

利用 HUBS 研究活动恒星

I 活动恒星简介

一般的活动恒星指的是存在耀发 (flare) 的主序星和亚巨星。而广义上讲，光谱型在 F-M 之间的恒星都存在活动性。例如，太阳也存在周期性的活动 (如黑子的 11 年周期，耀斑，日冕物质抛射等)。研究恒星的活动性对恒星演化、恒星辐射与行星的相互作用以及地外行星探测有重要价值^[1,2]。

在 X 射线波段，恒星的活动性可以由其 X 射线光度，或 X 射线与光学流量之比 (F_x/F_o) 表征^[1]。一般认为，活动恒星的 X 射线辐射与恒星表面磁场密切相关，而后者则起源于表面的较差自转和对流的双重作用引发的发电机效应。因此，统计上恒星的 X 射线光度 (L_x) 与自转角速度 Ω 和自转周期 P 存在下述关系^[1]：

$$L_x \propto \Omega^2 \propto P^{-2}$$

上述关系在 P 大于四天的时候存在，而当 $P < 4$ 天时，恒星的 X 射线光度一般不再变化。这一现象称为 X 射线饱和。其原因尚不清楚^[1]。

特别地，在密近双星中的恒星受到伴星潮汐力的影响，其自转周期逐渐减小，直至与公转周期一致。因此密近双星中的恒星更可能表现为活动恒星，其 X 射线特征与一般活动恒星相似^[3]。

II 活动恒星 X 射线波段研究现状

活动恒星的宁静态 X 射线辐射光度 (0.1-2keV) 在 10^{27-31} erg /s 之间，耀发态光度要高 1-2 个量级^[1,3,4]。典型辐射温度在 0.1-1keV 之间，属于软 X 射线波段。

对单个恒星来说，ASCA、Chandra ACIS、XMM-Newton MOS、Suzaku 等 X 射线卫星得到了太阳系近邻一些活动恒星的低分辨率 X 射线光谱，并由此对这些恒星的辐射温度、微分辐射量度 (differential emission measure, dEM) 分布进行了粗略研究。而高分辨率 X 射线光谱则主要由 Chandra HETG 和 XMM-Newton RGS 高分辨率光谱仪完成。在以往的十几年中，已经得到了太阳系近邻的数十颗活动恒星的高分辨率光谱^[3]，测量了 0.2-1.5keV 范围内的一些重要谱线，如 C，N，O，Ne，Mg 诸元素的类氢原子谱线 (共振线，互组谱线和禁线)，以及相应元素的类氢离子的莱曼 alpha 谱线强度，很好的限制了这些活动恒星宁静态和耀发态的温度、密度、dEM、金属丰度等参数的分布。由这些数据推测了其辐射区域的大小、耀发时密度变化的图像，并与太阳活动做了比较；发现了星冕中元素丰度与其第一电离能 (First Ionization potential, FIP) 之间的关系，即 FIP 与逆 FIP 效应^[5]；

统计上，基于 Chandra 和 XMM-Newton 对太阳系近邻活动恒星的高分辨光谱观测，得到了其特征辐射温度约为 0.1-1keV^[4]；基于不同年龄疏散星团的 X 射线观测，得到了 X 射线光度-恒星年龄的统计关系^[6]；并推测了活动恒星对银脊软、硬 X 射线辐射的贡献^[2]。

III 活动恒星 X 射线光谱研究存在的问题

1. 样本数目较少：

目前的观测包含了太阳系近邻的约 50 颗活动恒星 (其中单星约 30 颗，双星约 20 颗) 的 Chandra 或 XMM-Newton 的高分辨率光谱。这个样本数对于统计研究是不利的。举例来说，在太阳系 30pc 以内的 900 余颗 FGK 型恒星中^[7]，仅有 40

余颗被观测,难以研究恒星活动性与其质量、自转周期、年龄和金属丰度的关系;
难以对 FIP 效应/逆 FIP 效应进行统计以及建模。

2.样本不完备:

受探测器有效面积的限制,已观测恒星中的双星相对数目较多,单星较少;高光度的恒星多,低光度的恒星少。例如,太阳系近邻的 M 型矮星的数目最多,但仅有包括 Proxima Cen^[8]、CN Leo^[9]的几颗得以观测。对低光度、低质量恒星的观测还需要进一步完善,

3.耀发态的含时数据质量不佳:

耀发态恒星的辐射温度、密度和金属丰度会出现快速变化,而受探测器有效面积的限制,目前对恒星耀发整个过程中高分辨率的分析仅限于 Proxima Cen 等几个源^[8,9],其光谱质量不佳,得到的温度-密度结果误差较大,难以细致研究恒星耀发过程。

4.缺少对球状星团的观测

球状星团中包含了激变变星、活动恒星等 X 射线源,其中各类源对星团 X 射线辐射的相对贡献还未得到确认。对球状星团的观测并通过线辐射的比对,进一步量化活动恒星对银脊、球状星团和矮星系的软 X 射线辐射贡献。

IV 科学目标:

对活动恒星进一步的研究需要建立一个包含了不同光谱型、不同自转、年龄和金属丰度恒星的高分辨率 X 射线光谱库。需要得到更多恒星耀发时的含时光谱;需要对一些合适的球状星团进行高分辨光谱观测。

以上述光谱库为基础，可以进行以下研究：

- 1.对个体恒星，由 O，N，Ne 等元素发射线，进行温度-密度诊断。进而得到此恒星在宁静和（含时）耀发态时的温度、dEM、元素丰度、（逆）FIP 效应、活动区域面积等。参考和对比太阳相关观测，对耀发机制进行限制；
- 2.统计上，试图探究恒星宁静和耀发态温度、密度、谱线相对强度与恒星其他参数（质量，半径，自转，金属丰度，年龄、Lx、H alpha 谱线强度等）之间的统计关系，并做物理上的解释；对比球状星团与太阳系近邻恒星的发射线相对强度，限制后者对前者 X 射线辐射的贡献。

V 可行性

1.仪器工作波段与光谱分辨率

活动恒星典型温度为 0.1-1keV，其主要 X 射线辐射落在 HUBS 的工作能量区间中。

HUBS 光谱分辨率为 2eV，可以清晰地分辨 0.2-1.5keV 范围内的 C，N，O，Ne 元素的类氦原子和类氢原子谱线(谱线典型间距约 8eV)。

2.仪器观测效率

在 1keV 左右的有效面积约为 1000cm^2 ，为 Chandra HETG 的 10-50 倍，为 XMM RGS 的 10-20 倍；

活动恒星的典型 $L_x(0.1-2\text{keV}) \sim 1.0 \times 10^{27-31} \text{erg s}^{-1}$ ，可以取其中值 $1.0 \times 10^{29} \text{erg s}^{-1}$ ，假设此恒星位于 30pc (30pc 范围内有较完备的星表^[7])，则其 flux 约为 $1.0 \times 10^{-12} \text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2}$ ，考虑其典型温度为 0.6keV，由此可依据 Athena 探测器的文件推断光谱 (Athena 有效面积约为 HUBS 的十倍，需要的曝光时间需要做相应调整)，结果

如下：

1. HUBS 曝光时间在 100ks ,即可得到满足需求的、高信噪比的光谱 ;对于更近的恒星 ,曝光时间在 10-30ks 左右即可满足要求 (图 1);也就是说 ,如果需要得到 100 颗恒星的光谱 ,其总曝光时间需要约 $1.0\times 10^6\text{s}$,即约 11 天的总观测时间。

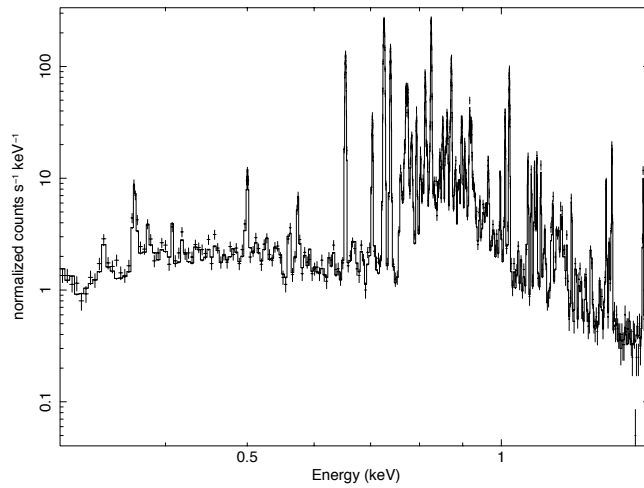


图 1 模拟的 HUBS 曝光 100ks 得到的光谱。模拟的源的光度为 $1.0\times 10^{29}\text{erg s}^{-1}$,距离为 30pc ,假设了温度为 0.6keV 的 apec 模型 ,金属丰度取太阳丰度。

- 2.对 M 型活动恒星 ,可由光度较低的 Proxima Cen 的 XMM 观测 ,推测其耀发态光谱 (phaseB ,曝光时间约 $800\text{s}^{[8]}$)。可见 ,HUBS 比 XMM-Newton RGS 相比 ,可以在同样曝光时间内 ,清晰地分辨各发射线 (参见图 2)。由于 HUBS 有效面积较大 ,可以预测 ,在 3-5pc 以内的 dM 型星的耀发态含时光谱均可达到较好的信噪比。

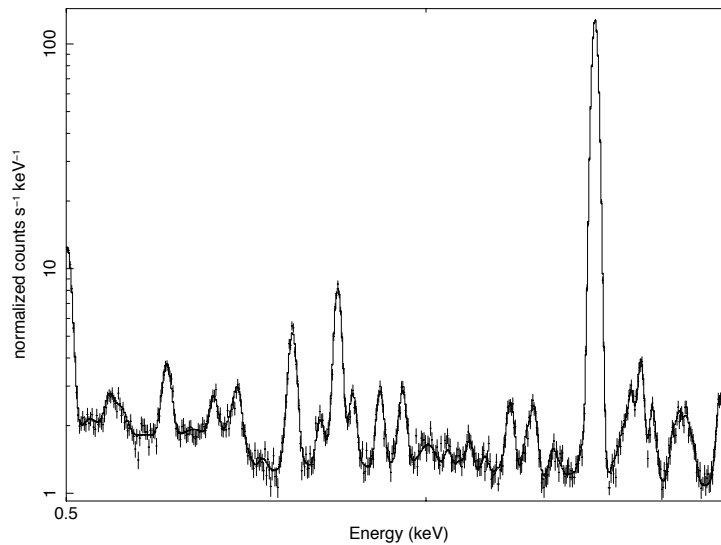


图 2 模拟的 Proxima Cen 在耀发态时，由 HUBS 曝光 800s 获得的 0.5-0.7keV 光谱。其中十字点和线分别为模拟的数据和拟合模型。

总结

HUBS 具有的较大的有效面积和良好的 X 射线光谱分辨率十分适应对太阳系近邻的活动恒星进行高分辨率软 X 射线光谱观测。对活动恒星的光谱的统计性质、太阳系近邻 dM 型活动恒星耀发态演化具有重要意义。

参考文献

- [1]Güdel, M., & Naze, Y, 2009, A&Arv, 17, 309
- [2]Masui, K., Mitsuda, K., Yamasaki, N, et al., 2009, PASJ, 61, 115
- [3]Testa, P., Drake, J., & Peres, G., 2004, ApJ, 617, 508
- [4]Johnstone, C. P. & Güdel, M. 2015, A&A, 578, 129
- [5]Nordon, R., & Behar, E., 2008, A&A, 482, 639

- [6]Núñez, A., & Agüeros, M., 2016, ApJ, 830, 44
- [7]Hinkel, N., Mamajek, E., Turnbull, M. et al., 2017, ApJ, 848, 34
- [8]Güdel, M., Audard, M., Reale, F., Skinner, S. L., & Linsky, J. L., 2004, A&A, 416, 713
- [9]Liefke, C., B. Fuhrmeister, B., & Schmitt, M., 2010 , A&A, 514, A94