

粒子物理学展望

先鼎昌

(中国科学院高能物理研究所)

粒子物理学又称高能物理学或基本粒子物理学,它研究比原子更深层次的微观世界中物质的结构,和在很高能量下这些物质如何相互转化.它是一门基础学科,是当代物理学发展的前沿之一.

粒子物理学的发展经历了三个阶段.

一、第一阶段 (1897—1937)

在这个阶段认识的基本粒子有光子、电子、质子、中微子和中子.光子是构成电磁场的基本单元,而中微子是为了保证原子核在作 β 衰变中能量和动量守恒的一种理论上假设存在的粒子.它们作为最小的结构基石,构成了当时人们认识的整个微观世界.

在这个阶段,理论上最大的进展是量子力学的建立.

将量子力学和相对论结合,解释了实验上发现的表征微观粒子性质的一种新的物理量——自旋,这是一种量子化的、固有的角动量.光子的自旋是 \hbar (普朗克常数除以 2π),质子、中子、电子和中微子的自旋都是 $\hbar/2$.人们还预言,所有自旋角动量为 $\hbar/2$ 的粒子都有它们电荷相反、质量相同的反粒子.电子的反粒子——正电子在1932年发现,其它粒子的反粒子在五十年代中期以后才发现.

在这一阶段还确认了四种相互作用力的存在,即除了已知的引力相互作用和电磁相互作用之外,还发现了两种新的存在于基本粒子之间的相互作用力——强相互作用和弱相互作用.强作用力存在于质子与中子间,是把质子和中子结合成原子核的作用力.弱作用力是使原子核发生 β 衰变的力.这四种作用力的强度

依次为强作用力、电磁作用力、弱作用力和引力.标志它们的强度的无量纲相互作用常数及由它们引起的过程速率见表1.表中 c 为真空中的光速; m_e 及 m_p 分别为电子及质子的质量; G 为万有引力常数; e 为电子电荷; G_F 为费米弱作用耦合常数; g 为汤川强作用耦合常数

表1 四种相互作用力的无量纲耦合常数、反应率和力程的比较

	无量纲耦合常数	反应率 (s^{-1})	力程 (cm)
引力	$\frac{Gm_p m_e}{\hbar c} = 3 \times 10^{-42}$	甚小	长程
弱作用力	$\frac{G_F m_p^2 c}{\hbar^3} = 10^{-5}$	$< 10^{10}$	$< 10^{-14}$
电磁力	$\frac{e^2}{\hbar c} = \frac{1}{137}$	$10^{16} - 10^{19}$	长程
强作用力	$\frac{g^2}{\hbar c} = 15$	$10^{21} - 10^{23}$	$\leq 10^{-13}$

二、第二阶段 (1937—1964)

这个阶段的开始,以 μ 子的发现为标志.

核粒子之间的作用力是短程的,约为 10^{-13} cm,在这距离之外,核力很快消失.为了说明这个性质,1936年汤川秀树根据与电磁力的类比,提出了一个强作用的新理论.因为电磁作用力是由于带电粒子之间交换光子引起的(图1),由于光子没有质量,所以电磁作用力正比于 $1/r^2$,它是长程的.汤川假设,强作用力是由于质子和中子之间交换一种基本粒子产生的(图1).由于核力的短程性,这个基本粒子必须有质量,并且由此产生的力在小距离时正比于 $(\frac{1}{r^2}) \exp[-r/(\hbar/mc)]$,其中 r 为核粒子之间

的距离, m 是所交换的粒子的质量。由核力的力程可以估计, 这个交换的基本粒子的质量应当是电子质量的 200—300 倍, 介于电子与质子的质量之间, 故称为介子。

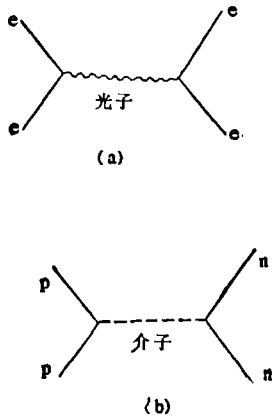


图1 汤川理论与电磁理论的类比(电子 e 之间通过交换光子产生电磁力, 质子 p 和中子 n 之间交换介子产生强作用力)

1. μ 子的发现

在最初几年, 汤川的理论并没有受到物理学界的重视。从 1933 年开始, 宇宙线实验中发现有一些粒子的穿透本领特强, 到 1937 年, 确认了这些粒子中包含有一种新粒子, 其质量是电子质量的 207 倍, 这就是后来被称为 μ 子的粒子。 μ 子不是稳定的粒子, 它衰变成电子和一对正反中微子, 平均寿命为 2×10^{-6} s, 其自旋为 $\hbar/2$ 。

μ 子被认为是汤川理论中所预言的粒子。从此, 汤川理论的重要性, 才普遍地被认识到了。

汤川最初提出的介子的电荷是正的或负的。1938 年 N. Kemmer 根据实验上发现的核力的电荷无关性(即质子与质子, 中子与中子以及质子与中子之间的强作用力是相同的, 与它们所带的电荷无关), 发展了稍早些时提出的同位旋的概念, 建立了核力的 $SU(2)$ 对称性理论。这个理论有两个重要结果: 一是除了带正、负电的介子之外, 还应当有不带电的中性介子, 三种介子的质量应当相同; 二是强相互作用的粒子按同位旋的不同, 分成一组组的多重态, 质

子和中子构成一个二重态, 它们是同一种粒子(即核子)的同位旋分量不同的状态, 而带有不同电荷的介子构成一个三重态。

2. π 介子、奇异粒子和超子的发现

μ 子并非汤川理论中引起强作用的粒子。1947 年, M. Conversi 等人发现 μ 子并没有强作用, 因此不可能是汤川理论中的介子。真正的具有强相互作用的介子是在 1947 年由 S. Powell 等人在宇宙线中发现的, 它们的存在, 后来又又在加速器上得到证实。它们的质量是电子质量的 270 倍左右, 带有正电荷或负电荷, 称为 π^\pm 介子。不带电的 π^0 介子在 1950 年被发现。后来, μ 子、电子和中微子被统称作轻子。

这是人类认识到大量基本粒子的开端。1947 年, G. Rochester 和 C. Butler 在宇宙线实验中又发现一系列新的奇异粒子。在这些奇异粒子中, 有质量比质子轻的奇异介子 K^\pm, K^0 和 \bar{K}^0 ; 有质量比质子重的 $\Lambda^0, \Sigma^\pm, \Sigma^0, \Xi^0$ 和 Ξ^- 等粒子, 它们统称为超子。

这些新发现的粒子都不稳定。除 π^0 介子(它的寿命是 10^{-16} s)外, 它们的平均寿命都在 10^{-6} — 10^{-10} s 之间。

所有这些被发现的基本粒子, 加上引力场的量子——引力子, 按它们相互作用的性质, 分成引力子、光子、轻子和强子四类, 见表 2, 其中引力子尚未在实验中发现, 但是人们普遍地相信其存在。

表 2 基本粒子按相互作用力分类

	引力	电磁力	弱作用力	强作用力	例
引力子	✓	—	—	—	g
光子	✓	✓	—	—	γ
轻子	✓	✓	✓	—	e, μ, ν
强子	✓	✓	✓	✓	π, K, p

3. 新粒子大量发现和强作用 $SU(3)$ 对称性的建立

为了研究微观世界, 从四十年代末开始建造能量越来越高、流强越来越大的粒子加速器。五十年代末, 随着一批高能加速器的建成和实

验上新的强有力的探测手段(如大泡室、火花室和多丝正比室等)的发明,开始了新粒子的大发现时期。到六十年代初,基本粒子的数目已经增加到比当年周期表出现时发现的化学元素的数目还要多,而且发现的势头还在增长。1961年由 M. Gell-Mann 和 Y. Ne'eman 提出的,用强相互作用的 $SU(3)$ 对称性来对强子(具有强相互作用的粒子)进行分类的“八重法”,就是粒子物理学中的周期表。不但当时已经发现的强子在“八重法”分类中都能找到自己的位置,“八重法”分类还准确地预言了一些新粒子的存在,其中最著名的是重子 Ω^- ,它在1964年被发现。八重法很好地说明粒子的自旋、宇称、电荷、奇异数以及质量等静态性质的规律性。

在此阶段中,证实了所有的粒子都有着它的反粒子,在上一阶段中,只有电子的反粒子——正电子得到实验的证实。而现在,反质子(1955年)、反中子(1956年)和反超子(1959年)等——被发现,其中第一个带电的反超子 Σ^- 是由我国的王淦昌教授等在1959年发现的。此外,还发现了为数众多、寿命极短、作强作用衰变的粒子。

基本粒子的大量发现,使人们怀疑这些基本粒子的基本性。基本粒子的概念面临一个突变。

在这个阶段中,理论上的最重要的进展是量子场论和重正化理论的建立,以及相互作用中对称性质的研究。

4. 量子场论和重正化理论的发展

量子力学应用于基本粒子现象,有不足之处:第一,它不能反映场的粒子性,例如电磁场还是用连续的麦克斯韦方程描述,光子的性质就不能反映出来;第二,它不能描述粒子的产生和湮没的过程,而这在基本粒子的现象中是普遍的现象,例如中子衰变成为质子、电子和反中微子;第三,它存在有负能量的解,这导致物理概念上的困难。量子场论是在相对论量子力学的基础上,通过场的量子化的途径发展出来的,它很好地解决了这三个问题。

然而,要确立量子场论作为基本粒子层次

的基本理论,还须解决一个重大的问题——发散困难。在量子场论的计算结果中,常常出现无穷大,这当然是不合理的。细究产生这些无穷大的根源,它们是和粒子的点的性质有关,这在古典的电子理论中就已经出现过。

在四十年代,对描述电子和光子现象的量子电动力学存在的发散困难进行过分析,由于 J. Schwinger、朝永振一郎(Y. Tomonaga)、R. Feynman 和 F. Dyson 等人的努力,在解决这个问题上有了突破性的进展。它们发现,量子电动力学中的无穷大无非会导致电子质量和电子电荷的改变,如果重新定义理论中的质量和电荷,使之与实验的观测值相应,则所有无穷大不会再出现。这种消除无穷大结果的方法,叫做重正化理论。今天,量子电动力学已经受了所有实验上的验证,成为电磁相互作用的基本理论。

5. 相互作用中对称性理论的进展

理论上另一重大的进展是相互作用中的对称性的研究。所谓对称性,就是量子场系统在某些对称变换下是否保持不变的性质这些变换,可以与时空有关,例如空间的转动、时空的平移变换、空间反射变换 P 、时间反演变换 T ;也可以与时空无关,而只与粒子的内部性质有关,例如把粒子换成其反粒子的电荷共轭变换 C ,把质子换成中子的同位旋空间的转动等。如果量子场系统在一种对称变换下保持不变,这时应当对应着一种守恒量,例如量子场论在时空平移下不变,对应的守恒量就是能量和动量。在五十年代初期,普遍认为在各种相互作用中,有着空间反射变换 P 、电荷共轭变换 C 和时间反演变换 T 的不变性,因此相应的量子数宇称和电荷宇称是守恒的。不过,这种观点,绝大多数是没有从实验上或理论上被严格证明过的。

1955年,经过周密的实验分析发现, θ 介子(一种衰变为两个 π 介子的奇异粒子,其宇称量子数为 $+1$)和 τ 介子(一种衰变为三个 π 介子的奇异粒子,其宇称量子数为 -1)有着相同的奇异数、自旋、寿命和质量。为什么两个在其它性质上可以认为是完全一样的粒子,却有

着完全不同的衰变方式，因而对应着不同的宇称量子数？这就是有名的 τ - θ 疑难。

1956 年，李政道和杨振宁指出，宇称守恒在弱作用中事实上并没有得到过实验上的证实。他们提出，在弱作用中，宇称是不守恒的，因此也不存在 τ - θ 疑难 τ 介子和 θ 介子是同一种粒子（现在称为 K^0 介子），但是由于在弱作用中宇称不守恒，所以它经过弱作用衰变出来的状态可以有不同的宇称，对应着不同的衰变方式。

1957 年，吴健雄等人在原子核 ^{60}Co 的 β 衰变的实验中，证实了宇称的不守恒。随后不久，宇称不守恒在其它的弱作用过程的实验中也得到了证实。这些实验，同时也是在弱作用中 C 的不守恒的证实。

曾经一度认为，尽管单独的空间反射 P 和电荷共轭变换 C 的不变性在弱作用中受到破坏，但是它们的联合变换 PC 在弱作用中还是不变的。

1964 年，发现在弱作用中， CP 不变性和 T 的不变性都不成立。不过，与宇称不守恒的显著程度相反， CP 的不守恒的程度是极为微弱的，其根本原因至今尚不了解。

三、第三阶段（1964— ）

这是粒子物理发展的现阶段。这个阶段，以强子的夸克组成假说的提出为标志。

并非所有的基本粒子都是基本的，这一思想最早是在 1949 年由费米和杨振宁提出的，他们认为， π 介子不是基本的，基本的是核子，而 π 介子只是由核子和反核子构成的结合态。在五十年代，基本粒子的数目有了很大的增加，1956 年，坂田昌一扩充了费米和杨振宁的模型，并提出了强子是由核子、 Λ 超子和它们的反粒子构成的 $SU(3)$ 模型。坂田的模型对介子的分类适用，但对重子的分类有着很大的困难。

1. 夸克假说的提出

到了 1964 年，基本粒子的数目增加到上百，使得 Gell-Mann 和 G. Zweig 提出 $SU(3)$

对称性的基础就是构成所有强子的构造单元，它们一共有三种，Gell-Mann 把它们命名为夸克（quark），现在习惯记为 u, d, s 。它们都是自旋为 $\hbar/2$ 的粒子，其性质见表 3。其中最奇异的地方，是它们的电荷是电子电荷的非整数倍。质子由 (uud) 构成；中子由 (udd) 构成； π^+ 介子由 $(u\bar{d})$ 构成； π 介子由 $(\bar{u}d)$ 构成等等。由于 Ω 是处在 s 态的三个 s 夸克构成的，夸克必须有新的对称性，才能保证这三个处在同一轨道状态和自旋状态的 s 夸克的统计性质。与这个新对称性相应的量子数，叫做色量子数。

表 3 夸克的性质 (e 是电子电荷的绝对值)

夸克	电荷	同位旋分量	奇异数	重子数
u	$(2/3)e$	$1/2$	0	$1/3$
d	$-(1/3)e$	$-1/2$	0	$1/3$
s	$-(1/3)e$	0	-1	$1/3$

近二十年来，人们在宇宙线中、在加速器上和岩石中寻找夸克，但尚未成功。目前流行一种假说：需要做无穷大的功才能把夸克从强子中完全分开。根据这一假说，夸克不能以自由的状态出现，这种性质，叫做夸克的囚禁。

2. 强子内部结构的实验证据

在六十年代和七十年代，有更多的能量更高、性能更好的加速器建成。虽然在这些加速器上没有找到夸克，但是却得到了间接说明夸克存在的证据。

从高能电子和高能量中微子散射截面的分析中，得到核子里存在有点状的、近似地自由的和质量不大的结构的结论。这些点状结构可以认为是夸克存在的证据。它们的电荷，可以由正、负电子湮没为强子的总截面加以验证。由正负电子湮没为强子的过程，可以看成正负电子湮没转化成光子，光子又转化成一正一反夸克，然后再由这对正反夸克组合成终态的强子。

3. 第四种和第五种夸克

在最初的假设中，夸克的种类只有 u, d 和 s 三种。1974 年，丁肇中及 Richter 等发现了一个新粒子 J （或称作 ψ ）。 J 粒子有着非常独

特的性质，显然不能认为由这三个夸克及其反粒子构成，而只能认为它是由一个新的夸克 c 及其反粒子 \bar{c} 构成。这个新的夸克 c 又称粲夸克，它具有一种新的量子数——粲量子数 C ，它的电荷是 $(2/3)e$ 。这第四个夸克及粲量子数的存在，不久便由一系列的新粒子 ψ' , ψ'' , D , F , η_c 等的发现得到更多的证据。

1977年，L. Lederman 等人发现了另外一个独特的新粒子 Y ，它的性质只能以它是由一种新的夸克 b 及其反粒子 \bar{b} 构成得到解释。这第五个夸克的存在，近年由新粒子 Y' 和 Y'' 等的发现得到更多的证据。现在称第五种夸克 b 为底夸克。它的电荷是 $(-1/3)e$ ，带有一种新的量子数——底量子数。

4. 轻子的新发现

与强子的数目急剧增加的情况相反，自从1962年证实了中微子分成 ν_e 和 ν_μ 两种之后，轻子数目一直就是四种： (e, ν_e) , (μ, ν_μ) 。1975年，Perl 等人在 e^+e^- 对撞中发现了一种新的轻子 τ ，它带正电或带负电，衰变成 μ 子或电子和两个看不见的中微子。它的质量很大，达质子的两倍，所以又叫重轻子。与此相应，普遍相信应有另一种中微子 ν_τ 存在，但是尚未得到实验上的证实。

迄今实验上尚未发现轻子有内部结构。 μ 子在各方面上都与电子相同，差别只在于质量，这是一直使物理学家困惑的问题，即所谓代的问题。 τ 的发现使轻子增加到三代： (e, ν_e) , (μ, ν_μ) 和 (τ, ν_τ) ，研究构成不同代的轻子的原因是目前粒子物理研究的中心课题之一。一种尝试是把轻子和夸克放在同一层次上来考虑（表4，表5），并考虑它们是复合粒子，是由更深一

层次的粒子统一地构成的。也许是由于实验上的证据不足，这种考虑目前尚缺乏可靠的基础。但是，至少因为我们对中微子 ν_τ 存在不怀疑，这种对称性强烈地意味着一个新的夸克——第6个夸克 t 的存在，人们称它为顶夸克，它应当带有 $(2/3)e$ 的电荷和一种新的量子数——顶量子数 T 。目前由第6个夸克构成的强子尚有待发现。

表4 轻子与夸克的对称性(这种对称性预言有第6个夸克 t 存在)

轻子			电 荷		夸 克		
$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix}$	0	$\begin{matrix} 2/3 \\ -1/3 \end{matrix}$	$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}$

表中电荷以电子电荷的绝对值为单位； ν_τ 和 τ 尚未发现

夸克理论提出后不久，就有人认识到强相互作用和弱相互作用必须与夸克联系在一起。根据这一点，再加上强子的结构特性和粒子衰变、反应等各种过程中的运动学特点，才能解释强子的寿命、宽度、形状因子、截面等动态性质。1965年，中国发展的强子结构的层子模型，就是这个方向的首批研究之一。层子的命名，是为了强调物质结构的无限层次而作出的。在比强子更深一层次上的层子，就是夸克。近二十年来，粒子物理理论发展的主流，一直沿着这个方向，在弱作用方面，有了突破性的进展；在强作用方面，也有很大的进展。

5. 电弱相互作用统一理论的建立

最早的弱相互作用理论，是费米于1934年在解释原子核的 β 衰变现象时提出来的。

宇称不守恒在弱作用衰变中的发现，给弱作用理论的研究带来很大的动力。不久便确立

表5 夸克与轻子的性质

夸克	质量 (GeV/c ²)	电荷 Q	奇异数 S	粲数 C	底数 B	顶数 T	轻子	质量 (GeV/c ²)	电荷 Q	电子数 l_e	μ 子数 l_μ	τ 子数 l_τ
d	0.008	-1/3	0	0	0	0	e	0.0005	-1	1	0	0
u	0.004	2/3	0	0	0	0	ν_e	0	0	1	0	0
s	0.15	-1/3	-1	0	0	0	μ	0.105	-1	0	1	0
c	1.2	2/3	0	1	0	0	ν_μ	0	0	0	1	0
b	4.7	-1/3	0	0	-1	0	τ	1.8	-1	0	0	1
t	?	2/3	0	0	0	1	ν_τ	0?	0	0	0	1

了描述弱作用的流，在洛伦兹变换下应当具有 $V-A$ 形式 (V 是矢量流， A 是轴矢量流)，称为普适弱相互作用理论，它适用于所有的弱作用过程。

尽管普适弱相互作用理论，在低阶的微扰论计算中得到了与实验相符合的结果，但高阶的计算中出现的无穷大是无法用重正化的方法消除的，这构成了费米弱作用理论的根本困难。

1961 年，S. Glashow 提出电磁作用和弱相互作用的统一理论。电磁相互作用是带电粒子之间交换自旋为 \hbar 的光子而产生的，与此类比，他提出弱作用是由于粒子交换自旋为 \hbar 的介子而引起的。两种相互作用由一个统一的图象给出，统一的基础是它们满足一种特殊的对称性—— $SU(2) \times U(1)$ 对称性。由于这种对称性，产生弱作用的介子有三种： W^\pm 和 Z^0 。（图 2）。但是，这个理论中 W^\pm 和 Z^0 介子的质量及理论上是否可以重正化等问题，没有得到解决。

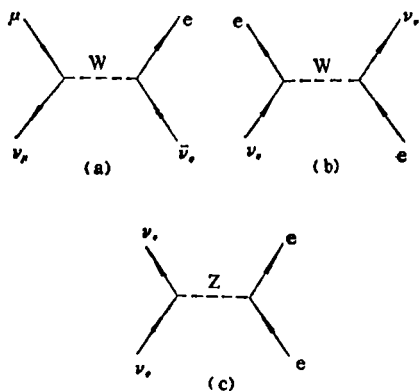


图 2 (a) 电弱统一理论中的 μ 子散射；
(b), (c) 中微子散射

1967 年，S. Weinberg 及 A. Salam 在 $SU(2) \times U(1)$ 定域对称性的自发破缺的基础上，弄清 W^\pm 和 Z^0 作为规范场粒子，它们的质量，以及弱作用耦合常数与电磁作用耦合常数之间的关系等。这个理论提出之初，并没有引起太大的重视，但是由于后来证明了它是可以重整化的，这样由这个理论得出的结论有了可信的基础，情况才根本改变过来。电弱作用统

物理

一理论随即被推广于研究强子的弱作用现象。

在实验上，弱电作用统一理论得到了中性流实验等的大量证据，特别是在 1982 年底及 1983 年由 C. Rubbia 等人发现 W^\pm 和 Z^0 规范粒子，它们的质量 ($m_W \simeq 80 \text{ GeV}/c^2$; $m_Z \simeq 90 \text{ GeV}/c^2$) 及特性与理论上期待的完全相符，这一实验给与这个统一理论很大的支持，使它有可能成为弱相互作用的基本理论。

6. 强相互作用研究的进展

六十年代初期，受到 $SU(3)$ 对称性在强子分类上取得的成功推动，提出了强作用的流代数理论，这是一种把强作用的对称性和色散关系等理论所沿用的解析性讨论结合起来，研究量子场论中出现的强子流算符的性质的理论。研究表明，这些流算符满足一定的代数关系，并由此得到了一些关于耦合常数之间、各种过程之间的关系及反常磁矩等物理量的结果。虽然这些结果与实验符合，但是流代数并没有给强作用带来突破性的进展。

六十年代末和七十年代初的高能散射实验，给出强子的两个最显著的特征，即强子内部存在点状结构，这些点状结构在很小的尺度中相互作用很微弱，有如自由粒子（渐近自由现象）。很明显，强相互作用理论必须考虑这些内部结构。

1973 年，由于定域规范场理论的进展，G. 't Hooft 和 Gross 等人发展了强相互作用的量子色动力学理论。与量子电动力学一样，量子色动力学是一种定域规范理论（表 6）。在这个理论中，严格的对称性是 $SU(3)$ 对称性。强相互作用是由于带有色荷的夸克之间交换胶子而产生的（图 3）。由于胶子是规范粒子，所以同光子一样，它是没有质量的。但是，光子没有电荷，而胶子却带有色荷，正是这个差别，使得强子之间的强作用力是短程力，而且有着渐近自由的性质。很可能也是因为这个性质，使得必须做无穷大的功，才能把强子里的夸克完全分开，否则造成夸克囚禁。不过，这一点，尚未得到严格的证明。

在小范围 ($\lesssim 10^{-14} \text{ cm}$) 中，由于强作用耦合

表 6 量子电动力学和量子色动力学的比较

	量子电动力学	量子色动力学
对称群	$U(1)$	$SU(3)$
守恒量子数	电荷	色荷
规范场的量子	光子(一种)	胶子(八种)

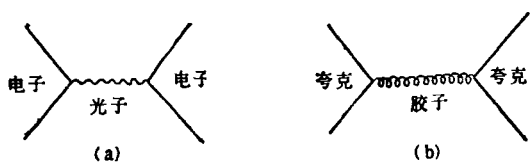


图 3 (a) 产生电磁相互作用的机制;
(b) 强相互作用的机制

数微小,量子色动力学可以做微扰论展开。尽管目前对夸克,胶子的囚禁性质尚未弄清,不得不引进诸如复合、碎裂等唯象概念,但也能较好地解释了一些高能实验结果: R 值随能量的变化;轻子-核子深度非弹性散射的结构函数对无标度性的偏离;高能下的喷注现象等。但在大范围 ($> 10^{-14}\text{cm}$) 中,量子色动力学除了不能用微扰论展开的困难外,还存在一些根本的问题。

作为强作用的基本理论,量子色动力学是一种有希望的理论。

7. 粒子物理的前景

目前,粒子物理已经深入到比强子更深一层次的物质的性质的研究。更高能量加速器(1 TeV, 即 10^{12}eV 质子加速器及 $2 \times 100\text{GeV}$ 的正负电子对撞机)的建造,无疑为粒子物理实验研究提供更有力的手段。使有可能产生更多的新粒子,以弄清夸克的种类和轻子的种类,以及它们的性质、它们的可能的内部结构。

电弱相互作用统一理论目前取得的成功(特别是弱规范粒子的发现),加强了人们对定域规范场理论作为相互作用的基本理论的信念。但是也要看到,这个统一理论的最后证实还有待于黑格斯粒子性质的澄清。电弱作用统一理论的进展,对今后以高能轻子作为探针,研究强子的内部结构、夸克及胶子的性质甚至强

作用的性质将起积极作用。

夸克之间的强作用性质研究的突破性进展,是能够建立强作用基本理论的前提。一些根本性的重大问题如囚禁、碎裂等,有待于近期的实验及理论上的进展来加以解决。在今后一个时期内,强作用将是粒子物理研究的一个重点。

电弱统一理论所取得的成就,鼓舞着许多人尝试把强作用也统一进去,使电磁现象、弱作用现象和强作用现象有一个统一的图象。这种理论通常称作大统一理论。它的出发点是把对称群扩大,大到足以包含强作用的对称群和电弱作用的对称群。夸克与反夸克,轻子与反轻子,构成这个大群的表示的基,通过自发破缺的方式来依次讨论强作用和电磁作用。大统一理论的一些直接推论是:质子是不稳定的;重子数是不守恒的;中微子是可以有质量的等等。目前,实验上正在对这些推论进行检验,但迄今未得到肯定的结果。

大统一理论也取得一些令人鼓舞的成果,例如给出重正化的 Weinberg 角 θ_w , 解释宇宙中物质-反物质的不对称性等。但是,它也遭到不少批评:它有许多参数——即使是在最简单的模型中,也包含近二十个无量纲的参数;它有两个相差极大的质量尺度—— W^\pm 和 Z^0 粒子的质量尺度 ($\sim 10^2\text{GeV}$) 以及三种相互作用强度相等时的能量尺度 ($\sim 10^{15}\text{GeV}$); 它不能解释为什么有三代轻子;它对质量谱的规律不能有所说明等等。这些批评的结果之一是提出超对称和超引力理论。

超对称是存在于费米子及玻色子之间的对称性。在超对称理论中,费米子和玻色子共同构成超对称群表示的基,成为超多重态。在这种理论中可以大大地减少不确定的参量的数目,而且由于手征对称性,作为旋量粒子的对应粒子的 Higgs 粒子的质量不大,这样就有可能解决大统一理论中两个相差极大的能量尺度的问题。在超对称理论中,对应于每一个玻色子,有一个费米子,反之亦然。例如,对应于光子

(下转第 467 页)