

走向统一的自然力

强力、弱力和电磁力的大统一 (VI)

厉光烈¹ 阮建红²

(1 中国科学院高能物理研究所 100049; 2 华东师范大学 200062)

(2) 标准模型

标准模型, 准确地讲, 应是粒子物理标准模型。粒子物理是研究亚原子粒子的性质、结构及其在很高能量下相互转化的物理学分支学科。夸克模型的提出使人们认识到物质结构的基本组分是夸克和轻子, 作用在它们之间的强力和弱电力可以分别用 $SU(3)$ 规范场和 $SU(2) \times U(1)$ 规范场——相应的动力学分别是量子色动力学和弱电统一理论(或称量子味动力学)——来描述, 分别通过胶子、中间玻色子 (W^\pm 和 Z^0) 和光子来传递, 于是 $SU(3)$ 和 $SU(2) \times U(1)$ 规范场理论便构成了粒子物理标准模型。

前面提到, 夸克和轻子都有六种“味道”, 标准模型将它们按其质量各分为三代: $\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}$ 为第一代夸克; $\begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}$ 为第二代夸克; $\begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}$ 为第三代夸克。类似地, $\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix}$ 第一代轻子; $\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix}$ 为第二代轻子; $\begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix}$ 为第三代轻子。这样, 三代、六种“味”、三种“色”的正反夸克, 共 36 种; 三代、六种“味”的正反轻子, 共 12 种; 加上传递强力的带八种“色”的胶子 (g^8)、传递弱力的中间玻色子 (W^\pm 和 Z^0) 和传递电磁力的光子 (γ) 也是 12 种, 总共 60 种。有趣的是, “60”刚好就是我国农历编年的一个“甲子”, 而六“味”轻子对六“味”夸克又刚好是我们常说的吉祥语“六六大顺”, 可以说, 这些都符合我国传统的对称性。何以如此, 尚待进一步探索^①。

粒子物理标准模型, 虽然已经成功地经受住了实验的精确检验, 但是, 严格地讲, 还不能被看作是强力、

弱力和电磁力的大统一理论, 这是因为, 在这个模型中, 强力、弱力和电磁力的耦合常数还不能只用一个参数来描述; 另外, 它之所以被称为模型而不是理论, 是因为还有两个尚待解决的疑难。一是“夸克囚禁”: 夸克被色力囚禁在强子之中, 物质还无限可分吗? 另一是“质量问题”: 虽然借助希格斯机制通过对称性破缺可以解决“质量问题”, 但是, 为了拟合跨度高达 11 个量级的亚原子粒子的质量, 需要引入过多的待定参数^②, 故要进一步探索对称性破缺的本质以回答质量来自哪里。

物质无限可分吗

电子被束缚在原子中, 质子和中子被束缚在原子核中, 但是, 夸克是被囚禁而不是被束缚在强子之中, 囚禁与束缚的区别就在于: 实验上可从原子中敲出一个又一个电子, 也可从原子核中敲出质子和中子, 但是, 实验上至今尚未从强子中敲出单个夸克, 或者说, 夸克好似被大自然判了“无期徒刑”, 被永远囚禁在强子之中。那么, 物质还能继续往小里分吗?

千百年来, 人类一直在探索这样的问题: 我们周围的物质能否无限地往小里分? 远古时期, 不同派别的哲学家对这个问题做出了不同的回答。古希腊哲学家德谟克利特认为, 物质是由许多微小的、不可分割的单个颗粒组成的, 他把这种颗粒称为“原子”, 并认为这些“原子”是永恒的、不变的和不可穿透的; 物质的多样性是由构成它们的原子的形式不同、状态不同或结合方式不同而造成的; 另一位古希腊哲学家柏拉图却认为, 把物质一次又一次地往小里分, 最终遇到的将是数学形式——“正多面体”。这些“正多面体”可以由它们的空间对称性来确定, 也可以用

三角形来合成；这些“正多面体”本身不是物质，但是它们构成物质。这两种观念：一是说物质由实体颗粒——“原子”组成，具有不连续结构；一是说物质由数学形式——“正多面体”组成，具有连续结构，形成了鲜明的对比，但是，在二千多年后，却都得到科学的验证。1808年，英国科学家道耳顿根据他所发现的倍比定律提出了原子论的科学假说，成功地解释了许多化学现象；但是，物质的晶体结构又确实是由“正多面体”组成的，似乎证实了柏拉图的预言，只不过后来实验发现这些“正多面体”也是由道耳顿的“原子”构成的。那么，这些原子是否“永恒不变”、“不可分割”呢？在道耳顿提出原子的科学假说之后，这个问题仍困扰科学家近百年，直到19世纪末，X射线、天然放射性和电子的先后发现才使人们认识到，原子不是“永恒不变的”，不是“不可穿透的”，不是“不可分割的”。于是，科学家又开始将原子往小里分：原子分成原子核和电子；原子核分成中子和质子；接着，发现了 π 介子、K介子和 Λ 超子等数百种亚原子粒子，并将它们归类为轻子、强子和媒介子，前一讲中对此已有介绍，这里就不再赘述。

前面提到，盖尔曼和茨韦格于1964年分别独立地提出了夸克模型，认为所有强子都是由夸克构成的，随后不久，实验物理学家便发现了夸克模型预言存在的 Ω 粒子，从而验证了夸克模型。但是，不仅实验上至今尚未直接观察到单个的夸克，而且理论上也认为，夸克被囚禁在强子内部，实验上根本无法观察到带色的夸克。值得一提的是，强子的夸克结构也具有对称性，即所谓 $SU(3)$ 对称性，因此，夸克可能就是柏拉图所说的“数学形式”，它们正是通过 $SU(3)$ 对称性来构成质子、中子和 π 介子等强子乃至所有的物质。于是，科学家和哲学家再次为康德悖论所困扰：一方面，人们可以将周围的物质分割为分子、原子，将原子分割为原子核和电子，将原子核分割为质子、中子……似乎物质可以这样永无止境地分割下去；另一方面，实验上确实无法把夸克从强子中“分割”出来，又使人们不得不怀疑：物质是否无限可分？

从德谟克利特提出原子“不可分割”到三大实验发现将原子“打破”，经过了2000多年，就是从道

耳顿提出原子的科学假说算起，也经历了近百年，而盖尔曼和茨韦格提出夸克模型至今只有50年，现在就说“敲不出夸克”、“物质不再可分”，似乎为时尚早。更不用说，实验物理学家用高能电子探测质子内部只是“看到”一些点结构，即所谓的流夸克，而不是夸克模型所预言的组分夸克，因此，究竟要从强子中打出组分夸克还是流夸克，实验物理学家并不清楚。也许，在可以预见的未来，科学家对物质结构的认识仍将重复连续-不连续-连续的循环，哲学家仍将为物质“可分”与“不可分”争论不休。

质量源自哪里

前面谈到“杨-米尔斯场”的时候，曾经提及使杨振宁困扰的中间玻色子质量问题，实际上，在弱电统一理论中，不仅传递弱力的中间玻色子存在质量问题，而且轻子和夸克在手征对称下同样存在质量问题，希格斯机制的提出，不仅解决了中间玻色子的质量问题，同时，用类似方法，也赋予了轻子和夸克质量，只是当时实验上一直未能找到希格斯粒子，使这一机制无法得到实验验证，于是，寻找希格斯粒子便成为了高能物理实验的主攻方向。

希格斯在根据他2010年11月24日在英国国王学院演讲录像整理的《寻找希格斯玻色子的一生》一文中指出：“寻找希格斯粒子的起始时间”是1975年，但因理论物理学家“完全没有在意”希格斯粒子的质量，未能给出恰当的预言，使得实验物理学家花了几十年的时间试图弄清应在什么能区寻找希格斯粒子。1984年，在德国电子同步加速器研究所（DESY）的双环储能（DORIS）正负电子对撞机上工作的Crystal Ball实验合作组曾经报道在 Υ 衰变中发现了希格斯粒子的信号： $\Upsilon \rightarrow H+g$ ，但是，他们后来的数据以及同期在美国康奈尔大学电子存储环（CESR）上工作的CUSB实验合作组获得的数据都未能验证这个结果，不过，这些实验却给希格斯粒子的质量加上了一个限制，即必须大于 $8 \sim 9 \text{ GeV}$ 。1989年，欧洲核子研究中心（CERN）的大型正负电子对撞机（LEP）建成后，第一次运行便确定了希格斯粒子的质量应大于 65 GeV ；第二次运行ALEPH实验合作组就发现了第一个质量在 114 GeV 的希格斯粒子候选事例，随后，

又在 115 GeV 附近发现了 10 个事例；LEP 运行 10 年后关闭，这时，寻找希格斯粒子的质量范围的下限已提高到 114.3 GeV。在随后的十多年中，与 LEP 同期建造的美国费米国家实验室的质子-反质子强子对撞机（Tevatron）成为唯一能找寻希格斯粒子的实验装置，但是，直到 2011 年 Tevatron 停机，从其上收集到数据仍不足以确认希格斯粒子的存在，只是将质量区间 100 ~ 103 GeV 和 147 ~ 180 GeV 从寻找希格斯粒子的质量范围中排除了出去。2008 年，设计能量为 14 TeV 的 CERN 大型强子对撞机（LHC）的建成为发现希格斯粒子创造了条件，2012 年初夏，在 LHC 环上的 ATLAS 和 CMS 探测器分别观测到质量为 126.5 GeV 和 125 GeV 的新粒子事例，同年 7 月 4 日，在 CERN 礼堂举办的报告会上，ATLAS 实验合作组的女发言人法比奥拉·吉亚诺蒂（F. Gianotti）和 CMS 实验合作组的发言人乔·因坎迪拉（J. Incandela）同时宣布发现了新粒子，相关实验结果发表在 2012 年《物理通讯》B716 卷上；Tevatron 也于同年在《物理评论通讯》109 卷上发表了更新的实验结果：在 120 ~ 135 GeV 能区观测到新粒子，这些实验以及 ATLAS 和 CMS 随后的工作从信号强度、耦合、自旋、宇称等方面确认了他们发现的新粒子就是标准模型预言存在的希格斯粒子，提出希格斯机制的比利时物理学家恩格勒特和英国物理学家希格斯因此荣获了 2013 年度诺贝尔物理学奖。

希格斯粒子，作为粒子物理学家一直在找寻的、粒子物理标准模型所预言的唯一的标量粒子，它的发现，不仅实验验证了希格斯机制，确认了“质量”来



恩格勒特和希格斯在 2012 年 7 月 4 日的新闻发布会上

源于真空对称性自发破缺，或者说，真“空”不空、“无”中生有，而且使标准模型的理论框架得以自洽。但是，为了拟合跨度高达 11 个量级的亚原子粒子的质量谱，标准模型不得不引入过多参数，使得这个模型尚不能被看作是一个完善的理论，这就意味着，仍需在真空中，或者说，在更深层次，去找寻“质量”的统一来源，以揭示真空对称性自发破缺的本质。

20 世纪 90 年代，在中国科学院理论物理所的一次学术研讨会上，本文作者（厉光烈）曾用下图的幻灯片来介绍粒子物理标准模型及其两个疑难，他将“颜色囚禁”和“真空破缺”中的“色”“空”两字用红笔框了起来，用“色空两难”来描述上述的两个疑难，并幽默地说：在座的粒子物理学家和核物理学家，当你们哪天弄清这里提到的“色空两难”时，你们就会发现，早在 2500 年前，佛祖释迦牟尼就在《般若波罗密多心经》中指出：“色不异空，空不异色；色即是空，空即是色”，也就是说，就像“波粒二象”意味着“波动”和“粒子”是微观客体的两种表现一样，“色空两难”可能意味着夸克的“颜色囚禁”和真空的“对称破缺”是更深层次物质运动形态在现实世界中的两种表现。希格斯粒子，作为来自“真空”的“信使”，它的发现，已经为揭示“色空两难”做出了贡献，展望未来，希格斯粒子工厂的建造必将为弄清质量的来源和统一自然力作出更大的贡献。

粒子物理标准模型

$SU(3)$ 和 $SU(2)\times U(1)$ +夸克色囚禁和希格斯机制

* 难题： 颜色囚禁 \Rightarrow 物质是否无限可分？
真空破缺 \Rightarrow 希格斯粒子（？）

般若波罗蜜多心经
(智慧到彼岸)

色不异空，空不异色；
色即是空，空即是色。

(3) 强力、弱力和电磁力的大统一

弱电统一理论告诉我们：弱力和电磁力在能量远高于中间玻色子质量时，它们是统一的，而在低能时，

弱电对称性自发破缺，表现为两种不同的相互作用：弱力和电磁力；同样，量子色动力学告诉我们：强力的耦合常数也是“跑动”的，在高速时，会变得很弱。于是，人们自然地要问：当能量更高时，强力的耦合常数是否会与弱电力的趋于一致，从而实现强力、弱力和电磁力的大统一呢？

乔治和格拉肖的 $SU(5)$ 模型

乔治 (H. Georgi, 1947 ~) 和格拉肖在 1980 年 9 月号《今日物理 (Physics Today)》上发表的《基本粒子力的统一理论》一文中指出：“量子电动力学、量子色动力学和最近公认的弱相互作用理论充分描述了小到 10^{-17} m (约为质子半径的百分之一) 的基本粒子间的作用力，这是目前加速器所能探测的最短距离。我们还不知道在更短的距离内会发生什么情况。但是，我们猜想，在距离达到 10^{-31} m 数量级时，所有三种相互作用 (以及其他尚未观测到的相互作用) 将会统一起来。也就是说，所有的相互作用会有相同的强度，而夸克、反夸克和轻子之间的区别将会消失。”接着，在简单介绍了“量子电动力学”、“量子色动力学”和“弱电统一理论”之后，通俗地介绍了他们于 1973 年底完成的“基本粒子力的统一理论”。



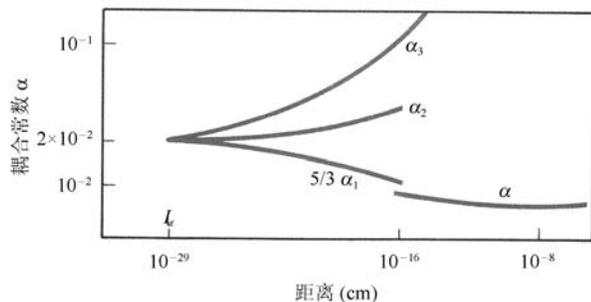
乔治

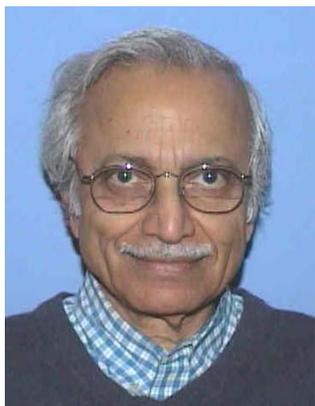
乔治和格拉肖的大统一方案采用的是 $SU(5)$ 对称群，他们取具有同一手性的夸克色三重态和轻子弱双重态作为这个群的基础表示，例如， d_R^r 、 d_R^w 、 d_R^b 、 e_R^+ 和 $\bar{\nu}_R$ ，这里上标 (r, w, b) 是色自由度^③、下标 R 表示右手粒子，由此构成了 24 个 $SU(5)$ 矩阵，与之对应，有 24 个规范场：其中一半对应于 8 个胶子场、3 个中间玻色子 (W^\pm 与 Z^0) 场和 1 个光子场；另一半则是在夸克和反轻子之间引起 5 种基本变换的 12 个 X 粒子场。显见，乔治和格拉肖的 $SU(5)$ 规范场可以涵盖 $SU(3)$ 色规范场和 $SU(2) \times U(1)$ 味规范场，或者说，他们的大统一

理论可以涵盖粒子物理标准模型。而且，由上例中的 e_R^+ 或 $\bar{\nu}_R$ 或 d_R^r 、 d_R^w 和 d_R^b 的线性组合可以构成带有整数 (包括零) 电荷的色中性的亚原子粒子，适当选取与上例类似的基础表示便可构成所有的亚原子粒子。应当指出：由于 $SU(5)$ 是单纯群，包括电荷在内的所有荷都是量子化的，于是，乔治和格拉肖的大统一理论自然地给出了电荷守恒定律，而这是粒子物理标准模型无法从理论上做到的。

乔治和格拉肖认为，在远小于 $L=10^{-31}$ m 的极短距离内， $SU(5)$ 规范对称性是明显的，在这种情况下，只需要一个耦合常数便可描述所有的相互作用，而且，与探测这样短的距离所需要的能量相比，所有的规范粒子 (胶子、 W^\pm 粒子、 Z^0 粒子、光子和 X 粒子) 都是轻的；在数量级为 L 的距离上，便会看到 $SU(5)$ 自发破缺的复杂物理过程： $SU(3)$ 耦合常数 α_3 ，即强力的耦合常数 α_s ，是最渐近自由的，随着测量距离的增加，它比 $SU(2)$ 耦合常数 α_2 增加得更快，而 $U(1)$ 耦合常数 α_1 ，由于光子不带电荷，完全不是渐近自由的，它随距离的增加而减小，这时产生的 X 粒子，其质量约为 $\hbar c/L$ 的数量级，比所有其余的规范粒子重得多；在远大于 L 的距离上，或者说，在 10^{-18} m 或更远的距离上， $SU(5)$ 对称性破缺为 $SU(3)$ 和 $SU(2) \times U(1)$ ，而且 $\alpha_3 > \alpha_2 > \alpha_1$ ，这时，X 粒子由于太重不能直接产生，因此实验上观测不到由它们引起的极弱、极短程的相互作用。下图是耦合常数 α_3 、 α_2 和 α_1 随距离的变化，显见，在距离达到“统一距离”L 时，所有三个常数是相同的 (只是 α_1 应有一个群论因子 3/5)；强力耦合常数 α_3 在距离大于 10^{-16} m 时变大，标志着由于夸克囚禁引起的 QCD 微扰理论的破缺；在大于 10^{-18} m 的距离， $SU(2) \times U(1)$ 的自发破缺使 α_2 和 α_1 降为简单的电磁耦合常数 α (它是出现在电磁相互作用中的

耦合常数 α 随距离的变化图。图中横轴为距离 (cm)，纵轴为耦合常数 α 。三条曲线在距离 $L \approx 10^{-29}$ cm 处交汇于 $\alpha \approx 2 \times 10^{-2}$ 。随着距离增加， α_3 增加最快， α_2 增加较慢， α_1 减小。在 10^{-16} cm 处， α_3 发生突变 (破缺)， α_2 和 α_1 也发生突变 (破缺)。





帕梯

α_1 和 α_2 的组合: $1/\alpha=1/(\alpha_1+1/\alpha_2)$ 。

差不多同时, 帕梯 (J. C. Pati, 1937 ~) 和萨拉姆也在 1974 年提出过一个大统一方案, 后人称其为帕梯-萨拉姆模型。在这个模型中, 轻子被看成夸克的第四种色, 和原有的三种色夸克一道

形成色 $SU(4)$ 群的基础表示。然后, 通过对称性破缺, 得到描述弱电力的味 $SU(2) \times U(1)$ 群和描述强力的色 $SU(3)$ 群, 其中色对称性也是破缺的, 因此, 夸克的囚禁是不完全的, 而在乔治-格拉肖大统一方案中, 色 $SU(3)$ 是没有破缺的严格对称性, 因此夸克的囚禁是完全的。

1974 年, 乔治·奎因 (H. R. Quinn) 和温伯格, 利用包括 $SU(5)$ 在内的一类大统一理论, 根据实验测知的 α 和已经测出但有相当误差的 α_3 估计出: $L=10^{-31}$ m 和 $\sin\theta_w=0.20$ 。当时, $\sin\theta_w$ 的实验值是 0.35, 这对大统一理论似乎很不利, 幸好, $\sin\theta_w$ 的实验值后来下降到 0.23 ± 0.02 , 这才与大统一理论的预言基本一致。

大统一理论最出人意料的预言, 就是质子本身(进而所有物质)是不稳定的, 在数量级约为 10^{31} 年的时间里, 一个质子会衰变成一个正电子和一个 π^0 介子。如果实验能够观测到质子的衰变, 那么大统一理论便通过了决定性的检验。

质子会衰变吗

前面提到, 乔治-格拉肖大统一方案中的规范场, 除了胶子场、中间玻色子场和光子场外, 还包括一种过去不知道的 X 粒子场。这种场传递一种超弱相互作用, 可以使夸克变成轻子, 也可以使轻子变成夸克。例如, 质子中电荷为 $\frac{2}{3}e$ 的 u 夸克可以放出一个电荷为 $\frac{4}{3}e$ 的 X 粒子变成电荷为 $-\frac{2}{3}e$ 的反夸克 \bar{u} , 然后, 这个 X 粒子再被该质子中电荷为 $-\frac{1}{3}e$

的 d 夸克吸收使其转变为正电子 e^+ , 而 \bar{u} 则与这个质子中另一个 u 夸克组成 π^0 介子, 也就是说, 质子在 X 场的作用下衰变成 e^+ 和 π^0 。由于这种与 X 场相联系的相互作用非常之弱, 故质子的衰变寿命极长。奎因、温伯格和乔治曾用 L 的计算结果来估计质子的衰变率, 后来, 欧洲核子中心的巴拉斯 (A. Buras, 1946 ~)、埃利斯 (J. Ellis, 1946 ~)、盖利亚德 (J-M. Gaillard, 1946 ~ 2005) 和内诺波洛斯 (D. Nanopoulos, 1948 ~), 美国加州理工学院的戈德曼 (T. Goldman)、罗斯 (D. Ross) 和洛克菲勒的马西亚诺 (W. Marciano) 等人改进了他们的估计, 得到的质子衰变率的估计值约为每 10^{31} 年衰变一个质子, 也就是说, “目不转睛”地盯着 10^{31} 个质子或数十吨水, 观察一年, 只可能看到一个质子衰变事例。

从 20 世纪 80 年代开始, 全世界的实验物理学家就在安排实验来检测质子衰变^④, 为了减少宇宙线本底, 或在地下深处建造蓄水数千吨的水库, 或利用地下废弃的矿井来安排大型实验装置, 具体地讲, 就是用契仑柯夫探测器来探测质子衰变后向两个相反方向放出的能量同为 500 MeV 的 e^+ 和 π^0 。由于 π^0 会衰变成两个 γ 光子, 只要观测到在探测装置内的某一点上突然放出一个 e^+ 和两个 γ , 便可确认那个点上有一个质子发生了衰变。例如, 印度和日本两国科学家利用印度柯拉 (Kolar) 金矿地下 2300 m 深处的废矿井来安装实验装置做探测质子衰变的实验, 他们所用的实验装置是由一层铁和一层探测器相间叠合组成的, 一期安装了 34 层, 重 140 t; 二期增加到 60 层, 重 260 t。他们的实验, 从 1980 年底开始运行, 到 1993 年结束, 虽然有几个事例候选者, 但是没有一个是令人确信的质子衰变事例。不过, 他们根据这十多年的观测数据推算出质子平均寿命在 10^{31} 年量级。随后, 有些实验以水作为探测物质, 例如, 美国的 IMB 实验、日本神冈 (Kamiokande) 实验和超级神冈实验等。IMB 和超级神冈都是利用契仑柯夫探测器观测水中质子衰变放出的 e^+ 和两个 γ 光子, 它们分别将质子寿命衰变下限提高到 10^{32} 和 10^{33} 年量级, 而神冈实验则是利用契仑柯夫探测器观测水中核子衰变放出的中微子, 将核子衰变寿命下降到 10^{27} 年量级。还有一些实验是用大型

液体闪烁探测器和 D_2O 探测器检测重子数改变的原子核衰变，得到的核子平均寿命在 $10^{29} \sim 10^{30}$ 年，甚至更低，在 $10^{23} \sim 10^{25}$ 年。但是，到目前为止，仍未观测到令人确信的质子（或核子）衰变事例。

按照粒子物理标准模型，重子数和轻子数是绝对守恒的。质子是最轻的重子，应该是绝对稳定的，但是，超出标准模型理论范畴的大统一理论却预言质子可能发生衰变： $p \rightarrow e^+ + \pi^0$ ，也就是说，有可能存在重子数不守恒的相互作用过程。虽然目前实验上尚未观测到令人信服的质子衰变事例，但是，宇宙中“物质比反物质多”所反映出的重子-反重子不对称性却为其提供了佐证。这个有趣的想法，最初，是由日本科学家吉村 (M. Yoshimura) 提出的，随后，斯坦福的埃利斯、盖利亚德、内诺波洛斯、温伯格、萨斯坎德和普林斯顿的特雷曼、威尔切克对它进行了详尽的阐述。他们指出，为了使宇宙大爆炸过程中产生的重子多于反重子，要求能够改变重子数的相互作用在反向进行时会显示出差别来，大统一理论满足了这个要求。总之，解决质子衰变问题，不仅可以验证大统一理论，而且有可能对重子数起源，进而对宇宙的未来、现在和过去有更多的了解和真理性的认识。

综上所述，外尔当初提出时空坐标的定域规范变换是试图统一电磁力和引力，但未能如愿；杨振宁和米尔斯将其推广为同位旋空间的定域规范变换，或者说，将阿贝尔群（即 $U(1)$ 群）推广为非阿贝尔群（即 $SU(2)$ 群），建立了杨-米尔斯规范场理论；格拉肖

在杨-米尔斯场的基础上引入 $SU(2) \times U(1)$ 规范场来统一描述弱力和电磁力，但仍然没有解决困扰杨振宁多年的“质量问题”；温伯格和萨拉姆，引入希格斯机制，解决了“质量问题”，建立了弱电统一理论，即规范场理论。差不多同时，盖尔曼和诺依曼提出夸克模型，格罗斯、波利策和威尔切克创建量子色动力学，即 $SU(3)$ 规范场理论，确立了粒子物理标准模型，即 $SU(3)$ 和 $SU(2) \times SU(1)$ 规范场理论，进而导致乔治和格拉肖、帕梯和萨拉姆提出强力、弱力和电磁力的大统一模型，并预言质子会衰变。但是，实验上至今尚未发现质子衰变的真实事例，因此，现在还不能说强力、弱力和电磁力的大统一已经实现^⑤。

① 当然，这里没有提到实验上尚未发现的引力子和将在后面再次谈及的希格斯粒子。

② 粒子物理标准模型中的参数包括：万有引力常数 G ；电子电荷 e ；夸克、轻子和中间玻色子质量 $m_u, m_d, m_s, m_c, m_b, m_t, m_e, m_\mu, m_\tau, m_Z, m_W$ ；卡比波角 $\theta_{12}, \theta_{23}, \theta_{31}$ 和 CP 破坏相因子 δ ；希格斯粒子质量 m_H ；以及量子色动力学中的强力耦合常数 α_s ，一共 19 个。如果再考虑三代中微子质量不为零，以及它们的混合参数和轻子 CP 破坏参量，那就更多了。

③ 现在文献中常用红 (R)、绿 (G) 和蓝 (B) 作为夸克的 3 色指标，但是，在乔治和格拉肖的文章中用的是 (r, w, b)，可能因为小写“g”已经用来标记胶子。

④ 其实，早在 1954 年，莱因斯和哥德哈伯就实验探测过质子衰变，当然，他们那时不是为了验证大统一理论，而是凭着物理学家的直觉，这里就不细说。

⑤ 大统一理论还应包含超对称理论，我们将在下一讲谈及超弦理论时再作介绍。

科苑快讯

为什么你总是迷路

当 GPS 稀里糊涂的指引你向“东”时，你是否盯着手机地图茫然无措？原来这可能部分归咎于大脑内嗅区 (entorhinal region, 最著名的记忆成功能区)，造成你方向感很差。根据发表在《当代生物学》(Current Biology) 网站上的研究论文，内嗅区帮助人类决定哪个方向可以到达目的地。为了适应各种环境，向导必须拥有良好的方向感，清楚他们当前所面对的方向和目的地所在方向。

在研究中，参与者探索一间虚拟的方形房间，四个角落各有一个独特物体，四面墙上都有不同的风景。志愿者熟悉环境后，就要通过一系列路径从一个角落

到另一个角落，研究者与此同时会用功能性磁共振成像监控其大脑活动。内嗅区一直以来被认为帮助确定已经面对的方向，但是向导规划一条线路时，必须想清楚目的地所在方向。

研究表明，大脑的该区域可能也决定下一次所去地点所面对的方向。当参与者想象他们通过方形房间的路径时，研究者发现信号强度与导航表现直接相关。为什么有些人从不为走哪个方向而迟疑，而有些人甚至不能顺利走出停车场，该研究也许可以提供新的见解。

(高凌云编译自 2014 年 12 月 18 日 www.sciencemag.org)