

文章编号: 1000-8349(2008)03-0232-12



# T Tauri 型星及其类太阳活动

邢丽峰<sup>1</sup>, 李金增<sup>2</sup>

(1. 郑州轻工业学院 技术物理系, 郑州 450002; 2. 中国科学院 国家天文台, 北京 100012)

**摘要:** 该文从低质量恒星的形成、主序前演化、多波段测光和光谱观测及研究等方面, 着重介绍类太阳恒星的主序前演化特性、T Tauri 型星的分类、光变特性和光谱特征、弱发射线 T Tauri 型星 (WTTS) 的光学证认, 以及其光度变化与发射线轮廓变化间的内在联系。相关研究对于认识类太阳恒星的形成、早期及后续演化、类太阳活动特性和活动机理等具有重要意义。另外, 该文对国内外 T Tauri 型星观测和研究的现状进行了介绍, 同时也给出了国内学者近年来在相关领域进行观测研究的部分结果。

**关键词:** T Tauri 型星; 光度变化; 光谱特征

**中图分类号:** P182.2<sup>+</sup>8 **文献标识码:** A

## 1 引 言

T Tauri 型星为年轻 (小于 10 Ma) 的、小质量 ( $M < 2.5M_{\odot}$ ) 的、晚光谱型的 (一般晚于 G) 处于主序前演化阶段的类太阳恒星。通常依照其光谱中  $H\alpha$  发射线的强度来进行分类, 按照  $H\alpha$  等值宽度的不同, T Tauri 型星可分为经典 T Tauri 型星 (Classical T Tauri Star, 简称 CTTS) 和弱发射线 T Tauri 型星 (Weak line T Tauri Star, 简称 WTTS)。一般认为,  $H\alpha$  线的等值宽度  $EW(H\alpha) \geq 10 \text{ \AA}$  的 T Tauri 型星称作经典 T Tauri 型星。观测和研究还表明, 经典 T Tauri 型星除了在光学波段有较强的发射线之外, 还具有强的红外 (IR) 超和紫外 (UV) 超。经典 T Tauri 型星仍然被拱星盘或吸积盘所包围, 其中心星体还在从吸积盘中吸积物质, 这一观点已被大多数人所接受<sup>[1]</sup>;  $H\alpha$  发射线等值宽度  $EW(H\alpha) < 10 \text{ \AA}$  的 T Tauri 型星被称作弱发射线 T Tauri 型星。对大多数弱发射线 T Tauri 型星而言, 除了具有光学波段的辐射

**收稿日期:** 2007-08-16; **修回日期:** 2008-04-30

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目 (10503006); 郑州轻工业学院博士科研基金资助项目

外, 还具有强的软 X 射线和射电辐射。但是, 弱发射线 T Tauri 型星缺乏近红外 (NIR) 超和 UV 波段的辐射, 所以普遍认为大多数弱发射线 T Tauri 型星周围的吸积盘已经部分或者全部耗尽<sup>[2]</sup>。因此, 从经典 T Tauri 型星到弱发射线 T Tauri 型星可能存在一个时序演化的关系, 而且研究发现经典 T Tauri 型星主要发现于分子云致密区域。相比之下, 弱发射线 T Tauri 型星的空间分布则比较广, 而且并不局限于分子云致密区。然而, 也有观测结果表明, 在同一恒星形成区内发现的经典 T Tauri 型星与弱发射线 T Tauri 型星事实上具有相当的演化年龄, 因而两者也有可能是同时形成的。

小质量主序前恒星最显著的特征之一是其光度的变化。经典 T Tauri 型星光变的幅度可达数星等 (小于 3 mag)。但是经典 T Tauri 型星的光变一般不具严格周期性。经典 T Tauri 型星的光变, 尤其是偶发的、无固定周期的变化, 主要由吸积引起。当 (吸积) 盘中物质沿着由于较差自转而严重扭曲的磁力线自由下落到年轻星体表层时, 大量的引力势能转化为动能, 从而引起了恒星-吸积盘系统局部热斑, 热斑又随恒星的转动移进和移出观测者可视半球, 从而导致了恒星-吸积盘系统的周期性光变。经典 T Tauri 型星的光变还有一种可能, 是由 (可能存在的) 环绕恒星运动的尘埃或气体团块对恒星的遮掩引起, 或是由不稳定性吸积造成, 这时的光变则表现为不规则光变。然而, 由于掩星现象所造成的光变与由热斑存在而造成的光变对于恒星颜色的影响是不同的, 因此这两类光变是可以从实测上利用多色测光进行区分的。

弱发射线 T Tauri 型星光变与经典 T Tauri 型星的光变则有着明显的不同, 其光变幅度仅仅为十分之几个星等或更小 (小于 0.8 mag), 并且弱发射线 T Tauri 型星的光变是周期性的变化。这类光变主要或完全是由年轻恒星的强磁场所造成的恒星表面冷的黑子 (或黑子群) 引起。与太阳类似, 在恒星表面黑子多的时候其他活动现象也较为频繁。剧烈活动时, 黑子附近的光球中总会伴随有光斑出现, 黑子上空的色球中也总伴有谱斑, 并且谱斑附近常有珥。这些活动统称为类太阳活动。所以弱发射线 T Tauri 型星又被称作年轻的类太阳色球活动星。通过对弱发射线 T Tauri 型星活动周期的测定, 进而在测定光变周期的基础上, 建立黑子模型, 揭示色球活动与磁场、自转、对流和恒星年龄的关系, 探索耀斑的形成机理等, 对认识类太阳恒星形成早期及其一生的演化、其活动和活动机理具有深刻的意义。以下我们将从小质量恒星的形成及在主序前的演化、多波段测光、光谱观测以及研究等方面介绍小质量恒星在主序前的演化、T Tauri 型星的光变特征、光谱特征、弱发射线 T Tauri 型星的证认、以及其光度变化与发射线轮廓变化间的内在关系。

## 2 T Tauri 型星的形成和早期演化

按照恒星形成的双模式理论, 大质量恒星主要在巨分子云中形成, 而小质量恒星大多与小分子云成协。不过小质量恒星形成区和大质量恒星形成区之间并没有严格的分界线, 小质量恒星同时也可以产生大质量恒星的巨分子云中形成。Shu 等人<sup>[3]</sup>把孤立的小质量星在分子云中形成的过程分为可区分的 4 个阶段:

- (1) 由于双极扩散而导致磁场或湍动对分子云的支撑消失时, 在分子云中首先形成多个缓

慢运动的云核 (见图 1(a)) ;

(2) 被星周壳层和拱星盘包围着的原恒星开始在由内向外塌缩的分子云核中形成 (图 1(b)) , 被称为塌缩和物质下落阶段;

(3) 原恒星的星风从拱星盘的轴向喷发出来, 从而形成一个双极外向流。在这一演化阶段, 中心年轻星体继续从拱星盘中吸积物质 (图 1(c)) 。这一阶段被称为外流阶段;

(4) 物质的下落过程完全停止, 具有 1 个拱星盘的新生恒星终于显露出来 (图 1(d)) 。

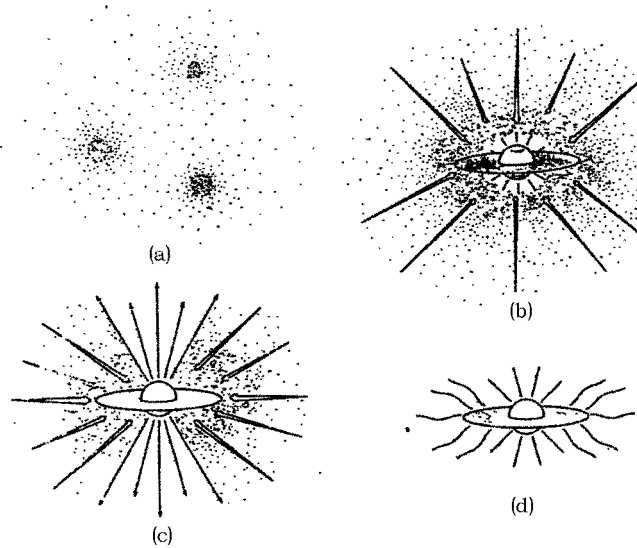


图 1 恒星形成的 4 个阶段<sup>[3]</sup>

在 4 个阶段中的第 3 个阶段, 随着原恒星年龄的增长, 星风的张角偏离两极方向逐渐变宽。当向外抛射物质的张角达到  $4\pi$  时, 原恒星将进入恒星形成的第 4 个阶段, 即吸积盘演化阶段, 也就进入 T Tauri 型星的阶段。此时, 中心的年轻天体在光学波段变得可见, 甚至在紫外波段也有可能观测到。

不过, 最近的研究表明, 来源于临近恒星形成区的超新星爆发等引起的激波<sup>[4]</sup>、偶发的巨型分子云团(块)碰撞<sup>[5,6]</sup>等均有可能引起分子云塌缩, 促使恒星形成。也就是说, 可能引发分子云塌缩的机制不是唯一的, 但是最终的结果是年轻的原恒星的诞生。所以孤立的小质量星在分子云中形成的触发机制也可能有多种, 这有待于进一步研究和证实。

综上所述, T Tauri 型星形成于分子云中, 由分子云核的塌缩而形成。随着吸积过程的继续, 原恒星的质量逐渐增加, 从吸积盘中吸积物质的强度随演化年龄的增加而逐渐减小。当恒星演化到达弱发射线 T Tauri 型星阶段时, 吸积过程基本停止, 吸积盘已大部分甚至全部消失。与此同时, 和吸积相伴随的原恒星双极物质抛射的张角逐渐变大, 中心年轻星体慢慢变得光学可见。随着恒星质量的增大和自引力收缩, 内部压力也逐渐增大, 当温度达到足以使其内部的氢产生聚合反应时, 恒星的辐射能量 99% 由氢的核燃烧提供, 自此恒星便进入了零龄主序 (ZAMS) 阶段。

### 3 T Tauri 型星的观测特征

#### 3.1 T Tauri 型星的光度变化

早在 1945 年, Joy<sup>[8]</sup> 就发现了这类不规则变星, 其光谱型为 G—M 型, 原型为 T Tauri, 统称为金牛座 T 型星。这类星的光度变化通常是不规则的, 变幅从十分之几星等到几个星等<sup>[9]</sup>。后来才发现金牛座 T 型变星分布在 H-R 图中主序带的右上侧, 位于 Hayashi 线上, 属于一类非常年轻的恒星。尽管 T Tauri 型星普遍存在光度的变化, 但是很难按照光变类型对这类星进行分类。下面我们分别介绍 T Tauri 型星光变周期的不同。

##### 3.1.1 长周期光变

FU Ori 型星的光变与激变变星的光变十分相似。FU Ori 型星光变 (有时也称为爆发) 为快速 (一般为几个月) 地、大幅度 (可达 6 mag) 地增亮。在随后的几年 (甚至更长的时间) 中, 已经增亮的 FU Orionis 型星要经过缓慢的过程逐步地变暗 (如图 2 所示)<sup>[9]</sup>。图 2 中给出了 3 颗 FU Ori 型星的光变曲线, 为了与 T Tauri 型星进行比较, 图中还绘出了一些典型 T Tauri 型星 (UZ Tau, EX Lup, VY Tau) 的光变曲线。

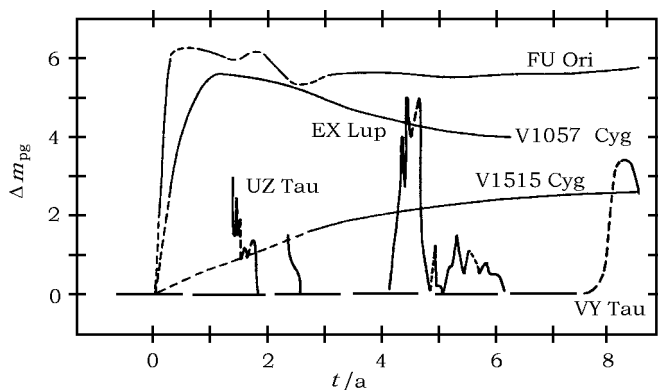


图 2 FU Ori 型星与 T Tauri 型星光变曲线的比较<sup>[9]</sup>

其中标有 UZ Tau、EX Lup 和 VY Tau 的为典型 T Tauri 型星的光变曲线, 而标有 FU Ori、V1057 Cyg 和 V1515 Cyg 的则是 FU Ori 型星的光变曲线

FU Ori 型星的爆发式光变, 主要由 FU Ori 型星从星体周围 (吸积) 盘中吸积物质过程中吸积率的快速变化 (典型的吸积率变化由  $10^{-7} \sim 10^{-4} M_{\odot} \cdot a^{-1}$ ) 引起。比如 V1057 Cygni 在爆发前就是一颗具有强发射线的经典 T Tauri 型星, 该星 1969 年 6 月开始变亮, 1970 年 7 月达峰值 ( $m_{pg}=10.5$ )。FU Ori 型星在快速增亮过程中, 其光谱型的变化证明了其吸积率的快速变化。然而, 在经典 T Tauri 型星中这类爆发式光变出现的几率和爆发的频繁程度目前尚不清楚, 还有待于通过进一步的观测研究去发现。

##### 3.1.2 中长周期光变

Herbst<sup>[10]</sup> 等通过对一个多目标源样本的长期联合测光观测, 按照引起光变的原因将中长周期的光变分成三种类型。目前, 对于 I 型和 II 型两种类型的研究较为充分, 已在多年观测研究的基础上建立了较完备的物理模型, 并成功揭示了这两种类型光变的物理本质。

## 1) I 型: 恒星表面黑子 (或黑子群) 随恒星的转动引起的光变

恒星表面黑子 (或黑子群) 随恒星的转动引起的光变被称为 I 型光变。由于中心星体在自引力收缩过程中角动量的守恒, 弱发射线 T Tauri 型星阶段年轻类太阳恒星的自转速度非常快, 磁活动极强, 表层黑子 (或黑子群) 较多、较大。因此, 对于弱发射线 T Tauri 型星的测光监测更容易观测到由于黑子 (或黑子群) 随恒星的转动而引起的光变。在 V 波段, 由恒星表面黑子 (或黑子群) 所引起的光变最大幅度可达 0.8 m, 在 I 波段可以达到 0.5 m。另外, T Tauri 型星色指数的变化也充分证明, 表面黑子的存在是引起弱发射线 T Tauri 型星光变的主要原因, 这同时也为我们提供了一种获取恒星自转周期的方法。图 3 给出了 6 颗弱发射线 T Tauri 型星的光变曲线<sup>[11]</sup>。对 V410 Tau 进行的长期测光观测还发现, V410 Tau 表层的整个黑子结构在过去的 15 年中保持着惊人的不变。另外, 对于弱发射线 T Tauri 型星的监测, 还可以发现另一种诱人的现象, 那就是在 U 波段, 有时甚至在 B 波段也能观测到的短时标的耀发。

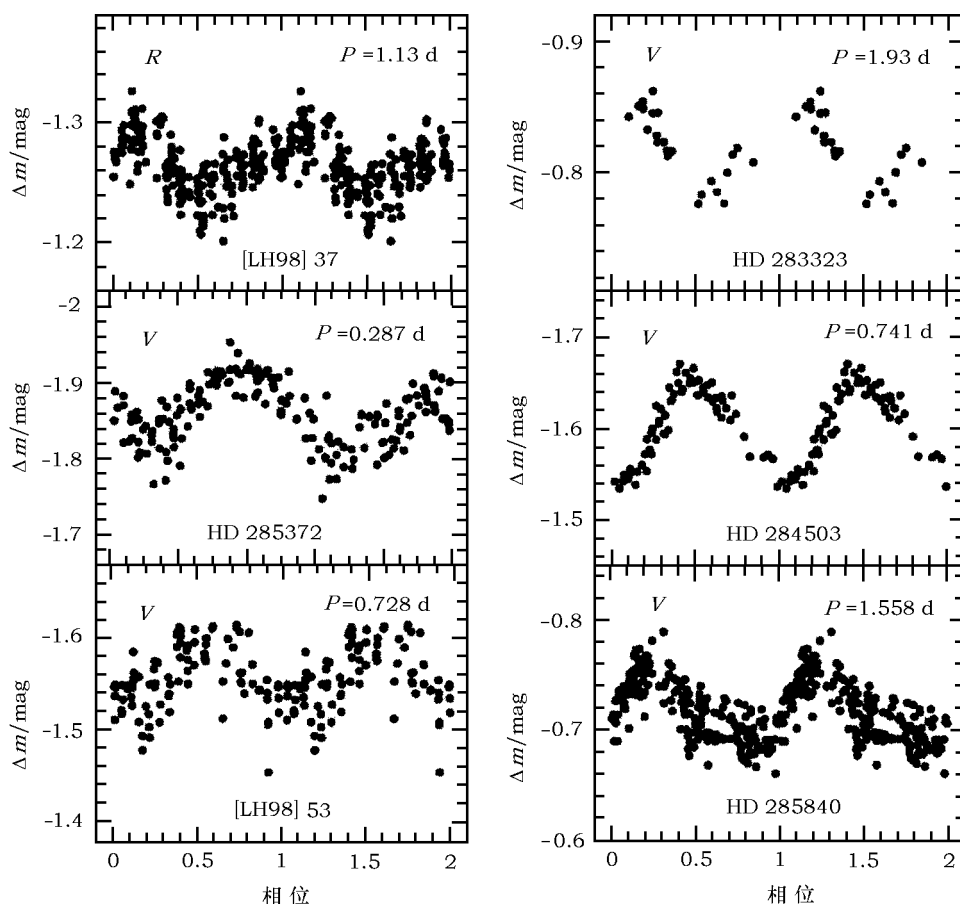


图 3 弱发射线 T Tauri 型星 [LH98] 37, HD 285372, [LH98] 53, HD 283323, HD 284503 和 HD 285840 的光变曲线<sup>[11]</sup>

2) II 型和 II<sub>P</sub> 型: 恒星表层热斑和黑子引起的光变

由恒星表层热斑所引起的光变称为 II 型光变, 通常表现为不规则光变, 而由恒星表层

热斑与黑子共同引起的光变被称为 II<sub>p</sub> 型光变, 通常表现为周期性(但周期不固定的)光变。这两种光变在经典 T Tauri 型星的测光观测中都能观测到, 但引起变化的原因并不完全相同。II 型光变是在经典 T Tauri 型星系统中, 由于吸积引起的局部热斑随恒星的转动移进和移出观测者可视半球, 从而导致的恒星-吸积盘系统的光变。随着吸积率的变化, 形成的热斑温度、大小和形状又各不相同, 光变的幅度也随着变化。II<sub>p</sub> 型光变则是由中心星体表层形成的黑子(群)与吸积造成的热斑随恒星自转共同引起(参阅参考文献[12,13])。经典 T Tauri 型星表层的黑子(群)的形成机制与弱发射线 T Tauri 型星相同, 所引起的光变也类似。然而, 由于经典 T Tauri 型星表层除了黑子(群)之外还存在热斑, 而且热斑的位置具有不确定性, 因此在周期性光变的基础上附加了不规则的成分。与表面黑子引起的光变相比, 经典 T Tauri 型星表层热斑引起的光变时标短、幅度大(约数星等), 而且在 B 和 U 波段更容易被观测到。

例如, 国内天文学家就曾在 2000 年利用中色散光谱监测手段, 成功观测到 DF Tau 的一次吸积爆发的全过程<sup>[14]</sup>(8 天)。在此期间, DF Tau 光谱中 Balmer 线系的高阶发射线急剧异常增强, 并表现出快速增强的反 P Cygni 轮廓, 表明中心天体对于星周物质存在着强烈的吸积。随着不稳定性吸积过程的结束, 表征强吸积过程的光谱特征消失。Balmer 线系的高阶发射线线宽异常增大, 发射强度也达到最高值。接下来更是出现了戏剧性变化, 所有 Balmer 线系的高阶发射线演变为异常展宽的强吸收。之后, DF Tau 的蓝端光谱则依照预期表现出较强的星风特性, 也就是在 Balmer 线系高阶发射线中出现了 P Cygni 轮廓。推论表明, 在整个不稳定性吸积过程中, 随着强吸积过程的结束, 事实上在中心星周围产生了一个短时标的弥散云(Diffuse nebula), 此时所有 Balmer 线系高阶发射线表现为强吸收, 随之而来的星风的增强则直接导致了该弥散云的消失。据估算, 在整个不稳定性吸积过程中 B 和 V 波段的光变分别达到了 8 mag 和 6 mag。这次对于经典 T Tauri 型星不稳定性吸积爆发全过程的成功监测代表了相关观测研究所取得的最详实资料, 也是最成功的一次。Li<sup>[15]</sup>给出了该不稳定性吸积过程中有代表性的中色散蓝端特征光谱图。

### 3) III 型: 恒星周围环恒星的尘埃或气体团引起的光变

环恒星的气体(尘埃)团遮掩恒星引起的光变称为 III 型的光变<sup>[16]</sup>。恒星周围可能存在环恒星的尘埃或气体团, 这些环恒星的尘埃或气体团绕恒星运动时可能由遮掩而引起恒星的光变。在对经典 T Tauri 型星的测光观测中, 经常观测到这种气体(尘埃)团遮掩恒星的现象。对于 Herbig Ae 型星的测光观测有时也能发现这类掩星现象。III 型光变的主要特征是, 恒星表面温度(如 B-V 等色指数)并没有明显变化, 而恒星的光度却发生了较大幅度的变化。在对早于 K 型的经典 T Tauri 型星 AA Tau<sup>[16]</sup>和 UY Aur<sup>[17]</sup>(两者光谱型均为 K7<sup>[18]</sup>)的测光观测都观测到了气体(尘埃)团对恒星的掩星现象。而且, 近期对弱发射线 T Tauri 型星 KH 15D<sup>[19]</sup>的监测中, 也观测到了类似的现象。

#### 3.1.3 短时标的光变

T Tauri 型星的短时标光变指的是恒星光度的连续变化或者长达数小时的小幅度变化(Gahm 1995)<sup>[20]</sup>。有时也有强的快速的光度变化, 但是在 T Tauri 型星的观测中比较少见, 像 Balmer 连续谱和发射线的耀发( $10^{26} \sim 10^{27}$  J)和宽带滤光片可观测到的较平滑的变化(能量达数倍的  $10^{28}$  J), 都属此类。

综上所述,对弱发射线 T Tauri 型星进行的测光监测研究,不但能够获得弱发射线 Tauri 型星的光变周期,同时还可能发现一些偶发现象,比如耀发、吸积爆发、尘埃或气体团对中心星体的掩星,甚至还可能观测到恒星的并合,以及行星体的吞并等一些短时标现象。

### 3.2 T Tauri 型星的光谱观测特性

#### 3.2.1 经典 T Tauri 型星的光谱特征

早在 1962 年 Herbig<sup>[21]</sup> 就总结出了鉴别经典 T Tauri 型星的光学光谱标准:

- 1) 氢的巴耳末线和 Ca II H、K 线均为发射线;
- 2) 光谱观测中可观测到 Fe I  $\lambda\lambda 4063$ , 4132 反常发射线;
- 3) 在一些经典 T Tauri 型星的光谱中存在禁线 [O I] 和 [S II];
- 4) 光谱线中 Li I  $\lambda 6707$  吸收线特征明显。

图 4 给出 3 颗经典 T Tauri 型星与一颗弱发射线 T Tauri 型星的中色散光谱 (3 200~8 800 Å)。其中的 DN Tau 为一颗 M0 经典 T Tauri 型星, DF Tau 是一颗被外围的环恒星盘包围着的 M0 型的经典 T Tauri 型星, DR Tau 为一颗 K5 型经典 T Tauri 型星。作为比较,图中给出了一颗光谱型为 K7 的弱发射线 T Tauri 型星 Tap 57(04525+3016)的光谱<sup>[23,24]</sup>。如图中所示,经典 T Tauri 型星通常有着较强的巴耳末线。

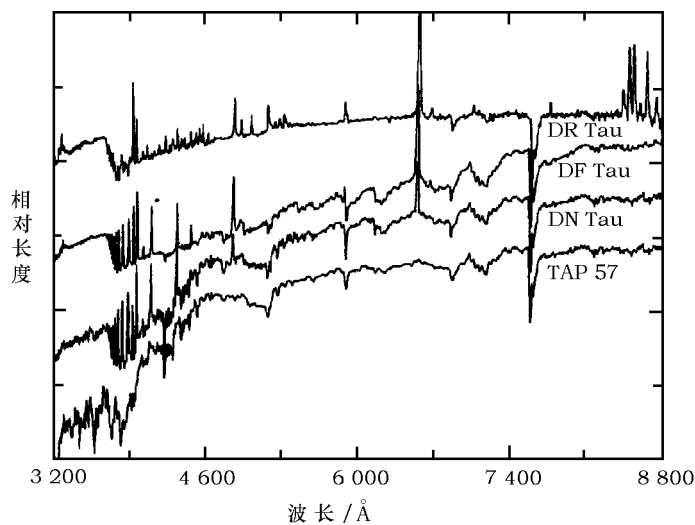


图 4 4 颗晚 K 或早 M 型 T Tauri 型星光谱<sup>[22]</sup>

经典 T Tauri 型星的  $H\alpha$  线一般很强,而且轮廓千变万化<sup>[25-31]</sup>。 $H\alpha$  发射线通常具有几百  $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$  的展宽<sup>[32,33]</sup>,而且往往存在着不同宽度和深度的吸收成分,其吸收成分的位置或谱线结构随着恒星的自转而变化。按照  $H\alpha$  线谱线轮廓的不同,可分为以下 4 种类型<sup>[34]</sup>。

- 1) I 型: 发射线两侧对称,其上没有或者仅有小的吸收成分(单峰)。
- 2) II 型: 发射线轮廓为双峰,其第 2 峰仅仅超过第 1 峰高度的一半。也就是吸收成分落到了发射线的一侧的中部或者偏下的部分。若吸收变弱的话,又可退化为单峰。
- 3) III 型:  $H\alpha$  线轮廓结构显示为双峰,但是第 2 个峰的强度远小于第 1 个峰的强度。
- 4) IV 型:  $H\alpha$  线表现为 P Cygni 或者反 P Cygni 轮廓。吸收成分足够强时,  $H\alpha$  线的第

2 个峰会完全消失, 甚至表现为局部低于连续谱的吸收。这些  $H\alpha$  线轮廓表明, 经典 T Tauri 型星的  $H\alpha$  线既包括发射成分, 又含有蓝移或红移的吸收线成分。

不仅经典 T Tauri 型星的  $H\alpha$  线, 其 Ca II 和 Na D 线有时也显示出蓝移或红移的吸收成分。观测表明, 多颗经典 T Tauri 型星的光谱在 Ca II 和 Na D 线  $50\sim 100\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$  速度位置上具有明显的蓝移吸收成分。

### 3.2.2 FU Ori 型星的光谱观测特征

FU Ori 型星的大幅度的增亮 (大约 6 mag), 以及随后在几年甚至几十年中漫长的变暗过程, 充分说明了爆发过程中其吸积率的快速变化。其吸积率的快速变化使得 FU Ori 型星的光谱特性同样发生着急剧的变化。如, V1057 Cyg 在 1970 年的爆发之前是一颗具有 (经典 T Tauri 型星特有的) 强发射线的 T Tauri 型星。其光度急剧增加后, 光谱快速地从经典 T Tauri 型光谱转变为 A-F 型超巨星光谱。之后, 随着光度的缓慢下降, 光谱又逐渐变为晚 G 型超巨星光谱 (G2-5 I b-II) [9]。除了急剧变化, FU Ori 型星的另一光谱特性则是其吸收线的双线结构 [35]。

到目前为止, 虽然只对少数几颗 FU Ori 型星爆发的现象进行了统计, 但是研究结果表明 FU Ori 型爆发很可能代表着经典 T Tauri 型星特定演化阶段的频发事件 [9], 尽管这类爆发出现的几率和爆发的频繁程度目前并不清楚。

### 3.2.3 弱发射线 T Tauri 型星的光谱观测特征

弱发射线 T Tauri 型星与经典 T Tauri 型星有着明显的不同。尽管弱发射线 T Tauri 的吸积过程已经停止。但是, 由于快速的自转弱发射线 T Tauri 型星具有很强的类太阳活动。弱发射线 T Tauri 型星的类太阳活动与主序、晚 (光谱) 型星显示出的磁活动十分相似, 但却具有着较快的自转速度。因此, 弱发射线 T Tauri 型星具有更显著的磁活动, 其表层形成了更多、更大的黑子 (或黑子群), 伴随黑子的形成而产生的类太阳活动 (如耀发、色球活动和星冕辐射等) 也更加剧烈。弱发射线 T Tauri 型星的的发射线由色球层 (色球活动、星冕、谱斑、耀斑等) 产生。弱发射 T Tauri 型星的快速的自转和强的类太阳活动已经在光谱观测中得到有力的证明 [22,36,37]。

与经典 T Tauri 型星相比, 弱发射线 T Tauri 型星的光谱发射不再受到星周吸积 (盘) 和吸积过程的影响, 但是其发射线强度 (等值宽度) 和轮廓却可以随着恒星活动 (耀发、色球活动等) 的强度、以及活动区 (谱斑、黑子、星冕、耀斑等) 转进和转出可视半球的自转而变化。大量的光谱观测表明, 弱发射线 T Tauri 型星的主要谱线 (如  $H\alpha$  和 Ca II H 和 K 等) 随恒星的自转其强度和轮廓不断地变化。正如参考文献 [38] 中图 3 所示, 当恒星表层黑子随着恒星自转背离可视半球, 恒星最亮时,  $H\alpha$  发射线轮廓低而平坦。当恒星表层黑子随着恒星自转移进可视半球, 恒星亮度降低,  $H\alpha$  线轮廓低而平坦的连续谱之上附加了窄而尖的发射, 并且窄的发射落在了底部平坦连续谱上的左侧 (即表现为蓝移)。反之, 当恒星表层黑子随着恒星自转移出可视半球, 恒星逐渐变亮时,  $H\alpha$  线轮廓上端窄的发射峰 (窄线部分) 落在底部较平坦部分上的右侧 (既表现为红移)。当最大的黑子 (或黑子群) 从可视半球的恒星表面通过时, 恒星最暗, 这时窄的发射线峰径向速度很小, 窄线的尖峰落在底部较平坦部分上的中央 (即无红移, 也无蓝移)。Fernandez 和 Miranda [38] 还给出了弱发射线 T Tauri 型星  $H\alpha$  等值宽度随恒星光变周期变化的关系 (见参考文献 [38] 中图 4)。



## 4 T Tauri 型星的证认

经过上述几个部分的叙述, 我们已经对经典和弱发射线两种 T Tauri 型星各自的光变、光谱等特征, 以及两者在测光和光学光谱观测上的区别有了一定的认识。为了能够更好地认识经典和弱发射线两种 T Tauri 型星及其特征, 下面我们将介绍量化的主序前星的光谱分类标准。

### 4.1 T Tauri 型星的质量和光谱型

因为恒星演化的快慢主要取决于恒星的质量, 所以首先应该限定 T Tauri 型星的质量范围。考虑到质量在  $2\sim 3M_{\odot}$  以上的恒星经过约 10 Ma 的演化就已经到达了零龄主序阶段<sup>[39,40]</sup>并演化成晚 B 和早 A(光谱) 型主序恒星。多数对 T Tauri 型星演化的研究, 所涉及到的 T Tauri 型星其质量约为  $1M_{\odot}$  或更小, 在此我们界定  $2M_{\odot}$  作为 T Tauri 型星质量的上限。

考虑到除了掩食双星, 恒星的质量不能直接通过观测得到, 通常采用恒星的有效温度或者恒星的光谱型限定恒星的质量。根据恒星在主序前的演化规律<sup>[40-42]</sup>, 以  $2M_{\odot}$  作为 T Tauri 型星质量的上限, T Tauri 型星合适的温度上限应在  $\lg T = 3.7$  左右。在 T Tauri 型星有效温度与光谱型关系中, 5 080 K 与 K1 型相对应<sup>[43]</sup>。考虑到其他研究者如 Martín 等人<sup>[44]</sup> 所给出的温度与光谱型关系, 具有相同 V 星等的恒星的有效温度比 Cohen 和 Kuhi 所给的高出近 150 K, 所以我们可限定 T Tauri 型星温度的上限为 5 250 K, 所对应的光谱型为 K0 型。

然而, 按照 H-R 图显示, 经过引力收缩后的 T Tauri 型星, 其表层温度有一定的增加。所以弱发射线 T Tauri 型星或者 Post-T Tauri 型星的光谱型应与收缩前稍有不同, 或者说其光谱型应早于 K0 型星, 接近于 G 型的零龄主序恒星。这样, T Tauri 型星光谱型上限应为 G 型。

Martín 等人<sup>[45]</sup> 对昴星团(年龄约 100 Ma) 中年轻的主序恒星的研究表明, 光谱型晚于 M6.5 的褐矮星其内外热交换与太阳类似, 也为完全的对流传热。但是这些恒星被归类为褐矮星。Martín 等人<sup>[45]</sup> 以褐矮星为界, 认为褐矮星对应的光谱型 M6.5 或更晚。因此, 在此我们限定 T Tauri 型星的光谱型为早于 M6。

### 4.2 经典 T Tauri 型星的证认

对于经典 T Tauri 型星, 由于其发射线特点明显<sup>[21,37]</sup>, 再加上连续谱特征<sup>[46,47]</sup>, 证认经典 T Tauri 型星比较容易。若以  $H\alpha$  线的等值宽度为标准区分经典和弱发射线 T Tauri 型星, 还应考虑双星系统以及恒星的耀发活动等对  $H\alpha$  线的等值宽度的影响。所以, 一般情况下不仅以  $H\alpha$  线的等值宽度为标准去区分经典 T Tauri 型星和弱发射线 T Tauri 型星, 还会附加紫外超、红外超以及光谱中的禁线发射等作为分类的依据。但是在实际的应用中, 如果确实缺少其他数据并且相关研究主要以统计分析为目的, 那么依靠  $H\alpha$  线的等值宽度对 T Tauri 型星进行分类还是很方便的。对于 K 型星, 由于单星和双星的色球活动引起的  $H\alpha$  线等值宽度的变化, 使得  $H\alpha$  线的等值宽度一般不超过  $5 \text{ \AA}$ , 因而以  $5 \text{ \AA}$  作为弱发射线 T Tauri 型星和经典 T Tauri 型星的分类标准就足够了<sup>[47,48]</sup>。对于 M 型星, 由于年轻疏散星团星和场星(零龄主序)的  $H\alpha$  线的等值宽度往往强于  $5 \text{ \AA}$ <sup>[49,50]</sup>, 在分类时需要对其  $H\alpha$  线的等值宽度进行相应的调整。对于早 M 型星的分类, 取约  $10 \text{ \AA}$  较为可靠, 而对于晚 M 型星应以约  $20 \text{ \AA}$  作为标准。

### 4.3 弱发射线 T Tauri 型星的证认

对于弱发射线 T Tauri 型星而言, 因缺乏经典 T Tauri 型星所具有的吸积盘以及吸积过程中

所表现出的光谱特征, 其光谱中仅有强的 Li I  $\lambda 670.8$  吸收线作为证认的主要依据。以往的观测研究实际上也正是主要依赖 Li I  $\lambda 670.8$  来证认和发现新的弱发射线 T Tauri 型星。利用 Li I  $\lambda 670.8$  吸收线强度来证认弱发射线 T Tauri 型星, 一方面是受到现代 CCD 探测器广泛应用的支持, 另一方面就是 Li<sup>2</sup> 的聚合温度较低, 因而其丰度可作为恒星年龄较有效的指示器<sup>[21,44,51,52]</sup>。在恒星形成初期, 同光谱型的类太阳主序前恒星理论上有着相同的 Li 丰度  $\lg N(\text{Li}) = 3.1 \pm 0.1$  (通常以  $\lg N(\text{H}) = 12$ ), 并且其 Li 丰度与星际物质中的 Li 丰度基本相同。Martín 等人<sup>[44]</sup> 的观测结果就表明, 主序前恒星表层的 Li 丰度没有明显的损耗。

与此同时, 理论和模型的研究也得到相同的结论, 对于年龄小于 5 Ma 的年轻恒星, 其 Li 损耗小于恒星形成初期 Li 丰度的 5%, 并且 Li 的损耗与恒星质量的大小无关<sup>[39,41,42,53]</sup>。对于质量小于  $0.5M_{\odot}$  的年轻恒星, 直到年龄大于 10 Ma, 其 Li 也并没有明显的损耗。对于质量接近  $0.5M_{\odot}$  的 T Tauri 型星的研究表明, 在弱发射线 T Tauri 型星阶段, 仍保持着最初恒星形成时的 Li 丰度<sup>[54]</sup>, 因此在恒星光谱中有很强的 Li I  $\lambda 670.8$  吸收线特征。

Martín<sup>[54]</sup> 考虑到, 万有引力和其他微小的扰动对 Li 丰度的影响都很小。在考虑了影响 Li 丰度的主要因素 (温度) 以后, 将对应于 Li 丰度最小值的 Li 线等值宽度作为弱发射线 T Tauri 型星证认的依据。Wichmann 等人<sup>[55]</sup> 则以处于零龄主序的昴星团作为弱发射线 T Tauri 型星光学证认中 Li I 吸收线强度的参考值, 并给出了弱发射线 T Tauri 型星  $W_{\text{Li}} - T_{\text{eff}}$  关系 (见参考文献 [55] 中图 2)。

此外, 研究表明, T Tauri 型星是强的 X 射线辐射源, 因此可以利用其 X 射线特性来进行弱发射线 T Tauri 型星候选体的选取并进行后续光学证认, 并通过测光监测和光谱观测等手段对类太阳恒星的早期演化进行较为系统的研究。近年来国内学者在相关领域的观测研究取得了显著进展, 一方面通过对 X 射线选候选体的中、高色散光谱观测, 证认了一大批弱发射线 T Tauri 型星<sup>[56,57]</sup>。另一主面用多波段测光监测测定了一些弱发射线 T Tauri 型星的自转周期, 通过分析得到了类太阳恒星早期演化的一些特性<sup>[11]</sup>。观测证明, 自转较快的小质量恒星与自转较慢的恒星相比, 前者具有更强的 X 射线辐射<sup>[58]</sup>。但是, 对于自转速度极快 (ultra-fast) 的源, 其自转和 X 射线辐射强度之间并没有明显的相关性。根据小质量恒星自转周期与演化年龄之间的关系, Xing 等人<sup>[59]</sup> 尝试给出了小质量恒星自转周期和锂丰度的关系。研究发现, 在主序前阶段 Li I 吸收线的等值宽度随恒星自转速度的变快而变小; 然而当恒星演化到零龄主序以后, Li 线的等值宽度则随恒星自转的变慢而变小<sup>[59]</sup> (见参考文献 [59] 中图 2 和图 5)。利用这一关系, 有可能可以更为有效地确定恒星的演化年龄。

## 参考文献:

- [1] Beckwith S V, Sargent A I, Chini R S, et al. AJ, 1990, 99: 924
- [2] Walter F M. ApJ, 1986, 306: 573
- [3] Shu F H, Adams F C, Lizano S. ARA&A, 1987, 25: 23
- [4] Thomas P, Hans Z. Proceedings of the International Astronomical Union, Cambridge University Press, 2006, 2: 270
- [5] Storch-Bergmann T, Ho L C, Schmitt H R, eds. Proceedings IAU Symposium, 2004: 222
- [6] Cen R. ApJ, 2005, 624: 485
- [7] Braun J M, de Boer K S, Vallenari A. AGAb, 1997, 13: 76

- [8] Joy A H. *ApJ*, 1945, 102:168
- [9] Herbig G H. *ApJ*, 1977, 217: 693
- [10] Herbst W, Herbst D K, Grossman E J, et al. *AJ*, 1994, 108: 1906
- [11] Xing L F, Zhang X B, Wei J Y. *ChJAA*, 2006, 6: 716
- [12] Vrba F J, Rydgren A E, Chugainov P F, et al. *AJ*, 1989, 97: 483
- [13] Vrba F J, Chugainov P F, Weaver W B, et al. *AJ*, 1993, 106: 1608
- [14] Li J Z, Rector T A. *NewA*, 2007, 12: 441
- [15] Li J Z, Ip W H, Chen W P, et al. *ApJ* 2001, 549:L89
- [16] Bouvier J, Chelli A, Allain S, et al. *A&A*, 1999, 349: 619
- [17] Ménard F, Bastien P. In *Circumstellar Matter, Proceedings IAU Symp.* Appenzeller I, Jordan C, eds. 1987: 133
- [18] Gullbring E, Hartmann L, Briceno C, et al. *ApJ*, 1998, 492: 323
- [19] Barge P, Viton M. *ApJ*, 2003, 593: 117
- [20] Gahm G F, Lodén K, Gulbring E, Hartstein D. *A&A*, 1995, 301: 89
- [21] Herbig G H. *Advances Astron, Astrophys.* 1962, 1: 47
- [22] Bertout C. *ARA&A*, 1989, 27: 351
- [23] Feigelson E D, Jackson J M, Mathieu R D. *AJ*, 1987, 94: 1251
- [24] Walter F M, Brown A, Mathieu R D, et al. *AJ*, 1988. 96: 297
- [25] Kuhl L V. *ApJ*, 1964, 140: 1409
- [26] Kuhl L V. In *Protostars and Planets*, Gehrels T ed. Tucson: Univ. Ariz. Press, 1978: 708
- [27] Ulrich R K, Knapp G R. *ApJ*, 1979, 230: 99
- [28] Schneeberger T J, Worden S P, Wilkerson M S. *ApJS*, 1979, 41: 369
- [29] Hartmann L, MacGregor K B. *ApJ*, 1982, 259: 180
- [30] Mundt R, Giampapa M S. *ApJ*, 1982, 256: 156
- [31] Mundt R. *ApJ*, 1984, 280: 749
- [32] Beals C S. *Publ. Dominion Astrophys. Obs*, 1950, 9: 1
- [33] Frinkenzeller U, Mundt R. *A&AS*, 1984, 55: 109
- [34] Reipurth B, Pedrosa A, Lago M T V T. *A&AS*, 1996, 120: 229
- [35] Hartmann L, Kenyon S J, Hewett R, et al. *ApJ*, 1988, 338: 1001
- [36] Petrov P, Dummmler R, Ilyin I, et al. *A&A*, 1998, 331: 53
- [37] Appenzeller I, Mundt R. *A&AR*, 1989, 1: 291
- [38] Fernandez M, Miranda L F. *A&A*, 1998, 332: 629
- [39] D'Antona F, Mazzitelli I. *ApJS*, 1994, 90: 467
- [40] Palla F, Stahler S W. *ApJ*, 1993, 418: 414
- [41] Forestini M. *A&A*, 1994, 285: 473
- [42] Martin E L, Claret A. *A&A*, 1996, 306: 408
- [43] Cohen M, Kuhl L V. *ApJS*, 1979, 41: 743
- [44] Martin E L, Rebolo R, Magazzu A, et al. *A&A*, 1994, 282: 503
- [45] Martin E L, Rebolo R, Zapatero-Osorio M R. *ApJ*, 1996, 469: 706
- [46] Kenyon S J, Hartmann L. *ApJ*, 1987, 323: 714
- [47] Strassmerier K G, Fekel F C, Bopp B W, et al. *ApJS*, 1990, 72: 191
- [48] Montes D, Fernandez-Figueroa M J, De Castro E, et al. *A&A*, 1995, 294: 165
- [49] Prosser C F. *AJ*, 1994, 107: 1422
- [50] Zapatero-Osorio M R, Rebolo R, Martin E L, et al. *A&A*, 1996, 305: 519
- [51] Bodenheimer P. *ApJ*, 1965, 142: 459
- [52] Magazzu A, Rebolo R, Pavlenko I V. *ApJ*, 1992, 392: 159
- [53] Bildsten L, Brown Edward F, Matzner Christopher D, et al. *ApJ*, 1997, 482: 442
- [54] Martin E L. *A&A*, 1997, 321: 492

- [55] Wichmann R, Covino E, Alcalà J M, et al. MNRAS, 1999, 307: 909
- [56] Li J Z, Hu J Y. A&AS, 1998, 132: 173
- [57] Li J Z, Hu J Y, Chen W P. A&A, 2000, 356: 157
- [58] Xing L F, Zhao S Y, Su W, et al. ChJAA, 2007, 4: 551
- [59] Xing L F, Shi J R, Wei J Y. NewA, 2007, 12: 265

## T Tauri Stars and their Solar-Type Activity

XING Li-feng<sup>1</sup>, LI Jin-zeng<sup>2</sup>

(1. Department of Technology and Physics, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China;

2. National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China)

**Abstract:** T Tauri stars (TTS) are young, solar mass ( $M < 2.5M_{\odot}$ ) stars, with ages of less than 10 Ma. The T Tauri phase represents a more evolved stage of the pre-main sequence evolution of low mass stars. According to their spectral features in the optical, T Tauri stars are classified as classical TTS (CTTS) and weak-lined, or naked TTS (WTTS), which corresponds to class II and class III sources, respectively, in the infrared classification scheme. CTTS used to show strong emission lines, and are usually much brighter in the infrared than other stars of similar mass. Weak-line T Tauri stars have H $\alpha$  lines in emission, but at strengths less than 10. WTTSs are believed to have no disk or at most a relic disk, and often suffer from much lower circumstellar extinction. They are of particular interest as the study of which provides important insights into the early stage evolution and even planet formation of our solar system.

This paper provides a comprehensive review of the historical study of TTS, these include its formation and evolution, typical classification schemes of different types of TTS, their optical identification and so on. Special efforts were made to introduce the light variations of TTS, accretion induced outbursts associated with CTTS, the rotation modulated light variation of WTTS due to the existence of cold dark spots, and especially the Lithium-rotation connection based on our multi-wavelength photometric monitoring.

**Key words:** T Tauri stars; light variation; spectral features