



张双南,中国科学院高能物理研究所粒子天体物理中心主任,中国科学院大学教授。慧眼天文卫星、eXTP空间天文台、中国空间站HERD实验等项目以及中国载人航天天文与天体物理领域专家组首席科学家。

从天文学和物理学的发展理解科学方法的3次飞跃

张双南

中国科学院高能物理研究所粒子天体物理中心,北京 100049

摘要 科学已经成为人类文明的重要组成部分,科学的3个要素分别是科学的目的、精神和方法。理解科学方法对于理解科学和发展科学至关重要。从天文学和物理学的发展过程以及其中的若干典型和里程碑事件(包括近年来几次天文学研究领域获得的诺贝尔物理学奖)展开分析,将科学方法的建立和发展归纳总结为科学方法的3次飞跃,即希腊古典和希腊化时期“从形而上学到实在精确的科学”、科学革命时期“从观察思辨的科学到实验科学”以及现代科学时期“从证实的科学到证伪的科学”。

关键词 科学史;科学;科学方法

理解我们的宇宙为什么是这样,从古至今,一直是哲学、物理学和天文学的最重要主题。当然,随着哲学和科学的分离以及科学的分科,对宇宙的研究就主要成为天文学的任务,而近年来物理学也

越来越多地把宇宙及其天体作为研究对象。古希腊的哲学家认为自然是有本原的,也就是自然是由最基本的东西组成的,这就是最早的本原论^[1]。随着物理学的发展,科学观就从本原论发展到还原

收稿日期:2024-03-12;修回日期:2024-05-06

引用格式:张双南. 从天文学和物理学的发展理解科学方法的3次飞跃[J]. 科技导报, 2024, 42(10): 55-64;

doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2024.03.01110

论,提出了万有理论和层展论(也称为涌现论),宇宙观也丰富多彩,包括单一爆炸起源和多重宇宙、平行宇宙等。本文通过天文学和物理学发展的若干典型事件,理解科学方法的发展和建立。文中所采用的科学史材料,特别是从古希腊到牛顿的科学史,主要来自诺贝尔物理学奖获得者斯蒂芬·温伯格的著作《给世界的答案:发现现代科学》^[1],下文不再特别说明。

1 科学方法第1次飞跃:从形而上学到实在精确的科学

归纳总结希腊古典和希腊化时期的科学方法,笔者称之为从形而上学到实在精确的科学,即从希腊古典时期亚里士多德的形而上学到希腊化时期以阿基米德和托勒密为代表的实在精确的科学。

希腊古典时期的科学在亚里士多德达到高峰,产生了形而上学的理念,开始追问自然规律,通过观察自然来理解自然现象背后的本质,也就是透过现象看本质。但是那个时候所谓的科学主要是在哲学层面思考自然,通过观察来进行思考,并不注重对他们发现的规律进行验证和应用。当今看起来亚里士多德的很多论断是荒谬的,但是竟然能够维持和统治科学界2000多年,直到伽利略时代才被彻底改变。

亚里士多德曾担任亚历山大大帝的私人导师。在亚历山大年轻时,亚里士多德教导他哲学、逻辑、伦理学和自然科学等知识。亚历山大大帝在亚里士多德的教导下接受了广泛的教育,这对他成为一位伟大的征服者和统治者产生了深远影响。亚历山大大帝是古代马其顿帝国的国王,也是古希腊世界的征服者和统一者,开创了亚历山大帝国的辉煌时代。他的征服行动使得希腊文化与东方文明相融合,也为后来的罗马帝国和拜占庭帝国的兴起奠定了基础,对世界历史产生了深远的影响。亚历山大大帝于公元前323年去世,第2年亚里士多德去世,这标志着希腊古典时期的结束。

到希腊化时期,情况有了明显变化。希腊化时期科学发展的主要变化是科学开始分科,研究具体

的、不同类别的、实在的现象,不再追求比较泛泛的、统一的背后的道理,于是就产生了很多技术等方面的应用。主要有2个比较突出的代表性人物。

希腊化时期科学发展的一个代表人物是天文学家托勒密,以他为代表的天文学家使得希腊化时期最后的阶段对宇宙运行规律的研究步入精确的科学时代。这个时期的科学研究,不但注重对科学规律的验证,同时已经开始基于发现的规律进行预言。

在介绍托勒密的天文学贡献之前,不得不提及柏拉图的家庭作业,也就是柏拉图制定了一个天体运动的原则,即天体必须在圆形轨道上做匀速规则的运动^[2]。为什么柏拉图要求天体的运动必须是匀速和完全规则的圆周运动呢?这涉及柏拉图的美学观念,这是美学对科学发展产生影响的一个重要例子。柏拉图向数学家们提出了问题:怎样的匀速和完全规则的圆周运动的组合可以作为假设来说明行星的运动?柏拉图的学生亚里士多德、希腊化时期最伟大的天文学家托勒密和科学革命的开创者哥白尼都交了作业,他们都是遵循着柏拉图的这个原则来做的。

亚里士多德交的家庭作业就是同心球壳的宇宙学模型,这是地心说最主要的理论模型。在这个模型中,每一个天体都被固定在以地球为中心的某一个球壳上绕地球正转或者反转。柏拉图同时代的这些数学家以及后面的人一直都在微调同心球壳模型,增加模型的复杂度来解决与观测的矛盾,那时候已经知道需要把模型和观测的数据结合起来,到亚里士多德的时候就形成了非常复杂的同心球壳模型。

但是同心球壳模型和观测结果始终不吻合,一个主要问题是行星的亮度问题。当时认为所有的行星都自己发光,没有认识到是反射太阳的光,由于处于同一个球壳上的行星离地球的距离是一样的,那么既然行星在同心球壳上它的亮度就应该不变。但是实际并不这样,一颗行星有时候看起来亮一些,有时候暗一些。这时候,天文学家们逐渐认识到理论模型不仅仅是在原则上自圆其说,而哲学只需要实现原则上的自圆其说就行了,并不需要精

确、定量的自圆其说,这是科学和哲学的主要区别之一。当然,当时精确地描述天体的运动有很多需求,如航海、旅行、占星术等就需要这样的理论。这正是科学开始有了实际用途之后必然的发展。

但是最终对天文学家产生特别大影响的还不是行星的亮度,而是行星的逆行危机,因为现在知道,我们看到的行星的亮度,既取决于行星离地球的距离,也取决于行星和太阳的距离,以及行星、地球和太阳三者的几何关系,相当复杂。因素太多,就不容易抓住主要矛盾,这是行星的亮度问题没有

对天文学家产生特别大影响的主要原因。

另一方面,既然在一个同心球上,在这个球面上的所有的天体看起来应该只往一个方向走,然而有时候看起来天体的方向是反着的,这就是逆行危机。这就不仅仅是定量的微调问题了,而是必须对同心球模型做出根本性的修改,才有可能符合观测的结果。为了解决这个问题,后来就形成了一个体系非常庞大的托勒密天文学,也就是托勒密的本轮说(图1^[2])。



图1 托勒密提出了“地心+本轮说”模型,解释行星的逆行现象

在这个理论模型中,天体不能只做简单的圆周运动,要稍微复杂一些,在绕着地球做圆周运动的同时,还绕着自己的一个中心转动,即自己有一个轮子,称为本轮。这样就可以解释观测数据了。他通过不断地调整这些轮子的各种参数,最后形成了非常复杂的本轮模型,可以非常精确地描述太阳系内行星的运动。从精确的实测天文学的角度看,这是一个非常成功的科学模型,这也是希腊化时期最杰出的科学成就。这也是笔者认为托勒密是希腊化时期“精确”科学研究代表的原因。

托勒密是希腊化时期“精确”科学研究的代表,而另一个代表性人物阿基米德则是“实在”科学研究的代表。

阿基米德原理被人们熟知,即当物体浸没在液体中时,所受到的浮力大小等于物体排开的液体的

重量,方向与重力相反。这一原理可以在牛顿力学理论框架中加上对流体性质的基本假设推导出来。但是阿基米德是在牛顿理论提出之前大约2000年就发现了浮力定律,直到现在还都在使用阿基米德的浮力定律,这个定律被广泛应用于船舶设计、水下工程等领域。阿基米德的科学成就还包括杠杆原理和机械、滑轮和螺旋、阿基米德螺线、圆周率面积和体积公式的证明,配得上无与伦比的赞美。

从古希腊开始的科学到希腊化时期,以亚里士多德为代表的形而上学的科学,就发展到了以托勒密和阿基米德为代表的精确实实在的科学,这是科学方法的第一次飞跃。

从古希腊的泰勒斯到希腊古典时期的亚里士多德,形成了形而上学的科学思想,中间经历了3个多世纪,从亚里士多德到阿基米德、托勒密,实现

了从形而上学到实在精确科学的科学方法的飞跃,中间就只有不到2个世纪,从历史的角度,科学方法的第一次飞跃相当短暂,这也是笔者称之为飞跃的原因,与历史的突然变化、物理学的相变有类似之处。

2 科学方法的第2次飞跃:从观察思辨的科学到实验科学

古希腊的科学,包括希腊古典时期和希腊化时期,实现了科学方法的第一次飞跃。这个时期科学研究的主要方法是观察思辨,即通过仔细观测,加上严密的逻辑思考,总结归纳科学规律。

物理学家温伯格对这一段观察思辨的科学评论道^[1]：“柏拉图认为自然科学应依靠纯粹的推理得到,这一不切实际的古老目标成为科学进步之路上的阻碍,因为自然科学的进步只能基于认真观察后的仔细分析。”从柏拉图到亚里士多德是一个主要的进步,亚里士多德的物理学是通过观察自然而得到自然规律,所以亚里士多德突破了柏拉图的纯粹推理。

但是亚里士多德仍然反对做实验,他认为实验改变了自然,得到的不是关于自然的规律,这个理念主导或者说阻碍了科学发展大约2000年。一直到伽利略的科学革命的时代,实验科学才开始得到系统的发展和应用。

哥白尼提出了日心说,但是他没有办法说服他人接受他的学说,他反复说他的学说比托勒密的学说更加简练也就更美,但是说服不了别人,毕竟不同人的审美观不同,审美观本身不是自然规律^[2]。而托勒密的地心加本轮说是从亚里士多德那里继承过来又加上了重要的改进,描述观测现象不但很精确而且一些预言能够被验证。哥白尼的理论对天体运动的描述没有托勒密的理论描述得好,就更加难以令所有人信服。

关键性的变化是伽利略发明了天文望远镜,通过前所未有的精确天文观测,证明了地心说无法通过进一步的修补自圆其说(关于是谁突破了“地心说”,科学史界有不同的说法,如哥白尼、开普勒、伽

利略和牛顿。这里采用的是温伯格的观点)。以前是一点一点地修改,出现了不符合原有的本轮参数的观测结果就修改,不断地修改本轮的参数就变成了当时的天文学家的主要工作。伽利略证明了无法通过进一步修改这些天体的本轮的参数来解释新的观测结果,必须彻底打破本轮说的框架,于是证明了日心说的正确性。

当今任何一个不管是做理论还是做观测的天文学家都知道,只有通过建造越来越先进的天文仪器、做越来越精确的天文观测,才能够促进天文学的发展,仅仅做自圆其说的思辨研究不能带来对宇宙规律更深刻的理解。正是通过建造新的更先进的天文望远镜等天文仪器,使天文学进入新天文发现的年代。而在伽利略之前,天文发现非常少,天文学的研究主要是试图来解释已经知道的那几个星星怎么运动。

因此,从伽利略开始,造越来越先进的天文仪器理解宇宙,使天文学脱离了纯粹的思辨,进入新天文发现和为解释新发现而建立基于科学理论的物理(和化学)模型的新时代。从此,通过观察和实验发现新现象、为了解释新现象而建立新的理论和模型,就成为科学发展的主要模式。因此,伽利略对科学方法更重要的贡献,是建立了现代实验科学。

研制建造望远镜当然可以说是实验,毕竟在研制望远镜的过程中需要做很多实验,但是更重要的是伽利略真正建立了实验室科学,这是对亚里士多德学派的最大突破。用天文望远镜毕竟仍然是观测,和亚里士多德的理念没有本质区别,仅仅是观察得更加精确罢了,但是在实验室里做实验则是一个根本的突破。

虽然伽利略并不是历史上第1个实验家,但是对后世影响最大的实验家。历史上做过实验的人很多,生于约公元前480年中国的墨子就是一个出色的实验家,他做实验比伽利略要早得多(历史上记载的“墨子”的实验,可能并非都是墨子本人做的,很可能是墨家的集体贡献)。墨子确实做过实验,而且通过小孔实验发现了光沿直线传播,还研究了光学的反射规律。如果从现代实验科学的观

点来看,墨子很认真地做过科学实验,也取得了重要的结果。然而遗憾的是,墨家学派后来彻底没落,并没有在历史上产生重要影响。虽然说墨子本人做过这些事情,但是后来完全失传了,不但西方科学的发展没有受益于墨子的成就,就是我们中国人今天学习的系统的光学知识也不是来自墨家学派,而是来自西方。

至少在墨子之后 500 年,托勒密也做了关于光的反射实验,这反映了墨子或者墨家在科学历史上非常领先。托勒密不仅通过观测天文现象来修补他的本轮说,也研究了光的反射和折射规律,所以他不仅是一位天文学家,也是一位出色的实验家。但无论是墨子还是托勒密,他们的实验都没有成为当时科学研究的主流方法,都随着历史的发展被抛弃了。历史的发展并不是线性的(如,出现了一个好的思想或者结果就顺着发展下去),可能昙花一现,也许是因为太超前,也许是因为和当时社会的文化或者政治不符合,总之因为各种原因就没有继续发展,在历史上就消失了。

也许是伽利略生逢其时,那个时候科学大发展的条件恰好成熟了,恰好是文艺复兴时期,可能人的思想开始全面地得到解放,可以接受对科学和哲学的“大神”亚里士多德的批评了。所以直到 17 世纪,伽利略的一系列科学实验,就成为牛顿的伟大成就最重要的先决条件。因此,虽然在伽利略之前有人做过实验,方法也很接近伽利略的方法,和现在的实验方法也有共同之处,却对科学发展没有产生影响。但是伽利略以及他开创的科学实验却产生了重大的影响,而且引发了科学革命。

有人说科学革命应该从哥白尼算起,这当然也可以,因为哥白尼的日心说是对亚里士多德的地心说的彻底“背叛”,从哥白尼到开普勒再到伽利略,可以说是一气呵成,完成了对亚里士多德的全方位的突破,科学革命从此开始。关于伽利略对科学方法的贡献,爱因斯坦评价:“伽利略的发现以及他所用的科学方法,是人类思想史上最伟大的成就之一,而且标志着物理学的真正的开端!”的确,在伽利略之前有零星的科学成就,但是直到伽利略才开始真正影响了科学的发展。爱因斯坦也评价了伽

利略的思想突破:“伽利略对科学的贡献就在于毁灭直觉的观点而用新的观点来代替它,这就是伽利略的发现的重大意义。”也就是说,直觉并不可靠,通过观察和实验揭示的东西才是更重要的。从这个角度讲,伽利略虽然推翻了亚里士多德的具体的科学理论,但是也实现了亚里士多德的科学理想,因为透过现象看本质正是亚里士多德创立的形而上学的核心,所以伽利略才是真正的形而上学主义者。

有人可能说,当前的天文学也仍然只是观测,毕竟人类的活动目前仅在太阳系以内,对宇宙的研究是无法做实验的。这仅仅是表面现象。事实上,天文学研究的数据虽然是“观测”得来的,但是和“实验室”科学研究密不可分,这表现在以下几个方面:1) 天文望远镜的研制需要大量的实验;2) 为了解释观测的数据,需要在地面实验室做大量的实验,如测量各种反应截面,甚至在实验室重现观测的结果,现在已经形成了一个天体物理的分支“实验室天体物理”;3) 即使是在天文学的观测中,也采用实验的方法,如“对照样本”“预测和检验”;4) 在地球实验室中,很多物理条件都难以实现,如极端引力、极端磁场、极端密度、极端能量、极端爆发、极端尺度等,在这些极端物理条件下检验和发展物理学理论,就只能利用宇宙的“天体实验室”进行,这就是笔者的主要研究领域之一。

从哥白尼到伽利略,科学方法的发展完成了第 2 次飞跃,也就是从观察思辨的科学到实验科学。这是科学革命时期的一个高潮。

3 伽利略和牛顿对科学方法的贡献

当今评价一个物理学家甚至所有科学家的水平时,最重要的判据之一是直觉和洞察力。伽利略做实验的时候,表现出了非常深刻的物理直觉和洞察力。如伽利略的实验包括抛射物的运动和自由落体的运动(图 2^[4]),由于条件所限,这些实验当时都只能在空气中进行,空气的阻力和扰动会影响实验结果。如果把这些空气中实验所得到的结果去拟合得到各种各样的经验公式,很可能发现不了真



图2 传说伽利略在比萨斜塔做自由落体实验,尽管目前并没有证据表明伽利略在比萨斜塔做过这个实验,但是他留下了很多详细的自由落体实验记录^[1]

正的物理规律。而伽利略最后得到的抛射物和自由落体的规律却与没有空气阻力和扰动情况下的规律是一致的。再如,他通过单摆实验发现了单摆的规律,即单摆的周期和振幅、重量都没有关系,只和长度有关。他做实验用的材料显然不是理想的材料,而且是在空气中进行的,所以必然会受到材料的性质、摩擦力、空气阻力等各种影响,但是他竟然得到了用理想材料而且没有空气阻力和扰动情况下的单摆的规律。因此,尽管伽利略的实验中有各种干扰因素,但是他通过实验和计算最后得到的结论竟然都和这些干扰因素没有关系,他能够忽略细节和容忍实验的不精确,从而直接理解了那些看起来复杂的现象背后的本质,这就是物理直觉和洞察力,能够去繁化简,直达本质,伽利略在这个方面达到了极高的境界。

现在回头看伽利略取得的结果,基本上没有错误,包括他的惯性定律和被牛顿归纳的牛顿第二定律。可能唯一有一点错误的,就是他对于惯性的本质认识得不够清楚,因为他认识到地球是个球形,所以他认为惯性运动必须是在球面上的运动。从这一点可以看出来,他还是认为最自然的运动是圆形的运动,所以他认为在圆周运动上面的运动是惯性运动,他还是没有脱离柏拉图的作业、没有突破柏拉图的理念。

伽利略不仅仅开创了系统的科学实验方法,而且也是假想实验(也称为思想实验)的高手。通过假想实验,伽利略推翻了亚里士多德统治了西方物理学大约2000年的3个标准理论,也就是物体越重下落速度越快、地球是静止的以及力是物体运动的原因。在伽利略的结论中,其实包含或者隐含了对当今物理学极为重要的4个原理:牛顿第一定律、牛顿第二定律、相对性原理和等效原理。可以看到,伽利略不仅仅是实验家,他的逻辑思维非常严密,在他之后只有爱因斯坦又把假想实验的威力发挥到了登峰造极的地步。爱因斯坦对伽利略的评价远高于科学史上的其他人。

伽利略对后世科学家的影响极为深远,特别是为牛顿建立他的理论体系奠定了最为重要的基础。伽利略于1642年1月8日去世。第二年,1643年1月4日牛顿横空出世,于1687年发表了他的巨著《自然哲学的数学原理》^[2],建立了人类历史上第1个系统的自然科学理论,科学革命达到顶峰。

在《自然哲学的数学原理》中,牛顿用的是希腊几何的公理化方法,因为当时普遍接受的逻辑思维方法就是建立公理,然后进行推导。牛顿用这种方法推导出了开普勒三定律,彻底消除了学术界对开普勒定律和日心说的怀疑。从这里可认识到科学理论具有演绎能力的重要性,如果一个科学理论不能用来推导就不能用来计算,那就没有什么用,就不是合格的科学理论,这就是科学方法里面的逻辑化和量化,因为演绎就是“逻辑+定量”,并不是只有逻辑的论证。

更加重要的是,牛顿从更基本和更深刻的原理出发,也就是从当今所说的牛顿三大定律和万有引力定律出发,演绎推导得到了当时已有的经验规律开普勒定律。当时大家只知道开普勒定律能够精确地描述太阳系内行星的运动,但是并不知道为什么会有开普勒定律。牛顿建立了一种科学研究的范式,即从更基本和更深刻的原理出发,演绎推导出或者解释已有的规律,这种范式成为当今科学研究的最高追求。

后世的学者利用牛顿的理论对海王星的预言和发现,是人类历史上第1次预言和发现了一个以

前完全不知道的天体,这比推导出已知的规律或者解释已知的现象更厉害。可以把已知的事情看作“靶子”,能够想尽办法去瞄准它,打中了也是马后炮而已;但是预言一个未知的事情就无从谈瞄准了。预言和发现海王星,确立了科学方法必须实证化。

逻辑化、定量化和实证化,是当今判断一个理论和学说是否属于科学的关键^[2],这是牛顿本人以及牛顿的理论对科学方法做出的系统的贡献。其中,利用伽利略开创的实验科学通过逻辑化和量化对科学理论开展实证,是科学方法的第2次飞跃,也就是从观察思辨的科学到实验科学。通过这样的科学方法,发生了科学革命,为人类带来了现代科学,从此人类文明的发展进入一个新的时代。

4 从最近的两次物理学诺贝尔奖理解科学方法的发展

2015年,美国激光干涉引力波天文台首次发现了引力波爆发事件,这个事件是2个黑洞撞在一起产生的^[5]。2016年2月,发布了这次重大发现的新闻,2017年10月,诺贝尔物理学奖委员会宣布了当年的诺贝尔奖(简称诺奖)奖励给激光干涉引力波天文台的3位发起和领导者^[6]。在诺奖宣布之前,有不少科学家评论这次的引力波发现,不但是证实了爱因斯坦于1916年预言的引力波的存在,也确凿无疑地证明了黑洞的存在。实际上,就有人预测了2017年霍金应该获得诺奖,因为此次发现的引力波,也验证了霍金的黑洞面积不减定理。当然,令人遗憾的是,那次霍金并没有获奖。

无论如何,在学术界看来,这次发现了2个黑洞撞在一起发出了引力波,形成了一个新的黑洞。意外的是,这次的诺奖颁奖词,只提到奖励他们对发现引力波所做出的关键性贡献,而没有提黑洞。有些善意的科学家就猜测,可能是诺奖委员会觉得黑洞的发现本身也很重要,说不定后面会给黑洞的发现单独发诺奖。

果然,仅仅3年之后,2020年的物理学诺奖(图3)^[7]就直指黑洞。该奖的一半是奖励利用广义相对论理论可靠地预言了黑洞存在的彭罗斯教授;另外

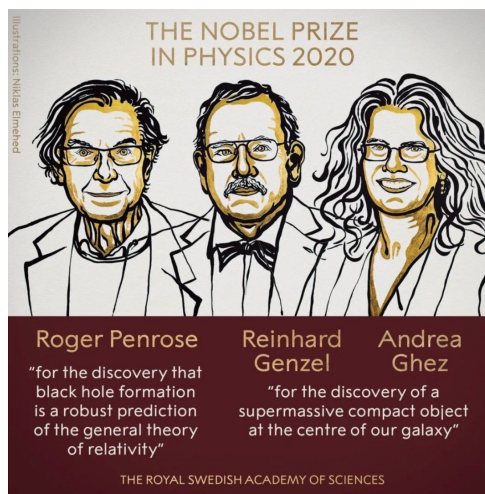


图3 获2020年诺贝尔物理学奖的3位科学家

一半是奖励发现了银河系中心的超大质量黑洞的2位科学家,他们分别带领了欧洲和美国的团队,对银河系中心黑洞的性质进行了精确的测量。这些天文学家,从20世纪八九十年代就开始精确地观测银河系中心每一颗恒星的运动,他们发现,这些恒星都围绕着银河系中心运动,说明银河系中心必然有一个质量非常大的天体,根据天体物理的理论,那应该是一个黑洞。

然而,令学术界又一次困惑的是,这次的颁奖词也没有提到黑洞,只说他们发现了银河系中心的超大质量物体。难道诺奖委员会认为这不是黑洞吗?或者诺奖委员会认为,目前的观测资料虽然和彭罗斯教授用广义相对论理论计算的黑洞的性质一致,但是仍然不足以证明是黑洞?如果诺奖委员会会有这样的疑虑,为什么还要颁发诺奖?实际上,尽管在该颁奖词中没有提到发现了银河系中心的黑洞,但诺奖物理学委员会在该研究的新闻发布中表示,对银河系中心的那个“超大质量致密天体”目前的唯一已知的解释,就是黑洞(“A supermassive black hole is the only currently known explanation”)。既然如此,为什么不在颁奖词里直接说“黑洞”呢?

这次诺奖之后,很多朋友都关心这个问题。笔者认为,诺奖委员会并不怀疑这些科学家的研究成果,也不认为学术界称之为黑洞有什么问题,这就是为什么这次诺奖的一半奖励给在广义相对论框

架下非常可靠地预言了黑洞的存在,而且在新闻发布中也承认“黑洞”就是对它“目前的唯一的已知”解释。诺奖委员会没有提这些科学家“发现”了黑洞,这符合现代科学的研究方法,这涉及科学方法的第3次飞跃:从证实的科学到证伪的科学。观测和测量的精度是有限的,不可能穷尽所有的可能性,未来也可能会通过更加精确的观测发现这些天体的性质和广义相对论预言的黑洞不一致,所以才非常严谨地在颁奖词中不提他们发现的是黑洞。

5 科学方法的第3次飞跃:从证实的科学到证伪的科学

进入现代科学时代之后,科学方法就发生了第3次飞跃,即从证实的科学到证伪的科学。这主要是卡尔·波普尔(图4)的影响,他是一个伟大的科学哲学家,主张放弃传统的归纳,强调经验证伪的科学方法原则,其中最主要的一个理念就是科学理论永远不能被证明是正确的。而在他提出这个理念之前,大家做科学研究的目的是通过归纳总结,提出一个科学模型或者科学理论,再证明该模型或理论的正确性。如,根据牛顿的理论,预言了海王星的存在,而果然发现了海王星,就认为牛顿理论是正确的,之后就放心地使用牛顿理论来设计大楼、桥梁、火箭等,每一次成功地应用了牛顿的理论,都更加证明了牛顿理论的正确性。然而,波普尔指出,不管你多少次在多少情况下验证了牛道理

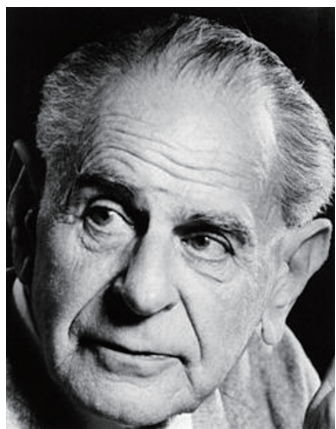


图4 卡尔·波普尔(1902—1994),科学哲学家,他主张经验证伪的科学方法原则

论的预言,都永远不能证明这个理论是正确的,因为你不可能穷尽所有的可能性去验证,而我们也不可能像证明数学的定理那样,从逻辑上证明这个理论在所有的情况下都是正确的。数学和其他科学理论有所区别。数学的定理证明,指的是在给定的公理化假设之下去证明这个定理,而公理是不需要证明其正确性的。然而,科学理论虽然也需要假设,但是并不能先验地认为假设就是对的,只能从科学理论演绎计算的结果和实际观测的比较,来理解这个理论假设的合理性。正是这样的原因,导致我们永远也不可能证明某个科学理论的绝对正确。

那怎么办呢?波普尔就指出,应该去证伪,即证明这个理论是不对的,去改进、修改甚至推翻这个理论。为了理解这一点,可以回顾一下,为什么广义相对论是比牛顿的万有引力定律更好的引力理论?爱因斯坦当年就认识到,虽然牛顿的理论正确地预言了海王星的存在,让大家觉得牛顿的理论是正确的,但是并不能很好地解释有些天文观测现象,如水星近日点的反常进动(图5^[4])。爱因斯坦认为,肯定是牛顿的理论在这种情况下失效了,即牛顿的理论被观测证伪了,这带来了进一步发展引力理论的机会。如果只考虑和牛顿的理论一致的结果,也就是证实牛顿理论的结果,永远也不可能知道牛顿的理论有失效的情况,也就不可能改进引力理论。这就是爱因斯坦当年提出广义相对论理论的主要动机之一。

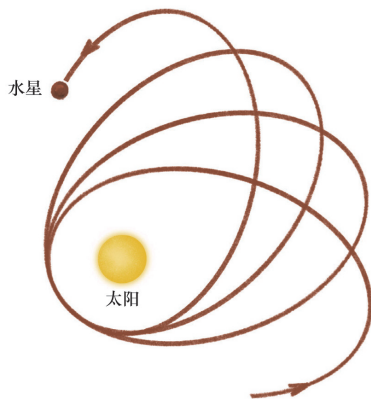


图5 水星近日点的进动

爱因斯坦建立了广义相对论理论之后做的第一个检验,就是计算水星近日点的进动,得到的结

果和观测结果完全一致。那还不能证明爱因斯坦的广义相对论是正确的,因为在这之前,水星近日点的进动已经知道了,爱因斯坦的检验只能说明,在这件事上他的理论比牛顿的理论表现得更好,但是仍然不能证明广义相对论在所有情况下都是正确的。他的预言一件大家还不知道的事情,如果观测的结果和他的预言不一致(即他的理论被证伪

了),那就说明他的理论仍然有问题。既然他的理论能够做出能被检验的预言,我们就说广义相对论理论具有可证伪性,也就是原则上是有可能被证明是错误的。他预言了光线的引力偏折(图6),观测到的结果和预言一致,所以他的理论尽管具有可证伪性,但是这次没有被证伪,人们就相信了广义相对论的确是比牛顿的理论更先进。

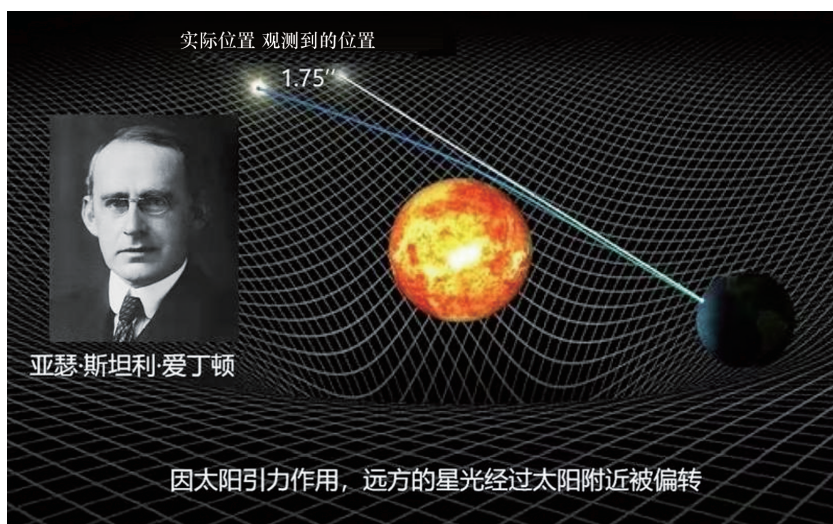


图6 1919年爱丁顿率领的远征观测团队验证了爱因斯坦的引力光线偏折预言(图片来源:百度网)

波普尔后来说,爱因斯坦做的这件事,深深地影响、启发了他,他才提出了科学理论的可证伪性原则。如果一个理论是科学理论,那就必须具有可证伪性,也就是说,能够做出明确的而且可以被检验的预言,如果检验的结果和预言不一致,那就说明该科学理论需要改进、修改甚至彻底颠覆。根据波普尔的可证伪性原则,如果一个理论不具有可证伪性,那就不是一个科学理论。这是目前科学界尤其是天文学界和物理学界比较普遍接受的观点。现代科学是从证实的科学到证伪的科学,证伪比证实更重要,因为只有证伪,才有可能改进理论,甚至发展出新的理论,

至今还没有发现违反狭义相对论和广义相对论所预言的观测或实验证据,就连最具挑战性的引力波预言也已经被观测证实了。狭义相对论和广义相对论还可以做出很多其他的尚未被证实的预言,还可以继续找证据去证伪相对论。并不是说找到了就可以把相对论推翻,我们的目的是通过证

伪,找到相对论理论的适用范围,然后发展出适用范围更广的新理论。事实上,现代科学已经很少发生完全粗暴地推翻现有理论的情况了,主要是要找到已有理论的边界(适用范围),然后再发展出适用范围更广的新理论。

6 结论

对希腊古典和希腊化时期的科学方法与发展做了归纳总结,称之为从形而上学到实在精确的科学,其中形而上学的代表人物是亚里士多德,实在科学的代表人物是阿基米德,精确科学的代表人物是托勒密。总结了从哥白尼到伽利略的科学方法的发展,笔者认为在这个时期完成了科学方法的第2次飞跃,也就是从观察思辨的科学到实验科学。系统的实验科学的代表人物是伽利略,这是科学革命时期的一个高潮,而科学革命的集大成者是牛顿。牛顿本人和牛顿的理论对科学方法做出了重

要贡献,即科学方法的逻辑化、定量化和实证化。实证包括证实和证伪,进入现代科学时代之后,科学方法的发展就发生了第3次飞跃,即从证实的科学到证伪的科学,这主要是卡尔·波普尔的影响,而波普尔则是受到了爱因斯坦对引力的光线偏折预言的启示。

最近的两次奖励天文学研究成果的诺贝尔物理学奖的颁奖词说明,诺贝尔物理学委员会相信波普尔的科学理论的可证伪性原则。目前科学界基本接受可证伪性原则。然而,值得指出的是,可证伪性原则是非常反直觉、反常识的,并不是每一个科学工作者都很自觉地在科学研究中坚持这一原则。在我们的科学教育中,几乎很少或者完全不提这一原则,导致绝大多数学生即使是完成了博士研究也从来没有听说过。这是在科学教育中不注重科学史和科学方法所造成的。当然,也有些学者(包括有些研究宇宙演化和大统一理论的研究者)主张抛弃科学理论的可证伪性原则,因为有些很严肃、很重要的理论就不具备可证伪性,如超弦理论、多世界理论、平行宇宙理论等,至少目前还不知道如何去证伪,这对科学方法带来挑战,说明科学方法也还需要发展。

“从证实的科学到证伪的科学”是说,在证实的基础上需要证伪,这是以前所忽略的。同样,“从形而上学到实在精确的科学”并不是说就不要哲学的

思考了,就不需要透过现象看本质了,而是“实在精确”成为主要特点;“从观察思辨的科学到实验科学”并不是说不需要“观察思辨”了。文中用“从……到……”只是为了强调科学方法的发展。

本文不是对天文学史、物理学史、天文研究方法和物理研究方法的系统和详细总结,因此并没有涉及现代天文学和物理学的细分学科,既没有涉及天文学史和物理学史的全貌,也没有涉及蒙卡计算、统计方法、数值计算等方面。这就不是一篇文章可以覆盖的了。

参考文献 (References)

- [1] 斯蒂芬·温伯格. 给世界的答案:发现现代科学[M]. 凌复华, 彭婧璐, 译. 北京: 中信出版社, 2016.
- [2] 张双南. 天文学与现代自然科学[J]. 中国国家天文, 2019(9): 14-55.
- [3] 张双南. 科学方法与美学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2022.
- [4] 张双南. 极简天文课[M]. 北京: 科学出版社, 2021.
- [5] Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. Observation of gravitational waves from a binary black hole merger[J]. *Physical Review Letters*, 2016. doi: 10.1103/PhysRevLett.116.061102.
- [6] The Nobel Prize in Physics 2017[EB/OL]. [2024-03-12]. <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2017/summary>.
- [7] The Nobel Prize in Physics 2020[EB/OL]. [2024-03-12]. <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2020/summary>.

Understanding the three giant leaps of scientific methodology from the development of astronomy and physics

ZHANG Shuangnan

Particle Astrophysics Division, Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Science has become an important constitution of human civilization, and the three key elements of science are its purpose, spirit and methodology. Understanding scientific methodology is very important to the understanding and development of science. In this article, the establishment and development of scientific methodology are summarized as three giant leaps from the development of astronomy and physics, focused on several typical and monumental events, including the several recent Nobel Prizes in physics awarded to research achievements of astronomy. The three giant leaps are “from metaphysics to actual and precise science” during the ancient Greek and Hellenic Greek periods, “from observing and speculating science to experimental science” during the scientific revolution, and “from confirmation to falsification” in the modern science, respectively.

Keywords history of science; science; scientific methodology ●



(责任编辑 王丽娜)