

天文学教程 下

A S T R O N O M Y

孙 扬 胡中为 编著



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

天文学教程

下册

孙 扬 胡中为 编著



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

内容提要

本书全面系统地阐述了天文学的基础知识,介绍了不同历史阶段出现的主要研究成果,也包括各个分支领域的最新研究进展。全书分上、下两册。上册内容包括天球坐标和时间计量系统、天文观测和常用仪器、太阳系的各种天体。下册内容包括各类恒星、致密星(白矮星、中子星、黑洞)、双星、星团和恒星演化,银河系以及星系和宇宙学。为满足交叉学科的需要,本书下册还介绍了宇宙的元素丰度与起源。本书可作为天文、物理、地理等专业大学生的基础教材,也可供其他有关专业的师生和科技工作者参考。

图书在版编目(CIP)数据

天文学教程.下册/孙扬,胡中为编著. — 上海:
上海交通大学出版社, 2020
ISBN 978-7-313-23572-5

I. ①天… II. ①孙… ②胡… III. ①天文学—高等学校—教材 IV. ①P1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2020)第 138378 号

天文学教程(下册)

TIANWENXUE JIAOCHENG (XIA CE)

编 著: 孙 扬 胡中为

出版发行: 上海交通大学出版社

邮政编码: 200030

印 制: 上海天地海设计印刷有限公司

开 本: 710 mm×1000 mm 1/16

字 数: 480 千字

版 次: 2020 年 11 月第 1 版

书 号: ISBN 978-7-313-23572-5

定 价: 89.00 元

地 址: 上海市番禺路 951 号

电 话: 021-64071208

经 销: 全国新华书店

印 张: 26

插 页: 8

印 次: 2020 年 11 月第 1 次印刷

版权所有 侵权必究

告读者: 如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话: 021-64366274

前 言

继往开来 开拓宇宙新视野

进入 21 世纪以来,天文学交融于迅猛发展的现代科学技术,成为最活跃的前沿学科之一。随着全波段天体电磁辐射和粒子辐射精细观测的大力发展,人造飞船探访太阳系天体,特别是对微弱的宇宙背景辐射和引力波的精准测定,古老的天文学进入一个突飞猛进的黄金时代。各种新发现和新成果纷至沓来,不仅揭示了天体和宇宙的新奥秘,展现了天体大千世界的美妙画卷,使人们大大地扩展了宇宙新视野,同时也出现了许多有待回答的重要问题,尤其是暗物质和暗能量这“两朵乌云”是否孕育着新的科学革命。

本书在 2003 年出版的普通高等教育“九五”国家级重点教材《天文学教程》(第二版)(高等教育出版社)的基础上改编而成。当年用过《天文学教程》第二版的青年已成长为我国天文和有关事业发展的生力军,在各自领域作出了卓越贡献,这是非常令人欣慰的!时过境迁,精英辈出,目前中国很多高校大力投入天文和有关专业的本科生及研究生培养,天文基础课也在各自改革创新,各件课件繁花似锦。因此,出版一部较全面系统、具备一定深度的本科基础课新教材是很有必要的。

《天文学教程》(第二版)是在已故的我国著名天文学家戴文赛教授的带领下,经过“科班弟子”几十年教学检验并不断更新完善的国家级重点教材。当年的编写者退休后,不忘初心和戴老的生前教诲,仍力所能及地调研,备写新版,参与讲座,为新人快速成长架桥铺路。由于天文学的领域很广,博大精深,尤其是近些年来物理学、航天与空间科学开辟了不同于传统天文学的新途径(诸如中微

子等粒子和引力波探测),以及融合天文学的粒子与(原子)核反应过程研究成为前沿热门领域,使得天文学发展日新月异,丰富多彩。因此教材应当与时俱进,舍弃过时的繁杂知识,更新和补充新内容,通过不同领域的合作,编写共同需要的新版《天文学教程》。

本书全面系统地阐述了天文学基本知识,并介绍了现代的重要进展,力求由浅入深,图文并茂,使用较多较新的信息资料。本书(上、下两册)基本上传承第二版的大纲和结构,上册(第1~8章)主要介绍天文学的发展历史和一般知识,以及太阳系天体的特征和运动规律。下册(第9~16章)则详细讨论宇宙中恒星和各种爆发性星体的形成和演化,以及星系和宇宙学的基本知识。新版特别增加了第15章“宇宙中的元素丰度及其起源”,从核物理的角度介绍宇宙中微观粒子的产生机制。本书可供1学年约120学时使用,也可以重点选讲80学时,其余作为课外阅读资料。本书也可供有志趣的师生和天文业余爱好者阅览。

本书撰写中参阅了一些老师的课件,吸取了同仁们很好的意见和建议,谨致谢意。感谢上海交通大学出版社对本书的器重和杨迎春博士的细致审阅与热情鼓励。

编著者虽然力所能及地吸取国内外有关著作和论文的精华,但因条件和能力所限,书中存在的缺点和错误,恳请读者批评指正。

目 录

第 9 章 恒星的一般性质 / 001

9.1 恒星的距离和光度 / 001

9.1.1 周年视差与距离 / 002

9.1.2 用三角视差法测定恒星距离 / 003

9.1.3 恒星的光度和绝对星等 / 004

9.1.4 测定恒星距离的其他方法 / 005

9.2 恒星的大小和质量 / 009

9.2.1 恒星直径的测定 / 009

9.2.2 恒星的质量和平均密度 / 012

9.3 恒星的运动 / 013

9.3.1 自行和切向速度 / 013

9.3.2 视向速度 / 015

9.4 恒星的光谱分类和化学成分 / 015

9.4.1 恒星大气和光谱形成 / 015

9.4.2 恒星的光谱分类 / 017

9.4.3 恒星化学成分的测定 / 021

9.5 赫罗图和恒星内部结构 / 023

9.5.1 赫罗图 / 023

9.5.2 恒星的内部结构 / 027

9.5.3 恒星的能源 / 029

9.6 恒星的自转 / 029

9.6.1 测定恒星自转速度的原理 / 029

9.6.2 恒星自转的发现和自转速度的测定结果 / 031

9.7 系外行星 / 033

9.7.1 探测系外行星的方法 / 034

9.7.2 系外行星的一些重要成果 / 041

第10章 变星和致密星 / 047

10.1 变星的发现、命名和分类 / 047

10.1.1 变星的发现和变星表 / 047

10.1.2 变星的命名 / 048

10.1.3 变星的分类 / 048

10.2 脉动变星 / 050

10.2.1 造父变星 / 051

10.2.2 长周期和短周期脉动变星 / 055

10.2.3 其他次型脉动变星 / 057

10.2.4 脉动理论 / 058

10.3 爆发变星 / 060

10.3.1 演化早期的爆发变星 / 060

10.3.2 耀星 / 062

10.3.3 沃尔夫-拉叶星 / 064

10.3.4 高光度变星 / 066

10.3.5 B型发射线星(Be)——仙后 γ 型变星 / 071

10.3.6 A型特殊星和共生星 / 072

10.4 激变变星——新星和超新星 / 073

10.4.1 新星 / 073

10.4.2 超新星 / 078

10.5 白矮星 / 091

10.5.1 白矮星概况 / 091

10.5.2 简并电子气及其物态方程 / 092

10.5.3 白矮星的质量-半径关系和钱德拉塞卡极限 / 094

10.6 中子星和脉冲星 / 096

10.6.1 中子星 / 096

10.6.2 脉冲星 / 100

10.7 黑洞 / 107

10.7.1 黑洞的概念 / 107

10.7.2 黑洞的奇特性质 / 108

10.7.3 黑洞的探测 / 110

第 11 章 双星和聚星 / 112

11.1 双星的发现和分类 / 112

11.1.1 双星的发现 / 112

11.1.2 双星的分类 / 114

11.2 双星的轨道 / 117

11.2.1 目视双星的轨道 / 117

11.2.2 分光双星和食双星的轨道 / 119

11.3 恒星质量的测定 / 121

11.3.1 目视双星的质量测定 / 121

11.3.2 质量函数 / 122

11.3.3 决定双星主要参数的小结 / 123

11.3.4 力学视差 / 124

11.4 密近双星 / 124

11.4.1 洛希瓣 / 124

11.4.2 密近双星分类 / 125

11.4.3 双星中的吸积过程 / 126

11.5 著名的双星和聚星 / 128

11.5.1 英仙 β ——大陵食双星 / 129

11.5.2 天琴 β / 131

11.5.3 大熊 W / 133

11.5.4 御夫 ϵ 和御夫 ζ / 134

11.5.5 双子 α / 135

11.5.6 猎户 θ^1 / 136

11.6 X 射线双星 / 137

11.6.1 X 射线源的发现和命名 / 137

11.6.2 X 射线双星的分类 / 137

11.6.3 典型的 X 射线双星 / 139

11.6.4 X 射线脉冲星的初步分析 / 141

11.6.5 吸积盘和吸积柱 / 143

11.6.6 SS 433 食双星系统 / 144

- 11.6.7 暂现 X 射线源和 X 射线暴源 / 145
- 11.7 γ 射线暴和引力波 / 148
 - 11.7.1 γ 射线暴 / 148
 - 11.7.2 引力波与引力波天文学 / 152
 - 11.7.3 引力波的间接证明——射电脉冲星 PSR 1913+16 / 154
 - 11.7.4 引力波的直接探测 / 155
- 11.8 双星与变星的关系 / 158

第 12 章 星团、星云和恒星演化 / 160

- 12.1 星团 / 160
 - 12.1.1 疏散星团 / 161
 - 12.1.2 星协 / 167
 - 12.1.3 球状星团 / 168
- 12.2 星云 / 171
 - 12.2.1 行星状星云 / 171
 - 12.2.2 发射星云 / 174
 - 12.2.3 反射星云 / 175
 - 12.2.4 暗星云 / 175
- 12.3 星际物质 / 177
 - 12.3.1 星际物质的性质 / 178
 - 12.3.2 星际原子和 H I 区及 H II 区 / 179
 - 12.3.3 星际分子和分子云 / 181
 - 12.3.4 冕气体区 / 184
 - 12.3.5 星际尘埃 / 185
 - 12.3.6 宇宙线 / 187
 - 12.3.7 中微子天文学 / 189
- 12.4 恒星的形成 / 190
 - 12.4.1 概述 / 190
 - 12.4.2 基本理论研究 / 192
 - 12.4.3 从原恒星到主序星 / 195
- 12.5 恒星的演化 / 197
 - 12.5.1 主序阶段 / 198
 - 12.5.2 后主序阶段 / 200

- 12.5.3 星团的赫罗图与恒星演化 / 200
- 12.5.4 恒星演化的晚期与归宿 / 201
- 12.6 密近双星的形成演化 / 203

第 13 章 银河系 / 207

- 13.1 银河和银河系 / 207
- 13.2 银道坐标系和恒星的运动 / 209
 - 13.2.1 银道坐标系 / 209
 - 13.2.2 不同波段观测的银河系及其概貌 / 210
 - 13.2.3 恒星在银河系的运动 / 212
 - 13.2.4 太阳在银河系的运动 / 213
- 13.3 星族 / 217
 - 13.3.1 星族的发现 / 217
 - 13.3.2 星族的特性 / 218
 - 13.3.3 星族与次系 / 219
- 13.4 银河系的自转和质量 / 220
 - 13.4.1 银河系自转的发现 / 220
 - 13.4.2 奥尔特公式 / 222
 - 13.4.3 银河系的自转曲线和质量 / 224
- 13.5 银河系的结构 / 226
 - 13.5.1 核球和棒 / 226
 - 13.5.2 银核、银心与超大质量黑洞 / 227
 - 13.5.3 银盘和旋臂 / 229
 - 13.5.4 银晕 / 234
 - 13.5.5 太阳的位置与近邻 / 234
- 13.6 银河系的特性 / 235
 - 13.6.1 银河系的大小和质量 / 235
 - 13.6.2 银河系的年龄 / 236
 - 13.6.3 银河系的环境 / 236
- 13.7 银河系的形成与演化 / 237
 - 13.7.1 银河系的形成 / 238
 - 13.7.2 银河系的演化 / 239
 - 13.7.3 银河系的未来 / 240

第 14 章 星系和宇宙学 / 242

- 14.1 普通星系的分类和主要性质 / 243
 - 14.1.1 椭圆星系 / 243
 - 14.1.2 旋涡星系和棒旋星系 / 246
 - 14.1.3 不规则星系 / 249
- 14.2 红移、哈勃定律和宇宙膨胀 / 250
 - 14.2.1 红移与哈勃定律 / 250
 - 14.2.2 星系的大小、质量和光度 / 253
 - 14.2.3 宇宙的空间膨胀 / 255
- 14.3 特殊星系 / 256
 - 14.3.1 活动星系核与活动星系的发现 / 256
 - 14.3.2 射电星系 / 258
 - 14.3.3 蝎虎 BL 天体和耀变体 / 263
 - 14.3.4 互扰星系和星爆星系 / 265
- 14.4 类星体 / 267
 - 14.4.1 类星体的发现 / 267
 - 14.4.2 观测特征 / 269
 - 14.4.3 红移的争论 / 270
 - 14.4.4 引力透镜效应 / 271
 - 14.4.5 视超光速现象 / 273
 - 14.4.6 类星体和活动星系核的统一模型 / 274
- 14.5 星系集团和宇宙大尺度结构 / 276
 - 14.5.1 多重星系 / 277
 - 14.5.2 本星系群 / 277
 - 14.5.3 星系团和超星系团 / 279
 - 14.5.4 宇宙的大尺度结构 / 282
- 14.6 星系际介质和背景辐射 / 284
 - 14.6.1 星系际介质 / 284
 - 14.6.2 宇宙背景辐射 / 285
- 14.7 时空观和宇宙模型 / 289
 - 14.7.1 宇宙学原理 / 289
 - 14.7.2 牛顿的绝对时空观和无限宇宙模型 / 290
 - 14.7.3 爱因斯坦的相对论和时空观 / 291

- 14.8 大爆炸宇宙学 / 296
 - 14.8.1 稳恒态宇宙模型和等级式宇宙论 / 296
 - 14.8.2 大爆炸宇宙学 / 297

第 15 章 宇宙中的元素丰度及其起源 / 303

- 15.1 元素丰度的测定与研究 / 303
- 15.2 原子核物理基本概念 / 305
 - 15.2.1 核素图概览 / 305
 - 15.2.2 原子核结合能 / 307
 - 15.2.3 β 衰变 / 307
 - 15.2.4 原子核反应 / 308
- 15.3 太阳系的元素丰度 / 309
 - 15.3.1 太阳光球的元素丰度 / 309
 - 15.3.2 陨石的元素丰度 / 310
 - 15.3.3 太阳系元素(核素)丰度分布的特征 / 318
- 15.4 恒星和星际物质的元素丰度 / 319
 - 15.4.1 恒星的元素丰度 / 319
 - 15.4.2 星际物质的元素丰度 / 322
 - 15.4.3 宇宙的元素丰度 / 323
- 15.5 宇宙早期的核合成 / 324
- 15.6 恒星核合成 / 326
 - 15.6.1 恒星内部的核合成过程 / 326
 - 15.6.2 爆炸性核合成 / 336
 - 15.6.3 中子星并合与黑洞吸积盘核合成过程 / 342
 - 15.6.4 宇宙线成因核素与散裂反应 / 344
- 15.7 宇宙中的元素起源 / 345
 - 15.7.1 元素起源的主要核过程 / 345
 - 15.7.2 核素丰度分布特征的主要原因 / 347

第 16 章 宇宙和天体的演化史 / 350

- 16.1 宇宙演化简历 / 350
 - 16.1.1 宇宙的最早阶段 / 352
 - 16.1.2 宇宙早期阶段 / 355

- 16.1.3 大尺度结构形成阶段 / 358
- 16.1.4 久远未来阶段 / 359
- 16.2 第一代恒星和星系的形成演化 / 360
 - 16.2.1 恒星时期——第一代恒星 / 361
 - 16.2.2 第一代恒星的反馈作用 / 364
 - 16.2.3 星系的形成演化——第一代星系 / 365
- 16.3 一般星系的形成演化 / 366
 - 16.3.1 星系的一般观测性质 / 367
 - 16.3.2 盘星系的形成 / 368
 - 16.3.3 椭圆星系的形成 / 369
 - 16.3.4 极亮红外星系 / 370
 - 16.3.5 星系的演化 / 371
- 16.4 太阳系的起源和演化 / 372
 - 16.4.1 太阳的形成和演化 / 372
 - 16.4.2 太阳系的起源与行星的形成 / 374
- 16.5 搜寻地外文明 / 394
 - 16.5.1 可联络的地外文明有多少? / 394
 - 16.5.2 SETI: 地外文明搜寻计划 / 395
 - 16.5.3 UFO: 不明飞行物 / 398

参考文献 / 401

附录 彩图 / 403

第9章 恒星的一般性质

恒星是像太阳一类的能产生强大能源的天体。从物理角度来讲,它们都是由自身物质的引力集聚在一起的炽热等离子体,其能量来源于内部的原子核反应。在它们“生命”的主要阶段,其核心区不断地进行“氢燃烧”,即氢聚变成氦的热核反应,所产生的能量从恒星内部向外传输,并从表面辐射到外太空。随着核心区的氢消耗殆尽,质量较大的恒星还会经历一系列核合成过程,而有些恒星还会经历爆炸性核合成过程而成为超新星,产生大量的重元素并抛到星际空间。

太阳是一颗典型的恒星。通俗地说,太阳是离我们最近的恒星,一般的恒星都是遥远的、大小不同的“太阳”。“恒星”是古代人们直观天象延续下来的不恰当概念,实际上,它们并不“永恒”:一方面,它们不断地运动着,只因为它们太远而很难准确测出它们的运动;另一方面,它们都在演化,在不同演化阶段,即不同年龄阶段其性质变化很大,因而恒星有多种类型。多数处于相对稳定演化阶段的恒星常称为正常恒星或普通恒星,以区别于后面所述的变星和致密星那样的特殊类型恒星。

恒星的一般性质包括距离、大小、质量、光度、表面温度等。本章阐明关于这些性质的有关天文概念及测定方法,综述观测研究的主要结果。

9.1 恒星的距离和光度

恒星的距离是最重要的基本资料。知道了恒星的距离,人们才可以进而了解它们的空间分布和运动、大小和质量,以及它们产生能量的规模等性质。很多重要的天文资料是不易或无法直接观测的,必须先设法做一些逻辑推理,把需求资料与某种可观测资料联系起来,建立需求资料与可观测资料之间的对应关系,然后由可观测资料导出需求资料,这就是“天文观测量转换法”。天体距离的测定就是这样,用三角法把距离测定转换为角度测量。在三角法不能测定太遥远

天体的距离时,人们又提出其他测定距离的一些方法,利用由近及远的外推法不断扩展测定距离的范围。

9.1.1 周年视差与距离

测定恒星距离的基本方法是三角视差法,以地球绕太阳公转轨道半径(日地距离)作基线,把测定恒星距离转换为测定恒星周年视差。在由太阳、地球和欲测恒星组成的直角三角形中(见图 9-1),太阳到恒星的距离 r 比日地距离 a 大得多,小的直角边所对的小角 p 就是周年视差。如果 p 以弧度为单位, r 、 p 与 a 之间有足够好的近似关系:

$$r \times p = a \quad (9-1)$$

如果 p 以角秒表示,并记为 p'' , 因为 $1 \text{ 弧度} = 206\,265''$, 则式(9-1)可改写为

$$r = 206\,265 \frac{a}{p''} \quad (9-2)$$

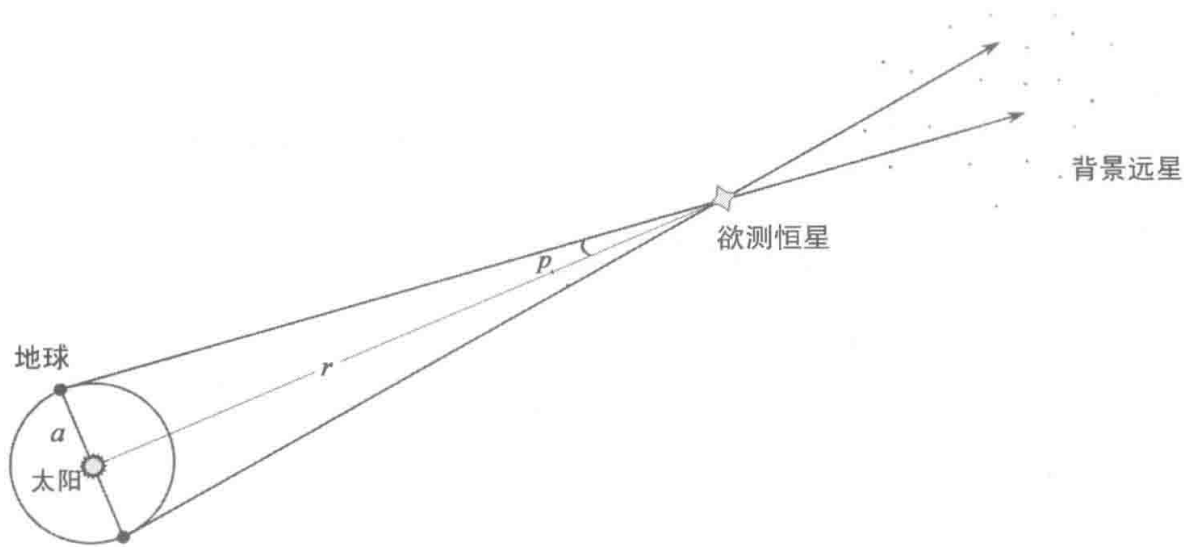


图 9-1 周年视差的定义

若改以天文单位(AU)为长度单位,则 $a = 1 \text{ AU}$, 式(9-2)可写成

$$r = \frac{206\,265}{p''} \text{ AU} \quad (9-3)$$

因为恒星的距离数值很大,一般不用 km 或 AU 作单位,而常使用下列两种单位:

秒差距(pc)——与周年视差 $p'' = 1''$ 对应的距离;

光年(ly)——光在一年内所经过的路程。

应当指出,虽然秒差距和光年是含有角度和时间单位意义的词,但它们却是距离的单位。秒差距、光年和其他长度单位之间的换算关系如下:

$$1 \text{ pc} = 3.261\,563\,8 \text{ ly} = 206\,264.8 \text{ AU} = 3.085\,677\,6 \times 10^{16} \text{ m};$$

$$1 \text{ ly} = 0.306\,6 \text{ pc} = 63\,239.7 \text{ AU} = 9.460\,730\,472 \times 10^{15} \text{ m}.$$

显然,恒星的距离若以 pc 为单位,就得到下列简单关系式:

$$r = \frac{1}{p''} \quad (9-4)$$

若以 ly 为单位,保留 3 位有效数字,则有

$$r = \frac{3.26}{p''} \quad (9-5)$$

对于更遥远的天体,常用千秒差距(kpc, 10^3 pc)和兆(百万)秒差距(Mpc, 10^6 pc)为单位。

9.1.2 用三角视差法测定恒星距离

由于地球绕太阳公转轨道接近于正圆,地面观测者看到黄极方向的恒星在天球上的视位置在一年内画出一个圆,其角半径等于恒星的周年视差。恒星越远,圆的半径越小。不在黄极方向的恒星视位置在一年内画出一个椭圆,它的长轴与黄道平行,半长径就等于恒星的周年视差。正好在黄道上的恒星,椭圆退化为直线(见图 9-2)。

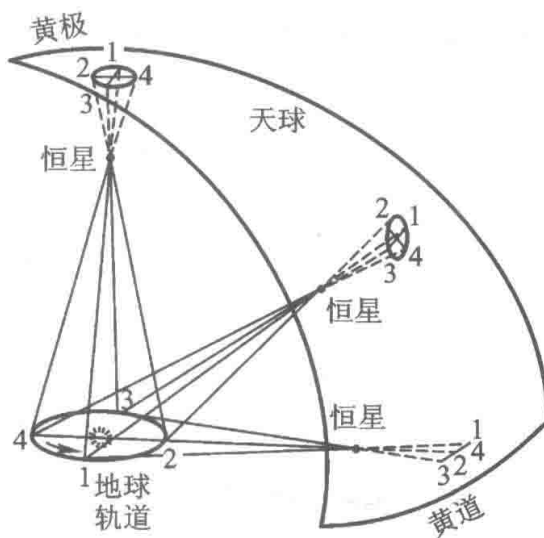


图 9-2 恒星的视差位移

哥白尼公布“日心说”之后,许多天文学家就尝试测定恒星的周年视差,但都因其数值很小及观测精度不够而没有成功。直到 19 世纪 30 年代后期,德国的 F. 贝塞尔(Friedrich Bessel)、俄国的冯·斯特鲁维(von Struve)、英国的 T. 亨德森(Thomas Henderson)才各自独立地分别得出天鹅 61、天琴 α (织女星)和半人马 α (南门二)的周年视差的可靠测量结果。他们测定的结果与现代测量的数据列于表 9-1 中,这是 19 世纪的重大天文成就,标志着哥白尼的“日心说”取得最后胜利,从此天文学越出了太阳系的疆界而进入对遥远天体的探索。

表 9-1 最早测定的 3 颗恒星的周年视差

观测者	恒星	最初测定的 视差值/角秒	现代测定的 视差值/角秒	现代测定的 距离/秒差距
贝塞尔	天鹅 61	0.31	0.294	3.40
斯特鲁维	天琴 α	0.26	0.129	7.76
亨德森	半人马 α	1.16	0.754	1.295

测定恒星的周年视差是一项精细而又烦琐的工作,往往需要经历几年时间,拍摄几十张照片,测量欲测星相对于背景的遥远暗星(可以认为视差位移极其微小而不计)的位置变化,归算出周年视差。利用人造卫星到太空进行天体测量可以摆脱大气扰动、折射以及仪器受重力弯曲等影响,从而大大提高测量精度。如《天文学教程》上册 4.7 节所述,依巴谷(Hipparcos)卫星从 1989 年 8 月至 1993 年 8 月的 4 年观测寿命期间,对暗至 12^m 的大量恒星进行了扫描观测。1997 年发表了“依巴谷星表”,列出 118 218 颗恒星的位置、视差和自行。对于亮于 9^m 的星,测量精度达 $0.000\,97''$,使距离在 100 pc 以内的恒星距离的测量误差不超过 20%。2013 年 12 月 19 日发射了盖娅(Gaia)卫星,主望远镜是三反射镜消像散型的,直径为 $1.45\text{ m} \times 0.5\text{ m}$,有天体测量仪、光度测量仪和视向速度光谱仪,于 2014—2020 年测定约 10 亿颗天体(主要是恒星,也包括行星、彗星、小行星和类星体)的位置和运动、2 亿颗以上恒星的视差,使距离为 10 000 pc 时测量精度达到 10%。

恒星的周年视差都小于 $1''$ 。半人马 α 的周年视差最大($0.755''$),它实际上是一个三合星系统,其中的一颗($\alpha\text{ Cen C}$)是离太阳最近的恒星,因而称为比邻星(Proxima Centauri),其周年视差为 $0.768''$,相应的距离为 4.24 ly。

9.1.3 恒星的光度和绝对星等

恒星的辐射功率,即整个星面每秒发射出的所有波段辐射的能量,称为恒星的光度(luminosity),用符号 L 表示。它是恒星本身所固有的、表征其辐射本领的量。恒星光度常以太阳的光度 $L_{\odot}$ ($3.846 \times 10^{26}\text{ W}$) 为单位。

研究者观测的是恒星视亮度,用视星等表示。它实际反映的是恒星辐射的照度,与恒星的光度成正比、与恒星到观测者的距离的平方成反比。令 E 和 m 为观测的恒星照度和星等, r 为以 pc 为单位的恒星距离, E_1 为假想把恒星“移到”标准距离(10 pc)时的观测照度,则

$$\frac{E_1}{E} = \frac{r^2}{10^2} \quad (9-6)$$