

谈谈粒子物理学的昨天、今天和明天

~~~~~ 汪 容 ~~~~~

“世界是由什么组成的?”这是一个很古老的问题。早在两千多年前,希腊哲学家就提出了“原子”这个概念,认为原子是组成世界的最小单元,是不可再分的。但是,这种讨论都是理性思辨性质的。当时生产技术水平低下,谈不上通过科学实验来检验这个概念是否符合事实。

十九世纪初,化学家开始利用科学实验的方法明确了原子和分子的含义,初步为科学的原子论奠定了基础。物理学家进入这个领域是在十九世纪电磁学研究的大发展之后,比化学家晚得多。然而,物理学的实验方法一开始进入这个领域,就通过电子的发现(J. J. Thomson 1897)和原子放射性的发现(H. Becquerel 1896)推翻了原子不可再分的信念。到30年代初,人们已经知道电子、质子、光子、中子和阳电子比原子、原子核更基本,所以,从30年代起,人们就把电子、阳电子、质子、中子和光子统称为“基本粒子”,认为它们是构成世界的最基本的砖块。这样,就诞生了“基本粒子物理学”。

从40年代到80年代,除二次大战的几年外,粒子物理学一直受到各个发达国家的高度重视,得到了很大的发展。

半个世纪以来,粒子物理学的发展大致可分为两个阶段。从30年代到60年代中,这是一个“基本粒子”大发现的阶段。在这个阶段将结束的时候,人们认识到“基本粒子”并不基本,从此“基本粒子物理学”就改名为“粒子物理学”。而从60年代后期到现在这个阶段,微观粒子的性质和相互作用的研究取得了历史性的重大进展。但新提出的重大问题仍层出不穷,可能将有新的突破。

## 关于昨天的回顾

到50年代末,基本粒子的种类数(包括反粒子)已经是30年代初的6倍。尤其引人注目的是,那些带奇异量子数的 $K$ 介子和超子(它们又统称为奇异粒子)都是事先没有预料到的不速之客。那末,它们都是“基本”的吗?大致在1960年左右,有一种理论叫做靴襻理论(Bootstrap theory——Bootstrap的意思是拉着自己的靴襻把自己提起来),认为强子是互为组成部分的。例如,认为 $\pi$ 介子可以由核子和反核子组成(质子和中子统称核子),核子可以由 $K$ 介子和 $\Sigma$ 超子组成, $K$ 介子又可以由核子和 $\bar{\Sigma}$ 反超子组成,等等。总之,各种强子是你中有我,我中有你,完全平等的,没有什么

更基本的东西。但是,这个理论不久就被事实推翻了,因为1959年和1960年西欧中心(CERN)和美国布鲁克海文实验室(BNL)的能量更高的高能质子加速器相继建成,在短短的两年里产生了上百种寿命为 $\sim 10^{-23}$ 至 $10^{-24}$ 秒的极其短命的强子。面对这种明显的事实,人们不能不思考,为什么强子会有几百种之多,它们会不会也是由某种更基本的东西以各种各样不同的方式组成?“夸克模型”和“层子模型”用具体的模型表达了这个思想。就是说,在强子之下另有一个物质结构层次,即层子(或夸克)的层次,强子是由层子(或夸克)和反层子(或反夸克)组成的。于是,粒子的大发现不但使人们获得了成百种前所未有的粒子的信息,而且在强子这个层次之下又揭开了一个新的物质结构层次!

除粒子的大发现外,粒子物理学发展的第一阶段还取得了另外一些重要收获,包括弱作用宇称不守恒和电荷共轭不守恒的发现两种中微子(一种是电子型中微子 $\nu_e$ 、一种是 $\mu$ 子型中微子 $\nu_\mu$ )的发现,它们都传出了微观世界的重要信息。

## 总结今天的收获

与第一阶段相比,第二阶段的各项收获更具有历史里程碑的意义。如果说,在前一阶段弱相互作用理论还只有唯象的意义,不能重正化,不是一个完整自洽的理论,那末,在第二阶段就已经建立了一个严格可重正化的完整自洽的弱电统一理论。它揭示了弱相互作用和电磁相互作用的内在的统一,经受了各方面的实验检验,取得了极大的成功。它所预言的传递弱相互作用的 $W^+$ 、 $W^-$ 、 $Z^0$ 三种粒子都已于1983年在西欧中心的加速器上发现,测得的静止质量与理论预言一致。又如果说,在前一阶段还根本没有找到一个能够表明强相互作用的机制的理论,那末,在第二阶段就找到了这样一个理论,即“量子色动力学”。它认为组成强子的层子(或夸克)都带有“色荷”(“色荷”有三种),而且还有八种胶子在“色荷”与“色荷”之间传递强相互作用。

这个理论也是可以重正化的。利用微扰论计算,并与重正化群方法相结合,它可以解释有强相互作用参与的一系列高能粒子的反应,特别是可以定量地解释渐近自由行为(当传递的能量动量增大时,层子的强相互作用将会减弱,以至渐近于没有强相互作用的自

由状态的一种现象)。

目前弱电统一理论和量子色动力学理论都是已经得到实验验证的理论。它们解决了五十年代和六十年代所没有能够解决的两大疑难问题,即弱相互作用和强相互作用的基本机制问题,所以带有一种突破的性质。特别值得注意的是,这两个理论恰恰都是非阿贝尔量子规范理论,而不是别的类型的理论。这似乎也是来自物质结构深处的一个重要信息。

至于新粒子的发现,就数量来说,第二阶段远没有第一阶段多,但其重要性毫不逊色。例如,1983年 $w^+$ ,  $w^-$ ,  $Z^0$ 的发现,给了弱电统一理论以决定性的支持。又例如,1979年正负电子对撞实验中三喷注事例的发现,证实了胶子的存在,从而有力地给了量子色动力学理论以支持。再说到层子(或夸克)的种类,60年代只知道有3种,即u层子、d层子、s层子。70年代又发现了2种,即c层子(丁肇中小组和里希特(Richter)小组,1974年)、b层子(莱德曼(Lederman)小组,1977年)。最近(1984年)西欧中心又发现了t层子。于是60年代的3种层子就扩充为今天的6种,不仅如此,按照量子色动力学理论,每一种层子又有三种“色”态。总起来就有36种层子和反层子。另外,1977年代还发现了第三种带电轻子,叫做 $\tau$ 子。与 $\tau$ 子相伴的是 $\tau$ 子型中微子 $\nu_\tau$ 。所以总起来轻子与反轻子共有12种。

现在我们可以把粒子列表如下(不再列入强子,因为它们是由层子和反层子组成):

|                                                                                                       | 自旋                                                          | 参与相互作用 |    |   |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|--------|----|---|
|                                                                                                       |                                                             | 弱      | 电磁 | 强 |
| 传递相互作用的粒子<br>$\left\{ \begin{array}{l} W^+, W^-, Z^0 \\ \gamma \\ \text{胶子 (8种)} \end{array} \right.$ | $\frac{\hbar}{2}$<br>$\frac{\hbar}{2}$<br>$\frac{\hbar}{2}$ | ●      | ●  | ● |
| 轻子和反轻子                                                                                                | $\frac{\hbar}{2}$                                           | ●      | ●  |   |
| 层子(夸克)和反层子(反夸克)                                                                                       | $\frac{\hbar}{2}$                                           | ●      | ●  | ● |

如果把电荷与色荷也写出来,就得到右上表。

(电荷栏的e是质子电荷;这里没有把反粒子列出来)。可以看到,d层子与 $e^-$ 对应,u层子与 $\nu_e$ 对应,……等等。相对应粒子的差别都恰好是 $\frac{2}{3}e$ ,这肯定并不是巧合。表中的二一对应也可能是一个相当重要的信息。但它究竟意味着什么,目前还没有现成的答案。

迎接明天的挑战

到目前为止,粒子物理中尚有不少未解决的问题,很多实验事实说明强子是由层子和反层子所组成,而

| 层子(夸克)    | 电荷              | 轻子         | 电荷   |
|-----------|-----------------|------------|------|
| d (红、绿、蓝) | $-\frac{1}{3}e$ | $e^-$      | $-e$ |
| u (红、绿、蓝) | $\frac{2}{3}e$  | $\nu_e$    | 0    |
| s (红、绿、蓝) | $-\frac{1}{3}e$ | $\mu^-$    | $-e$ |
| c (红、绿、蓝) | $\frac{2}{3}e$  | $\nu_\mu$  | 0    |
| b (红、绿、蓝) | $-\frac{1}{3}e$ | $\tau^-$   | $-e$ |
| t (红、绿、蓝) | $\frac{2}{3}e$  | $\nu_\tau$ | 0    |

且强子中还有胶子。但人们在天上、地下、海中找了二十年,从来没有找到过自由的层子和自由的胶子,它们好象永远被禁闭在强子之中,为什么发生这种现象?这就是“禁闭问题”。

量子色动力学给出了一种猜测,认为如果要想把层子从强子中拉出来,就必须给它提供无穷大的能量,这当然是不可能做到的。但这只是猜测,不是证明,因为目前人们只会用量子色动力学作微扰论计算,而禁闭现象显然不是一种微扰现象。

几年前人们发展了一种格点规范理论,可以利用电子计算机来做非微扰的计算。但这只是一种非常粗糙的模拟。初步的结果肯定了禁闭的存在,但仍不能说明禁闭的具体的机制。

利用电子计算机还看到了一种可能性,就是在高温、高密度的情况下,可以形成夸克与胶子的“等离子体”。此时离子和胶子并不禁闭在一个强子里面,但它们也不能自由地离开“等离子体”。

禁闭问题是过去从未遇到过的,它不但在科学上是一个还没有完全解决的问题,而且在哲学上也带来了个新问题,就是如何正确地理解物质的可分性。现在有充分的实验证据说明强子是由层子和反层子组成,也有充分的实验证据说明强子并不能分割成自由的层子和反层子。可见物质的可分性并不等于可分割性,它应该有比可分割性更广的、科学的和哲学的含义。

层子、反层子、轻子、反轻子一共已经有 $36+12=48$ 种。把它们按如下方式列表,就可以看到各行各列粒子的电荷和性质有着周期性的变化,很象一个元素周期表。那么,这是不是反映了层子和轻子有更深一层次的结构呢?根据过去的经验,人们相信这一点,并且提出了很多种亚层子(或亚夸克)模型。但是,实验提供的有关下一层次的信息实在太少了,所以这些模型多半只是层子模型(夸克模型)的仿制品,体现不出量的改变所带来的质的不同。我们不能设想,微观物

| 电荷   | 0          | $-e$   | $\frac{2}{3}e$ | $-\frac{2}{3}e$ |
|------|------------|--------|----------------|-----------------|
| 第一周期 | $\nu_e$    | $e$    | $u$            | $d$             |
| 第二周期 | $\nu_\mu$  | $\mu$  | $c$            | $s$             |
| 第三周期 | $\nu_\tau$ | $\tau$ | $t$            | $b$             |

质结构的各个层次永远是大娃娃套小娃娃，小娃娃再套更小的娃娃，……，如此无穷止地简单机械地重复下去。所以下个层次是什么，还是一个没解决的谜。

物质存在的基本形态是粒子还是场？为了研究微观粒子的产生、湮没和相互转化，从 30 年代起就提出了“量子化的场”这一概念，认为当“量子化的场”处于激发状态时，就有自由粒子出现；当量子化的场处于基态——最低能态——时，自由粒子就不出现，就是真空。几十年来，“量子化的场”的客观存在早已得到了实验上的充分证实，就好象微观粒子的客观存在一样。不仅如此，自由粒子的出现只是场在激发时的一种特殊状态；而在真空的情况，即使没有自由粒子，场依然存在。由此可见，与其认为微观粒子是物质存在的基本形态，倒不如认为量子化的场是物质存在的基本形态，因为后者存在于每一个时空点，比微观粒子有更多、更具普遍性的内容。这与经典物理学的物质观点

是很不相同的。顺便说一下，这个看法并不涉及物质结构层次的问题。如果轻子和层子是由某种更基本的东西组成，那末，与这更基本的东西相对应，必定存在某种更基本的场，它要比轻子场和层子场更基本。所以，无论从粒子的观点或从场的观点来看，都有如何再深入一个层次的问题。如果承认真空是处于基态——最低能态——的场，那么，真空就有了新的物理涵义，不再是一个空空洞洞的容器了。我们试从三个侧面来说明：

i. 真空是一种物理的实体，它能够对其他的物质发生影响。例如电子、 $\mu$  子的反常磁矩及氢原子能级的兰姆移动，如果不考虑真空的效应，就都无法得到解释。而一旦考虑了真空的效应，理论值和实验值就符合得非常之好。

ii. 作为物理实体的“真空”的概念，不变性的。在有些情况下，“真空”也像一种介质，它不满足某种变换（但不是罗仑兹变换）下的不变性。这叫做真空自发破缺，真空自发破缺能够使规范场粒子获得静止质量。

iii 处于真空状态的场仍保持持续不断的振荡，叫做真空起伏。非阿贝尔规范场在理论上有一类特殊的真空起伏，叫作“瞬子”。无穷多种不同拓扑数的“瞬子”，以  $\theta$  为参数作线性叠加，可形成一种规范不变的“物理的真空”，叫做  $\theta$ -真空。

在考虑非阿贝尔规范场的非线性效应时，不能忽略  $\theta$ -真空。不过，目前我们对它们的了解还很不充分。此外还要注意到引力场在理论上也有“瞬子”。

总之，在现代粒子物理学中，真空大大复杂化了。无论在科学上或在哲学上，对此都需要认真对待。可是有一点已经肯定，就是真空决不是非物质的虚空！

还有，在弱电统一之后，是不是还有更大的统一？引力场在量子场论中到底扮演一个什么角色？有没有玻色场和费密场之间的超对称性？……等等。这些问题都是对于人类的智慧和能力的挑战。但是人类必定会解答它们！