

# 伽利略惯性原理、牛顿体系及其宇宙佯谬

郭汉英

近代科学是在文艺复兴时期起步的,逐渐从神学的桎梏中摆脱出来。经过哥白尼、布鲁诺、开普勒、伽利略等先驱的不懈努力,到牛顿建立力学体系,取得极其伟大的成功。牛顿之后,经典力学又取得一系列重要进展;应用非常广泛而且重要。这里,主要考察有关伽利略惯性原理以及牛顿体系的宇宙佯谬等问题。

牛顿力学和引力定律是有近似的。首先,所有力学现象的描述,都离不开测量。在牛顿理论中,隐含着测量信号的速度为无限大,刚尺和钟的计时都满足欧几里德几何等假定。牛顿理论成立还有一些其他条件。通常,往往用“宏观、低



速”来表述这些条件。然而,这并不确切。例如,水星近日点的进动问题,既是宏观、又是低速,而牛顿理论却不能描述。大概除了欧几里德几何一些概念的近似之外,牛顿并不知道这些条件。对于这些条件的认识,经历了很长的过程。

牛顿体系的基础是伽利略惯性原理。这个原理包含惯性运动、惯性观测者、惯性参考系和伽利略相对性原理。当然,与所有的观念、原理一样,这个原理也是近似的、是大量观测中抽象出来的。然而,作为原理,起着极其重要的基准作用。后人发现,牛顿体系不能给出自恰的宇宙图景。在牛顿

设计阶段和整体布局中,均考虑了这些未来技术发展的需要,为这些依托于 CSNS 加速器的发展预留了空间。

开展加速器驱动洁净核能系统(ADS)的研究对于我国未来裂变核能的可持续发展开辟了创新的技术路线,可有效解决我国核能发展中核燃料不足和核废物处理的瓶颈问题。以散裂中子源的直线加速器为基础,可建设 ADS 系统的研究装置,开展 ADS 的基础性研究,同时还可利用同步加速器的脉冲束流在同一装置上开展 ADS 的研究工作。

以 CSNS 的加速器为基础,可进一步扩展规模更大的研究装置。例如可用 CSNS 的加速器作注入器(只需分出 CSNS 加速器束流的约 1% 即可),建设更高能量的同步加速器(约 30GeV),开展包括中微子和反质子在内的高能物理及核物理等基础科学的研究。

总之,根据国家科技发展需要,预计将在广东东莞建成一个以散裂中子源为主、包括多个大科学装置的大型科学研究基地,为国家的科技进步和创新做出巨大贡献。

(中国科学院高能物理研究所 100049)

## 作者简介



韦杰,1963年生,1983年毕业于清华大学物理系,1989年于美国石溪大学物理系获博士学位。美国布鲁克海文国家实验室终身研究员。1986~1998年参加美国重离子对撞机 RHIC 的物理设计、研发、建造和束流调试,1997~1999年参加欧洲 CERN 大强子对撞机 LHC 对撞区的设计、担任 US-LHC 项目 BNL 加速器物理部经理,1998~2002年主持美国 SNS 加速器储存环的物理设计,2000~2002年担任美国橡树岭国家实验室的散裂中子源 SNS 加速器物理组组长,2002~2005年任美国 SNS 储存环与输运线部主任、主持 SNS 储存环与输运线的建造。2005年接受中国科学院高能物理研究所聘请,担任中国散裂中子源加速器工程指挥部(筹)经理,2007年始担任中国散裂中子源工程(筹)经理。现为中国科学院高能物理研究所研究员。

本文根据《散裂中子源项目建议书》编写,作者代表中国散裂中子源工程项目组,编写过程中曾得到其他建议书编写人员的大力协助,在此一并致谢。

体系中,不仅无法解决惯性和惯性原理的起源,而且存在着惯性原理与宇宙图景之间关系的佯谬。这个佯谬一直延续至今。事实上,作为力学基准的惯性原理及其宇宙意义和起源,是一个贯穿近代力学、天文学和物理学的发展的一个极其重要的核心问题。

### 一、惯性运动的相对性和“闭舟行”

哥白尼的日心说,较之地心说完美而简单,编制星表的精度,也毫不逊色。这个学说,既符合毕达格拉斯匀速圆周运动思想和亚里士多德物理学的宇宙几何学说,又试图以其和谐证明上帝存在,但是由于认为太阳是宇宙中心,违背圣经、触犯上帝权威,仍被视为异端。17世纪初,天主教会正式宣布了禁令。布鲁诺支持哥白尼,但主张宇宙不存在中心,是无限的;1600年,他被教会烧死。伽利略也受到教会的迫害。亚里士多德-托勒密体系的维护者竭力反对日心说,试图从学术上刁难:如果地球在高速运动,为什么感觉不到?

17世纪初,开普勒首先突破亚里士多德关于受迫运动和自然圆运动的区分,提出惯性的概念。他根据第谷观测行星位置的数据,发现了行星运动的三定律;编制历法的精度大为提高。第谷并不支持哥白尼学说,然而,由他的观测数据所概括出来的规律,却支持并发展了日心说。

伽利略开创实验和理性思维相结合的近代物理研究方法,得到许多重要结果。在《关于托勒密和哥白尼两大世界体系的对话》(1632年)和《关于力学和运动两门新科学的对话》(1638年)这两部名著中,有系统的总结。

在第一部对话中,伽利略写道:“你和你的朋友把自己关在一条大船甲板下的主舱里。你们带着几只苍蝇、蝴蝶和其他小飞虫,舱内放一只大水缸,其中有几条鱼。挂上一个水瓶,让水一滴一滴地滴到下面的一个水缸里;缸里的鱼,向各个方向随便游动。……在仔细观察这些事情之后,再使船以任何速度前进,只要运动是匀速、不要左右摆动,你会发现,所有上述现象丝毫没有变化。你也无法从其中任何一个现象来确定船是在运动,还是停着不动;即使船运动得相当快……”伽利略描述了一个极为简单而重要的道理:从平稳行驶的船中发生的任何现象,无法判断船究竟是在平稳匀速运动还是停着不动;从而驳斥了地心说关于地动而人不知的非难。据考<sup>①</sup>,早在我国汉代《尚书纬·考灵曜》就有“舟行不觉”的

天才论述:“地恒动而人不知,比如闭舟而行不觉舟之运也”。这与伽利略的论证极其相似:同样是在论证地动人不觉,同样是在大舟中,同样要关掉窗户。“闭舟行而人不觉”,后人将其冠名为“伽利略的相对性原理”。其实,称之为“舟行不觉”原理或许更为恰当。

在第二部对话中,伽利略表述了另一重要结果:假设沿一个斜面AB滑下的物体,在B点以其得到的速度沿着另一斜面BC向上运动,则物体不受BC倾斜的影响仍将达到与A点相同的高度,只是需要的时间不同;当第二个斜面变成既不上升、亦不下降的水平面时,物体将一直以已获得的速度永远向前运动。伽利略的思想无疑比他的前辈前进了一大步,他认识到不受其他物体的作用,物体可以永恒地运动,这已经很接近惯性定律。但是伽利略并没有完全脱离亚里士多德的影响,他的水平面其实是和地球同心的球面。按照我国古代“天圆地方”的宇宙图像,大地是平的。因而,“舟行不觉”的运动相对性的思想,更加接近匀速直线运动的相对性。

应该指出,伽利略把人们请到“甲板下面的主舱里”,即“闭舟”的要求,对于“惯性运动是相对的”这一结论,并非必要。“闭舟”即不许向外看:一旦向外张望,那就显然会发现大船是在静止还是在行进、以什么速度在行进。但是,如果完全“闭舟”,根本不与大船的运动状态相联系,就不会得出相对性原理。必须“再使船以任何速度前进,只要运动是匀速,不要左右摆动”,才能得到:“无法从其中任何一个现象来确定船是在运动,还是停着不动;即使船运动得相当快。”换言之,必须把大船在不同匀速运动状态下的观测进行比较,才能得出伽利略的结论。对于伽利略船舱里的观测者来说,必须与外界联系,才能得到正确结论。

这样,对于只有船舱内的观测者的情形,必须允许他们“向外看”以记录船的运动状态,只不过要求仅仅比较“不向外看”的实验和观测结果,看是否能判断船的运动与否。这同样可以得到伽利略的结论。因此,对于“闭舟行”而言,“闭舟”的要求是可以去掉的。然而,是否能去掉这一简单要求,却带来一系列问题;甚至涉及到相对性原理和宇宙观测之间的关系。

### 二、牛顿力学体系的建立和成功

笛卡儿在《哲学原理》(1644年)中首先指出,

现代物理知识

“每一单独的物质微粒将继续保持同一状态,直到与其他微粒相碰而被迫改变这一状态为止”;“所有(这类)运动,其本身都是沿直线的”。他最早提出匀速直线运动状态等同于静止状态的思想。

牛顿总结出力学定律,发现万有引力定律。1687年,巨著《自然哲学之数学原理》问世,首次全面阐述牛顿力学三定律,奠定了经典力学的基础。著名的惯性定律(即第一定律)是牛顿力学的基础:“所有物体始终保持静止或匀速直线运动状态,除非由作用于该物的力迫使该物改变这种状态。”

牛顿和莱布尼兹发明了微积分。微积分可以解决力学问题:由运动定律得出运动方程,进而求解。牛顿将第二定律与万有引力定律结合起来,运用于行星的运动,导出了开普勒三定律;开创了天体力学。

根据牛顿定律写出运动方程,只要已知初始位置和速度,原则上就可以求出以后任何时刻的粒子位置。“决定论”盛行起来。1781年发现天王星,然而天王星的轨道偏离牛顿定律的计算。如果假定在天王星外面还有一行星,对其造成影响,根据牛顿定律,可以估计出这个行星的位置。1846年,发现这颗后来命名为海王星的新行星,验证了万有引力定律。1930年,根据行星运动的摄动理论计算,发现冥王星,这是牛顿引力定律的又一验证。然而,对于太阳系行星轨道的认识并没有由此完结。最近,国际天文学界取消了冥王星的行星地位。

牛顿力学和万有引力理论是第一个建立在观测和实验的基础之上的力学体系,在一定的近似程度上正确描述了粒子、物体和星球的运动和引力相互作用。其中出现了牛顿引力常数  $G$ ,是物理学认识的第一个基本常数。

按照牛顿力学,忽略水平面是地球表面的影响,伽利略的大船相当于惯性参考系;也就是说,在不同的水平面上,以不同速度、向不同方向匀速运动的大船,都是惯性参考系。在一个惯性系中能看到的种种现象,在另一个惯性参考系中必定也能看到,没有任何差别。因此,所有惯性参考系都是平权的、等价的。不可能判断哪个惯性参考系是处于绝对静止状态,哪一个是绝对运动的。

在伽利略和牛顿的时代,还没有形成有关坐标系变换、对称性等概念。不过,牛顿第一定律就是在叙述对于在惯性参考系中的惯性观测者的惯性运

动,这是相对性原理的基础。牛顿第二定律定义了力、质量和加速度,引进了这些量之间的关系;第三定律描述作用力与反作用力的关系,都是在描述动力学。万有引力定律描述在引力作用下的动力学。惯性定律和惯性系的重要性在于,这是进一步引入所有力学量和力学定律的出发点或者基准。

不同惯性系之间的变换称为伽利略变换。考虑最简单的伽利略变换。假定两个惯性系  $S(x)$  和  $S'(x')$  间以速度  $v^i = (u, 0, 0)$ ,  $i = 1, 2, 3$  相对运动。于是,它们之间的变换为  $t' = t$ ,  $x' = x + ut$ ,  $y' = y$ ,  $z' = z$ 。显然,欧氏距离和欧氏时间都是不变的。所有的伽利略变换构成伽利略群,共有 10 个参数,分别表征具有 1 个参数的时间平移对称性、具有 3 个参数的空间平移对称性、具有 3 个参数的空间转动对称性,以及由 3 个参数表征的具有不同相对速度的惯性系统之间的对称性。伽利略相对性原理可表述为:在描述 3 维欧氏空间和 1 维欧氏时间的惯性系之间的伽利略群的变换下,力学规律保持不变。

伽利略相对性原理和惯性系之间的伽利略变换群,在牛顿力学和引力理论中起着重要作用。从对称性的角度来看,伽利略变换的 10 个参数表明存在 10 类惯性参考系,它们彼此之间的共同点为 3 维空间和 1 维时间都是欧氏的。因此,存在 3 维欧氏空间和 1 维欧氏时间,与伽利略相对性原理是一致的。当然,牛顿并没有这样来看问题。

### 三、绝对空间和绝对时间及其异议

为了解决惯性运动的起源,也为了建立体系的需要,牛顿引进绝对空间和绝对时间的概念。在牛顿力学的所有规律中,并不出现相对于绝对空间的“绝对速度”。这既符合相对性原理,却又没有为确定绝对空间和绝对时间的存在留有余地。

为了论证存在绝对空间,牛顿求助于加速度。他著名的水桶实验就是试图利用加速度来说明绝对空间的存在:首先,把吊起水桶的绳子拎紧;然后,一旦松开绳子,水桶就会旋转;水桶中的水面,也会因此渐渐凹下去;马上把水桶停止下来,水桶中的水仍然会继续旋转、水面继续下凹一段时间。牛顿认为,水面之所以会下凹、在水桶停止转动后会继续下凹,都是因为惯性力的作用;而惯性力的来源,却是因为绝对空间的存在。

按照牛顿的解释,如果“闭舟”(即在伽利略船舱中)进行水桶实验,水面下凹等等与大船的惯性运动

状态无关,应该观测到同样的现象。这样,即使不向外看,水面下凹等等就表明绝对空间的存在。换言之,绝对空间对于水面是否下凹的影响,是无法用是否“闭舟”来加以区分的。对于这类现象和有关实验,应该特别关注。

对于绝对空间和绝对时间,早就有异议,代表人物有莱布尼兹、贝克莱和马赫等。19世纪后期,马赫提出,质点不是相对于绝对空间,而是相对于宇宙间所有其他质量的中心作惯性运动。针对牛顿的水桶实验,他认为在牛顿的论证中忽略了水桶壁的存在。如果水桶质量加大、水桶壁加厚至几英里,会怎么样?针对惯性运动和惯性系,马赫提出:“如果我们说,物体保持其在空间的方向和速度不改变,我们的这一断言只不过是相对于整个宇宙的简称。”“我们怎么能够确定这样的参照系?只能参照于宇宙中的其他物体。”(参见马赫,《力学的科学》,1883。)

马赫的分析仅仅停留在思辨的水平上。和牛顿一样,他认为存在超距作用;也无法说明宇宙中所有质量的中心是否存在,如果存在的话,如何具体决定惯性运动?迈斯勒、索恩和惠勒的名著《引力》尖锐地指出,几亿光年之外的星体何以能够决定这里现在的惯性?

事实上,没有任何有力证据直接表明存在牛顿的绝对空间。不过,其存在与人们的直观一致。随着牛顿力学和万有引力定律的成功,牛顿绝对空间和绝对时间的概念也就在学术界占据着主导地位。

#### 四、夜黑和引力佯谬与“闭舟行”

牛顿体系无疑是伟大的。然而,却不能完全精确、自恰地描述自然界的一切有关现象。质量、惯性和惯性运动的起源问题没有解决。绝对空间和绝对时间是支撑牛顿体系的支柱,却又缺乏直接的依据。

1859年,发现水星近日点绕太阳进动和牛顿力学的估计不同:每百年大约差43秒。这个既是宏观又是低速的现象,如何描述?后来,爱因斯坦广义相对论解决了这一问题。人们才知道,牛顿引力理论是一个近似的理论,对于质量为 $M$ 的点源的(引力)特征尺度应该满足 $L \gg r \equiv 2GM/c^2$ 。这里,除了牛顿引力常数 $G$ 之外,还有真空中的光速 $c$ 。

对于要建立体系的牛顿来说,更为尴尬的是,他的体系无法给出简单的宇宙图景。后人指出了这个问题。1823年,德国业余天文学家奥尔伯斯提出,无限大的欧氏绝对空间和其中天体均匀分布的宇宙

模型,无法解释“夜空为什么是黑的”这样的简单事实,这被称之为奥尔伯斯佯谬。1894年,另一位德国天文学家希林格又提出了“引力佯谬”。同时,天体之间的万有引力也无法建立一个在引力作用下稳定的宇宙图像;这称之为希林格佯谬。不妨一起称为夜黑和引力佯谬。这表明,在大尺度上,牛顿引力理论和静止的无限宇宙图景存在问题。

但是,如何定量确定在大尺度上牛顿引力的限制?在广义相对论的宇宙学中,可以用哈勃常数所对应的尺度来限制。或者,认为爱因斯坦最早引进的宇宙常数为 $\Lambda$ 为一基本的普通常数,牛顿引力理论适用的上限为远小于 $R = (3/\Lambda)^{1/2}$ 。这里, $\Lambda$ 的数值极小。

这些与宇宙图景有关的佯谬,也涉及伽利略相对性原理能否向外看的简单问题。

对于牛顿万有引力定律的天文应用,不得不“闭舟”:描述星体之间的引力作用时,不能“向外看”;一旦“向外看”,就会涉及宇宙图景的描述。由于无法给出自恰的宇宙学描述,必须局限在惯性参考系统之中。一旦向外张望,就会出问题。因此,不用“闭舟”,仅仅区分“不向外看”和“向外看”的结果即可;这样显而易见的事情,对于牛顿体系,一旦用于天体却无法做到。

但是,既然“天地同质”,对于天体的运用为什么不能“向外张望”?何况,一旦用于天体,必须想象一个把天体容纳在内的,在太空中“平稳行驶”的“闭舟”。这个“闭舟”应该多大?伽利略惯性系在空间和时间上都是欧氏几何的无限大和无限长;然而,又不得不“闭”。什么是在无限大的意义上的“闭”和“不许向外”呢?

其实,马赫的批判恰恰在无意中涉及牛顿体系的要害:绝对空间和绝对时间无法建立自恰的宇宙图景,宇宙观测难以与相对性原理相容。进而,从马赫的批判可以引伸出这样的要求:惯性运动和惯性参考系是远方天体的总和的引力产物;惯性运动的起源应该通过自恰的宇宙图景来解决。用今天的话来说就是:如果在一个理论体系之中能够解决惯性或者惯性运动的起源,那么这个体系必须要建立自恰的宇宙图景,而且这一图景应该与相对性原理之间存在内在的联系。

自然界是协调的,那么,作为“原理的理论”的这些原理之间,也应是相互协调的。于是,应该存在这

样的理论: 不仅满足相对性原理, 也应该与自恰的宇宙图景密切联系; 而且自恰的宇宙图景与相对性原理之间存在着内在关联: 宇宙图景表现为惯性运动和惯性系的起源。

不过, 要做到这一点, 仅仅从对称性看, 就不简单。如果三维宇宙图景与欧氏空间相似, 是没有中心、各向同性的, 其对称性只有空间平移和空间转动共 6 个参数; 如果时间也是均匀的, 再加上时间平移对称性的 1 个参数, 一共 7 个参数。而伽利略相对性原理的对称性有 10 个参数。二者相比, 前者少了 3 个表征惯性系相对运动速度不同的 3 个参数。这样一来, 就会出现相对于宇宙背景是在运动, 或者是静止的区别; 因而在这个意义上会存在优越惯性系。一旦存在优越惯性系, 会不会与伽利略相对性原理矛盾呢? 当然, 马赫并不知道如何实现他的观点。由于不能建立自恰的宇宙图景, 牛顿体系当然也不是这样的体系。这个相对性原理与宇宙图景的佯谬在爱因斯坦相对论体系中仍然存在。

### 结语

牛顿体系是取得伟大成功的体系, 尽管并没有完成。在一些重要的条件下, 牛顿力学和引力规律, 仍然能够极其精确地描述机械运动, 在很大程度上反映自然界的和谐。以牛顿力学和引力理论为代表的经典力学必然有其适用范围。如何确定?

在实验和观测上, 只有发现理论及其外推与实验和观测结果有偏差时, 才知道大体的适用范围。在理论上, 只有在更为精确地描述自然的理论中, 才能从定量上予以确定。

直到电磁学诞生, 爱因斯坦提出狭义相对论, 物理学才重视测量的信号速度为光速, 并非无限大。现在知道, 自然界除了光速  $c$ 、牛顿引力常数  $G$ 、普朗克常数  $h$ 、玻尔兹曼常数等这些基本常数之外, 很可能存在另一个基本常数, 即宇宙常数  $\Lambda$  或者宇宙尺度  $R = (3/\Lambda)^{1/2}$ 。牛顿力学定律和引力理论成立的条件为: 特征速度  $v$  与光速  $c$  相比很小,  $v/c \ll 1$ ; 质量为  $M$  的点源的(引力)特征尺度满足  $L \gg r_M = 2GM/c^2 \gg \ell_P$ ,  $\ell_P$  为普朗克长度; 同时, 在大尺度上, 也有限制:  $L \ll R$ ; 牛顿-胡克常数  $v = c/R$  可以忽略, 即取为零。

简而言之, 可以将上面的条件表述为:  $h \rightarrow 0$ ,  $c \rightarrow \infty$ ,  $R \rightarrow \infty$ , 且牛顿-胡克常数为零。当然, 这仅仅是对基本常数而言。即使在这些条件下, 还有空

间是三维的, 满足欧几里德几何的重要前提和条件。在牛顿理论成立的条件下, 没有涉及与大量粒子的统计行为密切相关的玻尔兹曼常数。

也就是说, 牛顿定律在小到微观尺度, 就会出现问題; 在必须考虑信号传播速度时, 也会出现问題, 等等。其实, 早就知道, 在星系团尺度上, 如果没有暗物质, 牛顿引力可能需要修正。另一方面, 即使是少体系统, 只要存在非线性效应, 在牛顿定律支配的这些“决定论”系统之中, 会出现混沌等非决定论的重要特征; 如此等等。是否还有某些条件尚未认识? 完全可能。

伽利略惯性原理是一个非常重要的原理, 在牛顿体系中, 起着定义力学量、引进力学定律的基准作用, 甚至在经典力学不成立的非相对论物理中, 仍然如此。同样, 惯性原理与自恰的宇宙图景之间的关系, 是个非常重要的问題。牛顿力学体系不能解决这个问题。宇宙学图景的问題, 在爱因斯坦相对论体系中, 得到极大进展。然而, 惯性原理的宇宙佯谬, 并没有完全解决, 一直延续至今。

今天, 暗宇宙在加速膨胀, 又把这些问題尖锐地提了出来, 迫使我们不得不认真思考。

(中国科学院理论物理研究所 100080)

\* 参见钱临照、戴念祖, 《尚书纬·考灵曜》中关于相对性原理的概念, 《中国大百科全书·物理学》中国大百科全书出版社, 1987, 第 913 页。《尚书纬》成书的年代一直有争议。钱、戴认为早在汉代, 也有人对此怀疑。“地恒动”、“舟行不觉”等观点, 为后人所转述。

## 科苑快讯

饮用水中的铬也会致癌

吸入六价铬( $\text{Cr}^{6+}$ )能够致癌已不是新闻, 然而美国国家毒理学项目(National Toxicology Program, NTP)最近的研究显示, 饮用水中的 $\text{Cr}^{6+}$ 也能致癌。 $\text{Cr}^{6+}$ 化合物广泛用于电镀工艺和纺织行业, 在饮用水源中也有发现。美国政府制定了严格的呼吸暴露工作相关规程, 美国环保署的饮用水标准将每升的铬含量限制在 0.1 毫克。

两年前, 研究者给实验鼠喂食每升 14.3~616 毫克的四种浓度不同的含 $\text{Cr}^{6+}$ 饮用水(所用化合物为脱水重铬酸钠), 结果发现这些啮齿动物在非常罕见的部位(如口腔)长出了恶性肿瘤。

(高凌云译自 2007 年第 14 期《环境科学与技术》)