第 47 卷 第 1 期　　天 文 学 报　　Vol.47 No.1
2006 年 1 月　　ACTA ASTRONOMICA SINICA　　Jan., 2006

活动星系核的铁 Kα 和铁 Kβ 发射线 —Cerenkov 线状辐射的进一步证据*

刘当波 [1]　陈 磊 [1]　陈文屏 [2]　尤峻汉 [1]

(1 上海交通大学物理系空间与天体物理研究所 上海 200030)
(2 台湾中央大学物理系天文研究所 台北 32054)

摘要　最近 XMM-Newton 观测到了 Seyfert 1 星系，NGC 3783, 除存在着 6.4 keV 的铁 Kα 发射线外, 还存在着很强的 7.0 keV 的铁 Kβ 发射线, 且两者之间的等值宽度 (EW) 之比难以由传统的 “光电吸收 — 莹光机制” 来解释. 利用尤峻汉等人提出的 Cerenkov 线状发射机制可合理解释 $\mathrm{EW_{K\alpha}/EW_{K\beta}}$. 给出了详细的模型考虑和理论计算，结果表明活动星系核中产生铁 K 线的机制不只有莹光机制还有 Cerenkov 线状辐射机制. 两者共存于活动星系核 (AGNs) 中，而且以 Cerenkov 辐射机制为主.

关键词　**辐射机制：一般，线：形成，** X– **射线：星系，星系：赛弗特，黑洞物理**
中图分类号： P 144;　　**文献标识码：** A

1 引言

我们曾经指出，用传统的光电吸收 — 莹光机制 [1−3] 解释活动星系核 Seyfert 1 星系的铁 Kα 发射线的物理起源时遇到一个原则性困难：该机制所预言铁 K 线与 X 射线连续谱的光变之间存在正相关，而这一预言没有得到观测的证实 [4,5]. 由此我们指出，活动星系核的铁 K 发射线可能主要产生于相对论电子的切仑科夫线状辐射机制. 因为在切仑科夫机制中，铁线发射的能量是由相对论电子提供的，而不是 X 射线连续谱. 这就自然地说明了铁线与连续谱光变之间不存在相关.

最新的观测表明， Seyfert 1 星系还有相当强的铁 Kβ 发射线 (见图 1), 其强度远超过莹光机制的预期值 [6−8]. 这是对传统的莹光机制的新挑战. 例如对 Seyfert 1 星系 NGC 3783, 观测到位于 6.4 keV 和 7.0 keV 的两条发射线 [6], 其等值宽度分别为 120 eV 和 35 eV, 比值为 $\mathrm{EW^{obs.}_{6.4}/EW^{obs.}_{7.0}} = 3.43$. 如果把这两条线看作是低价铁的 K$\alpha$ 和 Kβ 发射线, 则观测比值可表为 $\mathrm{EW^{obs.}_{K\alpha}/EW^{obs.}_{K\beta}} = 3.43$. 而莹光机制对两条等值宽度比有明确无误的理论预言，为 $\mathrm{EW_{K\alpha}/EW_{K\beta}} \approx 7$. 几乎是观测比的两倍. 很强的铁 K$\beta$ 线的存在暗示我们，在活动星系核周边环境中，有除莹光机制之外的其他谱线发射机制在起作用. 它们也对铁 K 线的发射，至少对铁 Kβ 线发射有重要贡献.

2005-01-18 收到
* 国家自然科学基金 (No. 10373010) 和高校博士点科研基金 (No. 20030248012) 资助课题

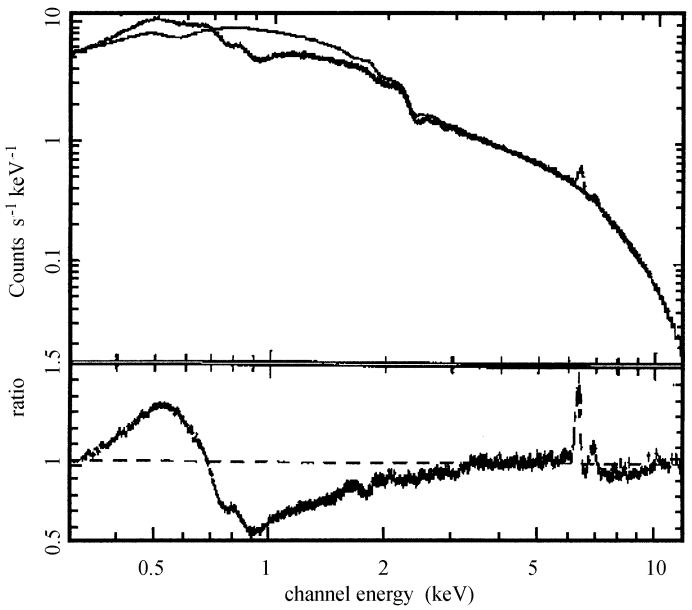

图 1 Seyfert 1 星系 NGC 3783 观测的铁 Kα 和铁 Kβ 发射线，$\sim 6.4\,\mathrm{keV}$ 处的发射峰为铁 Kα 发射线，$\sim 7.0\,\mathrm{keV}$ 处的发射峰为铁 Kβ 发射线 (取自引文 [6]).

Fig. 1 The observed iron Kα and Kβ line in Seyfert 1 galaxy NGC 3783. The peak at $\sim 6.4\,\mathrm{keV}$ is the Kα line of iron in the low or intermediate ionization states; the peak at $\sim 7.0\,\mathrm{keV}$ is the Kβ line (taken from Ref. [6]).

Reeves 等人提出，处于 $\sim 7.0\,\mathrm{keV}$ 的发射线很有可能是低价铁的 Kβ 线 ($7.06\,\mathrm{keV}$) 和类氢铁 Fe^{+25} 的 Kα 线 ($6.97\,\mathrm{keV}$) 的混合线. 这两条发射线的频率如此接近，以至观测上无法分辨. 他们试图以此说明观测比与莹光机制预言的不一致. 但是我们对这一解释的合理性表示怀疑. 在现有的物理学中，只能列出 3 种产生类氢铁 Fe^{+25} 的 Kα 线的机制：即光电吸收 — 莹光线发射，Fe^{+25} 离子的碰撞激发 — 退激发过程，以及 Fe^{+26} 的复合级联过程，但是我们论证，三者中没有一个能有效产生类氢铁 Fe^{+25} 的 Kα 线. 首先，类氢铁的 Kα 线不可能由光电吸收 — 莹光线机制产生，即不能通过铁离子的 K— 壳层电子的光电吸收及随后 L— 壳层电子的 $2 \to 1$ 的跃迁产生 Kα. 因为 Fe^{+25} 离子的 L 壳层是空的. 产生 Fe^{+25} 的 Kα 线的最重要的机制，看来只能是高电离等离子体中裸铁离子 Fe^{+26} 与自由电子的复合 — 级联过程. 虽然，在一个高温高电离等离子体中 (例如 $T \sim 10^8\,\mathrm{K}$), 常有 Fe^{+26} 与 Fe^{+25} 的共存. 因此与 Fe^{+26} 离子的复合 — 级联过程相伴随的，还可能有类氢铁离子 Fe^{+25} 和电子的碰撞激发 — 退激发过程，它也可以产生 Fe^{+25} 的 Kα 线. 但是它和共存的复合 — 级联发射相比非常弱，完全可以忽略不计. 因此复合 — 级联过程实际上是传统物理学中能产生类氢铁 Fe^{+25} 的 Kα 发射线的唯一机制. 但是复合机制有一个明确的预言：伴随类氢铁的复合 Kα 线的出现，在 $\sim 9.2\,\mathrm{keV}$ 的 K— 边处会呈现一个强度

对于 $T \gtrsim 10^8\,\mathrm{K}$ 的高温等离子体，Fe^{+25} 离子确实存在，但其碰撞跃迁 $1 \to 2$ 的激发截面 $\sigma_\mathrm{c}\left(\mathrm{Fe}^{+25}\right)$ 非常小，$\sigma_\mathrm{c}\left(\mathrm{Fe}^{+25}\right) \propto Z^{-2}$, $Z = 26$ 是铁的原子序数. 而复合截面 $\sigma_\mathrm{r}\left(\mathrm{Fe}^{+26}\right) \propto Z^4$. 只要等离子体电子温度 T 在合理取值范围内取值，截面比值 $\sigma_\mathrm{c}\left(\mathrm{Fe}^{+25}\right)/\sigma_\mathrm{r}\left(\mathrm{Fe}^{+26}\right) \propto Z^{-6}$ 都是一个很小的量.

几乎和 Kα 线相等的 K 复合发射边. 两者强度比为 $I_{\rm edge}/I_{\rm K\alpha}\approx 0.93\,(kT/{\rm keV})^{0.2}\approx 1.0$ [9]. 但是对于 NGC 3783, 观测上没有检测到 $\sim 9.0\,{\rm keV}$ 附近有任何发射峰的迹象.

基于以上情况，我们认为：除了莹光机制之外，产生 K 发射线的另一机制只可能是我们提出并得到实验证实的 '切仑科夫线状辐射机制'. 观测的铁 Kα 和 Kβ 线应为莹光和切仑科夫机制两者共同产生. 本文通过计算求出，当两者的相对强度比 $\chi\equiv I^{\rm c}_{\rm K\beta}/I^{\rm f}_{\rm K\beta}$ 取什么值时 (χ 表示两种机制中那一个对 AGN 中铁 Kβ 线发射的贡献更大), 会使计算的等值宽度比 ${\rm EW_{K\alpha}/EW_{K\beta}}$ 与 NGC 3783 的观测比 ${\rm EW^{obs.}_{6.4}/EW^{obs.}_{7.0}}=3.43$ 一致.

2　基本公式和计算

按切仑科夫线状辐射理论 [5,10], 在光学厚条件下，切仑科夫线辐射总出射强度为

$$I^{\rm c}=Y\left[\ln\left(1+X^2\right)-2\left(1-\frac{\arctan X}{X}\right)\right]\,. \tag{1}$$

当 $X<1$, 此情况为活动星系核的合理情况 (参见 (3) 式), 铁 K- 线的出射强度近似为

$$I^{\rm c}_{\rm K}\approx\frac{1}{3}Y_{\rm K}X^2_{\rm K}\,. \tag{2}$$

对铁 K- 线：

$$\begin{aligned}X_{\rm K}&=7.27\times10^{-56}\sqrt{\varepsilon^{-7}_{\rm 1u}A_{\rm u1}\Gamma^{-1}_{\rm 1u}g_{\rm u}S_2\left(\frac{S_1}{g_1}-\frac{S_{\rm u}}{g_{\rm u}}\right)}\,N_{\rm Fe}\gamma^2_{\rm c}\,,\\ Y_{\rm K}&=3.43\times10^{-8}\,\varepsilon_{\rm 1u}A_{\rm u1}g_{\rm u}S_2^{-1}\left(\frac{S_1}{g_1}-\frac{S_{\rm u}}{g_{\rm u}}\right)N_{\rm e}\,.\end{aligned} \tag{3}$$

其中下标 u 为与指定的铁 K 线相应的铁离子的上能级，u=2 和 u=3 分别对应于铁 Kα 和 Kβ 线. $N_{\rm Fe}$ 为气体中铁离子密度；$N_{\rm e}$ 和 $\gamma_{\rm c}$ 则分别为气体中相对论电子密度和其平均能量值；$A_{\rm u1}$ 为 ${\rm u}\to1$ 的自发跃迁几率，$\Gamma_{\rm u1}=\Gamma_{\rm u}+\Gamma_1=\sum_{\rm i=1}^{\rm u-1}A_{\rm ui}$ 为能级 u 的阻尼常数. 而 $g_{\rm u}$ 和 $S_{\rm u}$ 分别为与谱线对应的铁离子的上能级 u 的简并度和实际电子占有数. 对于铁的 Kα 线，u=2, $g_2=8$, S_2 的值则取决于铁离子的价次, 例如, 对于铁离子 $\rm Fe^{+22}$(类铍铁), 应取 $S_2=2$. 同样, 对于类铍铁离子的 Kβ 线，u=3, $g_3=18$, $S_3=0$, 等等. 式中 $\varepsilon_{\rm 1u}$ 为以尔格为单位的光子能量，例如 $\varepsilon_{12}=\varepsilon_{\rm K\alpha}=1.025\times10^{-8}\,{\rm erg}$, $\varepsilon_{13}=\varepsilon_{\rm K\beta}=1.131\times10^{-8}\,{\rm erg}$.

由 (2) 式和 (3) 式可以得到切仑科夫铁 Kα 和 Kβ 的线强比为

$$\frac{I^{\rm c}_{\rm K\alpha}}{I^{\rm c}_{\rm K\beta}}=\left(\frac{\varepsilon_{12}}{\varepsilon_{13}}\right)^{-6}\left(\frac{g_2A_{21}}{g_3A_{31}}\right)^2\left(\frac{\Gamma_{12}}{\Gamma_{13}}\right)^{-1}\left(\frac{S_1}{g_1}-\frac{S_2}{g_2}\right)^2\left(\frac{S_1}{g_1}-\frac{S_3}{g_3}\right)^{-2}\,. \tag{4}$$

(4) 式表明, 线强比和两线的频率比 $\varepsilon_{12}/\varepsilon_{13}$, 跃迁概率比 g_2A_{21}/g_3A_{31}, 阻尼常数比 Γ_{21}/Γ_{31} 等与原子参量有关, 也和铁的价次有关, 即与比值 $(1-S_2/g_2)\,/\,(1-S_3/g_3)$ 有关. 我们注意到，虽然不同价次的铁离子的原子参数如 $\varepsilon_{\rm 1u}$, $A_{\rm u1}$, $\Gamma_{\rm u1}\equiv\Gamma_{\rm u}+\Gamma_1$ 等略有不同，但不同价铁离子的比值 $\varepsilon_{12}/\varepsilon_{13}$, g_2A_{21}/g_3A_{31}, Γ_{21}/Γ_{31} 却差异很小. 误差应不超过 $\sim10\%$—20%. 在目前铁离子的原子数据还不够完整. 正处于数据积累阶段. 因此我们在以下计算中,

对于不同价次铁，近似都取 Fe^{+24} 离子的原子数据做计算 [11]. 对线强比有显著影响的其实是铁的价次，即 (3) 式中的因子 S_1 、 S_2 、 S_3. 计算结果见表 1.

表 1 各种价次铁离子的切仑科夫铁 Kα 和 Kβ 发射线线强比 R

Table 1 The ratio R of the equivalent widths of Cerenkov Kα and Kβ lines of iron ions with different valence

Iron Ions	Fe^0—Fe^{+16}	Fe^{+17}	Fe^{+18}	Fe^{+19}	Fe^{+20}	Fe^{+21}	Fe^{+22}	Fe^{+23}	Fe^{+24}	Fe^{+25}
S_1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1
S_2	8	7	6	5	4	3	2	1	0	0
$S_1/g_1 - S_2/g_2$	0	0.125	0.25	0.375	0.50	0.625	0.75	0.875	1	0.5
S_3	16—0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$S_1/g_1 - S_3/g_3$	0.11—1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.5
$R \equiv I^{\rm c}_{\rm K\alpha}/I^{\rm c}_{\rm K\beta}$	0	0.095	0.38	0.85	1.51	2.36	3.40	4.63	6.05	6.05

由表 1 可见，不同价次的铁离子，其切仑科夫线强比 $R \equiv I^{\rm c}_{\rm K\alpha}/I^{\rm c}_{\rm K\beta}$ 有明显不同值. 对于 Fe^0—Fe^{+16} 的低价铁离子， $R = 0$, 即切仑科夫机制不产生铁 Kα 线发射. 而中等价次铁离子如 Fe^{+22} (即类铍铁离子), 最有希望和观测的线强比做比较.

利用表 1 给出的切仑科夫线强比 R, 就可以完成等值宽度比的计算. 按定义，有

$$\frac{\mathrm{EW_{K\alpha}}}{\mathrm{EW_{K\beta}}} \equiv \frac{I_{\rm K\alpha}/I_0\varepsilon^{-\alpha}_{\rm K\alpha}}{I_{\rm K\beta}/I_0\varepsilon^{-\alpha}_{\rm K\beta}} = \left(\frac{\varepsilon_{\rm K\alpha}}{\varepsilon_{\rm K\beta}}\right)^{\alpha}\left(\frac{I_{\rm K\alpha}}{I_{\rm K\beta}}\right) , \tag{5}$$

其中 $\alpha = \Gamma - 1$ 是连续谱幂律谱的谱指数， Γ 是光子谱指数. (5) 式表明，等值宽度比的计算归结为谱线强度比的计算. 但是 (5) 式中的线强比 $I_{\rm K\alpha}/I_{\rm K\beta}$ 不能简单地用表 1 中的切仑科夫线强比 R 代入，因为在实际的活动星系核中，铁的 K- 线发射肯定有来自莹光发射机制的贡献，它和切仑科夫发射机制共存于 AGN 中. 即 $\sim 6.4\,\mathrm{keV}$ 处的观测谱线当为切仑科夫 Kα 线与莹光 Kα 线的混合. 同样， $\sim 7.0\,\mathrm{keV}$ 处应为两种机制产生的 Kβ 线的混合. 故 (5) 式中的线强比应当是

$$\frac{I_{\rm K\alpha}}{I_{\rm K\beta}} = \frac{I^{\rm f}_{\rm K\alpha} + I^{\rm c}_{\rm K\alpha}}{I^{\rm f}_{\rm K\beta} + I^{\rm c}_{\rm K\beta}} = \frac{I^{\rm f}_{\rm K\alpha} + RI^{\rm c}_{\rm K\beta}}{I^{\rm f}_{\rm K\beta} + I^{\rm c}_{\rm K\beta}} , \tag{6}$$

式中的 R 由表 1 给出， R 和铁离子价次有关. (6) 式可以进一步简化，因为在莹光发射机制中， Kα 和 Kβ 的线强比有确定值， $I^{\rm f}_{\rm K\alpha}/I^{\rm f}_{\rm K\beta} \approx 8$. 因此 (6) 式成为

$$\frac{I_{\rm K\alpha}}{I_{\rm K\beta}} = \frac{8I^{\rm f}_{\rm K\beta} + RI^{\rm c}_{\rm K\beta}}{I^{\rm f}_{\rm K\beta} + I^{\rm c}_{\rm K\beta}} . \tag{7}$$

假如 AGN 中切仑科夫铁 Kβ 线是莹光铁 Kβ 的 χ 倍， $\chi \equiv I^{\rm c}_{\rm K\beta}/I^{\rm f}_{\rm K\beta}$. 由于我们无法知道 AGN 中哪个线发射机制是主要的， χ 无法事先确定，只能由观测分析中定出. 于是 (7) 式成为

$$\frac{I_{\rm K\alpha}}{I_{\rm K\beta}} = \frac{8 + R\chi}{1 + \chi} . \tag{8}$$

将 (8) 式代入 (5) 式，得到

$$\frac{\mathrm{EW_{K\alpha}}}{\mathrm{EW_{K\beta}}}=\left(\frac{\varepsilon_{\mathrm{K}\alpha}}{\varepsilon_{\mathrm{K}\beta}}\right)^{\alpha}\left(\frac{8+R\chi}{1+\chi}\right)\,. \tag{9}$$

取 $\varepsilon_{\mathrm{K}\alpha}=6.4\,\mathrm{keV}$, $\varepsilon_{\mathrm{K}\beta}=7.0\,\mathrm{keV}$, $\alpha\approx 0.6$—0.7 (例如, 对于 NGC 3783, 光子谱指数 $\Gamma\approx 1.6$—1.7), 令 (9) 式与源 NGC 3783 观测的等值宽度比 $\mathrm{EW}^{\mathrm{obs.}}_{\mathrm{K}\alpha}/\mathrm{EW}^{\mathrm{obs.}}_{\mathrm{K}\beta}=3.43$ 相等，得到

$$\frac{8+R\chi}{1+\chi}=3.65\,. \tag{10}$$

由 (10) 式计算的源 NGC 3783 的 χ 值见表 2. 它与铁离子价次有关.

表 2　由观测的铁 Kα 和 Kβ 等值宽度比导出 NGC 3783 中切仑科夫线发射与莹光发射的相对强度比 χ

Table 2　The relative contribution χ of Cerenkov line emission to the fluorescence mechanism for the iron Kβ line emission in NGC3783, calculated by the observed equivalent widths of iron Kα and Kβ lines

Iron Ions	Fe^0— Fe^{+16}	Fe^{+17}	Fe^{+18}	Fe^{+19}	Fe^{+20}	Fe^{+21}	Fe^{+22}	Fe^{+23}	Fe^{+24}	Fe^{+25}
$R\equiv I^{\mathrm{c}}_{\mathrm{K}\alpha}/I^{\mathrm{c}}_{\mathrm{K}\beta}$	0	0.095	0.38	0.85	1.51	2.36	3.40	4.63	6.05	6.05
$\mathrm{EW}^{\mathrm{c}}_{\mathrm{K}\alpha}/\mathrm{EW}^{\mathrm{c}}_{\mathrm{K}\beta}$	0	0.089	0.36	0.80	1.43	2.23	3.22	4.38	5.72	5.72
$\chi\equiv I^{\mathrm{c}}_{\mathrm{K}\beta}/I^{\mathrm{f}}_{\mathrm{K}\beta}$	1.19	1.22	1.33	1.55	2.03	3.37	17.4			

由表 2 可见，两种机制对铁 K 线的相对贡献大小值还不能最后确定. χ 值最终还取决于铁的价次. 不同价次铁有不同 χ 值. 如果铁是以低价铁形式存在，例如为 Fe^0—Fe^{+19}, 则 $\chi\sim 1.2$—1.6, 即切仑科夫对铁线发射的贡献略高于莹光机制. 如果是 Fe^{+21}, 则 $\chi=3.37$, 切仑科夫铁线发射的贡献是莹光发射的 3 倍以上. 对于 Fe^{+22}, $\chi=17.4$. 莹光机制可以忽略不计. 铁离子的价次在观测上的确定最终取决于铁的 Kα, Kβ 频率位置的精确确定. Reeves 等人的最新报告似乎表明铁的 Kα, Kβ 频率位置分别在 6.4 keV 及 7.0 keV, 这对应于低价铁离子. 但他们在同一观测中又指出，在 ~7—9 keV 即中等电离铁的 K– 边位置观测到明显的吸收，以及在 ~6.7 keV 处看到 Fe^{+22}—Fe^{+24} 离子的吸收线. 这明显指出有中等电离铁的存在. 这一情况给 χ 值的确定带来困难. 但无论如何，表 2 给我们的总体印象是：不论铁离子价次如何， AGN 中的铁线发射都是以切仑科夫机制为主 (即总有 $\chi>1$). 因此我们断言，至少对 NGC 3783, 在探讨铁线起源以及铁线的各种奇异的观测性质时，必须认真考虑切仑科夫线状发射机制.

3　结论和讨论

最近的观测发现，一些 Seyfert 1 星系除存在铁 Kα 发射线外，还存在相当强的铁 Kβ 发射线 [6−8], 其强度远超过莹光机制的预期值，这是传统的莹光机制无法解释的，这表明活动星系核周边环境中有其他的谱线发射机制在起作用. 本文利用切仑科夫线状发射机制成功解释了 Seyfert 1 星系 NGC 3783 观测的铁 Kα 和 Kβ 发射线的等值宽度比

$EW^{obs.}_{K\alpha}/EW^{obs.}_{K\beta} = 3.43$ [6], 因此在探讨活动星系核铁线起源以及铁线的各种奇异的观测性质时, 必须认真考虑切仑科夫线状发射机制.

参 考 文 献

1 Guilbert P W, Rees M J. MNRAS, 1988, 233: 475
2 Reynolds C S. ASP Conf Series Vol TBD, 2001, 105
3 Fabian A C, Rees M J, Stella L, et al. MNRAS, 1989, 238: 729
4 Weaver K A, Gelbord J, Yaqoob T. ApJ, 2001, 550: 261
5 You J H, Liu D B, Chen W P, et al. ApJ, 2003, 599: 164
6 Reeves J N, Nandra K, George I M, et al. ApJ, 2004, 602: 648
7 Wang J X, Zhou Y Y, Xu H G, et al. ApJ, 1999, 516: L65
8 Fabian A C, et al. MNRAS, 2002, 335: L1
9 Paerels F, Kuulkers E, Heise J, et al. ApJ, 2000, 535: L25
10 You J H, Xu Y D, Liu D B, et al. A&A, 2000, 362: 762
11 Xu H G, Zhang S W, Chen J F, et al. ApJ, 1995, 441: 443

Iron Kα and Kβ Lines in Active Galactic Nuclei (AGNs) — Evidence of the Existence of the Cerenkov Line-Like Radiation

LIU Dang-bo[1] CHEN Lei[1] CHEN Wen-ping[2] YOU Jun-han[1]

(1 *Institute for Space and Astrophysics, Department of Physics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai* 200030)

(2 *Institute of Astronomy, Department of Physics, Taiwan Central University, Taibei* 32054)

Abstract The update observation of XMM-Newton shows that, except for the iron Kα line at ~ 6.4 keV, there is also an apparent iron Kβ line at ~ 7.0 keV in Seyfert 1 galaxy NGC 3783 with intensity markedly higher than that predicted by the traditional fluoresence emission. The observed ratio of the equivalent widths $EW_{K\alpha}/EW_{K\beta} \approx 3.43$ is difficult to understand from the 'photoelectric absorption-fluorescence emission' mechanism. In this paper, we argue that the new Cerenkov line-like radiation mechanism suggested by You et al. can provide a solution for the puzzle of $EW_{K\alpha}/EW_{K\beta}$. We present a detailed model consideration and theoretical calculation. Our calculated result shows that, except for the fluorescence emission, there coexists a Cerenkov line-like radiation mechanism in AGNs, which gives a significant contribution to the iron K-line emission, even moderately higher than the former.

Key words radiation mechanisms: general, line: formation, X-rays: galaxies, galaxies: Seyfert, black hole physics