

对 6 颗彗星的光谱处理和分类*

詹 想^{1,2†} 陈 黎¹

(1 北京师范大学天文系 北京 100875)

(2 北京天文馆 北京 100044)

摘要 利用国家天文台兴隆观测基地的 2.16 m 光学望远镜, 对 6 颗彗星 78P、C/2009 P1、49P、C/2010 G2、C/2010 S1、C/2011 F1 进行了 10 次光谱观测, 同时拍摄了类太阳恒星光谱. 用 IRAF (Image Reduction and Analysis Facility) 软件对得到的谱线进行了处理, 得到了这 6 颗彗星的相对反射谱. 将相对反射谱数据与 Bus-DeMeo 小行星光谱分类法中的 24 个类型进行比较, 计算了其光谱距离. 根据光谱距离排序和彗星相对反射谱的细节以及 K-S 检验, 最终确定了与该彗星光谱接近的小行星光谱类型.

关键词 彗星; 个别; 技术: 分光镜; 方法: 数据分析

中图分类号: P 185; **文献标识码:** A

1 引言

国际上, 对于小行星进行光谱分类已经比较成熟, 目前较详细的分类法是通过 MIT (Massachusetts Institute of Technology) 小行星光谱小组的 SMASS II (Small Main-belt Asteroid Spectroscopic Survey II) 巡天数据制定的 Bus-DeMeo 分类法, 将小行星按照光谱特征分为 24 个类型^[1]. 目前, 对彗星进行光谱分类的工作还比较少, 原因之一就是彗星成分比较复杂, 在离太阳较近的时候, 可能会有彗发、彗尾等结构. 不同结构的光谱特征可能会有所不同^[2].

但是, 对彗星光谱的分析可以了解彗星的化学性质. 更重要的是, 还可以研究彗星和小行星的关系. 目前已知有一些小行星是所谓的“死彗星”, 即喷发物耗尽后的彗星遗骸, 比如著名的北半球 3 大流星雨之一的双子座流星雨的母体, 就不是 1 颗彗星, 而是 3200 号小行星 Phaethon, 它其实就是 1 颗死彗星^[3].

近期彗星光谱研究的热点, 主要集中在以下方面:

(1) 彗星与柯伊伯带天体. 虽然普遍认为短周期彗星来源于柯伊伯带, 但进入内太阳系的彗星和远在海王星轨道以外的柯伊伯带天体的具体关系, 仍然不是很清楚. 近期的观测表明, 彗星的颜色比柯伊伯带天体更偏蓝, 缺乏红色, 有显著的不同之处. 但如果彗星来自于柯伊伯带, 那么这 2 类天体的特性应该是类似的. Jewitt 的研究认为, 彗星进入内太阳系之后, 表面覆盖的古老物质喷发, 造成了两者颜色的区别^[4].

2012-10-15 收到原稿, 2013-01-21 收到修改稿

* 中央高校基本科研业务费专项资金及中国科学院光学天文重点实验室开放课题资助

† universezx@163.com

(2) 彗星与半人马小行星. 半人马小行星是小行星的一个分类, 没有稳定的轨道且最后会被巨行星移出太阳系. 它们的行为一半像小行星, 另一半则像彗星, 所以用“半人马”来命名. 半人马小行星的轨道会穿越或曾经穿越过 1 颗或数颗气态巨行星的轨道, 有数百万年的动力学生命期.

截至 2008 年, 2 颗半人马小行星被发现有彗星状的挥发活动: Chiron 和 Echeclus, 因此它们既归属于小行星也归属于彗星. 而彗星 166P/NEAT 的轨道非常接近半人马小行星类型. 其它的半人马小行星, 像 Okyrhoe 被怀疑有类似彗星的活动^[5].

(3) 主带彗星. 主带彗星是分布在小行星带主带内的天体, 但运行到某些位置会呈现出彗星的活动和特征. 不同于多数彗星的轨道多半在接近木星或距离太阳更遥远的距离上, 主带彗星的轨道接近圆形, 并且在小行星带的主带内, 因此很难从轨道的特征上与许多标准的小行星区分出来. 即使有一些短周期彗星的轨道半长轴在木星轨道之内, 和主带彗星仍有所不同, 因为主带彗星的离心率和轨道倾角都与主带内的小行星相似. 最初知道的 3 颗主带彗星轨道都在主带外缘的内侧.

目前还不知道, 如果这些彗星来自柯伊伯带, 它们如何能在行星相对微弱重力扰动下改变轨道, 成为低离心率、轨道像典型小行星的主带彗星. 因此, 主带彗星被假设不同于其它的彗星, 是在内太阳系接近现在的位置上形成的, 是单纯的冰小行星. 目前已经知道, 许多小行星的成分里含有冰, 对这一理论是很好的佐证^[6].

我们观测了 6 颗彗星的光谱并进行分析, 这 6 颗彗星是 78P、C/2009 P1、49P、C/2010 G2、C/2010 S1 和 C/2011 F1.

彗星 49P 和 78P 的轨道近日点在火星附近, 远日点在木星附近, 它们都是周期彗星. 周期彗星起源于柯伊伯带, 所以它们的前身是柯伊伯带天体. 而半人马小行星是柯伊伯带天体和周期彗星中间的过渡体. 所以, 这 2 颗周期彗星既和半人马小行星联系紧密, 又和柯伊伯带天体联系紧密, 分析它们的光谱和小行星光谱类型之间的相似性是很有意义的.

另外 4 颗彗星都是非周期彗星, 应该起源于奥尔特云. 因为奥尔特云过于遥远, 目前无法对其天体进行直接观测, 所以还没有人直接研究奥尔特云天体和彗星以及小行星的关系. 但不能据此认为这些非周期彗星就和小行星无关, 因为某些非周期彗星可能会因为巨行星和太阳的引力摄动变成周期彗星, 进而最终演化为表现出某种小行星特征的死彗星. 因此研究非周期彗星和小行星的关系是有意义的. 同时, 非周期彗星数量众多, 研究彗星光谱类型时也应该考虑它们.

我们以 Bus-DeMeo 小行星光谱分类法所给出的 24 种小行星光谱标准数据作为模板, 将我们所得到的彗星光谱和模板相比较, 得出这些彗星最有可能的光谱类型, 并进行进一步的讨论.

2 观测

2011 年 10 月 28 日至 29 日、2012 年 1 月 3 日至 4 日、4 日至 5 日, 我们使用国家天文台兴隆观测基地 2.16 m 反射望远镜加低色散卡焦光谱仪, 对 78P、C/2009 P1、

49P、C/2010 G2、C/2010 S1、C/2011 F1 等 6 颗彗星进行了光谱观测, 选用的光栅是色散率为 200 \AA/mm 的低色散光栅, 狭缝宽度为 $3''$, 中心波长为 6000 \AA , 波长范围为 $2500\sim 8500 \text{ \AA}$. 其中, 78P 在不同时间观测了 3 次, 49P 在不同时间观测了 2 次, C/2010 G2 在不同时间观测了 2 次, 以获得更全面的彗星光谱信息, 因此 6 颗彗星共进行了 10 次观测.

彗星的光谱成分比较复杂, 在离太阳较近时, 可能会有彗发、彗尾等结构. 不同结构的光谱特征可能会有所不同. 因为国内望远镜的光谱观测能力有限, 我们不可能观测太暗的目标. 这 6 颗彗星中 C/2009 P1 较亮, 为 8.5 mag, 其余 5 颗彗星较暗, 但也在 12~16 mag 之间, 其彗核外包裹着明显的彗发, 因此我们得到的主要是彗发的反射光谱.

彗星光谱的另一个特殊之处在于, 彗星本身并不发光, 而是依靠反射太阳光形成反射光谱, 因此彗星光谱中除了彗星本身的信息外, 还包含了太阳光谱信息. 我们在进行光谱处理时, 必须除去太阳光谱, 才能得到真正有用的信息. 直接拍摄太阳的光谱是困难的, 所以国际上通用的办法是选择 1~2 颗类太阳恒星的光谱作为代替, 选择的标准是: 当我们观测时, 这颗星的天顶距和目标源在观测时的天顶距尽可能一致. 常用的类太阳恒星是 Hyades 64 (HD28099) 和 16 Cyg B (HD186427).

我们还拍摄了 He-Ar 灯的灯谱作为波长定标的标准. 因为我们只需要获得相对反射谱, 不需要绝对流量定标, 故原则上不需要拍摄流量定标星的光谱. 不过考虑到数据将来可能会用于其他用途, 因此还是拍摄了流量定标星的光谱.

由于彗星移动较快, 因此在曝光过程中, 望远镜需根据彗星的运动而作相应的调整, 以保证彗星的像始终落在光栅的狭缝中心.

表 1 为详细的观测情况记录. 10 月 28 日借用别人的时间观测, 无天气记录.

表 1 观测情况记录

Table 1 Records of observations

Target	Visual magnitude/mag	Observational time (UT)	Air mass	Heliocentric distance/au	Geocentric distance/au
C/2009 P1	8.5	11:00	1.52	1.73	1.98
I 16 Cyg B	6.25	11:15	1.07	/	/
78P	12	14:00	1.31	2.10	1.24
78P	12.5	11:30	1.35	2.01	1.79
II C/2010 G2	12	14:00	1.37	2.46	1.81
Hyades 64	8.1	16:30	1.35	/	/
49P	16	18:00	1.70	1.65	1.09
78P	12.5	11:30	1.35	2.01	1.80
C/2010 S1	15	12:30	1.27	6.86	6.77
III C/2010 G2	12	13:30	1.33	2.47	1.83
Hyades 64	8.1	15:30	1.19	/	/
49P	16	18:00	1.70	1.66	1.08
C/2011 F1	15	21:30	1.18	4.54	4.49

I: 2011-10-28—29, 天气晴, 视宁度和湿度无记录. 选用类太阳恒星 16 Cyg B;

II: 2012-01-03—04, 天气晴, 视宁度为 $4.5''$, 湿度 40%. 选用类太阳恒星 Hyades 64;

III: 2012-01-04—05, 天气晴, 视宁度为 $2.5''$, 湿度 40%. 选用类太阳恒星 Hyades 64.

3 光谱处理

我们使用 Linux 环境下的 IRAF 软件对光谱观测资料进行处理, 具体流程如下:

(1) 减本底: 本底是指 CCD 上每个像素所记录的光电荷数的底值, 又叫零秒曝光, 决定于栅压的大小. 在观测开始时和结束时, 我们会拍摄本底数据. 光谱处理的第 1 步就是将这一底值减去.

(2) 除平场: CCD 各个像素的量子效率不可能制作得完全均匀一致, 这样 CCD 拍摄得到的光谱图像亮度分布不均匀, 必须通过测定平场加以改正. 在观测开始时和结束时, 我们会拍摄平场. 除平场的过程又分为 3 个步骤, 首先将所有平场图像合并产生 1 个平场文件 Flat.imh, 然后将它作 spline3 三次样条拟和进行归一化, 最后以此为基准去除所有的目标图像, 即可除掉平场.

(3) 删除宇宙线: 我们观测目标的曝光过程中, CCD 的背景上不可避免会出现宇宙线. 数量的多少随曝光时间的长短而相应增减, 出现的位置则完全随机, 它们会对我们后来的处理产生不利的影 响. 宇宙线的特征很明显: 信号强度特别强, 但所占的像素特别少, 可能少到只有 1 pixel, 且其周围的信号一般很弱, 我们可以据此将它们除去.

到这一步为止, 我们完成了光谱的预处理.

(4) 抽取 1 维光谱: 我们得到的原始光谱图像是 2 维的, 需要将其转化为 1 维光谱. 我们根据拍摄时彗星在狭缝的位置, 确定相应的彗星光谱在纵轴方向的孔径范围, 它一般正好对应纵轴中部的亮带区域. 具体操作应当因图而异, 基本原则是既要保证目标源的大部分信息都包含在该区域中, 又要保证尽可能少地将背景天光包含在内. 接下来就应该除天光了, 因为光谱中包含天光成分, 所以需要在光谱中心的左右各选取 1 个基本上只包含天光的区域, 并根据它们的情况用拟和的方式扣除信号内包含的天光. 这样就得到了信号强度 - 像素位置关系图. 用同样的参数抽取类太阳星的 1 维光谱 (均需扣除天光) 和 He-Ar 灯的灯谱 (无需扣除天光).

实际观测时, 不同目标源的天顶距很难刚好一致, 因此我们还需要进行大气消光改正. 我们采用国家天文台兴隆观测基地的平均消光系数, 即使用数据文件 baoextinct.dat 为标准做消光改正.

(5) 波长定标: 从定标灯谱中由蓝端到红端均匀选择几条比较容易辨认的已知波长的谱线, 测量并记录这些谱线对应的横坐标, 单位为 Pixel, 然后通过插值法拟和并标出所有的谱线, 同时得到横坐标值与波长值的对应关系. 注意对于方差过大的点要予以删除, 并重新拟和. 之后, 将目标源 (含类太阳星) 与已定出波长的灯谱比对, 将它们的原始谱的横坐标值换为波长, 从而得到信号强度与波长的对应关系.

图 1 就是进行波长定标后的目标天体 1 维光谱图示例. 横坐标是波长, 纵坐标是 CCD 的累积 ADU (Analog/Digital Unit) 值 (即累积的模数转换电子读数). 其他目标的光谱图类似.

需要指出的是, 在光谱的连续背景上, 6500~8000 Å 波长范围内存在几处强吸收. 这几处吸收并非目标天体本身的吸收所致, 而是星光在穿越地球大气层时被其中的水 (氧) 分子吸收而造成的.

(6) 归一化: 彗星的目视星等相比类太阳星的目视星等差距很大, 光谱流量也因此相差很大, 而我们所感兴趣的只是连续谱轮廓, 因此可以将彗星光谱和恒星光谱均作归一化处理. 通常的做法是将波长 $5\,500\text{ \AA}$ 处 (即测光 V 波段的中心波长处) 的流量定为 1, 再把整幅图除以该处的流量值, 即可得到归一化的光谱流量图. 图 2 是以 $5\,500\text{ \AA}$ 处流量作为 1 进行归一化后得到的彗星 C/2010 G2 的光谱相对强度图. 其他目标谱形类似.

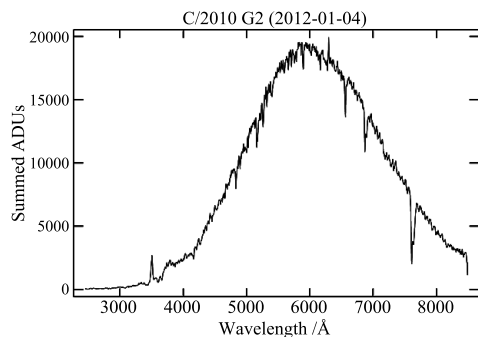


图 1 进行波长定标后的目标 1 维光谱图示例

Fig. 1 An example of a target's one-dimension spectra after wavelength calibrating

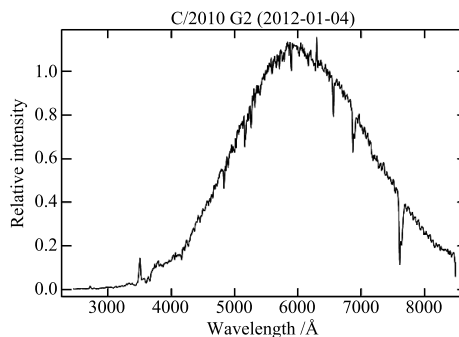


图 2 进行归一化后得到的彗星 C/2010 G2 的光谱相对强度图

Fig. 2 The relative intensity of comet C/2010 G2 after normalization

(7) 得到相对反射谱: 用归一化的彗星光谱除以归一化的类太阳星光谱, 最终得到的比率谱就是我们用于分析的相对反射谱. 为了更好地体现谱线轮廓, 在最终出图时采用了 5 点滑动平均. 这一步是我们的谱线处理的最后一步. 图 3~12 是对 6 颗彗星总共进行了 10 次观测后得到的相对反射谱. 横坐标为波长, 纵坐标为相对反射率, 范围从 $0.5\sim 1.5$. 这里只截取了 CCD 响应较好的 $4000\sim 8000\text{ \AA}$ 波长范围. 由地球大气造成的几处强吸收仍能看出来, 尤其是 $7\,500\text{ \AA}$ 附近的一处特别明显.

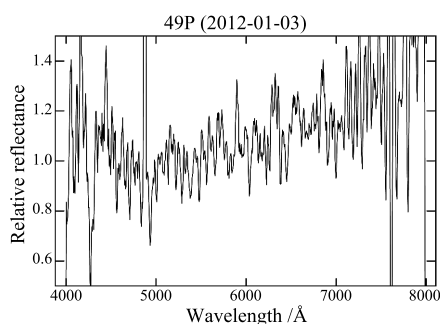


图 3 彗星 49P 的相对反射谱 (2012 年 1 月 3 日)
Fig. 3 The relative reflectance spectrum of comet 49P on 2012 Jan. 3

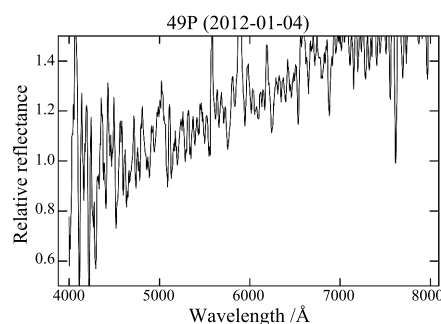


图 4 彗星 49P 的相对反射谱 (2012 年 1 月 4 日)
Fig. 4 The relative reflectance spectrum of comet 49P on 2012 Jan. 4

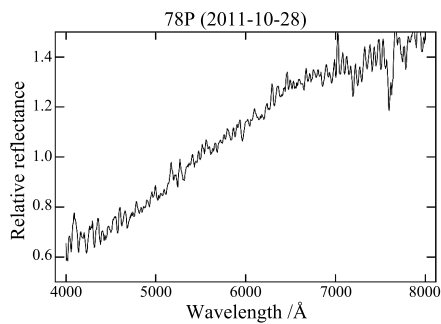


图 5 彗星 78P 的相对反射谱 (2011 年 10 月 28 日)

Fig. 5 The relative reflectance spectrum of comet 78P on 2011 Oct. 28

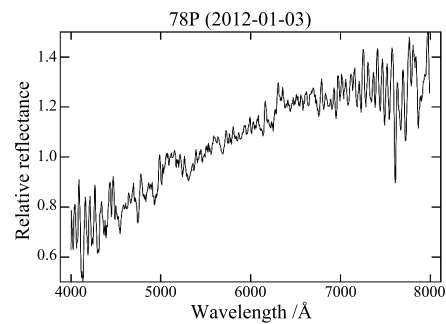


图 6 彗星 78P 的相对反射谱 (2012 年 1 月 3 日)

Fig. 6 The relative reflectance spectrum of comet 78P on 2012 Jan. 3

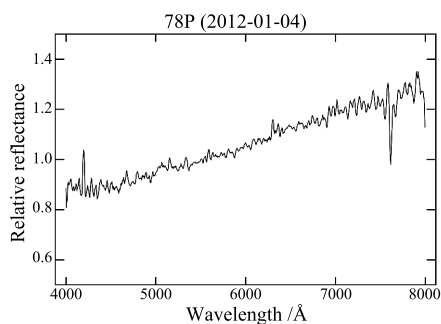


图 7 彗星 78P 的相对反射谱 (2012 年 1 月 4 日)

Fig. 7 The relative reflectance spectrum of comet 78P on 2012 Jan. 4

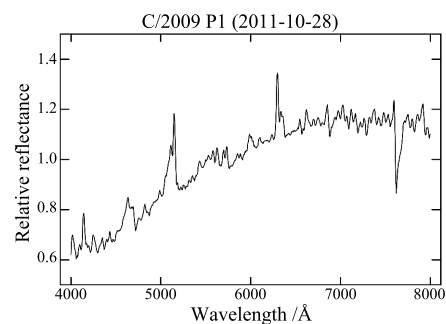


图 8 彗星 C/2009 P1 的相对反射谱 (2011 年 10 月 28 日)

Fig. 8 The relative reflectance spectrum of comet C/2009 P1 on 2011 Oct. 28

4 光谱距离

得到各彗星的相对反射谱后, 我们再采用“光谱距离”概念, 来计算各彗星的光谱数据相对于 Bus-DeMeo 分类法的 24 种小行星的光谱标准数据的光谱距离, 通过距离大小来判断彗星跟哪种类型最接近.

在天体的 1 维光谱图像中, 每隔一定距离 (比如 500 \AA) 取 1 个点, 共取 n 个点. 然后, 我们想象 1 个 n 维的光谱空间, 彗星这 n 个点的的数据看作这颗彗星在这 n 维光谱空间中的坐标, Bus-DeMeo 分类法的 24 种小行星分类也相应地在这 n 维光谱空间中有 1 个坐标. 这样, 我们只需要作出 1 颗彗星相对于 24 种小行星种类的光谱距离, 看哪个 (或哪几个) 距离最短, 就能说明该彗星的光谱特性比较接近于哪类 (或哪几类). 再结合彗星的相对反射谱, 从细节上作进一步的分析比较, 排除干扰最终确定彗星的光谱类型 [7].

由此, 我们得到光谱距离的定义式:

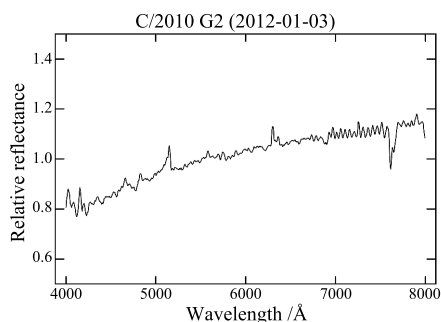


图 9 彗星 C/2010 G2 的相对反射谱
(2012 年 1 月 3 日)

Fig. 9 The relative reflectance spectrum of comet C/2010 G2 on 2012 Jan. 3

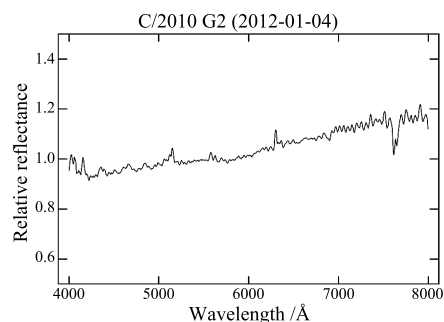


图 10 彗星 C/2010 G2 的相对反射谱
(2012 年 1 月 4 日)

Fig. 10 The relative reflectance spectrum of comet C/2010 G2 on 2012 Jan. 4

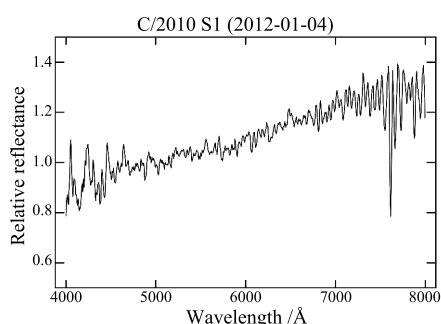


图 11 彗星 C/2010 S1 的相对反射谱
(2012 年 1 月 4 日)

Fig. 11 The relative reflectance spectrum of comet C/2010 S1 on 2012 Jan. 4

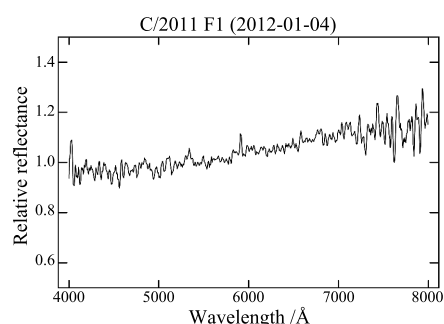


图 12 彗星 C/2011 F1 的相对反射谱
(2012 年 1 月 4 日)

Fig. 12 The relative reflectance spectrum of comet C/2011 F1 on 2012 Jan. 4

$$d_x = \sqrt{\sum_{k=1}^n (X_k - Y_k)^2},$$

式中 d_x 是我们未分类光谱 X 和已分类的 Bus-DeMeo 分类法小行星光谱 Y 间的光谱距离, k 表示光谱空间中的某个坐标, n 表示光谱空间的坐标总数 (或者说是光谱空间的维数).

光谱距离数值的大小反映了未知类型彗星光谱和各种类型小行星光谱的相似程度, 光谱距离越小表明, 2 条光谱的类型越接近.

Bus-DeMeo 分类法的 24 种小行星光谱标准数据的波长范围从 4500~24500 Å, 涵盖了从可见光到红外的较宽波段. 而我们的观测设备只能拍摄可见光波段的信息, 其响应较好的光谱范围为 4000~8000 Å. 两个范围取公共部分, 我们只能使用 4500~8000 Å 的数据进行比较.

Bus-DeMeo 分类法的数据是每隔 500 Å 取 1 个点, 在 4500~8000 Å 范围内有 8 个点. 因此我们采用 spline3 三次样条插值函数对彗星光谱进行平滑处理, 也在 4500~8000 Å 范围内每 500 Å 取 1 个点. 这样, 每颗彗星也是取 8 个点的数据. 换句话说, 在作者这次的工作中, 光谱空间的坐标总数 $n = 8$.

表 2 为 6 颗彗星在 10 次观测中的数据, 相对 Bus-DeMeo 分类法的 24 种小行星光谱的光谱距离, 已经按照距离由近到远排序, 保留距离最近的 4 个类型. 本文表中 Type 表示光谱类型, Distance 表示光谱距离, 彗星名字后括号中的数字表明了观测时间.

表 2 彗星光谱相对于 Bus-DeMeo 分类法的 24 类小行星光谱的光谱距离

Table 2 The spectral distance of comets' spectra relative to 24 types of asteroids' spectra via Bus-DeMeo taxonomy

Type	Distance	Type	Distance	Type	Distance
	O 0.314627875	A 0.756530237		A 0.213739327	
49P	B 0.350706573	49P	Sv 0.774872248	78P	Sv 0.359467801
(2012-01-03)	C 0.360062633	(2012-01-04)	L 0.801371325	(2011-10-28)	L 0.379882745
	Cb 0.365908595		D 0.830187931		Sa 0.384849971
	A 0.137193768		Sv 0.061434925		Sa 0.124541198
78P	Sv 0.15364677	78P	L 0.062857378	C/2009 P1	Sr 0.142960519
(2012-01-03)	L 0.162292729	(2012-01-04)	S 0.08173402	(2011-10-28)	R 0.14595996
	S 0.191130139		D 0.088322421		V 0.150399169
	K 0.048046228		T 0.055183784		Sv 0.14334162
C/2010 G2	Xe 0.066916665	C/2010 G2	D 0.082378699	C/2010 S1	L 0.161064645
(2012-01-03)	T 0.078239632	(2012-01-04)	Xe 0.08757197	(2012-01-04)	S 0.184023966
	Sq 0.084614656		K 0.091945908		D 0.193655932
	Xe 0.077043429				
C/2011 F1	K 0.092012445				
(2012-01-04)	T 0.101496256				
	Xk 0.119178396				

5 分析和结论

SMASS 网站给出的 Bus-DeMeo 小行星光谱分类法的 24 种光谱类型见图 13^[1].

根据 SMASS 网站给出的 Bus-DeMeo 小行星光谱分类法的 24 种光谱类型的数据平均值, 取其中的 4500~8000 Å 范围对应的数值, 我们画出了这 24 种光谱类型的相对反射谱图, 见图 14~17.

由图 14~16 可以看出, 同群光谱类型的谱形在 4500~8000 Å 范围内往往差别较小, 尤其是 S- 群和 X- 群的某几个子类型, 这给我们准确判断类型带来了困难, 因此除了光谱距离外, 我们还要结合数据的 K-S 检验结果来进行分析.

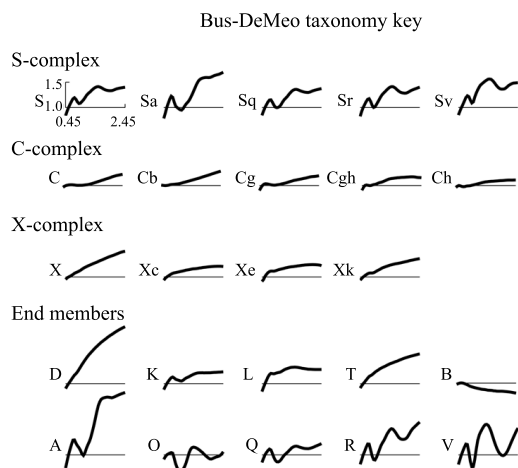
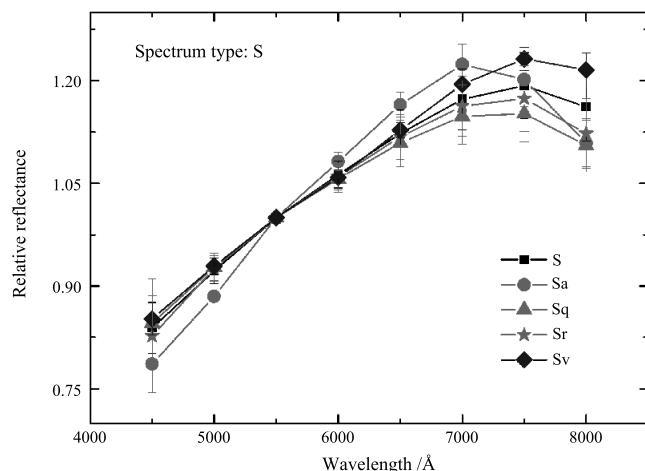
图 13 Bus-DeMeo 小行星光谱分类法的 24 种光谱类型^[1]Fig. 13 24 types of asteroids' spectra via Bus-DeMeo taxonomy^[1]

图 14 Bus-DeMeo 分类法的 S- 群, 包括 S、Sa、Sq、Sr、Sv 等光谱类型

Fig. 14 S-complex of Bus-DeMeo taxonomy, including S, Sa, Sq, Sr, and Sv types

另外, 考虑到观测时的天气条件, 1 月 3 日晚上视宁度比较差, 只有 $4.5''$, 而我们的光谱仪狭缝宽度为 $3''$, 视宁度大于狭缝宽度, 所以 3 日的数据比较差, 可信度较低. 而 1 月 4 日晚上视宁度比较好, 为 $2.5''$, 小于狭缝宽度, 所以 1 月 4 日晚上的数据可信度较高. 后面的分析会更偏重考虑 1 月 4 日晚数据的结果.

5.1 关于彗星 49P

在 2012 年 1 月 3 日和 1 月 4 日分别进行了观测. 由于观测时其亮度较低, 得到的数据信噪比较差 (图 3 和图 4), 导致后续分析误差很大. 具体表现在:

(1) 1月3日的光谱数据和1月4日的光谱数据得出的光谱距离排序情况差异较大;
 (2) 1月3日和1月4日数据得到的光谱距离本身数值较大,明显大于0.1.尤其是1月4日,最小的光谱距离竟然接近1.

(3) 同一日数据得到的光谱距离排序后,最接近的几个光谱距离差异很小,在误差范围内.最小的光谱距离相对于其相邻的几个光谱距离没有明显优势.

我们又尝试将两天的49P数据取平均,画出谱线,但信噪比仍然很差.用平均数据计算光谱距离,数值仍然很大.

因此,根据现有的数据,无法将49P归为已知的任意一类小行星类型中.

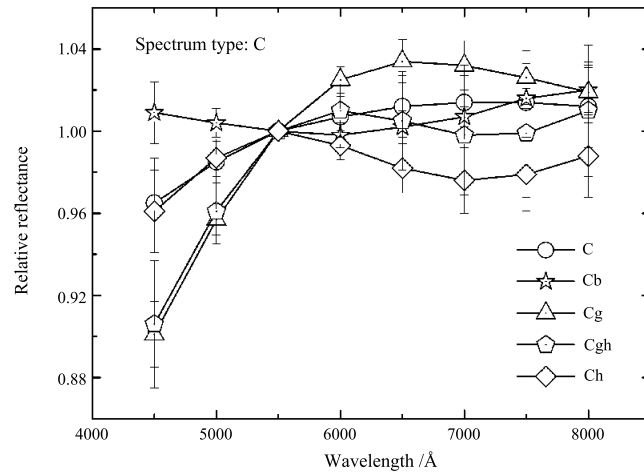


图 15 Bus-DeMeo 分类法的 C-群, 包括 C、Cb、Cg、Cgh、Ch 等光谱类型

Fig. 15 C-complex of Bus-DeMeo taxonomy, including C, Cb, Cg, Cgh, and Ch types

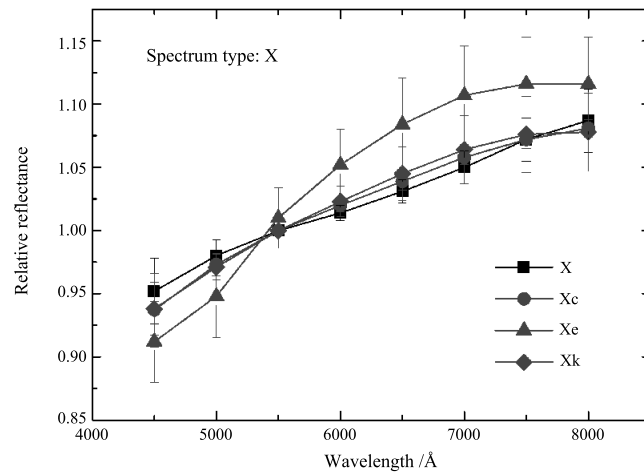


图 16 Bus-DeMeo 分类法的 X-群, 包括 X、Xc、Xe、Xk 等光谱类型

Fig. 16 X-complex of Bus-DeMeo taxonomy, including X, Xc, Xe, and Xk types

5.2 关于彗星 78P

在 2011 年 10 月 28 日观测了 1 次, 在 2012 年 1 月 3 日和 1 月 4 日又分别进行了观测, 得到了 3 组数据. 对比这 3 组数据, 容易看到, 2011 年 10 月 28 日和 2012 年 1 月 3 日的数据得出的光谱距离排序, 前 3 个类型完全一致: A-type 对应的光谱距离最小, 其次是 Sv-type 和 L-type. 2012 年 1 月 4 日的数据则显示 Sv-type 对应的光谱距离最小, 其次是 L-type 和 S-type. 考虑到观测时 1 月 4 日的天气最好, 数据信噪比最高, 因此当天数据在分析时参考价值更大. 1 月 4 日数据指出的光谱距离最小的是 Sv 型, 而在另外 2 次观测的数据中, Sv 型的光谱距离是第 2 小的, 且与最小的差距不大, 因此, 可以考虑 78P 彗星的光谱类型接近 Sv 型.

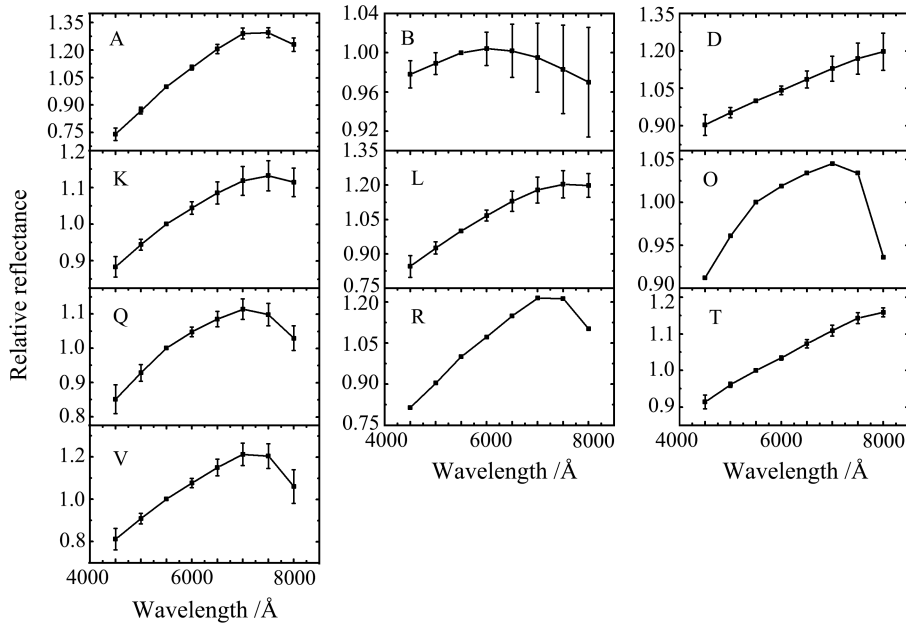


图 17 Bus-DeMeo 分类法的 A、B、D、K、L、O、Q、R、T、V 等光谱类型

Fig. 17 A, B, D, K, L, O, Q, R, T, and V types of Bus-DeMeo taxonomy

然后, 我们再看彗星的相对反射谱 (图 5~7), 发现其谱形呈总体明显上升的趋势, 其轮廓在 4 500 Å 处相对反射率平均约为 0.8, 最高处相对反射率平均为略大于 1.2. 对比 Bus-DeMeo 分类法对应的 A-type (图 17)、Sv-type (图 14) 和 L-type (图 17) 的谱形, 在同样波长范围内 (4500~8000 Å), L-type 在最高点的相对反射率较为接近 1.2, Sv-type 和 A-type 可以达到, 且轮廓相似. 考虑到 1 月 4 日的数据较好, 我们重点考察 1 月 4 日的相对反射谱 (图 7), 这个谱在最低处强度为 0.8 左右, 到 7 500 Å 左右强度达到最高, 而 A-type 最低处强度低于 0.75, 在 7 000 Å 处强度就达到了最高, 只有 Sv-type 在最低处强度约为 0.8, 在 7 500 Å 左右强度达到最高, 与 1 月 4 日的谱线轮廓符合得最好.

再看 K-S 检验结果. K-S 检验的计算方法为: 采用滑动平均的方法对原始的观测数据滤波, 滤波因子统一取为 0.5, 然后将滤波后的数据与 24 个 Bus-DeMeo 光谱做 K-S 检验, 显著性为 0.05. 得到的结果中, H 表示分布的相似情况. 若 $H = 0$, 表明观测的源与 Bus-DeMeo 描述的类型在这个波段有类似的分布; 若 $H = 1$, 则表明观测的源与 Bus-DeMeo 描述的类型在这个波段无类似的分布. P 表明误判的概率, P 越小, 说明判断正确性的概率越高.

表 3 为 78P 的 3 次观测数据与 A-type、Sv-type 和 L-type 的 K-S 检验结果. 可见 K-S 检验也支持将彗星 78P 的光谱类型判断为 Sv-type. 3 次观测数据的 Sv-type 对应的 H 均为 0. 具体到数据质量最好的 1 月 4 日: $H = 0$, $P = 0.9652$, 虽然 P 较高, 但至少 H 不为 1, 也符合这一判断.

最终, 综合各方面因素, 我们认为彗星 78P 的光谱类型接近 Sv-type.

表 3 78P 的 3 次观测数据与 A-type、Sv-type 和 L-type 的 K-S 检验结果
Table 3 The K-S test results between the three observational data of 78P and A-type, Sv-type, and L-type

2011-10-28			2012-01-03			2012-01-04		
Type	H	P	Type	H	P	Type	H	P
L	0	0.0696	L	0	0.1784	A	0	0.3226
Sv	0	0.1094	Sv	0	0.352	L	0	0.9256
A	0	0.3068	A	0	0.8602	Sv	0	0.9652

5.3 关于彗星 C/2009 P1

在 2011 年 10 月 28 日观测了 1 次. 因为该彗星亮度高, 所以图像信噪比较好. 依据光谱距离排序, 前 3 位分别为 Sa-type、Sr-type 和 R-type.

再看彗星的相对反射谱 (图 8), 发现谱线在 7000 \AA 之前明显上升, 在 7000 \AA 之后趋于平缓, 然后略微下降, 最高点的相对反射率约为 1.1. 对比 Bus-DeMeo 分类法对应的 Sa-type、Sr-type (均为图 14) 和 R-type (图 17) 的谱形, 在同样波长范围内 ($4500 \sim 8000 \text{ \AA}$), Sa-type 和 R-type 在最高点的相对反射率都超过了 1.2, 且最后下降比较陡, 只有 Sr-type 在最高点的相对反射率约为 1.1, 且最后下降比较平缓.

再看 K-S 检验结果 (表 4), H 均为 0, 说明 C/2009 P1 的光谱数据与这 3 种类型在此波段都有类似的分布. 不过 Sr-type 对应的 P 较高, 误判的概率相对较大.

根据光谱距离排序, C/2009 P1 最接近 Sa-type; 根据谱线轮廓分析, C/2009 P1 最接近 Sr-type; 根据 K-S 检验, C/2009 P1 最接近 Sa-type 和 R-type. 综合考虑, 至少我们可以知道, 彗星 C/2009 P1 的光谱类型最接近 S- 群, 至于是 S- 群中的 Sa-type 还是 Sr-type, 可能还需要更多的观测数据才能更好地说明.

表 4 C/2009 P1 的数据与 Sa-type、R-type 和 Sr-type 的 K-S 检验结果

Table 4 The K-S test results between the observational data of C/2009 P1 and Sa-type, R-type, and Sr-type

2011-10-28		
Type	H	P
Sa	0	0.1662
R	0	0.1662
Sr	0	0.6382

5.4 关于彗星 C/2010 G2

在 2012 年 1 月 3 日和 1 月 4 日分别进行了观测, 2 天的数据得到的光谱距离排序不同, 1 月 3 日是 K-type 排第 1, 然后是 Xe-type、T-type; 而 1 月 4 日是 T-type 排第 1, 然后是 D-type、Xe-type 和 K-type. 考虑到 1 月 4 日的的数据质量较好, 所以我们重点考虑 T-type.

我们又尝试将两天的 C/2010 G2 数据取平均, 再计算光谱距离并排序, 得到最小的 4 个光谱距离依次对应的是 T-type、K-type、Xe-type 和 D-type.

再看彗星的相对反射谱 (图 9~10), 发现谱线接近线性平缓上升, 起伏较小, 4 500 Å 处相对反射率约为 0.9, 8 000 Å 处相对反射率约为 1.15, 且图 10 在 6 000 Å 处有一明显凹陷. 对比 Bus-DeMeo 分类法对应的 K-type、T-type、D-type (均为图 17) 和 Xe-type (图 16) 的谱形, 在同样波长范围内 (4500~8000 Å), Xe-type 谱线轮廓呈“S”形上升, K-type 最后阶段有明显下降, 且在 6 000 Å 处没有凹陷, 均明显不符. T-type 和 D-type 谱形接近, 从最高点所达到的强度, 以及 6 000 Å 处的凹陷来判断, T-type 更符合要求.

再看 K-S 检验结果 (表 5), H 均为 0, 说明 C/2010 G2 的光谱数据与 D-type 和 T-type 在此波段都有类似的分布. 不过 T-type 对应的 P 较高, 尤其是 1 月 4 日的的数据, P 高达 0.985 4, 说明误判的概率很大.

最终, 根据平均后的光谱距离排序, C/2010 G2 最接近 T-type; 根据谱线轮廓分析, C/2010 G2 仍然最接近 T-type. 根据 K-S 检验, C/2010 G2 与 T-type 有类似的分布, 虽然误判的可能性较大, 但至少 H 不为 1. 综合考虑, 我们最终认为彗星 C/2010 G2 的光谱类型接近 T-type.

表 5 C/2010 G2 的两次观测数据与 D-type 和 T-type 的 K-S 检验结果

Table 5 The K-S test results between the two observational data of C/2010 G2 and D-type, and T-type

2012-01-03			2012-01-04		
Type	H	P	Type	H	P
D	0	0.2314	D	0	0.7029
T	0	0.638	T	0	0.9854

5.5 关于彗星 C/2010 S1

在 2012 年 1 月 4 日进行了观测, 根据光谱距离排序, 排前 3 位的分别为 Sv-type、L-type 和 S-type, 且 Sv-type 对应的光谱距离有明显优势.

再看彗星的相对反射谱 (图 11), 发现谱线上升较平缓, 且缺乏特征, 在 6 000 Å 附近似乎有一处凹陷, 轮廓最高处的相对反射率略微超过 1.2, 且在最后没有明显的下降趋势. 对比 Bus-DeMeo 分类法对应的 Sv-type (图 14)、L-type (图 17) 和 S-type (图 14) 的谱形, 在同样波长范围内 (4500~8000 Å), 它们的轮廓都很像, 只是 S-type 图形的最高点达不到 1.2, L-type 的最高点较为接近 1.2, 只有 Sv-type 的最高点稍微超过了 1.2, Sv-type 最满足此彗星的谱线强度特征.

再看 K-S 检验结果 (表 6), H 均为 0, 说明 C/2010 S1 的光谱数据与 3 种类型在此波段都有类似的分布. 不过 Sv-type 对应的 P 较高, 说明误判的概率很大.

最终, 根据光谱距离排序, C/2010 S1 最接近 Sv-type; 根据谱线轮廓分析, C/2010 S1 仍然最接近 Sv-type. 根据 K-S 检验, C/2010 S1 与 Sv-type 有类似的分布, 虽然误判的可能性较大, 但至少 H 不为 1. 综合考虑, 我们最终认为彗星 C/2010 S1 的光谱类型接近 Sv-type.

表 6 C/2010 S1 的数据与 S-type、L-type 和 Sv-type 的 K-S 检验结果

Table 6 The K-S test results between the observational data of C/2010 S1 and

S-type, L-type, and Sv-type

2012-01-04		
Type	H	P
S	0	0.4154
L	0	0.5447
Sv	0	0.9112

5.6 关于彗星 C/2011 F1

在 2012 年 1 月 4 日进行了观测, 根据光谱距离排序, 排前 3 位的分别为 Xe-type、K-type 和 T-type.

再看彗星的相对反射谱 (图 12), 发现谱线上升很平缓, 在 6 000 Å 附近有一处明显凹陷, 轮廓最高处的相对反射率约为 1.1, 且在最后没有明显的下降趋势, 这些特征跟之前分析的彗星 C/2010 G2 很像. 对比 Bus-DeMeo 分类法对应的 Xe-type (图 16)、K-type 和 T-type (均为图 17) 的谱形, 在同样波长范围内 (4500~8000 Å), Xe-type 谱线轮廓呈“S”形上升, K-type 最后阶段有明显下降, 且在 6 000 Å 处没有凹陷, 均明显不符. 只有 T-type 比较符合.

再看 K-S 检验结果 (表 7), H 为 0, 说明 C/2011 F1 的光谱数据与 T-type 和 Xe-type 在此波段都有类似的分布. 不过它们对应的 P 都较高, 说明误判的概率较大.

最终, 根据光谱距离排序, C/2011 F1 最接近 Xe-type; 根据谱线轮廓分析, C/2011 F1 最接近 T-type. 根据 K-S 检验, C/2010 F1 与这 2 种类型都有类似的分布, 虽然误判的可能性较大, 但至少 H 不为 1. 综合考虑, 我们最终认为彗星 C/2011 F1 的光谱类型

接近 T-type.

表 7 C/2011 F1 的数据与 T-type 和 Xe-type 的 K-S 检验结果

Table 7 The K-S test results between the observational data of C/2011 F1 and T-type, and Xe-type

2012-01-04		
Type	H	P
T	0	0.638
Xe	0	0.638

6 总结和讨论

我们观测了 6 颗彗星的光谱, 并通过光谱距离的概念, 判断这 6 颗彗星的光谱与现有的 Bus-DeMeo 小行星光谱分类中的哪类比较接近. 得出的结论是, 彗星 78P 的光谱类型接近 Sv-type, 彗星 C/2009 P1 的光谱类型接近 S- 群中的 Sa-type 或 Sr-type, 彗星 C/2010 G2 的光谱类型接近 T-type, 彗星 C/2010 S1 的光谱类型接近 Sv-type, 彗星 C/2011 F1 的光谱类型接近 T-type. 彗星 49P 因为数据信噪比较差, 无法得出明确的结论.

对于这些彗星, 我们可以大胆猜测, 它们与对应光谱类型的某些小行星可能在演化上有关系, 运行轨道可能也有相似性. 下一步可以计算彗星的运行轨道, 再计算其对应的光谱类型中的一些代表小行星的轨道, 寻求它们之间轨道的相关性, 也许会有更多的发现.

我们的工作说明了利用光谱距离来确定光谱之间的相近性, 再通过 K-S 检验来进行验证这一方法是可行的, 因为 K-S 检验支持光谱距离所得出的结论. 这一点非常重要, 使得我们将来使用这一方法来尝试进行彗星光谱分类成为可能.

我们工作的最大缺憾就是光谱所覆盖的波长范围不够宽. Bus-DeMeo 小行星光谱分类法的 24 种光谱类型要求的波长范围是从可见光到红外的 4500~24500 Å, 而我们目前的数据只能涵盖其中一部分 (4500~8000 Å). 这一部分体现出来的光谱特征比较少, 计算光谱距离时取点也很少, 计算结果会有较大的误差, 而且难以通过光谱特征来精确判定, 因为 Bus-DeMeo 小行星光谱分类法中许多重要的判定特征都在 10 000 Å 甚至 20 000 Å 处.

对于未来可以开展的工作, 如上所述, 我们目前的光谱观测覆盖的波长范围还比较窄, 所以今后再进行类似工作时, 我们应尽可能同时拍摄目标天体的红外光谱, 才能更准确地展开分析.

但更重要的一点是, 我们可以利用目前的光谱拍摄设备, 拍摄更多的彗星光谱. 等到样本足够多时 (比如得到超过 30 颗彗星的光谱, 且每颗彗星有 2 次及以上的观测时), 我们可以根据光谱距离来对彗星光谱进行分类. 当然, 要进行彗星光谱分类可能不光要考虑其连续谱, 还要考虑其原子、分子谱线的差别, 所以遇到合适的彗星, 我们会使用分辨率更高的光栅进行观测, 以获取它们的光谱细节.

这项工作具有一定的开创性, 因为在这之前并没有 1 个很好的彗星光谱分类系统.

这样可以避免受制于 Bus-DeMeo 小行星光谱分类法对较长波长范围的要求, 国内目前的观测设备本身也很难获取彗星的红外光谱数据. 同时, 也有助于分析彗星光谱在 4000~8000 Å 范围内的精细特征.

另外, 拥有了同一颗彗星相隔充分长时间的多次观测数据后, 我们还能分析彗星在相对于太阳的不同位置, 以及相对于我们的不同角度时, 彗星光谱轮廓是否会有变化等.

致谢 本文在观测过程中, 得到了国家天文台姜晓军研究员、吴宏研究员、陈颖为老师、王竞老师、紫金山天文台刘庆忠老师、颜景志老师等人的大力支持和帮助. 在数据分析处理和论文写作过程中, 得到了夏威夷大学杨彬博士、北京师范大学天文系陈阳老师、吴江华老师、张同杰老师、北京天文馆朱进研究员、国家天文台张天萌老师、清华大学王晓峰等人的指导和帮助, 在此表示衷心的感谢!

参 考 文 献

- [1] DeMeo F, Binzel R, Slivan S, et al. *Icar*, 2009, 202: 160
- [2] 王波波, 曹振国. 太阳系里的游荡者 — 彗星. 北京: 科学技术出版社, 中国社会科学出版社, 1998: 93-104
- [3] Mason J. *NewSc*, 1988, 120: 34
- [4] Jewitt D C. *AJ*, 2002, 123: 1039
- [5] Emel'yanenko V V, Asher D J, Bailey M E. *MNRAS*, 2005, 361: 1345
- [6] Hsieh H H. *Main Belt Comets*. Hawaii: University of Hawaii, 2010
- [7] 杨彬. 小行星的测光和光谱研究. 北京: 中国科学院国家天文台, 2003

The Processing and Classification for the Spectra of Six Comets

ZHAN Xiang^{1,2} CHEN Li¹

(1 *Department of Astronomy, Beijing Normal University, Beijing 100875*)

(2 *Beijing Planetarium, Beijing 100044*)

ABSTRACT In order to explore the relationship between comets and asteroids, some comets' spectra are taken, and the spectra are compared with the spectral types of the asteroids. The 2.16 m telescope in Xinglong observing station of NAOC (National Astronomical Observatories) is used to observe the spectra of six comets: 78P, C/2009 P1, 49P, C/2010 G2, C/2010 S1, and C/2011 F1. At the same time, the spectra of some sun-like stars are also observed. Then the IRAF (Image Reduction and Analysis Facility) software is used to reduce the data. The bias, the flat, and the cosmic ray are reduced from the images. And the comets' spectra are divided by the sun-like stars' spectra to derive the relative reflectance. Then the images of the relative reflectance spectra of the six comet are drawn. In addition, the spectra of the comets are compared to the 24 types in the Bus-DeMeo asteroid spectral taxonomy. The spectral distance is calculated as well. According to the order of the spectral distance, the details of the relative reflectance spectra, and the results of the K-S test, the asteroid's close to the comets' have been finally determined. Here is the conclusion:

the spectral type of comet 78P is close to Sv-type; the spectral type of comet C/2009 P1 is close to Sa-type or Sr-type of S-complex, the spectral type of comet C/2010 G2 is close to T-type, the spectral type of comet C/ 2010 S1 is close to Sv-type, the spectral type of comet C/2011 F1 is close to T-type. Because the comet 49P's data has a very poor SNR (Signal/Noise Ratio), the spectral type of comet 49P can't be determined clearly.

Key words comets: individual, techniques: spectroscopic, methods: data analysis