



杜东生

(一) 自然界相互作用力之谜

迄今为止，我们所知道的自然界中存在的相互作用力有四种：(1) 强相互作用力(即核力)，这是四种力中最强大的作用力。质子和中子就是靠这种力的束缚而结合成原子核的。(2) 电磁相互作用力。这是大家最熟悉的一种作用力。它存在于一切带电、带磁的物体之间。电子和原子核就是靠电磁力结合成分子、原子的。(3) 弱相互作用力。原子核的 β 放射性蜕变就是由这种相互作用力引起的。(4) 万有引力或称重力。它存在于一切物体之间。地球绕太阳的运动，天体在宇宙空间的运动都是由万有引力所支配。在通常的能量尺度，这四种力的强度是相差很大的。如果把强相互作用力的强度当作一，则电磁力的强度为百分之一(即 10^{-2})，弱作用力的强度为 10^{-10} ，万有引力的强度为 10^{-40} 。可见其强弱相差是多么悬殊。那么为什么自然界存在这么多如此不同的力呢？它们彼此有无联系？它们产生的根源是什么？从本世纪初开始就有许多科学家探索这个奥秘——作用力之谜。爱因斯坦曾经研究过电磁力与万有引力的统一，未能成功。海森堡也曾探讨各种作用力的大统一，也由于种种的困难半途而废。但六十年代后期美国物理学家格莱肖、温伯格和巴基斯坦物理学家萨拉姆，在现代高能物理实验的基础上，互相独立地探讨了弱作用和电磁作用力的统一理论，则取得了惊人的成功。人们自然要问，能否沿着他们的路子继续往前走，把弱作用、电磁作用和强作用三者统一起来呢？也就是说，是否存在一种更基本的作用力，它在能量比较低的条件下表现为三种不同的作用力，而在很高能量下则合为一种作用力？这就是大统一规范理论所研究的课题。所谓大统一规范理论，就是用规范场统一描述弱作用、电磁作用、强作用的一种理论。

是不是可以把万有引力也包括进来，而研究四种相互作用的更大的统一理论呢？是的，目前也有不少科学家在探索这种更大的统一。但至今其成就远不如

大统一理论大。故本文只介绍三种作用力的大统一理论。

(二) 大统一是客观存在的吗？

实验上早已证明，弱相互作用中的弱电流与电磁作用中同位旋为1的电流分量合起来满足 SU_2 群的对称性。这事实说明，电磁作用和弱作用是某种内在联系的。但电磁作用中的电流还有同位旋为零的分量。温伯格、萨拉姆等发现，如果把电流的同位旋为零的分量也加进来，就可用 $SU_2 \times U_1$ 的规范理论统一描写电磁作用和弱作用。他们发现，这个理论的两个耦合常数 $g(SU_2$ 耦合常数)和 $g'(U_1$ 耦合常数)可归结为一个耦合常数——电子电荷 e ，但要引进一个角度 ϑ_w ，这个角度不能从理论本身给出来，需要由实验确定。具体说来，他们给出 $g=e/\sin \vartheta_w$ ， $g'=e/\cos \vartheta_w$ 。实验定出 $\sin^2 \vartheta_w \approx 0.2$ 。到目前为止，由这个理论计算的各种结果都与实验吻合。因此我们有充分的理由相信， $SU_2 \times U_1$ 的弱、电统一理论是正确的理论。不过，这个统一虽然很成功，但严格说来，还没有把两种作用力真正归结为一种。因理论本身不能确定 $\sin^2 \vartheta_w$ 。

关于强相互作用，目前也找到一种比较有希望的理论即量子色动力学(简称QCD)。QCD是一种 SU_3 对称的规范理论，近年来已得到高能中微子-质子、高能电子-质子碰撞实验和电子-正电子对撞实验的支持。最近，在西德汉堡 DESY 实验中心 e^+e^- 对撞实验中，又间接证实了一种新的粒子——传递强相互作用的胶子的存在。而胶子是 QCD 所预言的。这可看做是对 QCD 理论的又一重要支持。

既然统一弱作用和电磁作用的理论尝试已经得到实验上的证实，既然我们有了有希望的强相互作用理论，而且这些理论都是规范场理论，那末，有没有可能同样用规范场理论把弱、电磁、强相互作用三者统一起来呢？这是一种猜测，这种猜测是否正确，归根结底要由实验来检验，但这确是一个非常吸引人的课题。

初步的尝试是令人鼓舞的。格莱肖等人首先提出

了 SU_3 对称的大统一规范理论。按照这个理论，强、弱、电三种力到了能量为 10^{14} — 10^{16} 京电子伏 (1 京电子伏 = 10^9 电子伏特) 的时候就合为一种相互作用了，在这个理论中只有一个单一的耦合常数。当粒子间相互作用的能量增高时，弱作用逐渐变强，强作用逐渐变弱，电磁作用强度很缓慢地变强。到足够高的能量 (10^{14} — 10^{16} 京电子伏) 合三为一。这种统一的相互作用随着能量升高逐渐变弱。用数学的语言讲，在低能量下，强、弱、电分别满足 SU_3 和 $SU_2 \times U_1$ 对称性，到了极高能量 10^{14} — 10^{16} 京电子伏，强、弱、电满足统一的对称性—— SU_3 对称。

当然，继格莱肖之后，别人又提出了不少其他的大统一模型理论。但大家公认比较好的模型是 SU_3 和 SO_{10} 规范理论。

大统一规范理论比旧有的理论有什么特点呢？首先，大统一理论包含了原有强作用理论 QCD 和 $SU_2 \times U_1$ 弱电统一理论。更重要的是，大统一理论给出了许多原有理论不能得到的结果。

(1) 大统一理论可自动导出电荷量子化。即宇宙间粒子的电荷取不连续值。可自动得到质子电荷与电子电荷绝对值相同。

(2) 大统一理论可以计算出 $\sin^2 \theta_W \sim 0.2$ 。而在原有弱电统一理论中是靠实验定出的。

(3) 大统一理论中重子数和轻子数都不守恒，故质子是不稳定的，它要蜕变。这个预言是激动人心的。它一旦被证实，将产生深远的影响。

(4) 大统一理论可以解释为什么宇宙中反物质少而物质占主导地位。还可解释宇宙中重子总数 N_B 与光子总数 N_γ 之比 $N_B/N_\gamma \sim 10^{-8}$ — 10^{-10} 也就是说，大统一理论对早期宇宙的发展过程的物理机制可以提供一些理论依据。

以上我们可以看到，沿着大统一的方向仅仅跨进了一步，就取得了如此多的收获。这事实说明，大统一很可能是客观存在的！当然，这只是探索的开端，更丰硕的成果还在后面。

(三) 质子不是永恒的

科学实验早已证明了，处在自由状态的中子是不稳定的。它要蜕变成电子、质子和反中微子 ($n \rightarrow e + \bar{\nu}_e + p$)，我们称之为中子的 β 蜕变，其平均寿命约为 15 分钟。处在原子核里的中子在核力作用下与质子构成束缚态——原子核。大多数的原子核里的中子将不蜕变。但有一些原子核里的中子也要蜕变。这类原子核具有 β 放射性。但迄今为止，科学家们没有发现质子的蜕变，不管质子是处在自由态还是束缚态。因此，“质子永恒”的想法可谓根深蒂固。但是，如果大统一理论是正确的，则“质子永恒”的观念必须打破。质子要蜕变成别的粒子。质子不是永恒的！大统一理

论计算给出，质子的寿命约为 10^{29} — 10^{33} 年。这当然是非常长的寿命，要知道，我们这个宇宙的年龄才只有 10^{10} 年呢！

质子蜕变的观念引起了各国科学家的极大重视。一旦实验证实了质子蜕变，我们的物理学又要大大前进一步。目前许多科学家争相测量质子的寿命而不惜昂贵的实验费用。

如何测量质子的蜕变呢？如果质子平均寿命是 10^{33} 年，则需要在一年的时间里不间断地观测 10^{33} 个质子才有可能看到一个质子蜕变的事例。 10^{33} 个质子的重量为 1700 吨 (若用水则为 1700 立方米)。用各种仪器去监测 1700 立方米的水可不是一件容易的事，况且还有各种干扰，特别是来自宇宙射线的干扰呢！按目前的实验技术，这类实验要花一百万美元以上。按照 SU_3 大统一理论，质子的主要蜕变方式及各种方式所占比例如下：

$p \rightarrow e^+ \pi^0, e^+ \rho, e^+ \omega, e^+ \eta, \dots$	约占 83%
$p \rightarrow \bar{\nu} \pi^+, \bar{\nu} \rho^+, \dots$	约占 15%
$p \rightarrow \mu^+ k^0, \dots$	约占 2%

目前世界上已经安排或考虑安排的探测质子蜕变的实验以探测 $p \rightarrow e^+ \pi^0$ 蜕变居多数。实验将上千吨的水放在矿井里，用大量的光电倍增管来观察 $p \rightarrow e^+ \pi^0, \dots$ 放出的契伦柯夫光。放在矿井下是为减少宇宙射线的干扰。

实验推断质子的寿命至少比 10^{30} 年要长，但科学家们正在夜以继日地改进实验装置，提高精度，估计近一、两年内可把质子寿命测量的下限推至 10^{31} — 10^{32} 年。

(四) 结 语

大统一理论是目前世界粒子物理学家研究的中心课题之一，它还处在年轻时期，还没有充分经受科学实验的检验。目前，人们正在一方面对它作进一步探索，一方面把它用于研究早期宇宙的演化过程。

参 考 资 料

弱电统一理论

- (1) S. Weinberg, *phys. Rev. Lett.* **19** 1264 (1967).
- (2) B. W. Lee et al. *Phys. Reports.* **9c** No. 1 (1973) 40.

QCD 理论

- D. J. Gross, F. Wilczek *phys. Rev.* **D8** 3633 (1973) **D9** 980 (1974).

大统一理论

- (1) H. Georgi, S. L. Glashow *phys. Rev. Lett.* **32** 438 (1974).
- (2) H. Georgi, H. R. Quinn, S. Weinberg *phys. Rev. Lett.* **33** 451 (1974).
- (3) J. Ellis. CERN preprint TH-2723 (1979).
- (4) D. V. Nanopoulos Harvard preprint HUTP-78/A0062.

(题头：牛枢学)