

A. 丹容 著



球面天文学和 天体力学引论

科学出版社

内 容 简 介

本书系天体测量方面的一部基础论著。本书共分上、下篇。上篇为“球面天文学”，主要内容有：周日运动、太阳的视运动、岁差、章动等；下篇为“天体力学引论”，主要内容有：行星和彗星的运动、轨道的计算、摄动理论等。本书可供天文和大地测量工作者以及高等院校有关专业的师生使用。

科学出版社
A. Danjon
ASTRONOMIE GÉNÉRALE
~~ASTRONOMIE SPHÉRIQUE ET~~
ÉLÉMENTS DE MÉCANIQUE CÉLESTE

J. & R. Sennac, 1959

球面天文学和天体力学引论

A. 丹容 著

李 珩 译

*

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1980年11月第一版 开本：787×1092 1/16

1980年11月第一次印刷 印张：31 1/4

印数：0001—1,230 字数：722,000

统一书号：13031·1362

本社书号：1886·13-5

定 价：4.75 元

A

译 者 的 话

本书作者前巴黎天文台台长、巴黎大学天文学教授 A. 丹容院士，是当代著名的天体测量学家。他根据四十余年教学与研究的经验写成此书。据作者自述，这是为他本人提供一本整理观测的手册，因而书中对于数据处理与数字计算占有相当重要的地位与不少的篇幅。至于本书内容与其特点，作者在第一版的“序言”中已有相当详细的介绍，这里不再赘述了。本书出版后得到世界各国天文学界的推崇，译者特将此书译成中文，以期为我国天体测量学与大地测量学工作者提供一本值得学习与参考的好书。在这里需要注意的是：本书原名为《普通天文学》，副题为《球面天文学和天体力学引论》，根据书的内容，中译本采用《球面天文学和天体力学引论》作为书名。此外，本书内的计算例子，多是外国天文台所见的天象；为了增进对于书中内容的了解，并弥补本书没有练习题的缺陷，读者应取我国出版的天文年历里的数据，对于近年来我国境内看见的天文现象加以计算。

本译稿承天体测量学工作者叶叔华、金文敬、须同祺、刘宝琳、阎林山等同志过目，他们提了不少有益的意见，陈晓中同志为此书做了细致的校订工作，改正了译稿中不妥之处，译者在此向他们致以诚挚的感谢。更望读者指出还未能发现的缺点，以便再版时加以改正。

序 言

本书是根据作者自 1929 年以来先后在斯特拉斯堡与巴黎两大学的讲稿加以发展而写成的。课堂口授的教材只限于纲要与原则,绝不能将全部内容讲解无遗,这是因为由于时间的限制,教师只好将细节与许多实际问题省略不谈。可是,听讲的人须在一本书里去寻找他们所需要的补充材料,用来补足他们在课堂里仓卒抄写的记录,以便学习或对已听过的部分加以进一步的了解。

本书的内容,作者从来没有于一年内讲授完毕过,这些都是高等天文学课程中有关基础天文学的内容。事实上,书中所叙述的超过了这个范围,因为本书的读者对象不只是大学生,而且包括了天文工作者。我写这本书更是为自己在工作上的需要提供一本手册,以便分析、整理、计算从观测中得到的天象资料。书里引用的公式,大部分是我自己经常使用而认为是最方便的形式。例如,第十五章有关月球、太阳、行星自转和卫星现象等问题,是我从来没有讲授过的。那里的公式对于观测者相当有用,都是根据我自己的经验推导得来,因而有些是新颖的;有些散见于文献、经我第一次汇集在这里的。

由于篇幅的限制,本书不能讨论天文仪器(我与古德合作,已经写了另外一本书¹⁾)与实用天文学,可是我在本书内却没有忽略应用。读者可从这里了解天文学不是数学的一个分支,而是一种观测的科学;虽然数学的解释占有相当重要的地位,但不以数学推理为最终目的,也不作烦琐的数学推导。

基础天文学的内容是对天体视运动的研究;它的两个主要目标是参照系的决定与时刻的测定。这两个重要课题于前几章内加以阐述,一方面我应用了经典力学的原则,另一方面我也不迟疑地抛弃了陈旧繁复的理论;如对光行差,我便从比较简单而直观的相对理论去叙述。至于和地球自转联系的现象,经典力学的表达方式已能满足球面天文学的需要。必须在此说明,本书所说的均匀时和绝对参照系与牛顿所指的绝对时间与空间没有丝毫联系;原来牛顿所提出的是“与外界事物没有关系”的(这是牛顿《原理》中的话)一种形而上学的概念。可是我们所应参照的是相对时间与空间;牛顿也说过,只有这种时间和空间,“由于我们与事物的关系,才接触到我们的感官”。

为了说明本书的计划,我必须对书中的数据与数字例题所占的地位作一点解释。天文学不是文字公式的游戏,初学的人应该认识数字计算不是一件容易的工作;而且文字的公式不经过数字解或编制成为数字表,便不能算是完成了它的作用。由于学生不能都购置《法国天文年历》,我特别在本书内为他们提供一些常用的数字表。本书后面附表三十七幅,都是与书中讨论的问题有关联的。这些表大部分都经我用两个方法计算过的,有些还是以前没有发表过的。附录一章简略地讨论了数字表的使用法。

本书的数字计算,真数与对数兼用。今天的职业计算者有计算机,但是学生和个别的计算者还需使用对数表。一度的 60 分制与十进小数制亦同时并用,这是由于后一种分角法我国现在还有人使用,虽然在别的国家已经是过时了。

1) A. Danjon et A. Couder: Lunettes et Télescopes, 1935 (折射与反射望远镜)。

球面天文学是天文学的基础,在它上面先后建立起行星天文学与恒星天文学.近三十年来的重要发现打破了均匀地球时的概念,因而摧毁了这个既经典而又有深刻变化的学科的传统叙述方式.

下篇的七章讨论行星、彗星、月球、其他卫星与双星的运动.我们特为行星与彗星轨道的决定保留一个重要的地位,特别举出数字计算的详细过程,这主要是为了帮助读者对于方法的了解,而不是为天文工作者作出范例,因而这不能当做是计算指南.每个人应该在从计算过程以至得到结果的程序有深切了解之后,为自己建立一个准则.所以我在本书里力求意义明晰,而故意放弃了规范化.

读者可能诧异本书没有任何参考文献,这是由于这方面的古书和专著,只在天文台图书室里才能找到,读者在那里不难发现很好的书目,因此我感觉没有必要举出许多书名了.反之,本书中叙述到重要发现之时,我总是写了一些历史小注,这是为了提醒读者,天文学是从观测发展起来的,理论是以后的产品.自古希腊的喜帕卡斯以来两千多年,天文学的方法并没有什么改变.

A. 丹容

1952年8月于巴黎天文台

第二版 序 言

本书第二版基本上保持了第一版的内容。自然,我们已将细心的读者所指出的和我们仔细校对时所发现的错误之处加以改正。第一版里叙述含糊不清的语句也修改了,但为了不增加重新排版的费用,我们尽量维持原来的版型。

可是有些篇幅势必加以改写。例如因遵循国际天文协会 1952 和 1955 年两次大会有关时间与地球自转的变化的决议案,作者将本书第七章,除《历法》一节外,不得不重新写过。

当我们将理论推到数字的应用时,便不能不只满足于简明扼要的解答。不管我们所用的方法与符号怎样,终需写出冗长繁复的代数展开式,可是在这一工作上,现今的学生远不如其前辈之有训练。为了照顾起见,我将十一章(轨道的决定)与十三章(月亮的运动)里某些地方加以简化。

自 1952 年本书发行以后,电子计算机的使用日益普遍,数字计算机构所用的技术亦日趋完善。从前认为不能计算的问题,现在已经成为日常的工作。在专业天文工作者的眼里,使用对数表的计算好象已成过去;但大多数初学计算的人,甚至没有计算机,如果不用对数表,他们将无法作任何的计算了。

书末附表 XXIX 所载的行星轨道的根数,在第一版里是以 1900 年 1 月 1 日 12 时(世界时)为历元计算,第二版已经改为 1900 年 1 月 0 日 12 时(历书时)为历元计算,因为这些根数的表达式里的时间 t 皆是历书时。

丹 容

1958 年 7 月于巴黎天文台

目 录

译者的话	i
序言	ii
第二版序言	iv

上篇 球面天文学

第一章 导论	1
§ 1 参照系的选择	1
§ 2 时间	2
§ 3 角的测量	5
§ 4 三角函数和三角函数表	7
§ 5 方向的极坐标	11
§ 6 球面三角形	12
§ 7 一阶的三角关系	13
§ 8 直角三角形和象限三角形	16
§ 9 二阶和三阶关系式	18
§ 10 球面三角形的解法	22
§ 11 较差坐标	32
第二章 周日运动	35
§ 12 周日运动	35
§ 13 第一地方参照系, 地平坐标	36
§ 14 第二地方参照系, 时角坐标	37
§ 15 恒星天球上的参照系, 赤道坐标	38
§ 16 赤道坐标与时角坐标的关系, 恒星时	39
§ 17 周日运动在望远镜里的情况	40
§ 18 地球, 地理纬度	42
§ 19 地理经度	44
§ 20 两种地方坐标系之间的关系, 坐标的变化	46
§ 21 中天, 天顶观测	48
§ 22 星的升与落	50
§ 23 卯酉圈的经过	52
§ 24 等高圈的经过	53
§ 25 拱极星的大距	54
§ 26 纬度变化与地极移动	56
第三章 太阳的视运动	58

§ 27	太阳在恒星天球上的运动, 黄道与 γ 点	58
§ 28	黄道坐标及其与赤道坐标的关系	58
§ 29	太阳的赤道坐标, 恒星时	59
§ 30	太阳在黄经上的运动	60
§ 31	四季	63
§ 32	太阳在赤经上的运动	64
§ 33	真太阳时, 平太阳时, 恒星时	65
§ 34	时差, 真日的变化	68
§ 35	太阳的中天	69
§ 36	民用时, 世界时	72
§ 37	太阳的升与落	73
§ 38	日规	74
§ 39	地方恒星时与世界时的相互转换	77
第四章	基本面的移动 (1. 岁差)	78
§ 40	恒星在天球上的坐标是变化的	78
§ 41	岁差与章动	79
§ 42	日-月岁差	81
§ 43	由日-月岁差的效应引起的赤道坐标的变化	84
§ 44	总岁差	86
§ 45	平坐标, 近似公式	88
§ 46	平坐标, 精确方法	91
§ 47	较差岁差	94
第五章	基本面的移动 (2. 章动)	96
§ 48	白道交点的逆行	96
§ 49	章动的主要项(布拉德勒)	97
§ 50	章动的短周期项	98
§ 51	恒星的真坐标	98
第六章	相对运动的一种光学效应(光行差)	100
§ 52	太阳的光行差	100
§ 53	恒星光行差概论	102
§ 54	长期光行差	103
§ 55	恒星的周年光行差	103
§ 56	视位置的黄道坐标的计算	106
§ 57	视位置的赤道坐标的计算	107
§ 58	归算到当天	108
§ 59	周日光行差	112
§ 60	行星光行差	113
第七章	时间与地球自转的变化	115
§ 61	世界时, 历书时, 回归年与时间的基本单位	115

§ 62	地球自转的变化	118
§ 63	历书时的测定	124
§ 64	恒星日, 太阳日, 地球对于恒星的自转周	126
§ 65	民用年, 历法, 儒略周期	129
第八章 相对位移的几何效应(视差与自行)		132
§ 66	恒星的周年视差	132
§ 67	恒星的自行	134
§ 68	视差与自行的测量	135
§ 69	太阳、行星与彗星的周日视差	137
§ 70	太阳视差的测量	140
§ 71	月亮的情形, 总视差, 地平坐标上的视差	142
§ 72	月亮在时角坐标与赤道坐标上的周日视差	145
第九章 天文折射(蒙气差)		149
§ 73	蒙气差理论, 第一近似研究	149
§ 74	蒙气差理论, 第二近似研究	151
§ 75	大气抖动、色散与吸收, 反常折射	154
§ 76	地平附近的蒙气差	157
§ 77	蒙气差表, 气温与气压的改正	161
§ 78	蒙气差改正	162
§ 79	对于有限距离的天体(月亮)的情形	164
§ 80	大气色散, 色闪烁	166
§ 81	地面折射, 地平俯角, 蜃景	168

下篇 天体力学引论

第十章 行星与彗星的运动		172
§ 82	开普勒定律, 牛顿定律	172
§ 83	椭圆运动或开普勒运动	175
§ 84	开普勒方程展开为时间的函数的公式	177
§ 85	抛物线运动, 近似抛物线运动	187
§ 86	行星与彗星的轨道根数	192
§ 87	行星或彗星的日心与地心坐标的计算	194
§ 88	太阳系, 行星的地心运动	197
§ 89	行星的质量、直径与密度	207
§ 90	天文学的单位	209
§ 91	彗星	211
第十一章 轨道计算		212
§ 92	概论	212
§ 93	预解的问题 I	214
§ 94	预解的问题 II	221

§ 95	预解的问题 III	223
§ 96	用高斯方法计算椭圆轨道	226
§ 97	高斯方法的数字应用	230
§ 98	抛物线轨道计算的奥耳伯斯方法	242
§ 99	奥耳伯斯方法的数字应用	244
§ 100	决定任何轨道的拉普拉斯方法	253
§ 101	拉普拉斯方法的数字应用	258
第十二章	摄动概论	270
§ 102	三体问题	270
§ 103	受摄运动的方程式的数字积分: 特殊摄动	271
§ 104	常数变化法, 普遍摄动	273
§ 105	吻切根数的变化	274
§ 106	与距离成立方反比的中心摄动	275
§ 107	切线向或法线向的摄动	276
§ 108	轨道面内的力在椭圆轨道上所形成的普遍摄动	278
§ 109	行星摄动	283
第十三章	月球的运动	288
§ 110	概论, 数据	288
§ 111	摄动力的展开式	290
§ 112	摄动函数的展开式	293
§ 113	运动方程式, 径向摄动力的常数项	294
§ 114	地球与月球的质量, 月球的视差	295
§ 115	与偏心率无关的差数项 1	297
§ 116	与偏心率无关的差数项 2	299
§ 117	与地球轨道偏心率有关的差数项 1	302
§ 118	与地球轨道偏心率有关的差数项 2	304
§ 119	与月球轨道偏心率有关的摄动 1	305
§ 120	与月球轨道偏心率有关的摄动 2	308
§ 121	摄动力的法向分量, 月球黄纬上的差数项	312
§ 122	月离表	318
§ 123	日-月岁差与章动	321
第十四章	食, 掩星, 凌日	327
§ 124	日月食概论, 沙罗周	327
§ 125	月食	329
§ 126	地球的大气与月食	330
§ 127	月食的条件与时间	332
§ 128	月食的计算	335
§ 129	月食续现的规则, 食系	338
§ 130	日食, 发生的条件	343

§ 131	一定地点的日食的计算	346
§ 132	日食界限图	351
§ 133	日食的继续与循环	356
§ 134	月掩星	361
§ 125	内行星凌日 1	366
§ 136	内行星凌日 2	371
第十五章	月亮, 太阳, 行星与卫星, 自转, 位相	377
§ 137	月球的自转, 卡西尼定律	377
§ 138	月球的天平动	378
§ 139	月亮的位相	380
§ 140	太阳的自转	383
§ 141	水星与金星的自转和位相	386
§ 142	火星的自转与位相	391
§ 143	木星的自转与位相	395
§ 144	木星的卫星	398
§ 145	木卫的星历表	403
§ 146	土星、光环与土卫	412
§ 147	天王星与海王星	418
§ 148	行星与月亮的光度测量	419
第十六章	目视双星的轨道	424
§ 149	引言	424
§ 150	轨道根数, 锡埃耳-因内斯常数	428
§ 151	视椭圆的绘制	431
§ 152	几何学方法	432
§ 153	动力学方法	435
§ 154	对点法	437
附录	据数字表所定的函数求插值、导数与积分	440
1.	一次、二次与高次差	440
2.	拉格朗日公式	442
3.	牛顿插值公式	443
4.	白塞耳与埃弗雷特公式	445
5.	求经验函数的导数	449
6.	据变差求插值法	450
7.	数字积分的实用公式	451

数 字 表

I.	用白塞耳公式求插值	455
II.	化度与分为秒	456
III.	$\Delta_s = x - \sin x$ 函数表	457

IV. $\Delta_t = \tan x - x$ 函数表	458
V. 化度为秒	459
VI. 化度、分、秒为时、分、秒	460
VII. 化时、分、秒为度、分、秒	461
VIII. 化时、分、秒为日的小数	462
IX. 化日与时为回归年的小数	463
X. 回归年的岁首	464
XI. 儒略周期	464
XII. 化恒星时为平太阳时	465
XIII. 化平太阳时为恒星时	465
XIV. 地球椭球体	466
XV. 半日周弧长	467
XVI. 岁差、章动	468
XVII. 岁差计算的系数	469
XVIII. 赤经岁差计算用表	470
XIX. 赤纬岁差	470
XX. 赤经岁差的第二项	471
XXI. 赤纬岁差的第二项	471
XXII. 赤经岁差的第三项	472
XXIII. 赤纬岁差的第三项	472
XXIV. 表 A 蒙气差	473
XXV. 表 B 气压订正	474
XXVI. 表 C 将气压高度归算到 0°C 气压的高度	474
XXVII. 函数 $\Psi(x) = e^{x^2} \int_x^\infty e^{-x^2} dx$ 表	475
XXVIII. 函数 $\Phi(x) = 2x\Psi(x)$ 表	476
XXIX. 大行星轨道根数表	477
XXX. 1956 年 1 月 1 日前, 出现两次经人观测过的周期彗星	478
XXXI. 开普勒运动表 表 A: 偏近点角	479
开普勒运动表 表 B: 真近点角	480
XXXII. 抛物线运动 表 A	481
XXXIII. 抛物线运动 表 B ($v > 108.55$)	483
XXXIV. 近似抛物线轨道 表 C	484
XXXV. 近似抛物线轨道 表 D	485
XXXVI. 椭圆轨道(高斯方程的解)	486
XXXVII. 抛物线轨道-奥耳伯斯方法-弦长计算表	487

上篇 球面天文学

第一章 导 论

§ 1 参照系的选择

球面天文学的主要目的是研究天体的视位置,因而它也是研究天体运动的学科。

研究宇宙的运动学,便是研究天体对于一种参照系的运动关系,只需这参照系是确定的。如果我们改变了参照系,便有必要将原来从运动学的观点描述世界的数字项加以修改。所以,新的参照系亦如旧的参照系一样有效;只需此两参照系的关系是确定的。

如果从动力学的观点去研究宇宙,参照系的选择便不会是任意的。经典动力学的原则只是对于所谓“绝对参照系”方才有效。更确切地说,如果运动物体对于某一确定参照系的加速度和作用的力的关系服从动力学基本原则,那么,这系统便可称为是绝对的。容易证明,两个绝对参照系只在等速直线运动的情形方才没有差异,换句话说,运动物体的加速度对于这两个参照系具有相同的数值。

许多世纪以来,天文学的目标只是对宇宙作运动学的描述。参照系的选择完全是任意的,特别是选择一种与地球相联系的参照系,并没有什么困难。行星的地心运动(完全从运动学的观点而取的一种相对运动)可以用托勒密体系正确地表达出来。在这一点上,托勒密体系(只须以开普勒的椭圆去代替本轮和均轮等正圆)是和哥白尼的体系有相同的效用的。

但是,当天文学成为牛顿动力学的一章之时,人们才感觉到有使用绝对参照系的必要。事实上,只有对于这种参照系,我们才能写出联系加速度 γ 、质量 m 和力 f 之间的向量等式: $m\gamma = f$, 虽然动力学的目标与哥白尼的体系毫无关系,可是我们把对于绝对参照系的追求叫做哥白尼问题,恐怕还是恰当的;早已证明,在牛顿的《原理》刊布以前一个半世纪,一种特殊参照系,即以太阳为原点而坐标轴的方向指着明亮的恒星这样的参照系,可以大大地简化行星运动的描述。我们今天已经了解这种简化背景的原因:将哥白尼所选择的参照系作为绝对参照系是一个很好的近似。事实上,将坐标原点由太阳中心移到太阳附近的太阳系的质量中心,便成为牛顿力学的绝对参照系。可见,原来由直觉选出的哥白尼体系,事后得到证实,其根据不必在《天体运行论》中寻找,而应在牛顿与其继承人的著作里去寻找¹⁾。

可是我们今天已经明白,天体力学所习用的参照系,严格地说,还不能算是绝对参照系。现代的研究[奥尔特(Oort),林德布拉德(Lindblad)]证明,银河系有普遍的自转,一切可见的恒星和太阳都参加这种运动。因此,认为太阳系的质量中心在作等速直线运动。

1) 动力学常采用一个任意的参照系,只要所用的参照系的运动是相对于另一个绝对参照系而决定的;否则,便不能计算附加的或惯性的加速度。

(即没有加速度), 并且指向恒星的坐标轴方向不变, 这种看法是不合理的。如果我们要建立一个新的绝对参照系, 也许可以将其原点放在银河系的质量中心, 并将其坐标轴指向最远的河外星系。

这样的向远方推移的参照系是否会被肯定下来, 现在还不能保证, 迟早也许会有新的发现推翻这一参照系的绝对性。在数学家和哲学家的眼里, 哥白尼的问题显然没有得到确定的解答。可是在实际应用上却得到充分的验证: 天文学和这种近似绝对参照系相处得很好, 天文学的定律和一切观测科学的定律一样, 是在一定程度的近似之下而建立与证明的。因此, 我们可以满意地总结说, 将力学的基本原则应用于天体, 对于修改后的哥白尼参照系的运动迄至现在是与观测所能达到的精确度相合的, 因而这种坐标系可以看做是一种绝对参照系。虽然观测表明这一参照系也参加银河系的普遍自转, 但是我们并不以为应该抛弃它, 因为银河系的自转是一种很缓慢的运动, 自转中心很远, 由是而来的附加加速度, 在观测方法还没有新的进展时, 是可以略而不计的; 而且即使考虑进去, 也是很容易计算的。

总之, 我们在这本书里所采用的绝对参照系是与太阳系的质量中心和明亮的恒星相联系的, 只在不合用的情形(例如讨论到岁差常数时), 我们才将银河系的自转效应计算进去, 而改变了我们常用的参照系。

但是在我们经常讨论的相对运动里, 可以采用任何坐标系; 为方便计, 我们使用地心坐标系。

§ 2 时 间

时间和长度与质量是力学和物理学的三个基本量。我们对于这三个量分别给与一个单位, 例如时间的单位是用以测量现象持续之久暂的。为测定一个实验经历的久暂, 我们可以采用一种物理的标准, 例如稳定的振子的振荡周期, 只需这个标准在实验的过程里保证其作有规则的振荡。

但对于天文学而言, 这问题却有另外一种意义。我们常将一个事件发生的时刻表示为距离某一确定原点的“相对位置”, 换句话说, 即将时刻放在时间尺度上的某个“地位”。这样, 在短时间内运行的钟表便不能解决问题, 而必须使用一种永久运转的時計, 它可以量度不管怎样长的时间。这便是给与天文学家的问题, 而须我们在此加以讨论。

时间的概念和上节所讨论的参照系, 同为运动学的两个基本概念。动力学更介入质量与力两个概念, 我们暂不在此加以分析。

当我们研究一个质点的运动时, 我们将其坐标、速度、加速度等表示为某一参数 t 的函数, 这个参数, 我们叫它做“时间”, 但却没有赋与它以任何的天文意义(有时被人误解), 所以它的测定就逻辑说来, 并不一定要和天文观测发生联系。事实上, 这个参数的定义, 只表现在我们所写出的时间 t 与坐标之间的关系式上。如果一种运动的历程表(即与 t 的各个数值对应的、为动点的坐标所规定的位置的表)可以计算出来之时, 则在某一瞬间由动点的坐标的测定, 便可在这历程表上作反方向的内插, 而求得相当于这一瞬间的 t 。于是, 这个动点便可作为一种時計。

如果两个独立的時計(即在独立的力的效应下两个运动的点)对于同一瞬间给出两个

不同的 t 的数值, 这样决定的时刻便没有丝毫的实际用途。这样的事是否可能呢? 在动力学的基本原则上, 对于一个在已知力的作用下的结构已知的物体, 我们可以将其运动的理论表达为一种严格的形式。如果基本原则是有效的, 则一切時計, 当其理论是正确地建立, 而其运行表又是正确地编成(我们还要表明这是不同的两件事)之时, 那么, 对于相同的一个瞬时应给出相同的一个 t 值(在实验的误差范围之内)。

假使观测给我们表现的两个独立的時計所提供的时刻有一种系统的差异, 我们是否须放弃基本原则呢? 自然是应当放弃的。可是事先我们必须检查几个重要的关键问题: 保证可以使用这个原则的各种条件是否得到满足? 究竟这是些什么条件? 首先, 理论须是正确的, 这里包含的运动的参照系是不是绝对的? 运动物体的力学性质是否确切地了解了? 它所受的力的规律是否明白? 还有, 动点的运行表是否计算正确? 计算所需要的理论中的积分常数(其数值只能根据观测而求得), 是否达到所需要的精确度。现在试对以上这些问题加以讨论。

(1) 人手所造的時計, 是机械零件的组合, 受牵引力和摩擦力的作用而作相对的移动。这些力的规律一般不太清楚, 而这些运动的零件又受弹性的变形与使用的磨损。因而, 我们对于这一类的時計(钟、表)便不能建立起严格的理论。机械的钟表最好也只能在短期里作为时间的内插的工具, 单靠它所确定与保持的时间没有足够的保证。

在这一点上, 天体的运动提供了很大的优点。太阳系运动的理论可以将系内成员的相互引力一并加以考虑¹⁾, 并可以将此运动归算到一种可以看做是绝对的参照系而得着发展。行星和卫星在其轨道上的运动是不受摩擦力的, 而且基本上与这些天体的物质结构无关。

许久以来, 人们相信地球的自转是得着这种保证的; 但是某些观测表明, 事实上并不是这样的。原来, 地球不能当做是一个不变形的刚体, 潮汐和地质与地球物理的许多现象都表明地球的惯性椭球的大小是有变化的。而且事实表明, 这些变化有其可以测量的效应。从此, 在不变形的地球的假设下所规定的恒星时 T , 只能当做是力学时 t 的函数, 用它去表达星历表, 不能是严格有效的。如果保留对应于同一瞬时的两个 t 的数值, 即一方面由地球自转而来的恒星时, 另一方面由某一天体(例如月球)的公转而来的另一种时刻, 让其一并存在, 则违背了力学的基本原则, 而不能算是合理的。为着区别这两个数值, 第一种时可以由其来源称为地球时, 第二种时为牛顿时。地球时与牛顿时之差, 在近三个世纪里的数值可于事后加以测定, 以后我们还要谈到。这一差异有时超过半分钟, 但这数字不能认为纯粹是由于这期间里地球变形所产生的效果。

如果两个行星, 或一个行星与一个卫星所提供的牛顿时, 在数值上有可以觉察的系统差, 便成了一个更加严重的问题。因为天体的公转运动理论比自转建立在更加可靠的假设上, 所以是更可信的。勒威耶(Le Verrier)在水星的公转上, 即在其计算的与观测的黄经上, 发现了一种系统差, 而这是牛顿力学所不能解释的。这一分歧引起长期的争论, 使人认为由水星公转运动而定的牛顿时与由月球运动而来的牛顿时发生一种系统差。爱因斯坦终于解决了这个困难, 他用他的相对论的引力理论说明了水星运动不规则的原因。于是, 我们可以总结说: 在观测所能达到的精确范围内, 天体力学的基本原则是有效的; 不

1) 我们可以承认, 对于太阳系里主要成员施加可觉察到的引力的任何质量, 没有什么逃出了人们的观测, 至少在太阳附近是这样。

过,一方面须将广义相对论所给与天体力学的改进,以及另一方面须将银河系自转在参照系上所生的影响(即上节所指出的),一并计算进去而已。

从此以后,我们将假设牛顿时能以最好的近似值表达力学时 t ,它以足够的精确度和连续性而被测定,能在一个无限而且均匀的时间尺度上记录一切观测。

可是,只要所测的时间相当短,用地球时代替牛顿时是没有什么错误的。换句话说,我们将假定地球的自转提供了一种可于短期使用的时间尺度,不过须将太阳、月球和行星的摄动计算进去而已。但是,对于某些问题,时间超过几月甚至几年,这假设便不是严格地合理了。

由此可见,力学时是一个难于达到和测定的数量。将来或许有一天,人手所造的時計能够提供一种均匀时间尺度,其精确度之高至少等于现时所用的天然時計^{*}。把一片截割合适的石英晶片放在自身可以调节的交变电场里,石英晶片的厚度会发生变化,这样便形成一种异常稳定的振荡,这样制成的石英钟已经为许多天文台所使用。但是,石英的振荡周期也不是严格地不变的,石英缓慢地老化,因而还不能保持稳定。这种新的振荡技术还发明不久。将来,人们可能用纯粹物理的方法去测定很长的时间。但是,我们怎样去保证时间尺度的连续性呢?这便是下面所要讨论的问题了。

(2) 星历表的编制是将行星或其卫星运动的恒星时与其所在的黄经度表示为力学时 t 的函数。要完成这一工作,须假定所要表达的数量其各项的数字系数是已知的。但是这些系数是积分常数的函数,而积分常数的数值只能根据观测而确定。

换句话说,为着预推天体的运动,须先对它们作长期的观测。这句话和我们熟悉的一个定理并无矛盾。这定理便是:在已知的力场里,质点的运动只与其初始条件有关;所谓初始条件,就是对应于某一给定时刻的质点的位置与速度。虽然对于某一瞬间质点的位置可以测定,但其速度却不能测定。

在一定时期里,不管观测的方法和理论怎样进步,利用天文观测去决定力学时 t ,总须使用凭借昔日观测所作成的星历表,而昔日的观测总不会象今天的观测那样精确。这些星历表的近似程度只反映技术在昔日的情况,而不是今日的情况。周期项里的数字系数的变化是不大的,因而相应的误差也是不大的;但长期项(即含有 t 及其整数幂的项)则不是这样的,这些项的计算值上的误差随 t 的增长而增大,以至于无限。因此,天文学里的基本常数值应该随时加以修订,以便在误差已不能容许时去缩小计算值与观测位置之间的差距。

可是,当常数有改动时,在星历表上便出现不连续的情况,于是,在天文观测和星历表的基础上所测定的 t 的尺度,也出现了不连续现象。这种不连续性必然会引起平太阳日长度的改变,换句话说,即引起我们采用为标准时间的间隔 t 的变化。由此可见,平太阳日亦如米尺一样是有变化的。如果我们保存这个长度与地球有关的原始定义^{**},那么,当大地测量有改进时,也须对长度的标准给与修订。更简单、更聪明的办法是将它一劳永逸地规定下来,即将标准长度当作仔细保存的一根金属尺子的长度。可是,我们对于时间标准还不能这样做,因而只好希望能建立起一种与天文常数的体系无关的物理标准。现今使用的石英钟已经能够比较几天内的时间间隔,而相对精确度达到 10^{-9} ;而一个平太阳日

^{*} 利用原子内部能级跃迁所发出的频率很稳定的电磁波而作成的原子钟,似已达到这个要求——译者注

^{**} 原来规定以通过巴黎的经线的四千万分之一作为长度的单位,定名米突(米)——译者注

只能测定到 10^{-7} 。这个问题的解决已经是不远的事了*。

无变化的时间的物理标准的采用，必然会打破人们对于两种时间尺度的一致性的看法：一方面是由不断的昼夜交替所规定的时间尺度，另一方面是化归到天文观测的均匀的时间尺度。换句话说，太阳中天的平均时刻逐渐与时钟所标示的正午发生差异。可是，这两种尺度的细小而持续的差异，须经历若干世纪始能表现出来。

(3) 为着照顾初学的人，我们在结束这一节时加上一个申明。天文学家有一个不大好的习惯，常在“时”这个字前面加上一个形容词，如恒星时、太阳时之类，但这些量和力学时 t 实在有根本的差别。这些量的性质虽有差别，但却有一个共同的特征，即它们差不多都是时间 t 的线性函数，它们的数值也都可以由观测求得，而且可用它们去编制星历表，因而可由这些量去求得力学时 t 。但是，一旦给与它们以“时”的称号，便容易引起混淆。所谓恒星时、真太阳时，甚至如现今所规定的平太阳时，就“时”这个字的本来意义说，其实都不能叫做“时”，而只能称为力学时 t 的线性函数。不幸，这一名词因习用长久而产生了某种权威，即使在严肃的著作里，也认为恒星时是均匀时，而恒星日是时间的标准。事实上这是十分错误的见解。如果我们要把一年里的时间测量到几秒的精确程度，近代天文学是有这种能力的。

读者应当记住，恒星时和真太阳时基本上是些二面角，因而是可以由直接观测求得的几何量，它们只可以作为去确定均匀的力学时的某种媒介，唯有力学时这一种时才配称为“时”。

数学家、物理学家与化学家，当科学的进步使他们觉察到习用的语言不恰当之时，常会对它们作出修改，而天文学家却循规蹈矩，常常安于旧日的名词，尽管事实已经表明它们是不恰当的。所以，我们在这里指出缺点与不当之处以后，还应提出一种修改的办法。这是本书作者一有机会便要提出呼吁的。

§3 角的测量

假想有一架仪器(例如瞄准天体或远处物体的望远镜)可以围绕一个旋转轴运动，这旋转轴是由放在固定轴承上的两个支柱所支持。为决定仪器的位置，我们装上一个刻度圆环(图1)，其平面与旋转轴正交，而环的中心应和旋转轴非常接近。装置在仪器支架上的两个固定的标记 A 和 B ，放在环的一直径的两端。观测者便在这标记所指处读出圆环上的刻度数。例如我们要测量仪器由一个位置转到另一个位置所转过的角度。设 A 和 B 是仪器在第一位置时圆环上 A 和 B 点的读数，而 A' 和 B' 是在第二位置时圆环上的读数。根据几何学的一个定理， AB 和 $A'B'$ 两直线之间的夹角便是要测量的角度，换言之，即 AA' 和 BB' 两弧之和的一半。

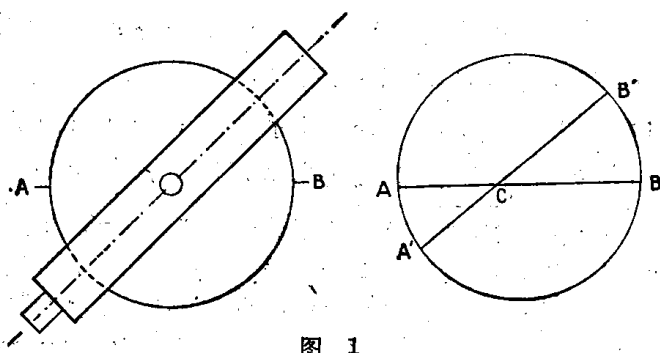


图 1

* 1964年10月在巴黎举行的十二届国际度量衡会议，决定以铯原子(^{133}Cs)的振荡频率来确定一秒的时间长度，其精确度达 6×10^{-12} ，即5000年只差一秒——译者注