

惯性原理及其宇宙起源(上)

郭汉英

常言说得好,没有规矩,不成方圆。没有基准,也就失去依据。什么是引进物理量和描述物理规律的规矩和基准呢?

在力学和物理学中,惯性原理即对于惯性观测者以惯性运动和惯性系为基础的相对性原理,对于力学量和物理量的引进、力学和物理规律的描述,起着十分重要的基准作用。对于与空间、时间,其中物质和运动直接相关的力学量和物理量,以及相应的力学和物理规律而言,至少在引力相互作用可以不考虑的情形中是这样。事实上,惯性原理的这一基准作用,在牛顿力学和狭义相对论中都非常突出。

早在我国汉代就有记载:“地恒动而人不知,譬如闭舟而行不觉舟之运也。”(《尚书纬·考灵曜》)这是在以地动观点说明地日关系,比喻“地动人不知”如“舟行不觉”。这里隐含着相对性原理的观点,是人类文明史上最早的猜测和论述。

16世纪中叶,哥白尼临终时发表的不朽著作《天体运行论》,标志着自然科学对神学的反叛和革命的开始。17世纪初,开普勒最先突破亚里士多德学说,提出惯性的观念和著名的开普勒三定律。随后,伽利略以平稳行驶大船内无法断定大船动静进行论述,驳斥托勒密学说维护者的非难,支持哥白尼学说,这就是后来以他命名的相对性原理的由来。

牛顿力学满足伽利略相对性原理,惯性系之间的伽利略变换下不变。麦克斯韦电磁学没有伽利略变换下的不变性,与相对性原理冲突。庞加莱和爱因斯坦在洛伦兹等人工作的基础上,把相对性原理从伽利略不变性推广为庞加莱不变性,建立各自的理论,问题才得以解决。庞加莱相对性原理要求力学和电磁学定律在惯性系之间的庞加莱变换下不变。

然而,正如爱因斯坦所指出的:“惯性原理的弱点在于它含有循环论证:如果一个质量离开其他物体足够遥远,它就作没有加速度的运动;而我们却又只能根据它运动时没有加速度的事实才知道它离其他物体足够遥远。”尽管在一定条件下,可以近似地处理这个问题。但是在原则上,如果不能通过实验和观测,即使是“理想实验”来确定惯性观测者、惯性运动和惯性系统等要素,惯性原理就不得不带有这

一“循环论证”的弱点。

为了描述引力、避免惯性原理的“循环论证”,爱因斯坦提出等效原理和广义相对性原理,认为惯性力与引力等效,并试图在加速运动与惯性运动之间也建立相对性;这样,庞加莱相对性原理也称为狭义相对性原理。然而,广义相对论做到的只是规律对于任意坐标系的协变性,并没有实现任意运动之间的广义相对性。爱因斯坦进而提出宇宙学原理,认为宇宙空间在大尺度上,大体是均匀各向同性的。随后,在观测的推动下,物理学认识到宇宙作为一个演化系统,这是上世纪自然科学最重要的成果之一。

不过,广义相对论在取得成功,并进一步引起物理学时空观变革的同时,也带来一些问题:到底有没有运动的广义相对性?在引力场中应如何定义物理量?如何引进物理规律?……一些著名学者还指出,宇宙学观测或宇宙学原理与狭义相对性原理并不协调。在相对论框架内,这些问题一直没有解决。

上个世纪90年代末以来,宇宙尺度上的观测数据分析表明,暗物质、加上与通常能量根本不同的暗能量,在宇宙演化中应该起着极其重要的主导作用;通常物质及其组成的星体仅仅占百分之几。我们的宇宙在加速膨胀,并不渐近于平坦的闵可夫斯基空时,而很可能渐近于宇宙学常数为正的4维常曲率空时,即德西特空时。面对这些观测数据的分析结果,以爱因斯坦相对论体系为代表的物理理论和宇宙论变得极为棘手;物理学面临着全面挑战。

早在1970年,著名学者陆启铿就建议应该把惯性运动、惯性系统的观念和相对性原理推广到德西特和反德西特空时。70年代初,他与合作者开创了把相对论推广到这些具有最大对称性的常曲率空时的研究。近年来,受到有关暗宇宙观测的推动,我国学者又进一步研究,取得一些有意义的结果。

德西特相对论具有宇宙学意义,只要我们的宇宙渐近于德西特空时,就会加速膨胀;而且,我们的宇宙大致是闭合的3维球面,只不过半径很大,离开平坦的偏离很小,在宇宙常数的量级。同时,德西特相对论的宇宙学意义,也表现在真实宇宙的渐近行为可以通过德西特宇宙作为惯性运动和惯性系的起

源,并在一定条件下确定德西特空时中的惯性运动和惯性系。这样,德西特惯性原理就在一定意义上突破了爱因斯坦所指的“循环论证”。

事实上,常曲率空时的惯性原理和德西特不变的相对论以及它们的局域化,不仅在为暗宇宙加速趋向的德西特空时中,如何定义物理量、引进物理规律提供基准和依据;也为具有引力的暗宇宙本身,提供这些基准和依据的局域化。

从伽利略相对性原理到庞加莱相对性原理,这是相对性原理公认的发展过程。相对性原理还要不要发展?如何发展?对此,学者们却有着完全不同的认识。按照爱因斯坦的观点,应该从“狭义相对性”到“广义相对性”这一途径发展下去。另一条途径,则是从庞加莱惯性原理发展到陆启铿提出的常曲率空时的惯性原理,进而考虑常曲率空时惯性原理的局域化,描述引力相互作用和真实宇宙。

我们将回顾相对性原理发展的历史过程,分析以广义相对论为代表的途径,论述为什么应该而且可以发展到常曲率空时惯性原理,并进一步考虑这个原理的局域化。这对于明确当前暗宇宙观测事实挑战的实质及如何应对这一挑战,将不无裨益。

一、惯性原理和牛顿力学

文艺复兴时期,近代科学在神学的桎梏下艰难地发展起来。

社会发展呼唤着新的天文体系,以突破越来越繁琐的托勒密地心学说。哥白尼总结大量天文观测数据,汲取先哲关于日心地动的思想、提出日心学说。这个学说较托勒密地心说完美而简单,编制星表的精度也毫不逊色。哥白尼试图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原理的宇宙几何学说,又以日心说的和谐证明上帝存在,表明对上帝的尊敬。但是,由于认为太阳是宇宙中心,违背圣经、触及上帝的权威,哥白尼学说被视为异端;17世纪初,天主教会正式宣布了禁令。布鲁诺支持哥白尼,但不以为太阳是中心,认为宇宙不存在中心。由于宣扬哥白尼学说,布鲁诺被烧死;伽利略也受到教会的严重迫害。亚里士多德-托勒密体系的维护者竭力在学术上反对哥白尼学说,他们的一个理由是:如果地球在高速运动,为什么人们没有感觉?

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,发现了行星运动的开普勒三定律;编制历法的精度也大为提高。伽

利略开创了实验和理性思维相结合的近代物理研究方法,得到许多正确的结果。在名著《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)中,伽利略做了系统的总结。在第一部对话中,他写道:“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……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,也不左右摆动,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……”

伽利略的大船论证详尽地叙述了“舟行不觉”这一极为重要的道理:平稳行驶的船中发生的任何现象,都无法判断船究竟是在平稳匀速运动还是停着不动。这就驳斥了地心说关于地动的非难。对照“地恒动而人不知,譬如闭舟而行不觉舟之运也”,伽利略的论证与《尚书纬·考灵曜》的天才论述何其相似。同样是在论证地动人不觉,同样是在大舟中,同样要关窗。“闭舟行而人不觉”,就是后人所谓的伽利略相对性原理。其实,称为“舟行不觉”原理或许更为恰当。

在第二部对话中,伽利略表述了另一个重要的结果。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,物体将一直以原有速度永远向前运动。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。

笛卡儿最早提出匀速直线(或惯性)运动状态在力学上完全等同于静止状态的思想。他在《哲学原理》(1644年)中指出,“每一单独物质微粒将继续保持同一状态,直到与其他微粒相碰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”。

牛顿力学和万有引力理论是第一个建立在观测和实验基础之上的体系,描述粒子、物体和星球的运

动和引力相互作用, 1687年, 牛顿的《自然哲学之数学原理》巨著问世。著名的惯性定律即第一定律是牛顿力学的出发点:“所有物体始终保持静止或匀速直线运动状态, 除非作用于该物的力迫使该物改变这种状态。”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, 哪一个为绝对运动的。

在伽利略和牛顿的时代, 还没有形成有关坐标系变换、对称性等精确概念。不过, 牛顿第一定律就是叙述惯性参考系中惯性观测者的惯性运动, 这是相对性原理的基础。牛顿的第二和第三定律, 引进了惯性质量、力和加速度的重要观念, 是在描述动力学; 牛顿万有引力定律则描述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。伽利略变换构成伽利略群, 共有 10 个参数, 分别表征时间的平移对称性(1)、空间的平移对称性(3)、空间转动对称性(3)和不同惯性系统之间的相对速度(3)。伽利略相对性原理可以表述为: 在描述 3 维欧氏空间和 1 维欧氏时间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、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的作用。

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。然而, 牛顿当然不会这样来看问题。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, 又没有确定绝对空间和绝对时间存在的“痕迹”。

为了论证存在绝对空间, 牛顿求助于加速度, 提出著名的水桶实验。

按照牛顿的观点, 如果在“闭舟”即伽利略船舱

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。

对于牛顿的绝对空间和绝对时间, 一直有人从哲学上或力学上提出异议。代表人物有莱布尼兹、贝克莱和马赫等。19 世纪 80 年代, 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, 他提出:“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? 只能参照宇宙中的其他物体。”

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, 它们的存在是与伽利略相对性原理及其对称性一致的。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。

牛顿的伟大体系并未完成。质量和惯性、惯性运动的起源问题没有真正解决; 绝对空间和绝对时间是支撑牛顿体系的支柱, 却又缺乏直接依据; 尽管这是伽利略相对性原理的要求, 以致牛顿力学和引力规律中不能出现相对于绝对空间的“绝对速度”。而且, 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; 这称为奥尔伯斯佯谬。同时, 也无法建立一个在引力作用下稳定的宇宙图像; 这称为纽曼-希林格佯谬, 或者二者一起称为夜黑和引力佯谬。

这些佯谬, 也涉及到“闭舟”, 即把人们请到“甲板下面的主舱里”的伽利略船舱。显然, 一旦人们向外张望, 显然就会发现大船是静止还是行进、在以什么速度在行进。其实, 如果允许“向外看”, 只不过对于“不向外看”和“向外看”的实验和观测结果加以区分;“不向外看”的结果和不许“向外看”的结果应该是一样的。因此, 对于“闭舟行”而言,“闭”的要求在一定意义上是可以去掉的。

然而, 这一简单要求对于牛顿万有引力定律的天文应用却很重要: 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。由于无法给出自洽的宇宙学描述，必须被局限在惯性参考系中。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，马赫的批判恰恰有意无意地打中了牛顿体系的这一要害——绝对空间和绝对时间无法与宇宙图景相容。马赫的批判可以引伸出这样的观点：惯性运动和惯性参考系是远方天体总和的引力产物；应该存在这样的理论，不仅满足相对性原理，也可以建立自洽的宇宙图景；而且，自洽的宇宙图景与相对性原理之间存在着内在联系；宇宙图景表现为惯性运动和惯性系的起源。当然，马赫并不知道如何实现他的观点；而牛顿理论却并不是这样的体系。

二、麦克斯韦电磁学、庞加莱相对性原理和爱因斯坦狭义相对论

麦克斯韦电磁学和“以太漂移” 在法拉第大量实验和重要观念的基础上，麦克斯韦建立了电磁理论。这是 19 世纪物理学伟大的理论成就。麦克斯韦电磁学统一了电和磁的规律，预言了电磁波，描述了带电体、光和电磁波的运动，取得了巨大成功。

麦克斯韦方程中出现了光速 c ，按照牛顿的空间和时间观念，光速 c 应该是相对于绝对空间的“绝对速度”；麦克斯韦方程应该仅在相对于绝对空间静止的惯性参考系中严格成立。当时大都以为，电磁波是充满绝对空间的“以太”波动。地球绕太阳运动、太阳系又在银河系中运动；因而地球相对于绝对空间不是静止的，应该能够测量出地球相对于“以太”的“漂移”。然而，所有关于“以太漂移”的可靠实验结果都是否定的；包括迈克耳孙-莫雷实验在内的这类实验，前后延续了几十年。

其实，“以太漂移”和牛顿的水桶实验相似；都是试图通过局部试验来测量大尺度的背景对于局部的影响。如果在“闭舟”即伽利略船舱中进行“以太漂

移”实验，如果存在“以太漂移”，就应该能测量到大船随着地球的“以太漂移”。于是，即使“闭舟”，在原则上也可以通过实验判断出伽利略大船相对于绝对空间的运动状态。不过，“以太漂移”的零结果否定了这一点。伽利略大船代表的惯性参考系和相对性原理在牛顿的绝对空间和“以太”，以及麦克斯韦电磁理论和实验之间，处于一种极其尴尬的境地。

19 世纪末，有人认为物理学已经接近完成了；晴朗的天空中只有“两朵乌云”。即迈克耳孙-莫雷实验和黑体辐射与理论的冲突。其实，“乌云”并不只迈克耳孙-莫雷实验和黑体辐射，夜黑和引力佯谬早就是“乌云”了；放射性的大量实验发现，更是“乌云密布”。至于理论体系自身的问题，就更多了。在这些问题和冲突之中，相对性原理、绝对空间和“以太”论、与“以太漂移”零结果之间的冲突，是最具有代表性的问题之一。

庞加莱相对性原理和爱因斯坦狭义相对论 为了说明“以太漂移”实验的否定结果，洛伦兹、费兹杰惹提出由于与“以太”相互作用而引起“尺缩”和“钟慢”等假说；洛伦兹导出了与之相应的对“以太”相对静止和相对运动的不同惯性系之间的变换，后人称为洛伦兹变换。庞加莱证明，洛伦兹变换构成群；引进空间和时间的平移变换后，仍然成群，称为庞加莱群，即非齐次洛伦兹群。

庞加莱最先提出，把相对性原理作为自然界的普适原理之一，而把伽利略变换推广，变成非齐次洛伦兹变换；他还证明了麦克斯韦电磁方程在相对性原理下的不变性。1904 年，他提出：“按照相对性原理，物理现象的定律对于静止和匀速平动观测者必须是相同的，因此没有办法、也不会有办法确定观测者处在哪一种运动状态。”

在 1905 年的著名论文中，爱因斯坦写道，他是“以相对性原理和光速不变原理为依据的，这两条原理规定如下：

“1. 物理体系的状态据以变化的定律，同描述这些状态变化时所参照的坐标系究竟是用两个在相对匀速移动着的坐标系中的哪一个并无关系。

“2. 任何光线在‘静止的’坐标系中都是以确定的速度 c 运动着，不管这道光线是由静止还是运动的物体发射出来的。”

爱因斯坦以此论证同时性的相对性，否定经典的“以太”，解释“以太漂移”的零结果，建立了他的理

论, 随后又导出重要的质能关系。1908年, 闵可夫斯基利用度规具有符号差的4维欧氏空时, 即闵氏空时, 重新描述了爱因斯坦理论的全部运动学和动力学内容。

事实上, 如果相对性原理的内容不包括庞加莱变换, 而把庞加莱变换作为推论; 那么, 只需要再要求光速 c 作为普通常数就够了。如果相对性原理包括庞加莱变换, 而且庞加莱变换中的速度参数就是光速 c , 那么就不必再另外提出光速不变原理。

把相对性原理从伽利略不变性推广到庞加莱不变性, 并不意味着一定要放弃牛顿的绝对空间和绝对时间观念。据说, 庞加莱甚至知道闵氏度量在非齐次洛伦兹变换下的不变性, 但是他仅仅把这个度量看成数学表述。洛伦兹和庞加莱认为, 存在一类相对于绝对空间静止的“优越”惯性系, 其时间是绝对时间或“真实时间”; 运动系的时间则是“表观时间”。爱因斯坦则放弃了牛顿的绝对空间、绝对时间和绝对同时性。他认为, 所有惯性系都是平权的, 同时性是相对的。于是, 这两种理论在物理上孰是孰非, 能否通过物理实验或者观测来进行检验, 无疑是一个相当重要的问题。有人认为, 问题并未最终解决, 仍需探讨。随着广义相对论的成功, 爱因斯坦的空时观和理论开始为物理学界普遍接受。

在庞加莱和爱因斯坦提出的相对性原理中, 延续了伽利略相对性原理的一个假定——1维时间和3维空间, 或者刚体的位形空间服从欧氏几何。这在当时是很自然的。在爱因斯坦的光速不变原理中, 包含了另一个假定, 即单程光速是不变的。

事实上, 现在所有可以忽略引力效应、与宇观尺度现象无关的宏观尺度上的实验和观测, 都与狭义相对论的理论预言相符。不过, 就上述两个假定的实验基础而言, 后者无法直接为实验所证实; 前者则不够坚实。也就是说, 对于时间和自由空间或刚体的位形空间, 服从欧氏几何的假定, 实验和观测依据并不充分。然而, 这一点很快就被广义相对论的成功所掩盖了。

单程光速不变在原则上无法直接证实。这是因为不这样假定就无法对钟; 而且与是否存在超光速信号无关。如果存在超光速讯号, 只要具体测量这种讯号的速度, 仍然需要对钟; 不论是用什么讯号对钟, 都存在这个问题。实验能够证明的是回路光速不变。不过, 如果回路是在真空的空间和时间之中,

而且满足欧氏几何的均匀性, 那么回路光速不变就意味着单程光速不变。因此, 这个假定与静止的尺和钟服从欧氏几何的假定有密切关系。

应该指出, 伽利略在论述“闭舟”时, 列举的全部是过程和状态, 而不直接是规律; 规律对于不同惯性运动的“闭舟”相同这一点是隐含的。无论是庞加莱的, 还是爱因斯坦的相对性原理, 主要提及的确是规律的不变性以及绝对静止或运动是否可以测量。庞加莱利用含有光速 c 的麦克斯韦方程的不变性, 建立他的理论。爱因斯坦的光速不变原理尽管涉及光源的运动, 从而涉及过程, 但是与建立狭义相对论这一点并没有直接关系。事实上, 光速与光源运动速度无关, 可以作为一个推论。

爱因斯坦强调光行差的重要性; 特别是对于他认识到光速与光源运动速度无关并提出光速不变原理的意义。然而, 这却与“闭舟”, 即从伽利略以来关于相对性原理“不能向外看”的约定不一致。现在, 如果在观测光行差时也观测红移, 那么会怎么样呢? 还存在爱因斯坦意义下的相对性原理吗? 这就是我们下面要探讨的相对性原理和宇宙学的关系问题。其实, 这也是我们曾经提出的一个虚拟问题: 如果河外星系红移、微波背景辐射和宇宙常数在1905年就发现了, 那么洛伦兹、庞加莱和爱因斯坦会怎么办?

三、相对性原理和宇宙学观测之间能够协调吗

著名学者邦迪早在1962年《物理学和宇宙学》的演说中就明确提出, 相对性原理要求惯性系之间没有优越的速度, 河外星系红移等却具有优越速度, 满足相对性原理的基本物理规律没有时间方向, 宇宙演化本身就给出时间方向。因此, “在宇宙学和通常的物理学之间, 看来存在着明显的冲突。”微波背景辐射发现后, 问题更加突出。这是由于微波背景辐射在扣除地球相对于“共动”参考系的漂移后, 基本上是均匀各向同性的, 基本上符合宇宙学原理的要求。1971年, 爱因斯坦的学生和追随者伯格曼在《宇宙学作为科学》一文中写道, “宇宙环境对于局部实验的影响导致相对性原理的等效破坏”。

正如邦迪、伯格曼等所指出的, 在相对论体系中, 相对性原理和宇宙学的不协调非常突出。当然也有人认为, 宇宙环境并不破坏相对性原理; 但是, 却没有见到什么有力的论述。

在爱因斯坦相对论体系中, 相对性原理要求与引力无关的物理规律在惯性系之间的庞加莱群的变

换下不变;和伽利略变换群一样,后者也有10个参数。 $3+1$ 个表征空时平移、3个表征空间转动和3个表征相对速度(推进)。按照爱因斯坦的理论,这些惯性系没有自身的优越速度、时间没有方向性。因此,只要不管引力和宇宙学效应,闵氏空时和庞加莱不变性是相对论物理和实验分析的基准,所有实验都与理论符合。在爱因斯坦狭义相对论中,空时测量、同时性定义以及一些基本物理量的定义,全都与庞加莱不变性密切相关。在相对论性经典和量子力学中,能量、动量和质量的定义和守恒,以及质能公式等,都与空时平移密切相关。在相对论性经典和量子场论中,相应的物理量和公式同样如此。不同场的定义和区分,在于它们是庞加莱群不同的不可约表示,这些不可约表示以庞加莱群的两个不变算子的本征值来表征,分别是质量平方和质量自旋的平方。第一个算子由平移群的生成元给出,第二个算子依赖于平移群和齐次洛伦兹群的生成元,它们共同构成庞加莱群的代数。

然而,如果要进行宇宙学观测或者进行与宇宙背景有相互作用的实验,或者要测量这些相互作用的效应,就会出现问题。河外星系红移表明,它具有优越速度,暗示宇宙在膨胀;宇宙膨胀又给出时间方向。微波背景辐射大体上可以代表3维宇宙背景空间的性质,不过要扣除地球实验室相对于微波背景辐射的“漂移”。这类实验和观测的结果表明:适当扣除我们实验室的“漂移速度”、忽略原初扰动,在一定近似下,大尺度的宇宙背景空间是均匀各向同性的,具有6个参数的变换群。按照广义相对论,这样的宇宙背景空时的度量是弗里德曼-罗伯孙-沃克度量,依赖于标度因子和一个标记3维宇宙空间为开放的伪球面、欧氏空间还是闭合球面的参数 $k = -1, 0, 1$,对应的对称性分别是“转动群” $SO(3, 1)$ 、欧几里德群 $E(3) = ISO(3)$ 和“转动群” $SO(4)$;标度因子仅依赖于宇宙时,其形式以及 k 的数值由宇宙中物质分布的能动张量通过爱因斯坦场方程决定。在这种背景空时里,由于存在优越速度和时间方向,相对性原理不再成立;按照庞加莱群的不可约表示对于物质场的区分和有关物理量的定义,也失去严格的意义。

但是,在相对论体系中分析宇观效应的数据,仍然要用以相对性原理和庞加莱不变性为依据的基本物理量和有关物理规律。这就出现问题:在什么意

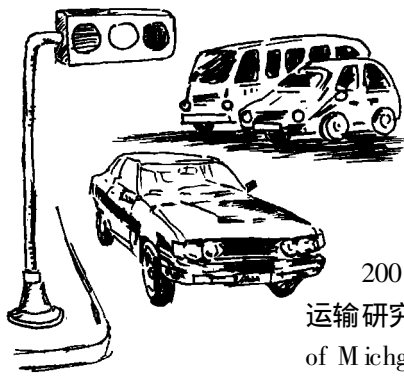
义下可以利用闵氏空时和庞加莱不变性下的物理量和物理规律,来分析有关宇宙效应的数据?近似程度如何?在相对论体系中二者如何协调?

习惯的看法认为,这些不协调是两类不同物理问题引起的,不是本质的冲突;就像其他物理理论一样,往往可以用来研究具有不同对称性的物理系统。然而,狭义相对论与宇宙学的关系却并非如此:两者都是关于空时的理论,作为宇宙学基础的广义相对论,在一定程度上是以狭义相对论为依据建立起来的;而相对性原理却又明显与宇宙学观测不相容。事实上,一切实验和观测都是在我们的宇宙之中进行的。如果找不到我们宇宙近似满足的宇宙学原理和相对性原理之间的关系,宇观尺度上由庞加莱相对性原理以及庞加莱不变性为基准,引伸出来的观念和建立起来的理论,就会失去严格的基础。当前物理学的一个重要趋势,就是将宇观尺度与微观尺度的物理联系起来,由相同的物理规律来描述;这就应该解决相对性原理与宇宙学间的不协调。然而,在爱因斯坦相对论体系中却无法做到。

这种不协调,同样可以追溯到“闭舟”或伽利略船舱,不过却值得反思。其实我们提到,就“闭舟”即伽利略船舱而言,只要找到“不向外看”和“向外看”的结果之间的联系和区别,加以区分即可。对于“闭舟”或伽利略船舱,这是很容易做到的。

然而,由于无法建立自治的宇宙图景,牛顿体系却无法做到。对于爱因斯坦相对论体系,尽管可以建立自治的宇宙图景,但是也无法消除这种不协调。

反映基本自然规律的基本原理之间应该是相互协调的。因此在一定意义上,应该存在排除这种不协调的空间-时间和宇宙理论。既具有相对性原理,又可以“向外看”、观测和描述宇观现象,二者之间具有一定的联系。不过这样一来,宇宙学背景就有可能成为相对性原理基础的惯性运动保障或者起源,甚至会在一定意义上确立这些惯性系统。另一方面,宇宙学背景也会在满足相对性原理的惯性系中,“挑选”出一类时间方向与宇宙演化的时间方向一致的,相对“优越的”惯性系。于是消除二者的不协调,既有可能在给出惯性运动的宇宙学起源、在一定意义上确立惯性系统,也有可能是在所有的惯性系统之中,确立一类与宇宙演化方向一致的“优越的”惯性系。当然,这既不意味着回到牛顿,也并不意味着回到经典“以太”。



汽车设计与交通安全 中的物理知识

高凌云 编译

2001年密歇根大学
运输研究学院(University
of Michigan's Transporta-

tion Research Institute)的负责人帕特里西娅·华勒说,“使用高速公路在让我们获益的同时,我们必须默认一定程度上的交通伤亡。目前对美国来说,可以接受的交通伤亡率是每年40000~42000人。”2004年美国交通事故死亡42636人。交通事故(如图1)已在美国年轻人的死因中高居榜首。

发生交通事故并导致伤亡,多数是由驾驶技术差、路况不好和汽车本身存在隐患等原因造成的。驾驶失误的原因很多,包括打瞌睡、缺乏经验、飙车、饮酒和走神。在各类事故中,瞌睡引起的事故可能要占1/4。年轻男司机尤其危险。

农村地区道路以及州与州交界处的高速公路设计并不完善,常常是狭窄、昏暗,设计拙劣,路肩宽度不足或者根本没有路肩。当农村地区逐渐变成郊区时,交通流量往往超出设计预期。有限的交通管制措施使超速者毫无顾忌,这些偏僻道路距离急救医疗场所通常较远。在美国,一半的交通伤亡事故发生在每平方英里(1平方英里 ≈ 6.7 平方千米)70户以下的乡村地区。这里居住的人口不到美国总人口的1/3,面积却占国土的90%。

我们可以想出很多办法来改变不安全地驾驶方式、改造不安全的路段,这篇文章^①主要谈汽车设计方面的物理知识。在这里,我们假定减轻汽车重量可以提高燃油经济性,我们也认为减轻汽车重量可能要冒极大的风险。这一观点依据的是简单的物理

学原理,忽略了汽车结构、汽车间的不共容性^②以及影响撞击伤害严重程度的乘客约束问题。

伤害的直接原因

撞车时发生的严重伤害主要是由两个直接原因造成的:第一个是硬接触,是指乘员被撞瘪的车壳挤压所伤,或是约束不当的乘员撞击坚硬的乘客舱表面而受伤;第二种情况叫做强迫减速伤害,是指汽车因撞击而强迫减速时乘客被所系安全带或弹出的气囊所伤害,这种伤害程度较轻,不过安全带或气囊的作用力仍有可能对乘员造成严重伤害。

我们首先考察前方撞击测试。图2所示为一辆中型小轿车正面撞击坚硬的刚性障碍物时的理想化速度-时间曲线图,以固定障碍物为参考系。小轿车的初始速度为每秒15.6米,坐在前排右座上的假



图1 一辆中型小轿车的侧面被同等尺寸小轿车撞击后,乘客舱遭受严重挤压;在密歇根大学的一次汽车碰撞的研究中,测量系统确定了汽车车身相对于其原来表面的横向变形;正如文中所述,对真实道路交通事故和室内撞击试验进行的综合分析,将指导专业人员设计出更安全的汽车

前面提及,在马赫对牛顿绝对空间的批判中,就隐含着要求相对性原理与宇宙图景之间相互协调。不过,马赫要求这是通过宇宙总体或远方星体总和的引力来实现的;马赫当然不可能知道,按照现在的引力理论,一旦出现引力,惯性运动就不再存在,存在的是惯性运动的局域化,或者局部惯性运动。

是否存在相对性原理与宇宙学相互协调的理论呢?在区分惯性运动和局部惯性运动的意义上,应该存在。这也是相对性原理应该进一步发展到陆启铿提出的常曲率空时相对性原理的一个重要原因。

(中国科学院理论物理研究所 100080)