

恒星大气理论

黄润乾 编著

云南人民出版社

33.14

前 言

恒星大气理论是天体物理的一个重要组成部分，它通过对恒星光谱的理论分析而得到有关恒星大气层的物理和化学结构知识。近几十年来恒星大气理论发展十分迅速，已形成了一个完整的理论体系，并在解释各类恒星光谱的能流分布，谱线轮廓等方面取得了辉煌成就。

编写这本恒星大气理论的目的，主要是为了将最近一、二十年内在这个领域中新发展的一些理论和计算方法介绍给我国天体物理工作者。作者希望，这本书的出版，能够引起天体物理界有更多的人对恒星大气理论研究的重视和兴趣，同时希望能够将恒星大气理论与光谱观测工作更好地结合，更快地推动我国天体物理研究的发展。

作者在编写这本恒星大气理论时，在全书的结构安排上与其它恒星大气理论书籍有较多的出入，在本书的结构和安排上，比较重视理论的系统性和逻辑性，而较少地照顾恒星大气理论的历史发展状况。

由于作者水平所限，书中错误和不当之处必然不少，敬请读者批评指正。

黄润乾

1984年2月于昆明云南天文台

内 容 提 要

恒星大气理论的基本任务是通过分析恒星光谱的理论分析而获得恒星大气层的物理和化学结构知识。为此需要建立起一个描述恒星大气的数学模型，解这个模型就可以得到恒星大气层的物理和化学结构。

本书介绍了如何建立模型，如何求解，如何调整和改进有关参量使得到的解与实测结果相符合等。对于谱线轮廓的求法也进行了详细的讨论，并注意收集和介绍了近一二十年恒星大气理论的许多新发展，是一本恒星理论方面较为系统和现代的著作，比较适合研究生、天体物理教师、从事恒星大气理论研究的科研人员及其他天文学工作者阅读，也可作为各大学天体物理专业的高年级教材。

目 录

第一章 基础知识

§ 1	恒星大气理论的基本任务	(1)
§ 2	恒星的光谱型	(2)
2.1	根据谱线确定光谱型	(3)
2.2	根据谱线系列的边界跳变值确定光谱型	(7)
2.3	根据色指数确定光谱型	(8)
§ 3	热动平衡状态 (TE)	(9)
3.1	什么是热动平衡状态	(10)
3.2	热动平衡状态下粒子的分布函数	(10)
3.3	热动平衡状态下的辐射定律	(19)
3.4	在热动平衡状态下的恒星大气	(21)
§ 4	辐射场	(23)
4.1	辐射场的宏观描述	(23)
4.2	在恒星大气中的辐射场	(29)
§ 5	辐射与大气物质的相互作用	(31)
5.1	辐射与大气物质相互作用过程的类型	(31)
5.2	消光系数与光学深度	(33)
5.3	发射系数	(35)
5.4	散射系数的一般讨论	(36)
5.5	应用举例	(40)
5.6	源函数 S_ν	(41)
§ 6	局部热动平衡状态 (LTE) 与非局部热动 平衡状态 (Non-LTE)	(42)

第二章 物质函数

- § 1 大气物质的不透明度.....(45)
 - 1.1 束缚—束缚跃迁过程的 κ_{ij} 与 a_{ij}(46)
 - 1.2 束缚—自由跃迁过程的 κ_{ik} 与 a_{ik}(54)
 - 1.3 自由—自由跃迁过程的 κ_{kk} 与 a_{kk}(57)
 - 1.4 散射过程的 σ_e 与 a_e(58)
 - 1.5 一些原子与离子的原子吸收截面和吸收系数.....(60)
- § 2 LTE 物态方程.....(68)
 - 2.1 总压强.....(68)
 - 2.2 密度.....(77)
 - 2.3 在LTE状态下,比热及绝热温度梯度的表达式.....(77)
- § 3 Non-LTE 物态方程.....(80)
 - 3.1 Non-LTE状态下气体压强 P_0 与密度 ρ 的表达式.....(81)
 - 3.2 统计平衡方程组.....(81)
 - 3.3 粒子数守恒和电荷守恒方程.....(90)

第三章 基本方程组

- § 1 流体静力学平衡方程.....(92)
- § 2 辐射转移方程.....(93)
- § 3 能量平衡方程与能量定理.....(95)
- § 4 对流.....(96)
 - 4.1 产生对流非稳定性的判别条件.....(96)
 - 4.2 混合程理论.....(101)

第四章 恒星大气模型

- § 1 概述.....(107)

§ 2	灰大气模型.....	(114)
2.1	引言.....	(114)
2.2	辐射转移方程的通解.....	(114)
2.3	平均辐射强度 $J_v(\tau_v)$, 辐射流 $F_v(\tau_v)$ 及 K -积分的表达式.....	(117)
2.4	指数积分 $E_n(x)$ 与积分算符 L 、 ϕ 、 χ 的数学性质.....	(120)
2.5	在 $\tau \gg 1$ 时, 辐射转移方程的渐近式	(124)
2.6	灰大气情况.....	(127)
2.7	灰大气的近似解与精确解.....	(130)
2.8	灰大气情况下的温度分布.....	(132)
2.9	太阳临边昏暗现象的解释.....	(133)
2.10	与非灰大气的关系, 罗色兰平均值.....	(134)
§ 3	局部热动平衡 (LTE) 大气模型.....	(137)
3.1	概述.....	(137)
3.2	流体静力学平衡方程的积分.....	(138)
3.3	数密度的计算.....	(141)
3.4	光学深度的计算.....	(145)
3.5	辐射转移方程的积分.....	(147)
3.6	温度分布的改正.....	(152)
3.7	谱线覆盖效应.....	(161)
3.8	LTE 大气模型计算结果与观测的比较	(171)
§ 4	非局部热动平衡 (Non-LTE) 大气模型.....	(178)
4.1	基本方程组.....	(179)
4.2	基本方程组的改写.....	(182)
4.3	完全线性化方法.....	(193)
4.4	完全线性化过程中的一些具体计算.....	(198)
4.5	数值计算中的一些具体问题.....	(215)

4.6 Non-LTE 模型计算结果的讨论	(216)
-----------------------------	-------

第五章 谱线理论

§ 1 谱线轮廓与等值宽度	(237)
§ 2 线吸收系数	(240)
2.1 原子的自发吸收	(242)
2.2 原子热运动的多卜勒效应	(243)
2.3 压强加宽	(244)
2.4 总吸收轮廓	(254)
§ 3 局部热动平衡 (LTE) 谱线理论	(258)
3.1 线辐射转移方程	(258)
3.2 <i>Milne-Eddington</i> 模型	(260)
3.3 生长曲线	(267)
§ 4 非局部热动平衡 (Non-LTE) 谱线理论	(276)
4.1 二能级情况	(277)
4.2 三能级情况	(290)
4.3 多能级情况	(293)
4.4 Non-LTE 谱线理论结果的讨论	(298)

第六章 膨胀大气中的辐射转移问题

§ 1 概述	(302)
§ 2 观测者参考系中的辐射转移方程	(303)
§ 3 跟随运动参考系中的辐射转移方程	(307)
§ 4 跟随运动参考系中辐射转移问题的求解方法	(309)
4.1 辐射转移问题的求解方法与步骤	(309)
4.2 线辐射转移方程的解法	(310)
§ 5 <i>Sobolev</i> 方法	(324)
§ 6 超新星1969I的光谱分析	(329)
参考文献	(335)

第一章 基础知识

本章的目的在于介绍一些与恒星大气理论有关的基础知识。

§ 1 恒星大气理论的基本任务

恒星大气是指恒星外部能将其产生的辐射转移出来的气体层，它的厚度对于大多数恒星来说，大约可达几百至几千公里，但相对于恒星的半径来说，仍是极薄的一层。

在地球上人们所能观测到的恒星光谱是在恒星大气层内产生的，因此恒星的光谱提供了研究恒星大气层内物理和化学结构的重要信息。

恒星大气理论属于天体物理的一个重要组成部分，它的基本任务是通过分析研究得到恒星大气层的物理与化学结构知识。学习恒星大气理论，首先应掌握它的一些基本方法，其特点是：人们根据对恒星大气层的物理条件和几何结构所作的一些简化假设，建立起一系列反映恒星大气层物理与化学结构的基本方程组，以及与这些基本方程组有关的物质函数与边界条件，即建立起一个数学模型。解这个数学模型可以得到恒星大气层的物理结构（如温度、压强、密度和不透明度等参量的分布），同时还可以得到光谱的能量流分布，再将由理论上得到的光谱能量流分布与实际观测到的恒星光谱能量流分布进行比较。人们需要不断地调整这个数学模型的有关参数，才能使由理论得到的和由实际观测得到的光谱能量流分布相一致。当二者满意地一致以后，就认为由模型提供的大气层的物理和化学结构反映了该恒星大气层的物理和化学结构。

本书正是根据上述逻辑结构而编排内容，全书共有六章。第一章介绍学习恒星大气理论必备的一些基本知识；第二和第三两章根据对恒星大气层的物理条件和几何结构的一些简化假设，建立起这个数学模型中的物质函数、基本方程组和边界条件；第四章恒星大气模型则是介绍如何求解这个数学模型而得到恒星大气的结构及光谱能量流分布；第五章谱线理论，介绍如何由相应数学模型得到谱线的轮廓。在第四和第五两章中由于考虑到一些历史发展因素，因而在这两章的一开始都介绍了一些经典的处理方法。第六章讨论了膨胀大气中的辐射转移问题。由于在膨胀大气中的物理和几何条件与通常所作的简化假设完全不同，目前尚无一个完整的理论。近年来已发展了一些膨胀大气中的辐射转移理论和计算方法，可以解释一些观察到的谱线轮廓。

§ 2 恒星的光谱型 光谱分类

恒星光谱由连续谱以及混杂在连续谱中的许多吸收线或发射线组成。连续谱的能量流分布与恒星的有效温度有关，随着恒星有效温度的升高，能量流的极大值向短波方向移动。谱线的强度则与该谱线相应的能级上的原子占据数有关。而能级上的原子占据数又与恒星大气的有效温度以及压强有关。因此，对于化学组成大致相同的恒星来说，其谱线的强度决定于恒星大气层的有效温度和压强（或重力加速度）。

恒星根据其大气层的物理状态不同，表现有不同的光谱型，光谱型的分类可以依据连续谱的能量流分布情况和谱线的情况进行。对于十分微弱的恒星，也可以借助其色指数来确定其光谱型。

恒星的光谱型可以分为以下几种：

O 、 B 、 A 、 F 、 G 、 K 、 M

每一个光谱型又可以细分为十个等级，用数字 $0, 1, 2,$

..., 9 来表示, 如 $B_0, B_1, \dots, B_9, A_0, A_1, \dots, A_9$ 等等。采用 $O, B, A, \dots$ 这样的字母顺序来表示光谱型完全是由历史习惯原因造成。同样的原因, 习惯上把 $O、B、A$ 型星称为“早”型星, $F、G$ 型星称为“中间”型星, 而把 $K、M$ 型星称为“晚”型星。但是, 这样的称呼与恒星真实的年龄并没有关系。

光谱型由 $O \rightarrow M$ 的变化, 反映了不同恒星大气层的有效温度由高向低的变化, 因而恒星的顏色由蓝色向黄色、红色变化。

下面介绍三种确定光谱型的方法: (1) 根据谱线确定光谱型; (2) 根据某一谱线系列的边界跳变值确定光谱型; (3) 根据色指数确定光谱型。

2.1 根据谱线确定光谱型

当恒星大气层的化学组成一定时, 谱线的强度决定于大气层的有效温度和重力加速度, 后者又直接与恒星的光度等级有关。因此, 对于化学组成和光度等级都相同的恒星 (例如主序恒星的光度等级都是 V), 光谱型主要由大气层的有效温度决定, 这就是一维分类的方法, 所谓哈佛分类就是这种一维分类。比较好的分类, 应该是根据恒星的有效温度和光度等级来进行分类, 即所谓二维分类。常用的 $M-K$ 分类就是二维分类。

一、哈佛分类

在以下的表示中将原子的电离状态用元素符号后面的大写数目字 I、II、III 表示, 其中 “I” 表示中性原子, “II” 表示一次电离原子, “III” 表示二次电离原子。例如中性氢写作 H I, 而一次电离的氢原子写作 H II。

不同的光谱型根据以下的谱线特征来确定:

O 型: 在 O_0-O_4 中 He II 吸收线是主要的, 在 O_5-O_9 中 He II 线被 He I 线所代替, 同时有 N II、O II、Si II 吸收线出现,

并且可以见到相对比较弱的H I吸收线（巴尔末线），连续谱的极大值在紫外光谱范围。

B型：在B0—B4有He I以及氢的吸收线（ H_β 、 H_γ 、 H_δ 等）和O II线。在B5—B9中He I线很弱，然而巴尔末线加强。

A型：A0—A4中主要是巴尔末线，其强度达到极大值。A5—A9中巴尔末线减弱，出现了一些电离的金属线如Fe I、Ca I。

F型：Ca I线的强度增大，Fe I、Ti I的强度也增大，同时还出现了中性金属线如Fe I，巴尔末线逐渐消失。

G型：Ca I线的强度达到最大值，中性金属线如Fe I、Ti I加强，而它们的电离线减弱。连续谱的极大值已移到可见光范围。

K型：中性金属线变强，特别是Ca I线。在K4—K9中出现了简单分子如CH、CN的谱线。

M型：几乎只有中性金属线和分子的谱线，特别是TiO的吸收线迅速变强。

图1.1给出了不同光谱型中几种谱线的相对强度以及有效

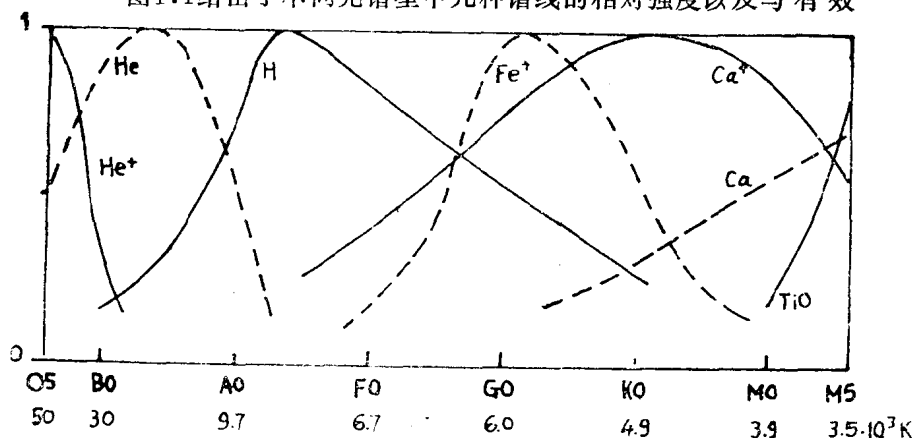


图1.1 在不同光谱型中几种谱线的相对强度以及有效温度的关系

温度的关系。由图可以看出，对于同一元素不同电离度的谱线来说，总是在较早的光谱型中出现电离度较高的线。光谱型由晚型向早型变化时，相应的原子电离势增大。而恒星的颜色则由红→黄→蓝，所有这些都说明，当光谱型由晚型向早型变化时，恒星的有效温度是由低向高变化。

二、 $M-K$ 分类

一维分类法不能很确切地确定恒星的光谱型。例如有两个恒星光谱，若根据光谱中有哪些谱线出现，以及这些谱线的强度来进行判别，可以认为它们很相似，几乎可以确定为同一光谱型，但是其中一个光谱的谱线很清晰(谱线很尖锐)，而另一个光谱的谱线比较模糊(谱线比较宽)，这种情况用一维分类法就无法加以区别。这是因为一维分类法主要是根据恒星的有效温度不同进行分类的。然而我们知道，当大气层的化学组成确定以后，谱线的情况不仅与有效温度有关，而且还与恒星表面的重力加速度有关。

恒星的光度 L 与谱线的宽度有密切关系，在同一光谱型内，即当恒星的有效温度 T_{eff} 大致相同时，光度 L 越大的恒星其谱线的宽度越小。我们知道，光度 L 与恒星的半径 R 有关，当 T_{eff} 一定时，由公式 $L = R^2 \left(\frac{T_{eff}}{5787} \right)^4$ 可知： L 越大则 R 也越大，同时重力

加速度 g 越小。由此可见，光度 L 与重力加速度有密切关系，因而在确定光谱型时，又把恒星的光度等级作为另一个参数，这就是二维分类法。

恒星的光度等级用表示光谱型符号后面的大写数字 I, II, ... 表示，例如 A0 I, A0 II, ...；在每一个光度等级内又可以细分为 a , ab , b 三个等级。

在一个光谱型内，光度 L 的变化很大，可以相差 10^3 倍。但是人们又只能粗略地把它划分为六个等级，并且对于不同的光谱

型，划分还不一致。图1.2给出了不同光谱型内划分光度等级情况。由于在同一光谱型内， L 变大表示 R 变大，故不同的光度等级代表不同类型的恒星：

- I = 超巨星；
- II = 亮的巨星；
- III = 正常的巨星；
- IV = 矮巨星；
- V = 主序星；
- VI = 矮星。

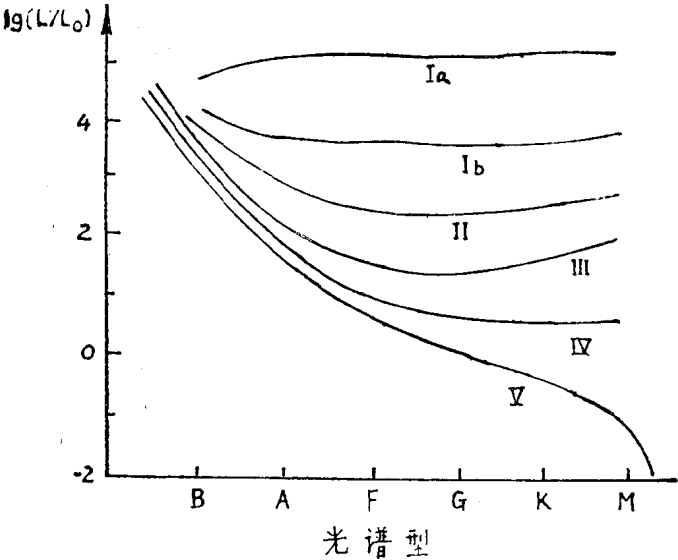


图1.2 赫罗图中光度等级的分布

此外白矮星作为特殊情况，它的光度等级用 DA 和 DB 表示。下面给出 $M-K$ 分类中光谱型表示方法的几个例子：

- 太阳 $\odot$ ： $G2V$ ；
- 天鹅座 α 星： $A2Ia$ ；

天狼星: $A2V$;

牧夫座 α 星: $K2III$;

猎户座 α 星: $M2Iab$ 。

2.2 根据谱线系列的边界跳变值确定光谱型

在恒星光谱的连续谱中，可以发现在确定的位置上流量发生突然变化的现象，称为“跳变”。这种现象总是发生在某一很强的吸收谱线系列（如巴尔末系列）的边界处，它相当于该原子的能级由束缚—束缚跃迁过渡到束缚—自由跃迁的边界。最典型的例子是巴尔末系列（图1.3）： H_α ($\lambda=656.3nm$)， H_β ($\lambda=486.1nm$)， H_γ ($\lambda=434.0nm$)，…越往下面谱线的强度越弱，谱线的间距越小，最后收敛于系列边界值 $\lambda_\infty=3646\text{\AA}$ 处。在 λ_∞ 以后则进入连续谱，连续谱的能量流总是比巴尔末谱线区连续谱能量流小许多。因此在 λ_∞ 处可以看到一个明显的能量流变化，称为巴尔末跳变，并用 D 表示。在实际光谱中，巴尔末系列的边界常常十分模糊，所以人为地将巴尔末系列的边界规定为 $\lambda_\infty=3650\text{\AA}$ ，于是巴尔末跳变为： $D \equiv 2.5 \log [F_V(\lambda 3650^+) / F_V(\lambda 3650^-)]$ 。

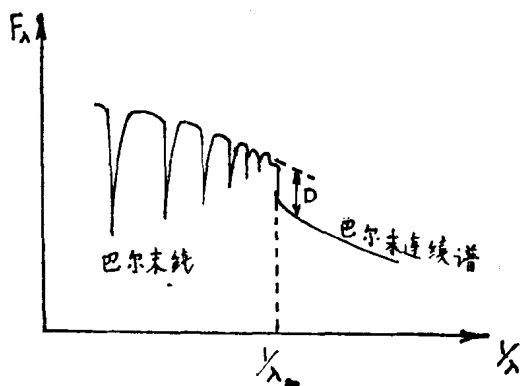


图1.3

巴尔末跳变值 D 的大小与恒星的有效温度有关，因此与恒星的光谱型有关。此外在巴尔末边界处流量下降的斜率，正如吸收线的宽度一样，与恒星的光度等级有关。因此人们可以根据巴尔末边界跳变值确定恒星的光谱型。图 1.4 给出主序星和超巨星的巴尔末跳变值 D 与光谱型的关系。

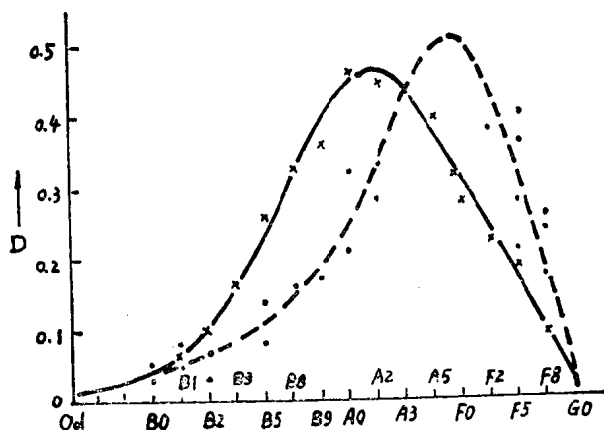


图 1.4 主序星和超巨星的巴尔末跳变值 D 与光谱型的关系，图中 $\times$ 是主序星的平均值， $\odot$ 是超巨星的值

2.3 根据色指数确定光谱型

恒星的色指数就是在不同的光谱范围（即在不同的色区）测得的亮度的差值（亮度是以视星等为单位）。例如在短波范围（蓝色区域）测得的亮度为 $m_{\text{短}}$ ，在长波范围（红色区域）测得的亮度为 $m_{\text{长}}$ ，则色指数 FI 为：

$$FI = m_{\text{短}} - m_{\text{长}} = -2.5 \log \frac{F_{\text{短}}}{F_{\text{长}}} \quad (1.1)$$

式中 F 表示辐射流。此外对色指数要规定一个标准值，为此，规定 $A0V$ 型星色指数为零，即对于 $A0V$ 型星来说 $m_{\text{短}} = m_{\text{长}}$ 。

色指数的大小决定于恒星光谱中的能量流分布情况，因此色指数与光谱型有关，所以又可以用色指数来确定光谱型。特别对于十分微弱，无法拍摄其光谱的恒星来说，用电光方法测量其色指数，并用色指数来确定其光谱型就十分重要。目前色指数用得最多的是所谓 UBV 系统，其中 U 表示紫外区域， B 表示蓝色区域， V 表示可见光区域。图1.5为光电接受器在这三个区域的灵敏度曲线，色指数是根据 $U-B$ 和 $B-V$ 得到的。图1.6给出了主序星的色指数与光谱型的关系。

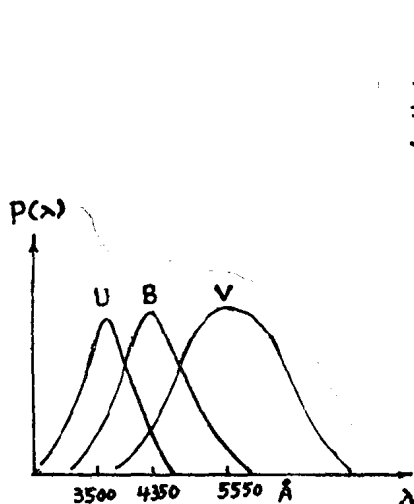


图1.5 光电接受器在 U , B , V 三个区域的灵敏度曲线

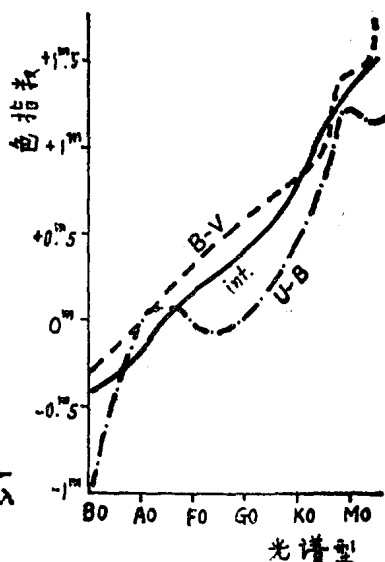


图1.6 主序星的色指数与光谱型的关系

§ 3 热动平衡状态 (TE)

本节将讨论什么是热动平衡状态，并介绍由统计物理得到的关于在热动平衡状态下粒子所遵守的一些统计分布规律，以及热

动平衡状态下的辐射公式。如果将恒星大气近似地看作处于热动平衡状态，则可以由这些分布函数和辐射公式得到几种大气温度的概念。

3.1 什么是热动平衡状态

设想有一个与外界完全隔离的容器（如空穴，见图1.7），在容器内存在气体粒子，也允许辐射进入。经过足够长的时间以后，容器内各处的温度达到一致，于是在容器内建立起一种平衡状态。温度是这一平衡状态的唯一状态参量。容器内的粒子，不论它们的初始状态如何，也不论它们在达到平衡状态前经历过什么变化过程，在平衡状态下，都满足一定的统计分布规律。我们称这种平衡状态为热动平衡状态，并用字母“TE”表示。

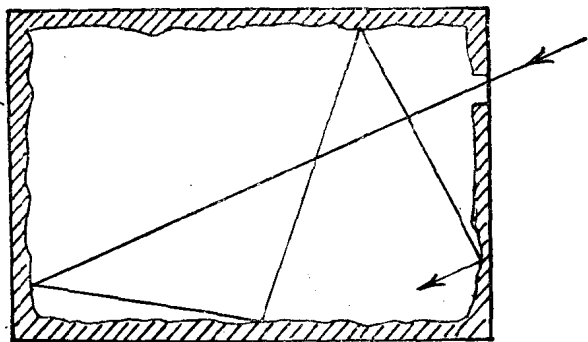


图1.7

3.2 热动平衡状态下粒子的分布函数

一、粒子的速度分布函数

根据统计物理，在 TE 状态下粒子的速度分布应遵从麦克斯韦速度分布公式：