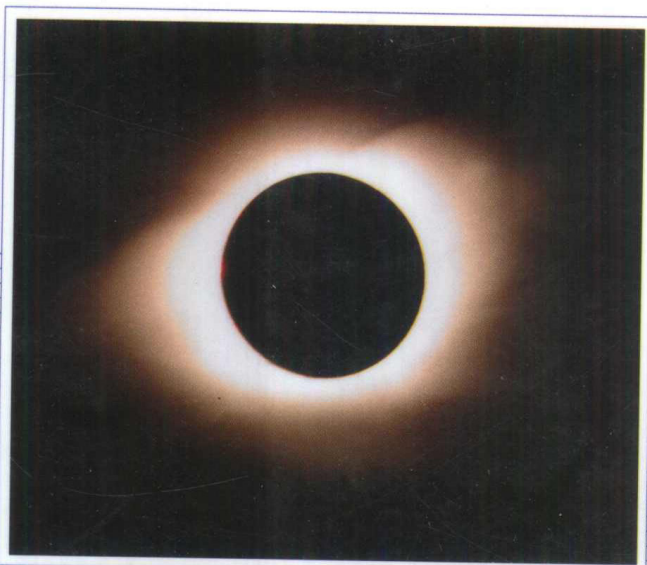


现代太阳物理丛书

日冕物理

章振大 著



科学出版社

内 容 简 介

本书叙述了日冕，特别是活动日冕的观测研究和理论分析结果以及最新进展。全书共分五章：第一章为概论，简要描述宁静日冕部分；第二章为日冕等离子体环；第三章为日冕物质抛射；第四章为冕洞和太阳风；而第五章为色球和日冕加热。

本书可供天体物理、空间物理和地球物理的科研工作者和有关学科的研究生及大学生等阅读参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

日冕物理/章振大著. —北京: 科学出版社, 2000.7

(现代太阳物理丛书/艾国祥主编)

ISBN 7-03-008086-6

I. 日… II. 章… III. 日冕-天体物理学-研究 IV.
P182.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 68102 号

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

源海印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2000 年 7 月第 一 版 开本: 850×1168 1/32

2000 年 7 月第一次印刷 印张: 17

印数: 1—1 500 字数: 446 000

定价: 38.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈北燕〉)

《现代太阳物理丛书》序言

现在呈现给读者的，是由我国太阳物理学界同仁编著的系列学术专著——《现代太阳物理丛书》。它覆盖当代太阳物理研究的主要前沿领域，汇集了太阳物理学的主要观测发现和理论成就，反映了近年太阳物理研究的最新进展，包括我国学者的贡献。

太阳是一颗普通的恒星。在显示恒星分类的赫罗图，即光谱型和光度分布的散布图上，太阳位于主序星的中部，光谱型是G2V。就恒星参数而言，太阳在组成宇宙的恒星大家庭中极其普通。正因为这样，研究太阳对认识恒星的形成、演化、内部结构和外层大气有典型的意义。另一方面，太阳是离地球最近的恒星，为我们提供了足够的亮度，使其成为一颗唯一可被高空间分辨、高时间分辨、高光谱分辨，并且有高灵敏度观测的恒星。众所周知，夫琅禾费太阳光谱研究和原了谱线塞曼分裂对黑子磁场的诊断，实际上标志了近代天体物理学的发端。太阳物理研究涉及粒子物理、量子辐射理论、等离子体物理、流体和磁流体力学、计算物理等基础物理学科。

太阳研究的唯一性还在于，它在自己的第三颗行星——地球上孕育了智慧的人类。太阳是决定人类生存的日地环境的母体。太阳至少30亿年来一直保持稳定的光度。同时，激烈的太阳活动及其周期变化，又影响和调制着人类生存的环境。在人类活动早已扩展到地球之外的今天，研究太阳活动又成为认识人类地外的可居住性和预报日地环境中灾变事件的基本要求。众所周知，不息演化的太阳磁场在巨大的空间尺度产生不稳定性 and 灾变过程。太阳耀斑释放的磁能相当于几十亿次核爆炸的能量；而由磁场驱动的日冕物质抛射，每次将数十亿吨的磁化等离子体抛入日

球空间。激烈的太阳活动引起地球磁场和电离层强烈的扰动，导致短波无线电通讯中断、供电系统破坏、长距离输油管道过早损坏、空间飞行器发生故障、宇航人员健康受到伤害以及远距离导航失灵等破坏性事件。实时地监视和预报太阳活动事件及其对人类环境的影响，已经成为太阳物理工作者和日地物理工作者的一个最富有挑战性的任务。组织这套丛书的目的之一，是为研究空间环境，提供更好的观测和理论基础。

早在公元前 28 年，中国就有了目视太阳黑子的正式记录。曾经创造了灿烂文化的中华民族，为世界天文学的发展做出了重要的贡献。当 1987 年，由中国天文学家独立研究和创造性发展的中国太阳磁场望远镜投入工作，中国的现代太阳研究开始步入国际前沿领域。在中国改革开放的今天，随着综合国力的增加，“发展空间天文，探索太阳奥妙”的新的任务，又历史地落在当代中国太阳物理学者的身上。这套丛书的撰写和出版，是中国太阳物理学家成熟的标志，也是中国太阳物理学家信心的象征。中国的太阳物理和日地物理工作者有能力抓住机遇，面临新世纪的挑战，为在科学技术领域再创辉煌做出自己的贡献。

艾国祥

1998 年 6 月

前 言

日冕物理是迅猛发展的太阳物理的一个重要分支学科。最近20多年来，随着观测手段和技术设备的不断更新和改进，尤其是行星际空间探测的发展，几个重要卫星相继投入观测，发现了发生于日冕的许多重要新活动现象，如日冕物质抛射、冕环以及冕洞等，而且日冕主要由冕环等组成，大部分辐射集中于冕环。这些新发现彻底改变了人们对传统均匀日冕的认识。这些活动日冕现象对日地空间物理和地球物理效应以及太空天气有着直接或间接的影响，而通过对它们的研究又促进了等离子体物理和磁流体力学等基本理论以及新技术的发展和应用。因此，这些领域的研究引起了人们的高度重视，具有很好的前景和实际应用及理论价值。

由于本学科发展迅速、内容繁多，限于篇幅，本书仅着重叙述一些最新的观测成果和基本理论方法以及研究结果，并给出有关的主要文献，供有兴趣的读者进一步研究时参考。

本书的出版得到了国家基金“九五”基础研究重大项目(19791090)的资助和艾国祥院士的大力支持，谨表衷心谢意。

由于作者水平有限，书中缺点和错误在所难免，敬请读者批评指正。

章振大

1999年4月于南京大学

目 录

第一章 概论	(1)
§ 1.1 日冕研究概况	(1)
§ 1.2 日冕辐射的特性	(6)
1.2.1 线辐射	(6)
1.2.2 日冕电离	(8)
1.2.3 发射光谱	(10)
1.2.4 日冕紫外连续辐射	(12)
1.2.5 日冕射电辐射	(13)
1.2.6 日冕元素丰度	(15)
§ 1.3 日冕电子密度	(17)
§ 1.4 日冕的温度	(21)
1.4.1 由电子密度径向分布求热运动温度	(21)
1.4.2 由电离理论求温度	(22)
1.4.3 由谱线宽度求日冕温度	(24)
1.4.4 由射电方法测定日冕温度	(25)
1.4.5 日冕温度分布	(25)
§ 1.5 日冕磁场	(27)
§ 1.6 日冕的结构	(31)
1.6.1 冕流	(32)
1.6.2 射线和极羽	(41)
第二章 等离子体环	(45)
§ 2.1 研究概况	(45)
§ 2.2 冷环的性质	(49)
2.2.1 H_{α} 线冷环的形态特性	(49)
2.2.2 EUV 线冷环的形态特性	(50)
2.2.3 H_{α} 线冷环的物理性质	(52)

2.2.4 EUV 线冷环的分析	(54)
§ 2.3 热环的性质	(60)
2.3.1 可见光谱区的观测	(60)
2.3.2 EUV 线的观测	(62)
2.3.3 X 射线的观测	(63)
2.3.4 射电波段的观测	(68)
2.3.5 热环的物理性质	(69)
§ 2.4 冕环的结构	(78)
2.4.1 MHD 近似	(80)
2.4.2 MHD 方程	(82)
2.4.3 环的稳定态结构	(86)
§ 2.5 冕环的热稳定性和动力学	(109)
2.5.1 冕环的热稳定性分析	(109)
2.5.2 冕环的动力学分析	(115)
2.5.3 MHD 稳定性分析	(120)
§ 2.6 耀斑冕环及其相互作用	(124)
2.6.1 耀斑环的观测性质	(125)
2.6.2 耀斑环的物理条件	(130)
2.6.3 耀斑冕环的相互作用	(136)
2.6.4 耀斑冕环相互作用的理论分析	(153)
第三章 日冕物质抛射 (CME)	(171)
§ 3.1 CME 的观测和形态学	(171)
3.1.1 CME 的观测研究	(171)
3.1.2 CME 的形态特征	(172)
3.1.3 CME 的速度, 质量和能量	(180)
3.1.4 CME 发生频率和分布	(193)
3.1.5 CME 的大小 (角宽度) 和位置	(200)
§ 3.2 CME 与太阳其他活动现象相关性	(205)
3.2.1 CME 与耀斑相关性	(205)
3.2.2 CME 与日珥的关系	(210)
3.2.3 CME 与射电爆发相关性	(212)
3.2.4 CME 与日冕大尺度结构相关性	(218)

§ 3.3 CME 的行星际效应	(224)
3.3.1 行星际激波与 CME 相关性	(224)
3.3.2 太阳高能粒子与 CME 关系	(228)
3.3.3 行星际 CME (ICME) 的探测	(237)
3.3.4 CME 与地磁暴关系	(241)
§ 3.4 关于 CME 与耀斑关系的争论	(246)
§ 3.5 CME 的理论研究	(264)
3.5.1 早期的 CME 模型研究	(265)
3.5.2 最近的 CME 模型研究	(279)
§ 3.6 CME 的预报	(320)
第四章 冕洞和太阳风	(332)
§ 4.1 冕洞	(332)
4.1.1 冕洞的形态特征	(333)
4.1.2 冕洞的密度和温度以及模型	(340)
4.1.3 冕洞磁场	(348)
4.1.4 冕洞的形成和演化	(352)
§ 4.2 日冕 X 射线亮点和喷流	(357)
4.2.1 X 射线亮点 (XBP)	(357)
4.2.2 喷流	(363)
§ 4.3 太阳风	(370)
4.3.1 太阳风的性质	(370)
4.3.2 太阳风中的磁场和波	(377)
4.3.3 太阳风理论研究	(384)
第五章 色球和日冕加热	(410)
§ 5.1 色球加热	(410)
5.1.1 色球辐射损耗	(410)
5.1.2 色球加热	(413)
§ 5.2 过渡区加热	(425)
5.2.1 能量平衡	(426)
5.2.2 过渡区的理论模型	(435)
§ 5.3 日冕加热	(437)
5.3.1 日冕能量平衡	(437)

5.3.2 日冕加热	(438)
参考文献	(487)
索引	(526)

第一章 概 论

§ 1.1 日冕研究概况

早在 2000 多年前(公元前 28 年),中国古代已有日食观测记录.1851 年首次在日食时成功进行了日冕照相.1931 年开始利用日冕仪在无日食时观测到日冕.1946 年首次由探空火箭观测到日冕高温辐射^[1].1957 年用卫星探测到行星际介质.在 1969 年以前,人们只能在日食时或利用高山日冕仪通过自由电子的汤姆孙散射了解日冕的性质,从 70 年代起开始采用高分辨率仪器在地面上和卫星上观测日冕,如 Skylab (1973 ~ 1974), Helios (1975 ~ 1983), P78-1 Solwind (1979 ~ 1985), SMM (Solar Maximum Mission, 1980 ~ 1989), Yohkoh (阳光, 1991 ~), SOHO (Solar and Heliospheric Observatory, 1995 ~) 和 TRACE (Transition Region and Coronal Explorer, 1997 ~) 等,带着配套仪器进行观测,对从太阳内部到太阳风作综合研究,以及利用软和硬 X 射线成像研究日冕活动等,开辟了探索日冕的新时代.

日冕是太阳大气的最外层,从过渡区顶部向外延伸到几个太阳半径($R_{\odot}$),甚至更远.它可分为内冕和外冕,内冕只延伸到离太阳表面大约 $0.3R_{\odot}$ 处,而外冕则可达到几个 $R_{\odot}$ 以外.日冕由很稀薄的完全电离的高温等离子体组成,其中主要是质子、高度电离的离子和高速的自由电子.

日冕辐射的波段很宽,从短于 $1\text{\AA}$ 的 X 射线、紫外线、可见光到波长百米的射电波,但辐射主要集中在紫外和 X 射线波段,以及从几千电子伏到几吉电子伏的粒子辐射谱.因此必须采用能接受不同辐射的各种仪器进行观测,它们包括了复杂的空间探测仪器,巨大的射电望远镜和高山日冕仪等;同时也利用每次日食机会

进行观测.封面彩图是 1997 年 3 月 9 日日食时(中国漠河)的日冕彩色照片(苏州天文站梅苞提供),图 1.1 是一般日冕白光照片.这种白光图像能很好地显示日冕的密度分布,因为被观测到的光是线性地与自由电子数有关,因而与沿视线方向累积的等离子体密度有关.

在 Lyot 于 1931 年发明日冕仪以前,人们只能在日全食时观测到日冕,因为它的亮度仅约为光球的百万分之一.在平时地面上大气的散射光和观测仪器的散射光,会大大地超过日冕本身的亮度而将它淹没掉.在日全食时,落在地球的月影使天空亮度大大减弱,在暗月边周围出现的日冕很容易观测.平时要观测日冕,必须采用能最大限度地消除散射光的日冕仪.一般在海拔 3000m 左右高山上,当天空晴朗时,太阳附近的天空亮度可低达日面亮度的 10^{-5} .在这种条件下,用日冕仪可观测到内冕;或者附上特殊单色滤光器,如光学发射线:Fe XIV $\lambda 5303\text{\AA}$ (形成温度约为 $2 \times 10^6\text{K}$), Fe X $\lambda 6374\text{\AA}$ (形成温度约为 10^6K)和 Ca XV $\lambda 5694\text{\AA}$ (形成温度约为 $4 \times 10^6\text{K}$)等,可观测到日冕结构细节,如冕环等.同时,日冕连续辐射有很大的偏振度,可用白光日冕仪或 K 冕计看到偏振的日冕连续谱和日冕物质抛射等.

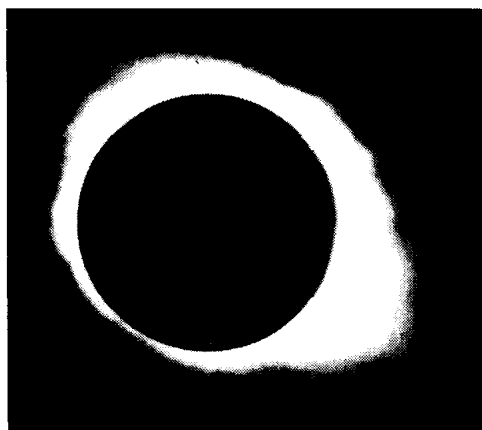


图 1.1 日冕白光照相
(美国萨克峰天文台提供)

随着空间探测事业的发展,人们已将日冕仪和 X 射线望远镜等放在卫星、火箭和气球等运载工具上,从事大气外的观测,以避免低层大气的灰雾、湍流和潮湿等的影响.这样,不仅可观测日冕的可见光波段和射电波段,而且能对 UV、EUV 和 X 射线辐射进行探测;同时也可在行星际空间对太阳风取样.

在 $\lambda 1000\text{\AA}$ 附近,太阳连续谱的亮度大约是 $\lambda 5000\text{\AA}$ 左右的亮度的 10^{-6} ,而在离日心 $1.1R_{\odot}$ 处日冕亮度也约为可见日冕亮度的 10^{-6} .因此日食时在 $\lambda 5000\text{\AA}$ 的内冕亮度与在 $\lambda 1000\text{\AA}$ (地球大气外)日面亮度几乎相同.日冕较强发射线的亮度约为每单位波长连续谱亮度的 $10^2 \sim 10^3$ 倍,这样它们就容易在连续谱上被观测到.

同色球层相比,日冕在光谱的可见区更加透明,辐射更弱,因而不可能在可见光谱区对着日轮上日冕进行观测.在 EUV 和 X 射线波段,某些强线的日冕光学厚度很大,这就可能用 EUV 和 X 射线看到日面上的日冕,并且出现临边增亮现象.图 1.2 是日冕的 X 光照相,取自文献[2].一般利用 X 射线图像可看到环,亮点和冕洞等重要的特征结构.

在辐射谱的另一端,即射电波段也可观测到日冕,因为日冕在射电波再次变为不透明的(光学厚);而且辐射的发射和吸收主要是由电子引起的,其辐射特征与 10^6K 平衡辐射分布在长波端的特征相同.如同在 EUV 和 X 射线谱一样,在射电波段也出现临边增亮现象,太阳的大小也比光球圆面大,而且也可由不同波长的观测推求大气不同高度的物理性质.然而当所用的射电波长愈长时,要想得到与短波长同样的分辨率,观测仪器所需的孔径就愈大.所以由于射电望远镜孔径和空间探测器稳定性的限制,使得它们的分辨率比可见区要差些,从而导致射电资料和 EUV 及 X 射线资料也受到一些限制.即它们只能显示较大尺度的结构和小的孤立结构的平均结果.不过由甚大阵(VLA)高分辨率射电辐射所得出的最新图像也显示出冕洞、亮点和活动区上空的增强等,这证实了 X 射线所得的结果.

此外,日冕是地球物理和空间现象的最重要辐射源.与色球层



图 1.2 1991 年 11 月 29 日阳光卫星软 X 射线望远镜所观测到日冕 X 光照相^[2]

一样,它是大尺度等离子体,并被磁场所渗透和被来自下面的波能流或磁能的耗散而加热到百万度高温的.日冕等离子体的热能密度与色球层在量级上相当,并在其中常常观测到磁场与等离子体之间、原先存在的磁场与从下面浮现的磁场之间复杂的相互作用.在日冕中经常有许多不稳定现象,例如日冕物质抛射;在强场区常发生耀斑;冕环的相互作用;沿着磁场中性线以及在强场两极附近,日冕物质可凝聚成较冷而密的日珥;日冕高温导致其等离子体向外膨胀而形成扫过地球的太阳风等等.这些以及其他类似现象

显示出极其复杂的等离子体现象.现在人们已经能够在很宽的电磁谱范围对日冕进行观测研究了;所采用仪器的空间分辨率可达到1角秒以下,获得了日冕等离子体现象的分光和形态的许多重要信息.同时,在理论上最重要的进展是阿尔文(Alfven)于20世纪40年代所发现的高导电流体中磁场与流场的耦合,从而把磁流体力学和等离子体物理理论用来研究日冕,并采用大型计算机进行数值模拟,这些都对许多日冕活动现象本质的阐明起了重要的作用.

不过我们还必须看到,虽然最近对日冕的研究取得了不少进展,但若干基本问题仍未解决.例如,日冕物质抛射现象,人们已越来越认识到它的重要性和对行星际物理及地球物理的重大影响,但由于观测资料的限制,对其起源和驱动机制以及演化特征等远未弄清楚.日冕的加热问题,早期认为日冕是由光球之下对流层产生的声波能流所加热,但由OSO-8飞船进行的分光观测表明,所需的声能流并不存在于高色球层;而日冕是由磁流波能流或电流或一连串小磁重联事件(如微耀斑和纤耀斑)所加热,仍是一个未决的问题;太阳耀斑可能产生于日冕低层,最近的观测资料显示,它们可能由活动区磁环(冕环)的相互作用所引起,或由单磁环的扭转而产生,或是由原先存在于日冕的磁场与从下面浮现磁场的相互作用而触发的,这些都有待于观测和理论研究进一步加以证实.但必须指出的是上述未决难题都与磁场密切相关,而遗憾的是到目前为止尚不能用光学方法直接测定日冕磁场,只能用射电方法间接推出,因而大大增加了问题解决的难度.

太阳风起源也是日冕研究领域未搞清楚的问题之一.按照早期的理论,太阳风是日冕高温膨胀的直接结果.尽管日冕能够产生太阳风,但这种简单理论不能解释太阳风稳定参数或这些参数的变化以及高速风.现在似已肯定,日冕物质抛射对太阳风有重要的贡献,而高速风主要来自开放场的冕洞区.显然太阳风的结构不仅取决于磁场结构,而且也依赖于不同的非热过程.因此目前的理论研究都采用一些可能的非热机制,这些机制能把另外的能量和

动量注入到太阳风中去,而导致在地球附近所探测到的风速和其他数据.

所有上述日冕问题和最近有关活动日冕的研究进展,我们将在下面几章中比较详细地讨论,而本章仅简要说明一些比较宁静的现象.第二章讨论日冕等离子体环,第三章描述日冕物质抛射,第四章为冕洞和太阳风,而第五章论述色球层和日冕加热.

§ 1.2 日冕辐射的特性

日冕的辐射是在高度非局部热动平衡状态下产生的,大致有以下几种:(1)日冕气体中的自由电子散射光球辐射而产生的连续辐射,即白光日冕;(2)电子在热运动中与质子、 α 粒子及各种重离子碰撞时,产生的韧致辐射;(3)处于亚稳态的离子的禁戒跃迁,是日冕禁线的来源;(4)当电子在磁场中运动时,产生回旋加速辐射或同步加速辐射,这种过程对于日冕的射电辐射是很重要的;(5)在日冕等离子体的静电振荡和阿尔文波等过程中也发出辐射.

在地面上观测到的日冕光谱由内冕光谱和外冕光谱所组成.内冕光谱包括上述的自由电子散射光球辐射的连续光谱和高度电离离子的禁线(全是发射线),而完全看不到吸收线.外冕光谱主要是行星际空间的尘埃粒子散射光球光谱,属于吸收光谱,谱线的宽度等于光球相应谱线的宽度,而深度则小得多.

日冕的辐射包含有重要的信息.每一种元素的不同级次的电离产生了从可见光区到X射线波段的发射谱,而每一种电离级次又与具有维持该级次的电离条件的区域相对应,这就使人们能以较高的空间分辨率来确定其温度和密度的不均匀性.但由于各种元素的电离级次范围都较宽且存在着不均匀性,使问题变得相当复杂.下面简要谈一下日冕的线辐射和电离以及连续辐射等.

1.2.1 线辐射

为了决定离子从某一激发态所产生的线辐射强度,必须通过

讨论所包含的细致平衡过程的速率来定出处于该激态的粒子数密度.所谓细致平衡即进入某一能态的粒子数等于离开该能态的数目.图 1.3 表示日冕离子两个能态之间跃迁平衡的过程,其中 R_{12} 是在较低态 1 的离子吸收了辐射之后跃迁到能态 2 的跃迁率; $n_e C_{12}$ 是相应的碰撞跃迁率, n_e 为电子密度.由于电子的热速度很大,其相应的碰撞频率也高,一般认为离子与电子的碰撞才是重要的. A_{21} 是每个离子由于自发辐射而从能态 2 至能态 1 的跃迁率. $n_e C_{21}$ 是每个离子由于碰撞而从能态 2 至能态 1 的跃迁率.在这种细致平衡中,设 $2 \rightarrow 1$ 态跃迁率正比于 $1 \rightarrow 2$ 态的跃迁率,其中忽略了从更高态至 2 态的跃迁.由于离子在各个激态的密度较低,这是一个合理的假设.

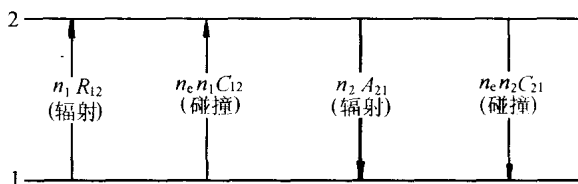


图 1.3 一种离子的二能态的辐射和碰撞平衡

在高密度情况下,能态间的平衡主要由碰撞过程所控制:

$$n_1 C_{12} \approx n_2 C_{21}, \quad (1.1)$$

其中 n_1 和 n_2 分别为处于能态 1 和 2 的离子数密度.在日冕的情况,辐射强度足够低,使得 $R_{12} \ll n_e C_{12}$,而气体密度也低到使 $n_e C_{21} \ll A_{21}$,因而有

$$n_e n_1 C_{12} \approx n_2 A_{21}. \quad (1.2)$$

由于包括 n_1 在内的所有能态的数密度与总气体密度成正比,而后者又正比于 n_e ,故单位体积自发辐射跃迁率正比于 n_e^2 ,而不是与 n_e 成正比.从日冕向外到达 $n_e C_{12} \ll R_{12}$ 处,由于引起 R_{12} 的辐射一般是在大气较低层产生的,因而有

$$n_1 R_{12} \approx n_2 A_{21}. \quad (1.3)$$

尽管在分析中必须考虑非局部热动平衡中的每一过程,但通过与热动平衡情况的比较,可看出各种跃迁系数有相互联系.例如,在热动平衡时(图 1.3),不仅向下的总跃迁率与向上的总跃迁率相平衡,而且碰撞跃迁率也与辐射跃迁率相平衡,即

$$\frac{R_{12}}{A_{21}} = \frac{n_1}{n_2}, \quad (1.4)$$

$$\frac{C_{12}}{C_{21}} = \frac{n_2}{n_1}, \quad (1.5)$$

此处 R_{12} 中的辐射强度与密度之间的比值等于对应于单一温度的平衡值,而辐射强度由普朗克公式给出:

$$I_\lambda = \frac{2hc^2}{\lambda^5} [\exp(hc/RT\lambda) - 1]^{-1}, \quad (1.6)$$

而密度比值则由玻尔兹曼分布给出:

$$\frac{n_u}{n_l} = \frac{g_u}{g_l} \exp[-(E_u - E_l)/kT]. \quad (1.7)$$

式中符号具有通常的意义,不再赘述.在非局部热动平衡中,由于气体密度和辐射强度很低,使能态 1 的离子至 2 态的跃迁率 $(n_e C_{12} + R_{12})$ 远小于与热运动温度相对应的平衡时的跃迁率.可是能态 2 的离子向下的跃迁率 A_{21} 却同密度及辐射无关.这样与热动平衡相比,基态粒子相对于较高能态而言是过剩的.

1.2.2 日冕电离

在讨论电离的复合时,可看出日冕对热动平衡的偏离很大,这是因辐射强度小,日冕的电离是由电子碰撞而非由光致电离引起的.如图 1.4 所示,在平衡状态下,电离被复合所平衡,电子与离子的这种复合是由第二个电子将电离能带走,单位体积中这种过程的复合率与密度的立方成正比.由于日冕密度低,很难进行这种复合,实际上常伴随有过剩能量发射的光致复合.因为日冕对产生于其中的 EUV 和 X 射线辐射是光学薄的,故对激发和电离而言,存在着从电子到高能辐射能流直接向空间发射的情况,这表示日冕