随笔和科苑快讯等栏目。

2016 年《现代物理知识》每期定价 10 元，全年 6 期 60 元，欢迎新老读者订阅。

邮局订阅 邮发代号：2-824。

编辑部订阅 汇款到：北京市玉泉路 19 号乙高能物理所《现代物理知识》编辑部；邮编：100049。

需要杂志的读者，请按下列价格汇款到编辑部。1992 年合订本，18 元；1993 年合订本，18 元；1994 年合订本，22 元；1994 年增刊，8 元；1994 年附加增刊合订本，36 元；1995 年合订本，22 元；1996 年合订本，26 元；1996 年增刊，15 元；1997 年合订本，30 元；2000 年附加增刊合订本，38 元；2000 年增刊，10 元；2001 年合订本，48 元；2002 年合订本，48 元；2003 年合订本，48 元；2004 年合订本，48 元；2006 年仅剩 4、5、6 期，每期 7 元；2007 ~ 2011 年单行本每期 8 元；合订本每本 50 元；2012 ~ 2015 年单行本每期 9 元，合订本每本 60 元。



化都是可以确定预言的，但弦理论给出的另一种模型具有与此完全相反的特点。自洽的超弦理论要求时空的维度是 10 维，由于我们的日常所感知的时空是 4 维，所以在弦理论中额外的 6 个空间维度紧化在很小的尺度之内。粗略来说，不同的紧化方式会给出不同大小的真空能密度，也即不同的宇宙学常数，而这个数目非常大，达 10^{500} 之巨。不同区域的宇宙有不同大小的宇宙学常数，而作为智能生命的我们，只可能出现在一个宇宙学常数大小适当以至于允许演化产生智能生命的区域。反过来说，我们观测到如此大小的宇宙学常数是因为我们自身的存在。这在本质上不是对暗能量性质的预言，而是以智能生命的存在作为一种约束对原本任意分布的宇宙学常数进行选择的结果。

本文中，我们简要介绍了弦宇宙学研究的动机、方法和现状，限于篇幅，我们仅仅选择性地介绍了一些较有代表性的理论模型，还有很多同样有意思的模型没有介绍。可以看到，超弦理论为解决当前一些重要宇宙学问题所发展的理论方法模型已经取得了重要的进展和突破。作为一个包含量子引力的非常有希望的大统一理论，超弦理论在研究宇宙学特别是早期宇宙时期具有独特的优势，尽管我们目前对于宇宙学暴涨、暗物质、暗能量等诸多问题的认识还需进一步深入研究。无论如何，了解宇宙是人类的一个基本好奇，宇宙学将会继续吸引物理学家和天文学家们不断地探索，随着越来越多的精度更高的天文学、宇宙学实验的进行，或许在不久的将来我们将有机会去探测到弦宇宙学模型的一些预言，甚至有可能检验超弦理论。