

编者按:本期重点推出美国著名理论物理学家戈登·凯恩(Gordon Kane)的文章“基本粒子物理学未来展望”。作为美国物理学会Lilienfeld Prize和Sakurai Prize双料得主,凯恩教授在超对称理论、希格斯物理学、弦论唯象学、暗物质和宇宙学等诸多领域做出了杰出贡献,他也是未来高能量对撞机项目的坚定支持者。本文以高屋建瓴的笔触对粒子物理学面临的问题和挑战以及可能的出路做了简要但独到的描述,特别强调了在“大机器、大数据、大科学”时代开展基础研究对一个国家和整个世界在社会、经济和文化等方面所产生的强有力的带动作用。

# 基本粒子物理学未来展望

戈登·凯恩<sup>1</sup> 撰文 王连涛<sup>2</sup> 翻译

(1. 密西根大学理论物理中心; 2. 芝加哥大学)

我们正走在探索自然规律的道路上。在这篇文章中,我们将总结这一探索的现状,并且讨论最终理解支配我们的世界的自然规律所必需的新的发现和认识。需要注意的是我们的目标是理解和认识我们的世界。实现这个目标并不要求解决很多尽管是很有趣的问题,例如黑洞信息悖论和多宇宙理论。我们的理论必须是一个同时有量子理论和引力的完整的理论。因此,所谓的等级问题就无法避免,解决这一问题需要有新物理。等级问题的最终解决需要一个新的对撞机。在这里我们会讨论对未来对撞机提出的一系列问题。我们同时强调,因为我们在探索未知的前沿,所以这样的探索必将同时带来新的技术和创意,从而产生上千亿的经济效益。我们会列举一些这方面的例子。产生巨大的经济效益的主要原因是,对撞机为这些新的技术提供了孕育的市场,让它们更容易成功。这一点可以从加速器发展的历史中看出来。同时,对撞机的发展也有重要的文化效应。

## 一、我们已经知道什么

经过自哥白尼和伽利略以来四个世纪的发展,我们终于发现了基本粒子的标准模型和建立了宇宙学。从而达到了物理学的在这段历史中的目标,那就是建立一个对我们的物理世界的描述。

我们可以观察到的一切,包括那些必须借助工具才能观察到的在很大的和微小的尺度上的现象,都可以被几条简单而优美的自然规律所解释。在有些情况下,描述这些规律的方程的解可能不容易得到。但是,并没有任何迹象表明我们所用的方程和理论不正确。一件T恤衫上就足以写下这些方程(这种T恤可以在欧洲核子中心(CERN)和国际理论物理中心(ICTP)的纪念品店里买到)。

基本粒子标准模型的主要部分在20世纪70年代中期就已经建立起来了,这包括描述强相互作用的量子色动力学,以及电磁和弱相互作用的理论。这个大厦的最后一块砖是2012年在欧洲核子中心(CERN)的大型强子对撞机(LHC)上被发现的希格斯玻色子。早在20世纪60年代,就有理论预言希格斯玻色子的存在。它的存在保证了理论的完备性。从另一个角度看,如果希格斯玻色子不存在,电子将会是无质量的粒子,原子会变得无穷大。这样,我们的宇宙就不会存在。

有时候,人们会质疑我们发现的粒子是不是真正的希格斯玻色子,或者我们发现的粒子只起到希格斯玻色子一部分作用。这个问题的答案是我们发现的粒子在实验误差允许的范围之内是真正的希格斯玻色子。理解这里的道理需要一些比较专业的知识。但是这是一个很重要的结论,所以我们

要在这里详细的解释一下。我们确信发现的粒子是希格斯玻色子的根本原因是其衰变到两个Z规范玻色子的分支比和标准模型希格斯机制的预言相符合。我们从衰变到两个W规范玻色子的道也可以得出类似的结论。但是两个Z的衰变道实验上测量的误差更小,所以我们在这里主要以这个道来论证。如果没有希格斯机制,希格斯粒子是不能衰变到两个Z玻色子的。这一点可以从标准模型的对称性加以理解。希格斯粒子是同位旋对称群SU(2)二重态的一部分,同位旋为1/2。然而Z规范玻色子是同位旋三重态的一部分,同位旋为1。基于类似于量子力学中角动量相加的规则,1加1是不可能得到1/2的。所以,符合对称性所预言的相互作用是 $hhZZ$ 。在希格斯机制中,这个相互作用中的一个希格斯粒子得到一个真空期望值(成为一个常数)。从而,相互作用成为 $hZZ$ ,正像在实验中观测到的那样。如果实验上测量到的 $hZZ$ 和标准模型的预言相符,那就意味着真空期望值为一个希格斯粒子所有,不可能再有其他的希格斯粒子。

在以上的论证中我们已经可以看到了目前正在讨论的新的对撞机之所以必需的一个重要原因。目前的对 $hZZ$ 相互作用的实验测量值和标准模型预言与标准模型基本符合。另一方面,10%左右的实验误差留下了存在尚未测量到的对标准模型的偏离的可能性。正在CERN运行的LHC最终会将这个精度提高到5%左右,这还不是很理想。中国提出的环形正负电子对撞机(CEPC)可以将精度提高到0.2%左右。如果结果仍然是和标准模型的预言相符,那么这样的精度会非常令人信服。

## 二、要充分理解物理世界,什么是我们必须知道的?

### 1. 粒子

我们需要知道组成万物的基本粒子是什么。这个问题的答案是两种夸克,再加上电子。电子是轻子的一种,是一个自旋为1/2的费米子。夸克是

类似的粒子,但是它们带有一种新的“荷”。因此夸克之间有一种新的相互作用,即强相互作用。基于它们的不同性质,前面提到的两种夸克的名字叫“上”和“下”。这个图像为一个古老的问题,“万物是由什么组成的?”,给出了一个惊人的简单而又优美解答。这比历史上提出的对这个问题的大量的(错误的)答案要简单得多。并且这是一个完全定量的答案,而不是含混的比喻。从恒星到原子,所有我们看到的東西都是由这些粒子组成的。几乎所有的组成我们的电子和夸克都是在宇宙大爆炸中产生的。我们的祖先也是由很多电子和夸克组成的。我们有理由相信人类寻找物质最小组成元素的历程已经到了尽头,现在是最后一站。我们预计电子和夸克的大小大致和普朗克尺度(下文介绍)相近。

### 2. 相互作用

夸克被一种“强相互作用”束缚在一起形成了质子和中子。这叫作量子色动力学(QCD),它基于一个SU(3)对称群。在质子和中子的外面,强相互作用并不完全消失。其剩下的部分就是所谓的核力。核力将质子和中子束缚在一起形成原子核,从而形成化学元素。电磁相互作用将电子和原子核束缚在一起成为原子,并进一步由原子形成分子,从而组成了石头,花朵,咖啡,人,等等。这是一条简单到令人震惊的链条。这些物体又被万有引力束缚在一起形成了行星和恒星,从而使生命(例如恐龙)得以存在。这些相互作用都属于一种特殊的类型,称为杨-米尔斯相互作用,其作用形式和大小都受到制约。

### 3. 规则

只知道基本粒子和它们的相互作用是不够的。如果我们不知道如何运用这些进行计算所依据的规则,我们还是不能描述物理世界。最早的计算规则是 $F=ma$ 。大约一个世纪以前,规则变成了量子理论和爱因斯坦的狭义相对论。两者的结合又进一步形成了相对论性的量子场论。从大约

1930年起,这套规则没有发生变化,然而我们对它们的认识却深化了许多。这套规则适用于所有的基本粒子和相互作用。

尽管标准模型非常成功地描述了物理世界,但是它本身是不完整的。它不包含暗物质粒子,也没有给出使宇宙早期暴涨的粒子。它不是一个量子引力理论,没有给出中微子质量的起源,也没有解释为什么宇宙中物质多于反物质。

只是知道什么是基本粒子,它们之间的相互作用以及规则是不够的。我们的目标已和过去不同,我们需要更进一步。这方面最早的进展是在20世纪70年代,当时发展出了大统一和超对称。然后,在80年代又发展出了宇宙暴涨理论和弦理论。基于这些,也许我们已经有了建构一个完整理论的必要组成部分。

物理学杰出的领袖,20世纪上半叶任剑桥大学卡文迪许实验室主任的欧内斯特·卢瑟福曾说:“不要让我发现有人在我的实验室里讨论关于宇宙的问题。”一直到20世纪70年代,我们还是可以找到很多类似的关于物理研究中无法逾越的障碍的言论。但是从那以后,至少对一些人而言这发生了变化。例如,最近斯蒂芬·温伯格说:“过去的科学家绝不只是知识比现代的科学家匮乏,他们对什么是应有的知识和如何去获得这些知识有着完全不同的看法。”

我们的目标是理解世界。在过去,我们的目标是理解和描述我们观察到的现象。现在,新的更深的目标则是为我们的世界找一个量子引力理论,并且解决标准模型所有的不完备之处。建立一个量子引力理论又可以称为以一个完整的高能理论来完成我们用来描述观察现象的低能有效理论(ultraviolet (UV) completion)。我们下面对这个问题作进一步的分析。我们把标准模型不完备之处分为四个大问题。

1. 标准模型有一个“等级问题”。这个问题涉及的技术问题不容易简单的讲清楚。从本质上讲,让普朗克能标和其他更低的能标,比如电弱相互作

用的能标,在相对论性量子场论中共存并不自然。这需要完整的理论具有标准模型没有的一些特殊的性质。

2. 标准模型不包含量子引力。弦理论很有可能可以给出解决这个问题的方案。我们将在下文中解释为什么弦理论是有用的。

3. 我们还需要解释几个宇宙学上的问题。我们知道宇宙中有多少暗物质,但是我们不知道暗物质究竟是什么。暴涨模型对宇宙早期的演化给出了很好的描述。但是,我们不知道暴涨的起因是什么,以及是什么机制决定了宇宙暴涨了多少。因为这些是宇宙学问题,我们可以暂时把它们放到一边。这些问题的答案也许会为我们解决等级问题提供一些线索。但是我们不太可能由此得到等级问题的完整答案。

4. 物理学中还有几个有趣的问题。但是解决这些问题不太可能对实现我们的目标有实质性的影响。比如,解决黑洞信息悖论不太可能影响我们对希格斯粒子质量,等级问题,或者宇称不守恒的认识。对其他的一些问题,比如为什么空间是三维的,为什么会有相互作用存在,或者我们的宇宙是否是唯一的,我们也可以作出类似的结论。很多人在作这方面的工作,但是这与理解我们的世界并没有紧密的关系。

所以我们看到,如果我们把目标限制在理解我们的世界,我们尚需解决的主要问题是等级问题。只要我们考虑普朗克能标,或者等价地说同时考虑引力和量子理论,等级问题就无法避免。

### 三、一些有用的设想和概念

#### 1. 超对称标准模型 (约1974年提出)

超对称标准模型是一个理论出发点很好的假设,是对标准模型的一种拓展。如果把这个理论中的粒子进行如下的互换:

费米子(半整数自旋) $\leftrightarrow$ 玻色子(整数自旋)

理论并不发生改变。对于各种相互作用的大

统一在超对称理论中可以很好地实现。由这个理论还可以导出电弱自发破缺。我们观察到的希格斯粒子的性质也和这个理论的预期相符合。虽然建构这样一个理论不容易,但是是可以做到的。

如果自然界的基本理论真的是有超对称的性质,标准模型粒子的超对称伴粒子(superpartners),例如 gluino, wino and photino (分别为传递强相互作用的胶子,传递弱相互作用的 W 玻色子,以及光子的伴粒子),应该最终可以在 LHC 收集足够多数据后被发现。

## 2. 普朗克能标

自然界有三个基本的普适常数:牛顿引力常数  $G_N$ ; 普朗克常数  $h$  (量子的单位); 和在爱因斯坦相对论中起重要作用的光速  $c$ 。从这三个常数出发,我们可以组成长度,时间,能量,质量,以及其他任意单位的量。我们预期基本理论应该是由一些简单的关系构成,其基本的单位是普朗克标度:

a. 普朗克长度  $[L=(h G_N/c^3)^{1/2}] \sim 10^{-33}\text{cm}$ 。这是一个宇宙自然的大小。

b. 普朗克时间  $\sim 10^{-43}\text{s}$ 。这是一个宇宙自然的寿命。

c. 普朗克质量(普朗克能标)  $10^{19}\text{GeV}$  (大约比 LHC 的能量高  $10^{15}$  倍)

我们的宇宙比普朗克长度要大得多,寿命比普朗克时间长得多。我们所观察的粒子质量比普朗克质量小得多。这些正是需要解释的问题。

我们预期弦理论有比我们的三维空间更多的空间维度。这些所谓的额外维卷曲起来成为一个很小的额外空间,大小和普朗克长度差不多。我们的巨大的三位空间来自于宇宙暴涨。暴涨和大爆炸产生了我们寿命很长的宇宙。我们不理解的是质量的起源,特别是希格斯粒子的质量。为什么希格斯粒子的质量是在  $100\text{ GeV}$  附近,比普朗克质量小很多。这就是等级问题。

## 3. 额外维理论的进展

科学上的进展可以来自于从新的更好的实验

装置上来的实验数据,也可以来自于理论上的进展。弦理论是 20 世纪 80 年代中期建立起来的,它很可能包含了等级问题的答案。和一些经常听到的说法正相反的是,弦理论在被真正的理解后是可以为实验所检验的。首先,一个自治的量子引力理论是建立在 10 维时空的基础之上。其中一维是时间,其余的是空间维度。一个基于 11 维时空的理论也是有可能的,那是所谓的 M-理论。10 维理论和 11 维理论的区别涉及很多技术细节。为了简化下面的讨论,我们忽略它们之间的区别。于此同时,我们生活在一个四维时空的世界当中。那么,弦理论中那些超出 4 维时空的额外维是如何处理的呢?我们必须认为它们存在吗?为什么我们观察不到它们?我们又应该如何理解它们?

物理学在过去几个世纪中的发展已经是我们可以接受不合直觉的东西。在这类的例子中,最早的恐怕是对力的理解。亚里士多德认为需要力来使物体运动。力一旦消失,运动也就停止。直到伽利略和他之后的牛顿才建立起正确的观念,一个物体会永远保持其运动状态,除非受到外力的作用(而亚里士多德的观念似乎对官僚的工作依然适用)。另一个,也许也是最令人震惊的,早期的例子是地球围绕太阳的公转。这好像和我们日常的观察不符,但是却是事实。另外一个令人吃惊的事是存在我们肉眼看不见的电磁波。用一个三棱镜可以从太阳光中看到不同颜色的可见光。如果我们再在可见光照到的范围之外放一个温度计,我们可以看到温度上升——这证明了存在我们肉眼看不到的电磁波。

也许另一个违反直觉的假想也是正确的,那就是存在我们不能直接观察到的额外的空间维度,因为它们太小了。在 20 世纪 80 年代,格林(M.Green)和施瓦兹(J.Schwarz)证明了一个自治的量子引力理论需要有 9 个空间维度(加上时间成为 10 维时空)。这是我们在发展基本理论的时候必须包括的一个内容。这些额外维空间的自然的大小是普朗克长度,所以我们看不到它们。

同时,这些额外维又可以发挥至关重要的作用。这里具体的理论涉及很多技术细节,但是我们不涉及这些细节也可以了解其主要的想法。要描述我们的世界,我们当然要有3个巨大的空间维度和一个时间维度。所以,我们会有6个(或7个,如果从11维时空出发)弯曲的空间维度。理论家在大约一个世纪以前就开始思考额外维了。卡鲁扎(T. Kaluza)思考了只有一个额外空间维的情形。他的工作出现在爱因斯坦发表广义相对论后不久。在广义相对论中,时空的几何结构由度规来描述。我们把5维时空的度规记为 $g_{ab}$ ,  $a, b=0, 1, 2, 3, 4$ 。在其中,我们四维时空的度规是 $g_{\mu\nu}$ ,  $\mu, \nu=0, 1, 2, 3$ 。卡鲁扎证明我们可以将5维时空的度规写成

$$g_{ab} = \begin{pmatrix} g_{\mu\nu} & A_\mu \\ A_\nu & \phi \end{pmatrix}$$

$A_\mu$ 可以被诠释为电磁场的矢量势。 $\phi$ 是一个标量,我们在这里可以暂时忽略它。这里,令人激动的发现是额外维可以被诠释成相互作用!在卡鲁扎工作的几年后,克莱因(Klein),当时还是我现在任职的物理系的一个助理教授,提出了我们观察不到额外维是因为它们弯曲为很小的尺度。这个卡鲁扎-克莱因理论并不能真正的解释我们的世界,然而它却指出了正确的方向。

要让我们的理论描述我们的世界,我们必须考虑到我们需要10维时空,不仅仅是我们只观察到4维。把10维理论中的额外维弯曲从而成为一个可以描述我们的世界的理论,这个过程称为紧致化。正像一个原子通常是在基态上,我们的世界也会在基态上,这通常被称为是真空态。值得一提的是,一个紧致化的10维世界可以包含我们的世界,包括标准模型的各种相互作用。我们是在这个紧致化的弦理论(或者M-理论)的基态。因为弦理论包括了引力,这就使理论在\*\*高能完备(UV complete)\*\*。

卡鲁扎-克莱因的设想,特别是额外维可以在紧致化后变成相互作用,鼓励我们设想紧致化的弦理论(或者M-理论)是构造一个高能完备而又能描述我们的世界的理论的正确道路。并且,这有希望

可以解决等级问题。

紧致化的方案有很多。这在早期曾让人失望,因为大家曾希望真正的量子引力的理论是唯一的。这和标准模型的产生可能有些类似。量子场论是适用于任何粒子和相互作用的规则,并不给出唯一的粒子物理的模型。在20世纪60和70年代,很多不同的关于粒子和相互作用的猜想被提出。每一种都有自己的预言,并接受了实验的检验。在这些猜想当中,标准模型被证明是成功的。但是,原则上也有可能没有一种当时的猜想是正确的,但是聪明的物理学家可以从实验和理论的尝试中找到线索并最终找到正确的方案。

我们现在面临类似的情况。我们懂得如何将几种理论紧致化,包括M-理论,杂化弦理论(Heterotic string theory),二类弦理论(Type II string theory),以及其他的几种。这些紧致化的理论和我们的世界很像,包含了夸克、轻子和杨-米尔斯相互作用。这样的理论可以产生出来本身非常令人鼓舞。正像是标准模型在不同的尝试中最终产生一样,现在我们也尝试不同的紧致化方案。我们的目标是找到一个能够包含标准模型的量子引力理论,也就是让标准模型UV complete。

你也许会对运用弦理论的必要性产生怀疑,因为很多人说弦理论不可能被实验检验。这个说法是错误的。有人说弦理论是在普朗克能标附近建构的,这比我们在对撞机上可以达到的能量高得多,或者说建构弦理论的时空尺度比我们可以直接观测的小很多,所以弦理论不可能被检验。但是,我们并不是一定要到达某一个地方才能了解那里发生的事。我们不可能去访问其他的恒星,但是我们可以知道宇宙中的其他恒星和我们的太阳是由相同的化学元素组成的。谁也没有直接看到宇宙大爆炸,但是有三个很强的证据使我们相信那确实发生过(这三个证据是:宇宙膨胀,核素的合成和宇宙中氦的丰度,和宇宙微波背景辐射)。当恐龙在6千5百万年前灭绝的时候,没有人在现场。但是我们还是可以检验恐龙灭绝的原因是不是陨石撞击。

我们所得到的基本理论要包含电弱对称破缺,因此它需要产生在 1 TeV 以下的电弱能标。同时理论又包含普朗克能标,所以它会有等级问题。要理解我们的世界,我们必须解决这个问题。在一个超对称的理论中,等级问题可以被解决。如果每一个粒子都有一个由超对称预言的伴粒子,那么,这个粒子和它的伴粒子对任何其他粒子的质量的贡献会相互抵消。这样我们就得到一个等级问题的解决方案,并且可以在实验上加以验证。如果这个方案是正确的,这些超对称的伴粒子必须存在。至少它们中的一部分会在 LHC 或者一个有更高能量并收集更多数据的未来对撞机上被发现。

原则上讲,标准模型可以在普朗克能标以下一直有效。但是,这样我们就无法解释电弱能标,或者说无法解释为什么电弱能标和普朗克能标之间的巨大差距。我们必须放弃从一个基本理论出发真正理解我们的世界。我们到目前为止还没有放弃的理由。紧致化的弦理论或 M-理论和我们的世界很接近,经过更多的努力,我们很有可能找到那个可以真正描述我们的世界的理论。不幸的是,并没有很多的理论家在作这方面的工作。

作为一个这方面尝试的例子,我们介绍一下我, Bobby Acharya 教授以及其他合作者的工作。我们提出了一个 M-理论的紧致化方案(紧致在一个很小的 G2 流形)。我们有很好的理由选择这个出发点。这样得到的 4 维理论自动是超对称的。我们还证明了这个理论可以自动产生理想的通过引力传递的超对称破缺。这个理论有和标准模型相近的粒子谱,可以有宇称破缺,并且有可能容纳和标准模型一样的三代物质粒子。它解决了强 CP 破坏问题,并且解决了等级问题。这个理论还包含了可以作为暗物质的粒子,以及在宇宙中产生比反物质更多的物质的机制,并且有一个具有和实验相符的质量的希格斯粒子。这是一个没有自由参数的理论。研究这样的理论会是富有成效的。Simons 基金正在用将近 1 千万美元支持一个历时 4 年的项目专门研究 G2 流形的性质,这会对进一步认识这类

理论的预言很有帮助。

## 四、在微扰论的范围内连接电弱能标和普朗克能标

我们认为电弱能标和普朗克能标的连接可以在微扰论的范围内实现。如果这是对的,那会使我们更有信心地认为巨大的能标之间的差别是可以由理论出发精确计算的。对微扰论的信心主要是基于两个线索。第一,我们已知的相互作用的强度可以在一个比普朗克能标低一点的大统一能标上统一。也就是说,如果我们先假定各种相互作用的大小在这个大统一能标上是一样的。然后,我们用微扰论计算在电弱能标上这些相互作用的强度。我们发现,所得到的结果和我们在电弱能标附近的测量结果相符。如果不同的能标之间没有联系,这就是一个难以置信的巧合。尤其是在超对称理论中,这个大统一的结果很好的成立。这可以被认为是超对称的间接证据。

另外还有一个于此相独立的线索。如果我们在超对称理论中通过用微扰论计算希格斯真空期望值来计算电弱能标。从高能出发,我们可以得到正确的结果。如果这和决定能标间的巨大差别没有关系,这又将是一个巧合。

## 五、自然性

相比于研究弦理论或者 M-理论的紧致化,有些人更喜欢讨论理论的“自然性”。简单的说,自然性就是指无论什么对称性或者机制解决了等级问题,它们一定会预言存在和标准模型的粒子(特别是那些比较重的粒子如 W 玻色子, Z 玻色子, 和顶夸克) 质量相近的新粒子。我们还没有发现这样的粒子,不少自然性的支持者对此表示了担心。

但是,历史表明这样的“自然性”的论证常常会令人误入歧途。顶夸克就是一个很好的例子。当底夸克在 1979 年被发现后,人们论证说因为顶夸克和底夸克属于同一个电弱二重态,它们的质量应该

很相似。首先,斯坦福直线加速中心的对撞机提高了对撞能量在3倍于底夸克质量的范围内寻找顶夸克。没有找到。同时,日本当时正在建造一个新的对撞机(“Tristan”)在6倍于底夸克质量的范围内来寻找顶夸克,结果同样也没有找到。事实上,顶夸克的质量是底夸克的41倍,远比所谓的“自然”的质量大。而与自然性的论证相反的方法从基本理论出发预言质量。顶夸克最终是在1996年在费米实验室被发现的。

寻找超对称伴粒子的情况和这个类似。没有理由认为自然性可以完全预言这些伴粒子的质量。如果它们的质量和标准模型的粒子相近,那很好。但是我们不知道为什么必须是这样。现在从实验上可以得出的结论是胶子的超对称伴粒子的质量至少是顶夸克质量的15倍以上。

## 六、未来对撞机

我们接下来讨论未来的对撞机,中国在这方面的方案,和建造对撞机的经济和文化影响。必须指出的是,无论在物理上得到什么结果,建造一个世界领先的对撞机对经济发展带来的促进会比对撞机本身的花费大。这并不是偶然的。如果我们要在新的高度上探索自然,我们必须要有新的或者改进的技术。这些新的技术一旦被发展出来,它们会带动新的经济增长。因为对撞机的建设为发展这样的新技术提供了最初的有保障的市场,以此从这里延伸来发展技术远比新起家的技术公司容易成功。

中国提出了自己的对撞机方案。首先计划建设一个正负电子对撞机,CEPC。这是一个坐落在一个很长的隧道当中(周长大约一百千米)的环形对撞机。建造这样一个对撞机有很强的物理动机。最主要的目标我在前面已经强调过,那就是探索到底希格斯玻色子和标准模型的预言有多接近。目前的实验测量的误差还不小(10%~20%),对标准模型的偏离还有很大的空间。LHC可以最终达到5%的精度,而CEPC可以提高到0.2%。这样的结果会成为进一步拓展标准模型的重要线索。另一个重

要的动机是在正负电子对撞机上寻找与希格斯粒子类似的粒子。还有很多其他的强有力的动机,在这里就不一一赘述了。

除了环形正负电子对撞机之外,世界上还有两个建设直线对撞机的方案。

1. 国际直线对撞机, International Linear Collider (ILC), 设想在日本建造。第一阶段的对撞能量比较低,主要测量希格斯玻色子的性质。其建设资金需要大量国际投入,目前还没有达成这个目标。

2. 紧凑直线对撞机, Compact Linear Collider (CLIC), 设想在欧洲核子中心建造。目前正在预研过程中。它可能作为欧洲核子中心的长期预算的一部分而得到资金建造。这要等到LHC的亮度升级之后,也许还要等到LHC的可能进行的能量升级之后。

以前,不同的国家和地区也同时有过自己运行的对撞机。

对比其他的方案,环形正负电子对撞机有一个很大的优势。那就是如果需要的话,它可以继续发展为第二阶段,一个高能质子对撞机。这可以在同一个隧道中进行建设。欧洲核子中心的对撞机正是这样发展的,大型强子对撞机(LHC)和之前的大型正负电子对撞机(LEP)用的是同一个隧道。一个质子对撞机也可能有不同的阶段,先可以是基于现有的强磁铁制造技术,在磁铁技术进一步发展以后再提高对撞能量。

LHC或CEPC可能发现新物理的最初征兆。如果是这样,我们接下来需要发现所有的新粒子并研究它们的性质。这里,历史同样可以给我们以启迪。W和Z玻色子是20世纪80年代在欧洲核子中心发现的。随后,正负电子对撞机LEP在CERN建成。它运行了十多年,检验标准模型和其他可能的模型的预言,最终确立了标准模型。然后在同一个隧道里,LHC在更高的能量进行质子对撞,并发现了希格斯粒子。这样一个更高能量的质子对撞机,成为SPPC,在中国也作为CEPC后继续发展高能物理实验的一种可能性被提了出来。在设计CEPC的隧道

的时候需要明智地考虑到以后继续发展的需要。

## 七、和未来实验装置相关的一些特殊问题

在20世纪80年代后期,美国开始建造一个超级超导对撞机(SSC)。在已经投入了几十亿美元和完成了1/3的建设工程之后,国会撤消了这个项目。中国在这里能汲取什么经验教训呢?表面上,这个项目的撤销有不少直接的原因。但是,这里还有两个更深层的原因。首先,SSC选择了一个过高的对撞能量,40 TeV,是费米实验室Tevatron对撞机的20倍。与此相比,LHC只作到了Tevatron 7倍的对撞能量。作出这个过份的决定是因为当时已经知道欧洲核子中心的LHC会有14 TeV的对撞能量,美国的对撞机必须比这个大上几倍,这样对于国会来说会好看一点。因为这样的政治原因,美国没能够以更小的步子前进。把能量增加这么多导致了费用超出预期,一部分的原因是当时并不清楚如何才能实现如此大的提高。第二个深层的原因是国会不理解,或者没人向他们解释清楚建设对撞机的经济效益。如此的大装置的建设会带来比投资更大的经济效益,但是没有人对国会和政府作出过关于这方面的清楚的论证。

另外一些直接的原因是:

1. 因为国会要每年做新的年度预算,政府长期预算缺乏稳定性。因此,很多设备和财务方面的决定不能提前作出,导致了花费的显著增加。

2. 工程管理人员分散了物理学家对装置建设的领导权。

3. 对是否需要国际上其他国家的经费投入没有清晰的概念。一个明智的选择是由一个国家承担计划建设一个装置。接受其他国家的资金投入,但不依赖于它们。

4. 和空间站以及其他项目表面上(实质上并不存在)的竞争。

正像上面讨论的那样,经费超过预算并不是SSC项目被撤销的主要原因。

## 八、对撞机项目对经济的影响

主要以LHC为例,我们来看一下对撞机项目在几个领域对经济的影响。其中一些例子还要溯源到费米实验室和粒子物理学更早期的发展。我们预期未来的对撞机会对经济有类似的影响。

1. 最大的影响是在一个完全出乎意料的地方,全球资讯网(World Wide Web)。这是由一个博士后在欧洲核子中心发展出来的技术。他当时的目标是让世界各地的大学和实验室能够得到和分析在欧洲核子中心的数据。伯纳斯·李(T.Berners-Lee)创造了基于网络实现的hypertext的概念。当时,互联网(internet)已经存在,但是却还没有全球资讯网。这样,在欧洲核子中心建设LEP对撞机最终导致了亚马逊,Facebook,谷歌等公司的出现。这对经济的影响无疑是巨大的,估计超过一万亿美元。

2. 储存并处理在LHC产生的海量的数据的需要催生了链接很多计算机的网络分布式计算和云计算。这些是很多基于网络的业务的关键技术,包括网络购物和社交平台。

3. 加速器是一个价值数十亿美元的产业,包括在医学治疗,医用同位素生产,半导体粒子植入等方面的应用。目前全球有大约4万台左右的加速器。

4. 粒子物理的探测器技术是一个价值几十亿美元的成像产业的基础。这项技术和手机有直接的联系。

5. Scientific Linux操作系统是2004年在费米实验室为了加速器装置被开发出来的。一个叫GE Healthcare的公司意识到他们需要类似的操作系统,于是就采用了Scientific Linux。目前,全球有超过3万台的医学成像设备运用基于Scientific Linux的系统去寻找断骨,肿瘤,器官损伤,等等。这个数字几年内会翻一番。类似这种对经济的巨大好处是可以具体估算的。

通过以上例子,我们可以定性地知道对撞机的建设对经济的好处是巨大的,未来对撞机的建设也将如此。这里再提两个有定量的结果的例子。

1. 为了分析粒子物理实验中的碰撞事例,多年来实验组开发了两个软件,ROOT 和 Geant。ROOT 现在在物理学研究之外有 2 万 5 千个用户,特别是在金融领域。Geant 在医学上被普遍用来模拟辐射损伤。我们可以用同等功能的商业软件或开发类似商业软件的价格来估计这些软件对社会的益处。合在一起,这两个软件的效益共值 60 亿欧元(参考文献:arxiv:1507.05638)

2. 一项由欧洲核子中心的研究派生的技术,Advanced Accelerator Applications,最近被 Novartis 用 39 亿美元买下。

对于很多类似的例子,我们都可以做这样可靠的经济价值估算。

从 Robert Solow 开始,经济学家几十年前就提出一半以上的新工作机会是由科技板块产生的。在 Science 一篇文章中(vol 344, p41, April 2014), J. Owen-Smith 等评论说:“很多小的商家都依靠在国家资助下的科学研究的成果来开发新的产品和服务”,“科学研究的成果在高技术产业中常有出乎意料的反响,即便这些产业集中在离当初的经费支持对象很远的方向上”,“科研经费的变动更有可能带来全国性的变化,而不是局部的变化”。

在第三次产业革命的最初几十年间,高能物理是一个领导力量。下一代高能物理的实验装置会对数据获取、存储和访问权限,以及材料和技术提出新的要求。这会带动新的技术革新,成为第四次产业革命的动力。

## 九、超越经济以上的影响

对中国而言,建设一个新的目标远大的前沿科学工程最大的好处也许是它能吸引很多聪明的年轻的中国人投入由好奇心驱使的科学研究。在这个过程中,青年人会对很多不同的科学领域发生兴趣,并投身其中,极大地加强中国在科学研究和创新上的实力。在欧洲核子中心毕业的博士中,大约有一半加入到工业界或和转入粒子物理不同的方向,加强了那些领域。在通过在欧洲核子中心的研

究得到博士学位的研究生中,大约有四分之一在粒子物理中拿到永久职位。

高能物理实验对社会的贡献并不只是经济上的。很多人的生活质量因此有了提高,延长了寿命,可以更好地和儿孙们以享天年。

有没有其他的办法可以代替像 CEPC 和 SPPC 这样的高能对撞机来发现新粒子,或者排除其存在的可能性,或者研究很多新粒子的性质,或者解决等级问题? 答案是否定的。现在有新的巧妙的办法可以把质子或电子(或者两者都可以)加速到更高的能量。但不幸的是,这些新的方法所产生的对撞亮度都太小,不可能产生足够的碰撞事例来作出新的发现。在 LHC 发现希格斯粒子的信号,并确认那不是可以和它很像的噪音,需要每个探测器能探测到 20 万个碰撞事例。在 SSC 的年代,有人号称新的磁铁技术(例如基于高温超导)将会替代当时已经广泛使用的超导磁铁。几十年过去了,这种新的磁铁技术还是没有发展出来。并且,我们现在对这个领域有了更深入的理解,那样的技术是不太可能存在的。

那么,我们是不是可以寄希望于发展出新的理论概念或者理论工具,从而不依靠实验装置也能推动物理的发展? 不行。当然新的想法可以产生新的理解和领悟。但是,没有实验数据,我们不可能知道理论是否真的描述自然界或解释其规律。如果没有希格斯玻色子的发现,很多物理学家仍然会对希格斯机制是否是夸克,轻子,以及 W 和 Z 玻色子质量的起源抱有怀疑。也会怀疑是否是希格斯场给了我们的真空非零的量子数。即便是在发现了希格斯玻色子之后,还有人试图拒绝接受这样的解释。新的理论必然是非比寻常的,没有实验数据,它是不会被接受的。为什么被接受很重要? 一旦足够多的人接受一个新的东西,物理学界的注意力就会集中在上面。很多理论家会发展它,实验家会检验它,这个领域就会更快地向前发展。

是不是天体物理和宇宙学的新结果,例如对宇宙微波背景辐射的测量,可以为解决等级问题提供

和LHC以及未来对撞机类似的信息呢?不能。没有从这些方面来的结果可以告诉我们和希格斯玻色子的性质有关的信息(比如它的质量,它和标准模型预言接近的程度,等等)。这些结果也不能给我们提供关于宇称破缺的起源,相互作用的统一,顶夸克质量的来源,等等很多问题的信息。自然,这也不能告诉我们等级问题是如何解决的。

我们是不是应该担心一个大型的对撞机是不是能在中国成功地建成并取得成果?中国的粒子物理学界已经成熟了。他们已经掌握了较低能的对撞机的相关技术,并在北京正负电子对撞机上取得了成功。很多中国粒子物理学家在国际上大的对撞机实验室工作过,例如欧洲核子中心和费米实验室。很多正在LHC上工作。当今建造对撞机已经是较为成熟的技术。对于预算和耗时的估计都会经过专家审定,会基本上正确。如果中国开始这些前沿的科学装置的建设,国际专家自然会加入到其中帮助这项工作取得最大的成功。

尽管中国的人均国民生产总值(GDP per capita)并没有发达国家那么高,中国的国民生产总值已经是世界上最大的之一。中国可以负担得起一个新的对撞机。基于美国国家科学基金2018年科学和工程指标的估计,中国在研发上的总体投入已经和美国一样。王贻芳指出,CEPC(甚至SPPC)的造价在国民生产总值中所占的比重不会超过(在科学上非常成功的)北京正负电子对撞机的造价在当时在国民生产总值中所占的比重。

中国已经有几个中等规模的科学工程,例如刚成功投入运行的散裂中子源。这个项目由高能物理研究所负责运行,是世界上四个类似的装置之一。中国正在开始建造另外4个中等规模的项目,软X射线自由电子激光,光源,加速器驱动系统,以及高亮度重离子加速装置。但是,中国还没有在一个领域有世界领先的装置。一个在探索自然的过程中,进行过粒子物理的研究作出巨大进展的国家会永垂青史。这个国家的科学工作者会得到应有的奖励和认可,国家的实验室会成为这个领域的世

界中心,就像现在的欧洲核子中心一样。

## 十、结束语

我们看到未来的实验装置可以将我们对自然界的认识推向一个新的更深的层次。无论最终物理上的结果是什么,必然会带来更大经济效益的投资。同时,这在文化上也会带来强大的优势。

拥有一个成功的量子引力理论会改变我们的世界观(即便我们不关心量子引力本身)。标准模型中的物质粒子可以包含在一个量子引力理论中。这将是一个在高能完备的理论。弦理论太重要了,我们不能只是将它留给弦理论家来作这方面的工作。一个量子引力的理论使我们必须解决等级问题。解决等级问题是我们理解世界的至关重要的一步,这是我们的目标。实现这样的目标同时需要在实验上发现新的物理现象。

### 致谢

我对霍金(Stephen Hawking)在这个工作的一大部分的内容上的合作表示感谢(arxiv:1804.00682)。这个文件在霍金去世之前已经完成,并且在微信公众号上发表。我同时感谢和Nima Arkani-Hamed,钱建明,邱成桐,特别是和Malcolm Perry以及赵悦的讨论。一部分Gordon Kane的研究是被美国能源部支持的,grant de-sc0007859。

编者注:相关名词

1. 标准模型:从20世纪末开始,人们认为微观世界的基本相互作用可以用杨-米尔斯理论来描述。所谓的“标准模型”是 $SU_c(3) \times SU_L(2) \times U_Y(1)$ 理论,它覆盖了强,电磁和弱相互作用。很遗憾,目前的理论还不能包含引力(见文章中关于超弦的讨论)。

2. LHC:是在欧洲建立的大型强子对撞机,它的设计能量为14 TeV。

3. 希格斯粒子:Higgs boson是粒子物理标准模型中的基本粒子(电中性的标量粒子),其对应的Higgs场在对称性自发破缺之后赋予标准模型中的其他粒子(规范玻色子以及费米子)质量,因此它在科学媒体中还获得了“上帝粒子”的昵称。Higgs boson于2012年7月4日在欧洲大型强子对撞机上(位于瑞士日内瓦)被ATLAS与CMS合作组宣布,希格斯粒子被两个实验组以超过5倍标准偏差的精度发现。

4. 同位旋:这是关于“基本粒子”间关系的对称性。它和自旋有相似的法则,只能取整数或半整数。两个同位旋 $I_1$ 和 $I_2$ 的耦合得到总同位旋 $I$ , $I$ 的取值只能是 $I_1+I_2$ ,  $I_1+I_2-1$ ,  $\dots$ ,  $|I_1-I_2|$ ,两个半整数同位旋可以构成一个整数的总同位旋,但两个整数同位旋不能构成一个半整数的总同位旋,即上面的序列中不包含半整数(见文章)。

5. 偏离标准模型的新物理(BSM):标准模型非常成功,至今所有实验都和标准模型的预言相吻合。但显然,它不是最终理论(如果存在的话)。它只能是更完备理论的低能有效理论。一定存在更基本的理论,但它是什么目前我们并不知道,还没有任何直接迹象预示它的能标。这需要年轻物理学家通过艰苦的努力来寻找超越标准模型的新物理。

6. 能标:一定的能量尺度或级别。我们相信,在不同的能标(越来越高)处,可能会出现新物理,例如中微子的 see-saw 能标,大统一能标等。对新能标的寻找在一定意义上就是对新物理机制的寻找。

7. 普朗克尺度:根据引力常数,人们推断在 $10^{19}\text{GeV}$ 存在新物理,似乎暗示这个能标是我们认识的极限。是否是这样完全不可知,因为它和我们目前所能达到的能量差距有15个量级!

8. 群:是对自然界中各种对称性描述的数学分支,用维尔切克的话是:对称性是不引起物理改变的改变(change without change)。群的应用是现代物理学的基础。

9. 暗物质:在观测宇宙现象时,发现宇宙中有25%的物质不发光(即不和电磁场相互作用),远远多于构成我们世界的强子物质(4%),但到今天我们仍然只知道它们存在,但不知道它们是什么。目前有直接,间接和用加速器直接产生的各种方式来寻找。很遗憾,直到现在的努力也没有成功。但暗物质一定存在!

10. 弦理论:众所周知,点粒子近似用在力学(万有引力),电磁学(库仑定律)当距离趋于零时理论产生不合理的发散(无穷大),这启发人们想到可能最小的微观客体不是点,而是有一定尺度的弦。这个想法很朴实,但处理起来就要用到非常复杂的数学。以威滕为代表的众多高手做了很多研究。

11. 黑洞信息悖论:按一般经典理解,黑洞能将任何物质吞噬到它的内部。我们知道任何物质在落入黑洞之前携带大量信息(广义的),黑洞只有三个参量(质量,电荷和角动量-自旋),那么这些信息都消失了吗? 这是否违反热力学第二定律? 这是个悖论。从霍金的理论我们现在知道黑洞面积正比于黑洞熵。这个问题还在继续研究中。

12. 维度:这本是一个抽象的数学术语,但很容易理解。我们的空间有 $x, y, z$ 三个方向,就是有三个独立的“维度”(自由度),显然线(直线或曲线)是一维的(只有一个自由度),面(平面或曲面)是二维的

(两个自由度),体积是三维的。相对论告诉我们时间和空间的关系,当我们描写一个事件时需要时间和空间的信息,因而我们将时空扩大为四维( $x, y, z, ict$ )。在本文中作者讨论的K-K理论,虽然它并不成功但给我们开辟了方向。弦理论中引进额外维。由于我们的世界是四维的,那些高维需要“紧致”,隐藏在很小的范围,却很可能起到重要作用。这个过程就是“紧致化”,目前这方面的研究还没有很大进展。

13. 电子伏特:是高能物理中常用的能量单位,eV。1 eV是一个电子电荷被一伏特电压加速所获得的能量,是 $1.602\times 10^{-19}$ 焦耳。在eV前面的标号K, M, G, T分别对应 $10^3$ ,  $10^6$ ,  $10^9$ 和 $10^{12}$ ,我们说LHC的能量达到14 TeV,即达到 $1.4\times 10^{13}$ 电子伏特。

14. 微扰论:这既是一种处理复杂物理问题的方法,又显示我们掌握的数学工具远远不足以解决自然界中真正的问题。我们通常将问题中可能起主要作用的项保留,求解方程,将起次要贡献的项对已经得到的解做微扰,逐阶逼近真实解(我们希望)。微扰方法既有效,又带来很多困难。这是理论物理的痼疾,也许格点计算可以克服这个难题。

15. CEPC:这是环形正负电子对撞机的英文缩写。是我国拟建的大型加速器。它是为精确研究希格斯粒子的性质而建。通过 $e^+e^-\rightarrow Z^*\rightarrow Z+H$ 的“黄金道”产生大量的希格斯粒子。SPPC是继CEPC后建的超大型质子-质子对撞机,是世界上能量最高的加速器,也许能达到100 TeV,它的建成有望帮助人们找到超越标准模型的新物理,如超对称粒子。对理解暗物质也有巨大作用。是我国对世界高能物理,也是对人类的重要贡献。

16. 微波背景辐射:在宇宙诞生的大爆炸大约38万年后,宇宙温度降为大约1 eV(约1万1千度)时,电子被质子俘获形成稳定的氢原子,本来和电子构成热平衡的光子退耦成为自由的光子,它们形成宇宙中的微波背景辐射。由于宇宙是在绝热膨胀,自由光子的波长变长,频率降低,能量降低( $E=h\nu$ ),目前微波背景辐射的温度为2.73 K。它的精确测量支持了大爆炸宇宙理论。

17. 量子引力理论:爱因斯坦建立的广义相对论是描述宏观引力的理论,量子论是关于微观世界的理论。霍金等人发现,广义相对论必定导致奇点的存在,从而在黑洞内,或宇宙大爆炸时理论不能自洽。他提出,在经典奇点处量子效应是不可忽略的。由于量子论中的不确定原理,经典理论中的奇点可以避免。一般讲,广义相对论是确定论(这也是爱因斯坦坚持的),而量子论是建立在概率论上的,这两者似乎很难统一,这也就是目前还没有人能建立一个完整的量子引力理论,虽然普遍认为应该存在这样的理论。