

# 弦理论大师威滕谈超对称

梅 健 伟

(中国科学院高能物理研究所)



爱德华·威滕博士是国际著名的数学家和物理学家,现任普林斯顿高等研究院教授;为美国科学院院士,英国皇家学会外籍院士。他于1951年8月26日出生于美国马里兰州的巴尔的摩。早年就学于布兰戴斯( Brandis)大学,1971年获得学士学位,而后分别于1974年和1976年在普林斯顿获得硕士和博士学位。然后他前往哈佛大学,1976~1977年为博士后,1977~1980年为初级研究员。1980年9月威滕出任普林斯顿的物理学教授,并一直延续到1987年他出任高等研究院自然科学学院的教授。此后,1997~1999年,查尔斯·西蒙讲座教授;1999~2001年,加州理工学院的访问教授。1985年威滕获阿尔伯特·爱因斯坦奖,并于同年获国际理论物理中心颁发的狄拉克奖。然后在1990年,他获得了被称为数学的诺贝尔奖的菲尔茨奖。1997年他获美国科学成就金奖。威滕至今已经发表了280多篇文章,被引

用次数超过6万次,平均每篇超过两百次,是迄今为止论文被引用总次数最多的理论物理学家。2003年8月11~16日在美国费米国家加速器实验室召开了第21届国际高能轻光子会议,威滕在会上做了关于超对称的报告。这是一个对大多数人来说相对陌生的题目。为了让更多的人对超对称有所了解,我们把这个报告翻译成中文。除了因可读性要求作了一些小的改动之外,尽量保持了原文的风貌,希望对大家有所帮助。

从标准模型建立到现在三十多年以来,它的绝大多数方面获得了越来越好的验证——这甚至包括了CP破坏和最近报告的有关顶夸克的一些性质。然而,标准模型中也有一部分内容人们仍然知之甚少,至今没有获得明晰的实验信息,那就是弱电对称

性的破缺机制。

为什么弱作用在日常生活中远没有电磁作用那么明显?长久以来,这个问题一直使得人们相信新物理是应该存在的。而且不少人也相信,我们现在也许正接近发现这些新物理的边缘。在以后的几年

$$\gamma P \rightarrow n K^+ K_s^0$$

的数据,发现有 $K^+ n$ 共振峰。SAPHIR合作组给出的结果是: $\Theta^+$ 粒子的质量为1540MeV,宽度为25MeV。

一年之内,有四个实验组相继宣布找到 $\Theta^+$ 粒子存在的证据,看来 $\Theta^+$ 粒子的存在是一个客观事实。理论家对它却有不同的解释。有人认为, $\Theta^+$ 粒子可能是一个介子八重态( $K^+$ 或 $K^0$ )和一个重子八重态( $n$ 或 $p$ )组成的强子分子态: $K^+ n$ 或 $K^0 p$ ),也有其他的看法。实验上需要仔细测量 $\Theta^+$ 粒子的其他性质,以及寻找更多的多夸克态(四夸克态,五夸克态,六夸克态),才能最后确定 $\Theta^+$ 粒子的性质。

欧洲核子中心CERN的著名理论家John Ellis则说,找到 $\Theta^+$ 粒子是一个十分令人激动的事件,寻找新的强子谱似乎正处于开始阶段,这提供了一个检

验重子结构的夸克模型还是手征孤子模型的平台。

夸克模型是1962年由M. Gell-Mann和G. Zweig提出的。由于成功地预言存在由三个奇异夸克组成的 $\Omega^- (sss)$ 粒子,M. Gell-Mann获得1969年诺贝尔物理奖。夸克模型已经40年持续地、成功地解释了强子谱的分类。如果手征孤子模型被实验证明是对的话,这表明粒子物理的发展进入一个新的阶段。

如上所述,日俄美欧四个实验组,除了日本LEPS合作组重新进行实验之外,其余三个合作组均是分析已往的实验数据,从而发现了存在 $\Theta^+$ 粒子的证据。这充分说明理论对实验的指导作用。

如果 $\Theta^+$ 粒子的发现是寻找大量新强子谱的开始,那么,这是否意味着中国的高能粒子实验物理学家和高能粒子理论物理学家面对着一次作出世界创新成果的机会呢?

中,无论是在费米实验室还是在LHC(欧洲核子中心的大型强子对撞机,正在建造中),实验肯定都正在接近决定性的阶段。

为了让弱电对称性破缺,人们往往需要引入一些新的粒子,但也可以通过其他一些特别的机制。在现有的各种弱电对称性破缺机制中,最简单的是原始电弱理论中所采用的方式:它只要求附加一个基本的希格斯(Higgs)粒子。从整体上来说,除了有一些很小的不一致外,这个机制与实验数据符合得很好。在标准模型中,这个机制还进一步表明希格斯粒子的质量应小于约200GeV。与之对应,还有其他一些机制。但在这些机制中,有些除了要求有一个基本的希格斯粒子之外,还要求有许多附加内容;有些则尽管不需要希格斯粒子,但实际上也以很多其他东西作为代替。对于现有的和正在计划(建造)中的加速器来说,只要求存在一个基本希格斯粒子的“纯”标准模型实际上是惟一一个不要求有一大堆新粒子的理论。这个理论有诸多优点:简单;与大量实际数据符合得很好;解释了很多原本将成为疑难的东西,比如为什么味改变的中性流以及破坏重子数守恒、轻子数守恒和CP对称性的相互作用过程会被压得很低。

但是从根本上说,尽管已经付出了很多聪明才智,人们实际上还是不知道怎样对标准模型做一个完整的、令人满意的扩充。换个角度,其实即使撇开这一点,绝大多数物理学家也都认为只包含一个希格斯粒子的最小标准模型不可能反映了粒子物理的所有内容。这其中最主要原因是在这样的模型中存在“等级(hierarchy)问题”<sup>①</sup>:一个标量场可以有裸质量 $m^2$ ,这是一个在量子修正下不稳定的量;在标准模型中,对 $m^2$ 的重整化是平方发散的,因而如果标准模型在某个质量标度 $M$ 处截断<sup>②</sup>,这将导致一个量级为 $\alpha M^2$ 修正,这对于 $m^2 \ll \alpha M^2$ 来说是不自然的。在一个依赖于弱电对称性自发破缺的模型中,这个问题不仅影响到希格斯粒子的质量,也影响到与之联系的标量场的真空期望值,从而影响到其他所有通过规范对称性破缺获得质量的粒子——W粒子、Z粒子、夸克和带电轻子。因此,如果标准模型不能在一个大约1TeV的能标之下自动“截断”并根植于一个更丰富、从而能

够有效压制希格斯粒子质量紫外发散的结构中的话,我们就不能够自然地使W和Z粒子拥有80~90GeV的质量,也不能自然地使希格斯粒子具有不大于200GeV的质量。对这一问题的不同解决方法将导致对标准模型的各种不同扩展。并且这个问题的重要性还在于,它将在决定未来物理发展的各种问题中处于中心地位:对弱电对称性破缺的不同研究结果将促使人们朝着不同的方向前进。

人们已经与这个问题争斗了好多年。与此同时,观测使人们注意到另一个需要类似微调,因而值得一提的现象——宇宙的加速膨胀:它要求有一个很小但非零的宇宙学常数,或者一种更复杂的“暗能量”形态。这事实上给出了一个与希格斯粒子质量类似的微调问题。标准模型中,真空的能量是4次方发散的:在最简单的近似下可以将每个有动量 $k$ 和能量 $\hbar\omega = \sqrt{k^2 + m^2}$ 的玻色或费米模式的零点能 $\pm \hbar\omega/2$ 简单相加,对 $k$ 的积分 $\pm \int d^3k \sqrt{k^2 + m^2}$ 是4次发散的。于是我们最多只能说真空能预期将是 $M^4$ 的量级;这里 $M$ 是某个截断能量,在这一能标上“某些其他过程”起作用,对真空能的贡献被截断了。实验显示了这一真空能为 $(10^{-3} \text{eV})^4$ 的量级,而 $10^{-3} \text{eV}$ 低于任何可能的标准模型的截断能标——这实际上更接近于中微子质量的能标,但到目前为止还没有人能解释这一点。对真空能的微调问题还没有好的解释。

现有的这个问题使人不得不经常提一下另一种思路——但这并不表示它就是值得认同的。这就是“人择理论”。根据这个理论,现在这个很小的宇宙学常数并不是通常意义下自然规律的结果;自然规律允许有极丰富的、可在宇宙空间各处实现的各种物理状态,这些物理状态可以对应各不相同的宇宙学常数——我们生活的区域里宇宙学常数很小仅仅是因为,否则的话这一区域将过快地膨胀冷却,以至于生命形式根本就来不及出现。一旦我们对宇宙学常数的微调问题采用了这种基于人择原理解释,那么这个途径显然也同样适用于其他微调问题,比如希格斯粒子的质量问题:如果希格斯粒子的质量,

① 等级问题也可以简单地认为是指,为什么弱电对称性的破缺能标能够稳定在于一个远小于普朗克能标( $\sim 10^{19} \text{GeV}$ )的位置上。在普朗克能标之上,人们普遍认为,一个更基本的、包含万有引力在内的大统一的理论将作用。——译者

② 尽管标准模型已经获得了很大成功,人们通常还是认为它只可能是一种只在一定能量范围内适用的“有效”理论(因为从大统一的观念出发,标准模型至少还没有把万有引力包括进来);在更高的能量上,我们需要更基本的理论。——译者

从而  $W$  和  $Z$  粒子, 夸克和轻子的质量都增大很多的话, 就肯定不会有我们人类。比如当这些粒子的质量接近普朗克能标的量级时, 如果聚在一起的粒子的个数稍微多一点, 它们就会塌缩成为黑洞。更一般地说, 如果所有基本粒子质量都比现实中的大一个因子  $N$ , 那么恒星和行星中所含的基本粒子数目就要减少一个因子  $N^{-3}$ , 于是对一个中等大小的  $N$ , 所有的恒星都将停止发光。

如果人们通过实验在标准模型预言的能量范围内找到了希格斯粒子; 而(甚至在 LHC 的能量上) 能够进一步表明自然界是如何解决微调问题的物理结构却没有出现, 那么这肯定会被有些人认为是对人择原理解释的一个支持。另一方面, (实际上) 现在没有人能预言现实到底会是怎么样。真正看好人择原理的物理学家反而更倾向于争论说, 如果像希格斯粒子质量一类的微调问题可以有合理的解释, 那么宇宙中这种机制明显起作用的区域就会远远多于那些这种机制作用不明显的区域, 在那些区域中希格斯粒子的质量只是因为某种偶然因素才取较小值。因此, 每个人看起来都同意一件事: 我们希望加速器不仅能带来希格斯粒子, 而且也能带给我们一个能“稳定”弱电对称性破缺能标的机制, 它应能同时说明为什么希格斯粒子以及其他粒子不会比现实中的更重。

人们已经假设了不少这样的机制, 比如“无希格斯粒子”模型——基于对称性的自发破缺; 包含“膜”和高额外维空间, 及可能的强动力学; “小希格斯粒子”模型——希格斯粒子由一个赝哥德斯通(pseudor Goldstone)玻色子充当; 超对称。所有这些机制的一个共同特征是没有一个模型是完美的——所有已知的途径都冒着破坏标准模型的某些成功之处的风险。讨论所有的可能性是不现实的, 所考虑的这几类模型的范围在过去几年里发展得太广泛了; 当前有许多新的假设实际上更多地是针对过程而本身并非模型。

因此本文的后半部分将专门阐述其中一个广受关注且极有趣的途径——超对称, 所有的讨论将主要针对这个模型中已知的一些优点及不足。

先说优点: 超对称可以使小的希格斯粒子质量变得自然; 超对称是一个更大的物理图景的一部分, 而不仅仅是一个解决等级问题的技术方法;  $\sin^2\theta_w$  的实验值倾向于支持超对称的大统一理论; 经受住了电弱理论的精确检验; 支持重的顶夸克质量。

超对称是将玻色子与费米子联系起来的一种新

的独特的对称性, 这在某种意义上解释了费米子的存在。将玻色子与费米子相联系也使得解释小的希格斯粒子质量成为可能, 因为我们知道为什么小的费米子质量可以是自然的。这至少成了超对称如何解决微调问题的一个苗头。

超对称继承了大统一理论的各种成功之处, 考虑到当前  $\sin^2\theta_w$  和质子寿命观测值的限制, 大统一理论的超对称版本是仍然可行的理论之一(这一点并非所有的大统一理论都能做到——译者)。因此我们也应该牢记大统一理论的优点, 这些优点从它们自身来说就是根本的。主要有: 使在标准模型中显得一团糟的夸克及轻子量子数变得有意义——标准模型中的每代夸克轻子场按其左右手不同分别属于  $SU(2) \times U(1)$  的 5 个不同表示, 但这些场在大统一理论中可以简单地集合进  $SU(5)$  的两个表示  $\bar{5}+10$  或  $SO(10)$  的一个表示  $16$ ; 由低能数据导出的大统一能标  $M_{GUT}$  相对接近普朗克能标——高得足以避免在质子寿命问题上引发灾难; 70 年代末期提出的基于大统一理论的中微子质量  $m_{\nu} \sim M_W^2/M_{GUT} \sim 10^{-2} eV$  现在表明显然是近似正确的; 大统一干净利落地与弦及量子引力相联系; 观测到的宇宙微波背景辐射的涨落可以自然地(但是带点猜测地)通过一个接近大统一标度的暴涨时期来解释。

简短地说, 大统一理论本身是很诱人的。但实际上只有在结合了超对称以后大统一理论才有意义, 这又有两个原因: 只有包含了超对称以后, 才有  $\sin^2\theta_w$  的实验值与大统一理论间的一致; 不包含超对称时, 理论预言的大统一能标及质子寿命都显得太小。因而, 大统一理论的成功鼓舞了人们对超对称的寻找, 而超对称的发现也必将为大统一理论增添吸引力。

还应强调, 超对称不仅仅是对等级问题的一个解决方案。它还是 ①一个新的、独特的对称性原理; ②一幅更吸引人的大统一图像中的一部分; ③一个更雄心勃勃的弦理论中的基本组成部分。实际上, 超对称概念的出现历史上至少有一部分是由于它在弦论中所充当的角色。实验上发现超对称必然对弦论有巨大推动作用, 去认识如何让超对称破缺也许可以为弦理论家们提供继续前进的关键线索。

更进一步, 当其他一些针对小的弱电能标的理论——像组分希格斯粒子模型——不时地陷入困境时, 超对称则与电弱理论的精确检验保持着一致。而且无论好坏, 当今所考虑的超对称与那些 20 年前

认为可行的是一样的。事实上,那些旧模型仍然可行是因为顶夸克质量最终被发现足够重,且正如弱电对称性破缺所要求的那样。(这也不全是好事:模型停滞了,一些问题却一直没有解决。)

除此之外,超对称同样存在一些问题。最明显的就是:尽管人们已经期待了很长一段时间,超对称至今没有被发现。比如说,回头看看1993年的轻光子会议的总结发言,超对称是早在10年前就已经被大卫·格罗斯(David Gross)描述为是“标准的非标准模型”了——这到现在已经有很长一段时间了。然而,至今没有发现超对称尽管让人失望,但大体说来也并不奇怪。如果荷电超对称伴子<sup>①</sup>的质量只比 $M_Z$ 大一点点,那我们就不会到现在还没看见它们。超对称伴子从弱电对称性破缺和超对称破缺两处获得质量,因此它们将自然地比只靠弱电对称性破缺获得质量的 $Z$ 粒子更重一些。但是这其中某个粒子的缺失也许确实会让人们觉得有些难堪——希格斯粒子。如果假定最小超对称的粒子谱,在树图级有 $M_{\text{Higgs}} < M_Z \sim 91\text{GeV}$ ;而顶夸克会导致大的辐射修正,希格斯粒子的理论质量限通常认为是 $M_{\text{Higgs}} < 130\text{GeV}$ 。与之对应,实验上有 $M_{\text{Higgs}} > 114\text{GeV}$ 。因此理论和实验尚没有明显冲突,但这种乐观的估计显然依赖于存在很大的辐射修正。这将导致需要一些不为多数模型所看好的耦合,或者导致要求超对称伴子有非常大的质量以至于 $M_Z$ 看起来太小,从而就不自然了。总的来说,尽管现在还没有什么冲突,但 $M_{\text{Higgs}}$ 的确切数值肯定将有助于澄清不少事实。如果像LEP所暗示的那样,这个值是115GeV,那就太好了。

从另一个层面看,如果超对称能对标准模型有所简化,那它将更让人信服。这样的简化包括比如:希格斯粒子会是电子的超对称伴子吗?遗憾的是,答案是否定的。在这类方向上做尝试的模型没有获得成功。因此最小超对称标准模型将粒子数实质性地翻了一番。

像其他许多试图解决微调问题的尝试一样,超对称也确实使标准模型的一些成功之处复杂化了:(1)标准模型的一个成功之处是自动保持了重子数和轻子数守恒,这是因为标准模型中的场之间没有破坏这些对称性的(微扰)可重整耦合项。这个特征

在超对称模型中丧失了,此时各种可重整的相互作用可能导致质子灾难性地衰变。为了克服这一困难,人们最常用的解决方案是要求一个新的对称性,称为 $R$ 宇称;但这只是一种可能性,并非必然。(2)由于引进了包含超对称伴子的新的圈图,超对称也有可能使标准模型在压制味改变中性弱流和CP破坏方面的成功得而复失。(3)超对称在大统一能标下引进了质子通过5维算符衰变的新过程;考虑到当前质子寿命的实验限制,这对很多模型来说都是个困难。

除此之外还有超对称如何破缺的问题。超对称破缺主要有两种途径:引力媒介型——超对称在很高能标下破缺,然后这种破缺通过超引力传递给标准模型;规范媒介型——超对称在大约100TeV处破缺,然后通过规范作用传递到已知世界。这两类模型每种都有优点,但都没有给出一条清楚地解决所有问题的道路。比如说,考虑宇宙学常数会促使我们看好引力媒介的方式:为了使与有效宇宙学常数相联系的势足够小,就要求包含引力,从而表明应是引力媒介型。而我们如果考虑超对称中过多的导致味改变中性流和CP破坏的源,规范媒介的方式将提供更明显的途径来消除它们。简单地说,我们没有一个完全令人信服的超对称破缺图像。而这一点实际上使超对称成了实验积极研究的对象:如果我们已经有一幅令人信服的、可行的关于弱电能标附近超对称世界的图像,我们是会更加确信现实就是理论所预期的那样,但是当证实这一点时我们可学的东西反而就少了。而相反地,去发现自然本身如何解决问题会显得更有意思;如果找到了超对称,每个令人烦恼的、超对称如何在现实世界中起作用的问题都会转化为对自然界作出新的、根本性了解的机会。

简短地说,发现超对称(或者任何其他关于等级问题的解答,因为每种方案都会导致一些恼人的问题)最终还是要依赖于实验,这是物理研究工作中的惯例,也是标准模型出现之前事情的正常状态。面对一大堆新的粒子和新的相互作用,揭开弱电能标超对称世界的细节将是一个长久而复杂的问题,这同时也为轻子对撞机不断寻求更高精度,为质子对撞机不断提高能量提供了一个极好的目标。

<sup>①</sup> 在超对称理论中,标准模型中的每个基本粒子都有另一个全新的粒子与之对应,充当其超对称伙伴(Superpartner);每个粒子与其超对称伙伴之间自旋相差 $1/2$ (也就是说玻色子的超对称伙伴是费米子,费米子的超对称伙伴是玻色子)。——译者