

# 关于规范场理论

段一士 葛墨林

(兰州大学)

在这一评述性报告中,我们想从规范场理论的发展概况,谈谈研究它的重要性和必要性。目的是希望促进我国高能物界对于规范场理论的研究予以足够的重视。

一、规范场理论是描述宏观和微观物质运动及其相互作用的某种具有普适性的客观规律。

规范场理论是否是客观规律,首先要从实践来检验它。十九世纪后半期由麦克斯韦所建立的经典电磁理论,以及本世纪初由爱因斯坦所创立的引力场理论是一百多年来宏观物理学中的两个重要成果,它们是长期经过实践检验的规范场理论,也即在宏观领域中存在下列两种严格的规范场理论:

1) 广义相对论

2) 经典电磁场理论

广义相对论是关于时间空间的性质与物质及其运动相互依赖关系的学说,是建立在广义协变性要求和黎曼几何基础上的引力理论。这一理论如果以度规 $g_{\mu\nu}$ 作为引力的基本场,它是严格的 $GL(4)$ 群的规范理论,如果以活运标架 $\lambda_{\mu\alpha}$ 作为引力的基本场,则它是局域洛伦兹群的规范理论。近二十多年来由于穆斯保尔效应的发现、微波和激光技术、空间技术和射电天文学的迅速发展,验证广义相对论的实验精度大大提高,除了三个基本实验之外,还提出许多新的验证方案。实验结果证实了爱因斯坦广义相对论的正确性,并排除了其它引力理论,例如 Brans 和 Dicke 理论的可能性。此外由广义相对论所预言的黑洞的存在,也接近于得到证实。

至于由 Maxwell 所建立的经典电磁场和电磁相互作用理论,它不仅长期经过实践的考验,并且在物理学和其它领域得到广泛的应用。这一理论早已知道它是  $U(1)$  群的规范理论。这里要特别指出的是 Bohm-Aharonov 实验直接证实了用  $U(1)$  电磁势  $A_{\mu}$  描述电磁现象的必要性。

在微观领域中,研究和确定基本粒子之间的相互作用机制是这一领域中的关键性的课题。只有确切的知道基本粒子的相互作用的具体形式以后,才有可能知道基本粒子真实的运动规律和它们之间的相互转化规律。除了微弱的引力作用以外,到目前为止已经发现存在三种基本相互作用:

## 1) 电磁相互作用

## 2) 弱相互作用

## 3) 强相互作用

在以高能物理实验为基础的基本粒子理论的发展过程中,人们已逐步将上述三种基本相互作用建立在规范场理论的基础之上,它们分别是:

## 1) 量子电动力学

## 2) 弱电相互作用的统一理论

## 3) 量子色动力学

其中量子电动力学已严格地为实验所验证。弱电相互作用的统一理论得到实验的验证,并未发现矛盾。而量子色动力学得到多方面实验的支持,还有待于进一步发展。这里必须指出,上述三种理论都是以轻子和层子(quarks)作为基本微观客体为基础建立起来的量子化的规范场理论。

以Maxwell经典电磁理论和Dirac相对论量子力学为基础所建立起来的量子电动力学(QED)是严格的 $U(1)$ 规范理论。由于这一理论可重整化,并可用微扰论进行计算,因而提供了理论与实验进行多方面和高精度比较的可能性。例如Lamb移动,电子和 $\mu$ 粒子磁矩等方面的理论计算与实验符合的程度是物理学中少有的,并且在确定精细结构常数的数值方面,由与QED理论无关的Josephson效应测得的结果得到可靠的旁证。

在弱相互作用方面,由于四个费米子直接耦合的相互作用形式不能重整化,并且对于某些反应(例如 $\nu + e^- \rightarrow \mu^- + \nu$ )在高能情况下会迁到破坏么正性的困难。促使人们逐步相信传递弱作用的中间玻色子存在的必要性。1967年Weinberg和Salam建立了以 $SU(2) \times U(1)$ 群规范场理论为基础的弱电相互作用的统一模型。为了使传递弱作用的中间玻色子具有质量,模型中引入了Higgs机制。这一理论不仅保持了旧弱作用理论的成功之处,有很好的高能行为,而且可以重整化。并且预言了中性流的存在。十年来 $W-S$ 弱电统一理论在多方面经受了实践的考验,由它所导出的中性流,通过中微子的各种反应证实与实验符合得很好。

此外这里还须指出,由于实践上证实在弱作用中不存在奇异数改变的中性流,1970年Glashow, Iliopoulos和Maiani提出在层子的弱流中必须有第四个层子参予。以后称之为GIM机制。它成功地解释了 $K_L \rightarrow \mu \bar{\mu}$ 衰变的小几率和 $K_L$ 与 $K_S$ 的质量差。并预言了具有粲(Charm)量子数的层子的存在,其质量不大于 $10\text{Gev}$ ,虽然GIM机制在理论体系上与 $W-S$ 模型没有直接联系。但它的建立和取得成功是以存在中间玻色子为前提的,因此它与弱电统一的规范场理论有间接关系。

人们已经十分清楚为什么对于组成强子的层子必须引入色量子数(Color),这不仅可以解决重子中层子自旋和统计的矛盾和强子内部层子间强相互作用的饱和性问题,而且有助于解释 $e^+e^-$ 对碰反应中产生强子截面的数值,以及 $\pi^0$ 衰变为 $2\gamma$ 的几率

的数值,在反用一套层情况时与实验比较数值偏小的差异。如果进一步认为色层子之间传递强相互作用的胶子是规范场,这就产生量子色动力学。当前流行的量子色动力学是建立在以 $SU(3)$ 色对称群为基础的规范场理论,称为 $QCD$ 。几年来量子色动力学在强相互作用领域中已逐步显示出它的重要性。首先 $QCD$ 是一种可重整化的理论,其次利用这一理论所导出的渐近自由性质可以解释轻子与核子深度非弹反应所呈现的Scaling现象,并且说明了在更高能量时Scaling,是怎样破坏的。同时利用 $QCD$ 所具有的红外奴役性质,可以解释在大距离时,胶子将层子束缚住,并且层子难于从强子内部被击出。此外 $QCD$ 目前还得到许多其它实验的支持。

从以上的评述我们可以看出规范场理论不仅是宏观动力学的基础,而且有充分理由说明它可能也是微观动力学的基础。规范场理论的客观性是经过实践或部分经过实践检验的。

## 二、规范场理论的主要特征,为什么微观领域需要规范场理论

为了阐明规范场理论的主要特徵,先扼要叙述一下规范场理论的基本概念。从物理的直观来看,规范场理论首先要求某种物质场 $\phi(x)$ 它具有李群 $G$ 所表征的对称性。令 $S$ 是群 $G$ 与 $\phi(x)$ 相应的一个表示,规范场理论进一步要求:

1)  $S$ 是时空坐标的函数,也即对于群 $G$ , $\phi(x)$ 的变换是局域性的,称它为 $\phi(x)$ 的规范变换:

$$\phi'(x) = S(x)\phi(x) \quad (1)$$

2) 变换后的场 $\phi'(x)$ 和原来的场 $\phi(x)$ 具有同样的运动规律。

为了建立这种局域性的规范不变理论,必须要有满足下列性质的协变微商

$$D_\mu \phi'(x) = S(x)D_\mu \phi(x) \quad (2)$$

$D_\mu$ 的一般形式是

$$D_\mu = \partial_\mu - g\beta_\mu \quad \beta_\mu = \beta_\mu^a I_a \quad (3)$$

$I_a$ 为群 $G$ 在 $S$ 表示中的生成元, $\beta_\mu$ 称为规范势,它是由群 $G$ 规范不变性所诱导出来的一种新场。(2)和(3)要求 $\beta_\mu$ 必须满足规范变换

$$\beta'_\mu = S\beta_\mu S^{-1} + \frac{1}{g}(\partial_\mu S)S^{-1} \quad (4)$$

由 $\beta_\mu$ 可构成具有规范协变性的反对称张量

$$F_{\mu\nu} = \partial_\mu \beta_\nu - \partial_\nu \beta_\mu - g[\beta_\mu, \beta_\nu] \quad (5)$$

$$F'_{\mu\nu} = SF_{\mu\nu}S^{-1}$$

如果 $\phi$ 是费米子,由 $F_{\mu\nu}$ 和 $D_\mu \phi$ 可以构成下列简单形的规范不变的 $B_\mu^a$ 和 $\phi$ 的拉氏函数

$$L = -\frac{1}{4}T_{\mu\nu} [F_{\mu\nu} F_{\mu\nu}] - \bar{\psi} \gamma_\mu (\partial_\mu - g\beta_\mu) \psi - m \bar{\psi} \psi \quad (6)$$

上式告诉我们规范不变理论不仅要 有 $\beta_a^a$ 场的存在, 并且自动提供了具有确定形式的 $\beta_a^a$ 和 $\phi$ 场的相互作用拉氏函数。

$$L_I = g \bar{\phi} \gamma_a I_a \phi \beta_a^a \quad (7)$$

这说明规范场理论本身是一个严格的相互作用理论。 $g$ 是 $\beta_a^a$ 和 $\phi$ 场之间相互作用常数。此外我们注意到在拉氏函数(6)中, 还包涵了三个和四个 $\beta_a^a$ 场自身的相互作用, 但作用常数仍然由 $g$ 表征。

由于 $\text{Tr}[\beta_a \beta_a]$ 不是规范不变量, 它在拉氏函数中不能作为质量项出现, 因此 $\beta_a^a$ 所对应的粒子一般不具有质量, 但通过Higgs机制可使 $\beta_a^a$ 获得质量, 这就是通常所谓的自发破缺规范理论。

描述宏观物质运动的引力理论和经典电磁场理论是严格的规范理论, 这已经是不容置疑的客观事实。但为什么在微观领域中也需要规范理论作为基础, 这主要是由于规范场理论具有以下几方面的主要特征:

#### 1、在规范场理论中传递相互作用的粒子是矢量粒子

除了群 $G$ 是与四维时空坐标有关的变换群以外, 在其它李群的规范理论中, 规范势 $\beta_a^a$ 的上指标 $a$ 不是四维时空的张量指标, 因此 $\beta_a^a$ 是四维时空的矢量, 它所对应的粒子自旋为1。当 $G$ 是四维时空坐标变换时, 它所对应的规范理论在目前物理学中唯一的理论是广义相对论, 我们暂不讨论这方面的问题。

在微观领域中人们已经认识到轻子和层子属于同一层次, 强子不是最基本的, 它是由层子组成的, 并且认识到轻子仅参与电磁相互作用和弱作用, 而层子除参与上述两种相互作用外, 它们之间还存在强相互作用。根据相对论的理论, 任何相互作用传播的速度都是有限的。这就要求相互作用应以场的形式或量子化以后的场(粒子)来传递。实践已经证实电磁作用由光子传递, 并提出弱作用和强相互作用分别由中间玻色子和胶子传递。

光子的自旋为1, 它是矢量粒子这已是人们所熟知的客观事实。由于实验已经相当好地确定弱作用的耦合形式是矢量流和赝矢流形式。因此传递弱作用的中间玻色子只可能是矢量粒子。至于传递强相互作用的胶子, 也是矢量粒子, 目前的论据是矢量胶子能够解释在电子与核子深度非弹反应中为什么Scaling现象来得早, 并且是以什么形式破坏的。这对于标量和赝标量胶子来说是难于做到的。

因此在微观领域中传递相互作用的粒子基本上都是矢量粒子。这就给电磁作用, 弱作用和强相互作用纳入规范理论提供了一个重要的前提。

#### 2、具有普适的相互作用常数

在规范场理论中, 相互作用常数 $g$ 出现在协变微商

$$D_\mu = \partial_\mu - g\beta_\mu^a I_a$$

之中,相互作用常数 $g$ 和规范势 $\beta_\mu^a$ 都与 $D_\mu$ 所作用的场量 $\phi$ 所描述的具体对象无关,并且与群 $G$ 的表示无关。因此在规范场理论中,对于给定的群 $G$ ,作用常数 $g$ 和传递相互作用的矢量粒子 $\beta_\mu^a$ 都具有普适性。

电磁作用常数 $e$ 的普适性,已由实验多方面精确证实。例如在电磁作用方面, $\mu$ 粒子和电子除了质量不同外,至今没有发现任何差异。又如质子电荷 $q_p$ 与电子电荷 $e$ 之差目前测定的结果是

$$q_p - e < 10^{-21}e$$

因此 $q_p$ 和 $e$ 应该认为是相等的。有趣的是通过简单的计算就可知道,假如 $q_p - e \simeq 10^{-18}e$ ,这时由于原子破坏了电荷中性,星体之间的库仑排斥力将与万有引力几乎相等,也就不会有与万有引力有关的各种天文现象。因此从这个简单的道理来看也必须

$$q_p - e \ll 10^{-18}e$$

弱相互作用常数的普适性,也早已由 $\beta$ 衰变, $\mu$ 粒子衰变以及其它的弱反应所证实。这里要说明的是规范场理论只能保证裸荷的普适性,矢量流守恒(CVC)保证了重整化后物理的矢量耦合作用常数的普适性。至于层子的赝矢流作用常数,要受到强作用的修正,这是大家熟知的。

74年发现了 $J(\psi)$ , $\psi'$ 等新粒子之后,层子从味(flavor)的方面已增加到四种。77年又发现了比 $J$ 粒子重三倍的 $\gamma$ 粒子,使人们推测可能还存在第五种第六种不同味的层子。如果真的是这样,并且每种味的层子还需有三种颜色,则层子的数目将增至十八种。但不管存在多少种层子都必须保持由层子所组成的强子颜色的中性。只有这样才能保证强子内部强结合力的饱和性。这隐含着将“色”的概念和强作用的“荷”联系起来。只有带色的层子才具有强相互作用。色的中性保证了介子只能由色相同的层子和反层子组成,重子只能由三种不同色的层子组成。这同时解决了前面所谈到的统计性的矛盾。上述强子的物理图象,严格要求色相同的层子不管它的味如何都具有相同的强作用的荷。如果进一步要求色具有 $SU(3)_c$ 的对称性,这就意味着必须存在一个普适的层子和胶子之间的强相互作用常数。

因此从相互作用常数的普适性来看,它给微观领域三种基本相互作用纳入规范场理论提供了另一个重要因素。

3、具有确定的相互作用形式,并且动力学中自然地包含了这种相互作用。

在规范场理论中一旦给定了群 $G$ 和 $\phi$ ,则 $\phi$ 和 $\beta_\mu^a$ 的相互作用形式就完全确定,不再有任何人为选择的余地。这是规范场理论的一个十分重要的特征。相互作用拉氏函数包含三个内容:1)作用常数 $g$ ;2)传递相互作用的矢量粒子 $\beta_\mu^a$ ,它还必须是 $G$ 的伴随表示;3)由 $\phi$ 构成的矢量流。前面已经述及了1)和2),下面主要从流的角度探

讨论规范理论中的相互作用形式。

对于电磁作用,群 $G$ 是 $U(1)$ 。在此情况相互作用的形式是熟知的 $\bar{\psi} \gamma_\mu \psi A_\mu$ , 它已为量子电动力学所取得的丰硕成果完全证实。但这种矢量耦合形式还具有另一方面的重要特征,就是它保证了电荷守恒,也即电流密度的四维散度为零。

在弱电统一的规范理论中,群 $G$ 是 $SU(2) \times U(1)$ ,  $W-S$ 理论的电磁作用部分和非中性弱作用部分与旧理论基本上是一致的。因此检验 $W-S$ 理论的是否正确,主要看由这一理论中的相互作用形式所预言的中性流是否与实验一致。前面已经谈到,到目前为止 $W-S$ 理论在这方面与实验符合得相当好。

对于以 $SU(3)_c$ 为规范群的色动力学,由于轻子不参与强相互作用,并且在强作用的理论中宇称是守恒的,在确定相互作用形式方面要比弱作用单纯得多。如果排除胶子是标量和赝标量粒子的论据是充分的,确认胶子是矢量粒子,并且色层子具有 $SU(3)_c$ 对称性,那么形如 $g \bar{\psi} \gamma_\mu I_a \psi \beta^a (I_a = \frac{1}{2} \lambda_a)$ 的相互作用形式几乎是唯一的。这说明将强相互作用纳入规范理论是十分自然的事。

在规范场理论中,动力学中自然地包含了确定的相互作用的形式,并且这种相互作用形式与场 $\phi$ 的对称性有直接内在联系。这是规范场理论所独有的深刻内容。正如在经典力学中,牛顿第二定律和万有引力是彼此无关的两件事。但在广义相对论中运动方程自然地包含了引力作用,并预言了除牛顿万有引力以外的高级效应。这可以认为是规范场理论由于自身包含相互作用内容所取得的成功。

#### 4、规范场理论是可量子化和可重整化的理论

一个场的理论场能否量子化是能否用于微观领域的一个重要前提。近十年来非阿贝尔群规范理论在量子化方面所取得的成功是规范场理论能够从单纯的电磁作用扩展到弱作用和强相互作用领域的一个重要的原因。

其次规范场理论的可重整化性,特别是在引入Higgs机制后的规范场理论,由于原始的拉氏函数具有群 $G$ 的规范不变性,不影响理论的可重整化性使得规范理论能够在基本粒子领域得到更广泛的应用。这里应该注意的是规范场理论的可重整性是与规范不变性所导致的某些重要的内在联系是分不开的。例如Ward-Takahashi恒等式的成立就是一个重要的例子。

量子电动力学之所以能取得突出的成就,从某方面来说是由于它可重整化的,并且由于某些微扰展开的高级图形具有不发散的部分,使得理论与实验能够进行精确的比较。

$W-S$ 弱电统一理论之所以取得成功,并且令人置信,是由于这一理论自然地包含了中性流,可建立一个彻底的可重整化的弱作用理论,并避免了弱作用中的高级发散。

在强相互作用理论中。人们之所以认为量子色动力学是一个有前途的理论,也在于它是可重整化的。并且由于它是一个非阿贝尔规范理论,由重整化群方程导出

了粒子在大动量转移情况下具有渐近自由的行为,以及由于不具有红外稳定的零点所导致的红外奴役现象,使得部分子模型和强子是层子的强束缚态模型,有可能在非阿贝尔规范场理论中统一起来。

### 5、规范场的经典解和拓扑守恒量

在通常的场论中守恒流以及与它所相应的守恒量是由场的拉氏函数对某一变换的不变性所导出的(Nöether)定理。近几年来发现在非阿贝尔规范场(例如 $SU(2)$ ,或其它半单纯群的规范场)的理论中还存在一种与拉氏函数不变性无关的拓扑守恒流,它所对应的守恒量是作用常数 $g$ 的对耦荷 $1/g$ 。对于 $SU(2)$ 规范理论,如果作用常数为 $e$ ,则这种守恒量就是磁单极的磁荷。它说明了为什么 $SU(2)$ 规范场的无源解中包含了磁单极解。

最近还发现 $SU(2)$ 规范场方程还存在许多其它类型的无源解,例如孤立子(Soliton)解,瞬时子(Instanton)解等,它们具有非零的Pontrijagin拓扑数。

$$n = \frac{g^2}{32\pi^2} \int \text{Tr}[F_{\mu\nu} \tilde{F}_{\mu\nu}] d^4x$$

并认为 $n = \frac{1}{2}$ 的半子(Meron)解的存在可能与层子的禁闭问题有关。由于非阿贝尔规范理论是一种非线性场的理论。在这方面的探讨可以说刚开始,它可能包含着至今我们尚未发现的许多新的物理内容。

### 三、关于场的统一理论

爱因斯坦在将特殊相对论发展成为描述引力现象的广义相对论以后,他和他的同事曾以很大的精力致力于在宏观领域中将引力场和电磁场包含在一个更简单而普遍的场的统一理论中。结果他们花费三十年的时间在这方面所做的努力是徒劳的。但这决不能不加分析地由此得出结论说建立场的统一理论的想法是错误的。只能说在爱因斯坦当时,他所希望建立的那种内容的场的统一理论是没有必要的,并且看来也是不可能的。

今天在基本粒子领域中试图建立场的统一理论的基础和内容应该认为与爱因斯坦当时的情况绝然不同。今天人们为建立场的统一理论所作的各种努力是由于需要有一个统一的图象,统一的思想 and 统一的理论来解释目前基本粒子相互作用、相互转化过程中所呈现的复杂性,解决理论与实验以及理论体系本身所出现各种矛盾。在这方面的各种试探是以高能物理试验为基础的。弱相互作用和电磁相互作用统一理论的建立和取得的成功就是一个明显的例子。

轻子和层子的性质差别很大,弱作用、电磁作用和强相互作用之间从表面上看来也很少有共同之处,但通过在微观领域人们所认识到的各种完全对称性和部分受到破坏的对称性,深入了解旧理论体系所呈现的各种矛盾,以高能物理实验和规范场理论为基础,在微观领域建立起一个包含三种基本相互作用的统一的量子动力学理论也不是绝对不可能的事。