

恒星活动性与宜居性的多波段研究

王松

合作者：韩恒赓、李雪、丁玥丹、张世迪、河林、刘继峰等

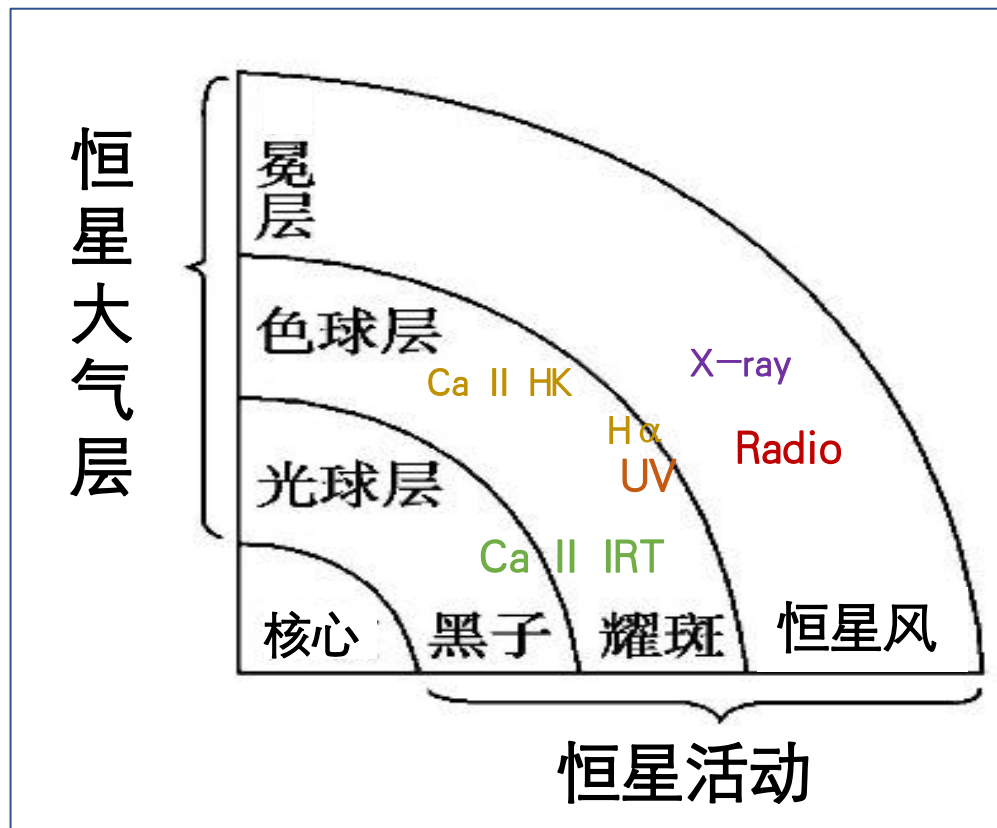
2025.5.28 国家天文台

报告内容

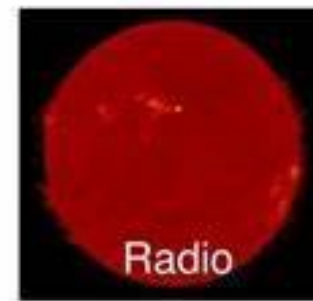
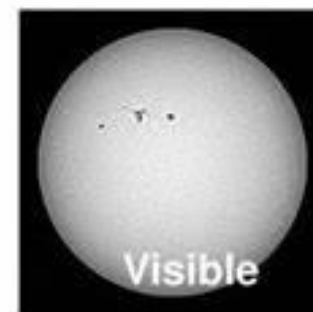
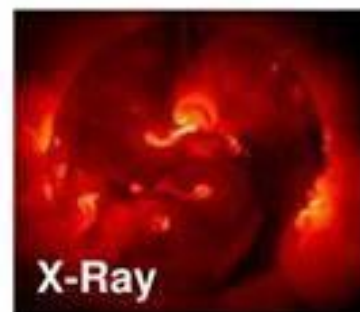
- ❖ 研究背景和意义
- ❖ 系列作品介绍
- ❖ 小结

研究背景

恒星活动性：恒星大气层中由于磁场演化驱动的一系列动态现象。

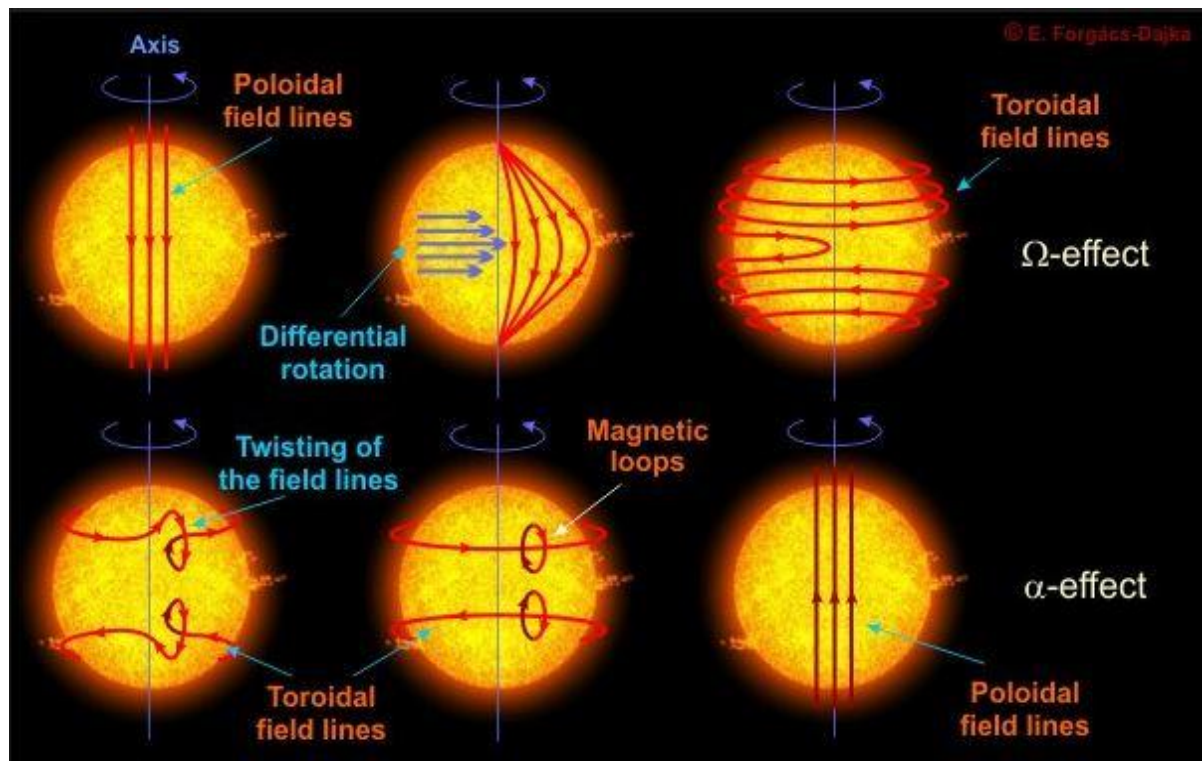


The Multi-Wavelength Sun

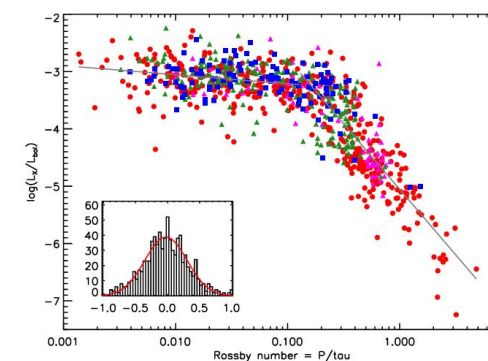
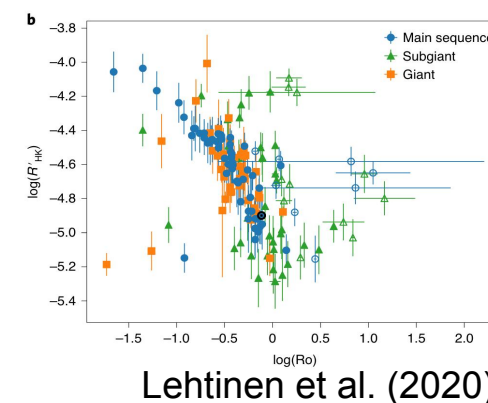
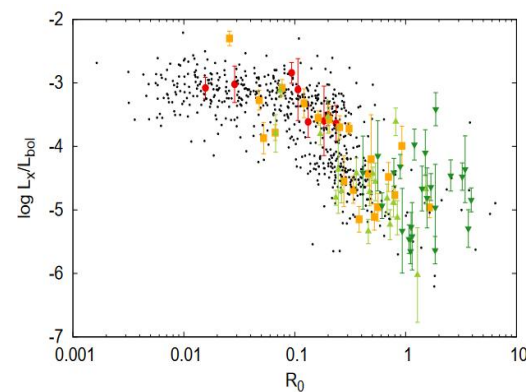
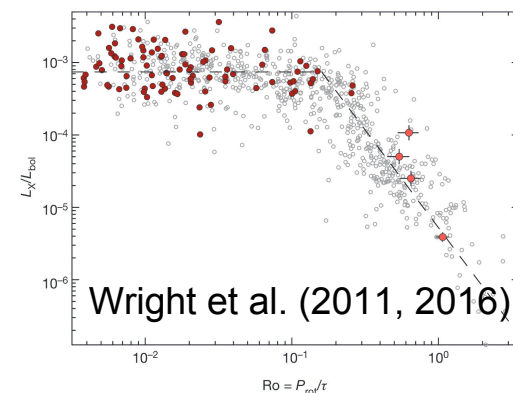


研究意义

➤ 1. 理解恒星内部结构和磁发电机机制



Credit: E. F. Dajka



研究意义

➤ 2. 理解恒星演化（回转年代学）

❖ Skumanich (1972) 提出“Skumanich 定律”

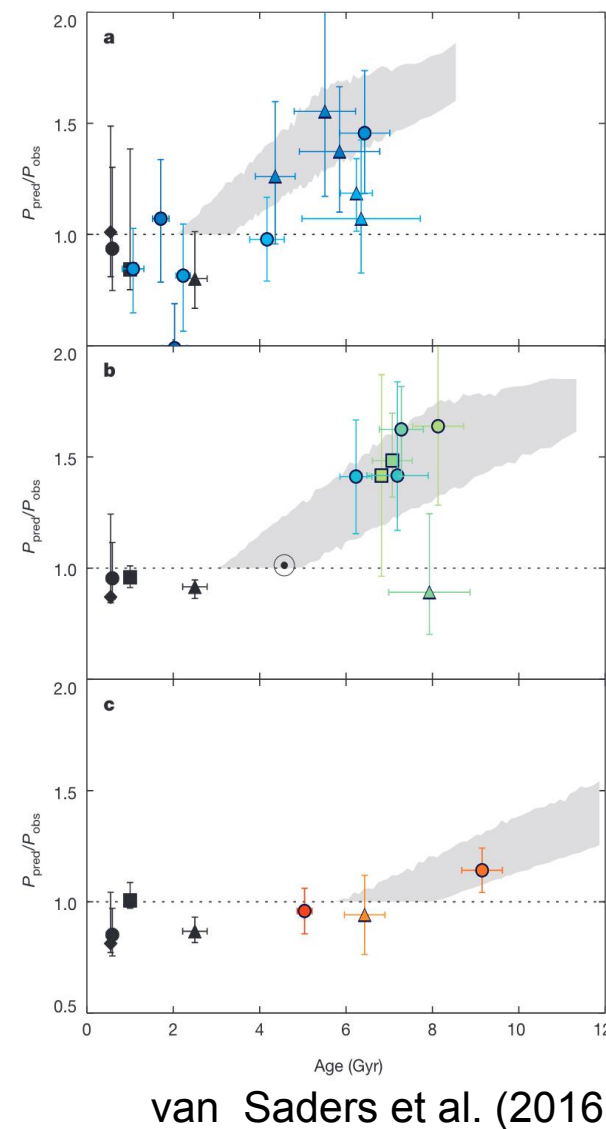
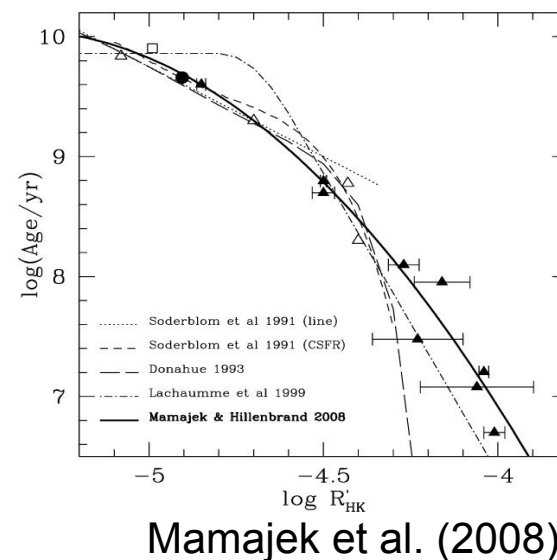
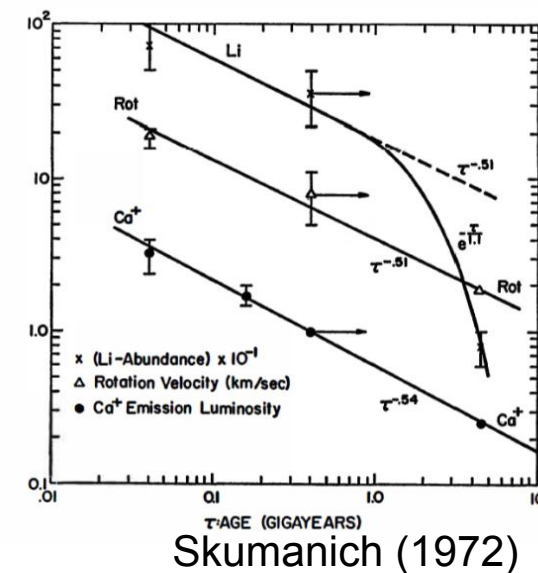
$$v_{\text{rot}} \propto t^{-1/2}, \quad \text{Ca}^+ \propto t^{-1/2}, \quad \text{Li-Abundance} \propto t^{-1/2}$$

❖ Barnes (2007) 给出回转年代学公式

$$P = f(B - V).g(t) = a x^b t^n$$

❖ van Saders (2016) 认为回转年代学对于老年恒星（大于约3Gyr）阶段可能不再适用

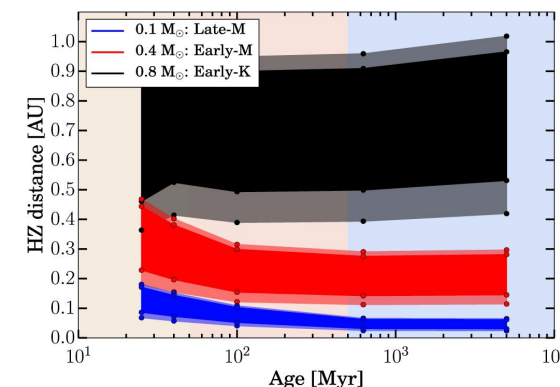
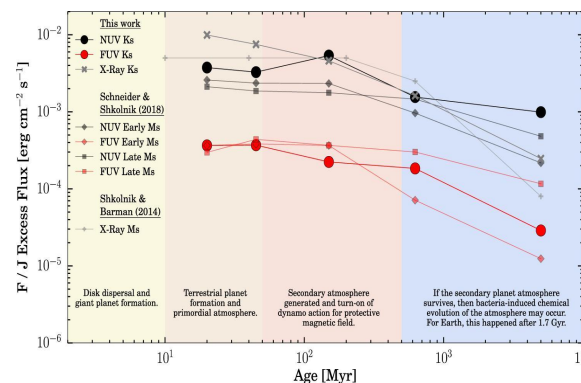
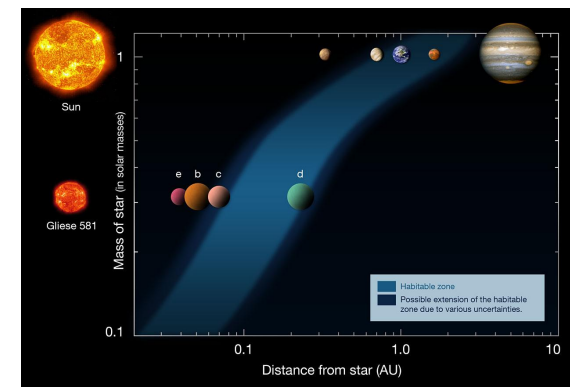
❖ 磁制动减弱 or 核和包层的耦合 (Spada+2020)?



研究意义

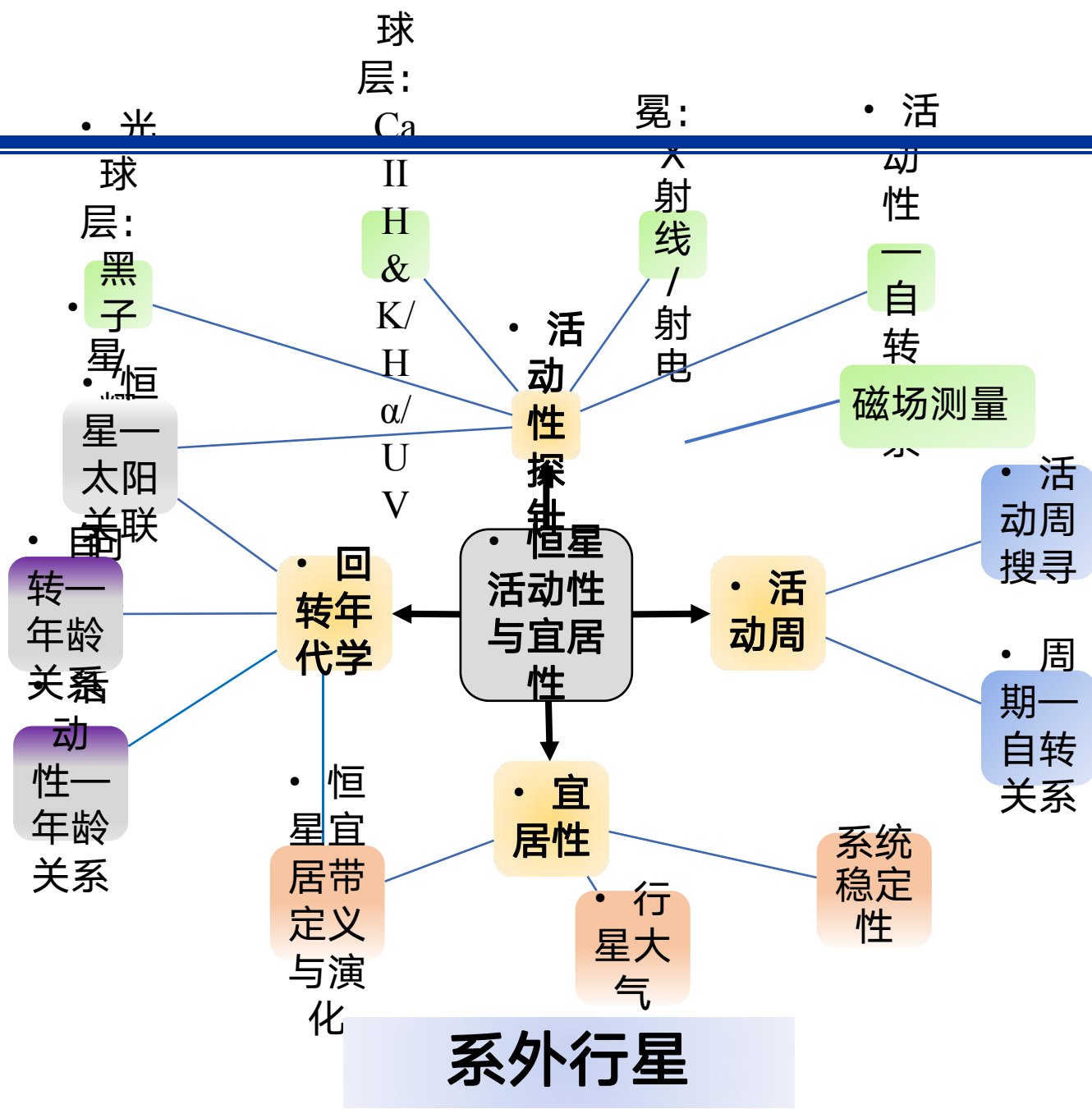
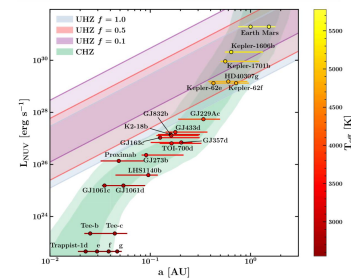
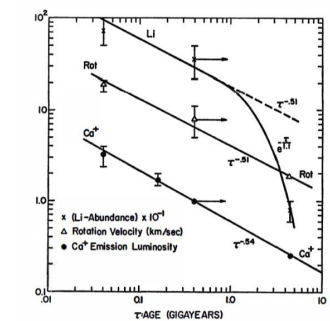
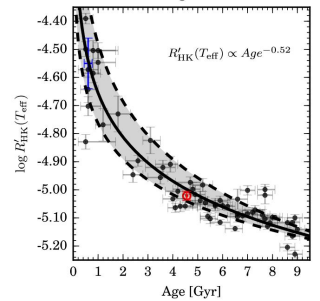
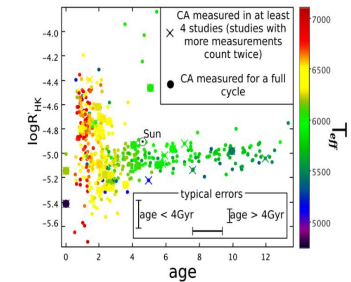
➤ 3. 理解系外行星宜居性

- 行星宜居性：衡量行星是否具备支持生命存在与演化条件的指标。
- 活动性影响宜居性因素：高能辐射(X射线、EUV)、耀发、恒星风
 - 大气逃逸、剥离（特别是小质量行星）
 - 化学破坏：破坏关键生命化合物的形成
- 宜居带
 - 液态水宜居带 (Kopparapu 2013)。内边界：失控温室效应；外边界：二氧化碳冷凝
 - 紫外宜居带 (Spinelli 2023)。适度紫外光促进生化反应；过量紫外辐射可破坏RNA

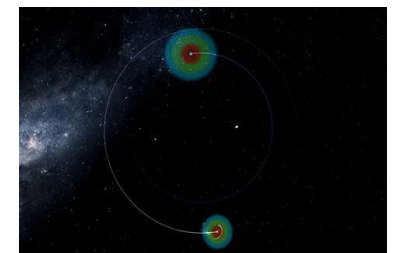
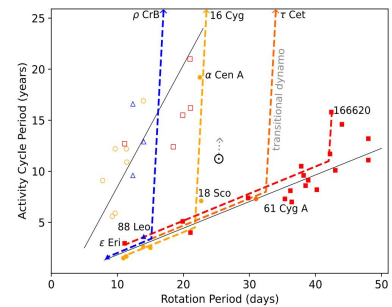
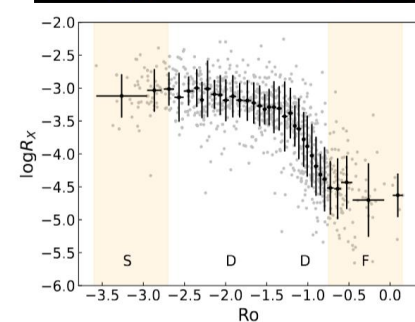
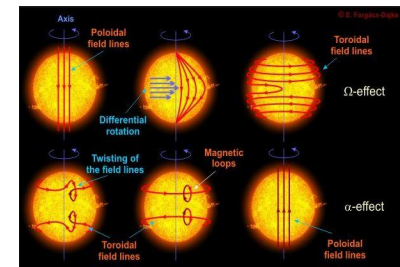


Richey-Yowell et al.
(2019)

研究意义

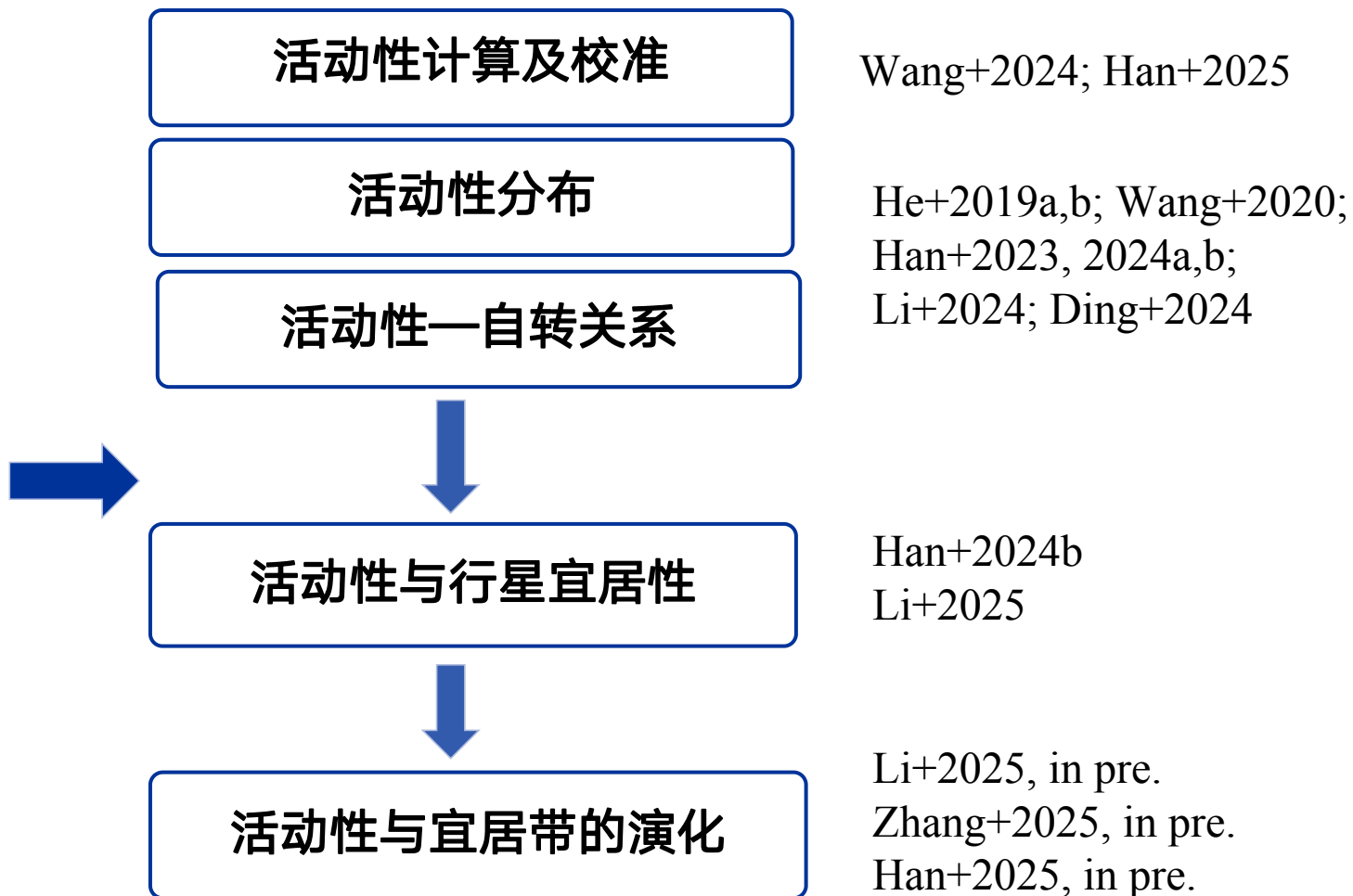


恒星结构与发电机制



系列工作

- 以X射线、光谱发射线、紫外辐射、耀发等为探针，研究不同类型恒星活动性分布，重构活动性—自转关系；
- 通过X射线和紫外辐射研究系外行星宜居性
- 结合疏散星团、场星，在百万年到百亿年的尺度上研究恒星自转、活动性的演化（回转年代学）及宜居带的演化



系列工作

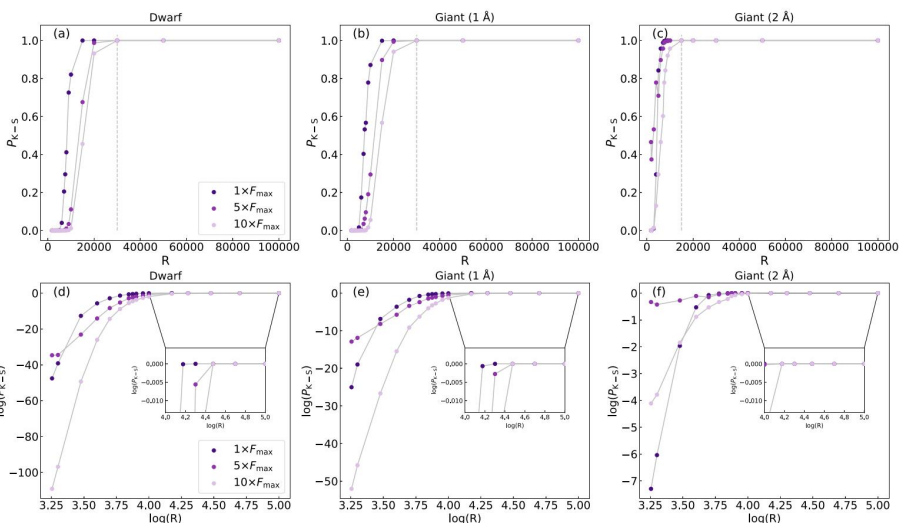
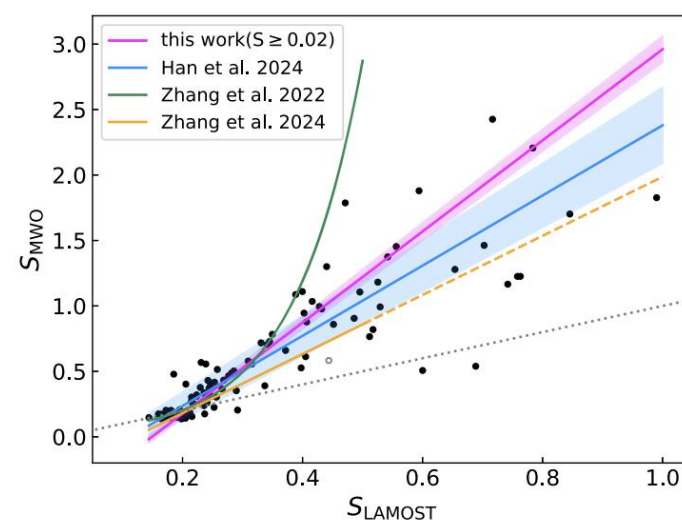
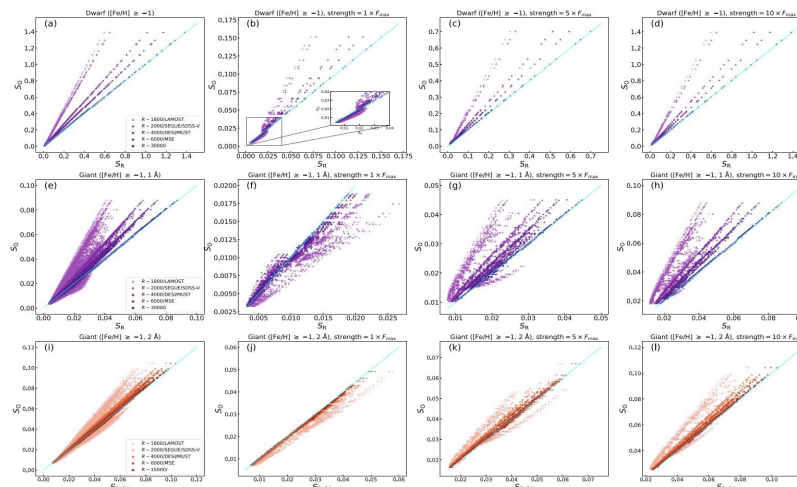
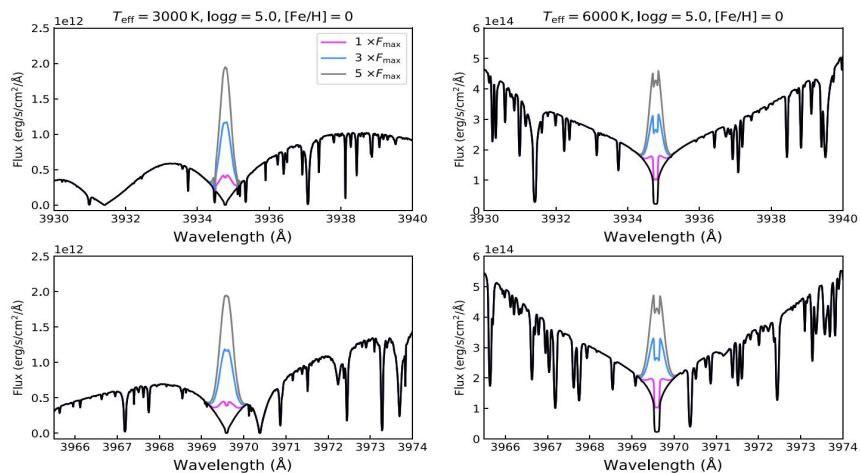
- 以X射线、光谱发射线、紫外辐射、耀发等为探针，研究不同类型恒星活动性分布，重构活动性—自转关系；
- 通过X射线和紫外辐射研究系外行星宜居性
- 结合疏散星团、场星，在百万年到百亿年的尺度上研究恒星自转、活动性的演化（回转年代学）及宜居带的演化



结果1：校准光谱分辨率对CaII H&K的影响

□基于PHOENIX模型，加上不同的辐射强度，给出光谱分辨率对CaII H&K影响的校准公式

Han, Wang*+2025

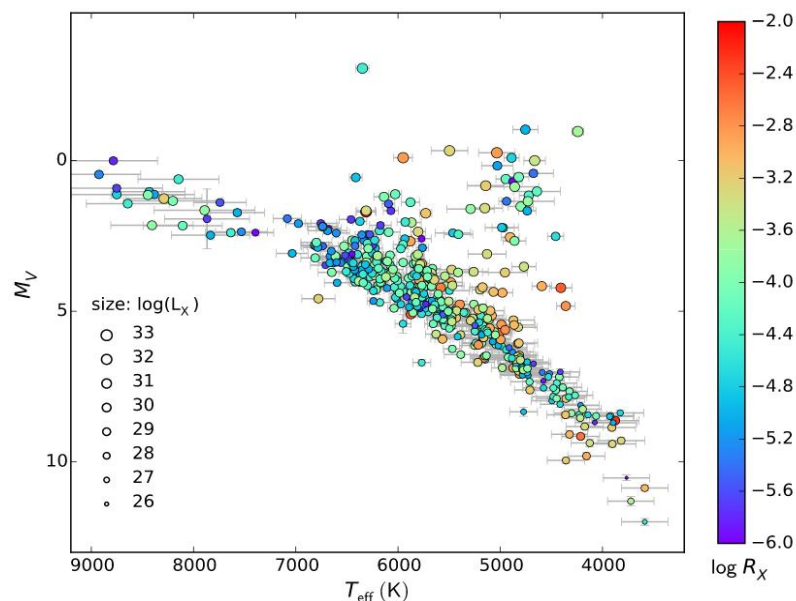
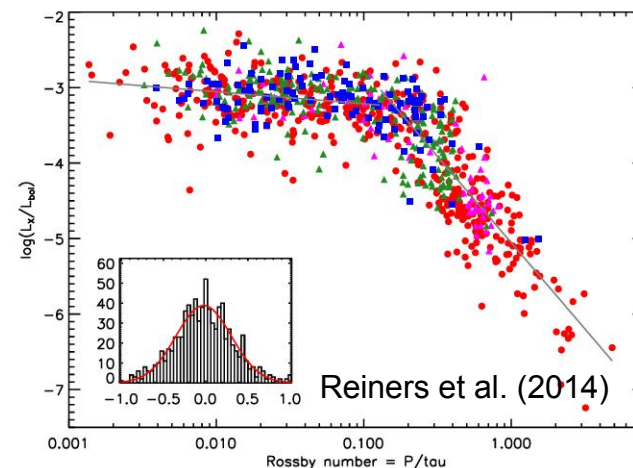


Type	Resolution	Activity Level	Stellar Type	k	b	k'	b'
Dwarf (1 Å)	1800	All	All	2.37	-0.021	49.218 ± 1.221	-0.415 ± 0.012
...	...	$S_R \geq 0.02$	All	2.413	-0.026	50.111 ± 1.243	-0.519 ± 0.014
...	...	$S_R < 0.02$	All	1.461	-0.005	30.341 ± 0.753	-0.083 ± 0.006
...	...	...	F	1.81	-0.014	37.588 ± 0.932	-0.27 ± 0.009
...	...	...	G	1.973	-0.015	40.973 ± 1.016	-0.291 ± 0.009
...	...	...	K	1.695	-0.007	35.2 ± 0.873	-0.125 ± 0.006
...	...	...	M	1.524	-0.006	31.649 ± 0.785	-0.104 ± 0.006
...	2000	All	All	2.166	-0.018	44.981 ± 1.116	-0.353 ± 0.01
...	...	$S_R \geq 0.02$	All	2.196	-0.021	45.604 ± 1.131	-0.415 ± 0.012
...	...	$S_R < 0.02$	All	1.435	-0.005	29.801 ± 0.739	-0.083 ± 0.006
...	...	...	F	1.758	-0.013	36.508 ± 0.905	-0.249 ± 0.008
...	...	...	G	1.861	-0.013	38.647 ± 0.958	-0.249 ± 0.008
...	...	...	K	1.634	-0.006	33.933 ± 0.841	-0.104 ± 0.006
...	...	...	M	1.477	-0.005	30.673 ± 0.761	-0.083 ± 0.006
...	4000	All	All	1.381	-0.005	28.679 ± 0.711	-0.083 ± 0.006
...	6000	All	All	1.192	-0.002	24.754 ± 0.614	-0.021 ± 0.005

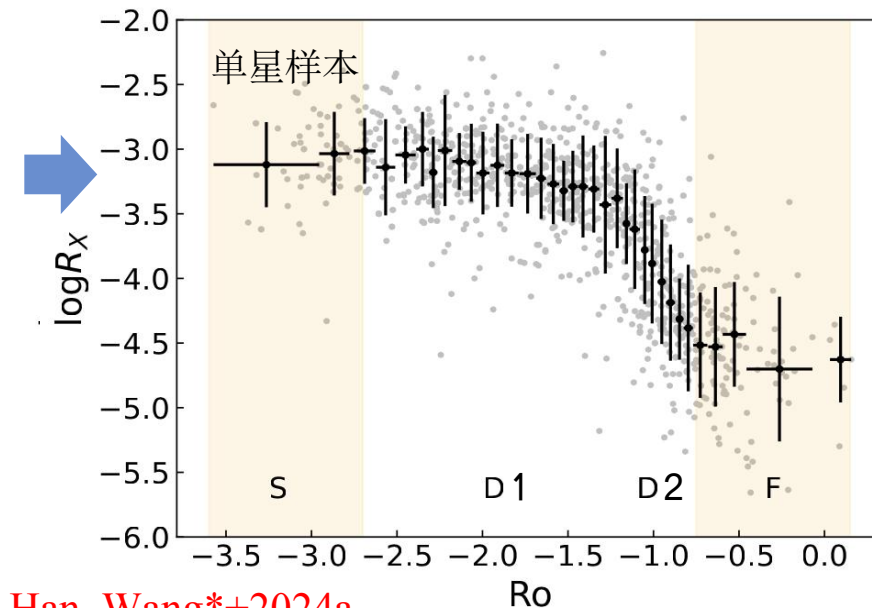
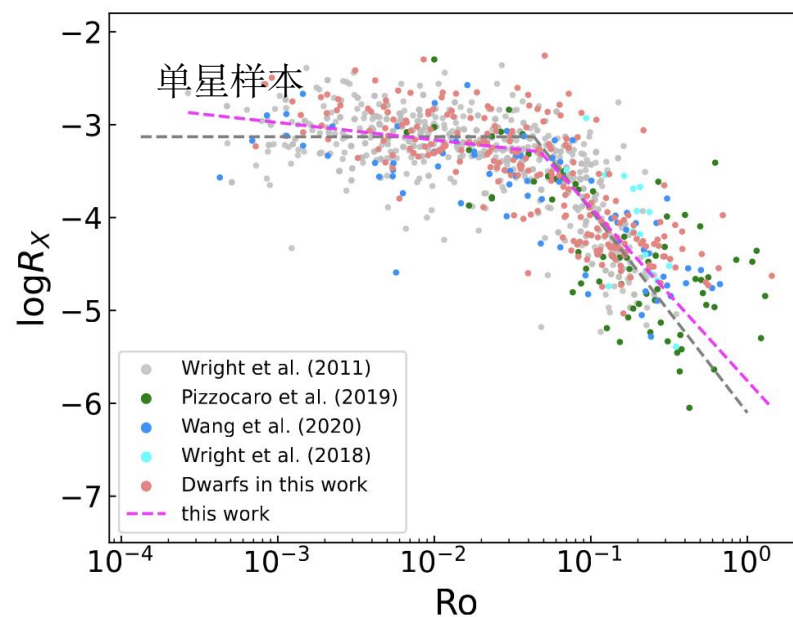
结果2: SD²F活动性—自转关系

□ X射线（冕）活动性—自转关系整体可分为SD²F四段：

- 经典的饱和和非饱和区应改变为弱下降区(D1)和快下降区(D2)，由两个幂率函数描述
- 在自转极快区域(S)，活动性有所下降，表现出过饱和现象
- 在自转极慢区域(F)，活动性降低的趋势放缓



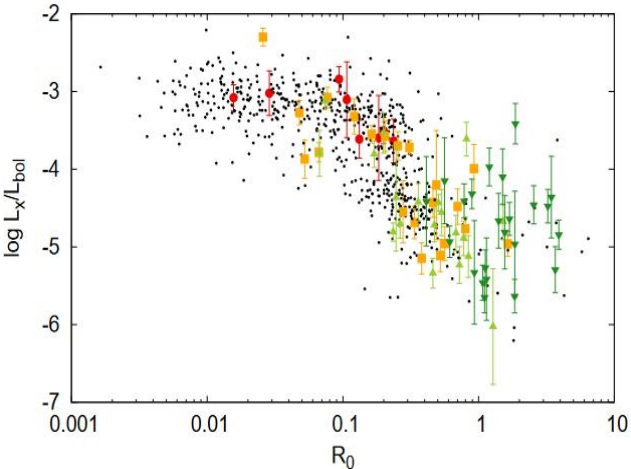
He, Wang*+2019a



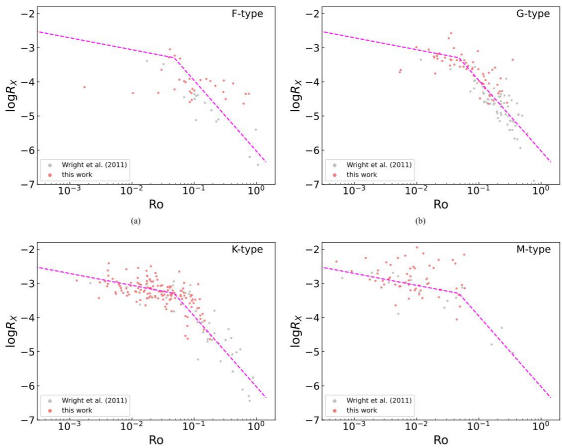
Han, Wang*+2024a

结果3： 活动性—自转关系随恒星温度变化

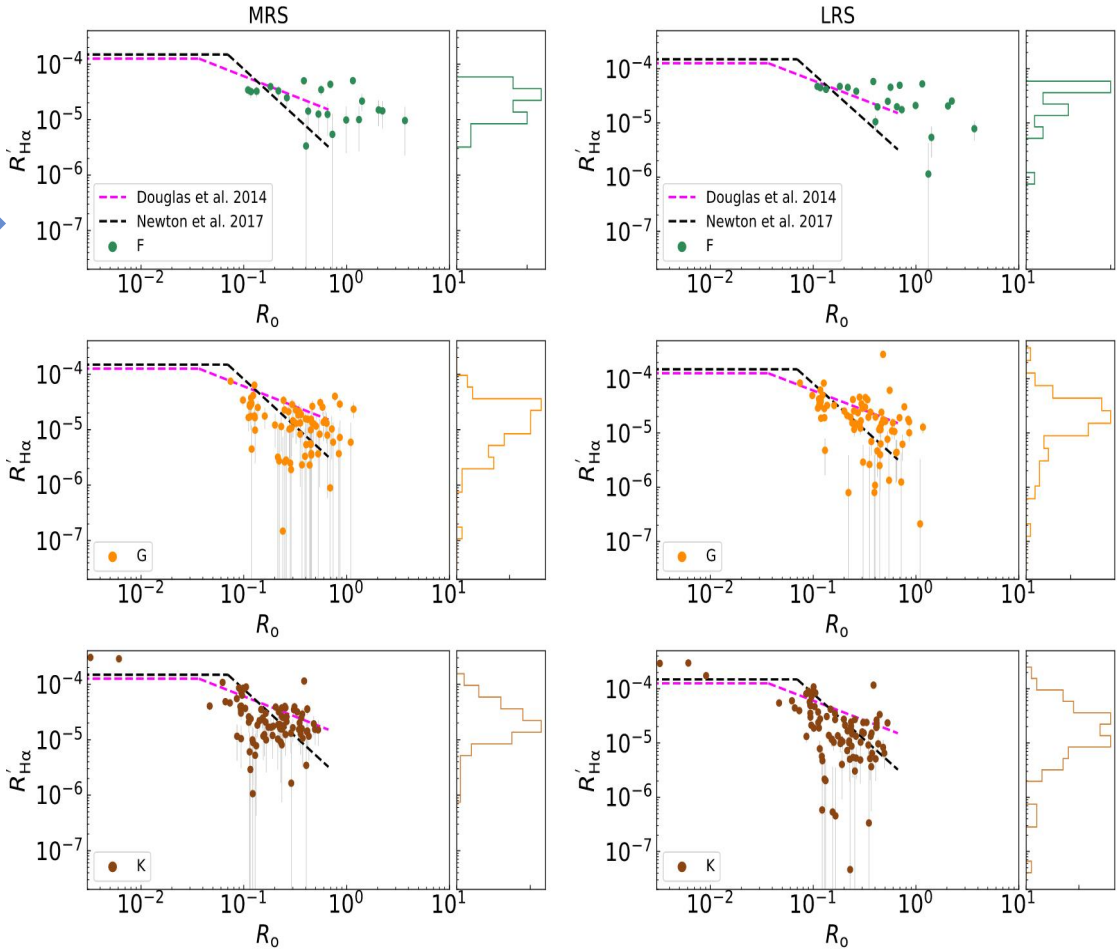
- 在活动性—自转关系的非饱和区域，发现无法简单用一个幂律关系描述（与经典认知不符）。
- 斜率随温度升高而变小，说明了不同类型的恒星在活动性—自转关系的非饱和区的发电机机制存在差异。



Pizzocaro et al. (2019)



Han, Wang*+2024a

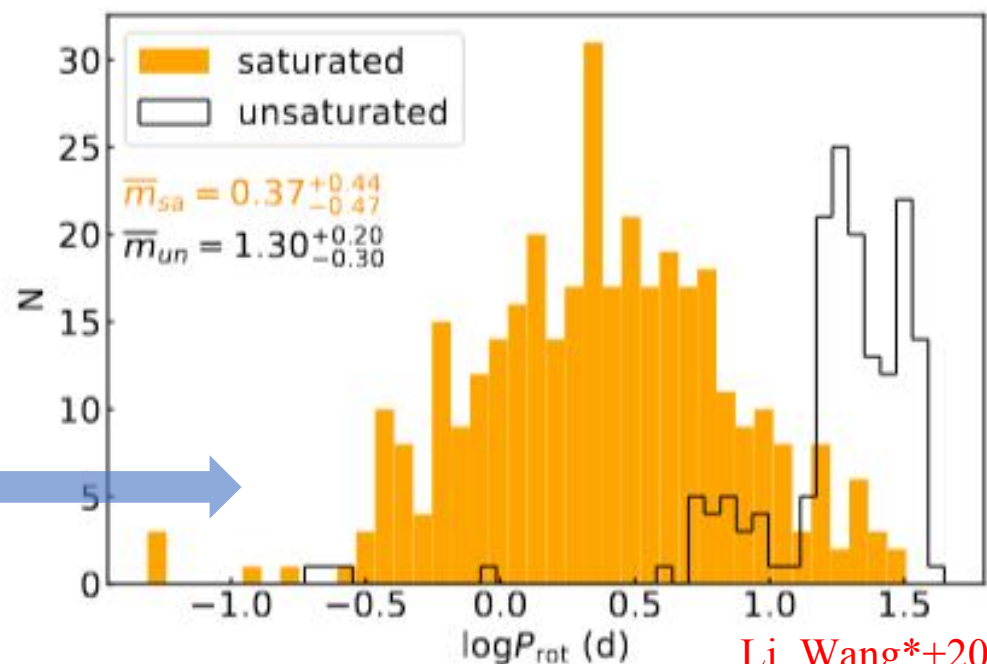
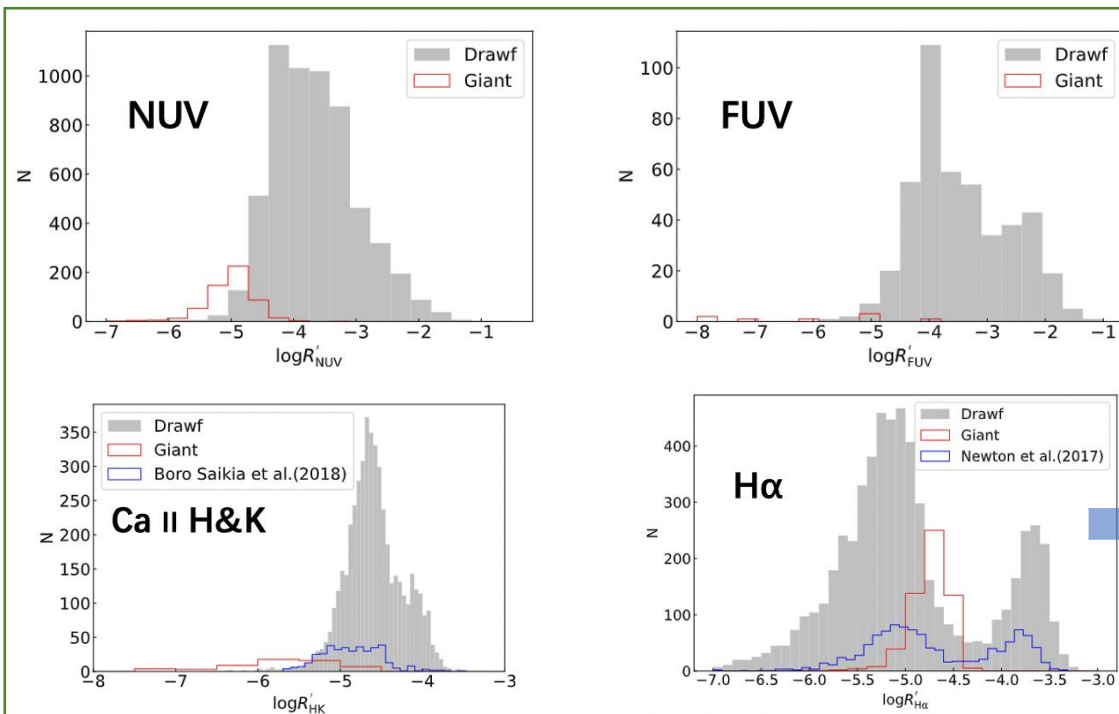
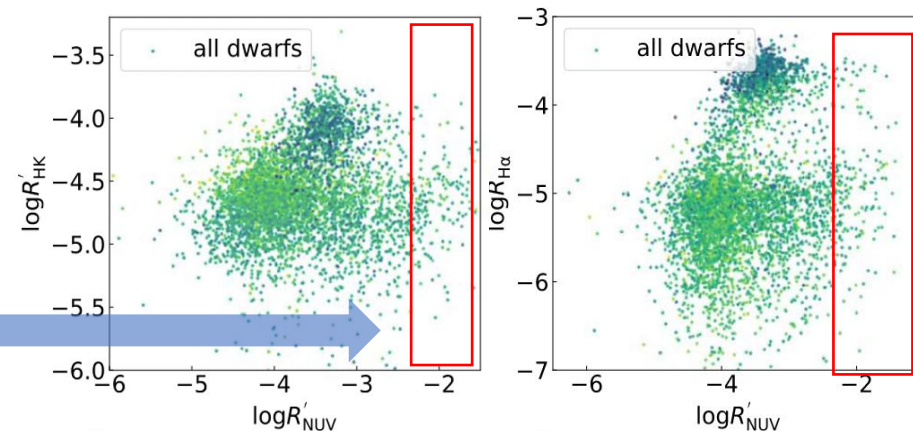


不同类型恒星的活动性—自转关系图（左图：LAMOST中分；右图：LAMOST低分）

Han, Wang*+2023

结果4：M恒星色球活动的两个特殊表现

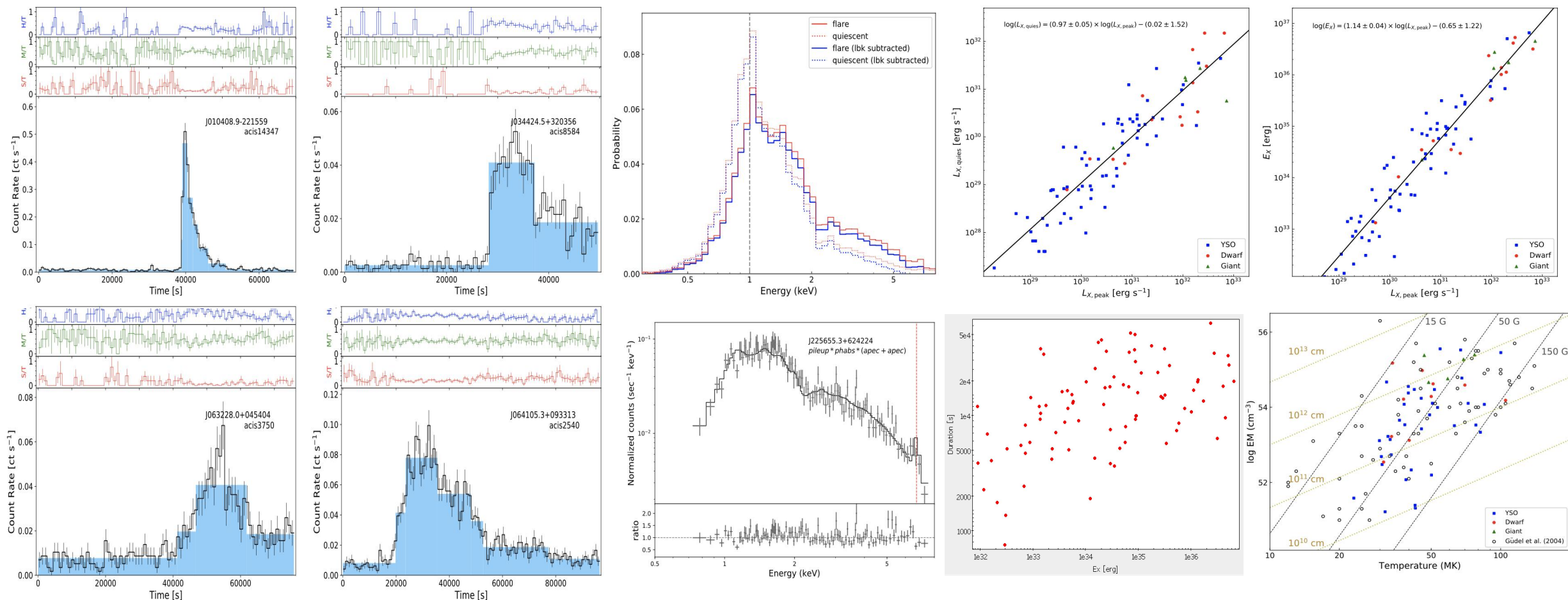
- 在M恒星色球层活动指数中，观察到类似于V-P间隙的双峰特征，表明恒星活动群体正经历着从饱和状态向非饱和状态的快速过渡 (Newton 2017)
- 发现了一组远超过饱和状态($\log R'_{\text{NUV}} > -2.5$)，具有极高紫外线活动的恒星，但色球活动较低，原因尚不清楚（小质量白矮星伴星？）



Li, Wang*+2024a

结果5: 恒星X射线耀发探测

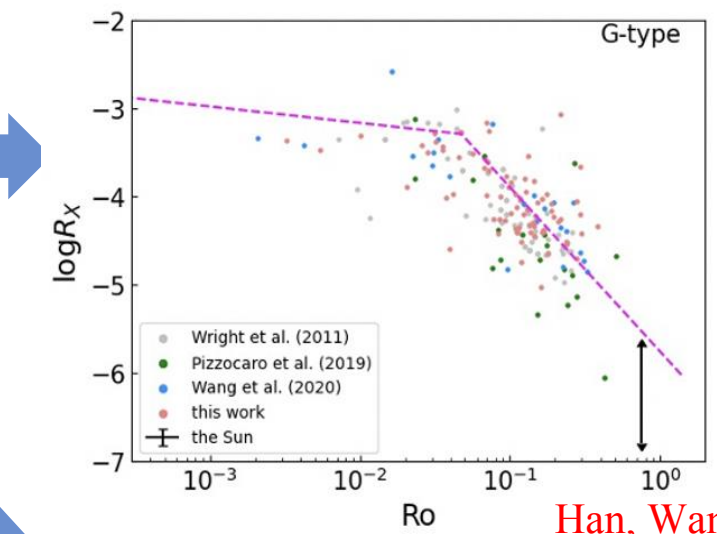
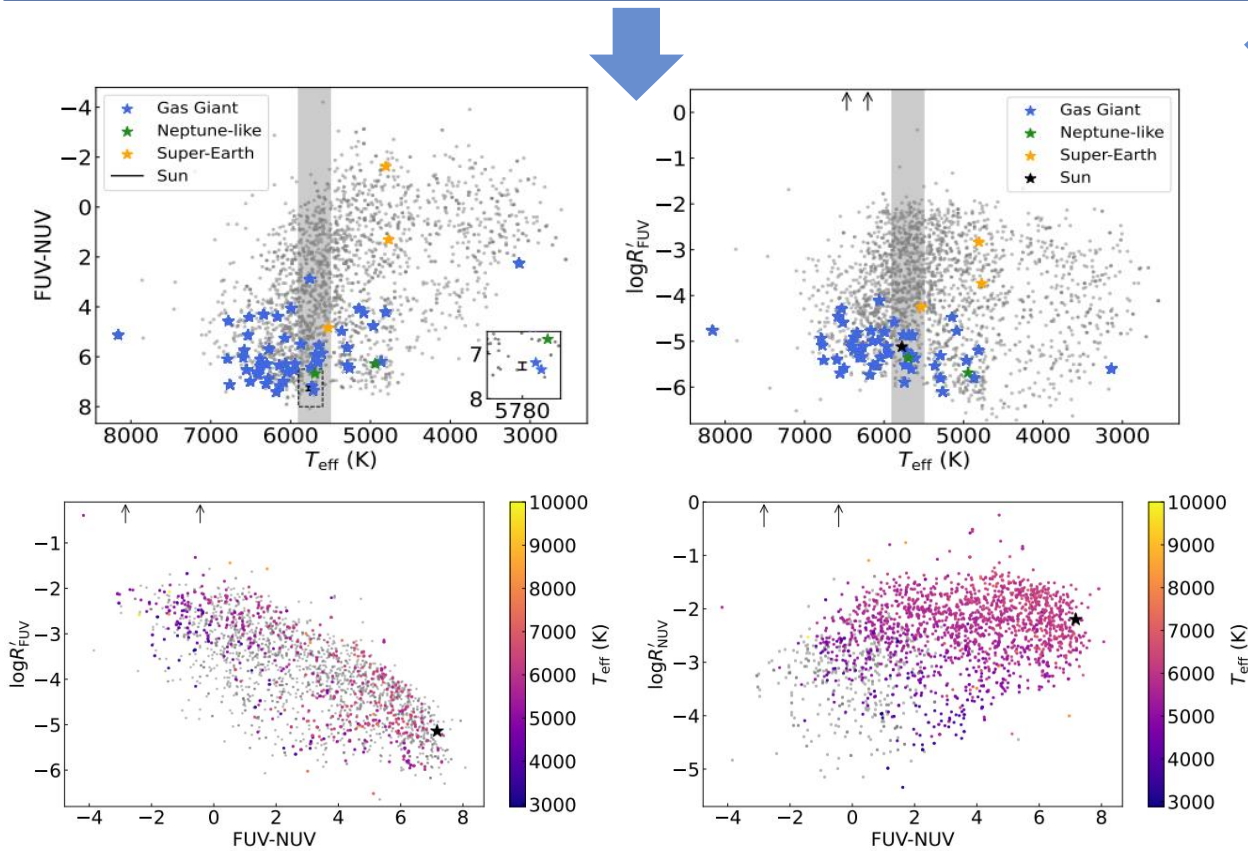
□ ~5000 Chandra ✕ LAMOST stars: 250 possible flares; 50 flares can do spectral fitting



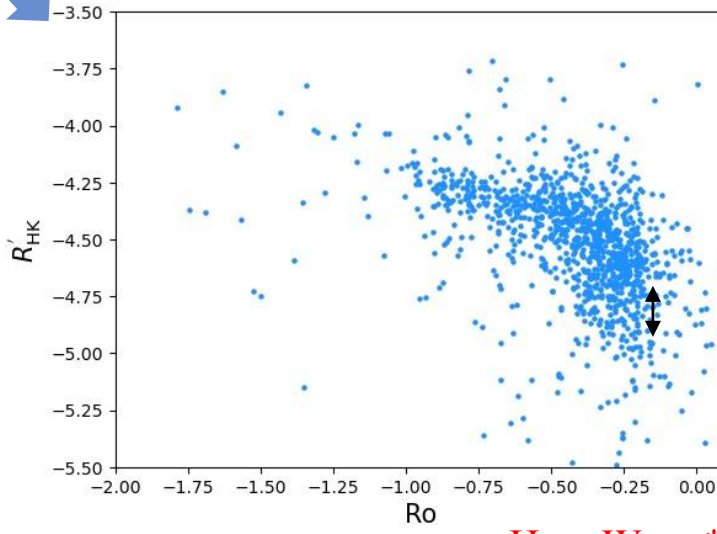
Wang+2020

结果6:太阳与G型星活动性比较

☐ 太阳在G型星中表现出极低的X射线（冕）活动性、很低远紫外辐射、较弱的色球层活动性、中等近紫外辐射



Han, Wang*+2024a



Han, Wang*+2025, in pre.

Li, Wang*+2024b

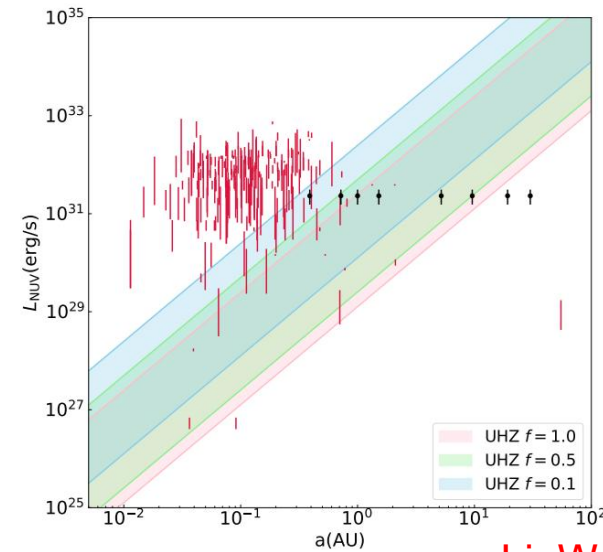
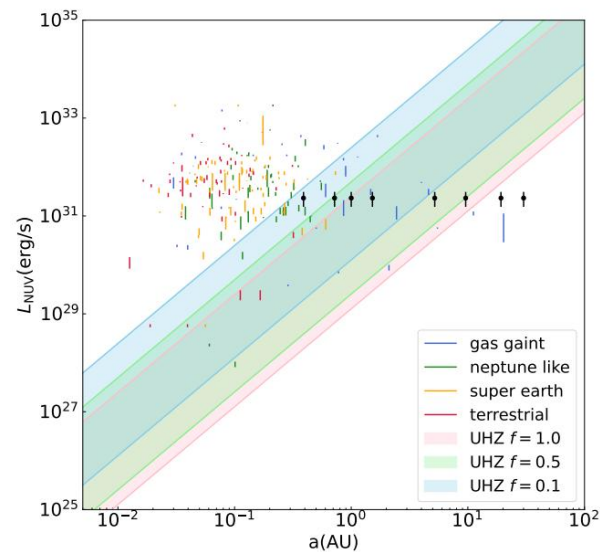
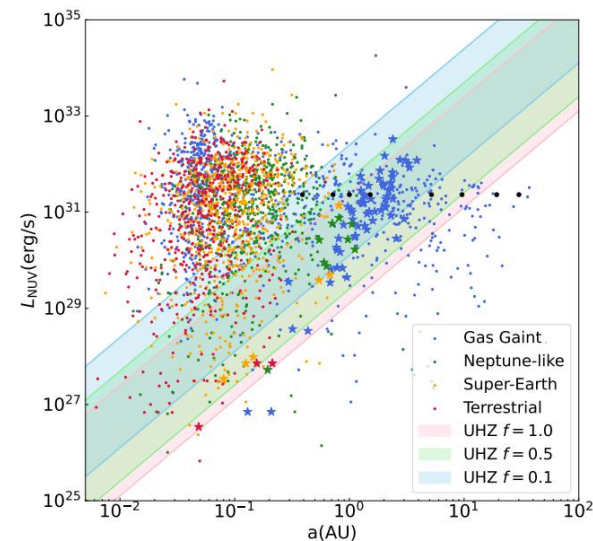
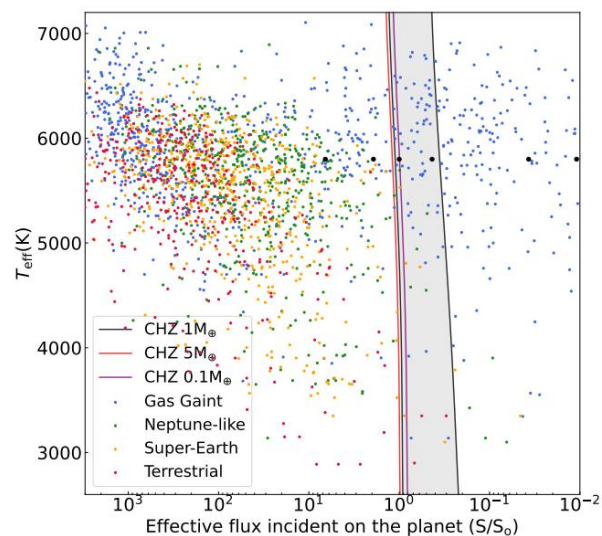
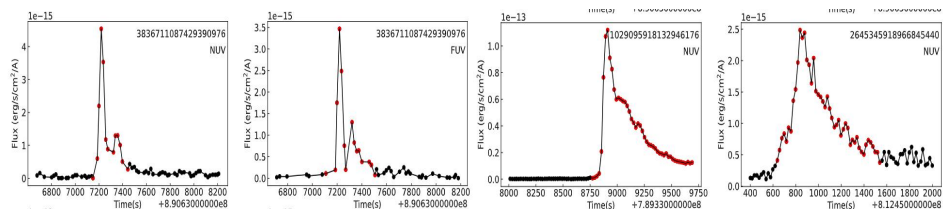
系列工作

- 以X射线、光谱发射线、紫外辐射、耀发等为探针，研究不同类型恒星活动性分布，重构活动性—自转关系；
- 通过X射线和紫外辐射研究系外行星宜居性
- 结合疏散星团、场星，在百万年到百亿年的尺度上研究恒星自转、活动性的演化（回转年代学）及宜居带的演化



结果7:系外行星紫外宜居性

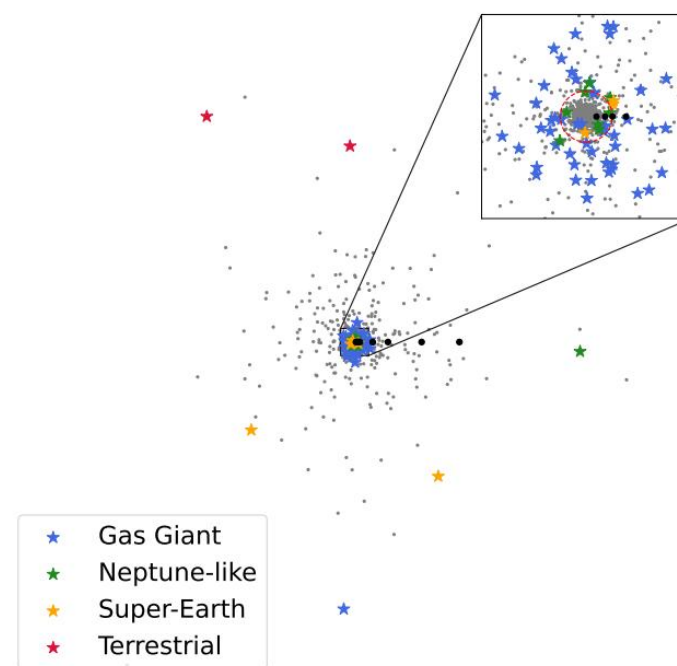
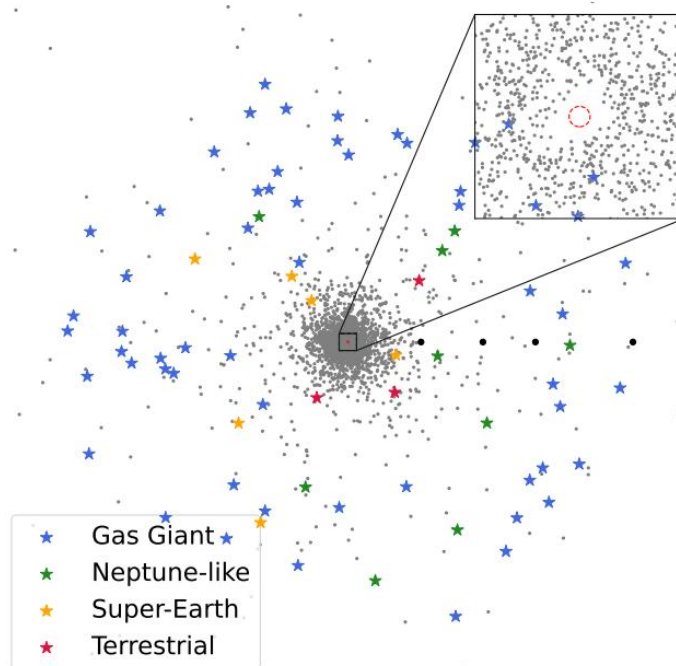
- 对2700余颗存在系外行星的恒星进行紫外测光，评估了约3700颗行星的宜居性。
- 只有不到100颗行星同时位于水和紫外宜居带 (CHZ/UHZ) :
 - 63 颗气态巨行星
 - 9 颗海王星类行星
 - 6 颗超级地球
 - 3 颗类地行星
- 宿主恒星的长时标紫外辐射的变化对其行星的紫外宜居性影响较小
- 探测到157次NUV flare, 若不频繁发生, 对 UHZ 的整体影响较小。



Li, Wang*+2025

结果7:系外行星紫外宜居性

- ❑ 宿主恒星演化到红巨星阶段，大多数行星会被吞噬，**仅有约 15% 的行星可能得以幸存**
- ❑ 同时位于CHZ和UHZ的行星则大多可以存活下来。
- MIST EEP
- 没有考虑行星迁移等因素

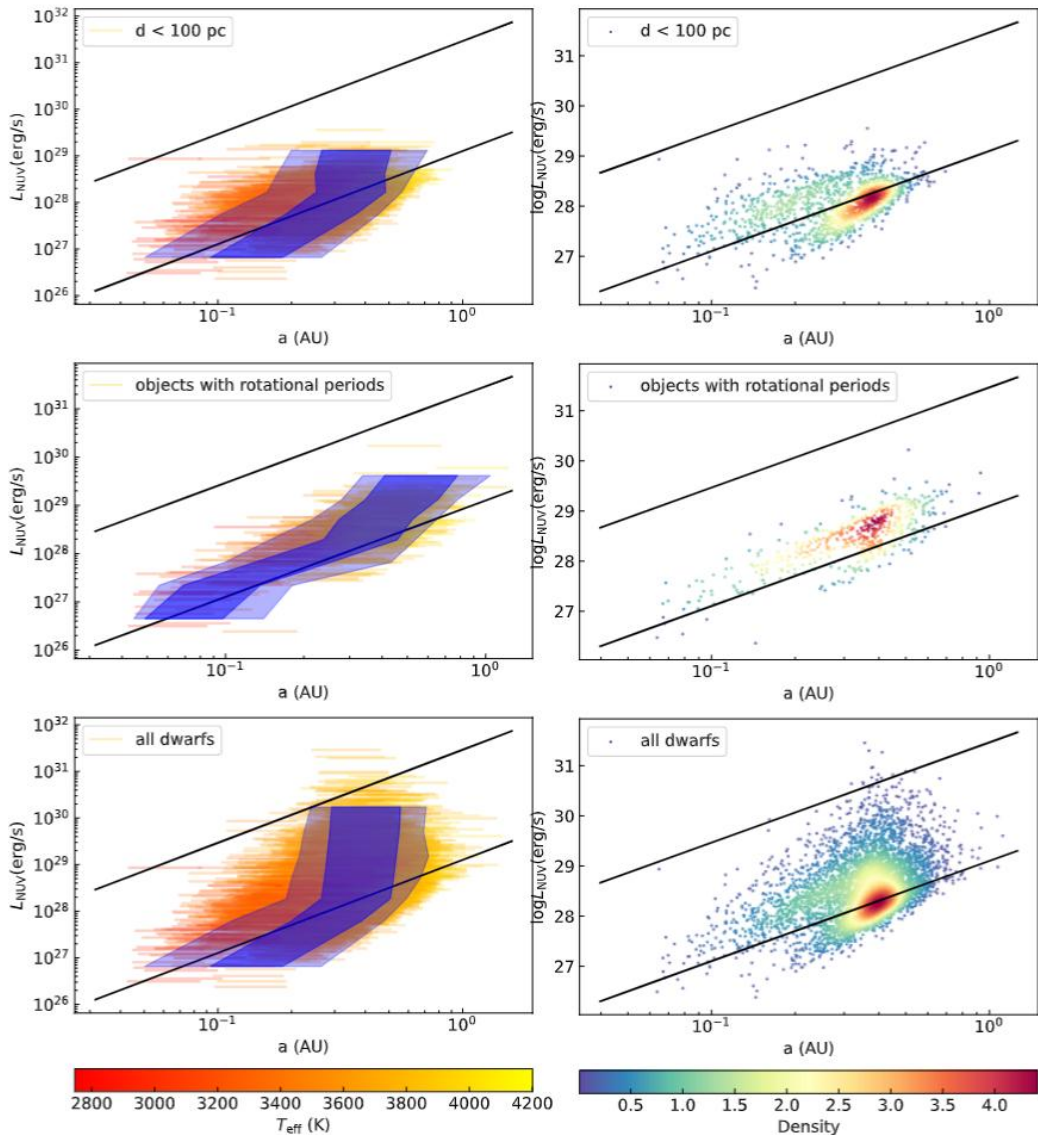


宿主恒星演化到红巨星时，行星到恒星距离与恒星半径的比较。距离通过除以恒星半径进行了缩放，所有恒星半径均归一化为太阳半径。

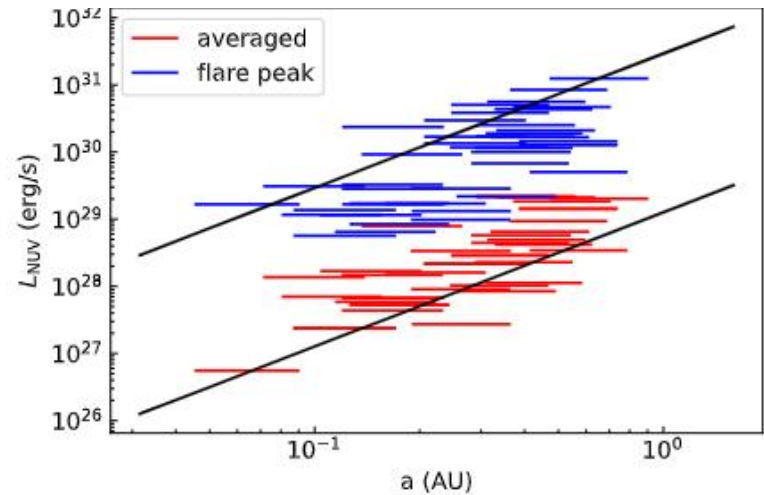
Li, Wang*+2025

结果8:M恒星紫外宜居带

- 针对大样本M恒星紫外辐射进行研究，发现大约40%的M型恒星周围的行星可能宜居
- 偶发耀斑带来的光变对宜居带变化影响较小



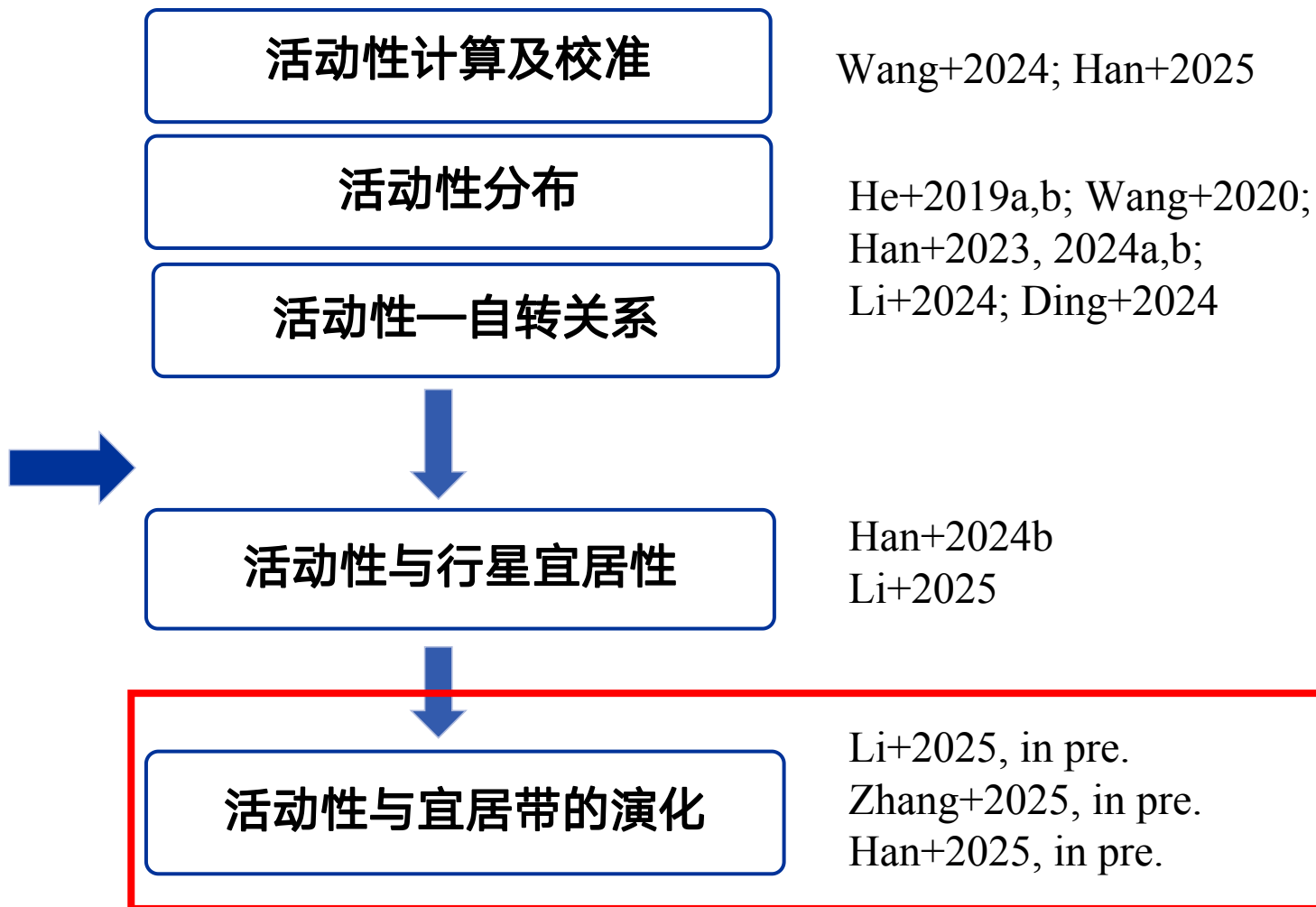
Sample	N	P ₁	P ₂	P ₃
< 100 pc	1624	83%	44%	25%
Periodic	567	97%	83%	64%
Total dwarfs	5849	93%	68%	51%



Li, Wang*+2024

系列工作

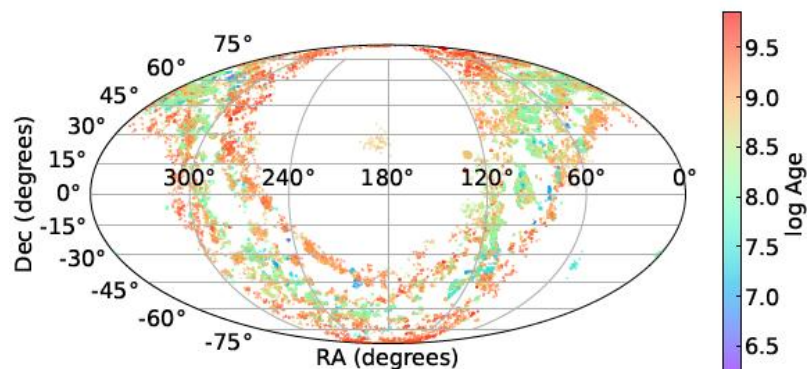
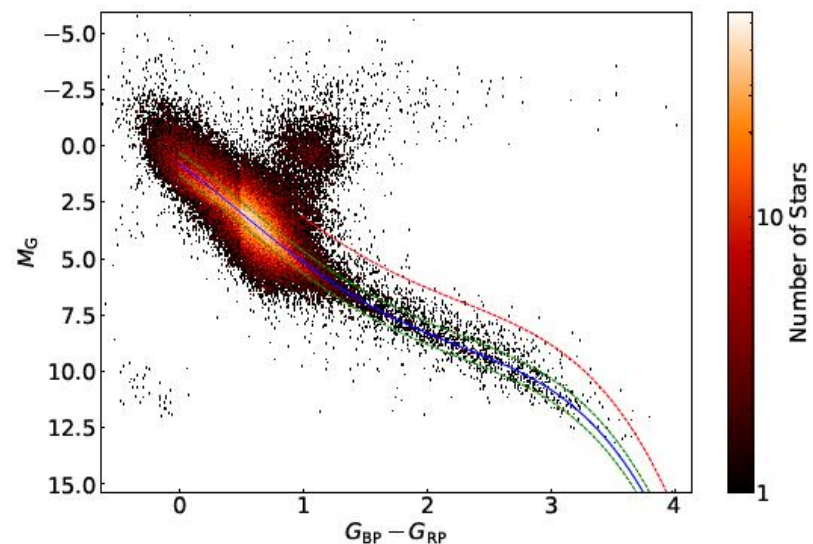
- 以X射线、光谱发射线、紫外辐射、耀发等为探针，研究不同类型恒星活动性分布，重构活动性—自转关系；
- 通过X射线和紫外辐射研究系外行星宜居性
- 结合疏散星团、场星，在百万年到百亿年的尺度上研究恒星自转、活动性的演化（回转年代学）及宜居带的演化



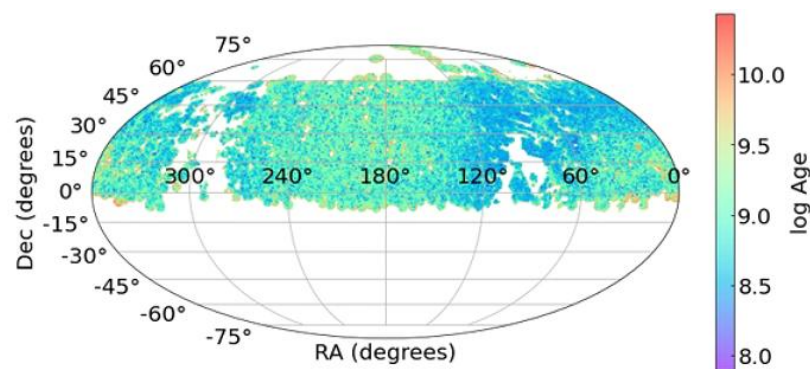
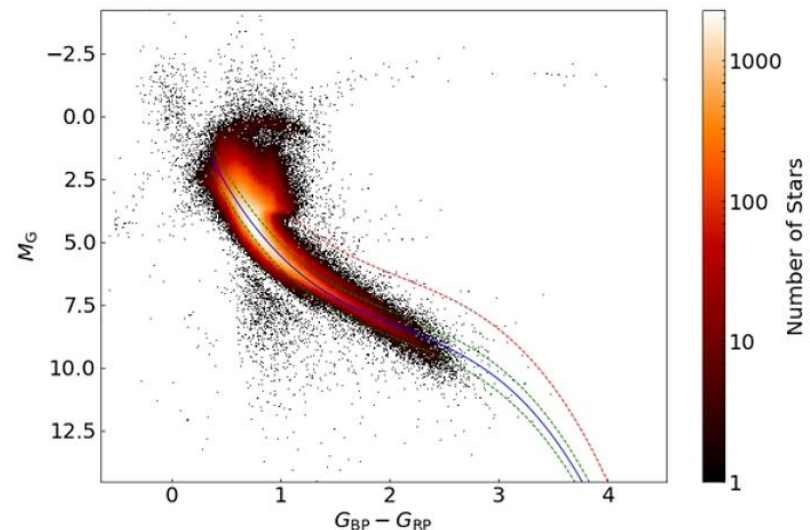
结果9：全年龄恒星紫外辐射和宜居带演化

构建恒星自转/活动性的全年龄演化的全年龄演化图谱

- 疏散星团、场星、球状星团、有白矮星伴星的双星
- 年龄覆盖从百万年至数十亿年
- X-ray(Chandra、XMM-Newton)、UV(GALEX)、Ca II HK (LAMOST)
- 对比三者演化趋势，探索谱型依赖的“活动时钟”



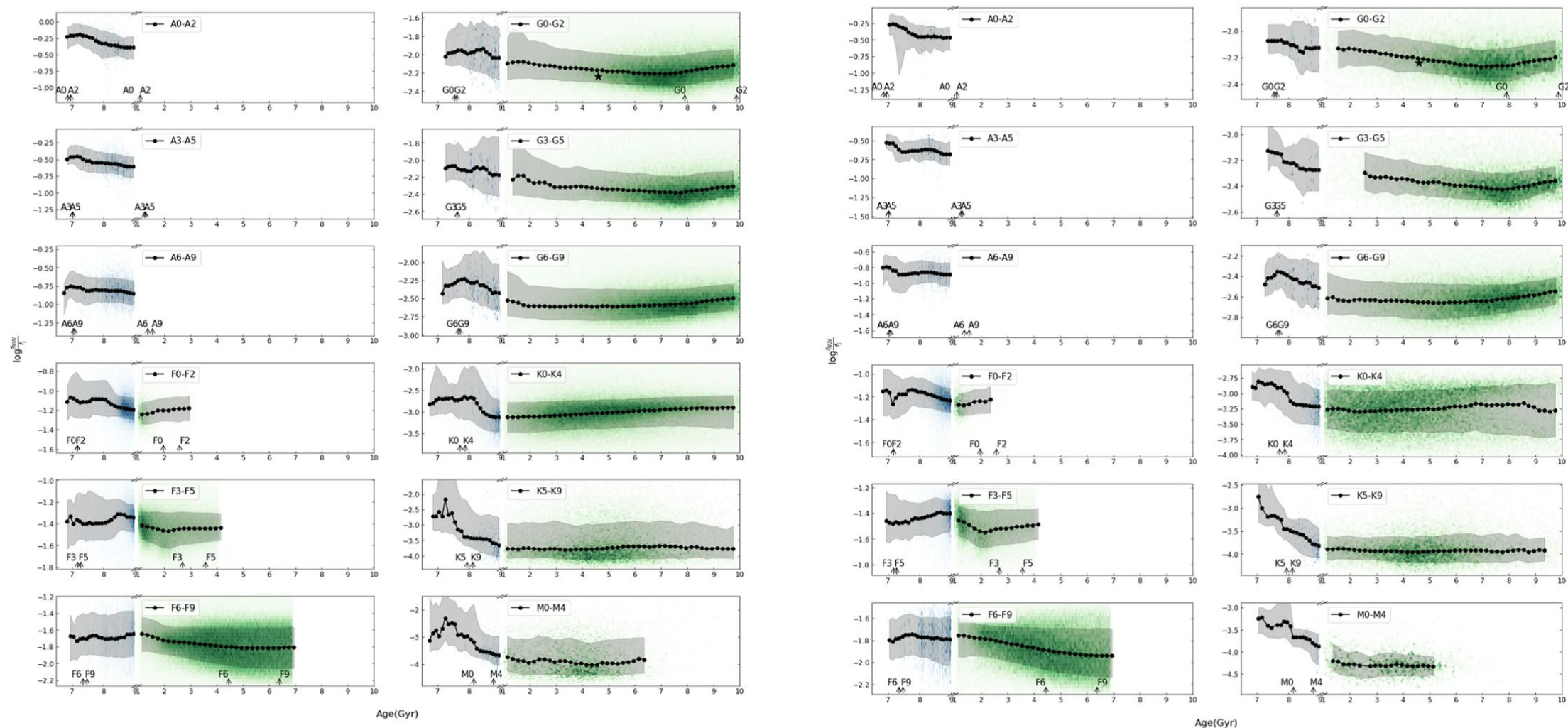
Gaia疏散星团



LAMOST场星

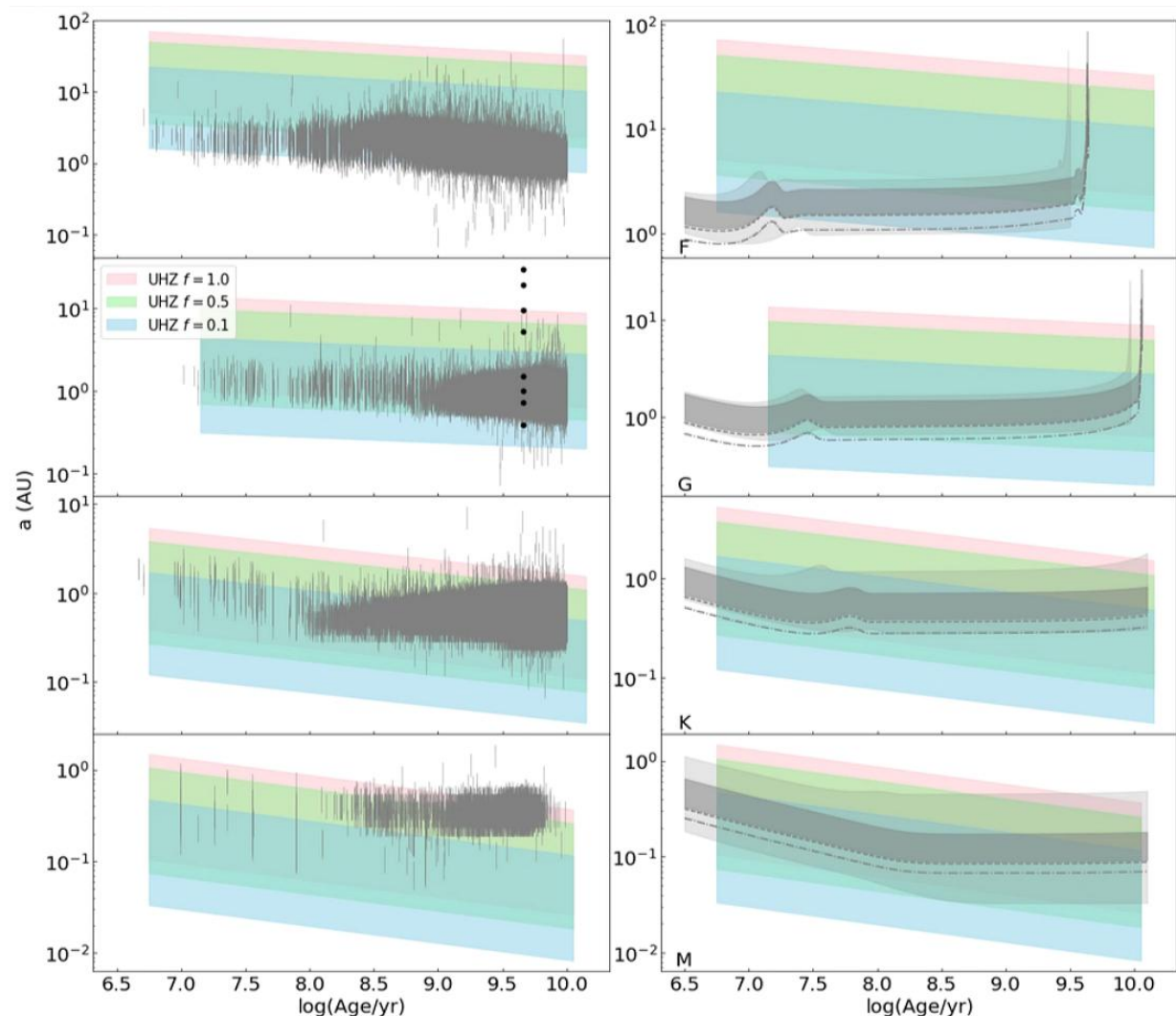
结果9：全年龄恒星紫外辐射和宜居带演化

□ UV辐射水平随年龄的演化（左：全部样本；右：考虑样本完备性）



结果9：全年龄恒星紫外辐射和宜居带演化

- 样本的观测值的CHZ演化趋势和模型给出的演化趋势是大致相同
- F：需要非常低UV透射率，CHZ与UHZ重合
- G/K：主序期CHZ与UHZ重叠稳定
- M：需要中等或较高紫外透过率，CHZ与UHZ可重合



Li, Wang*, in prep.

- 以X射线、光谱发射线、紫外辐射、耀发等为探针，研究不同类型恒星活动性分布，重构活动性—自转关系；
- 通过X射线和紫外辐射研究系外行星宜居性
- 结合疏散星团、场星，在百万年到百亿年的尺度上研究恒星自转、活动性的演化（回转年代学）及宜居带的演化



给出光谱分辨率对CaII H&K影响的校准公示；给出恒星UV光球辐射快速计算公式

提出SD²F活动性—自转关系；不同类型的恒星在活动性-自转关系的非饱和区斜率不同，说明发电机机制存在差异

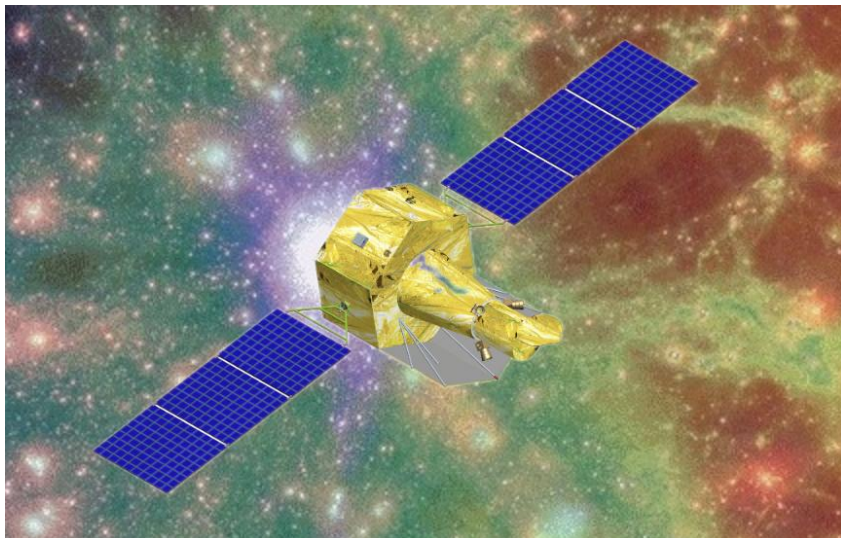
M恒星色球层活动指数分布呈双峰特征，表明恒星活动群体正经历着从饱和状态向非饱和状态的快速过渡

太阳在G型星中表现出极低的X射线（冕）活动性、很低远紫外辐射、较弱的色球层活动性、中等近紫外辐射

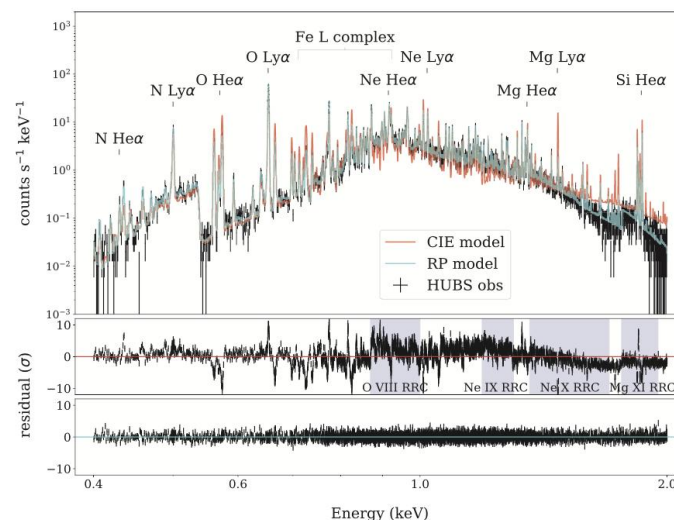
目前发现的行星中只有不到100颗行星同时位于水和紫外宜居带；大约40%的M型恒星周围的行星可能宜居

F恒星需要低UV透射率，M需要中等或较高紫外透过率，CHZ 才与 UHZ重合；G/K主序期 CHZ 与 UHZ 重合稳定

广告：HUBS恒星选源



- Spectral resolution: 2 eV for the main array at 1 keV; <1 eV for the central sub-array
- Energy resolution: $E/\Delta E \approx 500$ @1 keV for the 60×60 normal array; $E/\Delta E \approx 1000$ @0.6 keV for the 12×12 central sub-array
- FOV: 1 degree (60×60 pixels)
- Angular resolution: 1 arcmin/pixel



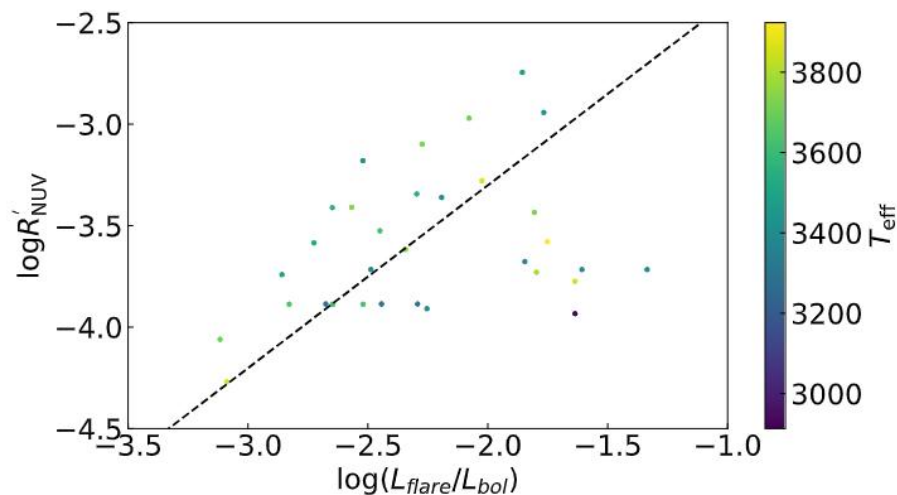
目前人员：王松、程鑫、赵展浩、
刘禾阳、毛选

欢迎各位老师同学加入！
songw@bao.ac.cn

❑ 基于HUBS的X射线测光和高分辨率光谱数据，研究：

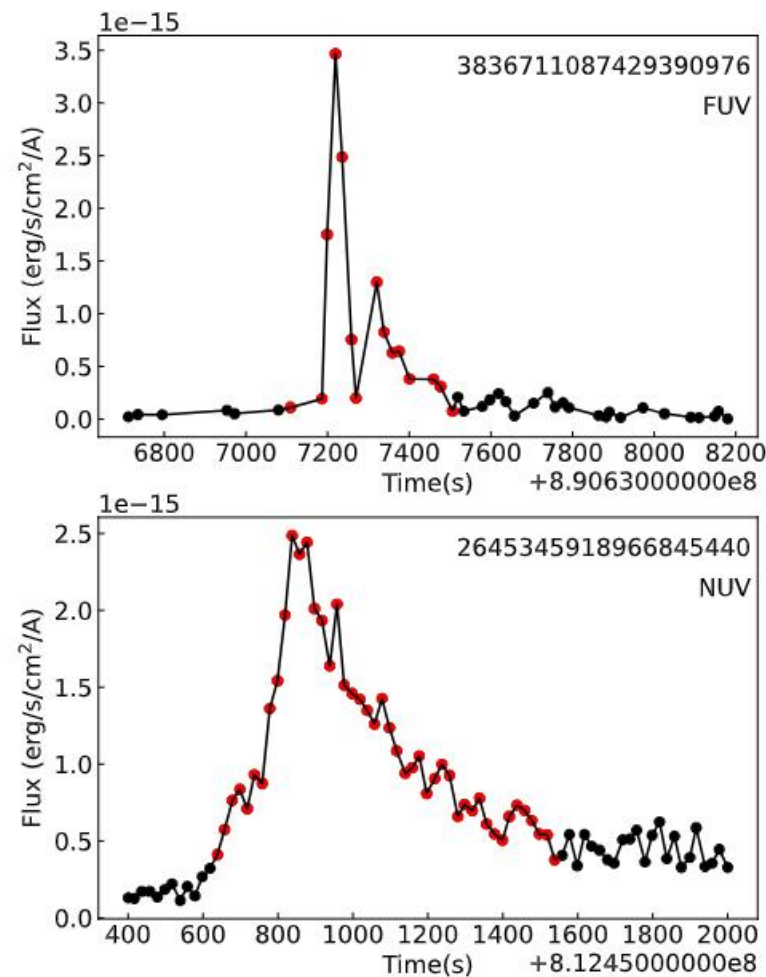
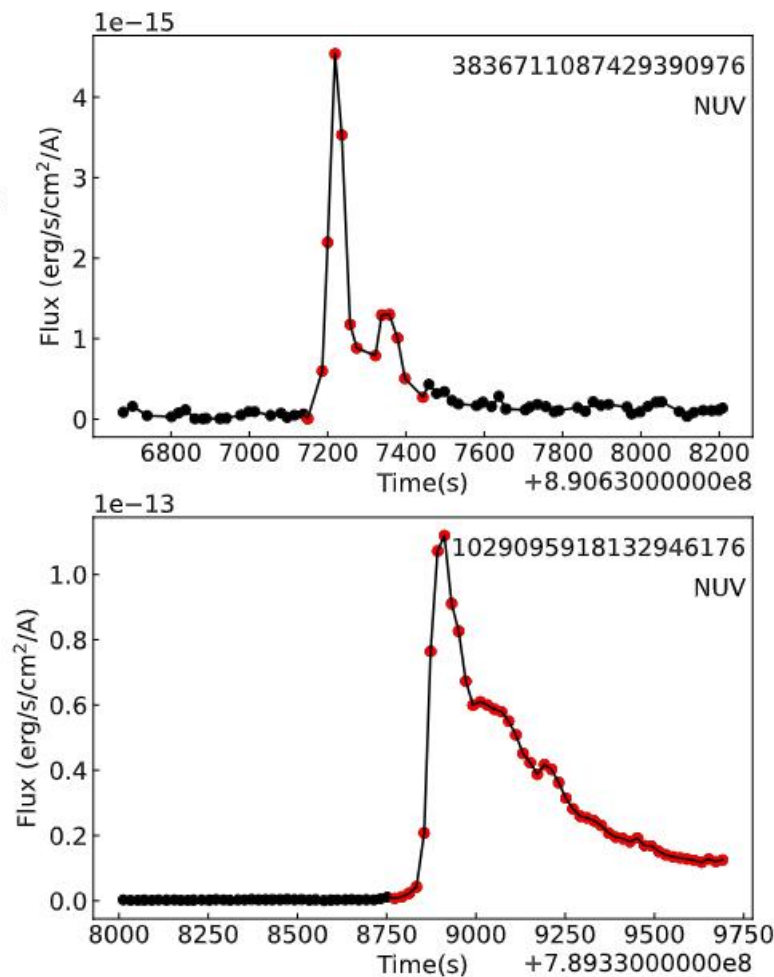
- 不同类型恒星耀发**精细光谱的含时演化**，**探测日冕物质抛射**，刻画冕的结构，理解恒星的冕加热机制
 - Differential emission measure, coronal temperature and density
 - Metallicity, FIP, inverse FIP
 - Doppler motion of spectral lines
- 研究双星、恒星-行星磁场相互作用，探索潮汐力对磁场发电机机制的影响
- 恒星活动—自转关系，理解磁发电机机制（新的探针？）
 - X-ray activity-rotation relation with new probes

结果5:紫外耀发探测



35 颗M恒星的 43 个完整耀斑事件

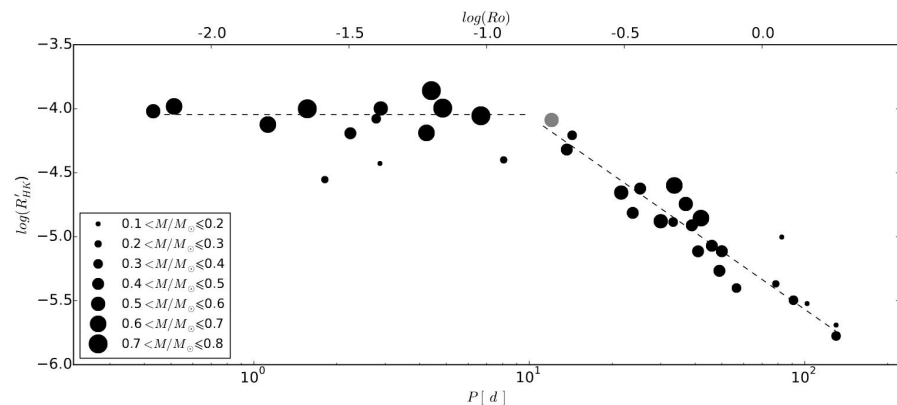
- 持续时间: 60-900 秒
- 峰值光度: $10^{28} - 10^{32}$ erg/s
- 耀斑能量: $10^{30} - 10^{34}$ erg
- 光谱型: M0-M5



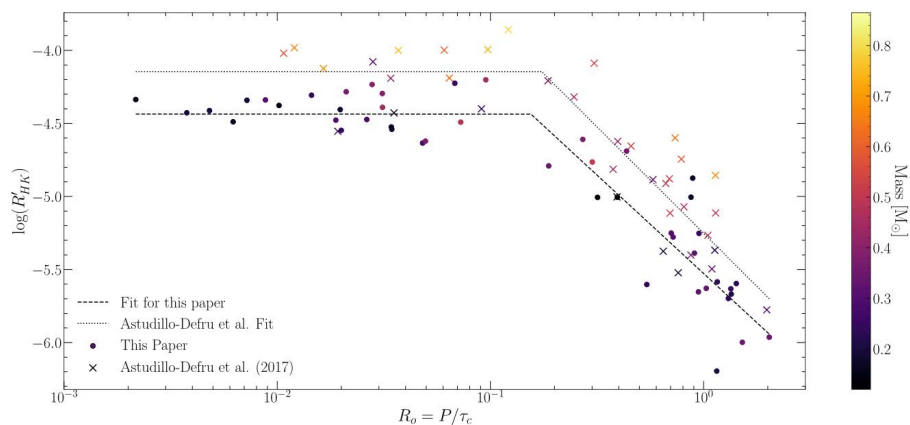
Li et al. (2024)

2.3 M星活动性

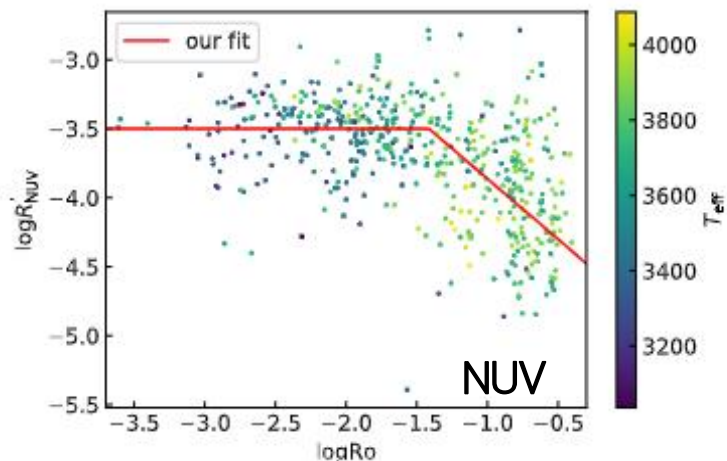
活动性-自转关系-H α



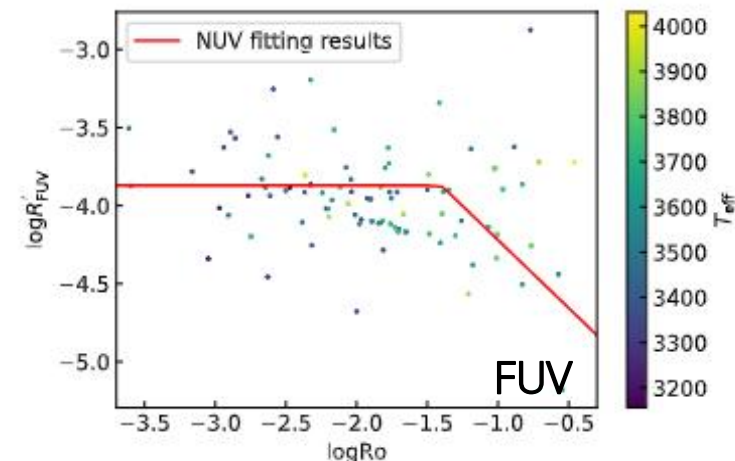
Astudillo-Defru et al. (2017)



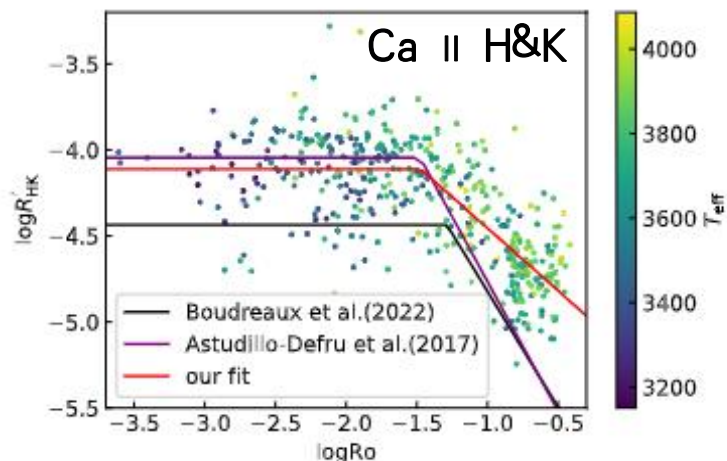
Boudreaux et al. (2022)



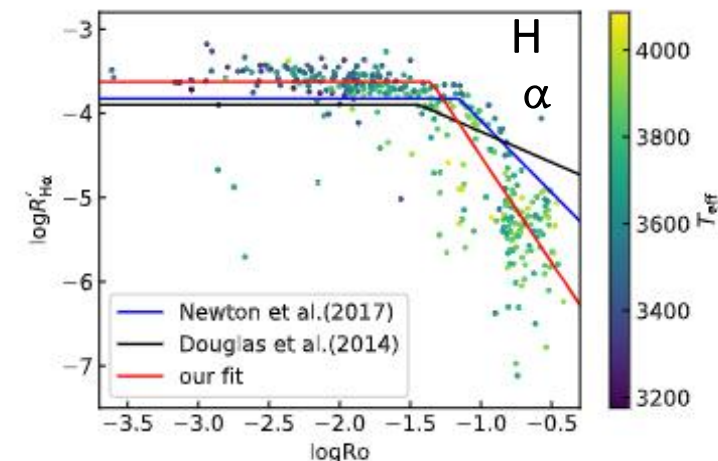
(a)



(b)



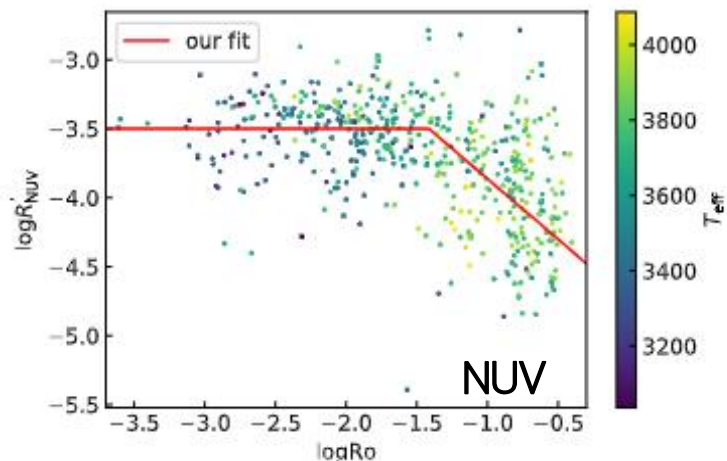
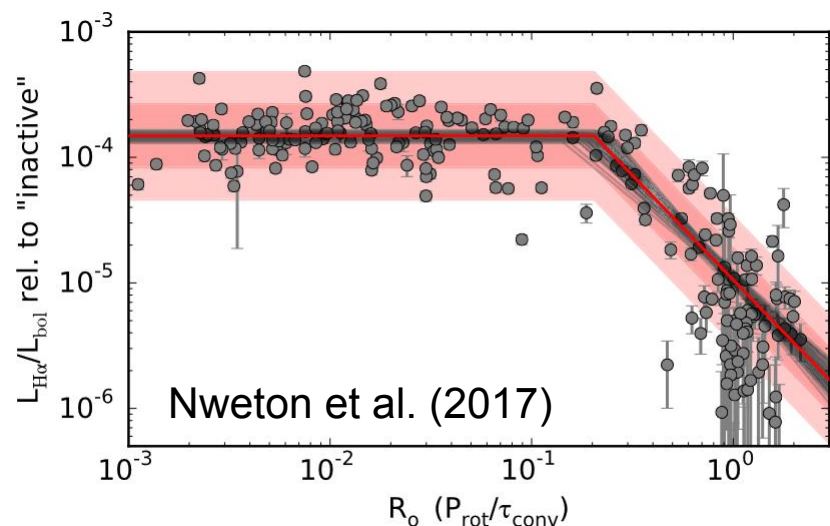
(c)



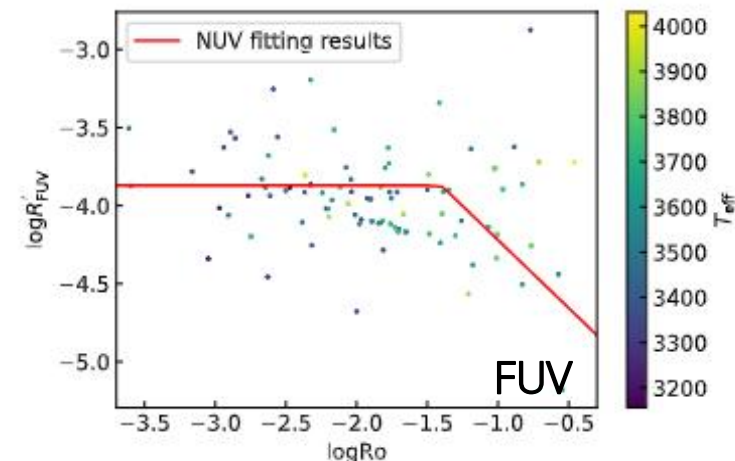
(d) Li et al. (2024)

M星活动性

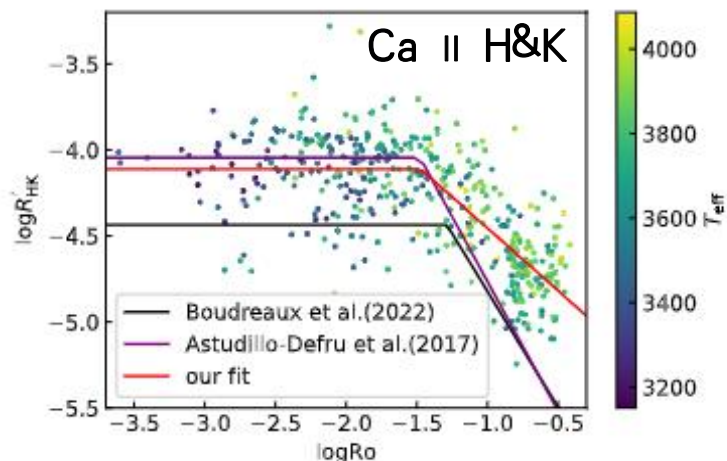
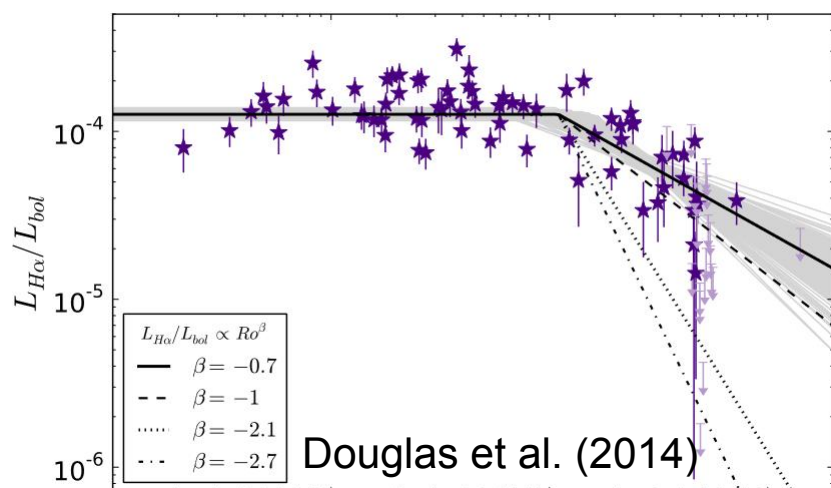
活动性-自转关系-H α



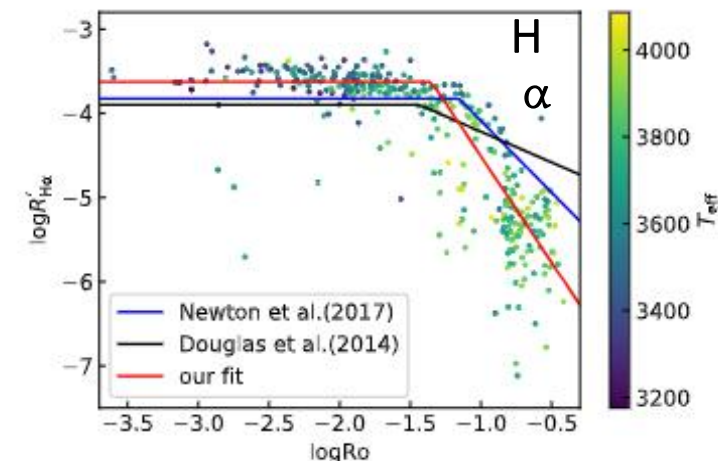
(a)



(b)

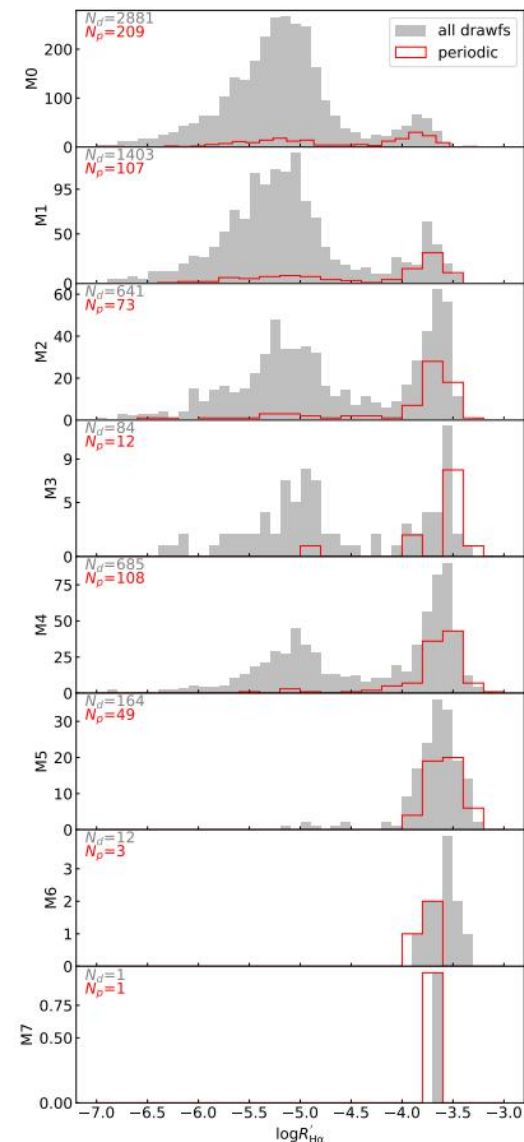
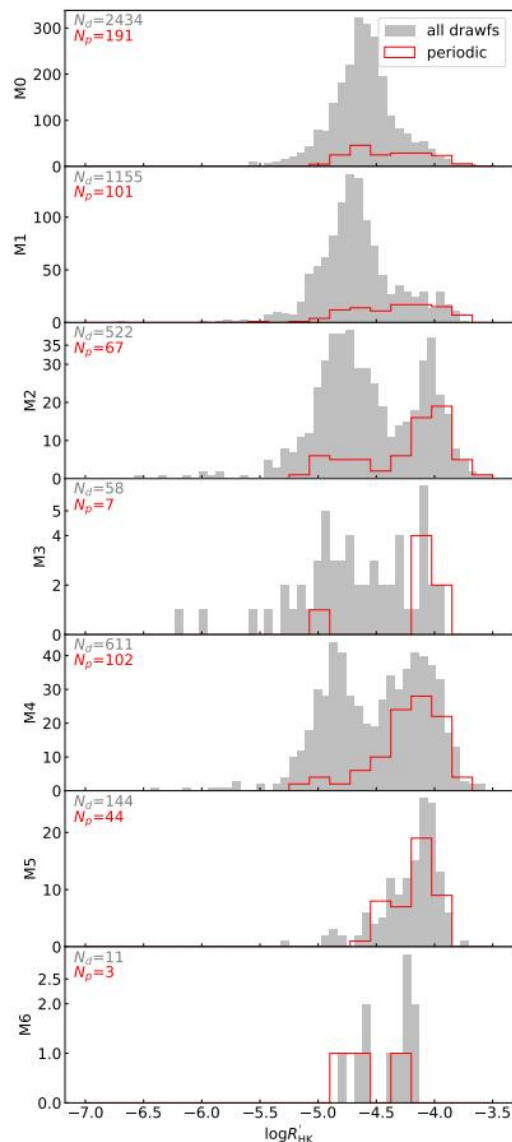
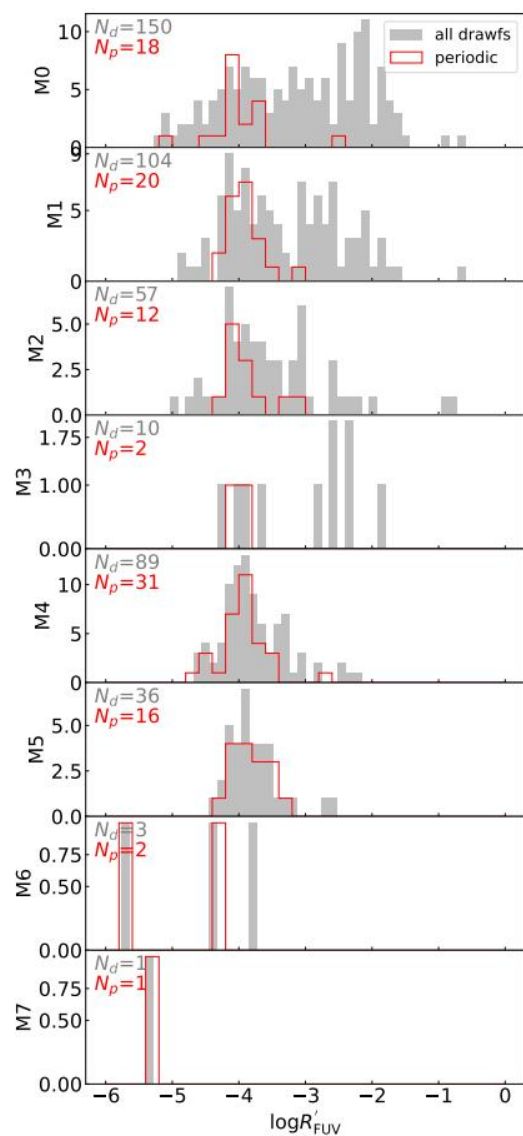
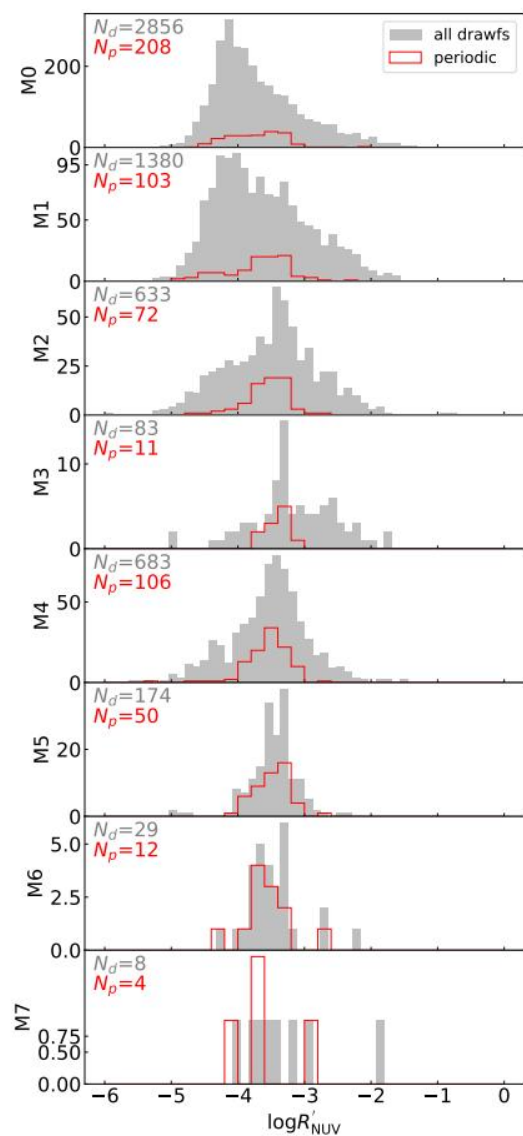


(c)

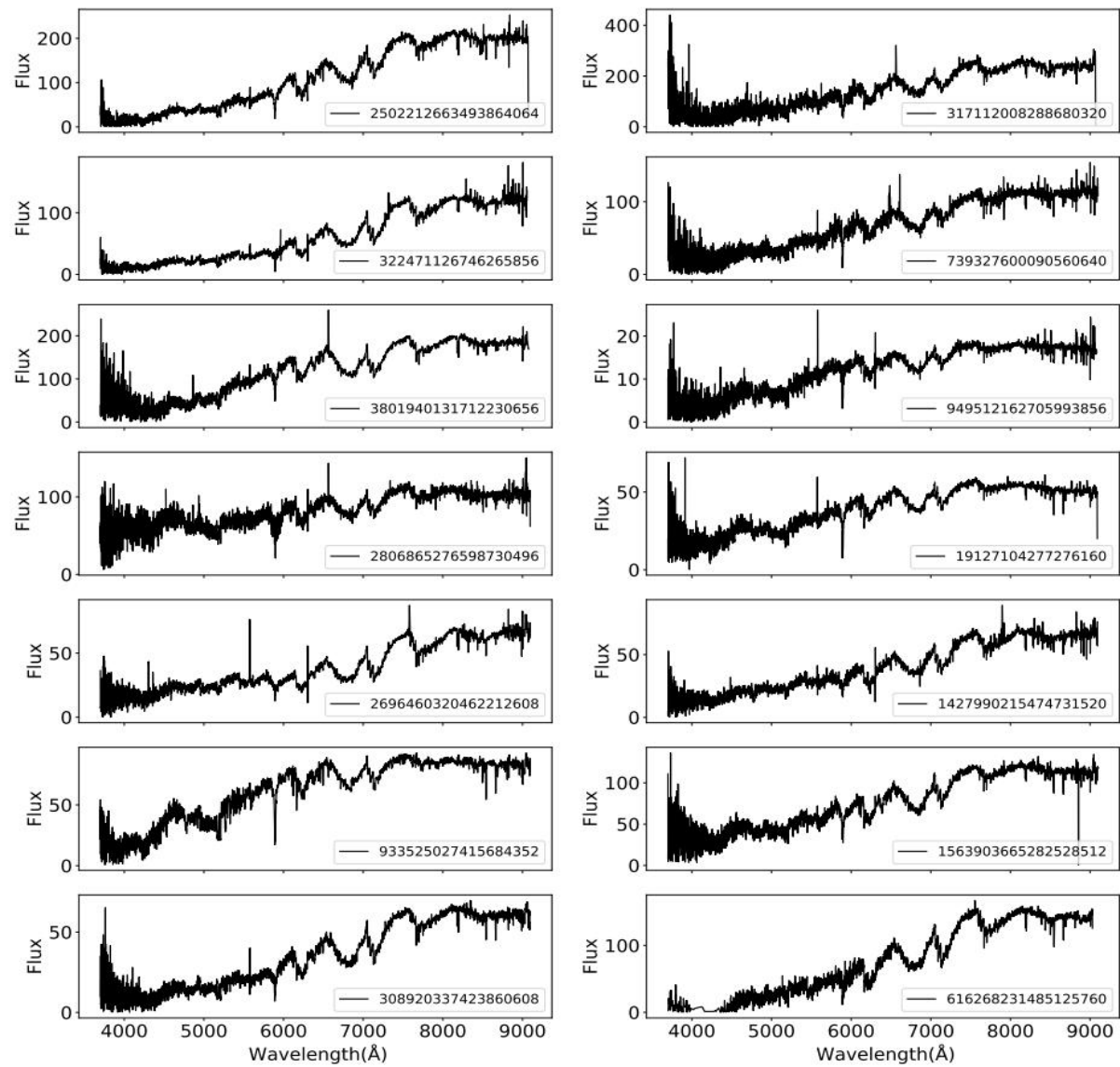


(d) Li et al. (2024)

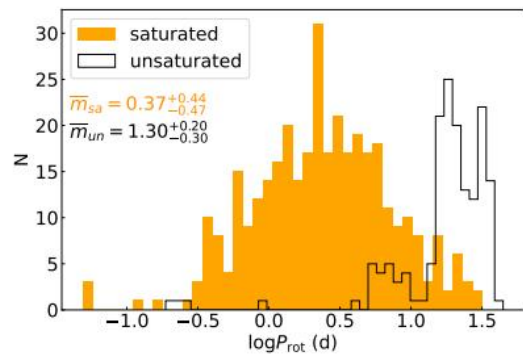
M星活动性



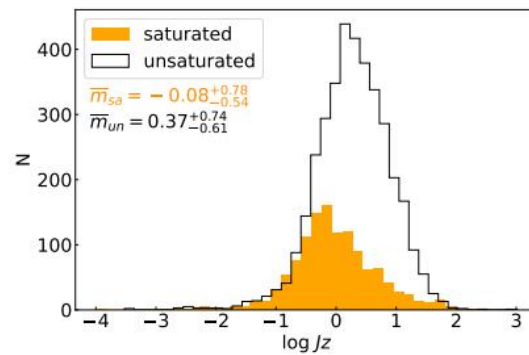
M星活动性



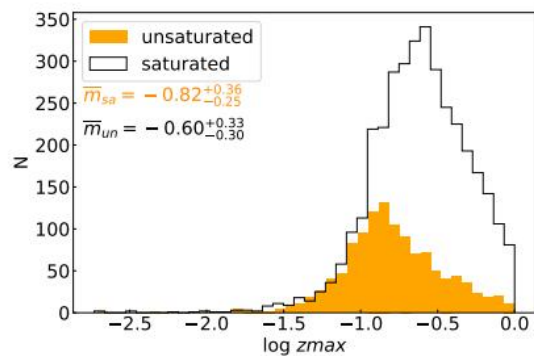
M星活动性



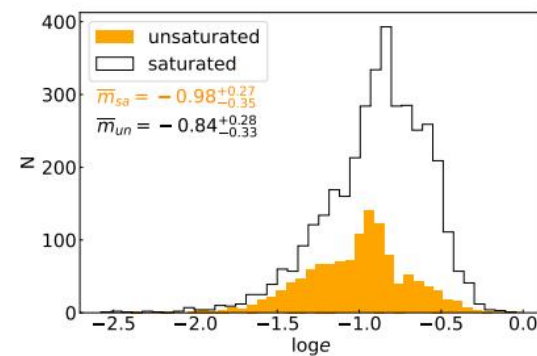
(a)



(b)



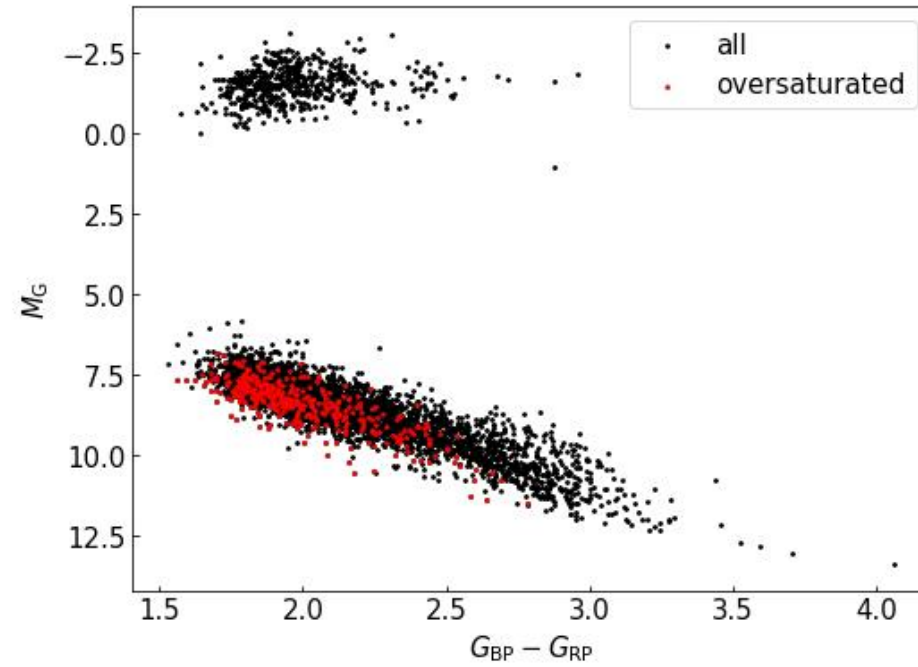
(c)



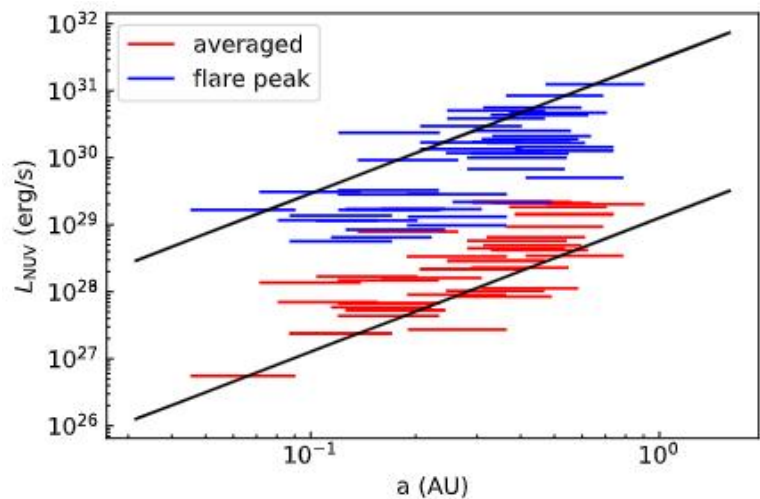
(d)

M星活动性

紫外异常高

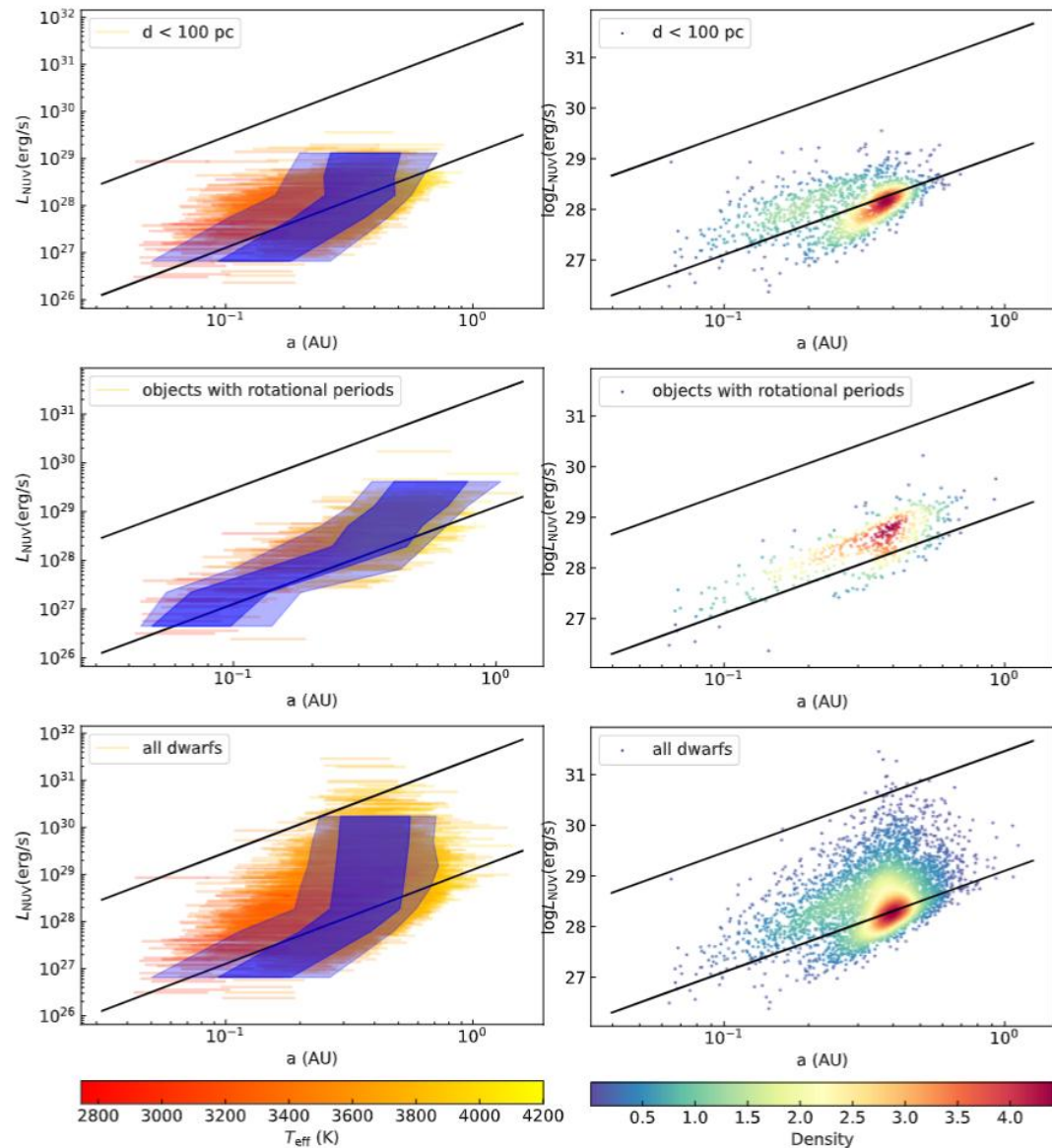


M星宜居带



Sample	N	P ₁	P ₂	P ₃
< 100 pc	1624	83%	44%	25%
Periodic	567	97%	83%	64%
Total dwarfs	5849	93%	68%	51%

- 考虑100 pc的距离完备性之后，大约40%的M型恒星可能宜居
- 偶发耀斑带来的光变对宜居带变化影响较小



CSST研究恒星活动性的预测

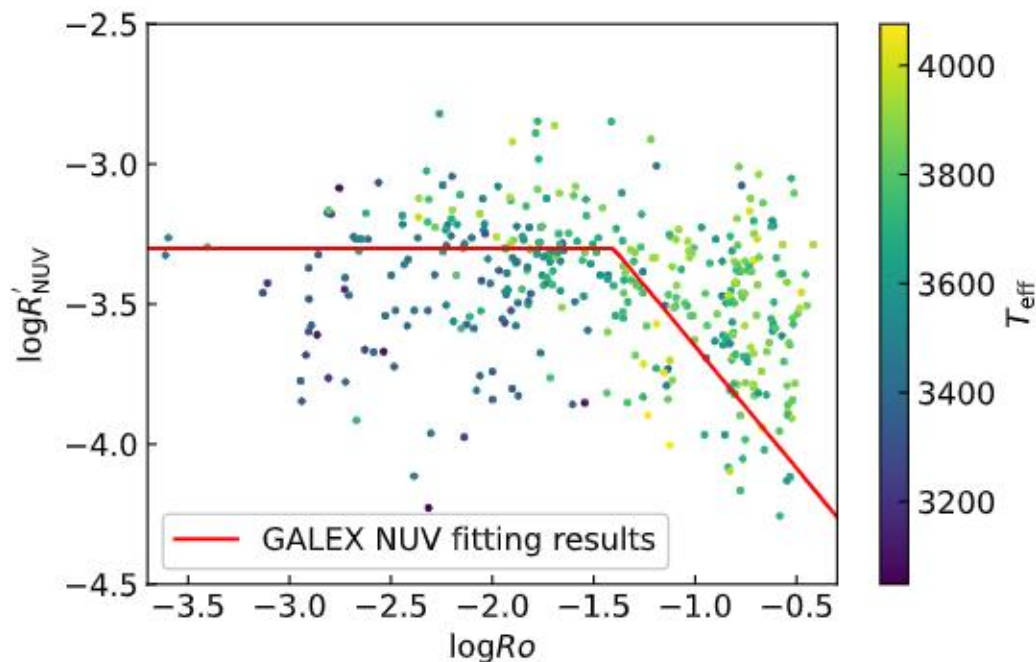
CSST

FoV: 1.1平方度

NUV 波段覆盖 252-321 nm

NUV波段极限星等约为 25 等

很适合探测暗源



- GALEX NUV与SDSS DR16u波段, 内插
- 与GALEX NUV 波段指数相比, 结果较为弥散
 - 不是同时观测
 - SDSS u对活动性的变化并不敏感
- 通过 CSST 观测研究大量 M 星, 会对我们紫外活动性的研究带来很大的帮助。

