**第十二届国际天文与天体物理奥林匹克竞赛**

**数据分析试题**

中国 北京 2018年11月3日11日

**1. 产星星系中的尘埃和年轻恒星**

作为星系内部恒星形成过程之中的副产品, 星系里的尘埃能够显著吸收紫外(ultraviolet, UV)波段和光学波段的星光, 然后在远红外(far-infrared, FIR)波段再辐射出来, 远红外波段对应的波长范围是10–300微米(m).

**1.1.**在星系的紫外谱上, 紫外辐射主要是由最近发生的恒星形成过程中所诞生的年轻恒星们贡献的, 因此星系的紫外光度可以作为量度星系里的“恒星形成率(star-formation rate, 英文缩写SFR)”的一个可靠指标. 由于观测到的紫外光度很大程度上受到尘埃散射和吸收的影响而减弱(尘埃消光, dust attenuation), 天文学家为了量化紫外连续谱的形状, 定义了一个指数, 叫作紫外连续谱斜率(UV continuum slope)(): *f* = *Q* · .其中*f*是星系在给定波长上的单色流量(单位: W m–3), *Q*是定标常数, 是紫外连续谱斜率.

**1.1.1.**人们定义了一个叫作AB星等的量: , 典型的产星星系的AB星等在紫外波段大致不变. 求这类星系的紫外连续谱斜率 (UV slope)是多少? (提示: *f* = *f*).

**1.1.2.**表1展示的是一个红移*z* = 6.60的星系CR7的远红外(FIR)流量观测结果. 用数据点点出星系CR7的AB星等(纵坐标)与静止参考系波长(rest-frame, 横坐标, 使用对数坐标)的关系图, 记为图1.

**1.1.3.**在图1中画出与数据点拟合最佳的直线, 用最小二乘法计算星系CR7的紫外连续谱斜率, 并与1.1.1.中你所得出的结果相比较. 并据此判断, 和1.1.1.中的典型产星星系相比, 星系CR7里的尘埃是不是更多? 请答[YES](更多)或[NO](否). 提示:可以将*m*AB写为静止波长和*m*1600的方程, 其中*m*1600是波长0 = 160 nm (1600 Å)处的AB星等.

表1. 星系CR7的远红外(FIR)测光数据(表中数据为观测到的波长, 红移*z* = 6.60)

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 波段 | Y | J | H | K |
| 中心波长(m) | 1.05 | 1.25 | 1.65 | 2.15 |
| AB星等  *m*AB | 24.71 0.11 | 24.63 0.13 | 25.08 0.14 | 25.15 0.15 |

**1.2.**假设星系中的尘埃颗粒吸收紫外光子的能量, 然后以黑体辐射的形式进行远红外辐射,紫外连续谱斜率()、紫外（UV)亮度(在1600埃处)、远红外亮度(*F*FIR)可以表示为以下函数关系: , 其中*F*FIR是观测到的远红外流量, *F*1600是160纳米(1600 Å)波长上的观测流量(“流量” *F*定义为: *F* = · *f*). 表2给出的是20个近邻星系的、*F*FIR和*F*1600的20组测量值(Meurer等人1999).

**1.2.1.**基于表2中给出的数据, 在画图纸上绘制纵坐标IRX和横坐标的关系图, 记为图2,画出拟合直线. 在图的旁边写出拟合直线的方程(形式类似于IRX = *a* · + *b*).

**1.2.2.**用以下等式, 求出IRX的观测值IRXobs与拟合预测值IRXpred的均方差 (单位为dex, dex(*x*) = 10*x*, 例如log(109) – log(104) = 5 dex):

**** (单位: dex)

其中IRX*i* = IRX*i*,obs – IRX*i*,pred.

表2. 20个邻近星系的紫外谱斜率(UV slope)、流量(flux, 10–3 W m–2)和远红外流量(FIR flux, 10–3 W m–2)

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 星系名称 | 紫外谱斜率 | log(*F*1600) | log(*F*FIR) |
| NGC 4861 | –2.46 | –9.89 | –9.97 |
| Mrk 153 | –2.41 | –10.37 | –10.92 |
| Tol 1924-416 | –2.12 | –10.05 | –10.17 |
| UGC 9560 | –2.02 | –10.38 | –10.41 |
| NGC 3991 | –1.91 | –10.14 | –9.8 |
| Mrk 357 | –1.8 | –10.59 | –10.37 |
| Mrk 36 | –1.72 | –10.68 | –10.94 |
| NGC 4670 | –1.65 | –10.02 | –9.85 |
| NGC 3125 | –1.49 | –10.19 | –9.64 |
| UGC 3838 | –1.41 | –10.81 | –10.55 |
| NGC 7250 | –1.33 | –10.23 | –9.77 |
| NGC 7714 | –1.23 | –10.16 | –9.32 |
| NGC 3049 | –1.14 | –10.69 | –9.84 |
| NGC 3310 | –1.05 | –9.84 | –8.83 |
| NGC 2782 | –0.9 | –10.5 | –9.33 |
| NGC 1614 | –0.76 | –10.91 | –8.84 |
| NGC 6052 | –0.72 | –10.62 | –9.48 |
| NGC 3504 | –0.56 | –10.41 | –8.96 |
| NGC 4194 | –0.26 | –10.62 | –8.99 |
| NGC 3256 | 0.16 | –10.32 | –8.44 |

**1.3.**在前文假设的能量转移过程中, *F*FIR与*F*1600的比率可用幂律关系表示: – 1. 其中*F*1600是未消光的流量; *A*是尘埃在波长的波段上的消光数值(以星等为单位).

**1.3.1.**求*A*1600的表达式, 以IRX为自变量.

**1.3.2.**根据表2的数据以及上面推导出的*A*1600(IRX)的关系式, 在图画纸上绘制*A*1600 关系图, 记为图3, 画出拟合直线. 在图旁边写出拟合直线的方程(形式类似于*A*1600 = *a* · + *b*).

**1.3.3.**如果你1.3.2.中的线性模型是正确的, 对一个没有尘埃的星系, 它的紫外连续谱斜率0会是多少?

**1.4.**确定了近邻紫外谱斜率与IRX之间的关系之后, 我们就可以在高红移宇宙中检测这个经验定律了. 2016年, 观测者得到了星系CR7的ALMA(阿卡塔马大型毫米波/亚毫米波阵)观测数据, 观测到它的远红外连续谱的流量上限*F*FIR等于1.5 10–19 W/m2(在3置信度上).

**1.4.1.**计算星系CR7的IRX. 这一数值是上限还是下限?

提示: 这里*F*1600应写为如下形式: *F*1600 = 0 · *f*1600. 其中0 = 160 nm(1600 Å), *f*1600是静止坐标系的观测流量.

**1.4.2.**你认为当前的观测是否足够充分, 以至于能够发现星系CR7偏离了你推导出的近域宇宙的IRX-关系式? 请答[YES](够充分)或[No](不够充分). 给出IRX的差, 并在答题纸上写下计算过程.

**2. 一个双星系统中的致密天体**

在阿帕奇天文台的“星系演化实验”(APOGEE)中, 天文学家在御夫座(Auriga)天区发现了一个不同寻常的双星系统. 在以下这些题目中, 你将要分析数据, 并自己重现他们的发现.

研究团组致力于用径向速度(radial velocity, RV)方法找出双星系统中的致密恒星. 他们研究了APOGEE存档的“单一”恒星的光谱, 并测量了这些数据中恒星径向速度的视变化. 针对其中大约200颗有着最高加速度的恒星, 研究人员比对了超新星自动化全天巡天(ASAS-SN)获得的光度变化数据, 来分析哪些有可能存在凌星(transit)、椭球变星(ellipsoidal variation)或者恒星黑子(starspot)等现象. 此后, 他们找出了一颗径向速度变化很大、光度变化也很大的恒星, 名为2M05215658+4359220.

**2.1.**下表展示的是恒星2M05215658+4359220在APOGEE光谱观测的三个径向速度测量值.这里我们假设它的径向速度的变化是由一颗看不见的伴星引起的. 恒星的自行可以忽略.

表3: APOGEE测量的恒星2M05215658+4359220的径向速度值

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 观测序号 | 约化儒略日  MJD | 径向速度  RV (km/s) | 误差  Uncertainty (km/s) |
| 1 | 56204.9537 | –37.417 | 0.011 |
| 2 | 56229.9213 | 34.846 | 0.010 |
| 3 | 56233.8732 | 42.567 | 0.010 |

**2.1.1.**利用这些数据和一个简单的线性模型, 来初步估算恒星的视最大加速度:

 (其中单位为km/s/day)

**2.1.2.**请利用这些数据, 初步估计那颗看不见的伴星的质量.

**2.2.**在发现了这颗特殊恒星之后, 天文学家展开了后续观测, 使用的设备是位于美国亚利桑那州霍普金斯山弗雷德劳伦斯惠普尔天文台(FLWO)的1.5米多目标反射光栅摄谱仪(TRES). 以下表格展示的就是用这个设备得到的径向速度测量值.

表4: TRES测量的恒星2M05215658+4359220的径向速度值

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 约化儒略日  MJD | 径向速度  RV (km/s) | 误差  Uncertainty (km/s) |
| 58006.9760 | 0 | 0.075 |
| 58023.9823 | –43.313 | 0.075 |
| 58039.9004 | –27.963 | 0.045 |
| 58051.9851 | 10.928 | 0.118 |
| 58070.9964 | 43.782 | 0.075 |
| 58099.8073 | –30.033 | 0.054 |
| 58106.9178 | –42.872 | 0.135 |
| 58112.8188 | –44.863 | 0.088 |
| 58123.7971 | –25.81 | 0.115 |
| 58136.6004 | 15.691 | 0.146 |
| 58143.7844 | 34.281 | 0.087 |

**2.2.1.**在画图纸上绘制TRES径向速度(RV)和时间的关系图, 记为图4 (Figure 4). 绘制一个合适的正弦曲线来拟合给定的数据. 根据你的绘图, 估算其轨道周期(*P*orb)和径向速度的半变幅(*K*, 即正弦曲线的振幅).

**2.2.2.**如果这颗恒星在以圆轨道运转, 求这颗恒星的轨道半径(*r*orb)的最小值, 分别用太阳半径*R*和天文单位au表示.

**2.2.3.**双星系统的质量函数可以定义为:

****.

其中下标“1”代表主星, “2”代表它的伴星. 参数*i*orb是双星系统的轨道(orb)倾角. 这个质量函数也可以用可观测量表示. 计算这个系统的质量函数, 以太阳质量*M*为单位.

**2.3.**基于对APOGEE、TRES光谱和GAIA视差测量的详细分析, 天文学家得出如下恒星参数.

表5: 恒星2M05215658+4359220的部分物理参数

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 有效温度  *T*eff (K) | 表面重力  log *g* (cm/s2) | 视差  (毫角秒mas) | 测量的  径向自转速度  *v*rot sin *i*  (km/s) | 热辐射流量  *F* (W m–2) |
| 4890 130 | 2.2 0.1 | 0.272 0.049 | 14.1 0.6 | (1.1 0.1)  10–12 |

测光观测表明, 它的光变曲线的周期与轨道周期相同, 因此我们可以假定它的自转周期和轨道周期相等: *P*rot = *P*orb *P*, 且轨道倾角和恒星自转轴倾角(rot)满足*i*orb = *i*rot *i*.

**2.3.1.**计算能看见的那颗恒星的光度(*L*1, 单位为*L*)、半径(*R*1, 单位为*R*)、轨道倾角正弦值(sin *i*), 以及质量(*M*1, 单位为*M*). 每个量都要给出误差.

**2.3.2.**从以下选项中, 选出这颗恒星的正确类型:

(1) 蓝巨星(Blue Giant),

(2) 黄主序星 (Yellow main sequence star),

(3)红巨星(Red Giant),

(4) 红主序星(Red main sequence star),

(5)白矮星(White Dwarf).

**2.3.3.**基于双星系统的质量函数*f*(*M*1, *M*2), 在你的图画纸中画出伴星质量*M*2(纵轴)相对于主星质量*M*1(横轴)的曲线, 记为图5 (Figure 5).

这里你需要根据2.3.1.中推导出的(sin *i*)作图, 并考虑其误差, 把根据其上限(sin *i* + sin *i*)和下限(sin *i* – sin *i*)计算所得的曲线也画在图上.

**2.3.4.**在你画的图5中, 画出一个垂直阴影区域, 覆盖范围[*M*1 – *M*1, *M*1 + *M*1], 再画两条水平的虚线, 纵坐标取值分别为白矮星和中子星的质量上限. 那颗看不见的伴星*M*2, 它的质量可能是多少? 它可能是一个什么天体?