

关于万有引力定律的发现年代问题

阎康年

(中国科学院自然科学史研究所)

关于引力平方反比定律和万有引力定律的发现过程和年代问题,自牛顿逝世以来,在学术界长期存在着分歧和争论。据笔者对有关的牛顿论著、书信和资料的分析与考证,认为有必要提出一些看法,供有关工作者参考。

一、区分几个有关的基本概念

笔者认为,长期以来在这个发现年代问题上之所以有争论,主要原因是未能很好区分以下几个基本概念,即引力平方反比定律和万有引力定律;引力平方反比关系的思想和经证明与验证后形成引力平方反比定律;按椭圆轨道还是圆轨道推导天体间的引力平方反比关系公式,以及从向心力定律还是离心力定律推导引力平方反比定律。此外,在引力与质量关系上,引力与物体(1684年前,牛顿一般用物体表示物质之量)、质量和相互作用二物体的质量积成正比,引力质量和惯性质量等概念,也不容混淆。只有在分清上述一系列概念的基础上,才便于澄清这个年代颇为久远的问题。

二、1665—1666年间牛顿发现引力平方反比定律和万有引力定律了吗?

国际学术界相当普遍地认为牛顿于1665—1666年间发现引力平方反比定律和万有引力定律。笔者经研究,认为此说证据不足,因为那时牛顿既不具备明确的质量概念,又未从理论上证明和实验上验证引力平方反比定律,甚至在文字上或口头上也未提及他在此期间发现万有引力定律的事。

国际学术界之所以流传“牛顿在1665—1666年间发现引力平方反比定律和万有引力定律”,主要是由于牛顿的名著《自然哲学的数学原理》(以下简称《原理》)发表之后,牛顿的几位密友和亲属转引牛顿的谈话和牛顿本人于1714年写的一份备忘手稿引起的。据查,与此有关的记载共六条,其中牛顿记述的有二条:一条是1684年6月20日牛顿给哈雷的信中提到,他发现引

力平方反比定律当在十八、九年之前,即1665—1666年间;另一条是牛顿在1714年写的一张条子¹⁾,上面说“由行星运动周期与其轨道中心距成二分之三次方比例关系决定的力,必与其至迴转中心的距离平方成反比,并由此比较使月球保持在轨道上运行所需的力与地球重力的关系,发现二者差不多吻合。这一切都是在疫症流行的1665年和1666年所取得的”²⁾。

别人引用牛顿的话而作的记载,有四条都关系到“苹果落地”问题:

(1) 继牛顿任卢卡锡讲座教授的惠士敦,回忆他在1694年同牛顿谈起《原理》序言时写道:“重力是什么?用牛顿以前的假设,这力按与地球中心距成平方反比关系而减弱。至于牛顿爵士的第一次实验(指1665—1666年间的“地月检验”——作者),当在地面上做足够大的圆,大至月球时,按粗略(一纬度)仅为60哩计算,他在某种程度上失望了”³⁾。这与上面牛顿讲的“差不多吻合”矛盾。

(2) 牛顿晚年的密友潘伯顿在有关著作中,也谈过类似的话,还提到因苹果落地而引起验证引力平方反比关系的故事。

(3) 牛顿晚年的另一位密友斯多克雷,明确提到在牛顿家后园的苹果树下,同牛顿喝茶和谈话的情况。他说“在1726年4月15日午餐后,天气温和,我们进入花园,并在苹果树下饮茶。谈话中,他告诉我正是在过去同样情况下,注意引力的思想出现在他的脑海,那是在一棵苹果树下偶然发生的,当时他处于沉思的冥想之中”⁴⁾。

(4) 伏尔泰曾追忆过,他在牛顿去世前一年即1726年去英国时,听到牛顿继姊妹说过牛顿因“苹果落地”发现万有引力定律的故事。

这四个记载说明,牛顿在1665—1666年间只具有引力平方反比关系的思想,并企图从理论上证明和用“地月检验”验证,但均失败了。四人均提到“苹果落

1) 见朴茨茅斯伯爵于1872年交给剑桥大学图书馆的一批牛顿手稿和《朴茨茅斯底稿备忘录》。

地”的故事,表明可能确有其事。但却并非因见苹果落地的偶然性,就很快发现万有引力定律,而是由此引起他试图用“地月检验”验证引力平方反比关系的思想。这是牛顿从布里阿德于1645年出版的“*Astronomic Philolaica*”中了解到的。布里阿德说“从太阳发出的力应和到太阳距离的平方成反比而减少”。从上述资料可看出,牛顿在1665—1666年间只具有引力平方反比关系的思想,他的密友和他本人可能曾认为已形成了引力平方反比定律。因而造成后来人们的误解,并流传二、三百年之久,引起很多争议。

大家知道,对历史事件的考察应持历史唯物主义态度,即应从事件发生的经过和前后的发展状况的第一手材料出发,全面分析,得出结论。而后来的话即使是本人讲的,当缺乏必要的证据时,也只能作为参考。

现在让我们考察一下牛顿在1665—1666年前后的论著,看看那时他在发现引力平方反比定律问题上的知识准备状况和思路,是否具备发现这个定律的条件。

在手稿Ms. Add. 4004¹⁾即《流水帐》²⁾(*Waste Book*)中,有1664—1666年间关于球体在正方形至正多边形及圆内运动和受力关系的讨论,牛顿得出全部抵抗力与物体运动力之比等于总边长(即周长)与半径之比。在1665—1666年间的Ms. Add. 3958手稿中,他进而推出“牛顿式的离心力定律”为:“一物体在半径等于R的圆周内运动时的离心力持续作用下,沿直线运动。在圆周上通过R距离所需的时间内,物体将沿直线通过R/2的距离”。显然,如果牛顿此时证明了引力平方反比定律,必是由“牛顿式离心力定律”、伽利略落体 v^2 定律和开普勒行星运动第三定律推导出来的。经笔者重新计算,认为只能由此证明圆轨道上的引力平方反比定律,而不是椭圆轨道上的,因此不能认为证明了这一定律。

1694年葛利高里(David Gregory)曾提到他看到过牛顿在1669年前的一份手稿,他说“在这份手稿中,奠定了整个牛顿哲学的基础:如月球对地球的重力,行星对太阳的重力,事实上甚至这一切都计算了”³⁾。经查对,这就是Ms. Add. 3958(5), fol. 87。即J·海瑞威说的《论圆运动》或A. R. 海尔说的《运动定律》,其中提到“离太阳减弱的力与太阳距离的平方成反比”⁴⁾,并用此关系和开普勒行星运动第三定律,计算了各行星与太阳间引力的相对比值。这是牛顿在1670年前详细论及引力平方反比关系的唯一手稿,但它并未证明和验证而形成引力平方反比定律。上述说法与牛顿在1686年6月20日给哈雷信中,提到参考布里阿德所说的平方反比思想相似。因此,可推断牛顿确实采取了布里阿德的这个思想。

此后直至1679年,因某种原因牛顿一直未过问引力定律问题,因而只要推开这期间牛顿写的手稿和通信,几乎找不到他在动力学和引力定律方面的论述。

物理

从上述资料,可看出以下几个问题:

第一,在1669年前,牛顿在动力学和天文学上的计算,是从他自己的“离心力定律”出发的。但发现引力平方反比定律却必需向心力的概念和向心力定律。而他提到向心力概念和定义的最早手稿,却只见于1684年6月至10月间写的《论运动》短文(*The Tractus Dei Motu*)。

第二,未发现牛顿在1665—1666年左右直至1679年有关论证引力平方反比定律的任何确切资料,也未发现与此有关的其它佐证材料。

第三,牛顿曾几次说过,此期间他发现引力平方反比定律是从他的“离心式定律”、落体 v^2 定律和开普勒行星运动第三定律推导出来的。但在《流水帐》中只用了前二者,在Ms. Add. 3958(5) fol. 87中却又只用了后二者,并与潘伯顿所说牛顿此时是从“以太阳为中心做完全的圆运动得出的结论”相矛盾。而潘伯顿的说法却与《流水帐》有关部份的思路一致。

第四,牛顿在1684年后多次说过,引力平方反比定律是在1679年发现的,并为此与胡克争论发现权问题。这一切与所说在1665—1666年间发现的相矛盾。果真如此,则驳倒胡克的理由岂不更充分么!

第五,在1673年后的手稿Ms. Add. 3958 fol. 90-1及1679年11月28日给胡克的信中,均提到落体沿渐收缩的螺旋线轨道向地心下落,而与开普勒的椭圆轨道矛盾。在受胡克批评和指正后,牛顿承认了错误。

联系到牛顿在1665—1666年左右发现引力平方反比定律和万有引力定律的上述五个论点,我们认为在1679年前,牛顿基本上是从圆轨道考虑和计算引力问题的,因此,硬说牛顿在1665—1666年间发现这两个定律是缺乏必要根据的,因而只能说是一种误传。

关于牛顿在1665—1666年间“发现引力平方反比定律”或“万有引力定律”,而拖延廿年未发表的原因,说法有十种之多。如潘伯顿和惠更斯等认为,因当时对地球半径测得不准, J·海瑞威认为牛顿当时陷入在光学上同胡克的论战, 赛耶等认为他忙于光学和化学上的实验研究, 亚当斯等认为月球与地球距离太小, 把月球看作质点处理误差太大, 卡乔里认为重力测定因纬度差异和离心力影响造成严重失误, 莫尔认为因对任何数学问题的发展已不感兴趣, 等等。牛顿自己则说因母病亡和处理遗产及忙于行政事务……。看来,这都是次要的原因。像牛顿这样一个热衷于科学研究的人,会因次要的和与学术无关的琐事,避开这样重大的课题达十五年甚至廿年之久吗?! 发现了这样重要的定律竟一、二十年不向任何人谈起,甚至没有论

1) 为剑桥大学图书馆对牛顿手稿的编号,以下类推。

2) 《流水帐》是牛顿继父留下的手稿,其中有牛顿在1664年1月至1665年1月写的部份手稿。

证和推导该定律的任何资料、手稿或其他证据,是不大合乎逻辑和情理的。比较合乎实际情况的解释可能是这样的:青年时代的牛顿受到开普勒、伽利略和笛卡尔的影响,对动力学发生了兴趣,又在开普勒和布里阿德的启发下钻研了天文学,并产生论证和验证布里阿德引力平方反比关系的想法,为此试算了月球对地球和行星对太阳的重力和离心力的关系及比值。但由于只能从圆轨道而不能从椭圆轨道论证引力平方反比关系,由于地球半径测得不准和把月球当作质点造成计算上的误差过大,致使验证失败,因而停留在设想和假设状态。为此,一时难以取得进展而搁置下来,直至1679年胡克的提醒,才再度研究这个问题,1675年12月7日,他在给奥登贝格的信中,有一句最能代表他的这种心情的话:“那只是一个假设。所以,仅可看作是我的一个猜想罢了”。

三、牛顿在1679年是否发现了引力平方反比定律?

关于这个问题的肯定性看法,几乎都来自牛顿在1684年后的谈话和信件。在Ms. Add. 3968b手稿中,牛顿写道:“用反流数法,我在1679年发现开普勒的天文学假设,即行星椭圆轨道运动的证明,这就是《原理》第一卷命题11”。在1686年7月14日给哈雷的信中,牛顿说:“这是真的,他的信(指胡克在1679年12月9日给牛顿的信——作者),使我偶然发现应该用图形法。在椭圆上的验算是靠其他的研究进行的;就这样搁置达五年之久,直到你要寻找那篇论文时”。又在《朴茨茅斯底稿备忘录》中写道:“利用此法,我对刻卜勒命题的证明,是在1679年。”这些资料说明,牛顿自认为在1679年用几何法证明了引力平方反比定律。

现在让我们分析一下牛顿和胡克在1679年通信中谈到上述问题的情况。这一年的11月28日,牛顿给胡克的信中,提到重物下降曲线是逐渐缩小的螺旋线,并指向地心。胡克于12月9日的回信中说:“并非都是相同的螺旋线,而宁是一种椭圆……”。这里,胡克指的是重物沿以地轴对称并逐渐缩小的椭圆螺旋线下降。12月13日,牛顿给胡克的回信中,接受了胡克的意见,但却指出当高度很大和假设重力一致时,“将不以螺旋线降至地心附近,而是因离心力和相互交错平衡的重力而升降的循环。我想物体将不描出一个椭圆,毋宁是AFOGHIKL表示的图形(如图1)”^[1]。

这些信件说明,正是由于胡克的批评和指正,才促使牛顿把已放下十三、四年的动力学又拾了起来,并想出如图的落体轨迹。但从牛顿在1684年8—10月写的《论运动》短文可看出,他在用几何法论证引力平方反比定律时,已改用椭圆轨道的图形。所以,在1679年底仍不认为落体轨迹是椭圆螺旋线的牛顿,能够用几何法证明直至1684年中期整个皇家学会都未证明

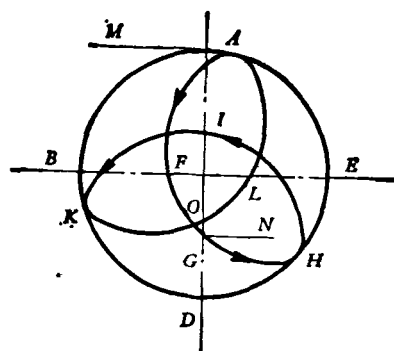


图1

的难题(除胡克自称已能证明外)来说,时间是太短了!

其次,从牛顿手稿的排列来看,至1684年8—10月才提出向心力概念及其求法,而只有从向心力概念去理解和证明引力平方反比定律及其公式,才是正确的。与1665—1666年间的情况相似,除上面引证的牛顿手稿外,几乎查不到当时他的证明资料、曾同他谈过证明这问题的人和有关记载。这就自然使人怀疑哈雷于1684年5月(有说是8月)第一次为论证椭圆轨道上的引力平方反比定律而走访牛顿时,牛顿说五年前已证明了但却遍找不到的原稿问题。A. R. 海尔认为,“人们可假设发生了如下情况:在哈雷于1684年5月第一次拜访后,牛顿必须立即回到他的椭圆轨道运动问题的研究,直至研究结束”^[2]。试想,如果牛顿在1680年前去世的话将会发生什么事情呢?在今天他可能只以发明微分和光学上的成就而知名,但在引力平方反比定律和万有引力定律的发现上,将不会留下明显的痕迹。

综上所述,可以看出,牛顿在1679年前已经证明引力平方反比定律的证据是不足的,其可能性似乎并不存在。反之,如果他那时确实证明了这个定律,按理应继续向天体力学的奠基工作挺进,做出更大的发现,为什么竟再次消沉下来长达五年之久呢?要知道,1684年哈雷第一次访问牛顿之后,牛顿就热衷于万有引力定律的研究工作和写《原理》。此后直到晚年,他对天体力学的关心几乎没有中断。所以,比较合乎情理的解释是1679年又因论证失败而停顿下来,只是在胡克的启发下,出现了用几何法证明椭圆轨道上的引力平方反比定律的想法,再考虑到1684年上半年之前,牛顿对质量概念并不清楚,更不可能下质量定义等情况,他在1684年前发现引力平方反比定律和万有引力定律几乎是不可能的。

四、万有引力定律的发现及年代

1684年5月,哈雷第一次访问牛顿后,牛顿终于

用几何法和求线段比例极限的概念,证明了椭圆轨道上的引力平方反比定律。并在8—10月写了《论运动》短文,录了副本,于11月交帕盖特带给哈雷,于1685年2月收入皇家学会记录。这篇《论运动》短文是发现引力平方反比定律的关键性文献,确实用的是几何法,而不是像很多作者所写的,用的是微积分,这是应引起注意和说明的。此文首次定义向心力,得出向心力定律为“物体在圆周上匀速旋转的向心力,等于单位时间经过的弧长的平方,除以半径”。并由开普勒行星运动第三定律得出“向心力与中心距的平方成反比”,而重力“是向心力的一个表现方面”等。因而合理地论证了引力平方反比定律。显然,在皮卡于十七世纪七十年代初精确测地球半径之后,再用“地月检验”验证引力平方反比定律,自然就顺利通过了。所以,引力平方反比定律只是在此时,才算正式建立起来。

在《论运动》短文后不久,也是8—10月间,牛顿又在《论物体在均匀介质中的运动》论文中,定义了质量是物质之量,由体积和密度共同度量。这个定义很可能是牛顿引自F·培根的《新工具》一书,因二者说法完全相同,牛顿是不可能不看到他信奉的实验哲学创始人的这本名著的。此外,为了研究引力与质量的关系,牛顿在这篇论文中,又通过磁石吸引铁屑及其他外力作用于物体产生的运动,探讨了水平面上作用力与质量的关系,得出“加速度等于质量乘加速度”的规律。当他将这个关系推广到重力与质量和重力与重力加速度的关系时,在概念上筑起了后来称之为引力质量和惯性质量等价的桥梁。可以认为,运动第二定律的发现是为了适应发现万有引力定律的需要,这点笔者将在专门的文章中予以讨论。所以,《论物体在均匀介质中的运动》一文是牛顿导向万有引力定律发现的关键性文献。

《原理》是《论运动》和《论物体在均匀介质中的运动》二篇论文的发展,是在哈雷的要求和鼓励下写成的。第一卷是在1685年夏天写成的,其中关于球体引力部份可能是同年春天写成的。在命题76中写道“...那么,我说其中一球用以吸引另一球的力,将与两球中心距离的平方成反比”。接着,在推论3中,提出在中心距不变的条件下,相互作用物体的引力“与一个球体和另一球体相乘而得出的乘积成正比”。继而,又从球体引出质量概念,终于在推论4中得出万有引力定律的原始说法:“在中心间距不变的情况下,与这乘积成正比,与这距离的平方成反比”,以及“总是正比于两球所含物质之量之积被其中心距的平方去除”^[1]。因此,可推论万有引力定律是在写第一卷后部份之前,即约1684年底至1685年3月之间发现的,而公开于1686年5月,即《原理》第一卷交到皇家学会之时。在第三卷《论宇宙系统》中,牛顿用万有引力定律系统研究和计算了行星对太阳、月球对地球及彗星运行轨道等问

题,发现计算结果与预计的误差在允许范围之内。这时,也只有在这时,万有引力定律才算经验证而正式建立起来。

关于胡克与牛顿争论引力平方反比定律优先发现权一事,曾引起科学史研究者的兴趣。据我们的看法,胡克确实在1679年提醒牛顿注意落体椭圆螺旋线轨迹问题,并在1680年1月6日给牛顿的信中,提到自己发现了引力平方反比关系,又在1684年向哈雷和雷恩说过,他能证明遵守引力平方反比关系的运动轨迹是椭圆。但他一直没有拿出证据,后来也没有发现那时他证明的资料。当胡克后来知道1686年牛顿与哈雷的通信中提到发现万有引力定律时,宣布自己是引力平方反比定律的优先发现者,并在1693年皇家学会议上又正式提出,因而展开了“万有引力定律发明权”的著名论战,并对牛顿独揽发现权而深感痛苦。胡克在1688年2月15日日记中写道“哈雷遇到牛顿——假装洋洋得意地宣称,尚知道我的信息,但不感兴趣”。显然,胡克对引力平方反比定律的发现确起过较大的作用,但却拿不出首先发现的确凿证据。因此,科学史上一般把此发现权归之于最早发表此成果的牛顿,是正确的。胡克宣布优先发现权而引起的争论,曾几乎使牛顿放弃《原理》第二版。胡克继续反对牛顿的光学理论,使牛顿把《光学》的出版推迟到胡克于1703年去世的第二年,甚至当胡克要求牛顿在《原理》序言中,对他的作用稍提一下也遭拒绝。在牛顿给哈雷的一封信中,竟“不想给胡克以任何荣誉;他宁愿抑制一下加给该书论述世界体系的第三卷和最后一卷的光荣”,以致爱因斯坦谈起时颇为感慨地说“唉!那是虚荣,你在那么多科学家中找到了这种虚荣”^[2]!两人在光学和发现万有引力定律问题上,积怨过深,牛顿采取的态度固然可以理解,但对胡克在发现引力平方反比定律过程中起的作用,给以实事求是的对待,也是应该的。因此,科学史上应将引力平方反比定律和万有引力定律的发现权,归之于牛顿,但也应记下胡克的部份功绩。

万有引力定律发现后113年,在地面上首次用实验予以证实的是H·卡文迪许于1798年进行的扭秤实验,发现二小球的引力测定与计算相符。在天体相互作用方面,约·亚当斯于1846年计算出天王星运动轨迹的不规则性,预言必是由其他行星的引力引起的,勒末累据此算出这新星的方位,接着德国人加勒予以观测,才发现海王星,位差不超过一度。于是,万有引力定律经过实践的检验,取得全世界的公认。

参 考 文 献

- [1] J. Herivel, Background to Newton's Principia, (1965), 67.
- [2] 同上, p. 19.
- [3] 同[2].

(下转第162页)