The background of the cover is a dark, textured space filled with various celestial objects. There are several bright, multi-colored galaxies or nebulae, primarily in shades of purple, blue, and yellow. Scattered throughout are numerous small, bright stars and star clusters. The overall effect is a rich, multi-colored cosmic scene.

黄佑然 许敖敖 秦志海 编著  
唐玉华 宣焕灿

# 实测天体物理学

科学出版社

# 实测天体物理学

黄佑然 许教教 秦志海 编著  
唐玉华 宣焕灿

科学出版社

1987

## 内 容 简 介

本书介绍实测天体物理学的基础知识,是编者根据多年的教学实践编写而成的。在材料的编选上,着眼于全波段,编者从现代实测天体物理学的进展和我国天体物理工作的发展水平出发,较全面地叙述了从光学、红外、射电直到紫外、X射线、 $\gamma$ 射线观测的基本原理和主要仪器,以及处理天体辐射的基本方法。由于太阳观测的某些特点,专门列出了一章进行讨论。书末的若干附录可供实际工作时参考。

本书可作为天体物理专业的教材,也可供天文工作者,研究生及有关人员阅读。

## 实 测 天 体 物 理 学

黄佑然 许敖放 秦志海 编著  
唐玉华 宣焕灿

责任编辑 方开文

科学出版社 出版

北京朝阳门内大街147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

\*

1987年6月第一版 开本:850×1168 1/32  
1987年6月第一次印刷 印张:22 1/2 插页:3  
印数:5001—1,350 字数:600,000

统一书号:13031·3504

本社书号:4692·13—5

定价:7.40元

## 前 言

实测天体物理学是天体物理学发展的基础。一方面，观测结果不断地提供天体新的信息并由此引出新的理论课题；另一方面，任何一种新理论的确立又都必须用观测事实来验证。

本书重点介绍实测天体物理学的基本观测方法，观测仪器和技术，以及观测资料的初步处理。鉴于实测天体物理学的基本任务是获得可供进行理论分析的观测资料，因此，本书将环绕这一中心，从搜集天体辐射的天文望远镜开始，依次介绍各种类型的光学探测器，实测天体物理工作中最基本的测光方法和分光方法。继而介绍对特殊天体——太阳的观测方法和观测仪器，以及测量天体偏振性质的方法和仪器。我们认为，对天体进行包括 $\gamma$ 射线、X射线直到射电辐射的全波段观测和理论研究，是最终揭示天体物理过程本质的必经之路。因此，本书还简要地介绍射电天文方法和红外天文观测，紫外、X射线和 $\gamma$ 射线天文观测的方法以及有关的探测器。然而，本书对上述方法和技术的介绍，主要限于基本原理和基本概念方面的论述；至于一些复杂的专门技术问题，书中将只作简略说明。所以，对从事某一方面专门工作的天文工作者，在阅读本书的基础上，显然还必须阅读有关文献，才能从事实际的研究工作。

本书由黄佑然(第六、七章)、许敖敖(第一、九、十章)、唐玉华(第三、五章)、宣焕灿(第二、四章)、秦志海(第八章)编写。特请胡宁生、李挺分别撰写了§2.8, §7.6两节。全书由黄佑然、许敖敖负责汇总。参加审稿工作的有苏定强(第二章)、秦涛(第三章)、崔连坚(第四章)、黄佑然(第五章)、方成(第六章)、章振大(第七章)、彭云楼(第八章)、许胤林与抗恒荣(第九、十两章)，在本书编写过程中，曾得到北京天文台恒星室许多同志有益的讨论和帮助，谨在此表

示感谢。

由于编者水平有限,书中错误和缺点在所难免,希望读者批评指正。

编者

1984年3月

# 目 录

<b>第一章 绪论</b> .....	1
§1.1 实测天体物理学的内容和科学意义 .....	1
§1.2 地球大气对天文观测的影响 .....	5
§1.3 热辐射的基本知识 .....	11
<b>第二章 天文光学望远镜</b> .....	20
§2.1 表征望远镜光学性能的物理量 .....	20
§2.2 实际光学系统的像差 .....	30
§2.3 折射望远镜的物镜 .....	41
§2.4 反射望远镜的光学系统 .....	46
§2.5 折反射望远镜的光学系统 .....	54
§2.6 各类望远镜的特性和用途 .....	58
§2.7 望远镜光学质量的检验 .....	61
§2.8 天文光学望远镜的新进展 .....	70
<b>第三章 辐射探测器</b> .....	77
§3.1 辐射探测器的一般特性 .....	77
§3.2 照相底片 .....	80
§3.3 光电器件 .....	96
§3.4 热辐射探测器 .....	115
§3.5 二维光电器件 .....	119
<b>第四章 天体光度测量</b> .....	136
§4.1 测光系统 .....	138
§4.2 光电光度计 .....	147
§4.3 光电测光的归算 .....	156
§4.4 光电测光的随机误差与系统误差 .....	166
§4.5 照相光度测量 .....	177
§4.6 多色测光的应用 .....	187

§4.7	热星等与热改正 .....	200
<b>第五章</b>	<b>天体分光测量</b> .....	<b>207</b>
§5.1	分光仪器 .....	207
§5.2	恒星的连续谱及其测量 .....	237
§5.3	谱线的测量 .....	259
§5.4	天体谱线波长的测定和证认 .....	273
§5.5	恒星的光谱分类 .....	280
§5.6	天体视向速度的测定 .....	286
<b>第六章</b>	<b>天体偏振测量</b> .....	<b>293</b>
§6.1	引言 .....	293
§6.2	偏振光的描述 .....	295
§6.3	分析偏振光的器件 .....	303
§6.4	偏振光的测量原理 .....	323
§6.5	测量偏振光的方法和仪器 .....	329
§6.6	偏振测量的误差及其检验和消除方法 .....	339
§6.7	偏振测量应用举例(偏振视向速度计) .....	347
<b>第七章</b>	<b>太阳的观测</b> .....	<b>354</b>
§7.1	地球大气对光学成像的影响 .....	354
§7.2	太阳望远镜 .....	363
§7.3	太阳线光谱的观测 .....	377
§7.4	太阳常数和太阳连续光谱绝对能量分布的测量 .....	405
§7.5	太阳单色光观测 .....	416
§7.6	太阳磁场的测量 .....	438
§7.7	太阳速度场测量简述 .....	451
<b>第八章</b>	<b>射电天文学方法</b> .....	<b>455</b>
§8.1	射电辐射特征和观测仪器 .....	456
§8.2	天线的基本原理和参数 .....	464
§8.3	射电望远镜接收机 .....	475
§8.4	射电辐射强度的测量 .....	490
§8.5	射电偏振测量 .....	501

§8.6	射电频谱测量 .....	514
§8.7	干涉仪 .....	527
<b>第九章</b>	<b>红外天文观测</b> .....	<b>545</b>
§9.1	引言 .....	545
§9.2	红外天文望远镜 .....	549
§9.3	红外探测器 .....	555
§9.4	红外天文观测的特殊附件、技术和方法 .....	569
§9.5	地球大气对红外观测的影响 .....	579
§9.6	空间红外观测 .....	581
§9.7	红外光度系统 .....	588
<b>第十章</b>	<b>紫外及 X 射线、<math>\gamma</math> 射线天文观测</b> .....	<b>591</b>
§10.1	引言 .....	591
§10.2	紫外天文观测 .....	595
§10.3	X 射线天文观测 .....	607
§10.4	$\gamma$ 射线天文观测 .....	631
附录一	光度学的基本概念 .....	640
附录二	常用显影液和定影液配方 .....	645
附录三	本波拉德大气质量表 .....	652
附录四	星等表 .....	658
附录五	UBV 系统标准星表 .....	675
附录六	恒星的色指数、有效温度和热改正间的关系 .....	678
附录七	偏振测量的标准星 .....	682
附录八	哈佛分类法 .....	685
附录九	MK 光谱分类系统的判据和标准星 .....	695
附录十	标准视向速度表 .....	699
附录十一	太阳最强光谱线表 .....	701
附录十二	织女星连续谱形状定标 .....	703
附录十三	太阳绝对分光辐照 .....	704
附录十四	白昼宁静度等级评价标准 .....	706
附录十五	标准缪勒矩阵 .....	710



# 第一章 绪 论

## §1.1 实测天体物理学的内容和科学意义

天体物理学是天文学中最年轻的一个部门。它应用物理学的理论和实验技术,研究各种天体的物理性质和化学组成。

迄今为止,除极少数太阳系天体外,人类还无法直接与天体接触。对天体的研究都是借助于来自天体的辐射。在这些辐射中蕴

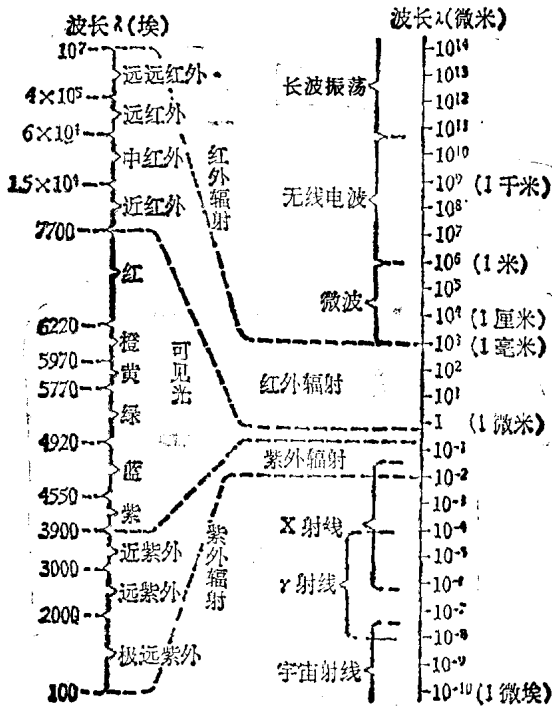
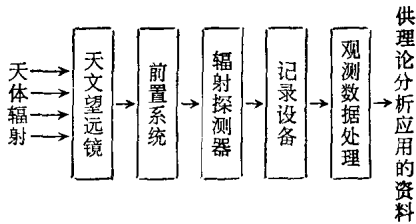


图 1.1 电磁辐射的波谱图。

含着有关天体物理性质和化学组成的主要信息。根据预定的研究目的,利用相应的天文仪器,接受天体的辐射(它们包括从 $\gamma$ 射线、X射线,紫外辐射、直到无线电波在内的全部电磁辐射);以及对这些辐射进行处理,从而获得可供进行理论分析的各种资料。这就是实测天体物理学的基本内容。

各类天体的辐射,包含着极其广阔的波段。图 1.1 给出电磁辐射的波谱图。它的每一个波长范围,都存在着相应的天体辐射。由于波长不同的电磁辐射,有时具有截然不同的物理性质,这就要求采用完全不同的天文仪器进行观测和处理,从而导致实测天体物理学与众多的实验物理领域发生联系。

然而,辐射的基本属性又使得对不同波段的天文观测,具有大体相同的几个主要环节:



虽然在各个环节中所使用的仪器可以有很大不同。各个环节的主要作用如下:

(1) 望远镜: 收集尽可能多的天体辐射,并形成天体的像。

(2) 前置系统: 根据不同的研究目的,对望远镜所收集的辐射进行必要的处理。例如分光观测中采用光谱仪或分光计作前置系统;偏振观测采用偏振计作前置系统等。

(3) 探测器: 将天体的辐射能(已经过前置系统处理过的)转换为可测信号。

(4) 记录设备: 通常是一些电子仪器,它们能精确记录来自探测器的信号。

(5) 观测数据处理: 对记录的原始观测数据进行整理和归算,得到可供理论分析应用的资料。近代一般采用计算机完成这一工

作。

实测天体物理学除了研究上述天体物理观测各环节的基本技术,各种观测仪器的原理和结构,以及观测结果的处理方法外,还必须研究星际介质和地球大气对天体辐射的消光作用,以及消除它们影响的理论和方法。此外,对于一些特殊天体(如太阳)的观测需要应用专门的仪器和方法,而相应某些专门的观测内容(例如天体磁场的测量)需应用特别的观测技术,对它们的探讨也都属于实测天体物理学的范畴。

天文学是观测科学,就这个意义上讲,实测天体物理学在天体物理学的诞生和发展中起着决定性的作用。近代天体物理学的发展史毫不含糊地证明了这一点。然而,实测天体物理学的发展又是与生产水平以及实验物理技术的发展密切相关的。望远镜发明前,天体物理观测只能用肉眼进行,限于用目视方法粗略估计天体的亮度。十七世纪初,望远镜开始用于天文观测,不仅扩大了观测的空间范围,也大大提高了观测精度。1666年牛顿用三稜镜得到了太阳光谱,1802年渥拉斯顿(Wollaston)在稜镜前加上狭缝从而发现了太阳光谱中的吸收线,以后德国光学家方和斐(Fraunhofer)创制了分光镜,用它对太阳光谱中的吸收线进行仔细观测,而基尔霍夫(Kirchhoff)则从理论上说明了吸收线产生的原因,从而为天体分光光学开创了基础。1839年法国达盖尔(Daguerre)发明了照相术,这种技术很快被应用到天文观测中。1845年费佐(Fizeau)和佛科(Foucault)拍摄到第一张带有黑子的太阳照片。接着,1851年布施(Busch)在日全食时拍摄到日冕的照片,1859年邦德(Bond)又将照相方法应用于恒星测光。到十九世纪七十年代,照相技术已被广泛用于实测天体物理工作中,其中包括恒星光谱分类工作。分光方法和照相技术在天体观测上的应用,以及天文望远镜口径的不断扩大的性能的不断改进,使天文学能够进行过去根本无法进行的对天体物理结构和化学组成的探索,从而诞生了天文学的一个新的分支——天体物理学。以后,随着生产技术和科学技术的日益提高,光电技术,无线电电子学技术,以及空

间技术和计算机技术又先后被应用于天文观测中，使实测天体物理学的方法和技术日趋完善，促使天体物理学不断获得新的发现和成果，达到了一个崭新的阶段。

各种新技术在实测天体物理学中的应用，不断给这门学科以新的生命力。尤其是近半个世纪以来，实测天体物理学的内容已发生巨大变革，主要表现在射电探测技术和空间探测技术的相继兴起，地面光学观测技术的更新和红外探测技术的发展。这场飞跃是由于探测手段的巨大变革造成的。虽然，从十九世纪初到二十世纪二十年代，人们已逐渐认识到天体发射着各种不同波长的辐射，但却缺乏有效的工具来探测它们。因此，天文工作者对天体辐射的探测一直局限于可见光范围。至多只能应用照相底片和温差电偶等探测器，向可见光两侧波段稍有扩展，探测到天体的部分近紫外辐射和部分近红外辐射。

随着无线电电子学技术的发展，1937年第一台射电望远镜问世，1942年首次发现太阳射电。第二次世界大战后，雷达的无线电接收技术广泛应用于天文观测中，开始了射电天文技术迅速发展的时期。射电探测手段的应用，大大扩展了人们的视野，丰富了人们对宇宙的认识。六十年代由射电探测获得的四大天文发现——类星体、射电脉冲星、微波背景辐射和星际有机分子，对天体物理学的发展具有重要的阶段性意义。

由于地球大气的消光作用，对天体紫外辐射，X射线辐射和 $\gamma$ 射线辐射，以及大部分红外辐射，波长大于30米的射电辐射的观测，必须在地球大气外进行。这些波段实测工作的发展，除与探测器的发展密切相关外，还有赖于空间运载工具的发展。本世纪四十年代，人们开始用高空气球和火箭携带适用于紫外和X射线波段的探测器，超越大气层进行天文观测，相继获得了太阳的紫外光谱和发现太阳的X射线辐射；但由于气球和火箭本身的缺陷，直到六十年代初才观测到恒星的X射线辐射。以后又陆续取得了不少有意义的观测结果，特别是“宇宙基底X射线辐射”的发现，被认为是六十年代天文学重大成就之一。七十年代初，专门用于X射线天

文观测的乌黑鲁卫星的上天,以及以后的爱因斯坦天文台、空间实验室,太阳轨道天文台,行星际探测器等等一系列人造卫星及宇宙火箭的发射(这些飞行器上配备了大量用于紫外, X 射线和  $\gamma$  射线天文观测的望远镜,探测器及遥测设备),使高能天体物理学的发展取得了辉煌的成果。例如, X 射线、 $\gamma$  射线脉冲星和宇宙 X 射线暴、 $\gamma$  射线暴的发现,星际介质中尺度约 100 埃的石墨尘粒的发现,都为研究天体的性质及演化提供了极其重要的观测资料。为紫外天文学和 X 射线、 $\gamma$  射线天文学开创了崭新的局面。

近二、三十年来,由于各类灵敏度很高的红外探测器的发明,大口径红外望远镜的制成,以及红外调制技术、致冷技术的发展,红外天文观测的进展也十分迅速,目前已发现有数万个红外辐射源,其中包括红外星和红外星云。它们的温度相当低,根本无法在光学波段中观测到。例如,曾在猎户座发现一个温度只有  $-200^{\circ}\text{C}$  的红外星云,天文学家认为它很可能是正在形成恒星的星云。显然,红外星和红外星云的发现为检验恒星起源和演化的理论,提供了不可缺少的重要资料。

近三十多年来,在可见光观测中成就最突出的领域是对天体磁场(特别是太阳及太阳活动区磁场)的观测。大型磁象仪及各种测量磁场仪器的发明和制造,使得人们对于各种天体的电磁性质有了更深入的了解。此外,由于可见光观测的空间分辨率和时间分辨率有了长足的进步,也使人们有可能了解更多天体物理现象的细节。

综上所述,实测天体物理学近三十多年来所取得的一系列重要发现,以及迅猛发展的近代理论物理在天文上的应用,使整个天体物理学面临着新的飞跃,也许这正酝酿着自然科学的又一次新的革命。

## §1.2 地球大气对天文观测的影响

除利用火箭、高空气球和人造地球卫星等运载工具对天体进

行大气外观测,一般观测都在地面进行。因此,来自天体的辐射将首先穿过厚厚的地球大气层,才能到达观测的天文仪器中。辐射在通过大气层时,将受到地球大气作用的影响,主要表现为: 1. 改变天体辐射的方向; 2. 改变天体辐射的成分和强度。前者即所谓大气折射(或称蒙气差),在进行天体测量工作时必须考虑它的影响。而大气对天体辐射强度、成分的影响,则是实测天体物理学中一个不可忽视的问题,通常称之为大气消光。此外,地球大气对天文观测的影响,还包括大气本身的辐射以及大气湍动的作用。前者对地面红外天文观测的影响极大;而后者则直接影响光学成像的质量。

地球大气消光的物理机制是大气分子和固体质点对辐射的吸收和散射作用。它既减弱了天体辐射的强度;又改变了天体辐射的能谱,使天体的颜色发生变化。最明显的例子是日出(或日落)时太阳的颜色与中午时几乎完全不同,这就是大气消光的缘故。大气分子对辐射的瑞利散射和尖埃质点的吸收作用,造成大气的连续吸收。根据瑞利散射公式,波长越短,连续吸收越厉害,这也就是晴空具有蔚蓝色的原因。大气中的臭氧、氧、氮、二氧化碳和水汽等分子的吸收作用将产生大量吸收线和吸收带。其中,作为大气主要成分的氮分子和氧分子,它们的主要吸收带分布于 2200 埃直到远紫外区的波段范围内,2300—2900 埃为臭氧分子的吸收带,所以地面上几乎接收不到波长小于 3000 埃的天体辐射。在可见光区(3500—7000 埃),大气的吸收很小,主要是大气的散射作用使辐射减弱,但是不厉害。大气对红外辐射的吸收相当强,其中起主要作用的成分是水汽、二氧化碳和臭氧;其次是甲烷和氧化氮。由于水汽随高度增加而迅速减少,在 12 公里高度以上就可忽略它的影响;二氧化碳的吸收直到 22 公里高度还相当明显;臭氧的含量随高度增加,到 22 公里高度处达到极大,而后再逐渐减少。尽管如此,大气层还是给红外辐射留下了几个小小的窗口,使地面观测得以应用。图 1.2a 显示地球大气对各种波长电磁辐射的消光的大致情况;图 1.2b 给出可见光区域中大气透射系数随波长的变化

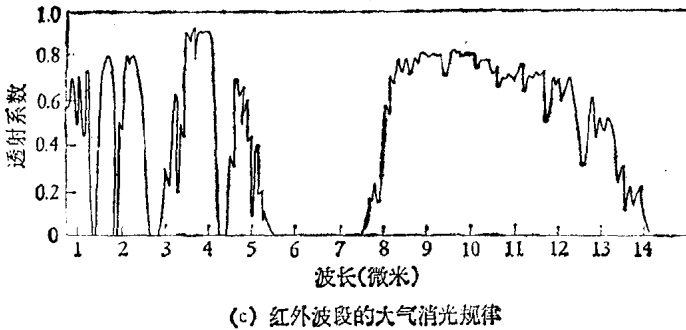
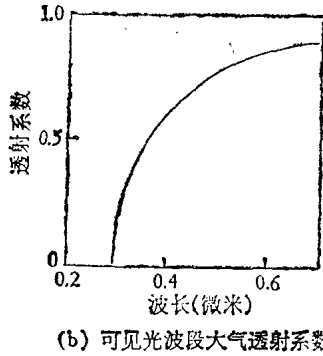
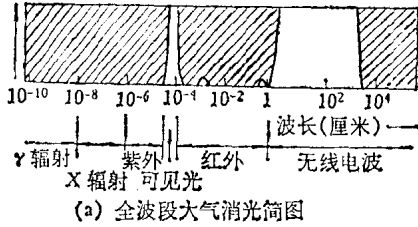


图 1.2 地球大气消光的选择性。

曲线；而图 1.2c 则给出红外波段直到 15 微米处的大气消光规律，这个波段中明显存在可供地面观测应用的若干个大气窗口。从图 1.1 可清楚地看出，在地面上根本无法观测来自天体的  $\gamma$  射线、X 射线和紫外辐射；大部分红外辐射也同样无法到达地面。因此，对于这些辐射的观测，只能借助于飞机、高空气球、火箭和人造卫星等飞行器，把观测仪器携带到地球大气层外去进行。必须指出，

由于地球大气的密度随高度指数地减小,因此下层大气的消光作用是主要的,如果选择在海拔较高的山峰上进行天文观测,大气消光的影响将显著减少。这也是天文台常建在高山上的原因。

由于地球大气(指地面附近的)自身的辐射主要在红外波段,因此,它将叠加在天体的红外辐射上,歪曲天体辐射的真实情况。考虑到天体红外辐射的微弱,必须正视它的不利影响。实际上,正是地球大气辐射决定了红外天文观测的背景噪声最终下限。

显然,天体辐射所经过的大气层的厚度将直接影响消光的大小。图 1.3a 为天体辐射穿过大气层到达地面的示意图。由图可知,当天顶距  $z_1$  较小时,天体辐射穿过的大气层厚度,比相应于较大天顶距  $z_2$  的厚度为小。在地平附近,天顶距最大,大气消光最厉害。所以一般天文观测都尽量避开大天顶距的情况,否则将给观测结果带来很大误差。

大气消光严重歪曲了天体的亮度和颜色,为了得到天体的真实辐射情况,必须对地面上的观测结果进行消光改正,这是实测天体物理重要的内容之一。下面定量讨论大气消光的改正问题。

由于地球大气的厚度远小于地球的半径,可先近似地假定地球大气是由垂直于观测点铅垂线的平面平行层所组成,每一层中的物理参数随层的高度  $h$  而变化。讨论天顶距为  $z$  的天体的辐射经过地球大气时减弱的情况,我们考虑比较简单的基本的单色辐射流情形。如图 1.3b 所示,  $dr$  为辐射路径中的一小路径元,来自天体的单色辐射流  $F_\lambda$  经过之后,其减弱为

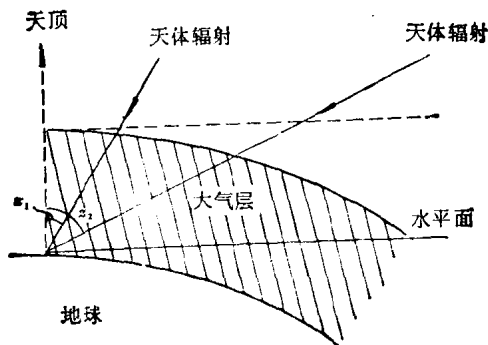
$$dF_\lambda = -\alpha_\lambda F_\lambda dr, \quad (1.1)$$

即辐射流的减弱与辐射流的强弱及路径元的大小成正比,  $\alpha_\lambda$  为比例系数,它是由大气的性质所决定,通常被称作吸收系数。由于各高度上大气的性质不同,所以吸收系数是  $r$  (或  $h$ ) 的函数。将式 (1.1) 改写为

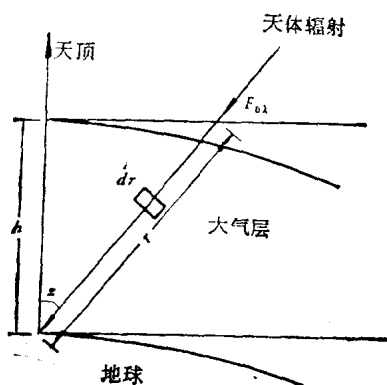
$$\frac{dF_\lambda}{F_\lambda} = -\alpha_\lambda dr, \quad (1.2)$$

对式 (1.2) 两边积分,并考虑到在大气层外(对应于  $r = 0$ ) 天体





(a)



(b)

图 1.3 大气消光与天顶距的关系。

的辐射为  $F_{0\lambda}$ ，于是在  $r$  处天体的辐射  $F_{\lambda}$  将为

$$F_{\lambda} = F_{0\lambda} e^{-\int_0^r \alpha_{\lambda} dr} \quad (1.3)$$

一般把  $\tau_{\lambda}(z) = \int_0^r \alpha_{\lambda} dr$  称作  $z$  方向大气的光学厚度，而  $P_{\lambda}(z) = F_{\lambda}/F_{0\lambda}$  称作  $z$  方向大气的透射系数。根据上述定义，式 (1.3) 成为

$$P_{\lambda}(z) = e^{-\tau_{\lambda}(z)} \quad (1.4)$$

式 (1.4) 给出透射系数与光学厚度间的关系。

在假设地球大气是平面平行层的近似条件下，将有  $dr = -\sec z dh$ （负号表示高度  $h$  从地面向上计算，而  $r$  则是从大气外