

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2019.02.03

# 活动星系核 Fe II 发射线的研究进展

黄红强, 陆伟坚, 林樱如

(百色学院, 百色 533000)

**摘要:** Fe II 发射线是活动星系核光谱从紫外到光学波段的一个重要特征, 其不仅与活动星系核的一些基本物理问题紧密相关, 而且在宇宙学上有着重要的应用。虽然对 Fe II 发射线的观测和理论研究已有好几十年, 但许多问题仍未有定论。主要对 Fe II 发射线近年的研究进展进行综述, 包括其与本征向量 I 的关系、它的起源、激发机制、发射区的运动学特征及在宇宙学中的应用等方面, 并指出了一些研究方向。

**关 键 词:** 活动星系核; 类星体; 发射线

**中图分类号:** P157.6      **文献标识码:** A

## 1 引 言

Fe II 发射线是活动星系核 (active galactic nuclei, AGN) 光谱的重要特征, 人们在多数活动星系核的光谱上都能观测到明显的 Fe II 发射线。目前 Fe<sup>+</sup> 离子的光谱合成模型包括几百个能级和超过 344 000 种能级跃迁方式<sup>[1-3]</sup>。Fe II 发射线可以从类星体的紫外波段一直延伸到近红外波段, 与其他发射线一起组合成所谓的小蓝包<sup>[4, 5]</sup>。Fe II 发射线比较强的波段包括 4 000 ~ 5 400 Å (光学 Fe II 线), 2 800 ~ 3 500 Å, 以及 2 000 ~ 2 600 Å (紫外 Fe II 线)<sup>[5-7]</sup>。

Fe II 发射线的研究对于天文学有着重要的意义, 主要表现在以下两个方面: (1) 在低红移类星体光谱发射线性质的主成分分析中, 光学 Fe II 发射线的相对强度 (通常用 4 434 ~ 4 684 Å 的 Fe II 发射线与宽 H $\beta$  发射线的等值宽度的比值表示,  $R_{\text{Fe II}} = EW_{\text{Fe II}}/EW_{\text{H}\beta}$ ) 是本征向量 I 的主要特征<sup>[8]</sup>; (2) 对不同红移处, 活动星系核 Fe 元素丰度的测量结果可以用来验证一些宇宙学参数<sup>[9-12]</sup>。虽然人们从观测和理论两方面对 Fe II 发射线已研究了几十年, 但仍有许多待解决的问题。不过许多研究已证实, Fe II 发射线与许多活动星系核的基本物理问题紧密相关。本文将从 Fe II 发射线与本征向量 I 的联系、Fe II 发射线的起源和激发机制、

收稿日期: 2018-07-10; 修回日期: 2018-09-02

资助项目: 百色学院重点科研项目 (2015KAN04); 广西自然科学基金 (2017GXNSFAA198348)

通讯作者: 陆伟坚, william\_lo@qq.com

FeII 发射区的运动学特征, 以及 FeII 发射线在宇宙学上的应用等几方面介绍近年来 FeII 发射线的研究进展。

## 2 FeII 发射线及本征向量 I 的驱动机制

本征向量 I 代表着光学 FeII 发射线的相对强度 ( $R_{\text{FeII}}$ ) 与 [OIII] 发射线的等值宽度 ( $EW_{[\text{OIII}]}$ ), 以及与 H $\beta$  发射线的半峰全宽 (full width at half-maximum, FWHM)  $FWHM_{\text{H}\beta}$  之间的反相关。从活动星系核各个波段的光谱都可以看出, 不同活动星系核的各种性质相差很大, 这说明活动星系核所处的物理环境也不同。尽管活动星系核的类型很多, 从统计上来看, 它们至少存在一个共性——遵循着本征向量 I。自从本征向量 I 被发现以来, 爱丁顿比 (Eddington ratio,  $L/L_{\text{Edd}}$ ) 一直被认为是其基本的物理驱动因素<sup>[6, 8, 13]</sup>。Shen 和 Ho<sup>[14]</sup> 于 2014 年为这个猜想提供了明确的佐证。他们通过分析斯隆数字化巡天项目第 7 期释放数据 (Sloan Digital Sky Survey seventh data release, SDSS DR7) 中 2 万多个红移  $z < 0.9$  的类星体的成团性, 发现当类星体光度已知时, 平均黑洞质量随着光学 FeII 发射线强度的增加而降低, 从而证明了爱丁顿比是本征向量 I 的驱动因素。Sun 和 Shen<sup>[15]</sup> 于 2015 年通过测量 SDSS 中低红移类星体的寄主星系光谱中的恒星速度弥散发现, 当类星体光度已知时, 寄主星系的恒星速度弥散随着光学 FeII 发射线强度的增加而降低。这为爱丁顿比作为本征向量 I 的基本物理驱动因素的观点提供了新的独立证据。

但是, 目前人们还没有完全理解爱丁顿比是如何驱动本征向量 I, 即究竟是什么物理机制导致光学 FeII 发射线的强度随着爱丁顿比的增加而增加? 其中一种可能是, 因为高爱丁顿比往往同时伴随着过量的软 X 射线, 而后者会使产生 FeII 发射线的电离区域更大<sup>[13, 16]</sup>。Shields 等人<sup>[17]</sup> 则认为, 宽线区 (broad-line region, BLR) 中低电离态的部分 Fe 元素消耗程度的不同, 导致了活动星系核中 FeII 发射线强度的不同。Dong 等人<sup>[11]</sup> 对此有不同解释, 他们认为爱丁顿比控制了被引力束缚在发射区云的柱密度的整体分布, 及其整体的气体供应。由于受到辐射压影响, 低柱密度云将会被高爱丁顿比处相对大的辐射压吹走, 因此只有高柱密度云才能够被引力束缚。Ferland 等人<sup>[18]</sup> 利用 Cloudy 光致电离模型对上述观点开展了具体的定量研究, 得到了肯定的结果, 即认为爱丁顿比是通过控制发射区云的柱密度来驱动本征向量 I 的。

## 3 FeII 发射线的起源

### 3.1 系统性研究

通过研究 FeII 发射区的空间尺度, 可以揭示 FeII 发射线的起源。然而, 目前直接给出这个尺度的研究工作还比较少。通过对发射线轮廓的测量可间接推算 FeII 发射区与其他发射区域的相对尺度。早期, Phillips<sup>[19]</sup> 及 Boroson 和 Green<sup>[8]</sup> 发现光学 FeII 发射线的宽度通常与 H $\beta$  的相近, 意味着光学 FeII 发射线和 H $\beta$  可能来自于宽线区内的相同区域。而

Marziani 和 Sulentic<sup>[20]</sup>及 Popovic 等人<sup>[21]</sup>则提出, Fe II 发射线可能来源于中等宽度线发射区 (intermediate line region, ILR)。后来关于 SDSS 类星体的系统性研究揭示了 H $\beta$  与光学 Fe II 宽度之间细微的系统性区别, 为光学 Fe II 发射线来源于中等宽度线发射区提供了证据<sup>[7, 22]</sup>。通过由斯隆数字化巡天项目第 5 期释放数据 (Sloan Digital Sky Survey fifth data release, SDSS DR5) 的约 4 000 个类星体光谱组成的样本, Hu 等人<sup>[7]</sup>于 2008 年发现光学 Fe II 发射线的半峰全宽  $FWHM_{Fe}$  总体上比 H $\beta$  发射线的宽成分窄, 即  $FWHM_{Fe} \approx 0.75 FWHM_{H\beta}$ 。若 Fe II 发射区是位力化的, 则 Fe II 发射区的典型尺度约为 H $\beta$  宽发射区的 2 倍。2010 年, Kovačević 等人<sup>[22]</sup>基于 SDSS DR7 的 302 个类星体的数据得到了与 Hu 等人<sup>[7]</sup>类似的结果。2015 年, Kovačević 等人<sup>[23]</sup>利用 SDSS DR7 的 293 个同时覆盖了紫外和光学波段的 I 型类星体的数据发现, 紫外与光学波段的 Fe II 发射线宽度之间存在正相关, 意味着紫外 Fe II 发射线与光学 Fe II 发射线一样, 都来源于中等宽度线发射区。利用 25 个活动星系核的近红外光谱, Marinello 等人<sup>[24]</sup>于 2016 年发现 Fe II 发射线的宽度与 O I 和 Ca II 发射线相似, 但是比 Pa $\beta$  发射区大 2 倍。

### 3.2 反响映射

反响映射是研究活动星系核结构的重要方法, 该方法根据发射线区光变相对于中心源光变的时间延迟, 来推算发射线区的尺度。早在 1993 年, Maoz 等人<sup>[25]</sup>就给出 NGC 5548 的紫外 Fe II 发射线的反响映射, 并发现延迟约为 10 d。这个值与 Ly $\alpha$  的接近, 表明紫外 Fe II 发射线可能起源于宽线区。这是目前唯一一个紫外波段 Fe II 发射线时间延迟的测量值。由于时间延迟的测量需要观测大量的光谱数据, 所以 Fe II 发射线的时间延迟很少观测到。2005 年, Wang 等人<sup>[26]</sup>基于 NGC 4051 的 3 年观测数据, 证实了光学 Fe II 发射线与连续谱之间存在协同的光变。2005 年, Vestergaard 和 Peterson<sup>[27]</sup>基于活动星系核 NGC 5548 的 13 年观测数据, 发现在几周之内, 光学 Fe II 发射线与连续谱呈现协同的变化。2008 年, Kuehn 等人<sup>[28]</sup>测量了 Ark 120 Fe II 发射线的光变曲线, 他们发现了光学 Fe II 发射线与连续谱有长时间的协同光变。2011 年, Han 等人<sup>[29]</sup>利用 Fairall 99 个月的观测数据, 首次报道了光学 Fe II 发射线与连续谱两者的光变呈反相关的案例。然而以上学者都未能探测到 Fe II 发射线的时间延迟。

直到最近几年, Fe II 发射线时间延迟的观测才有所进展。利用 Kaspi 等人<sup>[30]</sup>于 2000 年公布的活动星系核的监测数据, Bian 等人<sup>[31]</sup>于 2010 年计算了 PG 1700+518 光学 Fe II 发射线的光变曲线。虽然误差比较大, 但他们成功地测量出光学 Fe II 发射线的时间延迟, 约为  $209^{+100}_{-147}$  d。2013 年, Barth 等人<sup>[32]</sup>利用利克天文台 2011 年的光谱监测数据, 成功测量出两个活动星系核的光学 Fe II 发射线的时间延迟, 而且发现两个光学 Fe II 发射线的时间延迟分别比对应的 H $\beta$  线长了 1.5 和 1.9 倍。2013 年, Rafte 等人<sup>[33]</sup>研究窄线赛弗特 I 星系 SDSS J113913.91 + 335551.1, 用反响映射方法计算得到的光学 Fe II 发射线的时间延迟与 H $\beta$  线的一致。2014 年, Chelouche 等人<sup>[34]</sup>测量了 Kaspi 等人<sup>[30]</sup>监测的 3 个活动星系核的光学 Fe II 光度曲线和时间延迟 (其中有一个目标也被 Bian 等人<sup>[31]</sup>研究过)。结合 Barth 等人<sup>[32]</sup>的研究结果, 他们还提出一个初步的光学 Fe II 线的尺度-光度关系, 并指出该关系与 H $\beta$  线的相似。这些结果暗示着 Fe II 发射区的尺度与 H $\beta$  发射线的发射区相近。2015 年, Hu 等人<sup>[35]</sup>发表了他们对 10 个高吸积率活动星系核的反响映射的监测结果。他们成功探测到了其中的 9

个活动星系核的光学 Fe II 发射线相对连续谱的时间延迟, 其中有 6 个源的光学 Fe II 发射线时间延迟与 H $\beta$  发射线的接近, 2 个源的光学 Fe II 发射线时间延迟明显比 H $\beta$  发射线的长, 1 个源的光学 Fe II 发射线时间延迟比 H $\beta$  发射线的稍短。结合以前的研究数据, Hu 等人也探测到与 H $\beta$  类似的光学 Fe II 的尺度-光度关系。2016 年, Wang 等人<sup>[36]</sup> 研究窄线赛弗特 I 星系 1H 0323+342, 用反响映射方法计算出光学 Fe II 发射线的时间延迟与 H $\beta$  线的相近。Park 等人<sup>[37]</sup> 在 2017 年研究邻近赛弗特 I 星系 PG 0934+013, 用反响映射方法计算出其光学 Fe II 发射线的时间延迟比 H $\beta$  线的短很多, 该结果意味着这个源的 Fe II 发射区可能比 H $\beta$  的发射区更靠近中心。

综上所述, 对部分活动星系核的反响映射研究表明, 大多数源的位置可能很难与 H $\beta$  发射区进行区分。但是目前反响映射研究的源的数量较少, 而且往往伴随着很明显的选择效应<sup>[35]</sup>, 所以反响映射的结果目前还不足以代表整体的活动星系核 Fe II 发射线的性质。

### 3.3 窄 Fe II 发射线的研究

不少研究活动星系核的文献都介绍并处理过窄线 Fe II, 特别是 [Fe II] 禁线, 如 Boroson 和 Green mbox<sup>[8]</sup> 在 1992 年就介绍 [Fe II] 5 158 Å, 5 273 Å 及其处理结果。Dong 等人<sup>[11, 38]</sup> 在 2010 年和 2011 年对活动星系核中的光学窄 Fe II 发射线开展了系统性研究。Dong 等人<sup>[38]</sup> 在 2010 年的研究工作中指出: 在 I 型活动星系核中, 普遍存在光学窄 Fe II 发射线 (无论是容许线还是禁线); 而在 II 型活动星系核中, 则普遍没有光学窄 Fe II 发射线。基于此, Dong 等人认为窄的 Fe II 发射区被限制在窄线区 (narrow-line region, NLR) 最内部的盘状区域中, 其物理尺度小于尘埃环。如果这个结论普适, 那么寻找没有宽线区的活动星系核 (真正的 II 型活动星系核), 或者寻找没有尘埃环遮挡的活动星系核是很有意义的。然而, 后续研究表明这个结论可能并不普适。2015 年, Villar-Martín 等人<sup>[39]</sup> 对一个 II 型活动星系核个源 MRK 477 进行研究, 首次在 II 型活动星系核中证认出超过 10 条光学窄 Fe II 发射线; 他们认为, Dong 等人所提出的尘埃环内的窄线区难以解释 MRK 477 中的光学窄 Fe II 发射线。通过运用 Cloudy 光致电离模拟等方法, Villar-Martín 等人认为这些发射线由窄线区的气体云光致电离引起的, 而不是起源于恒星形成过程或者激波。

目前, 人们无法确认在活动星系核紫外波段是否能观测到窄 Fe II 发射线, 文献中只有零星报道 (如参考文献[40])。Sameshima 等人<sup>[12]</sup> 在 2017 年研究发现紫外 Fe II 发射线与爱丁顿比之间只有轻微的相关, 这可能意味着来自紫外波段的窄 Fe II 发射线的贡献很小。这可能是由于紫外的 Fe II 光子容易被 NLR 中的尘埃以及温气体所吸收和散射。而在近红外波段, [Fe II] 禁线在 I 型和 II 型活动星系核中都广泛存在 (具体介绍见参考文献[38, 41]); 但是近红外 Fe II 容许线是否存在, 仍有争议。例如, Marinello 等人<sup>[24]</sup> 在 2016 年的研究指出, 不管是 O I, Ca II 或者 Fe II 发射线, 在进行实测光谱的拟合时, 即使在信噪比最好的光谱里面, 都不需要添加窄发射线成分。

## 4 Fe II 发射线的激发机制

类星体中许多发射线的产生可以通过经典的光致电离模型来解释。然而不少研究表明,经典的光致电离模型不能很好地拟合观测到的紫外和光学 Fe II 发射线的强度,说明还有其他机制起作用<sup>[2, 3, 42-47]</sup>。虽然目前还没有一个模型能够完美解释紫外与光学 Fe II 发射线的强度比值以及 2 000 ~ 2 600 Å 的 Fe II 发射线的强度,但是,研究表明 AGN 宽线区的各种物理过程都可能影响 Fe II 发射线。首先,Fe II 发射线的反响映射研究(成功探测到 Fe II 发射线的变化相对于连续谱变化的时间延迟,详见 3.2 节)为光致电离机制提供了很强的证据;其次,有迹象表明微湍可能对 Fe II 发射线的强度有重要影响<sup>[2, 3, 45-48]</sup>。Baldwin 等人<sup>[46]</sup>的研究表明,只有考虑了微湍气体运动,光致电离模型才可以很好地再现观测到的紫外(2 200 ~ 2 800 Å) Fe II 发射线的形状和等值宽度。此外,Fe II 发射线的强度还可能受柱密度的控制<sup>[18, 43, 47, 49]</sup>,强 Fe II 发射线与高密度发射区存在相关<sup>[50-54]</sup>。2011 年,Sameshima 等人<sup>[47]</sup>指出,Fe II 发射线强度的模型预测值与实测值不符,可能是由于 Fe II 发射区并不是各向同性的。如果 Fe II 云呈不对称分布,则可以解释观测到的紫外与光学 Fe II 发射线强度的比值。Ferland 等人<sup>[18]</sup>发现紫外 Fe II 发射区可能比光学 Fe II 发射区更加不对称,且所预测的源于发射云尘埃的 Fe II 发射线强度与观测结果完全一致。然而,这种不对称分布是基于光学 Fe II 发射线存在系统性红移这一假设,也就是假设发射区可能存在内流<sup>[7]</sup>。但是,Sulentic 等人<sup>[55]</sup>认为这种红移可能并不显著,应谨慎对待(详见第 5 章)。

比较有趣的是,有研究表明,来自类星体外流的荧光激发也可能产生 Fe II 发射线。2016 年,Wang 等人<sup>[56]</sup>从由广域红外线巡天探测卫星探测到的具有很强的紫外 Fe II 发射线的 4 个遮蔽型类星体的光谱中,发现了强的共振线(如 CIV, AlIII 和 Mg II),但是却未发现非共振线(如 CIII], SIII 和 He II)。他们认为这些源的 Fe II 发射线是离中心比较远的外流所产生的共振散射光。由于这 4 个类星体都是遮蔽型类星体,所以吸积盘和宽线区的发射线都被尘埃环遮蔽,但是在尘埃环以外的外流的共振散射光还能到达观测者。近期,对红外波段的 Fe II 发射线的研究也有了一定的进展。2016 年,通过对 25 个活动星系核的近红外光谱的研究,Marinello 等人<sup>[24]</sup>发现:(1) 所有源都存在位于 9 200 Å 的 Fe II 发射线鼓包,表明活动星系核普遍存在 Ly $\alpha$  荧光;(2) 9 200 Å 鼓包的流量、1  $\mu\text{m}$  的发射线以及光学 Fe II 发射线三者之间存在相关性,这意味着 Ly $\alpha$  荧光对 Fe II 发射线的激发起了重要的作用。

## 5 Fe II 发射区的运动学

利用 SDSS DR5 中约 4 000 个类星体光谱,Hu 等人<sup>[7]</sup>于 2008 年发现,光学 Fe II 发射线相对于窄线区和 H $\beta$  宽发射线都有系统性红移,其速度漂移的典型值约为 400 km  $\cdot$  s<sup>-1</sup>,上限为 2 000 km  $\cdot$  s<sup>-1</sup>。他们还发现:

- (1) Fe II 发射线的宽度系统性地比 H $\beta$  发射线的宽成分窄;
- (2) Fe II 发射线的红移与爱丁顿比呈反相关;

(3) Fe II 发射线有红移的源, 其 H $\beta$  发射线的轮廓有红移不对称的趋势。

基于以上发现, Hu 等人认为 Fe II 发射线来源于中等宽度发射区, 并且其运动学由内流主导<sup>[7]</sup>。2012 年, Sulentic 等人<sup>[55]</sup>对 Hu 等人<sup>[7]</sup>于 2008 年关于 Fe II 发射线的速度漂移的报道提出了质疑。Sulentic 等人<sup>[55]</sup>基于四维本征向量 I 的框架, 把 Hu 等人<sup>[7]</sup>的类星体样本以及他们观测到的 469 个类星体样本分成了几个子样本。通过测量每个子样本的合成光谱(具有更高的信噪比), Sulentic 等人发现这些类星体的 Fe II 发射线并不存在系统性的红移。Sulentic 等人<sup>[55]</sup>提出, 导致 Hu 等人探测到系统性红移的原因主要有两点:

- (1) Hu 等人采用的类星体样本的信噪比不足以给出可信的 Fe II 发射线的速度漂移;
- (2) Hu 等人在拟合类星体发射线的时候并没有考虑 He II 发射线。

随后, 2012 年, Hu 等人<sup>[57]</sup>根据文献 [7] 中 Fe II 发射线的红移, 把类星体样本分成了 5 个子样本。Hu 等人<sup>[57]</sup>拟合了这 5 个子样本的合成光谱, 采用类似 Sulentic 等人<sup>[55]</sup>的方法, 并且拟合的时候考虑 He II 发射线, 结果成功地从 5 个子样本中探测到了 Fe II 发射线的红移, 所以他们认为文献 [7] 中 Fe II 发射线红移具有较好的鲁棒性。但是, Hu 等人<sup>[57]</sup>对 Sulentic 等人<sup>[55]</sup>的结果不能给出一个合理的解释, 他们认为部分由于 Sulentic 等人采用四维本征向量 I 框架(即 H $\beta$  宽度和 Fe II/H $\beta$  的强度比)的方法进行光谱分类。Hu 等人<sup>[7]</sup>(见参考文献 [7] 中的图 9)表明这些参数与 Fe II 的速度漂移几乎不存在相关性。

另外一个科研组也对光学 Fe II 发射线的系统性红移的观点提出质疑。2010 年, Kovačević 等人<sup>[22]</sup>利用来自 SDSS 的平均信噪比较高但样本量较小的类星体样本, 对 Fe II 发射线进行研究, 他们测量的 Fe II 发射线的红移远小于 Hu 等人<sup>[7]</sup>在 2008 年所得到的结果(相对于窄线的平均 Fe II 发射线红移为  $100 \pm 240 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ )。2015 年, Kovačević 等人<sup>[23]</sup>发现紫外 Fe II 线存在明显的平均红移, 但是在光学 Fe II 发射线中没有出现, 他们认为这可能说明紫外 Fe II 发射线的运动学是内流, 或者它们可能呈不对称的分布。

关于活动星系核 Fe II 发射线蓝移也有相关的报道。2008 年, Hu 等人<sup>[7]</sup>对 4 037 个活动星系核样本进行研究, 发现有 481 个存在 Fe II 发射线蓝移(不考虑测量误差所导致的数目涨落)。2010 年, Marziani 等人<sup>[58]</sup>发现, 一些 Fe II 发射线很强的源存在蓝移成分或者呈蓝移不对称。2016 年, Wang 等人<sup>[56]</sup>发现一些遮蔽型类星体的光谱包含有蓝移的 Fe II 发射线成分。他们认为这些蓝移的 Fe II 发射线成分可以由活动星系核的外流进行解释(详见第 4 章)。

## 6 Fe II 发射线的宇宙学应用

目前人们普遍认为, Fe 元素主要来源于 Ia 型超新星。Ia 型超新星是由寿命较长、质量中等的恒星对爆炸后形成。而  $\alpha$  族元素(如 Mg 元素)通常被认为来源于寿命较短、质量较大的恒星爆炸(主要是 II 型超新星)<sup>[59]</sup>。由于 Fe 元素与  $\alpha$  族元素形成的时间不同, 因此他们两者的元素丰度的比值可以作为宇宙金属丰度指示器。

利用 SDSS DR7 中 4 178 个赛弗特 I 星系和类星体的样本, Dong 等人研究了 Fe II 发射线的强度及其与其他发射线和活动星系核的物理参数的相关性<sup>[11]</sup>。他们发现, 大部分发射线

的强度比值和等值宽度都与爱丁顿比有最强的相关性，而与其他参数的相关性弱得多，例如在  $5\ 100\ \text{\AA}$  的连续谱光度 ( $L_{5100}$ ) 或黑洞质量 ( $M_{\text{BH}}$ )。唯一的例外是紫外 Fe II 发射线的等值宽度，它与宽线宽度、 $L_{5100}$ 、 $M_{\text{BH}}$  及  $L/L_{\text{Edd}}$  都不存在相关性。相比之下，紫外和光学 Fe II 发射线与 Mg II  $\lambda 2800\ \text{\AA}$  的强度比与  $L/L_{\text{Edd}}$  存在非常强的相关性。基于这些结果，他们猜测活动星系中发射线强度的变化是受  $L/L_{\text{Edd}}$  影响。因此，当使用 Fe II/Mg II 强度比表征 Fe/Mg 丰度比来研究类星体环境的化学进化史时，必须先纠正 Fe II/Mg II 强度对  $L/L_{\text{Edd}}$  的系统性依赖。换言之，Mg II/Fe II 的强度比只能作为 Mg/Fe 丰度比的“二级”表征。

通过研究 SDSS DR4 的 2 092 个活动星系核的 Mg II 发射线的观测数据，Dong 等人<sup>[60]</sup> 首次发现 Mg II 的等值宽度与爱丁顿比之间存在强烈的反相关。利用 SDSS DR7 的 17 432 个类星体的 Mg II 和紫外 Fe II 发射线的数据，Sameshima 等人<sup>[12]</sup> 研究了源于宽线区的 Mg 元素与 Fe 元素的丰度比。他们发现 Mg II 的等值宽度也与爱丁顿比存在强烈的反相关，而 Fe II 的等值宽度与爱丁顿比仅存在弱的正相关。为了研究导致 Mg II 和 Fe II 发射线这种差异的原因，他们使用 Cloudy 模型进行光致电离计算，并且考虑了最新的反响映射研究的约束。他们发现：(1) Mg II 和 Fe II 发射线分别产生于光致电离云中的不同区域；(2) 它们的等值宽度与爱丁顿比的相关性可以通过仅改变云的数密度来解释。基于这些结论，他们认为在关于类星体发射线的化学演化研究中，Mg II/Fe II 流量比很大程度上取决于云数密度。而 Mg II/Fe II 流量比用作 Mg/Fe 丰度比的一级代表的时候，应该先校准来自密度的依赖。通过校正这种密度的依赖后，他们提出了一些对宽线区云的 Mg/Fe 丰度比的新判断。他们把最终得到的 Mg/Fe 丰度比与化学演化模型进行比较，认为  $\alpha$  族元素的增丰发生在红移  $z \approx 2$  的时期或者更早。

## 7 总 结

本文综述了活动星系核 Fe II 发射线近年的几个方面的研究进展，包括 Fe II 发射线与本征向量 I 的关系、Fe II 发射线的起源、激发机制、Fe II 发射区的运动学特征以及 Fe II 发射线的宇宙学应用等。总结全文，我们可以发现，近年 Fe II 发射线在多个领域都有了一定的进展，但也存在不少问题，主要表现在五个方面。

(1) 虽然目前有证据表明爱丁顿比是驱动本征向量 I 的参数，但是还缺乏有力的证据解释活动星系核的爱丁顿比是如何驱动本征向量 I 的，以及为什么 Fe II 发射线的强度会随着爱丁顿比的增大而变强。

(2) 人们利用 SDSS 大样本的活动星系核进行研究，倾向于认为 Fe II 发射线可能主要来源于中等宽度发射区；对部分活动星系核的反响映射研究表明，大多数这些源的位置可能难以与 H $\beta$  发射区进行区分；对活动星系核窄 Fe II 发射线的系统性研究认为光学窄 Fe II 发射线可能主要来源于尘埃环以内的窄线区。

(3) 越来越多的证据表明多种物理机制参与了 Fe II 发射线的激发，但具体包括了哪几种，以及哪一种扮演着重要甚至决定性的角色仍未有定论。

(4) 研究发现 FeII 发射线相对于窄线区和 H $\beta$  发射线有系统性红移, 但后续的研究对此有异议。因此, FeII 发射区是位力化的还是内流, 目前仍有争议。

(5) 基于 SDSS 大样本的活动星系核的研究表明, 紫外波段的 FeII 与 MgII  $\lambda$ 2 800 Å 发射线的强度比与  $L/L_{\text{Edd}}$  存在强烈的相关性。校准了来自 MgII/FeII 对  $L/L_{\text{Edd}}$  的依赖后, 利用 Fe 元素与  $\alpha$  族元素丰度的比值作为宇宙金属丰度指示器, 研究表明,  $\alpha$  族元素的增丰可能发生在红移  $z \approx 2$  或者更早时期。

## 致谢

非常感谢审稿人提出的宝贵建议。

## 参考文献:

- [1] Verner E M, Verner D A, Korista K T, et al. ApJS, 1999, 120: 101
- [2] Sigut T A A, Pradhan A K. ApJS, 2003, 145: 15
- [3] Bruhweiler F, Verner E. ApJ, 2008, 675: 83
- [4] Grandi S A. ApJ, 1982, 255: 25
- [5] Wills B J, Netzer H, Wills D. ApJ, 1985, 288: 94
- [6] Sulentic J W, Marziani P, Dultzin-Hacyan D. ARA&A, 2000, 38: 521
- [7] Hu C, Wang J M, Ho L C, et al. ApJ, 2008, 687: 78
- [8] Boroson T A, Green R F. ApJS, 1992, 80: 109
- [9] Hamann F, Ferland G. ApJ, 1993, 418: 11
- [10] Yoshii Y, Tsujimoto T, Kawara K. ApJ, 1998, 507: L113
- [11] Dong X B, Wang J G, Ho L C, et al. ApJ, 2011, 736: 86
- [12] Sameshima H, Yoshii Y, Kawara K. ApJ, 2017, 834: 203
- [13] Boroson T A. ApJ, 2002, 565: 78
- [14] Shen Y, Ho L C. Nature, 2014, 513: 210
- [15] Sun J, Shen Y. ApJ, 2015, 804: L15
- [16] Marziani P, Sulentic J W, Zwitter T, et al. ApJ, 2001, 558: 553
- [17] Shields G A, Ludwig R R, Salviander S. ApJ, 2010, 721: 1835
- [18] Ferland G J, Hu C, Wang J M, et al. ApJ, 2009, 707: L82
- [19] Phillips M M. ApJS, 1978, 38: 187
- [20] Marziani P, Sulentic J W. ApJ, 1993, 409: 612
- [21] Popović L Č, Mediavilla E, Bon E, et al. A&A, 2004, 423: 909
- [22] Kovačević J, Popović L Č, Dimitrijević M S. ApJS, 2010, 189: 15
- [23] Kovačević-Dojčinović J, Popović L Č. ApJS, 2015, 221: 35
- [24] Marinello M, Rodríguez-Ardila A, Garcia-Rissmann A, et al. ApJ, 2016, 820: 116
- [25] Maoz D, Netzer H, Peterson B M, et al. ApJ, 1993, 404: 576
- [26] Wang J, Wei J Y, He X T. A&A, 2005, 436: 417
- [27] Vestergaard M, Peterson B M. ApJ, 2005, 625: 688
- [28] Kuehn C A, Baldwin J A, Peterson B M, et al. ApJ, 2008, 673: 69
- [29] Han X, Wang J, Wei J, et al. Science China Physics, Mechanics and Astronomy, 2011, 54: 346
- [30] Kaspi S, Smith P S, Netzer H, et al. ApJ, 2000, 533: 631
- [31] Bian W H, Huang K, Hu C, et al. ApJ, 2010, 718: 460
- [32] Barth A J, Pancoast A, Bennert V N, et al. ApJ, 2013, 769: 128



- [33] Rafter S E, Kaspi S, Chelouche D, et al. ApJ, 2013, 773: 24
- [34] Chelouche D, Rafter S E, Cotlier G I, et al. ApJ, 2014, 783: L34
- [35] Hu C, Du P, Lu K X, et al. ApJ, 2015, 804: 138
- [36] Wang F, Du P, Hu C, et al. ApJ, 2016, 824: 149
- [37] Park S, Woo J H, Romero-Colmenero E, et al. ApJ, 2017, 847: 125
- [38] Dong X B, Ho L C, Wang J G, et al. ApJ, 2010, 721: L143
- [39] Villar Martín M, Bellocchi E, Stern J, et al. MNRAS, 2015, 454: 439
- [40] Wang T, Dai H, Zhou H. ApJ, 2008, 674: 668
- [41] Riffel R, Rodríguez-Ardila A, Pastoriza M G. A&A, 2006, 457: 61
- [42] Collin-Souffrin S, Dumont S, Heidmann N, et al. A&A, 1980, 83: 190
- [43] Joly M. A&A, 1987, 184: 33
- [44] Sigut T A A, Pradhan A K. ApJ, 1998, 499: L139
- [45] Verner E, Bruhweiler F, Verner D, et al. ApJ, 2003, 592: L59
- [46] Baldwin J A, Ferland G J, Korista K T, et al. ApJ, 2004, 615: 610
- [47] Sameshima H, Kawara K, Matsuoka Y, et al. MNRAS, 2011, 410: 1018
- [48] Netzer H, Wills B J. ApJ, 1983, 275: 445
- [49] Verner E, Bruhweiler F, Verner D, et al. ApJ, 2004, 611: 780
- [50] Joly M. A&A, 1991, 242: 49
- [51] Lawrence A, Elvis M, Wilkes B J, et al. MNRAS, 1997, 285: 879
- [52] Kuraszekiewicz J, Wilkes B J, Czerny B, et al. ApJ, 2000, 542: 692
- [53] Harris K A, Williger G M, Habertzettl L, et al. MNRAS, 2013, 435: 3125
- [54] Clowes R G, Raghunathan S, Söchting I K, et al. MNRAS, 2013, 433: 2467
- [55] Sulentic J W, Marziani P, Zamfir S, et al. ApJ, 2012, 752: L7
- [56] Wang T, Ferland G J, Yang C, et al. ApJ, 2016, 824: 106
- [57] Hu C, Wang J M, Ho L C, et al. ApJ, 2012, 760: 126
- [58] Marziani P, Sulentic J W, Negrete C A, et al. MNRAS, 2010, 409: 1033
- [59] Nomoto K, Iwamoto K, Kishimoto N. Science, 1997, 276: 1378
- [60] Dong X B, Wang T G, Wang J G, et al. ApJ, 2009, 703: L1

## Progress on Fe II Emission Lines of Active Galactic Nuclei

HUANG Hong-qiang, LU Wei-jian, LIN Ying-ru

*(Baise University, Baise 533000, China)*

**Abstract:** As an important signature of many active galactic nuclei (AGNs), the Fe II emission lines are presented in the AGN spectra from the ultraviolet to the near-infrared. They are not only closely related to several basic issues in AGN, but also have important implication in cosmology. In this paper, the research progress of Fe II emission lines in recent years is reviewed and some research directions that still under debate are pointed out, which can be summarized into the following points.

First, there is evidence that the basic physical driver of the Eigenvector I is the Eddington ratio ( $L/L_{\text{Edd}}$ ), but why the Fe II strength increasing with  $L/L_{\text{Edd}}$  is not well understood.

Second, we review the location of Fe II emission region. Firstly, systematic investigation of the width of Fe II emission lines and other emission lines in Type I quasars indicates their origin from the intermediate line region. Secondly, although the AGN samples suffer from bias, reverberation-mapping (RM) shows that the location of the Fe II emission region is hard to be distinguished from the H $\beta$ -emitting gas in most of RM AGNs. Thirdly, systematic observations of the narrow optical Fe II-emitting gas indicate an origin of the innermost regions of the narrow-line region on physical scales smaller than the obscuring torus.

Third, there are growing evidences that there are several mechanisms responsible for the excitation of Fe II emission, but it is not yet fully confirmed which one plays an important and even dominant role.

Fourth, systematic redshift of the optical Fe II emission lines relative to either the local source rest frame or broad-line H $\beta$  was found, which serves as evidence for inflow of Fe II emission region. However, follow-up studies showed that this redshift may not be significant enough. Thus, it is still under debate whether the kinematics of Fe II emission region is virialized or dominated by inflow.

Finally, we review some progresses in the cosmology implications of Fe II emission lines. By correcting the systematic dependence of the Fe II/Mg II intensity ratio on  $L/L_{\text{Edd}}$ , it is reported that  $\alpha$ -enrichment by mass loss from metal-poor intermediate-mass stars may occur at  $z \approx 2$  or earlier.

**Key words:** active galactic nuclei; quasar; emission lines