

引言

物理理论的简约之美

统一的意思就是使事物简单化。从多变少，由少归一，便谓之统一。

爱因斯坦在解释了光电效应、提出两个相对论之后，便开始了对统一场论的研究。大有“躲进小楼成一统，管他冬夏与春秋”之势，这一“统”就是三十余年，到死方休。爱因斯坦将其后半生都献给了物理学中的这场“统一之梦”。然而，他为此独自奋斗三十余年却未得其果。

尽管“统一场论”一词始于爱因斯坦，但其思想却始于麦克斯韦和法拉第的电磁理论。事实上，如果略去“场论”二字，只谈理论之统一，那就应该追溯到牛顿时代了。

爱因斯坦逝世后，物理学家们在这条统一之路上，又走过了一个甲子的历程。在六十年的风风雨雨、点点滴滴中，理论物理学家们究竟做了些什么？统一之路如今走到了哪里？前途如何？本书从介绍牛顿力学、量子力学开始，到数学中的群论、对称守恒原理，再介绍标准模型、规范理论、量子场论、费曼路径积分、费曼图等，让读者对理论物理中的“统一”大框架，特别是主流物理界公认的“标准模型”，有一个基本认识。最后，也探讨一下统一理论与大爆炸宇宙学、暗物质、暗能量的关系，以及标准模型的困难和局限，并简要地介绍包括弦论、M理论、弦网等概念，让读者不仅能领略到理论的美妙和科学家的追求，也能体会到科学研究的艰辛，更激励着年轻人保持探索自然规律的愿望和好奇心，踏进科学的大门。

物理学中的统一之路，实际上追求的是一种简约之美。

把复杂的事情简单化，是一种本领和智慧。简约并不简单，大智若愚、大道至



简,用简去繁、以少胜多。中国清代有位书画家郑板桥,被称为“扬州八怪”之一,他在书斋中挂了一幅自写的对联,题曰:“删繁就简三秋树,领异标新二月花”,以此表明他的书法及文学理念,主张以最简练、清晰的笔墨和不同凡响的思想表现出最丰富的内容。

而物理学家的“统一”,归纳起来有三方面:一是物理规律的统一;二是物质本源的统一;三是相互作用的统一。

因而,物理学家所追求的简单化、统一化,听起来与郑板桥追求的书画笔墨及文字之“简约”,如出一辙。两者实质上也就是所谓“奥卡姆剃刀”原则的变换说法,同属“简约之美”。

奥卡姆不是人名,而是英格兰的一个村庄。14 世纪时,那里出了一位叫作“威廉”的逻辑学家。此人流传下来的东西不多,唯有这一句话脍炙人口——Entities should not be multiplied unnecessarily。可用中文将其翻译成一段八字格言:如非必要,勿增实体(奥卡姆剃刀原则)。意思是说,删除一切没必要的多余“实体”,留下最精炼的部分。

对于理论物理,这一原理最好的表述是:当你面对着导致同样结论的两种理论,选择那个最简单、实体最少的!物理统一理论中的实体,可被理解为基本规律、粒子和作用力。也就是说,统一,就是用最少数目的物理规律来描述自然现象;用最少数目的“不可分割基本粒子”来构成所有的物质;用最少种类的“力”来描述物质之间的相互作用,这才符合奥卡姆剃刀原则,符合简约之美!

牛顿曾经感叹过:“我能计算天体运行的轨道,但无法计算人类的疯狂。”

“奥卡姆剃刀”原则也许难以描述多变的社会现象及复杂的人性,但将其用于科学时的优越性却毋庸置疑。几百年来,这一原理在科学上得到了广泛应用,从牛顿的万有引力到爱因斯坦的相对论,再到如今的标准模型,在漫长的统一之路上,“奥卡姆剃刀”原则已经成为重要的科学思维理念。

然而,物理学中的统一理论,即用以描述物质世界的“最少数目”的标准,是随着时间而变化的。随着科学技术的不断进步,实验手段的不断改进和发展,各种理

论得以建立和完善,我们对大自然的理性认识也深入到不同的层次。这一切,使得在科学发展的不同历史时期,会有不同意义下的不同的“统一理论”。它们犹如在一条曲折流逝的河流中,在一定位置出现的一片片平静的港湾。河流总是从这些港湾和支流中,不断地吸取精华、去除糟粕,川流不息地奔向大海。

牛顿运动定律加万有引力定律,毫无疑问是物理学中第一个“统一理论”。牛顿之前的物理学,已经有了许多独立的、貌似互不相关的物理定律:伽利略发现了惯性原理,还通过著名的比萨斜塔实验证实了自由落体所遵循的规律;开普勒在研究第谷留下的大量实验及观测资料的基础上,提出了行星运动三定律;惠更斯和胡克,当时在力学、光学等多个领域也都有所建树。然而,是牛顿第一个认识到这些零零落落的孤立定律之间深刻的内在联系。他将这些分散的“支流”汇总在一起,完成了物理学上的第一次理论统一。

与那些“孤立”定律不同的是,牛顿运动定律描述的是“所有”物体在力的作用下的运动规律。这里的物体,可以是地面上的沙粒,也可以是宇宙中的天体。牛顿用锋利的“奥卡姆剃刀”,将物体的大小、形状、质地、软硬之类不重要的具体性质通通砍去,只留下一个质量 m 。因此,所有的物体都变成了一个质点,它们在力的作用下,都符合同样的运动规律。

场论的思想,始于麦克斯韦和法拉第的电磁场理论。法拉第在进行并记录了大量电磁实验的基础上,提出了“场”的概念。而精通数学的麦克斯韦,则希望用微分方程来描述和总结这些实验规律。最初,麦克斯韦面对着 20 多个方程式,其中包括由库仑、高斯、法拉第、安培等人研究总结的各种实验现象,还包括电介质的性质、各种电磁现象的规律等。麦克斯韦大刀阔斧地挥舞着“奥卡姆剃刀”,剃去了冗余重复的部分,再加上必要的新概念,最后将它们提炼简化为 4 个对称而漂亮的矢量方程式,将电、磁、光三者“统一”于一个经典场中。

后来,爱因斯坦的狭义相对论又将时间和空间的概念统一于一个四维的时空框架中。此时,时间和空间不再是绝对而单独的存在,而是通过洛伦兹变换互相联系在一起的整体。从狭义相对论的时空概念中能得到尺收缩、钟变慢的结论,这与



以太中的洛伦兹理论得到的结论一致。那么,以太的“实体”于此是多余的,因此,它被爱因斯坦用“奥卡姆剃刀”无情地剃去了。爱因斯坦留下了两条他认为必要的实体:相对性原理和光速不变,并建立了狭义相对论。再后来,他又将相对性原理扩展,用等效原理把引力质量和惯性质量等同起来,将引力效应与时空几何统一起来,建立了广义相对论。

物理学的一次又一次进展,原来都是和一次又一次的“统一”联系在一起的,难怪爱因斯坦最后要将其半生的努力都献给了统一大业。

在爱因斯坦刚建立广义相对论的年代,弱相互作用和强相互作用尚未登场。爱因斯坦当时对前景的估计应该是颇为乐观的,他也许会想,电磁力和引力是如此相像:它们同样是远程起作用(从20世纪30年代开始,就有了对近程起作用的、现在称为“弱相互作用”的描述),都符合距离的平方反比率,只要能將电磁力融入广义相对论的引力框架中,不就大功告成、统一起来了吗?

遗憾的是,爱因斯坦几十年大统一梦的努力最终以失败而告终。依现在笔者这样的马后炮观点看起来,爱因斯坦至少有两点错误:一是低估了万有引力“桀骜不驯”的本性,二是选错了道,想要用经典场论而不是量子场论来构建统一理论。也就是说,爱因斯坦忽略了更深入研究他自己参与创建的量子理论,也更忽略了量子理论后来几十年的发展。

当然,人们可能会说,从量子场论出发的这条统一之路不也仍然是困难重重,尚未打通吗?的确是这样,但是大多数的物理学家们认为这是一条正确的道路,也是一条无法回避的道路。试想,一个物理学的大统一理论可以不包括已经发展并被验证超过百年的量子理论吗?即使我们尚不知道这条道路的终点在何处,但坚持走下去必将在历史上留下痕迹,也许是弯曲迂回的痕迹,但将来仍然是“有迹可循”的。

当年,量子力学中有了薛定谔方程和海森伯的矩阵力学,万有引力有了爱因斯坦的场方程,电磁作用有了经典的麦克斯韦方程组。这三套马车在自己的大道上各行其是,的确应该将它们统一在一个单一的数学框架中,这是理论物理学家们喜

欢玩的游戏。量子力学的诞生和引力的几何化是当年物理界让人震撼的两大革命；而经典电磁学则在成功地建立了麦克斯韦理论的基础上，正在忙忙碌碌地走向应用。它带来了数不清的专利和许多杰出的工程师，揭开了电气工程中辉煌的一页。对 20 世纪初期的物理学界而言，大多数理论都朝着完善和推广量子力学的方向发展。风云激荡的时势，造就了一个又一个的量子英雄，忙着把诺贝尔奖发给这些为诺贝尔以前闻所未闻的奇怪理论做出贡献的科学家们。与电磁和量子领域非凡热闹的气氛相比较，广义相对论便显得孤独多了，它在默默地等待着天文学中更精确的实验验证资料。

这三组理论并非全无关系，在解决具体物理问题时，有时候三者都需要考虑。但是，它们毕竟有各自的用武之地：量子理论适宜探索微观世界；广义相对论在宇宙学中长袖善舞；电磁理论则成功地服务于人类的衣食住行。还有一件人们不应该忘记的大事，是与物理学的两大革命密切相关的，那就是在 1945 年 8 月 6 日，于日本广岛爆炸的原子弹。这次爆炸伤及了十几万无辜的生命，造成的后患难以数计，并使爱因斯坦后悔当年上书罗斯福促成制造原子弹一事。尽管如此，当时原子弹的技术毕竟是被同盟国所掌握，它的爆炸加速了日本的投降和第二次世界大战的结束。否则，世界历史和中国历史也许都要被改写了。

从物理学史的观点来回顾 20 世纪初物理学界这两大革命理论，量子力学象征着现代物理的开始，而相对论则代表了经典理论的结束。爱因斯坦统一之梦失败的原因之一，恐怕正是他将经典的尾巴抓得太牢了，因而挡住了一部分他用于观察现代物理龙头的视线。爱因斯坦始终不能接受不确定性原理等不同于经典现象的量子规律，尽管他扮演的老顽固角色对量子力学的发展也起到了正面推动的作用。但是，参与反推和参与正推总是有所不同的。记得著名的物理学家、诺贝尔奖得主史蒂芬·温伯格对爱因斯坦曾经有过一句非常精辟的评论。其大意是说，爱因斯坦所犯的最大错误不是他自己认为的“在场方程中引入了宇宙常数”，而在于他成为了自己理论成就的“囚徒”。他痴迷于广义相对论的物理数学之美中，想用这个经典理论一统天下，包括统一他不接受的量子理论。但这在事实上是不可能的。



事实上,量子理论的出现是一场比广义相对论更为深刻的革命,因为它跳出了经典思想的牢笼,走出了一条不确定性和决定性融合在一起的现代物理之路。

一个成功的物理大统一理论必定要建立在量子理论的基础上。因此,本书第二篇中简要地叙述了量子物理的发展历史和基本概念,带领读者了解量子力学的创建过程,并从科学家的物理思想及趣闻轶事中,更深入探测微观世界,体会领略神奇的量子现象。

物理理论的建立少不了数学。为了解理解物理中的统一理论,一定的数学知识是必要的。实际上,理论物理和数学互相渗透、融合在一起,彼此促进、相辅相成。在本书中,笔者尽量避免写出数学公式,而是代之以通俗的语言,用来描述艰深的数学概念,诸如群论、李群、李代数、对称、守恒、生成元、对称性自发破缺等。

世界的本源是什么?这是从希腊时代开始,哲学家和科学家们就不停追溯和思考的难题。对此类问题的探索关系到两个方面:构成物质的基本砖块有哪些?这些砖块之间的作用力又有哪些?说穿了,物理学中寻求的统一理论的本质,就是要寻求统一这些基本砖块及其相互作用的理论。大家在中学物理及化学中,已经接触过的分子结构、原子模型、质子、中子、电子,以及元素周期表等,是在原子(分子)层次的统一理论。然而,随着科学技术的发展进步,人类对物质本源的认识已经深入到更下一个层次。科学家们制造了大型加速器,利用快速运动粒子之间的碰撞来产生新粒子,也从浩瀚无边的宇宙中发现和捕获未知粒子。清点各种粒子后,我们知道其种类已经有好几百种。这其中,哪些算是“基本”的?哪些是由基本粒子构成的?如何将粒子动物园中的各种“动物”分门别类?这是本书在第四篇中将介绍的内容。

物理学家们从20世纪80年代开始建立的“标准模型”,是统一路上的一个重要成果。标准模型建立在杨-米尔斯规范场论的基础上,将目前物理实验能量能够达到的微观世界最小层次的物质结构和相互作用,统一于61种基本粒子。该理论所预言的多种粒子在实验中均被陆续发现,2012年最后发现的希格斯粒子,为这个理论贴上了一个醒目的标签。本书第五篇,便在叙述杨-米尔斯理论的基础上,

简单介绍标准模型。

一波未平,一波又起。现有的基本粒子尚未被统一,宇宙学的领域又传来了新的信息。原来我们能探测到的物质种类只占宇宙中所有物质成分的4.9%,其余的属于我们对其性质几乎完全无知的暗物质和暗能量。这些“暗货”到底是些什么?如何将它们统一在我们的物理理论中?天文学和宇宙学的实验观察数据,既给我们提出了挑战,也有可能向我们展现了克服困难的玄机。笔者在第六篇中,探索在大爆炸开始的短暂时刻,4种相互作用如何分离。微观和宇观的结合,是否能为物理学的统一之路开辟新的捷径?

尽管标准模型取得了一定的成功,但它与少量的实验结果也有不相符合的情况。并且,它将引力抛弃在外,因此人们并不认为它能够作为将来所谓“终极理论”的候选者。那么,除了标准模型之外,还有哪些主要的理论呢?物理学家为了统一引力,做了哪些努力?统一大业将何去何从?在本书的最后几节,笔者将对弦论、M理论、引力量子化、弦网等略作介绍。

20世纪初物理界的两场革命,带给了我们相对论和量子理论。如今,物理学需要新一轮的革命,将两者结合统一在一起。这种微观和宇观的统一,是否能为物理学以及其他科学的统一之路,开辟出一条新的路径?相信科学家们将继续努力,让我们期待欣赏大自然更高一层次的“简约之美”!

爱因斯坦三十年如一日的统一梦,即使未成正果,也精神可嘉。他留给后人的遗产,有前半生大胆创建物理理论的思想光辉,也有后半生百折不挠、追求统一的奋斗精神。爱因斯坦超人的物理直觉和对数学思想的异常敏感,将他造就成了一代伟人。

在后半生探索统一场论的过程中,爱因斯坦对物理和数学的观念发生了一些微妙的变化。或许是因为黎曼几何之于引力理论的重要性给他的冲击太大,印象太深刻了;也有可能是他对自己的物理直觉太过于自信了,以为不需要多想,那种直觉自然而然就在那里。总之,在后来几十年的研究中,他似乎不再像原来建立两个相对论时那样深究物理概念,提出革命思想,转而试图以几何为出发点来将广义



相对论拓展到电磁场。可是很遗憾,这种从数学走向物理的想法没有使他再获成功。

爱因斯坦太钟爱广义相对论、抵制量子论,以致他在 1950 年评价物理学领域中的成果时说:“基础物理理论需要一开始就在基本概念上与广义相对论一致,否则在我看来都是注定会失败的。”可惜爱因斯坦这次的预言不准确。如今,不知远在天国的他是已经注意到量子理论这几十年的成功,还是仍然像 1950 年那样,为量子理论与广义相对论的水火不容而耿耿于怀。

种种说不清的原因,使得爱因斯坦在最后三十余年中的科学努力似乎一无所获,没有得到什么对现代物理研究来说值得一提的成果。但不可否认,爱因斯坦是一个伟人。如今 100 多年过去了,他的许多理论我们仍在使用。然而他的巨大的身影,与他坚持不懈的经典统一梦,却都渐行渐远,慢慢地消失在无情的历史岁月里。

物理学家对统一理论的追求,只不过表明了探索大自然更深一层秘密的愿望和决心。有谁会真正相信,用一个“万能公式”或是一个“万有理论”,就解决了所有的问题呢?求统一的过程中发现更多的多元化和“不统一”,在不统一的世界中又不断显现共同的、统一的特征。爱因斯坦的统一梦后继有人,统一之路永无止境!



第一篇

从牛顿到爱因斯坦



从牛顿开始,物理学家们就做起了统一梦,爱因斯坦更为此花费了后半生数十年的时间和心血……