

希格斯粒子及高能物理的新时代

韩 涛 王连涛

2012年7月4日将作为一个激动人心的日子载入科学史册。在这一天，座落在法国和瑞士边境上的欧洲核子中心（CERN）宣布在大型强子对撞机（LHC）上发现了一个新的基本粒子，被称为希格斯粒子。2013年10月8日，比利时物理学家恩格勒特（Francois Englert）和英国物理学家希格斯（Peter Higgs）因其1964年的理论工作被授予2013年度的诺贝尔物理学奖。这是高能物理近四十年来最重大的发现。它所带来的震动深刻地影响了整个基础理论的走向，使其进入了一个全新的时代。本文将简单介绍这个奇妙的希格斯粒子以及希格斯机制，并展望和它有关的新物理。

人类对于自然界最基本的粒子的探索始于远古时代。在早期的历史中，尽管有一些智慧的思辨，但是由于探索手段的限制，这些始终没有成为基于实验基础的科学理论。这个情况一直到20世纪才得到根本性的改变。从汤姆孙的阴极射线管，到卢瑟福的 α 粒子散射，一直到高能粒子对撞机，人们对微观世界的探索不断深化，不同的基本粒子被相继发现。同时，20世纪初诞生的相对论和量子力学的结合和发展最终带来了量子场论，为认识基本粒子现象提供了坚实的理论基础。最终在20世纪80年代初期，一个可以用来描述全部所观测到的基本粒子的理论框架取得了足够多的实验验证，并得到了广泛的承认。这就是基本粒子物理的标准模型^{①②③}。这个模型包括6种夸克和6种轻子。它描述了自然界的3种基本的相互作用：强相互作用、弱相互作用和电磁相互作用。这些相互作用也是通过基本粒子传播的，其传播粒子分别为胶子（强），W和Z（弱），以及光子（电磁）。为了解释基本粒子质量的来源，标准模型借用了希格斯机制并预言了一个新粒子的存在。希格斯粒子由此成了基本粒子家族的新成员。

需要强调的是，希格斯粒子的发现，其意义远远超过发现一个新粒子。与夸克、轻子，以及传播子不同，希格斯粒子是第一个被发现的自旋角动量为零的标量

基本粒子。它在标准模型当中起到极其微妙而重要的作用。从标准模型的建立到希格斯粒子发现前的四十多年中，各种夸克、轻子，以及基本相互作用的传播粒子全部被发现，它们的性质也被大量的实验数据所验证。但是，仅有这些内容的标准模型是不完整的。希格斯粒子的发现从某种意义上讲使标准模型成为了一个自洽的框架。但是这一发现并不意味着我们对基本粒子物理有了完整的认识。恰恰相反，希格斯粒子存在的本身提出了一系列更令人深思的问题。对这些问题的探索会决定今后至少几十年高能物理发展的方向。

1. 什么是希格斯机制

我们先从标准模型中一个最关键的问题说起，那就是基本粒子质量的起源。对这个问题的探索几乎是随着基本粒子的发现同时开始的。比如，围绕电子的质量就曾经有过很多早期的尝试。标准模型本身对这个课题提出了新的问题。这不仅仅是因为诸多新的不同质量的粒子存在，更深刻的问题起源于标准模型中的粒子相互作用所具有的对称性。

对称性在物理学中有着至关重要的地位。它的存在很大程度上决定了相互作用的形式。标准模型中的弱相互作用也不例外。夸克和轻子都是自旋为1/2的费米子。量子力学告诉我们每一个费米子都有两个自旋极化自由度 $\pm 1/2$ 。我们可以取粒子的运动方向为极化轴。极化为 $+1/2$ 和 $-1/2$ 的费米子分别被称为是“右手”的和“左手”的。而弱相互作用的对称性决定了只有左手的夸克和轻子可以有弱相互作用。如果我们考虑将一个对象转换为其镜像的变换，称为宇称变换，左手和右手的极化在宇称变换下互换。这意味着宇称在弱相互作用下是不守恒的。这正是李政道和杨振宁提出的著名的宇称不守恒。

如果我们进一步思考，就会发现这里有一个让人十分疑惑的地方。标准模型中所有的夸克和轻子都是有质量的。对于有质量的粒子而言，自旋的极化是左

手还是右手并不是一个洛伦兹不变量。这一点可以如下理解：有质量的粒子的运动方向在洛伦兹变换下是可以反转的。所以在一个参考系的存在弱相互作用的左手粒子在另一个参考系可以是不存在弱相互作用的右手粒子，如图 1 所示。因此，相对论或者说洛伦兹对称性和弱相互作用的对称性在有质量的粒子身上不可能同时适用。

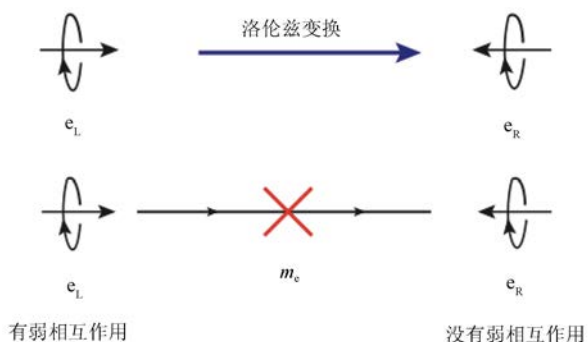


图 1

洛伦兹对称性经受住了不计其数的实验验证，它不可能在这里出问题。然而弱相互作用的对称也确切地限定了理论的形式。解决这个似乎是矛盾的问题的出路来源于物理学中另外一个重要的基本机制：自发对称破缺。这个机制的中心思想是物理体系的状态不需要具有动力学方程相同的对称性，或者说，量子力学基态在对称性变化下可以是不对称的。对于基本粒子物理学而言基态就是真空态。任何粒子都是基于真空态上的激发态。把自发对称破缺运用到弱相互作用完美地解决了我们面临的问题。经过自发对称破缺，真空不再保持弱相互作用的对称性。而基本粒子，诸如夸克和轻子，作为真空上的激发态，也不必保持弱相互作用的对称性。因此，它们可以有质量而且符合洛伦兹对称性。

传播弱相互作用的粒子， W 和 Z ，也是有质量的基本粒子。它们的质量的物理效应体现在弱相互作用是短程力，力程是 W 或 Z 的德布罗意波长（反比于它们的质量）。和标准模型的费米子类似，它们的质量也来源于如上描述的自发对称破缺。但是，由于它们是自旋为 1 的所谓的矢量玻色子，它们的质量起源的具体机制有所不同。要深入的理解这一点，我们必须进一步讨论自发对称破缺。这个破缺机制不仅仅是

赋予真空态特殊的性质，它还预言了一类新的粒子的存在。对于每一种自发破缺的对称性（更准确地说是连续对称性），都会存在一个自旋为零的无质量的粒子，被称为南部-戈德斯通(Nambu-Goldstone)玻色子。自发对称破缺和南部-戈德斯通玻色子在很多物理体系中存在。这方面的一个著名的例子是超流现象。但这似乎又为标准模型带来了新的问题，我们并没有在实验上观测到这样的粒子。解决这个问题的关键在于有质量的和无质量的矢量玻色子之间的区别。无质量的矢量玻色子有两个极化自由度，或者说是“横波”。我们最熟悉的例子是光子，只有两种可能的横向偏振。但是有质量的矢量粒子（如 W 和 Z ）就不同，它们必须同时有 3 个不同的极化自由度，既有横波又有纵波。我们自然会问， W 和 Z ，作为和光子自旋相同的矢量玻色子，究竟是如何多“得到”一个自由度而成为有质量的呢？巧妙的是，这个多出来的自由度恰恰正是对称自发破缺后产生的南部-戈德斯通玻色子。在这里，这个南部-戈德斯通玻色子并不是一个独立的粒子，而是成为了 W 或 Z 的一部分（第 3 个自由度）。这当然也同时解释了为什么实验上观测不到单独存在的南部-戈德斯通玻色子。从这个角度理解，光子质量为零正是因为电磁相互作用的对称性没有被自发破缺，因此不存在南部-戈德斯通玻色子可以为光子提供具有质量必需的第 3 个自由度。我们这里解释的正是著名的希格斯机制。希格斯机制是于 1964 年由恩格勒特、布鲁 (R. Brout)^④，希格斯^⑤，以及古拉尔尼克 (G. Guralnik)、哈根 (D. Hagen)、基布尔 (T. Kibble)^⑥ 分别独立提出的。这个机制被温伯格 (S. Weinberg) 发展，成为标准模型的重要部分，解释了所有基本粒子的质量的起源。

值得指出的是，希格斯机制其实存在于很多物理体系和过程当中，远远超出基本粒子的范围。一个最重要的例子是 BCS 超导体。在处于超导态的超导体内部，库珀对机制导致电磁相互作用的对称性自发破缺。光子获得质量。这个现象体现在外界磁场不可能深入 BCS 超导体内部，就像弱相互作用是短程力一样。这被称为迈斯纳效应。

2. 希格斯粒子

到这里，希格斯机制解释了标准模型中各个基本

粒子质量的起源。但是，我们的故事不能到此结束，因为仅有自发对称破缺和希格斯机制的标准模型是不完整的。这个问题的根源仍然在于有质量的矢量玻色子的特殊性，特别是两个矢量玻色子之间的相互作用。基本粒子之间的相互作用可以通过散射实验来进行测量。所以，我们可以计算两个矢量玻色子（W 或 Z）的散射过程，例如像图 2 中最左边的过程。其散射振幅可以用来测量 W 或 Z 的自相互作用的耦合强度。

计算表明，这个散射振幅和入射粒子的质心能量平方成正比。这意味着，在能量很高的情况下，这个散射振幅会发散。也就是说，在高能区，W 或 Z 的相互作用耦合会变得很强。从数值上看，当质心系能量 E_{cm} 大于 $E_0 \approx 1 \text{ TeV}$ 时，这个耦合就变的太强以致于我们以上的计算不再成立。在物理学上，相互作用太强导致计算失效并不意味着我们必须放弃整个理论框架。这种情况的出现只是意味着这里必然会有新的物理现象（新物理）出现。所以，我们的计算表明只有 W 和 Z 的标准模型是不完整的。而且，如果我们从低能出发不断增加质心系能量，在到达 E_0 之前一定会有新物理出现。

这样的新物理有很多可能的形式。希格斯粒子就是其中最简单的一种可能性。希格斯粒子是一个不带电荷的自旋为零的粒子（称为标量粒子）。它和 W 以及 Z 粒子都有耦合。正如图 2 所表示的那样，希格斯粒子对散射振幅贡献正好可以消去正比于能量平方的增长项。也就是说，新物理——希格斯粒子——的出现使得矢量玻色子的相互作用不会再在 高能区变得太强。有必要强调的是，希格斯粒子只是新物理最简单的可能形式，但绝不是唯一可能的形式。希格斯粒子的发现表明自然界在这里选择了一种最简单的可能性，这是一个有深刻意义的发现。

描述希格斯粒子的动力学理论很简单。希格斯粒

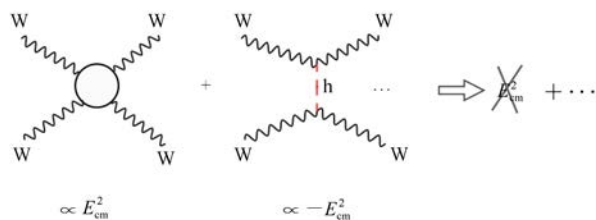


图 2

子可以和我们前面介绍的南部 - 戈德斯通玻色子（记为 a ）一起构成一个复标量场（记为 ϕ ）。这个场的动力学，特别是它的基态，由如下的势能决定：

$$V(\phi) = \frac{1}{2}\mu^2|\phi|^2 + \frac{\lambda}{4}|\phi|^4, \quad (1)$$

系统的基态取决于 μ^2 的符号。 $\mu^2 > 0$ ，系统的基态处于对称态， $\langle\phi\rangle = 0$ 。我们在这里用 $\langle\phi\rangle$ 表示场量 ϕ 在基态（真空态）下的期望值，又称为真空期望值。如果 $\mu^2 < 0$ ，系统的基态

$$\langle\phi\rangle = v = \frac{\sqrt{|\mu^2|}}{\lambda} \neq 0$$

具有对称性自发破缺。读者可能会意识到这个理论和描述相变过程临界现象的朗道 - 金茨堡（Landau-Ginzburg）理论很相似。事实上这正是完全相同的现象。自发对称破缺就是一个相变的过程。相变后系统的基态是一个玻色 - 爱因斯坦凝聚（BEC）。相变的序参量正是场的真空期望值 $\langle\phi\rangle = v$ 。考虑到对称性自发破缺后系统的激发态（粒子），我们可以将希格斯场表示为

$$\phi = \frac{1}{\sqrt{2}}(v + h + ia),$$

其中 a 会由希格斯机制成为 W 或 Z 的第 3 个自由度。而 h 正是我们新发现的希格斯粒子。由于这个标量场的模型十分简单，早期的希格斯机制的文献多选择这个出发点。特别有影响力的是，温伯格构造弱相互作用理论时也选择这个出发点。这使得这个简单的模型几乎称为希格斯机制的代名词，同时希格斯粒子 h 的存在几乎成了一个既定的结果。在这里让我们再次强调这只是一个简单的模型。还有很多其他的实现希格斯机制的可能性。事实上在很多存在希格斯机制的物理系统中并没有希格斯粒子。非常有趣的是，希格斯粒子的发现证明了在弱相互作用中，自然界选择了一个最简单的模型来实现希格斯机制。

由于希格斯粒子和标准模型中其他基本粒子的质量起源紧密挂钩，它不仅和所有的粒子都有相互作用，而且其相互作用的耦合强度也受到粒子质量大小很强的限制。所以，标准模型对于在对撞机上可能产生希格斯粒子的过程，以及希格斯粒子的各个衰变模式的强度都有明确的预言。目前，希格斯粒子的多个产生

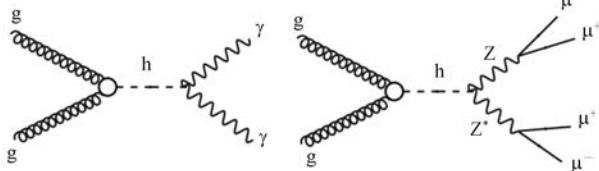
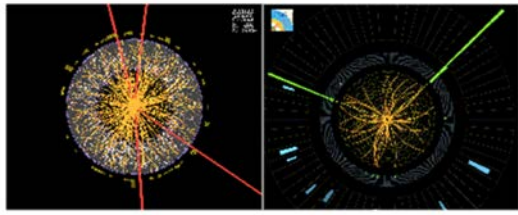


图 3

和衰变的过程都已经被观测到，图 3 展示了两个在 CERN 观测到的希格斯粒子的事例，以及两个在希格斯粒子发现中起到重要作用的过程。有意思的是，在对希格斯粒子实验发现的过程中，几乎所有重要的希格斯粒子和标准模型粒子之间的耦合都起到了重要的作用。所以，不仅我们有了多个实验观测的角度可以互相印证，而且我们对希格斯粒子和各种标准模型粒子的耦合强度也很快有了估计。到目前为止，所观测到的结果都在实验误差的范围内和标准模型相符合。

3. 结束语：希格斯粒子发现后的粒子物理新时代

希格斯粒子的发现从某种意义上讲“完成”了标准模型。但是，这绝不代表对基本粒子探索的终结。恰恰相反，标准模型中有很多重大的问题尚未得到解答。而希格斯粒子的发现正赋予了这些问题新的含义。从这个意义上讲，希格斯粒子的发现开创了理论物理的新时代。这里，作为这篇短文的结束语，我们简单地介绍这方面的一些主要的问题和发展方向。

对 W/Z 粒子和希格斯粒子的实验测量确定了标量势（方程（1））中的所有参数， μ^2 和 λ 。但是标准模型本身对这些参数的大小（比如希格斯粒子的质量）却没有解释。因此从这个基本意义上讲，标准模型只能是一个不完整的理论，必然需要一个可以对这些参数作出解释的更基本的理论来代替。在物理学中，每一个现象和理论，都对应于一个特定的能量标度（能标）。弱相互作用对应于 $M_{\text{weak}} \approx 100 \text{ GeV}$ 的能标，因为这是 W/Z 以及希格斯粒子的质量范围。而对于那个更基本（可以用来解释希格斯质量）的理论，我们所要考虑的首要问题就是它所对应的能标

在哪里。理论物理学中其实并不缺乏对可能的更高能标的思考。其中经常被提及的是量子引力的能标 ($M_{\text{Pl}} \approx 10^{19} \text{ GeV}$)，以及大统一理论的能标 ($M_{\text{GUT}} \approx 10^{16} \text{ GeV}$)。但是，即便抛开具体细节，仅从直观上就可以看到这里面的一个重大的问题是如何解释 M_{Pl} 或者 M_{GUT} 和 M_{weak} 的巨大差别。这就是所谓的质量等级问题 (Hierarchy problem)，或者叫自然性问题 (Naturalness problem)。反过来讲，如果那个更基本的理论没有自然性问题，它所对应的能标应该离 M_{weak} 不远。这正是我们为什么期待在 TeV 附近的能量区有超出标准模型的新物理的主要原因。有很多具体的新物理模型具有这样的性质，比较重要的有超对称 (Supersymmetry, SUSY)，复合粒子模型 (compositeness)，以及额外维度 (extra dimensions)，等等。在欧洲核子中心的 LHC 上，寻找和这些模型相关的新物理是主要的目标之一，受到了几乎和寻找希格斯粒子相同的重视。在已经结束的第一轮运行中（质子-质子的质心系能量为 7 TeV 和 8 TeV），这类新物理并没有出现。在将于 2015 年开始的新的一轮运行中，LHC 将在更高的能区继续寻找新物理（质心系能量 13 ~ 14 TeV）。目前，高能物理学界正在紧张而激动地等待这些新的数据。任何新的发现都必然带来高能物理新的突破。值得指出的是，即便是 LHC 的第二轮运行也不能完全地探索以解决自然性为目标的新物理机制。更高能量的对撞机，比如一个 100 TeV 质心系能量的更大的质子对撞机 (VLHC)，是实现这一目标最直接的途径。

如前所述，标准模型对于希格斯粒子和标准模型其他粒子的耦合有着确切的预言。同时，与自然性问题相关的新物理都会对这些耦合参数带来细微的变动。探测到这样的变化也就是看到了新物理的迹象。探测这样微小的效应需要很精确的测量。和追求更高的能量以寻找更重的新粒子不同，这种测量需要大量极其精密的数据。这正是所谓的希格斯工厂所要实现的目标。希格斯工厂往往基于正负电子对撞机，正在讨论中的国际直线对撞机 (ILC) 和大型环形正负电子对撞机 (比如 TLEP) 都属于这个类型。

除了自身的自然性，希格斯粒子还有可能和其他一系列的新物理相关。其中一个重要的例子是暗物质。暗物质是我们迄今为止确知存在的唯一的未被包括在

欢迎订阅

天文爱好者

邮发代号：
2-352

中国科学技术协会主管，
中国天文学会、北京天文馆主办

☆ 1958年创刊，中国优秀科普期刊。探索神秘宇宙的优选科普读物，从入门到精通的完全天文指南。

☆ 栏目：前沿·视点、新闻速递、观星指南、宇宙探秘、行摄无疆、星座魔方、宇宙画廊……

☆ 订阅方式：

1. 登录中国邮政报刊订阅网：<http://bk.chinapost.com.cn>，搜“天文爱好者”，按提示即可完成订阅。

2. 到当地邮局报刊订阅柜台，通过《天文爱好者》全国统一邮发代号 2-352 订阅。

3. 通过邮局汇款订阅：100044，北京市西城区西直门外大街 138 号，收款人：《天文爱好者》杂志社，

请在附言栏内注明您所订的刊期。

4. 通过淘宝网订阅：<http://aitianwen.taobao.com>。

* 10 元 / 期，全年 12 期共 120 元，跨年或分期订阅皆可。通过 3 或 4 订阅，可每期再加 3 元挂号费（全年 36 元），避免平邮丢失。

☆ 杂志社地址：北京市西城区西直门外大街 138 号

☆ 邮编：100044

☆ 电话：010-51583320

☆ 官方微博：<http://weibo.com/aitianwen>

☆ 投稿邮箱：amateur@bjp.org.cn

☆ 订阅邮箱：club@bjp.org.cn



标准模型之内的粒子。探索暗物质的性质是当今基本粒子物理的最重要的课题之一。在众多的暗物质模型中，最具吸引力的是所谓的弱作用重粒子（WIMP）模型。在这个模型中，暗物质粒子的质量在 100 GeV 到 TeV 附近。由于标准模型中的 W/Z 粒子以及顶夸克都通过希格斯机制获得了 100 GeV 左右的质量，我们很自然地想到暗物质粒子也可以通过相同的机制获得所需要的质量，至少同希格斯粒子有所关联。这是一个很有趣的想法，目前吸引了很多的理论和实验工作。

我们生活的宇宙中物质要远多于反物质。早在 50 年前，解释这一非对称性（Baryogenesis）是基本粒子物理和宇宙学的一个重要方向。几乎所有的 Baryogenesis 的模型都依赖于宇宙早期的相变过程。而弱相互作用的自发对称破缺的相变是我们确信必然在早期宇宙发生过的物理过程。所以很早就有人将这个相变和 Baryogenesis 联系起来。具有挑战性的是，要成功地实现 Baryogenesis，只有标准模型的希格斯粒子是不够的。我们必须引进新的和希格斯粒子相关的粒子。

总而言之，希格斯粒子的发现是高能物理学的一个里程碑，它表明了我们对 10^{-16} cm 的尺度物理有了深刻的理解。同时，它也对高能物理学的下一步发展和探索指出了极其有意义的方向。我们期待着高能物理的下一个重大发现！

（韩涛，美国匹兹堡大学 15260，清华大学 100084；王连涛，美国芝加哥大学 60637）

① S.L. Glashow (1961). “Partial-symmetries of weak interactions”. *Nuclear Physics* 22 (4): 579 ~ 588.

② S. Weinberg (1967). “A Model of Leptons”. *Physical Review Letters* 19 (21): 1264 ~ 1266.

③ A. Salam (1968). N. Svartholm, ed. “Elementary Particle Physics: Relativistic Groups and Analyticity”. Eighth Nobel Symposium. Stockholm: *Almqvist and Wiksell*. p. 367.

④ F. Englert and R. Brout (1964). “Broken Symmetry and the Mass of Gauge Vector Mesons”. *Physical Review Letters* 13 (9): 321 ~ 323.

⑤ Peter W. Higgs (1964). “Broken Symmetries and the Masses of Gauge Bosons”. *Physical Review Letters* 13 (16): 508 ~ 509.

⑥ G. S. Guralnik, C. R. Hagen, and T. W. B. Kibble (1964). “Global Conservation Laws and Massless Particles”. *Physical Review Letters* 13 (20): 585 ~ 587.