中国科学院大学
University of Chinese Academy of Sciences

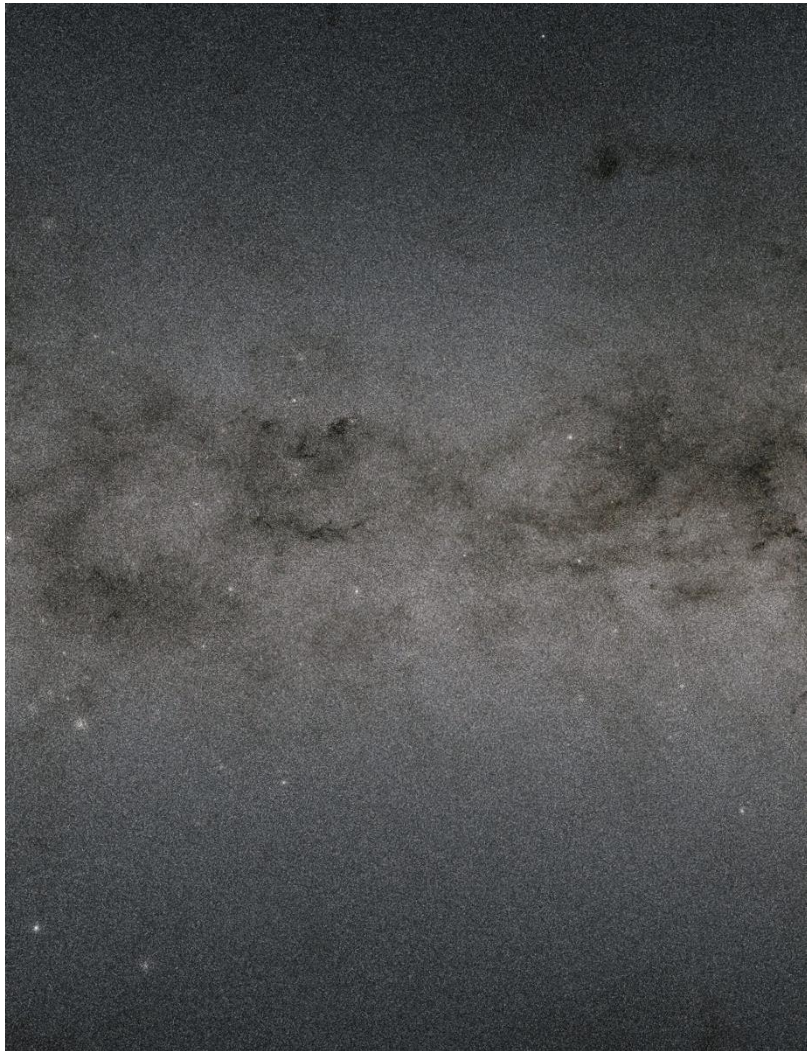
星团中的相互作用双星

Interacting Binaries in Star Clusters

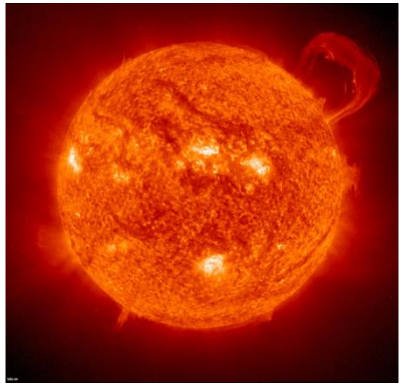
王 莉

2026/08/15

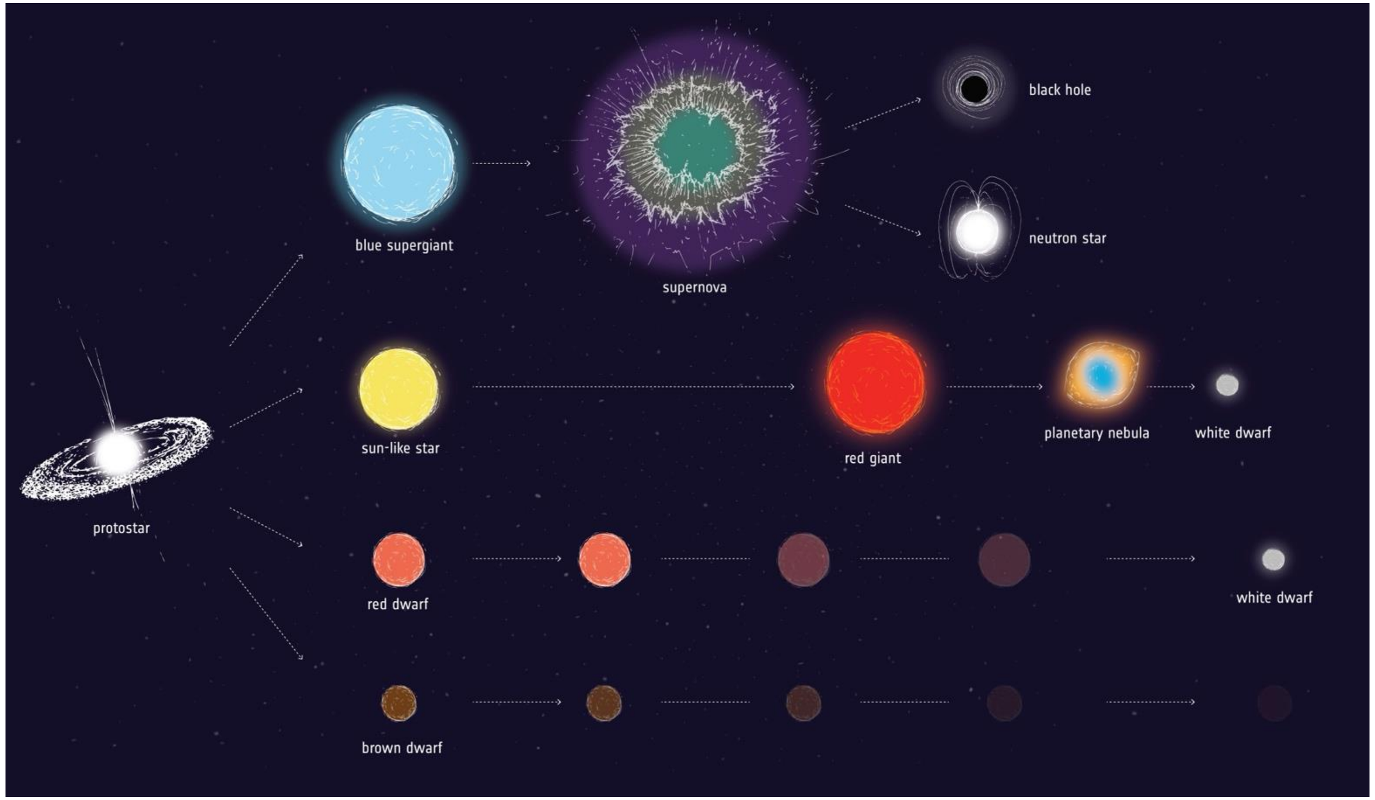
恒星



From ESA Gaia Mission



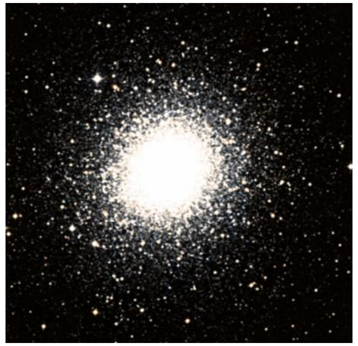
地球生命能量的来源：太阳



恒星为压力与引力平衡的气态物体，能量来源于核合成反应

恒星诞生的主要场所—星团

球状星团

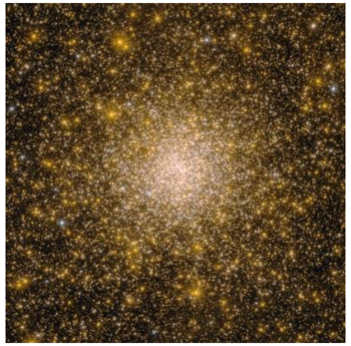


NGC 7089 (12 Gyr)

疏散星团

Pleiades (300 Myr)

年轻大质量星团



NGC 1856 (300 Myr)

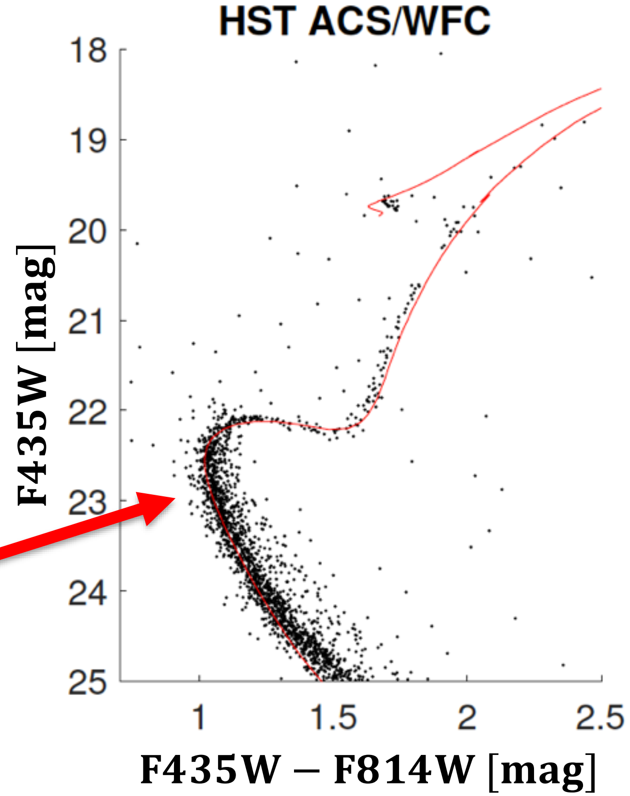
R136 (1−2 Myr)

Image Credit: *NASA/ESA*

大质量恒星的强烈恒星反馈：
强烈辐射、高速星风、II型超新星爆发

星团的单星族性

- 相同年龄
- 相同化学元素组成
- 忽略双星相互作用



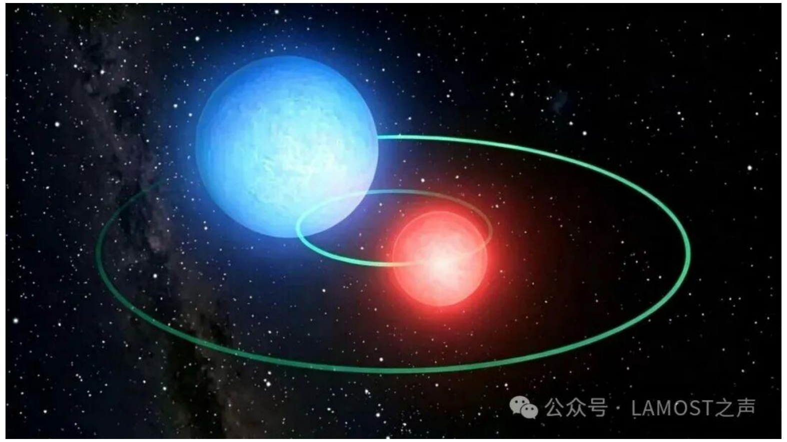
主序拐点

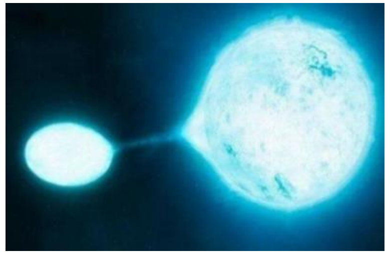
Li (2017)

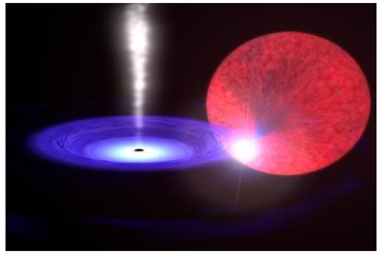
Cluster type	Age [Gyr]	Mass [$M_\odot$[a]]	Central density [$M_\odot$ pc^{-3}]	Metallicity[b] [$Z_\odot$]
OC	≤ 0.3	$\leq 10^3$	$\leq 10^3$	~ 1
GC	≥ 10	$\geq 10^5$	$\geq 10^3$	≤ 1
YMC	≤ 0.1	$\leq 10^4$	$\geq 10^3$	≥ 1

Li (2017)

双星

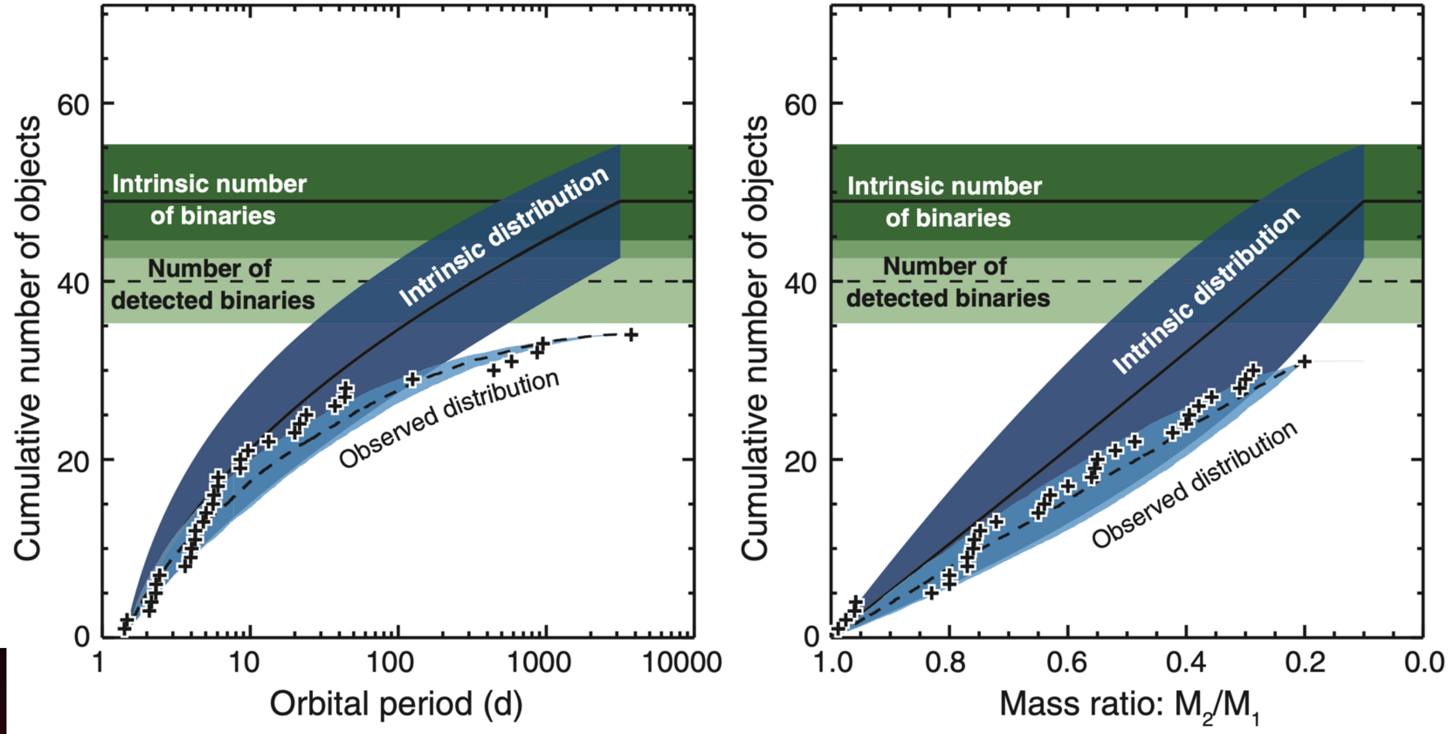






蓝离散星　　极小质量白矮星 $< 0.3\ M_{\odot}$　　X射线双星

……

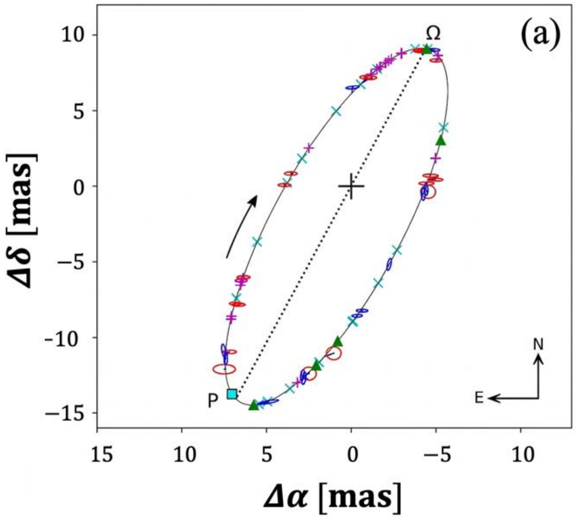


Sana et al. (2012)

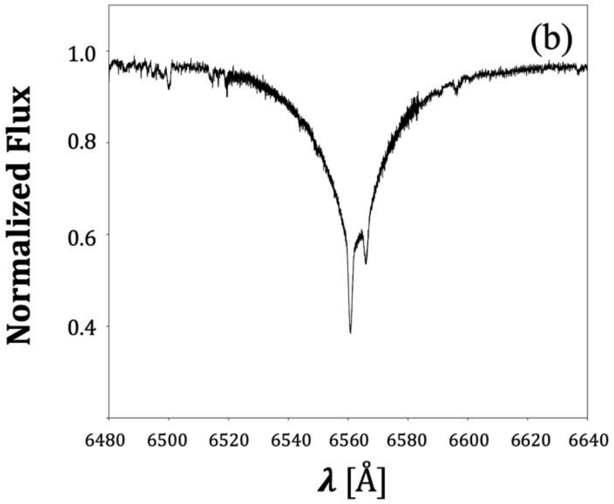
宇宙中约半数恒星处于双星系统中
大质量恒星的双星比例则接近百分之百

双星

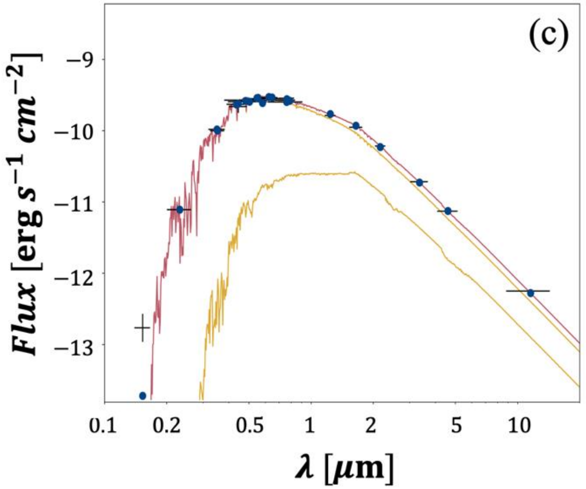
天体测量双星



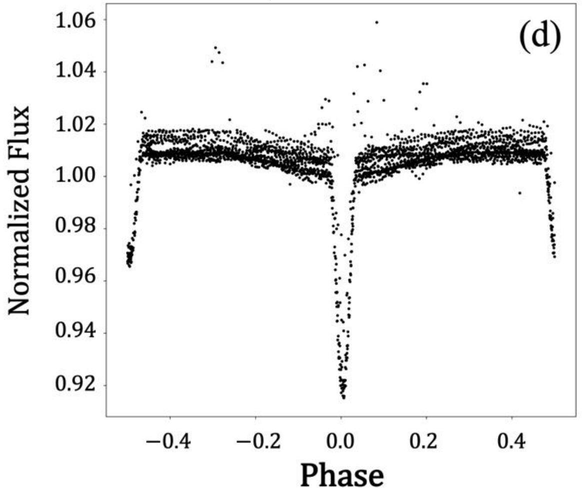
光谱双星



测光双星



食双星

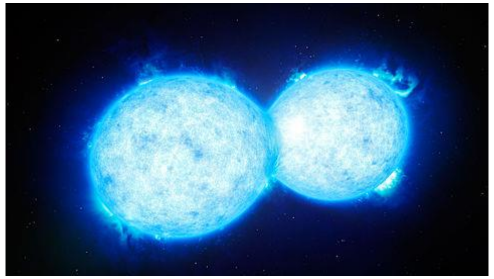


双星相互作用过程

- 潮汐相互作用

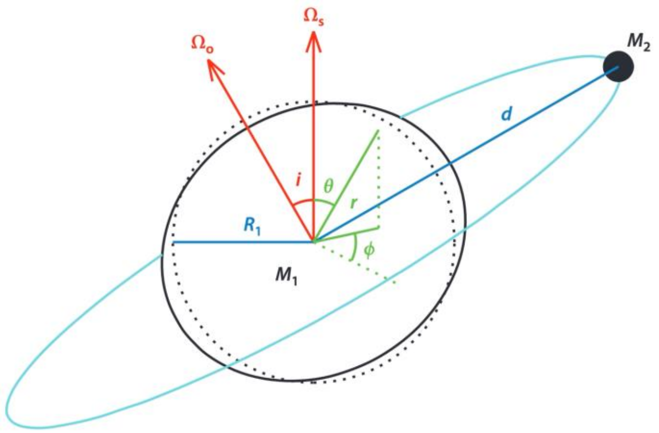
- 稳定物质转移

- 接触双星



- 并合与公共包层演化

双星的潮汐相互作用



"We still do not know where the tidal energy is actually dissipated."

Zahn & Goldreich (1966)

潮汐能量耗散机制

- **平衡潮**
  恒星整体的准静态形变，如地球上的潮起潮落
  (*e.g., Zahn* 1977, 1989)
- **动力潮**
  共振激发的内部波动。当受迫频率接近恒星固有频率时，能量被放大
  (*e.g., Zahn* 1975, 1977; *Goodman & Dickson* 1998; *Terquem et al.* 1998…)

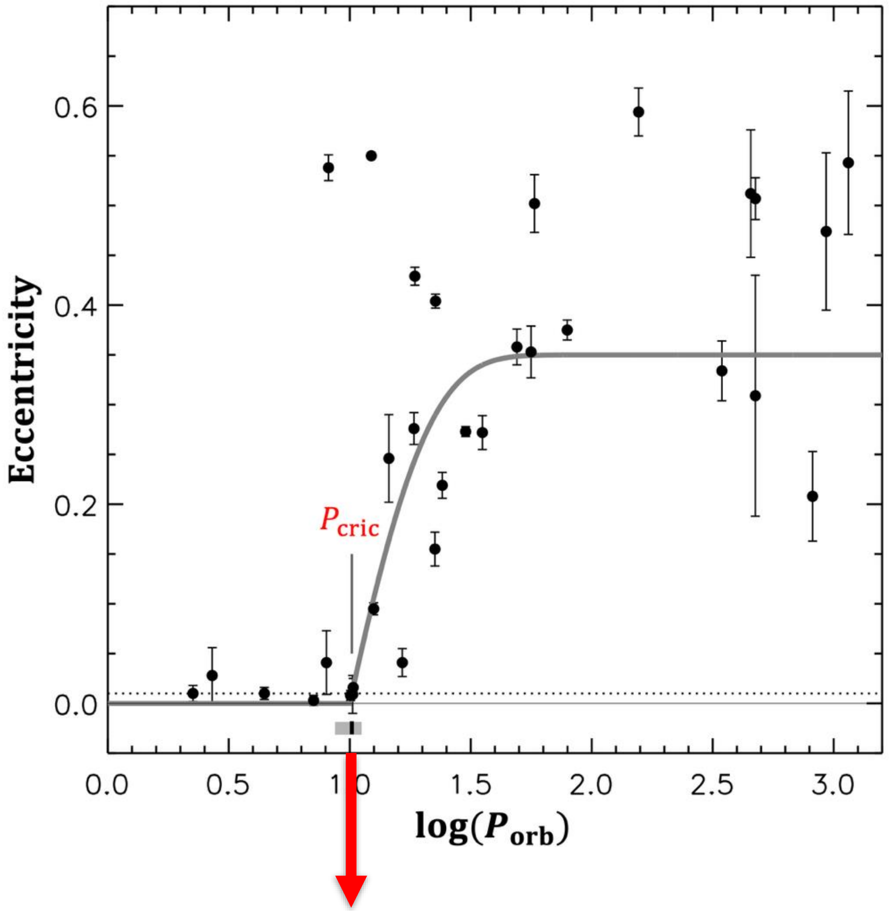
观测效应

- 恒星几何形状畸变
- 轨道运动对纯开普勒轨道的偏离，例如偏心食双星中的轨道进动
- 潮汐诱导的双星轨道及自转长时标演化
  双星轨道完全变圆
  恒星自转与轨道运动同步，即潮汐锁定
  恒星自转轴与公转轨道轴平行

see review of Ogilvie (2014)

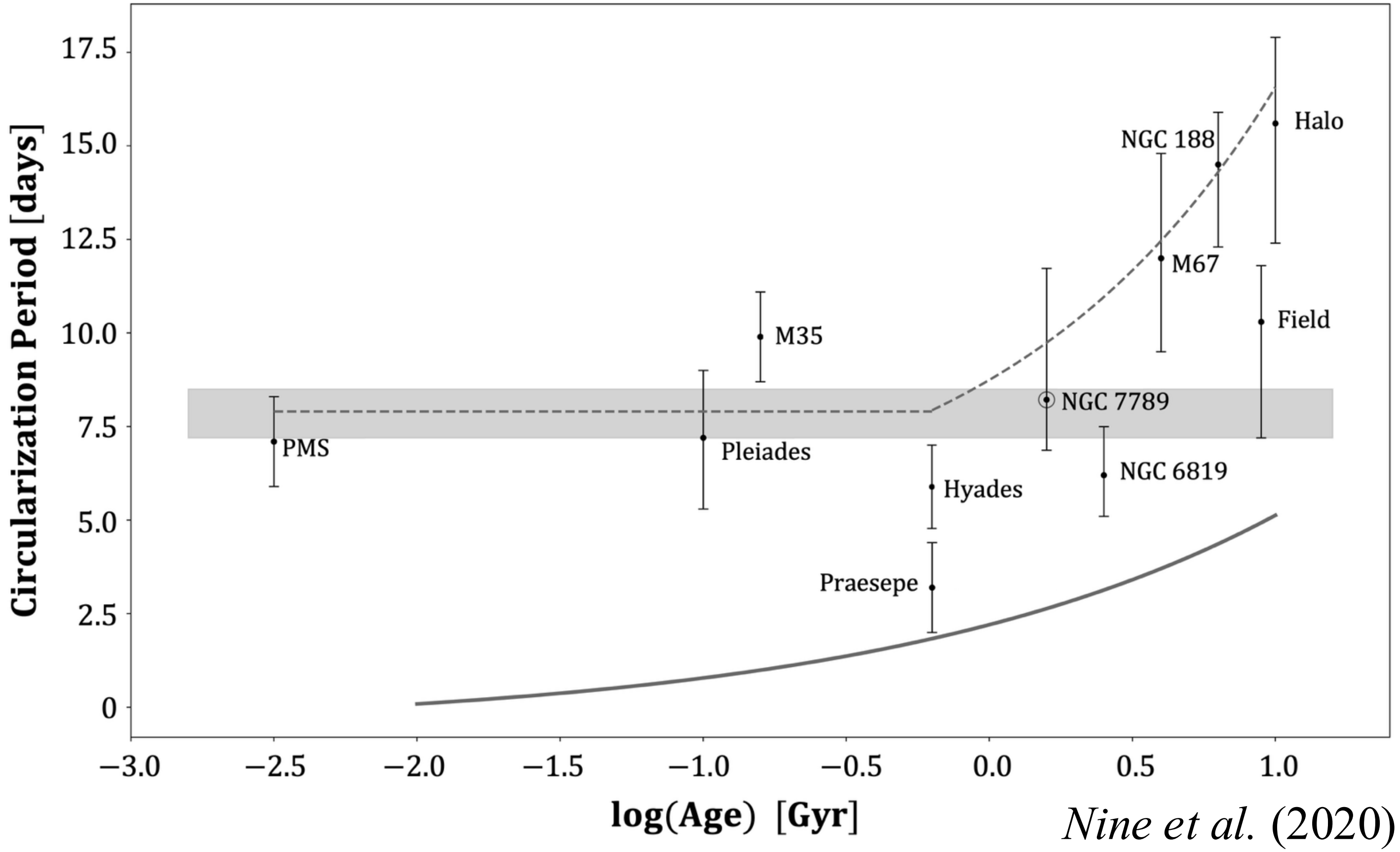
双星轨道变圆

等龄双星星族的圆化周期分布



圆化周期 P_{circ}

Meibom & Mathieu (2005)



Nine et al. (2020)

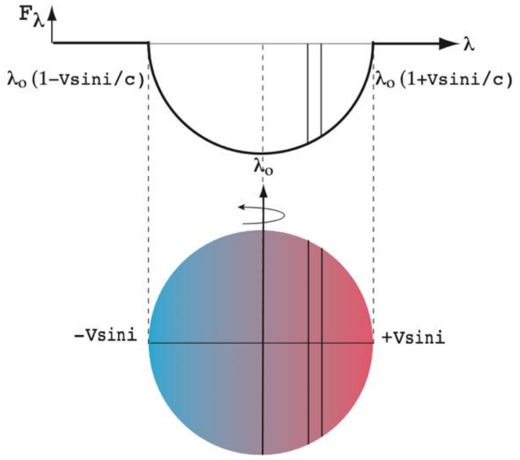
<1 Gyr: P_{circ}与年龄无关，约7.5 天

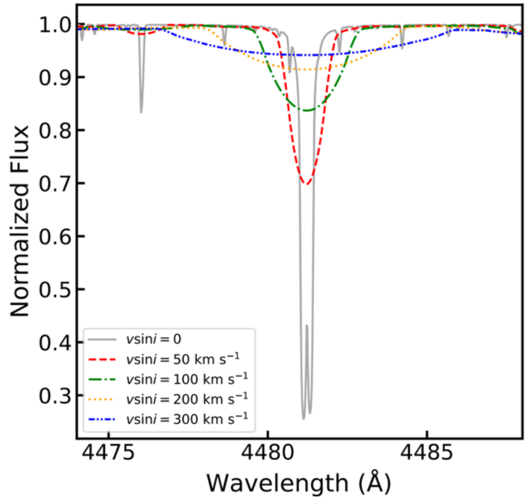
>1 Gyr: P_{circ}随年龄增长表现出显著的上升趋势

双星潮汐锁定

等龄双星星族的潮汐锁定双星

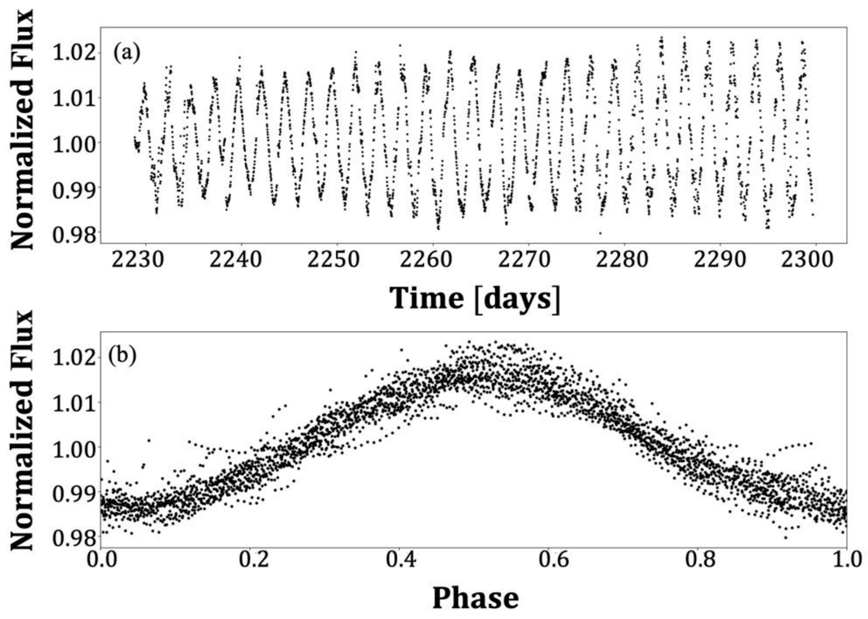
投影自转速度 $v\sin i_*$





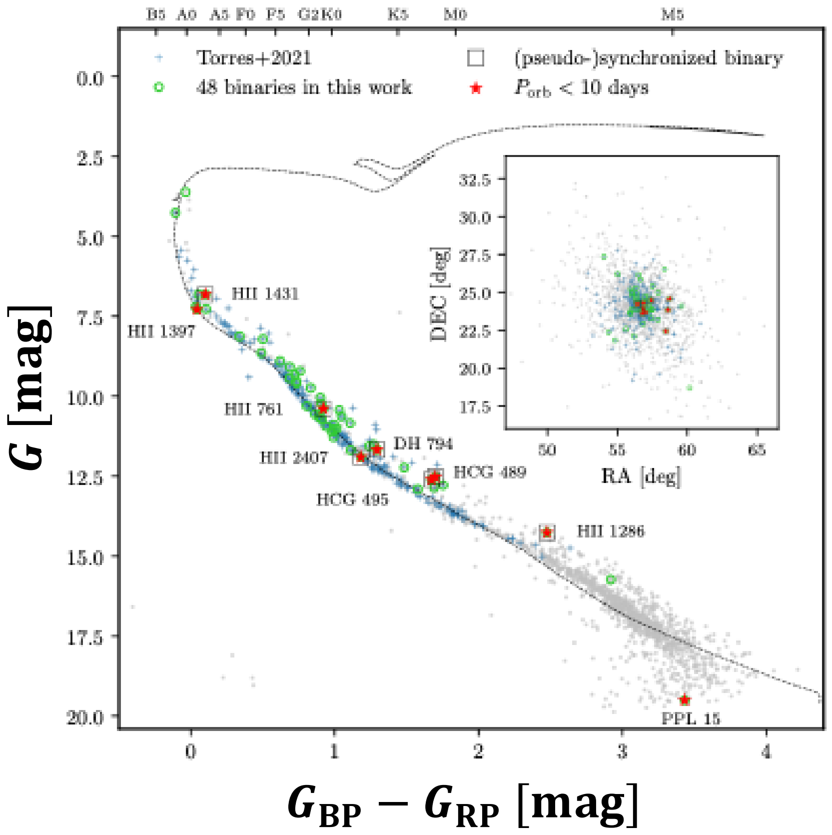
高精度长时序测光巡天

自转周期P_{rot}



Pleiades

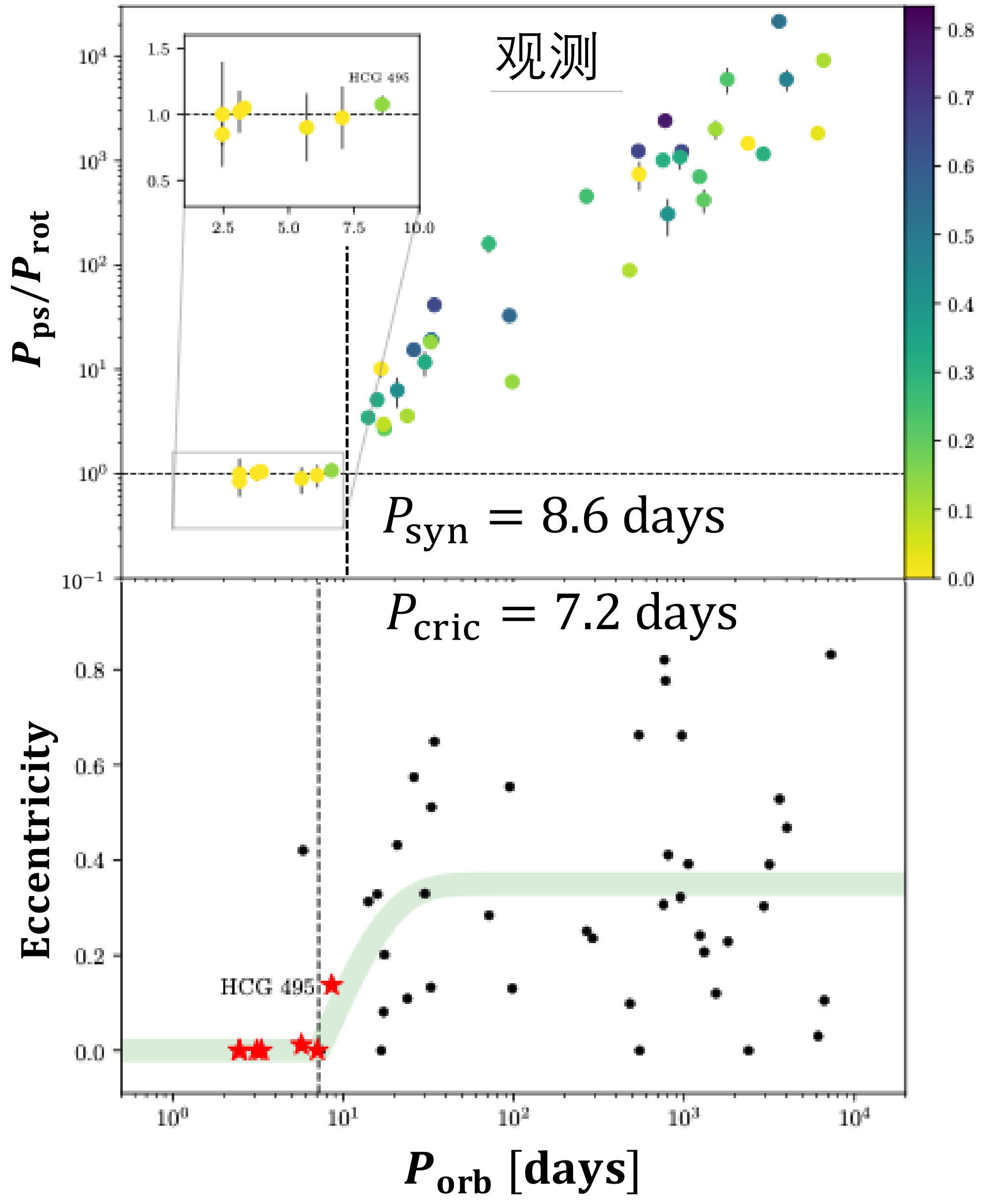
125 Myr

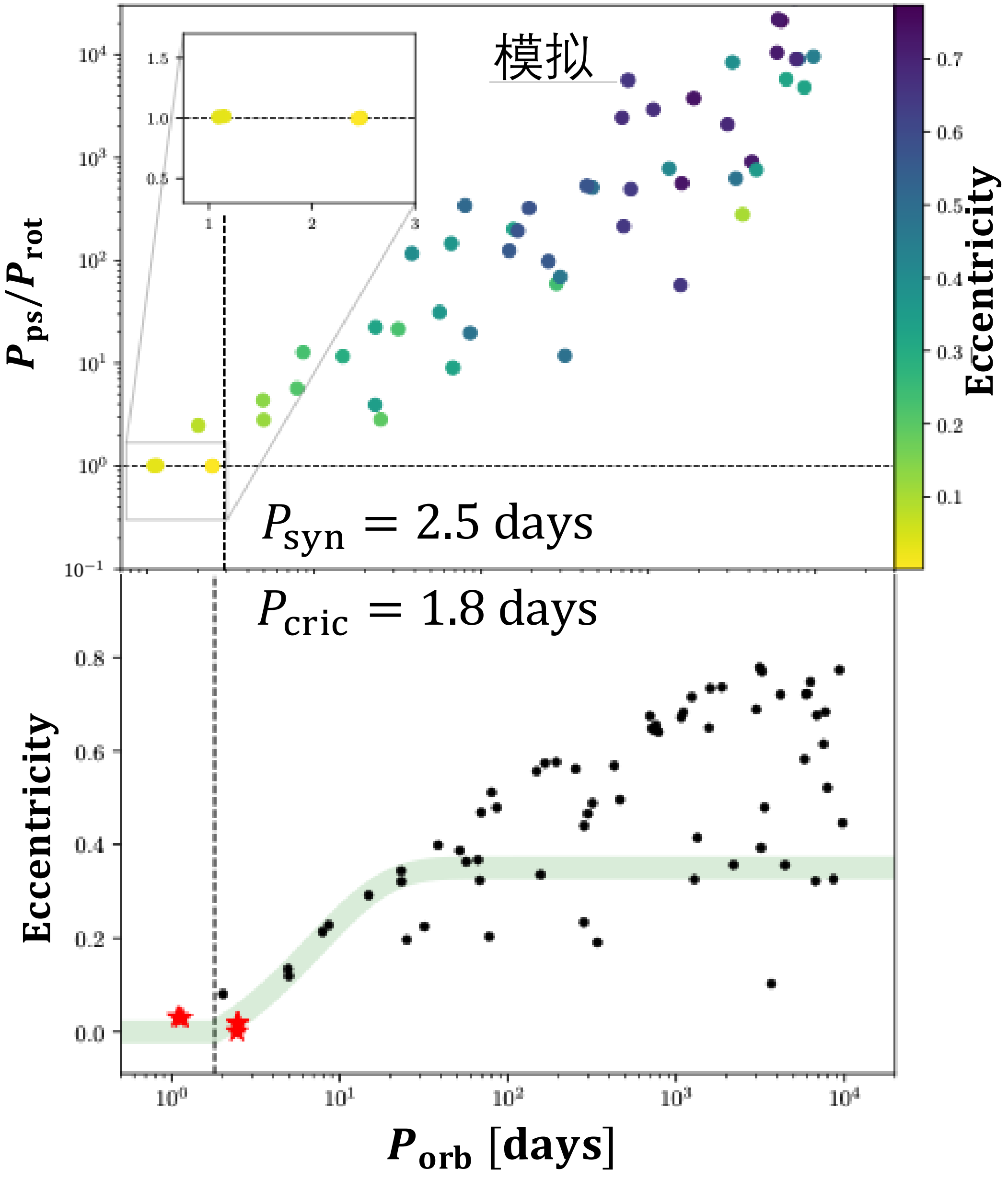


Wang et al. (2026)

双星潮汐锁定

等龄双星星族的潮汐锁定双星

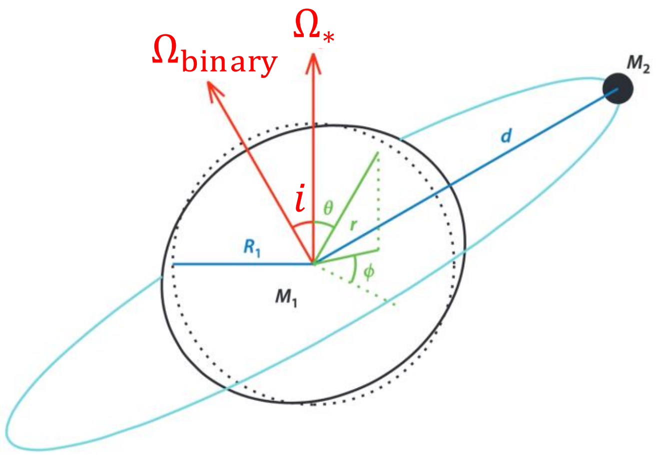


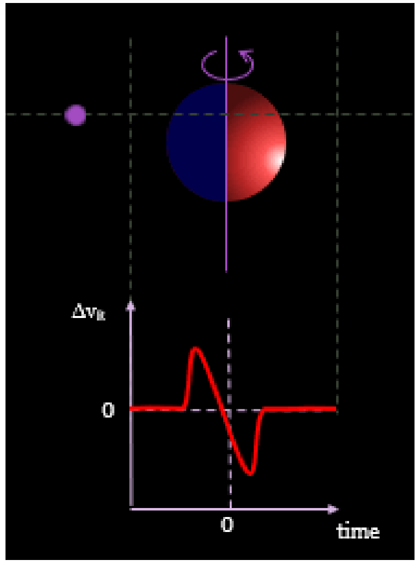


- 昴星团中，同步和圆化具有相似的临界轨道周期
- BSE采用的潮汐方案的潮汐效率明显不足，无法使P_{orb}>2天的双星产生足够强的潮汐相互作用

Wang et al. (2026)

双星自转轨道轴对齐





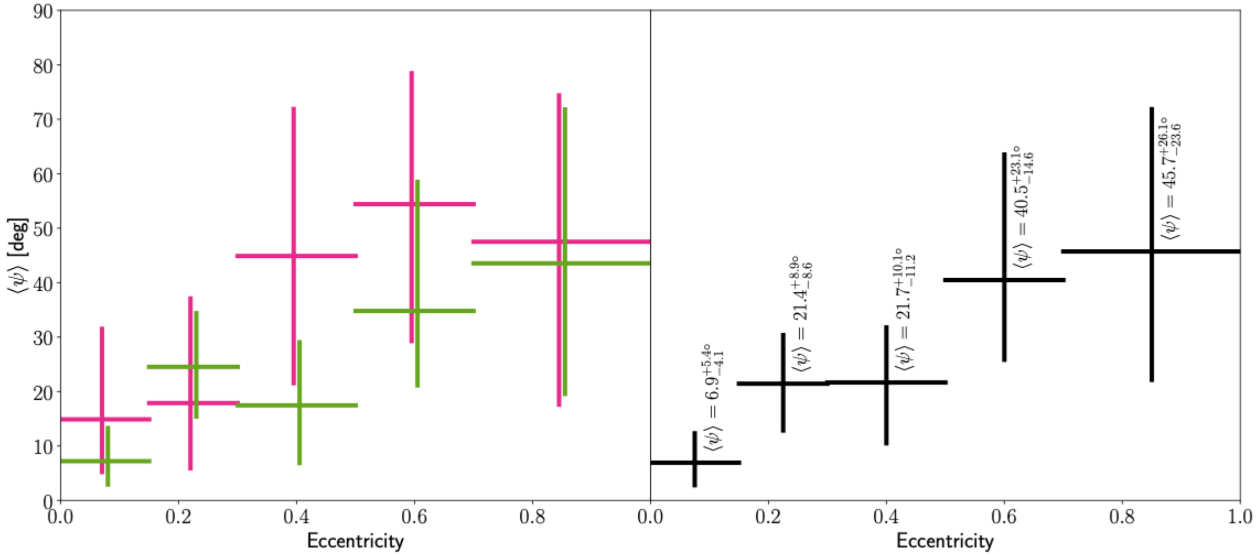
主要测量方法

- 中高分辨率光谱测量恒星投影自转速度 $v\sin i_*$，并结合恒星半径以及自转周期，则可以估计恒星自转轴倾角i_*；星震可以直接推导i_*

  食双星或天体测量双星提供确切的双星轨道倾角i_{binary}

  两个倾角之间的差值 $i_{\mathrm{binary}} - i_*$可以作为恒星自转轴与双星轨道轴夹角$i$的一个下限估计。

- *Rossiter–McLaughlin* 效应:伴星掩食主星表面不同自转速度区域时引起的谱线轮廓不对称畸变，只适用于食双星



恒星自转轴与轨道轴的相对夹角i与轨道偏心率密切相关

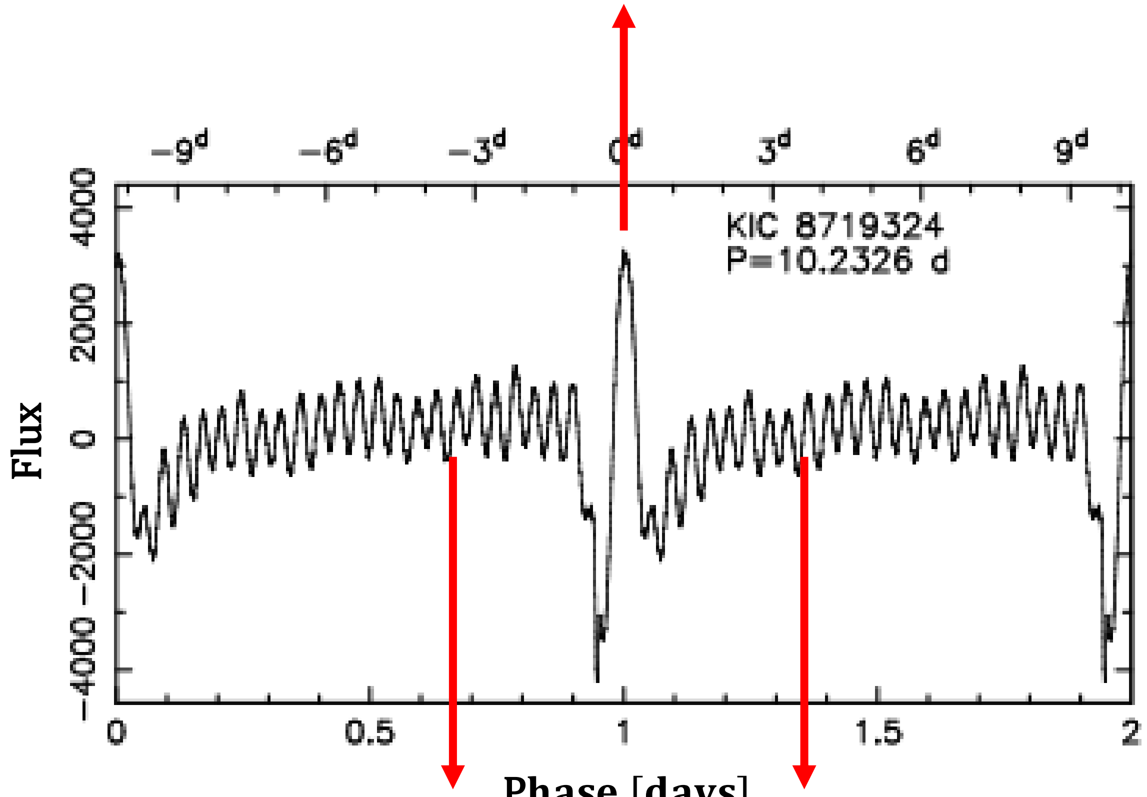
Marcussen et al. (2024)

$$\frac{da}{dt} \propto \frac{1}{Q}$$

"We still do not know where the tidal energy is actually dissipated." *Zahn & Goldreich* (1966)

高偏心率系统里的心跳星

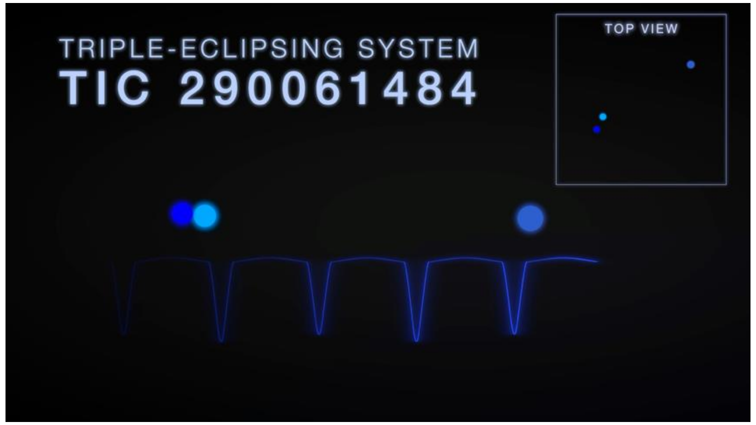
平衡潮所致



动力潮所致

(*Thompson et al.* 2012)

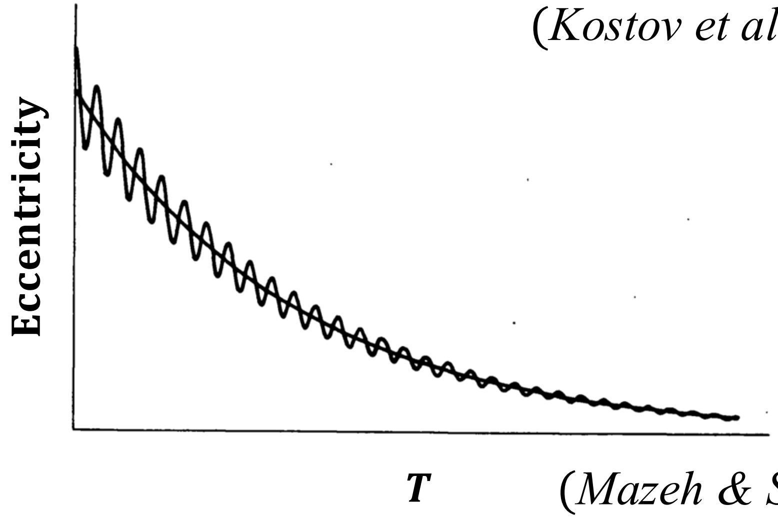
三星系统



$P_{\text{in}} = 1.8$ 天
$P_{\text{out}} = 24.5$ 天

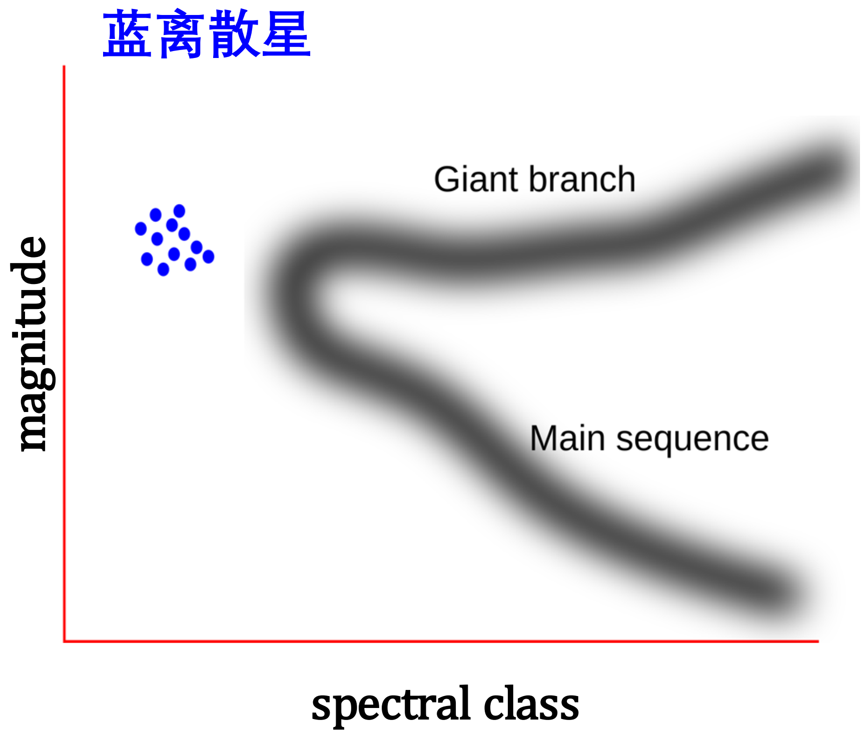
Credit: NASA

(*Kostov et al.*2024)

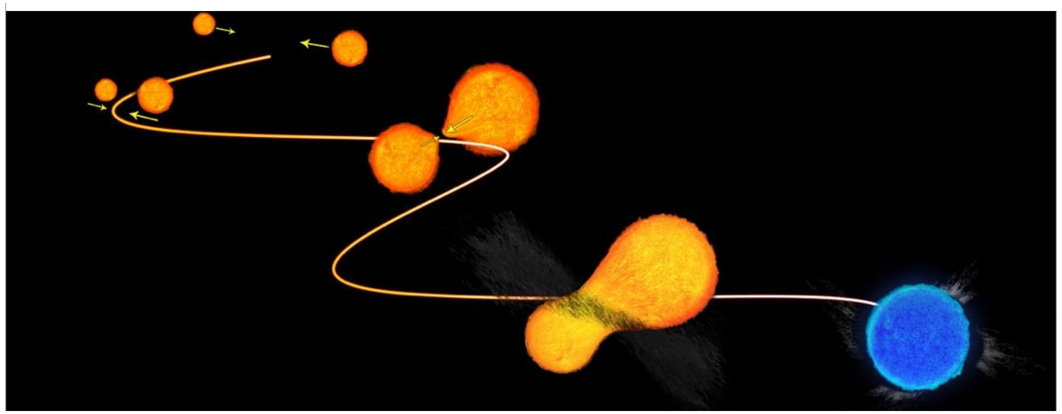


(*Mazeh & Shaham* 1979)

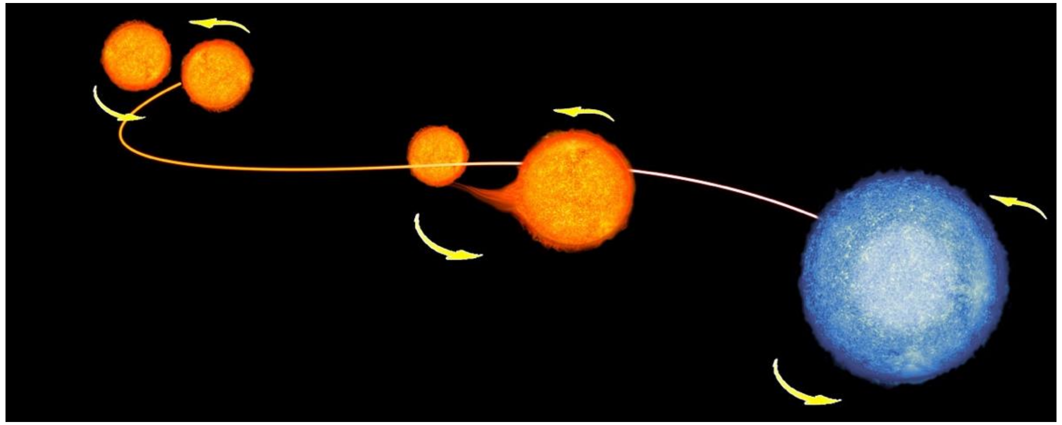
双星的物质转移与特殊恒星的形成



恒星直接碰撞 *Sills et al.* (2009)



Tian et al. (2006)
双星相互作用 *Xin et al.* (2015)



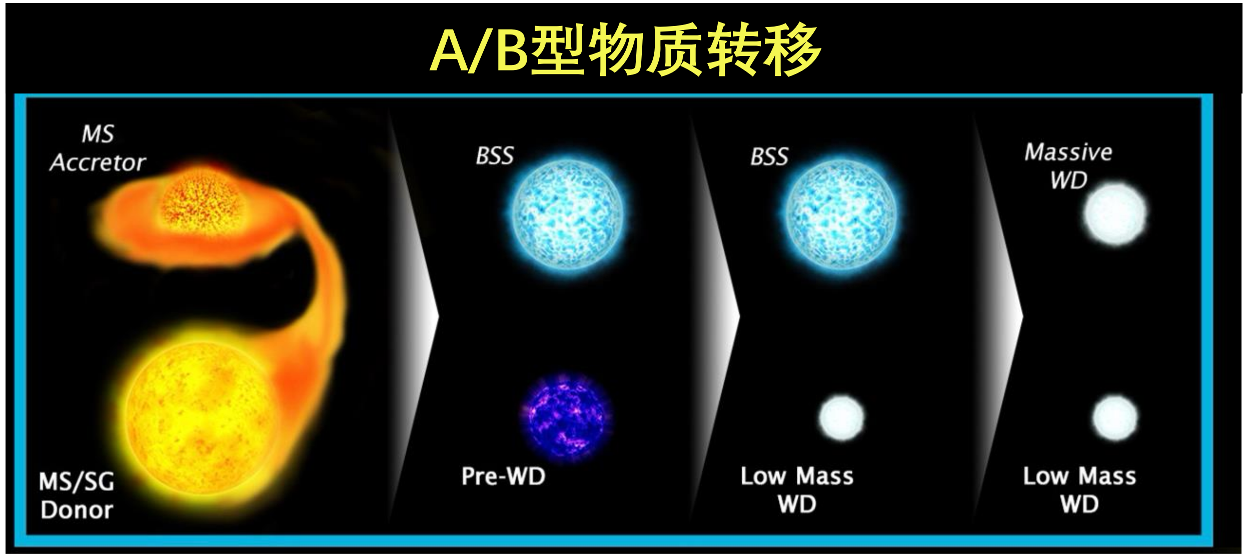
Credit: NASA/ESA

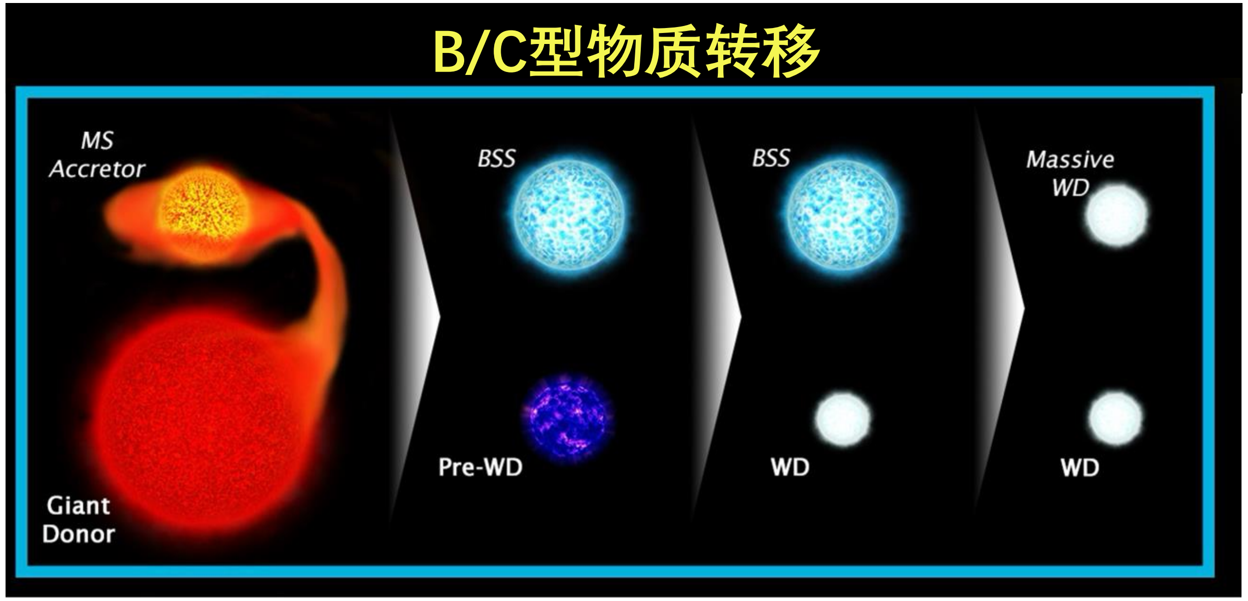
蓝离散星的形成机制

双星物质转移

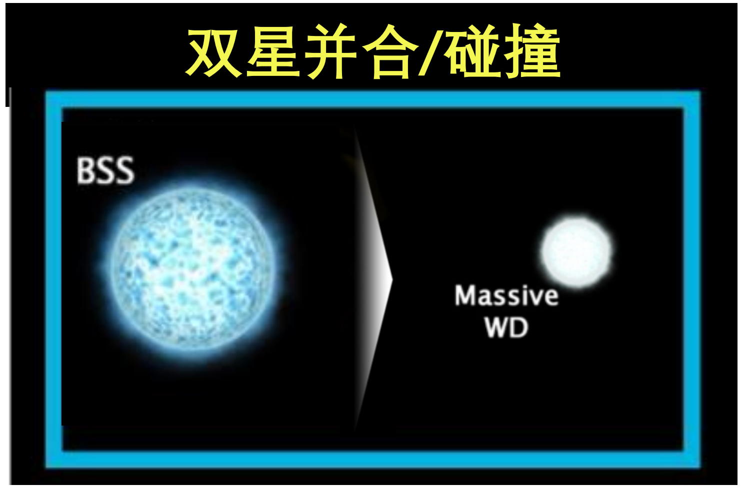
- A型物质转移：输质星在主序带阶段（核心氢燃烧阶段）发生物质转移
- B型物质转移：输质星在离开主序带后，但在核心氦燃烧结束前发生物质转移
- C型物质转移：输质星在核心氦燃烧结束后发生物质转移

Kippenhahn & Weigert (1967)

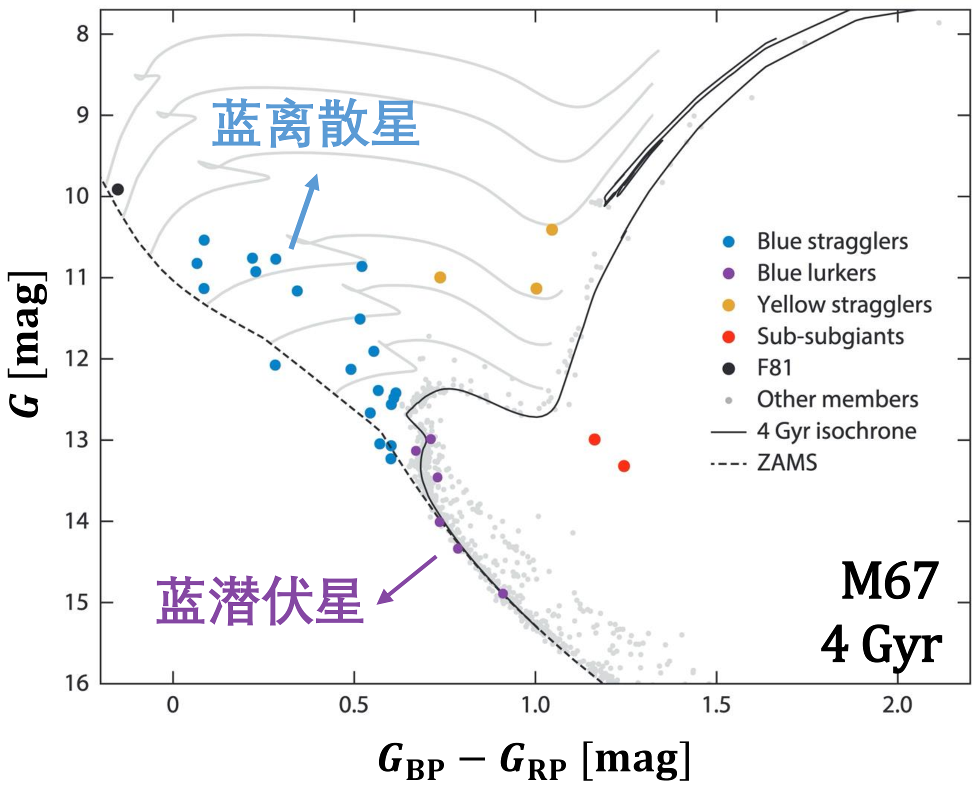




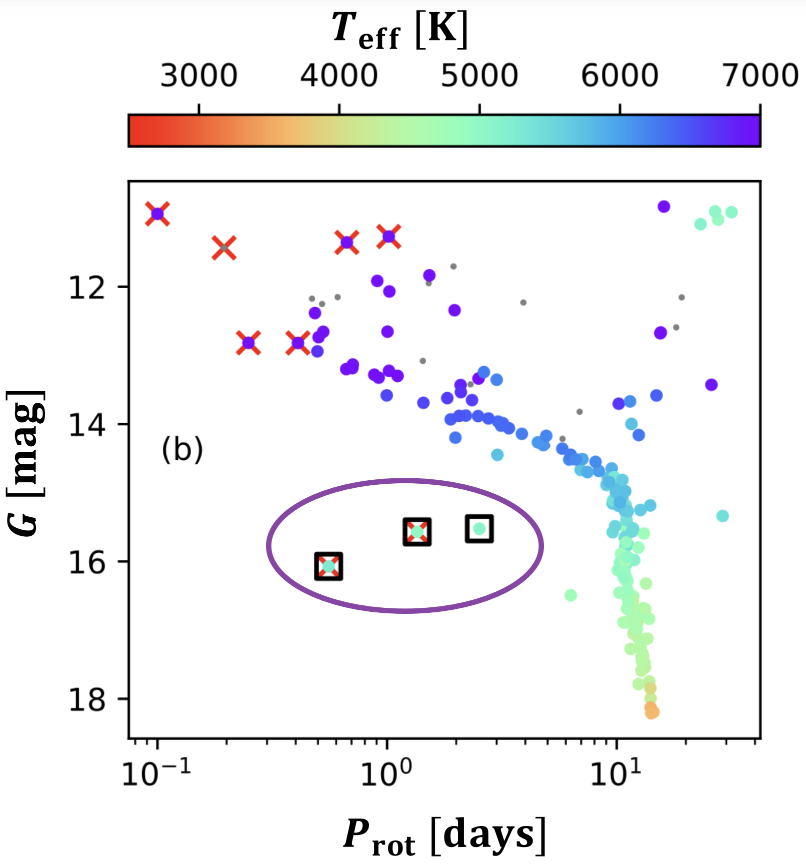
Jadhav (2022)



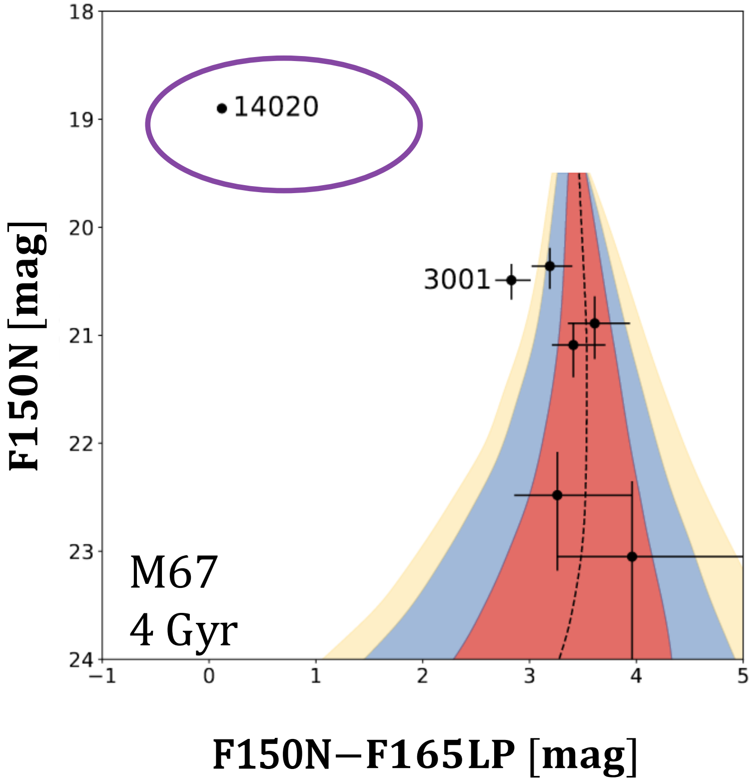
蓝潜伏星



(*Mathieu & Pols* 2025)



(*Jadhav et al.* 2026)



(*Nine et al.* 2023)

- 探测到高于平均水平的投影自转速率
- 证认出仅能通过物质转移过程形成的伴星
- 存在如仅能通过吸积物质所产生的化学元素丰度异常