

S Ori J053825.4–024241: un objeto pseudo-T Tauri Clásico en la frontera subestelar

Y el que arde vuela a la velocidad de la luz

Lagartija Nick (Val del Omar)

Presentamos un análisis espectrofotométrico de S Ori J053825.4–024241, un candidato a miembro en la frontera subestelar del joven y cercano cúmulo σ Orionis. Nuestras fotometría óptica e infrarroja cercana y espectroscopia de baja resolución indican que S Ori J053825.4–024241 pertenece al cúmulo y que posee una masa estimada a partir de modelos evolutivos de $0.06^{+0.07}_{-0.02} M_{\odot}$, lo que hace que el objeto se trate probablemente de una enana marrón. La velocidad radial de S Ori J053825.4 –024241 es similar a la velocidad sistémica del cúmulo. Este cuerpo, al que hemos clasificado como un objeto $M6.0 \pm 1.0$ de baja gravedad, muestra exceso de emisión en el infrarrojo cercano y variabilidad fotométrica anómalamente grande (medida en la parte roja del óptico y en la banda J) para su tipo espectral, lo que sugiere la presencia de un disco a su alrededor. Las observaciones espectroscópicas en el óptico muestran un exceso de continuo a longitudes de onda cortas y una emisión $H\alpha$ persistente y resuelta (con una pseudoanchura equivalente de unos $-250 \text{ \AA}$), además de la presencia de otras líneas de emisión, permitidas y prohibidas. Lo interpretamos como indicaciones de acreción desde un disco y posiblemente pérdida de masa. Concluimos que, a pesar de la baja masa de S Ori J053825.4–024241, este objeto exhibe algunas de las propiedades típicas de estrellas clásicas T Tauri activas¹.

8.1 Introducción

Las estrellas T Tauri son el puente entre las protoestrellas recién nacidas y las estrellas de edad cero en la secuencia principal. Se encuentran en general en cúmulos abiertos

¹Este capítulo es una versión modificada de un artículo publicado en una revista internacional con arbitraje: J. A. Caballero, E. L. Martín, V. J. S. Béjar, M. R. Zapatero Osorio, R. Rebolo, Ya. Pavlenko & R. Wainscoat 2006a, A&A, 445, 143.

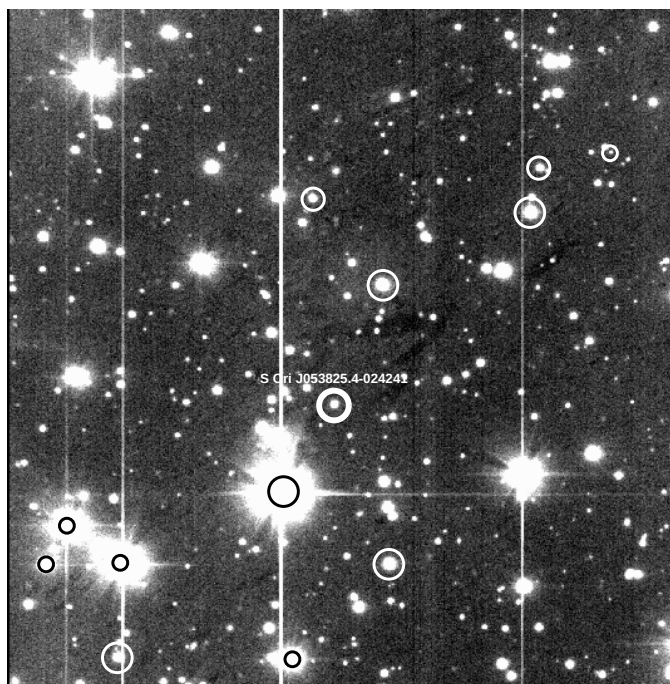


Figura 8.1: Carta de búsqueda de S Ori J053825.4–024241 (etiquetada) tomada en banda *I* con el telescopio IAC-80. Se han indicado con círculos otros miembros estelares y subestelares del cúmulo σ Orionis. El campo de visión es de 6.5×6.5 arcmin².

jóvenes o en regiones cercanas de formación estelar. Sus características espectroscópicas más prominentes son líneas de emisión, especialmente Ca II y la serie de Balmer ($H\alpha$, $H\beta$), y la presencia de litio en absorción. De acuerdo con la intensidad de las líneas de Balmer, se clasifican en estrellas T Tauri clásicas (CTT) y T Tauri de líneas débiles. Algunas estrellas CTT presentan también variabilidad fotométrica irregular, excesos en el ultravioleta y en el infrarrojo, velado en el óptico, fuerte emisión en rayos X y, en ocasiones, chorros. La radiación emitida por las estrellas CTT también puede estar altamente polarizada. El escenario más ampliamente aceptado para explicar todos estos rasgos es la acreción magnetosférica de masa en caída desde un disco circunestelar. Bertout et al. (1988), Appenzeller & Mundt (1989) y Königl (1991) han revisado las propiedades de las estrellas T Tauri y de sus discos.

La fase T Tauri es común en la evolución de estrellas en el rango de masas entre 3 y $0.2 M_{\odot}$. En los últimos años se ha sugerido la existencia de una fase quasi-T Tauri en enanas marrones. Véase, por ejemplo, Muzerolle et al. (2003), Barrado y Navascués & Martín (2003), Natta et al. (2004) o los más recientes artículos por Mohanty et al. (2005) y Furlan et al. (2005) y las referencias allí citadas. La búsqueda y la caracterización sistemáticas de discos alrededor de enanas marrones de diferentes edades y masas pueden ofrecer información sobre los procesos de formación y evolución que dan lugar a los objetos de masa subestelar y a los sistemas planetarios.

S Ori J053825.4–024241 fue identificada por primera vez como un candidato fotométrico a miembro subestelar del joven cúmulo σ Orionis (Caballero et al. 2004 –Capítulo 6–; Béjar

et al. 2004). S Ori J053825.4–024241 exhibe un exceso de emisión considerable en la banda K_s , mientras que su color $R - I$ parece ser algo más azul que el color de otros miembros del cúmulo de magnitud similar. Caballero et al. (2004) descubrieron que S Ori J053825.4–024241 es una fuente fotométricamente variable (Cap. 7). Midieron variaciones en la banda I de hasta 0.36 mag en escalas de unas pocas horas. Este objeto mostraba la mayor amplitud fotométrica de una muestra de 28 enanas marrones jóvenes y es en la actualidad una de las fuentes más variables para su tipo espectral.

En este capítulo presentamos espectroscopia óptica que confirma la pertenencia de S Ori J053825.4–024241 a σ Orionis, en la frontera entre estrellas y enanas marrones. Tanto los datos fotométricos como los espectroscópicos sugieren que el objeto está sufriendo acreción activa de masa. La presencia de discos circun(sub)estelares alrededor de estrellas de baja masa y enanas marrones de σ Orionis había sido inferida previamente por otros autores (p.e., Oliveira et al. 2004 y Scholz & Eisloffel 2004). Sin embargo, las peculiaridades particulares de S Ori J053825.4–024241 merecen un estudio intensivo.

8.2 Observaciones y análisis

8.2.1 Espectroscopia óptica

Hemos obtenido espectros de baja resolución de S Ori J053825.4–024241 usando el 2.56 m Nordic Optical Telescope (NOT, Observatorio del Roque los Muchachos) y el 10 m Keck I Telescope (W. M. Keck Observatory). Su carta de búsqueda está en la Fig. 8.1. La Tabla 8.1 proporciona el *log* de las observaciones espectroscópicas. Los datos brutos fueron reducidos usando tareas del entorno IRAF. Los pasos de reducción incluyeron la sustracción del *bias*, la corrección de *flat field*, la extracción óptima de los espectros, la calibración en longitud de onda y la corrección de respuesta instrumental y contribución telúrica (lo último sólo se realizó sobre los datos del NOT).

Tabla 8.1: *Log* de las observaciones espectroscópicas.

	NOT	Keck
Fecha	2003 dic. 26	2004 ene. 23
MJD	52 999.93	53 027.31
Núm. de espectros	3	2
Tiempo de exp.	3×900 s	1200+390 s
Telescopio	NOT	Keck I
Instrumento	ALFOSC	LRIS
Detector	E2V 2k×2k 42–40	Tektronics 2k×2k
Grisma	#5	#4
Filtro bloqueante	GG 475	GG 495
Recubrimiento λ	5300–9600 Å	5600–8100 Å
Tamaño de píxel	0.19 arcsec	0.213 arcsec
Tamaño de rendija	1.3 arcsec	1.0 arcsec
Dispersión	3.1 Å pixel ^{−1}	1.25 Å pixel ^{−1}
Resolución	12 Å	4.5 Å

ALFOSC

Utilizamos el instrumento AndaLucía Faint Object Spectrograph and Camera (ALFOSC) instalado en el foco Cassegrain de NOT para obtener un espectro de S Ori J053825.4–024241 ($R \sim 600$). Véase en la Tabla 8.1 los detalles observacionales y de configuración instrumental. Hágase notar el *fringing* muy fuerte más al rojo de 7600 Å y el bajo número de cuentas más al azul de ~ 6000 Å. Las condiciones meteorológicas durante las observaciones fueron pobres (cirros y humedad relativa alta).

Usando la misma configuración instrumental y en la misma noche, también tomamos espectros de tres candidatos a miembros adicionales de σ Orionis de brillo similar ($I \sim 17$ mag). Los tiempos de exposición fueron 3×900 s para S Ori J053825.4–024241, y 1000 s para cada uno de los otros tres objetos. Éstos (S Ori J053954.3–023719, S Ori J053838.6–024157 y S Ori J053826.1–024041) fueron encontrados en búsquedas fotométricas por Béjar et al. (2004) y Caballero et al. (2004). En el último artículo se informaba sobre la naturaleza variable en escalas temporales cortas de S Ori J053826.1–024041. Barrado y Navascués et al. (2003) clasificaron a S Ori J053826.1–024041 como un miembro del cúmulo de tipo M8. La Figura 8.2 muestra los espectros NOT, que fueron corregidos de líneas telúricas mediante la observación de estrellas sin rasgos espectrales prominentes.

Tabla 8.2: Magnitud en la banda I , emisión $H\alpha$, índices de pseudocontinuo y tipos espectrales derivados de los datos de NOT.

Nombre	I^a (mag)	pEW ($H\alpha$) (Å)	PC1	PC2	PC3	PC4	Tipo espectral
S Ori J053825.4–024241	16.86 ± 0.06	-230 ± 70	1.2 ± 0.6	1.85 ± 0.17	1.36 ± 0.13	1.7 ± 0.3	$M6.0 \pm 1.0$
S Ori J053954.3–023719	17.03 ± 0.04	-5 ± 1	1.8 ± 0.2	2.0 ± 0.2	1.34 ± 0.18	1.64 ± 0.12	$M6.0 \pm 1.0$
S Ori J053838.6–024157	16.52 ± 0.07	-6 ± 1	1.39 ± 0.14	1.75 ± 0.18	1.3 ± 0.3	1.6 ± 0.2	$M5.5 \pm 1.0$
S Ori J053826.1–024041	16.87 ± 0.06	$[-2, +2]^b$	1.4 ± 0.4	2.2 ± 0.5	1.19 ± 0.18	1.5 ± 0.3	$M5.0 \pm 2.0^c$

^a: De Béjar et al. (2004).

^b: pEW($H\alpha$) = -4 ± 2 Å (de Barrado y Navascués et al. 2003).

^c: El tipo espectral M6.0 se ajusta mejor a la secuencia espectral del cúmulo.

Se derivaron los tipos espectrales a partir de la medida de los índices de pseudocontinuo (PC) de Martín et al. (1996) y por comparación directa con estrellas estándares espectroscópicas bien conocidas. Proporcionamos nuestras medidas en la Tabla 8.2. Notemos que el índice PC1 está afectado por la intensa emisión $H\alpha$ de S Ori J053825.4–024241, y que el índice PC4 está afectado por el fuerte *fringing* en nuestros datos. Los índices PC2 y PC3 permanecen, sin embargo, como indicadores fiables del tipo espectral. En caso de que el velado debido a un exceso de continuo sea muy intenso, los índices PC pueden proporcionar tipos espectrales que son ligeramente más tempranos que los reales. El ajuste polinómico a las relaciones índice PC–tipo espectral dadas por Martín et al. (1996) ofrecen tipos espectrales entre M5 y M6 para las cuatro enanas en nuestro trabajo. En particular, hemos determinado que el tipo espectral de S Ori J053825.4–024241, el blanco principal de este Capítulo, es M6 con una incertidumbre de un subtipo. Los tipos espectrales derivados están de acuerdo con los colores ópticos de los objetos. Nuestra clasificación espectral de S Ori J053826.1–024041 parece diferir en unos tres tipos con respecto a la anterior ofrecida por Barrado y Navascués et al. (2003). Estos autores arguyeron que este objeto era probablemente una binaria para poder explicar su posición en la secuencia magnitud–tipo

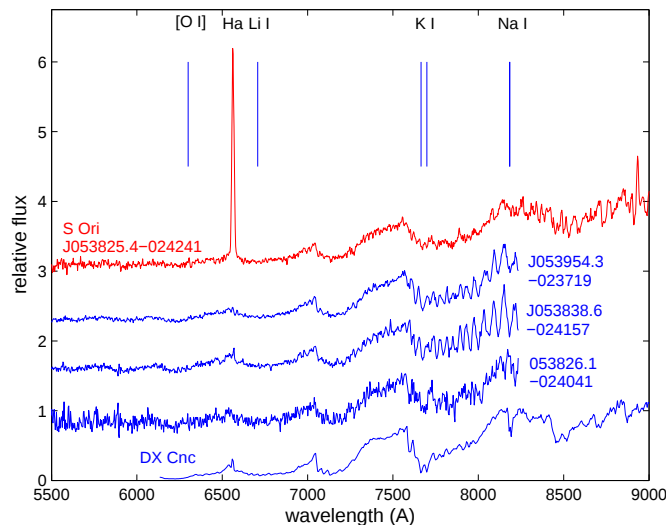


Figura 8.2: Espectros NOT de baja resolución de los candidatos a miembros de σ Orionis. El espectro de arriba corresponde a S Ori J053825.4–024241. Para los otros objetos, no se muestran los datos más allá de 8200 Å debido a la pobre relación señal-ruido. El espectro de la enana de campo de tipo M6.5V DX Cancr (GJ 1111, LHS 248; Martín, Rebolo & Zapatero Osorio 1996), que ha sido degradado a la misma resolución que los datos de NOT, se muestra para comparar. Los espectros han sido desplazados en el eje vertical por claridad. Se han etiquetado algunos rasgos atómicos.

espectral del cúmulo σ Orionis. Sin embargo, un tipo espectral M5–6 se ajusta mejor con la secuencia y con nuestros datos.

Como se puede ver en la Fig. 8.2, el rasgo espectral más prominente de S Ori J053825.4–024241 es $H\alpha$, que se detecta en intensa emisión. Medimos una pseudoanchura equivalente (pEW, anchura equivalente respecto al continuo observado local) de -230 ± 70 Å en el espectro NOT, lo que hace ser a S Ori J053825.4–024241 uno de los emisores más intensos entre los miembros de tipo tardío del cúmulo σ Orionis. Los otros tres objetos no muestran una línea de $H\alpha$ tan intensa (ver Tabla 8.2). La línea prohibida de [O I] $\lambda 6300.3$ también se detecta en emisión con una moderada intensidad en el espectro NOT de S Ori J053825.4–024241. Respecto a los rasgos de absorción, todos los objetos de σ Orionis muestran unas líneas de K I $\lambda\lambda 7664.9, 7699.0$ y Na I $\lambda\lambda 8148.8, 8183.3$ bastante débiles en comparación con las de enanas de campo con tipos espectrales similares (véase la Fig. 8.2). Aunque los dobletes están mezclados a la baja resolución de los datos de NOT, deberían aparecer con pEW de 20 Å y 6 Å en espectros de $\sim$ M6 V, respectivamente. Sin embargo, sólo podemos imponer límites superiores que son significativamente menores. La Tabla 8.3 proporciona nuestras medidas de S Ori J053825.4–024241. Ésto es indicativo de atmósferas de baja gravedad (Martín et al. 1996; Luhman et al. 1997) o a la presencia de un fuerte exceso de continuo; ambas propiedades apoyan la baja edad de los objetos y de su pertenencia al cúmulo σ Orionis. Nuestras medidas de pEW del doblete Na I $\lambda\lambda 8183.3, 8148.8$ están de acuerdo con las medidas de Kenyon et al. (2005) para varios miembros de σ Orionis con tipos M5–6.

Otro excelente indicador de juventud es la presencia de Li I $\lambda 6707.8$ en absorción. La baja resolución y el moderado cociente señal-ruido de los espectros de NOT no nos han permitido detectar de forma clara este rasgo. De acuerdo con Zapatero Osorio et al. (2002a), los miembros de tipo M5–6 de σ Orionis tienen pEW de Li I en el rango 0.3–0.7 Å.

Tabla 8.3: S Ori J053825.4–024241: datos de NOT.

Line	pEW (Å)
[O I] $\lambda 6300.3$	-2.5 ± 1.0
H α $\lambda 6562.8$	-230 ± 70
Li I $\lambda 6707.8$	$< +0.7$
K I $\lambda 7664.9^a$	$< +2.0$
K I $\lambda 7699.0^a$	$< +2.0$
Na I $\lambda 8183.3^a$	$< +2.0$
Na I $\lambda 8184.8^a$	$< +2.0$

^a: Medidas de la línea afectadas por *fringing*.

LRIS

Para comprobar la estabilidad de la emisión H α de S Ori J053825.4–024241, tomamos dos espectros de resolución ligeramente mayor ($R \sim 1700$) de 1200 s y 390 s aproximadamente un mes después de los datos de NOT (véase Tabla 8.1). Los espectros Keck fueron calibrados en longitud de onda usando líneas de emisión de cielo (Osterbrock et al. 1996), que fueron observadas con el blanco. La desviación estándar del ajuste polinómico a la calibración era típicamente de 0.28 Å. No se pudieron corregir los datos de respuesta instrumental o de contribución telúrica ya que fue imposible observar alguna estrella estándar de flujo debido a las paupérrimas condiciones meteorológicas. De los dos espectros, el primero (mostrado en la ventana izquierda de la Figura 8.3) posee un mayor cociente señal-ruido. Aunque el segundo posee una calidad mucho peor, H α es claramente detectada en emisión, como en el primer espectro. Los datos Keck confirman la persistencia de la intensa emisión H α de S Ori J053825.4–024241, y el hecho de que la intensa línea detectada en el espectro de NOT no fue posiblemente un suceso transitorio.

El perfil de la emisión H α observada se muestra en la ventana derecha de la Figura 8.3. Hemos representado los flujos relativos en función del desplazamiento de velocidad desde el centro de la línea y escalado por el pico el flujo H α del objeto. H α aparece bastante simétrica y ensanchada. Está resuelta si se compara con líneas telúricas de emisión en longitudes de onda similares. La FWHM promedio de las líneas de cielo es 3.6 Å (160 km s^{-1}), mientras que la emisión H α de S Ori J053825.4–024241 muestra una FWHM casi dos veces mayor, 6.2 Å (280 km s^{-1}), lo que sugiere un ensanchamiento natural de la línea.

Aparte de H α , también hemos detectado en emisión He I (D₃) $\lambda 5875.8$ y [O I] $\lambda 6300.3$. No se ven variaciones significativas entre los dos espectros Keck consecutivos. Las pseudoanchuras equivalentes medidas en el espectro de mejor calidad se dan en la Tabla 8.4. Las barras de error se estimaron midiendo las anchuras a distintos niveles de pseudocontinuo en un radio de 50 Å alrededor de la líneas. Como se infiere de la intensidad de las líneas

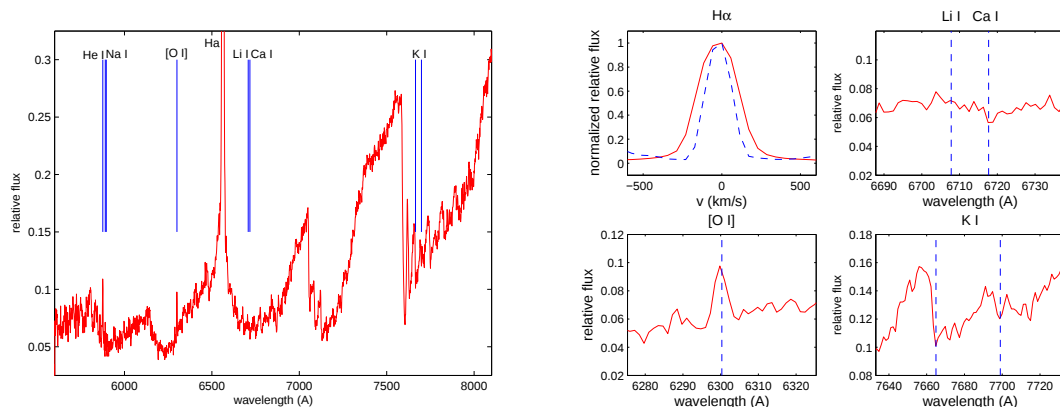


Figura 8.3: *Izquierda*: espectro Keck de S Ori J053825.4–024241. No se ha aplicado ninguna corrección de respuesta instrumental o de contribución telúrica. *Derecha*: detalles del espectro Keck de S Ori J053825.4–024241. *Arriba izquierda*: perfil de H α normalizado al pico (línea continua) y comparado con una línea de emisión de cielo (línea discontinua) en una longitud de onda muy parecida. *Arriba derecha*: no detección de litio con un límite superior de la pEW de 0.25 Å. *Abajo izquierda*: emisión de [O I]. *Abajo derecha*: región espectral alrededor del doblete de K I $\lambda\lambda 7664.9, 7699.0$.

(Tablas 8.3 y 8.4), los niveles de actividad de S Ori J053825.4–024241 se mantienen aproximadamente constantes entre las dos épocas de observación. También proporcionamos en la Tabla 8.4 las pEW de algunas líneas de Na I, K I, Li I y Ca I. El doblete de K I está severamente afectado por absorciones telúricas, mientras que sólo se pueden imponer límites a la intensidad de Li I $\lambda 6707.8$ (Fig. 8.3) y el doblete Na I $\lambda\lambda 5890.0, 5895.9$. Las líneas de Na I y K I (Fig. 8.3) se detectan mucho más débiles que lo esperado para enanas de mayor gravedad de tipo espectral similar.

La velocidad heliocéntrica de S Ori J053825.4–024241 se calculó mediante correlación cruzada de Fourier del mejor espectro de Keck del objeto con el de la estrella estándar de campo vB10 (M8 V, $v_h = +35.3 \pm 1.5$ km s $^{-1}$, Tinney & Reid 1998). Esta estrella molde también fue observada con Keck Telescope e instrumentación similar en una campaña anterior. Tomamos especial cuidado en la correlación de las ventanas espectrales no afectadas por absorciones telúricas y que poseían muchas líneas fotosféricas (en particular de TiO; 6620–6840 Å y 7000–7260 Å). Además, consideramos partes del espectro libres de líneas de emisión. Derivamos $v_h = +32 \pm 13$ km s $^{-1}$ para S Ori J053825.4–024241, lo que está en completo acuerdo dentro de las barras de error con la velocidad radial heliocéntrica de miembros de σ Orionis (Walter et al. 1998; Zapatero Osorio et al. 2002a; ver Cap. 2). Por tanto, nuestra determinación de velocidad es consistente con la pertenencia de S Ori J053825.4–024241 al cúmulo. También se calcularon las velocidades para cada línea de emisión del espectro. Medimos los centroides marcando dos puntos de continuo alrededor de las líneas y ajustando los perfiles con IRAF. Las velocidades observadas se corrigieron de la rotación de la Tierra, el movimiento de la Tierra alrededor del baricentro Tierra–Luna, y la órbita del baricentro alrededor del Sol para dar las velocidades heliocéntricas radiales listadas en la Tabla 8.4. Las medidas de He I y H α son coherentes con una precisión de 1σ con la velocidad “fotosférica” del objeto. Sin embargo, hay que hacer notar que la emisión prohibida debido a [O I] está desplazada hacia el azul.

Tabla 8.4: S Ori J053825.4–024241: datos de Keck.

Line	pEW (Å)	v_h (km s ⁻¹)
He I λ 5875.8	-3.5 ± 1.0	$+29 \pm 13^a$
Na I λ 5890.0	$< +0.1$	–
Na I λ 5895.9	$< +0.1$	–
[O I] λ 6300.3	-2.1 ± 0.5	$+7 \pm 13^a$
H α λ 6562.8	-260 ± 30	$+23 \pm 13^a$
[N II] λ 6583.5	$[-0.2, +0.2]$	–
Li I λ 6707.8	$< +0.3$	–
Ca I λ 6717.7	$+0.5 \pm 0.1$	$+32 \pm 13^b$
K I λ 7699.0	$+0.5 \pm 0.1$	$+32 \pm 13^b$

^a: Velocidad obtenida del centroide de la línea.^b: Velocidad obtenida mediante correlación cruzada.

8.2.2 Fotometría

También hemos llevado a cabo observaciones en el óptico y en el infrarrojo cercano de S Ori J053825.4–024241, usando los filtros *R*, *I*, *J* y *H* y en luz blanca. Estos datos, a los que hemos añadido medidas previas disponibles en la bibliografía (fotometría 2MASS, Béjar et al. 2004, Caballero et al. 2004 y Cap. 6 de esta memoria de Tesis), se han empleado para monitorizar su variabilidad en distintas escalas temporales. La fotometría de banda ancha se ha obtenido utilizando los siguientes telescopios: el 0.8 m IAC-80, la 1 m Optical Ground Station (OGS) y el 1.52 m Telescopio Carlos Sánchez (TCS) en el Observatorio del Teide, el 2.5 m Isaac Newton Telescope (INT) en el Observatorio del Roque de los Muchachos, el 3.5 m Calar Alto Teleskop en el Observatorio Hispano-Alemania de Calar Alto, y el 8 m Very Large Telescope UT1 (*Antu*) en el Observatorio de Paranal. En la Tabla 8.5 proporcionamos el *log* de las observaciones. Se listan la fecha juliana modificada (MJD) a comienzo de las observaciones, el número total de exposiciones y el tiempo de integración por exposición, la cobertura temporal por noche y filtro e instrumento utilizados. Los datos de OGS se tomaron sin filtro.

Las imágenes crudas fueron reducidas con IRAF usando técnicas estándares tanto en el óptico como en el infrarrojo. Hemos llevado a cabo un cuidadoso análisis de fotometría diferencial de la misma forma que en Caballero et al. (2004) (véase Capítulo 7).

Fotometría diferencial en la banda *I*

Utilizando los datos de IAC-80 (ver C.13.1), hemos llevado a cabo series temporales de fotometría diferencial en la banda *I* en una región de 6.5×6.5 arcmin² alrededor de S Ori J053825.4–024241. Desde diciembre de 2003 a febrero de 2004, S Ori J053825.4–024241 fue monitorizada durante seis noches. Durante dos de esas noches, el blanco fue observado durante más de dos horas. Se usaron un total de 45 imágenes para construir la curva de luz del objeto en la banda *I*, que se muestra en la Fig. 8.4. El *seeing* varió entre 1.2 y 2.0 arcsec durante las observaciones. La imagen final combinada se muestra en la Figura 8.1. La calibración fotométrica de estos datos se tomó de Béjar et al. (2004). La amplitud de variación mínima detectable era de 0.025 mag.

Tabla 8.5: *Log* de las observaciones fotométricas.

Fecha obs.	MJD inicio	Tiempo exp. (s)	Δt (h)	Telescopio	Instrumento	Filtro	Referencia
1998 ene. 22	50835.929	1×1800	<1	IAC-80	CCD	<i>I</i>	Béjar et al. (2004)
1998 ene. 22	50835.983	1×1800	<1	IAC-80	CCD	<i>R</i>	Béjar et al. (2004)
1999 ene. 22	51201.047	1×720	<1	TCS	CAIN-2	<i>J</i>	este Capítulo
1999 ene. 24	51202.870	1×720	<1	TCS	CAIN-2	<i>J</i>	Béjar et al. (2004)
2000 dic. 30	51909.075	5×1500	1.4	INT	WFC	<i>I</i>	Caballero et al. (2004)
2000 dic. 31	51909.901	10×1500	4.7	INT	WFC	<i>I</i>	Caballero et al. (2004)
2001 ene. 01	51911.055	6×1500	5.2	INT	WFC	<i>I</i>	Caballero et al. (2004)
2001 dic. 10	52254.295	1×1920	<1	<i>Antu</i>	ISAAC	<i>J</i>	Capítulo 6
2003 ene. 12	52647.414	12×1200	4.2	INT	WFC	<i>I</i>	Caballero et al. (2004)
2003 oct. 19	52932.023	1×3600	<1	3.5 m CA	o2K	<i>H</i>	Capítulo 6
2003 oct. 22	52935.201	1×600	<1	3.5 m CA	o2K	<i>H</i>	Capítulo 6
2003 dic. 22	52995.596	3×600	<1	TCS	CAIN-2	<i>J</i>	este Capítulo
2003 dic. 22	52996.086	1×1200	<1	TCS	CAIN-2	<i>H</i>	este Capítulo
2003 dic. 26	53000.092	3×120	<1	IAC-80	CCD	<i>I</i>	este Capítulo
2003 dic. 28	53002.080	6×600	~ 1	IAC-80	CCD	<i>I</i>	este Capítulo
2004 ene. 11	53016.116	10×300	~ 1	OGS	ESACCD	W^a	este Capítulo
2004 ene. 14	53019.061	20×300	1.9	OGS	ESACCD	W^a	este Capítulo
2004 ene. 24	53028.859	13×600	2.2	IAC-80	CCD	<i>I</i>	este Capítulo
2004 ene. 25	53029.843	14×600	2.7	IAC-80	CCD	<i>I</i>	este Capítulo
2004 ene. 30	53034.879	3×1200	<1	IAC-80	CCD	<i>I</i>	este Capítulo
2004 ene. 30	53034.854	46×300	4.0	OGS	ESACCD	W^a	este Capítulo
2004 ene. 31	53035.887	30×300	2.7	OGS	ESACCD	W^a	este Capítulo
2004 feb. 1	53036.833	45×300	6.3	OGS	ESACCD	W^a	este Capítulo
2004 feb. 2	53037.875	26×300	4.6	OGS	ESACCD	W^a	este Capítulo
2004 feb. 3	53038.948	6×600	~ 1	IAC-80	CCD	<i>I</i>	este Capítulo

^a: W : Imágenes ópticas tomadas sin filtro.

De acuerdo con el método expuesto en Caballero et al. (2004), hemos seleccionado una muestra optimizada de estrellas de referencia alrededor de S Ori J053825.4–024241. Se realizó fotometría sobre 97 fuentes usando diferentes aberturas (de 0.5 a $4.0 \times \text{FWHM}$). Seleccionamos la apertura de $1 \times \text{FWHM}$ porque a la vez minimiza la contribución fotónica de contaminantes cercanos y maximiza el cociente señal-ruido de las medidas. En total, 36 fuentes con apariencia estelar mostraban curvas de luz planas con desviaciones estándares de la serie temporal por debajo de 0.025 mag, que era la mínima amplitud de variación detectable con los datos de IAC-80. Estas fuentes se utilizaron para calcular las magnitudes de referencia como en Bailer-Jones & Mundt (2001).

La ventana izquierda de la Figura 8.4 muestra la curva de luz en la banda *I* de S Ori J053825.4–024241 y de una estrella de referencia. Las barras de error son del mismo tamaño que los de los símbolos en la gráfica. Los datos con la mayor cobertura temporal se enseñan en la ventana derecha de la misma figura. Hemos dibujado las desviaciones estándares de las 97 curvas de luz en función de la magnitud en la banda *I* en la Figura 8.5. S Ori J053825.4–024241 se separa de la tendencia general definida por la mayoría de las fuentes².

²Los objetos más variables en este diagrama son dos fuentes que probablemente sean binarias eclipsantes

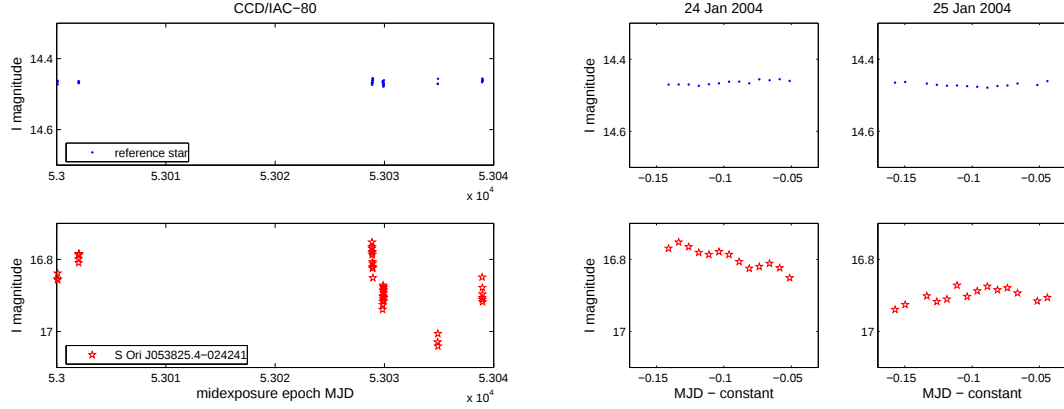


Figura 8.4: *Izquierda:* curvas de luz en la banda I de S Ori J053825.4–024241 (panel inferior) y de una estrella de referencia cercana (panel superior). Los datos se obtuvieron entre dic. 2003 y feb. 2004. La escala vertical es igual en los dos paneles. *Derecha:* detalles de las curvas de luz de IAC-80 de S Ori J053825.4–024241 (paneles inferiores) y de la misma estrella de referencia (paneles superiores). Nuestro blanco fue monitorizado durante unas 2.5 h durante MJD ~ 53029 (paneles a la izquierda) y 53030 (a la derecha). Parece que una modulación de baja amplitud y escala temporal corta se superpone a la variabilidad fotométrica de mayor amplitud.

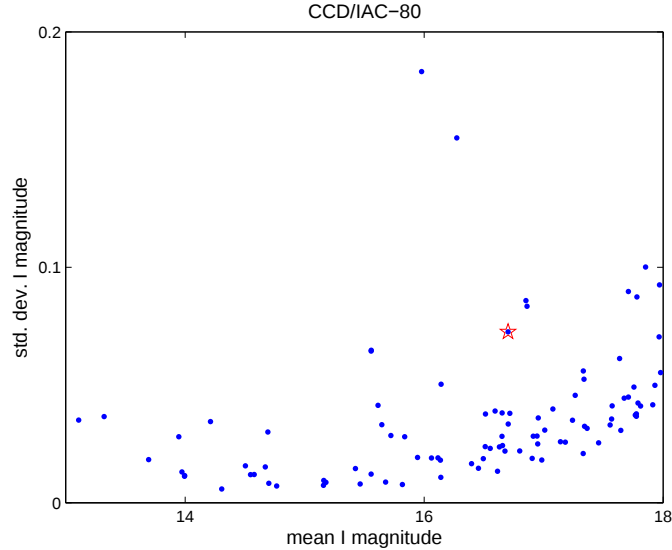


Figura 8.5: Desviación estándar de la fotometría diferencial de IAC-80 en función de la magnitud I promedio. La posición de S Ori J053825.4–024241 está marcada con una estrella.

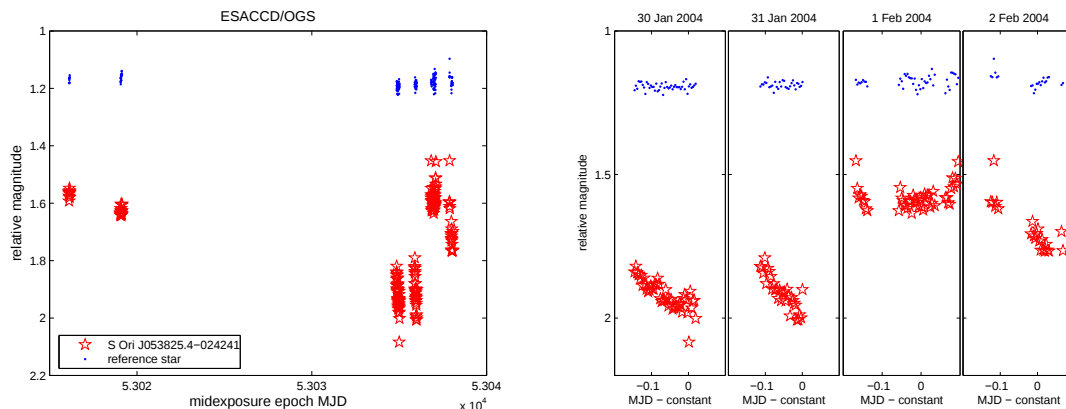


Figura 8.6: *Izquierda*: curvas de luz de S Ori J053825.4–024241 (estrellas) y de una estrella de referencia (puntos). Los datos se obtuvieron en la OGS entre enero y febrero de 2004. *Derecha*: detalles de las curvas de luz. El blanco fue monitorizado durante 3–6 h en cada una de estas cuatro noches de observación.

Es decir, la curva de luz de nuestro blanco exhibe una desviación estándar que es varias veces mayor que las de otras fuentes no variables de brillo similar, lo que sugiere una fuerte variabilidad y confirma los resultados de Caballero et al. (2004). S Ori J053825.4–024241 muestra variaciones en la banda *I* de ~ 0.05 y ~ 0.25 mag en escalas temporales de horas y días, respectivamente. Nótese el marcado decrecimiento en brillo alrededor de MJD = 53 035, que se mantuvo durante aproximadamente una semana.

Fotometría diferencial en “luz blanca”

Hemos usado el telescopio OGS (ver C.12.1) para monitorizar una gran área (~ 0.5 deg²) del cúmulo σ Orionis. Tomamos datos desde enero de 2004 hasta principios de febrero del mismo año en seis noches diferentes. Aquí nos centraremos en el análisis de S Ori J053825.4–024241.

No utilizamos ningún filtro al tomar los datos de OGS. Ésto se indica con una *W* (de *white light*) en la columna de filtros en la Tabla 8.5. Hemos calculado la longitud de onda efectiva de las observaciones de OGS para el caso de S Ori J053825.4–024241 mediante la convolución de la función de transmisión del telescopio, la respuesta de un CCD E2V y la distribución espectral de energía de un enana de tipo M6. El cálculo dio una longitud de onda efectiva de 7800 Å, que es intermedia entre la banda *R* de Johnson (6410 Å) y la *I* (8500 Å).

En total se utilizaron 173 imágenes de OGS para construir la curva de luz de nuestro blanco. No hemos corregido la curva de luz de extinción diferencial dependiente del color en función de la masa de aire. No se observó ninguna tendencia particular entre noche y noche en S Ori J053825.4–024241 y otras fuentes. Siguiendo el mismo procedimiento que en el análisis de los datos de IAC-80, se seleccionaron 145 fuentes con apariencia estelar para ser estrellas de referencia. Todas ellas muestran curvas de luz con desviaciones

de gran amplitud de fondo y que no pertenecen al cúmulo de acuerdo con sus magnitudes *BRIJK_s*. Una de estas binarias muestra una curva de luz con mínimos primario y secundario de amplitud similar (≈ 0.6 mag) y un periodo de ≈ 5.5 h (coordenadas J2000: 05 38 19.50 –02 41 22.5).

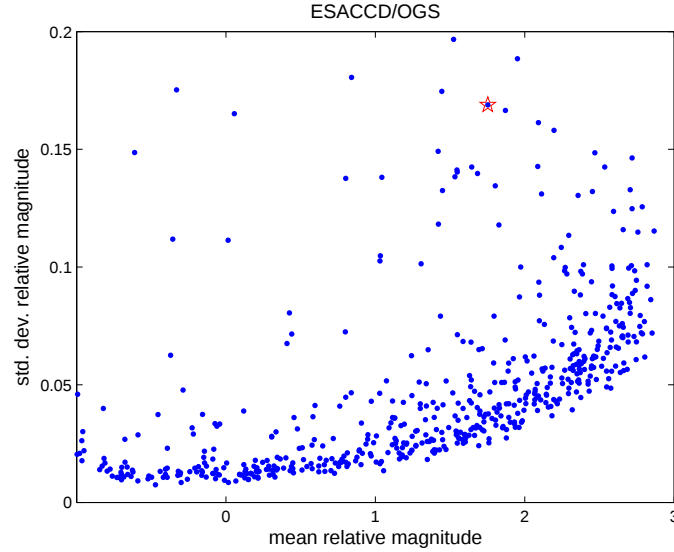


Figura 8.7: Desviación estándar de la fotometría diferencial de OGS en función de la magnitud relativa promedio. La localización de S Ori J053825.4–024241 está marcada con una estrella.

estándares menores que 0.020 mag, que es la mínima amplitud de variación detectable con los datos de OGS. Estas fuentes de referencia no son necesariamente las mismas que para la fotometría de IAC-80 a causa del distinto recubrimiento espacial, la longitud de onda efectiva y la sensibilidad de las observaciones. Las Figuras 8.6 y 8.7 muestran la curva de luz completa de S Ori J053825.4–024241 y los detalles de cuatro noches de observación y la desviación estándar de las curvas de luz en función de la magnitud, respectivamente. S Ori J053825.4–024241 muestra una marcada amplitud de variación en longitudes de onda más cortas que 8000 Å: ~ 0.2 mag en escalas de horas y 0.5 mag de noche a noche. También se observa la caída de brillo alrededor de MJD = 53 035.

8.2.3 Fotometría en el infrarrojo cercano

Hemos obtenido nuevos datos en el infrarrojo cercano (en las bandas J y H) en diferentes épocas. Todas las observaciones están resumidas en la Tabla 8.5. Los instrumentos utilizados fueron la cámara CAIN-2 (NICMOS-3 256×256 ; $1.00 \text{ arcsec píxel}^{-1}$) en el telescopio TCS, $\Omega 2K$ en el 3.5 m Calar Alto Teleskop e ISAAC en el VLT UT1 *Antu*. La fotometría en la banda J obtenida con el TCS en enero de 1999 fue publicada por Béjar et al. (2004). La restante fotometría en el infrarrojo cercano de la Tabla 8.5 está sin publicar y se presenta en esta Tesis por primera vez. Todos los datos se han referido al sistema fotométrico de 2MASS (S Ori J053825.4–024241 se detectó en MJD = 51 116.323). Hemos realizado fotometría diferencial en las bandas J y H del blanco respecto a cierto número de estrellas de referencia dentro de círculo de radio de 20 arcmin centrado en S Ori J053825.4–024241. Las mínimas amplitudes de variación que pueden ser detectadas son 0.03 mag en J y 0.06 en H . Nuestro blanco fue observado sólo una vez en K_s por 2MASS. Una discusión más detallada de la variabilidad infrarroja de S Ori J053825.4–024241 se dará en la Sección 8.3.5.

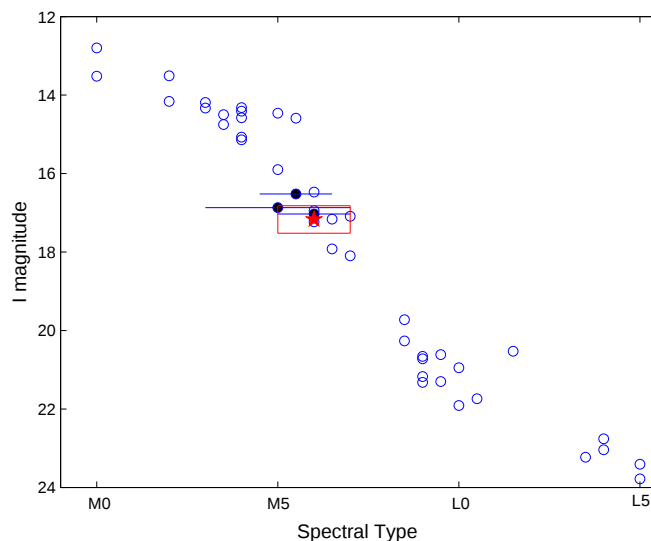


Figura 8.8: Secuencia espectral de estrellas de baja masa en el cúmulo σ Orionis. La posición de S Ori J053825.4–024241 está marcada con una estrella y una caja. Los restantes objetos de la Tabla 8.2 se han representado con círculos rellenos.

8.3 Discusión

La Figura 8.8 muestra la magnitud en la banda I en función del tipo espectral en el cúmulo en σ Orionis, en el rango de tipos espectrales entre M temprano y L intermedio. Los miembros del cúmulo de baja masa confirmados espectroscópicamente aparecen representados con círculos huecos. Los cuatro objetos de la Tabla 8.2 se representan con círculos rellenos. La caja centrada en S Ori J053825.4–024241 tiene en cuenta la incertidumbre en la determinación del tipo espectral y la máxima amplitud de las variaciones fotométricas. Como se espera para miembros del cúmulo, se ajustan a la secuencia espectral de σ Orionis (Fig. 8.8).

8.3.1 Estimación de masa

Stauffer et al. (1998) y Martín et al. (1998) determinaron que el límite de masa subestelar está en el tipo espectral M6 en el cúmulo de las Pléyades (120 Ma). Los modelos evolutivos más recientes predicen que los objetos en la frontera subestelar evolucionan a una temperatura efectiva aproximadamente constante (en unos 200 K) entre unos pocos millones de años y la edad de las Pléyades, para después enfriarse rápidamente. Se ha sugerido que el límite entre estrellas y enanas marrones ocurre en M5–6 en σ Orionis. El tipo espectral de S Ori J053825.4–024241 es M6, muy cerca del límite subestelar. Para restringir su masa con mayor precisión, hemos comparado la luminosidad del objeto con predicciones teóricas. La luminosidad de S Ori J053825.4–024241 se deriva de su magnitud promedio en la banda H ($H = 14.18 \pm 0.06$) porque, como se discute en la Sección 8.3.5, este objeto muestra la menor variabilidad fotométrica a estas longitudes de onda. Además, no hay un exceso obvio de emisión en la banda H en nuestros datos. Para transformar la magnitud H a

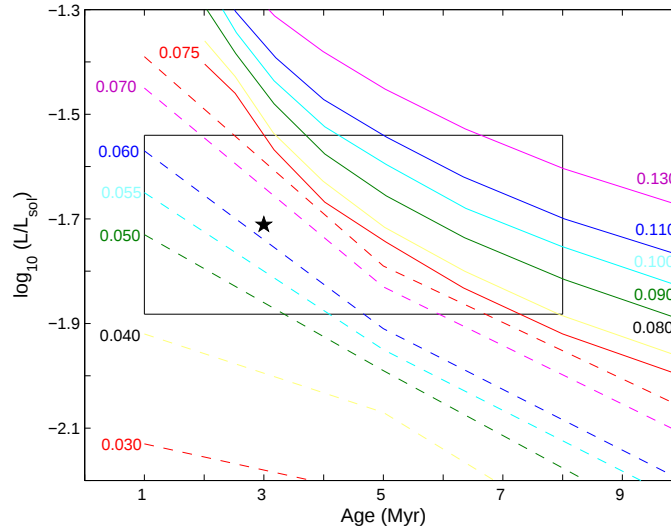


Figura 8.9: Modelos de evolución de luminosidad de estrellas de baja masa y enanas marrones según el grupo de Lyon; las líneas continuas se corresponden con los modelos NextGen98 (Baraffe et al. 1998) y las líneas discontinuas con los modelos Dusty00 (Chabrier et al. 2000). La posición más probable de S Ori J053825.4–024241 se indica con una estrella. La caja tiene en cuenta la imprecisión en la determinación de la luminosidad y de la edad del objeto. Para edades menores de 5 Ma, la naturaleza de S Ori J053825.4–024241 es muy probablemente subestelar.

magnitud bolométrica, hemos usado la relación entre la corrección bolométrica y el tipo espectral de Golimowski et al. (2004) y una distancia de 360 ± 70 pc al cúmulo σ Orionis, derivando $M_{\text{bol}} = 9.0 \pm 0.4$. La gran barra de error asociada a esta medida es debida al pobre conocimiento de la distancia al cúmulo.

Mostramos en la Fig. 8.9 la evolución de la luminosidad de objetos con masas entre 0.03 y $0.13 M_{\odot}$ tal y como proporcionan los modelos de Lyon (Baraffe et al. 1998, 2003; Chabrier et al. 2000). La posición más probable de S Ori J053825.4–024241 en este diagrama está indicada con una estrella en la edad de 3 Ma. La caja alrededor de esta localización tiene en cuenta la imprecisión en la determinación de la luminosidad y del intervalo posible de edad (1–8 Ma). De la Fig. 8.9, la masa de S Ori J053825.4–024241 se estima en $0.06^{+0.07}_{-0.02} M_{\odot}$, indicando que este objeto es probablemente subestelar³.

8.3.2 Emisión $H\alpha$

Con una pEW de unos $-250 \text{ \AA}$, S Ori J053825.4–024241 es uno de los emisores $H\alpha$ más intensos en el cúmulo σ Orionis. Para nuestro conocimiento, sólo hay dos miembros subestelares de σ Orionis con mayor emisión $H\alpha$: S Ori 55 (pEW $\sim -480 \text{ \AA}$, Zapatero Osorio et al. 2002b) y S Ori 71 (pEW $\sim -700 \text{ \AA}$, Barrado y Navascués et al. 2002). S Ori J053825.4–

³A posteriori de esta investigación, en el Cap. 6 se derivó una masa de $0.056^{+0.030}_{-0.018} M_{\odot}$, idéntica excepto por un menor error superior. Ello se debe a que allí se detalló con mayor precisión los rangos de temperaturas efectivas de aplicación de los modelos NextGen98 o Dusty00. El valor más probable sigue siendo, sin embargo, el mismo.

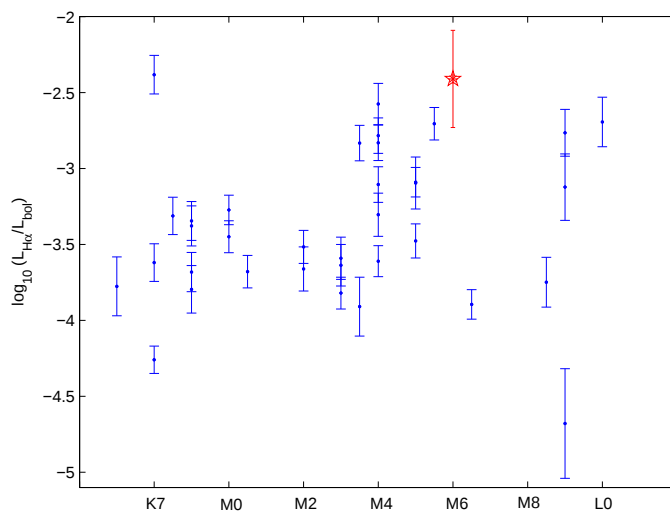


Figura 8.10: Luminosidad $H\alpha$ entre luminosidad bolométrica en función del tipo espectral de miembros de σ Orionis. S Ori J053825.4–024241 (estrella) exhibe una elevada medida de emisión $H\alpha$ en comparación con otras estrellas de baja masa y enanas marrones del cúmulo.

024241 (tipo espectral M6) es unos 400 K más caliente que S Ori 55 (M9) y 71 (L0). Por otro lado, la intensidad $H\alpha$ de nuestro objeto es unas cinco veces mayor que las estrellas de baja masa más activas del cúmulo (p.e., V505 Orionis de tipo espectral K7 y Haro 5-36 de tipo M4; Zapatero Osorio et al. 2002b y Cap. 3). Muchas estrellas de σ Orionis fueron detectadas en las búsquedas $H\alpha$ de Haro & Moreno (1953) y Wiramihardja et al. (1989, 1991). Sin embargo, S Ori J053825.4–024241 pasó desapercibida en estas búsquedas porque es entre tres y cinco magnitudes más débil en la banda I que las estrellas activas de masa baja del cúmulo.

La marcada persistencia de la línea de $H\alpha$ de nuestro objeto, que se ve siempre en emisión sustancial en nuestros datos, sugiere que su origen no se debe a un suceso transitorio. Las fulguraciones o *flares* son comunes entre las enanas frías de tipos espectrales M (Gizis et al. 2000). Sin embargo, la actividad por fulguraciones tiende a disminuir con rapidez en escalas de horas. Por otro lado, como se mencionó en la Sección 8.2.1, S Ori J053825.4–024241 muestra ensanchamiento de las alas de $H\alpha$ (Fig. 8.3). Después de la corrección por la contribución del perfil instrumental, la FWHM real de $H\alpha$ resulta ser de 230 km s^{-1} (o de 500 km s^{-1} si consideramos el pedestal de la línea al nivel del 10% del pico del flujo). Una velocidad tan grande podría ser mayor que el límite de ruptura de S Ori J053825.4–024241 si la inclinación del eje de rotación es diferente de 90° . De acuerdo con modelos evolutivos, el tamaño del objeto es de unos $4\text{--}5 R_{\text{Jup}}$, lo que en combinación con la masa derivada en la sección anterior da una velocidad de escape de $220^{+140}_{-50} \text{ km s}^{-1}$ y un periodo de rotación mínimo de unas 2–4 horas. Ninguna de las curvas de luz estudiadas muestra una modulación con esta periodicidad. Interpretamos la emisión $H\alpha$ persistente y ancha debida a caída de materia caliente o eyección de masa antes que a rotación intrínseca (p.e., White & Basri 2003).

Para comparar la intensidad de la emisión $H\alpha$ de S Ori J053825.4–024241 con las de otros miembros de baja masa de σ Orionis, hemos evaluado el cociente $L_{H\alpha}/L_{bol}$ de nuestro blanco. Esta medida es independiente de la superficie del objeto y representa la fracción de la energía total en $H\alpha$. La luminosidad bolométrica se calculó usando la M_{bol} dada en la Sección 8.3.1 y la magnitud bolométrica solar, +4.74 mag. Hemos seguido los cálculos de Hodgkin et al. (1995) para obtener $L_{H\alpha}$ de la anchura de la línea, el color $(R - I)_C$ y la magnitud en la banda V . El color $(R - I)_C$ se ha tomado de Béjar et al. (2004), ya que proporcionaron fotometría quasi-simultánea en las dos bandas. Hemos estimado que V debe de ser 21.0 ± 0.5 mag, adoptando la relación $(V - I)_C$ –tipo espectral de Kirkpatrick et al. (1994). Los datos NOT y Keck de $H\alpha$ ofrecen resultados similares dentro de las barras de error: $\log(L_{H\alpha}/L_{bol}) = -2.4 \pm 0.3$. La barra de error tiene en cuenta las imprecisiones fotométricas y el error en la distancia al cúmulo. Si el objeto fuera más brillante en V que lo esperado, p.e. $V = 20.0 \pm 0.5$ mag, entonces $\log(L_{H\alpha}/L_{bol})$ podría ser tan alto como -2.0 ± 0.3 . La Figura 8.10 muestra $\log(L_{H\alpha}/L_{bol})$ en función del tipo espectral para miembros del cúmulo. Excepto para nuestro blanco, los datos han sido extraídos de Zapatero Osorio et al. (2002a, 2002b) y Barrado y Navascués et al. (2002). En resumen, S Ori J053825.4–024241 exhibe una muy intensa emisión $H\alpha$, comparable con la de los acretores estelares más activos.

8.3.3 Otras líneas de emisión y velocidad radial

La velocidad radial “fotosférica” de S Ori J053825.4–024241 ($v_h = +32 \pm 13$ km s $^{-1}$) es consistente con su pertenencia al cúmulo σ Orionis. La velocidad sistémica del cúmulo está en el rango 27 a 38 km s $^{-1}$ (véase Cap. 2). Por ejemplo, Zapatero Osorio et al. (2002b) y Kenyon et al. (2005) encontraron velocidades heliocéntricas medias de 37 ± 6 y 31.2 ± 0.2 km s $^{-1}$, respectivamente, para los miembros de baja masa del cúmulo.

Las líneas de emisión, si se originaran en el exterior de la fotosfera, podrían mostrar una velocidad diferente. Las medidas de $H\alpha$ y He I $\lambda 5875.6$ están de acuerdo con la velocidad “fotosférica” de S Ori J053825.4–024241 con un error de 1σ . Sin embargo, [O I] $\lambda 6300.3$ muestra un moderado azulamiento en la velocidad en unos 2σ . Esto podría indicar la presencia de expulsión de gas de baja densidad (pérdida de masa, viento), que es un proceso comúnmente encontrado en las estrellas CTT con chorros. La componente roja de esta línea de emisión podría estar oculta por un disco opaco (Appenzeller, Jankovics & Östreicher 1984; Edwards et al. 1987). También se ha sugerido que las líneas de emisión prohibidas de baja velocidad, como la que hemos medido en S Ori J053825.4–024241, podría deberse a viento de disco (Corcoran & Ray 1997).

8.3.4 Litio y velado óptico

El rasgo de absorción de litio en $\lambda 6707.8$ Å no se detecta en ninguno de los datos espectroscópicos de S Ori J053825.4–024241. Podemos imponer límites superiores a la pEW de la línea en +0.7 Å (NOT) y +0.3 Å (Keck). A causa de la muy joven edad de σ Orionis, es esperable que todas las enanas marrones y estrellas del cúmulo no hayan reducido nada de su abundancia inicial de litio. De hecho, Zapatero Osorio et al. (2002a) detectó litio en absorción en todas las estrellas de baja masa y enanas marrones de su estudio (entre K

intermedias y M intermedias). A las resoluciones espectrales, R , en el intervalo 1 600–4 400, las pEW medidas variaron entre 0.3 y ~ 0.7 Å, indicando que σ Orionis es definitivamente más joven que 10 Ma. Kenyon et al. (2005) analizaron una gran muestra de miembros de σ Orionis con tipos espectrales en el intervalo M3–7 y con $R \sim 7\,000$, y encontraron unos pocos candidatos ($\sim 7\%$ de su muestra) con colores, velocidades radiales y gravedades superficiales consistentes con pertenencia al cúmulo, pero que no exhibían el rasgo de litio en sus atmósferas. Esto es similar a lo que observamos en S Ori J053825.4–024241: Li I en $\lambda 6707.8$ Å parece ser al menos un factor 2–3 veces más débil que en otros miembros del cúmulo con tipos M5–7. Otros autores han notificado también una gran dispersión en las pEW de Li I en los espectros de estrellas de muy baja masa y enanas marrones del cúmulo Chamaeleon I (p.e., Jürgens & Guenther 2001; Natta et al. 2004). Otro caso particular es el de la estrella binaria de tipo T Tauri StHA 34 que, a pesar de pertenecer a la asociación Taurus-Auriga y de poseer un disco de acreción (de donde se le derivó una edad 8 ± 3 Ma), en sus espectros de alta resolución no se detecta el rasgo de Li I $\lambda 6707.8$ Å (White & Hillenbrandt 2005).

Existen varias posibilidades para explicar esta aparente ausencia de litio en el espectro de S Ori J053825.4–024241: (i) no es miembro del cúmulo (improbable, en base a la fotometría, el tipo espectral, la velocidad radial y las líneas de emisión); (ii) sobreionización de los átomos de litio, asociada con calentamiento externo de las capas atmosféricas superiores; (iii) una muy baja gravedad superficial ($\log g \leq 2.5$); (iv) un moderado exceso de continuo en el óptico (velado); (v) procesos no estándares de destrucción de litio y (vi) pobres o insuficientes resolución espectral y relación señal ruido de los espectros.

Un moderado exceso de continuo que afectase a las longitudes de onda más azules podría ser suficiente para impedir una detección firme del rasgo de Li I. El color $R - I$ y las bandas de óxido de titanio de S Ori J053825.4–024241 son más azules y débiles, respectivamente, que lo esperado para enanas M6, lo que podrían indicar la presencia de velado. El origen de este exceso de flujo podría residir en el interior caliente de un disco a su alrededor, o en el gas sobrecalentado en acreción desde el disco, que es transportado hasta la fotosfera del objeto a través de canales magnéticos. Appenzeller & Mundt (1989) informaron acerca de la presencia de estrellas CTT en el catálogo de la población estelar de Orión (Herbig & Bell 1988) que mostraban líneas de emisión intensas sobreimpuestas a espectros de absorción típicos de los tipos más tardíos. Además, estas estrellas mostraban un velado muy fuerte que hacía decrecer significativamente la intensidad del rasgo de Li I desde ~ 1 Å hasta 0.03 Å.

Para estimar la cantidad de exceso de flujo que posiblemente esté “velando” el espectro fotosférico de S Ori J053825.4–024241, hemos seguido el método de “desvelado (*unveiling*)” descrito en Hartigan et al. (1989) y en White & Basri (2003). El parámetro velado fraccional, r , que es función de la longitud de onda, se define por la expresión:

$$r = r(\lambda) = \frac{F_{\text{excess}}}{F_{\text{phot}}} = \frac{F_{\text{excess+phot}} - F_{\text{phot}}}{F_{\text{phot}}}, \quad (8.1)$$

donde $F_{\text{excess+phot}}$ representa el espectro observado del blanco y F_{phot} se corresponde con un espectro de referencia de la misma temperatura efectiva y gravedad superficial y libre de exceso de continuo.

Nuestros datos no están calibrados en flujo. Por tanto, sólo podemos evaluar un velado

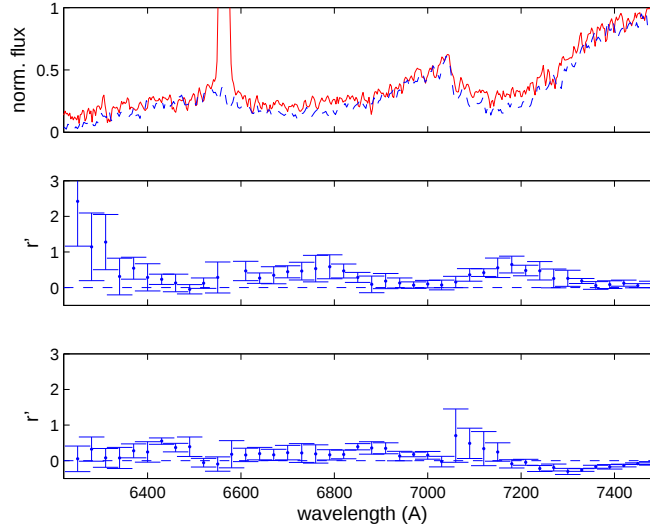


Figura 8.11: Velado relativo fraccional de S Ori J053825.4–024241 en comparación con el espectro de referencia de S Ori J053954.3–023719 (*panel central*) y del objeto de referencia comparado con una estrella estándar de campo del mismo tipo espectral (DX Cnc) (*panel inferior*). Se han usado cajas de 30 Å de ancho. Para identificar los rasgos y regiones espectroscópicas, los espectros de S Ori J053825.4–024241 (continuo) y de S Ori J053954.3–023719 (discontinuo) normalizados en 7500 Å se muestran en el panel superior.

relativo, r' , mediante la normalización de todos los espectros observados a 1.0 en una longitud de onda conveniente. Hemos elegido 7500 Å para la normalización porque está hacia el rojo de la línea de litio y nuestros datos poseen ahí una razonable relación señal ruido. Nótese que el velado absoluto y el velado relativo son iguales si no hay velado en 7500 Å ($r(7500) = 0$), y es mayor el primero que el segundo para valores no nulos de $r(7500)$ ($r > r'$ si $r(7500) > 0$)⁴. La Figura 8.11 ilustra nuestros resultados usando los datos NOT. El recubrimiento en longitud de onda en nuestro estudio es en el intervalo 6200–7500 Å, donde los espectros muestran una señal-ruido relativamente buena y no hay *fringing*. S Ori J053954.3–023719, que es un miembro del cúmulo de tipo M6, con una baja emisión H α y brillo similar que nuestro blanco principal (véase Tabla 8.2), ha sido seleccionado como objeto de referencia, y la estrella estándar de campo DX Cnc (M6.5 V) como objeto de control. El velado fraccional relativo de S Ori J053825.4–024241 en diciembre de 2003 se muestra en función de la longitud de onda en el panel central de la Figura 8.11. El panel inferior muestra el velado relativo del objeto de referencia (S Ori J053954.3–023719) respecto a DX Cnc. Como se deduce de la Ecuación 8.1, el velado fraccional relativo es 0.0 en la longitud de onda de normalización, en 7500 Å. Los espectros NOT de S Ori J053825.4–024241 y S Ori J053954.3–023719 se muestran en el panel superior para identificar las regiones y rasgos espectrales.

Como se infiere de la Fig. 8.11, el velado es en general despreciable en el objeto de referencia, S Ori J053954.3–023719. Las mayores diferencias se encuentran alrededor de 7100 Å (cerca del doblete de K1), y son debidas muy probablemente a la menor gravedad

⁴ $r(\lambda) = ar'(\lambda) + b$, donde los coeficientes lineales son $a = 1 + r(7500)$ y $b = r(7500)$.

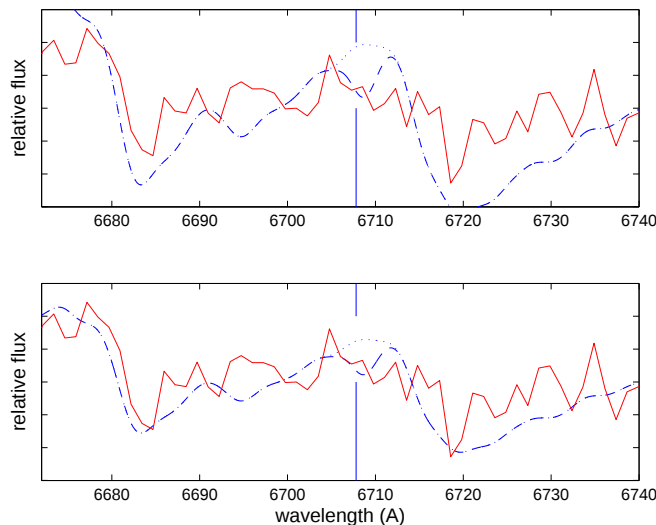


Figura 8.12: En el panel superior se compara el espectro Keck de S Ori J053825.4–024241 (línea continua) con los espectros sintéticos sin velado calculados para $\log N(\text{Li}) = 3.0$ (línea discontinua) y sin litio (línea punteada). La línea vertical indica la longitud de onda de Li I $\lambda 6707.8 \text{ \AA}$ en laboratorio. En el panel inferior se muestra lo mismo, pero los espectros teóricos tienen un velado $r = 0.5$.

superficial del objeto respecto a la enana de campo. Sin embargo, algo de velado parece estar presente en S Ori J053825.4–024241, en particular por debajo de $6400 \text{ \AA}$. La región alrededor de la línea de resonancia de Li I en $\lambda 6707.8 \text{ \AA}$ es de particular interés, y ahí hemos medido un velado fraccional relativo de $r' = 0.4\text{--}0.6$. En primer orden de aproximación, nuestro análisis sugiere que el velado real en S Ori J053825.4–024241 podría ser tan alto como $r = 2$ en las longitudes de onda más cortas ($\sim 6200 \text{ \AA}$), y $r \sim 0.5$ alrededor $6700 \text{ \AA}$. Este exceso de flujo contribuye al debilitamiento del rasgo de litio, lo que unido a una resolución moderada ($4.5 \text{ \AA}$, $R \sim 1700$) y la baja señal-ruido de nuestros espectros, impide una clara detección de la línea de absorción.

Hemos calculado unos espectros sintéticos alrededor de litio usando el código de Pavlenko, Zapatero Osorio & Rebolo (2000), con $T_{\text{eff}} = 2900 \text{ K}$, $\log g = 4.0$ y metalicidad solar (excepto para el litio), que son los parámetros atmosféricos esperados para un objeto M6 de σ Orionis. Los espectros teóricos se han degradado para ajustarse a la resolución de $4 \text{ \AA}$. Los cálculos se han llevado a cabo considerando dos abundancias diferentes de litio ($\log N(\text{Li}) = 3.0$ –sin destrucción– y destrucción completa) y la posible presencia de velado ($r = 0.5$). Hemos adoptado una distribución de energía plana del exceso de flujo en el intervalo de longitud de onda $6672\text{--}6740 \text{ \AA}$. Nuestros resultados se ilustran con la Figura 8.12, donde el panel superior se representa la comparación entre el espectro de S Ori J053825.4–024241 observado en el Keck y el espectro sintético sin velado, mientras que en el panel inferior aparecen los espectros Keck y sintético con velado. Es aparente de la Figura que los rasgos de óxido de titanio del blanco se reproducen mejor por la síntesis espectral que incluye velado. Un velado $r = 0.5$ se ajusta razonablemente a las observaciones, valor que está de acuerdo con nuestra estimación anterior. El rasgo de absorción de litio es detectable en el

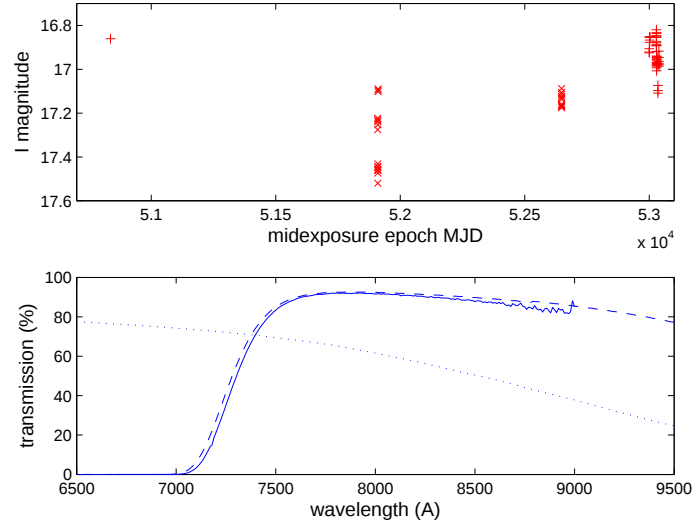


Figura 8.13: La curva de luz en la banda *I* en escalas temporales largas de S Ori J053825.4–024241 se representa en el panel superior. Los datos, que incluyen fotometría de INT (aspas) e IAC-80 (cruces), cubren seis años. El panel inferior muestra las curvas de transmisión de los filtros *I* del IAC-80 (línea discontinua) e INT (RGO-I, continua) y de uno de los CCD de la cámara WFC (línea punteada).

espectro no velado rico en litio, con una resolución espectral de $4 \text{ \AA}$ (con pEW teórica de $0.3 \text{ \AA}$), mientras que es bastante débil en el espectro con velado. Por tanto, la no detección de litio en nuestros datos es aún consistente con conservación total. Se necesitan espectros de mayor resolución para estudiar el litio en S Ori J053825.4–024241.

8.3.5 Variabilidad fotométrica y el escenario CTT

Basado en nuestros datos ópticos, concluimos que S Ori J053825.4–024241 es un miembro variable irregular del cúmulo σ Orionis. Las amplitudes de variación en la banda *I* ($8500 \text{ \AA}$) son de $\sim 0.05 \text{ mag}$ en escalas temporales de horas y de $\sim 0.25 \text{ mag}$ en escalas de días. La variabilidad es incluso mayor a longitudes de onda menores. De nuestros datos de OGS concluimos que S Ori J053825.4–024241 presenta una de las variabilidades más grandes en estrellas de muy baja masa y enanas marrones identificadas hasta ahora en el cúmulo. Estas conclusiones apoyan fuertemente el escenario CTT. Las estrellas CTT son en general variables, mostrando en sus curvas de luz amplitudes en el intervalo $0.05\text{--}2 \text{ mag}$. Como notificaron Appenzeller & Mundt (1989), todas las estrellas CTT monitorizadas cuidadosamente son en realidad variables. Algunas de ellas están caracterizadas por poseer variaciones quasiperiódicas de flujo en escalas de $2\text{--}10$ días.

Hemos buscado señales periódicas en los datos IAC-80 y OGS de S Ori J053825.4–024241 mediante el cálculo del espectro de potencias (o periodogramas) usando el método desarrollado por Lomb (1976) y posteriormente elaborado por Scargle (1982). Para eliminar la función espectral de ventana de las curvas de luz, hemos aplicado el algoritmo CLEAN (Roberts et al. 1987). Las tareas CLEAN y SCARGLE están disponibles en el paquete de

software PERIODS/STARLINK. El muestreo de nuestros conjuntos de datos es tal que la función de ventana muestra lóbulos en los múltiplos de las frecuencias 1 d^{-1} y 5.3 min^{-1} . No hemos encontrado picos significativos en los periodogramas. Es evidente de la Fig. 8.4 que si existe alguna periodicidad de escala intermedia debería de ser del orden de varios días.

Para estudiar la variabilidad fotométrica de largo periodo en el óptico de nuestro blanco, hemos comparado nuestros datos con datos publicados anteriormente en diferentes épocas y usando instrumentación similar. Como resumimos en la Tabla 8.5, los datos antiguos en la banda *I* se tomaron con el IAC-80 en enero de 1998 (MJD $\sim 50\,800$, Béjar et al. 2004), y con el INT entre diciembre de 2000 y enero de 2001 (MJD $\sim 51\,900$) y enero de 2003 (MJD $\sim 52\,600$, Caballero et al. 2004 –Cap. 7–). Estos datos y la nueva fotometría presentada aquí cubren un total de seis años de observación. Los filtros *I* usados en el IAC-80 y en el INT son muy similares por sus curvas de transmisión, representadas en el panel inferior de la Figura 8.13. Difieren ligeramente a longitudes de onda mayores de $9000 \text{ \AA}$, donde la eficiencia cuántica de los detectores ha caído por debajo del 40%, de ahí que no hayamos intentado corregir la fotometría debido a las pequeñas diferencias entre filtros o detectores. Para realizar una comparación directa, todos los datos se han referido a la misma calibración fotométrica, la de Béjar et al. (2004). La comparación de las curvas de luz de las estrellas de referencia en común entre los conjuntos de datos de IAC-80 y de INT ofrece una dispersión de 0.025 mag . El conjunto completo de datos en la banda *I* se muestra en el panel superior de la Figura 8.13. S Ori J053825.4–024241 también presenta variabilidad de larga escala temporal en el óptico con una amplitud de 0.7 mag . Ésta es mayor que las amplitudes de variación en escalas cortas. Se necesitan nuevos datos para investigar si la curva de luz de nuestro blanco consiste en una variación de grandes amplitud y escala temporal, sobre la que se superponen variaciones de menores amplitud y escala temporal (véase Scholz & Eislöffel 2004). Proporcionamos en la Tabla 8.6 los intervalos de las magnitudes fotométricas que hemos medido en el óptico y en infrarrojo cercano.

La Figura 8.14 muestra toda la fotometría infrarroja de S Ori J053825.4–024241 disponible hasta la fecha en función de la época de observación. La fotometría en la banda *H* parece ser bastante estable con una precisión de 1σ . En *J*, nuestro blanco presenta una gran dispersión, lo que sugiere variabilidad. La amplitud de las variaciones es de unas 0.5 mag , que es un valor comparable a la variabilidad en el óptico. La variabilidad fotométrica de las estrellas CTT decrece hacia longitudes de onda más largas porque el origen de las variaciones probablemente esté en las manchas fotosféricas calientes y/o frías que cubren un área significativa de la superficie del objeto. También se cree que parte de la variabilidad es debida a ocultaciones por heterogeneidades de la región interior del disco, que muestra una menor dependencia con la longitud de onda. Este último escenario podría ser aplicable a S Ori J053825.4–024241 para explicar sus peculiares curvas de luz en el óptico y en el infrarrojo cercano. Recordemos que S Ori J053825.4–024241 presenta un claro exceso de flujo en $2.2 \mu\text{m}$ (Caballero et al. 2004; Béjar et al. 2004), que podría estar asociado a la presencia de un disco de acreción.

Es interesante destacar que S Ori J053825.4–024241 fue detectada en la placas azules USNO-B1 (Monet et al. 2003), de cuyo catálogo hemos extraído su magnitud fotográfica azul. Esta magnitud se ha convertido a la estándar *B* aplicando la ecuación de conversión de Zombeck (1990). Proporcionamos nuestras medidas en la Tabla 8.6. De la magnitud *B*

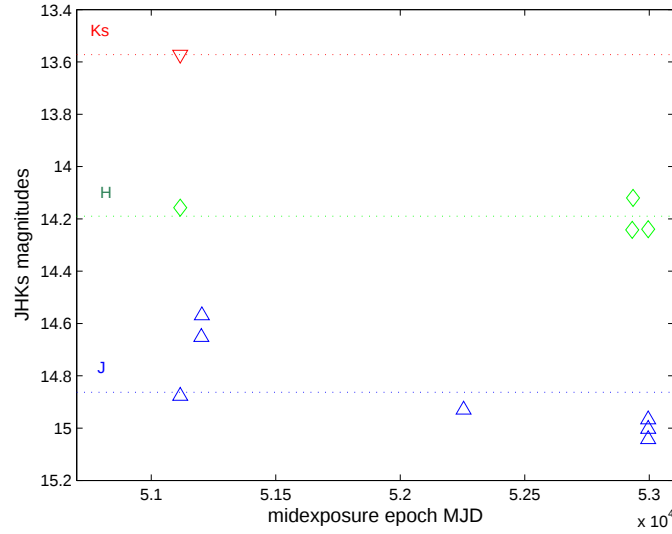


Figura 8.14: Curvas de luz en las bandas JHK_s de S Ori J053825.4–024241 (J : Δ ; H : $\diamond$; K_s : ∇). Las líneas punteadas marcan la magnitud promedio en cada filtro.

Tabla 8.6: Datos fotométricos de S Ori J053825.4–024241.

Filtro	Magnitud	Origen
B^a	~ 20.9	USNO-B1
R^a	18.66 ± 0.05	Béjar et al. (2004)
I	16.82–17.52	este Capítulo
J	14.57–15.04	este Capítulo
H	14.18 ± 0.06	este Capítulo
K_s^a	13.57 ± 0.03	2MASS

^a: Una medida individual.

y los colores típicos de enanas M5–7, es aparente que S Ori J053825.4–024241 presenta un exceso de flujo en las longitudes de onda más hacia el azul. Este resultado es consistente con nuestras estimaciones de velado que discutimos en secciones previas. El exceso de flujo puede estar asociado a procesos de acreción. En algunas ocasiones, cuando la actividad acrecional es mayor, S Ori J053825.4–024241 podría parecer más azul en el óptico que otros miembros del cúmulo de tipos similares. Esto podría explicar porqué este objeto no fue seleccionado como un candidato a miembro del cúmulo en búsquedas anteriores (como la de Kenyon et al. 2005 en las bandas RI).

8.3.6 Miscelánea

El catálogo USNO-B1 proporciona un movimiento propio para S Ori J053825.4–024241 de $\mu_\alpha \cos \delta = -4 \pm 14$ mas a⁻¹, $\mu_\delta = 4 \pm 1$ mas a⁻¹. Estos valores deben compararse con las medidas HIPPARCOS del par estelar O9.5 V+ B0.5 V en el centro del cúmulo σ Orionis ($\mu_\alpha =$

$+4.6 \pm 0.9 \text{ mas a}^{-1}$, $\mu_\delta = -0.4 \pm 0.5 \text{ mas a}^{-1}$). Debido a la gran incertidumbre en la determinación del movimiento propio de S Ori J053825.4–024241, no podemos asegurar su pertenencia al cúmulo a través únicamente de estudios astrométricos. Si fuera una enana M6 de primer plano estaría a una distancia de entre 100 y 150 pc de acuerdo con la relación M_J –distancia proporcionada por Dahn et al. (2002).

Hemos buscado en un radio de 4 arcmin alrededor de S Ori J053825.4–024241 en busca de posibles identificaciones de fuentes en el 1.4 GHz NRAO Very Large Array Sky Survey (Condon et al. 1998), el Infrared Astronomical Satellite Serendipitous Survey Catalog, el Infrared Space Observatory Data Archive y el International Ultraviolet Explorer Newly Extracted Spectra. No hemos identificado ninguna fuente en estas búsquedas. Además, nuestro blanco no fue detectado en rayos X por los instrumentos HRI y PSPC a bordo del *Röntgensatellit (ROSAT)* o por EPIC a bordo del *XMM–Newton* (Sanz-Forcada, Franciosini & Pallavicini 2004; Franciosini, Pallavicini & Sanz-Forcada 2005).

Se necesitan nuevas medidas de velocidad radial para afirmar si existe un compañero no resuelto alrededor de S Ori J053825.4–024241. Un compañero compacto caliente podría ser el responsable del exceso de flujo a longitudes de onda cortas; sin embargo, tal sistema binario no sería miembro del cúmulo σ Orionis, ni tampoco el compañero caliente podría contribuir al exceso observado en $2.2 \mu\text{m}$. De nuestras mejores imágenes, S Ori J053825.4–024241 no es resuelto con una FWHM de 0.53 arcsec. Si fuera un objeto binario, la separación entre ambos componentes sería menor que 190 AU a la distancia de 360 pc, y menor que 53 AU a 100 pc.

8.4 Sumario y conclusiones

Hemos obtenido espectroscopia óptica de baja resolución ($R \sim 600$) en el intervalo de longitud de onda entre 5300 y 9600 Å de cuatro candidatos a miembros de baja masa del cúmulo σ Orionis ($360 \pm 70 \text{ pc}$, 1–8 Ma). Estos objetos fueron seleccionados de las búsquedas fotométricas de Béjar et al. (2004) y Caballero et al. (2004). Hemos determinado tipos espectrales entre M5 y M6 para estas fuentes, lo que es coherente con que pertenezcan al cúmulo. Además, todos ellos muestran rasgos espectroscópicos típicos de atmósferas de baja gravedad, lo que apoya su pertenencia al cúmulo.

Se sabía que un objeto, S Ori J053825.4–024241 ($M_{6.0 \pm 1.0}$), era variable en la banda I (Caballero et al. 2004) y que mostraba colores $I - J$ y $J - K_s$ más azules y rojos, respectivamente, que otros miembros de magnitud similar (Béjar et al. 2004). A partir de nuestros datos espectroscópicos de baja resolución, S Ori J053825.4–024241 presenta una emisión $H\alpha$ muy intensa (una de las más grandes entre todos los miembros de baja masa del cúmulo), lo que, además del exceso en el infrarrojo cercano, sugiere que este objeto está sufriendo procesos de acreción desde un disco.

Para confirmar la posible naturaleza T Tauri de S Ori J053825.4–024241, obtuvimos un espectro de mayor resolución ($R \sim 1700$) en el intervalo 5600–8100 Å y monitorizamos fotométricamente el objeto en las bandas I , J y H y en luz blanca. S Ori J053825.4–024241 presenta una intensa y persistente emisión en $H\alpha$. Además, se le han detectado otras líneas permitidas y prohibidas, como [OI] $\lambda 6300.3$ y He I $\lambda 5875.8$. Las pseudoanchuras equivalentes de todas las líneas de emisión son consistentes con las medidas en otros acretores estelares conocidos. La línea $H\alpha$ está ensanchada con una anchura típica de estrellas T Tauri,

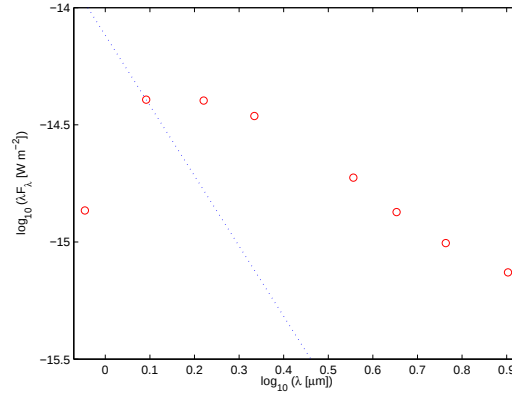


Figura 8.15: Distribución espectral de energía de S Ori J053825.4–024241, desde la banda *I* a [8.0]. La línea inclinada punteada denota la caída con pendiente -3 de un cuerpo negro en esta representación, sólo a modo ilustrativo.

lo que indica la presencia de caída de gas a altas velocidades. De la comparación de nuestro espectro de mayor resolución con los espectros de otras enanas no acretoras de tipos espectral similar, inferimos que hay presente algo de exceso de flujo de continuo hacia las longitudes de onda más azules. Cuantificamos este velado alrededor de $0.4\text{--}0.6$ en la región de Li I $\lambda 6707.8$, y mayor que 1.0 en longitudes de onda más azules que ~ 6400 Å. S Ori J053825.4–024241 tiene una velocidad radial coherente con pertenencia al cúmulo σ Orionis.

Se confirma que S Ori J053825.4–024241 es un objeto variable irregular. Las variaciones, que no muestran ningún patrón claro de modulación, son significativas ($0.05\text{--}0.7$ mag) desde el visible hasta la banda *J*. Se ha encontrado variabilidad en todas las escalas temporales (horas, días y años). La fotometría *H* parece bastante estable en el tiempo, lo que sugiere poca variabilidad a longitudes de onda mayores que $1.2\text{ }\mu\text{m}$. Tanto las propiedades espectroscópicas como fotométricas de S Ori J053825.4–024241 son coherentes con el escenario T Tauri. Asumiendo que S Ori J053825.4–024241 es miembro del cúmulo σ Orionis, hemos estimado su masa en $0.06^{+0.07}_{-0.02} M_{\odot}$ tras comparar con recientes modelos evolutivos. Basándonos en nuestros datos, concluimos que S Ori J053825.4–024241 es probablemente una enana marrón que sufre los mismos procesos que se dan en las estrellas T Tauri.

8.5 Addendum

Posteriormente al arbitraje interno, se han liberado datos *Spitzer* de la región de σ Orionis en que se encuentra S Ori J053825.4–024241. Se le han medido magnitudes $[3.6] = 12.72 \pm 0.08$, $[4.5] = 12.38 \pm 0.08$, $[5.8] = 11.96 \pm 0.08$ y $[8.0] = 11.26 \pm 0.08$ mag. La distribución espectral de energía resultante se muestra en la Figura 8.15. La presencia de un exceso de flujo en el infrarrojo cercano/medio es notable.