

第一次伟大的综合

——纪念牛顿的《自然哲学之数学原理》发表三百周年

黄守学 陶蕙英

(河北省廊坊师范专科学校物理系)

从远古到十七世纪中叶,人类对自然奥秘的探索是在黑暗中摸索着缓慢前进的。

在这漫长的时间里,在力学范围内主要是记录了一些现象,积累和总结了一些观测结果和实验定律。主要有阿基米德关于重心、浮力和简单机械的研究;斯台文(S. Stevin)关于斜面上力的平衡及力的平行四边形法则;伽利略关于摆的等时性、落体与抛体的运动规律;第谷·布拉赫(Tycho Brahe)和开普勒对天体运动的观测和规律的研究;帕斯卡关于流体静力学的研究;惠更斯关于振子运动和碰撞现象的研究等。然而这些实验定律是离散的、孤立的,互相没有逻辑联系。因此在这一阶段还没有形成现代意义下的理论。

尤其严重的是从古希腊一直流传下来的“天上”与“地上”的绝对性,即使在哥白尼用太阳取代地球作为宇宙中心之后也没有根本改变。关于“天上”的运动虽然有了开普勒总结出来的行星运动的经验定律,但没有进行恰当的解释。它们三条逻辑上独立的规则,没有内在的联系。对于“地上”的运动虽然有了伽利略的观察和实验,然而它仅是描述性的,与因果关系还相差甚远。另外如潮汐现象,岁差现象,卫星的运动,磁石的吸引等都是人类的不解之谜。

“物理学上的一切困难,看来是在于这里。”^[1]这是1686年5月8日牛顿在他的《自然哲学之数学原理》(以下简称《原理》)一书的序言中宣布的。他找到了打开自然之门的金钥匙。次年(1687年)这一划时代的巨著问世了。牛顿在世时共出三版,1713年第二版,1725年第三版。中文本由郑太朴先生根据第三版译

出,于1936年由商务印书馆出版(全书共957页),至今已经半个世纪。

确实可以这样说,“整个科学史上没有一部著作在创新或思维力量方面可以和《原理》相媲美,在取得的伟大成就方面也是如此。没有一部著作使自然科学的结构发生如此重大变化……。这种情况只有在这样的场合下才能发生:实验和观察、机械主义的哲学和先进的数学方法被揉合成一个自身完整的、能够用任何可能的实验加以证实的思想体系。”^[2]

一、第一次找到自然定律的数学形式体系

在牛顿以前关于运动的研究,虽然有伽利略的惯性定律和落体定律等成果,但这种规律的特点是描述性的,它不能回答具有这种规律的原因,即没有揭示出运动中的因果关系,不能回答落体运动与其他各种运动之间的内在联系,它不是运动的普遍定律,只是运动的一个特例。牛顿的目标是要回答这样的问题:有没有这样一条简单的规则,对各种物体的运动来说,由它某一瞬间的运动状态可完备地计算出它的全部运动过程。即对任一个物体的运动,知其现在,就可知其过去和将来。在牛顿以前还没有任何的实际结果支持那种认为物理因果关系有完整链条的信念,认为这种未来先知只是幻想。牛顿意识到只有微分定律的形式才能完全满足因果性的要求,这是牛顿最伟大的理智成就之一。要回答牛顿的上述问题,必须精确描写运动状态在无限短的时间内如何变化。由于历史上不存在计算与物理概念有联系的变量数

学,牛顿为了他的需要,不得不发明一种新的数学工具——流量和流数的理论(即微积分)。

牛顿在《原理》第一篇第一章“论首末比之方法”中,用与求极限步骤有关的逻辑概念,定义了一些构造运动定律的微分量,如即时速度的概念。牛顿写道:“所谓最后速度,……是刚刚在到达该处时的速度,”是“将成为零的量之最后比,”此即后人称为导数或微商的概念。在这一章的最后,牛顿宣布:“以下我们将量看作由极微的部分所成,或不用直线而用无限小的曲线,则我们的意思,在指将成为零的小部分而非为不可分的部分,在用和数及比率之极限而非确定的部分之和数及比率,”“所以我以后为便利叙述计而用极小的,将成为零的或最后的量,则所指并非为其量已定的量,而为必须无限减小之的量。”

牛顿为了描述自然规律而发明一种数学,从而形成一门科学的数学结构。这在人类历史上是首创,而《原理》是文明史中的第一部典范。

有了描述运动的一些微分量,如即时速度、速度变率等还不能构造因果关系。他以惊人的洞察力,从静力学中取来力的概念加以推广,把它与运动的变化率联系起来。牛顿写道:“运动之变化¹⁾与动力之作用成正比,其所循方向则为力的施作用的方向”。牛顿又创造了“质量”的概念,并把它与定律中的比例系数联系起来。这样,牛顿就建立了能表征各种复杂运动因果关系的微分定律——第二定律。顺便指出,牛顿关于微分定律的概念成为后来物理学发展的决定性因素。当把牛顿定律应用于质量连续分布的系统时,必然导致偏微分方程的发现和运用。牛顿是第一个在他的声传播理论中揭示偏微分方程的人。这种方程为场论的定律准备了语言。所以爱因斯坦在评价牛顿力学时写道:“牛顿力学也为场论开辟了道路。”^[3]

除第二定律以外,作用与反作用定律的发现也是牛顿的伟大功绩。牛顿把这个定律称为第三定律。由于力的概念是从人类机体的活动中产生的,所以它本身就带有主动与被动,施主与受主的区别。它们在量上的关系如何,历史

上没有定量的成果。牛顿断言:“作用恒与其反作用相等,或二物体之相互作用恒等,方向则恰相反。”马赫在他著名的《力学及其发展的历史批判概论》(以下简称《力学史》)中,评价牛顿的功绩时写道:“在牛顿关于力学原理的功绩中,最重要的是作用与反作用,或者压与反压相等的原理。关于几个物体运动的相互作用问题,不能从伽利略的所有原理中得到解决,必须由新的原理来决定相互作用。”^[4]

牛顿进而作为定律的推广得到六个系。系1和系2论述力的合成法则;系3和系4是论述动量守恒定律;系5是论述伽利略相对性原理;系6论述在相同加速力作用下不影响物体间的相对运动。有了上述定律与系以后,牛顿用第一篇十四章和第二篇九章的篇幅研究了各种具体的运动。如圆锥曲线上物体的运动,物体的直线的上升及下降,动的轨道内物体的运动及回归点的运动,物体在已知面上的运动及摆锤运动,球形物体的运动,非球形物体的吸引力,在有介质阻力时物体运动的各种情况以及流体静力学与流体动力学等。

二、第一次伟大的综合

在牛顿以前,无论是东方还是西方,天与地的绝对区分是根深蒂固的,没有任何一项成果能说明天上的运动与地上的运动服从相同的规律。牛顿在这部著作的第三篇《论宇宙系统》中精辟地表述了他所发现的万有引力定律。他写道:“……使天体不能出离其轨道的力,我们名之为向心力。我们已知道此项力与重力是一物,所以此后即称之为重力,使月球不能出离其轨道的该项力之原因,……可推至于一切行星。”“一切物体均有重力,而且与其所含的物质之量成比例。……均与距离的平方成反比。”“物体之重量与其形状或组织无关。”

此定律不仅将开普勒的行星运动和伽利略的落体与抛体运动统一了,而且对历史上遗留多年的潮汐现象、岁差现象、彗星现象、月球交

1) 欧拉(1750年)指出此处应为“变化率”。

轨点的运动等都给以正确的解释,使得两个世纪中一切可以想到的疑难问题都得到解决.这一贡献称为物理学史上第一次伟大的综合.对此,英国自然科学史家 W. C. 丹皮尔(W. C. Dampier)写道:“亚里士多德以为天体是神圣而不腐坏的,和我们有缺陷的世界是不同类的,而今天人们却这样把天体纳入研究范围之内,并且证明天体也按伽利略和牛顿根据地面上的实验和归纳所得到的力学原理,处在这个巨大的数学和谐之内. 1687年牛顿的《自然哲学的数学原理》的出版,可以说是科学史上的最大事件,至少在近些年以前是这样的.”^[5]

这一定律的威力不仅体现在对已有经验现象的解释上,还体现在对人类未知现象的预言上.例如,牛顿理论对地球形状(两极扁平)的预言,被1735—1744年法国科学院组织的两个探险队实际测量所证实,推翻了在欧洲占统治地位的笛卡儿的观点(地球两极突出).1845年法国的勒维烈(J. J. Leverrier)和英国的亚当斯(J. C. Adams)各自独立地用引力定律计算和预言一颗未知行星的存在位置,1846年被德国的加勒(J. G. Galle)的观测所发现,命名为海王星.还有克雷洛(A. C. Clairaut)根据牛顿原理预言1759年彗星经过近日点……,等等.从此宣布了天体力学的诞生.分析力学奠基人拉格朗日写道:“牛顿是最幸运的;宇宙体系只能被发现一次.”^[6]

牛顿以其深刻的思维,在《原理》最后一节中提出引力的起源问题.他写道:“一直到现在,我已将天体现象及海洋运动用重力来说明了,但重力之来源如何,却没有说过.此项力必有一原因,贯彻至太阳及行星之中心,完全不受丝毫损失.……我还没有方法由此项现象以推及重力之根源,我亦不想设立一假设.”牛顿提出的问题在二百三十年后,由爱因斯坦在他的广义相对论中得到进一步的解决,它把牛顿的引力理论作为近似(称为“牛顿近似”)包括在其中了.目前正在发展中的量子引力理论,将使人类对引力的本质有更进一步的认识.

三、经典力学的大厦

在牛顿以前,无论力学、天文学和物理学方面的著作大都属于经验知识的记述,没有严密的逻辑结构.无论亚里士多德的《物理学》还是哥白尼的《天体运行论》以及伽利略的《关于托勒密和哥白尼两大世界体系的对话》等名著都是如此.从方法论上说,从前总是归纳法占统治地位.然而按近代观点看,单纯现象的罗列和经验定律的堆积不能成为科学,更不能成为理论.科学的逻辑结构是由概念、基本假设(亦称公理或原理)以及由逻辑推理得到的结论三者构成.其中作为基础的基本假设的来源,一方面是由科学家在庞杂的经验事实中间选取的具有普遍特性的成果来建造;另一方面,需要由科学家发挥高度的创造力,从逻辑结构的需要,大胆提出的新假设来建造.

牛顿的《原理》正是具备上述条件的理论结构——经典力学“大厦”.

牛顿在《原理》开头的“定义和注释”中给出了质量、动量、惯性、力等的定义和时间、空间、处所和运动等基本概念の説明;接着在《运动之基本定理或定律》中给出三个定理和力的平行四边形法则,构成了一组完整的公理体系;之后就是三篇共二十八章的一些定理和系以及它们的各种应用.结构完整,清楚醒目,在物理学史上算是首创.所以爱因斯坦把牛顿誉为“理论物理学的广博而合用的体系的首创者.”^[7]

四、第一个时空模型

关于时空无论是在中国还是在欧洲,自古以来就有种种学说.其中以亚里士多德所著的《物理学》一书中的论述较为完整,但这只能算是自然哲学.

牛顿在《原理》的“注释”中写道:“绝对的,真的及数学的时间,是自身在那里流,而因其性质,是等速的且不与外界任何对象有关系.”“绝对的空间,因其性质且无关于外物,恒为等的且不动的.”“处所为物体所占的空间之部分,就空间之相关可为绝对的或相对的.”“绝对运动是

物体由一个绝对处所至一个其他的绝对处所之转移。相对运动则由一相对的处所至其他一相对处所之转移。”牛顿在此不仅给出绝对空间的定义，而且还进而给出它的实验证明，即著名的牛顿转桶实验。“绝对运动与相对运动所由以分的根源，是离开运动轴之飞力。在仅仅为相对的旋转运动方面，此项力不存在。”即是否为绝对转动可由水面是否为旋转抛物面来加以判断。这里应强调指出的是，牛顿在这部著作中完全回避了时空维数问题。书中常提到欧几里得、亚里士多德和伽利略的名字，而他们在自己的著作中都强调过空间、时间的维数。不但如此，牛顿在《原理》中，全部的表述形式都与时空维数不发生直接关系。对此只要注意到下述事实：卡鲁查（Kaluza） 5 维时空理论重新引起人们的兴趣， 11 维时空的超引力理论在数学上达到精美的地步，隐蔽时空维的提出等，就会感到牛顿在那时对这个问题回避是很有远见的。

用现代语言来概括牛顿时空的性质：分离性、客观性、连续性、无限性、均匀性和各向同性等。牛顿空间是与 R^3 等度的黎曼流形，即三维欧几里得空间 E^3 。牛顿时间则看作与一维实数空间 R^1 等度的一维欧氏空间 E^1 。而牛顿时空则定义为牛顿时间与牛顿空间的黎曼直积流形 $E^1 \times E^3$ 。时空点 $(t, x) \in E^1 \times E^3$ 称为“事件”。 $E^1 \times E^3$ 到 E^1 和 E^3 的自然投影记为 T 和 S ，即

$$T: E^1 \times E^3 \rightarrow E^1 \text{ (牛顿时间),}$$

$$S: E^1 \times E^3 \rightarrow E^3 \text{ (牛顿空间).}$$

牛顿时空的物理模型是最后的惯性计算系，也可以形象地称它为“箱子空间”。

牛顿时空模型被绝大多数人所接受，但也受到了少数人，如莱布尼兹从哲学角度，马赫从科学角度的尖锐批判。正是马赫在他的《力学史》第二章第七节“对牛顿力学的总括的批评”中的观点，成为广义相对论的一个重要思想来源。爱因斯坦说：“可以十分正确地认为马赫是广义相对论的先驱。”^[6]

五、第一个科学工作者的纲领

当牛顿用他几乎毕生的精力完成了这部巨著的时候，他的领悟和感受无疑是丰富而深刻的。他把它高度概括地写在序言里：“物理学上的一切困难，看来是在于这里：由运动的现象以推论自然之力，再由此项力以说明其他的现象。……好多理由使我发生一种推想，以为此项现象均与某项力有关。”对此，爱因斯坦写道：“而且直到十九世纪末，它一直是理论物理学领域中每个工作者的纲领。……这个框子在将近二百年中给予科学以稳定性和思想指导。”^[7]在此纲领指引下，物理学的发展再不象牛顿以前的时代那样在黑暗中缓慢前进。纲领象一盏明灯照亮了物理学发展的道路。物理学得到突飞猛进的发展。牛顿自己把这个纲领用于光学，解释了光的反射、折射、色散等现象，创造了光的微粒说。1738年，伯努利将力学模型用于气体，推导出气体压强公式，奠定了气体分子动力论的基础。1785年库仑研究两个静止电荷相互作用力时，利用了与牛顿万有引力定律的形式的相似性，发现了以他的名字命名的定律。对此，杨振宁曾作了考查和研究。他写道：“我曾经把库仑的文章拿来看了一看，发现他写出的那个公式同实验的误差达到30%以上。估计他所以写这个公式，一部分是猜出来的，猜测的道理是因为他已经知道了牛顿的公式。”^[8]甚至麦克斯韦建立电磁场理论时，也是以力学概念为基础的。直到十九世纪末叶以后，理论物理学的概念有了革命性的变革，才越出了牛顿的框子，物理学到达一个新的发展时期。让我们用爱因斯坦在《自述》中的一段话来结束这篇纪念文章吧。

“牛顿啊，请原谅我；你所发现的道路，在你那个时代，是一位具有最高思维能力和创造力的人所能发现的唯一的道路。你所创造的概念，甚至今天仍然指导着我们的物理学思想，虽然我们现在知道，如果要更加深入地理解各种联系，那就必须用另外一些离直接经验领域较远的概念来代替这些概念。”^[9]（下转第620页）