

物理学之美-解读 2013 诺贝尔物理奖

作者：张天蓉

人人都追求美，物理学家也不例外，但到底什么是物理学的美，那是一个模糊的概念，或者说只是一种感觉，只能意会，不能言传。物理学家也难以赋予它科学而精确的定义。

1. 理论预言之美

狄拉克可算是物理学家中追美之第一人。他淡泊名利、少言寡语，却对其物理理论之数学美极端追求，以至于在 1963 年《美国科学人》的一篇文章中，他写出如此超凡脱俗的话：“使一个方程具有美感，比使它去符合实验更重要。”

狄拉克导出他著名的狄拉克方程后，为了追求他的理论的数学美，做到自圆其说，而作出了一个被称为‘狄拉克海’的美丽假设。在这个假设的模型中，狄拉克天才地预言了当时并不存在，似乎显得有些荒谬的正电子^[1]。

预言不存在的东西，犹如第一次吃螃蟹，是要有点冒险精神的。不过，狄拉克别无选择，为了他的理论之美！

可没想到，在 1932 年，从美国加州理工学院传来一条令人吃惊的消息：卡尔·戴维·安德森（Carl David Anderson）在研究宇宙射线的云室里，发现了一种与狄拉克假设的‘空穴’一模一样的新粒子-正电子！这是人类第一次发现的反物质，这个实验为狄拉克赢得了 1933 年的诺贝尔物理奖。卡尔·戴维·安德森之后也因此发现而得到了 1936 年的诺贝尔物理奖。

其实，科学史上的多次事实证明：成功的预言能够充分地体现美丽理论的强大魅力。上世纪 60 年代中期，物理学家们，包括两位 2013 年诺贝尔物理奖得主，即比利时理论物理学家弗朗索瓦·恩格勒和英国理论物理学家彼得·希格斯，以及其他 4 位主要人物，从理论上预言存在一种希格斯玻色子。然后，他们孜孜以求，期望等待着希格斯粒子登场，其目的也就是为了完善和证实粒子物理学中的“标准模型”，证实物理理论之美。

2. 物理模型之美

物理，物理，究物之理，即探究物质起源之理，这是上天赋予物理学家的基本使命。物质到底是由什么构成的？物质的结构是否可以无限可分下去？早在公元前 4 世纪，古希腊学者德谟克利特就提出了物质由不可分的‘原子’构成的观念。后来，意大利科学家阿伏伽德罗提出分子学说；英国科学家道尔顿建立原子模型。再后来，科学家又证明了原子是由质子、中子、电子组成的。除此之外，人们还听说过光子、夸克、中微子等等，直到现在，被大多数物理学家认可的、最好的粒子物理理论，则是标准模型^[2]。

在标准模型中，物质的本源来自于 4 种基本力，以及 61 种粒子。尽管标准模型还谈不上是一个“统一的物理理论”，因为它无法将那个顽固的‘引力’统一在它的框架中。但是，它却较为成功地统一了其它三种力：电磁力、弱力、强力，并且基本上能精确地解释与这三种力有关的所有实验事实。

标准模型认为的‘基本粒子’有 61 种，其中包括 36 种夸克，12 种轻子，8 种胶子，2 种 W 粒子，另外还有 Z 粒子，光子，及希格斯粒子。

希格斯粒子是“标准模型”的宠儿，是被此模型所预言的所有基本粒子中，最后一个被发现的粒子。2012 年 7 月 4 日，欧洲核子中心（CERN）第一次宣布，他们的大型强子对撞机（LHC）捕捉到类似希格斯玻色子的踪影。2013 年 3 月 14 日，欧洲核子研究组织发布新闻稿表示，先前探测到的新粒子被确认是希格斯玻色子。即媒体所谓的“上帝粒子”。

物理学家为什么会预言存在这样一种希格斯粒子呢？这与一个叫做‘自发对称破缺’的物理术语有关。

3. 对称破缺之美

对称性不难理解，最简单的例子就是人体。人体基本上是左右对称的，有左手又有右手，有左眼又有右眼。自然界还有许许多多对称的例子，对称是一种美。各种各样的对称性，或许也应该加上各种不对称性，即对称的破缺，才构成了我们周围这个美丽的世界。

物理学家也早就注意到事物的对称性。并且，他们所建立的物理规律，各种方程，更是表现出对称的特点。也许从某种意义上可以说，物理学家们所追求和探索的物质深层的种种对称性，就是他们所欣赏、且津津乐道的物理学之美。

然而，有一个如今看起来很简单的现象却曾经困惑物理学家多年。那就是说，自然规律具有某种对称性，但服从这个规律的现实情形却不具有这种对称性。换言之，在实验中却没有观察到这种对称性，这是怎么回事呢？现在看来，这并不难理解，那是因为科学家们已经为我们理清了思路，建立了理论，这个理论就是：自发对称破缺。

可以举出很多简单的例子来说明这个专业术语。比如说，一支铅笔竖立在桌子上，它所受的力（物理定律）是四面八方都对称的，它往任何一个方向倒下的几率都相等。但是，铅笔最终只会倒向一个方向。当它朝某个方向倒下之后，就破坏了它原有的旋转对称性，而这种破坏是铅笔自身发生的，所以叫做自发对称破缺。

再表达得更清楚一些，就是说，物理规律具有某种对称性，但是，它的方程的某一个解却不一定具有这种对称性。实际上，我们看到的世界中的一切现实情况，都只是‘自发对称破缺’后的某种特别情形。因此，它只能反映物理规律的一小部分侧面。

自发对称破缺的概念，首先是在凝聚态物理中被朗道提出^[3, 4]、由安德森发展，为了解释物质相变而用的。下面，我们举几个物理中对称破缺产生相变的例子。

比如液态和固态，它们的对称性，到底孰高孰低呢？对称又如何破缺而导致相变呢？首先想象一下在液态（水）中的情形：其中的水分子作着随机而无规的布朗运动，没有固定的方向，没有固定的位置，液态的分子处于完全无序的状态，处处均匀，在任何方向，任何点看起来都是一样的！而这正是我们所谓的对称性，也就是说，液态的对称性很高。

在固态（冰）中的情形就不一样了。水分子们不再像在液体中看起来那样单调乏味，它们有次序地排列起来，形成整齐漂亮的格子或图案。当你从晶格中望过去，不同方向会有不同的风景。也就是说，固态的有序程度增加了，而对称性却降低了。

用数学的语言来描述的话，液态时，如果将空间坐标作任何平移变换，系统的性质都不会改变，表明对空间的高度对称。而当水结成冰之后，系统只在沿着某些空间方向，平移晶格常数 a 的整数倍的时候，才能保持不变。所以，物质从液态到固态，对称性减少了，破缺了。从连续的平移对称性减少成了离散的平移对称性。也就是说，晶体是液体的任意平移对称性破缺的产物。

另一个例子，是顺磁体到铁磁体的转变。在居里温度以上，磁体的磁性随着磁场的有无而有，即表现为顺磁性。外磁场消失后，顺磁体恢复到各向同性，是没有磁性的，因而，与刚才所说的铅笔类似，具有旋转对称性。当温度从居里点降低，磁体成为铁磁体而有可能恢复磁性。这时铁磁体会随机地选择某一个特定的方向为最后磁化的方向，成为在这个方向磁化的永磁体（和铅笔朝一个方向倒下的情况类似）。

如果我们想象，磁化磁体的分子中诞生了某种小生命。更进一步，不妨设想我们就处在那种小生命的地位。那么，在我们看来，世界并不是旋转对称的，在某个方向（磁化的方向）比较特别一些，能感觉到磁性！这儿可以用上一句中国成语：“旁观者清，当局者迷”。想想看，如果我们是从像磁铁那样一个有偏见的世界中来探索物理规律的话，我们得用多长的时间，才能认识到真正的大自然是旋转对称的啊。也就是说，自然定律的对称性一定要比我们能接触到的世界的对称性多得多。

事实上，我们能看到的真实世界的确是多次自发对称破缺后的结果，其中包括大爆炸、星团形成、生命诞生……等等。

后来，自发对称破缺的思想被嫁接到粒子物理，再应用到了标准模型中，在那儿大显身手。

4. 统一场论之美

标准模型建立在量子场论的基础上，量子场论的基本思想之一是认为：最基本的物理实在是一系列充满空间的场，而每一种粒子对应于一种场。

四种基本作用力：电磁力、弱力、强力和引力，则是由于与其相对应的粒子的交换而产生和传递的。比如说众所周知的，电磁力是由光子所激发和传递。

自发对称破缺也会被激发和传递。我们用一个通俗的例子来说明这点。

想象一大排竖立着的多米诺骨牌。每个骨牌面对着的情况类似于刚才所举的竖立的铅笔。不过骨牌遵循的规律是左右对称，不像铅笔是旋转对称。

一个骨牌的物理规律是左右对称的，但倒下后的位置（向左或向右）就不对称了。并且，只要有一个骨牌随机倒下了，对称性自发破缺了，便会诱发邻近的、再邻近的……以至于很远的骨牌一个一个倒下。换言之，这种‘激发’效应像一种波动一样，可以被传递到很远的地方。

‘一种激发的波动’，听起来有点像我们所说的电磁场中的光子。的确如此，物理微观世界中力的作用也可以被想象成是这样传播的。

再回到骨牌的例子。如果骨牌做得比较薄，倒下去很快，它的作用传播起来也很快，很快地就传到很远的地方，像光子那样。那时我们说，传播的力是一种远距作用，传播粒子的静止质量为 0。而如果骨牌比较厚，倒下去时是笨笨地慢动作。那时候，骨牌效应传播不远就被衰减而传不下去了。这种情形就对应于某种短程力，相应的传播粒子则具有一个有限的静止质量。

这些概念：对称自发破缺、元激发等等，被粒子物理学家从凝聚态物理搬来研究基本粒子和场。这些粒子和场与我们刚才所举的现实生活中的铅笔和骨牌一样，也遵循某种对称性。不过，它们遵循的是比我们常见的对称例子更为复杂的对称性，被称之为规范对称性。

在上世纪 60 年代初，物理学家在运用自发对称破缺理论来研究弱力、强力和电磁力统一理论的时候，碰到了一些麻烦，甚至一度似乎陷入绝境。事情是这样的：一个统一这几种力的理论应该是规范对称的，否则就会导致发散而得出不合理的荒谬结果。而规范对称的方程得出来的传递粒子只能是质量为 0 的粒子，这也意味着被传递的作用力是长程力。这个结论对电磁力没问题，但并不符合弱力和强力的情况。弱力和强力只在极短的距离起作用，在很短的空间和时间内就衰减了，因此，传递粒子应该具有较大的质量。

困难还不仅仅如此，不但作用力的传递波色子没有质量，其它组成真实世界的费米子，诸如电子、质子等，也都没有质量。这听起来像是个‘杞人忧天’的故事：“我们的世界明明是具有质量的，真不懂你们物理学家在说些什么？”别着急，这当然只是说粒子物理学家们研究了几十年的规范理论走入了困境。因为根据这个理论模型，得出了一个没有质量、与实际情况不相符合的世界。

物理学家们不愿意放弃看起来颇有希望的规范理论，而又要使某些基本粒子得到质量，为此想了许多办法。其中，希格斯机制是最简单的一种方法。这种机制在 1964 年被 3 个研究小组几乎同时提出，其中包括两位 2013 年诺贝尔物理奖得主，共 6 位主要人物^[5, 6, 7]，至于为什么以希格斯而命名，这其中有些巧合或误会，但并不重要，重要的是希格斯机制将规范场论带出了困境。希格斯机制的基本思想是假设宇宙中存在一种无处不在的希格斯场，当它与其它规范粒子相互作用的时候，因希格斯场的真空态不为 0 而产生自发对称破缺，使规范粒子获得质量，同时产生出一个带有质量的希格斯玻色子。

希格斯机制的实质，有点像是将规范理论中所有的粒子都得不到质量这个困难，转移到一个统一的希格斯场的真空态上来统一解决。无论如何，它成功地解释了粒子惯性质量的来源。

1968 年，温伯格和萨拉姆率先将希格斯机制引入格拉肖的弱电理论，用于统一弱力和电磁力的工作。他们三人因此而获得了 1979 年的诺贝尔物理学奖。

包括希格斯机制的弱电统一理论，还预言了弱力的传递粒子 W 和 Z 粒子，它们都是通过希格斯机制得到质量。这两个 W 粒子和 1 个 Z 粒子于 1983 年在 CERN 被发现。

希格斯粒子本来是人为引入标准模型的，它的发现^[8]证实了标准模型基本正确，也让我们再一次见识了物理学理论之美。

将四种作用力，以及构成世界的所有基本粒子，统一到一个单一的理论框架中，一直是物理学家们追求的美梦。就连伟大的爱因斯坦，也抵挡不住‘统一场论’之美的诱惑，把他后半生几十年的精力献给了这一事业。

相信希格斯粒子的发现、标准模型的验证、近代弦论的发展，让我们离统一场论之美景更近了一步。

参考文献：

【1】Dirac, P. A. M. (1928). "The Quantum Theory of the Electron". *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 117 (778): 610.

【2】R. Oerter (2006). *The Theory of Almost Everything: The Standard Model, the Unsung Triumph of Modern Physics* (Kindle ed.).

【3】*Collected Papers of L D Landau*, Ed. D ter Haar, NY, 1965 (Reprint of Landau's papers)

【4】于禄，郝柏林。《相变和临界现象》，科学出版社，1992

【5】 Englert, François; Brout, Robert (1964). "Broken Symmetry and the Mass of Gauge Vector Mesons". *Physical Review Letters* 13 (9): 321–23.

【6】 Higgs, Peter (1964). "Broken Symmetries and the Masses of Gauge Bosons". *Physical Review Letters* 13 (16): 508–509..

【7】 Guralnik, Gerald; Hagen, C. R.; Kibble, T. W. B. (1964). "Global Conservation Laws and Massless Particles". *Physical Review Letters* 13 (20): 585–587.

【8】 "Higgs Boson Discovery Confirmed After Physicists Review Large Hadron Collider Data at CERN". *Huffington Post*. 14 March 2013. Retrieved 14 March 2013.