

从电弱统一理论提出到现在已经过去了 23 年。量子色动力学从诞生到现在也已经历了 17 年。在这期间 CERN 建成了 $E_{cm} = 60 \text{ GeV}$ 的质子对撞机 ISR; FNAL 和 CERN 分别建成了能量为 500 GeV 和 450 GeV 的质子同步加速器。以后又建成了 E_{cm} 从 3 GeV 到 100 GeV 的正、负电子对撞机 SPEAR、DORIS、CESR、PEP、PETRA、TRISTAN、SLC、北京正负电子对撞机、LEP, CERN 和 FNAL 又将它们的质子同步加速器扩建为 E_{cm} 分别为 900 GeV 和 1800 GeV 的 SPSS 和 TEVATRON。用这些加速器和对撞机进行了大量实验研究, 对标准模型理论进行多方面的检验。在去年 8 月在新加坡召开的第 25 届高能物理国际会议上总结了检验结果。结论是:

标准模型理论令人注目地成功地经受住了所有实验的检验。超出标准模型理论的实验结果一个也没有得到。

这个结论当然令人非常高兴。这是半个世纪以来全世界高能物理界努力探索和研究的结晶。可以说: 标准模型理论的建立是探索微观世界基本规律这个漫长过程中的一个里程碑。当然, 这不是终点, 我们必须继续前进, 在这个时候, 回顾走过来的历程, 并展望未来的前景, 也许是一个适当的时机。

标准模型理论是一个具有 $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ 定域对称性的量子规范场论, 其中 $SU(2) \times U(1)$ 对称是自发破缺的。理论中的基本组元是: 三代六种轻子

$$\begin{pmatrix} e^- \\ \nu_e \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \mu^- \\ \nu_\mu \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \tau^- \\ \nu_\tau \end{pmatrix}$$

和六种相应的反轻子、三代、三套、18 种层子

$$\begin{pmatrix} \mu^R \\ d^R \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \mu^G \\ d^G \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \mu^B \\ d^B \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} c^R \\ s^R \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} c^G \\ s^G \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} c^B \\ s^B \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} t^R \\ b^R \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} t^G \\ b^G \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} t^B \\ b^B \end{pmatrix}$$

和 18 种相应的反层子。三类传递基本相互作用的粒子:

γ : 传递电磁相互作用
 W^+, W^-, Z^0 : 传递弱相互作用

胶子 8 种 传递强相互作用
 最后是在实验上迄今还没有发现的、导致对称性自发破缺的希格斯粒子 H。

首先回顾一下实验和理论在发现这些组元时分别所起的作用。 e^-, μ^-, τ^- 的存在, 在实验上发现以前, 理论都没有预料到。但 ν_e 的存在早在实验发现以前泡利根据 β 衰变中电子具有连续能谱的特点就预言中微子 ν_e 的存在。但 ν_μ 是和 ν_e 不同的中微子, 则是实验的结果。在 τ^- 轻子发现以后, 理论就断定相应的中微子 ν_τ 不同于 ν_e 和 ν_μ 。

反粒子的存在是早就由理论预言的。在 1928 年狄拉克提出电子的相对论性波动方程的理论时就预言正电子的存在, 四年以后才在实验中发现了正电子。

至于层子, 迄今还没有在实验中发现处于自由状态的层子。但理论之所以能预言层子的存在则来源于实验。1952 年建成了 Cosmotron, 1954 年建成了 Bevatron, 1960 年建成了 AGS。利用这些加速器, 发现了一系列强子。这些强子的性质具有许多规律性。1961 年盖尔曼在理论上对它们进行分类, 发现可以用 $SU(3)$ 群的一维表示、八维表示和十维表示来分类, 并预言 Ω^- 粒子的存在。1962 年在理论上提出强子多重态中的粒子的质量所服从的公式, 从而预言了 Ω^- 粒子的质量。1963 年在实验上发现了 Ω^- 粒子。1964 年, 理论分析发现, 具有不同自旋的强子的性质之间也有联系。可以将自旋为 0 和 1 的介子纳入 $SU(6)$ 群的 35 维表示和 1 维表示, 将自旋为 1/2 和 3/2 的重子纳入 $SU(6)$ 群的 56 维表示。1964 年, 盖尔曼根据用 $SU(3)$ 群表示对强子分类的成功, 提出强子由三种夸克组成的假设。用 $SU(6)$ 对称性理论对重子中夸克的波函数进行分析, 发现重子内部还隐藏着前所未有的自由度: 色自由度。

在盖尔曼提出强子的夸克模型时, 还不能确定夸克是真正存在的物理实体, 还仅仅是理论中的数学框架, 因此从文艺作品中借用一个字典中没有的一个字“quark”来命名。一部分中国物理学家从已经认识到的自然界的不同层次的结构断定, 当时发现的那么多的“基本粒子”不可能是物质结构的终点, 自然界存在着更深层次的结构。因此将组成强子的组元称为“层子”。

在盖尔曼 1964 年提出的理论中, 夸克只有三种。



但1974年发现了第四种层子： c 层子。 c 层子的存在，理论早在1970年就预言到。当然这个理论上的预言也有它的实验基础：实验上始终没有发现改变奇异量子数的弱中性流过程，如：



1977年，实验又发现了理论没有预见到的 b 层子。 b 层子被发现后理论要求消除反常所导致的发散困难，从而预言 t 层子的存在，但 t 层子至今还没有在实验中被发现。

已经发现的轻子和层子共有三代。到底有几代，理论并没有预言。最近在实验上详细地研究了 Z^0 的各种性质，测量了一系列衰变过程的部分宽度，从而推断中微子只有三种。去年8月在新加坡会议上给出的实验结果是：

$$N_\nu = 2.96 \pm 0.06$$

至于传递相互作用的粒子的存在，都是理论首先预言的。光子的存在是爱因斯坦在1905年为了解释光电现象的实验结果而提出的。直到1923年这一预言才为康普顿散射的实验所证实。这是人们首次认识到微观世界中的波粒二重性。 W^+ 、 W^- 、 Z^0 的存在及其性质是电弱统一理论所预言的，1983年才在实验中被发现。至于胶子的存在则是量子色动力学所预言的，它的存在以后在高能强子碰撞中产生的喷注现象的特点中首先体现出来。

至于希格斯粒子的存在则是电弱统一理论早在23年以前就预言的，但是至今还没有在实验中被发现。

现在来回顾一下这些组元之间存在着的基本相互作用的发现及其规律的认识过程。首先是万有引力。人类在远古就开始天文观察，到16世纪末，已经累积了大量观测资料，相当系统和精确。在此基础上开普勒于1609—1619年间总结出了行星绕日运动的三条经验规律。约70年后，牛顿提出了万有引力的现象性理论，再经过200年爱因斯坦才在1915年提出经典的、基本万有引力理论，这就是广义相对论。广义相对论的一个重要的实验基础是Eötvös以一亿分之一的精度在实验上证明：引力质量等于惯性质量。到现在为止，广义相对论的实验检验和证实还只有四种。它所预言的引力波至今还没有被发现。广义相对论在量子化以后出现的发散困难迄今还没有找到处理的办法。万有引力的研究开始得最早，进展的步伐却很慢，这可能是因为万有引力非常弱，实验非常难做，大部分是天文观察。很难观察到极端引力条件下的现象，并对之进行系统的测量和研究。

人类早就观察到自然界的电磁现象。从18世纪到19世纪上半叶，对电磁现象进行了大量的、系统的实验研究。在此基础上，麦克斯韦于1864年提出经典的基本电磁相互作用理论。在光子的假说提出以后，在

量子力学发展的推动下，1927—1929年间建立了量子电动力学，量子电动力学的最低次近似结果和实验结果符合得相当好。但在计算高次近似时得到了发散的结果。1948年终于提出了处理发散困难的重正化方法。

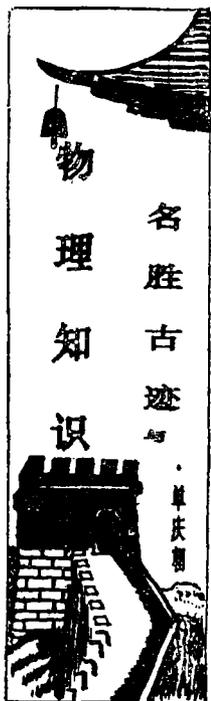
弱相互作用的存在是在实验发现了 β 衰变现象之后才认识到的。泡利提出中微子存在的假说以后，费米在1934年提出了四费米子弱相互作用的现象性理论。1955年实验上出现 θ - τ 之谜，这使李政道和杨政宁对一系列实验进行系统的分析以后认识到：在弱相互作用过程中宇称可能不守恒。吴健雄很快于1957年初在实验中证明：宇称在弱相互作用中不守恒，而且电荷共轭不变性也被破坏。此后有相当多的理论家认为CP联合起来还是守恒的。但1964年实验发现在弱相互作用过程中CP也是不守恒的。 $V-A$ 型普通弱相互作用现象性理论的提出也是导致电弱统一理论产生的一个重要环节，这是由于理论家对大量关于 β 衰变的实验结果进行了仔细的分析，发现支持弱相互作用中包含S、T型的实验结果不可靠的后果。

强相互作用的存在是在原子核实验研究中发现的。1935年汤川秀树提出核力的介子理论。1947年发现了 π 介子，于是物理界认为这就是汤川所预言的传递核力的介子，但以后在实验中发现了许许多多和核子有强相互作用的介子。这才使人认识到汤川提出的理论不可能是强相互作用的基本理论。目前的强相互作用的基本理论：量子色动力学，是理论家对大量实验结果进行了系统的分析，发现了隐藏的色自由度的存在之后，才建立起来的。

上面所介绍的关于对基本组元和它们之间的基本相互作用的探索和研究取得一系列进展，为标准模型理论的建立奠定了基础。最终导致标准模型理论诞生的还有两个理论上取得的重要进展：杨振宁和密耳斯提出的非阿贝尔规范场论，希格斯提出的规范对称性自发破缺的机制。

从以上简单介绍的发展情况看，实验研究和理论研究起着互相促进的作用。实验发现了当时理论所无法解释的新现象，促进理论向前发展。而理论的进展又导致超出当时实验结果的新的预言，促使实验进一步向前发展。当然，有些理论的发展来自理论的内部矛盾。例如：量子电动力学的发散困难导致重正化理论的建立。牛顿提出的瞬时相互作用的万有引力理论和狭义相对论否定了同时的绝对性之间的矛盾导致广义相对论的诞生。

理论来源于实践。但在理论终于掌握了现象深处的本质，发现了客观世界的基本规律以后，就将反过来引导实验。看来目前高能物理研究正处在这样一个阶段。因为到目前为止，所有可靠的实验结果都和标准模型理论的预言相符合。这表明实验还没有能够冲出



游览名胜古迹，不仅可以饱赏山水风光的优美，人文古迹的绚丽，还可以从中学习到不少的物理知识。

园林中一些奇特的建筑，往往蕴藏着丰富的物理知识。这些建筑，常不以雄伟华丽取胜，而以奇引人。扬州个园的四季假山，其冬山的雪山墙，墙上开了24个大圆洞，游客到此，感到不可思议。如稍加分析，则可发现：圆洞迎风而设，似如音孔，能“招风透声”，墙后一条封闭的“深巷”，仿佛乐器音箱产生共鸣，北风劲吹，不仅白山假山和“冰裂”似的石板地面，构成隆冬的雪景，呼啸的风声，又增添了游客入冬的意境。又如，古老的文峰塔，经8级地震，塔身无损，只是“塔尖坠落少许”。原来文献记载：该塔塔基“石筑须弥座”，且与塔身联成一体，因此，重心低，稳度大，似如“不倒翁”，又象现代建筑的打樁，使塔身荷重分散传至各方。

名胜古迹中厅堂匾额，是一种文学小品，有的也是物理小品。平山堂中堂上有一名句：“远山来与此堂

平”，说是江南诸山，与平山堂平。江南是百米高山，岂能与扬州土岗上的平山堂馆相平？这是文人的夸张？不！站在平山堂前看江南诸山，确有相平之感。其实，这一现象，如果用“透视原理”和“错觉”的解释，也就顿开茅塞了。

名胜中的一些雕刻，绘画等艺术，也常常可以用物理知识的角度来品尝。平山堂欧阳修肖像的胡须，为何近看为白，远看为黑？原来肖像是在黑板上刻画的，刻凹进去的白色“胡须”，其反射出来的光线，射到近看者的眼帘，故而为“白”。远看者，反射光射不到，则觉“黑”。这犹如站在远处看一座大楼的房间，是一个个黑洞洞，但站在近处看大楼房间，房间却又白又亮。又如鉴真纪念堂中有一幅画，画面上大殿的门始终随着游客走动而正面敞开，大雄宝殿中罗汉的眼睛也跟着人“转动”，这都可以用光学知识、相对运动、心理错觉来解释。

扬州的“天下第五泉”有两个。一口在平山堂西园池西，一口在池东，谁真谁假？议论纷纷。主张在池西者，是因为在那里曾掏出唐钱和古砖刻；主张在池东者，说是有一方丈丢失在外地泉水井里的随身水瓢，却被扬州第子在此井中发现，认定“地下水，息息相通”，象物理上的连通器，果真传说当真，岂不有点科学的情趣？又如徐园中有两口大铁锅，众说纷云，一说是六世纪肖梁时代的镇水遗物，一说是太平军用的军锅。如果实地测算一下它的重量和容积，用简单的热学知识计算便知：要用此锅烧一锅开水，需木材数吨，显然，军锅之传，不可取。

标准模型理论所表达的规律起作用的范围的边界。展望未来，首先必须进一步进行实验，对标准模型理论在更大的范围内进行更系统、更精密的检验。

当前高能物理实验研究的重要目标之一是发现 t 层子和希格斯粒子。根据最近一年来关于 Z^0 质量值的测量结果和 $\sin^2\theta_w$ 的精密测量值和理论分析，预测 t 层子的质量为

$$m_t = 137 \pm 40 \text{ GeV}$$

看来用 LEP 和 HERA 产生不了 t 层子，用 Tevatron 也许能产生 t 层子。当然，在本世纪末 LHC 和 SSC 建成之后肯定能够发现。最近实验给出希格斯粒子质量的下限已经提高到

$$m_H > 41.6 \text{ GeV}$$

但上限始终没有能定下来。

标准模型理论中有 18 个参数。有一部分在实验上已经定得很准，如 e 、 G_F 、 m_e 、 m_μ 、 m_τ 。有一部分已经定得相当准，如 $\sin^2\theta_w$ 、 m_{ν^0} 、CKM 矩阵元中的 $\sin\theta_{12}$ ，有些参数实验上定下来的准确度不够高，如： m_u 、 m_d 、 m_c 、 m_s 、 m_b 、CKM 矩阵元中的 $\sin\theta_{23}$ ，有些参数的准确度定得还比较差，如 CKM 矩阵中的

$\sin\theta_{13}$ ，和决定 CP 不守恒的相因子 δ 。有些定得不够精确的参数还必需用实验进一步提高其精确度。

与提高这些参数精确度的同时，还必需在更广泛的范围开展实验，进一步检验标准模型理论，应该研究尚未研究过的现象和过程。有些刚刚开始着手研究的问题，如规范场的三次项和四次项的效应，亟需进行深入的研究，有些实验的精度还需要提高。例如在 CERN 和 FNAL 测得的 CP 不守恒现象中 $\frac{\delta'}{\delta}$ 的数值还是彼此矛盾的。 $B_s - \bar{B}_s$ 的混合现象虽然已经发现，并测定相应的混合参数 r 的值为 0.21 ± 0.06 ，但 CP 不守恒在 B 衰变中的效应还没有在实验中被发现。

今后实验的精度必须提高，理论的精度也必须提高。例如：关于低能强相互作用过程和许多强子的性质在实验上已经测量得相当精确，但相应的理论研究的精度还很差，亟需提高。而且由于非阿贝尔规范场论是非常美妙的非线性理论，有非常丰富的内容，有待在理论上进行系统和深入的研究，以便将来用实验来检验。（待续）