

# 试论 20 世纪物理学科学思想的进化

程 民 治

众所周知,20 世纪物理学取得了突飞猛进的发展和极其辉煌的成就,可谓是物理学史上伟大的革命性的变革时期. 引起这场变革的最深层、最本质的内涵,主要包括如下 10 个方面的内容.

## 一、由确定性到不确定性

17 世纪尤其是 18 世纪以来,由于牛顿力学的节节胜利,人们由此而构造了一个全封闭的“时钟式”或“发动机”模型式的物理世界. 其中所有的事物不论是在宇观、宏观层次上还是在微观层次上,都精确地、有规律地运动着. 以致于在长达 3 个世纪之久,人们普遍认为物理科学的使命就是提供确定性的知识,并且实际上也正是这样.

20 世纪以来,统计规律和概率随机性、不确定性思想,在物理学所有学科领域均得到了深化和发展. 如在量子力学中,哥本哈根学派对薛定谔方程中的波函数作统计解释时,提出了几率波的概念,认为整个系统的单个粒子都服从统计规律. 特别是 70 年代后期与相对论和量子力学齐名的理论——混沌学的应运而生,更是和随机性、不确定性结下了不解之缘. 如在湍流现象中所激起的层层浪花或形成的许多不规则的旋涡,无人能预先准确地说出这些浪花和旋涡的运动方式.

## 二、由连续性到分立性

经典物理规律的明显特征是物理量的连续性. 如一定质量理想气体的等温线,弹簧振子的动能、势能随时间的变化曲线,以及变化的电场和变化的磁场所拥有的能量随时间因子的变更,等等,都是连续的.

但是,在 19 世纪末不太长的 10 多年时间里,一系列新的科学发现诸如黑体辐射、光电效

应和原子的线状光谱等实验事实,表现出与经典物理学理论的尖锐矛盾. 1900 年,普朗克提出的“安宁的扰乱者”——“量子假说”—— $\epsilon = h\nu$ ,一举打破了“自然界无飞跃”的古老的格言,明确揭示了组成辐射黑体的谐振子所具有的能量是分立的. 由此迎来了一代壮观的量子论的诞生,并抛弃了能量总是连续变化的这一传统思想.

## 三、由“构成论”到“生成论”

“构成论”的倡导者是古希腊的德谟克利特,他认为,宇宙万物都是由原子所组成,而原子是不可分割的极小物质单元;原子既不能被创造,也不能被消灭;物体之所以千差万别,是由于组成物体的原子的数量、形状、位置以及排列次序的不同……. 通过近代原子论,这种构成论的思想和方法论原则在自然科学中曾结出了累累硕果.

但是 20 世纪以来,随着物理学的前沿向着微观领域伸展,以“构成论”为主流的宇宙观受到了一系列严重的挑战. 当代高能物理学所展现的全新思想是:由一组有限的物质“基本组元”所构成的复合“物体”的经典概念对于亚核粒子是不适用的. 实验表明,在能量足够大的条件下,相互碰撞的亚核粒子能够发生分解,然而这样所得的部分决不是比原来粒子“更小的部分”. 例如两个质子通过高速撞击后,分裂成许多不同碎片. 这些碎片都是由碰撞质子的动能和质量所产生的强子. 质子分裂为它的“组成部分”不是确定的,随着相互作用过程中质子碰撞能量的强弱而异. 因为按照爱因斯坦的相对论,在两个质子的相互撞击中,能量的模式被互解并重新组合. 因而关于复合物体及其组成部分的概念不再适用于亚核粒子领域. 关于亚核粒子的“结构”只能在动态的意义上,用过程和相互作用的术语来描述. 亦即只有“生成论”

的宇宙观,才能对上例中两个高速撞击的质子所分裂成的许多不同种类的粒子之实验结果,作出圆满的解释。

#### 四、由“归一”到“统一”

在物理学史上先后出现了三种单一的物理世界图像。这就是分别以牛顿等为代表的力学物理世界图像;以黑尔姆等为代表的能学物理世界图像;以及以维恩等为代表的电磁学物理世界图像。这些学者主张以他们各自的物理世界图像作为物理学的一种研究纲领,并试图将一切自然过程及其规律分别归结为力学、能量转换、电磁场现象,以及它们各自所能直接观察到的物理量所服从的方程。毋庸置疑,这种试图把多样的自然现象简单地归结为某一种“单一”的自然现象,用某一种特殊的自然规律描述全部物理现象的企图,是不符合自然界的本来面貌的。取而代之的是基本相互作用统一的物理世界图像。

爱因斯坦在创立相对论的过程中,开辟了基本相互作用统一的物理世界图像的方向,形成了这种“统一”的物理学新思想。他不是企图把力学现象和电磁学现象归结为其中的任何一个,而是在新的时空框架中把两者统一起来。他的彪炳史册的狭义相对论的创立,实现了在运动学水平上两者的统一。此后,爱因斯坦、希尔伯特和韦尔等人,都曾投身于创立引力与电磁力相互统一的统一场论。随着60年代后期温伯格和萨拉姆各自独立提出的弱电统一理论被证实以后,1974年以来,各种大统一模型陆续创立。又由于大统一的能量标度处于引力开始变得重要起来的能量范围,把规范理论向包括引力在内的4种相互作用统一推进也就有了明确的意义。70年代提出的各种超引力理论和80年代兴起的超弦理论,就是包括4种基本相互作用的一些超统一模型。虽然所有大统一和超统一理论都还处于探索之中,但基本相互作用统一的眉目日趋清晰。

#### 五、由“细部”到“整体”

20世纪初以来,学科划分日益精细,其“技巧之一就是拆零,即把问题分解成尽可能小的

一些部分”(阿尔文·托夫勒语)。但是,由此而引起的后果是“知识的各种各样的分支在广度和深度上的展开,却使我们陷入了一种奇异的困难”(薛定谔语)。反之,只有整体性的知识,才能达到对自然的理解。物理学家们越来越清楚地认识到:“所有专业化研究所具有的真正价值只存在于各种知识的总体关联中”(薛定谔语)。

随着物理学向自然科学的各个分支学科甚至是向人文科学中的渗透,“打破学科间的壁垒”(普里高津语),已成为当代物理学的一种不可抗拒的潮流。人们自发地应用系统论思想来研究物理学,把整个科学看作一个系统,注意科学系统的整体功能,注意各子系统的相互作用、系统与环境的相互作用。由于现代科学大师们探索的目光已经超越了传统自然科学的领域,不仅由此而脱颖出一批新兴的交叉学科,如生物物理、化学物理、地球物理、社会物理学和物理科学美学,等等。而且在新的学科领域中,涌现出了许多崭新的物理学概念,如“物理格式塔”、“多维客体”、“隐序”、“多维世界”、“镶嵌客体”、“潜能世界”等等。

#### 六、由简单到复杂

追求简单性是经典物理学的目标,也是推动它取得成功的动力。这如同牛顿所说:“自然界喜欢简单化,而不爱用什么多余的原因以夸耀自己”。如经典力学就是简单性的科学。它用理想化的方法抽象出质点概念和刚体概念,再把牛顿定律加于其上而对复杂的现象作出简单的力学解释。经典物理学在实践上的成功,加强了人们对简单性的信念。直到本世纪中叶,科学家还都坚信“物理上真实的东西一定是逻辑上简单的东西”(爱因斯坦语)。

1977年,混沌科学的诞生,根本改变了物理世界简单性的观念。尼科里斯和普里高津说得好,“我们的物理世界已不再是以稳定的周期性行星运动为象征了。它是一个非稳定性和涨落的世界”,“复杂性不再仅仅属于生物学了。它正在进入物理学领域,似乎已经植根于自然法则之中”。另外,经典物理学不仅把物质客体

理想化,而且把研究对象的条件也理想化,使研究的视野仅仅局限在可积的保守系统中。但是,物理世界并非都是可积的保守系统。它不仅普遍存在着耗散系统,而且大量的保守系统都是不可积的,可积的保守系统只是在十分有限的范围内存在。依照混沌动力学,系统只要离开可积的理想条件,就会出现诸如因果互相缠绕、处处都是不稳定性、不可预言的随机性等异常复杂的混沌行为。

所以,物理世界决非是简单性的世界,它内含着演化的自组织过程和自发混沌。当今呈现在我们面前的是:“那许许多多塑造着自然之形的基本过程本来是不可逆的和随机的,而那些描述基本相互作用的决定性和可逆性的定律不可能告诉人们自然界的全部真情。这就导致了对物质重新进行考察,不再是用那种机械的世界观描绘出的被动呆钝的观点,而是用一种与自发的活性相关联的新的见解”(尼科里斯和普里高津语)。与这种新见解紧密关联的是描述复杂性的词汇,诸如非线性、非平衡、不稳定性、涨落、分岔、无序等。它们已日趋成为当代物理学家常用的概念。探索和研究复杂性,现已成为指引物理科学认识的新航标。

### 七、由存在到演化

和统计性、随机性和不确定性相联系的演化思想是本世纪物理学思想进化的另一个重要的方面。

随着克劳修斯于1865年引入了一个与系统的具体要素无关的物理学态函数——熵,来表示热力学第二定律,以及相对论、量子力学和耗散结构理论的创立,物理科学开始了从存在到演化的转变。其中熵概念的提出和引入,已经可以用系统的熵变化来研究物理事件的进化及其方向性,时间从此不再是单纯的运动参量,而变成物理的事实了;在相对论和量子力学描述的图景中,潜能的存在、几率波的引进,科学从“实物中心主义”开始转向对“关系”、对整体的研究;尤其是耗散结构理论的诞生,解释了物理学和进化的生理学之间的矛盾。开放系统源于非平衡且通过涨落的有序,使热力学退化的

箭头转向了宇宙进化的方向。分岔理论又将“历史”引入了物理学。非平衡态物理学的进展,特别是对于动力学现代理论的探索,正大大加深人们对演化的理解。物理学从牛顿的力,到爱因斯坦的能,再到热力学的熵,越出“量”的守恒与转化的层次,而进入质的创造与演化的层次。在这个层次,时间之矢具有与系统生命不可分的动力学意义,它给以往的动力学时间加上箭头或方向,而耗散结构理论的创立标志着物质世界进化的成功,它揭示了系统进化的机制,热力学之矢转向了宇宙进化的方向。

新的时空结构以演化统一运动,以复杂性囊括简单性。当我们从新的时空概念出发,将世界看作是不不断演化的具有活性的机体,一切僵硬的东西溶化了,一切固定不变的界限消散了,规律也不再是唯一的、永恒的了。现在我们可以从一种描述过渡到另一种描述,可逆与不可逆、运动与演化不是截然对立的(如牛顿力学),也不是相互矛盾的(如统计物理和量子力学),而是协调一致的。

### 八、从静观到参与

在以牛顿力学为核心的经典物理学体系中,蕴涵着这样的客观性的信念:第一,客观的物理过程不依赖于我们的认识过程而存在;第二,可以被我们依原样来描述,认识同自在之物的符合程度或消除主体影响的程度便是真理的客观性的尺度。

但是,量子力学的研究则表明,研究方法本身改变了被观测的实体。如在亚原子水平,观测要求仪器与被观测实体之间有相互作用。这就是说,物理学家描述的状态本身是观察者与被观测对象之间的相互作用。观察结果依赖于测量方法。这就是惠勒所说的“在量子世界中,它不像一部秩序井然的机器。所得的答案依赖于所提出的问题、所安排的实验以及所选择的仪器。我们自身不可回避地要介入‘什么将要发生’这一问题”。由此可见,现象、事件呈现什么样子,同样也取决于我们对测量装置的选择,对所提问题及可能作出的回答的方式的选择。诚如海森堡所说:“我们所观测的不是自然界本

身,而是我们用来探索问题的方法所揭示的自然界。”

惠勒在其伟大著作《物理学与质朴性》中,曾用“20个问题的猜谜”游戏为例,形象地说明了上述生成过程。游戏的规则是有一个人作被试者,先退避一会儿,由其余的人(参试者)商定一个词,再把被试者请进来,由他发问猜这个词,参试者只能回答“是”与“否”。被试者能在20次提问之内猜中这个词为胜。游戏的另一种方式是参试者不事先约定任何答案,而只要求对所有问题的回答不能自相矛盾,通过提问和应答,不断缩小答案的可能范围,“逼”出答案来。这个游戏揭示了这样的认识过程:首先,认识是我们同自然界之间的一种对话——提问和应答;其次,我们以多种方式提问,自然界只以“是”或“否”来回答,但是它从不撒谎。

现代物理学家就是以这样选择的方式来向自然界寻求答案的。所不同的是:在爱因斯坦看来,这个游戏应以第一种方式来进行,猜谜的方式可以多种多样,但谜底却只有一个。量子力学揭示的却是第二种方式,谜底是在问答过程中自然生成的。自然界事先不存在什么确定的答案,我们选择的提问方式影响着答案的形成。

### 九、由实验物理到理论和计算物理

15世纪到19世纪末相继创立与发展的经典力学、经典热学、经典电磁学和经典光学,都是实验物理学。它们主要靠以少量的实验为基础的数学推理取得成功的。在19与20世纪交替期间,从实验物理学研究中分离出了理论物理学。一批物理学家专注于构造定律的演绎系统,如量子力学、相对论等,使得理论物理学作为一种研究模式逐渐明确起来。其中,普朗克是第一位理论物理学家,玻尔则创立了第一个理论物理研究所,而给理论物理以最明确的界定的是爱因斯坦。

1955年洛斯阿拉莫斯实验室LA-1940号研究报告的问世,标志着计算物理学的诞生。这篇题为《非线性问题研究》的著名报告,是关于弱非线性一维动力学系统的研究。策划和领导这个计算实验的是费米。由于本世纪50年

代初至60年代末,计算机先后被用来研究那些使用解析数学无法处理的复杂现象,这不仅开辟了数学实验之先河,而且直接导致了“混沌”、“孤子”、与“长时尾”三大计算物理学的伟大发现。并由此形成了计算物理学三种代表性的研究方法和研究领域:混沌物理学、孤子物理学和分子动力学。

所谓计算物理学,它以电子计算机为主要工具,但它的主要特征不在于“计算”,而在于通过计算对自然过程进行模拟实验,进而作出发现,并由理论物理学去作进一步的论证,由实验物理学去检验。从此就形成了由实验物理学、理论物理学和计算物理学三足鼎立的新格局。

### 十、由臻美到达真

海森堡指出:“美是真理的光辉”——其意也可解释为,探索者最初是借助于这种光辉,借助于它的照耀来认识真理的。”深刻地揭示了“美”与“真”之间潜在的、必然的有机联系,以及科学美感对于发现“真”的重要意义。面对着20世纪物理科学理论研究高度数学化和抽象化的倾向,物理学家们越来越认定理论物理的“创造性原则寓于数学之中”。崇尚和执著地追求数学美,几乎支配着现代物理学家的全部工作,他们往往“首先从一个大的对称性出发,然后再问为了保持这个对称性可以导出什么样的方程来。20世纪物理学的第二次革命就是这样发生的”(杨振宁语)。由于数学对物理学有着“不可思议的有效性”(威格纳语),“有时候如果你遵循你的本能提供的通向美的向导而前进,你会获得深刻的真理”(杨振宁语)。特别是近20年来,在寻找基本的动力学规律上的进展,没有一项不与规范对称性美有关。如现时的理论物理学家常常将寻找合适类型的李群作为其理论探索的主要工作,目的就在于建立起揭示微观粒子体系内禀对称性的漂亮模型。

总之,作为精密科学典型的物理学,是整个自然科学的基础。在临近世纪末的今天,回顾近百年来物理学思想进化的历程,对于思考21世纪科学的走向,无疑具有极其深远的意义。