

·科技纵横·

# 粒子物理的统一梦

物理学的目的是研究探索自然界万物的结构及运动规律。万物运行的规律是什么？物质由哪些基本成分构成？物质的结构是否无限可分？物质之间如何相互作用？物含妙理总堪寻，物理学家希望能建立一个统一的理论框架，最好可以囊括所有的基本现象，解释自然界的本质规律。从古希腊的“原子说”、道尔顿的原子模型，到元素周期律的发现，再到基本粒子的标准模型，都是基于追求“统一”的愿望。追求统一也就是追求完美，这种愿望促使人们努力奋斗，孜孜以求，推动科学革命，产生新理论，从而造福社会、造福人类。

100多年前，19世纪的最后一天，英国著名物理学家威廉·汤姆生向科学界发表新年祝词，展望牛顿的经典物理学成就时说：“大厦已经落成，剩下只是一些修饰工作……。然而，在物理学晴朗的天空下，还有两朵令人不安的乌云……。”

之后，正是为了解决这两朵乌云，建立了量子力学和相对论，激发了物理学的重大革命<sup>[1]</sup>。如今的物理学中，有宏伟大厦，也有片片疑云，科学家们也仍然在不断地艰苦奋斗，拨云弄雾，尽力消除完美中的不完美，以达到新的统一<sup>[2]</sup>。

## 1 从粒子加速器到LHC

物理学是一门基于实验的科学。在探究物质结构秘密的过程中，利用高速的粒子产生碰撞，是基本的实验手段之一。原子中有些什么？就像孩子们看着一颗核桃，不知道里面是什么东西，于是，他们用一颗石头来轰击它，或者用两颗核桃，让它们快速地相撞，敲开之后便知道了其中的奥秘。当年卢瑟福和他的学生盖革所进行的 $\alpha$ 散射实验，就是一个著名的例子，他们用 $\alpha$ 射线轰击微米级厚度的金箔，确定了原子的“行星模型”。

卢瑟福的实验给人启发： $\alpha$ 射线是从天然放射性元素放射出来的，速度无法控制。为什么不人为地将粒子加速呢？1932年，两位英国物理学家约翰·考克饶夫（John Cockcroft, 1897—1967年）和华顿（E.T. Walton）建造了第一个粒子加速器，用交流电产生的磁场来加速带



图1 本文作者张天蓉

电粒子，如此获得高能量的粒子后，用它们来冲击原子核。之后，加速器不断改进，尺寸不断增大，能量不断提高。人们利用粒子加速器发现了绝大部分新的超铀元素，合成了上千种新的人工放射性核素，还发现了包括重子、介子、轻子和各种共振态粒子在内的几百种新粒子。之后，人们又采取将两束粒子对撞的方法。显而易见，这样比只加速一束粒子能够得到更大的能量。

目前世界上最大的对撞机是位于瑞

士日内瓦西北部郊区的欧洲核子中心（CERN）的大型强子碰撞机，一般将它称之为LHC，那是一个巨大的科学工程（图2），已经和当年的第一个粒子加速器不可同日而语。

欧洲核子中心可以说是当今世界上科学研究最前沿的地方。20多年之前，万维网在这儿悄然诞生，之后的发展有目共睹。2013年，这个组织宣告找到了“上帝粒子”（希格斯粒子），接着，诺贝尔奖委员会将2013年的物理奖授予了与此相关的两位理论物理学家：弗朗索瓦·恩格勒和彼得·希格斯。

大型强子对撞机LHC隐藏在100 m深的地下，位于一个周长27 km的巨大环形隧道内。世界各国合作的总耗资达到130亿美元，上万人为此日夜辛勤工作，目的就为了追踪一个平均寿命只有 $1.56 \times 10^{-22}$  s的基本粒子（图3），科学家让LHC隧道中的两束质子，以每秒11245圈的速度（接近光速）狂奔后相撞，在极小的空间内爆发出等于十万倍太阳温度的超级高温，并释放出大量的能量



图2 CERN的强子加速器LHC

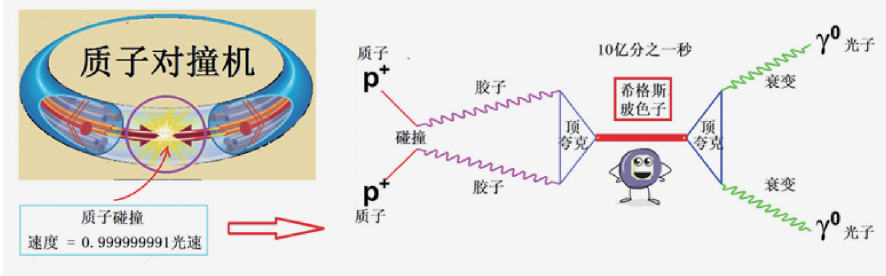


图3 希格斯玻色子

和粒子,希格斯粒子就产生在其中。不过,质子碰撞产生希格斯粒子的几率很小,每 $10^{12}$ 次的对撞,才可能产生1次。并且,希格斯粒子一旦产生后转瞬即逝,在10亿分之一秒的时间内就会衰变成其他的粒子。这就是LHC耗资如此巨大的原因,要想捕捉到希格斯粒子太不容易了。

什么是希格斯玻色子?为什么要花费巨资寻找它?这种动力正是来自于物理学家追求统一的梦想。如今,物理学家们已经将物质结构的基本“砖块”和3种相互作用,统一于62种基本粒子构成的标准模型中。标准模型理论所预言的数种粒子在实验中均被陆续发现,希格斯粒子是最后发现的一个,它为“标准模型”画上了一个完美的句点。

## 2 标准模型

20世纪40年代开始,有了高能的回旋加速器之后,科学家发现的新粒子的种类和数量越来越多。到了20世纪60年代,观察到的不同粒子已高达200多种。难道“粒子动物园”中这两三百种粒子都是“基本”的吗?这个可笑的结论太不令人满意了,完全不符合“统一”的要求。

所幸在理论物理学家们的努力下建立了标准模型(图4),它囊括了实验中发现的所有基本粒子,是迄今为止最成功地描述微观世界的理论框架。

除了我们还知之甚少的暗物质和暗能量之外,科学家认为物质间有4种基本的相互作用力:电磁力、弱力、强力、引力。如果暂时不考虑那个顽固的“引力”,标准模型可以将所有的物质及其相互作用统一在一个62种粒子的框架中,基本上能精确地解释与这3种力有关的所有实验事实。

标准模型是建立在杨振宁与其同事

建立的“杨-米尔斯规范场”理论的基础上,如图4左图所示。其中的“基本粒子”分为3类:费米子、玻色子、希格斯粒子。费米子包括夸克和轻子,是组成可见物质的基本“砖块”;玻色子是3种相互作用的传播粒子。比如说,电磁力的传播粒子是光子;弱作用的传播子为W粒子和Z粒子;强作用的传播子叫做胶子。为什么又有一个希格斯粒子呢?那是因为规范场理论只能处理无静止质量的粒子,但实际上很多粒子都具有静止质量,质量从何而来呢?标准模型使用对称破缺的概念,引进希格斯粒子,解决了这个问题。

12类费米子按4个1组,分别成为夸克和轻子的3代家族。只有第一代家族的4个粒子——上夸克、下夸克、电子以及电子中微子是构成通常可见物质的基本砖块,其他两代家族,都与常见物质无关,并且它们算是第一代家族衍生出来的更重的版本,所以除了专门的粒子学家之外,我们可以暂时不去了解它们,也没有必要记住它们。

因此,粒子物理的标准模型简化了世界本源的图景:物质由分子构成,分子由原子组成,原子由原子核和电子组成,原子核中有质子和中子。但是,质子和中子不是物质的基本单元,它们属于复合粒子,由更小更为基本的夸克和反夸克构成,每个质子由2个上夸克和1个下夸克组成;每个中子则由1个上夸克和2个下夸克组成。

光子(photon)在图4中用符号 $\gamma$ 表示,是电磁相互作用的传播粒子。胶子(gluon)用符号g表示,是夸克之间强相互作用的传播粒子。弱相互作用是使原子衰变的相互作用,对应于3个场传播子:带单位正电荷的 $W^+$ 、带单位负电荷的 $W^-$ 以及电中性的 $Z^0$ 。希格斯粒子(Higgs boson)在图4中用H表示。

## 3 没有终点的旅程

粒子物理学家们早已不满足于标准模型的束缚,因为它无法解释引力,也未曾包括暗物质和暗能量。

人们已经设想出了更大的统一理论,诸如超对称、弦论、大统一、万有理论等。然而,因为缺乏实验的支持,这些理论都还停留在假说和猜想的阶段。

如果想继续使用“碰撞”的办法来验证这些假说和猜想,粒子需要被加速到越来越高的能量。这点用敲核桃的比喻不难理解:核桃越小,需要用越大的能量来碰撞它们才能敲开。

到底需要多大的能量呢?我们现在的LHC又具有了多大的能量?可以将我们的“统一之路”,直观地用能量级别画出来,如图5所示。图5的左边,看起来像一条高速公路,或可称之为粒子物理要走向统一的“高能”公路。那么,这条统一之路通向何方?人类当前走到了什么地方?

首先,如图5所见,能量如果一直高上去,便到了大爆炸模型中宇宙的起点,这便是为什么人们有时会说,LHC能够模拟大爆炸。但那只是一个方向而已,能量还差几十个数量级。

图5中下方最低的那条水平红线,是现代加速器技术所具有的能量级别,大约是( $10^4 \sim 10^5$ )GeV左右,比发现希格斯粒子的位置稍高一点。比如说,CERN的LHC能够将每个质子加速到能量为6.5 TeV(1 TeV=1000 GeV)左右。“大统一论”的位置,大约是在 $10^{16}$  GeV左右的那条红线;再上面的一条是所谓包括了引力的“万有理论”,能量级别是 $10^{21}$  GeV,已经大于普朗克能量。

图5中的右图罗列了标准模型中基本粒子的质量(与能量相对应),它们当然都在下方标识了“现在”的红线之下,离上面标识“大统一论”的红线还差13个数量级。也就是说,从1932年的第一台粒子回旋加速器算起,80多年的时间,加速器的能量级别不过提高了4~5个数量级而已,并且,要想继续提高加速器能量,会越来越困难。就理论的角度而言,人类也许自以为发现了很多大自然的奥秘,现代科技如此发达,统一理论应该指日可待了吧。看了这张图之后,可能才恍然大悟,原来我们还差得很远很远啊!

通向统一之路不会只有一条,利用高能粒子“碰撞”的办法也不是达到统一的唯一途径。况且加速器的能量越高,

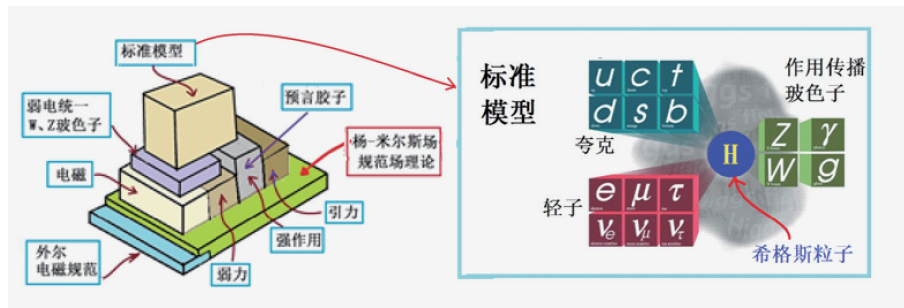


图4 标准模型

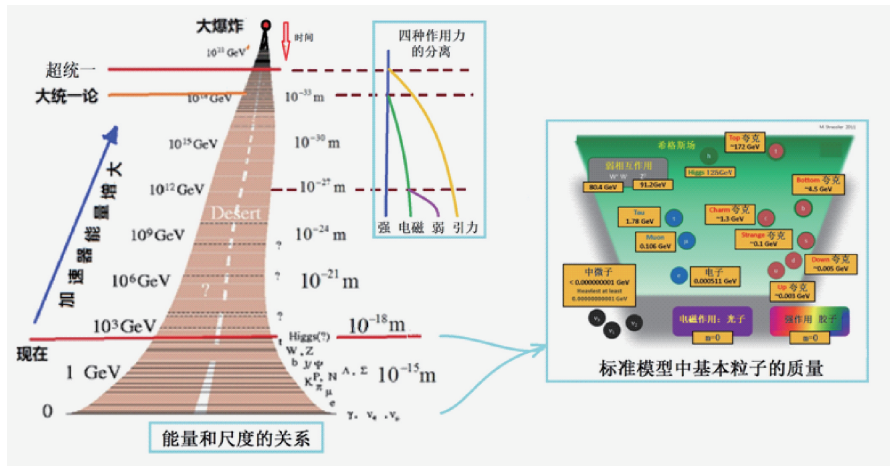


图5 统一之路漫长无止境

造价越高。实际上,没有任何人造的粒子加速器能比得过大自然的力量。我们所追求的目标-能量极大的统一高能公路的终点,就是宇宙之初,时间的起点。根据大爆炸模型,宇宙是由一个密度极

大、温度极高的太初状态演变而来的,那种极高能量的状态恐怕很难从地球上模拟。如果宇宙大爆炸真正发生过的话,必定在当今世界中留下蛛丝马迹,研究和观测宇宙中的各种现象,统一理论也

将会受益匪浅。此外,其他物理领域的研究成果,比如凝聚态物理、量子光学等,也对粒子物理的发展有帮助。

人类对自然的认识永无止境,不可能存在任何一劳永逸的“终极理论”,物理学的统一之路,是一条没有终点的旅程。

参考文献

- [1] 郭奕玲, 沈慧君. 物理学史[M]. 北京: 清华大学出版社, 1993.
- [2] 张天蓉. 爱因斯坦与万物之理: 统一路上的人和事[M]. 北京: 清华大学出版社, 2016: 173-212.

文/张天蓉

作者简介 美国德克萨斯州大学奥斯汀分校理论物理博士, 科普作家。

(责任编辑 王丽娜)