

5

Multiplicidad en σ Orionis: óptica adaptativa en el infrarrojo cercano

In space the stars are no nearer
They just glitter like a morgue

Marilyn Manson (Mechanical Animals)

5.1 Antecedentes

Las búsquedas profundas óptico-infrarrojas de objetos de muy baja masa en cúmulos estelares, como las descritas en otras secciones de esta memoria de Tesis, tienen muy pocos inconvenientes. Uno de ellos es la presencia de estrellas muy brillantes en el campo de visión. En regiones de formación jóvenes, como lo es σ Orionis, se encuentran estrellas de tipos espectrales tempranos y de gran luminosidad. Un ejemplo muy claro es σ Orionis A, la O9.5V del sistema múltiple central que da nombre al cúmulo. Algo más de una veintena de otras estrellas de tipos B, A y F pueblan la región. Todas estas estrellas poseen magnitudes tales que saturan incluso con el mínimo tiempo de exposición en un telescopio de clase 1 m usando filtros anchos estándar. Por el contrario, al intentar detectar objetos muy débiles de masa subestelar, se precisa utilizar tiempos de exposición largos, para que tales objetos posean una señal-ruido suficiente y para no estar dominado por la contribución del ruido electrónico. El resultado es la obtención de imágenes profundas, pero cuyo límite de detección disminuye al acercarse a las estrellas brillantes. Esta disminución puede tener lugar por la saturación y desbordamiento electrónico del detector (*blooming*, floración), por los patrones de difracción provocados por la araña del secundario o por los halos de la estrella brillante o por la aparición de reflejos (“fantasmas”, especialmente si la óptica del sistema instrumento-telescopio no está correctamente alineada). Todos estos efectos se pueden ver fácilmente en algunas de las figuras de esta memoria de Tesis (por ejemplo, en las Figuras 2.1 y en 6.2). A causa de esta contaminación luminosa, pueden no ser detectados algunos de los objetos localizados a distancias de hasta varias decenas de segundos de arco de las estrellas y que podrían formar con ellas un sistema múltiple.

Hasta la fecha, se conocen muy pocos sistemas múltiples en el cúmulo de σ Orionis. Aparte del famoso sistema central, sólo se sabe de unos pocos sistemas formados por estrel-

las de tipos tempranos separadas unos miles de unidades astronómicas y menos de media docena de sistemas binarios espectroscópicos. Algunos nuevos sistemas múltiples han sido tratados o propuestos por primera vez en esta memoria de Tesis. Por otro lado, la población de objetos subestelares del cúmulo es relativamente bien conocida y, a pesar de que algunos objetos se encuentran a distancias proyectadas de menos de 10 000 AU de estrellas conocidas del cúmulo, no hay indicaciones claras de que algún objeto subestelar forme parte de un sistema múltiple (en el Cap. 3 se han presentado entre tres y cuatro enanas marrones a separaciones físicas proyectadas de $\sim 5\,000$ AU de estrellas brillantes del cúmulo y que podrían estar asociadas a ellas, mientras que en el Cap. 4 se ha presentado una candidata a enana marrón con disco desarrollado, ς J053841.2–023737, que se encuentra a menos de 6 000 AU de dos estrellas del cúmulo). En esta sección se va a tratar de responder a dos preguntas claves de la formación estelar y subestelar: ¿cuál es la frecuencia de binariedad estelar en el cúmulo de σ Orionis?, ¿existen objetos subestelares, enanas marrones u objetos de masa planetaria, a una separación de estrellas del cúmulo tal que puedan estar ligados gravitatoriamente a ellas?. Este trabajo se puede entender como un estudio piloto complementario al de la búsqueda de amplia separación mostrada en el Cap. 3.

Existen varios métodos para reducir la contaminación luminosa en la proximidad de estrellas con posibles compañeros subestelares, como utilizar tiempos de exposición más cortos, máscaras coronográficas o cámaras de muy alta resolución espacial, o realizar las observaciones en el infrarrojo cercano o medio, donde el rango dinámico es mayor y la diferencia de magnitudes entre una estrella y un hipotético compañero es menor (se utilizan por defecto tiempos de exposición más cortos). En este capítulo se describe una búsqueda de compañeros de estrellas del cúmulo σ Orionis usando un sistema de óptica adaptativa en el infrarrojo cercano.

5.2 Observaciones

Se utilizó el sistema de óptica adaptativa (OA) NAOMI + INGRID en el William Herschel Telescope (WHT; véase Sección C.2.1) para obtener imagen H de seis estrellas pertenecientes al cúmulo σ Orionis. Además, se tomó imagen en la banda J de dos de ellas. Las observaciones tuvieron lugar entre el 8 y el 10 de septiembre de 2003. Se utilizaron distintos tiempos de exposición individuales (entre 10 y 60 s, dependiendo de la magnitud J de la estrella primaria) y un patrón de *dithering* común de nueve posiciones. El número de repeticiones en cada posición usado dependía del tiempo de exposición individual y de la calidad de la corrección de OA. Las FWHM de las imágenes después de la corrección de OA varió entre 0.2 y 0.4 arcsec. Para algunas estrellas se obtuvieron varios ciclos de imágenes. El tiempo de exposición total, variable de una estrella a otra, fue el suficiente para permitir la detección y caracterización fotométrica de enanas marrones de muy baja masa del cúmulo, casi hasta el límite planetario (hasta $H \sim 18$). Las imágenes infrarrojas se redujeron usando *scripts* IRAF desarrollados por el tesinando (que realizan automáticamente sustracción del fondo de cielo, corrección de *flat field*, alineamiento y combinación de las imágenes individuales). En la Tabla 5.1 se muestran las estrellas o sistemas observados, su nombre con la nomenclatura utilizada en esta memoria de Tesis, su tipo espectral, la fecha de observación, el filtro usado y el número de ciclos obtenidos en cada banda. En la Figura 5.10 al final del Capítulo se ha representado un diagrama a modo de resumen con todas las fuentes detectadas en la

búsqueda, con un código de colores para diferenciar los probables miembros del cúmulo de los objetos de fondo.

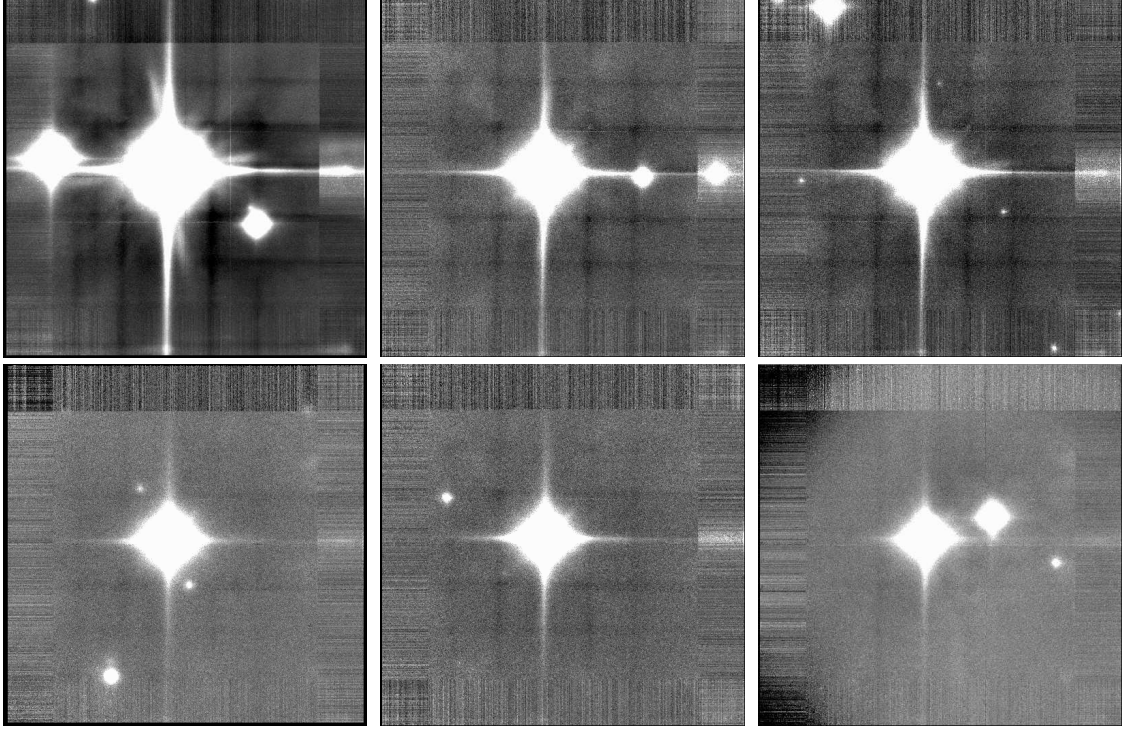


Figura 5.1: Imágenes H obtenidas con NAOMI + INGRID de estrellas en la búsqueda con OA. En la fila superior, de izquierda a derecha, σ Orionis AB (con σ Orionis C y D), HD 294271 y HD 37525. En la inferior, HD 37686, HD 37333, [W96] 4771–899 (con S Ori J053847.5–022711). El tamaño aproximado del lado del campo de visión es de unos 41 arcsec.

Tabla 5.1: Log de las observaciones^a.

Nombre	Estrella	Tipo Esp.	Fecha	Banda	Núm. ciclos ^b
ς J053844.8–023600AB	σ Orionis AB	O9.5V+B2V	2003 sep. 10	H	3
				J	3
ς J053836.6–023313	HD 294271	B5V	2003 sep. 09	H	1+1
ς J053901.5–023856AB	HD 37525	B5V	2003 sep. 09	H	2
ς J054013.1–023053	HD 37686	B9Vn	2003 sep. 08	H	1+1+1
ς J053740.5–022637	HD 37333	A1Va	2003 sep. 10	H	2+1
				J	1
ς J053848.0–022714AB	[W96] 4771–899	K7.0	2003 sep. 09	H	1

^a: Todas las observaciones realizadas con NAOMI + INGRID/WHT.

^b: El signo + separa números de ciclos tomados con distintos tiempos de exposición. Por ejemplo, para HD 37686 se tomaron tres ciclos en la banda H , cada uno con un tiempo de exposición diferente.

La utilización de un sistema de OA sin láser de guiado impone como restricción cerrar el bucle sobre una estrella de guía de una magnitud más brillante que una magnitud de-

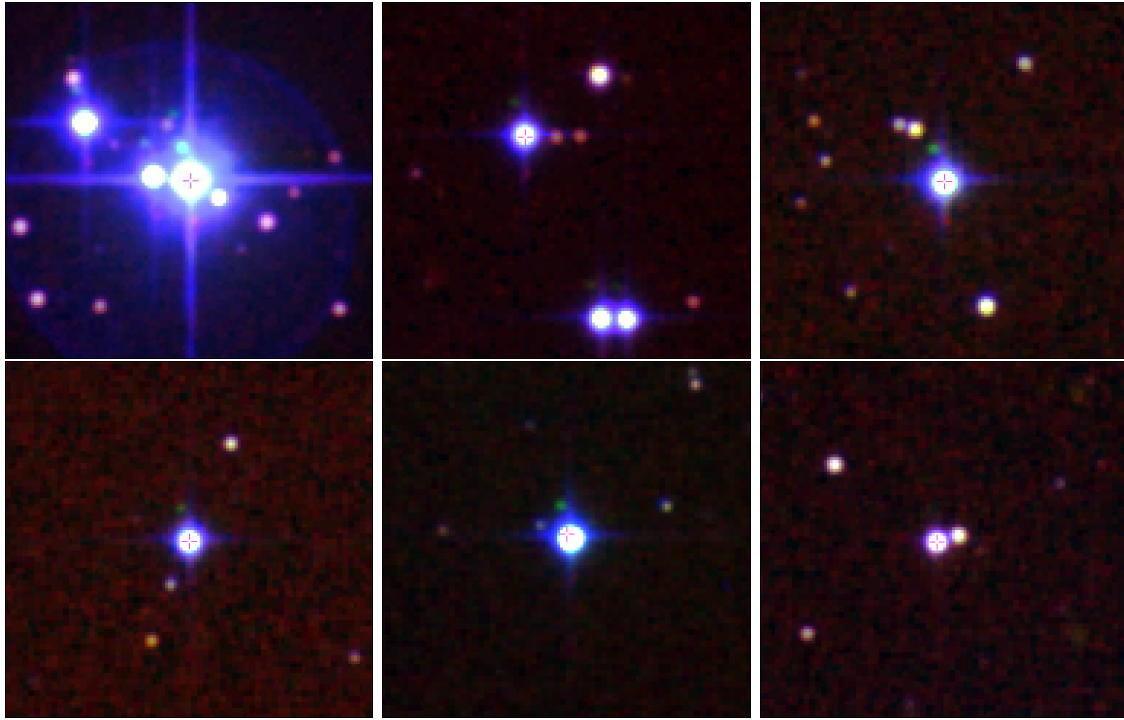


Figura 5.2: Imágenes en falso color resultado de combinar imágenes DSS-2-IR (banda *ER* fotográfica, equivalente a la *I* estándar; en color azul), 2MASS *J* (verde) y 2MASS *K_s* (rojo). En la fila superior, de izquierda a derecha, σ Orionis AB, HD 294271 y HD 37525. En la inferior, HD 37686, HD 37333, [W96] 4771–899. La cruz roja marca la posición de la primaria. El tamaño aproximado del lado del campo de visión es de unos 2 arcmin. Se usó la herramienta *Aladin* de Astronomía Virtual para crearlas.

terminada¹. La magnitud máxima de esta estrella depende principalmente de la abertura del telescopio, la eficiencia del instrumento, la longitud de onda de trabajo del sistema de guiado, del *seeing* natural en el momento de observación (a su vez dependiente de la longitud de coherencia atmosférica del lugar de observación, r_0) y de la fracción de luz que un dicróico desvía al sensor del frente de onda (en vez de ir al instrumento científico). En general, para NAOMI + INGRID esta magnitud es $V \sim 13$ cuando el *seeing* natural en el óptico

¹La OA se basa en las deformaciones de un espejo deformable (en el caso más habitual, facetado o segmentado) en el camino óptico del sistema para corregir las distorsiones en el frente de onda que originan las turbulencias atmosféricas. La configuración del espejo deformable, que varía en escalas de 0.001 a 0.010 s, es tal que se maximiza la calidad de imagen de una estrella de referencia brillante. Mientras que las deformaciones son capaces de mejorar la calidad de la imagen natural y son suficientemente rápidas como para que cuando se aplique la corrección esté todavía en fase con la variación, se dice que se tiene el *bucle cerrado* o lazo cerrado. La calidad de una imagen de OA se cuantifica por su cociente de Strehl. Éste se define como el cociente de la intensidad máxima en el plano focal dividida entre la intensidad medida en el mismo punto si el sistema estuviera limitado por difracción. Por ejemplo, para NAOMI + INGRID, a distancia nula de la estrella de guía, el cociente de Strehl varía entre ~ 0.3 en la banda *J* y ~ 0.7 en la banda *K_s*. El cociente de Strehl cae, además, con la distancia al eje óptico debido al efecto isoplanático. En particular, en la banda *H* el cociente de Strehl disminuye a la mitad a 17 arcsec de la estrella de guía, que es aproximadamente la distancia donde comienza la región de *trimming* una vez reducida una imagen centrada en una estrella de guía brillante. La FWHM y el diámetro que incluye el 50% de la energía crecen también con la distancia a la estrella de guía.

está por debajo de 1 arcsec. La corrección del sistema de óptica adaptativa es máxima en las proximidades de la estrella de guía. Por tanto, para estudiar en las proximidades de las estrellas seleccionadas con las máximas prestaciones, todas ellas debían ser suficientemente brillantes en el óptico como para poder cerrar el bucle. Además, se seleccionaron de forma que cubriesen un rango amplio y representativo de tipos espectrales del cúmulo, desde O9.5 hasta K7.0.

5.3 Resultados

Una imagen H obtenida con NAOMI + INGRID de cada una de las estrellas se muestra en la Figura 5.1. El tamaño aproximado del lado del campo de visión es de unos 41 arcsec y la orientación es la habitual. En la Figura 5.2 se muestra para cada una de las estrellas una región tres veces mayor que la estudiada con NAOMI + INGRID. Se han combinado imágenes en las bandas I , J y K_s para crear otra en falso color. Nótese que la mayoría de los objetos “rojos” que se ven en las imágenes forman parte o son candidatos a miembros del cúmulo.

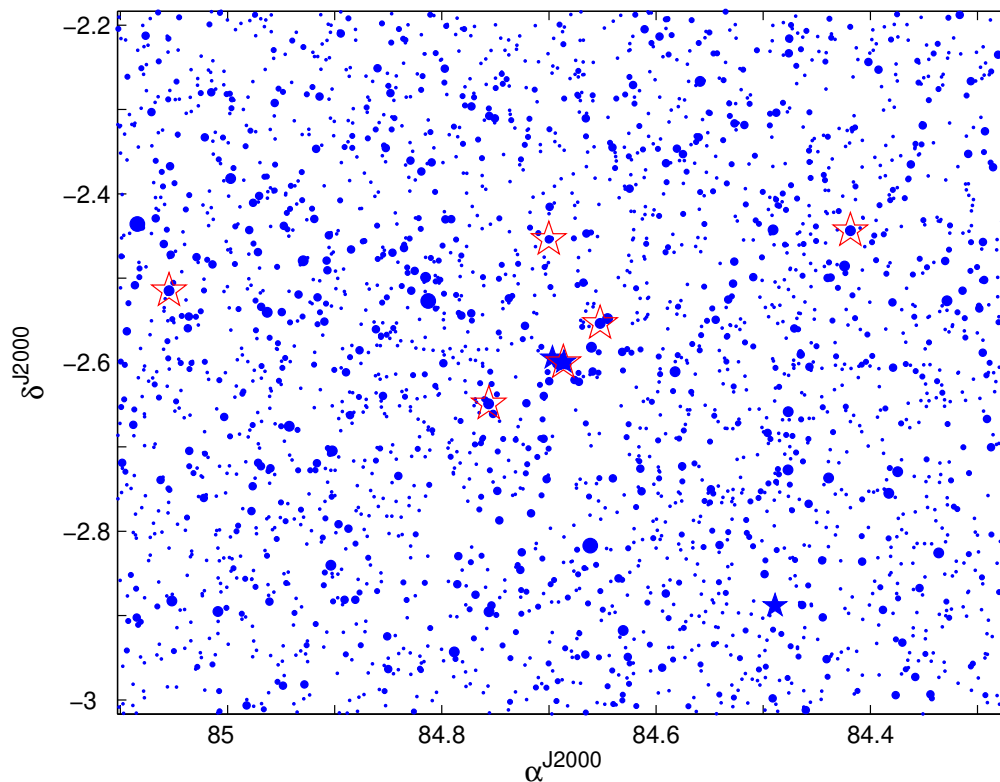


Figura 5.3: Pictograma centrado en σ Orionis AB de 50 arcmin de lado en el que se representan todas las fuentes con magnitud J menor que 16. El tamaño de los símbolos es inversamente proporcional a la magnitud. Las seis fuentes observadas se indican con estrellas grandes huecas (rojas). El norte está hacia arriba y el este hacia la izquierda, como es habitual.

Algunas de las estrellas forman parte de sistemas previamente conocidos. El caso de σ Orionis AB ya ha sido comentado en el Cap. 2. HD 294271 parece formar parte de un sistema cuádruple junto con HD 294272 AB y BD-02 1324D. Por último, [W96] 4771-899 posee un compañero visual con confirmación espectroscópica de pertenencia al cúmulo, S Ori J053847.5-022711.

Tabla 5.2: Compañeros visuales detectados.

Estrella	Núm. obj. detectados ^a	Segunda época ^b	Núm. obj. cúmulo ^c	Notas ^d
σ Orionis AB	6	Cap. 4, HRC-I	1(1)	σ Orionis C, D, IRS1; #2 rayos X
HD 294271	3	2MASS, Cap. 3	2	<i>IJKK_s</i>
HD 37525	9	2MASS, Cap. 6, PALAO	2(3)	Binaria
HD 37686	4	2MASS, Cap. 3, Cap. 6	1(1)	Enrojecimiento
HD 37333	2	2MASS, Cap. 3	0	
4771-899	4	2MASS, Cap. 3	1	Binaria; C espec.
Total	26		7(5)	

^a: Número de objetos detectados en total, incluyendo la(s) estrella(s) primaria(s).

^b: Segunda época usada para determinar la naturaleza del compañero visual. Se dan referencias a otros capítulos de esta memoria de Tesis, al catálogo 2MASS o a instrumentos cuyos datos también se han usado.

^c: Número de nuevos candidatos fotométricos a miembros del cúmulo (entre paréntesis, objetos de naturaleza desconocida).

^d: Detalles en el texto.

El pictograma de los 50 arcmin centrales del cúmulo se puede encontrar en la la Figura 5.3. Se han representado todas las fuentes infrarrojas catalogadas por 2MASS con magnitud $J < 16.0$, con distintos símbolos en función de su brillo. Los seis blancos estudiados se han representado mediante estrellas grandes de color rojo. Ninguna de ellos se aleja del centro del cúmulo más que 25 arcmin. El más oriental, HD 37686, se encuentra a unos pocos minutos de arco de la Nebulosa de Caballo.

A continuación se explica detalladamente cada una de las estrellas o sistemas estelares observados, las fuentes detectadas en cada campo y las posibilidades de que algunas de ellas se traten de compañeros ligados gravitatoriamente. Para la selección de los candidatos a miembros del cúmulo se han utilizado datos de altas energías y fotométricos óptico-infrarrojos de anteriores búsquedas (de “segunda” época) con una resolución espacial menor que la de NAOMI + INGRID. La Tabla 5.2 resume los resultados de nuestra investigación.

5.3.1 σ Orionis AB

En la imagen NAOMI + INGRID en la banda H , la más profunda de las adquiridas en esta búsqueda, se detectan σ Orionis AB (par no resuelto), σ Orionis C y D (estrellas brillantes al oeste-suroeste y al este, respectivamente²), una fuente embebida en el halo de σ Orionis AB,

²Se midieron el tamaño del píxel y la orientación del detector para la campaña 07-09sep03 a partir de las componentes σ Orionis C y D. Los valores medidos fueron $0.03857(14)$ arcsec píxel⁻¹, $-0.56(18)$ deg (el eje vertical del detector hacia el oeste del norte celeste), respectivamente.

a unos 3 arcsec hacia el nor-noreste (y que posiblemente se trate de σ Orionis IRS1), un compañero visual de σ Orionis C (objeto #1) y un objeto en el borde norte del detector (#2).

Dada la extrema proximidad entre σ Orionis C y el objeto #1, de tan sólo ~ 2 arcsec hacia el noreste, el cociente de Strehl y la PSF habrán variado suficientemente poco como para poder realizar fotometría por comparación de cuentas en el pico. De las magnitudes J y H de σ Orionis C catalogadas por 2MASS (9.09 ± 0.03 y 9.11 ± 0.05 , respectivamente), se han determinado las magnitudes de #1, $J = 15.1^{+0.8}_{-0.5}$ y $H = 14.9^{+0.5}_{-0.4}$. El color $J - H$ relativamente azul, $0.2^{+0.9}_{-0.6}$ mag, aunque con unas considerables barras de error, junto con su magnitud J , típica de enanas $\sim M6$ del cúmulo, parecen indicar que #1 se trata de un objeto de fondo. La mala calidad de la fotometría impide, sin embargo, descartarlo completamente como candidato a miembro estelar de muy baja masa del cúmulo.

El objeto #2, ς J053845.3–023541, fue clasificado en la búsqueda del Capítulo 4 como una fuente de rayos X, detectada con *Chandra*, con contrapartida en la banda K_s y sin fotometría en las bandas $IJJH$ debido a su proximidad al sistema central. Posiblemente se trate de un miembro del cúmulo por su emisión a altas energías.

Tabla 5.3: Compañeros visuales de σ Orionis AB: coordenadas y fotometría.

Objeto	α^{J2000}	δ^{J2000}	I	J	H	K_s	Notas
IRS1	05 38 44.84	−02 35 57.1	—	10.4 ± 0.2	9.8 ± 0.2	—	rayos X
C	05 38 44.12	−02 36 06.3	9.14 ± 0.10	9.09 ± 0.03	9.11 ± 0.05	9.13 ± 0.02	2M
D	05 38 45.63	−02 35 58.9	6.86 ± 0.10	7.12 ± 0.03	7.22 ± 0.03	7.26 ± 0.02	rayos X, 2M
#1	05 38 44.12	−02 36 06.3	—	$15.1^{+0.8}_{-0.5}$	$14.9^{+0.5}_{-0.4}$	—	
#2	05 38 45.35	−02 35 42.9	—	—	—	12.98 ± 0.10	rayos X

σ Orionis IRS1

La fuente a ~ 3 arcsec al nor-noreste de σ Orionis AB podría tratarse de σ Orionis IRS1. van Loon & Oliveira (2003) detectaron σ Ori IRS1 durante observaciones en el infrarrojo medio usando TIMMI-2 en el ESO 3.6 m Telescope (bandas $N1$ y $Q1$). Presentaron a la fuente como una nube de polvo cuyo núcleo se encuentra a una separación angular de 3.3 arcsec hacia el nor-noreste de σ Orionis AB (que se corresponde con una separación proyectada de 1 200 AU). Presentaba emisión extendida, en forma de abanico y FWHM ensanchada respecto a la de σ Orionis AB. Su espectro en la banda N exhibía un fuerte y ancho rasgo de emisión indicativo de polvo de silicatos. Propusieron que la emisión radio libre-libre detectada por Drake (1990), a 2.64 arcsec al norte de σ Orionis AB, podría originarse en una región fotoionizada en la interfase entre el campo de radiación de σ Orionis AB y la región de polvo de σ Orionis IRS1. Igualmente, la mayor parte del flujo infrarrojo de la fuente IRAS 05362–0237 provendría de σ Orionis IRS1. Cuantificaron en $\sim 1\,000$ AU, $0.001 M_\odot$ y 130 K el tamaño, la masa mínima y la temperatura de la nube de gas y polvo (este último con signos de coagulación). Finalmente, sugirieron que, aunque no había evidencia

todavía de que σ Orionis IRS1 albergase una estrella central, la fuente infrarroja podría ser un disco protoplanetario en proceso de dispersión por la intensa radiación ultravioleta de las estrellas O9.5V+B0.5V centrales. Sanz-Forcada et al. (2004) anunciaron que las imágenes HRC-I/*Chandra* (sensible al rango de energías entre 0.08 y 10 keV) del sistema central obtenidas por Adams et al. (2004) revelaban la existencia de una fuente de rayos X a unos 2 arcsec al noreste³ de σ Orionis AB. Estimaron que la contribución contaminante de esta fuente a los espectros EPIC y RGS/*XMM-Newton* de σ Orionis AB que presentaban en su investigación era del orden del 3%.

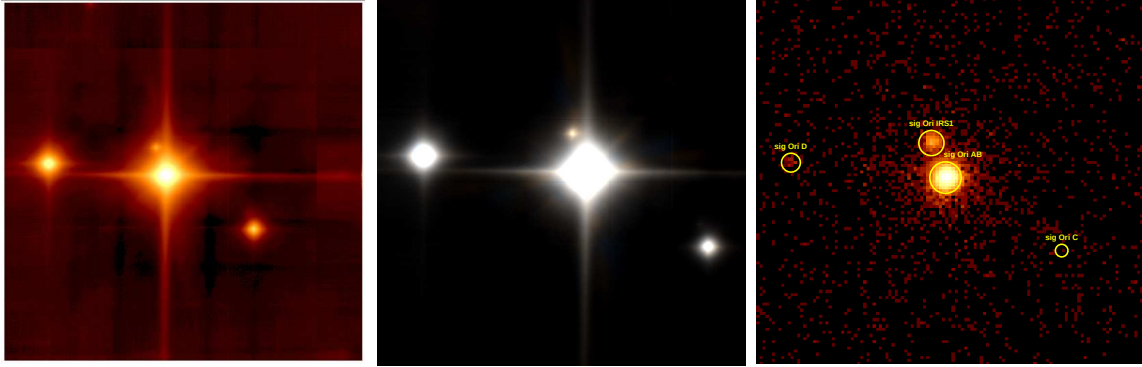


Figura 5.4: *Izquierda*: imagen combinada JH de la parte central del sistema central de σ Orionis, obtenida con NAOMI + INGRID/WHT. El campo de visión es de 30×30 arcsec². Se ha utilizado un escalado logarítmico para la apreciación de σ Orionis IRS1 cercano a σ Orionis AB. También son detectables σ Orionis C (abajo derecha), su compañero visual muy cercano y σ Orionis D (izquierda). *Centro*: lo mismo que la anterior, pero en colores falsos: J codifica azul y H rojo. *Derecha*: imagen HRC-I/*Chandra* de aproximadamente el mismo campo de visión. Se ha utilizado un escalado logarítmico y un *bineado* de dos píxeles. Se han marcado con círculos amarillos los componentes del sistema múltiple central visibles en el campo.

Se han realizado medidas astrométricas de alta precisión para confirmar que las localizaciones de la fuente de infrarrojo cercano detectada con NAOMI + INGRID a unos 3 arcsec de σ Orionis AB y la del corazón de la fuente de infrarrojo medio σ Orionis IRS1 son las mismas. Las separaciones angulares medidas fueron $\rho = 3.32 \pm 0.06$ arcsec, $\theta = 19.6 \pm 1.4$ deg. Los cálculos se realizaron usando σ Orionis C y D como estrellas de referencia astrométrica, con posiciones catalogadas por *HIPPARCOS* y por 2MASS. El sistema binario σ Orionis AB saturaba en nuestras imágenes, lo que impidió realizar ningún tipo de fotometría o astrometría sobre él.

El centroide de cada fuente luminosa en la imagen H de NAOMI + INGRID se calculó usando la herramienta `imcentroid` con distintos parámetros de ajuste, en particular 11 combinaciones distintas de parejas `boxsize-bigbox`. Las coordenadas del fotocentroide dependen fuertemente de estos dos parámetros, ya que el centroide del corte de la PSF a distintas alturas de esta varía⁴. Para estimar el fotocentroide “real” de cada fuente, se

³En realidad mencionan al *noroeste*, pero una simple inspección de la imagen original demuestra que fue un *lapsus malus*.

⁴Se puede entender, con un ejemplo culinario, como el corte de una zanahoria; a cada tajo del cuchillo de cocina, el eje de la zanahoria se desplaza levemente de la línea recta, ya que la zanahoria no es perfecta. Este test se ha repetido para más imágenes en otras campañas de OA tomadas para el programa de búsqueda de objetos de baja masa alrededor de estrellas jóvenes cercanas, con el mismo resultado.

han promediado los fotocentroides a distintas alturas (es decir, variando `boxsize`). No se han promediado valores claramente discordantes, que se correspondían con valores de `boxsize` muy bajos (unas décimas de FWHM) o muy altos (unas pocas FWHM). El error en su determinación se ha estimado calculando la desviación típica de los distintos valores. Mediante el estudio de otras imágenes de NAOMI + INGRID, se ha concluido que tal error depende de la calidad de la corrección; puede variar entre medio píxel (~ 20 mas) y hasta tres píxeles (~ 120 mas). En el caso de la imagen centrada en σ Orionis AB, se han medido errores en la determinación del centroide del orden del píxel, que es aproximadamente una decimoquinta parte de la FWHM típica (bastante pobre por otra parte – la FWHM varía de un lugar a otro del campo de visión). Las coordenadas del fotocentroide usando un ajuste moffatiano⁵ con `rimexamine` son idénticas a las calculadas con `imcentroid`. Dada la complejidad del cálculo que requiere determinar el fotocentroide usando `imcentroid`, excepto si se menciona lo contrario, el resto de fotocentroides de fuentes detectadas con sistemas de OA en esta memoria de Tesis se calcularán usando `rimexamine`. El error se estimará conservativamente en 0.1 veces la FWHM del objeto en el ajuste moffatiano. Este valor es aproximadamente un 50% mayor que el estimado mediante el promedio de varias iteraciones con `imcentroid`, pero se garantiza la validez del resultado con un esfuerzo menor.

Las magnitudes en las bandas J y H de σ Orionis IRS1, $J = 10.4 \pm 0.2$ y $H = 9.8 \pm 0.2$, se estimaron usando σ Orionis C y D como calibradores (con datos de 2MASS). Nótese que estas magnitudes están afectadas por la variación del cociente de Strehl en el campo de visión de NAOMI + INGRID y deben ser usadas con precaución.

Se han usado las imágenes HRC-I/*Chandra* obtenidas por Adams et al. (2004), archivadas en la base de datos de *Chandra*, para medir la separación angular entre σ Orionis AB y la fuente de rayos X detectada por Sanz-Forcada et al. (2004). La posición de la fuente de rayos X coincide con la infrarroja con un error menor 0.15 arcsec: $\rho = 3.18 \pm 0.13$ arcsec, $\theta = 22 \pm 3$ deg. La separación entre el núcleo de la nube detectada por van Loon & Oliveira (2003) y la fuente JH es menor de 0.1 arcsec. Se concluye, por tanto, que las fuentes de infrarrojo cercano y rayos X coinciden con la fuente de infrarrojo medio σ Orionis IRS1. La Fig. 5.4 muestra las imágenes JH de NAOMI + INGRID (de dos formas distintas) y la de HRC-I.

Hasta la fecha sólo se conoce un objeto de Clase I en el cúmulo σ Orionis, la fuente IRAS 05358–0238 (Oliveira & van Loon 2004; es una fuente doble separada 5.7 arcsec no estudiada en esta memoria de Tesis. Recuérdese también la fuente ς J053841.2–023737, id. 5, descubierta en el Cap. 4). σ Orionis IRS1 podría ser el segundo (o tercer) ejemplo de esta clase de objetos. La Figura 5.5 muestra el flujo espectral en función de la longitud de onda en su representación típica, λF_λ vs. λ , ambos en escala logarítmica. En la Figura, se pueden comparar las mediciones resueltas de σ Orionis IRS1 con las de IRAS 05358–0238. El flujo espectral de σ Orionis AB+IRS1 como fuente no resuelta también se muestra para determinadas frecuencias.

Se ha realizado una primera aproximación de considerar varios cuerpos negros de temperaturas efectivas y radios modificables de forma que la suma de las contribuciones ex-

⁵La PSF de las imágenes obtenidas con OA es más similar a una distribución fotónica moffatiana que a una gaussiana. En realidad, la PSF se ajusta mejor a la suma de dos gaussianas, una aguda (limitada por difracción) y otra chata (limitada por el *seeing*).

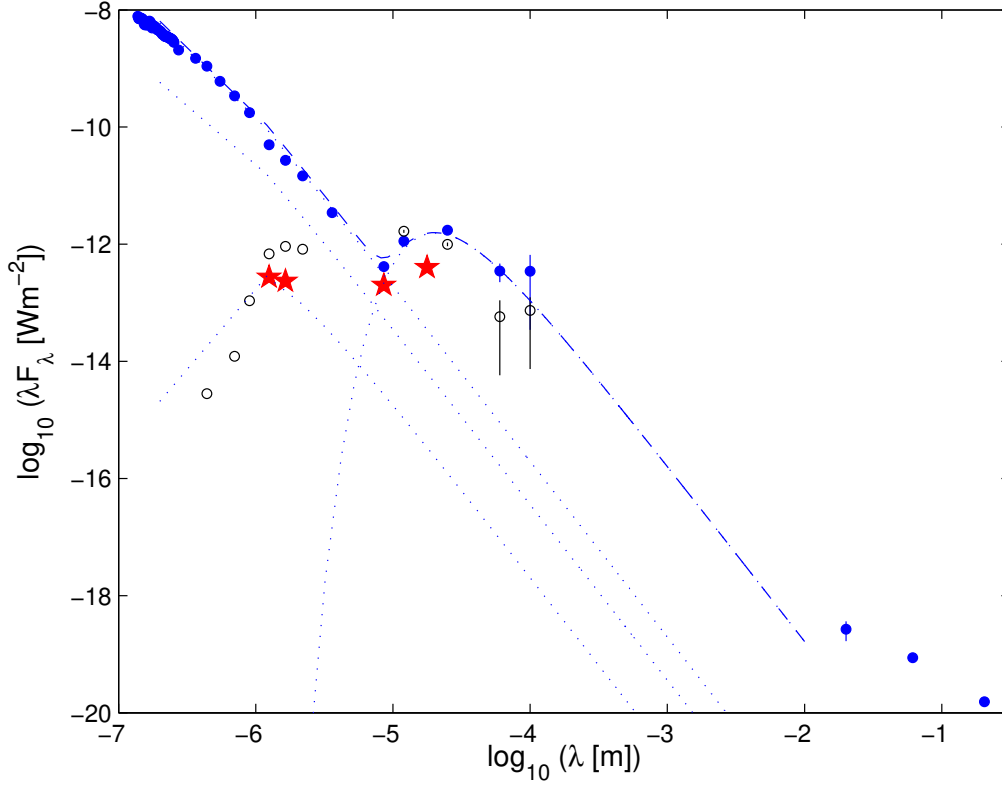


Figura 5.5: Distribución espectrofotométrica de energía de σ Orionis AB y σ Orionis IRS desde el ultravioleta hasta el dominio radio. Los puntos rellenos azules son para las medidas que no pueden resolver las fuentes A, B e IRS1 (excepto para la medida en la banda N1), así como las medidas radio centimétricas. Las estrellas rojas denotan las medidas resueltas de σ Orionis IRS1 en las bandas J , H , $N1$ y $Q1$. Las medidas $BRIJHK_s$ e $IRAS$ del objeto de Clase I IRAS 05358-0238 se muestran como comparación con círculos huecos vacíos negros. Se muestran las barras de error cuando son disponibles. Los flujos monocromáticos de cuerpo negro estimados para σ Ori A, B, la fuente central y el disco de IRS1 se muestran con líneas punteadas. La suma de los cuatro flujos monocromáticos aparece con una línea discontinua.

pliquen el flujo monocromático observado proveniente de σ Orionis AB+IRS1. Recuerdese que el flujo monocromático recibido de un cuerpo negro de temperatura T_{eff} y radio R a una distancia r es:

$$F_{\lambda} = \frac{2\pi hc^2 / \lambda^5}{e^{(hc/\lambda k_B T_{\text{eff}})} - 1} \left(\frac{R}{r} \right)^2. \quad (5.1)$$

Mediante un proceso iterativo, se han determinado un conjunto de cuatro pares $T_{\text{eff}}-R$ de forma que la suma de los flujos individuales de cuatro cuerpos negros se ajustase razonablemente al flujo total observado en cada banda (excepto en la región radio, ya que la emisión es de origen no térmico). Se ha usado una distancia a las fuentes de $r = 360$ pc. Los valores de $T_{\text{eff}}-R$ se muestran en la Tabla 5.4. Los cuatro cuerpos negros escogidos son σ Orionis A, σ Orionis B, la hipotética estrella en el núcleo de σ Orionis IRS1 y el disco

que la rodea. Se pueden extraer las siguientes conclusiones: (i) cuatro cuerpos negros es el número mínimo para explicar el flujo observado; (ii) la temperatura efectiva y el radio de σ Orionis B parecen corresponder mejor con los de una estrella de tipo B2.0V que los de una B0.5V. La correspondencia con los valores de la O9.5V son bastante correctos; (iii) por el radio de la fuente estelar central en σ Orionis IRS1, la estrella debería poseer una clase de luminosidad intermedia entre la de las enanas y la de las gigantes. Para ambas clases, el tipo espectral determinado por su T_{eff} se corresponde con estrellas de tipos entre G tardío y K temprano. A pesar de haber considerado a la estrella como un cuerpo negro, a partir de las magnitudes JH observadas y por comparación con estrellas del cúmulo con tipo espectral determinado y brillo similar se llega a la misma conclusión; (iii) el disco cercano calculado resulta ser ligeramente más caliente (180 K vs. 130 K) y mucho más pequeño (~ 14 AU – 30 000 AU – vs. ~ 1 000 AU) que el propuesto por van Loon & Oliveira (2003). No debe descartarse, sin embargo, la existencia de otro disco lejano, de gran tamaño y más frío, posiblemente responsable de la emisión extendida detectada con TIMMI-2/3.6 m ESO. Las próximas investigaciones sobre la naturaleza de σ Orionis IRS1 provendrán de estudios con OA con filtros anchos y estrechos, especialmente en el óptico (p.e., OASIS/WHT) y, quizá, con el satélite espacial *Herschel* (Spitzer Space Telescope no ha sido capaz de resolver el sistema).

Tabla 5.4: Parámetros de cuerpos negros de σ Orionis A, σ Orionis B, σ Orionis IRS1 (estrella) y σ Orionis IRS1 (disco cercano).

Objeto	Tipo esp.	T_{eff} (K)	R ($R_{\odot}$)
σ Orionis A	O9.5V	30 000	8
σ Orionis B	B0.5V	22 000	4
σ Orionis IRS1 (estrella)	$\sim$ G5–K1IV	5 000	2
σ Orionis IRS1 (disco cercano)	—	180	30 000

5.3.2 HD 294271

HD 294271 se localiza a sólo 3.5 arcmin al noroeste de σ Orionis A. Es la estrella más brillante de un sistema cuádruple de estrellas de tipos espectrales tempranos, catalogado en Bonner Durchmusterung (BD), Aitken Double Stars (ADS), United States Navy Observatory Index catalog of Double Stars (IDS) y Catalog of Components of Double and Multiple Stars (CCDM). El sistema está formado por HD 294271 (componente A, tipo espectral B5V de unas 6 $M_{\odot}$), HD 294272 (B, B8V, 4 $M_{\odot}$, a una distancia $\rho = 68$ arcsec y un ángulo de posición $\theta = 202$ deg respecto a la componente A), BD–02 1323C (C, de tipo espectral A temprano, ~ 3 $M_{\odot}$, $\rho = 72.6$ arcsec y $\theta = 208$ deg respecto a A; también: $\rho = 8.65$ arcsec y $\theta = 268$ deg respecto a B) y BD–02 1324D (D, posiblemente una estrella F, $\rho = 33.8$ arcsec y $\theta = 310$ deg respecto a A). HD 294271 es uno de los 13 probables miembros del cúmulo σ Orionis con masa igual o mayor que 3 $M_{\odot}$, de acuerdo con Sherry et al. (2004).

Se obtuvieron con NAOMI + INGRID dos imágenes en la banda H con dos tiempos de exposición diferentes. En ellas se detectan dos objetos, a parte de HD 294271, ambos exactamente hacia el oeste de la B5V. El más interno (objeto #1) se encuentra a una

distancia de 10.70 ± 0.14 arcsec y subtiende un ángulo θ de 267.3 ± 0.5 deg respecto a HD 294271, mientras que el más externo (objeto #2) lo está a 18.79 ± 0.16 arcsec y 269.6 ± 0.3 deg. Ambos son fuentes detectadas por 2MASS, por lo que se dispone de sus magnitudes JHK_s . También fueron observados en la búsqueda *VRI* expuesta en el Cap. 3. El objeto #2 fue seleccionado como candidato a miembro fotométrico en tal búsqueda, pero no pudo ser observado espectroscópicamente con AUTOFIB2 + WYFFOS. En la imagen en la banda *V* de tiempo de exposición más corto, la B5V es tan brillante que impidió que las herramientas automáticas de fotometría detectasen el objeto más interno, #1. Al ser un requisito de selección en aquella búsqueda la detección del objeto en las tres bandas ópticas, no fue seleccionado. Las coordenadas y magnitudes JHK_s de 2MASS e *I* de los dos objetos se muestran en la Tabla 5.5. El mismo área que la búsqueda del Cap. 3 ha sido estudiada hasta una mayor profundidad en las bandas *IZ* por Béjar et al. (en prep.). Ninguno de los dos objetos fue detectado, al encontrarse completamente encubiertos en el halo de σ Orionis AB.

La combinación de sus magnitudes aparentes conocidas en cualquiera de las cuatro bandas y sus colores *I* – *J* (#1: 1.87 ± 0.11 mag; #2: 1.96 ± 0.07 mag) y *J* – *K_s* (0.87 ± 0.10 mag y 0.88 ± 0.05 mag) los hacen ser candidatos fotométricos muy probables a enanas de tipo M temprano del cúmulo. De pertenecer a σ Orionis, se encontrarían a distancias proyectadas de $3\,900 \pm 700$ (#1) y $6\,800 \pm 1\,300$ AU (#2) de HD 294271, respectivamente.

Tabla 5.5: Compañeros visuales de HD 294271: coordenadas y fotometría.

Objeto	α^{J2000}	δ^{J2000}	<i>I</i>	<i>J</i>	<i>H</i>	<i>K_s</i>	Notas
#1	05 38 35.82	–02 33 13.3	15.57 ± 0.07	13.70 ± 0.08	13.14 ± 0.06	12.83 ± 0.05	2M
#2	05 38 35.28	–02 33 13.1	15.87 ± 0.06	13.91 ± 0.04	13.35 ± 0.02	13.03 ± 0.03	2M

5.3.3 HD 37525

HD 37525 está catalogada como una estrella de tipo espectral B5V químicamente peculiar de unas $6 M_{\odot}$, a unos 48.5 arcsec hacia el este-noreste de S Ori 17. En las dos imágenes NAOMI + INGRID, HD 37525 se resuelve en un par cercano. Se ha medido $\rho = 0.47 \pm 0.04$ arcsec, $\theta = 189^{+7}_{-6}$ deg (la mayor parte de la contribución de los errores proviene de la determinación del fotocentroide de la estrella primaria, ya que ésta satura y su PSF está deformada). La magnitud *H* combinada de los dos componentes según 2MASS es $H = 8.10 \pm 0.04$. Se ha estimado que la magnitud *H* de la primaria es igual o más brillante que 9.1 mag, y al menos 0.5 mag más brillante en *H* que la secundaria⁶. Esta diferencia de magnitud indica que la componente más débil podría tratarse de una B tardía o una A temprana de unas 3–4 $M_{\odot}$.

Se han detectado, además, otras siete fuentes infrarrojas. Las dos más brillantes, #6 y #7, al noreste de HD 37525 AB en el borde del campo de visión, están catalogadas por 2MASS. El catálogo GSC2.2 da únicamente fotometría *R* (en la banda fotográfica *F*)

⁶La relación entre las magnitudes de los dos componentes, m_1 y m_2 , y la combinada de ambos, m_{1+2} , es: $m_{1+2} = m_2 - 2.5 \log(1 + 10^{-\frac{m_1 - m_2}{2.5}})$.

combinada para las dos fuentes: $R = 13.90 \pm 0.42$. Su fotometría no es capaz de resolverlas. La región muy cercana a HD 37525 AB y ligeramente al norte había escapado a búsquedas de nuestro grupo, ya que se había intentado evitar su brillo (por ejemplo, en el apuntado de la WFC en la búsqueda descrita en el Cap. 6 la estrella se colocó en el hueco entre los detectores 3 y 4). Wolk (1996) indicó la presencia de una estrella de pre-secuencia principal sin emisión en rayos X en las coordenadas 05 39 02.3 –02 38 35.6 J2000 (P053902–0238). La astrometría de Wolk presentaba un ligero desplazamiento respecto a las astrometrías de USNO-B1 y 2MASS. Tampoco indicó si el objeto era doble o no resuelto. Este candidato a estrella del cúmulo se trata probablemente del objeto #6 (de ser el #7, éste poseería colores anómalos). Wolk proporcionó sus magnitudes $U = 17.79 \pm 0.14$, $B = 16.90 \pm 0.03$, $V = 15.151 \pm 0.008$, $R = 15.361 \pm 0.013$, $I = 13.691 \pm 0.016$ (los errores fotométricos parecen estar *muy* infravalorados). Su color $I - J \sim 1.3$ mag, para su magnitud $I \sim 13.7$, junto con su color $J - K_s = 0.75 \pm 0.06$ mag llevan a clasificar a #6 como un candidato fotométrico a miembro estelar del cúmulo. La separación proyectada a HD 37525 AB es de ~ 7500 AU. El objeto #7, con un color $J - K_s = 0.50 \pm 0.05$ mag, parece ser de fondo. Las magnitudes IJK_s conocidas de las dos fuentes se muestran en la Tabla 5.6.

Los dos objetos débiles al suroeste, #4 y #5, no fueron detectados por 2MASS, por lo que sus magnitudes JK_s mínimas son conocidas. Ambos no estaban en el campo de visión de las imágenes I de WFC00 o J de ISAAC, pero sí en las de la WFC03 (véase la explicación de esta nomenclatura en el Cap. 6). Se han determinado sus magnitudes I mediante fotometría PSF calibrando con seis objetos cercanos en la WFC03 con magnitud conocida. A partir de las imágenes de seguimiento en la banda H tomadas con $\Omega 2K/3.5$ m CAHA de candidatos a objetos de masa planetaria, descritas también en el Cap. 6, se han medido las magnitudes H de los objetos #4 y #5. Las magnitudes I y H medidas se muestran en la Tabla 5.6. Las fuentes #4 y #5 poseen colores $I - H$ mucho más azules que los de los miembros del cúmulo con confirmación espectroscópica de la misma magnitud I .

No se dispone de imagen óptica de los tres objetos restantes, muy cerca de HD 37525 AB (#1, #2 y #3). La magnitud H del más externo, #3 (a unos 15 arcsec hacia el este), se ha medido a partir de los datos $\Omega 2K$ mencionados antes (ver Tabla 5.6). En la misma imagen, el objeto #2 (a unos 7–8 arcsec hacia el oeste-suroeste) es parcialmente visible en el halo de la B5V doble. Los tres objetos son detectados en imágenes en las bandas K_C y K_s , tomadas con el Palomar Adaptive Optics System (PALAO⁷) y cedidas amablemente por María Rosa Zapatero Osorio. Debido al bajísimo movimiento propio de HD 37525 AB ($(\mu_\alpha \cos \delta, \mu_\delta) = (-0.6 \pm 1.0, -1.0 \pm 0.5)$ mas a^{-1}) y la escasa separación temporal entre las imágenes PALAO y NAOMI + INGRID, no se han podido hacer medidas astrométricas. Se ha podido imponer un límite inferior a las magnitudes H , > 18.5 , por comparación con la fuente más débil con fotometría fiable en el campo (#5). La naturaleza de las tres fuentes es desconocida para nosotros.

La B5V también se resuelve en un par cercano en las imágenes de PALAO. Usando 0.040 arcsec/píxel como escala espacial del detector y asumiendo la orientación hacia el norte correcta, se ha medido $\rho = 0.45 \pm 0.04$ arcsec, $\theta = 190^{+7}_{-6}$ deg, valores muy similares a los

⁷PALAO, construido por Jet Propulsion Laboratory, es el sistema de OA en el Hale 200-inch Telescope en el Palomar Observatory. Las imágenes científicas se obtuvieron usando la cámara infrarroja Palomar High Angular Resolution Observer (PHARO), diseñada y construida por la Cornell University. Las observaciones se realizaron el 1 de noviembre de 2001. Se tomaron 45 exposiciones individuales de 12.719 s.

determinados con NAOMI + INGRID.

Tabla 5.6: Compañeros visuales de HD 37525: coordenadas y fotometría.

Objeto	α^{J2000}	δ^{J2000}	I	J	H	K_s	Notas
#1	05 39 00.91	-02 38 52.2	—	—	>18.5	—	
#2	05 39 01.38	-02 39 06.2	—	—	>18.5	—	
#3	05 39 02.36	-02 38 57.2	—	>16.5	18.1 ± 0.2	> 15.5	
#4	05 39 00.05	-02 39 12.3	18.02 ± 0.05	> 16.5	17.69 ± 0.15	> 15.5	
#5	05 39 00.55	-02 39 15.9	18.99 ± 0.05	> 16.5	18.4 ± 0.2	> 15.5	
#6	05 39 02.16	-02 38 38.2	~ 13.7	12.40 ± 0.04	11.81 ± 0.03	11.65 ± 0.04	PMS, 2M
#7	05 39 02.52	-02 38 36.6	—	13.90 ± 0.03	13.55 ± 0.03	13.40 ± 0.04	2M

5.3.4 HD 37686

HD 37686 (BD-02 1335) es una estrella B9Vn de unas $3.5 M_{\odot}$, con un espectro peculiar por la nebulosidad que presenta, debida muy posiblemente a una envoltura de polvo (véase Sección 3). Su absorción $H\alpha$ es muy profunda y ancha, con una $pEW(H\alpha) = +8.5 \pm 0.5 \text{ \AA}$. La posesión de una concha de polvo no es sorprendente, ya que se encuentra a 22.7 arcmin hacia el este del sistema OB central del cúmulo, en la región donde empieza a ser apreciable la Nebulosa de la Cabeza de Caballo. La envoltura de polvo podría entenderse como el último jirón de la concha que envolvía a HD 37686 hace unos pocos cientos de miles de años, cuando la estrella se hubiera clasificado como de clase I o 0. Relativamente cerca de ella, a unos 36 arcsec, se encuentra S Ori J054014.0-023127, un objeto detectado en la búsqueda del Cap. 6 en el borde entre estrellas de muy baja masa y enanas marrones del cúmulo de σ Orionis.

Se obtuvieron tres imágenes en la banda H centradas en HD 37686. La tomada con el tiempo de exposición por subimagen individual más corto no era válida, ya que no se consiguió cerrar el bucle. Igualmente, la calidad de la imagen obtenida con el tiempo más largo era baja. Por tanto, se utilizó como imagen de referencia la tomada con el tiempo de exposición individual intermedio.

HD 37686 no es la única fuente visible en la imagen H . Se detectan tres objetos, dos débiles muy cercanos a la B9 (a 5.5–6.5 arcsec) y uno más brillante a unos 16.4 arcsec hacia el sur-sureste. Este último objeto (#1) ha sido de nuevo detectado en la búsqueda 2MASS y la del Cap. 3. Sus magnitudes IJK_s , mostradas junto con sus coordenadas en la Tabla 5.7, indican que el objeto muy probablemente no pertenece al cúmulo. A unos 2 arcsec al norte de #1 se vislumbra una fuente infrarroja cuya bajísima relación señal-ruido ha impedido estudiarla.

Un objeto con número de cuentas en el pico mayor que tres veces la desviación típica del número de cuentas de fondo (3σ) y que tuviera el mismo perfil de PSF que HD 37686 tendría una magnitud $H_{3\sigma} = 18.00^{+0.10}_{-0.08}$. Al igual, otro objeto a 3σ que tuviera la misma PSF que el objeto #1, a unos 18 arcsec de la primaria en el borde la región no afectada por el *trimming*, poseería una magnitud $H_{3\sigma} = 17.71 \pm 0.17$. Es decir, debido a las aberraciones ópticas y a la variación de la PSF con la distancia al eje óptico, *en esta imagen*, el cociente

de Strehl varía en un $\sim 33\%$ entre el centro y el borde útil del campo de visión (que se corresponde con una diferencia de magnitudes de unas 0.3 mag: $10^{-(18.00-17.71)/2.5} \approx 0.77 = 1 - 0.33$).

Las magnitudes H de los dos objetos más débiles, numerados #2 (suroeste) y #3 (noreste), se han calculado escalando por el número de cuentas en el pico con la estrella central (nótese que el número de cuentas en el pico de la B9Vn no ha alcanzado el rango de no linealidad). Si las fracciones del cociente de Strehl respecto a la estrella de guía es 1.00 en el centro y 0.77 a 18 arcsec, las fracciones a las separaciones de los objetos #2 y #3 (a ~ 5.5 y ~ 6.5 arcsec de la estrella de guía) serán del orden de 1.0–0.9 y 0.9–0.8, respectivamente. Las magnitudes estimadas asumiendo estas variaciones del cociente de Strehl, con sus errores calculados a partir de un conservador ruido poissoniano, se muestran en la Tabla 5.7. Se debe ser cauto al considerar estas magnitudes, ya que se desconoce cómo es el comportamiento preciso de la PSF de objetos con una relación señal-ruido sobre el fondo baja (los objetos #2 y #3 se detectan a 48σ y 8σ , respectivamente). Ninguno de los objetos había sido detectado en otra búsqueda automática anterior. Sin embargo, se encuentran en el área estudiada en la búsqueda del Cap. 6. En la imagen I tomada con WFC se encuentran en la región de saturación de la B9Vn; en la imagen H tomada con $\Omega 2K$, con $0.45 \text{ arcsec píxel}^{-1}$, se vislumbran al nivel de detección de la imagen, en el halo de la estrella temprana; y en la imagen J tomada con ISAAC, con una excelente resolución espacial (aunque el tamaño de su píxel es ~ 3.5 mayor que el de NAOMI + INGRID), ambos objetos se detectan con muy buena señal ruido. Sin embargo, sobre ellos no se realizó ninguna fotometría automática, ya que se eliminaban las detecciones de `daofind` en los halos de las estrellas más brillantes, para evitar posteriores confusiones. Una parte de la imagen ISAAC, con un escalado adecuado y un tamaño muy similar al del campo de visión de NAOMI + INGRID, se muestra en la Figura 5.6. Nótese que se detectan varios objetos adicionales a la imagen de OA, uno a un par de segundos de arco al norte del objeto #1, otro en la esquina noroeste (ambos se vislumbran a $\sim 2\sigma$ en la imagen NAOMI + INGRID) y una última fuente muy cerca del objeto #3, justo al norte de HD 37686.

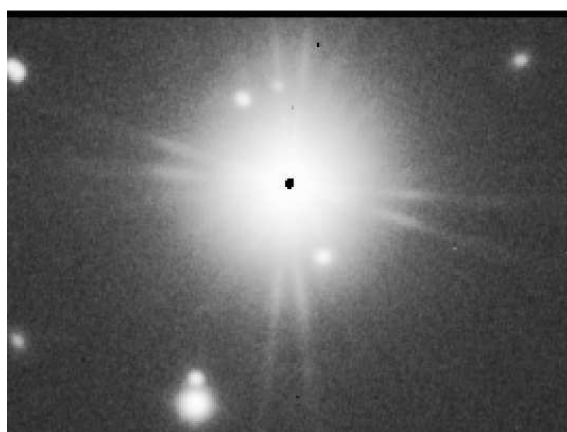


Figura 5.6: Imagen J tomada con ISAAC, de unos $40 \times 30 \text{ arcsec}^2$ de campo de visión, centrada en HD 37686.

Se ha realizado de nuevo fotometría en la imagen ISAAC, midiendo las magnitudes J

de los objetos #2 y #3 por comparación del número de cuentas en el pico con el de otras fuentes cercanas con PSF idénticas y catalogadas en 2MASS con marca de calidad AAA. El resultado se muestra en la Tabla 5.7. En particular, los colores $J - H$ de ambos objetos #2 y #3 son $1.89^{+0.22}_{-0.18}$ y $0.7^{+0.4}_{-0.3}$ mag, respectivamente. Dada la incertidumbre en los datos fotométricos disponibles para el objeto más débil, #3, cuyo $J - H$ está comprendido en un rango muy grande, se descarta extraer conclusión alguna sobre su posible pertenencia al cúmulo. Por el contrario, el color $J - H > 1.71$ mag (> 1.53 mag si se dobla el tamaño de la barra de error) del objeto #2, extraordinariamente rojo, podría ser una indicación de extinción circun(sub)estelar, más probable que si fuera una fuente de fondo. El origen de la posible envoltura o disco que tuviese #2 estaría asociada sin duda a la concha que parece poseer HD 37686. De formar ambos un sistema binario, la separación física proyectada sería menor de 2000 AU, y el objeto #2 podría ser o una estrella de muy baja masa o, más probablemente, una enana marrón en una fase preliminar de su evolución (como ς 053841.2–023737, id. 5).

Tabla 5.7: Compañeros visuales de HD 37686: coordenadas y fotometría.

Objeto	α^{J2000}	δ^{J2000}	I	J	H	K_s	Notas
#1	05 40 13.52	−02 31 08.1	15.70 ± 0.06	14.77 ± 0.03	14.70 ± 0.04	14.51 ± 0.09	2M
#2	05 40 12.94	−02 30 58.1	—	16.85 ± 0.11	$14.96^{+0.19}_{-0.14}$	—	rojo
#3	05 40 13.30	−02 30 47.5	—	17.54 ± 0.12	$16.8^{+0.4}_{-0.3}$	—	

5.3.5 HD 37333

HD 37333 (HIP 26456, BD−02 1319) es una estrella de tipo espectral AV temprano peculiar. Ha sido clasificada espectralmente en repetidas ocasiones, otorgándole subtipos desde A0 a A4 (p.e., Guetter 1976, Hernández et al. 2005). Gray & Corbally (1993) detectaron peculiaridades en las líneas de absorción de Si II entre 4000 y 4400 Å, y la clasificaron como A1Va (Si II). Su pertenencia a la Asociación OriOB1b, por su posición el diagrama Hertzsprung-Russell y por su movimiento propio, fue anunciada por primera vez en los trabajos de Guetter (1976) y de Warren & Hesser (1977a,b). No se ha detectado emisión en rayos X proveniente de la estrella. Sherry et al. (2004) le asignaron una masa de $3 M_{\odot}$, y la catalogaron como posible miembro del cúmulo σ Orionis.

Con NAOMI + INGRID se obtuvieron una imagen larga en J y dos en H . Se tomó además una imagen corta en la banda H , pero de baja calidad. Aparte de HD 37333, en todas las imágenes se detecta un único objeto (#1) al noreste de la A1Va. Al igual que en casos anteriores, el objeto está catalogado por 2MASS y detectado en la búsqueda del Cap. 3 en las bandas VRI . El objeto es bastante azul para su magnitud I , lo que indica que claramente no pertenece al cúmulo. Sus coordenadas y magnitudes IJK_s se muestran en la Tabla 5.8.

Tabla 5.8: Compañeros visuales de HD 37333: coordenadas y fotometría.

Objeto	α^{J2000}	δ^{J2000}	I	J	H	K_s	Notas
#1	05 37 41.18	-02 26 32.4	16.03±0.05	15.25±0.08	14.94±0.06	14.81±0.10	2M

5.3.6 4771–899

El objeto 4771–899 (denominación *Simbad* [W96] 4771-899) fue descubierto como la contrapartida óptica de una fuente de rayos X cerca de σ Orionis AB en la memoria de Tesis de Wolk (1996). Asignó a la estrella un tipo espectral K3 y detectó rasgos espectroscópicos de juventud. Más tarde, ZO02b le asignaron el tipo K7.0±0.5 y midieron con precisión las pseudoanchuras equivalentes de H α en emisión moderada en doble pico y de Li I en absorción. De acuerdo con Oliveira, Jeffries & van Loon (2004), 4771–899 posee excesos infrarrojos en las bandas K_s y L' , que ellos asocian a la presencia de un disco circunestelar. En el Capítulo 3 se ofrecen aún más detalles espectroscópicos y fotométricos de la estrella. En realidad parece formar un sistema binario visual con S Ori J053847.5–022711, separada unos 3.6 arcsec hacia el oeste-noroeste. Este último objeto es un objeto M5.0±0.5, también con H α en emisión y Li I en absorción. Las velocidades radiales de ambos objetos son iguales entre sí y a la velocidad radial promedio del cúmulo de σ Orionis dentro de las barras de error.

Se dispone únicamente de una imagen NAOMI + INGRID tomada en la banda H . En ella, se detectan tres objetos: la K7.0, que aparece como sistema doble, la M5.0 y un objeto débil al oeste del sistema (#1). Las coordenadas y magnitudes IJK_s de S Ori J053847.5–022711 y del objeto #1 se muestran en la Tabla 5.9. Este último, no seleccionado en la búsqueda del Cap. 3 ni en otras más profundas, como la de Béjar et al. (en prep.) en las bandas I y Z , no posee las magnitudes y colores propios de un miembro del cúmulo. Posiblemente se trate de una estrella M de fondo.

La PSF de la K7.0 central es asimétrica, lo que denota la presencia de un objeto brillante muy próximo. La imagen NAOMI + INGRID no es capaz, sin embargo, de resolverlos por completo. Se ha estimado la distancia entre 4771–899 y el objeto próximo hacia el sur (B) en 0.40±0.08 arcsec y la diferencia de magnitud ΔH en 0.337±0.019 mag. La masa conjunta de ambas estrellas debe de ser del orden de 1.5 $M_\odot$.

Tabla 5.9: Compañeros visuales de 4771–899: coordenadas y fotometría.

Objeto	α^{J2000}	δ^{J2000}	I	J	H	K_s	Notas
S Ori J... ^a	05 38 47.55	-02 27 12.0	13.98±0.05	12.14±0.03	11.50±0.04	11.27±0.03	Li I, 2M
#1	05 38 47.08	-02 27 17.3	18.45±0.06	16.72±0.14	15.86±0.14	15.6±0.2	2M

^a: ς J053847.6–022712 (S Ori J053847.5–022711, [W96] 4771–899 C).

5.4 Sumario y discusión

Los compañeros subestelares de estrellas del vecindario solar se encuentran a separaciones físicas proyectadas entre ~ 50 y $\sim 3\,600$ AU. Mientras que se detectan muchas enanas marrones y objetos de masa planetaria aislados en el cúmulo σ Orionis, aún no se ha verificado la existencia ningún objeto subestelar a separaciones físicas proyectadas menores que unas $5\,000$ AU (excepto los presentados en el Cap. 3). Gracias a un programa piloto de imagen en el infrarrojo cercano con óptica adaptativa, hemos estudiado las coronas de separación física proyectada entre ~ 150 y $\sim 8\,000$ AU alrededor de seis miembros estelares del cúmulo σ Orionis. La búsqueda únicamente ha cubierto 0.47 arcmin². Los tipos espectrales de los blancos primarios estaban en el amplio rango entre O9.5V y K7.0. Usando otros datos en el óptico, infrarrojo y rayos X, se han determinado las naturalezas astrofísicas de la mayoría de los 20 compañeros visuales de las seis estrellas detectados en esta búsqueda de haz de lápiz:

- Tres eran miembros del cúmulo con confirmación espectroscópica conocidos con anterioridad: σ Orionis C, σ Orionis D (alrededor de σ Orionis AB) y S Ori J053847.5–022711 (cercano a [W96] 4771–899).
- Se ha detectado la contrapartida en el infrarrojo cercano del núcleo de la nube σ Orionis IRS1 y se ha confirmado su emisión en rayos X. Se ha estudiado la distribución espectral de energía combinada de σ Orionis AB+IRS1 desde el ultravioleta al dominio radio y se ha propuesto a σ Orionis IRS1 como el segundo ejemplo de objeto de Clase I detectado hasta ahora en σ Orionis.
- Se ha propuesto que la fuente ς J053902.2–023838, a $\sim 7\,500$ AU de HD 37525 (B5V), se trata en realidad del candidato fotométrico a estrella de presecuencia principal P053902–0238, detectado por Wolk (1996).
- Dos objetos brillantes son las estrellas secundarias previamente desconocidas de los sistemas binarios muy próximos HD 37525 AB y [W96] 4771–899AB, a separaciones angulares de 0.45 ± 0.04 (~ 170 AU) y 0.40 ± 0.08 arcsec (~ 140 AU), respectivamente. Las dos nuevas binarias muy cerradas se muestran en la Figura 5.7. Los compañeros cercanos se encuentran en los dos casos hacia el sur de la primaria.
- Cuatro objetos muestran colores óptico-infrarrojos más azules que los miembros del cúmulo de la misma magnitud.
- A partir únicamente de las magnitudes JH de una fuente débil 2 arcsec al norte de σ Orionis C y de otra 6.5 arcsec al norte de HD 37686, no se ha podido descartar por completo que ambas puedan pertenecer al cúmulo.
- Para tres fuentes muy cercanas a HD 37525 AB sólo se dispone de observaciones en la banda H y no se ha podido derivar su naturaleza.
- Restan cuatro nuevos candidatos a miembros del cúmulo de acuerdo a sus colores óptico-infrarrojos o su emisión en rayos X:

1. ς J053845.3–023541, una fuente de rayos X a ~ 20 arcsec al nor-noreste de σ Orionis AB, detectada en la banda K_s en el Capítulo 4 (estrella de baja masa).
2. ς J0538358–023313, a 10.7 arcsec de HD 294271 (B5V) (estrella de baja masa).
3. ς J0538353–023313, a 18.8 arcsec de HD 294271 (B5V). Había sido seleccionada como candidato a miembro fotométrico durante la búsqueda *VRI* descrita en el Capítulo 3 (estrella de baja masa).
4. ς J0540129–023058, un objeto con un color $J-H$ extremadamente rojo a $\sim 2\,000$ AU de HD 37686 (B9Vn), una estrella localizada cerca de la Nebulosa de Caballo y que posee una envoltura de polvo (¿enana marrón con disco?).

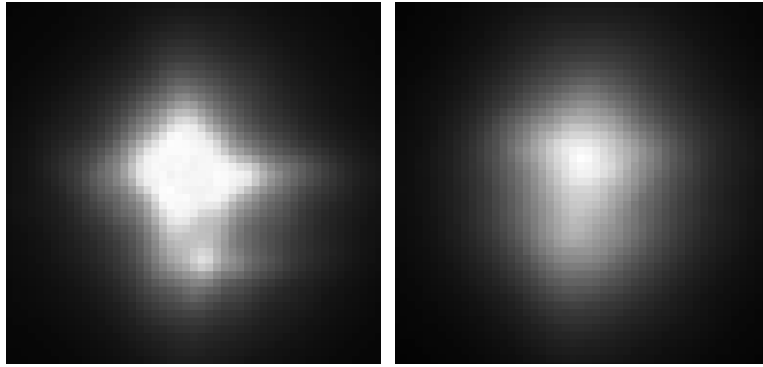


Figura 5.7: Regiones de $\sim 2 \times 2$ arcmin² centradas en HD 37525 AB y [W96] 4771-899 AB de las imágenes *H*.

En la Tabla 5.10 se muestra un resumen numérico de los sistemas múltiples anunciados en esta investigación. Sólo HD 37333 parece ser una estrella aislada, mientras que entre las otras cinco estrellas estudiadas hay tres sistemas binarios muy próximos ($\rho < 0.5$ arcsec, ~ 180 AU: σ Orionis AB, HD 37525 AB, 4771–899AB), cinco objetos entre 1 000 y 5 000 AU de sus primarias y otros tres entre 5 000 y 7 500 AU. El sistema central resulta ser al menos séxtuple, y hay otros tres sistemas triples visuales. Las masas implicadas van desde las $\sim 35 M_{\odot}$ del sistema combinado σ Orionis AB hasta la del objeto muy rojo ς J054012.9–023058 próxima a HD 37686, que podría tratarse de una enana marrón con envoltura (este es el único candidato a objeto subestelar detectado). La Figura 5.10 muestra un pictograma en el que se pueden encontrar todos los objetos comentados en este Capítulo. El código de colores indica probables objetos de fondo (negro), miembros conocidos del cúmulo (azul) y nuevas detecciones o confirmaciones (rojo). ς J054012.9–023058 se ha indicado con un círculo.

Con el fin de justificar la clasificación de los objetos con fotometría óptica como candidatos a miembros del cúmulo, se ha preparado el diagrama color-magnitud I vs. $I - J$ mostrado en la Figura 5.8. Se aprecia claramente cómo ς J053835.8–023313 (HD 294271 #1) y ς J053835.3–023313 (HD 294271 #2), propuestos como nuevos miembros del cúmulo, siguen la secuencia de los miembros previamente confirmados (en puntos). Aparte de estas dos estrellas de muy baja masa, con círculos rellenos también se muestran σ Orionis C y D, ς J053902.2–023838 (P053902–0238) y ς J053847.6–022712 (S Ori J053847.5–022711), y con círculos vacíos tres estrellas de fondo, todas ellas detectadas en esta búsqueda.

Tabla 5.10: Miembros y candidatos a miembros más probables de sistemas múltiples detectados en esta búsqueda.

Estrella	Objeto	Nombre	ρ (arcsec)	θ (deg)	v_{esc} (km s ⁻¹)	Notas
σ Orionis AB	IRS1	ς J053844.7–023600	3.32±0.06	19.6±1.4	6.5	σ Orionis IRS1
	C	ς J053844.1–023606	11.47±0.06	237.8±0.3	3.5	σ Orionis C
	D	ς J053845.6–023559	12.81±0.06	84.3±0.3	3.3	σ Orionis D
	#2	ς J053845.4–023543	19.48±0.07	26.8±0.4	2.7	Nuevo, rayos X
HD 294271	#1	ς J053835.8–023313	10.70±0.14	267.3±0.5	1.5	Nuevo
	#2	ς J053835.3–023313	18.79±0.16	269.6±0.3	1.1	Nuevo, VRI
HD 37525	B	ς J053901.5–023856B	0.47±0.04	189 ⁺⁷ ₋₆	7.2	Nuevo, HD 37525 B
	#6	ς J053902.2–023838	20.78±0.06	28.9±0.3	1.4	PMS
HD 37686	#2	ς J054012.9–023058	5.45±0.10	204.9±1.4	1.6	Nuevo, rojo
HD 37333						No comp.
4771–899						
	B	ς J053848.0–022714B	0.40±0.08	170±10	3.2	Nuevo, 4771–899B
	S Ori J...	ς J053847.6–022712	7.63±0.10	287.1±0.8	0.9	M5.0, Li I, 4771–899C

Verificar si los nuevos candidatos a miembros forman sistemas múltiples junto con sus estrellas cercanas es una empresa realmente difícil, ya que la norma del movimiento propio de las estrellas son menores de 5 mas a⁻¹. Además, la densidad numérica de objetos miembros del cúmulo en la región central, donde se encuentran casi todos los blancos observados, es bastante grande, por lo que la probabilidad de que exista un alineamiento casual es alta. En el Capítulo 3 se expuso una aproximación estadística para determinar el grado de fiabilidad en la detección de un sistema binario. En esta ocasión, se va a exponer una aproximación dinámica basada en la velocidad de escape en un sistema gravitacional ligado. La velocidad de escape se puede reescribir en unidades astronómicas estándares de la forma (v_{esc} en km s⁻¹):

$$v_{\text{esc}} = \left(\frac{2GM}{r} \right)^{1/2} \approx 42.124 \left(\frac{M/M_{\odot}}{r/\text{AU}} \right)^{1/2} \quad (5.2)$$

La separación física proyectada medida, r' , se debe corregir por el efecto de profundidad, multiplicando por ≈ 1.22 ($r = (3/2)^{1/2} r'$) para obtener la separación física más probable, r . En la penúltima columna de la Tabla 5.10 se muestran las velocidades de escape calculadas. Se han usado las masas de las primarias mencionadas en el texto. Aproximadamente la mitad de las velocidades de escape son menores que el valor de ~ 2.4 km s⁻¹, calculado en el Capítulo 3 como la dispersión de velocidad estelar del cúmulo. Estos valores deben ser tomados sólo como guía, pues el verdadero examen para comprobar la multiplicidad de los sistemas vendrá dentro de al menos 100 Ma, cuando el cúmulo se haya disipado y hayan terminado las interacciones dinámicas entre sus miembros.

Finalmente, durante la fase de arbitraje interno se han estudiado las distribuciones espectrales de energía de los objetos investigados usando datos de *Spitzer*. De entre to-

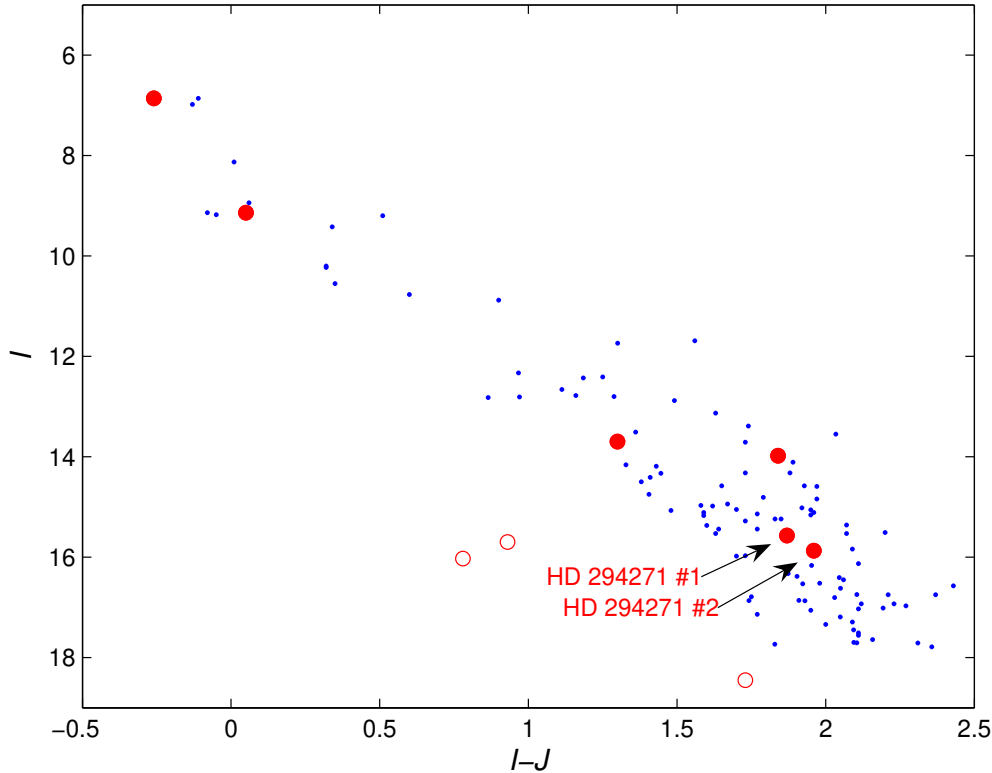


Figura 5.8: Diagrama color-magnitud I vs. $I - J$ de los objetos con fotometría IJ detectados en esta búsqueda. Las estrellas catalogadas como miembros se han marcado con círculos rellenos, y las de fondo con círculos huecos. Se han etiquetado las dos nuevas estrellas de baja masa del cúmulo con datos IJ , HD 294271 #1 y #2. Los puntos denotan objetos de σ Orionis confirmados espectroscópicamente, mostrados en el diagrama color-magnitud del Capítulo 1.

dos ellos, sólo han sido detectadas las fuentes infrarrojas asociadas a las seis primarias, σ Orionis C y D, ς J053902.2–023838 (P053902–0238), ς J053835.8–023313 (HD 294271 #1), ς J053835.3–023313 (HD 294271 #2), ς J053847.6–022712 (S Ori J053847.5–022711) y, marginalmente, ς J053845.3–023541 (la fuente X cercana a σ Orionis AB). Sólo una de las fuentes clasificada como contaminante de fondo, HD 37525 #5, ha sido detectada en la banda de $3.8 \mu\text{m}$ y con un error de 0.6 mag. Tanto 4771–899AB como ς J053847.6–022712, su compañera cercana, son los únicos miembros de σ Orionis investigados en este Capítulo que muestran indicaciones de presencia de discos (especialmente claras en ς J053847.6–022712), lo que favorece la hipótesis de que forman un sistema ligado. Desafortunadamente, el candidato a enana marrón muy rojo ς J054012.9–023058, al encontrarse muy cerca de su primaria no ha podido ser resuelto por *Spitzer*.

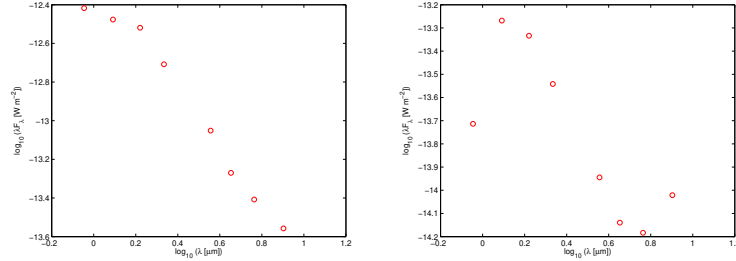


Figura 5.9: Distribuciones espectrales de energía de [W96] 4771-899 AB (izquierda) y ζ J053847.6-022712 ([W96] 4771-899 C). Nótese el exceso de flujo en 5.8 y 8.0 μm en ambos cuerpos.

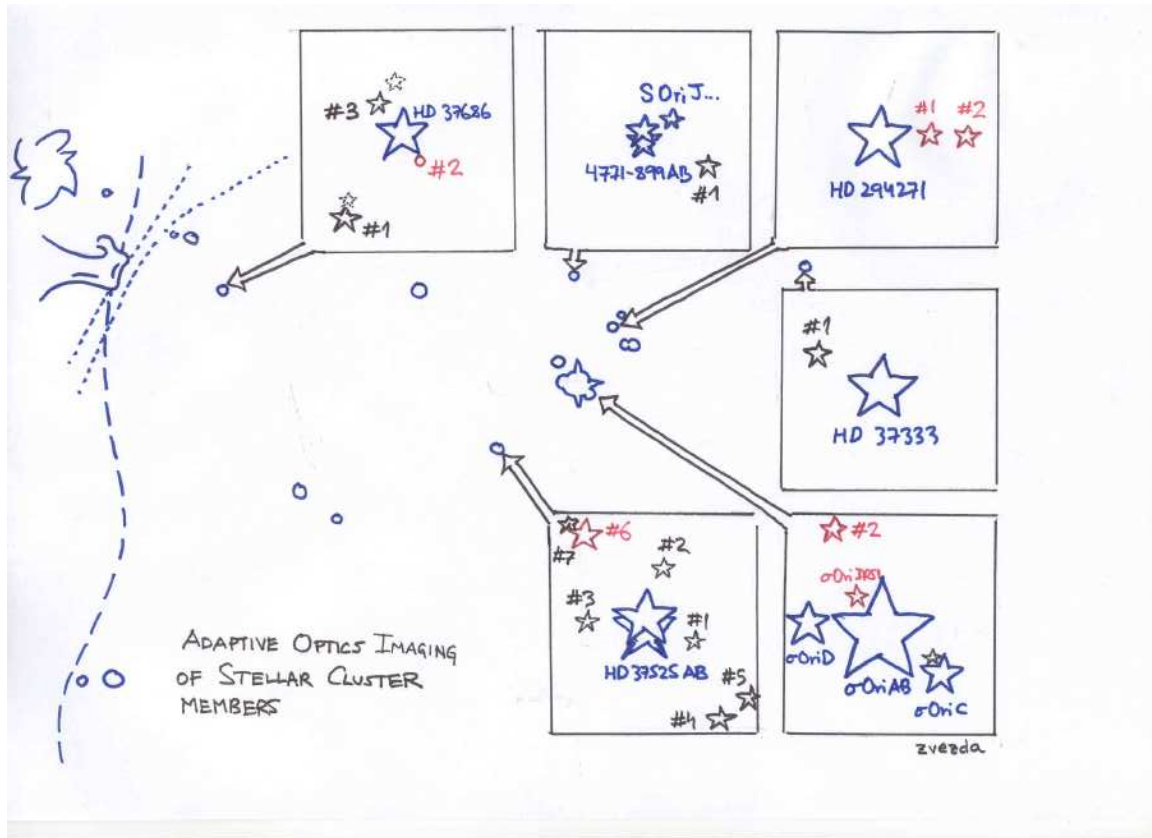


Figura 5.10: Pictograma indicando cada uno de los seis sistemas observados y su localización en el cúmulo. El código de colores indica probables objetos de fondo (negro), miembros conocidos del cúmulo (azul) y nuevas detecciones o confirmaciones (rojo). Nótese la Nebulosa de Cabeza de Caballo y la región H II IC 434 al extremo opuesto de los campos de OA.