

自然本性与还原论

温伯格 著

江向东 黄艳华 编译

依照惯例,大学哲学史课程都是从大约公元前 600 年小亚细亚的泰勒斯讲起。根据后人的记述,泰勒斯宣讲每种东西都是由水组成的。了解泰勒斯的东西,大学生们这是从一种他们知道是错误的学说开始他们的哲学研究,这对他们是种有益的经历。

虽然是错误的,可是泰勒斯和他的在苏格拉底之前的继承人却并不就是愚蠢的。在某种程度上他们萌生了这样一种想法,也许能够用一些简单而普遍的原则为基础来对许许多多复杂的事物作出解释:每种东西都是由水组成的,或者每种东西都是由原子组成的,或者每种东西都在流动,或者所有东西都不曾改变,或者无论什么。仅有这种纯粹定性的思想没能取得什么大的进步。两千多年以后,牛顿终于提出了运动和引力的数学定律,他从而可以解释行星的运动,潮汐和苹果的下落。接着,他在《光学》中预言,总有一天光和化学会通过将“与力学原理相同的推理方法”应用于“自然界最小的粒子”而得到理解。

到 19 世纪末,在氢原子、碳原子、铁原子等大约 90 种原子的某些假设的性质的基础上,物理学家和化学家成功地解释了当时所知的与化学和热有关的东西。20 世纪 20 年代,物理学家开始能用一种称为量子力学的新的通用的理论去解释原子的性质以及像放射性和光这样的其他东西的性质。这种理论的基本实体不再是原子本身,而是电子、质子和其他几种甚至比原子更基本的粒子,再加上它们周围的力场,比如像磁铁或电荷周围的这些熟悉的场。

到了 20 世纪 70 年代中期,有一点已经变得很清楚,这些粒子和所有已知的其他粒子的性质可以理解为是一种相当简单的量子理论,既所谓标准模型的数学结果。标准模型的基本方程并不是处理粒

子和场,而是只处理力场;粒子只不过是场的能量包而已。从牛顿时代到我们所处的时代,我们已经看到,我们知道如何去解释的现象的范围在不断地扩大,而用于这些解释中的理论在简单性和普遍性方面也在不断地得到改善。

在科学史上,最初达尔文和华莱士把生物进化解释为遗传和自然选择的结果;接着 20 世纪的生物学家把遗传解释为基因和变异的结果;然后克里

克和沃森把基因机理解释为 DNA 分子结构的结果,借助于足够大的计算机, DNA 分子结构可以解释为薛定谔方程的一个解。

这种风格的科学被恰如其分地称为还原论。在最近的一篇与此有关的文章“作为反叛者的科学家”中,戴森把物理学中的还原论描述为力图“使物理现象的世界还原为一套有限的基本方程。”我可以就正在寻找的是方程还是原理讲些模棱两可的话,可是在我看来似乎是,在这种描述中,戴森相当好地抓住了还原论的本质。他还引用了薛定谔和狄拉克分别于 1925 年和 1927 年在量子力学方面的工作,并以此作为“还原论的胜利。化学和物理学的令人迷惑的复杂性被还原为两种形式的代数符号。”

当我研读《20 世纪物理学》这部巨著的时候,发现了一个建立在所谓“突创论”现象之上的、反对还原论的见解。凝聚态物理学理论上的领头人物之一安德森认为,“突创论”是 20 世纪物理学的上帝原理。当某个系统的复杂性达到足够高的层次时,构成系统的基本成分中所不存在的新现象就“突生”出来。比如,在由大量的某种原子构成的固体中就突生出超导电性,可是超导电性对单个原子却没有意义。类似地,生命是从生物化学中突生出来的;生物化学又是从原子物理学中突生出来的;原子物理学



则是从现代标准模型所描述的基本粒子的性质中突生出来的。突生现象在某种程度上能使在大尺度上的现象不受在小尺度上所发生的事情的细节的影响。比如,虽然你必须了解许多单个原子的知识才能知道给定的物质是否是超导体,可是超导体的一般特点却带有普遍性,并不依赖于构成超导体的原子的性质。安德森是正确的,基本粒子物理学的发展不太可能对理解像超导电性那样的突生现象有很多直接的帮助,更不用说生命现象了。

我认为任何一点都不能为反对基本粒子物理学的还原论倾向提供使人信服的例证。尽管突生的现象确实突生了,但最终还是从基本粒子物理学中突生出来的。而且,你若想弄懂世界为什么会是这个样子,那你就必须弄懂为什么基本粒子会是它们现在的这个样子。

20世纪末科学的状况与20世纪初的状况大不一样。在我们经历过的这个世纪,不在于我们现在知道了比以往更多的东西,而在于我们已经认识了科学知识的独特形式。在1900年那个时候,许多科学家猜测,物理学、化学以及生物学都按照它们各自独立的规律运作。人们相信科学王国是由很多独立的领地构成的,它们彼此和睦相处,却又各成一统。虽有少数科学家坚定地抱有牛顿的所有学科大综合的梦想,却没有任何能将这种综合付诸实践的明确的想法。如今我们认识到,化学现象之所以会如此,是因为电子的物理性质、电磁学和大约100种不同类型的原子核所致。生物学当然涉及到一些物理学和化学所不曾有的历史的偶然性,可是现在是从分



图1 伽利略的研究风格

子水平上理解了促使生物进化的遗传机制,而相信自发生物法则的生机论却寿终正寝了。这真正是还原论取得胜利的世纪。

在物理学本身也可以看到同样的还原论倾向。这不是我们如何从事物理实践的问题,而是我们如何看待自然本性的问题。有许多迷人的问题有待于解决,一些是像湍流这样的过去遗留下来的问题,另一些是像高温超导电性这样的最近才遇到的问题。这些问题都必须从它们各自的方式着手,而不是还原为从基本粒子物理学的方式着手。可是,一旦这些问题得以解决,这种解必将是取已知物理学原理的现象演绎形式,比如说色动力学的方程或者电动力学的方程,若追问这些方程为什么会是如此,我们就会通过许多中间步骤而将答案追溯到同一个源头:基本粒子的标准模型。于是,基本粒子理论连同引力理论和宇宙学,此时就构成了科学知识的整个前沿尖端。

标准模型是一种量子场论。出现在基本方程中的自然的基本成分是各种场:熟悉的电磁场,以及20来种其他场。像光子和夸克以及电子这些所谓的基本粒子都是场的“量子”,即成包的场的能量和动量。这些场的性质及其相互作用主要由对称性原理来确定,其中包括爱因斯坦的狭义相对性原理,再加上“重整性”原理,即场只能以某种特别简单的方式彼此相互作用。标准模型业已经受住了现有实验设备所能进行的每一种考验。

然而,标准模型显然不是故事的结尾。我们不知道为什么它遵守某些确定的对称性而不是别的对称性,也不知道为什么它只是包含6种夸克,不是更多也不是更少。除此之外,标准模型中还出现了18个数值参数(如夸克质量比),而且必须要人为地调节这些参数才能使该模型的预言与实验相符。最后一点,由于引力相互作用不满足能支配其他相互作用的重整化原理,因而不能把引力纳入标准模型量子场论的理论框架之中。

因此,我们现在必须朝着真正统一的自然观迈出下一步。遗憾的是,这个下一步已被证实是举步维艰的。我们的处境在某种程度上有点像德谟克利特——我们可以看到统一理论的轮廓,可它却是这样一种理论,只有当我们能以远远小于我们在实验室里所能达到的长度标度去检测自然的时候,理论的结构才会变得明显。德谟克利特推测了原子,2000年以后发现原子比他猜想的尺度要小大约10

个数量级(即差了一个因子 10^{-10})。现在我们猜想有一种能够把所有自然力统一起来的理论, 我们还能想到这种理论的结构必定比我们能进行实验研究的长度标度小得多。

我们可以为这种基本的标度提供两条线索。一条线索是, 强核力(使原子核内部的粒子中的夸克结合在一起的力)的强度随距离的减小下降得很慢, 而电磁力和弱核力的强度增加得甚至更慢, 按通常的估计, 大约在电子尺度的 10^{-16} 这样的标度时, 所有的力会变得相等。另一条线索是, 在电子尺度的 10^{-18} 长度标度, 引力变得与其他几种力一样强。这两个估算的长度标度靠近得足以让我们坚信, 真的存在一种最终统一的理论, 其结构在电子尺度的 $10^{-16} \sim 10^{-18}$ 之间的这种长度标度上可以看到。可是, 在纯粹的数学意义上, 我们离能观察到这些结构的距离比德谟克利特能观察到原子的距离更为遥远。

那么我们该做些什么呢? 我确信, 对我们来说还没有理由去开始讨论基本物理学的结束。我也不认为(尽管我也不能肯定)在物理学风格上需要什么巨大的变革。还原论模式在这个世纪为我们工作得如此之好, 对我来说在同样的模式中似乎还有足够的能取得进展的希望。具体而言, 有两种方法还没有详尽无遗地研究, 一种是高路线, 一种是低路线, 此处“高”和“低”是指所研究过程的能量。

低路线这种方法乃是, 试图通过理论家与实验家的通力合作, 在我们的实验室所能达到的能量上来完善我们对物理学的理解。能量越高, 所能研究的结构尺度就越小; 若用不大于万亿 (10^{12}) 电子伏的能量, 我们就不能直接研究尺度小于电子尺度的万分之一的结构。如前所述, 在这个标度上物理学已由标准模型做了很好的描述。这种理论一部分是基于对称性原理, 不允许在该理论的方程中出现已知的基本粒子的任何质量, 而在已知粒子之外的一些东西, 必定会打破这种对称性。在这种理论的原始版本中, 这些东西是遍布宇宙的一种场, 这种场打破了这种对称性, 与地球的引力场打破了上和下的对称性的方式几乎一样。在我们的实验中, 这种场的量子将会以粒子的形式显示出来, 即所谓的希格斯粒子。虽然也存在其他的可能性, 但所有的理论都一致认为, 在能量高到足以产生 10^{12} 电子伏量级的质量, 即能产生 1000 倍的质子质量时, 超出标准模型已知粒子之外的一些东西必定会在我们研究

的碰撞中显示出来。

了解对称性破缺机制的细节是至关重要的, 因为就是这种机制设定了夸克、电子和其他已知基本粒子的质量标度; 在最简单版本的标准模型的方程中出现的唯一的质量是希格斯粒子的质量。从质量的单位我们可以推算出长度的单位, 因此也正是这种机制设定了基本粒子的长度特征标度。因此, 如果我们要解决“等级问题”, 就必须理解对称性破缺机制, 所谓“等级问题”, 就是要搞清楚我们在实验室中所遇到的长度之间的巨大悬殊, 诸如电子的尺度这样的量, 以及使所有的力能统一起来的地方的长度标度这些量之间的差距。

这个问题乃是我们希望在超导超级对撞机(图2)上来解决的。既然美国国会已经决定取消超级对撞机, 我们就只能寄希望于计划在欧洲建造的类似的加速器, 即大型强子对撞机。在大型强子对撞机上, 我们有获得进一步的信息的大好机会, 从而得知在什么地方能找到希格斯粒子或者它的任何替代物。要害是涉及到这种(或几种)粒子的连续产生和湮灭的量子涨落, 它对诸如 W 粒子的质量这样的能用现有装置测量的量有一些轻微的影响。我们可以期待, 通过 CERN 的实验, 就能得知 W 粒子的比目前要精确得多的质量, 而目前位于芝加哥附近的费米实验室正在进行的实验将为“顶”夸克的质量提供一个精确值, 这也会影响 W 粒子的质量。这项工作完成之时, 我们就能够估算出希格斯粒子(假如只存在一种)的质量, 或者排除带任何质量的单种希格斯粒子存在的可能性。至此, 我们仍然需要大型强子对撞机, 用它来约束能赋予基本粒子质量的对称性破缺机制的细节。



图2 得克萨斯州沃克西哈奇附近 87 千米隧道的 SSC 的实验大厅

在我们等待下一代大型加速器的同时,在我们的实验中可能会出现许多其他的东西。这其中包括中子或电子的电偶极矩(类似罗盘指针的磁化,可是它产生的是电场而不是磁场),这是在一些对称性破缺理论中期待的一种效应。我们也可能发现一些新粒子,它们是由试图解决等级问题而提出的各种理论(超对称理论、人工色理论)所预言的。也存在像质子衰变或中微子质量这样的微小的效应,它们可能是由在最终统一时的极小的长度标度上出现的物理过程而直接产生的。这些奇特的效应将表现为对前面提到的破坏重整化原理的标准模型的某种补偿。可是这些效应将会正比于它们产生时的极小尺度之处的能量。因此,它们虽然没被禁止,但也会非常小,也许这就是为什么它们还没有被探测到的原因。不过,它们还是可能被探测到的。不久,在日本将有一种称为神冈的地下设备,在那里可能发现质子衰变;在对来自太阳的中微子的研究中发现了一些直接的线索,表明实际上中微子确实有微小的质量。任何一件事情或所有这些事情都可能在将来的实验中被发现。可是,从标准模型建立以来,我们已经这么说了将近20年,到目前为止还没有发现任何东西。

此外,就是高路线。有相当一部分粒子理论家现在正极力想跳过中间步骤,不等待新数据而直接对最终的统一理论做系统的阐述。在20世纪70年代,也就是在标准模型取得成功之后,曾一度认为终极理论将和标准模型一样会采用量子场论的形式,只不过其形式更简单更统一罢了。这种希望大体上已经被放弃了。我们现在已经了解的一件事情是,任何物理上满意的理论看起来都是在能量足够低时的量子场论。可见,在标准模型中获得巨大成功的量子场论并没有告诉我们多少关于它所起源的更深层理论中的东西。标准模型被看做是一种“有效的”量子场论,即一种极为不同的基本理论的低能极限。而且,将引力纳入量子场论领域的一次又一次的失败表明,基本理论是大有径庭的。

沿这条路线走,成功的最大希望在于某种弦理论。弦是假想的一维基本实体,它像是闭合的橡胶带子,或是不闭合的普通的弦,像小提琴的弦那样能以许多不同的频率振动。它们大约是电子尺度的 10^{-18} 倍,因此,在实验室里进行观察时,它们看起来像是不同类型的点粒子,而其类型取决于弦的偶然振动的模式。关于弦理论的一件激动人心的事情

是,在一些弦理论的版本中预言了一张有关粒子类型的菜单,这张菜单里所列的粒子与我们在自然界中实际观察到的惊人的相似。更有甚者,引力场的量子即引力子,是弦理论的所有版本都预言过的粒子类型之一。因此,弦理论不仅把引力与基本粒子物理学的其余的力统一起来了,而且还解释了为什么引力必定存在。最后,挡在引力的量子场论路途中央的由来已久的无穷大问题,在弦理论中也得以避免。我们在场论计算中所发现的无穷大,产生自粒子在空间占据同一点这种过程。可是弦可以做有限的延伸,因而在弦上一个给定的点与任何其他弦上几乎所有的点的距离将总是非零的。因此,弦理论为我们最终的统一理论提供了第一个真正的候选者。

遗憾的是,直到20世纪80年代,弦理论还没有真正达到人们所期望的远大目标。看起来似乎有许多多种不同的弦理论,而且人们普遍猜测这些不同的理论实际上只是同一种万能理论的不同版本而已,却无人知道那种万能理论可能是什么样的。在解任何一种弦理论去寻找它所预言的像夸克质量这样的可测量的物理量的过程中,都有难以克服的数学困难,而且根据一些初始原则我们也无法说出弦理论的哪种版本是正确的。即使所有这些障碍都排除了,我们还将面对这样的问题:为什么现实世界就应该用像弦理论这样的东西来描述。

通过追溯弦理论的历史根源,会使人想起这个问题的一个可能的答案。在20世纪60年代,在现在的强核力的标准量子场论建立之前,许多理论家已经放弃了采用任何一种量子场论来描述这些力的想法。取而代之的是,通过一种称为“S矩阵理论”的积极方法去尝试计算核子和介子的性质,从而避免涉及像电子的场这样的不可观测的量。在这种方法中,通过在可观测的量上附加合理的物理条件来进行,尤其是加在任意数目的粒子的所有可能的反应几率之上。(附加的条件之一就是,所有反应的几率加起来总是100%;另一个要求是,这些几率平滑式地取决于参与任一个反应的粒子的能量和运动方向;还有另一个要求是,把这些几率看做是在极高的能量上的行为;最后还有各种对称性条件,包括在狭义相对性原理中所体现的时空对称性。)结果表明,要找到能满足所有这些条件的任何一组几率都相当困难。最后,借助富有灵感的猜测,在1968—1969年找到了一个反应几率的公式,它好像能满足所有

这些条件。不久,人们认识到所发现的这个理论实际上是一种弦理论。这段历史可能反映了弦理论的逻辑基础。也就是说,弦理论可能最终被理解为,能使反应几率满足所有这些合理的物理条件的惟一方式,或者至少是在任何一种里面包括引力的理论中能满足这些条件的惟一方式。

这种观点有它自相矛盾的地方。当谈到S矩阵理论中各种“反应”的几率时,在我们的脑海里会浮现这样的过程:两个或多个粒子经过远距离自由运动后来到一起,相互发生作用,产生新粒子,最后各自运动并分开,直到它们再次彼此远离、不会再相互发生作用为止。这是现代基本粒子物理学中的范例性实验。可是,这种类型的反应只有在宇宙差不多是空的而且是“平坦”的这种情况时才会出现,也就是说,宇宙中既不能充满高密度的物质也不能遍布着使时空结构扭曲的强引力场。这实际上就是我们的宇宙现在所处的状态,可是早期宇宙并不是这个样子,而且即使是在现在,也存在像黑洞这样的使时空明显弯曲的物质。把一套“合理的条件”作为物理学基本原理附加在反应几率上,这看起来似乎很奇怪,在那段时间,这些条件所涉及的反应并不总是可能的,而且即使是在现在,也不是随处都是可能的。

实际上,我们目前的宇宙差不多是空的和平坦的这个事实本身就难免自相矛盾。在大多数理论中,各种场的量子涨落会给“空的”空间一个相当大的能量密度,从而它产生的引力场会使时空明显地弯曲——弯曲得非常厉害,以致于普通的基本粒子反应根本就不会发生,而且也不会有科学家能够生存并去观测它。这个问题在弦理论中没有解决;在现有的大量弦理论中,大多数理论都预言了一个巨大的真空能量密度(由于历史原因,这被称之为宇宙常数问题)。

为了解决真空能量密度的问题,我们可能需要借助的不仅仅是新的物理原理,而是其类型也要与迄今为止看起来是恰当的那些原理不一样。这可能不是第一次必须要从思想上对什么是容许的基本原理做出改变。洛伦兹1909年在他的《电子论》中趁机评论了爱因斯坦比他早4年提出的狭义相对论与他所做的工作之间的差别。洛伦兹曾试图利用电子结构的电磁理论来表明,由电子组成的物质,当它处于其运动对光速的影响不可能被检测出来的运动状态时,这样就可以解释,为什么无论是沿着或是垂直

于地球绕日运动的方向都检测不到光速的任何差别。与之相反,爱因斯坦却把光速对所有观察者都相同作为一个基本的公理。洛伦兹抱怨说:“爱因斯坦只是把我们颇费周折地从电磁场的基本方程推导出来的并不是总能让人满意的东西视为理所当然。”但是历史却站到了爱因斯坦那一边。从现代观点来看,爱因斯坦所做的就是把对称性原理——在观察者的速度发生变化的情况下自然规律的不变性——作为自然规律的一条基本原理而引入。自从爱因斯坦那个时代以来,我们对不同种类的对称性原理都是合理的基本假设这种思想越来越熟悉了。标准模型主要是建立在一套假想的对称性原理的基础之上,对弦理论也可以这么看。可是在爱因斯坦和洛伦兹所处的年代,对称性被普遍看做是数学奇特性,对结晶学意义重大,可是几乎不值得被视为自然界的基本原理。洛伦兹对爱因斯坦所假设的相对性原理感到不舒服,这并不奇怪。或许我们也应该去发现新的类型的假设,也许最初也会像爱因斯坦的对称性原理在洛伦兹看来不那么惬意一样。

我们遇到过这样一个假设。这就是所谓的人择原理,这个原理是说,自然规律必须考虑到有能力研究自然规律的生物的存在。这个原理现在还没有被普遍接受,尽管它为我们解决巨大的真空能量密度问题提供了迄今为止惟一的方法。(过大的真空能量密度将会妨碍星系的形成,或是在生物进化之前过早地结束大爆炸,这取决于它的符号。)在一些宇宙学理论中,人择原理的一个较弱的版本并没有超出普通观念。如果我们现在所说的包括物理常数值在内的自然规律,随所在宇宙的地点而变,或者因时代的更替而不同,或者在宇宙的量子力学的波函数的形式变化时不一样,那自然地,我们就只能在某个地方,或是某个时代,或是以波函数的某种形式,发现我们自己易于接受智慧生命。

从长远来讲,我们还应该求助于人择原理的更强有力的形式。当我们最终认识到物理学的终极规律之时,我们会面对这样的问题:为什么自然界是用这些规律来描述而不是用其他规律。有许多可以想像得出的逻辑上相当合理但却不正确的理论。比如,牛顿力学中就没有任何逻辑上的错误。不难想像,正确的终极理论,乃是与智慧生命的存在相一致的、惟一一套逻辑上协调的原理。

(编译自《直面科学》,哈佛大学出版社,2001年)