

# 高能物理的发展

朱 洪 元

(中国科学院高能物理研究所)

高能物理(亦称粒子物理)是在研究原子、原子核和宇宙线的过程中诞生的。在五十年代初,加速器的能量开始超过 1GeV,从而有可能开始对高能物理现象进行系统的研究,高能物理也就开始成为物理学中一个独立的分支学科。

在原子的研究中,发现了电子、质子和光子。就目前的粒子的分类来说,电子是第一个被发现的轻子,质子是第一个被发现的强子,光子是第一个被发现的传递基本相互作用的粒子。当时,电子和质子被认为是不可分割的、永恒不变的物质的基元,所以称为“基本粒子”。

在原子的研究中,建立了量子力学和量子电动力学,为尔后量子场论的发展打下了基础。量子场论是当前粒子物理理论的基础。

在原子核的研究中,发现了 $\beta$ 衰变,表明一种新的基本相互作用——弱相互作用的存在;也发现了核子力,表明另一种新的基本相互作用——强相互作用的存在。这样,和以前发现的万有引力相互作用、电磁相互作用一起,一共发现有四种基本相互作用。

在原子核的研究中,发现了中子。在此基础上引进同位旋的概念。空间、时间是物质存在的普遍形式,同位旋是物质存在的一种特殊形式。前者称为外部自由度,后者称为内部自由度。其实最早发现的内部自由度是电荷,它也是物质存在的一种特殊形式。

在宇宙线研究中,发现了 $\mu$ 子、 $\pi$ 介子和奇异粒子。 $\pi$ 介子是第一个被发现的自旋为 $\hbar$ 的整数倍的强子,而质子和中子则是自旋为 $\hbar$ 的半整数倍的强子。所有自旋为 $\hbar$ 整数倍的强子以后统称为介子,而所有自旋为 $\hbar$ 的半整数倍

的强子统称为重子。

$\mu$ 子和奇异粒子的发现表明一种新的内部自由度——“代自由度”的存在。这是物质存在的一种新的特殊形式。

从五十年代起,到现在已经发现数以百计的粒子,它们能够相互转化,看来不象什么“基本粒子”,于是将“基本”二字取消,统称它们为“粒子”。

研究这些粒子,发现它们没有一种是不生不灭的,在一定的条件下都能产生和消灭,没有一个例外。

其次,发现这些粒子都是配成对的,称为“正、反粒子”。正、反粒子的一部分性质完全相同,另一部分性质完全相反。例如电子和正电子是一对正、反粒子,它们的质量和自旋完全相同,它们的电荷和磁矩完全相反。也有少数正、反粒子的所有性质都相同,那末它们就是同一种粒子,光子就是这种粒子的一个例子。

可以将已经发现的粒子分为三类。第一类是传递基本相互作用的粒子。已经发现的是传递电磁相互作用的光子 $\gamma$ 和传递弱相互作用的中间玻色子 $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z^0$ 。理论上预言的传递万有引力相互作用的引力子和传递强相互作用的胶子至今还没有在实验上发现。

其它的已经发现的粒子,可以按照其是否参与强相互作用分成两类。不参与强相互作用的统称为“轻子”。已经发现的轻子共有三代,每代有二种,共六种。它们分别用符号

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix} \quad (1)$$

表示。它们的自旋均为 $\hbar/2$ ,因此是费米子。其中 $e$ 为电子, $\mu$ 为 $\mu$ 子, $\tau$ 代表 $\tau$ 轻子,它们

带的电荷都相同;与之相应的  $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$  均不带电,统称为中微子.与三代、六种轻子相对应,存在着三代、六种反轻子.

参与强相互作用的粒子统称为强子.实验上发现的数以百计的粒子主要是强子.在五十年代,发现强子都有一定大小.例如,质子和中子的半径均为  $0.8 \times 10^{-13}\text{cm}$ . 在六十年代,进一步发现强子内部还有带点电荷的东西,它们在强子内部能相当自由地运动.在国外,它们被称为“夸克”或“反夸克”.在国内有一部分物理学家将它们称为“层子”或“反层子”,因为他们认为,即使层子也不是物质结构的最终单元,只不过是物质结构中的一个层次而已.

已经发现的强子都是由三代、六种层子及相应的反层子组成.这三代、六种层子分别用符号

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix} \quad (2)$$

表示.它们的自旋均为  $\hbar/2$ ,因此也是费米子.设  $e$  代表质子的电荷,则  $u, c, t$  层子的电荷均为  $\frac{2}{3}e$ ,而  $d, s, b$  的电荷均为  $-\frac{1}{3}e$ . 与之相应,存在着三代、六种反层子.

由于层子是费米子,它们的波函数必须是反对称的.在研究了重子内部的层子的波函数以后,发现强子内部还隐藏着前所未知的新自由度.每种层子或反层子都可以处于三种不同的状态.由于颜色的原色有三种:红、绿、蓝,所以将“色”这个词借用过来,称这种隐藏在强子内部的自由度为“色自由度”.

但是这种色自由度的存在会在高能物理过程中显示出来.高能正电子和电子相互碰撞,从而湮没转化为许多强子,就是这样一种过程.测量这一过程的截面表明,的确存在色自由度,否则这一过程的截面值应该就是实验值的  $1/3$ .

设  $R, G, B$  分别表示每一种层子的三种色的状态,那么除光子和中间玻色子  $W^+, W^-, Z^0$  以外,在实验中发现的数以百计的粒子都由表 1 所示的 24 种轻子和层子以及相应的反粒子

组成.

表 1

|            |        |       |         |       |       |         |       |
|------------|--------|-------|---------|-------|-------|---------|-------|
| $\nu_e$    | $e$    | $u^R$ | $u^{G}$ | $u^B$ | $d^R$ | $d^{G}$ | $d^B$ |
| $\nu_\mu$  | $\mu$  | $c^R$ | $c^{G}$ | $c^B$ | $s^R$ | $s^{G}$ | $s^B$ |
| $\nu_\tau$ | $\tau$ | $t^R$ | $t^{G}$ | $t^B$ | $b^R$ | $b^{G}$ | $b^B$ |

表 1 中的粒子的性质很有规律性,和化学元素的周期表相类似.轻子和层子各有其特殊性,但也有共性.为了解释已有的实验,理论也要求它们的性质这样相配.这表明它们可能有共同的基础,可能存在更深层次的结构.但目前的实验技术还不能测量出轻子和层子的大小.只能肯定,假使轻子和层子都有一定的大小,那么它们的半径一定小于  $10^{-16}\text{cm}$ . 原子和强子的半径相差约五个数量级.假使强子和层子的半径也相差五个数量级,那么层子的半径只有  $10^{-18}\text{cm}$  数量级.因此,用目前的实验技术测量不出来,也就不足为奇了.

万有引力相互作用和电磁相互作用在宏观物理现象中可直接表现出来.但强相互作用和弱相互作用是在研究工作深入到原子核以后才显示出来,这是因为它们是短程力.此外它们还有各自的特点.在弱相互作用中宇称  $P$  不守恒,电荷共轭宇称  $C$  不守恒.后来发现,  $CP$  也不守恒.而在其它三种基本相互作用中,  $C$  和  $P$  都是守恒的.

根据现有的理论,强子由层子和反层子通过强相互作用结合而成.强相互作用通过胶子传递.如上所述,层子在强子内部可以相当自由地运动.强相互作用的这一特性称为“渐近自由”性质.在另一方面,即使利用目前加速器所能产生的能量最高的粒子来轰击强子,也没有能够将层子和胶子打出来,使之处于自由的、不受束缚的状态.强作用的这种将层子和胶子囚禁在强子内部的性质称为“囚禁”.渐近自由和囚禁是强相互作用所特有的性质.

在实验上已经发现的四种基本相互作用的强度可以用下列的四个无量纲参数来表达:

万有引力相互作用强度为

$$Gm_p^2/\hbar c = 5.9 \times 10^{-39};$$

弱相互作用强度为

$$G_F m_p^2 c / \hbar^3 = 1.0 \times 10^{-5};$$

电磁相互作用强度为  $e^2 / \hbar c = 1/137$ ;

强相互作用强度为  $g_s^2 / \hbar c \simeq 1/5$ .

其中  $G$  为万有引力常数,  $G_F$  为费密弱相互作用常数,  $e$  为正电子电荷,  $g_s$  为强相互作用常数,  $m_p$  为质子质量. 在目前加速器所能达到的能量范围内, 万有引力在高能物理过程中所起的作用微不足道. 但是在高能物理现象中, 强相互作用、电磁相互作用和弱相互作用起作用的范围同样普遍. 它们都能导致各种粒子的产生、运动、转化和消灭.

为了提供关于强相互作用、电磁相互作用和弱相互作用相对强度的一些感性认识, 表 2 给出三个高能碰撞过程的总截面, 它们分别由强相互作用、电磁相互作用和弱相互作用决定:

表 2\*

| 相互作用类型 | 碰撞粒子          | 总截面 (cm <sup>2</sup> ) |
|--------|---------------|------------------------|
| 强      | $\pi + N$     | $2.5 \times 10^{-26}$  |
| 电磁     | $\gamma + N$  | $1.0 \times 10^{-28}$  |
| 弱      | $\nu_\mu + N$ | $6.1 \times 10^{-37}$  |

\*  $N$  代表核子,  $\pi$  代表  $\pi$  介子, 中微子  $\nu_\mu$  的能量为 100 GeV.

高能物理现象一方面具有微观物理现象中普遍存在的波、粒二重性, 另一方面又普遍存在着产生和消灭过程. 量子力学能反映微观世界的波、粒二重性, 但不能反映粒子的产生和消灭过程, 因为它所描述的是由自由度数目确定的物理系统. 经典电磁场论所描述的是具有无穷多个自由度的物理系统, 能够反映电磁波的产生和消灭, 但不能反映波、粒二重性. 要建立既能反映波、粒二重性, 又能反映粒子的产生和消灭过程的理论, 就得按照将经典力学改造成为量子力学的方法, 将经典场论改造成为“量子场论”. 在这种理论中, 场量是算符, 满足一定的运动方程和对易关系或反对易关系. 例如, 电子由量子旋量场  $\psi(x)$  反映. 自由电子场可以作如下的傅里叶展开:

$$\psi(x) = \sum_{\mathbf{p}, s} \{ a_{\mathbf{p}, s} u_{\mathbf{p}, s} e^{i\mathbf{p}x} + b_{\mathbf{p}, s}^+ v_{\mathbf{p}, s}^+ e^{-i\mathbf{p}x} \}, \quad (3)$$

其中,

$$p_0 = \sqrt{m_e^2 c^2 + |\mathbf{p}|^2}$$

$u_{\mathbf{p}, s}$  和  $v_{\mathbf{p}, s}^+$  是表示自旋状态的旋量波函数.  $a_{\mathbf{p}, s}$  是代表一个动量为  $\mathbf{p}$ 、自旋取向为  $s$  的电子的消灭算符,  $b_{\mathbf{p}, s}^+$  是代表一个动量为  $\mathbf{p}$ 、自旋取向为  $s$  的正电子的产生算符. 因此, 量子场反映了粒子产生和消灭的普遍性和它们之间的不可分割的联系, 还反映了正、反粒子的对立统一. 按照这一方法建立起来的量子电动力学的最低次近似计算结果和实验符合得相当好.

为了使理论计算和更精确的实验结果符合得更好, 需要计算高次近似的贡献, 但在计算时, 却得到无穷大的结果, 因此毫无意义. 这种困难称为“发散困难”. 在三十年代到四十年代中, 曾经有人怀疑, 量子电动力学在能量超过  $137m_e c^2$  的区域中不能反映客观规律. 在中子发现以前, 人们也曾经怀疑, 量子力学在原子核现象中已经不能反映客观规律. 当时认为原子核是由质子和电子组成的. 假使量子力学的规律仍然成立, 那么, 电子在原子核中的动能将达到几百 MeV, 远远超过电子和质子之间的静电吸引力所产生的位能的绝对值, 因此电子不可能被束缚在原子核内. 中子发现后才认识到: 并不是量子力学不适用于原子核, 而是原子核由质子和电子组成的这一设想错了.

经过分析, 在 1948 年发现, 所有这些无穷大计算结果在物理上的效应全部归结为改变电子的质量和电荷, 使之变为无穷大. 假使将计算结果中出现的无穷大的质量和电荷用实验上测得的质量和电荷值替代, 则计算结果变为有限值, 而且的确比低次近似计算的结果和实验符合得更好. 例如, 实验测得的电子磁矩值为

$$1, 001\ 159\ 652\ 209(31) \frac{e\hbar}{2m_e c},$$

量子电动力学的理论结果在误差范围内与之相符合. 实验做得如此精确, 理论结果也如此精确, 而且彼此符合, 这是非常罕见的. 这种处理量子场论中出现的发散困难的方法称为“重正化方法”.

量子力学和量子场论是在玻尔的思想指引

下建立起来的,它的基本原理是:

(1) 物理量的值可以取不连续的数值,在数学上是用希尔伯特空间中的算符来表示。

(2) 物理状态服从统计规律,在数学上是用希尔伯特空间中的矢量来表示。

这两条基本原理的应用范围在实验上还没有发现它的边界。尽管实验对微观世界的探索已经从  $10^{-8}\text{cm}$  深入到  $10^{-16}\text{cm}$ , 能量从几个电子伏提高到几千亿电子伏特, 物理现象仍然服从量子理论的基本规律。

但是并不是任何形式的量子场论都能用重正化的方法来解决它的发散困难。例如, 费米所提出的弱相互作用理论就是不可重正化的, 因此它不可能是弱相互作用的基本理论, 只可能是某种现象性理论。杨振宁和密尔斯在 1954 年提出的非阿贝尔规范场理论为弱相互作用基本理论的建立开辟了道路。物理规律假使具有某种对称性, 与之相应, 一定存在某种守恒定律。杨振宁和密尔斯的理论的核心思想是: 物理规律假使具有某种定域对称性, 与之相应, 必定存在某种相互作用。

建立弱相互作用基本理论的另一个重要概念是希格斯在 1964 年提出的真空对称性自发破缺的机制。在非阿贝尔规范场论和真空对称性自发破缺的基础上, 格拉肖、萨拉姆和温伯格在六十年代提出了电弱统一理论。在七十年代, 这一理论的一系列结果为高能中微子实验和极化电子与氦核相碰撞的实验所证实。在 1983 年, 这一理论所预言的中间玻色子  $W^+$ ,  $W^-$  和  $Z^0$  在实验上被发现, 其性质在实验误差范围内和理论预言相符合。从十九世纪末发现放射性起, 八十多年来经过几代物理学家的努力, 终于建立起电磁相互作用和弱相互作用相互密切联系的基本理论。这一理论和麦克斯韦建立的将电和磁统一起来的电磁场论一样, 是物理学发展过程中的一个里程碑。

电弱统一理论具有同位旋空间中的  $SU(2)$  定域对称性和一个所谓“超荷空间”中的  $U(1)$  定域对称性。当前人们集中力量研究的一种强相互作用的基本理论——“量子色动力学”, 是

一种在色空间中具有定域  $SU(3)$  对称性的非阿贝尔规范场论。这种理论要求存在八种矢量场, 称为“胶子场”。与之相应的八种胶子的自旋均为  $\hbar$ , 是传递强相互作用的媒介。将层子和反层子结合成为强子的力就是由胶子传递的。量子色动力学的确具有渐近自由的性质。强相互作用的强度随着动量传递的增加而减弱。因此有可能用微扰论的方法和量子色动力学来探讨高动量传递的强相互作用的过程。低次近似计算的结果和实验结果定性符合。但要对量子色动力学进行定量的、精确的检验, 不仅需要精确的实验结果, 也需要精确的理论结果。因为更高近似的贡献相当可观而又难于计算, 而大动量传递过程的截面很小, 在实验上难于精确测量, 所以即使研究大动量传递的强相互作用过程, 在理论上和实验上还有困难, 需要进一步努力。用量子色动力学研究低动量传递的强相互作用过程和强子内部结构还要困难得多。量子色动力学是否是强相互作用的基本理论, 这一问题看来还需要作出艰苦的努力, 才能得出结论。

电弱统一理论和量子色动力学合称为“标准模型理论”。前些年好像有一些实验和标准模型理论相矛盾。但新的更准确的实验表明, 出毛病的不是标准模型理论, 而是那些老的实验结果错了。迄今为止, 还没有发现, 在标准模型理论和实验之间有不可克服的矛盾。在三十年代, 费米提出初步的弱相互作用理论, 汤川提出初步的强相互作用理论, 经过半个世纪的努力钻研, 通过艰难曲折的道路, 终于建立起能够经受住目前所有实验检验的标准模型理论。这当然是令人高兴的事。

但从另一个角度看, 标准模型理论又是一个新的起点, 必须从此出发, 探索更深入、更广阔的基本理论。因为在标准模型理论中的参数多达约二十个。这一事实表明, 标准模型理论内部还包含有相当份量的现象性理论的内容。必须探索这部分现象性理论的本质, 使之发展成为基本理论。

此外, 作为万有引力相互作用的基本理

论——广义相对论在量子化以后出现的发散困难不能用重正化的方法来解决。这一矛盾也迫使理论非向前发展不可。

在标准模型的参数中，一小部分来自规范场部分，因此和物理规律的对称性有关。要减少来自这方面的参数，看来需要探索物理现象是否隐藏着更大的对称性。目前理论探索中相当大的一部分如大统一理论、超对称理论、超引力理论、超弦理论等，属于这一方面的研究。

这些参数中的大部分来自希格斯场部分，因此和对称性的破缺有关。在标准模型中，一切粒子的质量都和希格斯场有关。不仅如此，将不同代的层子联系起来的也是希格斯场。因此，弄清楚希格斯场的实质是什么，使对称性破缺的机制是什么，是非常重要的研究课题。目前理论探索工作中有一部分（如动力学破缺理论、人工色理论等）就是属于这个方向上的研究。

如前所述，表1中所排列的轻子和层子同化学元素的周期表很相似。这种规律性和为什么存在代的问题，在标准模型理论中都没有得到解释。因此当前也正在探索轻子和层子是否也是具有内部结构的复合粒子。人工色理论则探讨希格斯粒子是具有内部结构的复合粒子的可能性。也有人在探讨，中间玻色子  $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z^0$  是否也是具有内部结构的复合粒子。超弦理论也在探索物质结构的新的形式。因此，探索物质结构的下一个层次，也是当前粒子物理理论研究的一个重要方向。

从物理学发展的历史看，这两个方向长期以来是物理学中两个相互密切联系的非常重要的发展方向。发现空间和时间是一个不可分割的四维统一体，将空间的对称性和时间的对称性扩大为彭加来对称性，就可导致狭义相对论。引入空间、时间的定域平移对称性就可导致广义相对论。电磁相互作用其实是来源于内部自由度中的定域  $U(1)$  对称性。将这种  $U(1)$  定域对称性和同位旋空间中的整体对称性联系起来，扩大为  $SU(2) \times U(1)$  的定域对称性，并引进真空对称性的自发破缺，就可导致电弱统一

理论。与此同时，物理学的研究从太阳系结构深入到原子结构，从原子结构深入到原子核结构，再深入到强子结构。太阳系的结构和来自空间、时间定域平移对称性的万有引力相互作用密切相关，而原子结构和来自定域  $U(1)$  对称性的电磁相互作用密切相关。原子核结构和同位旋密切相关。强子结构和色空间中的定域  $SU(3)$  对称性密切相关。现在探索各种内部自由度之间的联系以及内部自由度和外部自由度之间的联系，探索更大的对称性和对称性破缺的机制，探索轻子、层子、中间玻色子  $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z^0$  以及希格斯粒子等的内部结构，这些探索正是前面谈到的物理学理论研究中的两个历史发展方向的继续。

但是，目前所有这些探索虽然可能在一些方面取得进展，但与之同时又常常带来新的困难。预言的新现象在实验上没有看到，而一些标准模型理论结果本来和实验结果符合，但新的理论结果反而可能和实验结果不再符合。

按照玻尔的对立原理，必须要求新的理论在目前实验所能达到的能量范围内，将标准模型理论作为某种很好的近似包括在内。在另一方面，还要求它能解决代的存在问题、规范等级问题和量子引力理论的发散困难问题。这将是目前正在用很大力量进行研究的超弦理论所必须通过的第一道检验关口。

归根到底，认识来源于实践。要使这些探索汇合到一个正确的方向上来，一定要由实验来提供指路标。但是迄今为止，连标准模型理论所预言存在的希格斯粒子还没有在实验上发现。这并不是说，标准模型理论在这里出了问题。因为标准模型理论只预言希格斯粒子的存在，并没有预言希格斯粒子的质量有多大，因此，也没有预言利用已有的能量最高的加速器和对撞机能否产生希格斯粒子。

前两年在实验上好像发现了一些新现象，似乎可能提供理论发展的指路标。但在最近一年来积累了更多、更精确的数据以后，发现这些所谓新现象只不过是统计涨落，并随着数据的增加而消失。从1986年开始，将有能量更高的

对撞机陆续建成。希望利用这些对撞机所进行的实验,能发现新的现象,为理论探索指路。

在三十年代以前,人们所认识的基本相互作用只有两种,即万有引力相互作用和电磁相互作用;所认识的“基本粒子”也只有两种,即电子和质子。当时就有人设想,一个真正的基本理论只应该包含三个有量纲的基本参数:  $\hbar$ ,  $c$ ,  $r_0$ , 其中  $r_0$  是一个基本长度。也许可以取作

$$r_0 = \sqrt{\frac{G\hbar}{c^3}} = 1.6 \times 10^{-33} \text{cm},$$

其中  $G$  是万有引力常数,是一个具有普遍意义的常数。所有一切形式的物质都参与万有引力相互作用,它来源于空间、时间的定域平移对称性。而空间、时间是物质最普遍的存在形式。

当时物理学理论中的基本常数只有六个:  $\hbar$ ,  $c$ ,  $G$ ,  $e$ ,  $m_e$ ,  $m_p$ 。物理理论下一步的基本任务是建立一个理论,从这个理论本身可以将下列三个无量纲常数推导出来:

$$\frac{c^2}{\hbar c} = \frac{1}{137},$$

$$m_e \sqrt{\frac{G}{\hbar c}} = 4.2 \times 10^{-23},$$

$$m_p \sqrt{\frac{G}{\hbar c}} = 7.7 \times 10^{-20}.$$

爱因斯坦在他的后半生致力于统一地理解万有引力相互作用和电磁相互作用,爱丁顿在他的后半生致力于统一地理解电子和质子,但他们都没有成功。

看来宇宙比当时人们所设想的远为深广。

爱因斯坦和爱丁顿所致力研究的问题现在已经发展为如何统一地理解四种基本相互作用,如何统一地理解轻子和层子。可以提出比这更进一步的研究问题:如何统一地理解轻子、层子、光子、中间玻色子 ( $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z^0$ )、胶子、引力子、希格斯粒子等一切粒子以及它们之间的一切相互作用。

看来历史在重复。在十九世纪末,开尔文就曾经认为,物理学的发展任务已经完成了,下一代物理学家可以做的事看来不多了。过了三十年,人们认为只要能统一理解万有引力相互作用和电磁相互作用,统一理解质子和电子,将三个无量纲参数从理论本身中推导出来,物理学就大功告成了。过了五十年后的今天,又有人在谈论‘一切事物的理论’(The Theory of Everything)。

牛顿曾经说:“他只不过是像一个在海边玩耍的小孩,拣到几块美丽的石子,而自然界前面的大海,是一望无际的”。我想在本世纪末,全世界的物理学界能拣到几块大海边的美丽的石子,就是了不起的成就。

从这些年来的经验看,即使要在上述方向上踏踏实实地前进一步,不仅需要实验上的新发现指路,还需要玻尔在建立量子理论过程中的那种理论思维上的深刻洞察力。只有这种深刻的洞察力,才能从实验所提供的大批成果中看出关键性的实验结果,从而找到理论前进的突破口。