

# Estudio de estrellas jóvenes de muy baja masa

Matilde Fernández<sup>1</sup>, Fernando Comerón<sup>2</sup>, Viki Joergens<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Astrofísica de Andalucía, CSIC, Apdo. 3004, E-18080 Granada, España  
(matilde@iaa.es)

<sup>2</sup> European Southern Observatory, Karl-Schwarzschild-Strasse 2, 85748 Garching,  
Alemania (fcomeron@eso.org)

<sup>3</sup> Max-Planck Institut für extraterrestrische Physik, Postfach 1312, D-85741 Garching,  
Alemania

<sup>4</sup> Sterrewacht Leiden, P.O. Box 9513 NL-2300 RA Leiden, Países Bajos  
(viki@strw.leidenuniv.nl)

## Resumen

Durante los últimos años el estudio de estrellas jóvenes de baja y muy baja masa ha experimentado un auge, en parte debido a los recientes avances tecnológicos. Este estudio, a veces muy detallado, nos está permitiendo investigar hasta que punto el modelo en boga para la formación de estrellas de tipo solar se puede aplicar también a sus analogas menos masivas. En esta comunicación se muestran una serie de observaciones que apoyan esta hipótesis, aunque también se hace hincapié en algunos aspectos en los que el proceso de formación de objetos en el límite subestelar parece distanciarse del planteado para las estrellas de tipo solar.

## Introducción

En la etapa pre-secuencia principal, en la que las estrellas todavía no tienen como principal fuente de energía la fusión del H, se distinguen varios grupos de estrellas, según sus masas. Las más masivas (dentro de las que se pueden estudiar bien en el intervalo de longitudes de onda del visible) son las estrellas Ae/Be de Herbig, con masas entre unas 2 y 9  $M_{\odot}$  (Catala 1989). Tienen tipos espectrales A y B y ciertas líneas en emisión, debidas fundamentalmente a la materia caliente de su entorno. Con masas inferiores encontramos las estrellas T Tauri, que son las análogas solares, pero todavía en fase de formación (Bertout 1994; Appenzeller y Mundt 1989). Estas estrellas presentan un espectro fotosférico *bastante* similar a las de la etapa secuencia principal, salvo que sus líneas están más ensanchadas por su baja gravedad superficial. A este espectro fotosférico se le suele superponer otro de líneas de emisión más o menos intensas. Realmente, hay un continuo en lo que respecta a la intensidad del espectro de líneas de emisión, desde líneas fotosféricas tan sólo un poco rellenadas a un espectro dominado por las emisiones. De cara a su estudio estas estrellas se han dividido en dos grupos, tomando como línea divisoria la anchura equivalente de la emisión  $H_{\alpha}$ : por debajo de 10 Å están las que tienen líneas de emisión débiles (prácticamente sólo muestran emisión en  $H_{\alpha}$ ) y por encima las estrellas T Tauri clásicas. Avanzando aún más hacia estrellas menos masivas, nos encontramos, finalmente, con objetos cuyas masas están por debajo del límite subestelar (unas 0.08  $M_{\odot}$ ): las enanas marrones jóvenes.

Debido a una serie de cuestiones, las estrellas que están más (y mejor) estudiadas dentro de las que acabamos de mencionar son las estrellas T Tauri. A continuación explicaremos

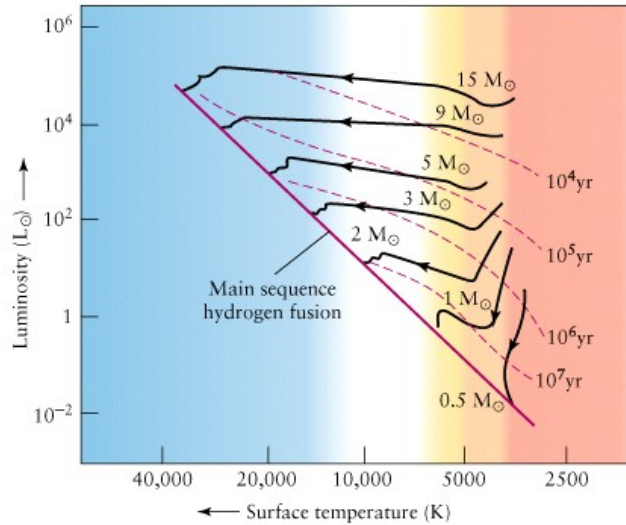


Figure 1: Trayectorias evolutivas en la etapa pre-secuencia principal de estrellas con masas entre 0.5 y 15  $M_{\odot}$  (<http://dilbert.physast.uga.edu/~derek/ASTR1020/birth.html>).

los motivos. El diagrama de la Fig.1 muestra las trayectorias evolutivas en la etapa pre-secuencia principal de estrellas con masas entre 0.5 y 15  $M_{\odot}$ . El tiempo que transcurre desde que comienza la formación de una estrella hasta que alcanza la secuencia principal varía enormemente en función de su masa. Así, las más masivas (las estrellas Ae/Be de Herbig) permanecen en la etapa de contracción apenas unos pocos millones de años, mientras que las estrellas T Tauri pueden llegar a tardar 100 ó 1000 millones de años (para las menos masivas) en alcanzar la secuencia principal. Esto tiene importantes consecuencias de cara a su estudio ya que la envoltura de gas y polvo que rodea a la estrella, y que proviene de la nube molecular en la que ésta se ha formado, tarda un tiempo en disiparse. Para estrellas por encima de unas 9  $M_{\odot}$  el proceso de formación es tan rápido que no podemos observar en el visible la estrella en formación. A nivel de las estrellas Ae/Be de Herbig el problema desaparece, aunque la muestra de estrellas (y candidatas) en este grupo es pequeña. En lo que respecta a las estrellas T Tauri el panorama es mucho más alentador y se conocen ya varios miles de ellas. Por supuesto, para las menos masivas, el problema es otro: la dificultad de llevar a cabo estudios en el visible y (no tanto) en el infrarrojo cercano. Esta dificultad estriba en que al ser extraordinariamente débiles tan sólo en los últimos años, y gracias a los avances tecnológicos, ha sido posible llevar a cabo las búsquedas necesarias para identificarlas, así como realizar el estudio subsiguiente de clasificación espectral y calibración fotométrica. La observación de este tipo de objetos está acompañada también por un auge en el estudio teórico de las trayectorias evolutivas de estrellas de muy baja masa y de objetos en el límite subestelar.

### Aproximándonos al límite subestelar

Los resultados que se han obtenido hasta ahora para los objetos de muy baja masa sugieren que el esquema evolutivo es muy similar al que siguen las estrellas de tipo solar: a partir de condensaciones en la nube molecular aparecen las protoestrellas que van creciendo como

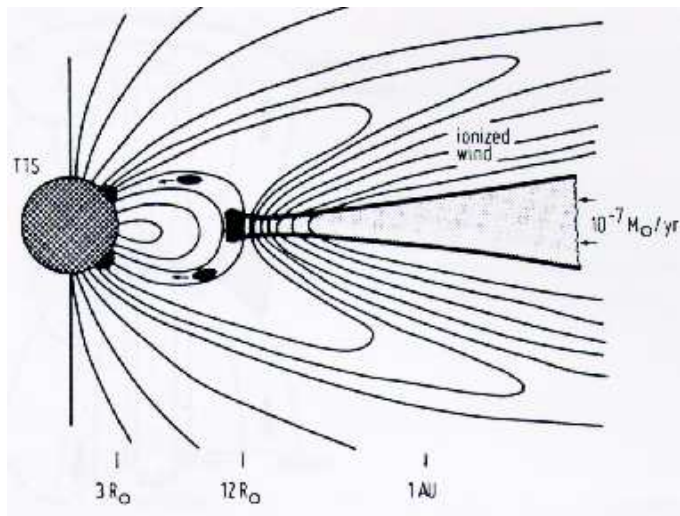


Figure 2: Diagrama del modelo de acreción magnetosférica aplicado a estrellas jóvenes de tipo solar (Camenzind 1990).

resultado de la caída (acreción) de materia de la nube. Debido a la conservación del momento angular (hay que recordar que la nube gira) se desarrolla un disco de acreción y la materia de la envoltura cae primero sobre ese disco y desde ahí, perdiendo momento angular, se va aproximando a la estrella, hasta caer sobre su superficie. La pérdida de momento angular está ayudada por el fenómeno de pérdida de masa que tiene lugar simultáneamente a la acreción.

Para las estrellas de tipo solar esta fase evolutiva se explica haciendo uso del modelo de acreción magnetosférica, según el cual el campo magnético de la estrella es suficientemente intenso como para *frenar* la materia del disco, impidiendo que éste alcance la superficie de la estrella. Es decir, se crea un hueco de varios radios estelares entre la estrella y el disco y la materia que cae sobre la estrella lo hace siguiendo las líneas del campo magnético, yendo a parar a latitudes altas sobre la estrella (ver Fig.2). Esta es la etapa en la que se encuentran las estrellas T Tauri clásicas. Las regiones calientes de las zonas internas del disco, así como la materia que cae sobre la estrella, producen el espectro de líneas de emisión y el continuo "extra" que se superpone a la emisión fotosférica. Cuando las zonas internas del disco se van disipando, o en general, cuando la acreción se atenúa, la estrella es libre para continuar su contracción y en ese momento su variabilidad empieza a estar dominada por una actividad de tipo magnético similar a la que conocemos en el Sol: manchas frías, fulguraciones, etc. En estas estrellas la emisión  $H_\alpha$  es mucho más débil y apenas hay rastros de otras líneas en emisión. Son las llamadas estrellas T Tauri con líneas de emisión débiles.

Si consideramos que este mismo esquema se aplica a las estrellas de muy baja masa, entonces, búsquedas como las llevadas a cabo en las últimas décadas para encontrar estrellas T Tauri, pero con mayor sensibilidad, deberían ayudar a localizar los objetos jóvenes de muy baja masa. Y efectivamente, así es. Lo que hace años nos proporcionaron las imágenes con prisma objetivo nos lo muestran hoy en día la espectroscopía multiobjeto o las búsquedas de emisores en  $H_\alpha$  o de estrellas variables, los diagramas color-color o las imágenes en rayos X.

En la Fig.3 mostramos una región de formación estelar en Lupus 3 donde hemos encontrado, gracias a espectroscopía multiobjeto de baja resolución, varias estrellas de tipo espectral M tardío, próximas al límite subestelar (Comerón et al. 2003a). Uno de los objetos más

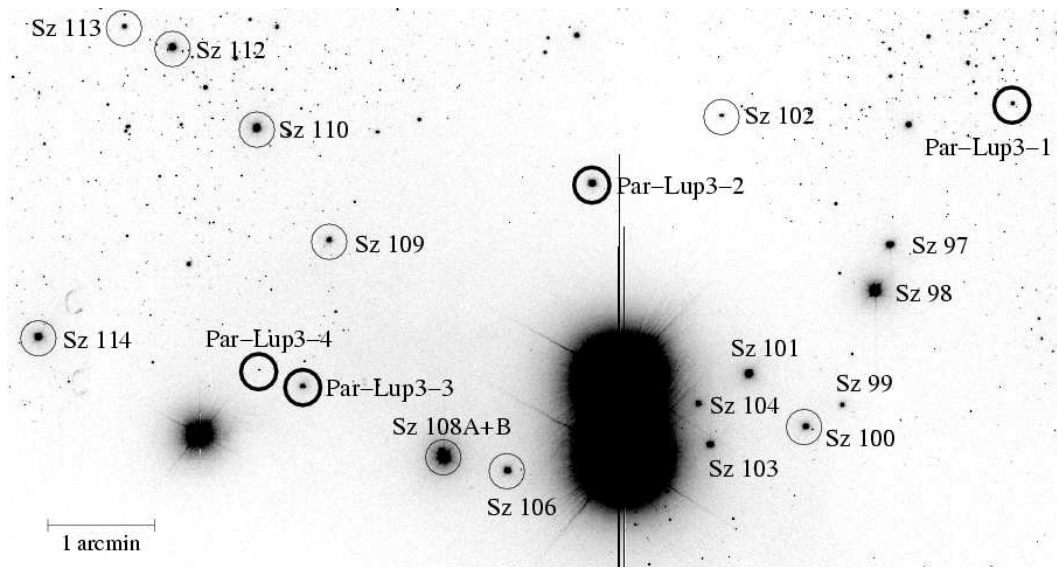


Figure 3: Imagen en la banda I de una parte de la región de formación estelar de Lupus 3. El tamaño del campo es de  $9.67' \times 5.13'$ . El norte está hacia arriba y el este hacia la izquierda.

interesantes es Par-Lup3-4. Este objeto es muy parecido a LS-RCrA 1, que descubrimos en 2000 (Fernández et al. 2001), y que presenta un espectro de líneas de emisión muy intensas superpuestas a un espectro fotosférico tardío (ver Fig.5). Las líneas permitidas informan, fundamentalmente, del proceso de acreción de masa, aunque también hay una componente debida a un flujo (viento/chorro) de materia, que se detecta claramente a través de las líneas prohibidas. Podemos comparar estos espectros con el de una estrella T Tauri clásica en la que se dan simultáneamente ambos procesos de acreción y pérdida de masa (Th 28, Krautter et al. 1984). El parecido entre los espectros es muy notable (ver Fig.4). Estamos viendo la fase T Tauri clásica cerca del límite subestelar.

¿Que ocurre en el límite subestelar cuando la acreción se atenúa? Hemos llevado a cabo un seguimiento fotométrico de una muestra de enanas marrones o estrellas candidatas a enana marrón (se habla de *candidatas* porque aunque sus masas estén por debajo del límite subestelar, las barras de error de sus temperaturas entran en la zona estelar). En la Fig.6 se muestra la curva de luz de una de estas estrellas. Para tres de ellas hemos encontrado periodos en las curvas entre 2.2 y 3.4 días y los atribuimos a manchas frías (actividad de tipo magnético) que modulan el brillo, debido a la rotación (Joergens et al. 2003). Es decir, el periodo de la curva de luz es el periodo de rotación de la estrella. Estos periodos son bastante más largos que los encontrados para enanas marrones más evolucionadas, lo cual encaja muy bien con el hecho de que todavía están en la fase de contracción y aceleración. En principio, y dado que nuestras observaciones cubrían un total de 5.5 días, podría haber dudas sobre la certeza de los periodos más largos, pero afortunadamente las estrellas habían sido estudiadas, en los meses anteriores a nuestras observaciones, por Carpenter et al. (2002), quienes obtuvieron las curvas en los filtros JHK del infrarrojo cercano. Hemos escalado las curvas tomadas en los filtros *i* y *J* y en la Fig.6 se muestra el resultado. El hecho de que la variabilidad se haya mantenido constante durante casi dos meses apoya la hipótesis de que es debida a una mancha fotosférica.

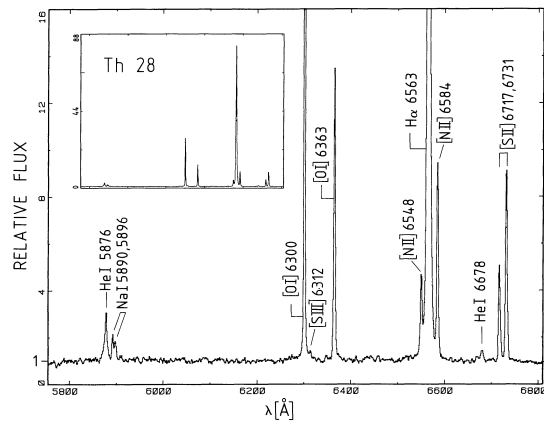


Figure 4: Espectro de la estrella T Tauri clásica Th28 (Krautter et al. 1984).

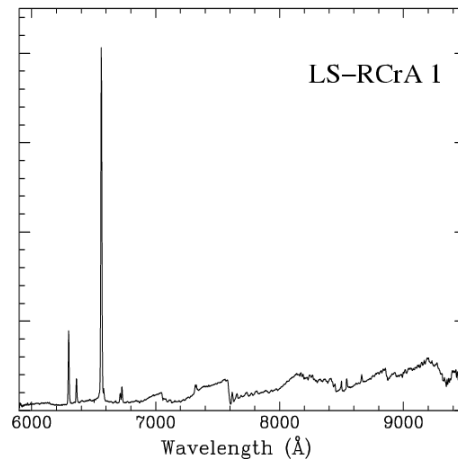
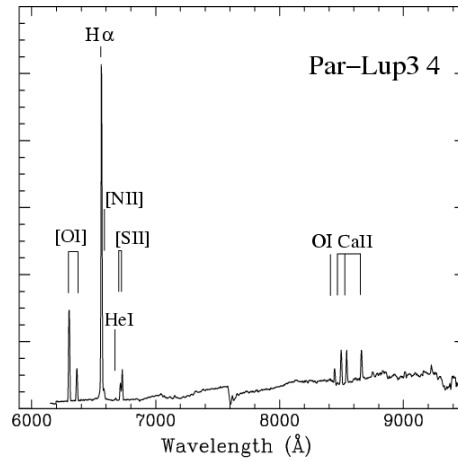


Figure 5: Espectros de Par-Lup3-4 y LS-RCrA 1 (Comerón et al. 2003a) obtenidos usando FORS1 y FORS2 en el telescopio VLT (Paranal, Chile). En ordenadas se indica la intensidad relativa.

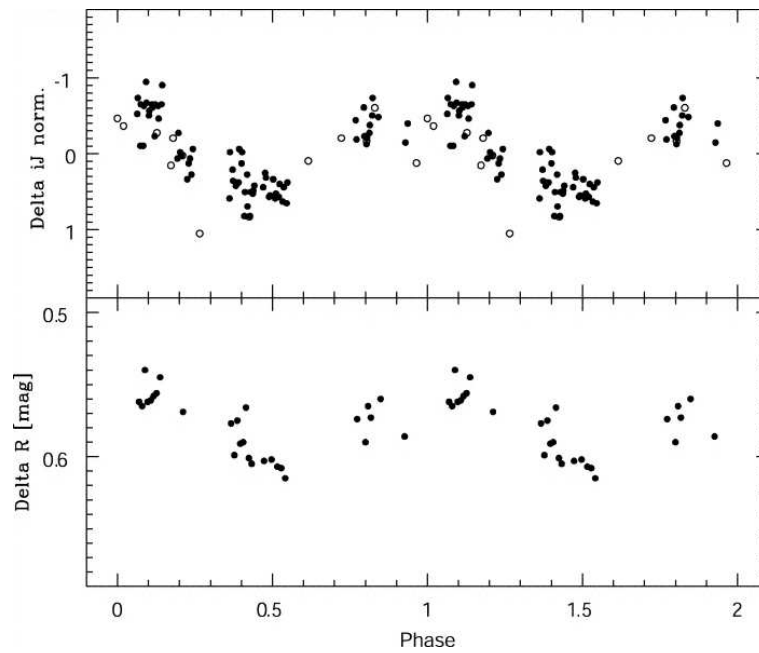


Figure 6: Curva de luz combinada en los filtros  $i$  y  $J$  de la estrella candidata a enana marron ChaH $\alpha$ 6, asumiendo un periodo de 3.4 días (Joergens et al. 2003). Los círculos vacíos corresponden a las medidas tomadas en la banda  $J$ .

### Sin embargo...

Los resultados que hemos presentado hasta ahora apuntan a un esquema evolutivo para las estrellas cerca del límite subestelar muy similar al de las estrellas de tipo solar. Sin embargo hay algunos puntos en los que parece haber discrepancias.

Conforme se ha ido ampliando la muestra de estrellas de muy baja masa en las que tiene lugar un proceso de acreción intenso, parece confirmarse el hecho, ya mencionado desde el comienzo de este estudio (Fernández y Comerón 2001), de que dichos objetos son subluminosos. El diagrama de Hertzsprung-Russell muestra que sus posiciones no encajan con las de otros miembros de las mismas regiones de formación estelar (ver Fig.7). La explicación que nos parece más plausible, sugerida desde el punto de vista teórico por Lee Hartmann y sus colaboradores en 1997, es que el mismo proceso de acreción de masa altera la luminosidad y temperatura superficial de los objetos, haciendolos parecer más calientes y subluminosos. Estudios llevados a cabo recientemente (Luhman et al. 2003, Comerón et al. 2003b) apoyan esta hipótesis con nuevos objetos.

Por otro lado, en lo que se refiere a la variación periodica del brillo de los análogos menos masivos de las estrellas T Tauri con líneas de emisión débiles, no siempre es posible descartar la presencia de *nubes*: en algunos de estos objetos las temperaturas fotosféricas podrían bajar hasta niveles en los que la condensación de polvo sea significativa, según los modelos de circulación atmosférica elaborados para enanas marrones. Aunque eso es improbable para los objetos que hemos estudiado nosotros, sí es posible para otros más evolucionados, ya que durante la etapa de formación y contracción la temperatura superficial es superior a la que tendrá el mismo objeto una vez formado.

Por lo tanto, es necesario seguir estudiando estos objetos y otros de menor masa con la idea de ver hasta que valor de la masa se aplica el modelo de formación de estrellas de tipo

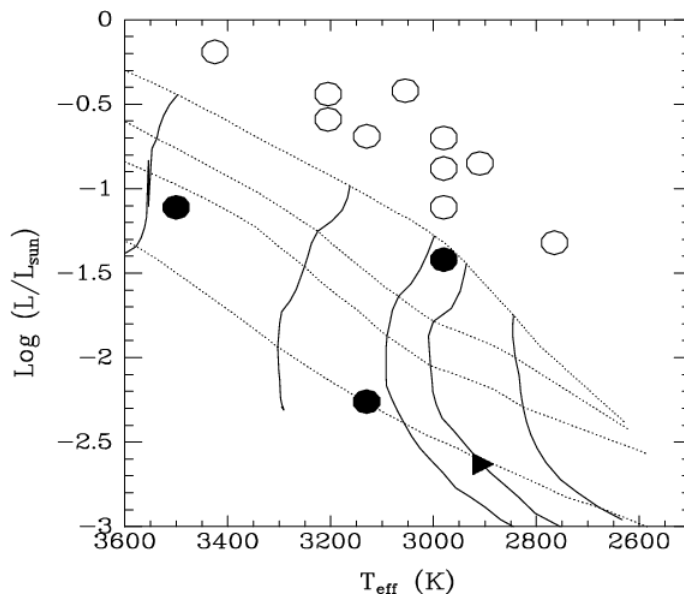


Figure 7: Posición en el diagrama de Hertzsprung-Russell de las estrellas Par-Lup3-4 (círculo relleno a  $T_{eff}=3130$  K) y LS-RCrA 1 (triángulo). Los otros círculos rellenos corresponden a otras estrellas de la region Lupus 3 en las que el proceso de acreción es intenso, mientras que los círculos vacíos indican la posición de estrellas con líneas de emisión débiles (Comerón et al. 2003a).

solar y que posibles modificaciones será necesario aplicar.

## Bibliografía

- Appenzeller, I., Mundt, R. 1989 *A&ARev* 1, 291
- Bertout, C., 1994 en “Star formation and techniques in infrared and mm-wave astronomy” Eds. T.P.Ray y S.V.W.Beckwith, Springer-Verlag Heidelberg, p.49
- Camenzind, M. 1990 *Reviews in Modern Astronomy* 3, 234
- Carpenter, J.M., Hillenbrand, L.A., Skutskie, M.F., Meyer, M.R. 2002, *AJ* 124, 1001
- Catala, C., 1989 in the ESO Workshop on “Low mass star formation and pre-main sequence objects” Ed. B.Reipurth, p.471
- Comerón, F., Fernández, M., Baraffe, I., Neuhäuser, R., Kaas, A.A. 2003a *A&A* 406, 1001
- Comerón, F., Reipurth, B., Henry, A., Fernández, M. 2003b *A&A* (submitted)
- Fernández, M., Comerón, F., 2001 *A&A* 380, 264
- Hartmann, L., Cassen, P., Kenyon, S.J. 1997 *Ap.J.* 475, 770
- Joergens, V., Fernández, M., Carpenter, J., Neuhäuser, R. 2003 *Ap.J.* 594, 971
- Krautter, J., Reipurth, B., Eichendorf, W. 1984 *A&A* 133, 169
- Luhman, K.L., Briceño, C., Stauffer, J.R., Hartmann, L., Barrado y Navascués, D., Caldwell, N. 2003 *Ap.J.* 590, 348