

# 恒星运动和宇宙结构

[英] 亚瑟·斯坦利·爱丁顿 © 著

张建文 © 译

宇宙散发着神秘魅力，像磁石般吸引着人们的目光，  
从古至今，人们探究其真相的欲望从未减退。

本书带您揭开宇宙的神秘面纱，探索扑朔迷离的恒星运动，  
让您置身其中，受益无穷。

长江出版传媒  
湖北科学技术出版社

# 恒星运动和宇宙结构

[英] A.S. 爱丁顿 著

张建文 译



长江出版传媒  
湖北科学技术出版社



图书在版编目 (CIP) 数据

恒星运动和宇宙结构 / (英) A. S. 爱丁顿著 ; 张建成译. — 武汉 : 湖北科学技术出版社, 2016. 11

ISBN 978-7-5352-9021-2

I. ①恒… II. ①A… ②张… III. ①恒星—研究②宇宙—研究 IV. ①P145. 1②P159

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 211849 号

策 划: 李艺琳

责任编辑: 李大林 张波军

责任校对: 王 迪

封面设计: 中和东星 王 梅

出版发行: 湖北科学技术出版社

地 址: 武汉市雄楚大街 268 号

(湖北出版文化城 B 座 13—14 层)

网 址: <http://www.hbstp.com.cn>

电 话: 027-87679468

邮 编: 430070

印 刷: 三河市华晨印务有限公司

邮 编: 065200

700×960 1/16

2016 年 11 月第 1 版

13.5 印张 120 千字

2016 年 11 月第 1 次印刷

定 价: 39.80 元

如对本书有意见和建议或本书有印装问题, 请致电 010-50976448

## 内 容 简 介

本书介绍了我们对于恒星和宇宙结构的认识。本书共 12 章，分别是：观测数据、总论、最近的恒星、移动的星群、太阳运动、两个恒星流，双星流的数学理论、光谱型相关现象、恒星的数量、一般性统计研究、银河系、星簇和星云、恒星系统动力学。作者通过数学模型计算和讨论，解释了造父变星的变化周期理论，用科学理论证明宇宙天体中恒星的运动规律和宇宙天体的内部结构，进一步发展了恒星大气理论，并用以分析吸收线的形成和讨论恒星的连续光谱，最后对恒星系统动力学做了研究说明。

## 前 言

本书目的是介绍对于恒星和宇宙结构的认识现状。过去十年来，天文学的这一分支尤为引人注目，并且也有许多新的发现，我们完全有理由期待在未来几年将会同样硕果累累。在现阶段尝试对我们的知识进行一般性讨论可能有风险，然而，也许在目前这个时期，在研究有积极进展的情况下，对所取得的进展加以讨论显得尤为有用。

有关进展将必然导致对观念重新调整的知识必须谨慎地灌输给每一个读者，但我相信也无须过度谨慎。在构建假设及编织看来最好的、符合我们现今部分知识的解释不存在危害，如果它们帮助我们——即便是暂时的，把握那些零星的事实的关系，并组织我们的知识，这些就并非漫无目的的揣测。

尚未尝试历史性地看待这个问题，我宁愿来描述建立在最新数据基础上，而非先去研究上述的研究结果。我特别遗憾的一个必然结果是：诸多研究人员已经为最近取得的进展做出了贡献，却很少被提及。W. 赫舍尔爵士、科德尔德、西利格、纽科姆和其他人在历史进程中已经居于更为突出的地位，但它超出了我描述知识据之得以前进的步伐的目的，在此，所研究的是现状。在切实可行的范围内，我一直在努力为一般的科学读者写作本书，完全避免数学讨论需要极大的牺牲，所以本书中大部分数学分析分别放在两章（第七章和第十章）中。数学讨论偶尔也会出现在其他章

节，希望不会影响本书的可读性。

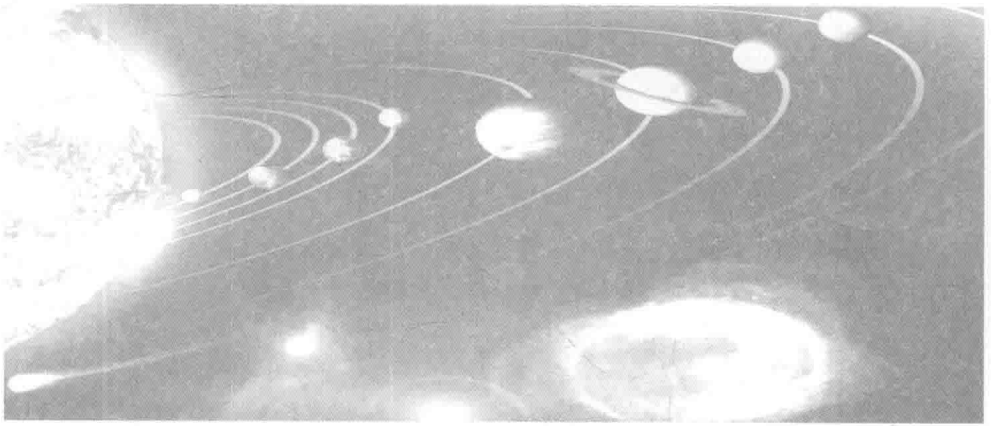
我要感谢 G. E. 希尔教授允许使用 G. W. 艾奇先生在威尔逊山天文台所获得的两张星云照片，感谢皇家天文学家 F. W. 戴森博士所获得的天空的富兰克林—亚当斯图表其余三张图片，这只是我欠戴森博士的一小部分。本书所涉及的几乎所有主题都时常地在我们之间进行讨论，我绝不尝试区分我欠他的那些思想。还有许多其他的天文学家，我从他们的交谈中自觉或不自觉地得到了本书的素材。

我要感谢格林尼治皇家天文台的 P. J. 梅洛特先生，他热心地帮我重新绘制了三张富兰克林—亚当斯图片。

感谢格林尼治皇家天文台首席助理 S. 查普曼博士热心地阅读了校稿，对他的细致检查和建议深表谢意。

我也深深地向本书的编辑 R. A. 格里高利博士表示谢意，感谢他为本书提出的众多的宝贵建议和在本书付梓过程中的帮助。

A. S. 爱丁顿



## 目 录

---

|      |           |     |
|------|-----------|-----|
| 第一章  | 观测数据      | 1   |
| 第二章  | 总论        | 24  |
| 第三章  | 最近的恒星     | 32  |
| 第四章  | 移动的星群     | 44  |
| 第五章  | 太阳运动      | 57  |
| 第六章  | 两个恒星流     | 70  |
| 第七章  | 双星流的数学理论  | 101 |
| 第八章  | 光谱型相关现象   | 125 |
| 第九章  | 恒星的数量     | 148 |
| 第十章  | 一般性统计研究   | 161 |
| 第十一章 | 银河系、星簇和星云 | 187 |
| 第十二章 | 恒星系统动力学   | 198 |

---



## 第一章 观测数据

据估计，现役最强大的望远镜能够观测到的恒星数量可达到数百万颗。恒星天文学的一个主要目的，是要弄清在这众多的星体之间所存在的关联，并研究它们构成的庞大体系的性质和关系。这项研究迄今仍处于起步阶段，但当我们考虑到该问题的重要性时，几乎不会预期，我们在恒星宇宙的本质的整体理解上的进步是迅速的。但这个活跃的天文学分支尤其在过去 10 年间，取得了诸多非常确定的研究成果，并且可能形成了恒星在空间中的普遍化分布以及它们运动的普遍性质。虽然我们的知识依然存有缺陷，在一些重要的问题上依然无解，但沿众多方向开展的研究仍然得到了能够很好确定的令人震撼的事实。我们在后面几页的任务是整合这些结果，并对已取得的进展加以评述。

直至近几年来，对太阳系星体的研究形成了最大的天文学研究分支，但该分支与我们在此要讨论的关系不大。从我们的角度来看，全部太阳系只是众多恒星系中的一个，星球系统规模大约比行星系统大 100 万倍，并且恒星之间的距离超过太阳系中运转的较为熟知行星的距离百万倍。进一步说，尽管本书的主题是恒星，但并非所有的恒星天文学分支都在本书中的探讨范围中，本书的侧重点在恒星社会内恒星之间的关系。我们只关注恒星的亮度划分、发展阶段和其他属性，而不关注恒星个体的特点。因



此，本书的目的不是对于恒星物理性质的详细研究，无论是变星、新星还是双星系统，无论是它们的化学变化还是温度变化，这些有趣的现象都不是我们研究的目标。

在这里简要列举所有事实或者假设的所有超级结构都必须建基于天文观测数据，对我们研究有用的星球数据有：

- (1) 在天空中出现的位置。
- (2) 星等。
- (3) 光谱类型或颜色。
- (4) 视差。
- (5) 固有运动。
- (6) 径向速度。

此外，也可以在一些极为罕见的情形下用到一个恒星的质量和密度，这是一件重要的事，因为假定一颗星球只能通过它的重力吸引影响另外一颗恒星，而重力吸引依赖于星球的质量。前面数据基本上包含了在研究恒星分布的一般问题中有用的特点。<sup>①</sup> 在罕见的情形下，能够得到列于上面中 6 个类目下恒星的完整知识，所采用的绝大多数研究过程的间接性要归因于尽可能利用我们确实拥有的部分知识的必要性。

前面所列举的观测将分别依序考虑，在天空中出现的位置无须多言，它始终可以用必要的精度给以描述。

星等——恒星的星等是其视亮度的度量，除非距离已知，我们通常并排在一个位置上计算出相对或绝对亮度。恒星的星等都是基于对数尺度测量的，从表示传统亮度源任意标准的 6 等恒星出发，但现在能够达到足够高的精度。对于一个 5 等恒星，我们将获得为 6 等恒星 2.512 倍的光。<sup>②</sup> 类

---

① 或许我们应该补充的是，双星的分离和周期也很可能被证实为有用的数据。

② 有必要提醒读者，日常仍在使用的星等系统——如众多双星观测者所使用的波杜表，甚至和博斯总星表初编（1910 年）的星等，都不符合这类标度。



似地，往下或往上一个星等，均表示增加或减少光的比例均为  $1 : 2.512$ 。该数据的这种选择方法使得 5 个星等的差异对应于光亮度比为  $\sqrt[5]{100} \approx 2.512$ ，公式为：

$$\log_{10} \frac{L_1}{L_2} = -0.4 (m_1 - m_2)$$

其中， $L_1$ 、 $L_2$  表示两颗恒星的光强度， $m_1$ 、 $m_2$  表示两颗恒星的星等。

星等分类有两种：光度（或视度）和感光度。我们经常发现，对于两颗恒星，对眼睛而言显得更亮的恒星在照相板中却留下较暗的影像。这两类系统均没有非常严格的定义，原因在于当星球具有不同的颜色时，通过眼睛判断光的品质时存在一定的个人因素。但是，如果使用感光板时，依赖于特定种类的感光板的感光性，或者依赖于显微镜物镜的色差校正可能导致差异。随着星等确定的准确性提高，采用更为精确的视觉和影响标度将会变得必要，不过目前看来不存在由此原因导致的一致性的严肃需求。但在光度与感光度之间的区别非常重要，其间的差异也很巨大。一颗星球的颜色越蓝，它对感光板的相对影响就越大，蓝色恒星和相同视觉亮度的红色恒星可能存在多达两个星等的光度差。

用对数刻度测量亮度具有许多优点，但也容易对所采用的数值的真正意义产生误解，它并不总能意识到对恒星亮度的通常测量是如何粗糙。如果个体星球的星等误差不大于  $0^m.1$ ，我们通常对结果都很满意，然而，这意味着在光强度上有近 10% 的误差。按照这种解释，那就是个相当差的结果。恒星研究的一个重要部分，是关注在一定星等范围内恒星数量的计数。随着一个星等的每个连续步骤中恒星的数量增加约 3 倍，很明显，所有这些研究工作将非常重要地取决于所采用的星等标度的系统误差消除，2/10 或 3/10 数量级上的偏差将深刻影响测量结果。在标准的星球序列下，准确的星等系统的建立是一件极为困难的事情，即便至今依然不能确定已



经实现了这一点。在关注范围内的星球覆盖了 20 多个星等，相应于光比大约为  $1000000000:1$ ，在不带来严重累积误差的情况下细分这一范围，对任何一种物理测量都将是难度很大的任务。

哈佛天文台涵盖了天空的两个半球的广泛的研究，它是现代标准星等的主要依据。位于北极点附近的哈佛标准星等序列已由便捷的步骤扩大到星等 21，该值是威尔逊山天文台的 100 英寸<sup>①</sup>胡克反射望远镜所能达到的极限。如今提供了一个合适的标度，据此能够实现微分测量。感光度的哈佛序列的绝对标度已经分别由 F. H. 西尔斯在威尔逊山、S. 查普曼和 P. J. 梅洛特在格林尼治独立测试，两种结果都表明，从第十到第十五星等该标度合理正确。但据西尔斯看来，第二和第九星等之间需要修正， $1^m.00$  在哈佛标度中绝对值相当于  $1^m.07$ 。如果这个结果是正确的，在统计学讨论中加入这一误差就相当必要。

就统计而言，现今在哈佛、波茨坦、哥廷根、格林尼治和耶基斯天文台都获得了大量的恒星星等的测定，修订后的哈佛测光法给出了低至约  $6^m.5$  所有恒星的视星等。同为视星等的波茨坦星等给出了我们的天空更有限的一部分，它低至  $7^m.5$ 。哥廷根测定是一种绝对测定方法，独立于哈佛序列，但与之吻合相当好，提供了星等亮度高于  $7^m.5$  的广大天空区域的感光度结果。耶基斯研究给出了北极点  $17^\circ$  范围内的星等低至  $7^m.5$  的恒星的视星等和感光度结果。在哈佛序列的基础上，格林尼治进行了一系列的研究，提供了扩大到 17 星等的更暗淡的恒星的统计结果，对恒星系统的遥远部分的研究是一个特别有价值的来源。

到目前为止，我们一直在考虑恒星的视亮度，而非其本征亮度。后者的量值可以在知道与该恒星的距离下计算得到。我们将测量太阳的绝对光度作为亮度单位。已经测得太阳亮度的恒星星等值，可以表示为  $-26^m.1$ ，

---

① 1 英寸  $\approx 0.0254$  米。



即它的亮度是零星等星亮度的 26.1 倍。<sup>①</sup> 根据这一亮度  $L$ ，星等大小为  $m$ ，视差为  $\omega''$  时，有以下公式：

$$\log_{10} L = 0.2 + 0.4 \times m + 2 \log_{10} \omega$$

恒星的绝对星等与它们的视星等的差异同样巨大，已知最暗淡的恒星是格龙布里奇的伴星 34，这颗恒星星等比太阳暗淡 8 倍。估算的最明亮的恒星的光度通常很不确定，但是，只针对已明确确定的结果，仙王座变光星的亮度平均为太阳亮度的 7 倍或许这个光度会被许多猎户座型恒星超过。因此，本征亮度至少具有 15 个星等，或 1000000 : 1 的光比。

光谱类型——天文物理学家已使用多种类型的光谱分类系统，但哈佛天文台的德雷珀目录系统在恒星分布研究中应用最为广泛，这主要是由于该系统对明亮的恒星做了完备的分类，该系统由以下字母来表示假想的演化序列：

$$O, B, A, F, G, K, M, N$$

一个连续的分级自  $O$  到  $M$ ，并且假设从一类过渡到下一类可被细分成 10 种。由此  $B5A$  通常缩写为  $B5$ ，表示  $B$  和  $A$  之间的中间类别； $G2$  表示  $G$  和  $K$  之间的类别，但要更为接近于  $G$ 。从  $A0$  到  $A9$  的恒星通常称为  $A$  型，但据推测  $B6$  至  $A5$  将是最好的分类形式，这个原则偶尔被采用。

对我们而言，通常不必考虑这些字符所代表的恒星的物理特点，原因在于不必讨论运动和分布的关系，我们所需要的就是一种根据恒星演变所达到的阶段和共同特点进行区分的方法。但是，有必要简要地描述控制分类的原则并指明光谱的主要类型。

从其最早期一直到最新进化的各个阶段，跟踪一个假想的恒星，据推测恒星光谱上的变化遵循以下过程：起初，光谱包括微弱的连续背景上的

---

<sup>①</sup> 最近的研究结果为一 26.5 (才拉斯基，莫斯科天文台分析，1911)，但最好把粗略代表太阳光度的单位作为常规单位并由公式予以定义，而不是每次改变的恒星的光度测量，这样就能得到同样恒星星等的更好确定。



全漫射频带，光谱频带变得越来越少、越来越窄，出现了微弱的吸收谱线，显现的第一类谱线是各种氢光谱系列、众所周知的巴尔摩氢光谱系列及“附加的”或“尖锐的”氢系列光谱<sup>①</sup>。最后一类谱线是由 E. C. 皮克林于 1896 年在恒星中所认识到、但由 A. 富勒于 1913 年首次人工生成的光谱，明亮的频带到此消失，在其余阶段的频谱完全由吸收谱线和频谱组成，但在异常的个体恒星，会反常地出现亮线。下一个阶段出现了真氢光谱强度的急剧增加，谱线变得非常宽和发散，其他谱线消失。其后，钙的 *H* 线和 *K* 线以及其他太阳光谱将变得明显并且强度增大，此后，氢谱线强度下降，尽管它依然是剩余频谱的主要特征。首先达到钙光谱极为剧烈的阶段，随后将观测到众多太阳光谱谱线。在到达太阳光谱阶段之后，主要特征是光谱从紫外端的缩短、氢光谱的进一步衰减、微弱吸收光谱线数量的增加，以及最终出现金属化合物特别是氧化钛的频谱，全谱最终接近太阳黑子频谱。

在这些原则指导下，我们将光谱分为八种主要类型，但在它们之间有一个连续的分级序列。

O 型（沃尔夫—拉叶型）——广谱包括微弱连续背景上的明亮频谱；其中最引人注目的有，中心位于频段  $\lambda\lambda 4633$ 、4651、4686、5693 和 5813 的光谱。该型光谱分为 5 种，包括 *Oa*、*Ob*、*Oc*、*Od*、*Oe*，通过频带的强度和宽度加以区分。此外，在 *Od* 和 *Oe* 暗线，主要属于氢和氢—氦谱系组成它们的频谱。

B 型（猎户座型）——由于这类频谱主要由氢频谱组成，也被称为氢类频谱。此外，还存在一些起源未知的特征谱线以及“尖锐的”和巴尔摩系列频谱，O 型频谱中的明亮频带不再出现。事实上，它们早在 *Oe5B* 区中就已消失，因此，通常把这类频带作为猎户座型的起点。

---

<sup>①</sup> A. 富勒的实际工作和 N. 玻尔的理论研究，都绝少怀疑该光谱是由于氢的缘故，尽管存在它与氢光谱的简单数值关系。



A 型（天狼星型）——巴尔摩氢系列频谱处于极大强度，为该型光谱最为显著的特征，其他频谱都存在，但它们相对比较微弱。

F 类（钙型）——氢系列光谱依然非常显著，但不像 A 型那么强烈，钙的狭窄 H 和 K 线已经变得非常突出，成为这一频谱的特征。

G 型（太阳型）——太阳可视为这一类的典型恒星，光谱中出现了大量的金属频谱。

K 型——频谱有些类似于 G 类，它主要区别在于氢谱线，在 G 型中仍然相当强的氢谱线在 K 型中比某些金属线更暗淡。

M 型——该型光谱的标记为由于氧化钛而呈现凹槽状，值得注意的是，该型光谱将完全以这种物质为主。已认识到两个连续的阶段，可细分为 Ma 和 Mb，除了显示普通的 M 型光谱外还显示出明亮氢谱线的长周期变星可入 Md 级。

N 型——常规的光谱类型终止于 Mb 级，没有向 N 型的转变，且 N 型与上述类型的关系并不确定，该型的特征归因于碳的化合物的特征凹槽谱线，M 型和 N 型恒星均具有强烈的红色调。



图 1.1 恒星光谱类型

有时，使用 A. 塞齐 (A. Secchi) 不太详细的分类会比较方便。严格说来，他的系统与可见光谱相关，德雷珀符号与感光度有关，但二者可以很好地协调。



|         |     |    |       |         |
|---------|-----|----|-------|---------|
| A. 塞齐类型 | I   | 包含 | 德雷珀类型 | B 和 A   |
|         | II  |    |       | F、G 和 K |
|         | III |    |       | M       |
|         | IV  |    |       | N       |

由于属于最后两类中的恒星相对很少，这种分类实际上是分成大小基本相同的两组，当材料缺乏而无法进行广泛的讨论时，这是一个非常有用的分类。

很多时候，有迹象表明，德雷珀分类并未成功地将恒星分成两个真正均匀的组。根据诺曼·洛克爵士的理论，每种恒星类型内都有温度上升和下降的恒星，例如，在 K 型内为两类恒星的混合，一类处于非常早的发展阶段，另一类恒星处于发展后期。在 B 型的情形下，B. H. 鲁登道夫 1 已经发现，按照洛克分类中分别作为温度上升和温度下降的恒星，所测得的径向运动存在可观的系统性差异（需要指出，这并非运动上的而是物理状态上的真正差异，导致在光谱测量上出现了错误）。E·赫兹普龙 2 指出，在莫里小姐的分类（即清晰确定的吸收线）中是否存在 C 型特征对应于恒星的本征光度的一个重要区别。然而迄今为止，广为接受的还是德雷珀分类，它至少为我们的研究提供了可用的最完整的分类。

比色指数——恒星可根据颜色来代替光谱型进行分类，这两种方法均根据恒星所发射的光的性质来分类，因此有共同之处。也许我们不要太过期盼这两个分类之间存在非常密切的对应关系，因为，虽然颜色主要依赖于光谱的连续背景，但光谱类型由细纹和条带来确定，而它们对颜色几乎没有直接的影响。尽管如此，在这两种特性之间发现了密切的关联，毫无疑问，这是由于两者密切地与恒星的有效温度有关这一事实。

最便捷的颜色测量能通过感光度扣除视星等之差得到，此即所谓的比色指数，光谱类型和比色指数之间的关系如表 1—1 所示。



表 1-1 光谱类型和比色指数之间的关系

| 光谱类型  | 参考比色指数 |            |
|-------|--------|------------|
|       | 金 $m$  | 施瓦茨希尔德 $m$ |
| $B_0$ | -0.31  | -0.64      |
| $A_0$ | 0.00   | -0.32      |
| $F_0$ | +0.32  | 0.00       |
| $G_0$ | +0.71  | +0.32      |
| $T_0$ | +1.17  | +0.95      |
| $M$   | +1.68  | +1.80      |

金的结果表示哈佛系统的视觉和感光度标度，史瓦西<sup>4</sup>的结果表示，哥廷根的感光度和波茨坦的视觉所确定的标度。允许存在一定的差异，取决于感光度星等和视星等吻合的特定类型的光谱，二人的研究彼此完全符合。

上述结果得自于相当多的恒星的观测结果，但该表可相当精确地应用于恒星个体，因此，当比色指数已知时，可以确定光谱类型，反之亦然。至少对于前几种类型的恒星，光谱类型与比色指数对应之间的平均偏差不超过  $0^m.1$ ，对于  $G$  型和  $K$  型会出现较大的偏差，但其相关性依然非常密切。

另有一种分类方法，是根据测得的恒星所发射的光的“有效波长”特性进行分类。如果将由多个平行条带或金属丝等间隔布置的粗格栅置于望远镜的物镜前方，衍射图像将出现在主图像的任意一侧。这些衍射图像是严格的光谱，并且图像中心点的选择，将取决于光谱的强度分布。因此，每颗恒星都会有确定的有效波长，这将作为它的比色指数，或者说是其颜色被感光板的解析。对于相同的望远镜和光栅，在最先出现的两个衍射图像之间的间隔是有效波长的常数倍。该方法由 K. 史瓦西于 1895 年首次使用，它的一个重要的应用是由普罗斯佩·亨利用于确定在厄洛斯星上的大气扩散效果，该方法已经被 E. 赫兹普龙应用于恒星分类。



视差——地球绕太阳的周年运动，导致所观测的恒星方向上发生微小变化，使得恒星似乎在天空中略呈椭圆形。这种周期性的位移叠加在恒星的统一的固有运动中，而恒星的固有运动通常要大得多，然而，区分这两种位移并无困难。由于我们只关心两个天体连线的方向，地球运动的影响与地球处于静止的影响相同，恒星在空间刻画的轨道与地球相同，但随着位移反转，恒星的假想轨道将提前于地球轨道 6 个月。这个轨道近于圆形，但由于通常都是以某个角度观测，它在天空中显示为椭圆。在任何情况下，椭圆的长轴等于地球轨道的直径，并且，由于后者的长度是已知的，其视星等或角量值的确定提供了计算恒星距离的方法。视差定义为恒星距离上一个天文单位（地球的轨道半径）长度所对应的角，相当于该星显示的椭圆的主半轴。

对这个小椭圆的测量，总是由相对于周围的一些恒星来进行，原因是没有希望以必要的精度获得绝对的方向确定，由此得到的相对视差需要通过参比恒星的平均视差量予以修正，以获得绝对视差。这种修正只能从星等和固有运动均与参比恒星相似的恒星的距离的一般性知识推测。但是，因为它基本很少超过  $0.01''$ ，并不会将太大的不确定性引入最终结果。

视差是我们想要测定的数据中最难确定的，而仅仅比较确定地测得了有极少数恒星的视差。直到在测量手段上取得巨大的进步，除了最近的数百颗恒星外，所有其他恒星的视差都不能用这个方法测得。但如此艰辛的观测是必须的，即使这会占用研究者很长时间。通常，所公布的视差表包含许多非常不确定的方面，有些则是完全虚假的。基于这些结果的统计研究易被极大地误导，然而，可以确信，通过毫无保留地拒绝除具有最高精确度的数据之外的所有测定，可以得到一些重要的信息，我将在第三章对这些结果进行讨论。此外，还可以采用多种本身并非高精度的测定，以得到不同序列星等和固有运动的恒星的平均视差，前提条件是明显不存在系统误差，至少，它们可以用于检查不那么直接的方法所得到的结果。