



# 探究“月地检验”及其教育价值

张天耀

(重庆市巴蜀中学 重庆 400013)

(收稿日期:2020-05-04)

**摘要:**针对学生对人民教育出版社高中物理教材中关于“月地检验”论述方式的困惑,文章以牛顿的《自然哲学之数学原理》一书为基础,探究了牛顿对“月地检验”的论证过程,提出了一种新的教学思路,并论述其教育价值.

**关键词:**月地检验 教育价值 自然哲学之数学原理

得出万有引力定律的过程中,非常关键的一步是证明使月球保持在圆轨道上的力和地面附近物体的重力是同一种力,即“月地检验”.讲授这一部分时,应该如何引导学生去思考,不同的教材有不同的处理方法,但是人教社最新版的教材样本让笔者感到困惑.

## 1 人教社新教材的处理方式

在人教社2019版《物理》的校阅样本中,可以发现老教材中引导学生思考的一系列层层递进的问题被改为了2个略显突兀的问题:地球绕太阳运动,月球绕地球运动,他们之间的作用力是同一种性质的力吗?这种力与地球对树上苹果的吸引力也是同一种性质的力吗?笔者揣摩编者的意图为:提示学生先猜测太阳对行星的力、地球对月球的力、地球对苹果的力是同一种力,而后进行证明.在科学研究中,直觉和大胆猜测固然是重要的,但是过于直接地把问题抛给学生,是否有利于学生的学习?以前教学过程中就有学生质疑:“月地检验”这么妙的想法真的只是牛顿的猜测吗?这一伟大理论只是牛顿的灵光一闪凭空出现或者归功于那个著名的苹果?并不是人人都有这样的灵感,猜测也是各种各样,即便是将学生的思路引导到正确的方向,那也应该有一个能说服人的依据,不然学生的疑问得不到解释,学习也只是一种被动的接受.所以笔者仔细阅读了牛顿

的《自然哲学之数学原理》,从中总结了一种不同于教材的讲述思路,可作为教材的补充.

## 2 《自然哲学之数学原理》记录的论证思路

### 2.1 牛顿如何“猜”到要进行“月地检验”的

书中并没有直接写牛顿是如何想到要进行月地检验的,但是仍可从中找到其思维轨迹.《原理》第三篇里记载了牛顿的论证思路:命题1,证明了使木星的卫星偏离直线,停留在圆轨道上的力与距离平方成反比;命题2,证明了太阳的行星停留在圆轨道上的力与距离平方成反比;命题3,证明使月球停留在圆轨道上的力与距离平方成反比<sup>[1]</sup>.牛顿认为各天体因为惯性有沿直线运动的趋势,他首先根据天文观测数据证明了使天体保持在圆轨道上的力(向心力)与距离的平方成反比,但是因为什么原因产生的向心力呢?是中心天体的引力吗?和地球表面物体的重力是同一种力吗?引力真是牛顿“猜”出来的?恐怕并不是.在牛顿生活的时代还有磁力学说、以太旋涡学说等,引力这种看不见摸不着的超距作用并非是最好的选择,但是,牛顿是如何想到通过“月地检验”来证明引力是向心力的来源呢?

### 2.2 牛顿提出了月球朝着地球的方向“下落”

月球“下落”的这种观念,多少使人迷惑,因为月球围绕地球在做圆周运动,丝毫没有靠近地球<sup>[2]</sup>.牛顿所提出的“下落”是这样的物理含义:如图1所

示:当没有外力作用时,因为惯性,月球将沿直线从A点匀速运动到B点;实际上月球却是回到了b点,月球为什么能回到圆周轨道上?原因就是,在匀速运动的同时,地球对月球的引力使得月球朝着地球匀加速“下落”,就好像地球把正在做离心运动的月球拉回了圆轨道的b点.这个观念相当有趣:牛顿居然把一小段圆周运动分解为了切向的匀速直线和径向的匀加速直线运动.

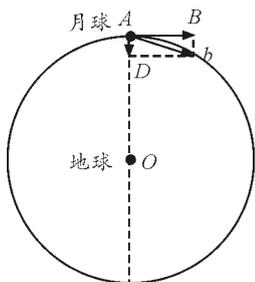


图1 月球运动的分解图

毫无疑问,月球在“下落”这种想法是进行月地检验的导火索.其一,这种有趣而深邃的思考孕育了现代物理学处理曲线运动的基本方法:取微小元、化曲为直、合运动和分运动等效;其二,从月球的“下落”去类比苹果的下落,进而猜测使月球下落的力和苹果的重力是同一种力显得顺理成章、水到渠成.

### 2.3 牛顿计算了月球每分钟“下落”的高度

我们根据《原理》当时的测量数据:地球周长为  $C_{\text{地球}} = 123\,249\,600$  巴黎尺  $\approx 40\,023\,951.9$  m(牛顿使用法制单位,为方便阅读,本文全部换为国际单位),月球在朔望点的平均对地距离约为地球半径的60倍,月球的周期为  $T = 27$  天7小时43分 = 39 343 分.

如图2所示,从A点开始,1 min后运动到b点,首先计算月球每分钟转过的弧长  $s, s = \frac{t}{T} \times C_{\text{地球}} \times 60 = \frac{1}{39\,343} \times 40\,023\,951.9 \times 60 \approx 61\,038.48$  m.再计算每分钟下落的高度  $h = \overline{AD}$ , 因为  $\triangle ADb$  和  $\triangle AbC$  相似,所以  $\frac{\overline{AD}}{\overline{Ab}} = \frac{\overline{Ab}}{\overline{AC}}$ . 又因为  $\overline{AC} = d$  (月球轨道的直径), 弧长  $s$  相对于周长极小,  $\overline{Ab} \approx s$ , 所以  $\frac{\overline{AD}}{s} = \frac{s}{d}$  (这个证明过程记载在《原理》的第二章命题4的推论IX:在给定向心力作用下,沿圆周匀速运

动的物体,其在任意时间内掠过的弧长,是圆周直径与同一物体受相同力作用在相同时间里下落空间的比例中项<sup>[1,2]</sup>).

最后带入数据得

$$h = \overline{AD} = \frac{s^2}{d} = \frac{(61\,038.48 \text{ m})^2}{60 \times \frac{40\,023\,951.9 \text{ m}}{\pi}} \approx 4.874 \text{ m}$$

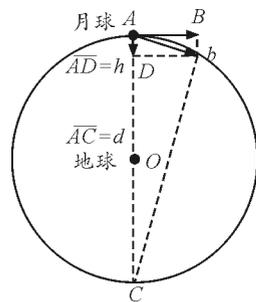


图2 计算下落高度的示意图

### 2.4 牛顿对比了月球的“下落”和苹果的下落

如果月球被吸引向地球的力与距离的平方成反比,那么在地球表面,同一个物体的受力变为  $60 \times 60$  倍.因为径向是匀加速下落,满足  $h = \frac{1}{2} at^2$ ,所以每分钟朝地球下落的距离为  $60 \times 60 \times h = 60 \times 60 \times 4.874$  m,所以每秒钟朝地球下落的距离为  $h' = 4.874$  m.又因为当时惠更斯已经准确的测出,地表的物体在重力的作用下,每秒下落的距离为15巴黎尺1寸1分又  $\frac{7}{9}$ <sup>[1~3]</sup> (约等于4.90 m).所以,在误差范围内使月球保持在圆轨道上的力和苹果受到的重力应该是同一种力,都来自于地球的吸引,且与距离的平方成反比.

## 3 “月地检验”的教育价值

物理教师必须认清物理学的本质,以物理思维为抓手,确立思维教育是物理教育制高点的理念,从知识教学走向思维教育,并内化为自己的教学行为——为学生思维发展而教,让物理核心素养的养成和发展真正落到实处,完成立德树人的根本任务<sup>[3]</sup>.从《原理》出发,深入探究牛顿对“月地检验”的论证过程,是对物理思维的深入挖掘,也是一次思维教学的尝试.

### 3.1 培养学生质疑创新的科学思维

写作本文的初衷就来于学生的质疑:牛顿真的

就是猜测到“月地检验”吗？当时笔者也无法回答，但是当打开《原理》认真品读后发现，牛顿的独立思考本身也来源于质疑：到底是什么原因使得天体做圆周运动而不会脱离轨道？月球“下落”、运动的分解、微元法等极富有创造力的物理思想也是在思考过程中逐渐产生和成熟的。创新往往来源于质疑，这是一个引导学生体会质疑创新的科学思维的好机会。

### 3.2 培养学生科学推理和科学论证的思维

人教社2019版《物理》教材体现的思想是：什么力使得行星保持在轨道上？不妨先猜想这个力是太阳对行星的引力。地球对苹果的力和对月球的力是同一种力吗？也不妨先猜想是同一种力，再通过定量计算向心加速度来进行证明。

而《原理》第3篇命题1~3从天文观测的数据证明了天体保持在轨道上的力与距离的平方成反比。命题4证明地球对使得月球保持在轨道上的力和苹果的重力是同一种力，都与距离的平方成反比，所以应该是地球对月球的“重力”提供其做圆周运动的向心力。直到命题5的注释部分，牛顿才得出结论：“使天体保持在某轨道中的力至今都称为向心力，但是现在越来越明显了，它只能是一种吸引作用，此后我们称之为引力”<sup>[1~4]</sup>。这才第一次出现了引力的概念，可见由向心力过渡到引力，并非偶然，而是经过了一步步的科学论证。引力的普适性，是牛顿深邃思维的展现，“月地检验”是建立这种统一和联系的关键一步<sup>[4]</sup>。

人教版教材的编写侧重于“先猜想后推理”，而

《原理》的思路更强调通过严谨的“归纳演绎”进行科学论证，两者相辅相成，将两者结合更能提升学生的科学思维能力。

### 3.3 让学生走入历史 具备创造历史的能力 品格和情怀

如果将《原理》中记载的论证方式作为正常教学的补充，将能带领学生经历人类发现知识的过程，让学生现有水平转向更高的层次去，促进学生的深度学习。正是通过这样的过程，帮助学生养成走入历史，并具有创造未来历史的能力、品格和情怀<sup>[5]</sup>。

综上所述，笔者认为教学设计应该源于教材但不拘泥于教材，而应该抓住每一个知识点的学习过程，解答学生的困惑，开阔学生的眼界，启迪学生思维，促成深度学习的发生，把培养核心素养落到实处。“月地检验”绝不是牛顿简单的猜测，而是经历了数十年的反复思考不断走向成熟的结果，万有引力定律的提出也是严密的推理和论证的结果，我们应该深入挖掘其教育价值。

#### 参考文献

- 1 牛顿. 自然哲学之数学原理[M]. 王克迪, 译. 西安: 陕西人民出版社, 2001. 450 ~ 461
- 2 费恩曼. 费恩曼物理学讲义第1卷[M]. 郑永令, 等译. 上海: 上海科学技术出版社, 2013. 70
- 3 王高. 用思维变革物理教育[J]. 物理教师, 2020(3): 10 ~ 13
- 4 杭庆祥. 牛顿的“月地检验”验证的是什么[J]. 物理通报, 2015(12): 123 ~ 125
- 5 郭华. 如何理解“深度学习”[J]. 四川师范大学学报(社会科学版), 2020(1): 89 ~ 95

## An Exploration of the *Moon and Earth Test* and Its Value of Education

Zhang Tianyao

(Chongqing Bashu Middle School, Chongqing 400013)

**Abstract:** Aiming at students' confusion about of "month and earth test" in the high school physics textbook published by People's Education Press, this paper is based on Newton's *Mathematical Principles of Natural Philosophy*, explores Newton's demonstration of "month and earth test", proposes a new teaching methodology, and discusses its value of education.

**Key words:** month and earth test; value of education; *Mathematical Principles of Natural Philosophy*