

著名物理学家谈超弦

(一)

编者按

超弦理论是近年来理论物理研究最热闹的一个题目之一。1988年初,英国BBC电台,播出了一个名为“竭尽全力搜寻超弦”的节目。请了几位著名的物理学家,包括超弦理论的倡导人以及几位诺贝尔奖金的获得者,就有关超弦问题回答了记者的提问。这些谈话有助于人们了解超弦理论的历史背景、它的主要内容、包含的物理思想以及存在的各种问题。在此,我们选编其中的一部分,以飨读者。

一、与约翰·施瓦兹的谈话

约翰·施瓦兹(John Schwarz)是加利福尼亚理工学院的物理系教授。他的早期工作,特别是与格林(Michael Green)合作所做的工作,推进了超弦理论的研究,使其由一潭死水而变得热气腾腾。

问:用弦做为基本粒子模型的想法,已经有一段相当长的历史了。关于它的早期阶段,您能谈点什么吗?

答:弦理论有着一段不寻常的历史。起初它想解决的问题与今天所讨论的完全不同。那是在1968—1970年左右,人们企图用它来解释核子内部的强相互作用力。在这方面它取得了一些成果,但始终未能完全成功。到了七十年代中期,量子色动力学(QCD)诞生了。做为描写强相互作用的一种理论,它取得了公认的成就。随着QCD理论的发展,尽管人们对弦理论曾做过许多工作,大多数人还是放弃了这方面的研究。我没有这样做,当时我正与一位法国物理学家舍科合作,我们注意到在人们企图用弦理论描写核子内部强相互作用力时,遇到的一个问题是该理论总是给出一种特殊的粒子。它没有质量,具有两个单位的自旋角动量,在核过程中没有与之对应的东西。然而,我们

知道,它恰是在爱因斯坦广义相对论中碰到的那种粒子,称为引力子。

引力是与核力完全不同的一种力。在通常的情况下,它极其微弱。自从我们发现了弦理论中的这个粒子就是引力子之后,决定放弃用这个理论来描写核力的做法,看看能否用它描写引力而同时又能把其它几种作用力都纳入进来。当然,这要求我们在观念上有一个巨大的改变。因为,这样的弦比原来设想的弦要小得多。

问:这里所谈的是怎样的一种大小呢?

答:当我们用弦描写核子时,它有着核子的典型尺度,即 10^{-13} 厘米。而当我们用弦描写引力时,有一个由引力结构所决定的自然尺度,这就是所谓的普朗克长度。这两个尺度相差 10^{16} 倍。可以打个比方。如果把普朗克长度看作是一个原子的尺度,那么原来的原子就相当于太阳系这么大。因此,当我们用弦来统一各种力时,我们谈论的是一种不可思议的微小距离。

这样又经过了五年,1974年我们形成了用弦描写引力和统一其它各种作用力的一种想法,我和舍科就这一想法继续进行了研究。不幸的是舍科不久就去世了。1979年起我和格林开始了合作。

问:旧的弦理论是如何看待中子和质子的呢?

答:按照20年前盖尔曼和兹维格的理论,中子和质子这类强作用粒子称为强子;它们都是由三个夸克组成的。这些夸克靠某种力束缚在一起。可以把它们设想为一种弹性体或一种弦,夸克是这些弦的端点。

问:这种思想的主要困难是什么呢?

答:有这样几个困难。一个是前面已经提到的,从数学上看,不可避免地要导致存在一个自旋为2、无质量的粒子,它在与核子有关的粒子谱中没有合适的位置。

另一个困难,也是更令人感兴趣的困难,就是

这个理论的自洽性要求时空的维数要大于四。最早提出的弦理论,要求这个维数为 26。1971 年我和拉蒙(Ramond)、内维(Neveu)一起改进了它,把这个维数减少为 10。事实上,今天流行的 10 维超弦理论是在此基础上发展起来的。用这样的弦描写核子,维数显然就是一个严重的问题。我们只知道有三维空间和一维时间。如果你想要的是一个真实的理论,那就根本没有什么余地留给那些多余的维数。

问:当时,您是不是希望对这种理论做某种改造,从而得到一个自洽的四维理论呢?

答:是的。在那以后的几年中,包括我自己在内,做了很大的努力,企图改造这两种理论,使其成为只有四维时空而不是 10 维或 26 维。在这方面,曾经提出过不少饶有兴趣的建议,但往往都是从一个数学上非常漂亮的体系出发,越变越丑,越不能令人信服,最后不可避免地成为不自洽。

问:据说原来的弦理论的另一个问题是存在一种运动速度超过光速的粒子(快子),它是不可避免的吗?

答:在 26 维玻色子弦理论中,它确实是不可避免的。相比之下,10 维理论有一个优点,它提供了通过修改理论而去掉这些快子的可能性。众所周知,快子的存在是与基本原理不相容的。

问:旧的弦理论总还有些成功之处吧?

答:是的,这正是这种理论能够发展的原因。它抓住了核力强作用理论中应具有的一般特征,其中包括高能粒子如何相互作用,粒子的质量、角动量及这些量之间的关系等。

问:今天看来,似乎不必用弦来描写核子,靠 QCD 就足够了。这种说法对吗?

答:今天,人们已经普遍承认 QCD 是一个描写核子强相互作用的正确理论。然而,把量子色动力学适当地重新表述,仍有可能使弦起重要作用。当然,这个弦与 15 年前提出的弦有着完全不同的数学行为。它的精确结构正是我们今天知道的,非常流行的超弦理论。

问:弦理论的命运的真正转折点是什么呢?

答:它始于 1980 年,当时我和格林合作继续发展 10 维弦理论的研究工作,这种理论有一个重要的特点,即超对称性。正是它把弦理论推到了粒子物理的前沿上来。

我们知道,所有的基本粒子不是属于玻色子就是属于费米子,无一例外。这两种粒子有两个重要的方面不相同。首先,它们携带的角动量,即自旋,不相同。玻色子的自旋是一个基本单位的偶数倍,而费米子的自旋是同样单位的奇数倍,另一个不同点它们的量子力学行为不同。当交换两个全同的玻色子时,描写该系统的量子力学公式

不受影响,而交换两个全同的费米子,相应的量子力学公式会出现一个负号。超对称性却能把这两类粒子纳入统一的描写之中。

问:有人说,费米子可以看作是实物粒子,玻色子是实物粒子之间传递力的媒介粒子,这种说法对吗?

答:我认为这是一种很好的说法。象夸克和轻子都是费米子的例子,而光子和引力子都是玻色子的例子。

问:您曾提到超对称性是现代弦理论的真正基础,这一点是如何实现的呢?

答:说来话长。1971 年提出的 10 维弦理论第一次引入了超对称理论。1976 年超对称被推广到引力理论,从而建立了超引力理论。超对称弦理论与超引力的结合就成为今天的超弦理论。

通常,人们把引力理论量子化总会遇到所谓的发散困难。它很类似于一个数被零除,是一种不可能完成的运算。这实际上是那些把基本粒子看作一个数学点的所有理论所具有的普遍特点。

弦理论的重要发展是用弦代替了这些点。我和格林经过几年的努力发现超弦理论有一个相当激动人心的结果就是计算弦理论中引力的量子力学修正时,得到了不再发散的有限表达式。

与此同时,我们还发现,超弦可以有两种。其一是所谓的开弦,它们有着自由的端点。另一类弦是一些圈,称为闭弦。最初的理论中这两类弦同时存在,今天看来,只有闭弦的理论最有成功的希望。

在自然界中还有一个重要事实需要用基础理论阐明,这就是人们在低能弱作用下熟知的宇称不守恒,理论家们称之为左手和右手的手征性存在着差别。弱电统一的标准模型显然具有这种性质。

当时已存在的几种超弦理论除了一种之外,都具有这种左右不对称性。但不幸的是与此同时还包含一种新的不自洽性,使理论有垮台的危险。这是一种称为“反常”的问题,简单的讲是这样的,一种具有某种对称性的经典理论,只是考虑了量子力学效应就使对称性遭到了破坏,人们则称之为有反常存在。这样的理论不能认为是一种有意义的自洽的理论。这种反常总是与理论具有左右不对称而同时存在的。

1984 年我和格林对于一种超弦理论做了详细的计算。我们惊奇地发现,尽管的确有反常,但最初定义这种理论时使用的特殊对称性结构有选择的自由,一旦选择了某种特定的方式,反常会奇迹般地消失。所有其它的选择不能做到这一点。能够导致自洽理论的这种特殊的对称性结构的名字叫 $SO(32)$ 。

后来人们又发现 $E_3 \times E_3$ 这种结构也可以有类似的作用。而且由它建立起的超弦理论最有希望容纳已观察到的基本粒子现象，因而使人更感兴趣。

问：这些理论必须以超过四维的时空来描述，为什么不再是一个问题呢？

答：只要我们放弃用弦描写强核力，而用它描写引力和其它的力，这些多余的维数就变成了优点而不再是缺点。这是因为引力是一种时空的几何学理论，由于几何学上的一些推论，多余的维数会蜷缩成某种很小很小的小球。所以这种理论允许多余的维数存在，理论本身会告诉你这些多余的维数发生什么变化。

问：这些小球会有多么小呢？

答：这个尺度就是前面提到的普朗克长度， 10^{-33} 厘米。这是一个不可思议的小距离。这就是说，空间的每个点，或者说，我们所认为的空间的点，事实上，是一个 10^{-33} 厘米大小的一个六维小球。它们太小了，我们是探测不到的。

问：我们怎样来研究这些弦呢？象电子或夸克这样的粒子，在某种意义上也应当看做是弦吗？我们是否认为它们的内部有些小的闭合的圈呢？

答：我想，情况还不完全是这样。弦可以以不同的方式振动，每一种振动模式可以看作描写一类粒子。这就是说可以只存在一种弦，而电子是一种振动模式，夸克是另一种振动模式，引力子是又一种振动模式等等。

问：您在前面提到， $E_3 \times E_3$ 对称构成的超弦理论最有希望，这两种 E_3 有什么具体意义吗？

答：这一点还不完全清楚。目前认为，在现在可以达到的能量范围内，实验上已知的粒子物理对称性是其中一个 E_3 的一部分。另一个 E_3 对称性描写一类新的物质，人们称之为“影子物质”。它们与我们所熟悉的物质或者完全不发生相互作用，或者只有极弱的相互作用。

问：这种影子物质会不会就在我们谈话时穿过这个房间，而我们完全不知道呢？

答：是的。但你仍然可以通过引力对它们加上某些限制，我们与影子物质共享一种引力。如果有影子星体，尽管用光看不到它们，通过引力效应会发现它们。

问：目前有没有这些影子物质存在的证据呢？

答：没有。然而，它的存在是与我们已知的宇宙的知识相容的。有证据表明，宇宙中可见的物质只能解释宇宙总质量大约百分之十左右。因此，即使宇宙有一半质量是这些影子物质，仍然不会有矛盾。余地还大得很。

问：据我所知，超弦理论的一个重要的问题是多余的

六维空间蜷缩成什么样的特殊形态。您是否认为这是一个难以克服的障碍呢？

答：是的，这或许可以看作是理论存在的两个最基本的问题之一。假如我们能知道这多余的六维空间究竟是什么样子，我们就会有极大的能力计算我们要知道的各种东西。虽然这个空间小到不可观测，但它的细节却对确定可观测粒子的性质起重要的作用。例如，基本粒子为什么只有三代，一直是个谜。但这个代的数目却是与这个多余空间的拓扑性质密切相关。

问：除此之外，您认为该理论还有什么最突出的问题呢？

答：这个理论精确的而不是近似的表述方式问题。或者用行话来讲，这个理论的非微扰形式而不是今天靠逐级微扰近似来表述的问题。从超弦理论目前状况看，我们知道了一些方程式，但没有能深刻地了解作为这些基本方程式基础的基本原理。这一进程与爱因斯坦的广义相对论的发展史正好相反。爱因斯坦是从一个漂亮的原理——等价原理做为出发点，从它构造了一些方程式，然后研究这些方程式。这里还没有找到与等价原理相当的基本原理。

问：这个理论能预言一些可以被新一代加速器发现的粒子吗？

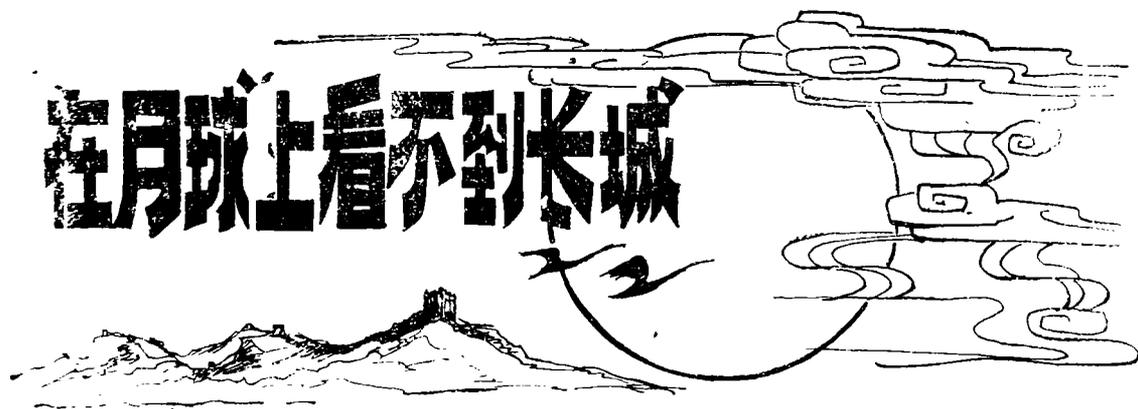
答：假定我们成功地找到了基本原理并给出了方程的解，那时我们可以了解多余的六维空间的拓扑性质，从而可以知道低能下会有哪几种粒子，它们的质量比以及相互作用的强度。这些正是实验家需要的信息。肯定会有些特发现的粒子，例如与超对称有关的粒子，那时我们就能够对可以用实验检验的一些问题做出预言。

问：人们把超弦理论称为“包罗万象”的理论，因为这个理论的终极目标是要解释所有的粒子以及所有的力。经常听人讲，历史上曾有过一些时期，“包罗万象”的理论即将实现，但后来总是错的。超弦理论的命运是否会不一样呢？

答：我想，所有以前曾经成功过的统一的理论都是部分的统一；只能描写已知的某些粒子和某些作用力。近年来，电磁力和弱作用力的统一取得了巨大的成功，后来又扩充到包括强作用力，但引力仍留在了外边。

超弦理论作为包含引力而同时又能描写其它各种作用力的候选者，还是第一个例子。它的数学结构如此严密，以至于你实际上不能对它作任何改变。假如它还能成功地描写实验结果，很难想象这种理论会是某种更好的理论的一种近似。

问：让我们从乐观的方面来看一看。假定一切进展顺利，那末本世纪末就会做出我们可以观测的预言，



王 龙

有些事情,人们都那么说,人云亦云.而听的人不去深究是不是真是那么回事,或者明知道不是那么回事,也不去捅破那层窗户纸,而去以讹传讹,就象皇帝的锦衣一样.关于“长城是在月球上唯一可以用肉眼看到的地球上的建筑物”这一说法就是一例.它是不久前一位外国人说的.从此以后,中国人把这句话奉为真言.这也不奇怪,因为中国的有些事情往往要由外国人来评判.

要判断这种说法的是非,并不需要非常高深的理论,也不必再乘登月火箭去实地考察一番,只需看看电视节目中放映的卫星云图就可以了.在没有云的云图上,几时曾见到过长城?从月球上用肉眼观长城,肯定没有从人造卫星上看更清楚.

在月球上用肉眼看不到长城的原因也不难理解.因为我们要看得见一个物体,其线度必须超过眼睛的空间分辨能力.这一分辨能力相当于一分到三十秒的视角.这一限制是由视网膜上锥形细胞的排列密度以及光线在眼球内的衍射过程所决定的.按这一限制,如果一个物体的线度小于从这个物体到眼睛这段距离的几千分之一时,无论多么好的眼力是看不到这一物体的.按此计算,在几百公里高度的人造卫星上,人眼

只能分辨地面一百米以上的线度;在距地球 38 万公里的月球上,只能分辨地面上千公里以上的线度.

这里所说的线度,既指物体的长度也指物体的宽度.因为单眼视觉所感受的,是一个二维形象.如果只有长度满足眼睛的空间分辨要求而宽度不满足,也是看不见物体的.例如把一根长一米的头发挂在一百米远的地方,同样是看不见的.

从月球看长城,正如从远处看一根头发.长城全长 6700 公里,从月球上看,它满足空间分辨的要求,但其宽度只有十米左右.因此,它与其它的建筑物一样,从月球上用肉眼是看不到的,从几百公里高的人造卫星或航天飞机上也看不到.外国人所说的那句话,也许是他误认为从月球上看长城,其长度满足了眼的空间分辨的缘故.如果照此理解,这样说也无不可.世界上的事情,不必每件都那样认真.但偏偏有人认真起来,在美国宇航员王赣毅博士访华时,当着很多人面问他:你从航天飞机上看到长城没有?如果对方是一般人,也许会陷入既不愿讲假话,又不肯煞风景的两难境地.然而王赣毅毕竟是博士.他说:“那天飞过中国上空时天空有云,未能看清.”

他回答得多么好啊!

它会使人相信超弦理论就是一种描写我们的这个世界如何构造的基本原理.那时,理论物理学会完成历史使命了吗?

答:我认为,所有科学领域都不会有完结之日,你永远可以问许多新的问题.

在这种意义上,你所说的确是逻辑上可以接受的.然而,迄今为止我们的经验表明,无论什么时候,只要我们成功地回答了一个问题,关于这

个答案又会提出五个新问题.我们看不出有什么迹象表明今后的漫长岁月这种情况不会继续下去.

我认为,至少还要十五年以上,我们对于基本粒子和它们之间的作用力的完全理解的希望才可能实现.尽管如此,人们仍相信,这条道路是正确的,最后的成功是可以达到的.

(丁亦兵 编译)