

超弦 试图统一所有相互作用和物质

吴丹迪

(下)

五. 弦的相互作用

以上我们只讨论了自由弦。我们知道所有基本粒子都被当成弦(而不是点), 弦的不同运动状态表现为不同的自旋和质量。而目前可能观察到的粒子(表1)全都相应于弦的零质量状态。那么弦与弦是怎样相互作用的? 解决这个问题最好先发明弦的量子场论。我们知道, 点粒子的量子场论是把点粒子的波函数量子化; 超弦的量子场论, 则把超弦的波函数量子化。超弦的波函数是弦的座标(玻色的和费米的)函数。目前还没有找到比较圆满的场论方案, 因此描写超弦相互作用, 也还基本上停留在量子力学水平。

为了简化叙述, 让我们只讨论玻色弦的相互作用, 超弦并无原则区别, 只不过复杂一些。一种描写弦相互作用的方式是所谓橡皮图。一根开弦在时空中扫出一个象带子一样的世界面, 见图5。带子的两条边是弦的两个端点所画出的世界线。σ=0的一端用虚线表示。有定向和不定向两种开弦。不定向开弦两端没有差别, 把σ

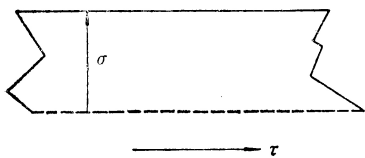


图 5

参数计算的起点改换一下, 这弦还是它自己。南布先生提出过一个定向弦的例子。他设想弦的一端带有夸克(带正色)而另一端带反夸克(带负色), 并规定σ的方向是从正色到反色。两根弦

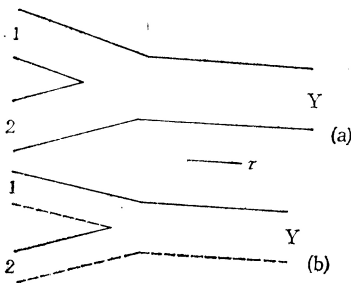


图 6

1和2的端点如果接到一起, 就形成一个新的弦Y(图6a、b)。对不定向弦, 任何两个端点都可以联结(a); 对定向弦, 则必须根据同性相斥, 异性相吸, 把正色与反色两个端点联起来(b)。如

果我们把图6的时间τ方向反过来, 就得到弦Y分裂成两根弦1和2的相互作用。1和2先结合成弦Y, 过后Y又分裂成弦3和4的作用表示在图7。如果弦是不定向的, 那么对同样的过程1+2→3+4就还存在另一种不同的作用方式——扭图(图8), 这里1+2

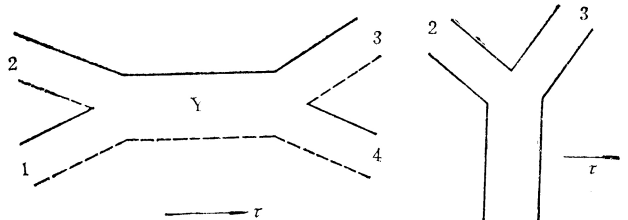


图 7

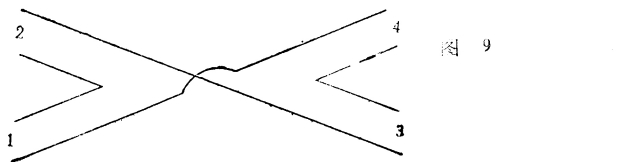


图 8

→Y与Y→3+4中两个Y的两个对应边相联。将图7象对付橡皮似地在水平方向压缩, 在垂直方向拉伸, 就得到图9。图7称为1+2→3+4的S道图, 它是1与2先结合成一个弦粒子共振态, 然后共振态衰变产生3和4两个粒子。而图9则称为同一过程的t道图, 它是粒子1放射共振粒子z变为4, 粒子z又被粒子2吸收使其变成3。

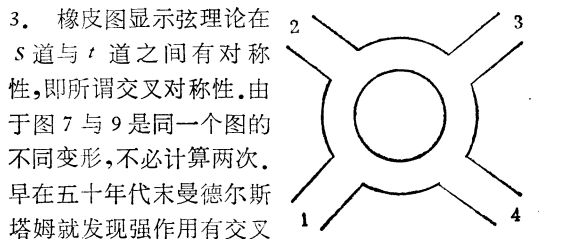


图 10

橡皮图显示弦理论在S道与t道之间有对称性, 即所谓交叉对称性。由于图7与9是同一个图的不同变形, 不必计算两次。早在五十年代末曼德尔斯塔姆就发现强作用有交叉对称性。

既然不改变联结关系,只改变图的形状,并不改变图所代表的过程,我们自然可以将图7改成如图10的圆形,取个不好听的名字,叫乌龟图。乌龟图不止可以有四个“足”,还可以有五个、六个等等,代表更复杂的过程。1,2,3,4等外线代表的粒子,是在过程的始、末态中找得到的,而图7中的 γ 叫内线粒子。它可以在形成以后先分裂成两个别的粒子,这两粒子又相遇变成一个,然后再衰变成3和4(图11)。这样的图也可以用一个中空的乌龟图表示(图12)。图11包含四个图6那种基本相互作用,而图7对于过程 $1+2 \rightarrow 3$

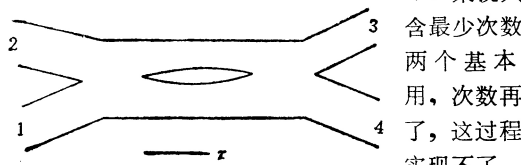


图 11

+4来说只包含最少次数的两个基本作用,次数再少了,这过程就实现不了。所以图11又称为高阶修正图或圈图,而图7则称为树图或最低阶图。在实际物理问题中,外线都是基态的弦粒子,这种粒子用一个点表示(图13a)。图13叫饼图。图11中间粒子所受的变化,换个说法也可以认为是一根弦(空洞下面的)在时间 τ 方向上演化,然后在逆 τ 的方向演化(空洞上面的弦),直到与出发点的弦贴合。所以中间粒子的演化可以用世界面环表示(图13b)。定向弦的环面是可以定向的。如规定图13b外沿

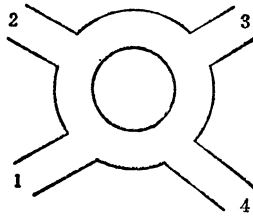


图 12

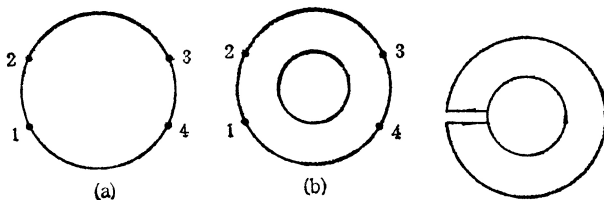


图 13

图 14

是顺时针的,内沿是反时针的(因与外沿颜色相反),则环面的方向指向纸面,在环面任一处用两根箭头相反的线切割环面(图14)可以特别清楚地看出环面的定向。对不定向弦,除了有图14那种可定向环面外,还可以有莫比厄斯带(图15)。莫比厄斯带是不能定向的曲面,以曲面上一点出发,不穿过曲面也不接触边沿,就可以找到通向曲面在出发点相反一侧的通路。

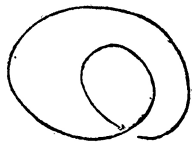


图 15

玻色弦基本相互作用如图16.1)表示弦的基本作用 2)开弦两端相联变成闭弦. 3)两根闭弦接触后变成一根新的闭弦. 4)闭弦与开弦接触变成开弦. 5)开

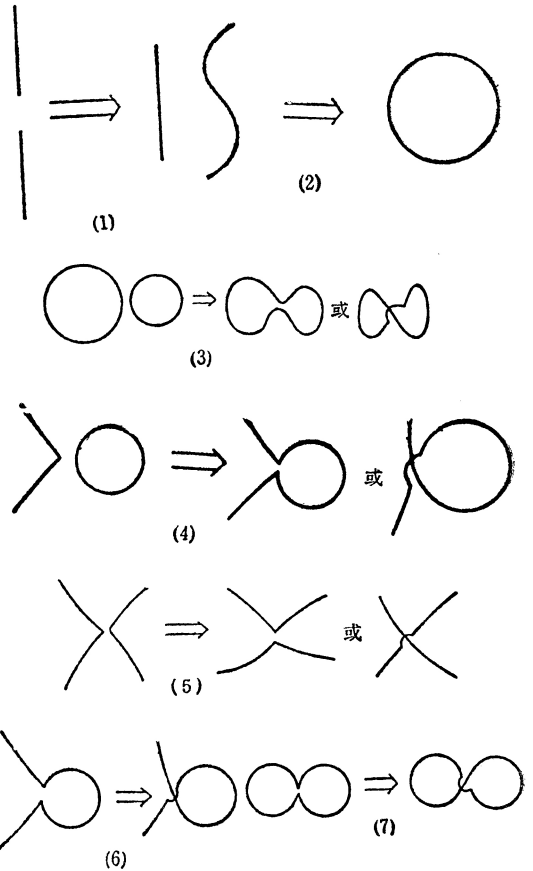


图 16

弦与开弦接触变成新的两根开弦。6)开弦的两中间点接触变成新的开弦。7)闭弦上两点接触变成新的闭弦。

其中凡发生扭的作用,例如6)和7)等等,对于定向开弦都不存在。

以上弦的相互作用都是点作用,即弦的两个点发生接触,其它点不接触。这同点粒子场论的定域相互作用的概念相符合。可是1985年魏腾先生提出了非定域作用机制。他把一根弦分成左右两段,在两根弦相互作用时,一根的左半段与另一根的右半段贴合,形成一根新的弦。魏腾弦没有闭弦,而且仅此一种作用方式。由于这作用与非阿贝尔规范势的相互作用有相似性,因此引起了兴趣。

图17

六、如何回到现实空间?

我们知道,超弦的量子理论只能在十维时空写出

来。可是我们生活的时空是四维的，这个矛盾怎么解决？如果 10 维时空的超弦理论是一个好理论，为什么我们只看见三维空间，而看不见另外六维空间呢？

为了回答这个问题，让我们先来看看空间维数的概念是怎样形成的。同一切其它概念一样，空间维数的概念也是在人类同自然界相互作用中产生的。因为人们可以前进或后退，左倾或右倾，爬上或爬下，而且所有多种多样的位移，都可以用这三个方向的位移适当组合而成，所以人们获得了空间有三维的概念。我们也可以利用发射或吸收光的方法来检验空间的三维性。总之人们是在发现某一维上的情况有变化以后才感知这一维空间的存在。如果人类既不能在某一维空间上造成变化，也看不见这一维传来的光信号，那么这一维空间对人类来说就是死的，觉察不到的。很可能这另外六维空间的情况就是这样，人类既不能“走进”去，也不能觉察里边出来的信号。这就是空间维数降低的现象。

让我们先在波动现象中找出维数降低的例子。因为我们习惯于三维空间，就来研究三维降为二维或一维的例子。我们知道，只有半波长比空腔线度小的波动才能在空间里形成驻波，并存在于空腔之中。声学里，长波声音低，短波声音高，所以低音提琴要比在低音区的小提琴大。现在让我们观察一个扁盒子，它在 z 轴方向很薄（图 18），高度为 l 。那么波长大于 $2l$ 的振动就只能在 $x-y$ 平面内形成波动。假如我们的仪器恰好只能

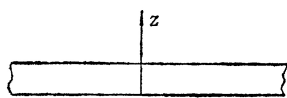


图 18

吸收和发射波长比 $2l$ 大许多的波动，而这种波是只能在 $x-y$ 平面上造成不同点的差异，在 z 轴上所有点的运动状态没有区别，我们就说扁盒子把长波波动限制到二维空间去了。这种波动的振幅只是 x 、 y 和时间 t 的函数，与 z 无关。 z 这一维空间对于长波波动来说是紧致掉了的，不可感知的。

量子力学认为一切粒子都有波动性，一个动量 p 的粒子的波长是 $\lambda = h/p$ 。如果一个粒子的波长比扁盒的厚度 l 大得多，那么它在盒子里也只知道 $x-y$ 平面， z 方向对它是紧致掉了的。要感知 z 方向的存在，粒子的动量必须大于 $h/2l$ 。

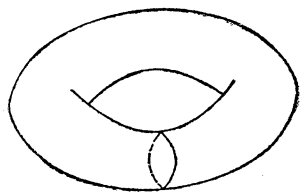


图 19

经过以上讨论，我们就可以理解超弦理论家们为高维时空构造的模型了。这模型可以抽象地用闭环面代表，而闭环面同自行车轮胎形状相似（图 19）。不过要理解这个抽象的示意图，还真要费点脑筋呢。首先要把这个闭环面的“面”当做十维时空，

也就是“车胎”的“胶带”才代表我们的十维时空，而带里边用来充气的空洞以及外面的空间都不是我们需要的，我们假定它们不存在。胶带本身——环面就是一切，其它都是无关的，而且还要想象闭环面上任一点都有一维时间和九维空间的活动方向。第二，闭环面有两种圆线，绕大圈的和绕小圈的（后者是图中有一半用虚线表示的圆）。任一点上在大圆方向的时空是四维的，在小圆方向有六维空间。第三，大圆的半径是无穷大，至少有一百亿光年那么大，一百亿光年是目前宇宙学认为宇宙的尺寸。而小圆的半径却只有普朗克长度那么大，即 10^{-33}cm 。要想感知这六维空间，就必须接受或发射动量大于 $m_p c$ 的讯号，这里 $m_p = 10^{19}\text{GeV}/c^2$ 是普朗克质量。这种讯号的能量要比 10^{19}GeV 还大，而这个能量对于人类来说可能永远可望而不可及。

你可能要问，为什么六维紧致空间的线度只有 $h/m_p c$ 那么小，而不能大一些呢？这个问题是由卡鲁查和克莱因两位先生回答的。他们发现要在紧致以后剩下的四维时空中得到正确的引力常数，紧致空间的线度就必须在普朗克长度量级。普朗克长度本来就是由引力常数和普朗克常数导出的量，所以他们的结果并不令人惊奇。按照卡鲁查-克莱因理论，十维时空的向量，包含四维时空的一个向量和六个标量。十维时空的二阶对称张量（54 个分量）包含四维时空的一个二阶对称张量（9 个分量），6 个向量和 21 个标量，等等。当十维时空按闭环面方式紧致起来时，超弦的物理也就这样变得丰富起来。有一点要注意的是，被紧致的六维空间虽然在图 19 中只用小圆线表示，实际上它的结构可以复杂得多。

七、几何学的新生

超弦理论为具有悠久历史的几何学分支——拓扑学提供了广阔的用武之地。也许只有进一步发展几何学才能解决超弦理论所面临的某些困难。在第五节我们曾讨论世界面的几何，那里有定向曲面和不定向曲面；在第六节又讨论了十维时空的几何，它的模型是闭环面。这些讨论不仅涉及时空一点附近的几何性质，还涉及大范围时空的几何性质。研究时空大范围性质（也叫整体性质）的学问叫拓扑学。超弦六维紧致空间的拓扑性质是最丰富和最有趣的。长期以来，物理学家都只对时空的局部性质感兴趣，因为差不多所有的运动方程都可以用微分形式表达。例如牛顿力学方程，麦克斯韦电磁方程等等，就连爱因斯坦的几何引力理论，也是用微分方程描写的。近来情况有很大变化，谈论拓扑学在理论物理学家当中成了时髦。

任何几何学都是研究图形在某种变换下的不变性质。例如全等理论研究图形在移动下的不变性质，相似理论研究图形在尺度伸缩下的不变性质等等。拓扑变换是可能想象的限制最小的变换，在这变换下，除

了图形的接触性质不变以外，其它都可以改变。所谓接触性不变是指，如果图形上的两个点可以通过在图形内的道路连起来，那么变换以后，这两点仍可以用图形内的道路连起来。拓扑学的概念需要严格定义，我们这里不讨论。我们仅仅指出，一个实心球经拓扑变换可以变成一个点；然而球面(不包括心)就不能变换成点，因为球面内的中空部分不属于所研究的图形，这个性质经拓扑变换后不应改变。如果除了保持接触性以外，还要求变换前后两图形上的点能找到一一对应关系，这样的变换叫做同胚变换。能通过同胚变换互相变换的图形称为同胚的。例如球面和玻璃杯的表面同胚，却与闭环面同胚。让我们再来介绍一些拓扑学上的简单知识及其在超弦理论中的应用。

如果图形上的任意两点都可以通过图形上的道路连结起来，这样的图形是连通的。例如闭环面是连通的。图形上的闭道路(又称环路)的种类数可以作为描写图形的拓扑性质的根据。那么环路是怎样分类的呢？一个环路如果可以通过在图形上的变换与另一个环路重合，就称这两个环路是同伦的。在图 20 中有三个平面上的环路，我们假定 P 点不属于平面。按上述定义 A 和 B 两个环路同伦， $A(B)$ 与 C 不同伦，因为 C 必须穿过平面外的点 P 才能与环路 A (或 B) 重合，

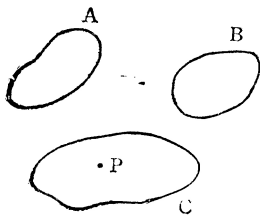


图 20

而这是一个拓扑上不允许的变换。显然，就同伦类来说，环路 C 的大小，形状和位置都不重要，关键是它将图形外的一点 P 包在其中。绕行 P 点两周的环路与绕行一周的不属一个同伦类。顺时针绕 P 点一周和逆时针绕 P 点一周的两个环路彼此不同伦；但是这两个环路之和却是一个不绕 P 点的环路，或绕 P 点零周的环路，与环路 $A(B)$ 同伦。绕 P 点零周的环路称为平庸的环路。我们可以在绕 P 点的所有环路与整数之间建立一一对应关系，并且可以象对整数那样对环路进行加法运算。我们描述这个情况说：有奇点的平面有一个整数同伦群。按这个说法，二维球面只有平庸同伦群，而闭环面有两个整数同伦群，一个由绕大圆的所有环路构成，另一个由绕小圆的所有环路构成。

除了同伦群以外，欧拉数也是一个非常有趣的拓扑学量。让我们用三维图形来说明欧拉数的概念。我们先将三维立体图形分割成许多小四面体，怎么分都可以，直到用大大小小的四面体充满我们的三维图形为止。设图形被分成了 V 块四面体。这些四面体的交界面都是三角形；原来三维图形的表面也给分成了许多三角形，设所有这些三角形的个数为 A 。这些三角

形的边都是线段，设线段的个数为 L ，线段交点的个数是 P 。点、线段、三角形、四面体等等分别称为 0 维、1 维、2 维、3 维等等的“单形”。欧拉数则定义为分割图形所得各维单形的交替和

$$X = P - L + A - V + \dots$$

这个定义可以推广到高维和低维的图形去。当分割方法改变时， P, L, A, V 等数都随之改变，但是欧拉数 X

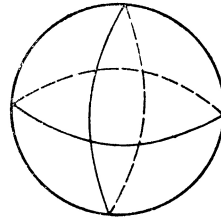


图 21

不变。例如球面可以用两根大圆线分割成四个球面三角形(图 21)，所以球面的欧拉数是 $X = 2 - 4 + 4 = 2$ 。

那么这些拓扑概念跟超弦有什么关系呢？魏腾先生认为被紧致的六维空间可以有非平庸的同伦群。纯规范势(其规范场强为零)绕非平庸环路的环路积分可以不为零，并引起超弦理论规范对称性的破缺。因此，在超弦理论中规范对称性的破缺与十维时空在普朗克标度下紧致到四维时空这件事密切相关并同时发生。超弦理论不用黑格斯机制来达到对称性破缺的目的。魏腾先生还发现，被紧致的六维空间的欧拉数的绝对值的二分之一，即 $\frac{1}{2} |X|$ 正好是夸克和轻子的代数，或者说

$\frac{1}{2} |X|$ 是不同种类左手中微子的个数。更有趣的是，两个费米子与一个标量粒子(它可能是费米子的伴子)的耦合常数的数值，取决于这三个场的乘积在非平庸环路上积分的数值。如果这些设想都能实现，那么一切物理量就都可以用群论来理解，从而失去了它们的神秘性。

顺便让我们强调，我们这里讨论的是“真实”空间的拓扑性质，例如被紧致的六维空间。在讨论磁单极和瞬子时，我们也遇到拓扑学问题，不过那里情形完全不同。讨论磁单极时我们假定黑格斯场的真空平均值有非平庸的拓扑结构。讨论瞬子时是讨论非阿贝尔规范势的非平庸拓扑结构。

八、展望和忧虑

上面介绍了超弦理论的某些侧面。从这肤浅的介绍中你也许可以得到这样的印象：超弦理论是雄心勃勃的理论。它要囊括一切相互作用，包括引力和一切物质。它动用了历代大师所创造的最深奥的理论工具。它不仅想证明这个理论是自洽的，还想证明它是唯一的：这个理论描写现存的宇宙，反过来，因为只有一种超弦理论能够成立。所以现在的宇宙必须是象它现在这样。

目前，超弦理论显示出许多成功的迹象，例如它包

含了引力作用,没有反常,有超对称性,对时空维数有限制,初步的计算结果都是收敛的等等。但是它也还有相当多的问题。要证明超弦理论的自治性,就必须认真计算它的高阶修正,但是由于还没有找到正确的超弦场论方案,所以不知从何下手。至于唯一性的问题就更困难。现在已经出现了十几种超弦模型,其中呼声最高的是普林斯顿一组科学家提出的杂化弦模型。杂化弦模型里只有闭弦,没有开弦。它由 26 维左旋闭玻色弦和 10 维右旋闭超弦杂凑而成。26 维闭弦先紧致到十维,被紧致的十六维空间按照卡鲁查-克莱因理论提供非常大的规范对称性, $SO(3^2)$ 或 $E_8 \times E_8$ 。一个最近引起重视的模型是前面介绍的魏腾模型,在这个模型中只有开弦,没有闭弦,而且相互作用是非定域的。超弦的不唯一性的更大的来源是时空紧致化,当高维时空紧致到四维时空时,被紧致的六维空间的拓扑性质有很多选择余地(据说有上万个)。当然,不管批评者如何评头品足,关键还要看一个新理论是否产生经得起实验检验的新结果。遗憾的是,尽管经过两年紧张的研究,人们还未能找到一项可以同实验比较的新结果。也许是因为超弦理论太复杂,需要花更多的功夫才能理解它。关于超弦理论从根本上看能否受到实验验证的问题也有争议。一部分人认为,由于 10^{19}GeV 这个能量对人类可望而不可及,而超弦的任何与其它理论不同的性质,只有到接近这个能量标度

时才表现出来,所以超弦理论永远不能受到实验检验。另一部分人则认为,在超弦的零质量粒子的物理现象中,如果考虑高阶修正,有可能找到对 10^{19}GeV 这个标度敏感的性质。

当问及著名物理学家对超弦理论的看法时,我们发现互相矛盾的评价。有人说超弦是最有希望的理论,最漂亮的理论。也有人说:“什么漂亮,不过是无穷多的谐振子!”

超弦也引起了理论物理学界的哲学争论。有人说超弦将是最终的理论;而另一部分人则认为先有最终的理论,然后再来研究物理学的具体内容,这不符合有史以来物理学的发展规律,更不要说是否存在一个最终的理论。有一种看法认为,现在之所以有这么多人研究超弦,是因为建造大加速器费钱费时,新实验资料产生的周期拉长,唯象研究题目难找。所以人们只好在相对来说纯理论的领域,例如超弦方面找题目。一位著名物理学家担心,物理学正在返回中世纪黑暗时期,当时人们推崇亚里士多德,只追求理论的形式美。不同“美学”派别的争论是不准备同实验比较来判别高低的。

总之,超弦理论在近两年有了飞跃的发展,现在投入超弦研究的理论物理学家正在日益增多,其中有很多优秀的青年。我们相信这方面的研究一定会在人类思想宝库中增添新的精华。