

# 类星体SDSS J0916+2921的 类银河系2175 Å尘埃消光特征\*

时雪草<sup>1</sup> 潘翔<sup>2</sup> 窦立明<sup>3</sup> 王建国<sup>4</sup> 姜鹏<sup>2</sup>  
杨臣威<sup>2†</sup> 周宏岩<sup>1,2</sup>

(1 中国科学技术大学天文学系 合肥 230026)

(2 中国极地研究中心 上海 200136)

(3 广州大学天体物理中心 广州 510006)

(4 中国科学院云南天文台 昆明 650216)

**摘要** 光谱观测显示类星体SDSS J091613.60+292106.1 (简称J0916+2921, 系统红移 $z_{em} = 1.1418 \pm 0.0018$ )中有特殊的2175 Å尘埃消光特征, 其强度显著大于银河系平均强度. 光谱同时探测到与尘埃成协的丰富气体吸收线, 确定吸收线系统红移为 $z_{abs} = 1.1413 \pm 0.0002$ , 和类星体红移一致. 气态金属离子柱密度相对太阳丰度的比例为 $[Al/Zn] = -1.68 \pm 0.10$ ,  $[Cr/Zn] = -0.49 \pm 0.10$ ,  $[Fe/Zn] = -0.81 \pm 0.18$ . 尘埃耗散作用显著, 说明该系统中尘埃十分丰富, 与观测的强尘埃消光特征吻合. 类银河系的2175 Å尘埃消光特征在类星体光谱中多见于中间插入吸收线系统, 至今未明确认证内禀吸收线系统出现该特征, 类星体SDSS J0916+2921是目前仅有的数个候选者之一. 该类星体X射线辐射相较一般类星体更强, 后续可用作研究2175 Å尘埃在强高能射线照射条件下的形成与离解平衡, 以揭示2175 Å尘埃的化学成分、物理性质和起源.

**关键词** 星系: 活动星系核, 星际介质: 消光, 类星体: 吸收线

中图分类号: P158; 文献标识码: A

## 1 引言

星际介质是星系的重要组成部分, 很大程度上决定了恒星和行星的形成, 因而对于天体起源研究尤为关键<sup>[1]</sup>. 尘埃是星际介质的主要组分之一, 与星际环境频繁相互作用: (1)对入射光进行吸收、散射、再发射, 从而改变辐射场(如星光、吸积盘、超新星等产生的辐射); (2)通过耗散效应, 沉积周围气态物质元素, 催化促进分子生成; (3)碰撞、聚集使尘埃尺寸逐渐增长, 为天体形成创造条件<sup>[2]</sup>.

消光曲线, 即尘埃对光子的吸收强度随波长的变化特征, 是观测上探测和研究星际尘埃的重要手段. 尘埃消光在紫外-光学波段最为显著, 而在这一波长范围内最重要的

2019-07-22收到原稿, 2019-08-21收到修改稿

\*国家自然科学基金项目(11903029、11973037)资助

†yangchenwei@pric.org.cn

观测特征为2175 Å波长处的宽吸收峰. 在本星系群中, 该特征在质量较大、金属丰度较高的银河系中尤为显著<sup>[3]</sup>, 因而也常称遥远宇宙中的2175 Å吸收体为类银河吸收体. 除银河系外, 大麦哲伦云<sup>[4]</sup>及某些遥远漩涡星系<sup>[5]</sup>的部分视线上同样观测到2175 Å吸收峰, 可见该特征在星际尘埃中较为普遍. 但是2175 Å吸收峰的载体尘埃到底是什么化学成分、具有怎样的物理性质目前尚无定论.

主流观点认为2175 Å吸收峰的载体为碳基的小颗粒尘埃, 如石墨、富勒烯、微金刚石、多环芳香烃(PAH)分子等<sup>[2]</sup>. 基于石墨、PAH的散射模型也实现了对典型银河系视线上2175 Å吸收特征的模拟再现<sup>[6]</sup>. 但当这类碳基小颗粒尘埃受到大量软X射线照射时, 分子内共价键很容易断裂从而瓦解. 类星体是典型的高能辐射源, 光谱观测中鲜有内禀2175 Å吸收峰, 部分研究者推断认为2175 Å吸收载体难以在类星体的强辐射场中长期存在<sup>[7]</sup>.

近期, 我们在7个类星体中发现疑似与蓝移宽吸收线(外流气体)相关联的类银河尘埃吸收特征, 暗示2175 Å吸收体可能存在于类星体外流气体中<sup>[8]</sup>. 在另一个类星体SDSS J170542.91+354340.2 (简称J1705+3543)的系统红移处, 我们同样发现了显著的类银河吸收峰, 结合残余莱曼辐射、吸收线光变等特征分析, 该吸收体很可能内禀于类星体<sup>[9]</sup>, 而遗憾的是并没有获得J1705+3543在X射线波段的观测数据, 因而难以对该类星体在X射线波段的辐射特性进行限制. 本文给出了类星体SDSS J091613.60+292106.1 (简称J0916+2921, 系统红移 $z_{\text{em}} = 1.1418 \pm 0.0018$ )系统红移处的类银河2175 Å消光特征及其光学和X射线波段观测, 弥补了之前研究中的部分不足.

如无明确说明, 本文中误差为 $1\sigma$ 置信水平; 同时在红移距离计算中, 本文假定标准 $\Lambda$ CDM宇宙学模型, 参数为哈勃常数 $H_0 = 70 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$ 、暗能量密度参数 $\Omega_\Lambda = 0.7$ 、物质密度参数 $\Omega_m = 0.3$ .

## 2 光学观测与数据分析

斯隆数字巡天(Sloan Digital Sky Survey, SDSS)于2003年12月21日对类星体J0916+2921进行了测光观测, 并于2005年1月18日对其进行了光谱观测<sup>[10]</sup>. 类星体J0916+2921在SDSS的u、g、r、i、z波段星等分别为 $19.99 \pm 0.04$ 、 $19.55 \pm 0.02$ 、 $18.74 \pm 0.02$ 、 $18.53 \pm 0.02$ 、 $18.45 \pm 0.04$ ; SDSS光谱波长覆盖为3800–9200 Å, 分辨率 $R \sim 2000$ . 在近红外波段, 英国红外望远镜深场巡天(UKIRT Infrared Deep Sky Survey, UKIDSS)测量的Y、J、H、K波段星等分别为 $17.77 \pm 0.02$ 、 $17.43 \pm 0.02$ 、 $16.86 \pm 0.04$ 、 $16.10 \pm 0.03$ , 观测时间在2007年2月5日至2009年4月3日之间<sup>[11]</sup>, 无显著光变.

随后, 我们使用6.5 m多镜面望远镜(Multiple Mirror Telescope, MMT)的蓝通道光谱仪(Blue Channel Spectrograph, BCS)于2008年2月11日和3月30日对J0916+2921进行了两次光学光谱观测. 观测中分别使用 $1200 \text{ grid} \cdot \text{mm}^{-1}$ 和 $300 \text{ grid} \cdot \text{mm}^{-1}$ 光栅, 光谱分辨率分别约为2000和1000, 波长覆盖范围分别为4160–5480 Å和3180–8384 Å. 两条MMT光谱中, 前者( $1200 \text{ grid} \cdot \text{mm}^{-1}$ )具有较高分辨率, 同时覆盖了绝大多数吸收线, 使得吸收线柱密度的测量更为可靠; 后者( $300 \text{ grid} \cdot \text{mm}^{-1}$ )相对于SDSS光谱向蓝端延伸, 使得静止系紫外波段消光曲线测量更为可靠. 我们参照银河系尘埃分布<sup>[12]</sup>, 对所有光谱、

测光数据进行了银河系消光改正. 所有光谱流量与SDSS测光流量大体吻合. 为提高信噪比, 我们将所有光谱合并, 并测量消光曲线, 而吸收线测量则使用高分辨率的MMT 1200 grid · mm<sup>-1</sup>光谱和SDSS光谱.

## 2.1 消光曲线

如之前所介绍, 我们合并J0916+2921的所有光学光谱, 以研究其消光曲线. 假定高光度类星体合成谱<sup>[13]</sup>为J0916+2921的无吸收模板. 将类星体模板在K波段流量调整到J0916+2921的观测值后(图1中天蓝色实线), 直观对比可以看出, J0916+2921的测光(绿色圆点)和光谱(黑色实线)流量在短波长处受到强烈抑制, 同时在静止系2200 Å附近存在明显的类银河吸收峰. 随后, 我们将在K波段与J0916+2921归一的类星体合成谱模板插值到观测波段, 得到无吸收模型单位波长( $\lambda$ )的流量 $F_{\lambda}^{\text{model}}$ , 结合观测流量 $F_{\lambda}^{\text{obs}}$ 计算得到实测消光曲线 $A_{\lambda} - A_K = -2.5 \lg (F_{\lambda}^{\text{obs}} / F_{\lambda}^{\text{model}})$  (图1子图中黑色实线和绿色圆点). 这条观测消光曲线整体较为平滑, 表明我们选用的合成谱模板很好地对目标类星体J0916+2921的无吸收谱进行了近似, 即使在发射线附近也没有很强的局部特征, 因而对于消光曲线的分析影响不大, 尤其是附近没有强发射线的2175 Å吸收峰特征. 另一方面, 吸收线附近区域呈现很窄的尖峰, 由于特征很窄, 同样不会对平滑的连续谱消光曲线产生干扰.

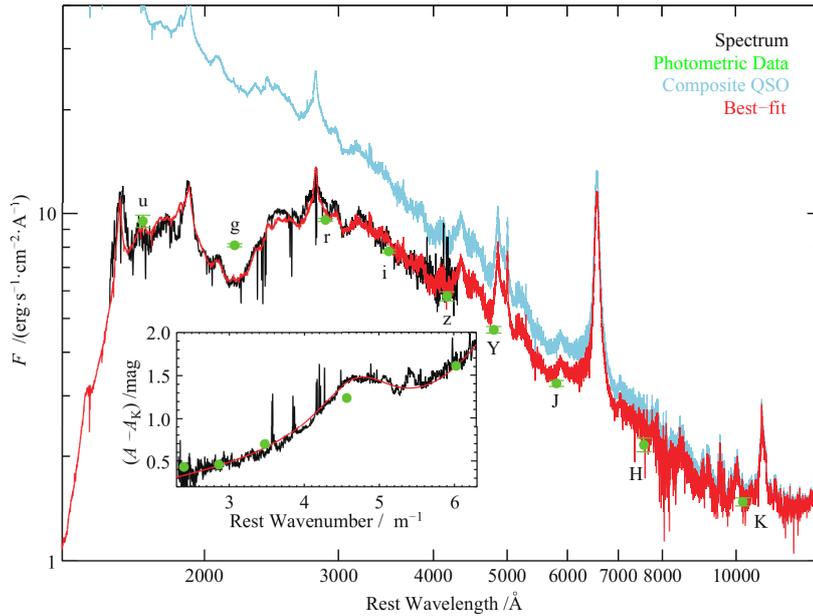


图 1 J0916+2921的静止系紫外-光学-近红外测光(绿色圆点)、光谱数据(黑色实线)与类星体合成谱(天蓝色实线)的对比(在K波段归一化). 以合成谱为模板计算得到消光曲线(子图中黑色实线与绿色圆点), 并得到最优拟合(红色实线).

Fig. 1 The UV-optical-NIR photometric (green dots) and spectroscopic (black solid lines) data of J0916+2921 are shown, together with the X-shooter quasar composite (sky blue solid line) scaled to the flux of J0916+2921 at the K band. The apparent extinction curve is obtained assuming the quasar composite as an extinction-free model (black solid lines and green dots in the insert panel), and the best-fit model is shown with red solid lines.

鉴于J0916+2921的消光曲线与银河系类似,我们选用银河系中常用的参数化模型:

$$A_\lambda - A_K = \begin{cases} c_1 + c_2x + c_3D(x, x_0, \gamma) & \lambda > 1/c_5 \text{ (紫外消光)}, \\ c_1 + c_2x + c_3D(x, x_0, \gamma) + c_4(x - c_5)^2 & \lambda \leq 1/c_5 \text{ (远紫外消光)}, \end{cases} \quad (1)$$

其中 $\lambda$ 为波长,以 $\mu\text{m}$ 为单位, $x$ 为波数,单位为 $\mu\text{m}^{-1}$ .该分段模型由3种成分组成:(1)紫外波段的线性消光成分,斜率为 $c_2$ ,标度为 $c_1$ ;(2)以Drude轮廓描述的2175 Å吸收峰:中心波数 $x_0$ ,吸收峰宽 $\gamma$ ,表达式为

$$D(x, x_0, \gamma) = \frac{x^2}{(x^2 - x_0^2)^2 + x^2\gamma^2}, \quad (2)$$

系数为 $c_3$ ;(3)远紫外的2阶消光项,以 $c_4$  (强度)和 $c_5$  (2阶项起始位置)为参量.即便吸收线、发射线对消光曲线测量的干扰较小,我们仍然对强吸收和强发射线中心区域进行了屏蔽,随后用参数化模型拟合J0916+2921的观测消光曲线,并用自举法重复1000次测量以计算模型参数的误差.最后的拟合参数为 $c_1 = -0.13 \pm 0.15$ 、 $c_2 = 0.18 \pm 0.06$ 、 $c_3 = 1.78 \pm 0.56$ 、 $x_0 = 4.72 \pm 0.03$ 、 $\gamma = 1.53 \pm 0.20$ 、 $c_4 = 0.40 \pm 0.15$ 和 $c_5 = 5.03 \pm 0.23$ .吸收峰中心波数略高于银河系的均值,且宽度较宽,类似于大部分类星体视线上实测的中间插入2175 Å吸收体<sup>[14]</sup>.吸收峰强度为 $A_{\text{bump}} = \pi c_3/2\gamma = 1.89 \pm 0.09$ .

## 2.2 吸收线与柱密度

鉴于吸收线较窄,我们可采用局部平滑、迭代屏蔽的方式对观测光谱进行归一化处理<sup>[14]</sup>.在光谱中,我们探测到两组MgII吸收线系统,其中一组为中间插入吸收,红移为0.8376,由于与本文研究目标没有直接相关性,因而不作讨论;另一组吸收线系统红移为 $z_{\text{abs}} = 1.1413 \pm 0.0002$ ,与系统红移 $z_{\text{em}} = 1.1418 \pm 0.0018$ 一致,为类星体关联吸收体.上节中显著的2175 Å尘埃吸收峰表明类星体附近应该存在显著的低电离吸收线系统,而该近邻吸收体是系统红移处唯一的强吸收线系统,因而无疑两者有物理联系,所以我们在后文中称该吸收体为2175 Å尘埃吸收体.该尘埃吸收体的主要强吸收线轮廓见图2,其中灰色方块为SDSS光谱数据,黑色散点为MMT光谱数据,两次观测吸收轮廓接近,且MMT数据质量有明显提升.可以看到在尘埃吸收体静止系( $z_{\text{abs}} = 1.1413 \pm 0.0002$ )中,吸收线主要覆盖的速度区间为 $[-200, +200] \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ ,因而我们考察这些证认的吸收线在这一范围的光深以及等值宽度,通过视光深法(Apparent Optical Depth, AOD<sup>[15]</sup>)和生长曲线法(Curve Of Growth, COG<sup>[16]</sup>)分别估计离子的柱密度.在使用生长曲线法之前,我们需要得到尘埃吸收体的等效速度展宽 $b$ .考虑到我们探测到多个FeII跃迁的吸收,其中有FeII  $\lambda 1608$ 这样非常微弱的吸收线,也有FeII  $\lambda 2382$ 这样吸收接近见底的强线,通过对FeII等值宽度的模拟,可以准确限定生长曲线.最终拟合结果见图3,卡方分布图表明等效展宽为 $b = 34.5 \pm 3.0 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ .基于该生长曲线,我们同样对其他离子柱密度进行测量.视光深法和生长曲线法测得的柱密度见表1中 $\lg N_{\text{AOD}}$ 及 $\lg N_{\text{COG}}$ 列,对于弱线,两者测量结果较为接近,而对于强线,由于存在潜在的饱和区域,视光深法测量并不可靠,因而我们采用生长曲线法的结果作为离子柱密度.通过累加同种元素的不同离子柱密度,我们对元素柱密度进行了估计(表1中 $\lg N_{\text{X}}$ 列).鉴于锌的升华温度低难以附着尘埃,因而常用于表征吸收体气体元素原始丰度.若以太阳丰度<sup>[17]</sup>为基准,则可以计算得到吸

收体中Al、Cr、Fe相对锌元素的丰度 $[X/Zn]$  ( $[X/Zn] \equiv \lg(N_X/N_{Zn}) - \lg(N_X^\odot/N_{Zn}^\odot)$ ); 其中 $\lg N_X$ 为实测J0916+2921的元素丰度,  $\lg N_X^\odot$ 为太阳元素丰度<sup>[17]</sup>, 此定义中太阳的元素相对值丰度为0), 结果为:  $[Al/Zn] = -1.68 \pm 0.10$ 、 $[Cr/Zn] = -0.49 \pm 0.10$ 与 $[Fe/Zn] = -0.81 \pm 0.18$ . 这种气体中元素大量缺失的现象是由于金属离子附着尘埃形成, 因而称之为尘埃耗散. 该吸收体中的尘埃耗散严重表明系统中尘埃丰富, 进一步验证了气体吸收线与观测的显著尘埃消光特征之间的关联.

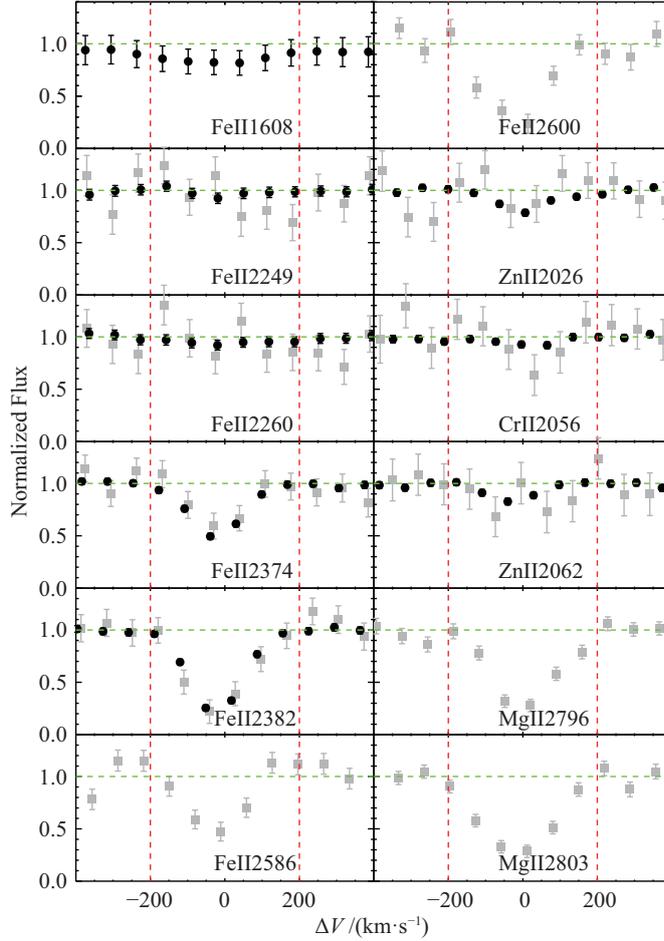


图2 J0916+2921近邻吸收体中主要吸收线的归一化轮廓, 已经投影到速度空间, 横轴 $\Delta V$ 表示相对于吸收线系统速度(红移 $z_{\text{abs}} = 1.1413 \pm 0.0002$ )的偏离, 负数为蓝移. 其中黑色散点为MMT数据, 灰色方块为SDSS数据, 绿色点线为归一化连续谱, 红色虚线标记 $[-200, +200] \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围.

Fig. 2 The absorption line profile for major absorption lines in the proximate absorption line system of J0916+2921. The relative velocity ( $\Delta V$ ) in the panels is calculated in the rest-frame of the absorber  $z_{\text{abs}} = 1.1413 \pm 0.0002$ , and the negative value means blue shift. Black dots are derived using the MMT data, and grey squares correspond to the SDSS data. The green dot lines are the normalized continuum, and the red dashed lines mask the  $[-200, +200] \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$  velocity range.

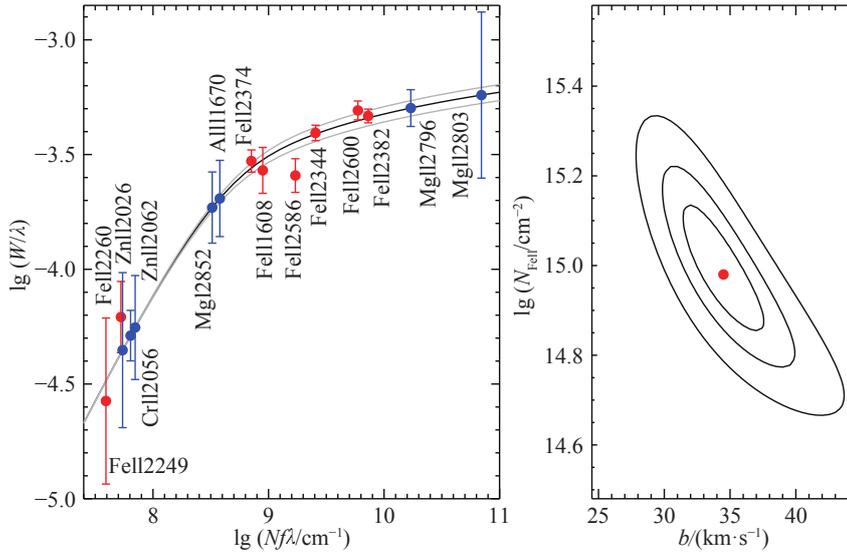


图 3 右图: 利用多普勒参数 $b$ 和多种FeII离子的柱密度拟合的生长曲线的约化卡方轮廓, 红点为最佳拟合, 从内到外的实线分别对应 $1\sigma$ 、 $2\sigma$ 、 $3\sigma$ 置信区间. 其中 $N_{\text{FeII}}$ 为FeII离子柱密度,  $b$ 为谱线多普勒速度展宽; 左图: 各吸收线在最佳拟合生长曲线(黑色实线)上的位置, 其中灰色实线表示生长曲线 $1\sigma$ 的误差范围. 其中 $N$ 为离子柱密度,  $f$ 为谱线振子强度,  $W$ 为谱线等值宽度.

Fig. 3 Right panel: The contour of the reduced  $\chi^2$  in the fitting of COG using the doppler parameter  $b$  and FeII multiplets. The best-fit result is indicated with a red dot, and the rings from inside out correspond to  $1\sigma$ ,  $2\sigma$ , and  $3\sigma$  confidence levels. Here,  $N_{\text{FeII}}$  is the column density of FeII. Left panel: The positions of different absorption lines in the best-fit COG (black solid line) are shown, where  $N$  is the column density,  $f$  is the oscillator strength of the absorption lines, and  $W$  is the absorption line equivalent widths. The grey solid lines show the  $1\sigma$  uncertainty of the COG.

### 3 X射线观测与数据分析

上世纪90年代, J0916+2921被伦琴卫星(Röntgensatellit, ROSAT)在X射线波段探测到(观测序号: wp700224), 并证认为点源. 随后于2006年4月15日被XMM-Newton观测到(Obs-ID (观测序号): 0303820301). 我们从数据库中抽取出XMM-Newton卫星上携带的欧洲光子成像照相机(EPIC)对该源的有效观测数据, 并参照标准设定, 使用Science Analysis System (SAS, ver 10.0.0)软件处理. PN、MOS1和MOS2相机所记录的光子事件分别由epchain与emchain工具获得. 无效的像素(如坏点、受热效应污染的点)均被去除. 最终PN、MOS1和MOS2数据的有效曝光时间分别为21.2 ks、26.7 ks和26.2 ks. 我们选取 $35''$  (PN相机)和 $30''$  (MOS相机)孔径, 并扣除等尺寸的空场背景, 抽取得到数据. 通过SAS软件的rmfgen、arfggen工具获得响应函数, 改正后最终得到数据.

表 1 J0916+2921近邻吸收体中主要吸收线及测量结果

Table 1 Major proximate absorption lines in J0916+2921 and measurement results

Element	Ion	Transition/Å	lg $f$	$W/\text{Å}$	$\lg(N_{\text{AOD}}/\text{cm}^{-2})$	$\lg(N_{\text{COG}}/\text{cm}^{-2})$	$\lg(N_{\text{X}}/\text{cm}^{-2})$	
Mg	Mg I	2852.96	0.26	$0.53 \pm 0.07$	$12.66 \pm 0.39$	$15.77 \pm 0.03$	$17.03 \pm 0.74$	
	Mg II	2796.35	-0.21	$1.41 \pm 0.05$	$13.71 \pm 0.17$	$17.01 \pm 0.76$		
	Mg II	2803.53	-0.51	$1.61 \pm 0.06$	$14.07 \pm 0.11$			
Al	Al II	1670.79	0.27	$0.34 \pm 0.13$	$12.80 \pm 0.78$	$13.08 \pm 0.03$	$13.08 \pm 0.03$	
Cr	Cr II	2056.25	-0.98	$0.10 \pm 0.02$	$13.26 \pm 0.50$	$13.47 \pm 0.02$	$13.47 \pm 0.02$	
	Fe II	1608.45	-1.24	$0.43 \pm 0.08$	$14.47 \pm 0.62$	$14.98 \pm 0.15$	$14.98 \pm 0.15$	
Fe	Fe II	2249.88	-2.74	$0.06 \pm 0.05$	$14.87 \pm 2.39$			
	Fe II	2260.78	-2.61	$0.14 \pm 0.05$	$15.32 \pm 0.98$			
	Fe II	2344.21	-0.94	$0.92 \pm 0.07$	$14.43 \pm 0.06$			
	Fe II	2374.46	-1.5	$0.70 \pm 0.08$	$14.73 \pm 0.10$			
	Fe II	2382.76	-0.49	$1.11 \pm 0.08$	$14.11 \pm 0.05$			
	Fe II	2586.65	-1.16	$0.66 \pm 0.11$	$14.37 \pm 0.08$			
	Fe II	2600.17	-0.62	$1.18 \pm 0.12$	$13.97 \pm 0.07$			
	Zn	Zn II	2026.14	-0.31	$0.09 \pm 0.07$	$13.05 \pm 0.35$	$12.93 \pm 0.10$	$12.93 \pm 0.10$
	Zn	Zn II	2062.66	-0.59	$0.11 \pm 0.06$	$13.12 \pm 0.43$		

对于抽取得到的光谱, 我们以每个单元最低20个计数进行分割后合并. 鉴于MOS1和MOS2仪器性质接近, 且实测光谱相吻合, 我们将MOS1、MOS2光谱作合并处理. 对于所抽取得到的PN及MOS光谱, 我们用XSPEC (12.6.0版本)软件同时进行拟合, 拟合误差为90%置信度水平. 拟合过程中采用同样的模型, 并对PN与MOS光谱的参数(除归一化参数外)进行绑定. 首先, 我们尝试了最简单的幂律谱模型(XSPEC的zpowerlw, 并取 $z_{\text{em}} = 1.1418 \pm 0.0018$ ), 同时考虑银河系中性吸收(柱密度为 $N_{\text{H}}^{\text{MW}} = 1.76 \times 10^{20} \text{ cm}^{-2}$ [18]). 结果见图4上, 以卡方/自由度表示的最佳拟合优度为 $\chi^2/\text{DOF} = 14.09/28$ , 拟合得到幂指数为 $\Gamma = 1.74 \pm 0.13$ , 同时银河吸收改正后的0.3–10.0 keV X射线亮度为 $1.37 \times 10^{-13} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$  (PN)及 $1.32 \times 10^{-13} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$  (MOS). 鉴于J0916+ 2921中存在显著的内禀气体吸收和尘埃消光, 我们尝试加入本征吸收体对光谱进行拟合. 在幂律谱的银河吸收基础上, 我们添加 $z_{\text{abs}} = 1.1413 \pm 0.0002$ 处的中性吸收体. 由于之前所测量的吸收线均来自金属离子而没有氢、氦元素的柱密度估计, 我们对吸收体的金属丰度并不了解. 考虑到吸收体很可能与类星体或其寄主星系相关联以及对类银河消光曲线的探测, 本征吸收体很可能类似银河系星际介质, 即大约为太阳丰度, 因此我们同样假定X射线的本征吸收体为太阳丰度. 最终拟合优度与之前相仿, 为 $\chi^2/\text{DOF} = 14.09/27$ , 因而光谱质量无法精确计算吸收体性质. 本征吸收模型拟合得到的幂指数为 $\Gamma = 1.75_{-0.13}^{+0.24}$ , 与之前一致, 同时本征吸收体柱密度限制为 $N_{\text{H}}^{\text{Int}} < 1.33 \times 10^{21} \text{ cm}^{-2}$ , 置信度为90%. 若假定太阳丰度, 这一柱密度值对应的Zn元素柱密度限制为 $N_{\text{Zn}}^{\text{Int}} < 10^{13.7} \text{ cm}^{-2}$ . 实测Zn元素柱密度在X射线模拟的估计范围内, 这一结果表明之前的假定, 即吸收体可能对X射线产生吸收以及吸收体为太阳丰度, 在现有数据基础上是合理的. 拟合得到的卡方对幂指数、本征吸收体柱密度的依赖关系见图4中的子图.

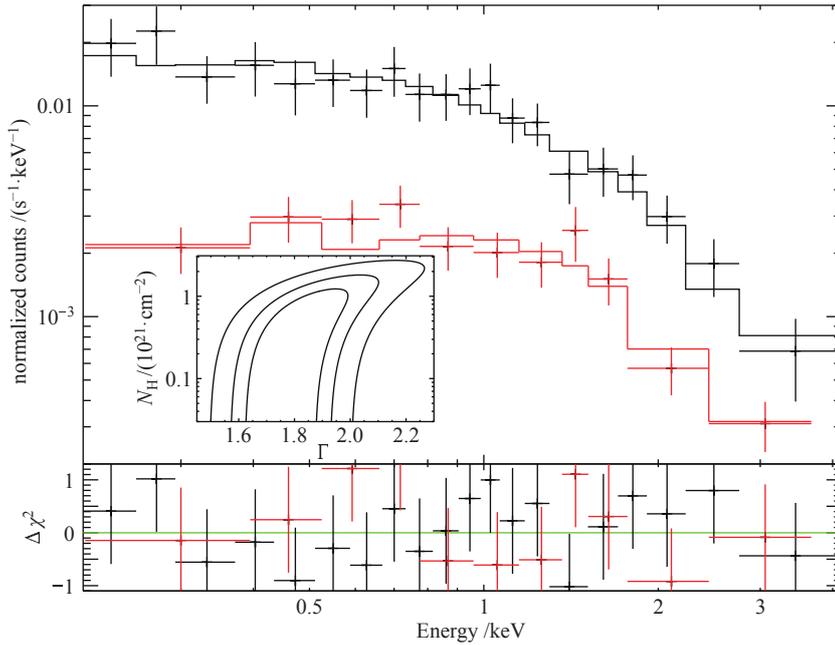


图 4 上图: J0916+2921的XMM-Newton EPIC光谱(散点)以及最佳拟合结果(阶梯实线)。其中PN和MOS的数据及模型分别由黑色和红色表示。子图显示了卡方对拟合参数X射线谱指数 $\Gamma$ 及本征吸收柱密度的依赖,从内到外的环线分别表示 $1\sigma$ 、 $2\sigma$ 、 $3\sigma$ 置信区间。下图:上图中最佳拟合的卡方。

Fig. 4 Upper panel: The XMM-Newton EPIC spectrum of J0916+2921 and the best-fit model of a simple power law. The upper and lower spectra correspond to the PN and MOS data. The inset shows the confidence contours ( $1\sigma$ ,  $2\sigma$ , and  $3\sigma$  for the two interesting parameters) for the photon index  $\Gamma$  and the intrinsic neutral absorption column density. Lower panel: residuals of the best-fit model as in the upper panel.

#### 4 讨论: 类星体高能辐射环境下的类银河系尘埃?

结合测光流量,我们估算得到J0916+2921在消光改正后的光学波段5100 Å单色光度为 $L_{5100} = 4.46 \times 10^{45} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1}$ 。另一方面,在X射线波段, J0916+2921的观测系下0.3–10 keV光度为 $L_{0.3-10 \text{ keV}} = 2.10 \times 10^{45} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1}$ 。X射线–光学光度比为 $L_{0.3-10 \text{ keV}}/L_{5100} = 0.47$ ,对于常用类星体SED<sup>[19]</sup>,比值为0.50,两者相一致。注意到我们对光学流量进行了消光改正,而受限于数据质量,对X射线流量并未修正潜在吸收体的吸收,可见J0916+2921的实际X射线辐射强度高于直接观测结果, J0916+2916的高能辐射很可能相对一般类星体更强。按照一般AGN中热光度 $L_{\text{bol}}$ 与 $L_{5100}$ 经验关系<sup>[20]</sup>,可以得到 $L_{\text{bol}} = 4.60 \times 10^{46} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1} = 1.20 \times 10^{13} L_{\odot}$ 。J0916+2921光度较高,远高于普通星系(如银河系、仙女座星系光度 $\sim 2 \times 10^{10} L_{\odot}$ )。若假定尘埃升华温度为 $T_{1500\text{K}} = T/1500\text{K}$ ,则J0916+2921的尘埃升华半径为 $R_{\text{sub}} = 1.3 L_{\text{UV},46}^{1/2} T_{1500\text{K}}^{-2.8} \text{ pc} = 1.6 \text{ pc}$ <sup>[21]</sup>,其中 $L_{\text{UV},46}$ 为类星体紫外光度,单位是 $10^{46} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

类星体J0916+2921具有较高的光度,同时具有比一般类星体相对更强的高能X射线辐射。在这样的高能辐射环境下类银河2175 Å吸收体是否存在,是类星体及星际介质的研究中一个十分有趣的问题。J0916+2921中近邻尘埃吸收体有3种可能的起源<sup>[15]</sup>,与类

星体相关性由远及近分别为: (1)处于类星体伴星系中; (2)来源于类星体寄主星系的恒星形成区; (3)来源于类星体核区. 首先, 在近邻宇宙中, 2175 Å吸收体普遍存在于漩涡星系(如银河系、仙女座星系)的星系盘中, 其所处的星际环境中通常金属丰度较高且尘埃丰富, 而伴星系(如大、小麦哲伦云)通常质量较低, 且金属元素、尘埃成分贫乏, 因而伴星系不太可能是2175 Å吸收体的载体. 因而J0916+2921中2175 Å吸收体更可能位于寄主星系或内禀于类星体核区. 对于(2)、(3)两种情况, 基于已有的观测数据并不能加以区分. 若吸收体位于寄主星系恒星形成区, 考虑到一般漩涡星系的尺寸, J0916+2921中吸收体距离星系核的距离至多为几十个kpc (千秒差距). 与宁静星系相比, J0916+2921的恒星形成区会受到较强的来自核区的高能电离辐射, 同时类星体对寄主星系的外流反馈作用也会对星际介质产生扰动. 这类环境下星际介质的性质会受到怎样的影响以及怎样进一步影响恒星形成过程都值得进一步研究. 若吸收体内禀于类星体, 吸收体无法在尘埃升华半径以内存在, 因而距离中央引擎须超过1.6 pc. 与之相关联的类星体核区结构可能有尘埃环、窄发射线区或者外流. 尘埃环和窄发射线区由于受类星体引力场束缚, 其速度场有较大可能性为维里化状态, 因而吸收体红移很可能与系统红移非常接近, 同时吸收线轮廓也偏向于对称结构; 而外流对应的吸收体通常相对类星体系统整体蓝移(吸收体红移低于系统红移), 同时吸收线轮廓通常更为复杂. 由于吸收线较窄, 我们的光谱观测分辨率不足以对吸收线轮廓进行分辨, 同时波长覆盖范围内也没有很好的系统红移处指针(如窄发射线或星光吸收线), 因而目前无法对这3种起源加以区分. 但无疑, 尘埃吸收体的内禀起源局限于类星体外围结构, 因而了解吸收体的性质可能对研究类星体外区的结构、演化等过程提供帮助.

J0916+2921中探测到近邻的类银河吸收体对2175 Å吸收载体能否在高能辐射场中存在提出了挑战. 即使在赛弗特星系中, 理论上即使距中央引擎千秒差距的距离上, 核区的高能X射线和极紫外光子也可以轻易瓦解PAH分子<sup>[22]</sup>, 而在光度更高的类星体J0916+2921中更是如此. 而实际观测中, 90%的星爆星系中探测到的PAH发射特征, 只出现在约10%的活动星系中<sup>[23]</sup>, 在某种程度上印证了活动星系中高能辐射摧毁PAH分子的理论预期. 但另一方面, 我们也不难看出, PAH发射特征在活动星系中并非没有探测, 一定数量的例外仍然存在. 同时我们也发现了一批类星体近邻的2175 Å吸收体, 如引言中提到的J1705+3543以及部分宽吸收线类星体. 实际上, 尘埃是类星体的重要结构—尘埃环的主要成分, 而碳基小颗粒尘埃则是大量尘埃颗粒的根源之一, 因而不可或缺. 那么这些小颗粒尘埃如何在活动星系的辐射场中生存, 很大程度上可能源于遮蔽效应<sup>[22]</sup>, 即在某些视线上, 类星体电离辐射到达尘埃之前便已经被足够厚的物质所吸收, 使这些受遮蔽的小颗粒尘埃免受高能射线的解离. 这些存活的小颗粒尘埃如何进入类星体周围, 它们的进一步演化以及与周围物质的相互作用都是很有意义的课题, 值得后续的观测研究和理论分析来进行解答.

## 5 总结与展望

本文中, 我们对一个特别类星体J0916+2921的近邻类银河2175 Å尘埃吸收体进行了详细的光学、X射线波段的联合诊断. 通过分析光学测光和光谱数据, 我们对其消光曲线进行测量, 探测到强度为 $A_{\text{bump}} = 1.89 \pm 0.09$ 的类银河2175 Å吸收峰. 其吸

收峰相比银河平均值较宽,与之前发现的河外2175 Å吸收特征类似.在光学光谱中,我们发现系统红移附近唯一的一个近邻MgII吸收系统.我们测量了吸收体的气体元素柱密度,以Zn元素为基准,发现Al、Cr、Fe元素均存在严重的尘埃耗散现象.种种迹象均表明该吸收线系统与2175 Å吸收峰相关联.通过对X射线和光学测光流量进行分析,计算得到J0916+2921的X射线光度为 $L_{0.3-10\text{ keV}} = 2.10 \times 10^{45} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1}$ ,热光度为 $L_{\text{bol}} = 1.20 \times 10^{13} L_{\odot}$ ,具有典型的类星体高能辐射特征.若考虑X射线波段存在潜在的近邻吸收体吸收,J0916+2921的X射线辐射相较一般类星体更强,远高于正常星系.与之前的近邻2175 Å吸收体类似,J0916+2921的类银河吸收体可能来自寄主星系恒星形成区,也可能内禀于类星体.无论是哪种可能性,J0916+2921中的强X射线辐射都对近邻2175 Å吸收体的存在提出了更严重的挑战.对J0916+2921这样本身具有很强高能辐射而兼有近邻2175 Å吸收的目标,后续多波段观测及大样本分析对于研究类星体环境下尘埃的性质、尘埃对类星体的演化、类星体与寄主星系的相互作用和共同演化都具有独特的意义.

### 参 考 文 献

- [1] Boulanger F, Cox P, Jones A P. Dust in the Interstellar Medium//Casoli F, Lequeux J, David F. *Astronomie spatiale infrarouge, aujourd'hui et demain Infrared Space Astronomy, Today and Tomorrow*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2000: 251-335
- [2] Draine B T. *ARA&A*, 2003, 41: 241
- [3] Fitzpatrick E L, Massa D. *ApJ*, 1986, 307: 286
- [4] Fitzpatrick E L. *AJ*, 1986, 92: 1068
- [5] Berlind A A, Quillen A C, Pogge R W, et al. *AJ*, 1997, 114: 107
- [6] Weingartner J C, Draine B T. *ApJ*, 2001, 548: 296
- [7] Pitman K M, Clayton G C, Gordon K D. *PASP*, 2000, 112: 537
- [8] Zhang S H, Ge J, Jiang P, et al. *ApJ*, 2015, 802: 92
- [9] Pan X, Zhou H Y, Ge J, et al. *ApJ*, 2017, 835: 218
- [10] Abazajian K N, Adelman-McCarthy J K, Agüeros M A, et al. *ApJS*, 2009, 182: 543
- [11] Lawrence A, Warren S J, Almaini O, et al. *MNRAS*, 2007, 379: 1599
- [12] Schlafly E F, Finkbeiner D P. *ApJ*, 2011, 737: 103
- [13] Selsing J, Fynbo J P U, Christensen L, et al. *A&A*, 2016, 585: A87
- [14] Jiang P, Ge J, Zhou H Y, et al. *ApJ*, 2011, 732: 110
- [15] Savage B D, Sembach K R. *ApJ*, 1991, 379: 245
- [16] Jenkins E B. *ApJ*, 1986, 304: 739
- [17] Asplund M, Grevesse N, Sauval A J, et al. *ARA&A*, 2009, 47: 481
- [18] Kalberla P M W, Burton W B, Hartmann D, et al. *A&A*, 2005, 440: 775
- [19] Mathews W G, Ferland G J. *ApJ*, 1987, 323: 456
- [20] Richards G T, Lacy M, Storrie-Lombardi L J, et al. *ApJS*, 2006, 166: 470
- [21] Barvainis R. *ApJ*, 1987, 320: 537
- [22] Voit G M. *MNRAS*, 1992, 258: 841
- [23] Aitken D K, Roche P F. *MNRAS*, 1985, 213: 777

# Milky-Way-Like 2175 Å Dust Extinction Feature Observed toward the Quasar SDSS J0916+2921

SHI Xue-cao<sup>1</sup> PAN Xiang<sup>2</sup> DOU Li-ming<sup>3</sup> WANG Jian-guo<sup>4</sup> JIANG Peng<sup>2</sup>  
YANG Chen-wei<sup>2</sup> ZHOU Hong-yan<sup>1,2</sup>

(1 Department of Astronomy, University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

(2 Polar Research Institute of China, Shanghai 200136)

(3 Center for Astrophysics, Guangzhou University, Guangzhou 510006)

(4 Yunnan Observatories, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650216)

**ABSTRACT** We report a Milky-Way-like 2175 Å dust extinction feature observed toward the quasar SDSS J091613.60+292106.1 (J0916+2921) (system redshift  $z_{\text{em}} = 1.1418 \pm 0.0018$ ) spectroscopically, whose strength is greater than the average Galactic value obviously. Plenty of metal absorption lines were detected at a redshift of  $z_{\text{abs}} = 1.1413 \pm 0.0002$ , which is associated with the quasar emissions. The ratios of column densities of gaseous metal ions relative to Solar metallicities are  $[\text{Al}/\text{Zn}] = -1.68 \pm 0.10$ ,  $[\text{Cr}/\text{Zn}] = -0.49 \pm 0.10$ , and  $[\text{Fe}/\text{Zn}] = -0.81 \pm 0.18$ , showing significant dust depletions. The pattern indicates that the absorber is heavily dusty, supporting the detection of 2175 Å dust extinction feature. The Milky-Way-like dust extinction was usually observed in the intervening quasar absorbers, but its existence in the quasar intrinsic absorbers has never been confirmed. The associated dusty absorber toward the quasar SDSS J0916+2921 is one of the several intrinsic 2175 Å absorber candidates. The X-ray radiation of the quasar is greater than the average value. This might provide a natural laboratory for further studying the equilibrium of formation and destruction of 2175 Å dust grains in the harsh radiation field, so that their chemical compositions, physical structures, and origins are revealed.

**Key words** galaxies: active galactic nucleus (AGN), ISM: extinction, quasars: absorption lines