

探索质量起源之谜： 希格斯粒子发现历程 和未来希格斯工厂

陈缮真¹ 杨海军^{2,3}

(1. 中国科学院高能物理研究所 100049; 2. 上海交通大学物理与天文学院 200240;
3. 上海交通大学李政道研究所 200240)

1. 前言

2012年7月4日,在欧洲核子研究中心的主报告厅里举行了一场特别的全球新闻发布会,在大型强子对撞机LHC上运行的两个大型实验ATLAS和CMS,同时宣布发现了希格斯粒子,揭开了基本粒子质量起源之谜^{①②}。半个世纪以前预言了希格斯粒子的彼得·希格斯(Peter Higgs)和弗朗索瓦·恩格勒(François Englert)也被邀请到现场。彼得·希格斯,这位时年83岁的老人喜极而泣,他说:“这一切竟然发生在我的有生之年,真是令人难以置信。”全球数千家媒体和电台进行了广泛的报道,美国《科学》杂志将希格斯粒子的发现评为2012年度最重大的科学发现^③。

这是一个期待了近半个世纪的实验结果,六位理论物理学家在1964年发表的研究成果终于被实验所证实了,弗朗索瓦·恩格勒和彼得·希格斯因此荣获了2013年度的诺贝尔物理学奖。

为什么这个发现如此的令人激动?因为,在物理学最微观和基本的分支——粒子物理学半个多世纪的发展过程中,科学家逐渐建立了一整套理论框架,这个框架被称为粒子物理学的标准模型。而这个框架下最基本的粒子几乎都被发现了,希格斯粒子被认为是最后一个最基本的粒子,所以也被人

称作是“标准模型的最后一块拼图”,参见图1。

希格斯粒子的发现揭示了基本粒子质量的起源,填补了标准模型最后也是最重要的基石,从某种意义上完备了标准模型理论,成为粒子物理学研究的一个重要里程碑。粒子物理标准模型的发展和完善,凝聚了几代人近一个世纪的心血。

2. 泡利的疑惑:粒子的质量在哪里

如果我问你,这个世界上有多少种“力”?你可能会列举“重力、摩擦力、磁力、压力、浮力……好多好多!”但是如果问一个现代的粒子物理学家,世界上有多少种“力”,你得到的答案一定是四种,强

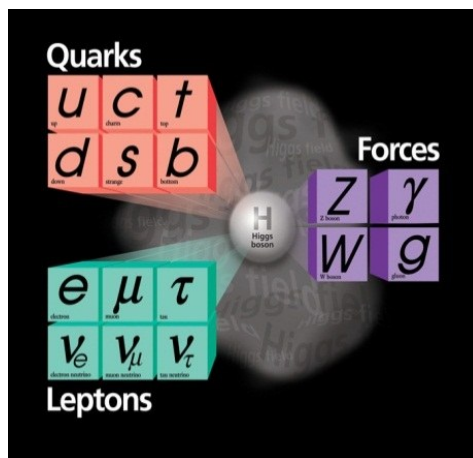


图1 粒子物理标准模型的基本粒子

核力(强相互作用),弱核力(弱相互作用),电磁力和万有引力。那么普通人眼中的力的种类为什么和物理学家眼中的不一样呢?那是因为在生活中能感受得到的力本质上都来自于电磁相互作用力。你可能会疑问,那些不带电的物体产生的力为什么本质上也是来自电磁力呢?其实,像是摩擦力、压力等看似没有电和磁参与的力,从微观层面来看,都是分子之间的相互作用,而分子之间是通过它们本身的电磁场互相影响彼此的,所以,这些宏观上不带电和磁的力,从本源上来讲其实还是电磁相互作用力。那么,为什么我们看到的世界感受不到引力和电磁力之外的那两种力呢?强核力,弱核力,它们究竟是什么?其实,就像它们的名字所暗示的那样,强核力和弱核力的作用范围都特别短,都只能在原子核内部才能发挥作用,也都是实验物理学家们通过对放射性衰变的分析才被发现的。强核力就像是橡皮筋一样,拉住了因为带着同样的电荷而互相排斥的原子核内的粒子,而弱核力则是启动放射性衰变,以及恒星中氢聚变过程的一种力。

人类最熟悉的基本作用力是万有引力,这也是在宇宙尺度上维系星体运动的最直观的作用力。而由于上百年来电磁学以及电动力学理论的发展,特别是19世纪中叶英国物理学家麦克斯韦总结了一组描述电场、磁场与电荷密度、电流密度之间关系的偏微分方程——麦克斯韦方程组之后,人类已经对于宏观的电磁力以及它的传播子光子有了深刻的了解。然而,不同于这类能够轻易观测到宏观效应的引力和电磁力这两种长程作用力,人类对于另外两种基本短程的作用力的认知过程则艰难得多。因为对另外两种力的研究一开始都只能在放射性衰变这样的看不见摸不着反应中才能进行。在19世纪末放射性元素被发现之后,欧内斯特·卢瑟福(Ernest Rutherford)和约瑟夫·汤姆孙(Joseph Thomson)通过在磁场中研究铀的放射线偏转,发现铀的放射线有带正电的,带负电的和不带电的三种。他们把这三种射线分别被称为 α 射线, β 射线

(也就是电子)和 γ 射线,相应的发出 α 射线和 β 射线的衰变过程也就被命名为 α 衰变和 β 衰变。

1930年的物理学界,人们在讨论一个严肃的问题, β 衰变中能量、动量以及自旋角动量到底守不守恒,因为在那时实验上观测到的 β 衰变的电子能量谱线总是呈现出一种弥散的状态,而不是两体作用给出的单一能量值。这个问题如此深刻地触及到了基本守恒律,几乎动摇了上百年来物理学基石。但是在那个年代,相对论、量子理论的发展已经将物理学家的世界观打碎了一次又一次了,人们已经开始在谨慎的考虑守恒律也被打破的可能性了。但是时年仅三十岁的奥地利物理学家沃尔夫冈·泡利(Wolfgang Pauli)是守恒律的坚定信徒,他为了解释这个问题,提出了一个假设:他认为,在 β 衰变的过程中,除了实验中观测到的带电粒子射线之外,还有一束不带电的粒子射线。这类粒子如此之小又如此之孤僻,以至于当时的各种探测器都无法观测到它,这种粒子就是中微子(泡利最初将其称之为“中子”,但是在两年之后詹姆斯·查德维克(James Chadwick)发现了真正的中子之后,恩里科·费米(Enrico Fermi)和泡利重新将其命名为“中微子”)。这也是历史上第一次有弱核力参与的衰变过程的表达式被完整的写出。几年之后的1935年,为了解释原子核内的质子和中子是如何被束缚在一起的,日本科学家汤川秀树提出了强核力的理论。

在那之后的二十年,物理学界对强核力、弱核力进行了更加深入的研究。时间到了1953年,科学家们想要仿照麦克斯韦方程组,写出描述核子、介子以及它们的相互作用的方程。此时长期研究规范场的泡利首先取得了一些突破,他通过纯粹的数学工具严谨地推导出了一条能够统一描述电磁力场和核力场的非阿贝尔规范场方程。此时的泡利已经53岁,知名于“泡利不相容原理”等理论、年少成名的他此刻已是载誉满身的大科学家,被学界称为“物理学的良心”和“上帝的鞭子”。虽然他写出的非阿贝尔规范场方程在数学上很美,但是他意识到这条方程在物理上还存在着致命的缺陷,那就是

方程存在发散项,这意味着这条方程预示着规范场必须存在质量为零的传递相互作用的规范粒子来维系方程的关系。然而,质量为零的规范粒子就意味着它传递的相互作用力应该是长程力,应该在无限长的距离外都能接收到它的力的作用,这和现实中发现的核力均为短程相矛盾。因此,泡利认为他的理论“导致了一些相当不实际的阴影粒子”,所以治学严谨的他只是在几场报告会上谈论了这个理论,但是选择了不发表这项成果^④。

1954年,杨振宁与合作者罗伯特·米尔斯(Robert Mills)也写下了一条类似的方程,他们希望这条方程能够描述强核力。不同于谨小慎微的泡利,他们选择将研究成果快速地发表了出来(称作杨-米尔斯方程),并且开始了学术圈内的宣传。杨振宁在普林斯顿做了一场关于这条方程学术报告,而这场报告的会场里大师云集,俨然是一场华山论剑。其中,这里面就坐着前一年写出过同样概念方程的泡利。当杨振宁在黑板上写下了新发现之后,却被坐在台下的泡利打断道:“方程描述的这个场的质量是什么?”泡利的问题简单却深刻,却像是内力浑厚的一阳指直戳了这条理论的软肋:它无法描述现实中有质量的粒子,而这一点泡利自己再清楚不过了。泡利本希望能见证一场精彩的见招拆招,但是杨振宁只尴尬地回答道:“我不知道……”。质量!质量到底到哪里去了?这是泡利最关心的问题。没有解决粒子质量的来源问题,一切美好的方程都是纸上谈兵。不出意外,在那之后相当长的时间内,这条非阿贝尔规范场方程都没有发挥出真正的作用,但当时大家可能都没有料想到,多年以后,这条本有缺陷的方程所描述的规范对称性竟成为了粒子物理标准模型的基石之一。

3. 基本粒子的“元素周期表”

不同于泡利等人痴迷于研究物质间的相互作用,有另一批科学家此刻正沉迷于研究物质本身的组成。我们知道,这个世界上所有的宏观物体都是由无数的微小的叫做原子的粒子组成的。而原子

则是由一个位于其中心极小的空间上的原子核和若干个在核外空旷的空间内绕核运动的电子组成。原子核内包含若干个紧密结合在一起的质子和中子,这些原子核内质子和中子不同的数目就决定了不同的原子有不同的物理性质。我们所熟悉的氧、碳、氢等不同的原子就是靠它们原子核内质子的数量不同而表现出了不同的性质。但是质子和中子就是组成物质的最小结构了吗?科学家们对此的认知逐渐随实验进展而产生了变化。在20世纪50年代,研究微观粒子实验的物理学家们发现,有少量的一些粒子表现非常奇怪,寿命比其他粒子长得多。为了解释这些粒子的奇怪现象,在20世纪60年代初,以莫里·盖尔曼(Murray Gell-Mann)为代表的粒子物理学家提出了夸克模型的概念,认为绝大多数粒子都只含有上夸克(up quark)和下夸克(down quark),而这些表现奇异的粒子的结构中则含有另一种与下夸克电荷一致的成分——“奇异夸克”(strange quark)。虽然这样一个包含三种夸克的夸克模型成功地描述了20世纪60年代所发现的几乎所有除了轻子以外的粒子的物理性质,然而这种带有分数电荷的假设无论如何在那个年代来看都有些许的疯狂。

在同一个时代,著名的物理学家理查德·费曼(Richard Feynman)为了理解基本粒子的行为和分类提出了另外一种模型,叫做“部分子模型”。夸克模型与部分子模型都可以解释一些粒子分类上的问题,所以直到在这之后的20世纪60年代末,粒子物理学界都还没有完全接纳夸克模型,连夸克模型的提出者盖尔曼都一直保持着谨慎小心的态度,表示夸克模型只是一个数学模型,并试图模糊化处理夸克是否真实存在的话题。甚至在斯坦福直线加速器中心(SLAC)在1968年发现质子内确实存在更深层次的次级结构时,科学家们仍然更愿意相信被发现的次级结构是部分子而非夸克。

那么事情是如何出现转机的呢?夸克模型究竟是如何成为了粒子物理学家们的共识的呢?在盖尔曼提出夸克模型后不久,谢尔顿·格拉肖(Shel-

don Glashow)和詹姆斯·比约肯(James Bjorken)在盖尔曼的包含三种夸克的模型之上提出了第四种夸克存在的假设,格拉肖和比约肯把这个他们构想中的第四种夸克命名为“charm”。charm这个词有“魔力,魅力,吸引力”的意思,格拉肖认为charm夸克的魅力可以让夸克模型更加的完善。

我国著名的物理学家王竹溪先生把这类夸克翻译为“粲夸克”,“粲”这个字的意思有“美,鲜明”的意思,既和英文charm的发音相似,又表达了类似于英文原词的含义。格拉肖和比约肯似乎是对于数学上对称美的极致追求者,他们认为在盖尔曼等人的模型中既然有一个与下夸克类似的奇异夸克,那么就应该会有另一个和上夸克类似的夸克,不但如此,新的夸克的加入还能使得自然界最基本的相互作用之一的弱相互作用得到更好的描述。然而,他们的猜测在当时并未受到重视。真正使得粲夸克的假设被更多的人重视起来的是1971年由格拉肖、约翰·李尔普罗斯(John Iliopoulos)和卢奇亚诺·梅安尼(Luciano Maiani)一起撰写的一篇文章,提出了所谓的GIM机制。格拉肖对于粲夸克理论非常有信心,他甚至在一场于1974年举办的国际会议里立下赌注,如果在两年内找不到粲夸克,他就会把他的帽子吃掉!

事情果然没有让格拉肖失望。就在他立下吃帽子赌局之后不久,几个实验团队就发现了一些有趣的新结果。1974年9月,位于美国布鲁克海文国家实验室的丁肇中实验团队利用将高能质子朝着铍靶射击,并从碰撞产物中,寻找正负电子对的方法,发现了一个奇特的信号:他们发现,总能量为31亿电子伏特的正负电子对出现频率非常多,这意味着一种带有31亿电子伏特的质量的新粒子被大规模的产生了出来。在粒子物理学家看来,质量与能量是等价的,而31亿电子伏特的能量相当于一个电子在31亿伏特的电压下所获得的能量。丁肇中的学术声誉非常好,做实验非常小心谨慎,他不愿意冒进发表任何可能有错误结果。由于在粒子物理实验中,经常会有因仪器原因导致的干扰信

号,在尚不能确定这实验结果不是某种错误电子信号之前,丁肇中团队都在秘密地分析核对他们的实验数据。与此同时,在美国斯坦福直线加速器中心,伯顿·里克特(Burton Richter)的实验团队设计与建成了一种新型对撞机——斯坦福正负电子非对称环(SPEAR),在这台对撞机里,电子与正电子以相反方向转动与碰撞。1974年11月10日,他们在31.05亿电子伏特的能量上也找到很多粒子被产生出来的事件,同样,这意味着一种新粒子存在的迹象,他们将这个新粒子命名为“ ψ 介子”。里克特迫不及待的想要将这项成果公诸于世,于是他们决定,在第二天发布这个消息。

无巧不成书,11月10日,就在里克特的实验团队发现他们新结果的当天,本来远在美国东海岸的丁肇中恰巧到了美国西海岸的斯坦福直线加速器中心开会。在这里,丁肇中得知里克特实验团队发现新粒子的消息后,发现里克特团队发现的新粒子与自己团队发现的新粒子的质量如此接近,他不得不怀疑两个团队是不是发现了同一种粒子。于是丁肇中决定不再犹豫,立刻也要将自己团队的发现公诸于世,并且将他们发现的粒子命名为“J介子”。11月11日早上8点钟,丁肇中与里克特在SLAC实验室主任办公室会面。双方对对方团队的新发现都表示了祝贺。经过一番沟通后,他们才确定了他们发现的新粒子果然是同样一种粒子。于是,他们立刻将他们的实验结果分别公之于众,并写成两份报告,同时发表在了《物理评论快报》的12月份期刊。因为两个团队分别独立发现并命名了新粒子,为了使得两人的贡献都得到认可,学界将这个粒子命名为 J/ψ 粒子,这也是基本粒子家族中唯一一个由两个字母名字组成的粒子名字。 J/ψ 粒子的性质不同于以往发现的任何粒子,以至于只有格拉肖和比约肯在夸克模型下预言的粲夸克才能合理地解释 J/ψ 粒子的存在。事实上, J/ψ 粒子是由一个粲夸克与一个反粲夸克共同组成的。 J/ψ 粒子的发现在粒子物理学界里引起一场革命(后来被称为“十一月革命”),因为它意味着夸克模型理论并

不是纸上空谈,由于粲夸克的发现,强子被证实是由夸克组成的。然而这并不是夸克发现故事的结束。在丁肇中与里克特忙于加速器和对撞机实验的时候,另一批科学家在另外的领域的研究表明,夸克的数量可能比格拉肖和比约肯相信的还要多。早在1956年,为了解释两种质量和寿命相同,看起来像是同一种的粒子的 θ^+ 粒子和 τ^+ 粒子(后来被证实其实就是同一种粒子,现在叫做 K^+ 介子),却有着不同的宇称量子数和不同的衰变产物,李政道和杨振宁提出,在弱相互作用中,微观粒子的行为可能宇称量子数并不守恒。宇称的守恒对应的对称性是“左”和“右”的对称,也就是说,李政道和杨振宁推测在微观世界中,“左”和“右”的物理规律并不完全相等同。

这个推测在当时的年代颇具震撼力,打破了被千百年来人类视为金科玉律的观念。第二年,吴健雄等科学家在对钴 $60(^{60}\text{Co})$ 衰变的观测中证实了这项推测,她利用两套装置中互为镜像的钴60设计了一个实验,一套装置中的钴60原子核自旋方向转向左旋,另一套装置中的钴60原子核自旋方向转向右旋,结果发现在极低温的情况下两套装置中放射出来的电子数有很大差异,进而证实了李政道和杨振宁的假说。同年,李政道和杨振宁因为这一项划时代的假说,获得了1957年的诺贝尔物理学奖。

在弱相互作用下的宇称的对称性破缺被发现后不久,物理学家发现在弱相互作用下,电荷共轭的对称性也是破缺的。此时,列夫·朗道(Lev Landau)以及李政道和杨振宁认为,电荷-宇称(C-P)两个量子数的联合,应该保持着良好的对称性。电荷-宇称对称性的守恒可以使得粒子和反粒子遵循着相同的物理规律。

而在1964年,科学家们在含有奇异夸克的介子衰变中,发现了另一个更加“奇异”更加难以让人接受的事实:电荷-宇称联合的对称性似乎也不守恒。在电中性 K 介子的衰变中,詹姆斯·克罗宁(Jim Cronin)和瓦尔·菲奇(Val Fitch)发现,本应衰变成三个 π 介子的长寿命 K 介子,却有一些衰变成了

两个 π 介子。这种衰变模式是电荷-宇称对称性的守恒所不允许的。克罗宁和菲奇的研究结果再一次给理论界带来了巨大的冲击,也为他们带来了1980年的诺贝尔物理学奖。

为了解释电荷-宇称对称性的破缺,1973年,在意大利物理学家尼古拉·卡比博(Nicola Cabibbo)的研究的基础上,日本科学家小林诚和益川敏英建立了卡比博-小林-益川矩阵(CKM),给出了电荷-宇称对称性的破缺存在的必要条件,并在当时只发现了三个夸克的情况下预言了六个夸克的存在。之后,底夸克与顶夸克分别于1977年和1995年在美国费米实验室的粒子加速器中被发现。至此,夸克的六种“味道”全部在实验中发现,夸克模型被完整呈现和证实。夸克模型也成为了标准模型的基石之一。

4. 希格斯机制:基本粒子质量的起源

对称性在物理学中有至关重要的地位,它的存在很大程度上决定了相互作用的形式。电弱相互作用统一理论的内在对称性要求传递粒子之间相互作用力的传播子不具有质量。电磁相互作用力的传播子——光子满足这一要求,但弱相互作用力的传播子—— W^+ 和 Z^0 玻色子都具有较重的质量,这破坏了电弱相互作用的对称性,也导致了理论计算困难。实验上核力传播距离有限的事实又表明,这些传播子确实是有质量的。许多年来,这种矛盾一直困惑着粒子物理学界。直到1964年,有三篇文章分别提出了电弱对称性自发破缺机制,即“希格斯机制”^{⑤⑥⑦},参见图2。1964年8月,弗朗索瓦·恩格勒和罗伯特·布绕特(Robert Brout)首先发表了一篇关于这种机制的文章;紧接着,彼得·希格斯在10月份;杰拉德·古拉尼(Gerald Guralnik)、卡尔·哈庚(Carl Hagen)和汤姆·基博尔(Tom Kibble)在11月份也分别独立发表了类似的机制,因此,这种机制也最早被人称作“布绕特-恩格勒-希格斯-古拉尼-哈庚-基博尔机制(BEHGHK)”。然而由于历史上的机缘巧合,希格斯成为了这些天才大脑中最

幸运的人,如今这种机制常被称作希格斯机制。

在希格斯机制中,通过电弱对称性自发破缺后产生的 Nambu-Goldstone 玻色子,让原本只有两个横向极化自由度的无质量 W 和 Z 玻色子获得了额外的纵向自由度,从而使得 W 和 Z 玻色子获得质量。其他基本粒子通过与希格斯场的相互作用获得质量,而希格斯场的激发态对应的就是希格斯玻色子。

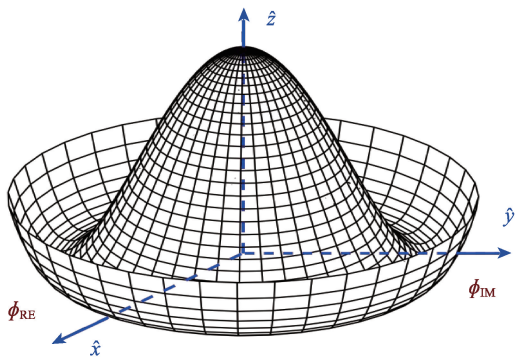


图2 描述对称性自发破缺的概念图

希格斯机制解决了质量起源问题,但同时也带来了新的问题,那就是,有希格斯场的存在,那就应该有希格斯粒子的存在。关于希格斯粒子,历史上还曾有过另一个精彩的描述。在1993年,为弄清在欧洲核子研究中心大家都在尽力寻找的希格斯粒子到底是什么东西,英国的科学大臣威廉·瓦德格雷夫(William Waldegrave)曾发起过一项挑战,就是给他讲清楚希格斯机制是怎么回事,而奖品是一瓶上好的香槟。瓦德格雷夫本人并没有粒子物理学基础,高深的公式他并不懂,因此,想要赢得挑战就必须讲好一个形象的故事。最终,伦敦大学学院

的粒子物理学家大卫·米勒(David J Miller)想出来一个描述并最终赢得了这瓶香槟。米勒描述了这样一种情况:假如在一个鸡尾酒会上,大家都在自由地交谈。此时的所有人就是分布在空间的希格斯场。这时一个无名小辈走入了酒会,那么没有人会注意得到他,他可以自由地在酒会上穿梭,并且可以随意地改变行动方向。这时,这位无名小辈在酒会上的运动就像是一个无质量的粒子。但是假如此时一位名人(比如爱因斯坦)走入了房间,那么酒会上的人就会迅速地注意到这位名人,并围上来。这时的爱因斯坦就只能缓慢地移动,并且难以改变方向。这时这位名人的运动状态,就像一个有质量的粒子,参见图3。

但是,假如这时候没有人进入房间,只是门口有个人悄悄地讲了一个传闻,听到这个传闻的人都会非常主动地把这个传闻讲给屋里其他的人听,这时屋里就会聚集起一小团听传闻的人群。当一个人讲完这条传闻之后,听到传闻的人总有一个会把这条传闻继续传播下去。这样,虽然每个人听完传闻之后就回到了自由交谈的状态,但是这条传闻会随着一小团变动的人群继续移动下去。就像是聚集的人群能给爱因斯坦赋予质量一样,这小团聚集的人群也给自身赋予了质量。这时,这小团聚集的人群就是一个希格斯粒子,参见图4。

希格斯粒子像是一把钥匙,可以将杨-米尔斯方程中被盒子紧锁着的质量释放出来。希格斯粒子和希格斯机制,如同杨-米尔斯方程,以及夸克模型一样,成为了粒子物理标准模型的第三块基石。

在标准模型三大基石集齐之后,谢尔顿·格拉



图3 利用卡通场景描述粒子如何获得质量



图4 利用卡通场景描述希格斯粒子

肖、阿卜杜勒·萨拉姆(Abdus Salam)、以及史蒂文·温伯格(Steven Weinberg)等人在统一电磁力和弱核力的尝试中,逐渐地将这三大基石融合,绘出了粒子物理标准模型的基本蓝图^{⑧⑨}。

5. 高能对撞机:粒子物理研究的利器

标准模型成为了能够描述基本微观粒子以及他们之间电磁力、强核力、弱核力这些相互作用的基本假设。然而,不管理论有多美,一个未经完整证实的标准模型依然只是一个空中楼阁。只有被实验验证过的理论才是真理。此时,标准模型的蓝图虽然在手,要想按图索骥,证明它,粒子物理学家们还需要工具。工欲善其事,必先利其器。想要寻找这些粒子,粒子物理学家最趁手的工具就是高能对撞机。

对撞机是一类研究粒子物理学的科学家们使用的科研仪器,是可以将人类认知深入到小于原子尺度的微观世界的超级显微镜。对撞机会将电子、质子、或者重离子等微观粒子进行加速,使他们以接近光速的速度在管道内运行,随后两束粒子在探测器内以极高的能量进行聚焦和对撞。相向而来的两个粒子在对撞的瞬间经历了极其复杂的物理过程,产生大量的携带了高能量的新粒子。随后这些新粒子会向四周的空间喷射,并被围绕在对撞点的探测器所接收到。物理学家则可以通过研究被探测器探测到的对撞产物,来反推分析出对撞时的物理过程。由于粒子物理学所研究的对象如此之小,所需要的能量如此之高,科学家们只能通过建造大型的加速仪器来获得研究所需的高能量。

在二十世纪的六七十年代,科学家们在法国、美国、苏联、德国等国家的一些实力雄厚的大学或

研究所先后建造了十几个对撞机。这些对撞机大小相差巨大,从周长几米到周长两千米,分别覆盖了许多不同的能量区间,可以分别研究不同的特定课题。在那个年代,由于科学家们开始掌握了对撞机这一研究利器,粒子物理学呈现出了一轮爆发式的发展。前文提到的粲夸克,以及底夸克和顶夸克, W^+ 和 Z^0 玻色子等都是通过对撞机实验发现的。随着研究的深入和进展,能量较低区间的课题已不能满足理论发展的需求,科学家们开始需要越来越高能量的对撞机来开展科学研究。中型和小型的对撞机逐渐离开科学家们关心的焦点,只有个别在特定能量区间上运行的对撞机因一些特殊需求被保留至今。而建造越大的对撞机自然花费通常会越高,大型对撞机的建设再也不是一所实力雄厚的大学或研究所就能够独立完成的了。在这种不断发展的过程中,在不同机构工作的粒子物理学家们逐渐开始联合,展开了全球范围内的合作。

在20世纪70年代末,欧洲核子研究中心的物理学家们就开始考虑长期的物理学发展的战略了。建造一个周长27千米的“大型电子对撞机”(LEP)的计划开始浮出了水面。经过几年的设计和论证,在1981年的5月22日,欧洲核子研究中心最终批准了这个宏大项目。经过从1983年到1988年的施工与安装,大型正负电子对撞机LEP终于在1989年正式启动,27千米的周长也让它成为了迄今为止人类历史上最大的科学研究仪器。

然而,1989年在欧洲启动的LEP,并不是当年能量最高的对撞机,因为在1986年起,对撞机能量最高的桂冠一直都高挂在美国的一台对撞机头上。1986年底,在美国费米国家实验室,一个周长6.3千米的正反质子对撞机“万亿电子伏特加速器”(Tevatron)正式开始以史无前例的对撞能量运行了起来,Tevatron所创造的1.96 TeV能量记录维持了二十多年,一直到2010年后才被欧洲核子研究中心的大型强子对撞机(LHC)打破。

为什么当时更大、更新的对撞机LEP会能量低于Tevatron呢?这是因为,虽然同样被叫做对撞机,

LEP 和 Tevatron 却分属于两类不同的科学研究仪器,他们分别是正负电子对撞机和强子对撞机。正如他们的名字所描述的那样,正负电子对撞机中进行对撞的粒子是正负电子,而强子对撞机中进行对撞的粒子可以是质子,也可以是重离子。电子是一种不可再分的基本粒子。这种粒子带有电荷,而体积则被认为是趋近于零。电子在对撞中能够参与的物理过程非常的简单,对撞产物非常干净,非常适合用它进行精确测量的实验,因而电子对撞机通常也被称作为“粒子工厂”,因为它能够像工厂一样稳定的生产产品。然而电子有一个令实验物理学家非常无奈的特性,就是电子在转弯的时候会辐射出大量的能量,从而使得电子本身自带的能量降低。并且,电子转弯越剧烈,辐射出的能量就会越大。所以,电子对撞机通常会做成大半径的环,或者直接只在一段直线内加速电子。位于美国的“斯坦福直线加速器对撞机”(SLAC)就是一个将电子在直线内加速然后完成对撞的实验仪器。直线加速器的缺点是,电子束不能被重复利用,对撞一次后就会浪费掉所有的被加速的电子,而环型对撞机可以使得被加速的粒子一次又一次地重复被利用,从而节约粒子和能量。正负电子对撞机因其半径大、能量较低,并不需要强磁场将粒子束缚,所以制造工艺相对简单。

强子对撞机中进行对撞的粒子最通常的是质子,也就是氢的原子核。质子在粒子物理学中不是基本粒子。质子中包含三个夸克和一些将夸克连接起来的胶子。夸克和胶子在对撞中会参与复杂物理过程,对撞产物也会非常复杂和多样,无法像正负电子对撞机粒子工厂那样有稳定的产出。但是,由于质子的质量远大于电子,在转弯时只会辐射出较少的能量,所以质子能够在加速器中获得比电子高得多的能量。强子对撞机适合“开疆拓土”,用极高的能量去探索能量前沿的问题。利用强子对撞机研究物理问题,就是一个“大力出奇迹”的过程。而极高的能量则意味着强子对撞机必须使用

高强度的磁场,因而需要大量超导材料,制作工艺远比正负电子对撞机复杂。强子对撞机不擅长做非常精确的测量,但是适合用来探索新的物理现象。

前文中的 LEP 和 Tevatron 都在标准模型的验证过程中发挥了巨大的作用,它们的物理目标之一都包含了对希格斯粒子的寻找。特别是在进入新世纪前后,标准模型中的基本粒子包括夸克,轻子和传播子全部已经发现了,就只剩下希格斯粒子还未曾被发现。然而,在分别经过了多年的运行之后,虽然 LEP 和 Tevatron 在别的领域都取得了令人瞩目成果,他们却分别都在希格斯粒子的寻找道路上折戟沉沙。尽管已有越来越多的人相信了标准模型,但是希格斯粒子的缺席使得标准模型仍然还是空中楼阁。

20 世纪 80 年代,与 LHC 几乎同时开始预研的美国超导超级对撞机(SSC)其实比 LHC 大得多。1982 年,美国科学家提出了建造 SSC 的设想,其环形隧道长 87 千米,质子碰撞的能量为 40 TeV,是 LHC 设计能量的 3 倍。1983 年,美国能源部批准了 SSC 的预研,1987 年 1 月 SSC 工程正式启动。1988 年 11 月确定选址德克萨斯州,1991 年开始施工建造,此时经历了一番重新设计的 SSC 工程估价从 44 亿升至 82.5 亿美元,预计 1999 年投入运行。但仅在两年后,美国国家审计总署审计后认为 SSC 项目费用超支、进展滞后。于是,命途多舛的 SSC 在开工建设之前经历了临阵换帅后推倒原设计方案、新方案大幅增加预算、学界的不同意见、政党轮换中支持对撞机的共和党总统下台、冷战和美苏争霸结束等多种内部外部压力的联合作用下,终于在 1993 年的 10 月 21 日被美国国会正式宣告终止建设。

按照 SSC 的设计,它的能力应该如此之强大,以至于在三十多年以后的今天,世界上仍然没有可以与之匹敌的对撞机。假如它没有经历那些波折,几乎必然是希格斯粒子的最佳猎手。然而,历史容不得假设。正因为 SSC 的停建,使得美国失去了长期以来在高能物理领域的霸主地位。

6. 大型强子对撞机：希格斯玻色子的发现

在20世纪80年代,谁能想到,在对待科学的态度上,四分五裂的欧洲竟然比统一的美国更加团结。早在1984年,也就是欧洲核子中心的LEP正式开始运行的五年之前,在LEP尚在建设中的时候,欧洲的科学家们就在考虑LEP退役之后未来的事情了。在1984年的一次讨论会上,科学家提出了第一个利用LEP退役后的隧道内建造新的“大型强子对撞机”LHC的提议。然而这个提议在很长的一段时间内都没有形成完整的提案并得到批准,原因一是此时LEP还在建设阶段,距离它退役还为时尚早;二是在1987年,SSC获得了美国国会的批准。SSC的存在使得欧洲的计划失去了竞争优势,也让LHC是否有必要再被建造画上了一个问号。然而在1993年SSC被宣告中止之后,失去了美国SSC的竞争,欧洲的LHC成为当年世界上唯一一个能够有望解决包括寻找希格斯粒子等重大粒子物理学问题的对撞机方案。于是,在1994年,LHC的建设计划正式被欧洲核子研究中心批准。2000年,LEP正式结束了它十多年的数据获取运行过程,并于2001年开始被完全拆除。而LEP所留下的长达27千米隧道则被重新利用,用于安置LHC。

LHC除了本身占据的一条27千米长的隧道,

还有几个逐级加速的加速器环,复杂庞大的结构使得它刷新了人类历史上所建造的最大规模的科学研究仪器的记录,成为了一个极具科幻色彩的庞然巨物,其加速器环占据的空间的地表范围参见图5。LHC不但大,而且设计对撞能量也达到了惊人的14万亿电子伏特,相当于每一个质子都在七万亿伏的电压下被加速,远超了它的前辈LEP和美国的竞争者Tevatron。质子在加速器内获得的能量能达到自身质量的近万倍,在27千米加速器环内以每秒1.1万次的频率飞行,速度达到光速的99.99%,每秒钟能发生高达10亿次的撞击事例。质子-质子剧烈的碰撞可以模拟宇宙大爆炸的高温高能状态,碰撞产生的瞬时温度可与宇宙大爆炸后不久(约10~12s)的状态相比。粒子物理学家利用质子碰撞后的产物可以探测新粒子和新物理现象,例如,寻找标准模型预言的希格斯粒子,探索超对称、额外维、暗物质等超出标准模型的新物理。

LHC主要进行四项大型实验,包括ATLAS(超环面仪器实验)、CMS(紧凑缪子线圈实验)、ALICE(大型离子对撞实验)和LHCb(底夸克实验),这是人类科学与工程领域集大成者,当之无愧的典范。其中ATLAS和CMS是两台多用途的大型探测器,用于分析在加速器中质子-质子碰撞时产生的数量庞大的粒子。两项实验的研究规模均达到前所未有的程度,其建设过程中的状态参见图6。ATLAS

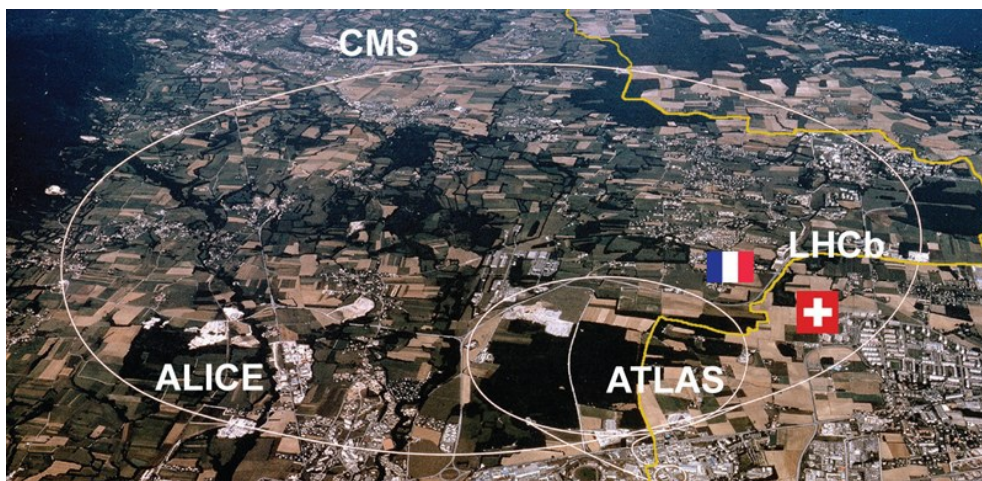


图5 欧洲核子研究中心大型强子对撞机俯瞰图

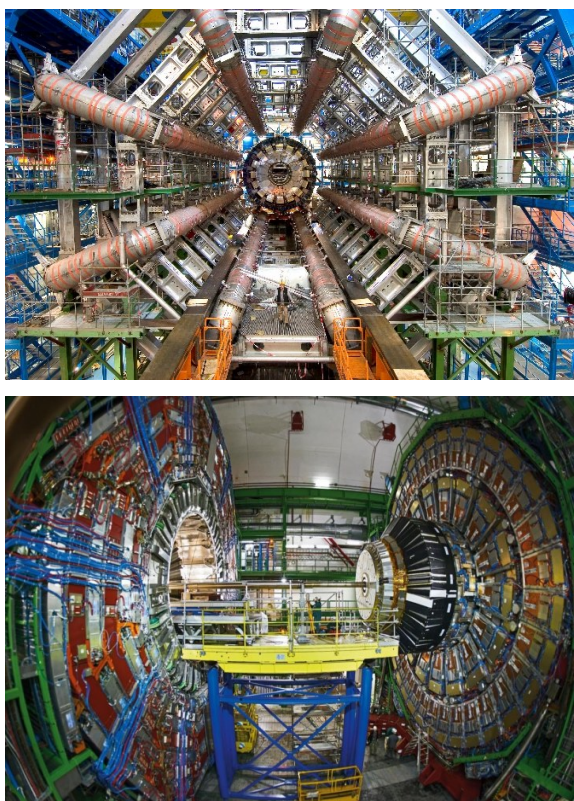


图6 安装中的ATLAS(上图)和CMS(下图)探测器

探测器长46米,宽25米,高25米,总重量约为7000吨,有近1亿路电子学读出通道,是迄今为止世界上规模最大的粒子探测器。CMS探测器长21米,宽15米,高15米,重量约12500吨。ATLAS和CMS探测器相当于一个巨型的数码照相机和显微镜,每秒中能拍摄4千万次,把质子间数亿个碰撞事例产生的粒子信息记录下来进行分析。ATLAS和CMS两个大型国际合作实验组各自拥有约5000位研究人员和工程技术人员,来自60多个国家和地区的300多个研究机构。

然而LHC却是一台难以被驯服的机器,它的启动阶段充满了波折。2008年,LHC在启动试运行阶段,超导高电流通过一段焊接不良的连接线时产生的电弧打穿了冷却设备的液态氮储存槽,冷却超导磁铁用的液态氮发生了严重的泄漏,高达6吨液态氮泄漏到隧道中,泄漏量达到液氮总量的约1/3。这使得LHC不得不花一年时间进行维修和复查。然而不论外界对LHC的预期或喜或悲,在经历了一段艰难的启动阶段之后,LHC还是于2010年正式

开始运行和获取对撞物理数据,而它也轻易地摘得了人类在地球上创造的最高能量的记录。并且在两年之后的2012年,它成功发现了希格斯玻色子。

2012年7月4日,注定是个不平常的日子,欧洲核子研究中心CERN举行了全球新闻发布会,宣布LHC的ATLAS和CMS两个大型实验组同时发现了质量约为125 GeV的新粒子^{①②},信号强度达到并超过粒子物理学家判定新发现的置信度5个标准偏差,即发生错误判断的可能性小于300万分之一。新粒子的特性类似于粒子物理学界一直努力寻找的,被称为“上帝粒子”的“希格斯玻色子”,参见图7。这正是半个世纪以来,全球成千上万科学家共同艰辛努力的结果。世界上千家媒体和电台都报道了这项划时代的伟大发现,譬如:纽约时报报道“科学家发现了对宇宙至关重要的神秘粒子”;BBC新闻报道了“大型强子对撞机上发现疑似希格斯粒子”;英国卫报标题为“希格斯粒子的发现是人类的又一次巨大飞跃,这项伟大成就堪比人类登月,是值得所有人自豪的”。CERN的总所长罗夫·赫尔(Rolf Heuer)声称:“人类在理解自然世界上跨越到了一个崭新阶段。”

此时,标准模型大厦终于不再是空中楼阁,它所预测的所有基本粒子都已发现。此刻距希格斯机制的提出,已经过了48年。希格斯玻色子的发现填补了标准模型最后也是最重要的基石,从某种意义上完备了标准模型,成为粒子物理研究的一个重大里程碑。

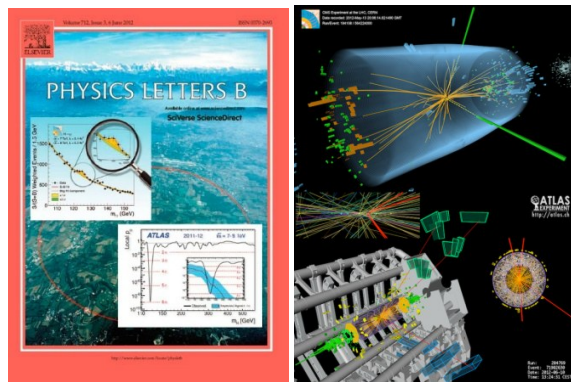
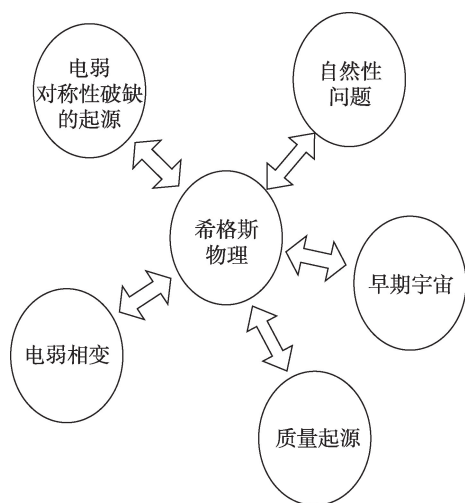


图7 大型强子对撞机实验上发现希格斯粒子

7. 未来的道路:希格斯工厂

2012年希格斯粒子的发现被视为自原子结构揭示以来人类对宇宙认识的重大突破,这一突破开启了粒子物理的新时代。一方面,标准模型的框架虽已建成,但细节仍是不清晰的,还有大量的不确定的条件,所以一切基于希格斯机制与标准模型的理论都可以大胆的前进一步、提出更精细的实验要求了。另一方面,物理学家也十分清楚目前的标准模型是不完善的,已有很多实验观测结果与标准模型的预测相冲突,比如在标准模型框架里中微子是没有质量的,但是诸多中微子振荡的实验结果表明,中微子是有质量的。标准模型也无法描述暗物质等,所以,超出标准模型的新物理的理论仍然有大量的可能性。而希格斯粒子不仅仅和基本粒子质量的起源有关系,其他的重大前沿科学问题比如早期宇宙演化的过程、暗物质与暗能量等也与希格斯粒子息息相关,参见图8。因此,对希格斯粒子的精确研究是粒子物理学界一个非常明确的未来需要完成的重要物理目标。



国际高能物理学界经过多年的深入研讨,逐渐形成共识,即希望采用正负电子对撞机来产生大量希格斯粒子(即“希格斯工厂”)。主要因为在大型强子对撞机LHC实验中,质子对撞过程中产生非常多的强子本底,希格斯粒子的产生伴随着大量无用的

本底,所获得的信号有非常大的噪音,难以精确测量希格斯粒子的特性。如果采用正负电子对撞,产生的本底非常低,有利于在“干净”的对撞环境下对希格斯粒子的性质进行更精确的测量。此外,正负电子对撞有固定的质心系能量,可以通过ZH产生过程中Z玻色子的反冲独立精确测量希格斯的产生截面和衰变分支比,这是LHC强子对撞实验无法做到的优势。目前国际上有三个基于正负电子对撞的“希格斯工厂”方案,日本的国际直线对撞机(ILC),中国的高能环形正负电子对撞机(CEPC),以及欧洲的未来环形对撞机(FCC)。

7.1 日本的ILC

ILC是个长达30千米的直线加速器,它进行正负电子对撞,质心系能量可达500 GeV或更高,既可以作为“希格斯工厂”,也可以运行在更高的能量研究希格斯自耦合等。ILC的建造涉及大量先进的加速器技术、探测器技术等。尽管ILC造价昂贵且建设过程存在风险,但考虑到ILC极为重大的科学意义,承建国很有希望因此而成为粒子物理领域新的霸主。欧洲CERN,美国费米实验室Fermilab和日本高能加速器研究机构KEK均对建造ILC表现出极大兴趣。经过多年的预研和竞争,国际高能物理学界最终形成共识,支持日本承建ILC项目。2020年成立了国际准备小组(IDT),而且在美国强烈要求下将中国排除在外。2021年日本成立了ILC项目开发中心,各项工作正在稳步推进,预计未来3~4年成立预实验室(Pre-Lab),参见图9。

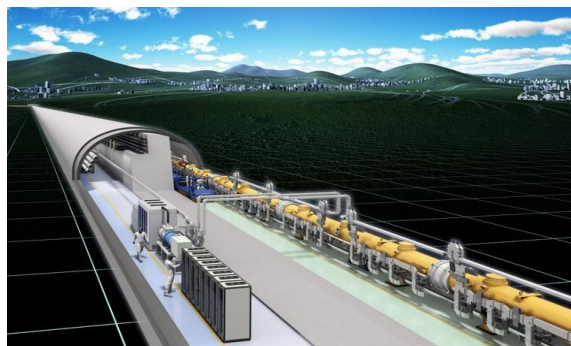


图9 国际直线对撞机ILC示意图

7.2 中国的 CEPC

希格斯粒子的发现也极大振奋了中国高能物理学界。仔细分析国际上高能量粒子物理领域的发展形势,美国因政府削减经费失去高能物理领域的领先地位,欧洲借此机会一举超越美国成为新的引领者,但2030年之前欧洲主要精力仍在LHC的运行及其升级,日本则忙于ILC项目的承建。中国有了一个难得的机遇,可以充分利用中国的优势,利用成熟的环形加速器技术,在中国本土建设下一代基于环形正负电子对撞机的希格斯工厂,从而使中国的高能加速器和粒子探测器技术实现大幅度的跨越发展,引领国际高能物理实验研究的最前沿。

2012年9月13~14日,仅仅在希格斯粒子发现后的两个月,中国高能物理学会在北京召开了“第二届中国高能加速器物理战略发展研讨会”,来自全国各地的40多位专家学者参与了研讨,并在研讨会上首次提出了在中国建造下一代环形正负电子对撞机CEPC的宏伟设想,即先建造一个周长约50~100千米、能量为240 GeV的环形正负电子对撞机作为希格斯工厂;未来条件成熟后可在同一隧道内将其改造为能量50~100 TeV的超级质子对撞机,能量将比正在运行的LHC高约6倍,以实现未来加速器的终极目标。CEPC瞄准的是希格斯粒子发现后对撞机实验的核心前沿物理问题,其科学目标是精确测量希格斯粒子的性质以及探索标准模型背后更基础的物理规律。随后,国内高能物理学界组织了研究团队进行CEPC前期的预研究。

2014年2月,“希格斯粒子发现之后,基础物理学向何处发展”论坛在北京举行,论坛嘉宾包括两位诺贝尔物理学奖得主,两位菲尔茨奖得主,四位基础物理学奖得主等国际著名物理学家。嘉宾们坚信下一代粒子加速器将会为人类认识世界带来重要的突破,并认为CEPC将为中国开启成为粒子与加速器物理领域世界领导者的机遇。诺贝尔物理学奖得主David Gross认为,中国提出建设的下一代加速器CEPC,将使中国在基础科学领域处于中心位置。他说:“我把这个梦想叫做中国大加速器

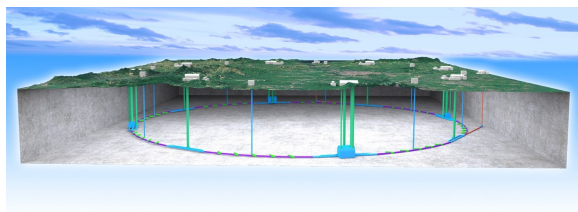


图10 高能环形正负电子对撞机CEPC示意图

(The Great Accelerator),这会 and 万里长城(The Great Wall)一样令人瞩目。它会比万里长城的作用更大,会在科学技术各领域有突破和发现。”

经过6年的努力,2018年11月,CEPC研究团队正式发布了加速器、物理和探测器两卷概念设计报告^⑩,由来自24个国家,222个研究机构的1143位研究人员共同签署发表长达930多页的设计报告。CEPC概念设计图参见图10。粒子物理学的前途是很明确的,未来几十年细致研究希格斯粒子的性质已是世界高能物理学界的共识,而中国设计的对撞机几乎已是成本与效率的最优选择。

7.3 欧洲的 FCC

在中国发布自己的希格斯粒子工厂对撞机之后,欧洲核子研究中心在2019年也发布了他们设计的希格斯粒子工厂“未来环形对撞机”(FCC),其预期建设选址参见图11。然而,不出科学家的意料,欧洲的FCC设计在正负电子对撞机阶段的一些关键指标上与中国的CEPC设计“几乎一模一样”,因为这就是研究希格斯物理的最优解。

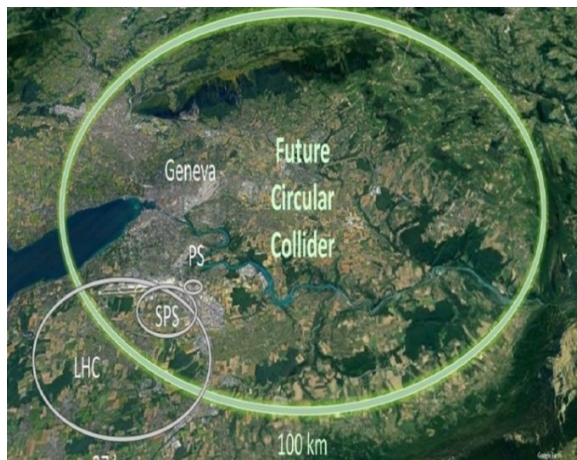


图11 未来环形对撞机FCC示意图

2020年6月,欧洲粒子物理战略规划明确将正负电子对撞机希格斯工厂列为优先级最高的下一代高能物理加速器设施并且布局、投资了大规模的技术研发。可见,全球的粒子物理学家目前努力的方向是一致的。然而,欧洲核子研究中心CERN仍然在运行着大型强子对撞机LHC,并且在未来15~20年左右,欧洲还计划对LHC进行多次升级改造,这些计划会制约FCC的建设计划,而中国则有望比欧洲早十年建成希格斯粒子工厂,从而在激烈的国际竞争中赢得先机。

8. 结语

二十一世纪的中国正在为实现“两个一百年”奋斗目标、实现中华民族伟大复兴的中国梦而奋斗。中国科学家必须要为实现中国梦提供强有力的科技支撑,使中国成为科技创新大国,为提高社会生产力和综合国力提供的战略支撑。中国科技的发展将面向世界科技前沿和国家战略需求,找准科技突破的新方向,做出基础性、战略性和原创性的重大贡献。

希格斯粒子发现后,建造CEPC希格斯工厂承载了中国高能物理学家的期盼和梦想,这也是实现中华民族伟大复兴“中国梦”的重要组成部分。建设一个以CEPC为核心的国际科学城,使得中国在基础物理研究、加速器和探测器等关键技术实现跨越式发展,从跟跑者向并跑者转变,乃至最终成为世界的引领者。这是国家发展的一个难得的历史机遇,其重要的科学意义、在国际上将产生的重大影响,以及对未来发展的推动作用和其他大型科技基础设施建设项目不可替代的。由于激烈的国际竞争,这个历史机遇的时间窗口不到十年。这是历史赋予这一代人的重任。衷心期待这个梦想能够成为现实,让“中国的大加速器”和万里长城一样引人注目,在新中国建国100周年之际真正起到

引领未来的作用。

参考文献

- ① ATLAS Collaboration. Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC. *Phys Lett B*, 2012, 716: 1-29
- ② CMS Collaboration. Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC. *Phys Lett B*, 2012, 716: 30-61
- ③ Cho A. The Discovery of the Higgs boson, *Science*, 2012, 338: 1524-1525
- ④ Mikhail Shifman, *Standing Together in Troubled Times — Unpublished Letters by Pauli, Einstein, Franck and Others*, World Scientific Publishing Co., 2017:12-16
- ⑤ Englert F, Brout R. Broken symmetry and the Mass of Gauge Vector Mesons. *Phys Rev Lett*, 1964, 13: 321-323
- ⑥ Higgs P. Broken Symmetry and the Masses of Gauge Bosons. *Phys Rev Lett*, 1964, 13: 508-509
- ⑦ Guralnik G S, Hagen C R, Kibble T W B. Global Conservation Laws and Massless Particles. *Phys Rev Lett*, 1964, 13: 585-587
- ⑧ Glashow S L. Partial-symmetries of weak interactions. *Nuclear Physics*, 1961, 22: 579-588
- ⑨ Weinberg S. A Model of Leptons. *Phys Rev Lett*, 1967, 19: 1264-1266
- ⑩ CEPC Study Group. CEPC Conceptual Design Report: Volume 1 - Accelerator, arXiv:1809.00285
- ⑪ CEPC Study Group. CEPC Conceptual Design Report: Volume 2 - Physics & Detector, arXiv:1811.10545

