

Part III

Actividad y meteorología en objetos ultrafríos: discos y atmósferas

Variabilidad fotométrica de enanas marrones jóvenes en σ Orionis

El que ama arde

Lagartija Nick (Val del Omar)

Hemos llevado a cabo series temporales de fotometría diferencial multiépoca en la banda I de una gran muestra de objetos en la región sureste del cúmulo abierto joven y cercano σ Orionis. Monitorizamos un campo de ~ 1000 arcmin² durante cuatro noches en un periodo de dos años. Usando este conjunto de datos, hemos estudiado la variabilidad fotométrica de 28 candidatas a enanas marrones del cúmulo con masas desde el límite subestelar hasta casi el dominio de masas planetarias. Hemos encontrado que alrededor del 50% de la muestra presenta variabilidad fotométrica en escalas temporales que van desde menos de una hora hasta días y años. Las amplitudes de variabilidad en la banda I varían en el rango de 0.01 a ~ 0.4 magnitudes. Se observa una correlación entre la presencia de exceso de flujo en la banda K_s del infrarrojo cercano, fuerte emisión $H\alpha$ y variación fotométrica de gran amplitud. Discutimos brevemente cómo estos resultados podrían ajustarse a los escenarios propuestos para explicar la variabilidad de enanas frías y ultrafrías (manchas magnéticas, oscurecimiento parcheado o heterogéneo por nubes de polvo, discos de acreción y binariedad). Además, hemos determinado periodos rotacionales tentativos en el rango entre 3 y 40 h para tres objetos con masas de unas 60 M_{Jup} y la velocidad rotacional de 14 ± 4 km s⁻¹ para uno de ellos¹.

7.1 Introducción

La variabilidad fotométrica de enanas marrones y estrellas de muy baja masa cerca del límite subestelar ha recibido una atención significativa durante los últimos años. Véase el Cap. 1 para encontrar allí más información sobre la fotovariabilidad de enanas ultrafrías de campo.

¹El contenido de este capítulo está basado en un artículo publicado en revista internacional bajo arbitraje: Caballero, Béjar, Rebolo & Zapatero Osorio 2004, A&A, 424, 857.

Los estudios de variabilidad fotométrica de objetos con pertenencia confirmada a algún cúmulo estelar cuyas propiedades astrofísicas son bien conocidas tienen ventajas sobre aquellos que se realizan sobre objetos del campo. La edad, la metalicidad y la distancia son conocidas y comunes a toda la muestra de miembros del cúmulo. Al caer en una secuencia fotométrica bien definida, diferentes luminosidades se corresponden con diferentes masas. Por tanto, la monitorización de una muestra de objetos de un cúmulo permite la exploración de las propiedades de sus miembros en un amplio rango de masas. Además, las cámaras de gran campo pueden observar simultáneamente un número elevado de fuentes con las mismas condiciones atmosféricas e instrumentales. A edades muy jóvenes (p.e., de unos pocos Ma), las enanas marrones en rápida rotación, al ser objetos completamente convectivos, podrían generar un campo magnético suficientemente intenso como para producir manchas superficiales de tipo solar o actividad cromosférica. También, los discos de acreción pueden no haberse disipado por completo todavía. La investigación de la rotación de enanas marrones muy jóvenes es especialmente importante para entender los fenómenos relacionados con la formación subestelar, tales como la evolución del momento angular, la relación entre el disco y el objeto central y la evaporación del disco.

Ya se han realizado monitorizaciones fotométricas de gran campo en el infrarrojo cercano y en el óptico de estrellas en la región de Orión, especialmente en el área alrededor del cúmulo de la Nebulosa de Orión (*Orion Nebula Cluster*; Herbst et al. 2000, 2002; Carpenter, Hillenbrand & Skrutskie 2001; Rebull 2001 y referencias allí citadas). En particular, en la región de σ Orionis se han encontrado evidencias de variabilidad en una gran variedad de objetos, desde la estrella magnética B2Vp con abundancia peculiar de helio en el sistema múltiple OB central, σ Orionis E, pasando por las estrellas de tipo solar, hasta objetos con masa por debajo del límite estelar/subestelar (p.e., Fedorovich 1960; Landstreet & Borra 1978; Bailer-Jones & Mundt 2001).

En este capítulo presentamos fotometría diferencial de 32 candidatos a miembros de baja masa del joven cúmulo abierto de σ Orionis.

7.2 Observaciones y análisis

Las observaciones se realizaron en el Observatorio del Roque de Los Muchachos, en La Palma. Utilizamos el mosaico de cuatro chips Wide Field Camera (WFC), montado en el foco primario del 2.5 m Isaac Newton Telescope. El detector consiste en cuatro CCD $2k \times 4k$ adelgazados EEV4280 con un tamaño de píxel de $13.5 \mu m$, que se corresponde con una escala de píxel de 0.333 arcsec.

Se llevó a cabo una monitorización de un área de $\sim 0.29 \text{ deg}^2$ al sureste del centro del cúmulo σ Orionis durante dos épocas: tres noches consecutivas, desde el 30 de diciembre de 2000 al 1 de enero de 2001 (a partir de ahora, WFC00), y en el 8 de enero de 2003 (WFC03). Algunas estrellas estándar de Landolt (1992) se observaron durante 2003 ene. 08, lo que nos permitió calibrar la magnitud I de WFC03. Al final resultaron 33 diferentes exposiciones de estas observaciones, cada una de ellas con una magnitud de completitud $I \sim 21.5$. Usamos el filtro I RGO, que es muy parecido al I Johnson–Cousins–Kron. Aunque las noches fueron claras, las condiciones de *seeing* variaron ligeramente durante las campañas. En la primera época se usó un tiempo de exposición más largo, y las cuentas de algunos objetos relativamente brillantes caían en la región de linealidad cuando el *seeing* mejoraba. En la

Tabla 7.1 hay un *log* de las observaciones con información útil. Ofrecemos la fecha, número de exposiciones tomadas cada noche de observación, masa de aire efectiva, la anchura a media altura (FWHM) en segundos de arco y el tiempo de exposición en segundos. El conjunto de datos de la WFC00 se muestra sobre la línea horizontal, y el de WFC03 por debajo. Los datos de WFC00 ya han sido usados, junto con los de observaciones en el infrarrojo cercano, para estudiar la variabilidad fotométrica de la enana marrón joven y de baja masa S Ori 45 (Zapatero Osorio et al. 2003 –a partir de ahora ZO03–). Los datos de WFC00 y WFC03 se han utilizado también durante el Capítulo 6 de esta memoria de Tesis.

Tabla 7.1: *Log* de las observaciones.

Fecha	Num. exposiciones	Masa de aire efectiva	FWHM ["]	Tiempo de exp. [s]
30 dic. 2000	5	1.23–1.70	1.4–1.6	1500
31 dic. 2000	10	1.17–1.50	0.9–1.4	1500
01 ene. 2001	6	1.17–1.58	1.2–1.8	1500
08 ene. 2003	12	1.17–1.81	1.0–2.0	1200

La reducción de las imágenes se realizó con el medio IRAF usando paquetes estándar (*imred.ccdred*). Las imágenes brutas fueron sustraídas de *bias* y corregidas de *flat field* antes del alineado. Se usó un patrón de *dithering* con desplazamientos de varias veces el *seeing* para poder sustraer de manera apropiada la contribución del *fringing*. Para realizar esto, se construyó una imagen de *flat field* para cada noche usando imágenes científicas con su *bias* sustraído.

El alineado de las imágenes WFC00 y WFC03 se hizo por separado, debido a un desplazamiento de 0.6 arcmin entre los centros de apuntado de las dos épocas. El *fringing* residual en los CCD estaba por debajo del nivel del 0.8%. Antes de calcular la fotometría de abertura, se realizó el estudio de la FWHM promedio y del nivel de cuentas de cielo en cada imagen. Este análisis se hizo para cada detector individualmente. Usamos el paquete IRAF *daophot* para proceder con el análisis fotométrico. Se usaron nueve diferentes aberturas por cada imagen: 0.50, 0.60, 0.70, 0.80, 0.90, 1.00, 1.25, 1.50 y 2.00 veces la FWHM promedio. El radio interno del anillo de cielo fue 5.00 veces la FWHM promedio, mientras que la anchura del anillo se fijó en 8 píxeles. Se obtuvieron magnitudes instrumentales para 29 514 objetos.

7.2.1 Fotometría diferencial

El análisis de los datos (selección de las fuentes, cálculo de las magnitudes de referencia, análisis estadístico, obtención de las curvas de luz y análisis preliminar de series temporales) se realizó con el sistema interactivo MATLAB.

Se seleccionaron las fuentes cuya media de los errores de las magnitudes IRAF fuera menor que 0.25 mag para cada una de las nueve aberturas. Para evitar la confusión de fuentes, especialmente cuando hay objetos débiles cercanos a brillantes en campos poblados, los objetos con desviaciones estándar de las coordenadas del centroide mayores que 1.5

píxeles (~ 0.5 arcsec) fueron eliminados. Teniendo en cuenta estos requerimientos, se descartaron las fuentes con cuentas cercanas a la saturación, objetos muy débiles que aparecían cercanos a estrellas brillantes, rayos cósmicos y defectos de los chips.

Las magnitudes instrumentales fueron transformadas a magnitudes diferenciales, I_{diff} , sustrayendo un valor de referencia (esto es, una magnitud de punto cero). Esta magnitud de referencia para cada CCD y para cada tiempo de exposición se calculó usando un gran número de estrellas no variables localizadas a lo largo de todo el área monitorizada. Éstas fueron seleccionadas mediante un procedimiento iterativo: sólo las fuentes de bajo ruido fotométrico y desviaciones estándares $\sigma(I_{\text{diff}}) < 0.020$ mag (en el conjunto WFC00) y < 0.015 mag (WFC03), y con magnitudes en el rango $17.5 \text{ mag} < I < 21.0 \text{ mag}$, fueron seleccionadas de una muestra inicial de candidatas a estrellas de referencia. Cada CCD de los conjuntos WFC00 y WFC03 se trató por separado. La muestra final de objetos de referencia (~ 100 por chip) fue la intersección entre las muestras de referencia de WFC00 y WFC03. Debemos hacer notar que una enana marrón objetivo, fotométricamente estable si se compara con otros objetos de magnitud similar, puede ser una “estrella” de referencia si cumple los requisitos expuestos arriba.

Las magnitudes de referencia se calcularon de acuerdo con Bailer-Jones & Mundt (2001). Su método está basado en una media de flujos de las estrellas de referencia, donde las estrellas más brillantes, con los errores poissonianos más pequeños, dominan la magnitud de referencia final. Sin embargo, también se calculó una sencilla media de las magnitudes de todas las estrellas de referencia, para buscar alguna diferencia significativa. Debido al gran tamaño de la muestra de estrellas de referencia, ambas magnitudes de punto cero eran similares. Como la desviación estándar de la diferencia entre los niveles de referencia calculados a partir de la media de flujos y de la media de magnitudes era menor que 1 mmag, en los subsiguientes cálculos sólo hemos usado el de la media de flujos.

Estudiamos la dependencia de la magnitud de referencia para cada CCD en función del tiempo, de la masa de aire y del *seeing*. No detectamos ninguna tendencia, por lo que no aplicamos correcciones de alto orden dependientes de la masa de aire o del *seeing*. Todos los cálculos se realizaron por separado para cada uno de los chips de la Wide Field Camera, ya que cada CCD posee características distintas (ganancia, ruido electrónico y variación entre las magnitudes instrumentales y aparentes). También, la FWHM promedio para cada chip es distinta en cada momento debido a las diferentes distancias al centro del plano focal.

Realizamos el análisis anterior en el conjunto WFC00 para cada una de las nueve aberturas (0.5 a $2.0 \times \text{FWHM}$) y elegimos la de $0.70 \times \text{FWHM}$, que simultáneamente minimizaba la contribución fotónica de fuentes contaminantes cercanas y maximizaba el cociente señal/ruido, por lo que también proporcionaba el mayor número de estrellas de referencia.

Se añadió un pequeño valor aditivo a los valores I_{diff} de cada objeto para poder transformarlas en magnitudes aparentes, calibradas con las estrellas estándar de Landolt observadas durante la campaña de WFC03. Por tanto, para cada objeto, la media de la WFC03 I_{diff} (denotada por $\overline{I_{03}}$) es igual a la magnitud real en la banda I .

Finalmente, se obtuvieron curvas de luz multiépoca, calibradas y en la banda I para más de 8 000 objetos que verificaban todos los criterios mencionados arriba.

Tabla 7.2: Datos fotométricos y espectroscópicos para los 32 candidatos a miembros del cúmulo σ Orionis considerados en nuestro estudio.

Nombre	I	$I - J$	Tipo esp.	pEW(Li I) (Å)	pEW(H α) (Å)			
					BZOR	ZO	ByN	M
S Ori J054000.2-025159	16.21 $\pm$ 0.04	2.15 $\pm$ 0.05	—	—	—	—	—	—
S Ori J053902.1-023501	16.41 $\pm$ 0.03	1.62 $\pm$ 0.05	—	—	—	—	—	—
S Ori 16 ^a	16.62 $\pm$ 0.03	1.94 $\pm$ 0.04	—	—	—	—	—	—
S Ori J053847.2-025756	16.75 $\pm$ 0.02	2.23 $\pm$ 0.03	—	—	—	—	—	—
S Ori J053829.0-024847 ^a	16.81 $\pm$ 0.02	1.80 $\pm$ 0.06	M6.0 $\pm$ 0.5	—	—	—	< 5	—
S Ori J053954.3-023719 ^a	16.82 $\pm$ 0.03	1.94 $\pm$ 0.04	—	—	—	—	—	—
S Ori J053825.4-024241 ^a	16.86 $\pm$ 0.02	1.73 $\pm$ 0.03	—	—	—	—	—	—
S Ori 25 ^a	16.93 $\pm$ 0.03	2.16 $\pm$ 0.03	M7.5 $\pm$ 0.5	0.6	45.0 $\pm$ 1.0	—	42 $\pm$ 8	44 $\pm$ 1
S Ori J053826.1-024041 ^a	16.93 $\pm$ 0.02	1.95 $\pm$ 0.04	M8.0 $\pm$ 0.5	—	—	—	4 $\pm$ 2	—
S Ori 27 ^a	17.03 $\pm$ 0.03	2.15 $\pm$ 0.03	M7.0 $\pm$ 0.5	0.74 $\pm$ 0.09	6.1 $\pm$ 1.0	5.7 $\pm$ 0.5	5 $\pm$ 2	—
S Ori J053922.2-024552	17.05 $\pm$ 0.03	1.65 $\pm$ 0.05	—	—	—	—	—	—
S Ori J054014.0-023127	17.07 $\pm$ 0.03	2.60 $\pm$ 0.04	—	—	—	—	—	—
S Ori 28 ^a	17.14 $\pm$ 0.03	1.81 $\pm$ 0.03	—	—	—	—	—	—
S Ori 31 ^a	17.23 $\pm$ 0.02	1.87 $\pm$ 0.07	M7.0 $\pm$ 0.5	—	—	—	2.5 $\pm$ 0.9	—
S Ori 30 ^a	17.29 $\pm$ 0.03	1.98 $\pm$ 0.03	M6.0 $\pm$ 0.5	—	—	—	16 $\pm$ 6	—
S Ori 32 ^a	17.34 $\pm$ 0.03	1.85 $\pm$ 0.03	—	—	—	—	—	—
S Ori J054004.5-023642 ^a	17.51 $\pm$ 0.03	2.02 $\pm$ 0.04	—	—	—	—	—	—
S Ori 36 ^a	17.71 $\pm$ 0.03	2.20 $\pm$ 0.04	—	—	—	—	—	—
S Ori J053918.1-025257	18.64 $\pm$ 0.04	2.51 $\pm$ 0.04	—	—	—	—	—	—
S Ori 42 ^a	19.04 $\pm$ 0.03	2.48 $\pm$ 0.03	M7.5 $\pm$ 0.5	—	—	—	89 $\pm$ 12	—
S Ori 45 ^a	19.49 $\pm$ 0.02	2.57 $\pm$ 0.02	M8.5 $\pm$ 0.5	2.4 $\pm$ 1.0	60.0 $\pm$ 1.0	33 $\pm$ 9	26 $\pm$ 15	—
S Ori J053929.4-024636	19.73 $\pm$ 0.03	2.55 $\pm$ 0.03	—	—	—	—	—	—
S Ori 71 ^a	20.02 $\pm$ 0.03	2.69 $\pm$ 0.04	L0.0 $\pm$ 0.5	—	—	—	700 $\pm$ 80	—
S Ori J053849.5-024934	20.08 $\pm$ 0.02	2.80 $\pm$ 0.04	—	—	—	—	—	—
S Ori 51 ^a	20.23 $\pm$ 0.03	2.85 $\pm$ 0.07	M9.0 $\pm$ 0.5	—	—	—	25:	—
S Ori 50 ^a	20.48 $\pm$ 0.03	2.88 $\pm$ 0.04	M9.0 $\pm$ 0.5	—	—	—	< 10	—
S Ori 47 ^a	20.49 $\pm$ 0.02	3.16 $\pm$ 0.03	L1.5 $\pm$ 1.0	4.3 $\pm$ 0.5	—	$\leq$ 6	25:	—
S Ori J053944.5-025959	20.74 $\pm$ 0.04	2.72 $\pm$ 0.05	—	—	—	—	—	—
S Ori 53 ^a	20.96 $\pm$ 0.02	2.87 $\pm$ 0.03	M9.0 $\pm$ 0.5	—	—	—	< 10	—
S Ori J054007.0-023604	21.16 $\pm$ 0.03	2.84 $\pm$ 0.04	—	—	—	—	—	—
S Ori J053956.8-025315	21.25 $\pm$ 0.04	2.97 $\pm$ 0.05	—	—	—	—	—	—
S Ori J053858.6-025228	22.17 $\pm$ 0.05	3.54 $\pm$ 0.06	—	—	—	—	—	—

^a Referencias: Béjar, Zapatero Osorio & Rebolo 1999 (BZOR); Zapatero Osorio et al. 1999b, 2002a (ZO); Barrado y Navascués et al. 2001b, 2002a, 2003b (ByN); Muzerolle et al. 2003 (M).

7.3 Candidatos subestelares

De las 32 candidatas a enanas marrones de σ Orionis estudiadas aquí, 19 habían sido descubiertas fotométricamente en búsquedas ópticas por Béjar et al. (1999, 2004). Los restantes 13 objetos fueron seleccionados de una búsqueda combinada IJ realizada con la Wide Field Camera (I) en el Isaac Newton Telescope y el instrumento ISAAC (J) en el Very Large Telescope Antu/UT 1. Los detalles de esta búsqueda se ofrecen en el Capítulo 6 de esta memoria de Tesis, en donde se describió su pertenencia al cúmulo mediante datos espectrofotométricos. Los 32 objetos seleccionados para el presente análisis fotométrico tienen magnitudes I entre 16.0 y 22.5 mag. Ni los objetos más débiles ni los más brillantes ofrecen una fotometría fiable, sea por la no linealidad o por la excesiva debilidad de las señales en cada exposición, respectivamente. Proporcionamos en la Tabla 7.2 la muestra completa, junto con información espectroscópica relevante extraída de la bibliografía (tipos espectrales y pseudoanchuras equivalentes de la absorción de Li I λ 6707.8 Å y de la emisión de H α λ 6562.8 Å). Los tipos espectrales de los objetos estudiados varían entre $\sim$ M5.5 y $\sim$ L2 y sus masas entre $\sim$ 0.074 y $\sim$ 0.006 $M_{\odot}$.

La mayoría de las enanas marrones de nuestra muestra confirmadas mediante espectroscopia muestran H α en emisión, que podría estar relacionada con actividad cromosférica o con la presencia de un disco circun(sub)estelar. Debería hacerse notar la emisión H α ,

asimétrica y extraordinariamente intensa, del objeto subestelar frío S Ori 71. Barrado y Navascués et al. (2002a) estimaron su masa entre 22 y 13 M_{Jup} . Le midieron una pseudoanchura equivalente de $700 \pm 80 \text{ \AA}$, lo que le hace ser uno de los emisores $H\alpha$ más intensos entre las enanas jóvenes de tipos espectrales tardíos descubiertos hasta ahora. S Ori 25, S Ori 42 y S Ori 45 también muestran $H\alpha$ en intensa emisión, ~ 10 – 20 veces mayor que la emisión promedio de otras fuentes de σ Orionis con tipos similares. De acuerdo con Barrado y Navascués & Martín (2003), tales intensas emisiones son consistentes con fenómenos de acreción de disco. Otros objetos del cúmulo presentan líneas de emisión $H\alpha$ débiles a moderadas. Lamm et al. (2004) detectaron una fuerte correlación entre variabilidad fotométrica en variables periódicas y $H\alpha$ en emisión en una muestra de estrellas de presecuencia principal en el joven (2–4 Ma) cúmulo abierto de S Monocerotis (NGC 2264). Sin embargo, no se ha encontrado una correlación con las variables irregulares.

Hemos usado el 2MASS All-Sky Catalog of Point Sources (Cutri et al. 2003) para estudiar la posible presencia de excesos en el infrarrojo cercano en alguno de nuestros objetos, que podría ser una indicación de discos calientes. A la izquierda de la Fig. 7.1 se muestra el diagrama $I - J$ vs. $I - K_s$ para las 17 candidatas a enanas marrones estudiadas con fotometría JHK_s 2MASS más precisa que 0.1 mag (fuentes más brillantes que $I = 17.5$ mag, aproximadamente). Las líneas continuas y discontinuas son las isocronas color-color para objetos subestelares de 3 Ma, basadas en modelos del grupo de Lyon (Baraffe et al. 2002 y Chabrier et al. 2000, respectivamente). Todos los candidatos subestelares excepto dos se encuentran sobre la isocrona discontinua dentro de las barras de error. Los objetos discordantes son S Ori 27 y S Ori J053825.4–024241. Mientras que S Ori 27 parece desplazarse hacia colores más azules, S Ori J053825.4–024241 presenta un claro enrojecimiento que sugiere un exceso de emisión infrarroja a $2.2 \mu\text{m}$. Estos objetos tampoco se encuentran cerca de la secuencia del cúmulo en el diagrama $J - H$ vs. $H - K_s$, como el mostrado en la ventana derecha de la Fig. 7.1 donde, de nuevo, sólo se han dibujado los datos JHK_s de 2MASS más precisos que 0.1 mag. S Ori 27 es una enana marrón de tipo $M6.5 \pm 0.5$ con una masa estimada de $\sim 40 M_{\text{Jup}}$. En el momento de realizar esta investigación, no se disponía de información espectroscópica acerca de S Ori J053825.4–024241. Como se verá en el Cap. 8, se trata de una enana marrón con disco con una intensa emisión $H\alpha$.

7.4 Criterios de variabilidad

La dispersión de los puntos de una curva de luz representa una medida de la variabilidad fotométrica, o al menos impone un límite superior a la variabilidad. La desviación estándar, $\sigma(I)$, de la curva de luz es el indicador de variabilidad más utilizado, aunque también otros parámetros han sido propuestos: la amplitud pico a pico, el promedio de las magnitudes absolutas relativas, el “rango” (la diferencia entre los percentiles 15 y 85% respecto a la mediana), estadísticos como la χ^2 o la $\tilde{\eta}$, y otros índices y tests como el de Kolmogorov–Smirnov. Algunos de los parámetros necesitan simulaciones de Monte Carlo posteriores para cuantificar la probabilidad de variabilidad. Algunas discusiones sobre indicadores de variabilidad se pueden encontrar en Stetson (1996), Bailer-Jones & Mundt (1999), Herbst et al. (2002) y Enoch et al. (2003). Aquí definiremos unos criterios de variabilidad para cada escala temporal. Compararemos la fotometría de nuestra muestra en σ Orionis con los datos de las fuentes del campo con brillo similar. Por coherencia, todas las curvas de luz

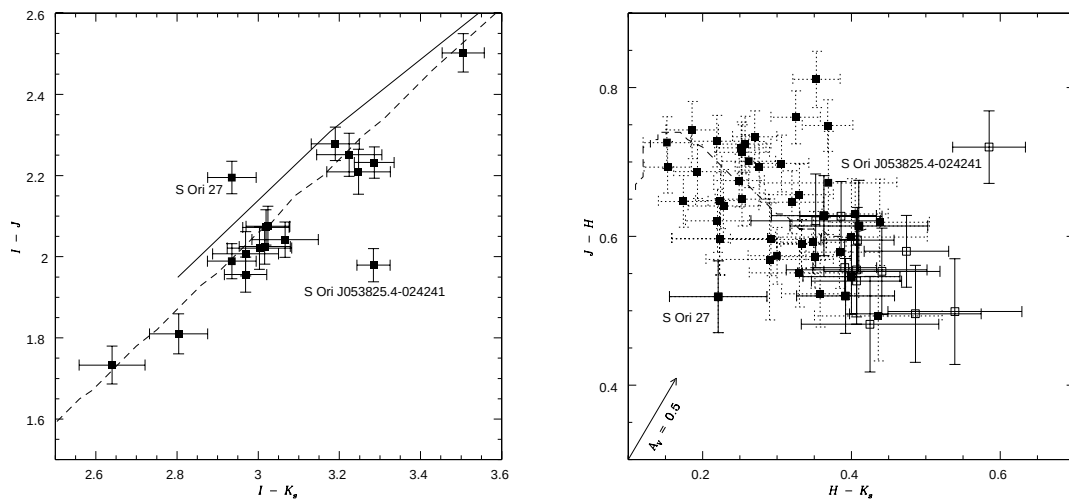


Figura 7.1: *Izquierda:* diagrama color-color $I - J$ vs. $I - K_s$. Se muestran todas las candidatas a enanas marrones estudiadas con datos fotométricos JHK_s de 2MASS con precisión mejor que 0.1 mag. Las líneas continuas y discontinuas son isocronas color-magnitud para objetos subestelares de 3 Ma, basadas en modelos del grupo de Lyon (Baraffe et al. 2002 y Chabrier et al. 2000, respectivamente). *Derecha:* diagrama color-color $J - H$ vs. $H - K_s$. Los cuadrados pequeños rellenos con barras de error punteadas son para objetos del cúmulo σ Orionis con confirmación espectroscópica. Los cuadrados vacíos con barras de error continuas denotan los objetos estudiados en este trabajo. De estos, los objetos confirmados espectroscópicamente se dibujan mediante cuadrados rellenos. La línea discontinua es la isocrona color-color para objetos subestelares de 3 Ma, en base a los modelos de Chabrier et al. (2000). Las estrellas de tipo K tardío y M temprano se localizan en la esquina superior izquierda de la figura, mientras que las enanas M de tipo intermedio y tardío están cerca del centro.

se han tratado de la misma manera.

Definimos $\sigma(I)$ como la desviación estándar de la curva de luz para cada noche. El diagrama $\sigma(I)$ vs. I mostrado en la Fig. 7.4 ilustra la fuerte dependencia de la desviación estándar fotométrica en función de la magnitud aparente de los objetos. La envolvente inferior de $\sigma(I)$ es aproximadamente plana al nivel de 5 mmag en el rango $I \sim 17.0$ –19.5 mag, mientras que crece exponencialmente mas allá de ~ 20.5 mag a causa del error fotónico poissoniano. Por otro lado, la dispersión también aumenta por debajo de ~ 16.5 mag por efectos de la saturación y la no linealidad en las fuentes más brillantes. Para calcular $\sigma(I)$, tres valores de I en la época WFC00 y uno en la WFC03 no fueron considerados en ninguna de las curvas de luz, ya que la PSF medida en las correspondientes imágenes se desviaban de la PSF promedio para cada época.

Las tres enanas marrones más brillantes ($I < 16.7$ mag) de la muestra de 32 objetos de σ Orionis no serán considerados en la discusión de la Sec. 7.5 porque una fracción significativa de los puntos de las curvas de luz se tomaron con las cuentas en el régimen no lineal del detector. Asimismo, la curva de luz de S Ori J053858.6–025228, un objeto subestelar más débil que $I = 22$ mag, fue descartado por su gran error poissoniano. La fotometría de las restantes 28 enanas marrones, cuyo conjunto llamamos *muestra final*, es fiable.

Las curvas de luz de nuestra muestra final se muestran en las Figuras 7.2 y 7.3. Para una

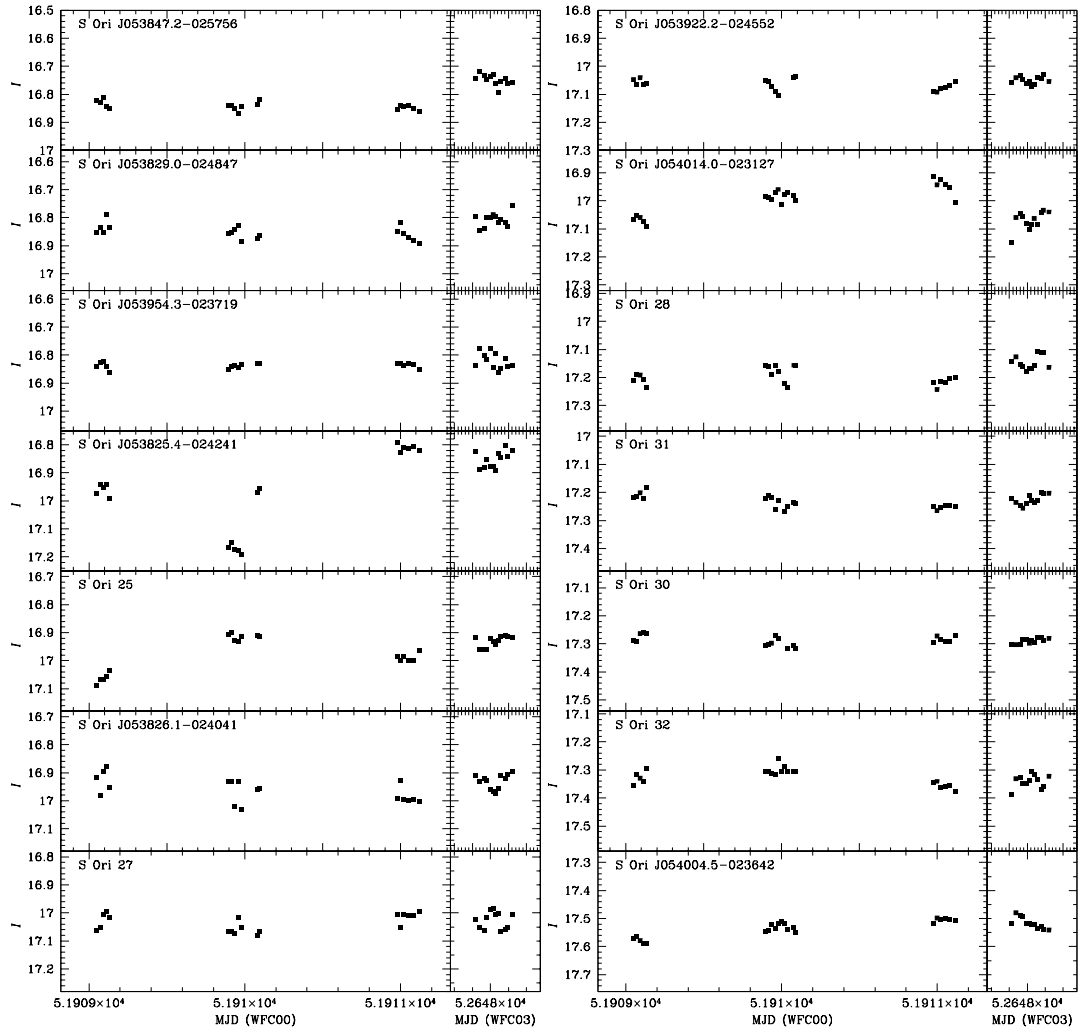


Figura 7.2: Curvas de luz de los catorce objetos más brillantes de la muestra final.

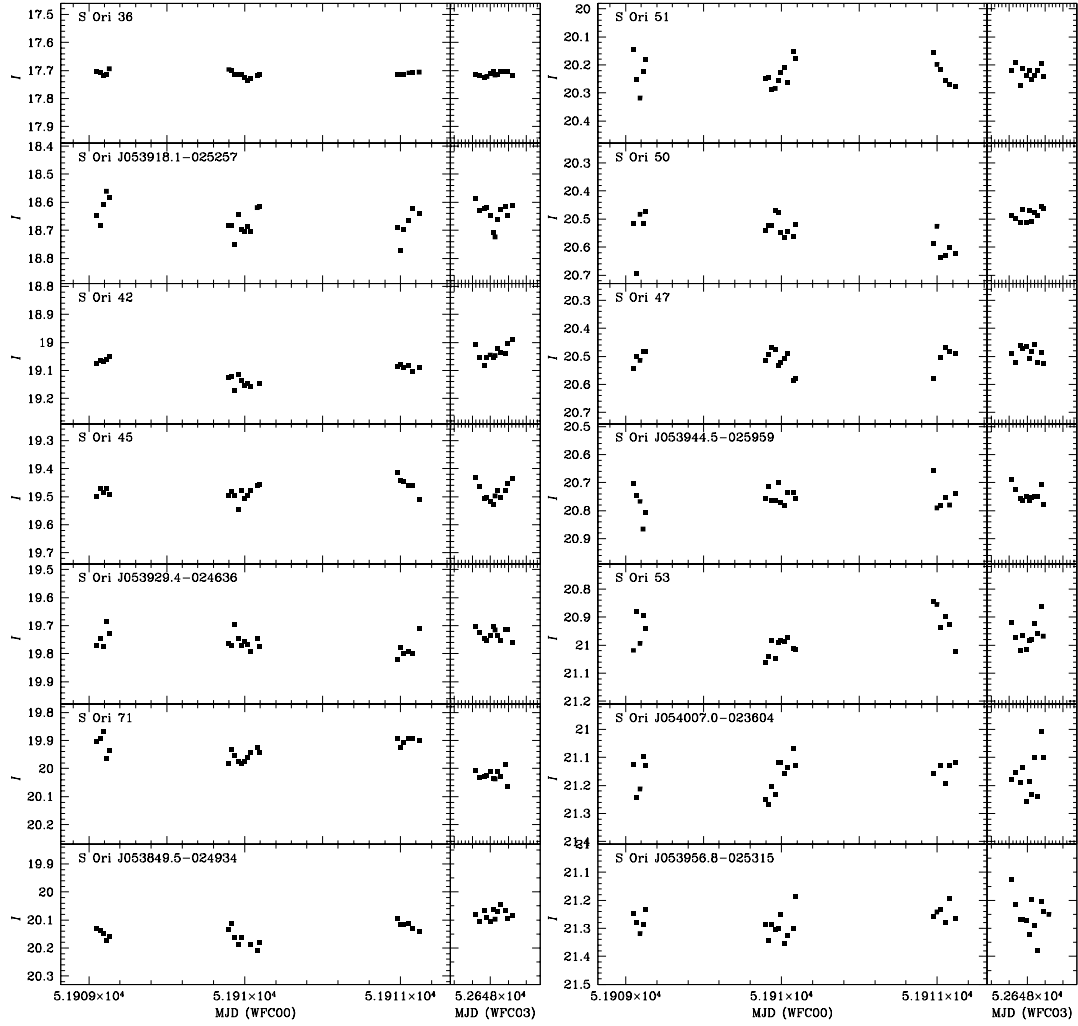


Figura 7.3: Curvas de luz de los catorce objetos más débiles de la muestra final.

mejor comparación, hemos usado una representación común para todas las curvas: la escala vertical se ha fijado a 0.5 mag de ancho y la escala temporal es constante en el eje horizontal. Se indican las dos épocas y la Fecha Juliana Modificada ($MJD = JD - 2400\,000.5$). No hemos tenido en cuenta la corrección heliocéntrica, ya que la máxima diferencia entre JD y HJD (Fecha Juliana Heliocéntrica) es del orden de unos pocos segundos en un periodo de tres noches. Las curvas de luz de las estrellas de referencia son similares a las de S Ori 36.

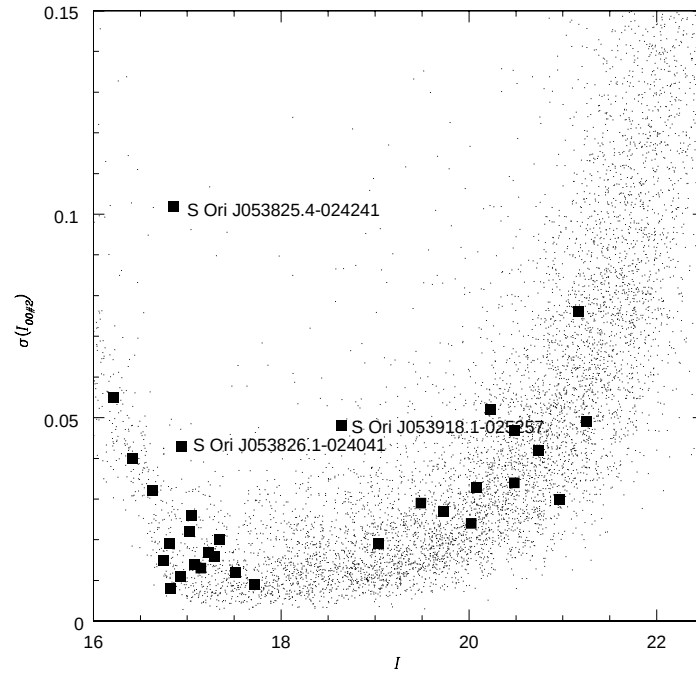


Figura 7.4: Desviación estándar de las curvas de luz diferenciales en función de la magnitud I para cada objeto (puntos pequeños) en la segunda noche de WFC00. Sólo se muestran los objetos con $\sigma(I) < 0.15$ mag. Los errores fotométricos medios dados por IRAF están por debajo de 5, 15 y 100 mmag para objetos más brillantes que $I = 18$, 20 y 22, respectivamente. Los cuadrados rellenos denotan las candidatas a enanas marrones. Las enanas marrones variables en escalas cortas (en base a la definición de ϖ_{ST}) están etiquetadas.

7.4.1 Escalas temporales cortas

Para poder encontrar variabilidad fotométrica en escalas temporales muy cortas (en una serie de exposiciones consecutivas, es decir, de minutos a horas), hemos comparado la $\sigma(I)$ de las curvas de luz de nuestros blancos con aquéllas de las estrellas de campo de magnitud similar. Para cada blanco, hemos definido un parámetro de variabilidad en escalas temporales cortas, ϖ_{ST} , dado por la siguiente ecuación:

$$\varpi_{ST} = \frac{N^-}{N^+ + N^-}, \quad (7.1)$$

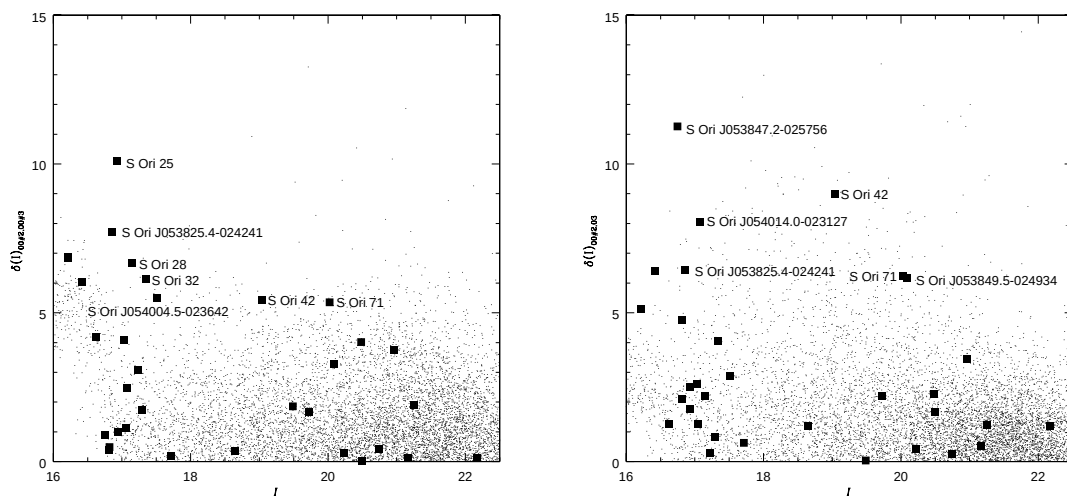


Figura 7.5: *Izquierda*: diferencias absolutas adimensionales entre las magnitudes medias de la segunda y tercera noches de la época WFC00 en función de las magnitudes I aparentes. Los objetos de campo se representan mediante puntos pequeños, mientras que los cuadros rellenos denotan las candidatas a enanas marrones. Se dan los nombres de algunos blancos variables en escalas temporales intermedias. *Derecha*: lo mismo pero para la segunda noche de la época WFC00 y de la noche WFC03.

donde el subíndice “ST” significa “*short term*” y N^+ y N^- son el número de fuentes en el mismo intervalo de magnitudes con mayor y menor $\sigma(I)$, respectivamente, que la $\sigma(I)$ del objeto considerado. Altos valores de ϖ_{ST} implican mayor probabilidad de variabilidad. La anchura del intervalo se fijó en 0.2 magnitudes, centrados en la magnitud I del blanco. Típicamente se consideraron unos cien objetos con brillo similar y, por tanto, con errores fotométricos similares en la comparación. Se seleccionó un intervalo tan estrecho para minimizar la contribución al error de fuentes débiles o en el dominio no lineal, que muestran un error fotométrico grande y que podría enmascarar la variabilidad intrínseca del blanco.

Impondremos un corte en $\varpi_{ST} = 0.95$ para separar las fuentes variables de las no variables. Consideraremos como variables muy probables de corto periodo dentro de nuestra muestra a los blancos con $\varpi_{ST} \geq 0.95$. Este criterio demanda que para que una enana marrón sea detectada como variable, ésta debe ser significativamente más variable que los objetos de campo en el mismo intervalo de magnitud. Estadísticamente, las curvas de luz de las fuentes variables muestran amplitudes fotométricas que están entre el 5% de las mayores amplitudes. Ésto se puede entender también como que sólo hay un 5% de probabilidad de que una enana marrón que sea realmente no variable sea incorrectamente clasificada como variable (es decir, una probabilidad del 5% de detección positiva falsa). La distribución de ϖ_{ST} es bastante plana entre 0 y 1 dentro de su intervalo de magnitud. Sin embargo, la distribución de $\sigma(I)$ es asimétrica: la mayoría de los puntos caen cerca de la media de los errores fotométricos de IRAF, mientras que sólo un porcentaje pequeño se encuentra lejos de esta localización (véase la Fig. 7.5).

7.4.2 Escalas temporales intermedias y largas

Para detectar variabilidad en un blanco entre una noche y otra (en escalas temporales intermedias, de unos pocos días), comparamos las magnitudes promedio (tanto de los blancos como de las fuentes del campo), $\bar{I}_i$, calculadas para cada noche, i . Listamos las magnitudes medias de nuestra muestra en la Tabla 7.3. La comparación se realizó obteniendo el valor absoluto de $\bar{I}_i - \bar{I}_j$ para cada objeto, donde i y j representan dos noches diferentes. Para evitar el sesgo introducido por la variabilidad de escalas temporales cortas, hemos dividido las diferencias por el error estándar de las magnitudes medias. Por tanto, hemos definido una diferencia absoluta adimensional de magnitudes, $\delta(I)_{ij}$, como:

$$\delta(I)_{ij} = \frac{|\bar{I}_i - \bar{I}_j|}{\sqrt{\frac{\sigma(I_i)^2}{n_i} + \frac{\sigma(I_j)^2}{n_j}}} \quad (7.2)$$

donde n es el número de datos fotométricos por cada noche. Al usar magnitudes promedio en cada noche aumentamos la sensibilidad a la variabilidad de escalas intermedias.

Hemos seleccionado variables probables en escalas intermedias en nuestra muestra de una forma similar a como seleccionamos las enanas marrones variables en escala corta. Hemos utilizado la definición de la Ecuación 7.1, donde ahora utilizamos ϖ_{MT} (el subíndice MT proviene de “*mid-term*”). En este caso N^+ y N^- representan el número de fuentes en el mismo intervalo de magnitud con mayor y menor $\delta(I)_{ij}$, respectivamente, que la del objeto considerado. La ventana izquierda de la Figura 7.5 muestra las diferencias adimensionales en función de las magnitudes aparentes para la segunda y tercera noches de la época WFC00. Se han obtenido diagramas similares considerando otras posibles combinaciones, p.e. la primera noche con la segunda y la segunda con la tercera. La variabilidad en escala intermedia sólo puede ser investigada con los datos de WFC00. Como en el análisis anterior de la variabilidad corta, la anchura del intervalo de magnitud era 0.2 mag centrado en la magnitud I de cada blanco. De acuerdo con nuestro criterio, las enanas marrones probablemente variables poseen $\varpi_{\text{MT}} \geq 0.95$.

Para la variabilidad en escalas temporales largas, que tiene en cuenta diferencias entre la primera época de observaciones (WFC00) y la segunda (WFC03), separadas por unos dos años, aplicamos un criterio similar al de la variabilidad intermedia. Ahora, la única noche WFC03 se compara con cada una de las tres noches WFC00 usando las diferencias de magnitud adimensionales, $\delta(I)_{ij}$. El parámetro que mide la variabilidad larga se llama en este caso ϖ_{LT} (“*long-term*”).

Las enanas marrones variables en escalas temporales largas poseen $\varpi_{\text{LT}} \geq 0.95$. El ϖ_{LT} calculado para la comparación entre la primera noche de WFC00 y la noche WFC03 está representado en función de la magnitud aparente I en la ventana derecha de la Fig. 7.5. Se obtienen diagramas similares al comparar con las otras dos noches de WFC00. De acuerdo con el criterio de variabilidad adoptado, todas las variables de escala intermedia podrían ser identificadas también como variables de escala larga. Ésto es así porque hemos comparado cada noche de WFC00 con la época WFC03. Algunas variables intermedias podrían ser también variables largas, pero no lo podemos discriminar fácilmente a partir de nuestros datos. Por tanto, hemos excluido a las variables intermedias de nuestro análisis en escalas largas.

7.5 Discusión

En la Tabla 7.4 proporcionamos los parámetros de variabilidad obtenidos para tres diferentes escalas temporales y para nuestra muestra de blancos.

Tabla 7.3: Magnitud media y desviación estándar de las curvas de luz de cada noche^a.

Nombre	$\overline{I_{00\#1}} \pm \sigma$	$\overline{I_{00\#2}} \pm \sigma$	$\overline{I_{00\#3}} \pm \sigma$	$\overline{I_{03}} \pm \sigma$
S Ori J054000.2–025159	16.203±0.012:	16.34±0.05:	16.17±0.03:	16.21±0.05:
S Ori J053902.1–023501	16.51±0.03:	16.58±0.04:	16.47±0.03:	16.40±0.07:
S Ori 16	16.578±0.010:	16.64±0.03:	16.592±0.008:	16.62±0.03:
S Ori J053847.2–025756	16.832±0.015	16.842±0.015	16.848±0.009	16.748±0.020
S Ori J053829.0–024847	16.83±0.03	16.856±0.019	16.86±0.03	16.81±0.02
S Ori J053954.3–023719	16.939±0.015	16.838±0.008	16.832±0.008	16.82±0.03
S Ori J053825.4–024241	16.96±0.02	17.11±0.10	16.811±0.012	16.85±0.03
S Ori 25	17.063±0.019	16.915±0.011	16.989±0.015	16.932±0.019
S Ori J053826.1–024041	16.92±0.04	16.97±0.04	16.99±0.03	16.93±0.03
S Ori 27	17.03±0.03	17.06±0.02	17.01±0.02	17.03±0.03
S Ori J053922.2–024552	17.056±0.012	17.06±0.03	17.077±0.015	17.050±0.014
S Ori J054014.0–023127	17.069±0.016	16.983±0.016	16.95±0.03	17.07±0.03
S Ori 28	17.207±0.019	17.165±0.013	17.217±0.015	17.15±0.03
S Ori 31	17.207±0.016	17.230±0.017	17.252±0.007	17.226±0.019
S Ori 30	17.273±0.016	17.297±0.016	17.284±0.010	17.290±0.010
S Ori 32	17.33±0.02	17.300±0.017	17.356±0.013	17.34±0.02
S Ori J054004.5–023642	17.579±0.012	17.535±0.013	17.506±0.007	17.516±0.020
S Ori 36	17.707±0.009	17.710±0.009	17.710±0.004	17.713±0.008
S Ori J053918.1–025257	18.62±0.05	18.68±0.05	18.68±0.05	18.64±0.04
S Ori 42	19.064±0.009	19.142±0.019	19.088±0.009	19.04±0.03
S Ori 45	19.484±0.013	16.49±0.03	19.46±0.03	19.48±0.03
S Ori J053929.4–024636	19.74±0.04	19.76±0.03	19.78±0.04	19.73±0.02
S Ori 71	19.91±0.04	19.96±0.02	19.901±0.012	20.02±0.02
S Ori J053849.5–024934	20.150±0.017	20.18±0.04	20.118±0.017	20.081±0.019
S Ori 51	20.22±0.07	20.24±0.04	20.23±0.05	20.23±0.02
S Ori 50	20.54±0.09	20.53±0.03	20.60±0.04	20.48±0.02
S Ori 47	20.50±0.03	20.52±0.04	20.52±0.06	20.49±0.03
S Ori J053944.5–025959	20.78±0.06	20.75±0.03	20.75±0.05	20.74±0.03
S Ori 53	20.95±0.06	21.01±0.03	20.91±0.06	20.96±0.04
S Ori J054007.0–023604	21.16±0.06	21.17±0.07	21.18±0.08	21.16±0.07
S Ori J053956.8–025315	21.27±0.04	21.29±0.05	21.24±0.03	21.25±0.07
S Ori J053858.6–025228	21.91±0.20:	22.23±0.18:	22.3±0.2:	22.17±0.11:

^a 00#1: primera noche de observación durante WFC00; 00#2: segunda noche de WFC00; 00#3: tercera noche de WFC00; 03: noche de WFC03

7.5.1 Enanas marrones variables en escalas temporales largas

Dos enanas marrones, S Ori J053847.2–025756 y S Ori 42, varían significativamente ($\varpi_{LT} \geq 0.95$) de la época WFC00 a la WFC03. La amplitud de sus curvas de luz se ofrece en la Tabla 7.5. Estos objetos representan un 7% de la muestra final de enanas marrones. Ya que nuestras observaciones no son igualmente sensibles a la variabilidad larga como a la

Tabla 7.4: Parámetros de variabilidad de largo, medio y corto rango de toda la muestra. Véase la definición de cada ϖ en la Sección 4.

Nombre	ϖ_{LT}	ϖ_{LT}	ϖ_{LT}	ϖ_{MT}	ϖ_{MT}	ϖ_{MT}	ϖ_{ST}	ϖ_{ST}	ϖ_{ST}	ϖ_{ST}
	00#1-03	00#2-03	00#3-03	00#1-00#2	00#1-00#3	00#2-00#3	00#1	00#2	00#3	03
S Ori J053847.2-025756	0.93	0.97	0.95	0.2	0.5	0.1	0.5	0.2	0.4	0.4
S Ori J053829.0-024847	0.6	0.9	0.8	0.5	0.6	0.1	0.8	0.5	0.9	0.5
S Ori J053954.3-023719	0.6	0.5	0.4	0.0	0.1	0.0	0.5	0.1	0.3	0.8
S Ori J053825.4-024241	0.96	1.00	0.8	0.98	0.99	0.99	0.6	0.98	0.4	0.8
S Ori 25	0.97	0.6	0.9	0.97	0.94	0.94	0.6	0.4	0.6	0.5
S Ori J053826.1-024041	0.4	0.8	0.8	0.8	0.91	0.6	0.94	0.95	0.9	0.6
S Ori 27	0.1	0.8	0.4	0.7	0.4	0.90	0.7	0.7	0.7	0.7
S Ori J053922.2-024552	0.3	0.5	0.6	0.2	0.6	0.6	0.3	0.5	0.2	0.4
S Ori J054014.0-023127	0.2	0.98	0.97	0.96	0.98	0.9	0.4	0.5	0.9	0.8
S Ori 28	0.93	0.6	0.92	0.8	0.3	0.95	0.6	0.5	0.6	0.7
S Ori 31	0.7	0.1	0.6	0.6	0.8	0.8	0.6	0.7	0.2	0.5
S Ori 30	0.6	0.2	0.2	0.6	0.3	0.6	0.5	0.6	0.3	0.2
S Ori 32	0.5	0.8	0.4	0.7	0.7	0.97	0.6	0.7	0.4	0.6
S Ori J054004.5-023642	0.94	0.7	0.3	0.8	0.95	0.90	0.3	0.5	0.2	0.5
S Ori 36	0.2	0.1	0.1	0.1	0.2	0.0	0.2	0.3	0.0	0.1
S Ori J053918.1-025257	0.7	0.7	0.7	0.9	0.94	0.4	0.95	0.96	0.93	0.9
S Ori 42	0.6	0.98	0.8	0.9	0.5	0.8	0.1	0.97*	0.1	0.5
S Ori 45	0.1	0.0	0.6	0.1	0.6	0.7	0.1	0.7	0.7	0.6
S Ori J053929.4-024636	0.3	0.6	0.8	0.3	0.7	0.6	0.7	0.7	0.7	0.3
S Ori 71	0.9	0.9	0.9	0.6	0.2	0.7	0.5	0.4	0.3	0.2
S Ori J053849.5-024934	0.8	0.94	0.5	0.3	0.5	0.7	0.1	0.6	0.1	0.2
S Ori 51	0.1	0.2	0.0	0.2	0.1	0.1	0.8	0.8	0.5	0.2
S Ori 50	0.7	0.6	0.8	0.3	0.7	0.8	0.90	0.4	0.3	0.1
S Ori 47	0.2	0.6	0.4	0.3	0.3	0.0	0.1	0.7	0.6	0.1
S Ori J053944.5-025959	0.4	0.1	0.1	0.4	0.4	0.1	0.6	0.4	0.4	0.1
S Ori 53	0.2	0.8	0.4	0.6	0.4	0.7	0.4	0.1	0.4	0.3
S Ori J054007.0-023604	0.0	0.3	0.1	0.2	0.2	0.0	0.3	0.7	0.5	0.7
S Ori J053956.8-025315	0.2	0.4	0.1	0.3	0.3	0.3	0.1	0.2	0.2	0.5

* La curva de luz de S Ori 42 estaba afectada por la traza luminosa de un satélite artificial.

intermedia o corta, este porcentaje representa un límite inferior a la frecuencia real de enanas marrones jóvenes con variabilidad en escalas temporales largas. Las escalas exactas, que podrían ser entre varios días y años, son en realidad desconocidas para nosotros. Este tipo de variabilidad podría estar asociada con la evolución de rasgos superficiales lentamente variables, tales como nubes de polvo o manchas de tipo solar, o con la presencia de discos de acreción o de un compañero cercano interactuante. En el caso de S Ori J053847.2-025756, no se dispone de datos espectrales y su emisión $H\alpha$ es desconocida. Dada su temperatura efectiva relativamente alta (~ 2800 K, obtenida a partir de su color $I - J$), la formación de manchas de origen magnético o de un disco de acreción podrían estar favorecidas sobre la condensación de polvo (Mohanty et al. 2002; Joergens et al. 2003). La enana marrón S Ori 42 es ~ 2 mag más débil y más fría, con una temperatura efectiva estimada en alrededor de 2500 K. Se espera que haya condensación de polvo a estas temperaturas frías; sin embargo, la emisión $H\alpha$ notablemente alta de S Ori 42 (Tabla 7.2) apoya los escenarios que involucran caída de masa.

Entre nuestra lista final de enanas marrones, S Ori 71 es el emisor $H\alpha$ más intenso (Tabla 7.2). Esta fuente es un objeto no variable de acuerdo con nuestros criterios. Aún así, los tres ϖ_{LT} están bastante cerca del límite 0.95, lo que sugiere que podría tratarse en realidad de una variable en escalas largas con una amplitud de ~ 0.13 mag. S Ori 71 es bastante débil, y los errores fotométricos relativamente grandes pueden habernos impedido detectar una clara variación de magnitud. La persistente e intensa emisión $H\alpha$ de S Ori 71 sugiere que, para este objeto en particular, la emisión está probablemente relacionada con

la presencia de acreción o a un compañero cercano interactuante (Barrado y Navascués et al. 2002a).

7.5.2 Enanas marrones variables en escalas intermedias

Seis candidatas a enana marrón joven presentan variaciones significativas noche a noche en la banda I durante la campaña WFC00. Muestran al menos uno de los tres valores de ϖ_{MT} mayores que 0.95. La amplitud de sus curvas se proporciona en la Tabla 7.5. Representan un 21% de nuestra muestra final. Las posibles causas que podrían provocar la variabilidad fotométrica en escalas intermedias son: ocultamiento variable por polvo circunsubestelar, distribución heterogénea de manchas frías o calientes que cubran un alto porcentaje de la superficie subestelar, condensados de polvo en la atmósfera, variaciones en la tasa de acreción y tránsitos de compañeros débiles en órbitas cecanas. Destacamos dos casos, los de S Ori J053825.4–024241, una enana marrón quasi-T Tauri (tratada en el próximo Capítulo), y S Ori 25.

Hay espectros ópticos disponibles para S Ori 25. Muestran una fuerte emisión $H\alpha$, con una anchura al 10% de la intensidad en el pico mayor que 100 km s^{-1} (véanse las referencias dadas en la Tabla 7.2). La emisión $H\alpha$ de S Ori 25 es marcadamente estable en escalas temporales de años. Además, este objeto parece mostrar una modulación de la curva de luz con un periodo de $\sim 40 \text{ h}$, como discutiremos después.

Las otras cuatro candidatas a enanas marrones variables en escalas temporales intermedias son S Ori J054014.0–023127, S Ori 28, S Ori 32 y S Ori J054004.5–023642. No hay espectroscopia disponible para ninguna de ellas. Sin embargo, S Ori J054014.0–023127, para la que determinamos una variabilidad fotométrica con amplitud de $\sim 0.12 \text{ mag}$, aparece bastante sobreluminosa en el diagrama color–magnitud I vs. $I - J$.

7.5.3 Enanas marrones variables en escalas temporales cortas

Tres candidatas a enanas marrones de σ Orionis han sido clasificadas como variables probables en escalas temporales cortas de acuerdo con nuestro criterio ϖ_{ST} . Son las fuentes denominadas S Ori J053825.4–024241, S Ori J053826.1–024041 y S Ori J053918.1–025257. Además, aunque los valores ϖ_{ST} de S Ori 27 y S Ori 28 están por debajo del límite 0.95, hemos medido picos fiables en los periodogramas de sus curvas de luz, lo que sugiere clasificarlas también como enanas marrones variables cortas (vease Sec. 7.5.4). Las amplitudes de las curvas de luz se dan en la Tabla 7.5.

Las intensas variaciones fotométricas intra-noche observadas en S Ori J053826.1–024041 y S Ori J053918.1–025257 se mantuvieron durante tres o más días. Ambas fuentes son variables fotométricas, aparentemente estocásticas, con amplitudes pico a pico de ~ 0.10 – 0.15 mag en escalas temporales tan cortas como el intervalo entre exposiciones consecutivas ($\sim 20 \text{ min}$). No hemos clasificado estos dos objetos como variables en escalas intermedias. Sin embargo, S Ori J053825.4–024241, que posee un exceso de emisión en $2.2 \mu\text{m}$, verifica nuestros criterios de variabilidad intermedia.

En principio, la variabilidad de corto periodo está asociada más probablemente a variaciones rápidas en la superficie de un objeto que en un disco, donde las escalas temporales relevantes deben de ser del orden del periodo de revolución de sus partículas. Sin embargo, el escenario de la modulación rotacional requiere periodos de rotación muy rápidos,

tan cortos como una o dos horas. En contraste, los movimientos verticales intensos de células convectivas (burbujeo) causados por la convección turbulenta podrían modificar el recubrimiento fotosférico de nubes de polvo o de manchas magnéticas oscuras en tiempos muy cortos. Esta idea está apoyada por la mayor importancia de la fuente de calor interna durante las etapas más tempranas de evolución de los objetos subestelares, que empuja el material caliente desde el interior a la fotosfera. La caída de masa desde un disco o la formación (o aparición) de una mancha caliente podrían también explicar el repentino abrillantamiento de gran amplitud (por más de 200 mmag) de la variable inestable S Ori J053825.4–024241 durante la segunda noche de WFC00.

7.5.4 Una búsqueda de periodicidades

Se ha realizado análisis de series temporales sobre 56 curvas de luz en nuestra muestra final (28 candidatas a enanas marrones $\times$ 2 épocas). Hemos usado PERIOD, un paquete de análisis de series temporales (desarrollado por Vik Dhillon) dentro de la colección de software STARLINK, que incluye los algoritmos Lomb-Scargle (Lomb 1976; Scargle 1982) y CLEAN (Roberts, Lehar & Dreher 1987). Los límites en la búsqueda de frecuencia fueron la frecuencia crítica de Nyquist y la inversa del máximo recubrimiento temporal. Se utilizaron cinco iteraciones con una ganancia de 0.1 durante las ejecuciones con CLEAN. Los periodogramas de tres blancos (S Ori 25, S Ori 27 y S Ori 28) muestran picos significativos, que son al menos cinco veces mayores que el ruido típico en los periodogramas de objetos no variables de brillo similar.

S Ori 25 es una enana marrón variable en escalas temporales intermedias cuya curva de luz parece subir y bajar durante las tres noches de la campaña de WFC00. El periodograma de CLEAN en la ventana superior de la Figura 7.6 muestra un pico muy potente en 40 ± 8 h (0.61 ± 0.13 day $^{-1}$) y sus armónicos. El pico también aparece en el periodograma Lomb-Scargle. Los datos de WFC03 no son suficientes para probar esta detección, ya que la cobertura fue de sólo ~ 5 h. Adoptaremos un radio de 0.45 ± 0.05 R $_{\odot}$ para S Ori 25. La imprecisión en la determinación del radio está estimada a partir del intervalo posible de edades, 1–8 Ma, y de las trazas evolutivas de Chabrier et al. (2002). La velocidad rotacional proyectada, $v \sin i$, de 9.4 ± 1.0 km s $^{-1}$ (medida por Muzerolle et al. 2003) da un periodo rotacional máximo $P/\sin i = 58 \pm 9$ h para S Ori 25, lo que es compatible con nuestros resultados. Más aún, usando el periodo rotacional medido, podemos restringir los valores tanto del ángulo de inclinación ($i = 46_{-13}^{+16}$ deg) como de la velocidad rotacional (14 ± 4 km s $^{-1}$). El periodo de 40 h es, con mucho, mayor que los encontrados en la bibliografía para enanas marrones de campo (excepto por el periodo de 238 h detectado en 2MASSW J1300425+191235 por Gelino et al. 2002), pero similar a aquellos descubiertos por Joergens et al. (2003) en la joven región de formación estelar Chamaeleon I. Mientras que la duración de la modulación periódica de S Ori 25 parece ser generalmente mayor que las de las enanas marrones de campo, la medida de su $v \sin i$ es similar (Mohanty & Basri 2003; Bailer-Jones 2004). Además, la intensa emisión H α en S Ori 25 sugiere acreción de masa. Un disco de acreción sincronizado rotacionalmente al joven objeto central podría explicar la baja velocidad angular de S Ori 25. La velocidad angular se mantendría constante en un valor bajo hasta que el disco se disipase y se rompiera el acoplamiento, momento en que el objeto central seguiría contrayéndose. Se piensa que un escenario similar ocurre en las estrellas T

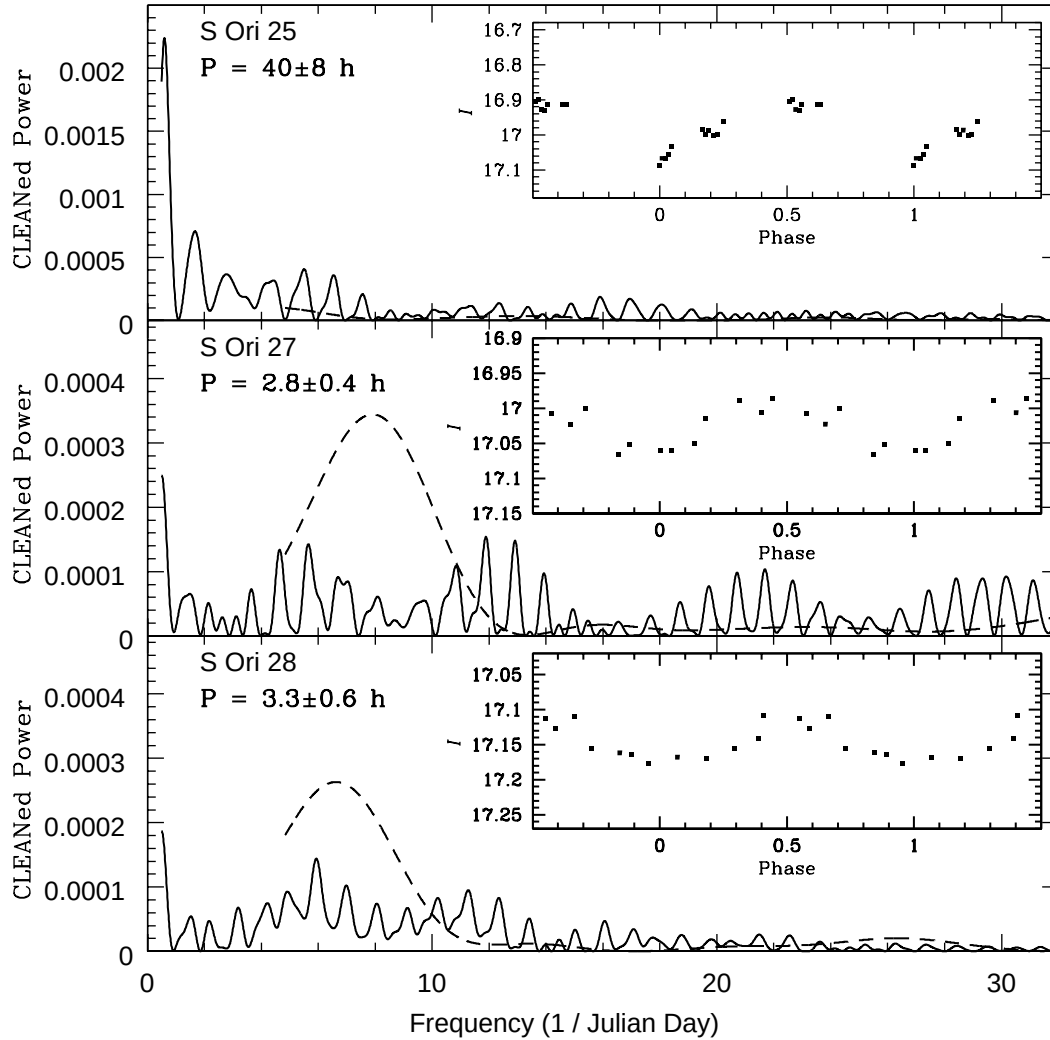


Figura 7.6: Periodogramas de las curvas de luz de S Ori 25, S Ori 27 y S Ori 28 (de arriba a abajo) correspondientes a WFC00 (línea continua) y WFC03 (discontinua). Los diagramas insertos muestran las curvas de luz asociadas con cada pico del periodograma (WFC00, WFC03 y WFC03, respectivamente). Nótese que las escalas de la potencia (CLEAN), de la magnitud I y de la época de S Ori 25 son diferentes de las de S Ori 27 y 28. Se dan más detalles en el texto.

Tauri clásicas.

Los periodogramas de S Ori 27 y S Ori 28 muestran picos aislados en 2.8 ± 0.4 y 3.3 ± 0.6 h, respectivamente. Las curvas de luz de WFC03 puestas en fase muestran modulaciones sinusoidales con amplitudes de unas 30 mmag, tal y como se ilustra en la Figura 7.6. Desafortunadamente, los datos de WFC03 cubren sólo del orden de un ciclo; por tanto, los periodos determinados son bastante inciertos. Las curvas de luz de WFC00 no muestran

variaciones periódicas en escalas de ~ 3 h. Recordemos que S Ori 28 es también una candidata a enana marrón con variabilidad en escalas intermedias.

El tipo de variabilidad periódica, posiblemente relacionado con la rotación, podría estar causado por heterogeneidades distribuidas sobre la fotosfera (en forma de polvo o de manchas) que evolucionan en escalas temporales de unas pocas horas. La rápida evolución de rasgos atmosféricos que provocan la detección de periodos “falsos” si se tienen en cuenta sólo piezas de curva de luz fue previamente anunciado por Bailer-Jones & Mundt (2001) y Gelino et al. (2002). Análogamente a las estrellas T Tauri clásicas de Tipo II p descritas por Herbst et al. (1994), manchas calientes asociadas a acreción inestable o a rotación podrían originar las modulaciones. Las manchas calientes no duran cientos o miles de rotaciones, tal y como lo hacen las manchas frías.

Otros estudios de variabilidad fotométrica en miembros subestelares del cúmulo σ Orionis han sido publicados por Bailer-Jones & Mundt (2001) y ZO03. S Ori 31 y S Ori 45 son los únicos objetos en común con este trabajo. Bailer-Jones & Mundt (2001) anunciaron un periodo de rotación de 7.5 ± 0.6 h para S Ori 31. Aunque esta escala temporal es accesible para los datos de WFC00, la amplitud sugerida de variación fotométrica es bastante pequeña, ~ 10 mmag. Estos autores también encontraron un pico en 30 ± 8 min en el periodograma de S Ori 45, una enana marrón de tipo M8.5, masa $\sim 25 M_{\text{Jup}}$ emisión $H\alpha$ intensa. Un periodo corto comparable (~ 46 min) fue afirmado por ZO03. Sin embargo, como fue hecho notar por estos autores, dado el radio esperado de esta joven enana marrón, tal periodo no podría estar asociado a rotación porque implicaría una velocidad rotacional extremadamente rápida e inconsistente con equilibrio hidrostático.

ZO03 también detectaron una segunda modulación, más potente, en sus curvas de luz ópticas e infrarrojas de S Ori 45 con un periodo de 2.5–3.6 h, y que podría estar asociado a rotación. El conjunto de datos WFC00 fue también considerado por ZO03. La curva de luz a partir de nuestro nuevo análisis es muy similar a la de ZO03. Detectamos el periodo anunciado por ellos una vez eliminados los puntos alrededor de la fase 0.5, como sugirieron tras utilizar información de la fotometría infrarroja. De acuerdo con nuestros criterios conservadores para la determinación de variabilidad fotométrica, S Ori 45 está cerca de la frontera entre fuentes variables y no variables. Este es también el caso de las enanas marrones periódicas S Ori 27 y S Ori 28. A partir de nuestro trabajo y de datos recogidos de la bibliografía, encontramos que la frecuencia de enanas marrones periódicas en nuestra muestra final es del 18%.

7.5.5 Últimos comentarios

De nuestra lista final de 28 enanas marrones jóvenes en el cúmulo σ Orionis, nueve muestran algún tipo de variabilidad fotométrica en el óptico (en escalas temporales cortas, medias o largas) con un 5% de probabilidad de detección positiva falsa, lo que representa un 39% de la muestra. Este porcentaje aumentaría hasta un 46% si también se consideran S Ori 27, S Ori 28 (variables periódicas en escalas cortas con probabilidades de detección positiva falsa ligeramente superior al 5%), S Ori 31 y S Ori 45 (enanas marrones periódicas según otros trabajos). Si sólo tenemos en cuenta las candidatas a enanas marrones más brillantes que $I=19.5$, para las que los errores fotométricos son razonablemente bajos, la frecuencia de variabilidad resulta ser del 72%. Resumimos nuestros resultados en la Tabla 7.5, donde

las abreviaturas LT, MT y ST significan variabilidad en escalas largas, medias y cortas, respectivamente. Si se ha informado de una posible señal periódica tanto en este trabajo como en la bibliografía, se ha usado la letra “P”. Hemos considerado a S Ori 27, 28, 31 y 45 como variables ST por sus cortas periodicidades fotométricas. También se proporcionan en la Tabla 7.5 las amplitudes o las dispersiones de las curvas de luz y otras propiedades importantes, como emisión $H\alpha$ intensa o exceso infrarrojo.

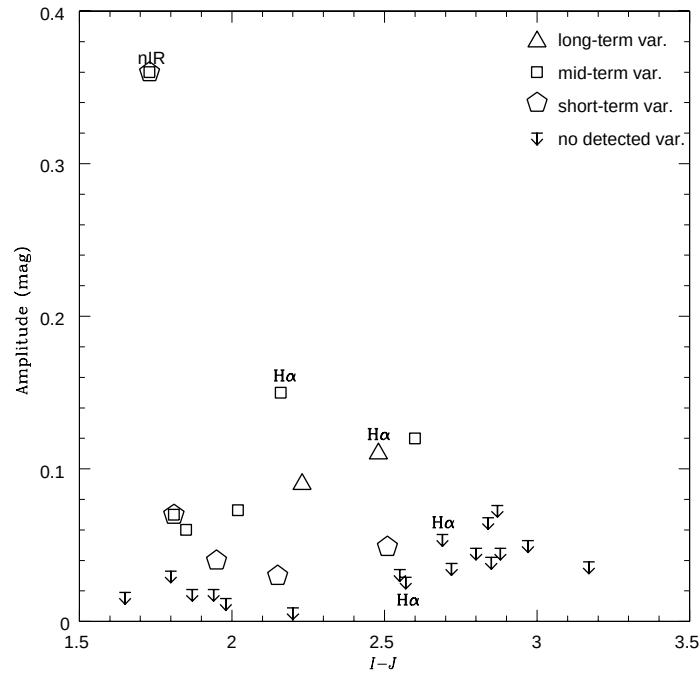


Figura 7.7: Amplitudes de variabilidad en función del color $I - J$. Los triángulos, cuadrados y pentágonos huecos denotan enanas marrones variables en escalas temporales largas, intermedias y cortas, respectivamente. Para el resto de objetos de nuestra muestra se enseñan los límites superiores. También se indican los objetos con emisión $H\alpha$ intensa o con exceso en el infrarrojo cercano.

En la Figura 7.7 hemos representado las amplitudes fotométricas de la muestra final de objetos en función de su color $I - J$, que es un indicador de temperatura y masa. Hemos utilizado diferentes símbolos para cada tipo de variabilidad, y flechas para las fuentes a las que no se les ha detectado variabilidad. Como se infiere de la Figura, no hay una tendencia clara entre las amplitudes y el color de las enanas marrones. S Ori J053825.4–024241 muestra la amplitud más grande que, como se ha discutido antes, podría estar asociada a la presencia de un disco. Hay que hacer notar a partir de la figura que las mayores variabilidades en la banda I se encuentran en el grupo de enanas marrones variables en escalas medias y largas. Encontramos variabilidad fotométrica en miembros del cúmulo σ Orionis con masas en el rango $70\text{--}25\text{ M}_{\text{Jup}}$.

Tabla 7.5: Sumario de la variabilidad fotométrica.

Nombre	Tipo de variabilidad ^a	Amplitud ^b (mag)	Propiedades ^c
S Ori J053847.2–025756	LT	0.09±0.02	–
S Ori J053829.0–024847	–	≤0.03	–
S Ori J053954.3–023719	–	≤0.02	–
S Ori J053825.4–024241	MT + ST	0.36±0.04	nIR
S Ori 25	MT (P)	0.15±0.02	H α
S Ori J053826.1–024041	ST	0.04	–
S Ori 27	ST (P)	0.03	–
S Ori J053922.2–024552	–	≤0.019	–
S Ori J054014.0–023127	MT	0.12±0.05	–
S Ori 28	MT + ST (P)	0.07±0.03	–
S Ori 31	ST (P ^d)	≤0.02	–
S Ori 30	–	≤0.015	–
S Ori 32	MT	0.06±0.02	–
S Ori J054004.5–023642	MT	0.073±0.014	–
S Ori 36	–	≤0.009	–
S Ori J053918.1–025257	ST	0.05	–
S Ori 42	LT	0.11±0.03	H α
S Ori 45	ST (P ^d)	≤0.03	H α
S Ori J053929.4–024636	–	≤0.03	–
S Ori 71	–	≤0.06	H α
S Ori J053849.5–024934	–	≤0.05	–
S Ori 51	–	≤0.04	–
S Ori 50	–	≤0.05	–
S Ori 47	–	≤0.04	–
S Ori J053944.5–025959	–	≤0.04	–
S Ori 53	–	≤0.08	–
S Ori J054007.0–023604	–	≤0.07	–
S Ori J053956.8–025315	–	≤0.05	–

^a: Tipo de variabilidad. LT: en escalas largas; MT: en escalas intermedias; ST: en escalas cortas; P: periódica; –: sin variabilidad detectada.

^b: Amplitudes de variabilidad fotométrica: amplitudes pico a pico para variables LT y MT y amplitudes $\sigma(I)$ para ST y no variables.

Para las últimas, los valores deben entenderse como límites superiores de variabilidad.

^c: Propiedades o rasgos espectrales prominentes. H α : emisión H α intensa; nIR: exceso en el infrarrojo.

^d: Periódica de acuerdo con Bailer-Jones & Mundt (2001) y/o ZO03.

7.6 Conclusiones y resumen

Hemos monitorizado fotométricamente en la banda I una muestra de 32 candidatas a enanas marrones jóvenes en el cúmulo estelar σ Orionis. Algunas de ellas ya han sido confirmadas espectroscópicamente como miembros del cúmulo. Sus masas abarcan el rango desde el límite subestelar hasta la frontera con los objetos de masa planetaria. De estos objetos subestelares, 28 tienen indicadores de variabilidad fiables, y sus curvas de luz se han estudiado en detalle. Ésta es una de las muestras más grandes de enanas marrones jóvenes monitorizadas en busca de variabilidad fotométrica.

Con un 5% de probabilidad de detección positiva falsa, hemos encontrado que nueve de

nuestros objetos muestran variabilidad en la banda I en distintas escalas temporales. Si incluimos las enanas marrones periódicas S Ori 27 y S Ori 28 encontradas en este trabajo, y S Ori 31 y S Ori 45 anunciadas en la bibliografía, la incidencia de enanas marrones variables en el cúmulo es alrededor de 46%. Esta frecuencia es mayor que la encontrada en estrellas de muy baja masa y enanas marrones de campo (aproximadamente un 33%). Las amplitudes de variabilidad medidas también son unas tres veces más grandes en este estudio. Este comportamiento diferente puede achacarse a la juventud de las enanas marrones de σ Orionis. Hemos clasificado la variabilidad fotométrica en base a las variaciones en escalas temporales largas, medias y cortas:

- *Variabilidad fotométrica en escalas largas (variaciones año a año)*. Dos candidatos subestelares (un mínimo de 7% de la muestra final) muestran variaciones en las magnitudes diferenciales medias medidas en dos épocas separadas 2.09 años, con amplitudes de 0.09–0.11 mag. No muestran variaciones ni inter-noche ni intra-noche.
- *Variabilidad intermedia (variabilidad de noche a noche)*. Seis blancos (21 %) parecen ser variables de noche a noche, con amplitudes de variación en el rango 0.06–0.36 mag. Tres de ellos tienen variaciones de magnitud mayores que 0.1 mag, lo que las haría ser las enanas marrones con las mayores amplitudes detectadas hasta ahora. S Ori 25 muestra una modulación periódica de la curva de luz de ~ 40 h, coherente con la reciente determinación del parámetro $v \sin i$, lo que da una velocidad rotacional de $14 \pm 4 \text{ km s}^{-1}$. Un frenado magnético debido a un disco de acreción podría ser el responsable del largo periodo detectado.
- *Variabilidad de término corto (escala de horas)*. Tres de nuestros objetos muestran una aparente variabilidad fotométrica de tipo aleatorio en escalas de unas pocas horas. Las amplitudes de las curvas de luz de dos de estos objetos parecen ser estables durante al menos tres noches consecutivas con desviaciones estándares alrededor de 0.04–0.05 mag. La tercera enana marrón variable en escala corta, S Ori J053825.4–024241, es también una variable en escala intermedia y que muestra la mayor variabilidad en nuestra muestra.

Con probabilidades de detección positiva falsa ligeramente mayores, S Ori 27 y S Ori 28 muestran picos en los periodogramas de WFC03 alrededor de 3 h, que podrían estar relacionados con periodos de rotación rápidos, como los encontrados en otras enanas marrones jóvenes y enanas ultrafrías de campo evolucionadas. Estas rápidas rotaciones podrían explicarse por la disipación de un disco circunsubestelar o por la evolución de rasgos superficiales en escalas temporales de unas pocas rotaciones.

Hay que hacer notar la correlación encontrada entre la gran amplitud de variabilidad y la detección de excesos infrarrojos o emisión $H\alpha$ intensa, lo que podría ser una evidencia de un disco de acreción subestelar. Cuatro de las trece enanas marrones con espectroscopia disponible poseen $H\alpha$ en emisión intensa ($pEW(H\alpha) > 30 \text{ \AA}$). Dos de ellas (S Ori 25 y S Ori 42) son variables con amplitudes de ~ 0.12 mag y en escalas mayores de un día. Respecto a las otras dos, S Ori 45 ha sido confirmada independientemente como variable fotométrica por ZO03, y S Ori 71 es sospechosa de ser realmente una variable débil de largo periodo. Se ha detectado un exceso en el infrarrojo en la banda K_s en la enana marrón variable con

la mayor amplitud de la muestra, S Ori J053825.4–024241. Este es uno de los primeros objetos subestelares en mostrar una correlación entre exceso infrarrojo y gran variabilidad fotométrica, en analogía con las estrellas T Tauri de baja masa.

Un único escenario de variabilidad apenas puede explicar simultáneamente todas las escalas temporales involucradas. Se han sugerido como posibles causas de la variabilidad la presencia de discos de acreción, recubrimiento heterogéneo en la fotosfera por manchas magnéticas frías o por nubes de polvo de evolución rápida, transferencia de masa o eclipses debido a compañeros. Se necesitan tanto monitorización de largo término en varias bandas como estudios espectroscópicos completos para concluir sin ambigüedad cuál es el escenario de variabilidad preferido en objetos jóvenes por debajo del límite subestelar.

7.7 Addendum

La detección de periodos de 2–3 h en objetos subestelares jóvenes como los detectados en esta investigación ha dado lugar a nuevos estudios. Palla & Baraffe (2005a; 2005b) investigaron la pulsación inducida por combustión de deuterio en enanas marrones jóvenes, tomando como ejemplo los miembros subestelares de σ Orionis: S Ori 27 ($P = 2.8 \pm 0.4$ h; Caballero et al. 2004 –este trabajo–), S Ori 28 ($P = 3.3 \pm 0.6$ h; Caballero et al. 2004 –este trabajo–), S Ori 31 ($P = 1.8 \pm 0.2$ h; Bailer-Jones & Mundt 2001), S Ori 45 ($P = 0.5 \pm 0.2$ h; Zapatero Osorio et al. 2003). Debido a la sensibilidad de las reacciones nucleares a la temperatura, las estrellas completamente convectivas pueden convertirse en pulsacionalmente inestables durante la fase de combustión de deuterio a través del mecanismo ϵ (Gabriel 1964; Toma 1972). Palla & Baraffe propusieron la identificación de esta nueva clase de pulsadores subestelares, cuyos prototipos son los objetos enunciados antes. Son necesarios nuevos trabajos, tanto teóricos como observacionales, para investigar estas pulsaciones inducidas de periodo corto (confirmar y determinar con mayor precisión los periodos; medir la variabilidad temporal de la amplitud y periodicidad de las modulaciones; cuantificar la cercanía de los objetos a la banda de inestabilidad en distintos diagramas color-magnitud).

Se ha preparado un diagrama adicional que relaciona el tipo espectral, la pseudo anchura equivalente de la emisión $H\alpha$ (es decir, la acreción) y la amplitud de la variabilidad fotométrica. Se han utilizado datos de $pEW(H\alpha)$ mostrados en este Capítulo y en el Capítulo 8. En el diagrama sólo se muestran aquellos objetos con $pEW(H\alpha)$ medida. Los objetos por encima de o sobre la línea discontinua, cuyos sonbres se han etiquetado en la Figura, son acretores según el criterio de Barrado y Navascués & Martín 2003. *Todos los acretores son variables fotométricamente con amplitudes >0.1 mag.*

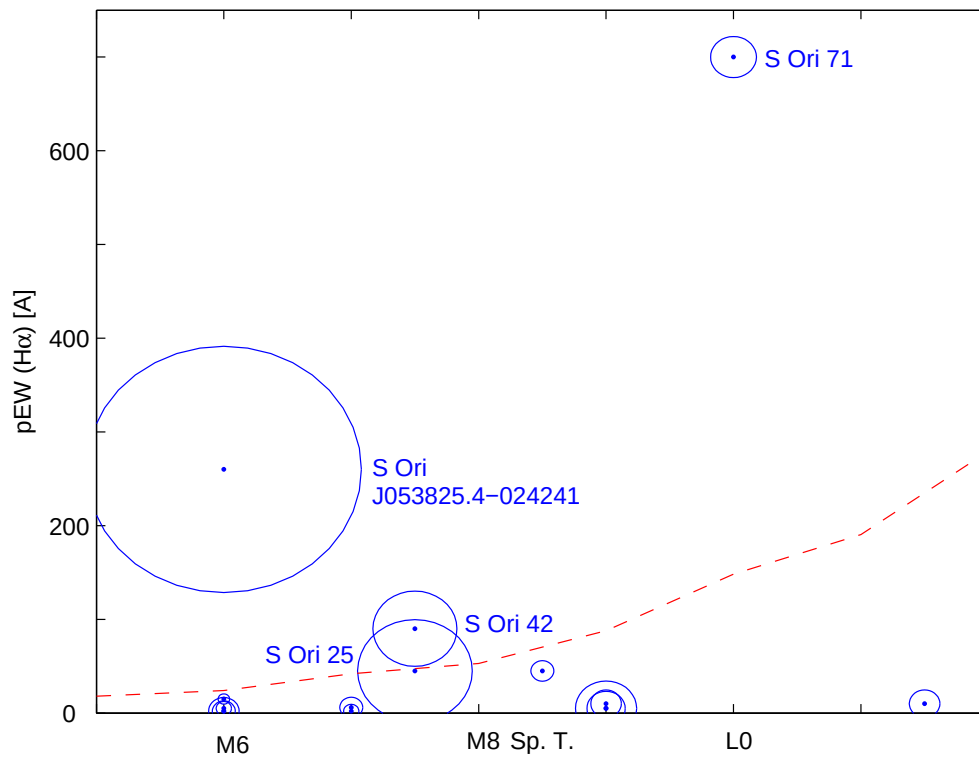


Figura 7.8: Pseudoanchura equivalente de la emisión $H\alpha$ en función del tipo espectral para los objetos con $pEW(H\alpha)$ medida (puntos). El radio de los círculos es proporcional a la amplitud de variabilidad fotométrica. La línea discontinua marca el criterio de acreción según Barrado y Navascués & Martín (2003). Se han etiquetado los nombres de los objetos acretores más variables.

