

高等学校教材

天文学教程 下册

周洪楠 张承志 肖耐园 编



高等教育出版社

内 容 简 介

本书是一部综合性基础天文学教科书，全书全面系统地阐述了天文学各分支学科的基础知识；介绍了六十年代以来天体物理学中的新进展，对于天体测量学和天体力学中正在兴起的新技术、新方法和新理论以及已经取得的最新成果作了简明的反映。全书分上、中、下三册。

上册内容包括天球坐标系和时间计量系统、天文观测和仪器、太阳和太阳系内各天体。

中册内容包括恒星和特殊恒星(变星、致密星和双星)、星团、星云和恒星演化，银河系以及星系和宇宙学。

下册内容包括天体力学和天体测量学的基础知识。

本书不但可作为天文、物理、地理等专业的基础天文教材，亦可供有关科技人员参考。

本书责任编辑 杨 祥

高等学校教材

天 文 学 教 程

(下 册)

周洪楠 张承志 肖耐园 编

高 等 教 育 出 版 社 出 版
新 华 书 店 上 海 发 行 所 发 行
商 务 印 书 馆 上 海 印 刷 厂 印 装

开本 850×1168 1/32 印张 10.5 字数 250,000

1988年4月第1版 1988年4月第1次印刷

印数 0001—1,200

ISBN7-04-000995-1/O·559

定价 2.65元

序 言

六十年代初，在已故戴文赛教授主持下，南京大学天文学系编写了《天文学教程》(上、下册，1961年上海科学技术出版社出版)，它曾对我国的天文教育事业作出了积极的贡献。

在过去的四分之一世纪中，天文学经历了自伽利略时代以来前所未有的繁荣，进入了全波天文学的时代。类星体、星际多原子分子、宇宙微波背景辐射、脉冲星、天王星和木星的环带、引力透镜效应等许多重大发现；X射线、 γ 射线、红外和紫外天文学的兴起；“阿波罗”登月的实现、大规模的太阳系的空间探测……，促使人类对宇宙的认识发生了深刻的变化。因此，重新编写《天文学教程》，使之能跟上迅速发展着的天文学的步伐已是刻不容缓的事了。

本书是按照国家教育委员会理科物理教材编审委员会天文教材编审小组审定的大纲编写的，分上、中、下三册，基本上保留了原《天文学教程》的框架，但除少数内容未作大的修改外，都是重新撰写的。本书是一部综合性基础天文学教科书，它较全面和系统地阐述了天文学各分支学科的基础知识；介绍了六十年代以来天体物理学中的新进展，对于天体测量学和天体力学中正在兴起的新技术、新方法和新理论及已经取得的新成果也作了简明的反映。另外，本书除文学上特有的单位外全部采用国际单位制的单位。为了便于读者查阅，书末附有人名索引和名词索引。

本书上册除§4.1—§4.6由肖耐园撰写外，均由张明昌撰写；中册由朱慈壎撰写；下册由肖耐园(第十三章)、张承志(第十四和

十五章)和周洪楠(第十六至十八章)撰写。上册和中册由朱慈墟通校,下册由周洪楠通校。朱慈墟主持了全书的编写工作。

本书内容广泛,涉及天文学各个领域,鉴于作者学识有限,不当和错误之处在所难免,恳请读者提出批评和指正。

作 者

一九八六年一月于南京大学

目 录

第十三章 天体位置的变化及归算	1
§ 13.1 大气折射	2
§ 13.2 视差	9
§ 13.3 光行差	20
§ 13.4 岁差和章动	30
§ 13.5 恒星位置的归算	45
第十四章 恒星位置的测定和基本坐标系的建立	71
§ 14.1 子午测定恒星赤道坐标的原理和仪器	71
§ 14.2 子午天体测量仪器的误差及其影响	77
§ 14.3 测定恒星赤道坐标的目视方法	82
§ 14.4 照相天体测量学的原理和方法	85
§ 14.5 恒星自行的测定	90
§ 14.6 恒星三角视差的测定	94
§ 14.7 基本坐标系的建立	95
§ 14.8 各类星表系统简介	97
§ 14.9 天文常数系统概述	100
§ 14.10 测定恒星位置的新技术	104
第十五章 地球自转参数和天文点的测定原理	109
§ 15.1 太尔各特法测定纬度	109
§ 15.2 纬度变化和地极移动	113
§ 15.3 中星仪测时	116
§ 15.4 精确时间的发播	119
§ 15.5 世界时、历书时和协调世界时	121
§ 15.6 测定地球自转参数的新技术	125
§ 15.7 测定天文点的原理和仪器	132

§ 15.8	天文点的测定方法	136
§ 15.9	天文定位在航海中的应用	140
§ 15.10	多星等高法同时测定经度和纬度	143
第十六章	二体问题	147
§ 16.1	开普勒定律和万有引力定律	147
§ 16.2	二体问题的运动方程和积分	153
§ 16.3	二体问题的轨道分类	160
§ 16.4	开普勒方程的解法	165
§ 16.5	日心黄道直角坐标和速度的计算	169
§ 16.6	星历表计算	177
§ 16.7	初轨计算原理和方法	181
§ 16.8	引力作用范围, 宇宙速度	185
§ 16.9	二体问题在宇宙航行动力学中的应用	190
第十七章	N 体问题	196
§ 17.1	N 体系统的力函数	196
§ 17.2	地球对外面一质点的吸引	202
§ 17.3	N 体问题的积分	207
§ 17.4	用直角坐标表示的摄动运动方程	212
§ 17.5	三体问题的摄动运动方程	216
§ 17.6	限制性三体问题	223
§ 17.7	秤动解	229
§ 17.8	零速度面	233
§ 17.9	限制性三体问题的应用	238
第十八章	摄动问题	240
§ 18.1	摄动理论简介	240
§ 18.2	拉格朗日行星运动方程	243
§ 18.3	摄动力三分量表示的摄动运动方程	251
§ 18.4	瞬时椭圆, 几种常见的摄动	258
§ 18.5	解摄动运动方程的基本方法	262
§ 18.6	摄动运动方程的分析解法原理	264
§ 18.7	摄动函数展开方法轮廓	274

§ 18.8 摄动运动方程的解	280
§ 18.9 人造地球卫星的摄动运动	285
§ 18.10 月球火箭与行星际飞行器的摄动运动	289
§ 18.11 地球自转的运动方程	293
§ 18.12 地极移动和岁差章动	297
主要参考书目	308
人名索引	309
名词索引	322

第十三章 天体位置的变化及归算

迄今为止测定恒星位置都是在地面进行的。观测结果受到观测误差以及恒星和观测者本身位置变化等各种因素的影响。观测误差和观测仪器、观测方法、观测环境以及结果处理等有关，在以后有关章节中将加以具体论述；本章仅讨论后一类中的各种因素。

为了克服恒星和观测者位置变化对测定恒星位置的影响，首先必须分析造成这类变化的原因，研究恒星和观测者运动的规律及其影响观测结果的机理，确定这些效应的数量；其次，则须确立某一固定瞬间（在天文学上称为历元）和原点的天球坐标系，并解决如何把不同瞬间和不同地点的观测结果都归算到这个历元及原点，从而得到确定的恒星位置。这类影响归纳起来包括大气折射、视差、光行差、岁差、章动以及恒星自行。

地球周围有一层浓密的大气。由于大气对光线的折射，在光学观测中，目标的方向发生变化。这种变化称为大气折射。在观测结果中，首先要改正它的影响。

视差曾在 § 4.6, § 7.1 和 § 8.1 中介绍过。它是观测者在空间位移造成的天体方向的变化。为了对不同的观测进行比较，必须把一切观测结果都换算到同一观测地点。通常根据不同的要求把这“同一观测地点”选择为地球中心，通过归算得到天体的地心坐标，或选择为太阳中心，则得日心坐标。

光行差是因为观测者随地球自转和绕日公转以及光速为有限值而引起的天体方向的变化。

岁差和章动，已在 § 4.5 描述过它们的现象，实质上是地球在日月引力作用下的一类运动。由于岁差和章动，地球自转轴在空间的指向改变，因而由自转轴所定义的天极及与之相应的天赤道在天球上都随时间变化。此外，由于行星的引力作用，产生行星岁差，使黄道也发生变化。天赤道和黄道的变化，又导致春分点移动。其结果，恒星和一切天体的赤道坐标由于坐标系本身的转动而随时间改变。为要得到恒星坐标的确定值，就要把它们换算到同一个特定的坐标系，即换算为对于某一历元的春分点和天赤道的坐标。这就必须改正岁差和章动的影响。

除此以外，在 § 11.2 还介绍过恒星的运动，表现在天球上即恒星自行。显然，恒星自行必然导致恒星坐标的变化。在作恒星坐标的换算时，必须考虑恒星自行的影响。

§ 13.1 大气折射

光线经过不同的透明介质发生折射的物理现象是大家所熟知的。从天体到观测者的光线，必须经过地球表面的大气层。越靠近地面大气的密度越大，从而导致折射系数连续改变；星光在经过大气层的过程中连续折射，因而星光传播路径发生弯曲。这就是大气折射现象。由于大气折射，观测者所看到的天体方向和没有大气时不同，这个方向差通常也称大气折射或称蒙气差。约在公元前二世纪，古希腊的波西东尼乌斯(Posidonius)发现了大气折射对天文测量的影响。后来，托勒密在他的著作《光学》中进一步论述了大气折射问题。在我国，晋代天文学家姜岌已发现了这一现象。十六世纪，第谷测定了大气折射值。大气折射的近代理论是直到十七世纪才创立的。此外，大气中各种气体和尘埃质点的散射和吸收能引起星光光谱成分的衰减和变化，也会稍微改

变星光的方向。

一、大气折射对天顶距的影响

图 13.1 中，设观测者在 M 点观测天体 σ 。在大气层外，天体的光线沿着直线方向 σK 行进。光线在 K 点进入大气层，产生折射，连续地改变方向，其路线成为一条曲线。观测者将在此曲线的最后部分看到天体，也就是沿着光路曲线在 M 点的切线方向即 $M\sigma'$ 看到天体。

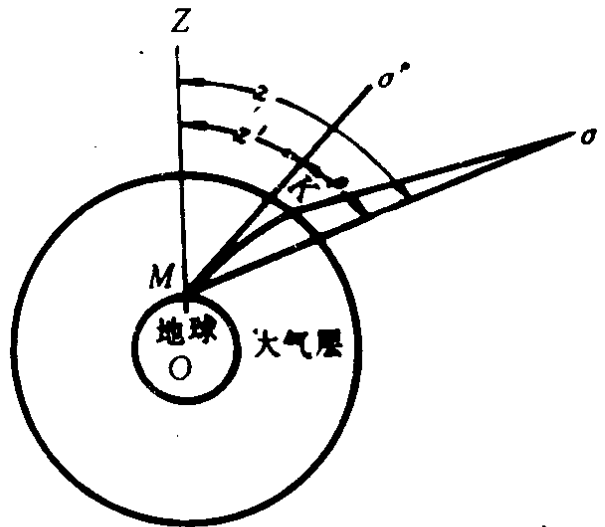


图 13.1 大气折射对天顶距的影响

如果没有大气折射的影响，观测者将在 $M\sigma$ 方向看到天体。

$M\sigma'$ 方向与 $M\sigma$ 方向之差为 $\angle \sigma' M \sigma = \rho$ ， ρ 就是大气折射。设 MZ 为天顶的方向， $\angle Z M \sigma = z$ ，叫做真天顶距。在大气折射影响下，所见天体的天顶距 $z' = \angle Z M \sigma'$ ，叫做视天顶距。根据折射定律，入射线与折射线以及在入射点对折射面所作的法线均在同一平面内。所以 σK 、 σM 和 $\sigma' M$ 都位于通过 $MZ\sigma$ 的一个垂直平面内，因此

$$z = z' + \rho. \quad (13.1)$$

由此可见，大气折射使得天体的天顶距减小，或者说使得天体的高度增加。由地面测得的天体的视天顶距必须加上大气折射改正，才是天体的真天顶距。

大气折射现象发生在同一垂直平面内，所以对天体的方位角没有影响。尽管大气折射对天体的赤经(或时角)、赤纬等量的测量值也有影响，但通常折射改正总是首先直接加到视天顶距上，而不是从其他测量值中改正。

二、大气折射的消除

1. 大气折射的近似公式 要消除大气折射对观测的影响, 必须计算大气折射 ρ 的值, 通过(13.1)式改正视天顶距。由于对大气的物理状态及其随多种因素变化的知识至今了解得仍不够充分, 精确地计算大气折射是十分困难的。这里仅就一种最简单的大气结构模型进行讨论。假定大气是由无数密度不同的等密度层组成的, 并考虑到大气层的厚度远较地球半径为小, 则可近似地认为观测地点附近的大气等密度层都是平行平面层。

暂且把大气分成 n 个等密度层, 并假定各层的折射率从地面

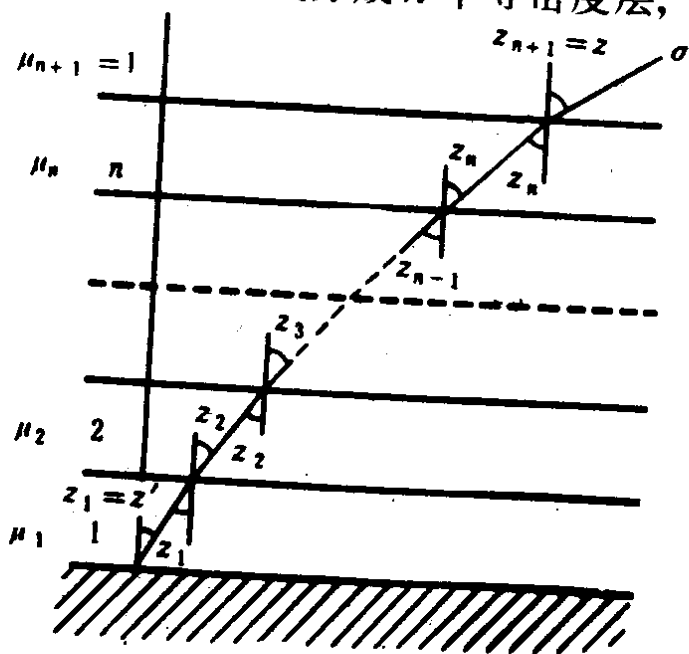


图 13.2 平面等密度大气层

(第1层)到最外层(第 n 层)分别为 $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n$, 即假定折射率在整个大气层中的变化是不连续的(图 13.2)。大气层外的折射率 $\mu_{n+1}=1$ 。若观测一天顶距为 z 的天体, 光线在大气层中的路线为一折线。对于最外层来说, 光线的入射角就是天体的

真天顶距 z , 折射角为 z_n , 而 z_n 也是第 $(n-1)$ 层的入射角, 依次类推。最后, 光线在第一层的入射角就是观测天顶距 $z' = z_1$ 。

从大气层外起, 对相邻的两层运用折射定律, 有

$$\begin{aligned} \sin z &= \mu_n \sin z_n, \\ \mu_n \sin z_n &= \mu_{n-1} \sin z_{n-1}, \\ \mu_{n-1} \sin z_{n-1} &= \mu_{n-2} \sin z_{n-2}, \\ &\dots \end{aligned}$$

$$\mu_2 \sin z_2 = \mu_1 \sin z';$$

因此有

$$\sin z = \mu_1 \sin z'. \quad (13.2)$$

从以上推导过程可见，只要把大气看作由平行平面等密度层构成，当 n 趋向无限，即大气层中折射率连续变化时，也能得到 (13.2) 式。这时光线循一弯曲路线传播。

将 (13.1) 式代入 (13.2) 式，得

$$\sin(z' + \rho) = \mu_1 \sin z',$$

即
$$\sin z' \cos \rho + \cos z' \sin \rho = \mu_1 \sin z'.$$

由理论研究得知， ρ 的最大值为 $35'$ ，故可看作微量，则有 $\cos \rho \simeq 1$ ， $\sin \rho \simeq \rho'' \sin 1''$ ，代入上式得

$$\sin z' + \cos z' \rho'' \sin 1'' = \mu_1 \sin z',$$

因此
$$\rho'' = 206265'' (\mu_1 - 1) \operatorname{tg} z'.$$

在标准状况（大气温度为 0°C ，气压为 101324.72 帕）下，地面大气的折射率 $\mu_1 = 1.000292$ ，代入上式得

$$\rho'' = 60.2'' \operatorname{tg} z'. \quad (13.3)$$

这就是计算大气折射 ρ 的近似公式。式中的系数 $60.2''$ 称为大气折射常数。对于小于 30° 的天顶距，用 (13.3) 式求得的大气折射误差约为 $0.1''$ ；对于小于 60° 的天顶距，此式尚可适用。当天顶距再增大时，这个近似公式和实际情况相差很大，无法应用。

2. 各种大气折射理论 为了更精确地计算大气折射，必须考虑到地球的曲率，将大气分为许多同心球层。一般说来，大气的折射率随高度的增加而减小，但要确定两者之间的精确关系，却极为困难，只能采用一些与实际情况尽可能相符的假设。无论采用哪种假设，大气折射都可展开成下列形式

$$\rho = a \operatorname{tg} z' + b \operatorname{tg}^3 z' + c \operatorname{tg}^5 z' + \dots, \quad (13.4)$$

式中各系数 a, b, c, \dots 等的表达式因不同的假设而不同。

历史上曾提出过各种大气性质随高度变化的不同假设，形成各种不同的大气折射理论。不少著名学者如牛顿、布拉德雷(Bradley)、拉普拉斯(Laplace)和贝塞耳(Bessel)等都对大气折射进行过研究。其中具有代表性的是吉尔当(H. Gylden)在1868年提出的理论，著名的普尔科沃大气折射表就是根据他的理论编制的。这个表在1870年初版，后来几经修订再版，至今应用最广泛的仍是普尔科沃天文台所编的大气折射表。

二十世纪以来，根据在大气中的新发现又编制了很多大气折射表。各种大气折射值，在天顶距不大时彼此符合得很好。有的大气折射值仅当天顶距大于 80° 时，彼此之间才显示出较大的差异。在这个领域中，最新的进展是用电子计算机代替折射表，并根据大气折射在天顶距上的适用范围，扩充公式的有效性。但接近地平时的大气折射的精确计算，至今仍是一个没有解决的问题。

3. 反常折射 大气折射的理论值是根据理想的大气情况导出的。实际的大气情况非常复杂，比如，大气的等密度层既非同轴球层，更不是水平的。大气状况随气温、气压、水汽压等因素而千变万化；很难准确地掌握。此外，大气结构还受地区性局部气象因素的影响，甚至观测室内外或观测室内各部分之间的温差，也会引起大气层的形态改变。所以用理想的大气模型算得的大气折射就与实际情况有差异。这种差异称为反常折射。反常折射严重的可达十分之一角秒的量级，从而极大地限制了地面光学天体测量测角仪器精度的提高。当前，尚未有很好的办法消除反常折射，只有通过选择良好的天文台环境，改善观测室结构等措施尽量减轻其影响。

三、大气折射表

在实际工作中，求大气折射改正不采用公式计算，因为公式

中含有随大气折射率变化的因子，直接计算这些因子是很不方便的。大气折射率和大气密度有关，而大气密度又随大气的温度和气压而变化。在实际应用中，首先计算出标准状况下不同视天顶距 z' 的大气折射，并编制成表，称为平均大气折射表。这种表以视天顶距 z' 为引数，可查出标准状况下的大气折射 ρ_0 。

查出平均大气折射 ρ_0 后，再利用大气折射订正表来计算实际气温、气压下的大气折射 ρ 。在订正表中载有分别以气温和气压为引数的相应的改正系数。计算公式为

$$\rho = \rho_0(1 + A + B), \quad (13.5)$$

式中 A 和 B 就是气温和气压的改正系数，分别由下列公式求得

$$A = \frac{-0.00383t}{1 + 0.00367t}, \quad B = \frac{H}{101324.72} - 1, \quad (13.6)$$

式中 t 为以摄氏度计量的大气温度， H 是以帕计量的气压。实际上现在大部分气压计都以毫米水银柱为单位计量，则(13.6)式的第二式应为

$$B = \frac{H}{760} - 1, \quad (13.7)$$

此外，还须注意 H 是加纬度和气温差改正的实气压，而不是由气压计直接读取的数值。设气压计读数为 H' ，测站纬度为 φ ，气压计内水银温度为 t' ，则有

$$H = H' [1 - 0.00264 \cos 2\varphi - 0.000163(t' - t)], \quad (13.8)$$

对于天顶距较大($z > 45^\circ$)的天体，大气折射变化剧烈，气温改正系数 A 应以 αA 代替，这时计算公式为

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha A + B), \quad (13.9)$$

在《中国天文年历》中，附表 13 刊载着“蒙气差表”和“蒙气差订正表”。前一表以视天顶距 z' (即表上“天顶距 z ”)为引数，查取平均大气折射 ρ_0 (即表上“蒙气差 R_0 ”)；后一表分别以气温 T 、

实气压 H 和视天顶距 z 为引数查取 A , B 和 α 。

例一、设在南京大学天文台($\varphi=32^{\circ}3'$)由观测得某星的高度为 $63^{\circ}5'27''$, 这时读得仪器温度 18.3°C , 气压计读数为 754.8 毫米汞柱, 气压计温度 19.9°C , 求此星的大气折射。

求解步骤如下:

(1) 求天顶距。 $z=90^{\circ}-63^{\circ}5'27''=26^{\circ}54'33''$;

利用《中国天文年历》附表 9“化分秒为度的小数”化得 $z=26.91^{\circ}$;

(2) 查蒙气差表。在 $z=26.5^{\circ}$ 和 $z=27.0^{\circ}$ 这两个引数间, 以 $n=(0.91-0.5)/0.5=0.82$ 为内插因子进行线性内插, 得 $R_0=30.50''$;

(3) 求实气压。 $\cos 2\varphi=\cos 64^{\circ}6'=0.6403$;

$$H=754.8 \times (1-0.00264 \times 0.6403-0.000163 \times 1.6) \\ =754.8 \times 0.9980=753.3(\text{毫米汞柱});$$

(4) 查蒙气差订正表。分别以仪温和实气压为引数, 作简单内插后得 $A=-0.0657$, $B=-0.0088$;

(5) 求大气折射。利用(13.5)式得

$$\rho=30.50'' \times (1-0.0657-0.0088) \\ =30.50'' \times 0.9255=28.23''.$$

例二、设在某测站由观测得某星的视天顶距为 $70^{\circ}14'53''$, 这时读得气温为 22.5°C , 并已求得实气压为 762.9 毫米汞柱, 求此星的大气折射。

求解步骤如下:

(1) 将天顶距化为度的小数。 $z=70^{\circ}14'53''=70.25^{\circ}$;

(2) 查蒙气差表。以天顶距 z 为引数作简单内插后得 $R_0=166.00''$;

(3) 查蒙气差订正表。分别以气温、实气压和天顶距为引数,

查得 $A = -0.0796$, $B = +0.0038$, $\alpha = 1.009$;

(4) 求大气折射。利用(13.9)式得

$$\begin{aligned}\rho &= 166.00'' \times (1 - 1.009 \times 0.0796 + 0.0038) \\ &= 166.00'' \times 0.9235 = 153.30'' = 2'33.30''.\end{aligned}$$

虽然对大气折射已作了相当详尽的研究, 并编制出了便于实际应用的表, 但是对于接近地平的天体所计算出的大气折射, 和实际数值差异很大。因此在实际观测中, 应避免测量天顶距大于 75° 的天体。

除了对光学观测产生影响外, 在人造卫星或月球激光测距工作中, 大气折射使观测到的光行时间与真空中的理论光行时间不同。测距结果必须扣除因大气折射引起的对光程的影响。大气折射也影响甚长基线干涉测量和人造卫星多普勒观测的结果。

§ 13.2 视 差

一、视差现象和视差位移

1. 视差的起因 观测者在两个不同位置观测同一天体引起的观测目标方向之差叫做视差。图 13.3(a)中, 设位于 O' 点的观测者观测天体 σ , 方向为 $O'S'$; 位于 O 点的观测者观测同一天体 σ 的方向为 OS 。令 O' 到 O 的连线方向指向 A , 可见 OS 对于 $O'S'$ 的方向差为

$$\angle AOS - \angle AO'S' = \angle O\sigma O' = p.$$

p 就是 σ 对于 O 和 O' 两点的视差。

2. 视差的大小 在 $\triangle OO'\sigma$ 中, 令 $OO' = d$, $O\sigma = \Delta$, $O'\sigma = \Delta'$, 则有

$$\sin p = \frac{d}{\Delta'} \sin AOS = \frac{d}{\Delta} \sin AO'S'. \quad (13.10)$$

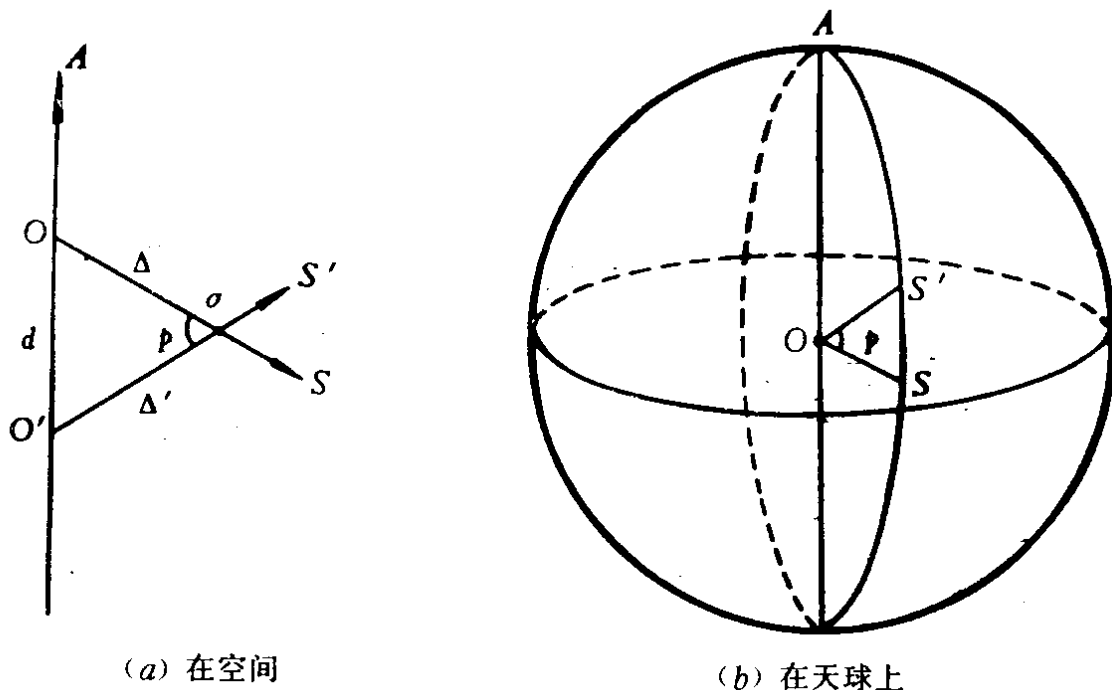


图 13.3 视差和视差位移

由此可见，一个天体对于两个观测点的视差，等于该天体对这两点间的直线所张的角。视差 p 的大小随两点间的距离 d 增大而增大，随天体到这两点的距离 Δ (或 Δ') 的增大而减小。若 d 和 Δ 均为常数，则当 $\angle AO'S'$ 为直角时， p 为最大。

3. 向点和视差位移 现在把 $O'S'$ 方向、 OS 方向和 $O'O$ 方向投影在以 O 为球心的天球上； $O'O$ 在天球上的投影为 A (图 13.3(b))。' O' 点对于 O 点的视差，可以看成原先观测者在 O' 点观测，后来位移到 O 点观测同一天体所产生的。这种位移方向在天球上的投影叫做向点，即图 13.3(b) 中的 A 点。相应地，观测方向的改变，即视差 p ，反映在天球上就是天体的视位移 $S'S$ 。天体的这种视位移叫做视差位移。显而易见，向点 A 和视差位移 $S'S$ 是在同一大圆上，且视差位移发生在这大圆上从 S' 起背离开向点的方向。据图 13.3(b)，以大圆弧表示相应的角度，则由 (13.10) 式得

$$\sin SS' = \sin p = \frac{d}{\Delta'} \sin AS = \frac{d}{\Delta} \sin AS'. \quad (13.11)$$