

高等学校教学用书

球面天文学教程

C. H. 勃拉日哥著

高等教育出版社

普通高等教育出版社

球面天文学教程

（第二版）

（中国科学院天文研究所）



高等学校教学用书



球面天文学教程

C. H. 勃拉日哥著
易照華 楊海寿譯

高等教育出版社



本書係根據國立技術理論書籍出版社 (Государственное издательство технико—теоретической литературы) 出版的勃拉日哥 (С. Н. Блажко) 著“球面天文學教程” (Курс сферической астрономии) 1948 年版譯出。原書經蘇聯高等教育部審定為高等學校教科書。

本書由北京大學數學力學系易照華、楊海壽合譯，並經戴文賽同志校訂。

球 面 天 文 學 教 程

С. Н. 勃拉日哥著

易照華 楊海壽譯

高等教育出版社出版

北京琉璃廠一七〇號

(北京市書刊出版業營業許可證出字第〇五四號)

丁林印刷廠印刷 新華書店總經售

書號 13010.21 開本 850×1168 1/32 印張 10 12/16 字數 290,000

一九五四年十月上海第一版

一九五六年五月上海第二次印刷

印數 2,501—3,500

定價(8) 1.20

序 言

球面天文學的內容早已確定到這種程度，使所有的教本都包括着標題相同的各章，所不同的只是篇幅的多少和敘述的方式。對於接着普通天文學課程之後來讀這一門課的大學生，我曾想給他們一本在敘述上儘可能簡單明瞭的球面天文學教本，然而這樣做並未將天文現象簡單化，而且也適當地照顧到所要求的計算準確性。

這一教本和其他各教本的最主要區別是：

(1) 廣泛地應用了關於窄球面三角形的定理；我覺得，這有助於敘述的直觀性；

(2) 大氣折射的敘述比一般的敘述簡單，且能引導讀者去列大氣折射的數值表。

在敘述歲差和章動方面我仿倣了紐康的辦法(Newcomb: A Compendium of Spherical Astronomy)。爲了要說明章動的複雜公式是從哪裏來和怎樣得到的，我在末一章中給出了歲差和章動的初步的動力學理論。對這個問題的敘述方式我參考了儒可夫斯基(H. E. ЖУКОВСКИЙ)教授的演講和潘梭(Poinsot)的論文(Précession des équinoxes)。

物理數學博士斯維列夫(M. C. СВЕПЕВ)曾仔細審閱了原稿並對原文的適當修正和改進提出了指示，僅向他表示深深的謝意。

目 錄

序言

第一章 引言..... 1

- § 1. 初論;天球;球面天文學的對象..... 1
- § 2 球面天文學的課題..... 4
- § 3 關於觀測到的坐標的改正和將坐標化到同一系統的球面天文學課題..... 6
- § 4 本書的內容..... 8

第二章 必需的數學知識..... 9

- § 5. 弧和角的量度單位..... 9
- § 6. 近似式和近似公式.....10
- § 7. 球上的圓.....13
- § 8. 球面二角形和三角形.....14
- § 9. 球面三角形的基本公式.....16
- § 10. 直角球面三角形.....22
- § 11. 一邊等於 90° 的球面三角形.....23
- § 12. 運算技術的要點.....24
- § 13. 小的和窄的球面三角形.....28
- § 14. 內插法.....32
- § 15. 由函數的差計算其導數,時變.....40
- § 16. 實用指導.....43
- § 17. 造表和尋找表中錯誤時內插法的應用.....16

第三章 地球和它的繞日運動.....49

- § 18. 地球的形狀和大小.....49
- § 19. 確定地球上點的位置的坐標.....50
- § 20. $\varphi - \varphi'$ 和 ρ 用旋轉橢圓體元素表達出來的式子.....51
- § 21. 緯度的變化.....54
- § 22. 鉛垂線的周日顫動.....54
- § 23. 地球重心的運動.....57

第四章 球面坐標系及其有關問題.....63

- § 24. 天球上最主要的點和圓.....63
- § 25. 地平坐標系.....63
- § 26. 赤道坐標系.....68

§ 27. 黃道坐標系	70
§ 28. 銀道坐標系	71
§ 29. 各坐標系間坐標的比較	71
§ 30. 坐標系間坐標的轉換	72
§ 31. 天球上點的相對位置。角距和位置角	83
§ 32. 大圓在天球上的位置和軌道平面在空中的位置的確定	84
§ 33. 在太陽或行星表面上的點的坐標	85
第五章 時間的測量	89
§ 34. 測量時間的基礎	89
§ 35. 恆星時	89
§ 36. 太陽時: 真太陽時和平太陽時; 時差	90
§ 37. 時差的近似計算法	93
§ 38. 平太陽日和恆星日的相對長度	94
§ 39. 化民用時爲恆星時及相反的轉化	95
§ 40. 區時和法定時; 日界線	98
§ 41. 各種時間的對照及符號	100
§ 42. 曆法	101
§ 43. 時間的天文記法	102
§ 44. 儒略日; 儒略周期	103
第六章 天空周日轉動的現象	105
§ 45. 天體中天; 中天時的時刻和天頂距	105
§ 46. 天體的出沒; 晨昏蒙影	112
§ 47. 天體通過卯酉圈	116
§ 48. 天體大距	117
§ 49. 坐標變率; 它們的微小變化間的關係	118
§ 50. 關於天球周日轉動的兩個問題	121
第七章 大氣折射	127
§ 51. 基本觀念; 名詞; 問題的建立	127
§ 52. 等密度層爲水平面的情形的大氣折射	131
§ 53. 天文大氣折射基本積分的推導	133
§ 54. 大氣折射主要項的計算	138
§ 55. 大氣折射的更準確的計算	143
§ 56. 大氣折射係數的測定	148
§ 57. 普耳科夫大氣折射表	150
§ 58. 實際的大氣折射	152
§ 59. 大氣折射較差	153

§ 60. 大面積的大氣折射較差	158
第八章 視差	163
§ 61. 基本概念; 名詞	163
§ 62. 視差位移的一般定律	164
§ 63. 地球為球形時的周日視差	166
§ 64. 地球為橢圓體時的天頂距和地平經度的視差	166
§ 65. 時角、赤經和赤緯的周日視差	169
§ 66. 視差對天體到觀測者的距離和天體角半徑的影響	171
§ 67. 月球的周日視差的準確公式	172
§ 68. 天體周日視差的測定	176
§ 69. 日食和月掩星	182
§ 70. 周年視差	184
§ 71. 黃經和黃緯的周年視差	185
§ 72. 赤經和赤緯的周年視差	186
§ 73. 由於周年視差, 恆星的地心位置在天球上所畫的圖形	188
§ 74. 由觀測測定恆星周年視差	188
§ 75. 行星和彗星的地心坐標和日心坐標	190
第九章 光行差	192
§ 76. 基本概念; 問題的建立	192
§ 77. 黃經和黃緯的周年光行差	194
§ 78. 赤經和赤緯的周年光行差	197
§ 79. 恆星視位置繞真位置而畫出的曲線	201
§ 80. 行星的光行差	202
§ 81. 周年光行差係數的測定	204
§ 82. 光行差較差	208
§ 83. 周日光行差	210
第十章 歲差和章動	212
§ 84. 基本概念; 名詞; 問題的建立	212
§ 85. 黃道和其極的運動	215
§ 86. 平均極和平均赤道的運動	220
§ 87. 黃道和平均赤道的運動的結合	223
§ 88. α 和 δ 因歲差而變化的速度 $\frac{d\alpha}{dt}$ 和 $\frac{d\delta}{dt}$	226
§ 89. α 和 δ 的歲差的公式	228
§ 90. 實際上 α 和 δ 的歲差的計算法	230
§ 91. 歲差的準確公式	235
§ 92. 章動的基本概念、名詞和公式	239

§ 93. 章動對於恆星的赤經和赤緯的影響·····	243
第十一章 光行差,歲差和章動公式的實際應用·····	246
§ 94. 恆星時和平太陽時的準確概念·····	246
§ 95. 由觀測確定恆星的赤經赤緯·····	249
§ 96. 白塞耳年·····	251
§ 97. 恆星在年初平位置歸算到給定時刻的真位置·····	252
§ 98. 由恆星在年初的平位置歸算到它的視位置·····	255
§ 99. 係數的數值·····	258
§ 100. 恆星位置表·····	261
§ 101. 天文曆書·····	265
第十二章 光行差,章動和歲差常數的測定·····	267
§ 102. 基本概念;問題的提法·····	267
§ 103. 光行差常數的測定·····	270
§ 104. 章動係數的測定·····	272
§ 105. 歲差常數的確定·····	273
§ 106. 各天文常數間的關係;常數系·····	285
第十三章 地球的自轉,日月歲差和章動·····	288
§ 107. 轉動慣量·····	288
§ 108. 動量矩·····	289
§ 109. 太陽和月球對於地球的吸引·····	290
§ 110. 基本定理·····	294
§ 111. 地球因慣性的轉動·····	294
§ 112. 歲差和章動·····	297
§ 113. 日月歲差和章動·····	306
習題·····	311
題解·····	322
附錄·····	327
最重要的參考文獻·····	331

第一章 引言

§1. 初論;天球;球面天文學的對象 天體測量學的觀測幾乎是研究天體在空間的相對位置,它們的移動以及轉動的唯一的基礎。用這些觀測來確定的是在不同時刻的一些方向,而且僅僅是一些方向,沿着這些方向,由被觀測的天體或天體的一定點所發出的光到達觀測者。這當中的例外僅僅是天體視線速度的測定,這種測定是要依靠用都普勒、菲佐(Doppler-Fizeau)原理來進行的光譜分析的。

要直接確定由觀測者至天體的距離是不可能的;這是要經過多次由觀測者至天體的方向測定,並將測得結果綜合,從中推求出來。這些觀測或者同時或者不同時在不同的觀測地點進行,例如由地面上不同的點或者由地球繞日軌道上不同的點來觀測。目前在某些情況下天體的距離並不是根據自天體發出的光線方向的測量而確定的,例如,造父變星和太陽的距離的確定,然而這種情況和上面所說的並不相抵觸,原因是此時所應用的經驗定律是根據用天體測量學方法所得到的距離而確定的。

由於上述,在觀測時刻儘量準確地確定由觀測者至天體(或天體的一定點)的連線方向,就成為研究天文現象中的重要因素了。

對於這種測定首先必須決定,哪些量可以用來表示每一個個別方向並將它們跟其他方向區別開來。我們可以取三個方向,三個互相垂直的坐標軸線,來作基礎,要確定任何被測量的方向時可以用這個方向和這些坐標軸線所成的三個角來表示。然而在天文學中爲了觀測和研究的方便和清楚起見所使用的是另一種方法。

設想(圖1)有觀測者 M 在地球上的某個地方(在陸地上,在船上,在飛機的機艙中)或者在地球中心,或者在太陽中心,或者在天狼星上,我們將想像有一條直線,由觀測者連到被他所觀測的天體 Σ ,設想在我們前面有一個任意半徑的球面,其中心的位置或是在這本書的一頁上的任一點,或是在教室的黑板上,或是在我們前面的桌子的上面。設想有一條直線,由這個球面的中心起平行(要點就在這裏)於被觀測的天體和實際的或想像中的觀測地點之連線的方向。每一條這樣的直線將和球面交於一點,這個交點我們將以標記天體的字母來表示,這個天體就是和平行於由測觀者到這個天體的方向的直線相對應的。

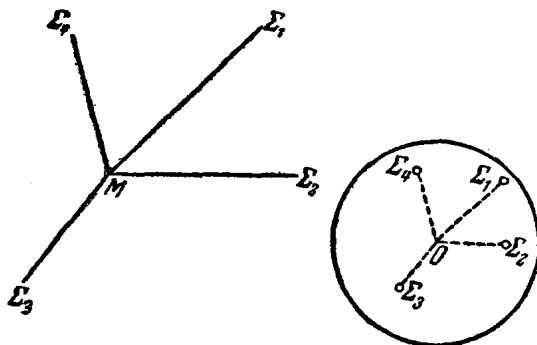


圖 1.

必須了解,位於這個球面中心的假想觀測者所見球面上這些點的相對位置,確能完全代表地面上真的觀測者或者在地球中心,太陽中心或天狼星上的假想觀測者所見天體的相對位置。

引入並利用這種輔助球面的意義在於:將代表着天體的各點在球上的相對位置加以研究,比起測定由真正(或假想的)觀測地點至天體方向的相對位置,是要更清楚些,而且也更簡單,更便於作數學探討。這個輔助球在天文學中稱為天球。

天球儀是天球的模型,在它上面可以註明各種點並且畫出必需的大圓和小圓的弧段。在紙上和黑板上我們按照假定的形式,畫出天球

面上點和弧的相對位置；而不十分注意到描繪的完全的準確，然後再根據數學定理推出某種結果。

此外，對於每一個真的或假想的觀測者並無任何必要爲他假想一個特別的輔助球；相反地，在某些情形下必須根據問題的性質而在同一球上按照指定的方式（也就是使用和被觀測的方向平行的半徑）去畫出對應於各種觀測條件的點；例如，在同一球上標出兩點以表示從地面上的一定點和從地心所看到的同一天體，或者一天體在不同時刻的位置，等等。

球面天文學是天文學的一個部門，它所研究的問題是關於天體在地球上的像的相對位置，也就是說關於在不同的觀測條件下所見天體方向的相對位置，關於它們由各種原因而生的變化，其中如太陽，月球和行星等天體的自行是除外的。球面天文學是天體測量學，天體物理學和天體力學中所有問題的基礎，這些問題牽涉到天體——從我們大氣中的流星直到最遙遠的恆星——在空間中的視位置和實位置，它們的移動和自轉。它對於解決大地測量學的問題也是必需的，大地測量學不僅研究由觀測者至天體的方向，同時也研究由觀測者至地上目標的方向。

爲要確切了解上述一切，還須說明一事，即引至觀測目標的直線所由出發的觀測地點究竟是指什麼？在觀測恆星，行星，太陽和月球時可以把儀器的任一點（以及觀測者身體的任一點，其中包括他的眼睛）當作觀測地點來研究，原因是，雖然嚴格地從數學觀點來講由這些點至天體的直線並不重合，但因這些天體甚爲遙遠，引至天體的一定點（例如，引至月球圓面上的一定點）的各個方向之差是微小的，不能由觀測分辨出來。例如，不難算出，從地球上相距 2 米的兩點至月球（距離爲 384,400 公里）的一定點的方向之差不超過 $\frac{2 \times 206,265''}{384 \times 10^6}$ ，亦即 0.001 弧秒；在天文測量中是不可能達到這樣的準確度的。

但若所測量的是天體的方向與鉛垂線之間的角（天體的天頂距），那

末這個角就與鉛垂線的方向有關了，鉛垂線近似地通過地心，地球的半徑約等於 6400 公里。因此彼此相距 1 米的兩觀測地點的鉛垂線之間的角等於 $\frac{1 \times 206,265''}{6,400,000} = 0''.03$ ；這樣的量在某些問題中是不能忽略的。

假若所測量的是任一地上目標的方位角，這目標與觀測者的距離，譬如說，為 10 公里，那末從儀器上彼此相距僅 10 厘米的兩點至目標的方向之差就已經是一個 $\frac{10 \times 206,265''}{10^6} = 2''$ 的角度；這樣的量在準確的測量中是不能忽略的。

這個問題是這樣解決的，在所有這樣的測量中都要使用儀器，儀器的筒子會繞着兩條軸線而旋轉：一條是豎直的，一條是水平的，爲了消除儀器的不可避免的誤差起見，觀測工作必須這樣地佈置，使由這兩條軸線的交點至目標的方向終於能被確定，或更確切地說，要使由豎直軸線上距水平軸線最近的點至目標的方向能被確定，必須把這一點當作觀測地點。

§2. 球面天文學的課題 在 §1 中已經講到，確定由觀測地點所見天體方向的相對位置，以及研究這些方向由於各種原因而產生的變化，是可用天球上點的相對位置的研究來代替的。到天球上任一點的天球半徑的方向，是和由觀測者到被觀測的天體或天體的一定點的方向平行的。

研究球面天文學的問題，自然，是從建立球面坐標系開始，球上點的位置可以用這樣的坐標來確定，這些坐標的測量實際上也就是實用天文學的課題。建立球面坐標系的普遍原則如下。選擇某一通過觀測地點的方向，以及通過天球中心的對應（與所選方向平行的）直線；這個方向具有確定的性質，例如，它可能是由地球引向上的鉛垂線的方向，或是由觀測者到天球北極的天軸的方向等等；我們以字母 A 表示這直線和天球面的交點（圖 2）。設有一個平面，通過天球的中心 O 並且和直線 OA 垂直，另有一個圓周，係由此平面和天球相交而成；顯然，點 A

與這個圓周上任一點的距離都是 90° ；這個圓周就是坐標系的基本圈。在天文學中一般將地球上和其大圓相距 90° 的一點，叫作這個圓的極①。顯然，每一個大圓有兩個這樣的點並且它們位於球的同一直徑的兩端；這兩個極有着不同的名稱，以後我們再介紹它們；所以， A 就是上述圓圈的確定的極；在直徑另外一端的極以字母 A' 表示。設想在基本圈

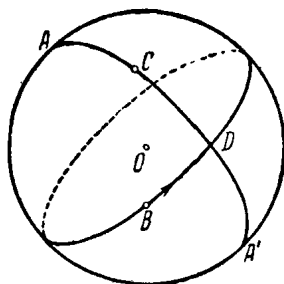


圖 2.

上有由某種性質所決定的一點 B 。然後設 C 為球上的任一點。設想有球的半個大圓，由極 A 起經過點 C 而到極 A' ；我們將以字母 D 表示這個半圓和坐標系基本圈的交點；我們約定以弧 BD 來確定點 D 在基本圈上的位置，弧 BD 是按一定的方向自點 B 至點 D ，例如，這個方向可能是反時針方向的，如果我們是由極 A 來看基本圈的話。於是很清楚，球上任一點 C 的位置由兩個量來單值地確定：大圓弧 AC 的長，由 0 算到 180° （由 A 至 A' ），而弧 BD 的長，由 0 算到 360° ；這兩個弧 AC 和 BD 就是這種球面坐標系中點 C 的坐標。

在天文學中使用幾種這樣的坐標系；它們互相間所不同的是基線 OA 的方向，因而也就是基本圈的位置，它們是根據基本圈而命名的：地平系，赤道系和黃道系；在關於宇宙構造的問題中還應用銀道坐標系。

在地平系中基本方向是鉛垂線，基本圈是地平圈；在赤道系中相應地為地球自轉軸線的方向和天球的赤道圈；在黃道系中則用黃道圈；在銀道系中，用通過銀河帶中間的圈。

在地平系和赤道系中天體的球面坐標是由觀測確定的；黃道系中的坐標則由赤道系中所測量出的坐標計算而得；黃道坐標應用於計算和研究太陽系中天體的運動。銀道坐標亦由赤道坐標計算而得。

① 不要把極的這種意義與幾何學中所用的極的意義相混淆，在幾何學中，所說的極是直線對於圓的極或者平面對於球的極。

坐標系建立以後的課題，自然就是將一種系統的坐標變換為另一系統的坐標，也就是說，知道了天球上任一點在一種系統中坐標的數值以後，怎樣求出它在另一系統中坐標的數值。顯然，在相當的公式中應當引入這樣的量，它們標明了並且單值地確定了一種系統的基本線和圈對於另一系統的位置。坐標系的建立和坐標變換公式的推導就是球面天文學中開始的部份。

天體在空間的分佈是不斷地隨着時間而變的；因此每一個天體的球面坐標也在改變着；爲了研究它們的運動必須約定，怎樣測量任何兩個現象之間的時間間隔，任意兩個時刻之間的時間間隔，也就是，一般地說，怎樣計算不斷地“消逝”的時間。這個問題是要通過利用天文現象和建立時間計算的原則來解決的，它是球面天文學中接在坐標之後的問題。

§3. 關於觀測到的坐標的改正和將坐標化到同一系統的球面天文學課題 用裝置適當的儀器而觀測到的天體的球面坐標，不能直接應用於理論上的討論和推演；這種球面坐標不能給出作為理論上探討基礎的那些方向，因而就這種意義來講，它們是不準確的；它們受某些因素的影響而生畸變，應該改正它們以消除這些畸變。這些因素就是：

(1) 大氣折射，這就是由天體到觀測者的光線通過地球大氣時，受到折射的現象；由於大氣折射的緣故；觀測者所看見的天體，其方向就與沒有大氣折射時在同一時刻他所應看到的天體方向不同；關於大氣折射問題的研究也是球面天文學的一個課題。

(2) 視差，這就是：從兩個不同的觀測地點來看天體，其球面坐標是不同的；由地面上的觀測者到天體的方向，一般說來，是和在同一時刻由地心的假想觀測者到同一天體的方向不相一致的，爲了從理論上研究天體的運動，所需要的正是後面這種地心方向和與之對應的球面坐標。關於視差問題的研究，以及怎樣由屬於地面上觀測地點的坐標（地面坐標）得到地心坐標，也是球面天文學的課題。關於從天體的地心坐

標得到它的日心坐標的問題亦如此，所謂日心坐標就是假想的觀測者或者坐標原點係位於太陽中心的坐標，一般地說，就是關於當觀測地點（真的或假想的）改變時坐標變化的問題。

（3）光行差，這就是由觀測者到天體的真方向的變化，變化的原因是觀測者在運動着，而另一方面，光並不是立刻就傳達觀測者的。因為光行差的緣故，所得到的是天體的視坐標而不是真實的坐標；所觀測到的正是天體的這種視位置，在球面天文學中就要研究怎樣由視坐標變換為真坐標的問題。

當我們注意到這三種因素並從直接觀測到的天體坐標中去掉大氣折射，視差和光行差的影響以後，就得到觀測時刻天體的真地心或日心坐標。它們就是在觀測時刻屬於赤道坐標系的坐標。

然而地球自轉軸線的方向並不是固定的；它在隨着時間而變，因此這個坐標系的極和基本平面（天球赤道平面）的位置也在變化着；這就是所謂的歲差和章動現象。因為坐標系的基本線和基本平面的方向在變化着，坐標系本身就隨時在變，所以就不能把在不同時刻的天體的球面坐標直接加以比較。因此必須研究坐標系的運動，然後推出一些公式來，根據這些公式，可以通過計算從天體的一個球面坐標求得另一個球面坐標，第一個球面坐標係對在觀測時刻 t 的坐標系位置而言，第二個雖是時刻 t 的天體坐標，然而却是對坐標系在任一其他時間 t_0 的位置而言了。這些問題的解，即所謂把坐標由一個春分點化到另一個春分點，也是球面天文學的一個課題。

只有當直接測出的天體坐標，消除了由所有上述因素而生的變化以後，最後，才能夠確定恆星的自行，而對於太陽系的天體來說，也才能夠得到可以作為確定軌道之依據的坐標。

也必須解決反面的問題。藉助於多次的觀測就可以作出恆星真坐標的表，這些坐標是對坐標系在一定時刻的位置而言的。為了實用天文學的需要，特別是為了確定地面上（陸上或海上）某地的經緯度，地面

上目標的方位角以及爲了修正時鐘點，必須從恆星的真坐標預算出來恆星的視坐標，然後載於天文年曆中。

爲了上述目的而推出的球面天文學公式，也應用於其他許多方面。例如，視差的公式可用以預測日食和月掩星的情況，和確定行星和地球以及恆星和太陽的距離。

§4. 本書的內容 根據上述球面天文學的內容及其所承擔任務的特點，本書包含了上列的內容的各章，然而爲了推導許多公式和利用天文年曆的材料起見，需要有一定的數學知識，爲了清楚地了解某些結論起見，需要有關於地球及其運動的知識，所以在球面天文學本身的敘述之前，加上了第二章和第三章，第二章敘述必需的數學知識，第三章敘述關於地球及其運動的必要的知識。

爲了給學生們一個關於歲差和章動現象的力學本質的概念起見，書末初步地敘述了這現象的動力學，雖然，嚴格說來，這並不是在球面天文學而是在天體力學的範圍了。