

隐藏的额外维度

刘玉孝 贾海龙

(兰州大学物理科学与技术学院 730000)

自古以来,人类对宇宙的好奇心就像一团永远扑不灭的火焰,不断地驱使着我们去探索那未知的浩瀚宇宙。从古代那些充满奇幻色彩的神话传说,到如今令人眼花缭乱的科幻小说和电影,人类对于宇宙的思考 and 探索从未停止过。如果要选出一部最经典的科幻作品来代表这种对宇宙的极致想象,那么《星际穿越》绝对当之无愧。

电影《星际穿越》讲述了未来地球环境恶化,粮食短缺,主角库珀与队友们勇敢地踏上星际旅行寻找新家园的故事。库珀最终穿越一个神奇的虫洞来到五维时空(四维时空加上一个额外的空间维度)。在这个高维时空里,库珀居然能看到四维宇宙中自己当初出发时的场景,并且成功地把黑洞中的量子数据以摩尔斯电码的形式传递给女儿墨菲。这一幕简直让人惊奇:难道在现实世界里,我们也有机会“穿越”到高维时空中去吗?

不过,根据现在的物理知识,我们四维时空之外的空间维度(额外维)到底是否存在还不太好说呢!虽然科学家们一直在尝试用各种方法来证明或者解释它的存在,但到目前为止,额外维是否存在还是个谜。然而,物理学家们不会因此放弃探索。实际上,从20世纪开始,他们就提出了不同的额外维理论,试图解开这个谜团。

现在我们要面对一个现实:按照目前的时空观念,要感知到高维时空难如登天。这就好比莫比乌斯环上的小蚂蚁,它们生活在二维空间里,觉得那个二维曲面就是整个世界。而对于我们来说,该曲面只不过是三维空间里的一个普通曲面而已。可是,对于那些小蚂蚁来说,这就是它们生活的全部!同理,我们只能感受到前后左右上下这三个空间维度,永远被困在这个三维空间里,想都别想像魔

师那样瞬间从舞台“瞬移”到观众席去(如图1所示)!虽然听起来好像有那么点高维生物从额外维“瞬移”到观众席的意思,但其实这只是魔术师玩的一些视觉把戏罢了。

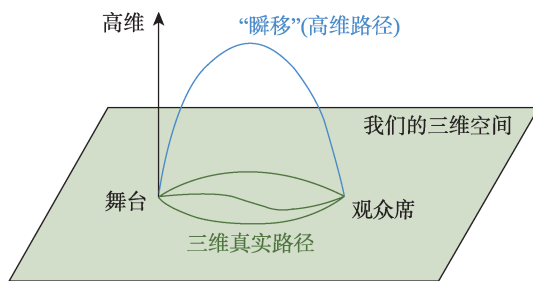


图1 魔术师的“瞬移”表演

那么问题来了,《星际穿越》中所涉及的“穿越”现象是否有科学依据呢?额外维理论是怎么发展起来的?它又是怎么影响物理理论的?更重要的是,作为生活在三维空间里的普通人,我们能否感知到那些隐藏的额外维呢?带着这些疑问,接下来我们沿着额外维理论的发展脉络(见图2),跟随物理学家的脚步,一同探索额外维的奥秘。

一、早期的额外维思想

在人类文明出现之后,古代的哲学家和思想家们就对额外维这个概念有过初步的思考。比如说,柏拉图在《理想国》里提出了“洞穴隐喻”,认为我们看见的世界只是一些看不见的、高度抽象的理念的投影。这一理念被一些人解读为暗示存在额外的空间维度,听起来有点玄乎,像是走进了柏拉图那无边无际的理念国。

到了文艺复兴时期,数学界开始热闹起来。欧几里得几何得到了不断的发展,后来数学家们还建立了非欧几何,并琢磨能不能把三维空间给推广到

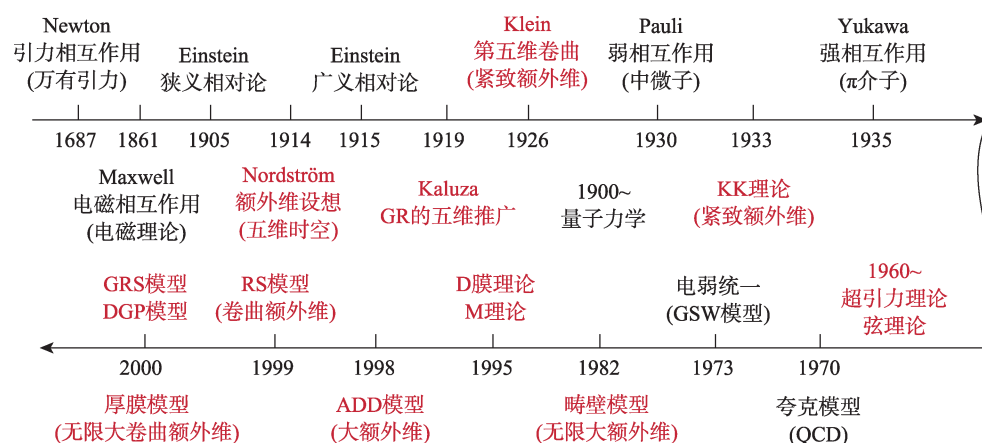


图2 额外维理论的发展脉络

四维乃至更多维度上去。非欧几何,特别是黎曼几何的建立,给后来爱因斯坦的广义相对论提供了坚实的数学基础。到了19世纪末,英国有个叫欣顿的数学家兼科幻作家,作为四维几何的积极推广者,他编写了一本关于四维空间的科普书籍,还开创性地给出了在三维空间里直观展示如“超立方体”这样的高维几何图形的方法。

不过话说回来,虽然这些古人在哲学和数学上对额外维度有所设想,但要将这些设想转化为物理现实,对他们而言是极为困难的。为啥呢?因为当时的物理定律看起来挺和谐的,突然增加额外的空间维度,则会与物理实验定律相矛盾。比如,按照牛顿的万有引力定律,两物体之间引力的大小是跟它们之间的距离平方成反比的,这是符合三维空间的几何和物理规律的。但如果放到四维空间里,根据高斯定理,引力大小就得跟距离的立方成反比了。因此,从这个角度来看,当距离比较大时,四维空间的引力相较于三维空间会变弱(如图3所示)。

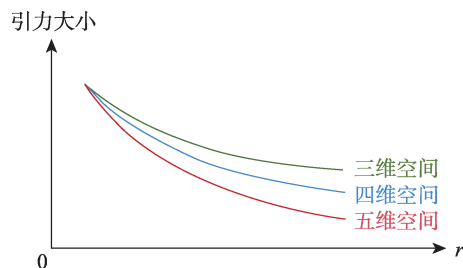


图3 牛顿引力在不同维度的空间中的行为

比如,地球上100公斤的人,在三维空间里感受到的引力是1000牛,要是换到四维空间,那数值简直小得可怜,只有十的负三十九次方牛,这跟咱们现实中的观测结果差太远了!所以,从当时物理学家的角度来看,引入额外维度简直就是自找麻烦,既增加了理论的复杂度,又跟实验结果对不上。

二、额外维设想的初步尝试

在上一节里,我们提到,20世纪之前关于额外维度的讨论主要局限于哲学家和数学家的理论探索,与实际物理研究联系尚不紧密。那时候的物理理论跟实验一致,完全没必要引入额外维度来添乱。

然而,芬兰的物理学家诺德斯特姆可不这么想。1914年,他勇敢地进行了尝试,引入额外维度来统一引力和电磁力这两种当时已知的基本相互作用力^[1]。他提出用五维矢量来描述电磁势矢量和引力势标量。不过他的理论问题较多,而且还是基于牛顿的引力理论,而非爱因斯坦后来提出的广义相对论。因此,这一理论当时没有引起过多关注。

随后,爱因斯坦于1915年提出了比牛顿的引力理论更为完善的广义相对论,用时空几何漂亮地解释了引力。1919年,德国数学家和物理学家卡鲁扎被这一简洁美妙的几何理论激发了灵感,将爱因斯坦的广义相对论推广到五维时空,从而形式上统一了引力和电磁力^[2]。然而,一个关键问题随之产生,

为何第四个空间维度至今仍未被发现呢?卡鲁扎的解释是存在于五维时空中的场(基本粒子)不依赖于额外维度。但这引发了一个新的疑问,若粒子不受额外维度的影响,那么该额外维与我们所处的三维空间将存在多大差异呢?

1926年,瑞典的克莱茵提出了紧致额外维假设,认为额外维是一个半径可能跟普朗克尺度那么小(10^{-35} 米)的圆环^[3]。而且,由于这第五维是紧致的,动量的第五分量是量子化的。于是就有了一系列卡鲁扎-克莱茵(KK)粒子。这些KK粒子可以简

单理解为五维时空中的粒子在四维时空的投影或者约化(如图4所示),它们跟四维标准模型中粒子的质量存在差异(具体差别跟额外维的大小有关,比如,对于普朗克尺度那么小的额外维,差异就在普朗克能标量级,即 10^{19} GeV)。科学家们曾期望欧洲核子研究中心(CERN)的大型强子对撞机(LHC)能通过加速粒子来撞出这些KK粒子。要是额外维真的存在,当加速器达到相应的能标时,那撞出来的KK粒子应该在对撞机里留下痕迹。这种探测方式是目前检验额外维存在性的主要手段之一。

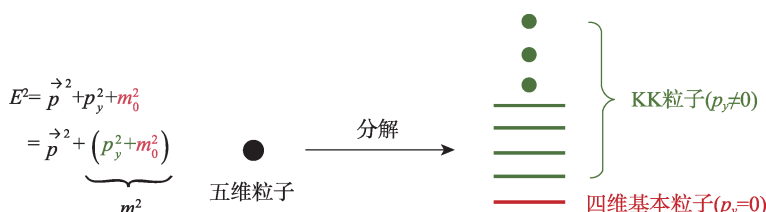


图4 一种五维基本粒子的四维投影/约化

为了更好地理解这“紧致”或“卷曲”额外维的本质,我们可以这么想象:在如图5(a)所示的二维柱面上(即一维无限长空间与一维紧致成圆环的额外维的组合),有一个粒子在其中运动。从远大于圆环尺度的宏观角度来看,实验发现它就像在一维的直线上运动。但实际上,该粒子是在二维空间里遵循二维运动规律运动的,只不过额外维的影响在我们宏观视角下几乎感觉不到。如图5(b)的三维空间也是同理,在二维平面的每一个点上,都隐藏着一个紧致(卷曲)成微小圆环的额外维,粒子可以在那儿转了一圈又回到起点,而对于生活在二维空间的宏观生物来说,它们感知不到额外维的存在。

1933年,美国数学家维布伦首次将卡鲁扎和克莱茵的额外维理论命名为KK理论。虽然该理论在

经典层面上统一了引力和电磁力,但对物理学家而言,这还不够。比如,该理论不能解释电子所带的电荷。此外,由于当时量子场论尚未建立,该理论未能涵盖其他相互作用。然而,KK理论对后续相关理论的发展仍起到了重要作用。它提出了紧致额外维这个基本概念,从经典层面解释了我们为啥感受不到额外维的存在,也为后来的额外维理论发展打下了基础。

三、超引力和超弦/M理论

在上一节中,我们介绍了KK理论,了解到它存在一些问题。再加上弱相互作用和强相互作用先后被发现,物理学家们忙于构建相应的理论。因此,额外维理论的发展进程便逐渐放缓。

到了20世纪60年代,强和弱相互作用的理论已建立起来。物理学家们再次尝试寻找统一四种基本相互作用(引力、电磁、弱和强)的理论。于是,更高维的理论再次进入大家的视野,如26维的弦理论、最高11维的超引力理论、10维的超弦理论、11

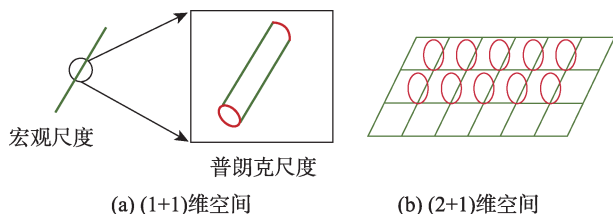


图5 卷曲额外维度示意图

维的M理论,以及畴壁理论、膜世界理论等纷纷出现,极大地改变了人们的时空观。

这些理论主要从两个角度来考虑额外维度:一种是从经典层面出发,例如超引力的局域超对称性允许存在从最大11维到最小4维的时空;另一种则是从量子层面出发,例如一个自洽的、包含引力的量子理论(如弦论)要求存在特定维度的空间。

下面简要介绍20世纪70年代发展起来的超引力理论。对称性最早是19世纪初数学家们在研究一元多次方程解的置换规律时开始关注到的。伽罗瓦群的提出标志着描述对称性的群论雏形的产生。随后,高斯和卡耶利等数学家推动了群论的建立和发展,使其成为数学的一个独立分支。到了19世纪末,庞加莱等人将群论应用于几何学,研究了几何变换的对称性。后来,群论在拓扑学、数论里也得到了发展。在物理学中,对称性的研究起到了至关重要的作用,没有它,物理学的发展可能要推迟几十年!例如,庞加莱群推动了狭义相对论的发现,非欧几何为广义相对论奠定了基础,而规范对称性的研究对强相互作用理论(QCD)以及电弱统一理论的提出起到了关键作用。

超引力理论是基于超对称的引力理论。一般而言,超对称是指玻色自由度和费米自由度之间的对称性。该理论规定,对于每一个费米子(例如电子、夸克),都存在一个与之对应的玻色型伴随粒子,反之亦然。若在粒子物理标准模型里引入超对称,那么将会增加与原有粒子数量相等的超对称伴随粒子。实验学家们原本期望能在粒子对撞机中探测到这些粒子,从而验证超对称假设。然而,截至目前,即使是最先进的大型强子对撞机(LHC)也尚未发现这些粒子的存在。尽管如此,超对称性在理论构建方面的成就仍然是显著的。

正是在这样的研究背景下,超引力理论应运而生。它将广义相对论与超对称性相结合,旨在统一包括引力在内的所有基本相互作用。这一目标是极具挑战性的,因为它需要克服广义相对论在量子化过程中遇到的不可重整问题。研究表明,超引力

理论所允许的时空维度范围从4维到11维不等。然而,除了4维 $N=8$ 的超引力理论之外,其他高维超引力理论虽然在经典层面上并无重大问题,但在量子层面上却面临着紫外发散的挑战。综上所述,尽管超引力理论存在一些缺陷(如部分高维版本在量子层面的紫外发散问题),但它仍然是一个具有重要的理论框架,为后续超弦/M理论的发展提供了重要的基础和启示。

接下来,我们介绍弦/超弦理论以及M理论。值得一提的是,M理论作为一种高维超引力理论,在紫外完备性和量子自洽性方面均取得了显著成就。

要追溯弦/超弦/M理论的起源,需从1968年开始讲起。如前所述,广义相对论在量子化过程中遭遇了紫外发散的问题,而这一问题无法通过重整化方法得到有效解决。因此,若要实现引力与其他三种基本相互作用的统一,就必须对广义相对论进行一系列针对量子引力的重大改进。在探索量子引力的道路上,弦理论、圈量子引力、渐近安全引力、非对易几何以及全息原理等多种理论都进行了有益的尝试。其中,弦理论的发展尤为引人注目^[4]。然而,要使弦理论在量子层面上实现自洽,必须引入额外维度。这一需求无疑为额外维的存在性提供了坚实的理论依据。

弦理论的故事始于1968年。当时,物理学家们在研究用于描述强相互作用的数学模型——Veneziano振幅时,意外地发现它可以通过一维“弦”的振动来加以解释。到了20世纪70年代中期,弦理论的研究重点逐渐从强相互作用理论转向了发展统一的理论框架(包括量子引力)。弦理论的基本理念颇为简洁:宇宙中的基本粒子并非零维的点,而是一维的“弦”。弦的不同振动模式对应不同的基本粒子,而粒子的质量、电荷以及其他物理属性,则均由弦的振动频率和形态所决定。基于这些理念,物理学家们提出了玻色弦理论。为了让理论在量子层面自洽,宇宙得是26维的(25个空间维度加1个时间维度)。该理论的成功之处在于,其低维有效

理论能够描述 26 维时空中的爱因斯坦引力。换言之,基于“基本物质组成是弦”这一假设,我们同样能够推导出爱因斯坦的广义相对论。但是该理论也有短板——它描述不了已知的费米子(如电子、夸克等)。

后来,物理学家们在超引力理论的启发下,对弦理论进行了扩展,提出了超弦理论。在超弦理论框架中,量子自洽性要求时空维度为 10 维。通过对超弦不同构造方式的深入研究,物理学家们发现了一个有趣的结论:10 维超弦理论的低能有效理论正是 10 维超引力。这一发现为后来 M 理论的建立提供了重要线索。不过,在超弦理论的后续研究中出现了一个复杂的情况:符合量子自洽性的超弦理论并非只有一种,而是包括 I 型、II A 型、II B 型、HO 型和 HE 型五种类型。

直到 1995 年,弦理论领域的领军人物威腾通过深入研究五种超弦理论之间的对偶关系,提出了更基本的非微扰 11 维 M 理论。这一理论在一定程度上统一了包括超引力和超弦理论在内的超对称理论体系^[5]。尽管目前我们对超弦理论的非微扰特性尚缺乏深入了解,且完整的量子引力理论尚未建立,但超弦理论仍是当前最被看好的描述量子引力的大统一理论候选者。

四、大额外维与膜世界理论

在前面的讨论中,额外维度与我们生活的三维空间不同,它们并非无限延伸,而是呈现出“紧致化”的特性。这意味着它们可能缩小到普朗克尺度,从而超出了我们的直接感知范围。自 20 世纪 80 年代以来,基于不同额外维特性的各种新理论如雨后春笋般涌现。下面介绍其中一些典型的额外维理论。

4.1 无限大额外维理论(畴壁模型)

1982 年,Arkane-Hahn 创新性地将量子场论与额外维理论相结合,在一个六维平直时空的 Nielsen-Olesen 涡旋动力学模型中引入了希格斯场^[6]。这一理论揭

示,在低能区域,物质场(即基本粒子)能够实现局域化,并被限制在低维的畴壁上,从而无法感知到额外维的存在。而只有在高能状态下,粒子才有可能逃逸至额外维空间。这一理论被视为膜世界理论的早期雏形。

随后,在 1983 年, Rubakov 和 Shaposhnikov 提出了一种新观点^[7]:我们或许生活在一个 $3+N+1$ 维的高维闵氏时空里,其中的 N 个额外维空间与我们熟知的三维空间一样,是平坦且无限延伸的。他们以五维平直时空为例,通过引入一个沿额外维方向分布的背景标量场,成功构建了一个畴壁模型。在这个模型中,生活在五维时空里的基本粒子会与背景标量场发生 Yukawa 相互作用,从而感受到一个沿额外维方向的势阱。这一势阱能够束缚低能粒子,使其实现局域化;然而,高能粒子则能够逃逸到额外维空间中,如图 6 所示。

五维平直时空中畴壁模型的成功在于,通过考虑费米子与背景标量场之间的 Yukawa 耦合作用,可以得到被局域化在畴壁上的四维手征费米子。然而,由于该模型未涉及引力效应,因此未能导出牛顿引力平方反比律,这导致该额外维模型一度遭到搁置。直到厚膜模型提出后,畴壁模型才得到了进一步发展。

4.2 膜世界理论

20 世纪 90 年代前后,物理学家们在研究超引力理论时发现,弦还有更高维延展体的推广,这些

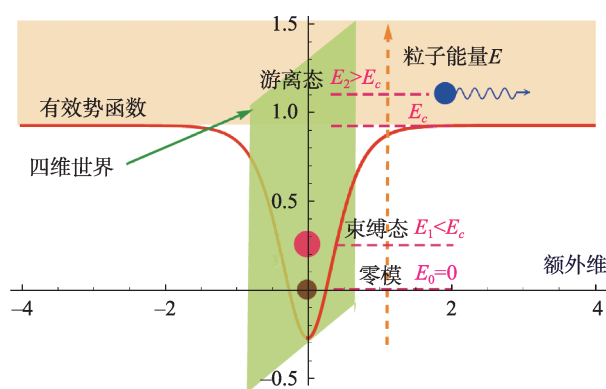


图 6 畴壁模型的图像^[8]

推广被称为“膜”。膜的动力学在弦理论的研究中占据重要地位,并构成了弦理论发展的一个重要分支。膜的一个重要代表是 D_p -膜(其中 p 代表膜的空间维度)^[9]。其衍生出的膜世界假设为解决规范层次问题的额外维模型提供了理论基础。膜世界图像的一个基本假设为:在10维时空里,有一个 $p+1$ 维的超曲面(即 D_p -膜)。标准模型中的物质场以及描述它们之间相互作用的规范场均被束缚在 D_p -膜上,而引力场则能够在整个时空中自由传播。这一概念对后来超弦理论的研究以及唯象额外维模型的建立产生了深远影响。

1998年,几位著名的高能物理学家 Arkani-Hamed、Dimopoulos 和 Dvali(ADD)借助于膜世界假设,提出了一种解决规范层次问题的新方法。这一问题源于四维引力能标(普朗克能标, $M_{\text{Pl}} \sim 10^{16} \text{ TeV}$)与电弱能标($M_{\text{EW}} \sim \text{TeV}$)之间高达16个数量级的差异。他们建立了一个 $4+N$ 维的大额外维模型,该模型亦被称为ADD膜世界模型^[10]。在此模型中,与KK理论相似,每个额外维均为一个圆形,但这些圆的半径远大于普朗克尺度,甚至可达到亚毫米量级。这正是“大额外维”名称的由来。基于膜世界理论的基本框架,在ADD模型中,所有标准模型粒子均被限制在一张四维超曲面(即膜)上,而引力子则可以在整个 $4+N$ 维时空里传播(如图7所示)。为

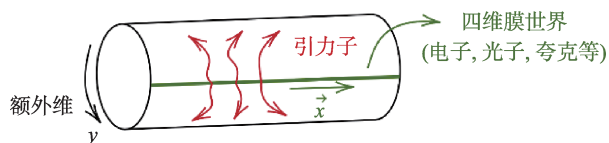


图7 ADD膜世界图像

解决上述规范层次问题,ADD模型假设高维引力的基本能标 M_* 与电弱能标处于同一数量级。四维引力能标被视为高维引力基本能标在四维空间的表现。它们之间的关系可通过以下公式表示: $M_{\text{Pl}}^2 = (2\pi r_c)^N M_*^{N+2}$, 其中 r_c 代表额外维的半径。通过适当调整额外维的半径,可使高维时空中的引力能标和电弱能标均为TeV量级,从而有效解决层次问题。此外,在超出额外维尺度时,四维牛顿平方反比定律将得以恢复。

在某种程度上,ADD模型利用大尺度额外维的概念,似乎解决了层次问题。但如果额外维的数量减少,模型就会出现麻烦,因为层次问题会转移至为何额外维如此之大的问题——例如,当 $N=2$ 时,额外维半径约为亚毫米量级,这远大于高维引力基本能标对应的尺度($\text{TeV}^{-1} \sim 10^{-19} \text{ m}$)。这是为什么呢?因此,这个模型并未完全解决层次问题。

很快,哈佛大学的教授 Randall 及其博士后 Sundrum 构建了卷曲额外维模型,即RS-I模型,通过膜世界更完美地解决了规范层次问题^[11]。在RS-I模型里,考虑膜对时空的反作用后,整个时空是五维的 AdS 时空。其中,额外维是具有 S^1/Z_2 对称性的紧致圆环对折后认同形成的有限线段。在额外维的两端各有一张平直膜(如图8所示):右端是可见膜(又称TeV膜),即我们生活的膜世界;左端是不可见膜(又称普朗克膜)。标准模型中的基本粒子被束缚在可见膜上,而引力则分布在整个高维时空中。

那么,RS-I模型是如何解决层次问题的呢?在该模型中,高维时空中引力的基本能标 M_* 和模型的

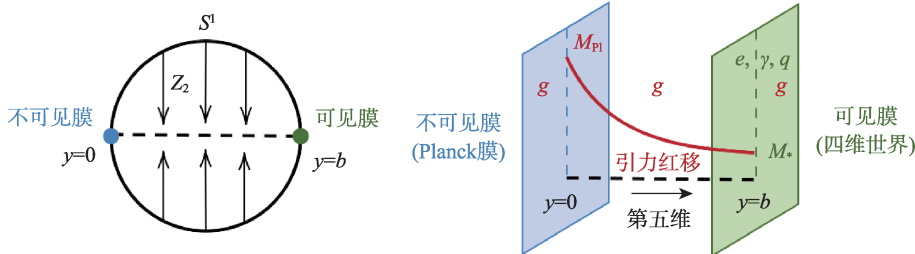


图8 RS-I膜世界图像

质量参数 k 均与普朗克能标相当, 即 $M_* \sim k \sim M_{\text{pl}}$ 。由于时空是以两个膜为边界的 AdS_5 , 可见膜上的电弱能标因度规中的弯曲因子产生的红移效应而被指数压低: $M_{\text{EM}} = e^{-kb} M_*$ 。而膜上的引力能标(四维引力能标)与基本能标满足关系: $M_{\text{pl}}^2 = M_*^3 (1 - e^{-2kb})/k$ 。因此, 只需将额外维的大小 b 设置为约 37 倍普朗克尺度(即 $b \sim 37/M_{\text{pl}}$), 即可解决四维时空中两个能标相差 16 个数量级的规范层次问题。此外, 该模型在高维时空中不会引入新的基本能标层次问题。因此, 可以说 RS-I 模型非常有效地解决了层次问题。此外, 在该模型中, 引力在大尺度上(即大于 $1/\text{TeV}$) 仍然满足牛顿平方反比定律。

RS-I 模型成功提出之后仅一个月, Randall 和 Sundrum 便提出了令人瞩目的 RS-II 模型^[12]。这一次, 他们没有继续探索层次问题的解决方法, 而是提出了一个新奇的想法: 在具有无限大额外维的情况下, 是否仍能实现我们现实世界中的牛顿引力? 他们将 RS-I 模型中右端的可见膜移至无穷远处, 并将标准模型中的粒子束缚在位于额外维坐标原点的膜上, 从而得到了只有一个膜世界的 RS-II 模型(如图 9 所示)。通过这些改动, 额外维从有限的变为了无限大的。通过计算这个模型中的引力微扰, 我们可以发现四维引力势为

$$V(r) = \frac{G_N m_1 m_2}{r} \left(1 + \frac{1}{k^2 r^2} \right)$$

由此可见, 膜上的引力由两部分组成: 一部分是四维牛顿势(第一项), 另一部分是额外维对引力势的贡献。与紧致额外维情况下分立的 KK 质量谱

不同, RS-II 模型中的引力子包含一个零模和一系列连续的 KK 质量谱。上式中, 第一项为引力零模的贡献, 而第二项则来自有质量 KK 引力子的连续谱的积分贡献。由于式中 k 的取值为普朗克能标, 因此当距离 r 远远大于普朗克尺度时, 修正项变得可以忽略。因此, 即便额外维是无限大的, 四维牛顿引力的结果依然能够得以恢复。

在 RS 模型取得巨大成功之后, 额外维的唯象研究得到了极大的关注。一些物理学家将研究重心从弦论和粒子物理转向对额外维的探索, 并提出了多个著名的膜世界模型。例如, 2000 年初提出的 Gregory-Rubakov-Sibiryakov(GRS)模型^[13]旨在研究超大尺度范围外引力是否仍然遵循四维牛顿平方反比律; 同年提出的 Dvali-Gabadadze-Porrati(DGP)模型^[14]揭示了膜世界中可能存在的引力屏蔽效应: 当超过某一距离后, 引力会迅速衰减, 类似法拉第电磁笼内电磁波无法逃逸的现象。其他模型不再赘述, 详情可参见综述文献^[8,15-17]。

4.3 厚膜模型

在上述膜世界模型中, 膜被假设为无厚度的超曲面, 基本粒子被束缚在膜上, 而引力可以传播到额外维。同时, 引力零模被局域化在膜上, 以恢复四维牛顿引力。随后, DeWolfe 等人^[18-20]基于膜具有内部结构的物理设想, 将畴壁模型与 RS-II 模型相结合, 提出了厚膜模型。在五维的厚膜模型中, 膜的内部结构通常由五维时空中的背景标量场来生成(类似畴壁的形成), 允许所有物质场(即粒子)分布在整個五维时空中。为了与四维粒子物理的观测结果一致, 该理论引入了物质场与引力及背景标量场的耦合机制。这一机制确保了各种物质场的零模(用于描述标准模型中的粒子)能够被局域化在厚膜上, 同时引力零模(用于描述广义相对论中的引力)也能被局域化在膜上。此外, 除了零模, 厚膜中还可能存在着有质量的 KK 共振态粒子, 它们准局域在膜上。从膜上的观测角度来看, 这些有质量的 KK 共振态粒子具有短暂的寿命。

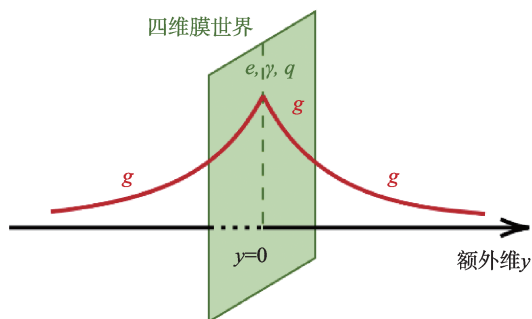


图9 RS-II 膜世界图像

五、实验与观测：如何验证隐藏的额外维度？

尽管额外维在理论上有丰富的解释和预测,但它们的存在目前仍被视为一种理论假设。为了验证这些额外维的存在性,物理学家们一直积极寻找实验证据。首先,欧洲核子研究中心的大型强子对撞机(LHC)为额外维的研究提供了重要的实验平台。在 高能状态下,粒子碰撞可能产生额外维理论所预测的 KK 粒子,如 KK 引力子、KK 标量粒子、KK 矢量粒子以及 KK 费米子等。其次,膜世界理论预言了膜上两质点间的引力势会受到额外维的修正,这些修正可能体现在小尺度上,也可能体现在大尺度上。在小尺度上,可以通过扭秤实验来验证牛顿平方反比定律是否仍然成立。在宇宙学尺度上,则可以通过观测引力波及其电磁对应体来验证是否存在大尺度的引力屏蔽效应。最后,结合额外维理论,一些天文学和宇宙学的观测也被用来检验额外维的存在。截至目前,尚未观察到额外维存在的实验迹象。

六、结语

隐藏的额外维度是现代物理学的重要研究前沿之一,它被视为探索新理论框架的关键,能够揭示新颖的时空观念,并有望统一引力、电磁力、弱力和强力等四种基本相互作用。KK 理论、超弦理论、M 理论以及膜世界理论都引入了额外的空间维度,为我们理解时空和引力的本质提供了新的视角。尽管这些理论仍面临诸多挑战,但随着实验技术的不断进步,未来我们有望深入探索这些隐藏维度,从而加深对宇宙的理解与认识。

参考文献

- [1] G. Nordström, On the possibility of unifying the electromagnetic and the gravitational fields, *Phys Z*, 1914, 15: 504.
- [2] T. Kaluza, On the problem of unity in physics, *Sitzungsber Preuss*

- Akad Wiss Berlin (MathPhys)*, 1921, 1921: 966.
- [3] O. Klein, Quantentheorie und fünfdimensionale relativitätstheorie, *Zeitsch Phys A*, 1926, 37: 895.
- [4] J. H. Schwarz, The early history of string theory and supersymmetry, 2012, arXiv: 1201.0981.
- [5] E. Witten, String theory dynamics in various dimensions, *Nucl Phys B*, 1995, 443: 85-126.
- [6] K. Akama, An early proposal of “Brane World”, *Lect Notes Phys*, 1982, 176: 267 15.
- [7] V. A. Rubakov and M. E. Shaposhnikov, Do we live inside a domain wall? *Phys Lett B*, 1983, 125: 136.
- [8] 刘玉孝, 钟渊, 杨科. 额外维与厚膜模型简介[J], *物理学进展*, 2017年02期.
- [9] J. Polchinski, Dirichlet branes and Ramond-Ramond charges, *Phys Rev Lett*, 1995, 75: 4724-4727.
- [10] N. Arkani-Hamed, S. Dimopoulos, and G. Dvali, The hierarchy problem and new dimensions at a millimeter, *Phys Lett B*, 1998, 429: 263.
- [11] L. Randall and R. Sundrum, A large mass hierarchy from a small extra dimension, *Phys Rev Lett*, 1999, 83: 3370.
- [12] L. Randall and R. Sundrum, An alternative to compactification, *Phys Rev Lett*, 1999, 83: 4690.
- [13] R. Gregory, V. A. Rubakov, and S. M. Sibiryakov, Opening up extra dimensions at ultra large scales, *Phys. Rev. Lett*, 2000, 84, 5928.
- [14] G. R. Dvali, G. Gabadadze, and M. Porrati, *Phys. Lett. B*, 2000, 485, 208.
- [15] R. Maartens and K. Koyama, Brane-World Gravity, *Living Rev. Rel*, 2010, 13, 5.
- [16] Y.-X. Liu, Introduction to Extra Dimensions and Thick Brane-worlds, [arXiv:1707.08541].
- [17] D. V. Ahluwalia, J. M. H. da Silva, C. Y. Lee, Y.-X. Liu, S. H. Pereira, and M. M. Sorkhi, Mass dimension one fermions: Constructing darkness, *Phys. Rept*, 2022, 967, 1.
- [18] O. DeWolfe, D. Z. Freedman, S. S. Gubser, and A. Karch, Modeling the fifth-dimension with scalars and gravity, *Phys. Rev. D*, 2000, 62, 046008.
- [19] M. Gremm, Four-dimensional gravity on a thick domain wall, *Phys. Lett. B*, 2000, 478, 434.
- [20] C. Csaki, J. Erlich, T. J. Hollowood, and Y. Shirman, Universal aspects of gravity localized on thick branes, *Nucl. Phys. B*, 2000, 581, 309.