

第六讲 超弦理论与宇宙学的挑战*

李 淼[†]

(中国科学院理论物理研究所 北京 100080)

摘 要 超弦理论从根本上改变了人们对时空的看法,时空在弦论中只是一种宏观体现.弦论中的非经典时空影响早期宇宙的发展,在一些观测宇宙学的实验中人们也许会发现弦论的效应,例如微波背景辐射的功率谱的异常.最近发现的暗能量也对弦论宇宙学提出了挑战.

关键词 弦论,量子引力,暴涨宇宙,暗能量

Challenges in string theory and cosmology

LI Miao[†]

(Institute of Theoretical Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract Space-time has become an emergent concept in string theory, but we still lack a fundamental formulation of string theory in a time dependent background. String effects may possibly be first discovered in certain experiments in observational cosmology, such as the power spectrum measurements of the cosmic microwave background. The newly discovered dark energy may constitute the most important challenge to string theory.

Keywords string theory, quantum gravity, inflationary universe, dark energy

1 弦论与量子引力

20 世纪的物理学的颠峰之一是量子场论.20 世纪初人们建立了量子理论和相对论,这两个理论是整个 20 世纪新物理学的基石.到了 20 世纪下半叶,量子理论与相对论的结合成了理解一切微观世界的基础.人们发现,所有的微观物理现象特别是基本相互作用都可以用量子场论来描述.不仅如此,一些复杂的现象如凝聚态物理中的许多问题也可以用量子场论来研究.

基本相互作用之所以可以用量子场论来描述,除了因为一切现象满足量子力学的规律以及相对论以外,另一个深刻的原因是较大尺度上的物理现象相对独立于较小尺度上的物理现象,较小尺度的物理过程对较大尺度上的物理过程的影响可以通过很少的参数来体现.用专业的术语来说,就是重正化群效应的体现.换言之,不论小尺度上的物理如何复

杂,较大尺度上的物理可以用较少参数的可重正化的量子场论来描述.当然,我们这里所谈的较小尺度和较大尺度也是相对而言.在粒子物理中,较大尺度指的是物理过程发生的时空区域,在最高能的加速器上,这个区域大约是 10^{-16} cm 左右,小于这个尺度上的物理有待于下一代加速器来探测.

重正化的粗粒化过程也许在量子引力中失效.要理解这一点,我们需要了解量子引力理论的发展史.引力量子化直到 20 世纪 60 年代才被人们严肃对待,到了 70 年代,初步的量子化尝试说明通常的量子场论方法在这里完全不适用.量子场论中最常用的办法是先确定一个经典过程或者经典背景,然后假定在这个经典背景下场的量子涨落比较小,可以用一个或几个小参数来控制,较小尺度上的量子涨落的效应只是改变这几个小参数.最简单的例子是电磁相互作用,一个电子会辐射出虚光子,而一个

* 2005-02-22 收到初稿,2005-05-25 修回

[†] Email: mli@itp.ac.cn

虚光子会变成一个正负电子对然后重新湮灭成一个虚光子,这种量子涨落的效果是改变电子的电荷大小.将这种微扰方法应用到引力中,人们发现,原来的引力理论(爱因斯坦理论)中的参数的改变不足以吸收这些效应,也就是说,我们需要引进无限多个参数.用正规的语言说,引力的微扰量子化是不可重正的.比较直观地说,引力的微扰量子化是一个不能作任何预言的理论,因为我们需要引入无限多个物理“常数”.

在过去数十年中,出现许多试图克服这个基本困难的尝试,可以说,得到相当多人的认可的尝试只有两个:一个是所谓的非微扰圈量子引力;另一个就是超弦理论.圈量子引力虽然得到一部分人的追随和同情,但是由于理论中的一些基本问题还没有得到解决,不能说是一个流行的理论.超弦理论在过去的20年中成了量子引力的最为流行的理论,主要原因是这个理论直接解决了我们前面所说的不可重正化的困难.虽然解决的方案依然是基于微扰论基础上的,这并不是说超弦理论直接继承了量子场论的重正化群的图像.重正化群的图像在一定范围中还是正确的,但不是基本原理了,我们甚至可以说,超弦理论或者任何自洽的量子引力理论在根本上是违背重正化群的图像的,至于如何违背,我们在下两节中具体介绍.

决定超弦的能标到底是什么?这是一个很重要的问题,因为这直接与我们在实验室中能否验证超弦理论相关.过去很长一段时间中,人们认为超弦的能标接近普朗克能标,也就是 10^{28} eV,比现在实验能够达到的能标高了16个量级,从而完全排除了在实验室中验证弦论的可能.最近几年,人们发现,如果弦论中微观的额外维空间的尺度并不是很小,超弦的能标可以远远低于普朗克能标,甚至低到下一代加速器所能达到的能标(如欧洲核子中心正在建造的大型强子对撞机).如果真是这样,我们很可能在不远的将来在加速器上直接观测弦的效应,甚至额外空间维度.这当然是一个极端的也是最好的可能,从纯粹的几率来看,弦论的能标应该远远高于我们在不远的未来能够达到的能标,这样,寻找弦论的证据就必须通过别的途径.

宇宙学是最近一些年来一个有着突飞猛进发展的领域,宇宙学的实验不但发现了暗物质和暗能量,还验证了大尺度结构形成的理论.大尺度结构的最早成因可以追溯到宇宙的极早期,早到宇宙中还没有任何物质.那个时候,由于某种原因,宇宙发生

了加速膨胀,宇宙在极短的时间内就会增大一倍(这个时标还不十分确定,大约是 10^{-38} s).在这段时间内,时空发生了量子涨落,这些量子涨落由于宇宙加速的原因被固定了下来,变成了以后的物质密度涨落的种子,我们看到的星系以及星系团结构就是这些种子导致的引力坍缩的结果.一个加速膨胀的宇宙不仅为我们解决了宇宙中最大尺度结构的起源,也很有可能给我们带来微观世界的消息,这是因为,加速的宇宙非常迅速地放大了空间,将比亚原子还要小的尺度放大到天文尺度,如果我们足够幸运,这些放大效应可能保留了只有小尺度上才会发生的一些物理过程的信息.所以,宇宙学观测可能完成实验室里不可能完成的任务,甚至会帮助我们观测超弦理论中的效应.

2 弦论的时空观

我们前面说到,在弦论中不可重正化的问题已经不存在,其实弦论做得比希望的更好,不但不需要重正化,理论本身就没有通常场论中出现的无限大.场论中无限大的起源是高能区域的自由度,越是高能区自由度越多,这样它们对一些物理量的贡献就很大.弦论中消除无限大的主要原因是基本自由度的延展特性,例如当我们研究微扰论时,基本自由度是一维的弦.在高能区,我们不可避免地会激发越来越长的弦,而长弦所占的空间很大,从能量密度的角度来看,能量密度并没有无限地升高,这样就避免了无限大的出现.

非微扰弦论中还会出现除了弦的其他自由度,例如高维膜,这些高维膜在高能区的行为类似弦,从而也不会引起无限大的出现.所以我们期待,即使是在非微扰弦论中,无限大也不会出现.

避免无限大出现的性质正好决定了弦论中时空的一个新的特性,这就是被许多人认识到越来越重要的紫外/红外关联.这里,紫外指的是高能区的自由度,红外指的是低能区的自由度.通过量子论中的测不准原理,我们知道,高能区对应于小尺度空间,低能区对应于大尺度空间.在普通场论中,红外自由度相对地独立于紫外自由度.如果我们只关心红外自由度的话,我们可以在理论中将紫外自由度“积出”,这样紫外自由度对红外自由度的影响仅仅是改变了红外自由度之间的耦合常数,这就是我们前面提到的重正化群的效应.我们前面说到,在弦论中,当我们提高能量时,自由度例如弦不可避免地占

据越来越大的空间,而大空间与红外自由度有关系。所以,在弦论中红外自由度不完全独立于紫外自由度。

普通的量子场论中不存在紫外/红外关系。如果我们假定不同方向的空间坐标之间是不可交换的,在这样的空间上建立量子场论,我们发现某种紫外/红外关系就会出现。我们看一个最简单的例子就知道为什么会有这样的关系:假设只有二维空间,两个空间坐标的对易子是一个常数,这个对易子很类似量子力学中坐标与动量之间的对易子。所以,也会有类似的测不准关系,在 x 方向的测不准乘以在 y 方向的测不准不能小于一个常数。如果场论中的一个事件在 x 方向有很准确的位置,那么这个事件在 y 方向的位置就很不准确,前者对应于小距离也就是紫外区域,后者对应于大距离也就是红外区域。这样,紫外与红外就不是两个独立的区域。当然,这种紫外/红外关系比较人为,因为我们强制地引入不对易的空间。不但如此,不是任何量子场论在不对易的空间中都有很好的定义,我们所知道的非对易量子场论都来自于弦论中的一些例子。例如,如果在 D 膜上引入一个均匀的磁场,那么垂直于这个磁场的两个空间方向就是不对易的。

虽然不对易量子场论有些人人为的安排在里面,但它却反映了弦论的一个基本特点,那就是不同的空间之间甚至空间与时间之间是不可对易的。在弦论中,我们不需要人为地引进磁场就会发现时间和空间之间是不可对易的。不过,时空不对易性与量子力学中的坐标与动量的不对易性不同,因为弦论中并不存在时空坐标之间的非平庸的对易子,时空的不可对易性隐藏在弦论的物理过程中。我们相信,正是这种隐藏的不可对易性保证了弦论中不出现量子场论中的紫外发散。

弦论中的紫外/红外对应以及时空不对易性来自于基本激发态的延展的特点,例如弦和膜,似乎和量子引力本身没有关系,但是弦的激发态中自动包括引力子这个事实说明,这些延展体带来的特性肯定与量子引力有关。我们现在还不知道如何将时空不对易性直接与量子引力联系起来,但有一个间接的证据,这个间接的证据与黑洞有关。

众所周知,黑洞的大小与质量成正比。决定黑洞大小的是其视界的尺度,对于一个外部观察者来说,时空到了视界就中止了,因为只有视界外发生的事件才能被外部观察者所观察到。时空本身当然可以延拓到视界的内部,只是这个延拓只有对掉入黑

洞的观察者来说才是存在的。所以,黑洞的质量越大,我们对其所占的不可观测到的空间也就越大。在 高能散射过程中,当能量足够大时,一些作为中间态的“虚”黑洞会被产生出来。参与散射的初始粒子的能量越高,产生的黑洞的质量越大,从而其所占的空间也就越大。黑洞只是中间态,或迟或早地要衰变。黑洞越大,其衰变后的典型粒子的能量就越低。我们看到,我们尽可以提高初始粒子的能量,但是末态粒子的能量反而会越来越小,这看起来就是紫外/红外关系。在量子力学中,如果我们要探测越来越小的距离,我们必须增大初始粒子的能量,现在我们看到,如果能量超过一定的值,黑洞作为中间态产生了,我们反而不能探测到越来越小的距离,因为黑洞的越来越大的视界限制了这种探测,或者说,黑洞衰变的低能粒子使得被探测的空间更加模糊。

上面谈到的是黑洞与紫外/红外对应的关系,其实黑洞也与时空不可对易性相关,不过要了解黑洞与时空的不可对易性的关系需要更多的专业知识,我们这里就不加讨论了。

虽然弦论中有许多证据说明时空的微观结构与我们想象的很不相同,我们却没有很好的数学表述从一开始就将这些结构纳入理论框架。迄今为止最好的理论框架也许是所谓的矩阵理论。矩阵理论的构造基于弦论中的零维的 D 膜,也就是 D 粒子。这些粒子在弦论的强耦合极限下成为 11 维时空中的沿着一个固定方向的引力波。矩阵理论猜测,在这个极限下,整个理论由这些 D 粒子的动力学给出。 D 粒子和其他 D 膜一样,动力学由一个矩阵力学给出,矩阵的对角元对应于 D 粒子的空间位置,非对角元是联结 D 粒子之间的开弦,当 D 粒子靠得很近时,对角元与非对角元的区分变得模糊,所以 D 粒子的相对位置没有严格的定义,或者我们可以说, D 粒子的位置空间变成了整个矩阵描述的非交换空间。这个非交换空间某种程度上反映了弦论中的时空性质。

3 宇宙学与量子引力

弦论中的能标到底有多高?弦论是一个高维的理论,在 1994 年之前,大家都认为弦论只能在 10 维时空中才有自治的定义。1994 年之后,人们发现,在强耦合极限下,有效空间多出了一维,这种现象是非常罕见的,目前只在弦论中才出现。不论是 10 维还是 11 维时空,弦论不是简单地定义在我们观察到的 4 维时空中,在观察到的宏观的 4 维时空之外,还有

一些蜷曲的微观的空间,这些空间尺度到底有多大并不能确定。决定4维时空中的引力耦合强度的普朗克能量标度不仅与弦论中的基本能量标度有关,也与微观的空间尺度有关。普朗克能标是确定的,弦论的能标却是不确定的,可能在 10^{12} eV到 10^{28} eV之间。前者下一代加速器就能达到,而后者在地球上原则上是永远不可能达到的能标。

既然弦论的能标这么不确定,如果我们期望下一代加速器就能达到那就过于乐观了。也许我们在实验室中永远不可能直接观测到弦论的效应,这样我们就必须将目光投向地球之外。

宇宙射线能达到的最高能量是 10^{20} eV,远远高于加速器所能达到的能量。但是极高能量的宇宙线并不多,不能拿来作粒子物理的系统实验。而宇宙学早在20世纪80年代就作为粒子物理实验的延伸了。例如,宇宙学可以对中微子的质量给出上限。不过,直到几年前,宇宙学并没有对粒子物理中的新粒子或者新现象给出确凿的证据。

90年代初,宇宙背景辐射探测卫星(COBE)第一次观测到微波背景辐射中的非常微小的不均匀性,随后有许许多多的气球和地面对微波背景辐射的观测,逐渐地给出了不均匀性依随尺度的变化。这些结果可以用一个曲线来概括,而这个曲线在某种程度上证实了暴涨宇宙论的预言。

暴涨宇宙是Guth在1980年提出的宇宙演化过程中比热大爆炸更早的一个时期。他提出这个假想的动机是为了解决宇宙学中的三大自然性问题。这些自然性问题其实就是初始条件问题,在目前的观测宇宙学中并没有太多的实验兴趣。暴涨宇宙的最重要的结果是产生了形成星系和星系团所需要的最初的密度扰动。在暴涨宇宙时期,宇宙由于某种原因加速膨胀,任何非均匀的涨落都会被迅速地放大尺度从而跑出当时的视界,一旦出了视界,这些涨落就会被固定下来,因为比视界大的尺度上没有因果联系了,从而波动不再是通常此起彼伏的波动。

要实现暴涨,最简单的办法是通过一个标量场的势能。纯粹的势能所产生的引力其实是斥力,这样就会驱动宇宙快速地膨胀。如果在这个过程中标量场顺着势能降低的方向缓慢地滚动,宇宙在每个时刻看起来基本上是一样的。这样,量子涨落在每个波长上的涨落大小与波长基本无关,这就是标度不变的扰动谱。标度不变扰动谱早在暴涨宇宙模型提出之前就为Harrison和Zeldovich所讨论过,所以又叫Harrison-Zeldovich谱。原初扰动谱经过后来宇宙历

史的影响,不再是简单的形式,电子、质子和光子处于热平衡态时的所发生的物理过程对密度扰动谱有很大的影响,会在角功率谱中产生一系列峰。这些峰已经被观测到,观测的结果与一个在暴涨时期产生的标度不变的绝热谱基本吻合。

然而2004年公布的WMAP实验似乎揭示了与“标准”暴涨宇宙模型预言稍有不同的地方,这些细微的不同,如果为将来更多的数据所证实,应该是通常暴涨宇宙模型之外的微观物理所遗留下来的效应。例如,功率谱的谱指数的跑动很有可能是量子引力如时空本身的量子效应引起的。所以,进一步研究暴涨宇宙在微波背景辐射留下的遗迹可能会间接地告诉我们更深层次上的物理。

过去几年的另一个重要发现是宇宙尺度上的暗能量的存在。1998年,在研究了一些Ia型超新星之后,美国的两个研究小组得出结论,我们的宇宙的膨胀速度在增大。在通常的引力理论中,由于万有引力的效应,宇宙的膨胀只能减速。一个加速膨胀的宇宙要么是某种斥力引起的,要么爱因斯坦的理论在大尺度上失效了。其实,爱因斯坦本人早在创立理论宇宙学的时候就在他的场方程中引入了一个等效于斥力的项,这一项后来被称为宇宙学常数项。用现代的观点来看,这一项的起源是真空的能量。由于真空能量是相对论性不变的,也就是说在不同的惯性系中真空能量密度都是一样的,所以真空能不同于一般物质的能量,它产生的“万有引力”不再是引力,而是斥力。

分析超新星的结果是,暗能量占宇宙总能量密度的70%左右。在发现暗能量之前,人们一直倾向于认为宇宙学常数或者暗能量应该等于零。因为宇宙学常数在引力理论中是一个带有量纲的量,如果与普朗克能标相距太远,很难在理论上解释。也许某种对称性的存在可以迫使暗能量为零。现在,一个不为零同时与普朗克能标相差很大的暗能量密度对理论家提出了一个前所未有的挑战。

暗能量这个问题之所以特别,因为它的存在预示着非同寻常的量子引力性质。在最简单的情况下,暗能量是一个不随时间变化的常数,也就是宇宙学常数。在爱因斯坦的广义相对论中,这个宇宙学常数仅仅是一个参数,可以随便调节,所以在经典理论中如同电子电荷那样是一个输入量。在量子理论中,任何量子场的量子涨落都会影响这个常数。众所周知,一个量子场的零点能是无限大,如果不考虑引力效应,我们在粒子物理中常常将零点能人为地去掉,因

为零点能不影响其他相互作用。当我们考虑引力时，由于引力与任何的能形式都耦合，我们就不能人为地调节零点能了。当然，在一个正确的量子引力理论中，零点能不可能是无限大，因为无限大的零点能包含了任意小尺度的贡献，而量子引力本身的存在排斥任意小距离，例如我们前面谈到的弦论就排除了任意小的距离存在。但是，零点能的自然值应该和理论本身所含的能量标度有关，例如普朗克能标。实际观测到的非常小的暗能量说明经典值和量子零点能有一个非常不可思议的抵消，这个奇迹性的抵消为什么会发生？我们对此一无所知。当然，也许经典的宇宙学常数和量子零点能本身并不能截然分开，在这种情况下，量子引力理论到底是如何实现这么小的零点能的？我们同样不知道解答。

超弦理论虽然还不能对暗能量问题提供一个很好的回答，但最近几年的进展却启发了对暗能量的两种观点。第一种观点认为，弦论中存在许许多多不同的“真空”，我们的宇宙可能恰巧处在某一个特别的真空中，在这个真空中宇宙学常数就是这么小。有一部分人确实构造了非常多的真空，其中非常少数的一些真空有很小的零点能。那么，我们为什么恰恰处于这些少数的真空中的一个？这就需要所谓的人择原理来帮助我们了。人择原理说，只有在智慧生物能够生存的前提下，我们才能提出有意义的物理问题。在这里，如果暗能量太大，那么在宇宙早期的时候，星系和星系团就不可能形成，没有星系，人类也不可能产生，那么就没有智慧生物来提出暗能量问题。这个“原理”的确能在某种程度上回答暗能量为什么这么小的问题，但是，许多人认为这不是一个科学的回答。

第二种观点来源于全息原理，而全息原理的发现归功于人们对黑洞的理论研究。早在 20 世纪 70 年代初，贝肯斯坦 (J. Bekenstein) 就发现，黑洞应该有一个宏观的熵，熵值正比于黑洞视界的面积，反比于普朗克长度的平方。对于黑洞的一个外部观察者来说，黑洞所占据的空间由它的视界所决定。假想一个含有很大质量的系统坍缩成黑洞，原系统所占的体积一定大于视界的大小所决定的体积，而原系统的边界面积也大于视界面积，所以黑洞的熵小于原系统边界的面积（乘以一个常数）。如果热力学第二定律在坍缩的过程中是成立的，这样原系统的熵小于黑洞的熵。两个不等式导致一个新的不等式，就是一个系统的熵小于它的边界的面积。这就导致了

全息原理：一个系统原则上可以由它的边界上的一些自由度完全描述。将全息原理应用到宇宙学中，就产生了全息暗能量这个概念。

既然暗能量的密度和临界密度接近，那么暗能量本身就应该和宇宙的尺度有关。用我们前面解释过的全息原理，可以将暗能量与宇宙尺度联系起来。一个简单的看法是，如果我们认为暗能量就是零点能，这个零点能对应的短距离截断（紫外截断）不能任意地小，最小值应该由视界的尺度决定，而后者是红外截断。如果紫外截断太小的话，给定的红外截断之内就可能形成黑洞，从而用来计算零点能的方法也就失效。当然，这只是一个简化后的图像，真正的机制还有待发现。1998 年，科恩 (A. Cohen) 等人提出视界的大小应该是哈勃视界，直到最近人们才发现应用哈勃视界的结果是暗能量不能驱动宇宙加速膨胀。本文作者指出，必须用事件视界来取代哈勃视界，这样做的结果可以与实验做非常好的拟合。这个模型正引起越来越多的人的重视。

我们前面仅仅谈到了两个与弦论有关的最为重要的宇宙学问题：暴涨宇宙以及暗能量的起源。其实还有更多的与弦论直接或间接相关的宇宙学问题，例如，宇宙弦的存在的可能。可以毫不夸张地说，宇宙学在今后 10 年到 20 年之间将是发展弦论的主要实验方面的驱动力。

4 弦论的未来

弦论的发展已经经过了将近四十年的时间。20 世纪 60 年代末，弦论的发现起源于强相互作用，由于量子色动力学的建立，强相互作用不再需要弦论。到了 70 年代中期，人们发现弦论中自然包含了引力，从而也就包含了量子引力，接下来的弦论的发展完全是在弦论内部的逻辑发展。这种逻辑发展有其强大的威力，人们在这种思路下发现了几种不同的弦论、对偶性，甚至 M 理论。但是，暗能量的发现也许昭示了纯逻辑发展的结束，因为到目前为止，弦论的纯逻辑并不能解释一个很小的暗能量密度的存在。

即使没有暗能量问题的挑战，人们也需要开始重视实验对弦论的限制和验证（或者证伪），因为无论是加速器物理还是宇宙学都已经发展到可能发现量子引力和弦论的效应。我们相信，未来的 10 年或者 20 年时间，将见证宇宙学、粒子物理与量子引力和弦论的交互推动的飞速发展。