

# 希格斯粒子之理论浅析

杨金民<sup>†</sup>

(中国科学院理论物理研究所 北京 100190)

2012-11-26收到

<sup>†</sup> email: jmyang@itp.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20140103

## A brief review of the Higgs particle

YANG Jin-Min<sup>†</sup>

(Institute of Theoretical Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**摘要** 被誉为上帝粒子的希格斯玻色子于2012年7月4日在欧洲核子研究中心的大型强子对撞机(LHC)上被发现,这一发现震惊了世界。文章将从理论方面介绍希格斯玻色子,内容包括:(1)世界的基本组分和希格斯玻色子在其中扮演的角色;(2)希格斯玻色子的本质和希格斯机制;(3)希格斯玻色子在LHC上的产生、衰变和发现;(4)希格斯玻色子存在的和谐社会——超对称理论。

**关键词** 希格斯玻色子, 大型强子对撞机, 超对称

**Abstract** The Higgs boson, the so-called God particle, was observed at the Large Hadron Collider (LHC) of CERN on July 4, 2012. This observation caused a sensation in the world. In this introduction to the Higgs boson we shall describe: (1) the fundamental constituents of matter and the role played by the Higgs boson, (2) its nature and mechanism, (3) its production, decay and observation at the LHC, (4) the natural framework for the Higgs boson, i.e., low energy supersymmetry.

**Keywords** Higgs boson, Large Hadron Collider, supersymmetry

## 1 引言

2012年7月4日,位于日内瓦的欧洲核子研究中心(CERN)举行新闻发布会,该中心的大型强子对撞机(large hadron collider, LHC)的两个实验组ATLAS和CMS分别宣称发现了一个质量大约为125 GeV的新粒子(置信度是99.9999%)<sup>[1]</sup>,这个粒子的行为与被誉为上帝粒子的希格斯玻色子相符合。至此,高能物理领域苦苦寻觅几十年的希格斯粒子终于羞涩面世了。

希格斯粒子是英国科学家彼得·希格斯(Peter Higgs)等人于1964年提出的,其主要功能是给构成世界的基本粒子提供质量,这一质量产生机制

(称为希格斯机制)简单而优美,这近似神话般的理论最终被证明(极可能)是正确的,人类凭自己的肉脑竟然初步摸透了上帝创造世界的玄机!

希格斯玻色子的寻找是一项耗费惊人的巨大工程,2000年关闭的欧洲大型正负电子对撞机(large electron-positron collider, LEP)和2011年关闭的美国Tevatron对撞机都对希格斯粒子进行了全力寻找,也朦朦胧胧看到了一点希格斯粒子的迹象(LEP看到了在115 GeV处事例有微弱的超出, Tevatron看到了在115—135 GeV质量区间有大约 $2.5\sigma$ 的事例超出),但终因能量和亮度达不到而与希格斯玻色子失之交臂。曾经因花费太大而被美国国会终止的超导超级对撞机(superconducting super collider, SSC)也曾经剑指希格斯玻色

子,但SSC的天折最终把发现希格斯粒子的荣耀让给了欧洲人。

欧洲聚几十个国家之力花费上百亿美元建造了LHC,这个对撞机是人类科学史上的巨无霸装置,它的ATLAS和CMS实验组分别都有两千多名科学家组成,其主要目标就是寻找希格斯玻色子和新物理。寻找希格斯粒子所花费的物力和人力在科学史上是没有先例的。这个粒子究竟是什么?它有那么重要吗?为什么非要找到它呢?本文将简述希格斯粒子的本质和它在粒子物理中扮演的角色,并从粒子物理的标准模型出发讲到希格斯粒子存在的天堂(超对称理论)。

## 2 希格斯玻色子在粒子家族中的角色

要充分理解希格斯玻色子的重要性,就必须从物质世界的基本组成讲起。组成物质世界的基本砖块是两种夸克(u夸克和d夸克)和电子,它们联合组成了原子,原子组成了宇宙尘土,某些不甘寂寞的宇宙尘土巧妙联合形成了生命和人类。所以,我们人类的老祖宗是三剑客:u夸克、d夸克和电子。虽然组成物质世界只需要这两种夸克和电子,但是后来发现这两种夸克还有堂兄弟(“二门”堂兄弟是c夸克和s夸克;“三门”堂兄弟是t夸克和b夸克),电子也有堂兄弟(分别为 $\mu$ 轻子和 $\tau$ 轻子)。人们不理解上帝为何创造这些多余的堂兄弟们。其实,这些多余的家庭成员都极

不稳定,寿命极短,产生出来后立马就衰变掉了,而只有“一门”的兄弟们(u夸克、d夸克和电子)幸存下来并与上帝同在。物质世界的基本粒子大家庭如图1所示。

在基本粒子大家庭中,夸克带色又带电,属于强权阶层,它们之间的色作用是通过胶子传递的,这种作用很激烈(即强作用),以致于把这些好色的夸克都永远地囚禁在魔窟之中(即夸克禁闭),它们终身不得自由,一旦自由就会引起天下大乱而导致世界回到一片混沌;轻子带电不带色,属于较弱的一个阶级,它们远离色的引诱,而只参与由W-玻色子、Z-玻色子和光子传导的电弱作用,因此它们是可以自由的;真正的无产者自由派是我们不熟悉的中微子( $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$ ),这些中微子太轻微、太渺小了,其体重还不到电子质量的百万分之一,它们既不带电也不带色,一无所有的它们逍遥洒脱、与世无争(与别的粒子作用极弱),具有极强的穿透力和接近光速的飞行速度(前一阵意大利的Opera实验曾闹剧般地宣称发现中微子的速度超过光速,后来他们自己发现松懈的电缆导致了错误的结论,光速仍是不可超越的极限速度),这样,遥远的天体里所产生的中微子可以直达我们的地球,向我们诉说那银河里所发生的故事,例如,太阳发来的中微子告诉我们太阳的发光机理,超新星发来的中微子告知我们超新星的爆发机制,还有宇宙婴儿时期所留下的背景中微子可以告诉我们早期宇宙所发生的故事。

上帝创造这些中微子是有理由的,作为物质世界基本砖块的夸克和轻子,它们不善独舞,必须得有舞伴,它们表演出来的二重奏(物理上叫二重态)是这样组合的:(u, d); (c, s); (t, b); ( $\nu_e, e$ ); ( $\nu_\mu, \mu$ ); ( $\nu_\tau, \tau$ ),这种看起来一阳一阴梁祝似的组合恰恰符合我们中国人的审美观,阴阳交合一起翩翩起舞,舞出了一个美妙的大千世界。但是,基本粒子世界也不是一个民主国度,统治这个国家的法理看起来也不合理,例如,只有左手夸克和轻子才允许配对进行二重奏,右手夸克和轻子只能孤单地旁观,上帝为何偏爱左而冷落右?这没理可讲,因为上帝本身可能就是一个独

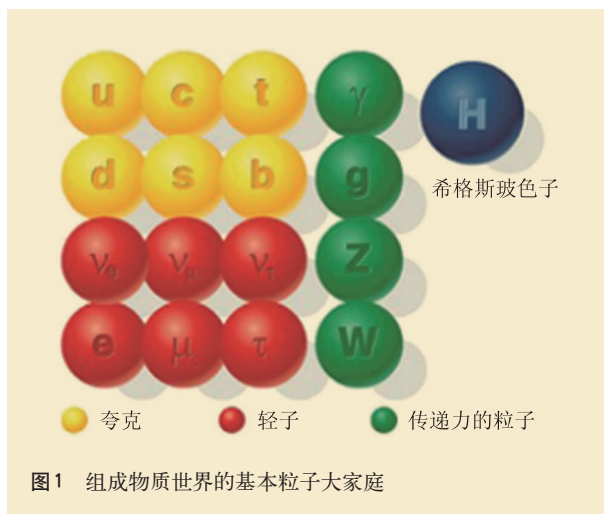


图1 组成物质世界的基本粒子大家庭

裁者。

基本粒子大家庭中的希格斯玻色子最与众不同(它的自旋是0,跟别的粒子都不一样),它扮演天子(上帝粒子)的角色,想要质量的粒子必须到它这儿来乞讨,它愿意给谁质量就给谁,愿意给多少就给多少,传递最强最脏的色作用的胶子因不受希格斯粒子的喜欢而没有得到质量,传递电磁作用的光子因过分显耀自己也没有讨得质量,胶子和光子想要传递信息给希格斯粒子(也就是发生作用或耦合)就必须通过别的成员进行传递(也就是通过别的粒子组成的圈图)。另外,得到质量的粒子也是严重的分配不均,例如,t-夸克的质量是其舞伴b-夸克质量的几十倍,这种严重的不公平至今不被人们所理解(虽然也有一些尝试性的理论来企图解释这一现象,比如top-color凝聚理论)。

随着希格斯玻色子的发现,基本粒子家族就全部展现在我们面前了,这个家族内部虽然也有不公平(因而不能说和谐),但每个成员各司其职、共同主导着丰富多彩的物质世界。需要注意的是,我们这儿所说的世界是指看得见的光明世界,至于宇宙中的黑暗部分,那是目前我们还不了解的一个聊斋世界,那个世界由另一种基本粒子(即暗物质粒子)所主宰,它除了像中微子那样不带色不带电之外,它还是宇宙中真正的多数派,比我们看得见的物质要多得多,它们如梦如幻时刻云游于我们周围,但我们却看不见摸不着它们,它们的质量可能跟希格斯粒子无关,可能来自另外的我们感触不到的世界。

统治这个基本粒子家族的法理叫作标准模型,标准模型虽然显得不那么漂亮(比如左和右的

费米子被区别对待),但它是目前为止人类历史上最成功的理论,并产生了最多的诺贝尔奖。这个理论预言的所有粒子都被发现了(希格斯粒子是最后一个),所预言的物理现象也都被证明是正确的(希格斯粒子的性质将在LHC及以后的国际直线对撞机(international linear collider, ILC)或者希格斯粒子工厂被敲定)。找到希格斯粒子并敲定它的性质是当今及以后几十年高能物理的主要任务。

### 3 希格斯粒子的本质和希格斯机制

要理解希格斯粒子的本质就必须从对称性自发破缺讲起。环顾四周,对称性之美无处不在。对称性更是贯穿物理学的一条主线。物理学中的对称性分为时空对称性和内部对称性。时空对称性很容易理解,也就是物理规律在时空平移和洛伦兹转动下是不变的,例如,物理规律不会随地点和时间的不同而不同,也不会空间的转动下而发生改变;内部对称性比较难以理解,它们存在于量子世界,也就是描述微观世界的物理规律对某些不同的粒子是一样的(当一种粒子变为另一种粒子时,物理规律不变),例如强作用在u夸克和d夸克交换时是不变的。对称性的破缺分为明显破缺和自发破缺,明显破缺就是在拉氏量中野蛮地引入对称破缺的项,这时运动方程就不具有这种对称性了(理论也就丑陋不堪了);自发破缺就是拉氏量和运动方程具有某种对称性,而运动方程的解(物理态)不具有这种对称性。早在1930年代,朗道就发现铁磁体的相变与对称性自发破缺有关,描述其内部磁场的运动方程具有空间转动不变性,当在居里温度(对

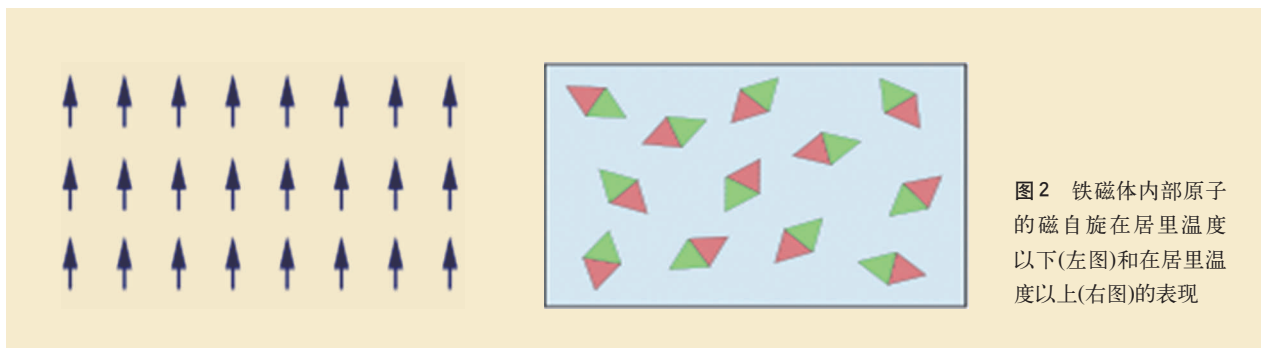


图2 铁磁体内部原子的磁自旋在居里温度以下(左图)和在居里温度以上(右图)的表现

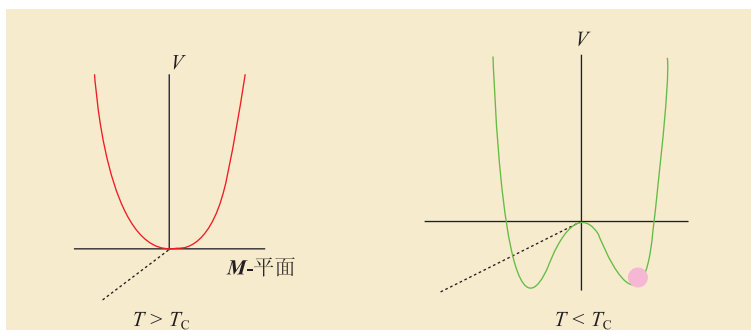


图3 铁磁体的自由能  $V$  在居里温度  $T_c$  以上(左图)和在居里温度以下(右图)随磁化强度  $M$  的变化行为

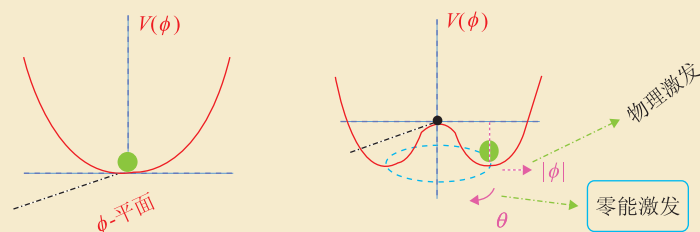


图4 势能  $V(\phi) = -\mu^2 \phi^* \phi + \lambda (\phi^* \phi)^2$  在  $\mu^2 < 0$  (左图) 和  $\mu^2 > 0$  (右图) 的变化行为。右图中沿着  $\theta$  方向的激发是零能激发(对应 Goldstone 玻色子), 而沿着径向  $|\phi|$  的激发是物理激发(对应希格斯粒子)

于铁来讲是  $770^\circ\text{C}$ ) 以上时, 铁磁体内部原子的磁场自旋杂乱无章(具有空间转动不变性), 但在居里温度以下时, 铁磁体内部原子的磁场自旋集体指向某一方向(空间转动不变性丧失), 如图2所示。

朗道用吉布斯自由能(热动力学势)描述这一现象, 这个势依赖于温度  $T$  和磁化强度  $M$ , 在临界点附近可以写成  $V = A(T) + b(T - T_c)(M \cdot M) + c(M \cdot M)^2$ , 其中  $A(T)$  是温度的函数(不依赖于磁化强度),  $b$  和  $c$  都是大于零的常数。这个势给出的最低能态(也就是满足  $\partial V / \partial M_i = 0$  的态)在  $T > T_c$  和  $T < T_c$  时很不一样: 在  $T > T_c$  时得到  $|M| = 0$  (具有转动不变性, 磁化强度为0); 在  $T < T_c$  时得到  $|M| \neq 0$  (不具有转动不变性, 磁化强度不是0), 如图3所示。

对称性自发破缺在量子场论中的最简单的例子是, 一个具有  $U(1)$  对称性的复标量场  $(\phi)$  系统, 其势能为  $V(\phi) = -\mu^2 \phi^* \phi + \lambda (\phi^* \phi)^2$ , 其中  $\lambda$  必须大于0(否则这个势能没有最小值), 而  $\mu^2$  可正可负。这个势给出的最低能态(也就是满足  $\partial V / \partial |\phi| = 0$  的态)在  $\mu^2 > 0$  和  $\mu^2 < 0$  时很不一样: 在  $\mu^2 < 0$  时得到

$|\phi| = 0$  (在  $U(1)$  变换下不变); 在  $\mu^2 > 0$  时得到  $|\phi| \neq 0$  (在  $U(1)$  变换下要变), 如图4所示。

在  $\mu^2 > 0$  时真空态  $\phi = v \neq 0$  ( $v$  是正的实数, 它的相角可以通过一个  $U(1)$  变换而吸收掉)。显然在  $U(1)$  变换(即乘上因子  $e^{i\alpha}$ ) 下真空态要变化。也就是拉氏量(或运动方程)具有  $U(1)$  不变性, 而  $\phi$  的真空态不具有  $U(1)$  不变性, 我们说此种情况下  $U(1)$  对称性自发破缺了, 如图4所示, 这时真空沿着  $\theta$  方向的激发是零能激发(对应 Goldstone 玻色子)而沿着径向  $|\phi|$  的激发是物理激发(对应希格斯粒子)。

在规范理论中, 上述的  $U(1)$  对称性变成定域规范对称性, 零能激发的 Goldstone 玻色子被规范玻色子吃掉, 从而规范玻色子多了一个径向自由度而变成有质量的粒子(规范对称性限制了规范玻色子不能有质量), 希格斯粒子留下来而成为真正的物理粒子。这就是希格斯机制。

在实际的理论——标准模型中, 上述的复标量场是  $SU(2)$  的二重态, 它有4个自由度, 当它自发破缺了  $SU(2)$  后, 产生了3个没有质量的 Goldstone 粒子和一个有质量的希格斯粒子, 3个 Goldstone 粒子被规范玻色子  $W$  和  $Z$  吃掉, 而使得  $W$  和  $Z$  获得了质量, 剩下的那个希格斯粒子就是物理上可见的真的粒子了。

4 希格斯粒子的产生、衰变和发现

## 4 希格斯粒子的产生、衰变和发现

虽然希格斯粒子对于理解物质世界的基本组成极其重要, 但我们身边早就没了希格斯粒子的踪影, 希格斯粒子只是在宇宙创生之初昙花一现, 它在完成使命(破缺电弱对称、给其他粒子赋予质量)之后马上就涅槃了。我们的宇宙起源于137亿年前的一次大爆炸, 当初的情境就像圣经描述的那样一片混沌, 那个爆炸的火球内充斥着大量的希格斯粒子, 后来当太阳和地球形成的时



候希格斯粒子早就衰变掉了，太阳和地球没有看到过希格斯粒子，只有宇宙老人在他还是婴儿的时候见到过希格斯粒子。

既然我们的现实世界中已经没有了希格斯粒子，要想看到它，就必须使它重生，重新产生希格斯粒子可不是一个简单的活儿，生产它的工厂就是像LHC这样的高能对撞机。在LHC上希格斯粒子产生的主要过程如图5所示，其中的黑团代表LHC上对撞的质子，真正发生对撞而产生出希格斯粒子的是质子中的夸克和胶子(质子就像一个肉包子，里面包藏着各种夸克和胶子)。

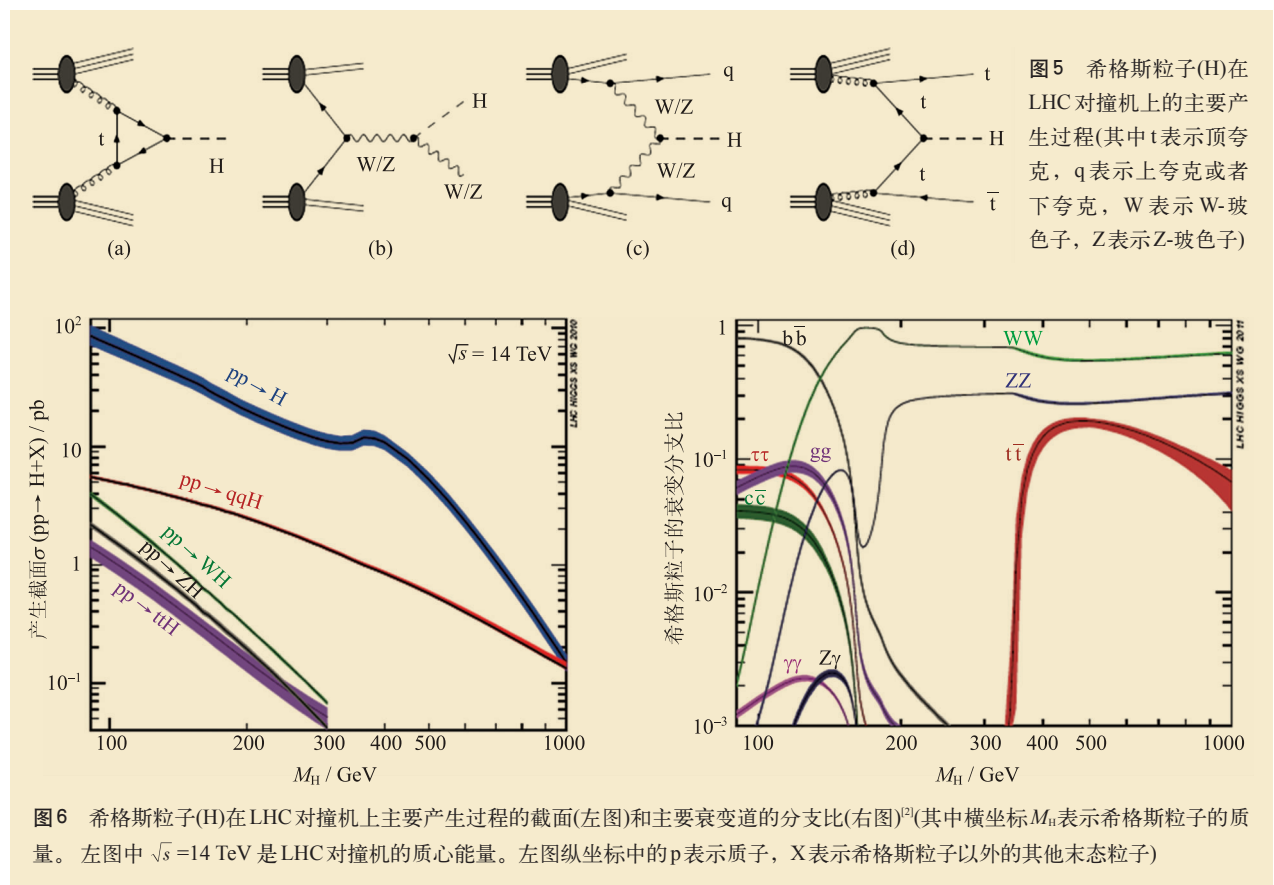
以上几个产生过程所给出的产生截面(简单来说就是产生希格斯粒子的几率)相差很大，截面最大的是图5(a)的胶子融合，其次是图5(c)的矢量玻色子融合，再其次是图5(b)的H和W或Z的联合产生，最小的是图5(d)的希格斯粒子和顶夸克对的联合产生，如图6中的左图所示。

希格斯粒子产生之后马上就衰变掉了，由于希格斯粒子与别的粒子的耦合正比于相应粒子的

质量，当希格斯粒子比较轻的时候，它主要衰变到b夸克对，当希格斯粒子比较重的时候，它主要衰变到WW，ZZ和t夸克对，如图6所示。对于一个125—126 GeV的希格斯粒子，它的主要衰变道的分支比如图7所示，其中分支比最大的是b夸克对，但在LHC上b夸克背景极大，这个道到目前为止还没有被观测到。在LHC上寻找希格斯粒子最干净的道是双光子和 $ZZ^* \rightarrow 4$ 轻子， $WW^*$ 和 $\tau$ 轻子对也可以被利用。

LHC的两个实验组ATLAS和CMS分别寻找了双光子、 $ZZ^*$ 、 $WW^*$ 、 $\tau$ 轻子对和b夸克对，截止到2012年11月，他们的观测结果如图8所示，他们观测到了在125—126 GeV处有事例的明显超出，合起来每个组发现的事例都超过了5个标准偏差，已经达到了可以宣布发现的标准。由图8可见，目前的数据仍显粗糙(误差较大)，双光子道信号的观测值要明显高于标准模型预言值。

2012年11月12—16日在日本京都召开了“强子对撞机物理大会”，会上LHC的两个实验组



$b\bar{b}$	56%	$\tau^+ \tau^-$	6.2%	$\gamma\gamma$	0.23%
$WW^*$	23%	$ZZ^*$	2.9%	$\gamma Z$	0.16%
$gg$	8.5%	$c\bar{c}$	2.8%	$\mu^+ \mu^-$	0.02%

图7 一个125—126 GeV的标准模型的希格斯粒子的主要衰变道的分支比<sup>[3]</sup>

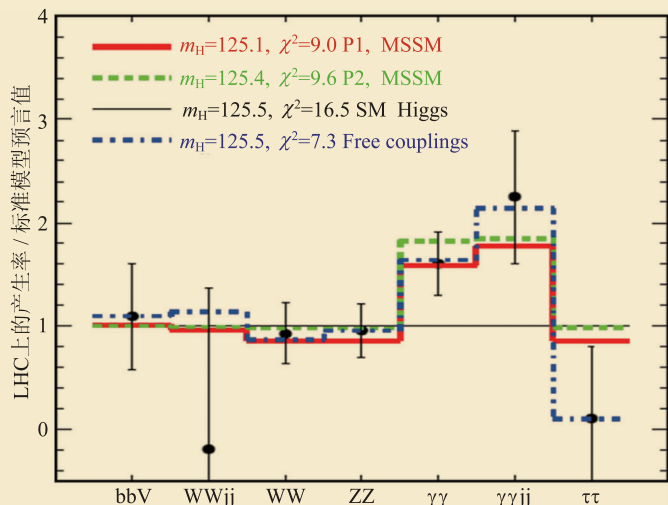


图8 一个125—126 GeV的希格斯粒子在LHC上的产生率与标准模型预言值的对比<sup>[4]</sup>(横坐标中V表示Z-玻色子或者W-玻色子; j表示一个喷注(jet))。其中值为1的水平线是标准模型(SM)的预言, 带误差范围的黑点是LHC的测量值(综合了CMS和ATLAS两个实验组的数据, 7 TeV和8 TeV的亮度共大约10/fb), 红色和绿色的线是最小超对称模型(MSSM)的预言(取了两个参数点), 蓝色线是让希格斯粒子的耦合自由变化所得到的最佳理论值

	$H \rightarrow \gamma\gamma$	$H \rightarrow ZZ^*$	$H \rightarrow WW^*$	$H \rightarrow t\bar{t}$	$VH(H \rightarrow b\bar{b})$
ATLAS	$1.8 \pm 0.5$	$1.4 \pm 0.6$	$1.5 \pm 0.6$	$0.7 \pm 0.7$	$-0.4 \pm 1.1$
CMS	$1.56 \pm 0.46$	$0.8^{+0.35}_{-0.28}$	$0.74 \pm 0.25$	$0.72 \pm 0.52$	$2.2\sigma$ 超出本底

图9 一个125—126 GeV的希格斯粒子的数据  $\sigma_{exp}/\sigma_{SM}$  (实验测量的产生截面与标准模型理论预言值之比), 其中红色数据是基于7 TeV(5/fb)+8 TeV(12/fb), 黑色数据是基于7 TeV(5/fb)+8 TeV(5/fb)(图中V表示Z-玻色子或者W-玻色子)

ATLAS和CMS分别又宣布了一些新结果<sup>[5]</sup>, 如图9所示, 两个实验组都在 $\tau\tau$ 道观测到了信号, 但 $bb$ 道仍旧没有看到明确的信号超出。

目前基本上可以说, LHC重生了希格斯粒子, 并初步看到了它的面目, 这将载入世界科学史册和人类文明史册。希格斯粒子的发现为我们理解物质世界的组成和来源指明了方向, 说明我们的主流理论(标准模型—超对称—大统一)可能是正确的, 从而鼓舞着人们沿着这一主流方向继续探索。实验学家将继续测量希格斯粒子的性

质, 并探索发现新的粒子, 理论学家将深入研究与希格斯粒子有关的理论, 特别是超对称理论, 并以超对称理论为桥梁最后建立一个成功的大统一终极理论。

## 5 希格斯粒子的和谐环境——超对称理论

137亿年前宇宙创始时与希格斯粒子同宫共舞的应该还有很多伙伴, 其中可能还有个大家族就是超对称粒子。从理论上讲, 如果存在基本的希格斯粒子, 那么只有超对称理论才是它存在的天堂, 在那里它如鱼得水, 存在得自然, 生活得安逸和谐, 离开超对称, 希格斯粒子就会像脱缰的野马而难以稳定, 其原因是希格斯粒子对高能标度以及高能标度处的重粒子过度敏感, 量子效应让希格斯粒子质量难以稳定在它应在的位置(弱标度100 GeV), 自然地它应该向上狂奔到大统一标度( $10^{15}$  GeV), 甚至普朗克标度( $10^{19}$  GeV)。如果放任它这样一直跑上去的话, 所有的基本粒子的质量也都跟着向上跑(因为质量都是希格斯粒子给的), 氢原子也就形成不了, 整个宇宙还将是一片混沌, 生命更是无从谈起。在标准模型中, 管制希格斯粒子

质量不向上狂奔的手段是, 精细调节有关参数去抵消暴躁的量子效应, 精细调节的程度就像是在地球上用一杆枪去打月球上的一只兔子。超对称理论解决这一精细调节问题的手段甚为高明, 它用优美的对称性压制住了希格斯粒子质量中的量子效应, 从而稳定住了希格斯粒子的质量。

超对称是对时空对称性的扩充, 也是唯一的非平庸扩充。内部对称性和时空对称性本来是相互并行、井水不犯河水, 只有超对称甚是特

殊，它竟然跟时空对称性有机地结合起来。超对称的代数非常简单和优美，如图10所示，但这简单的对称性在粒子物理和宇宙学中却有异常丰富的现象和后果，从而征服了无数的科学家。

超对称理论预言标准模型的每一个粒子都有它的超对称伴子(叫作超粒子)，如图11所示，如果超对称理论是真理的话，我们还有另一半超粒子世界。这些众多的超粒子在宇宙形成的极早期大量存在并甚是活跃，可惜这个家族的绝大部分成员都很短命，在宇宙的早期与其他众多粒子热闹一番后便纷纷衰变而退出历史舞台，到现在只剩下一个老幺(最轻的超粒子)长生不老，其年龄和宇宙老人一样，至今已有137亿岁了。超对称理论除了预言大量的超粒子之外，还预言希格斯粒子有好几个兄弟姐妹(共兄妹5个)，它们一起组成一个快乐和谐的小家庭(刚刚发现的这个希格斯粒子是其中的幺妹)。虽然绝大部分超粒子都早已仙逝而归于宇宙尘土，但我们可以在高能对撞机实验中让它们得以重生。

最轻的那个超粒子组成了宇宙中的暗物质，它不带电、不带色、是宇宙中的逍遥客。它对宇宙中星体和星系的形成起着关键作用，没有它，宇宙的结构就难以形成；它就像宇宙中的强力胶，没有了它，宇宙中的一个一个星体就会纷纷飞散，宇宙就会彻底散架而导致天下大乱。它无影无踪聊斋般地游荡在我们周围，要感知它的存在，必须有专门的实验设备(各种天体物理实验和像LHC这样的高能对撞机实验)。

寻找这些超粒子是LHC的主要目标之一，LHC正在寻找这些粒子。由于目前的寻找结果是尚未看到这些粒子，再加上LHCb实验组所观测的B介子衰变都与标准模型的预言相符合(超对称粒子对B介子衰变应该有一定程度的贡献)，由此英国广播公司(BBC)说超对称被送入了医院。

其实，一个125 GeV的希格斯粒子也对超对称给出了暗示：要么超对称破缺的能标向上移动一些(那样就不是真正的低能超对称，就不能完美解决精细调节问题)，要么最小超对称模型(MS-

SM)就要扩充一点(比如加入一个单态希格斯超场，这样的模型叫次最小超对称模型(NMSSM))。从图8可以看到，最小超对称模型(MSSM)跟希格斯粒子的实验观测值(图8中带误差范围的黑色线)符合得还是比较好的(比标准模型要好得多)，但它的问题是有一定程度的精细调节。而次最小超对称模型(NMSSM)不仅跟希格斯粒子的实验观测值符合得好，而且没有精细调节问题的困扰。图12展示了4个超对称模型的存活参数空间所对应的精细调节程度，其中的 $\Delta$ 值越大，对应的精细调节程度也就越大， $\Delta$ 值低于10被认为是自然的。另外两个模型CMSSM和nMSSM因不

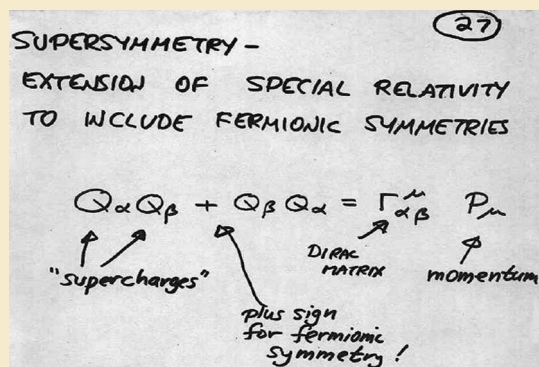


图10 超对称代数(E. Witten在国际弦理论会议上所做的报告中的一张透明片)<sup>[6]</sup>

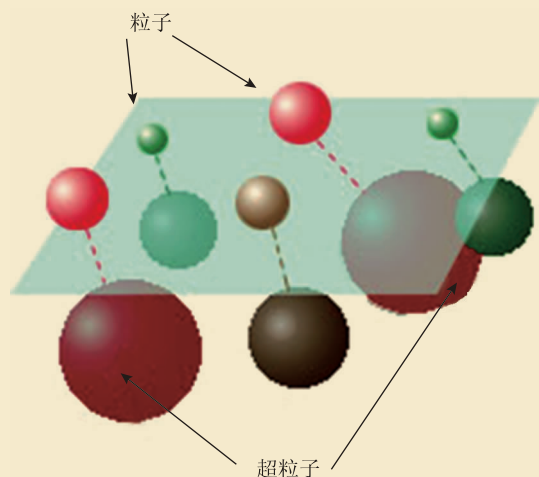


图11 超对称理论预言每个粒子都有它的超对称伙伴(超粒子)，由于超对称的自发破缺，超粒子都比较重(其中镜面之上的那些粒子都是标准模型中的粒子，镜面之下的那些粒子是超粒子)



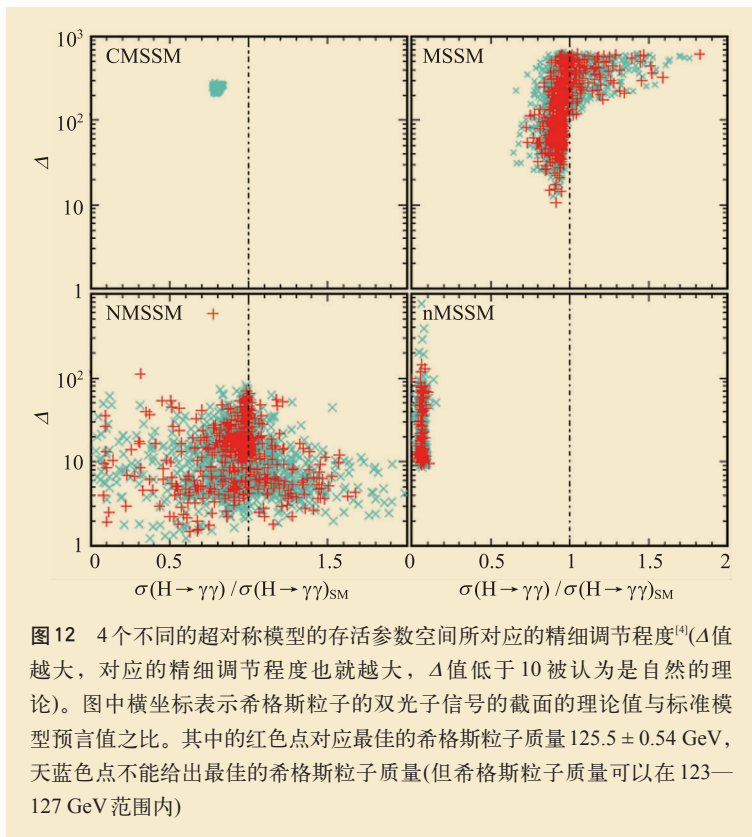


图 12 4 个不同的超对称模型的存活参数空间所对应的精细调节程度<sup>[4]</sup>( $\Delta$ 值越大, 对应的精细调节程度也就越大,  $\Delta$ 值低于 10 被认为是自然的理论)。图中横坐标表示希格斯粒子的双光子信号的截面的理论值与标准模型预言值之比。其中的红色点对应最佳的希格斯粒子质量  $125.5 \pm 0.54$  GeV, 天蓝色点不能给出最佳的希格斯粒子质量(但希格斯粒子质量可以在 123—127 GeV 范围内)

能提高希格斯粒子的双光子信号(CMSSM 甚至难以给出一个 125 GeV 的类似标准模型的希格斯粒子)而处于被排除的边缘。

因此可以说, 目前的 LHC 实验数据(包括超粒子寻找实验、LHCb 的 B 介子衰变数据和希格斯粒子的测量数据)已经开始检验并挑选超对称模型, 随着实验的进展, 真理就会水落石出。其实这些不同的超对称模型都具有同样的内核(也就是图 10 中的超代数), 不同的是它们在物理世界中的展现形式。

## 6 结束语

希格斯粒子的发现说明人类初步理清了上帝创造世界的思路, 这一发现在科学史上是个里程碑, 但可能是一场大戏的序幕。正像考古学家揭开一个汉墓时遇到的情形, 发现希格斯粒子就像刚刚揭开棺材板, 接下来的工作是清理识别棺槨中的宝藏, 并说清其中的秘密。接下来要回答的问题还很多, 例如, 发现的这个粒子究竟是不是希格斯粒子? 若是希格斯粒子, 它究竟是标准模型的希格斯粒子或者超对称的希格斯粒子? 还有没有更多的希格斯粒子? TeV 能区有没有超对称粒子? 如果发现不了超对称粒子, 那么 TeV 能区的新物理是什么? 若 TeV 能区没有新物理, 那怎么理解精细调节问题(难道上帝是个疯子)?

### 参考文献

- [1] The ATLAS Collaboration. Phys. Lett. B, 2012, 716: 1; The CMS Collaboration. Phys. Lett. B, 2012, 716: 30
- [2] Dittmaier S, Passarino G, Mariotti C *et al.* [LHC Higgs Cross Section Working Group], CERN-2011-002, arXiv: 1101.0593 [hep-ph]
- [3] Peskin M E. arXiv:1208.5152 [hep-ph]
- [4] Cao J, Heng Z, Yang J M *et al.* JHEP, 2012, 1210: 079
- [5] <http://www.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/hcp2012/>
- [6] Witten E. 国际弦理论会议. 2002 年 8 月, 北京

### 读者和编者

## 《物理》有奖征集封面素材

均有稿酬及全年《物理》杂志相送。

请将封面素材以附件形式发至: physics@iphy.ac.cn; 联系电话: 010-82649470; 82649029

期待您的参与!

为充分体现物理科学的独特之美, 本刊编辑部欢迎广大读者和作者踊跃投寄与物理学相关的封面素材。封面素材要求图片清晰, 色泽饱满, 富有较强的视觉冲击力和很好的物理科学内涵。被选用的封面素材提供者,

《物理》编辑部