



 Springer

*Characterizing Stellar
and Exoplanetary Environments*

恒星 (和) 系外行星 环境表征

[奥] Helmut Lammer (赫尔穆特·拉默) 著

[奥] Maxim Khodachenko (马克西姆·霍达琴科)

沈自才 丁义刚 刘宇明 译

代 巍 刘业楠 校



国防工业出版社
National Defense Industry Press



装备科技译著出版基金

恒星和系外行星 环境表征

Characterizing Stellar and Exoplanetary Environments

[奥地利] Helmut Lammer 著
[奥地利] Maxim Khodachenko

沈自才 丁义刚 刘宇明 译
代巍 刘业楠 校



国防工业出版社

• 北京 •

著作权合同登记 图字：军-2018-017 号

图书在版编目 (CIP) 数据

恒星和系外行星环境表征 / (奥) 赫尔穆特·拉默 (Helmut Lammer), (奥) 马克西姆·霍达琴科 (Maxim Khodachenko) 著; 沈自才, 丁义刚, 刘宇明译. —北京: 国防工业出版社, 2019.1

书名原文: Characterizing Stellar and Exoplanetary Environments
ISBN 978-7-118-11643-4

I. ①恒… II. ①赫… ②马… ③沈… ④丁… ⑤刘… III. ①恒星—地外环境 ②行星—地外环境 IV. ①P152 ②P185

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 214861 号

Translation from the English language edition:

Characterizing Stellar and Exoplanetary Environments

edited by Helmut Lammer and Maxim Khodachenko

Copyright © Springer International Publishing Switzerland 2015

This Springer imprint is published by Springer Nature

The registered company is Springer International Publishing AG

All Rights Reserved

本书简体中文版由 Springer 授权国防工业出版社独家出版发行。
版权所有, 侵权必究。

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

三河市腾飞印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 17½ 字数 205 千字

2019 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—1500 册 定价 129.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 68428422

发行邮购: (010) 68414474

发行传真: (010) 68411535

发行业务: (010) 68472764

前言

目前，天体物理学和空间科学中，系外行星学是发展最快的领域之一。在发现第一个太阳系外的类木型气体巨行星 51Peg b 的 19 年后，已经观测到超过 1100 个系外行星。尽管大多数已经发现的系外行星是基于径向测速法发现的，近来有越来越多体积从稍大于地球到稍小于海王星以及类木型气体巨行星的系外行星，则是利用经纬仪探测技术观测到的。这些行星的发现得益于若干国际地基转移观测项目，以及 CoRoT（对流、自转和行星凌星）项目/望远镜和开普勒空间天文台的能力。距离主恒星不大于 0.05AU 的系外行星的探测引发一系列问题：这些行星的大气结构，它们与极端恒星辐射及等离子体环境的相互作用，可能存在的磁层对大气层的保护作用，主恒星和行星间的破坏性潮汐引力，等离子体圆环面的形成，呈彗星状逃逸的行星等离子体尾迹，以及其上层大气在热致或非热致质损过程中的稳定性，等。系外行星之主恒星的光谱特性和瞬态行为关系到对行星大气化学反应和大气进化过程的建模。由于这种关系，下面将讨论为深入理解矮星紫外光谱，采用观测和理论手段进行的最新研究。

本书陈述了哈勃太空望远镜在紫外谱段对于系外行星观测结果的分析，以及用于表征行星上层大气结构和恒星环境的高级数值模型的应用。除了哈勃太空望远镜的观测之外，还将对 NASA 的斯皮策（Spitzer）望远镜在红外谱段发现的热木星的二次红外日蚀中的大气分子和原子进行讨论。这类观测有助于利用顶层大气流体动力学经验模型来表征低热层的温度结构。轨道位置小于 0.1AU 的富氢系外行星的顶层大气 - 磁层 - 等离子体环境观测和表征可用于理解顶层大气的非静力状态、识别磁障和验证复杂数值模型。

本书各篇章横跨不同领域而又有机联系，诸位作者来自于“通过观测和先进建模技术表征恒星和系外行星环境”的研究小组。该小组得到总部位于瑞士伯尔尼的国际空间科学机构（ISSI）的支持，在过去两年一直从事有关过程的研究。这些学者的研究结果表明，对系外行星在极端恒星辐射和等离子体环境下行为的研究，同样有助于行星学界理解类地行星（包括早期的金星、地球、火星）及其大气在太阳寿命之初的活跃期是如何演化的。这些观测、理论研究和发现对下

一代空间望远镜的研究内容具有及时而重要的启示，这些望远镜包括即将配备远红外和中红外光谱探测装置的詹姆斯·韦伯空间望远镜（JWST），ESA 的“表征系外行星卫星”（CHEOPS）任务，欧洲的“下一代行星发现者”（PLATO 2.0），以及 NASA 的“凌星系外行星卫星调查”（TESS）任务，俄罗斯主导的国际紫外天文台项目“世界空间观测-UV”（WSO-UV）和计划中的欧洲天体测量任务“近地空间天体测量望远镜”（NEAD），等。

Helmut Lammer

Maxim L. Khodachenko

第 1 篇 系外行星主星辐射和等离子体环境

第 1 章 系外行星主星辐射和等离子体环境	2
1.1 引言:短波辐射与行星大气的关联性	2
1.2 紫外辐射	4
1.3 极紫外辐射	7
1.4 X 射线辐射	10
1.5 本章小结	13
参考文献	13
第 2 章 随时间变化的恒星风	17
2.1 引言:风与星冕的联系	17
2.2 恒星风观测的限制	19
2.2.1 直接探测技术的上限	19
2.2.2 从中心球吸收进行的恒星风测量	19
2.2.3 T 金牛星的恒星风	25
2.3 理论模型的预期结果	26
2.4 本章小结	27
参考文献	28
第 3 章 主星行星的磁场和风	32
3.1 引言:恒星磁场	32
3.2 分析恒星磁场使用的技术	33
3.2.1 塞曼展宽和分光偏振测定术	33
3.2.2 塞曼多普勒成像	34
3.3 低质量主序星的旋转和磁性	34
3.3.1 太阳	34
3.3.2 类日恒星	35

3.3.3	M 矮星	36
3.3.4	旋转和磁性	36
3.4	低质量主序前星	37
3.5	恒星磁场发射的恒星风	39
3.5.1	恒星磁场和活动	39
3.5.2	恒星风	40
3.6	本章小结	43
	参考文献	44

第 2 篇 系外行星上层大气和恒星的相互作用：观测结果和模型

第 4 章	系外行星大气和周边环境的观测	50
4.1	引言：系外行星大气	50
4.2	热木星大气最深的观测层	51
4.2.1	热层中的热传输	51
4.2.2	向阳面发射光谱	51
4.2.3	云、霾和极光	52
4.2.4	碱金属特征	52
4.2.5	巴尔末线	53
4.3	热木星外层大气的透射光谱	53
4.3.1	远紫外观测	53
4.3.2	近紫外观测结果	58
4.3.3	早期入凌	60
4.3.4	HD189733b 凌星的 X 射线观测	60
4.4	WASP-12:被遮蔽的行星系统	60
4.5	恒星与行星的相互作用	62
4.6	本章小结	63
	参考文献	64
第 5 章	热木星大气的类型	70
5.1	引言:系外行星气体壳层	70
5.2	宿主恒星的重力引发的热木星大气外流	71
5.3	热木星大气层与恒星风的相互作用	74

5.4	热木星壳层的分类	77
5.5	从三维数值模拟得到的热木星大气层的形状	81
5.6	本章小结	86
	参考文献	87
第6章	系外行星受 XUV 加热并膨胀的大气层中的超热粒子	90
6.1	引言:高层大气短波辐射效应	90
6.2	系外行星高层大气超热原子的高层大气物理学	91
6.3	热木星 HD 209458b 膨胀大气层中的超热粒子	97
6.4	以氢气为主的系外行星高层大气的加热效率	99
6.5	原子氢的超热部分	106
6.6	本章小结	112
	参考文献	113
第7章	恒星对系外富氢类地行星、超地球行星大气演化的驱动作用	117
7.1	引言:富氢类地系外行星	117
7.2	热逃逸	119
7.3	离子加速	124
7.4	本章小结	127
	参考文献	128
第8章	对 WASP-12b 星近紫外观测结果的解释	131
8.1	引言:WASP-12b,蒸发中的热木星	131
8.2	环绕行星磁障的弓激波	133
8.3	WASP-12b 星及其宿主恒星之间相互作用的气体动力学仿真	137
8.4	本章小结	141
	参考文献	142
第9章	近区外行星对其宿主星的影响	144
9.1	引言:热木星诱发的恒星活动	144
9.2	由近区行星引起的色球活动增强与黑子面积增加	145
9.3	弓激波	151
9.4	行星是否可以影响恒星旋转	152
9.5	行星吞噬	153
9.6	本章小结	156
	参考文献	156

第3篇 系外行星和天体物理磁场

第10章 从太阳系行星/卫星到系外行星的磁层环境	164
10.1 引言;磁层	164
10.2 地球、木星、土星的磁层	165
10.3 抛物面模型在热木星磁层中的应用	175
10.4 本章小结	179
参考文献	182
第11章 系外行星磁场的探测方法和实用性	185
11.1 引言;行星磁场	185
11.2 磁场对气态巨行星的效应	186
11.3 磁场对类地行星的效应	195
11.4 本章小结	200
参考文献	201
第12章 阿尔芬半径:天体物理磁层的关键参数	208
12.1 引言;阿尔芬半径和天体物理磁环境	208
12.2 在磁化行星磁层中的非局域阿尔芬半径	209
12.3 有磁盘的磁化行星磁层中的阿尔芬半径	212
12.4 磁化恒星磁层中的阿尔芬半径	213
12.5 强磁场下致密物体磁层中的阿尔芬半径	213
12.6 本章小结	215
参考文献	216

第4篇 天基和地基系外行星观测与表征工具

第13章 与星同在:未来天基系外行星搜寻和表征任务	220
13.1 背景介绍	220
13.2 当前和不久的将来的天基观测任务	226
13.3 ESA 下阶段任务:PLATO 2.0	232
13.4 NASA 下阶段任务:WFIRST, 星冕成像仪和遮光体	234
13.5 更远未来的任务:达尔文, TPE 和新世界探测	235
13.6 本章小结	236
参考文献	236

第 14 章	系外行星科学研究的工具：世界空间天文台——紫外工程	239
14.1	引言：HST 之后的紫外系外行星天文学	239
14.2	WSO-UV 任务	240
14.3	WUVS；WSO-UV 光谱仪	241
14.4	WSO-UV 和 HST 光谱仪效率对比	242
14.5	ISSIS；探测用成像和无缝光谱仪	243
14.6	WSO-UV 轨道	244
14.7	WSO-UV 科学管理计划	245
14.8	2014 年 WSO-UV 项目进展状态	246
14.9	WSO-UV 地面站	247
14.10	本章小结	248
	参考文献	249
第 15 章	地基系外行星项目	251
15.1	引言：地基系外行星研究	251
15.2	径向速度测量	251
15.3	直接成像和干涉仪法	260
15.4	天体测量学、偏振测量法、微透镜法	262
15.5	本章小结	263
	参考文献	263

系外行星主星辐射和等离子体环境

导致行星大气演化并适宜居住的过程，不能脱离行星主星寿命期内其辐射、等离子体和磁场环境的演化而单独考虑。下面对系外行星的主恒星自到达零龄主序起的紫外、极紫外和 X 射线通量、恒星风和它们的磁结构的活动性进行讨论。

第 1 章 系外行星主星辐射和等离子体环境

主星的辐射控制了行星的能量平衡、行星大气层中的光化学过程以及大气外层的质量损失。恒星的光学和红外 (IR) 辐射作为行星表面和低层大气能量的主要来源, 在恒星从零龄主序演化起缓慢增加。紫外辐射, 包括支配了 M 矮星紫外辐射 (UV) 光谱的拉曼 (Lyman) - α 射线, 控制了 H_2O 、 CO_2 和 CH_4 等重要分子的光化学反应。主星的极紫外和 X 射线使得行星的外层大气电离并加热, 对于近距离的类似木星的行星所造成的质量损失是很快速的。恒星的紫外辐射、极紫外辐射 (EUV) 和 X 射线辐射的强度依赖于恒星活性, 这种活性当恒星旋转降低时随时间而衰减。这样一来, 系外行星大气层的演变取决于它的主星演化。我们对可用于测量或预估具有不同光谱类型和时代的主星的 X 射线 (X-ray)、EUV 和 UV 的可用技术进行了总结。

1.1 引言: 短波辐射与行星大气的关联性

利用径向速度、经纬和成像技术发现了许多太阳系外行星 (系外行星) (参见第 13 章 ~ 第 15 章) 促进了表征其大气的化学和物理特性的观测和理论研究 (参见第 4 章), 以及这些系外行星能否维持生命形式的研究 (Kasting 和 Catling, 2003; Seager 和 Deming, 2010)。由于系外行星的大气密度随高度上升而下降, 光解作用 (分子的光解离和原子的光致电离) 将最终支配热平衡的化学反应。这种变化通常发生在大气压力小于 1mbar ($1\text{bar} = 10^5\text{Pa}$) 的高度。光化学模型现已用于计算类地行星和超级行星 (Segura 等, 2005; Kaltenegger 等, 2011; Hu 等, 2012)、热海王星 (Line 等, 2011) 和热木星 (Kopparapu 等, 2012; Moses 等, 2013; Line 等, 2010)。波长低于 170nm 的远紫外辐射 (FUV), 特别是非常明亮的拉曼 - α 射线 (121.6nm), 控制了如 H_2O 、 CO_2 和 CH_4 等重要分子的光解离, 这样可以增加氧的混合比 (Tian 等, 2014)。臭氧 (O_3) 被称为超地行星大气的潜在生物特征 (Segura 等, 2005, 2010; Grenfell 等, 2012), 但对 O_2 的光分解及随后的化学反应而不是生物过程控制其丰度的程度进行评估是很重要的 (Tian 等, 2014)。需要基于现实主恒星的紫外线辐射, 包括固有的拉曼 - α 射线通量的未来的光化学模型来解决提出的生物特征和大气化学丰度的可靠性问题。近期的模型, 如上面引述的模型, 表明了碳与氧的比率、淬火反应、热结构和扩

散在确定系外行星大气中的重要分子的混合比例起了重要作用，但主星的短波辐射是至关重要的。

恒星紫外光谱由发射线和大气中不同高度下宽温度范围内的连续谱组成。波长范围 170 ~ 320nm 的称为近紫外辐射（NUV），波长范围 91.2 ~ 170nm 的称为远紫外辐射（FUV），波长范围 10 ~ 91.2nm 的称为极紫外辐射，10nm 以下的范围称为 X 射线。之所以选择 170nm 作为 NUV 和 FUV 之间的区分，是因为在此波长之上的光球发射通常占主导地位，而在这个波长之下色球辐射占主导地位。另外，170 ~ 320nm 波长范围对 O₂ 和 O₃ 的光化学反应是很重要的，而 H₂O、CO、CO₂ 和 CH₄ 之类重要分子的光化学反应主要由波长低于 170nm 的辐射控制。由于氢的光致电离由波长低于 91.2nm 的辐射引发，很自然地定义 EUV 波长范围为 10 ~ 91.2nm。宁静期太阳的 X 射线和极紫外谱如图 1.1 所示，图中给出了一些重要的谱线和连续谱。

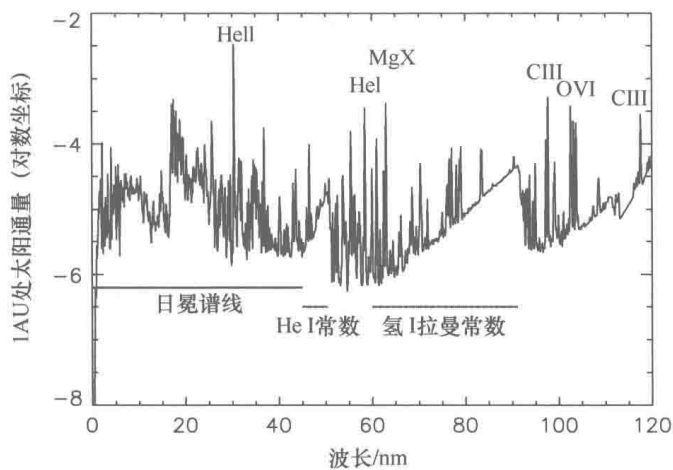


图 1.1 太阳活动极小期（2008 年 3 月和 4 月）获得的太阳辐照度参考光谱（SIRS）
（Linsky 等，2014）

注：1AU 处太阳通量单位为 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$ 。图中标出了重要的发射线和连续谱。

光学涂层的反射率在确定哪些仪器能胜任在这些光谱区的观察起着重要的作用。哈勃太空望远镜（HST）上的空间望远镜成像光谱仪（STIS）和宇宙起源光谱仪（COS）仪器中使用的氟化镁镀膜光学器件在 117nm 以下的反射率迅速下降。这些仪器广泛用于 NUV 和 FUV 光谱仪。在更短的波长，就必须使用具有远紫外光谱仪探索者（FUSE）航天器上的 LiF 或 SiC 镀膜光学系统的法向入射光谱仪，或者在极外探索者（EUVE）航天器和 X 射线观测上使用的掠入射光学系统。在这两种情况下，光通量远小于 HST 摄谱仪。

1.2 紫外辐射

国际紫外探测卫星 (IUE) 提供了 F-M 矮星的第一个高分辨力紫外光谱, 而 HST 的光谱仪, 特别是高通量宇宙起源光谱仪, 提供了包含 M 矮星的暗星光谱。这些数据可以从用于空间望远镜的米库尔斯基档案 (MAST)^① 下载。艾尔斯 (2010) 创建了覆盖 117 ~ 320nm 波长范围的单独校准 HST 恒星光谱的 StarCAT^② 档案。这对 F、G 和 K 矮星是一个有价值的档案, 但只包含少量 M 矮星。

为建立 M 矮星主星^③的紫外光谱的档案, France 等 (2012, 2013) 获得了 GJ436 (M3.5V)、GJ667C (M1.5V)、GJ581 (M5.0V)、GJ832 (M1.5)、GJ876 (M5.0V) 和 GJ1214 (M4.5) 的 COS 谱。在恒星的可居住区看到的 GJ876 和太阳平静期的光谱的比较 (图 1.2) 给出了一个重要结果。相对不活跃的 GJ876 的 NUV 光谱只有太阳的四分之一, 这是由 M 矮星低得多的光球区温度造成的, 而 NUV 光谱主要在这一区域形成, 在这种低温下短波辐射与温度呈指数关系。此外, M 矮星的 FUV 光谱, 特别是波长低于 150nm 的部分, 在通量上可与太阳光谱相比。这是因为, FUV 光谱在色球中形成, 发射取决于磁加热速度, 而不是恒星有效温度。由于 GJ876 和其他观察到的 M 矮星主星的 NUV 辐射微弱, 而可居住带的系外行星观测到的 FUV 辐射与地球上看到的太阳一样明亮, M 矮星主星的 FUV 谱必然包含在系外行星大气的光化学计算中。对 M 矮星, 光解离 CO₂ 和 H₂O 形成 O 的强 FUV 辐射与光解离 O₂ 和 O₃ 的弱 NUV 辐射的结合, 提供了系外

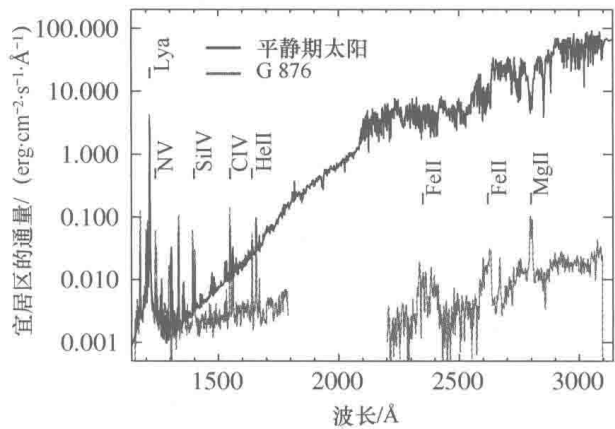


图 1.2 从恒星可居住区 (太阳为 1AU, GJ876 为 0.21AU) 看到的太阳和 M 矮星 GJ876 的 FUV 和 NUV 光通量的比较 (France 等, 2012) (1erg = 10⁻⁷J)

注: NUV 辐射 (170 ~ 320nm) 由恒星光球层发射, FUV 辐射 (117 ~ 170nm) 由恒星色球层发射。

① <http://mast.stsci.edu>.
② <http://casa.colorado.edu/~ayres/StarCAT/>.
③ <http://cos.colorado.edu/~keviof/muscles.html>.

行星大气层中产生显著的氧的非生物路径。在此基础上，France 等（2013）和 Tian 等（2014）认为，系外行星的大气中氧或臭氧的探测不足以作为有效的生物标志。以前 Canuto 等（1982，1983）也讨论过这一点。

太阳光谱中最明亮的发射线中的很大一部分是拉曼 - α 射线 ($\lambda=121.6\text{nm}$)。这也是 F-M 矮星最亮的发射线，但星际介质的中性氢吸收去除了大部分的固有恒星通量。Wood 等（2005）开发了一种技术，能利用从氘拉曼 - α 射线和其他星际氢吸收线获得的星际氢的体密度和速度信息重建固有拉曼 - α 射线剖面。France 等（2013）开发了一种替代技术来解决星际吸收和固有拉曼 - α 射线剖面这两个问题。如图 1.3 所示，在恒星际介质（ISM）沿朝向恒星的视线的运动性能相对简单时，这种方法提供了可信的固有拉曼 - α 射线流量（Redfield 和 Linsky，2008）。甚至当没有观察到要重建的拉曼 - α 射线剖面时，Linsky 等（2013）证实，可以利用不受星际吸收影响的其他发射线的流量或者恒星光谱类型和诸如旋转速率之类恒星活动的测量来估算固有拉曼 - α 射线的流量，但结果不确定性稍大。

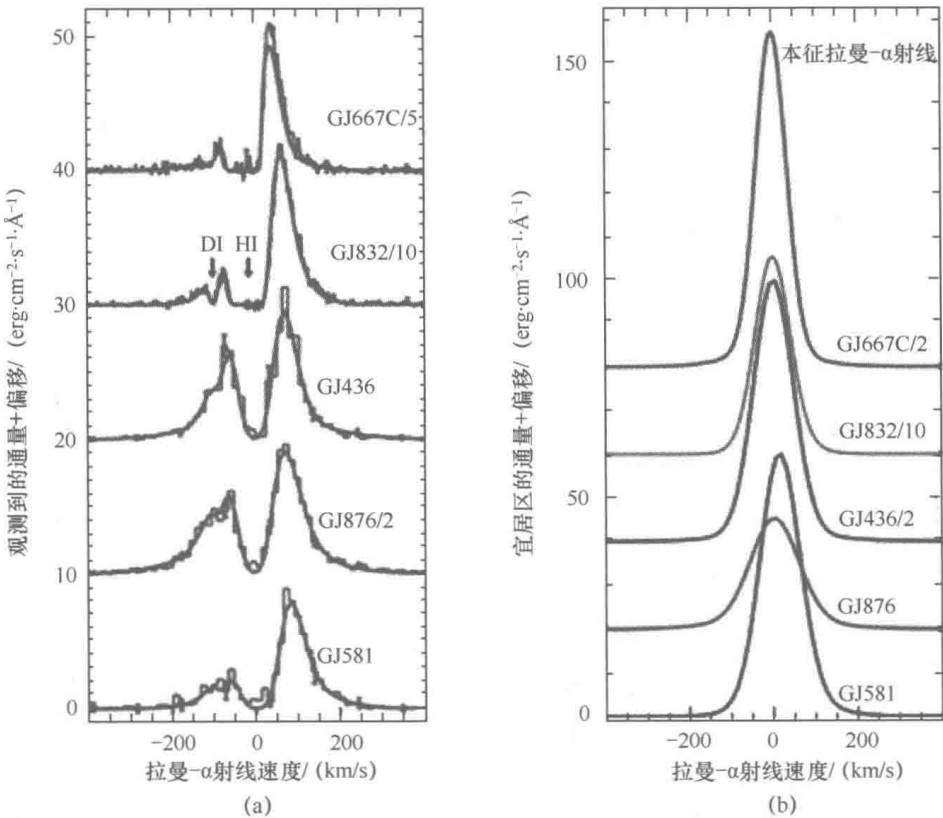


图 1.3 5 颗 M 矮星主星的拉曼 - α 射线剖面观测结果和重建结果的比较（France 等，2013）

注：光谱分别偏离了 $10\text{erg} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ （图（a））和 $20\text{erg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ （图（b））。

拉曼 - α 射线通量在系外行星外层大气的光化学作用中起着极为重要的作

用，因为这条发射线非常明亮，而系外行星大气中的 H_2O 、 CO_2 、 CH_4 、 C_2H_2 以及其他重要分子的光解离截面在 FUV 波段非常高 (Ribas 等, 2010)。在太阳的可居住区，拉曼 - α 线通量占 115 ~ 121nm 与 122 ~ 179nm 总的光通量的 30%，但在 M 矮星 GJ876 的可居住区，这一通量是其余 FUV 光通量的 2.3 倍，几乎与整个 FUV 和 NUV 的通量一样大 (France 等, 2012)。

太阳型 (早期 G) 矮星在主星序内变老时，其紫外辐射线和连续谱随恒星旋转速度、磁场的动态放大和色球的磁加热的下降而下降 (Linsky 等, 2012)。Ayres (1997)、Ribas 等 (2005, 2010) 以及 Claire 等 (2012) 已经使用了观测到的不同年龄和不同旋转速度的太阳型恒星的紫外辐射，来确定紫外辐射放大比例与从零龄主序开始的恒星年龄 τ (Gyr) 和旋转速度的关系。例如，Claire 等 (2012) 确定 150 ~ 215nm 的光通量按 10nm 波段遵循指数规律 $F = \alpha \tau^\beta$ ，其中 α 、 β 随年龄而下降。图 1.4 给出了他们对 6 颗年龄在 0.1 ~ 6.7Gyr 的类太阳恒星的分析得到的通量对年龄和波长的依赖性。Ribas 等 (2005) 指出，相比于 EUV 和 X 射线，太阳型恒星的拉曼 - α 射线的相对通量随年龄而增加，而更高温度辐射线的通量随年龄的下降要快于拉曼 - α 射线。尽管期望类似的缩放法则能用于比太阳冷的恒星，但目前还没有可用于开发 NUV 和 FUV 辐射缩放规律的研究结果。

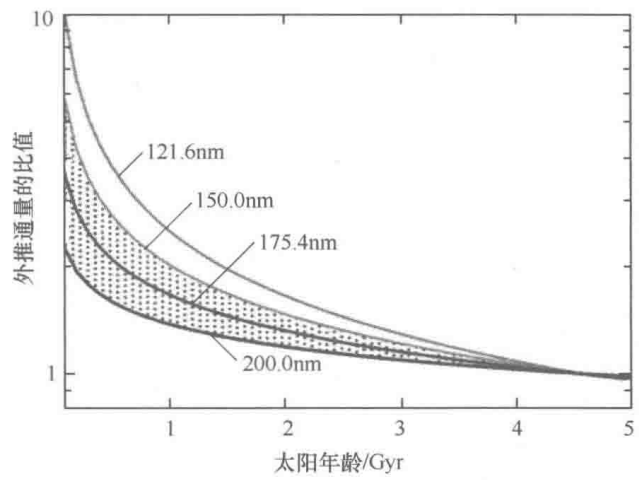


图 1.4 不同波长光通量相对于当前太阳的归一化比值随太阳年龄的变化 (Claire 等, 2012)

91.2 ~ 117nm 光谱区包含了拉曼- β 射线和氢的拉曼系列中更高的发射线以及若干亮过渡区线，包括了 C II 103.6nm 双线、C III 97.7 nm 和 117nm 的多峰线、O VI 103.4nm 双线。FUSE 获得了这一范围的恒星光谱 (Moos 等, 2000; Sahnou 等, 2000)。Redfield 等 (2002) 测量了 7 颗从 A7V ~ M0V 的恒星的辐射线，但没有包括明亮的拉曼 - β 射线和拉曼系列的更高辐射线，这些辐射线受到 FUSE 巨大入口光阑看到的地冕辐射的污染。Linsky 等 (2014) 基于拉曼线对太阳谱中拉曼 - α 射线通量比来估计这些恒星的拉曼系的辐射。

1.3 极紫外辐射

在 10 ~ 91.2 nm 光谱区域 (图 1.1) 包含三个无束缚发射连续谱: 拉曼连续谱 (60 ~ 91.2 nm), He I 连续谱 (45 ~ 50.4 nm) 和 He II 连续谱 (15 ~ 22.8 nm)。叠加在这些连续谱之上的是 He I 的共振线 (58.4 nm) 和 He II 的共振线 (30.4 nm) 以及过渡区主星和星冕的发射线。在氢电离边缘 (91.2 nm) 波长以下的极紫外辐射会电离和加热接近中心的系外行星的外层大气, 为显著的质量损失提供能量 (Lecavelier des Etangs, 2007; Murray-Clay 等, 2009; Ehrenreich 和 Désert, 2011; Lammer 等, 2013)。但是, 星际间的吸收使得无法测量 40 ~ 91.2 nm 的辐射, 即使是最近的恒星, 太阳除外。

低于 40 nm 时, 星际氢气和氦气的不透明度降低, 使得可以对邻近恒星光谱进行观测。EUVE 包含了 3 台覆盖 7 ~ 76 nm 光谱区、光谱分辨力达 0.05 ~ 0.2 nm 的光谱仪 (Welsh 等, 1990; Bowyer 和 Malina, 1991)。Craig 等 (1997) 和 Monsignori Fossi 等 (1996) 给出了 F-M 矮星 EUVE 光谱的实例, 而 Sanz-Forcada 等 (2003) 提供了发射线通量。Linsky 等 (2014) 基于 MAST 数据文档中下载的 EUVE 数据, 计算了 15 颗 F5 ~ M5 矮星在 10 ~ 20 nm、20 ~ 30 nm 和 30 ~ 40 nm 波长间隔内的 EUV 通量。

可用的 EUV 恒星光谱数量有限, 但可以从两个来源得到补充。高分辨力太阳光谱辐照度可覆盖整个 EUV 范围 (太阳作为恒星点光源的光谱)。一个很好的例子是在太阳处于非常低活动水平时获得的太阳辐照度参考光谱 (图 1.1) (Woods 和 Chamberlin 等, 2009)。也建立了一些新的半经验太阳模型 (Fontenla 等, 2014) 来匹配太阳光斑的光谱辐照度, 磁场加热速率的增加导致了 EUV 通量的增加。这些都是从色球层到星冕的热结构的一维非平衡模型, 包括了 21 种元素的电离以及连续谱和线发射。新模型是 Fontenla 等 (2009, 2011) 模型的更新。由于新的模型针对相同的恒星, 但磁场加热水平不同, 这些模型至少能代表不同活动水平的太阳型恒星的情况。

一些人使用现有的光谱数据来估计恒星的 EUV 发射与年龄和旋转速度的关系。使用 6 颗年龄在 0.1 ~ 6.7 Gyr 的类似太阳的恒星在狭窄光谱范围 G0 ~ G2 内的 HST、FUSE、EUVE 和 X 射线光谱, Ribas 等 (2005) 证实, 这些光谱可用形式为 $F = \alpha \tau^{-\beta}$ 的幂函数进行拟合, 其中, F 为某个波长间隔内的通量, τ 为恒星年龄 (Gyr), α 和 β 取决于波长间隔。他们计算得到了 10 ~ 36 nm、36 ~ 92 nm (插值) 和 92 ~ 118 nm 波长间隔内拟合最好的 α 和 β 值。 β 值随波长的增加而减小, 表明光通量随着恒星年龄的增加而下降速度更慢。例如, 具有太阳质量的恒星在 6.7 Gyr 时的通量相比 0.1 Gyr 时的通量, 在 1 nm 处为 1/20000, 在 10 nm 处为 1/200, 在 100 nm 处为 1/50。Claire 等 (2012) 将这种方法扩展到利用近期数据