

密级: _____



中国科学院大学
University of Chinese Academy of Sciences

硕士学位论文

Seyfert 星系 NGC 3783 中的温吸收

作者姓名: _____ 符晓丹

指导教师: _____ 纪丽 研究员

学位类别: _____ 理学硕士

学科专业: _____ 天体物理

培养单位: _____ 中国科学院紫金山天文台

2017 年 06 月

Warm Absorbers in Seyfert Galaxy NGC 3783

by
Xiaodan Fu

A Dissertation Submitted to
University of Chinese Academy of Sciences
In partial fulfillment of the requirement
For the degree of
Master of Astrophysics

Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences

June, 2017

学位论文独创性声明

本人郑重声明：我所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作及所取得的研究成果。尽我所知，除了文中已经标注引用的内容外，本论文中不含其他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出贡献的个人和集体，均已在文中作了明确的说明或致谢。本人知道本声明的法律结果由自己承担。

作者签名：_____ 日期：_____

关于学位论文使用授权的说明

本人完全了解中国科学院紫金山天文台有关保留、使用学位论文的规定，即：中国科学院紫金山天文台有权保留送交论文的复印件，允许论文被查阅和借阅；可以公布论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文。

（保密的论文在解密后应遵守此规定）

作者签名：_____ 导师签名：_____ 日期：_____

摘要

活动星系核 (AGN) 的反馈对其中的超大质量黑洞的吸积过程, AGN 与宿主星系共同演化, AGN 对星系际环境的影响密切相关。温吸收作为 AGN 外流的重要形式, 在大约 50% 的 I 型 AGN 中的紫外和 X 射线波段都有吸收。了解它的本质可以帮助我们更好地认证 AGN 如何影响周围环境。我们第一次对 Seyfert I 型星系 NGC 3783 这个源在 2013 年 *HST*/COS 和 *Chandra*/HETG 的同时观测做了联合研究, 用光致电离模型 XSTAR 对两个波段的谱线做了联合拟合, 得到了其中若干温吸收体的物理性质, 并据此研究了其核心的超大质量黑洞的物质反馈过程。

在单独对 COS 谱线的拟合研究中, 我们发现了外流中存在三个温吸收体, 其电离参数 ξ 在 $10 \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}$ 左右, 柱密度 N_{H} 在 $1 \times 10^{20} - 5.2 \times 10^{21} \text{ cm}^{-2}$ 左右。我将得到的结果与前人研究做了对比, 发现 2013 和 2001 的紫外谱线中的出现的温吸收体可能来自同一吸收体, 但吸收体的速度存在一个减速。

在 COS 谱和 HETG 谱的联合拟合分析中总共发现了外流成分中存在的五个温吸收体。这五个温吸收体的电离参数 $\log \xi$ 有一个很广泛的区间, 从 0.6 到 3.8 $\text{erg s}^{-1} \text{ cm}$; 柱密度 $\log N_{\text{H}}$ 从 19.5 到 22.3 cm^{-2} , 速度 v 从 380 到 1060 km s^{-1} , 遮挡因子从 0.33 到 0.75。五个吸收体的并不完全处于压力平衡状态。其中两个可能是同一个吸收体的不同部分, 其它两个则可能是在不同时期从尘埃环的内部吹出较小的离散云。由这些吸收体贡献的质量外流估计在每年 0.22-4.1 个太阳质量的范围内。有关 NGC 3783 外流的性质和反馈过程也可结合所有已有的观测进一步地研究。

关键词: 星系: NGC 3783, 类星体: 吸收线, 类星体: 塞弗特星系, 紫外: 星系, X 射线: 星系

Abstract

The feedback of the active galactic nucleus (AGN) is closely related to the accretion process of the supermassive black hole, the co-evolution of AGN and the host galaxy, and the influence of AGN on the intergalactic environment. Warm absorbers is an important form of AGN outflow and have absorption features in both UV and X-ray bands in about half of type I AGN. Knowing its essence can help us better understand how the AGN affects the surroundings. Using XSTAR generated photoionization models, for the first time we present a joint fit to the simultaneous observations of *HST*/COS and *Chandra*/HETG on Seyfert I galaxy NGC 3783. We obtain the physical properties of absorbers in this AGN system and then study the feedback process of the supermassive black hole.

In the separate study of COS spectra, we find that there are three warm absorbers in the outflow, and their ionization parameters ξ are ~ 10 , column densities N_{H} are $\sim 1 \times 10^{20} - 5.2 \times 10^{21} \text{ cm}^{-2}$. We compare our result with the previous study in 2001 in UV spectra and deduce that a one-to-one corresponding relationship may exist in the warm absorbers between 2013 and 2001 spectra, but their speeds have a slowdown with time.

In the joint study of COS and HETG spectra, totally five warm absorbers are found in the AGN outflows, which spread a wide range of ionization parameter $\log \xi$ from 0.6 to 3.8, column density $\log N_{\text{H}}$ from 19.5 to 22.3 cm^{-2} , velocity v from 380 to 1060 km s^{-1} , and covering factors from 0.33 to 0.75. Not all the five WAs are in pressure balance. Two of them are likely different parts of the same absorbing gas, and two of the other WAs may be smaller discrete clouds that are blown out from the inner region of the torus at different periods. The totally mass outflow rate of these WAs is estimated within a range of 0.22-4.1 solar mass per year. The property and the feedback process of the NGC 3783 outflow also depend on further research with the all the existing observation data.

Keywords: galaxies: individual (NGC3783), quasars: absorption lines, quasars: Seyfert, ultraviolet: galaxies, X-ray: galaxies

目 录

摘 要	vii
Abstract	ix
目 录	xi
图形列表	xiii
表格列表	xv
第一章 活动星系核的反馈	1
1.1 AGN 统一模型	1
1.2 外流对宿主星系的影响	2
1.3 温吸收物理过程	3
1.4 温吸收研究现状	11
第二章 NGC 3783 中的温吸收	15
2.1 NGC 3783 过往的研究	16
2.2 观测处理过程	18
2.3 模型准备	21
2.4 NGC 3783 紫外谱线分析处理	23
2.5 COS 谱线 XSTAR 拟合结果	26
2.6 NGC 3783 HETG 谱线分析处理	29
2.7 COS 谱线和 HETG 谱线联合拟合	29
第三章 温吸收体的一些推断	33
3.1 COS 光谱拟合结果的推测	33
3.2 联合观测的推断	35
第四章 总结	39
参考文献	41
作者简历及攻读学位期间发表的学术论文与科研成果	51
致 谢	53

图形列表

1.1	AGN 统一模型模型	1
1.2	吸收线的等值宽度示意图	5
1.3	生长曲线示意图	6
1.4	不同温度下 C III 线各能级的数目随电子密度分布	9
1.5	C III $\lambda 1175$ 吸收线	10
2.1	吸收体运行方向改变导致观察到的径向速度降低的示意图	17
2.2	NGC 3783 的 COS 谱以及拟合发射区连续谱和发射线后的残差	19
2.3	NGC 3783 的 HETG 谱, 以及采用幂率谱拟合连续谱辐射的残差 ..	21
2.4	NGC 3783 的光谱能量分布	23
2.5	COS 谱线 XSTAR 拟合结果	27
2.6	各组分单独的模型	28
2.7	COS 和 HETG 谱线的联合拟合结果	30
2.8	COS 谱和 HETG 谱中 5 个 WAs 单独的模型	32
3.1	3 个吸收体中的 N V 1239 和 C IV 1548 分别在 2001 年和 2013 谱线 中的位置	34
3.2	WAs 参数与以前的研究比较	36
3.3	热稳定性曲线	37

表格列表

2.1	NGC3783 的基本信息.....	15
2.2	NGC 3783 近几年在 X 射线波段和 UV 波段的一些观测	16
2.3	高斯线拟合 COS 谱的参数.....	25
2.4	NGC 3783 的拟合参数设置	26
2.5	COS 谱线 XSTAR 模型最佳拟合参数	28
2.6	COS 谱线和 HETG 谱线联合拟合最佳拟合参数	31
3.1	COS 谱线与前人发现组分的对应关系	33

第一章 活动星系核的反馈

1.1 AGN 统一模型

在河外天体中有一类中央核区活动性很强的星系，其核心称为活动星系核 (active galactic nucleus, 简称 AGN)，其宿主星系称之为活动星系。活动星系有比正常星系更亮的致密核，在 X 射线， γ 射线等波段比正常星系有着更强的发射，研究活动星系的意义非常重大。

AGN 是宇宙中电磁辐射的最强源泉。主要被分为类星体、Blazar、Seyfert 星系和射电星系等四大类。其中 Seyfert 星系又根据面向我们或侧向我们分为 Seyfert I 型和 Seyfert II 型。自从 AGN 被发现以来，人们对它进行了大量的探索，但其内部具体的结构，依然由许多未知的地方等待人们去探索。

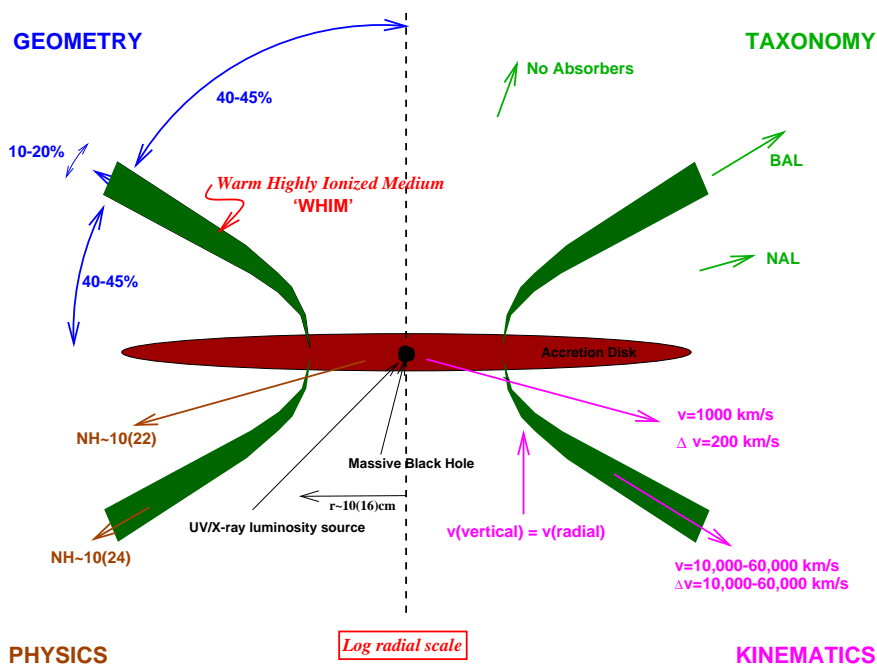


图 1.1: AGN 统一模型模型 (图片来源: Elvis, 2000)。

自从 70 年代以来，人们对 AGN 的认识逐渐加深，建立了活动星系核的统一模型，即黑洞吸积盘模型 (Antonucci, 1993)，图1.1描述了统一模型中的各个组成部分，包括：

黑洞 (Black Hole)：活动星系核中心存在超大质量黑洞，其质量大约在

$10^6 - 10^9 M_{\odot}$;

吸积盘 (Accretion Disk) : 围绕黑洞作开普勒旋转的物质形成吸积盘, 通常认为吸积盘是一个薄盘, 一般在位于距离中心 10^{-3} pc 内, 密度可达 10^{15} cm^{-3} , 是 AGN 中主要的产能部分。来自紫外电离光子跟光学波段光子构成了吸积盘的连续谱 (Haardt et al., 1994);

宽线区 (Broad Line Region) : 位于距中心距离 0.01-0.1 pc 内, 气体密度 10^{10} cm^{-3} 左右, 由于这个区域内气体的维里速度在几千公里每秒左右, 致使云团发出的发射谱线存在较大的半高全宽, 因此被称为宽线区。宽线区云团表面可能存在较高的电离组分, 最强的发射线一般为 $\text{Ly}\alpha$ (1215\AA)、C IV 双线 (1549\AA)、O VI (1035\AA);

尘埃环 (Torus) : 存在于距离中心 1-100 pc 内, 密度为 $10^3 - 10^6 \text{ cm}^{-3}$ 左右。尘埃环被认为存在于宽线区和窄线区之间, 中心源和宽线区的辐射经过尘埃环时会被遮挡, 从而使得宽线区的辐射无法被探测到。因此, 只有在观测视角较小的 I 型 AGN (面向) 中可以观测到宽发射线, 而在 II 型 AGN (侧面向) 中由于光学厚和几何厚的尘埃环的阻挡, 不能观测到宽发射;

窄线区 (Narrow Line Region) : 位于距中心距离 100 pc 到 1000 pc 处, 这个区域气体密度比较小, 通常为 $10^3 - 10^6 \text{ cm}^{-3}$ 左右。这个区域由于离中心较远, 气体的维里速度比较小, 通常在几百公里每秒左右, 因此这个区域被称为窄线区。

1.2 外流对宿主星系的影响

当 AGN 中的中央黑洞在吸积外部物质的同时, AGN 也在向外输出能量和物质, 形成自身的反馈。AGN 的反馈过程会阻止宿主星系继续吸积气体, 抑制黑洞自身的生长, 进而抑制星系中的恒星形成, 使得恒星形成率降低 (Kormendy et al., 2013)。反馈形式除了向外辐射的辐射压、喷流 (jet) 之外, 还有一种重要的反馈叫做外流 (outflow)。外流对整个宿主星系以及星系际环境都有着重要的影响。来自于外流的质量损失率每年可达几百个太阳质量 (Dunn et al., 2010), 2012 年一颗红移为 6.42 的类星体被发现其 [C II] 发射线外流的质量损失率竟达 $3500 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ (Maiolino et al., 2012), 而我们熟知的 Mrk 231, 其外流的质量损失率也达到了 $420 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ (Rupke et al., 2011)。Chang 和 Spitoni 2010 年曾提出外流效率与星系质量成反相关, 当星系盘上的恒星总质量 M 小于 10^{10} 个太阳质量时, 外流作用对星系演化不可忽视 (Chang et al., 2010; Spitoni et al., 2010)。总之, AGN 中超大质量黑洞的吸积过程, AGN 与宿主星系的共同演化, AGN 对星系际环境的影响都与这些向外流动的气体密切相关。

1.3 温吸收物理过程

1.3.1 温吸收定义

温吸收 (Warm Absorber, 简称 WA) 是出于某一电离态, 并且在紫外波段或 X 射线波段产生吸收的气体。这种光致电离气体是 1984 年第一次在 AGN 中探测到 X 射线波段吸收之后才被提出的概念。而大约在 50% 的 I 型 AGN 中都能在紫外 (Crenshaw et al., 1999) 和 X 射线波段 (Reynolds, 1997; George et al., 1998) 观测到这种电离气体外流。其速度通常在每秒几百到几千公里 (McKernan et al., 2007), 有时候甚至可以达到每秒几万公里 (Tombesi et al., 2010)。如果假设 AGN 的寿命为一千万年, 则这些温吸收外流可以向外运动到 10 kpc 左右, 由这些气体贡献的质量外流理论上可达每年几十个太阳质量 (Blustin et al., 2005)。这些气体有很高的覆盖因子, 质量也超过 $10^3 M_{\odot}$, 由其贡献的质量反馈普遍大于 $0.1 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ (Kriss, 2004), 当它们的光度达到 AGN 辐射热光度的 0.5% 时, 对其宿主星系的演化有重大的影响 (Hopkins et al., 2010)。它们能够阻止宿主星系内恒星的形成及星系周边气体冷却凝聚 (Krongold et al., 2007), 并提高星系际纤维结构的金属丰度 (Hopkins et al., 2010)。

许多研究表明这些温吸收体可以被很好的拟合进压力平衡下的多吸收体模型 (例如, Netzer et al., 2003; McKernan et al., 2007; Krongold et al., 2009), 即温吸收体的结构可以被理解作为一种处于同一空间的多相介质 (Krolik et al., 2001)。但由于这种温吸收气体到中心黑洞的距离与其自身密度存在简并, 使得其本身的许多特性难以测量, 从而这些温吸收外流的起源和质量外流率等无法准确得知, 以至于仍无法被概括进 AGN 的统一模型。目前认为这些温吸收外流可能来自于吸积盘风 (Elvis, 2000)、尘埃环风 (Krolik et al., 2001)、宽线区 (Risaliti et al., 2010) 及窄线区的云团 (Kinkhabwala et al., 2002) 等等。

我们对温吸收体的物理特性, 动力学和形态学都知之甚少, 而我们希望借由研究这种温吸收气体来达到以下目的:

- 1 通过研究温吸收体的位置信息, 来完善 AGN 的统一模型。
- 2 通过研究由温吸收体贡献的外流质量信息, 来探究中心黑洞具体的吸积过程, 以及 AGN 的反馈对其宿主星系及其周边的星系际的影响。

1.3.2 电离平衡过程

对于温吸收体 (WAs) 来说, 光致电离和复合过程对其非常重要。光致电离指的是原子或离子受高能光子激发, 放出自由电子的过程, 其电离效率

可表示为:

$$PIR \equiv \int 4\pi J(\nu) \sigma(\nu) d\nu \quad (1.1)$$

其中, $J(\nu)$ 是平均电离流量, $\sigma(\nu)$ 是电离碰撞截面;

辐射复合过程指的是自由电子与电离离子重新结合的过程, 其效率可表示为:

$$RR \equiv n_e \alpha_{rr}(T_e) \quad (1.2)$$

其中, n_e 为气体电子密度, T_e 为电子温度, α_{rr} 为复合系数。

除了上述过程之外, 还有双电子复合过程, 碰撞电离过程等许多过程对其起作用。

双电子复合过程指一个自由电子与离子相结合, 使得离子中原有的一个电子被激发的过程, 其效率可表示为:

$$DR \equiv n_e \alpha_{dr}(T_e) \quad (1.3)$$

其中, α_{dr} 为双电子复合系数;

碰撞电离过程指的是自由电子和离子发生碰撞, 使得离子中的电子被激发并释放, 其效率为:

$$CIR \equiv n_e C(T_e) \quad (1.4)$$

其中, C 是碰撞电离效率。

光致电离模型最早是由Tarter et al. (1969b) 和Tarter et al. (1969a) 构建的。他们假设中心电源照射周围团状气体, 计算关于电离参数 ξ 的电离平衡方程, 并进一步计算此光度下的谱线。电离参数的定义如下:

$$\xi = \frac{L_{ion}}{n_e R^2} \quad (1.5)$$

其中, L_{ion} 为中心源在 1 Ryd 到 1000 Ryd 的能量区间内的光度, n_e 为团状气体电子密度, R 为中心源到气体间距离。

关于电离参数 ξ 的电离平衡方程的推导方法如下: 对给定的 ξ 值, 估算其电子温度值 T_e ; 计算在温度 T_e 时的电离平衡, 即令前面提到的各效率 $PIR + CIR = RR + DR$; 在 T_e 处按预估的电离水平来推算各个过程的加热冷却率; 若加热率与冷却率相同, 此时为电离平衡态, 若不同, 则适当变化预估值 T_e , 直到推算出的加热率与冷却率相同。电离平衡模型比较复杂, 由此产生的光致电离模型编程程序也比较复杂。

1.3.3 吸收线展宽的机制

1.3.3.1 等值宽度

中心点源通过温吸收体时，气体原子中的电子便会吸收光子从低能级跃迁到高能级，同时原先的光子中相应能级的光子数便会减少。根据基尔霍夫定律，炽热的固体，液体以及高压下的气体都发射连续光谱。来自中心源的光发射出连续光谱，在遇到较冷吸收体时，连续光谱中的一些光子被吸收产生一条条暗线谱。但由于气体内部各粒子的活动，会导致谱线加宽。除了谱线本身的自然加宽之外，比较重要的加宽机制有由于粒子的多普勒运动导致的多普勒展宽和激发态原子在运动过程中与其它种类粒子碰撞导致的洛伦兹展宽。通常由于这些加宽使得可以由观测到的吸收线得到吸收线的等值宽度，从而得到视线方向上吸收体的柱密度等信息。

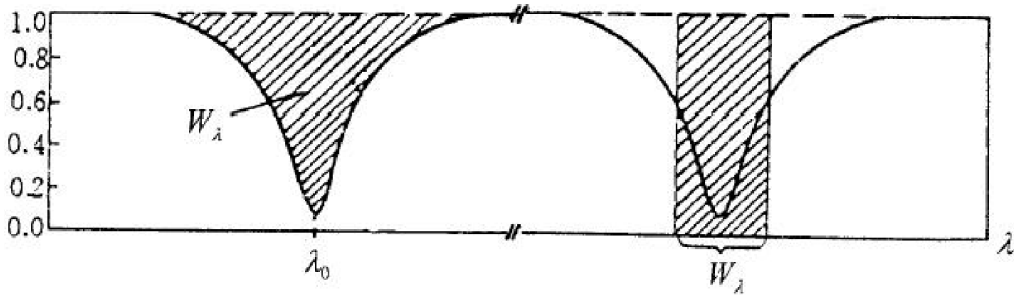


图 1.2: 吸收线的等值宽度示意图，横坐标为波长，纵坐标为谱线强度。

如图1.2，以连续光谱背景强度为单位，取一长为1.0单位强度的矩形，其面积等于吸收阴影所占的面积，则矩形的宽就是等值宽度。等值宽度的表达式：

$$W_\nu = \int \frac{(F_{\nu,c}(\nu) - F_{\nu,l}(\nu))}{F_{\nu,c}(\nu)} d\nu \quad (1.6)$$

其中 W_ν 为等值宽度， $F_{\nu,c}(\nu)$ 为频率 ν 处连续谱的流量， $F_{\nu,l}(\nu)$ 为频率 ν 处吸收线的流量值。

1.3.3.2 生长曲线

描述吸收介质原子数目与等值宽度之间关系的图叫做生长曲线，如图1.3所示。由上一节的1.6式，可以知道等值宽度的值，结合 I_ν 和 $\tau(\nu)$ 我们可以通过如

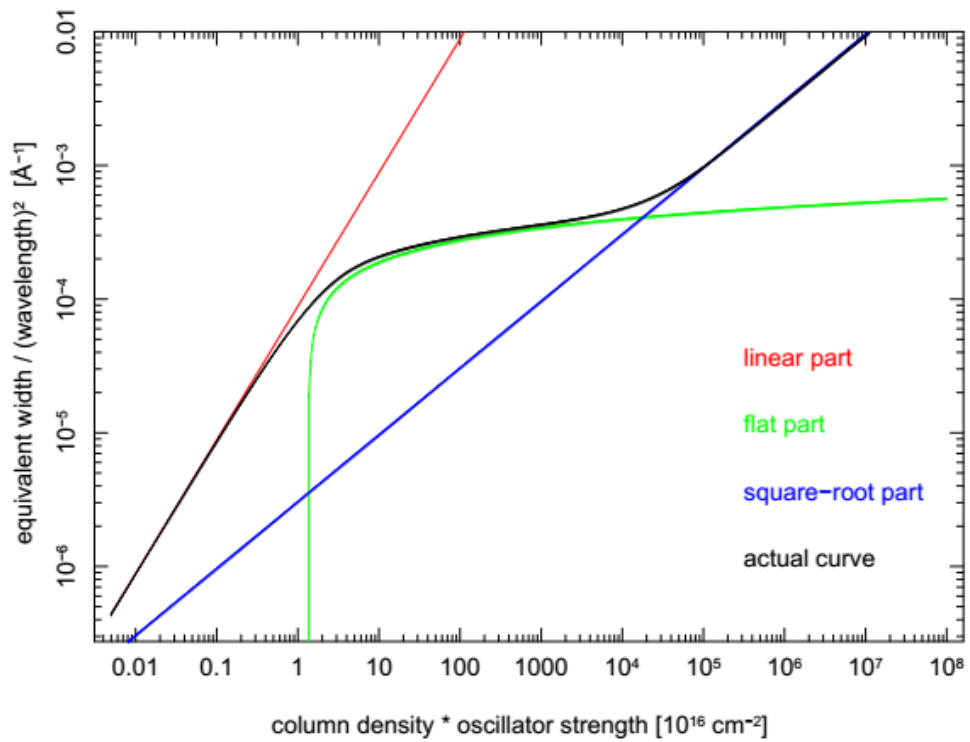


图 1.3: 生长曲线示意图。横坐标是 $N_i f_{ij}$, 纵坐标是 W_λ/λ^2 , 阻尼部分之与 Γ 有关, 其中线性部分、水平部分和阻尼部分分别以红、绿和蓝三色曲线表示。计算生长曲线的参数如下: $\lambda = 5 \text{ \AA}$, $v_{th} = 100 \text{ km s}^{-1}$, $\Gamma = 10^{12} \text{ s}^{-1}$ (图片来源: Hanke, 2007)。

下推导得到等值宽度关于介质中原子数的关系：

$$\begin{aligned}
I_\nu(\text{observer}) &= I_\nu(\text{source}) e^{-\tau_\nu} = I_\nu(\text{source}) e^{-\sigma(\nu)N} \\
F_{\nu,l}(\nu) &= e^{-\tau(\nu)} F_{\nu,c}(\nu) \\
\tau(\nu) &= N_i \sigma(\nu) = N_i f_{ij} \frac{\pi e^2}{mc} \phi(\nu) \\
W_\nu &= \int (1 - e^{-\tau(\nu)}) d\nu
\end{aligned} \tag{1.7}$$

其中 τ_ν 为介质的光深， $\sigma(\nu)$ 为不透明度， N_i 为柱密度， f_{ij} 为振子强度，对于 Lorentzian profile $\phi(\nu)$ 有 $\int_{-\infty}^{\infty} d\nu \phi(\nu) = 1$ 。生长曲线分三个部分：线性部分 (linear part)，水平部分 (flat part)，阻尼部分 (square-root part)。

线性部分：如果吸收原子数目很少，对吸收线等值宽度的贡献主要来自于吸收线的核 (core) 的多普勒运动。这时 $\tau \ll 1$ ，

$$(W_\nu)_{lin} = \int \tau(\nu) d\nu = N_i f_{ij} \frac{\pi e^2}{mc} \int \phi(\nu) d\nu = N_i f_{ij} \frac{\pi e^2}{mc} \tag{1.8}$$

可以看出这时吸收线等值宽度 $(W_\nu)_{lin} \sim N_i f_{ij}$ 。

水平部分：此时吸收介质的原子数目到达这样一个程度，即使得吸收线的核饱和了，但吸收线的 wings 还没有对等值宽度产生贡献。这时光深 τ 满足： $\tau(\nu_0) \gg 1$ ， $|\nu - \nu_0| > \Delta\nu_D$ 时 $\tau(\nu) \ll 1$ ，此时，

$$\begin{aligned}
\tau(\nu_1) &= \frac{(W_\nu)_{lin}}{\sqrt{\pi} \Delta\nu_D} \exp \left[- \left(\frac{\nu_1 - \nu_0}{\nu_D} \right)^2 \right] = 1 \\
(W_\nu)_{flat} &\approx 2 |\nu_1 - \nu_0| = 2 \Delta\nu_D \sqrt{\ln \left(\frac{N_i f_{ij} \sqrt{\pi} e^2}{mc \nu_D} \right)}
\end{aligned} \tag{1.9}$$

此时 $(W_\nu)_{flat} \sim \sqrt{\ln N_i f_{ij}}$ ，因此等值宽度没有强烈依赖于柱密度。

阻尼部分：如果吸收介质的原子数目很大，使得吸收线 wings 也对等值宽度的值产生了贡献，此时需用 Lorentzian profile $\phi(\nu)$ ，

$$\begin{aligned}
\tau(\nu_1) &= \frac{(W_\nu)_{lin}}{\pi} \frac{\Gamma/(4\pi)}{(\nu_1 - \nu_0)^2} = 1 \\
(W_\nu)_{sqrt} &\approx 2 |\nu_1 - \nu_0| = \sqrt{\frac{N_i f_{ij} e^2 \Gamma}{\pi mc}}
\end{aligned} \tag{1.10}$$

其中 Γ 为原子能级的衰减速率。此时 $(W_\nu)_{sqrt} \sim \sqrt{(N_i f_{ij} e^2 \Gamma)/(mc)}$ ，此时等值宽度与 $\sqrt{N_i f_{ij}}$ 正相关。

多普勒参数：在生长曲线的计算中，有一个很重要的参数 b ，称为多普勒参数。 $b = \sqrt{2kT/(\mu m_p)}$ ， b 可以通过测量谱线的半全宽得到： $b = \text{FWHM}/(2\sqrt{\ln 2})$ 。

1.3.4 外流吸收体距离的推断

根据 $\xi = L_{ion}/(n_e R^2)$ 可知, 如果知道吸收体的电子密度 n_e , 则可以推算出其距中心源的距离。精确求得 n_e 的方法比较困难, 以下几种方法可以用来估算 n_e 。

第一种方法: 通过某些特征吸收线, 如 C III $\lambda 1175$, 该线经常被用来做电子密度的估算。 Gabel et al. (2005) 计算了不同温度下该线的三个轨道能级 ($2s2p\ ^1P$, $2s2p\ ^2P$, $2s2p\ ^3P$, 以下写为 $J=0,1,2$) 的数量随电子密度 n_e 的分布, 并画出了不同温度下 $(J=2)/(J=0)$, $(J=1)/(J=2)$ 的数目比率随 n_e 的分布。如图1.4所示:

他们发现, 虽然不同温度下, 该线各能级的数目变化差距很大, 但 $(J=2)/(J=0)$ 的比率的变化却并不大。 $(J=2)/(J=0)$ 只随着 n_e 发生变化。因此, 通过拟合目标源中 C III 的吸收线, 得到这几个能级对应的吸收线的柱密度, 通过计算 $N_{J=2}/N_{J=0}$ 的比值可以得到所对应的 n_e 值。使用这种方法的前提是: 1 目标源的谱线的分辨率足够高可以分辨出其中的单根谱线; 2 每个能级所对应的谱线足够细使得单根谱线不要重度重合在一起。

如图1.5所示, 作者拟合了 2001 年 NGC 3783 的 STIS 的观测谱线。通过其中谱线中的 S IV 线的线心和宽度确定了 C III 线这三个不同能级的吸收线位置, 并算出了对应于每条线的柱密度。 $N_{J=2}/N_{J=0} = 2.9 \pm 1.4$, 对应于图1.4中的 $n_e = 3_{-1.5}^{+5} \times 10^4\ \text{cm}^{-3}$ 。图1.4中 $n_e = 3 \times 10^4$ 处只有 $J=2$ 和 $J=0$ 的数密度较大, 而 $J=1$ 数密度接近零, 而从图1.5中可以看到 $J=1$ 的吸收线几乎没有, 这与得到的 n_e 值是相符合的。

第二种方法: 通过发生光变时随时间变化的电离平衡情况来确定其 n_e (Arav et al., 2012)。电离态为 i 的某元素丰度可以写作以下形式:

$$\frac{dn_i}{dt} = -n_i(I_i + R_{i-1}) + n_{i-1}I_{i-1} + n_{i+1}R_i \quad (1.11)$$

其中 I_i 是电离态为 i 时的电离率 (ionization rate per particle); 电离态从 $i+1$ 到 i 的复合率为 R_i (recombination rate per particle), $R_i = \alpha_i(T_e)n_e$, 复合系数 α 由电子温度 T_e 决定, 约为 $T_e^{-1/2}$ (Osterbrock et al., 2006)。

当达到电离平衡时, $dn_i/dt = 0$, 将每个电离态的平衡方程叠加, 可以得到 $n_{i+1}/n_i = I_i/R_i$ 。

当中心源辐射的电离流量发生突然的改变时, 假设改变为 f (该值可以从连续谱的变化得出), 其电离率变化为: $I'_i = (1+f)I_i$, I'_i 为变化后 i 电离态的电离率; 而复合率不会马上发生变化, 即: $R'_i = R_i$, R'_i 为变化后 i 电离态的复合率。

重新达到电离平衡的时标为:

$$\begin{aligned} \frac{n_i}{t^*} &= -n_i(I'_i + R'_{i-1}) + n_{i-1}I'_{i-1} + n_{i+1}R'_i \\ &= -n_i(I_i(1+f) + R_{i-1}) + n_{i-1}I_{i-1}(1+f) + n_{i+1}R_i \end{aligned} \quad (1.12)$$

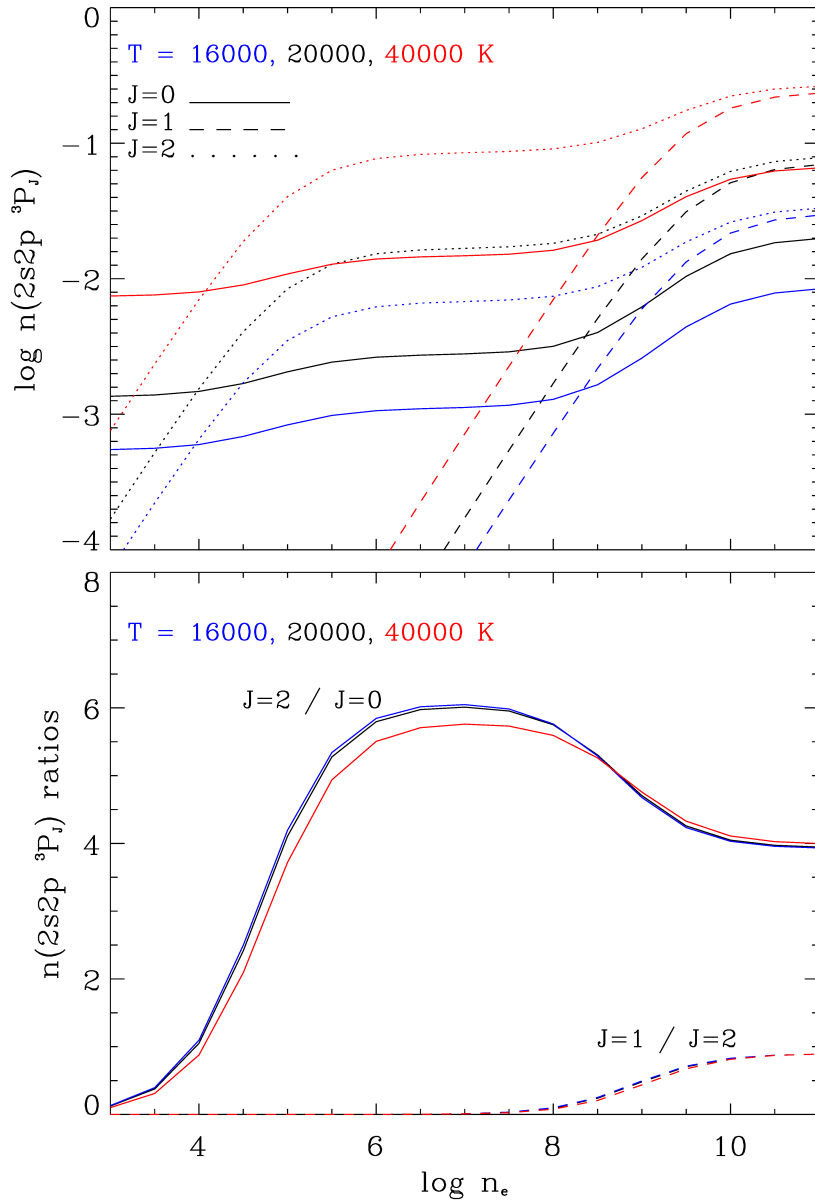


图 1.4: 不同温度下 C III 线各能级的数目随电子密度分布。上图为温度为 16000, 20000, 40000 K 下该线的三个轨道能级 ($2s2p \ ^1P$, $2s2p \ ^2P$, $2s2p \ ^3P$) 的数量随电子密度 n_e 的分布, 下图为不同温度下 $(J=2)/(J=0)$, $(J=1)/(J=2)$ 的数目比率随 n_e 的分布 (图片来源: Gabel et al., 2005)。

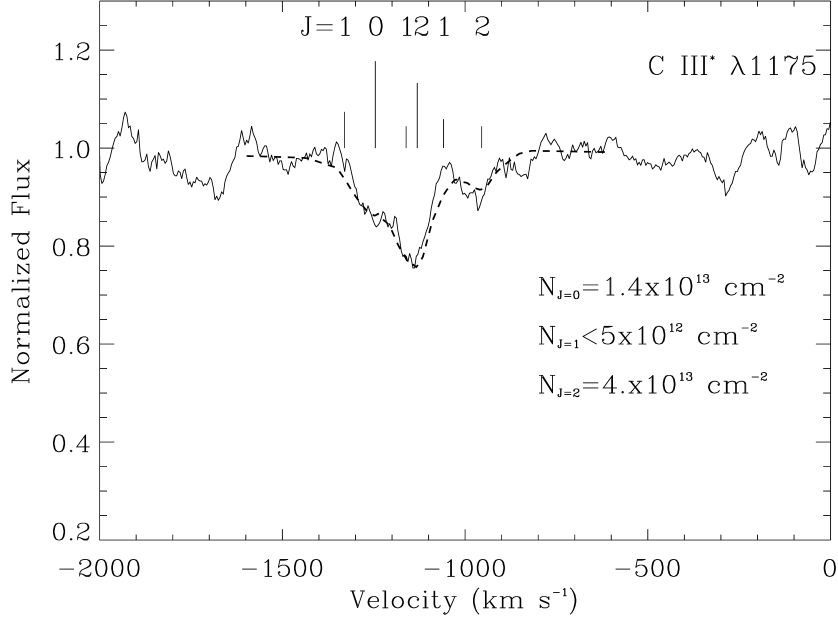


图 1.5: C III $\lambda 1175$ 吸收线。每个能级的吸收线位置是由 S IV 线的线心和宽度确定的，标出吸收线位置的竖线长度表了其相对振子强度。虚线为拟合谱线的模型，由该模型可以得到每个能级下吸收线的柱密度 (图片来源: Gabel et al., 2005)。

将 $R_i = \alpha_i(T_e)n_e$ 以及 $n_{i+1}/n_i = I_i/R_i$ 代入 1.12 式中，得到：

$$t^* = \left[-f\alpha_i n_e \left(\frac{n_{i+1}}{n_i} - \frac{\alpha_{i-1}}{\alpha_i} \right) \right]^{-1} \quad (1.13)$$

根据此式，只要得到目标源中观测到的谱线变化 f ，和达到新平衡的时间 t^* ，结合模型中在特定温度下的复合系数和不同电离态数密度比值，可以得到吸收体中的电子密度 n_e 。但达到新平衡的时标不容易确定，所以使用这种方法通常只会得到一些关于 n_e 区间的限定。比如 Arav et al. (2012) 通过对比 Mrk 509 的 COS 和 STIS 谱线，通过两段谱线的变化估计了重新达到平衡时的时标，得到了关于其外流的 n_e 值的大致区间。而 Zhang et al. (2011) 也运用该方法，分析了 2003 年 *Chandra*/HETG 对 Mrk 290 的观测谱线，给出了发生光变后重新达到电离平衡的时标的下限 2.5 天，得到了其中的吸收体的 n_e 的上限值 $6.2 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$ 。

第三种方法：通过拟合出的各个吸收体的遮挡因子和其柱密度推测。假设吸收体为球形的云团，由其遮挡的宽发射区尺寸 d_{BLR} 和吸收体对发射区的遮挡因子 C_f ，通过它们之间的几何关系可以大致估算出吸收体的尺寸 $d_{\text{abs}} = d_{\text{BLR}} \sqrt{C_f}$ 。因为吸收体是球形，估算出其尺寸可以得到它的厚度，结合吸收体的柱密度 N_H ，可以得到它的 $n_e = 1.2 \times N_H/d_{\text{abs}}$ 。这种方法的使用前提是需要假设吸收体的形状为球形。