

粒子物理：从卢瑟福到 LHC

2011年8月出版的 *Physics Today* 杂志刊登了美国德克萨斯奥斯汀大学物理天文系教授、诺贝尔奖获得者斯蒂芬·温伯格(Steven Weinberg)的特写文章. 这是他在2011年4月美国物理学会上主题为“亚原子物理100年”的报告. 在报告中, 温伯格从欧内斯特·卢瑟福(Ernest Rutherford)的金箔实验讲到当今的大型强子对撞机(Large Hadron Collider, LHC). 他认为百年间人类对基本粒子的了解历经了不可思议的发展. 摘译如下:



图1 这幅蜡笔画由 R. G. Matthews 于 1907 年所画. 图中 Ernest Rutherford 正在加拿大的麦吉尔大学做报告

1911年3月7日, 卢瑟福在曼彻斯特文学和哲学学会的会议上宣布发现了原子核. 美国物理学会决定将这一天作为基本粒子物理的开始之日. 温伯格认为这是一个聪明的选择, 因为发现原子核所依赖的实验从那时起就成为粒子物理散射实验的范例. 更重要的是, 观察到大角度的 α 粒子散射使卢瑟福确信原子中大部分的质量和正电荷都应集中在原子核中心的小区域. 而此前一般认为原子就好像一个布丁, 而电子就像葡萄干散布在正电荷的背景之中. 原子核的发现是一系列后续的进一步发现链中最基本的第一步, 后经过多位物理学家的努力, 诞生了现代量子力学.

在量子力学取得初期成功之后, 基础物理学面临着两个明显的前沿:

一是要将量子力学推广到能处理相对论现象. 保罗·狄拉克(Paul Dirac)采用了将薛定谔方程推广成相对论方程的做法. 这看起来将成为预言基本粒子必须具有自旋为 $1/2$ (以普朗克常数 \hbar 为单位) 这一巨大胜利的核心, 但从今天的角度来看, 这个预言不是成功而是失败的. 因为还存在自旋为 1 的像

W 和 Z 中性玻色子那样从哪方面看都和电子一样基本的粒子, 我们当中很多人还相信将在 LHC 上发现同样基本但自旋为 0 的粒子. 另外, 很难将狄拉克方程推广到包含多个电子的系统. 那时的未来属于由几组人合作发展出的量子场论. 量子场论在 1933 年因恩里科·费米(Enrico Fermi)的 β 衰变理论而得以应用, 并从那时起成为所有成功的粒子物理理论的基本数学框架.

另一个明显的前沿是原子核. 20 世纪 30 年代, 对这个前沿的探索因理论家极不情愿假设新粒子而受到阻碍. 这里有 3 个例子: 首先在詹姆斯·查德威克(James Chadwick)1914 年发现的 β 衰变的电子连续谱中, 不是人们所期待的电子带走所有的核跃迁所释放的能量. 这个现象如此令人困惑, 以致于尼尔斯·玻尔(Niels Bohr)甚至建议在这些衰变过程中能量可能是不守恒的. 沃尔夫冈·泡利(Wolfgang Pauli)在 1930 年因提出中微子而遭到了众多质疑, 这些怀疑直到四分之一世纪后中微子被发现之前一直未能完全消失. 第二个是狄拉克早期认为他的理论中负能电子海中的空穴应该是当时唯一知道的带正电的质子. 虽然后来他改变了主意, 但 1932 年由卡尔·安德森(Carl Anderson)和帕特里克·布莱克特(Patrick Blackett)在宇宙线中发现的正电子还是让大多数物理学家很吃惊, 甚至包括安德森和布莱克特自己. 第三个例子是, 为了给出原子核正确的质量和电荷, 物理学家一开始假设原子核由质子和电子组成. 中子的想法一直未被接受, 直到 1932 年查德威克发现了它. 从今天的观点看, 即使早期存在明显的理论需求也不愿假设存在新的粒子的行为似乎十分奇怪. 今天的理论家如果在没有实验证据的情况下未引入至少一个新粒子, 他或她的业绩便很难得到业界的尊敬. 1935 年, 汤川秀树(Hideki Yukawa)花费了很大的勇气才在已知核力方程的基础上提出应该存在一个质量大约为质子质量十分之一的玻色子. 同时, 中子和质子具有相近的质量, 这预示它们之间应该存在某种对称性. 1936 年, Merle Tuve 及其同事发现质子-质子之间的核力类似于已知的中子-质子之间的力. 几乎立刻, 其

本栏目是经美国物理联合会(AIP)授权, 与 *Physics Today* 合作的项目

他物理学家就得出联系中子和质子的对称性应是数学家称之为 $SU(2)$ 的同位旋守恒群的结论. 在 20 世纪 40 年代末, 量子电动力学中有关无穷大的老问题得以由重整化理论解决. 而汤川介子—— π 介子也被发现, 并被区别于一个具有相近质量、在 1937 年被发现的粒子—— μ 子. 带一种新量子数——奇异数的粒子在 1947 年被发现. 所有这些粒子均在宇宙线中被找到. 在 20 世纪 50 年代, 加速器开始取代宇宙线作为发现新粒子的工具. 加速器变得越来越大, 直到具有地理特征, 从太空都可以看到.

量子电动力学的巨大成功自然导致人们希望用完全的量子场论描述所有的基本粒子及其相互作用, 但是这一进程遭遇了严重的障碍. 一是这样一种量子场论将要求对基本粒子进行选择. 由于发现了太多的新粒子, 不可能进行认真的筛选, 将它们中任何一个小的子集作为基本的组分. 还有, 虽然很容易设想各种形式的描述强相互作用的量子场论, 但人们无法处理它们. 强相互作用太强了, 以致于无法应用微扰论. 对于强相互作用, 某些理论家甚至放弃量子场论, 而只依赖 S 矩阵的一般性质, 以及针对所有散射过程的一组几率振幅. 另一个问题是怎样构造近似的对称性? 就像同位旋守恒, 或描述低能 π 介子性质的自发破缺手征 $SU(2) \times SU(2)$ 对称性, 或甚至更加近似地联系更大家族粒子的 $SU(3)$ 和 $SU(3) \times SU(3)$ 对称性? 甚至空间和时间反演及电荷共轭不变性, 最后都是近似的. 如果对称性是自然界简单性的一种表述, 近似的对称性是否是自然界近似简单性的一种表达呢? 对弱相互作用, 我们有费米在 1933 年提出的 β 衰变理论作为一种量子场论与实验很好地符合. 但当理论超出最低阶的微扰论以后, 人们碰到了不可能通过重整化移除的无穷大.

所有这些障碍通过 20 世纪六七十年代发展出的标准模型得以克服. 标准模型以推广量子电动力学的规范不变性为基础. 这些规范对称性中的部分是自发破缺的, 部分不破缺. LHC 无疑将给我们揭示控制电弱相互作用¹⁾ 的规范对称性破缺的机制. 存在一种明确的基本粒子选择方案——夸克、轻子和规范玻色子, 它们对应的粒子场将出现在标准模型当中. 仍旧很难准确计算由夸克组成的强子粒子, 它们感受到强相互作用, 但在高能区强相互作用变弱, 因而允许足够多的物理现象被计算的事实, 从而使我们知道理论是正确的, 并且, 进一步, 强相互作用在低能区变强的事实可能被用来解释为什么孤立

的夸克未被发现. 通过把可重整性条件施加到标准模型上, 使其变得很简单——拉氏量只包含有限数目的基本场以及作用在其上有限数目的时空微商. 这个条件是为了使在微扰理论中遇到的所有无穷大可以被吸收到拉氏量中有限数目常数的重新定义之中. 这种简单为像同位旋守恒那样的强相互作用神秘的近似对称性提供了自然的解释.

很明显, 标准模型需要被超越. 几个世纪以来, 我们注视着夸克和轻子的质量和混合角存在一个神秘的谱, 就好像它们是某种未知语言的符号, 我们人类尚无法翻译它们. 还有需要超出标准模型的东西来解释宇宙中的暗物质. 现在人们普遍相信标准模型只是一个有效理论, 它是在涉及远大于我们所熟悉的质量尺度的某种更基本理论的低能极限. 这意味着我们可以预期标准模型将要补充一些在通常意义下不可重整的相互作用, 但受到出现在分母上大的质量的压低. 无穷大仍然可被吸收到理论中常数的重新定义之中, 但重新定义的常数数目不再是有限的. 近年来, 我们发现了存在新的质量尺度在 10^{16} GeV 附近的证据. 标准模型的可重整相互作用自动保证重子数和轻子数守恒, 但没理由假设它们是绝对守恒的定律. 事实上, 发现中微子具有微小的质量预示着标准模型需要补充一些破坏轻子数守恒并受到一个量级 10^{16} GeV 的分母压低的不可重整相互作用. 温伯格非常期待本世纪的某个时间我们将会发现受到类似压低的轻子数不守恒过程, 由此质子衰变²⁾ 将成为粒子物理学家重点关注的对象. 当然在中微子质量发现之前很早, 我们就已经知道一些超出标准模型的其他东西——存在引力, 它预示着新物理应在质量稍大于 10^{16} GeV 的地方. 还存在这样的事实, 标准模型中对数依赖于能量的一个强相互作用、两个电弱相互作用的耦合常数, 看起来在 10^{15} GeV 到 10^{16} GeV 区间收敛到相同的数值³⁾. 有很多很好的如何超出标准模型的想法, 包括超对称和所谓的弦理论等, 但至今仍未有实验数据支持它们之中的任何一个. 即使政府慷慨地支持粒子物理研究到超出我们所希望的程度, 我们可能也永不

1) 电弱相互作用是把电磁作用和弱作用统一在一起的一种相互作用, 在低能区它会破缺成电磁相互作用和弱相互作用. 注意电弱相互作用, 或电弱统一, 不是简单的分开的弱作用加上电磁作用, 而单独的电磁作用的规范对称性是不破缺的. ——译者注

2) 重子数不守恒是质子衰变的必要条件. ——译者注

3) 这个事实通常被解释为强相互作用和电弱相互作用形成大统一的证据. ——译者注

可能建造那些能达到 10^{15} GeV 到 10^{16} GeV 能量的加速器。在未来某天,我们可能探测到很早期宇宙暴涨期间辐射出的高频引力波。同时,我们可以期望 LHC 及其后继者将为我们提供极其需要的能超越过去 100 年粒子物理成就的线索。所有这些值得吗? 我们是否真需要知道为什么有三代夸克和轻子? 或自然界是否具有超对称? 或暗物质是什么? 温伯格认为是值得的,因为回答这些问题是了解自然界如何从少数简单定律导出所有规则的下一个必要步骤。这个程序首先开始于卢瑟福发现原子核后几年发明的量子力学,在那时以前,化学还被看作是一个建筑在独立于物理原理之上单独的学科。而这些发展使得在 20 世纪初科学家可以宣称物理学是完备

的,虽然还没有人真去从物理原理推导出化学原理。物理学家并不担心,因为解释化学好像不是他们的工作。但在 1929 年,量子力学发展起来之后,狄拉克曾宣布“更大范围的物理和整个化学所需数学理论背后的物理学定律已经是完全知道的了。”还原的程序——追踪所有科学原理直到少数简单的物理学定律——不是唯一重要的一种科学,或唯一重要的一种物理,但它具有特殊的内在重要性并将在未来的世纪驱动粒子物理学家们继续前进。

(清华大学 王青 编译自 Steven Weinberg. *Physics Today*, 2011, (8):29, 原文详见 <http://ptonline.aip.org>)