ENANAS MARRONES:

Durante décadas, los astrónomos sospecharon la existencia de cuerpos celestes demasiado pequeños para producir energía como las estrellas, pero demasiado masivos para ser simples planetas. Estos objetos hipotéticos -ni estrellas verdaderas ni planetas ordinarios- fueron bautizados como enanas marrones.







Rafael Rebolo
rrl@iac.es
Instituto de Astrofísica de Canarias
Consejo Superior de Investigaciones Científicas

María Rosa Zapatero Osorio
mosorio@cab.inta-csic.es
Centro de Astrobiología (CSIC-INTA)

Eduardo Martín
ege@iac.es
Instituto de Astrofísica de Canarias

La idea surgió en la década de 1960, cuando los astrofísicos teóricos Kumar y Hayashi comprendieron que por debajo de cierta masa —aproximadamente 75 veces la de Júpiter— la gravedad no puede comprimir y calentar el hidrógeno lo suficiente como para iniciar la fusión nuclear sostenida. Tales cuerpos se podrían formar como las estrellas, pero brillarían únicamente gracias al calor residual de su nacimiento, enfriándose y apagándose lentamente a lo largo de miles de millones de años.

Durante muchos años, la búsqueda de enanas marrones resultó frustrante. Se esperaba que fueran tenues, rojizas y difíciles de detectar, visibles sobre todo en el infrarrojo. Se anunciaron muchos candidatos, pero ninguno pudo confirmarse como un objeto subestelar. Todo cambió en 1995, cuando encontramos por fin la evidencia definitiva de su existencia.

LA PRIMERA ENANA MARRÓN: TEIDE 1 Y LA APERTURA DE UNA NUEVA FRONTERA

En septiembre de 1995, publicamos en Nature el descubrimiento de Teide 1, la primera enana marrón confirmada (Rebolo, Zapatero Osorio & Martín 1995, Nature 377, 129). El objeto fue hallado en el cúmulo estelar de las Pléyades (Fig. 1), un cúmulo estelar joven y cercano, ideal para este tipo de búsqueda. A lo largo de 1994, realizamos una exploración fotométrica con el telescopio IAC80 en el Observatorio del Teide y posteriormente un seguimiento espectroscópico con el 2.5 m INT y el 4.2m WHT desde el Roque de los Muchachos (La Palma). Los datos que obtuvimos con estos telescopios mostraron que un objeto en la región central del cúmulo de las Pléyades, que denominamos Teide Pléyades 1, tenía una temperatura y luminosidad demasiado pequeñas para mantener la fusión de hidrógeno de forma estable, situándole claramente en el dominio subestelar. Su pertenencia al cúmulo de las Pléyades, que pudimos establecer también por su movimiento propio y velocidad, permitía conocer su edad, composición química y distancia, parámetros clave para estimar su masa en unas 55 veces la de Júpiter. Claramente insuficiente para producir la fusión de hidrógeno. Por primera vez se demostró que las enanas marrones existen en la naturaleza más allá de las ambigüedades que presentaban otros candidatos previos y que finalmente resultaron ser estrellas de muy baja masa. Teide 1 verificaba todos los criterios para ser considerada una enana marrón.

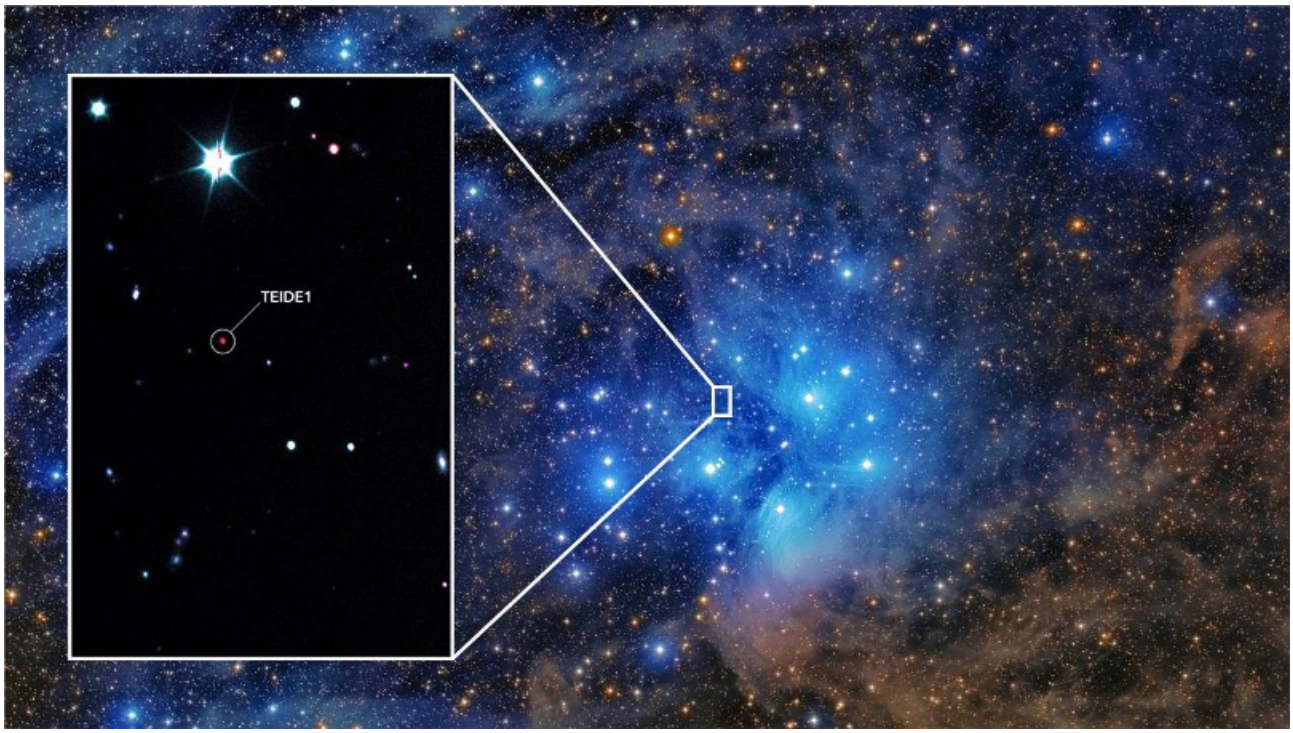
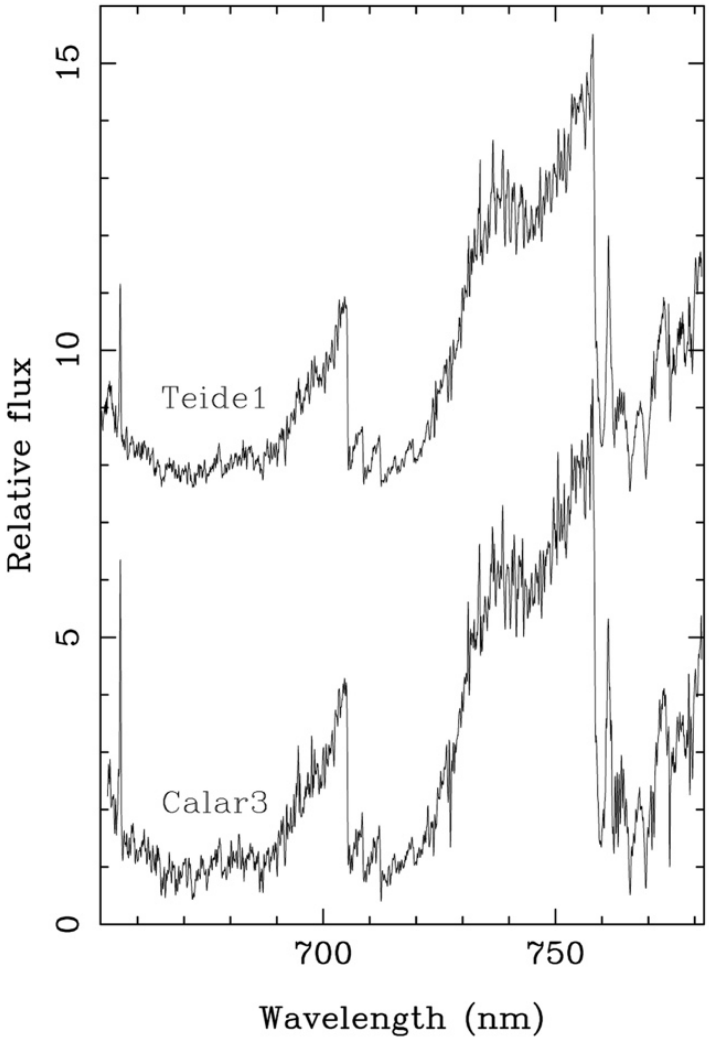


Figura 1. Imagen de Teide 1 y su localización en el cúmulo estelar de la Pléyades (crédito: IAC).

Basándonos en la estadística asociada con nuestra exploración, predijimos en aquel artículo que las enanas marrones serían extremadamente abundantes en nuestra Galaxia, predicción confirmada más tarde por grandes cartografiados como 2MASS, DENIS, WISE y Gaia. Se puede decir que Teide 1 abrió un nuevo capítulo en la investigación astrofísica dedicada a los cuerpos que ocupan ese territorio antes inexplorado entre las estrellas y los planetas.

LA PRUEBA DEL LITIO: CÓMO DISTINGUIR UNA ESTRELLA DE ULTRA-BAJA MASA DE UNA ENANA MARRÓN

Antes de Teide 1, el mayor obstáculo para confirmar enanas marrones era distinguirlas de las estrellas de muy baja masa. Ambos tipos de objetos pueden tener atmósferas relativamente frías y ser poco luminosos, pero solo las estrellas logran mantener fusión nuclear de hidrógeno. Para resolverlo, habíamos propuesto un método espectroscópico conocido como la "prueba del litio" (Rebolo, Martín & Magazzù 1992, *ApJ Lett.* 389, L83). El litio es un elemento frágil que se destruye fácilmente en el interior estelar a temperaturas superiores a unos 2,5 millones de Kelvin. Una estrella, incluso la más pequeña, quema su litio al poco de formarse, mientras que una enana marrón de menos de 60 veces la masa de Júpiter —incapaz de alcanzar esas temperaturas— lo conserva prácticamente intacto. Por tanto, detectar litio en el espectro de un objeto frío es una prueba inequívoca de que nunca ha iniciado la fusión del hidrógeno. Este método se convirtió en la norma para identificar enanas marrones. Fue aplicado con éxito a Teide 1 y también a Calar 3 (ver Fig. 2 y Fig. 3) la segunda enana marrón que descubrimos unos meses después, esta vez desde el Observatorio hispano-alemán de Calar Alto (Almería) confirmando en Noviembre de 1995 la naturaleza subestelar de ambas con el telescopio Keck de 10m que recién había iniciado su operación científica en Hawaii (Rebolo et al. 1996, *ApJ Lett.* 469, L53). Posteriormente, la técnica de medir litio fue refinada y extendida consiguiéndose obtener abundancias de litio de forma casi rutinaria en enanas marrones del campo como LP 944-20 (Pavlenko et al. 2000, *A&A* 355, 245; 2007, *MNRAS*, 380, 1285) y de cúmulos



estelares de diversas edades, incluyendo el cúmulo de las Híades (Martín et al. 2018, *ApJ* 856, 40), lo que llegó incluso a proporcionar una nueva manera de determinar edades para cúmulos y asociaciones estelares.

La prueba del litio sigue siendo uno de los ejemplos más elegantes de cómo una sola línea atómica —débil pero reveladora— puede definir toda una nueva categoría de objetos astronómicos.

CARTOGRAFIANDO LA POBLACIÓN SUBESTELAR: LA FUNCIÓN INICIAL DE MASAS

Una vez confirmada la existencia de las enanas marrones, la siguiente pregunta fue: ¿cuántas hay y cómo se forman?

Durante las tres décadas que han transcurrido desde la publicación de Teide 1, hemos realizado extensos estudios ópticos e infrarrojos de cúmulos jóvenes para determinar la función inicial de masas subestelar (IMF), la función que describe cuántos objetos nacen en cada rango de masa.

Figura 2. Espectros de Teide 1 y Calar 3.
Enanas marrones del cúmulo de las Pléyades.

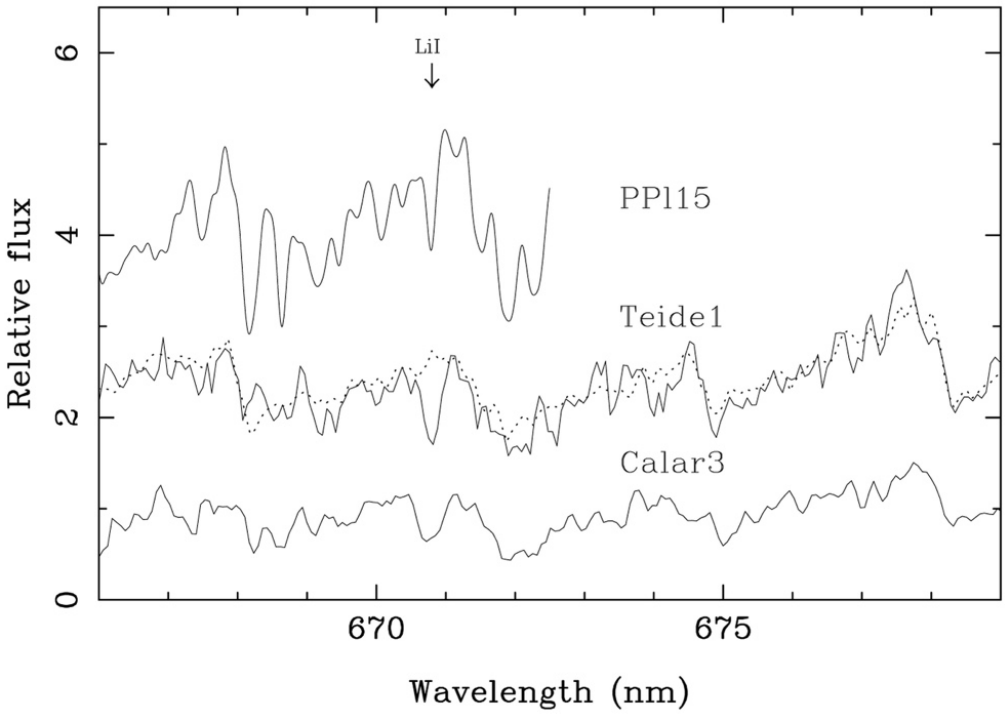


Figura 3. Espectros que muestran la presencia de la línea de litio 670.78 nm en las enanas marrones Teide 1 y Calar 3 (Rebolo et al. 1996 ApJ Lett.).

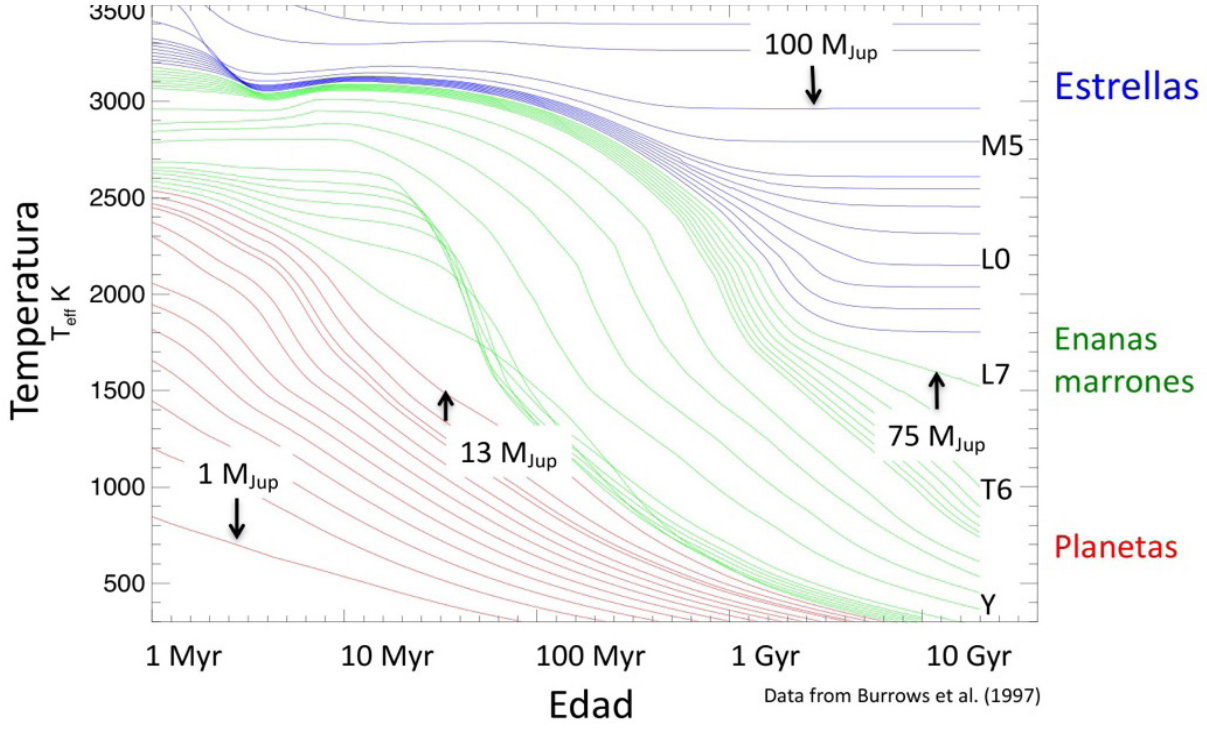


Figura 4. Evolución con la edad de la temperatura efectiva de estrellas de baja masa, enanas marrones y planetas de diferente masa. Se utilizan modelos de Barrows et al. (1997). Las líneas evolutivas de cada clase de objeto se representan con diferentes colores. Los tipos espectrales se indican en el lateral derecho.

Las observaciones de las Pléyades (Zapatero Osorio, Martín & Rebolo 1997, *A&A* 323, 105; Zapatero Osorio et al. 2014, *A&A* 572, A67) y del cúmulo joven σ Orionis (Béjar et al. 2001, *ApJ* 556, 830) proporcionaron el primer censo casi completo de enanas marrones desde el límite de fusión de hidrógeno (≈75 M_{Jup}) hasta el límite de fusión del deuterio (≈13 M_{Jup}). En la Fig. 4 mostramos curvas evolutivas para objetos en este rango de masas.

Las funciones de masa estelar de estos cúmulos eran muy representativas del promedio de la vecindad solar, lo que nos permitía suponer que la función de masa subestelar también lo sería, algo que se ha demostrado mucho más recientemente. Estas investigaciones establecieron que los objetos subestelares son ubicuos en los cúmulos jóvenes y que, por extrapolación de los comportamientos de la función de masa, el número de enanas marrones en la Via Láctea debería acercarse al número de estrellas, superando los 50 mil millones.

PLANETAS ERRANTES: MUNDOS SIN SOL

Tras confirmar la existencia de enanas marrones en todo el rango de masas, nuestro grupo se planteó si podrían existir objetos incluso más ligeros de masa, del tamaño de planetas gigantes, vagando solos por el espacio.

En el año 2000, el equipo encabezado por Zapatero Osorio, Béjar, Martín y Rebolo publicó en Science el descubrimiento de los primeros planetas flotantes libres, los encontramos en el jovencísimo (3 millones de años) cúmulo estelar □ Orionis (Zapatero Osorio et al. 2000, *Science* 290, 103). Gracias a los mayores telescopios ópticos e infrarrojos de la época, identificamos fotométrica y espectroscópicamente objetos aislados con masas entre 5 y 10 veces la de Júpiter, por debajo del límite de combustión del deuterio (ver un ejemplo en Fig. 5). Trabajos posteriores extendieron esta función de masas del cúmulo hasta unas 4 M_{Jup} (Peña-Ramírez et al. 2012, *ApJ* 754, 30).

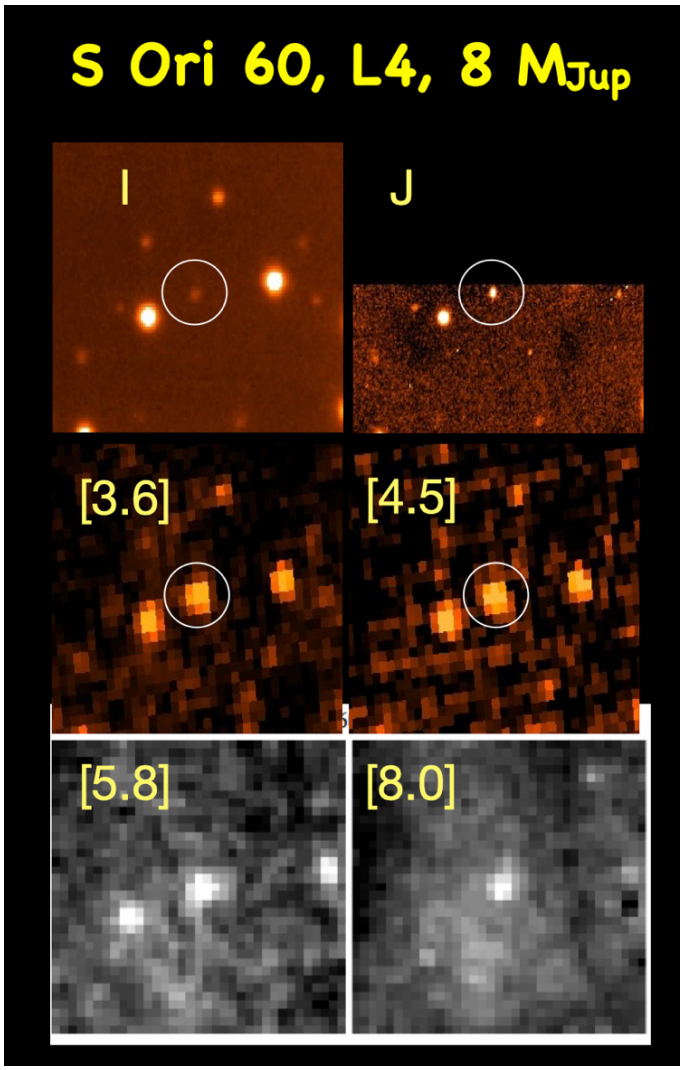


Figura 5. Imágenes de S Ori 60, un objeto con masa estimada 8 MJup no ligado a estrellas, situado en el cúmulo sigma de Orión. Su tipo espectral es L4. Se presentan imágenes en bandas I, J, 3.6, 4.5, 5.8 y 8.0 micras, mostrando el considerable incremento de flujo en las bandas del infarrojo medio

Estos objetos, sin estrella anfitriona, indicaban que la naturaleza puede producir objetos de masa planetaria mediante los mismos procesos de colapso y fragmentación que originan las estrellas o alternativamente que los procesos de formación de sistemas planetarios podrían producir la eyección de planetas gigantes (y tal vez también terrestres) en sus primeras etapas de formación. Un mundo errante con 5 ó 6 veces la masa de Jupiter, un super-Jupiter a una distancia de poco más de 2 pc del Sol fue detectado por Luhman usando datos del WISE y del HST hace poco más de una década, confirmando así que estos gigantes planetarios escapan de las regiones de formación y son ubicuos. Por ahora, los planetas terrestres errantes todavía no se han podido detectar.

La existencia de estos objetos aislados de masa planetaria que pudimos probar en el año 2000, a tan solo cinco años del anuncio de Michel Mayor y Didier Queloz del descubrimiento de un Jupiter en órbita próxima a una estrella de tipo solar, difuminó aún más la frontera entre planetas y enanas marrones, revelando un continuo de masas que une ambos extremos.

El hallazgo de los objetos aislados de masa planetaria (ver función de masa en Fig. 6) tuvo un alto impacto en las teorías de formación: ¿nacen estos mundos aislados como estrellas o son planetas expulsados de sus sistemas? En cualquier caso, demostramos que pueden existir objetos similares a los planetas sin estrella, obligando a replantear los modelos tradicionales de formación estelar y planetaria.

MULTIPLICIDAD Y LA FÍSICA DE LAS BINARIAS SUBESTELARES

Las binarias —sistemas de dos cuerpos orbitando un centro de masas común— son laboratorios naturales para medir masas de manera directa, sin depender de modelos teóricos. En el último mes de 1995 en trabajos liderados por Nakajima y Oppenhaimer se publicó el descubrimiento de Gl 229 B, la primera enana marrón detectada en órbita alrededor de una estrella de tipo M cercana al Sol, un objeto que habría de marcar la referencia para una nueva clase espectral, la clase T. Recientemente se ha podido probar que Gl 229 B es en realidad una pareja de enanas marrones, cada una con unas 30 veces la masa de Jupiter. En 1998, nuestro grupo descubrió la segunda enana marrón detectada como compañera estelar, *G 196-3 B* (Rebolo et al. 1998, *Science* 282, 1309), un objeto frío y débil que orbita una estrella joven a unos 25 parsecs de distancia del Sol. Su baja temperatura y luminosidad indicaban una masa de solo 20 M_{Jup}, confirmando la existencia relativamente frecuente de enanas marrones como compañeras de estrellas. Fue uno de los primeros objetos que ayudó a establecer la clase espectral de tipo L.

En esos años se encontraron las primeras binarias formadas íntegramente por enanas marrones, comenzando con *CFHT-PI 18* en las Pléyades (Martín et al. 1998, *ApJ Lett*. 509, L113), cuyos componentes, de 35 y 45 M_{Jup}, fueron resueltos con el Hubble Space Telescope. Posteriormente se descubrió la primera binaria de tipo L (DENIS-P J1228.2-1547, Martín et al. 1999, *Science* 283, 1718) y la primera binaria subestelar del vecindario solar (Gliese 569 Bab, Martín et al. 2000, *ApJ* 529, L37).

Un hito llegó en 2004, cuando se logró por primera vez determinar la masa dinámica de una binaria de enanas marrones, *GJ 569 Bab*, utilizando óptica adaptativa en el Observatorio Keck (Zapatero Osorio et al. 2004, *ApJ* 615, 958). Las órbitas revelaron masas de unos 70 y 55 M_{Jup}, una confirmación empírica de su naturaleza subestelar independiente de los modelos evolutivos. Junto con la prueba del litio, este resultado cimentó las bases observacionales de la astrofísica subestelar.

CLASES ESPECTRALES, ROTACIÓN Y DISCOS: LA VIDA DE LAS ENANAS ULTRAFRÍAS

A medida que se descubrían más enanas marrones, surgió la necesidad de clasificarlas espectroscópicamente. La secuencia estelar OBAFGKM terminaba en la clase M, pero las enanas marrones más frías requerían nuevas categorías.

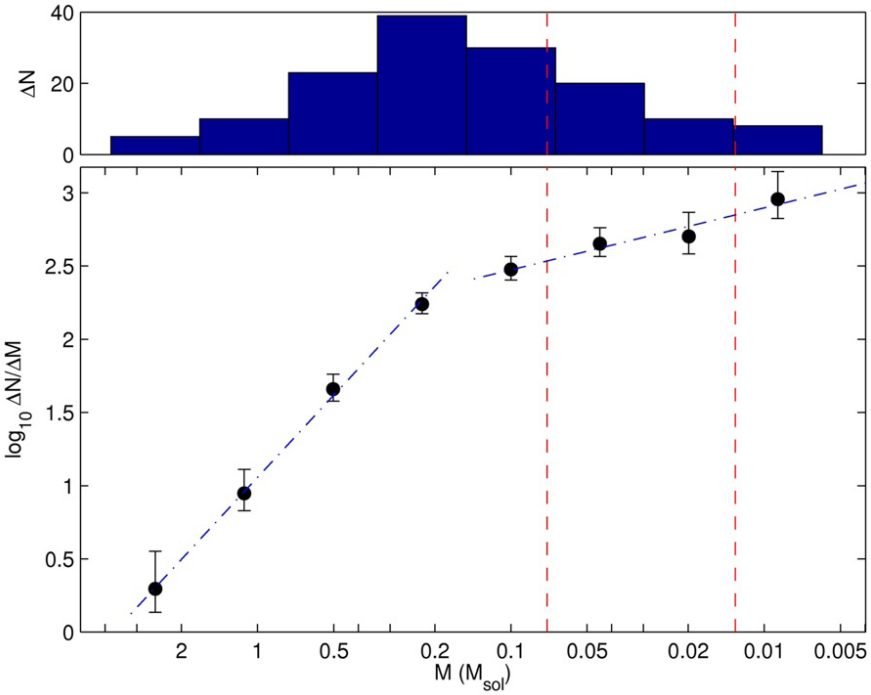


Figura 6. Función de masas subestelar del cúmulo sigma de Orión. En la región estudiada se identificaron unas 100 estrellas frente a unas 40 enanas marrones y objetos aislados de masa planetaria. Nótese que la función de masas subestelar solo se ha medido con completitud hasta unas 6 M_{Jup}.

En 1997, el análisis de espectros de alta resolución de las primeras enanas marrones condujo a proponer la clase espectral L, para objetos más fríos que las estrellas enanas M. Estos objetos más fríos estaban dominados por líneas de metales alcalinos e hidruros metálicos (Martín et al. 1997, *A&A* 327, L29). Poco después se descubrió la primera enana L en las Pléyades (Martín et al. 1998, *ApJ* 507, L41) y se estableció uno de los primeros sistemas de clasificación para enanas M tardías y L (Martín et al. 1999, *AJ* 118, 2466). Más tarde se descubrieron numerosos objetos aún más fríos —ricos en metano— que permitió a Kirkpatrick, Burgasser y colaboradores la definición de las clases T e Y, extendiendo la secuencia hasta temperaturas apenas superiores a la temperatura de equilibrio de la atmósfera terrestre.

En 2006 se demostró que las enanas T son rotadores muy rápidos, con velocidades de hasta 60 km/s (Zapatero Osorio et al. 2006, *ApJ* 647, 1405). A diferencia de las estrellas, que frenan su rotación con el viento estelar, las enanas marrones conservan gran parte de su momento angular, revelando propiedades magnéticas e internas únicas.

Otro avance vino del estudio de los discos. Las observaciones infrarrojas mostraron que muchas enanas marrones jóvenes poseen discos protoplanetarios similares a los de las estrellas. En 2007, detectamos por primera vez discos alrededor de objetos aislados de masa planetaria en σ Orionis (Zapatero Osorio et al. 2007, *A&A* 472, L9), lo que sugiere que incluso estos cuerpos diminutos pueden albergar material capaz de formar lunas o anillos. Estos hallazgos vincularon directamente las enanas marrones con la formación planetaria, demostrando que los mismos procesos —acrecimiento, evolución de discos y posiblemente eyección de materia— operan a lo largo de todo el rango de masas.

FRONTERAS ACTUALES: DE LOS MUNDOS DE METANO A LA MISIÓN EUCLID

Tres décadas después de Teide 1, la investigación de enanas marrones se ha convertido en una empresa global y multidisciplinar. Los avances en detectores infrarrojos, óptica adaptativa y misiones espaciales permiten estudiar sus atmósferas, química y evolución con un detalle sin precedentes.

Entre los hitos recientes destaca la detección de metano en la enana T extremadamente pobre en metales más cercana, WISEA J181006.18-101000.5 realizada por nuestro grupo (Zhang et al. 2025, *ApJL* 984, L35). Este hallazgo demuestra que los objetos subestelares existen incluso en entornos con metalicidad muy baja, ampliando nuestra comprensión de la formación estelar en la galaxia primitiva. En la Fig. 7 se presenta una comparativa de tamaño de este objeto con Júpiter y una estrella de tipo solar.

Paralelamente, la misión espacial Euclid de la Agencia Espacial Europea (ESA), lanzada en 2023, ofrece imágenes infrarrojas profundas y de gran campo, ideales para identificar enanas marrones y objetos de masa planetaria. Participamos en el consorcio Euclid y uno de nosotros, Martín, es Científico Independiente de Legado liderando el programa de investigación subestelar de esta misión. En 2025, el equipo publicó los primeros resultados del satélite Euclid sobre objetos subestelares: "*Euclid Early Release Observations – A Glance at Free-Floating Newborn Planets in the Sigma Orionis Cluster*" (Martín et al. 2025, *A&A* 697, A7), que demuestra la capacidad de la misión para detectar cuerpos de masa cercana a la de Júpiter en regiones de formación estelar próximas. Estos avances confirman que el campo sigue siendo dinámico, expandiendo continuamente los límites de lo que podemos detectar y comprender.

POR QUÉ IMPORTAN LAS ENANAS MARRONES: UN PUENTE ENTRE EXOPLANETAS Y EVOLUCIÓN GALÁCTICA

Las enanas marrones no son rarezas astronómicas, sino piezas clave para entender la física de las estrellas y de los planetas. Su estudio influye en múltiples ámbitos:

- **Formación estelar**: demostraron que el colapso gravitatorio puede producir objetos de un rango continuo de masas, refutando la idea de un límite mínimo estricto para nacer como estrella.
- **Formación planetaria**: los planetas errantes desafían los modelos actuales, al mostrar que cuerpos tipo planeta pueden formarse de manera aislada o ser expulsados de sistemas.
- **Física atmosférica**: sus atmósferas, ricas en agua, metano y amoníaco, son análogas a las de los gigantes gaseosos, y sirven como laboratorios naturales para estudiar nubes, química y meteorología exoplanetaria.

- **Magnetismo y rotación**: sus rápidas rotaciones y emisiones de radio ocasionales revelan procesos magnéticos en interiores fríos y degenerados.
- **Población galáctica**: se estima que existen más de 50 mil millones de enanas marrones en la Vía Láctea, lo que las convierte en una de las poblaciones más abundantes

Más allá de su relevancia científica, las enanas marrones ofrecen una lección de humildad: el universo produce diversidad a todas las escalas, llenando los huecos entre las categorías que los humanos inventamos para comprenderlo. Desde la débil luz de Teide 1 hasta las profundas imágenes de Euclid, el estudio de las enanas marrones ha transformado nuestra visión del cosmos. Son piezas fundamentales en el continuo que une a las estrellas con los planetas y a los procesos que los generan. Hoy, las enanas marrones se sitúan en la intersección de múltiples disciplinas —física estelar, ciencia de exoplanetas, estructura galáctica y astrobiología—. Nos recuerdan que, entre las estrellas brillantes y los planetas oscuros, existe una vasta población de mundos silenciosos, fríos y antiguos, cada uno portando una parte de la historia de cómo el universo construye su diversidad.

Figura 7. Representación de los tamaños relativos de una estrella tipo solar, Júpiter y una enana marrón como WISE1810 que es de baja metalicidad y probablemente muy antigua.

