



关于自然本身

斯蒂芬·温伯格 撰文 曹则贤¹ 翻译

(1.中国科学院物理研究所 100080)

20世纪末科学的状态与世纪初相当不同。不只是我们现在知道的更多了——在这个世纪里我们还理解了科学知识的模式。在1900年的时候,许多科学家认为物理、化学和生物学是各自运作在一套独立的规律之下的。科学的版图据信由一些分立的共同体组成,它们和平相处且又各自为政。少数一些科学家抱持着牛顿的所有科学大融合的梦想,但对达成这样的大融合所依据的条件缺乏明确的想法。今天我们知道化学现象之所以如此是因为电子、电磁学和那一百种左右的原子核的物理性质。当然,生物学以一种不同于物理和化学的方式牵扯到历史偶发事件,但是驱动生物进化的遗传机制如今在分子的术语基础上得到理解,而生机论,即关于独有的生物学规律的信条,无疑地已消亡了。这实在是一个还原论获胜的世纪。

同样的还原论倾向也见于物理学领域。问题不是我们如何从事物理学研究的实践,而是我们如何看待自然本身。有许多有趣的难题等待着被解决,这包括过去遗留下来的如湍流一类的问题和新近出现的高温超导之类的问题。这些问题必须用其自身特有的词汇加以阐述,而不是还原到基本粒子物理的层面。但是,到这些难题被解决时,其解的形式将是自己知的物理定律,比如流体力学或电磁学的方程,所作的现象推演;若我们欲问一问为什么这些方程取这样的形式,我们循着得到答案的中间步骤会抵达同样的源头:基本粒子的标准模型。基本粒子理论同引力理论和宇宙学一道构成了整个科学知识的最前沿。

标准模型是一种量子场论。出现在其方程里

的自然之基本要素是场:我们熟知的电磁场和20种左右的其他场。所谓的基本粒子,如光子、夸克和电子,是场的“量子”,即场的能量和动量束。这些场以及它们之间的相互作用之性质很大程度上是由对称性原理^①,包括爱因斯坦的狭义相对论以及可重整化原理^②所支配的,此原理规定场之间只能通过某些特别简单的方式发生相互作用。标准模型已经经受住了已有实验设施所能够加于其上的所有考验。

但标准模型显然不是故事的终结。我们不知道它为什么遵从某些而不是别的对称性,或者为什么它要包含六种夸克,而不是比这多一点或少一点。此外,标准模型中有18个之多的数值参数(像夸克质量比)必须手工调节以使得模型的预言同实验结果相符合。最终一点,引力依然不能被带入标准模型的量子场论框架中去,因为引力作用并不满足支配其他相互作用的可重整性。

当前我们有必要朝向一个关于自然的真正统一的观点迈出下一步,但不幸的是这下一步非常艰难。我们似乎是处于德谟克利特当年一样的境况——我们看到了一个统一理论的轮廓,但这个理论的结构只当我们在远小于实验室里能触及到的距离尺度上检视自然才会变得清晰起来。德谟克利特推测原子的存在,2000年后在比他本人小十个数量级(小一百亿倍,或者是 10^{-10} 倍)的尺度上原子被发现。今天我们推测有一个能够将所有相互作用统一的理论,我们也看到这个理论的结构比我们实验上能够研究的距离尺度要小得多。

关于这个基本尺度我们有两条线索。其一是

强核力(即把夸克约束在原子核里面的粒子里面的作用力)的强度随距离的减小非常缓慢地减弱,而电磁力和弱核力^③却是更加缓慢地增加的,所有这些力的强度,按照目前的估计,在电子大小^④的 10^{-16} 倍的距离尺度上变得相等。另一个线索是引力在电子大小的 10^{-18} 倍的距离尺度上变得和其他相互作用一样强。这两项估算很接近,让我们相信确实存在一个终极的统一理论,其结构在电子大小的 $10^{-18}\sim 10^{-16}$ 倍的距离尺度上才变得清晰起来。但仅从纯数值来看,我们离能看到这些结构的差距,比起德谟克利特要看到原子的差距,要大得多。

那么我们现在怎么办?我相信我们没有理由谈论基本物理的终结。我也不认为(尽管我不是肯肯定)物理的风格有必要作大的改变。在我看来遵循本世纪行之有效的还原论的模式就有很大的希望取得进步。明确一点说,有两条路线还没有穷尽:一条高的,一条低的,这里的‘高’和‘低’指的是欲研究之过程的能量的高低。

路线之一,低的,就是通过理论物理学家和实验物理学家的共同努力,在实验室可达到的能量尺度上努力达成对物理学的理解。能量越高,可研究的结构尺度就越小;凭借不高于万亿电子伏特的能量,我们无法对约为电子大小1%的结构进行研究。如上所述,此尺度上的物理可以由标准模型加以描述。此理论部分地是基于一个对称性原理,该对称性禁止理论方程中出现的、已知的基本粒子获得任何质量。已知粒子之外的某个存在必须打破这个对称性。在理论的初始版本,这个“某个存在”是充满宇宙的一个场,它以地球引力场破坏了上下对称性同样的方式破坏了(标准模型理论里的)对称性。该场的量子在实验中会以粒子的面目出现,被称为Higgs粒子。还有其他的替代方案,但所有的理论都认为若我们在能够产生万亿电子伏特量级的质量,即质子质量的一千倍,上进行碰撞实验,一定会有标准模型中已知粒子以外的“某个事物”

出现。

理解对称破缺机理的细节是至关重要的,因为是这个机理确立了夸克、电子和其他已知粒子的质量尺度的。而在最简单版本的标准模型理论中出现的唯一质量是Higgs粒子的质量。从质量的单位我们可以推导出长度的单位,所以这也确立了基本粒子的特征长度尺度了。因此,如果我们要解决“层次结构难题”,即如何理解我们在实验室遭遇的尺度——比如电子的大小——同所有的力得以统一的尺度之间的巨大差异的难题,就必须理解这个对称破缺机制。

我们希望在超级超导对撞机上解决的就是这个问题。现在,美国国会已经决定取消超级对撞机项目,我们寄希望于在欧洲建造一个类似的对撞机,大型重子对撞机。同时,我们会有相当的机会获知在哪里能找到Higgs粒子或其替代物的进一步信息。其关键点是牵扯到这一(或这些)粒子不断产生和湮灭的量子涨落会在当前设施能够测量到的一些量上,比如W子的质量,有些微的效应。我们预计,欧洲联合核子中心进行的实验能够更精确地确定W子的质量,而费米实验室的实验正朝着精确测量顶夸克的质量努力着,顶夸克的质量也会影响W子的质量。如果这件事得以完成,我们将能够估算Higgs粒子的质量(如果恰好有一个的话),或者排除存在任何质量的单一Higgs粒子的可能性。但我们依然需要大型重子对撞机来锁定为基本粒子提供质量的对称破缺机制。

在我们等待下一代大型加速器期间我们的实验可能会有一些新的发现。这包括中子或电子的电偶极矩,一些对称破缺理论要求电偶极矩的出现,或者各种为了解决层次结构问题而提出来的理论(超对称性,人工色理论)所预言的粒子。在最终统一的非常小的尺度上发生的物理过程可能会直接产生一些微弱的效应,比如质子的衰变或中微子的质量。这些奇异的效应可表现为违反前述可重

整化原理的对标准模型之补充。虽然不是被禁止的,但是这些效应同距其发生点之微小距离的高阶幂成正比,因此是非常小的,这也可能是它们至今未被探测到的原因。但将来它们也许会被探测到。不久将有一台新的名为超级神冈探测器的地下设施要建成,也许能发现质子的衰变;而对来自太阳的中微子的研究间接暗示中微子质量的存在。所有这些,或其中任何一个,都可能在未来的实验中出现。自从标准模型完成之日我们这么说了近二十年了,但目前为止一个也没有(得到证实)。

现在来说‘高’的途经。相当一部分粒子理论学家如今试图越过所有中间步骤而直接进行到终极的统一理论,不再等待新的数据。在标准模型取得成功后的20世纪70年代的一段时间里,人们认为终极的统一理论应该取量子场论的形式,类似标准模型但更简单、更显统一。这个愿望如今相当程度上已被放弃了。原因之一是,我们现在明白任何物理上令人满意的理论在足够低的能量上都应该看起来像是量子场论,因此标准模型中量子场论的巨大成功并不能告诉我们任何关于深层的、可以导出标准模型之理论的有用信息。标准模型被看成一种“有效”量子场论,即一种相当不同的基本理论的低能近似。试图将引力纳入量子场论框架内的努力所不断遭遇的失败表明终极的基本理论是相当不同的。

沿着这条思路成功的最大希望寄托在某种类型的弦论上。弦是假想的一维基本存在,像橡皮筋那样闭合的或者像一段普通的弦那样是开的,如同小提琴的弦那样能在非常多的频率上振动。它们的大小约是电子尺寸的 10^{-18} 倍,所以在实验室的尺度上它们可以被看作是不同的点粒子,类型取决于弦振动的模式。关于弦论激动人心的一点是某些版本的弦论能凭预测开列出一张粒子类型的单子,同我们在自然界中已经观察到的颇为相似。进一步地,所有弦论都预测到的一类粒子是引力

子,即引力场的量子。因此,弦论不仅将引力同基本粒子物理统一起来,它还能解释为什么引力必须存在。最后一点,拦在引力之量子场论路上的无穷大老问题在弦论里也得以避免。量子场论计算中的无穷大是由于粒子占据同一时空点所造成的。但是弦有有限尺寸,因此两条弦永远不能处于零距离。弦论由此为我们提供了第一个候选的终极统一理论。

可惜的是,弦论至今并没有满足人们在20世纪80年代对它报有的太大期望。有太多变种的不同弦论,人们也广泛怀疑这些变种会是同一个普适理论的不同解,没人知道普适理论该是什么样子。在求解弦论以期找出可观测的物理量(比如夸克质量)的路上堆积着可怕的数学障碍,我们也不能从第一性原理判断到底哪个弦论的版本是正确的;即便这些障碍得以克服,我们仍然还要面对为什么真实世界要用弦论之类的东西来描述的问题。

通过追溯弦论的历史起源人们建议了一个对此问题可能的回答。在20世纪60年代,在关于强核力相互作用的标准量子场论出现之前,许多理论物理学家放弃了任何用量子场论语汇描述这些力的想法,转而借助于一个称为“S-矩阵理论”的实证主义纲领来计算核子和介子的性质,避免涉及电子的场之类的不可观测量。依照这个纲领,计算过程中要对可观测量施加物理上合理的限制,特别是关于任何数目的粒子间所有可能反应之几率的限制(在这些限制条件中,一条是所有可能反应的几率加起来总是100%;另一个要求是这些几率是参加反应的粒子之能量和运动方向的光滑函数;还有一个是关于这些几率在高能量上的行为的;最后是各种对称条件,包括根植于狭义相对论原理中的关于时空的对称性)。人们发现要找到任何一组能满足上述所有条件的概率是非常困难的。最终,得自灵光一现的猜测,一个能给出满足上述所有条件的几率的公式于1968~1969年之间被发现。此后不

久,人们认识到该理论实际上是弦论。这段历史也许反映了弦论出现的逻辑基础。即是说,弦论可以最终被理解为能满足施加于反应几率上的所有物理上合理的条件的唯一选择,至少是满足任何包含引力的理论中的这些条件的唯一选择。

这个观点内含悖论的元素。在我们谈论S-矩阵理论中的各种反应的几率时,我们头脑已经构思了两个或多个粒子在自由飞越了相当长的距离后碰到了一起,然后反应,产生新的粒子,这些新粒子最终会相互远离直到它们不再有相互作用。这是现代基本粒子物理里的范式实验。但是这样的反应只能发生在或多或少是空的且“平”的宇宙——即未被高密度物质填充的、未被强的引力场充满从而弯曲了的时空。这确实是我们当前宇宙的状态,但在早期宇宙却不是这样;即便今天也依然有黑洞之类的物体,其周围的空间是严重弯曲的。所以,把施加于反应几率的一组“合理的条件”当作物理学基本原理,而这些条件所限制的反应既不是由来如此,今天也不是处处如此,就显得有点怪怪的了。

确实,当前的宇宙或多或少是空的且平的本身就是悖论的。在多数理论中,多种场的量子涨落会在“空的”空间[®]中引入那样大的能量密度以至于由此产生的引力场会让时空是相当弯曲的——是如此的弯曲以至于不会有任何常规的基本粒子反应会发生,也不会出现科学家来观测它。这个问题在弦论中也未能得到解决;大量的弦论中的大多数都预言存在巨大的真空能量密度。

为了解决真空能量密度问题,我们也许要求助于不只是新的,而是新型的、完全不同于当前看起来合情合理的那些原理的物理原理。这不是第一次我们不得不改变关于什么才是可允许的基本原理的思想。1909年在其《电子理论》一书中,洛仑兹借机评论四年前爱因斯坦提出的狭义相对论同他自己工作之间的不同。洛仑兹曾试图用电子结构的电磁学理论来表明,由电子作为组成部分的物质

在运动中会表现出这种行为方式,以至于不能感知其运动对光速的效应,从而解释了为什么一直以来都不能测量到垂直和平行于地球绕太阳运动方向上光速的差别。不同的是,爱因斯坦把光速对所有观察者不变当作一个公理来接受。洛仑兹抱怨道:“我们费力不讨好地要从电磁场基本方程中推导出来的东西,爱因斯坦只是简单地推测一下。”但历史站在了爱因斯坦这一边。以现代的观点,爱因斯坦所做的就是引入一个对称性原理——自然定律对观察者速度的变化所表现的不变性——作为自然的一个基本原理。自爱因斯坦的时代起,我们已经越来越熟悉这套把各种对称性原理当作合情合理的基本假设的思想。标准模型很大程度上是基于一组设定的对称性原理,弦论也可以这样看待。但在爱因斯坦和洛仑兹的时代,对称性一般地被认为是数学稀罕物,对晶体学家有很大的价值,但很难让人以为值得纳入自然的基本定律中去。不难理解洛仑兹对爱因斯坦的狭义相对论假设感到的不自在。我们也许也要去发现新型的假设,如同爱因斯坦的对称性原理之于洛仑兹,该假设对于我们来说一开始也是不易接受的。

我们已经遭遇过这样的假设了。所谓的人择原理宣称自然规律必须允许能够研究自然规律的生命体的出现。此原理目前当然还未被广为接受,尽管它提供了目前为止我们能解决大真空能量密度的唯一方式。(太大的真空能量密度,取决于它的符号,要么能阻止星系的形成,或者早早地结束大爆炸过程以至于生命来不及产生。)在某些宇宙学理论中,弱人择原理版本不过是常识。如果现在我们称之为自然规律的东西,包括物理常数是在宇宙的不同地点,不同时段,或者在描述宇宙的量子力学波函数的不同项中,都是不一样的,我们当然只能存在于宇宙的某个地点,某个时段,或者某项对智慧生命友好的波函数中。长远来看,我们需要一种强的人择原理形式。当我们理解了物理的终

极规律,我们将面临这样的问题,即为什么自然是由这些而不是别的规律描述的。可以想象大量的逻辑上是完美相容的、但却是错误的理论。比如,牛顿力学逻辑上就没有什么错误。可以想到,正确的终极理论一定是与智慧生命出现相容的、唯一的那么一组逻辑上相容的原理。

人择原理只不过是一类不寻常假设的一个例子,但却是受到广泛关切的一个例子。在我们寻找自然的终极规律的努力中,也许我们在21世纪中不得不接受比我们目前能够想象到的还要奇怪的新型基本物理原理的合理性。

① 对称性原理指的是,若我们以某种方式改变我们的视点,自然定律保持不变。狭义相对论指出对于以恒定速度相互运动的观察者来说,自然定律不变。还存在其他的时空对称性,指出若我们转动或平移我们的实验室,或者重新设定我们的时钟,自然定律保持不变。标准模型是建立在这些时空对称性以及其它一些对称性

的基础之上的。所谓的其他对称性要求我们以某种方式改变对理论的场的标记,自然定律仍取同样的形式。——原注。

② 重整化的概念出现在20世纪40年代的后半期,是为了将在量子电动力学计算推广到一阶近似以外所遇到的无穷大的能量和反应速率赋予一些意义所作的努力。一个理论是可重整化的,如果这些无穷大可以通过合适的对理论的一组参数值,比如质量和电荷,在重新定义(重整化)加以消除。可重整化已不再看作是消除无穷大的基本物理要求了,但我们将会看到因为其他一些原因它仍被保留在标准模型中了。——原注。

③ 原文如此,即弱相互作用。——译者注。

④ 电子并没有一个完好定义的尺寸。在我们的理论中它是一个点粒子。我这里所说的电子大小,是指电子的经典半径,即假设有一个所带电荷为一个电子的电荷而其静电能等价于电子质量的球,则此球的半径就是电子的经典半径。此半径可以用来表征基本粒子物理中遇到的特征距离;比如它同典型的原子核大小差别就不大。——原注

⑤ 原文为“empty” space. 这个怪怪的翻译是因为我们早先把space 错误地翻译成空间所造成的。——译者注。

(本文摘自《20世纪物理学》(第2卷),科学出版社出版)

封面照片说明

雪龙2号科学考察破冰船

2018年9月10日,由我国自主建造的第一艘极地科学考察破冰船“雪龙2号”在上海顺利下水,标志着我国极地考察现场保障和支撑能力取得了新的突破。多年来,我国的极地考察全仗着“雪龙号”一船支撑,这次终于迎来了“兄弟”。

“雪龙2号”船是一艘满足无限航区要求、具备全球航行能力,能够在极区大洋安全航行且具备国际先进水平的极地科学考察破冰船。该船采用国际先进的船艏船艉双向破冰船型设计,并具备全回转电力推进功能和冲撞破冰能力,能够以2~3节的航速在冰厚1.5米加0.2米积雪的环境中连续破冰航行,并可突破极区20米当年冰冰脊,还可以实现极区原地360°自由转动,有着很强的船舶机动性。该船装备了国际先进的海洋调查和观测设备,实现了系统的高度集成和自

治,科研人员在船上即可开展有关极地的各项研究,是极地研究的重要科研平台。

“雪龙2号”由自然资源部中国极地研究中心组织实施,中国船舶工业集团有限公司第七〇八研究所设计、江南造船(集团)有限责任公司承担建造。该船长122.5米,宽22.3米,吃水7.85米,吃水排水量约13990吨,航速12节至15节,续航力2万海里,自持力60天,载员90人。

南北极蕴含着极为丰富的资源,是世界各国关注的热点区域,“雪龙2号”的研制成功,无疑将为我国极地研究发挥重要的作用,成为我国开展极地海洋环境与资源研究的重要基础平台。新船将于2019年上半年交付使用,届时将承担起我国极地考察任务。

(晓 秋/供稿)