

超弦理论概说

邱 荣

(福州大学物理系,福州 350002)

粒子被看作是长为 10^{-33}cm 的一维弦,在相对论玻色弦基础上引入描写费米子的坐标,便成超弦。几乎可以说,由超弦理论本身要自治的要求,便可统一地描写引力、电磁力、强力和弱力。它要求时空是 10 维的,对规范群有严格的限制,目前尚只有 $SO(32)$, $E_8 \times E_8$, $O(16) \times O(16)$ 规范群才导致没有手征反常的规范理论,同时可自由调节的参数特别少,只有弦张力、规范耦合常数和引力常数三者中之二。

爱因斯坦从 1925 年起,致力于当时已知的两种力——引力和电磁力的统一,一直到 1955 年逝世为止,仍没有成功。但他的思想影响着后人。终于温伯格在 1967 年、萨拉姆在 1968 年各自独立地提出统一电磁力和弱力的规范理论。他们认为这两种力在高温下是同一种力,并预言存在中性流及传递弱力的 Z^0 , W^\pm 粒子。1973 年,在实验上发现了中性流。1979 年温伯格、萨拉姆、格拉肖因而获得了诺贝尔奖金物理学奖。1983 年又找到了 Z^0 和 W^\pm 粒子。发现它们的鲁比亚、范德梅尔在 1984 年也获得了诺贝尔奖金物理学奖。电弱统一理论的成就,鼓舞人们进而欲把电磁力、弱力和强力统一起来。当想把引力也包含在内时,碰到了无穷大问题,即当把引力理论量子化时,遇到了不可重整化的发散的困难。广义相对论因而和量子力学不相容。出路何在呢?

人们认识到出现无穷大的困难,是由于把相互作用的物体看作点粒子。由牛顿引力理论

$$F = G \frac{mM}{r^2} \quad (1)$$

知,质量为 m 和 M 的两物体的距离 $r \rightarrow 0$ 时,相互作用力 $F \rightarrow \infty$ 。所以无穷大的问题是由于传统理论把物体看作点粒子而带来的。

同时,1968 年 Vineziano 猜测了一个与量子场论无关的函数能很好地描写强子的许多特征。两年后,南部阳一郎和 Susskind 证明,使

物理

用这个函数计算粒子的性质就相当于把粒子看成一维的弦。

因此启发人们应该用一维弦来表示粒子,而放弃 300 年来习惯用的点状结构来描写粒子。于是便发展成超弦理论。

一、什么是超弦理论呢?

首先,它把粒子看作是一维的弦而非点状结构。弦有开弦和闭弦。前者象琴弦,有端点;后者象橡皮筋,没有端点。因为弦有线度,弦长为 10^{-33}cm ,所以象琴弦一样有振动。琴弦的振动频率有基频和泛频之分。设琴弦长为 l ,则第 n 个泛频频率为

$$\nu_n = \frac{c}{\lambda_n} = n \frac{c}{2l}, \quad (2)$$

或

$$\lambda_n = \frac{2l}{n}.$$

如图 1 所示, $n = 0$ 时,琴弦不振动,频率为零,波长为无穷大 λ_∞ ; $n = 1$ 时, $\nu_1 = \frac{c}{2l}$ 为基频。所以,第 n 个泛频频率是基频的 n 倍,其波长 λ_n 是 λ_1 的 $\frac{1}{n}$ 。由于端点的反射作用,琴弦上的振动形成驻波。它与行波不同,驻波里的每一点的振幅不随时间改变,而行波中振幅的最大值随着时间向某个方向运动。开弦各振动模式

间的关系和琴弦相似。由于开弦端点没有固定,所以 $n=0$ 时,可以描写弦的匀速直线的整体自由运动。开弦端点也能反射弦上的波动而形成驻波, $n=1$ 时,称为元振动模式。和琴弦相似,其他第 n 个振动模式的频率是元振动模式频率的 n 倍, $n=1,2,\dots,\infty$ 。弦振动就相当于无穷多个谐振子的谐振动。闭弦振动模式间的频率也有整数倍关系。由于没有反射波的端点,所以有左旋和右旋的行波。

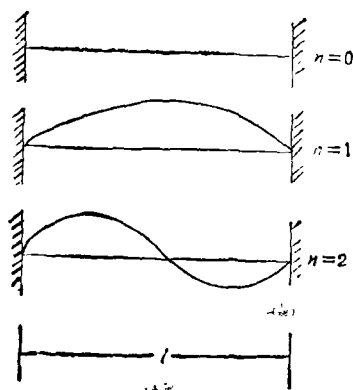


图1 琴弦的振动

波动性和粒子性都是粒子的特性,两者是等价的,因而基本单弦的每一种振动模式都对应一种粒子。根据量子力学谐振子的能量 $E_{N_s} = \left(N_s + \frac{1}{2}\right) \hbar \omega$,所以粒子的能量和质量是由振动频率决定的。而谐振动模式频率由弦张力 T 所决定。

其次,它只存在一种基本的相互作用,就是弦的分裂和接合。当开弦相碰时,它能通过端点的接触和连接而形成第三根弦,然后这第三根弦形成最终的两根弦。开弦的两端点还能对接成闭弦,所以开弦理论中还会有闭弦。

第三,弦理论中引入了超对称变量,即形成了超弦理论。光子、引力子、中间玻色子等粒子的自旋具有整数,称为玻色子;而电子、质子、中子等粒子的自旋为半整数,叫做费米子。超弦理论就是在相对论玻色弦理论的基础上引入描写费米子的坐标,这样就能同时描写玻色子和费米子。“超对称性”即指玻色子和费米子之

间存在的对称性。玻色子都有其超对称伙伴费米子,费米子都有超对称伙伴玻色子。也就是玻色子和费米子可以组合在一些有同样质量的超多重态中,而且两者数目相等。

二、超弦理论有哪些特点呢?

1. 几乎由超弦理论本身要自洽的要求,便可实现四种力——引力、电磁力、强力和弱力的统一;由它得出的四种力是一种基本力的不同表现形式。因为在闭超弦的零质量状态中有自旋为 $2, 3/2, 1/2$ 和 0 的粒子,在开超弦零质量状态中有自旋为 1 和 $1/2$ 的粒子,这些粒子在对称性自发破缺时会得到不同的质量,而且都比普朗克质量 $m_0 = 10^{19} \text{GeV} \approx 10 \mu\text{g}$ 小得多,所以有可能把超弦的各种零质量粒子辨认为已经发现的轻子、夸克、规范粒子等以及它们的超对称伴子。如表1所示,夸克、轻子和规范粒子是标准的电弱规范理论所要求的,引力子是量子引力理论所要求的,伴子则是超对称理论所要求的。开弦两端点能连接成闭弦,所以任何开弦理论同样还含有闭弦理论,而闭弦理论中包含自旋为 2 的引力子,略去引力子闭弦便不自洽,所以在超弦理论中,若包含例如电磁相互作用这类杨-米尔斯力,便必须也包含引力。这样,超弦理论就包括了引力,把四种力统一在超弦之中,而且是一圈图有限的,高圈图也可能是有限的。

表1 现代粒子理论中设想的粒子

粒子的名称	自旋	质量(GeV)	发现否?
夸克、轻子	1/2	0—40	✓
费米子伴子	0	?	×
规范粒子	1	0—100	✓
引力子	2	0	×
引力伴子	3/2	?	×
黑格斯粒子	0	?	×
规范伴子	1/2	?	×

为何超弦理论会是有限的呢?因为它除零质量状态可辨认为已发现的粒子外,还存在无穷多个质量是普朗克质量整数倍的状态。可能

是由于后者的存在,改善了超弦理论的收敛性. 正如函数 e^{-x^2} , 对所有实的 x^2 值都是有限的, 可是将其展开:

$$e^{-x^2} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} (-x^2)^n, \quad (3)$$

则右方除 $n=0$ 是有限的, 其他项在 x 趋于无穷大时, 都趋向无穷大. 只有把右方所有各项都加在一起, 才得到左边收敛的指数函数. 因此, 很可能只有把超弦的所有质量状态加在一起, 才显示出超弦理论的有限性, 因而解决了引力理论量子化的无穷大困难.

2. 超弦理论的自洽性要求时空是 10 维的. 我们生活在其中的时空是四维的: 一维时间, 三维空间. 可是以往的牛顿力学、电动力学、广义相对论和量子场论, 既可以在四维时空, 也可在任意维时空写出它们的公式. 没有任何现象可以说明上述理论只能在四维时空成立而在其他维时空不成立. 但是超弦理论却与众不同. 由于弦的运动扫出了一个二维曲面, 而二维曲面在共形变换下是不变的, 这就导致了只有当时空维数 $D=10$ 时, 才能量子化. 于是, 超弦理论就成为对时空维数有严格限制的第一个理论. 在日常生活中, 我们所感觉到的四维时空仅是 10 维时空表现出来的维数, 而其余六维卷缩起来形成一种非常小的结构, 小到不能直接看到它. 六个卷缩维度很可能近似为弦的长度 10^{-33}cm .

3. 超弦理论对规范群作出了严格的限制. 目前尚只有 $SO(32), E_8 \times E_8, O(16) \times O(16)$ 规范群才导致没有反常的手征规范理论.

超弦理论如果要给杨-米尔斯力以现实的量子说明, 除要求只有四个可观察的维度外(其中六维必须是卷缩的), 还必须导致可观察到的弱力是手征的, 即左右不对称的. β 衰变 $n \rightarrow p + e + \bar{\nu}$ 是弱相互作用力引起的, 式中反中微子 $\bar{\nu}$ 是右旋的, 即 $\bar{\nu}$ 的运动方向和它的自旋方向是一致的, 如图 2(a) 所示. 其相应的镜反射物——左旋反中微子 $[\bar{\nu}]$ 的运动方向和其自旋方向相反, 如图 2(b) 所示] 在自然界是不存在的. 实际上, 弱相互作用力引起的

许多效应, 其镜反射的对应物在自然界是不存在的. 这个现象我们称弱相互作用是手征的(即手的方向性). 手征的量子规范场论似乎要破坏某些守恒定律, 例如破坏电荷守恒定律. 这种破坏我们称为“手征反常”. 手征反常标志了规范不变性的破坏, 因此理论是不自洽的. 要找到一种理论既是手征的, 但又无手征反常, 在 10 维时空里, 过去人们认为是不可能的. 1984 年 8 月 Green 和 Schwarz 证明, 当规范群是 32 维的特殊正交群 $SO(32)$ 或 $E_8 \times E_8$ 中的一种时, 手征反常恰好抵消了, 所以就可以在 10 维时空中定义一个没有反常的手征规范理论, 而且在取 $SO(32)$ 时, 单圈图散射振幅的发散项也恰好抵消. 现在又知 $O(16) \times O(16)$ 群也可导致没有反常的 10 维手征规范理论. 因此, 超弦理论的自洽性要求, 导致了对规范对称群的严格限制. 这是非常令人兴奋的事, 因而引起物理学界对超弦理论的极大兴趣, 形成了研究超弦理论的高潮.

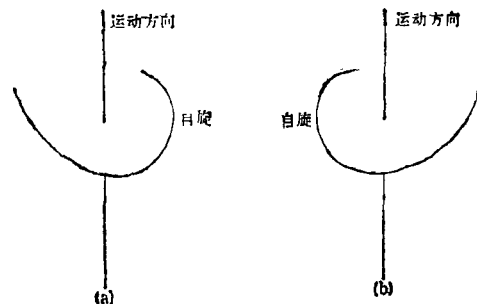


图 2
(a) 自然界存在的右旋反中微子 $\bar{\nu}_e$; (b) 自然界不存在左旋反中微子

4. 超弦理论具有自由参数特别少的优点, 只有弦张力 T 、规范耦合常数 g 和引力耦合常数 K , 庞加勒不变性又进一步要求 $K \sim g^2 T$, 因此自由参数实际上只有二个.

超弦理论最大的问题是至今尚未找到一项可以同目前实验可比较的新结果. 同时, 要证明超弦理论是自洽的, 还必须认真计算它的高阶修正, 但是由于尚未找到正确的超弦场论方案, 所以尚不知从何入手. 这些问题都急需研究解决.