

宽吸收线类星体物理研究*

王挺贵[†]

(中国科学技术大学天体物理中心 合肥 230026)

摘要 现在普遍相信类星体的反馈会调节寄主星系形成的进程,但其中具体的物理过程依然是个谜.类星体的外流是一个重要的候选者.为了确定外流的重要性,中国科学技术大学天体物理中心开展了宽吸收线类星体的一系列研究,取得了一些进展:(1)宽吸收线区的紫外吸收物质的柱密度比原来预计高出 2 个量级,低电离吸收线形成于饱和的高电离吸收线区(2)射电宁静的宽吸收类星体吸收物质主要在赤道面,并且不同的源吸收物质分布情况很不相同,而在射电强的类星体中,赤道和极向外流都是可能的(3)共振散射线偏振表明,外流物质携带角动量.

关键词 类星体,吸收线

The physics of broad absorption line quasars

WANG Ting-Gui[†]

(Center for Astrophysics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract Quasar feedback is considered a crucial process in galaxy formation and evolution; however, details of the physical process remain a mystery. Quasar outflow is one possible process. To assess the importance of quasar outflow we have performed a series of studies on broad absorption line (BAL) quasars, and have obtained the following results. (1) The UV absorption column density is an order of magnitude higher than previously believed, and low ionization BALs are formed in the high ionization zone. (2) In radio-quiet BAL quasars, the outflow is mainly confined to the equatorial direction while in radio-loud ones both equatorial and polar outflows are possible. (3) The polarization of resonantly scattered lines suggests that the outflow carries large angular momentum.

Keywords quasars, absorption lines

1 引言

一些星系中心的超大质量黑洞吸积周围的气体,气体在下落到黑洞过程中将巨大的引力结合能转换成粒子的热运动动能,产生大量的电磁辐射,同时吸积也是大质量黑洞增长的过程.它们的辐射光度甚至超过整个星系的恒星光度百倍,我们称这些天体为活动星系核.近 10 年来的观测表明,几乎所有大质量星系的中心都存在超大质量黑洞,核活动是星系演化的一个特殊阶段.人们普遍相信核活动巨大的能量输出使得它在星系演化的过程中起关键的作用,产生了一系列观测到的黑洞质量与星系参数的相关性.类星体是高光度的活动星系核统称.

大约 10%—20% 的类星体具有宽的、蓝移的离子吸收线,这些类星体被称为宽吸收线类星体 (BAL QSO). 最常见的紫外吸收线有 CIV1549,

NV1240, Ly α , SiIV1397, OVI1032, MgII2798, AlI-II1870 等类 Li 离子共振吸收线(如图 1 所示),这些吸收线是由类星体部分电离的高速外流物质吸收连续谱产生的,外流的速度可高达 0.1c—0.2c (c 为光速).如果这些外流具有足够的质量外流速率,它可能是联接核活动与星系演化的关键物理过程,同时也将对吸积过程产生重要影响.因此确定宽吸收线类星体物理参数近年来受到特别重视.

本文将介绍宽吸收线类星体的研究背景和我们近年来在这方面开展的一些研究工作,包括吸收物质的柱密度,外流的几何以及外流角动量的确定等.

* 国家自然科学基金(批准号:10533050)资助项目
2008-07-10 收到

[†] Email: twang@ustc.edu.cn

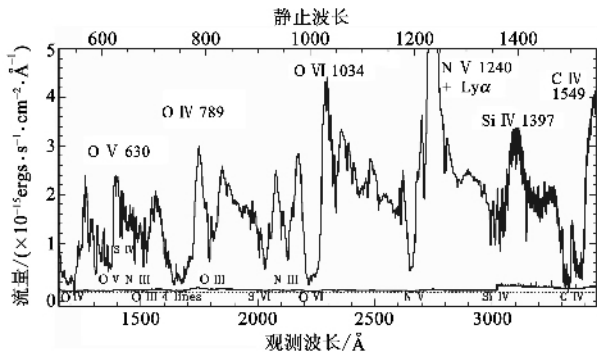


图 1 宽吸收线类星体 PG0946 + 301 的 HST 紫外光谱. 发射线标在谱的上方, 而吸收线在谱的下方标出. 注意在发射线的蓝侧有对应的宽吸收线(取自文献 [1])

2 宽吸收类星体中外流的基本图像

目前对宽吸收线类星体有 2 类截然不同的观点: 人们较为普遍接受的观点是, 所有的类星体都具有宽吸收线外流, 但外流只覆盖一少部分的立体角, 换言之, 只在类星体的一些视线方向上观测到了外流; 另一类观点是, 只有一些特殊的类星体具有宽吸收线外流. 观测检验这 2 个观点的主要方法是: (1) 通过比较 BAL QSO 吸收线区的覆盖因子与观测到宽吸收线类星体的比例, 如果二者一致, 则支持第一类模型; (2) 检验 BAL QSO 与非 BAL QSO 性质在统计上的差别, 如果有差别, 则二者可能是不同的. 第一类检验主要通过离子共振散射谱线的强度与理论模型预言的比较来确定. 对大部分吸收线而言, 离子与光子的作用并不是真吸收而是共振散射, 因而通过测量别的方向上散射过来的光就可以确定散射物质覆盖的区域. 这一方法给出宽吸收线区的覆盖因子上限为 30%, 但一定程度上与模型相关. 第二类方法发现 BAL 与非 BAL QSO 只在发射线轮廓上有细微差别, BAL QSO 的 CIV 线更加蓝移, 这可能说明它们有不同, 或者只是二类系统不同的视角方向引起的, 前者支持第一种观点, 而后者支持第二种观点, 因此第二类方法并没有给出明确的倾向.

宽吸收线外流是由辐射加速的, 如果外流的电离程度合适, 活动星系核强的紫外辐射可以非常有效地加速物质外流. 在光学薄的情况下, 辐射加速度可以写成:

$$a_r = \frac{\int \sigma_\nu L_\nu d\nu}{4\pi r^2 c} = \lambda \frac{L_{UV}}{L_{Edd}} \frac{GM}{r^2},$$

其中 σ_ν 为单位质量物质对频率为 ν 的光子的吸收

截面, L_ν 为频率 ν 处单位频率间隔的光度, λ 为平均吸收截面与电子散射截面之比, L_{UV} 为积分光度, L_{Edd} 为完全电离的氢辐射压与引力平衡时辐射光度(称为 Eddington 光度), M 为黑洞的质量. 对于典型的类星体而言 $L_{UV}/L_{Edd} \sim 0.1$, λ 取决于具体的吸收过程, 主要包括谱线的共振散射或者连续谱的光电吸收过程. 对于典型的类 Li 离子电离物质而言, 共振散射的截面与光电吸收的截面之比量级为 10^5 . 但共振散射只能发生在吸收物质共同坐标系共振频率附近, 很容易饱和, 因此它的重要性取决于吸收物质的速度梯度. 对于共振散射光学厚的物质, 二者的相对重要性由柱密度的速度梯度($n \frac{dr}{d\nu}$)以及电离连续谱的形状决定. 在考虑的电离度范围, λ 估计在 10—10000 之间. 在一些情况下, 尘埃的吸收也是重要的辐射力来源. 观测上发现吸收线轮廓的一些特征也表明共振线辐射压是外流的重要加速机制, 如 CIV 吸收坑中有时在速度 5800km/s 处有剩余流量的峰, 这是由于 NV 离子吸收类星体强的 Ly α 发射线后获得额外的加速度而使得该速度段的离子数目降低引起的.

一些宽吸收线类星体的吸收坑的深度比局部连续谱深, 从而要求宽吸收线物质同时也吸收发射线, 换言之, 宽吸收线区在发射线区外. 对于类星体, 典型的宽发射线区的尺度为 $10^{16} - 10^{17}$ cm, 作为比较, 典型的 $10^8 M$ 质量黑洞的半径为 1.5×10^{13} cm. 宽吸收线区可能延伸到 pc(秒差距)尺度. 从紫外吸收坑我们可以估计吸收离子柱密度的下限, 这个下限对应的物质柱密度只有 10^{21} cm $^{-2}$, 从吸收线轮廓看, 吸收物质是连续地外流, 从而估计吸收物质密度只有 $10^5 - 10^6$ cm $^{-3}$. 这种低密度的物质暴露在类星体的强辐射场中, 物质的电离程度很高, 类 Li 离子很难存在. 一种解决方案是, 在宽吸收线的内部存在高电离的吸收物质, 这些物质吸收软 X 射线, 从而保证外面的类 Li 离子的存在. 宽吸收线类星体中观测到强的软 X 射线吸收支持这种解决方案.

吸收物质的来源可能是黑洞吸积气体构成的吸积盘的风, 或者核区附近的气体. 当这些气体暴露在类星体的紫外辐射场中时, 它们将得到加速. 由于我们对吸积盘理论知道得有限, 我们并没有理解风是如何发生的. 在一些模型里, 如磁驱动风可能是吸积盘带走角动量的很有效的机制, 而角动量损失正是气体吸积的决定因素. 数值模拟表明, 流体风在后来基本上是径向的, 但现在还没有磁流体力学风的详细模拟. 现在关于宽吸收线的外流的基本图像

如图 2 所示.

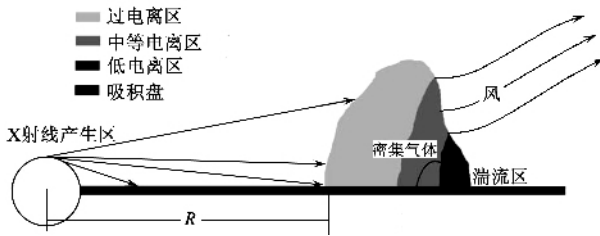


图 2 宽吸收线区的示意图. 吸积盘上物质由于局部的辐射压力将气体推高在吸积盘的底部形成物质, 大部分的软 X 射线在光照一面吸收, 形成高电离物质区, 该区域的物质在辐射压(光电吸收)的作用下, 最先缓慢加速, 在中等电离区, 紫外共振散射加速很有效, 形成宽吸收线的风.

3 类星体外流研究

3.1 紫外吸收物质的柱密度

早期的 X 射线观测表明, 宽吸收线类星体的软 X 射线很弱, 暗示具有很强的吸收^[2], 但是只有在中能 X 射线观测到高的吸收物质柱密度之后才明确给出宽吸收线类星体高的 X 射线吸收柱密度, 同时中能 X 射线观测显示部分覆盖.

如果这些 X 射线吸收物质和紫外吸收物质具有相同的外流速度和距离, 外流携带的动量和动能非常可观, 这将对星系的演化产生重要的影响. 但是由于技术的限制, 要从 X 射线波段确定出这些弱 X 射线源吸收物质的速度是很困难的. 王挺贵等^[3]最先意识到在软 X 射线产生光电吸收的物质会在紫外波段产生共振线吸收(图 3), 由于共振线吸收很容易饱和, 紫外波段只对比较低的柱密度敏感, 而相应的 X 射线吸收边则对大得多的光学深度敏感. 通过对 X 射线吸收的分析和光电理论计算的比较, 我们发现紫外的吸收线饱和是很严重的, 物质柱密度比原来预计要高出几个量级.

最近陆红琳等^[4]分析了低电离宽吸收线类星体, 他们发现, 这些天体的 AlIII 和 MgII 吸收线的光深在不同的速度处非常相似, 从而推断其吸收离子柱密度比在不同速度处非常相似. 这种相似性是出乎意料的, 因 AlIII 和 MgII 形成的条件有差别. 对电离复合过程的理论分析表明, 只有在 Al⁺³和 Mg⁺²主导的吸收物质, 二者的比例由电离连续谱的形状决定. 这要求产生紫外吸收物质的柱密度至少为 10^{22} cm^{-2} , 与上述分析一致(图 4). 同时这项工作也解决了在宽吸收线研究中的长期困惑——低电离和高电离宽吸收线在轮廓上的相似性.

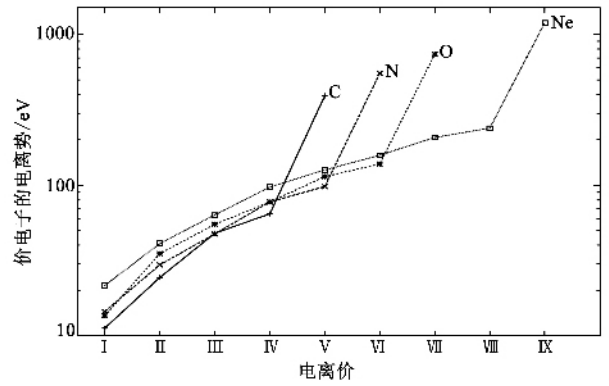


图 3 常见吸收元素的离子的价电子电离势(以电子伏特为单位). 能量小于 0.4keV 的软 X 射线吸收由类 Li 或者更低价的离子主导, 它们是产生紫外吸收线的主要离子(取自文献[5])

3.2 赤道和极向外流并存

宽吸收线类星体的一个重要参数是外流的几何, 早期的计算表明, 辐射压加速的吸积盘风沿着吸积盘的赤道面方向, 但是最近的研究表明, 在赤道和极向外流都是可能的. 电离物质中的电子散射核区的连续谱, 引起辐射的偏振, 对于轴对称的散射物质分布, 其偏振度与视线方向的夹角(i)的关系为 $p \propto \cos^2 i$. 观测上宽吸收线类星体的光学偏振高于非宽吸收线类星体的光学偏振, 从定性上说, 宽吸收线类星体倾角更大. 王慧元等^[6]基于宽吸收线和非宽吸收线类星体偏振分布的差别, 推断出不同的宽吸收线类星体具有相当大范围的吸收物质的分布.

射电辐射是类星体中少数能够空间分辨的成分, 一方面是其尺度的延展, 另一方面是射电干涉技术使得容易开展射电高分辨的观测. 射电喷流的良好准直性及其相对论性质, 使它成为类星体对称轴的观测指示, 早期研究的宽吸收线类星体都是射电弱的, 但在大规模的射电和光学深度巡天开展以后, 90 年代末发现不少射电强的宽吸收线类星体. 我们和中国科学院上海天文台合作, 对一些射电强的宽吸收线类星体开展高分辨的射电观测, 发现射电强的类星体即使在毫角秒的分辨率下基本上还是致密结构(图 5)^[7,8].

除了直接成像之外, 射电亮温度可以用来探测一类喷流与视线夹角很小的天体. 喷流的射电辐射是相对论运动电子在磁场中加速引起的同步辐射, 同步辐射的光子被相对论电子散射时获得能量产生逆 Compton 辐射. Kellerman 最早意识到一个基本稳定的射电源, 其射电辐射的一次逆 Compton 辐射不

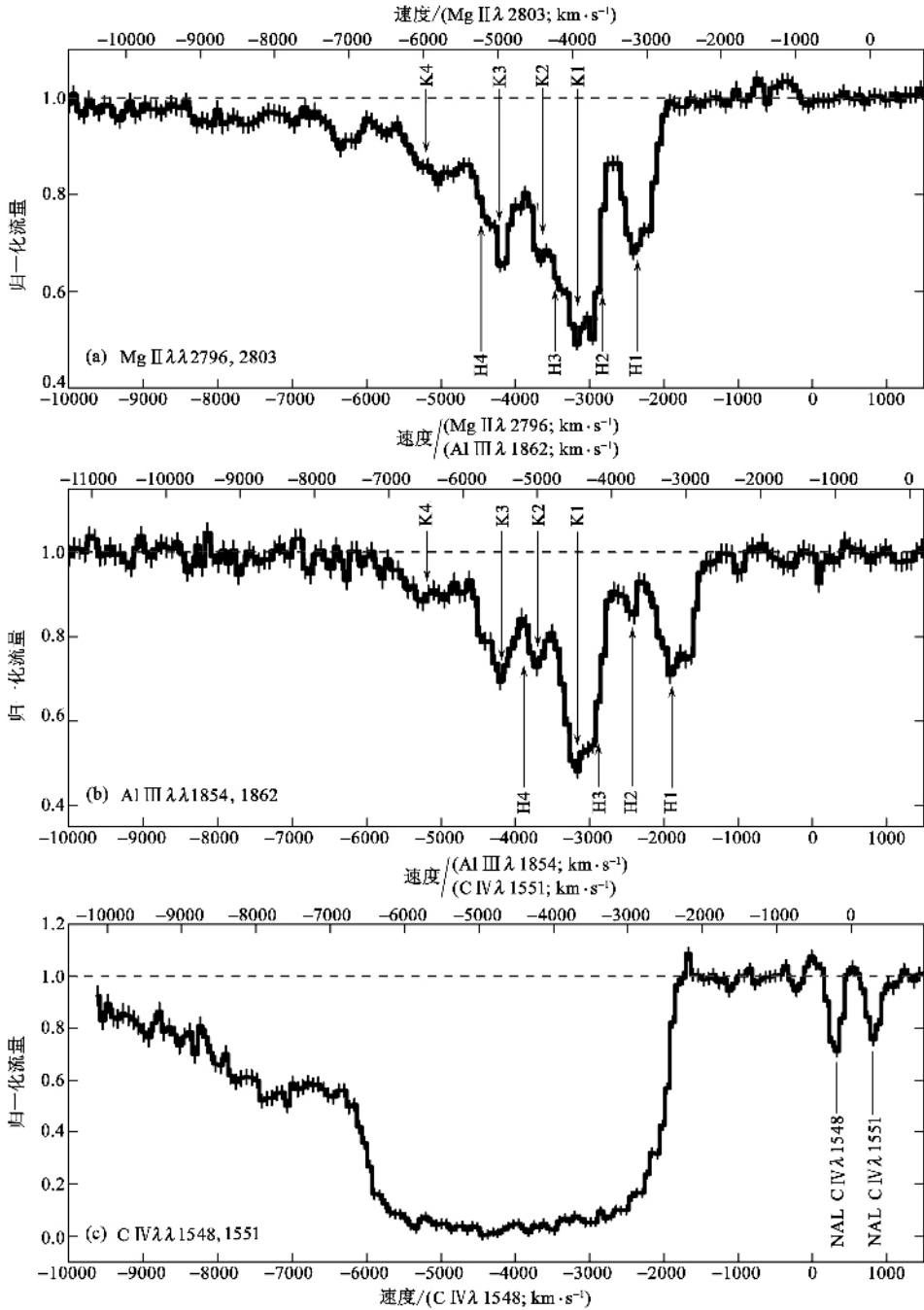


图4 低电离宽吸收线类星体 J1448 + 0424 的吸收线轮廓. MgII 和 AlIII 双线的轮廓非常相似,位置对应 CIV 吸收坑的最深的部分.(取自文献 [5])

应该超过同步辐射的密度,否则多次散射的结果导致电子快速冷却.换言之,同步辐射的亮温度应该有一上限——Compton 极限.由于相对论喷流的成束效应,射电喷流的视亮温度可以超过 Compton 极限,但在喷流随动坐标系中是满足这一极限的.利用这一特性,我们可以探测到朝着我们的相对论性喷流.周宏岩等^[9]利用二次观测之间射电流量的变化,从变化的时间限定变化流量辐射区的尺度,因为信号的传递速度不能超过光速,从而估计宽吸收线

类星体的射电亮温度下限.他们发现一些源的亮温度超过 Compton 极限,表明在这些源中,外流沿着二极方向,这与宽吸收线的赤道外流传统的看法矛盾.同时,他们也发现一些经典的双瓣的射电源,这些源在传统的射电图象中属于视角较大的一类.所以从射电观测看,宽吸收线类星体中的外流方向可以是极向,也可以是赤道平面.

王俊贤等^[10]利用目前最为先进的欧洲 X 射线天文观测卫星 XMM - Newton 对这些射电强的宽吸

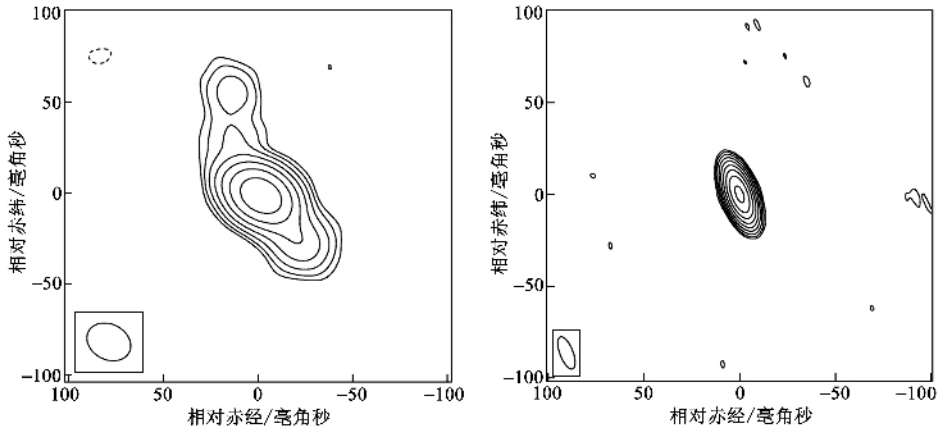


图 5 2 个宽吸收线类星体的高分辨的 ENV/VLBI 图像,其中 J1312 + 2319 是少数几个具有分辨开的结构的源之一(取自文献 [7])

收线类星体开展观测,发现它们无例外地与传统的宽吸收线类星体的高柱密度吸收不相同,这些宽吸收线类星体只有弱的吸收或者没有吸收。有 2 种不同图像可以解释这种差别:一种是 X 射线由射电喷流贡献主导, X 射线没有穿越宽吸收线区;另一种可能是,这些射电强源的宽吸收线区结构与射电弱源不同。在极向外流的宽吸收线类星体中,低电离宽吸收线类星体的比例比一般的宽吸收线类星体中高出很多。极向外流可能是射电辐射等离子体和周围物质相互作用形成的,形成在比较大的尺度上。这些气体不存在过电离的问题,也不是辐射压加速的。这需要进一步的研究才能确定哪种图像正确。

3.3 外流携带角动量

如果外流来自吸积盘的风,它必定携带角动量。确定外流携带角动量的大小,同时也是吸积盘研究的重要课题。角动量守恒要求吸积气体在向黑洞下落的过程中损失掉角动量,但是角动量怎样损失的,具体过程还是没有完全搞清楚,吸积盘的磁驱动风是一个候选者。

王慧元等^[11]通过蒙特卡罗模拟方法求解偏振的辐射转移方程,研究了外流的共振散射过程。他们发现在轴对称的外流系统,只有在外流系统带有角动量时才能产生偏振角随着视线方向速度旋转,转动的速度可以从吸收线的偏振信息中读出。偏振角转动在一些源中已经观测到,从转动的速度可以判断这些源在外流形成区域的速度约 10^4 km/s ,这是吸积盘风的重要证据,至于风带走的角动量大小则依赖于其他参数。

王慧元等同时发现的宽吸收外流区的共振散射

也对一些重要的发射线产生影响,特别是 CIV 和 NV 线被用来确定发射线气体的金属丰度,从而确定核区恒星形成的历史。但是这些线的流量很大程度上受共振散射的影响,以前的研究给出的丰度有比较大的问题。

4 结论

我们最近几年从各个方面对宽吸收线类星体的物质外流开展了研究,发现(1)宽吸收线区的紫外吸收物质的柱密度比原来预计的要高出 2 个量级,并确定低电离吸收线形成了饱和的高电离吸收线区;(2)从连续谱的偏振分布研究给出射电宁静的宽吸收类星体吸收物质主要在赤道面,并且不同的源吸收物质的覆盖立体角和厚度很不相同,而射电强的类星体外流在赤道和极向都是可能的;(3)宽吸收线的共振散射线偏振表明,外流物质携带角动量。尽管有这些进展,但是我们离确定吸收物质的外流速率,以及估计外流携带的能量、动量和角动量还有一定的距离。

致谢 感谢王慧元提供图 2 资料。

参考文献

- [1] Arav N *et al.* ApJ, 2001, 561 :118
- [2] Brinkmann W, Wang T G, Matsuoka M. A&A, 1999, 345 :43
- [3] Wang T G, Brinkmann W, Yuan W *et al.* ApJ, 2000, 545 77
- [4] Lu H L, Wang T G, Zhou H Y *et al.* 2008, ApJ, in press
- [5] Wang T G, Wang J X, Brinkmann W *et al.* ApJL, 1999, 519 :35
- [6] Wan H Y, Wang T G, Wang J X. ApJ, 2005, 634 :149
- [7] Jiang D R, Wang T G. A&A, 2003, 397 :L13
- [8] Liu Y, Jiang D R, Wang T G *et al.* 2008, MNRAS, Submitted
- [9] Zhou H Y, Wang T G, Wang H Y *et al.* ApJ, 2006, 639 :716
- [10] Wang J X, Jiang P, Zhou H Y *et al.* ApJL, 2008, 676 97
- [11] Wang H Y, Wang T G, Wang J X. ApJS, 2007, 168 :195