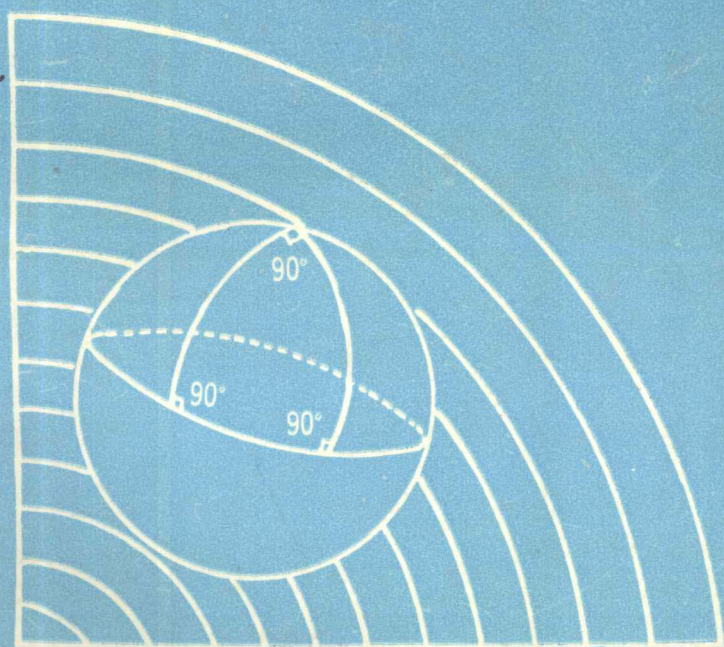


图 解 相 对 论

郭 远 珍 编 著



航空工业出版社

图 解 相 对 论

郭 远 珍 编 著

航 空 工 业 出 版 社

1995

(京)新登字 161 号

内 容 提 要

本书共分三篇:狭义相对论、广义相对论和宇宙学。以历史为线索,物理意义为主要内容,用著名的实验和天文观测为事实,借假想实验,用图解的形式对相对论的主要内容、基本概念、基本理论、各种悖谬和结论作了简要的介绍。同时还对在广义相对论基础上建立起的现代宇宙学中的宇宙起源与演化、宇宙的膨胀、元素起源与丰度、宇宙年龄以及各种宇宙模型和天体物理学的一些前沿科学问题进行了介绍,为了增强说服力,保持学科的严肃性、科学性也用了必要的数学公式。

本书以文引路,以图说文表意,是一本有关相对论和宇宙的图解科普读物,适合物理、天文、哲学工作者和具有高中文化水平的,渴望探索宇宙奥秘的年轻读者阅读。

图书在版编目(CIP)数据

图解相对论/郭远珍编著. —北京:航空工业出版社,1995.8

ISBN 7-80046-898-4

I. 图… I. 郭… III. 相对论-图解 N. 0412.1-64

中国版本图书馆 CIP 数据核字(95)第 17083 号

航空工业出版社出版发行

(北京市安定门外小关东里 14 号 100029)

南京航空航天大学印刷厂印刷

全国各地新华书店经售

1995 年 9 月第 1 版

1995 年 9 月第 1 次印刷

开本:787×1092 1/16

印张:25.63

字数:622 千字

印数:1—1500

定价:21.50 元

前言

由爱因斯坦创立的相对论是继 17 世纪前后以牛顿为代表的物理学巨大飞跃以来又一次巨大的飞跃,是物理学和自然科学的伟大成就,也是其他现代科学技术不可缺乏的基础理论。因此不少中外学者在这一领域辛勤探索、奋斗,取得了重大突破,有的还成为诺贝尔奖金获得者。现在相对论也已经开始成为世界各国大学物理专业的学生喜爱的重要内容。但是由于相对论的高度抽象的概念,高深难懂的数学,和似是而非、很不寻常、与人们正当想法和习惯、直接经验格格不入,甚至达到相抵触的地步的结论和推论,使初学者感到十分神秘和畏惧,影响了人们学习和研究这门学科的兴趣。

国内外关于相对论的著作也不少,但多为专著,在科普读物中虽然也有像小说一样引人入胜的通俗读物,但却又偏浅,它只能给人对相对论粗略的了解,用公式和图形相结合论述相对论的书不多,而且图形较少又较零碎。

本书尝试填补这个空隙,以图解的方式,对相对论和宇宙学的基本概念、原理和理论以及所用实验、天文观测进行介绍,使抽象的概念形象化、直观化,高深的数学几何化,帮助读者理解复杂的问题,绕过学习中的障碍,懂得新概念的奇特性,并不是相对论的缺点,而是它的革命性的最大的特征之一,正是这些新奇的观念的根本性,使得相对论在科学史上占有崇高的地位,使它成为物理学的一块基石。消除对初学者的畏惧心理,激发学习研讨兴趣。

图解方法阐明复杂问题并不是创新。伟大科学家爱因斯坦、波尔、海森伯等人在解释最复杂的问题时就采用了这种方法,并且在作图中用了夸张的手法。与图并用的还引用了一些原始资料 and 照片。相对论是一门运用数学很多的科学,根据本书的图解宗旨把数学的使用压缩到最低的限度。但是为了加强说服力,保证知识的科学性和严肃性,在某些重要内容上还是列出必要的公式。

本书共分三篇十三章。狭义相对论是关于物质世界的时空和在时空中物质高速运动的普遍理论,是在不同惯性系中测量和描述事件,它把宇宙中最基本的物理量:时间、空间、物质和运动联系起来。根据光速不变原理和相对性原理得到了质速关系,揭示了质量和能量的内在联系,以及时间膨胀,运动尺收缩,双生子佯谬和长度佯谬等效应。

广义相对论是关于更广阔时空领域内的引力论,它摒弃了惯性系的优越地位,提出了等效原理和广义相对性原理,将引力和时空几何联系起来,用弯曲空间来描述物理世界。它取代了牛顿的万有引力理论,准确地解释了水星近日点

的进动,科学地预言了引力频移和光线在强引力场中的弯曲等现象。由引力方程还得出了引力波、天体坍缩、致密星、白矮星、中子星、黑洞等。的确,广义相对论是科学上最完美、最精湛的创造。

广义相对论是现代宇宙学的基础,在第三篇中着重介绍了现代宇宙的内容,天文观测事实,宇宙起源与演化,宇宙膨胀与年龄,宇宙的大爆炸和微波背景辐射,元素的起源与元素的丰度,正反物质及各种宇宙模型等。这三篇既是一个整体,又各成系统,独成一册,可单独使用。书中还涉及到有关物理学,天体物理学,宇宙学问题一些前沿课题和新进展。同时吸收了经典理论的某些精华,并注意了与经典理论的对比,保证内容的完整和系统性。

本书是个人学习的体会,水平有限,错陋难免,欢迎指正。

湖南张家界市武陵大学

郭远珍

1994年8月

目 录

第 1 篇 狭义相对论

第 1 章 狭义相对论的建立	(1)
1.1 参考系、坐标系	(1)
1.2 惯性系和非惯性系	(7)
1.3 伽利略相对性原理——力学的相对性原理	(12)
1.4 经典的坐标变换——伽利略变换	(14)
1.5 电磁理论(光)不遵从伽利略相对性原理	(17)
1.6 以太和绝对参考系	(21)
1.7 迈克尔逊-莫雷实验	(24)
1.8 对迈克尔逊-莫雷实验零结果的解释	(29)
第 2 章 狭义相对论的基本原理	(37)
2.1 爱因斯坦 1905 年的论文	(37)
2.2 狭义相对论的基本原理(两个假设)	(39)
2.3 光速不变的检验实验	(43)
2.4 洛伦兹变换	(50)
2.5 四维时空和间隔不变性	(60)
第 3 章 狭义相对论的时空观	(74)
3.1 牛顿的绝对时空观	(74)
3.2 同时的相对性(时间的相对性)	(76)
3.3 运动的时钟变慢效应(时间膨胀)	(85)
3.4 运动物体的长度缩短效应	(105)
3.5 时间次序问题	(118)
3.6 多普勒效应	(119)
第 4 章 相对论动力学	(129)
4.1 相对论的质量、质速关系	(129)
4.2 相对论的动量	(136)
4.3 相对论的能量、质能关系	(138)
4.4 能量、动量关系	(148)
4.5 相对论的运动定律	(157)
4.6 康普顿效应	(164)

第 2 篇 广义相对论

第 5 章 等效原理	(171)
5.1 狭义相对论的缺陷	(171)
5.2 等效原理	(181)

5.3	引力和引力场	(194)
5.4	反引力(质量排斥)	(208)
第6章	马赫原理和广义相对性原理	(211)
6.1	马赫原理	(211)
6.2	广义相对性原理	(214)
第7章	广义相对论的空间和时间	(216)
7.1	弯曲空间、黎曼几何及度规	(216)
7.2	理想实验对弯曲时空的分析	(222)
7.3	引力方程	(230)
第8章	广义相对论的检验	(233)
8.1	引力方程的史瓦西解	(233)
8.2	引力与时间的关系——引力频移	(234)
8.3	粒子在球对称场中的运动与水星近日点的进动	(242)
8.4	光子在引力场中的运动——引力场中光线的弯曲	(246)
第9章	引力波及其探测	(254)
9.1	引力波	(254)
9.2	引力波的性质	(255)
9.3	引力波的波源	(256)
9.4	引力波的能量	(259)
9.5	引力波的探测	(264)
第10章	黑洞	(275)
10.1	恒星的演化	(275)
10.2	黑洞及表述黑洞的几个概念	(282)
10.3	黑洞的性质	(293)
10.4	黑洞的辐射(蒸发)	(298)
10.5	黑洞的观测	(304)
10.6	白洞和其他宇宙洞	(313)

第3篇 宇宙学

第11章	宇宙学发展简史	(319)
11.1	古代宇宙观	(319)
11.2	经典宇宙论	(322)
11.3	现代宇宙论(简介)	(326)
第12章	现代宇宙学	(327)
12.1	宇宙学原理与罗伯逊-沃尔克度规	(327)
12.2	河外星系的谱线红移和哈勃定律	(331)
12.3	星系和射电计数	(336)
12.4	宇宙微波背景辐射	(341)
12.5	元素(氢)的丰度	(345)

12.6	标准宇宙模型.....	(357)
12.7	宇宙的演化.....	(364)
12.8	大爆炸模型的困难与暴胀宇宙.....	(379)
第13章	其他宇宙模型	(383)
13.1	爱因斯坦有限无界的静态宇宙模型.....	(383)
13.2	稳恒态宇宙模型.....	(383)
13.3	霍伊尔-纳里卡宇宙模型	(385)
13.4	等级式宇宙模型.....	(388)
13.5	震荡宇宙模型.....	(389)
13.6	暴胀宇宙模型.....	(390)
13.7	正反物质宇宙模型.....	(390)
13.8	紊乱或气泡宇宙模型.....	(394)
13.9	宇宙弦模型.....	(394)
附录	一些重大物理、天体物理事件年表	(401)
	参考文献.....	(404)

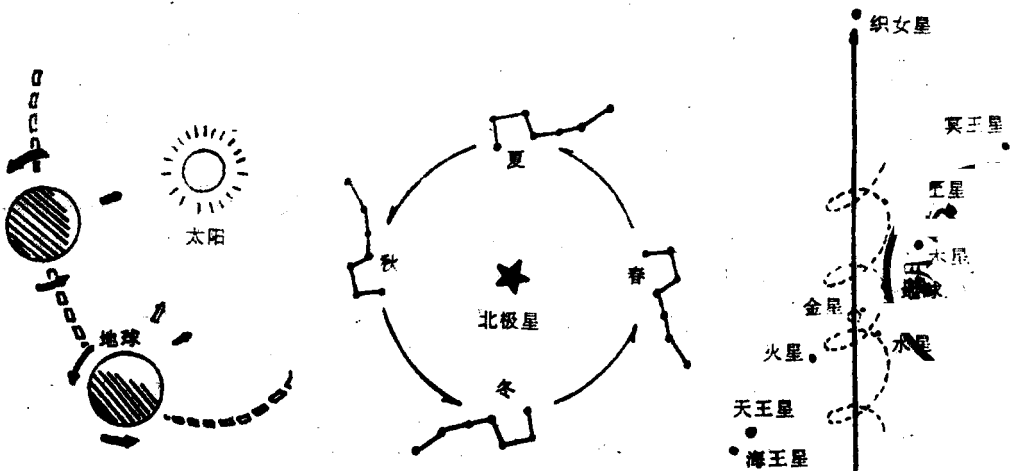
狭 义 相 对 论

第一章 狭义相对论的建立

1905 年爱因斯坦建立起狭义相对论,它在科学中第一次引入了既违反常识,又无法形象化的概念,使人们感到神秘,望而生畏。尽管这个新理论在概念上离我们那么遥远,但是它所产生的实际效果是非常伟大的,影响是极为深远的。它给物理学带来了一次巨大的变革,极大地深化了人们对自然界的认识。它是近代物理学的两大支柱之一,也是现代科学技术不可缺少的基础理论。但是,它又是经典物理的继续和发展。所以,要了解相对论,必须具备一些必要的经典物理的知识。

1.1 参考系、坐标系

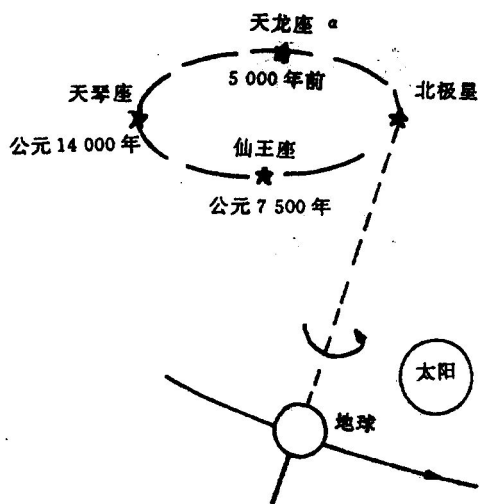
宇宙中的任何物体都在永恒不停的运动。一切静止的现象都是相对的,所有物体的运动都是在时间和空间中演化和进行的。



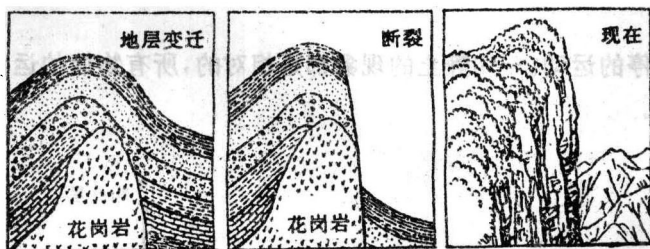
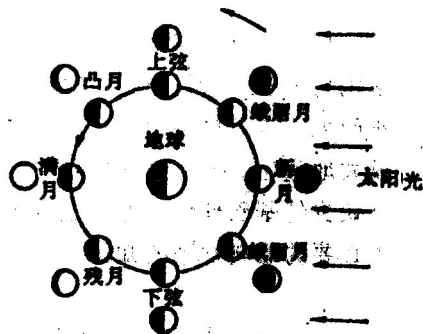
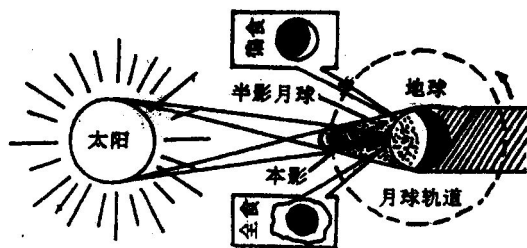
(a) 地球既绕太阳公转,又绕轴自转,一年走九亿四千多万公里,每 24 小时自转一周

(b) 北斗星在一年内绕北极星不断变换斗形

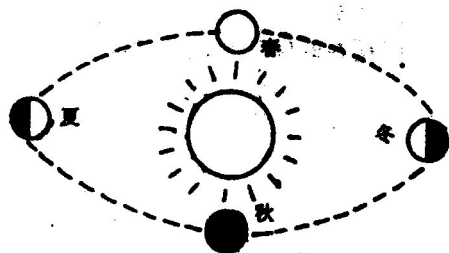
(c) 太阳带着太阳系成员向织女星方向前进



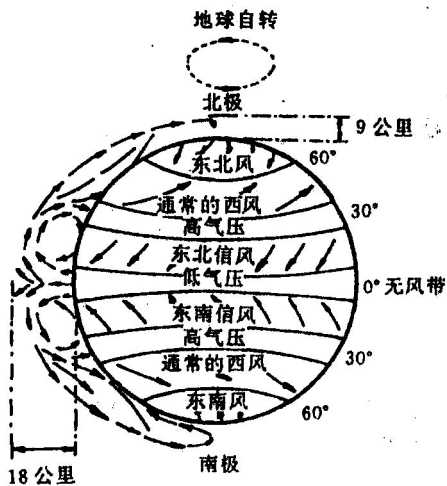
(d) 由于地球的进动,地球北极所对应的位置缓缓发生变化,公元 14 000 年时地球北极将指向天琴星座



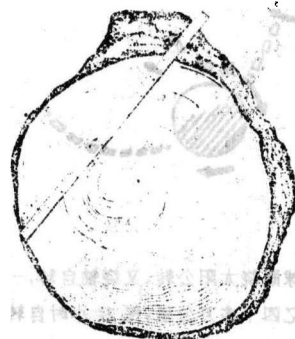
(f) 地壳(貌)的运动



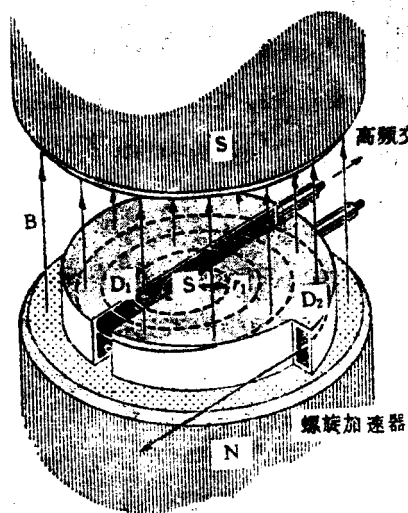
(e) 由于月球、地球和太阳之间的相对运动,在地球上产生四季变化、月相变化及日、月食现象



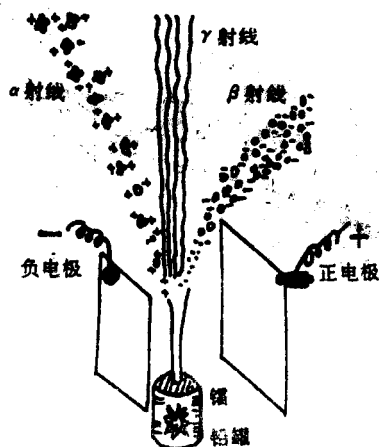
(g) 地球上主要的大气环流



(h) 树本每年增大一圈,它的年轮反映树木的增长运动



(i) 带电粒子在磁场中的运动



(j) 放射线在电场中的偏转

图 1-1 物体的运动

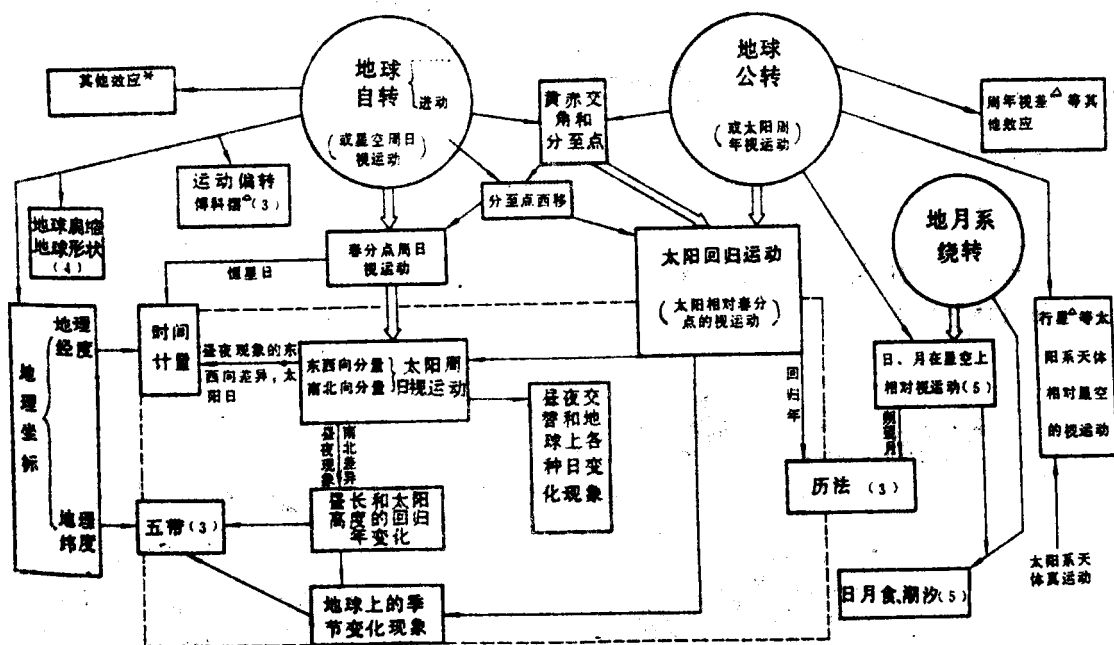
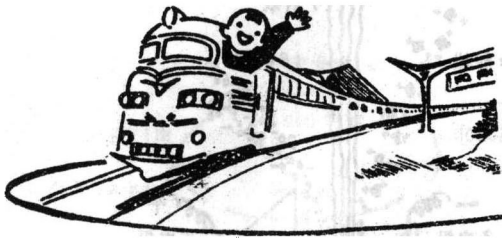
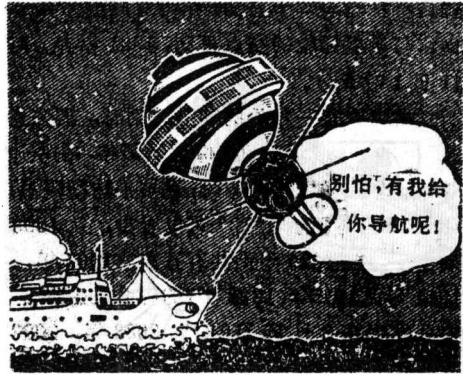


图 1-2 地球运动各种效应及其相互关系一览

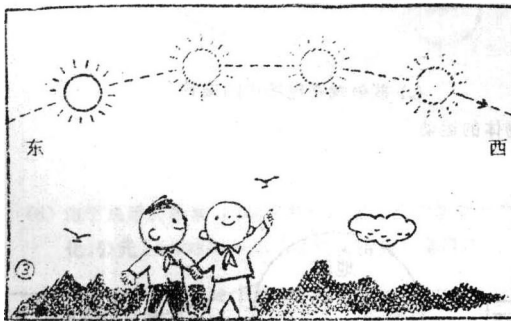
描述一个物体的运动,要选择另一个物体或几个虽然在运动而相互保持静止的物体群作为参考,这种被选作参考的物体或物体群称为参考系或参照系。



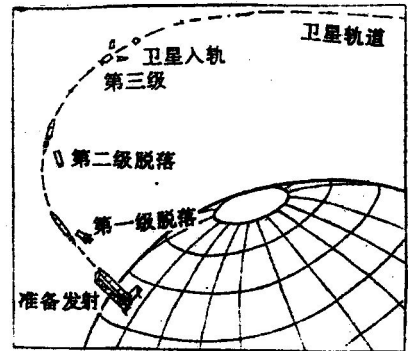
(a) 火车以站台为参考系



(b) 卫星可作海上舰船运动的参考系为船只导航



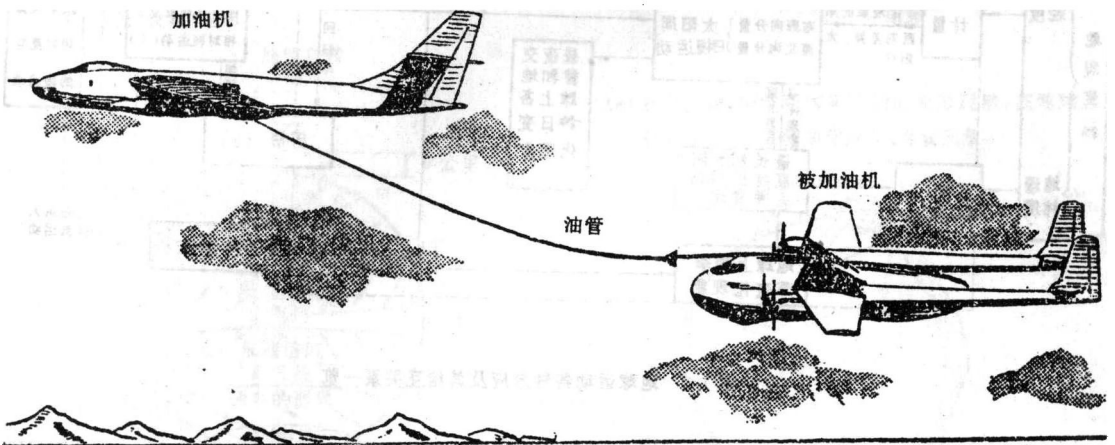
(c) 太阳东升西落的运动以地面、树木、观察者为参考系



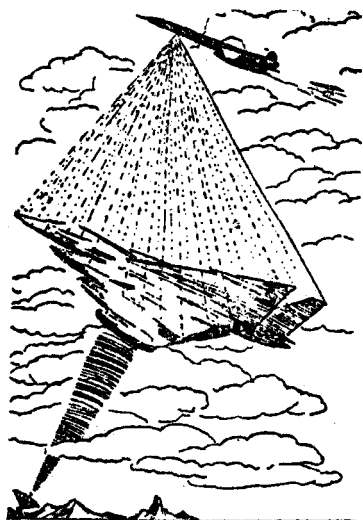
(d) 卫星进入轨道的运动以地球和发射塔作为参考系

图 1-3 参考系

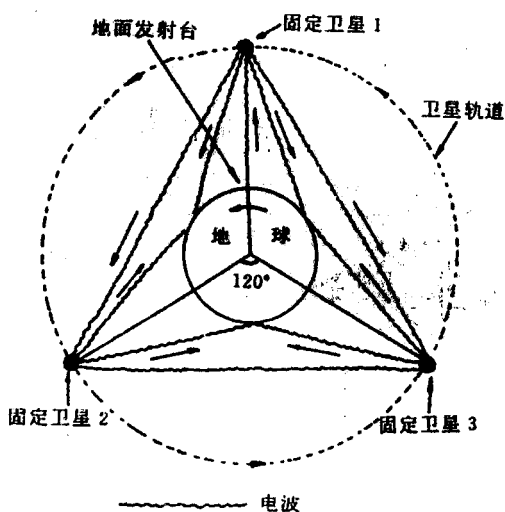
这样, 物体的位置相对参考系发生变化, 则这个物体对参考系就有相对运动, 反之物体处于相对静止状态。



(a) 加油机和被加油机保持相对静止, 但它们相对地面的山和空中的云是运动的



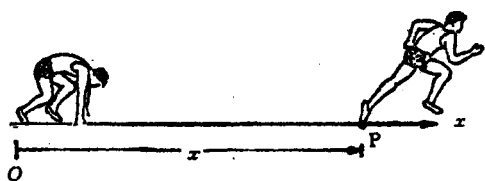
(b) 飞机与它的电子影像保持相对静止，但它们相对地面和雷达站是运动的



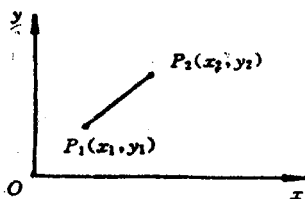
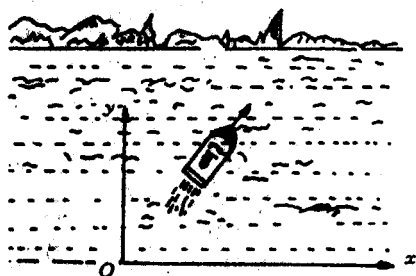
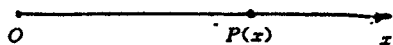
(c) 通信卫星的周期与地球自转周期相同，它相对地面静止

图 1-4 相对运动与绝对运动

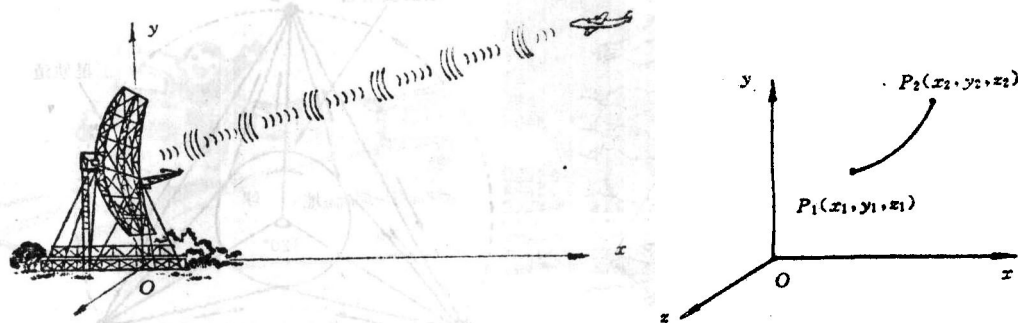
一个跟参考系牢固地连在一起，并且相互垂直相交于一点(原点)，伸展在空间的三个轴的几何图形就是参考系的几何表示，叫做坐标系。这种空间的数学表示，通常选用三维直角坐标系，即笛卡儿坐标系。在数学、物理和天文方面还常使用球面坐标、柱坐标、曲线坐标、天球坐标、银道坐标等。用坐标系可定量地表示运动物体在不同时刻相对参考系的位置。



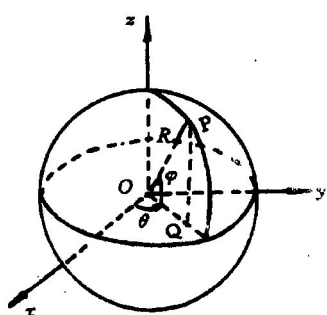
(a) 若物体作直线运动，只要一维坐标 x 表示



(b) 若物体在平面上运动，就用二维坐标来描述物体的运动，即 (x, y) 来表示

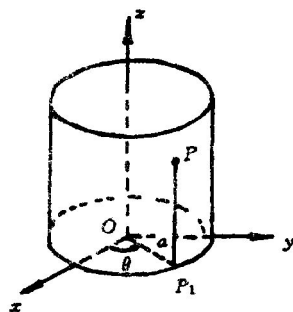


(c) 物体在三维空间运动, 用 (x, y, z) 三个坐标值来描述(笛卡儿坐标系)



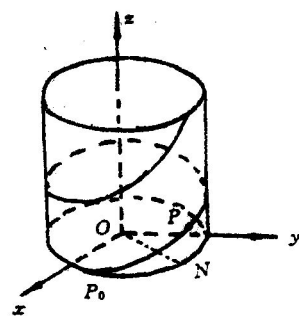
(d) 球面坐标

$$\begin{cases} x = R \cos \varphi \cos \theta \\ y = R \cos \varphi \sin \theta \\ z = R \sin \varphi \end{cases}$$



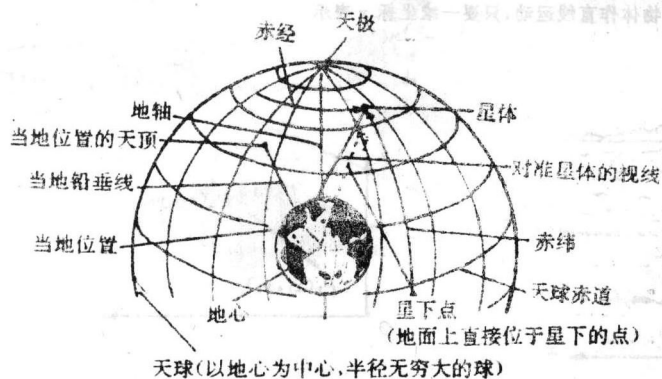
(e) 柱面坐标

$$\begin{cases} x = a \cos \theta \\ y = a \sin \theta \\ z = z \end{cases}$$

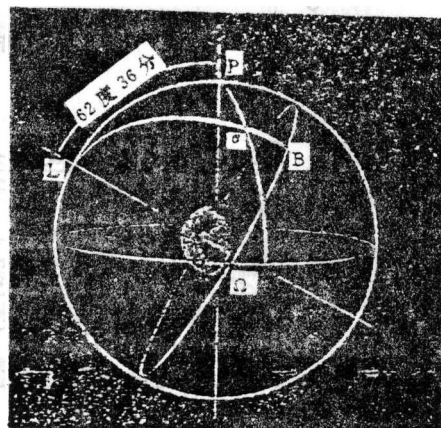


(f) 圆柱螺旋线

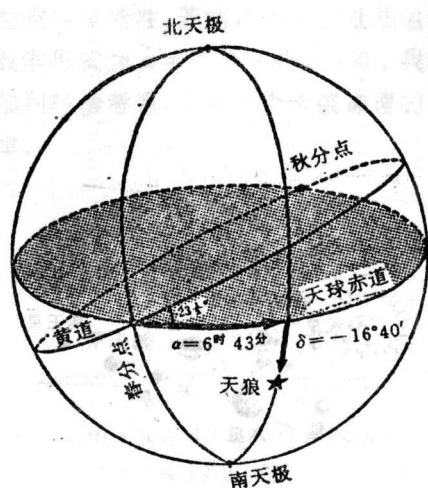
$$\begin{cases} x = a \cos wt \\ y = a \sin wt \\ z = vt \end{cases}$$



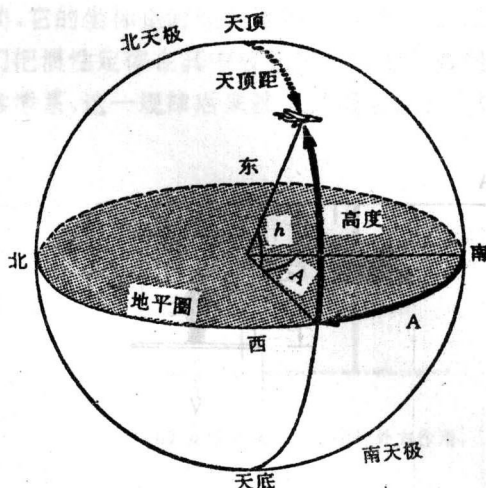
(g) 天球坐标系



(h) 银道坐标系



(i) 赤道坐标系



(j) 地平坐标系

图 1-5 各种坐标系

严格地说,参考系里还应有一个或若干个固定在其中的钟。这样,坐标系就表示物体的位置(x, y, z),钟用来表示事件发生的时间,这就可以完整地描述时空中发生的事件。

1.2 惯性系和非惯性系

描述物体的运动,参考系的选择是非常重要的。在不同的参考系内考察同一物体的运动,结果往往是很不相同的。参考系选得好,可使研究的问题变得很简单。

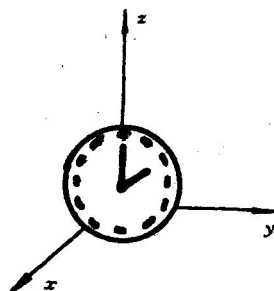
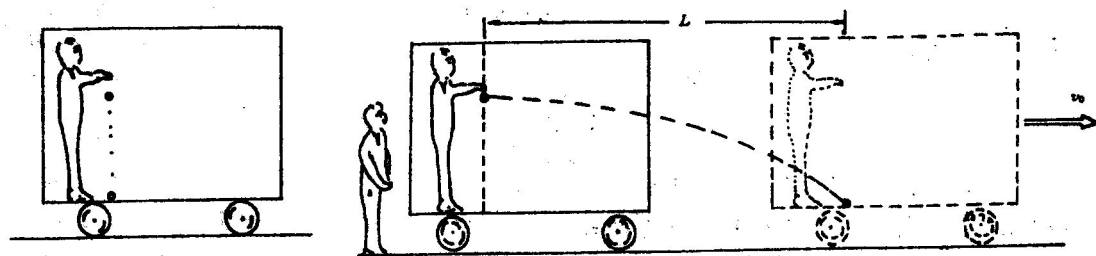


图 1-6 参考系是一个安有时钟的坐标系



(a) 火车厢静止,其中的观察者观测到小球自由下落

(b) 火车厢以 v_0 作匀速直线运动,其中的观察者看到小球作自由落体运动,但车外观察者则发现小球作的是抛物运动

图 1-7 以火车厢为参考系,研究小球的运动比较简单

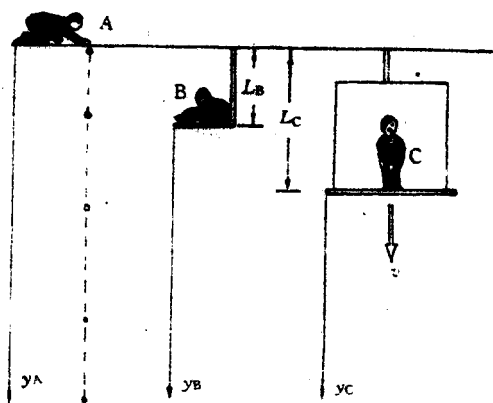


图 1-8 不同惯性系对运动的描述不一样。在 S_A 系中小球的运动是 $y_A = gt^2/2$ ；在 S_B 系中，坐标原点在 A 以下 L_A 的地方，观察者看到小球的运动是 $y_B = -L_A + gt^2/2$ ；在 S_C 系中，坐标原点 $L_C = vt$ ，在其中的观察者看到小球的运动是 $y_C = -vt + gt^2/2$ 。但在这三个惯性系中，小球的加速度都相同

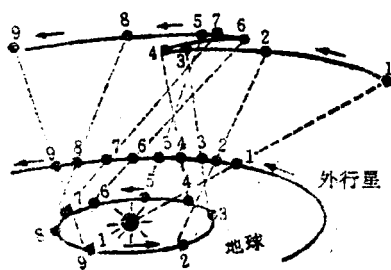


图 1-11 行星逆行图解

在科学发展中，选择适当的参考系起着重要的作用。中世纪后期被人们称为物理学之父的伽利略，曾为坚持日心参考系宁愿冒着监禁甚至死刑的危险。他与专制势力争辩的主题正是参考系的选择问题。他在强迫跪地起身后坚定地说：“地球仍然在转动！”。后来他在幽禁中逝世。这是科学史上的最大冤案。1979 年 11 月 10 日罗马教皇约翰·保罗二世在梵蒂冈才当众宣布：伽利略在 17 世纪 30 年代由于天文观受到教庭审判而遭磨难是不公平的，为伽利略平反。这件事充分证明，真理的力量是不可抗拒的！

伽利略在科学上的贡献是多方面的。他首先提出了惯性的概念。他把物体不受外力作用时总保持原来状态（或静止或匀速直线运动）这句话叫做惯性定律。物体保持原来运动状

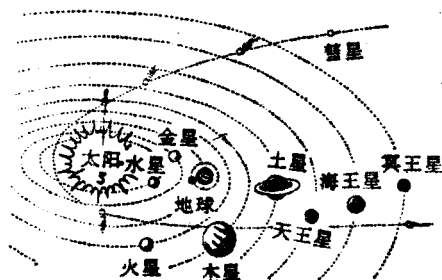


图 1-9 以太阳为参考系，太阳相对静止，行星及它们的卫星、彗星等相对太阳运动

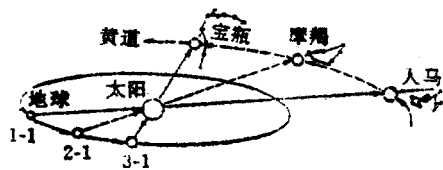
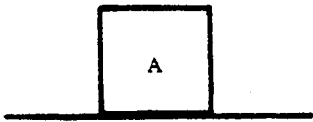


图 1-10 地球从 1 月 1 日到 2 月 1 日的真实运动引起太阳由人马座向东移动到摩羯座。在 3 月 1 日，地球的运动引起太阳的视位置移向宝瓶座

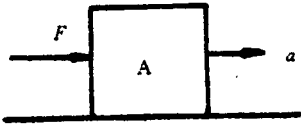
火星 1984 年相对于恒星背景的视运动图。

行星的这种复杂运动是由于它们和地球在各自轨道上围绕太阳运行时，各自的运行速度不同导致相对位置的变化所造成的。以火星为例，当地球由位置 1 运行到位置 3 时，看到火星在天球上的投影为顺行。由于地球运行得快，在相对恒星背景地球要超过火星的一瞬间，我们看到火星在位置 3 似乎不运动了，这叫做“留”。留后，火星在天球上的投影似乎逆行了，逆行的时间不长，由于地球与火星的距离迅速拉大，经过短暂的留后，我们看到火星又顺行了。

态的性质叫做惯性。若物体作匀速直线运动，它的坐标是时间的函数($r = kt$)，所以，惯性定律的数学形式为 $\ddot{x} = 0, \ddot{y} = 0, \ddot{z} = 0$ 。我们把惯性定律在其中成立的参考系叫做惯性系，也叫做伽利略参考系，它是一个未被加速的参考系，这一规律后来被牛顿概括为三定律中的第一定律。



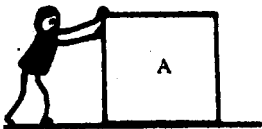
(a) 物体 A 不受外力(除竖直方向外)
作用总保持静止状态



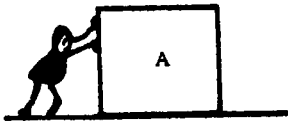
(b) 要使物体运动必须有外力作用，
克服它的静止惯性



(c) 物体 A 在 $t = t_1$ 时刻速度为 v_0 ，在 $t = t_2, t_3, t_n$ 时刻仍以速度 v_0 运动，在不受外力时它永远以速度 v_0 运动下去



(d) 物体保持它原有的静止状态，
外力太小仍不能使它运动



(e) 推者虽然更使劲了，但力仍
不能克服这个物体的惯性

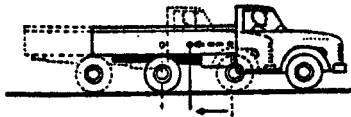


(f) 两个人推这个物体，力足以使静
止惯性得以克服，物体开始运动

图 1-12 惯性定律和静止惯性



(a) 飞机为迅速着陆减速可用开伞增加阻力，
减少飞机的动惯性



(b) 汽车刹车以后由于动惯性不能立刻停止下来，
而还要前进一段距离

图 1-13 动惯性