

郝庆年◎编著

泛参考系力学

MECHANICS IN PANREFERENCE FRAME

爱因斯坦：“全部经典力学就等于悬在半空中，因为我们不知道它属于哪一个坐标系。”

本书的工作就是要在低速宏观范围内，将经典力学的规律安放到各种参考系，即“泛参考系”的基地上。

本书将为广大中学生提供非常简明的物理图像和许多巧妙的解题方法。



兰州大学出版社
LANZHOU UNIVERSITY PRESS

泛参考系力学

MECHANICS IN PANREFERENCE FRAME

郝庆年◎编著

兰州大学出版社

《泛参考系力学》简介

本书坚持宇宙间不存在绝对运动观点, 扬弃经典力学中绝对静止的惯性参考系, 吸收广义相对论中引入相对论的引力场概念, 把经典力学

图书在版编目(CIP)数据

泛参考系力学/郝庆年编著. —兰州: 兰州大学出版社,
2007.11

ISBN 978-7-311-03037-7

本书是以中学... 为主要读者对象的, 所以设

I. 泛... II. 郝... III. 力学—中学—教学参考资料

IV. G634.73

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 178174 号

- | | |
|------|---|
| 书 名 | 泛参考系力学 |
| 作 者 | 郝庆年 编著 |
| 出版发行 | 兰州大学出版社 (地址: 兰州市天水南路 222 号 730000) |
| 电 话 | 0931-8912613(总编办公室) 0931-8617156(营销中心)
0931-8914298(读者服务部) |
| 网 址 | http://www.onbook.com.cn |
| 电子信箱 | press@onbook.com.cn |
| 印 刷 | 兰州德辉印刷有限责任公司 |
| 开 本 | 880×1230 1/32 |
| 印 张 | 4 |
| 字 数 | 90 千字 |
| 印 数 | 1~1000 册 |
| 版 次 | 2007 年 12 月第 1 版 |
| 印 次 | 2007 年 12 月第 1 次印刷 |
| 书 号 | ISBN 978-7-311-03037-7 |
| 定 价 | 12.00 元 |

(图书若有破损、缺页、掉页可随时与本社联系)

关 于

《泛参考系力学》一书

(代 序)

郝庆年老师编著的《泛参考系力学》一书,是一本以中学生为主要读者(对大学低年级学生也有参考价值)的好书。该书通俗易懂、深入浅出地介绍了爱因斯坦广义相对论的基本思想,如时间、空间、物质与引力场,惯性参考系与加速参考系,等效原理等等;解读了爱因斯坦的一些深奥的科学哲学思想,科学的美学原理和科学的认识论问题。在此基础上,作者分析了牛顿经典力学的内在矛盾和局限性,基于引力场和惯性力场局域等效的等效原理,把经典力学推广到加速系,提出了“泛参考系力学”的概念;分析了牛顿关于“力是物体之间的相互作用”的观点的局限性,依据等效原理,提出了“加速参考系也是引力之源”的观点,把经典力学中作为虚拟力的“惯性力”提升为加速坐标系中的“引力”;依据广义协变性原理,提出按实用的观点把物理参考系划分为引力场强度为零和引力场强度非零的“泛参考

系”，避免了经典力学中惯性系和加速系之间的绝对划分，比较简洁地处理了一些经典力学中的非惯性系（加速系）中的力学问题，有独到之处。虽然广义相对论的非相对论极限可以处理本书所讨论的加速系中的力学问题，但是作者以中学生能理解的方式处理这些问题，却是难能可贵的；对于通俗地给中学生介绍广义相对论的基本概念，也是有参考价值的。

作者在书中注重讨论的一些问题，如时空的属性，何为惯性和惯性运动，惯性参考系的存在问题，引力质量和惯性质量以及引力场和惯性力场的本性，场的普遍性和粒子的特异性，科学规律真理性的美学原理，科学认识的相对性，对科学理论和科学大师的真理财富的继承和当代科学家自己应有的创新，等等，都是现代物理学正在探索的基本问题和重要问题。本书的分析和讨论，对爱因斯坦的深刻而宝贵的科学和哲学思想财富的解读与介绍，无疑会促进年青读者们去思考这些基本问题。在物理学正面临重大变革的今天，引导对物理学感兴趣的年青人关注物理学基本问题，鼓励他们从事这一领域的探索与研究，这对于物理学的发展和变革来说，是十分必要的和重要的。

爱因斯坦广义相对论以广义协变性原理和等效原理剥夺了惯性参考系的特殊性。但是，爱因斯坦并不怀疑真空背景场的存在。在今天，量子真空背景场的存在已为众多实验所证实，普遍为物理学家所承认。对真空背景微波辐

射各向异性的精密测量,可以在一定精度下测得我们相对于真空背景场的运动速度,“惯性参考系”以真空背景场的现代形式出现。然而,这一“惯性参考系”,并不是牛顿的不动的“绝对空间”,而是有丰富物理内涵的、万物赖以存在的真空背景场,它不但不与爱因斯坦相对论矛盾,相反,它正是相对论的物理基础。爱因斯坦和现代物理学与宇宙学告诉我们:时空是我们所在的这个宇宙的真空背景场的时空,而广义相对论则揭示了真空背景场的宏观平稳部分作为四维黎曼时空流形(几何体)的尺钟效应和普适的物理效应的深刻内涵及其科学的对称性之美。

以上意见仅供参考。

四川大学物理系 王顺金

2005年5月15日

王顺金,四川大学物理系教授,博士生导师,中国高能物理学会理事,《高能物理与核物理》、《原子核物理评论》编委。曾任美国加利福尼亚大学伯克利分校顾问、美国橡树岭国家实验室、德国重离子研究所、马克斯—普朗克核物理研究所等机构及马里兰等8所大学客

座教授。创立了原子核多体关联动力学、物理系统的代数动力学和代数动力学算法。被评为“国家有突出贡献的中青年专家”。

导 言

按牛顿的观点,经典力学只适用于以绝对静止为基本特征的惯性参考系。广义相对论认为这样的参考系是不存在的。因此,爱因斯坦讲:“全部经典力学就等于悬在半空中,因为我们不知道它属于哪一个坐标系。”

本书就是想以广义相对论的基本思想为依据,革新经典力学,将其由“半空中”安放到任何参考系,即“泛参考系”的基地上。

狭义相对论和广义相对论各是以两条基本原理为基础建立起来的。泛参考系力学是属于广义相对论体系的,是以以下三条原理为基本依据的:

一、一切运动都是相对的;

二、物理学定律对任何参考系都是相同的(协变的),就本书言,可说成是,经典力学的基本规律在低速宏观范围内对各参考系都是适用的。

三、等效原理:在足够小的范围内加速参考系和引力场等效。

大凡原理,都是以一定事实为依据的假定或信念。这里的第一条原理就是一种信念。人们可以不接受它,就像经典力学那样。我们所以接受它,因为,第一,这种运动观能很好地解释更多的观察事实;第二,我们认为宇宙间不存在绝对空间和绝对运动;第三,则是需要,我们大量研究和处理的都是以问题的具体情景所选择的物体(即是以任意物体)作参考系的问题,第一条原理适应这样的要求。第二条原理也是一种信念。可以认为不同物体作参考系描述运动其规律是不同的,如经典力学就是这样。但也可以认为是相同的,广义相对论就是以此为一条基本原理的。后者不是“唯心论”,是我们对宇宙统一性、和谐性或说是对物理美学原则的笃信。用一个我们易于接

受的说法是：物理规律本身应是客观的、确定的，不应因有无人的观察和在什么物体的参考系观察而不同。正是这个信念去指导我们判断一个理论的优劣，导引人们去构建更完美的理论。从这个意义上讲它更是一条重要的指导原则。要把它变为现实是需要付出相当的艰辛，做出极卓越的工作的。广义相对论就是这样的理论的一个典范。第三条原理是广义相对论的另一条基本原理，我们对它的信念是以爱因斯坦的思维实验和广义相对论的巨大成功为事实依据的。

下面让我们以这样的观点去考察本书的基本思路吧。

按第一条原理，宇宙应是无中心的，一切物体都在相对运动着，没有任何物体有绝对优越的地位。这样，每个物体都有平等的资格作参考系去描述其它物体的运动。然而当我们以不同参考系运用经典力学描述时却遇到了很大的矛盾。最简单的事例就是分析在地面上水平加速行进列车的光滑底板上放置的小球的行为。这里有两个参考系：地面和列车。地面系观察者看到小球在水平方向上不受力，小球不动，他认为这符合牛顿第一定律。列车系观察者同样看到小球在水平方向上未受力，但却做加速运动，他认为牛顿第一定律不成立。

对此矛盾，经典力学采取的是回避态度，各立门户：把地面这样被认为是绝对静止的参考系叫做惯性参考系，并把自己退缩到这种参考系中；把类似列车这样的参考系叫做非惯性（或加速）参考系，并宣布在这样的参考系中，经典力学不成立。泛参考系力学拒绝这种态度，坚持第二条原理，认为在低速（ $V \ll C$ ）宏观范围内，经典力学关于“时间均匀流逝；空间是三维的欧几里德空间；时间和空间各自独立”的观点是正确的。经典力学所选用的量及所建立的基本规律也是正确的，只是在惯性参考系，力等某些概念方面存在缺陷，妨碍了它的广泛的适用性。而这些缺陷在广义相对论创建后的现在是不难克服的。为此，我们引入了第三条原理：在足够小的范围内，加速系和引力场等效，按我们更实用的说法：加速系也是一种实在的引力

源。列车系中的小球正是受了这个引力场作用才有了加速度,于是牛顿第一定律成立了。但等效原理与牛顿关于力是物体间相互作用的观点是冲突的。于是,我们不得不揭示牛顿观点的局限性,为扩展力的概念扫除障碍。

为了让读者对第三条原理有较深的了解,本书又谈了空间与场的关系,引出了“任何空间都有引力场”这个广义相对论的结论(引力场实际上是空间弯曲的反映),使泛参考系力学在理论上具有较充分的说服力。接着我们用较大的篇幅修定经典力学,建构泛参考系力学,并举例讲了它的简美的有魅力的应用。最后作为本书重要内容,我们宣传了爱因斯坦的科学哲学思想,它将会大大地激发人们的创新热情和创造活力。

目 录

关于《泛参考系力学》一书(代序)	王顺金
导言	(1)
第一章 运动与参考系	(1)
第二章 “惯性参考系”析	(6)
第三章 等效原理	(16)
第四章 力	(27)
第五章 空间与场	(33)
第六章 泛参考系动力学	(40)
第七章 泛参考系力学的应用	(65)
第八章 最富创造性的思想	(89)
怎样向中学生介绍“泛参考系力学”	(100)
附录一 爱因斯坦转盘	(103)
附录二 广义相对论中时空及惯性参考系问题简介	(105)
关于“泛参考系力学”问题研讨的说明	(108)
后 记	(114)

第一章 运动与参考系

全部物理现象都具有这样的特征,即它们不为“绝对运动”概念的引进提供任何根据。

——爱因斯坦

因为我们是根据离开任何我们认为不动的物体的那些事物的位置和距离来定义所有处所的;而对于这些处所来说,我们是在考虑物体从这样一些处所移动到另一些这样的处所的情形下,算出所有的运动的。

——牛顿

1. 运动的绝对性与相对性

1 宇宙是由物质构成的;运动是物质的存在形式。

运动是绝对的,也是相对的。所谓绝对的,是说宇宙间的一切物体,大到星球、星系、星系团、超星系团,小到原子、原子核、基本粒子和夸克,无一不在不停地运动着。宇宙间不存在绝对静止的物体,或说宇宙间没有绝对静止。所谓相对的,则是说描述任何物体的运动,都是就它相对于别个物体,即相对于所选“参考系”而言的。上面所说的运动的绝对性,其中的运动也是在相对性的这个意义上讲的。

爱因斯坦说：“运动总是显示为一个物体对另一个物体的相对运动（比如汽车对于地面，或者地球对于太阳和恒星）。运动决不可能作为对于空间的运动，或者所谓‘绝对运动’而被观察到的。……全部物理现象都具有这样的特征，即它们不为绝对运动概念的引进提供任何根据；或者用比较简短但不那么精确的话来说：没有绝对运动。”^①无绝对运动，就是说物体没有不以别的物体作参考的自身固有的运动。当我们在描述某个物体的运动时，总是或明确或隐含有参考物体。倘若在广袤无垠的宇宙空间中只有一个浑然均匀的物体，我们则无法判断其是否在运动，更说不清它如何运动了。

2. 参考系

对于描述物体的运动，参考系的选择具有根本意义。不给定参考系则无法描述任何物体的运动，既不能确定其运动方式，也不能确定其运动程度，甚至连物体是否运动也判别不了。对物体的同一状态，不同参考系的描述是不同的。比如从一架水平均匀速度（从地面上看）飞行的飞机上掉下一个物体，以飞机作参考系看它是自由落体运动；以一同掉下的另一个物体作参考系看它是静止的；以稍晚时刻掉下的物体作参考系看它是匀速直线运动的；而以地面作参考系看它则是做平抛运动的，其轨迹是抛物线。地面上放一物体，对地面参考系而言是静止的，但对太阳参考系来说，它则是做着既绕太阳以椭圆轨道公转又随地球自转的十分复杂的运动。

那么，什么是参考系呢？对此，牛顿在他的名著《自然哲学的数学原理》（以下简称《原理》）中有如下的论述：“因为我们是根据离开任何我们认为不动的物体的那些事物的位置和距离来定义所有处所的；而对于这些处所来说，我们是在考虑物体从这样一些处所移动到另一些这样的处所的情形下，算出所有的运动的。”^②这里，牛顿显然

是以人们“认为不动”的物体来定义参考系的。在经典力学中这是正确的。详细点讲,参考系就是人们为了描述研究对象(物体)的运动而选定的、认为是静止的某物体上固定的坐标系。通常我们只是说选某物体作参考系,实际上这里还赋予了以该物体判别其它物体空间位置的这种坐标系的功能。

为什么牛顿在谈参考系时要指出它是“我们认为不动的物体”?因为,在牛顿看来宇宙间未必有(尽管他很希望有)绝对不动的物体;另外,在实际观察和研究物体运动时,并不一定需要以绝对不动的物体作参考系,而是按照实际情况选某个物体作参考系,将运动描述清楚就足够了。例如描述在公路上行驶的汽车和在轮船上运动的人时,通常只需要以地面和轮船作参考系就可以了。

描述物体的运动,除了空间三维坐标外,还应有时间。在经典力学中,时间被认为是与空间无关而均匀流逝的。因此,所有各参考系可用一个共同(或在每个参考系上放置一个事前在一起校正好)的时钟来计时。所以,通常参考系都是指三维空间坐标系。但在接近光速的情况下(即狭义相对论的适用范围),时钟快慢会随参考系物体运动而变化。这时,参考系中除了三维空间坐标外还应有自己的“时间坐标”,合起来构成四维的时空坐标。

3. 关于参考系的几个问题

①参考系的基本属性是静止。我们再次重申:在经典力学中从运动学角度讲,参考系的基本属性就是静止(通常人们并不赋予所选参考系物体以匀速直线运动的方式运动),而且,这个静止不是客观存在,是人们“认为的”。这即是说,当我们选定某个物体(这可以是任意的!)作参考系时,就应认为它是一个静止的物体。它本身无运动可言,因而更谈不上它的运动方式。

除了在进行不同参考系的转换时,需要指定某个参考系的运动方式,然后再依此确定其它参考系的运动方式外,直指(即绝对地说)某个参考系是何种运动方式都是与定义不符的。然而,平时我们常有这种“直指”的情况。其实,这大多不过是指地面为静止。这是我们长期生活在地球上的人们的习惯见解;还有些则是由所研究的问题的特定情况看,存在着合适的可被认为是静止的物体。例如研究行星运动时,以太阳作静止是最自然的。

应当说明的是,在经典力学中早就有了按物体有固有运动方式的观点将参考系进行分类的做法了。由此导致了一些根本性的矛盾。本书的重要目的之一就是想废弃这种分法。

②任何物体都可被选作参考系来描述所研究物体的运动。这里,没有什么物体享有特权,它们都有同样的资格。研究轮船上某物体的运动时,可以以船上某物体作参考系(它可以是相对船运动的),可以以船作参考系,可以以水面为参考系,也可以以地面为参考系,它们都是同样被允许的。只要描述无误,它们都会给出正确的结论。但这并不等于说,对所研究物体运动的描述以任何物体作参考系效果都相同。即如前述的放在地面上的某物体,在地面参考系与太阳参考系上看,其运动状况和繁简程度大不相同。所以在研究物体运动时,从实际情况出发选择哪个物体作参考系物理图象简明清晰、处理方法简便就是十分重要的。这里大有文章可做。然而,此处不存在正确与错误的问题。历史上关于天体运动的托勒密的“地心说”与哥白尼的“日心说”的“真理性”的争论,是不适当地给各自参考系赋予了绝对意义。应当说它们都是正确的。只不过“日心说”的图象更简明。但是,在这场争论中,“日心说”胜利的进步意义是应充分肯定的。从物理学角度讲,在描述太阳系各行星的运动时,太阳不仅有资

格作参考系,而且较之地球是更好的参考系;从反对宗教统治的角度讲,它有力地批判了中世纪天主教会所支持和宣扬的“地球是宇宙的中心”的观点。从此,开始了自然科学的真正的解放运动。

③不同参考系上观察到的运动现象和观测的各物理量,诸如运动轨迹、速度、加速度、力、能量、波长、频率(周期)等,原则上说都应该是不同的。因此,当谈及物理定律或判断物理定律在某参考系中是否成立时,定律中各物理量的值都应该是该参考系中的值。这一点本来是理所当然的。但在许多时候人们却疏忽或背离了它。

参考文献:

①爱因斯坦文集.北京:商务印书馆,1977年3月,第一卷,P.455。

②[美]H·S塞耶编.牛顿自然哲学著作选.上海:上海人民出版社,1974年11月第一版,P.22。

第二章 “惯性参考系”析

为什么惯性系在物理上比其它坐标系都特殊,这是怎么一回事?

——恩·马赫

[惯性系]这一概念所以不能令人满意,是由于下述理由:没有任何深刻的根据,就在所有可想象的坐标系中间挑选出某些坐标系来,然后假定物理定律(比如惯性定律和光速不变定律)只适用于这种惯性系。

——爱因斯坦

我们可以把绝对运动和惯性坐标系的鬼魂从物理学中赶出去,从而建立一个新的相对论物理学。

——爱因斯坦 英费尔德

1. 惯性参考系的由来

牛顿三大运动定律是经典力学的基石,而其中的第一定律又是三大运动定律的基石。对于这个基石的基石定律,牛顿是这样叙述