

Comencemos con una pregunta a todas luces redundante: ¿de qué están hechas las estrellas de neutrones? La redundancia pierde su condición, solo un instante después, cuando pensamos: ¿cómo se estructura su interior y se comporta la materia a densidades superiores a las del núcleo atómico? Palabras mayores, que ya tienen sus años (Wheeler 1966), de cuando aún no conocíamos ninguna estrella de neutrones. Si hablamos de su densidad, lo hacemos también de su masa y radio, piezas de las esquinas en este puzzle aún por completar. Por fortuna, hemos asistido a una auténtica revolución en la última década gracias a los rápidos avances en los ámbitos técnico, de computación y observación, que nos han ofrecido la oportunidad de *pesar* estrellas de neutrones y medir sus radios con mayor precisión en un gran número de púlsares que forman parte de sistemas binarios.



Pablo Rodríguez Gil
Instituto de Astrofísica de Canarias /
U. de La Laguna
prguez@iac.es

Desde el punto de vista de la evolución de las estrellas, encontrando la ecuación de estado de la materia densa —ultradensa, si queremos— seríamos capaces de trazar una línea entre las estrellas de neutrones y los agujeros negros, ya que diferentes ecuaciones de estado impondrían a las primeras diferentes masas máximas. Las implicaciones en nuestra comprensión de las explosiones de supernovas, el tamaño de las poblaciones de objetos compactos, y el ritmo de producción de eventos de ondas gravitatorias por fusiones en sistemas binarios son claramente relevantes.

LAS VIUDAS NEGRAS Y LOS PÚLSARES

Las hembras de algunas especies de arañas del género *Latrodectus* pueden acabar devorando al macho tras la cópula —que es cosa de dos cuerpos—, lo que les ha hecho ganarse el apelativo de “arañas viudas” o “viudas negras”. El descubrimiento en los años 1980 del púlsar de milisegundos PSR B1957+20 (PSR J1959+2048; Fruchter, Stinebring & Taylor 1988) puso sobre la mesa la existencia de estrellas de neutrones cuya intensa radiación en el rango de las altas energías podía haber “vaporizado” su estrella compañera en un sistema binario, también asunto de dos cuerpos y de evidente semejanza con algunas *Latrodectus* (Fig. 1). Este hallazgo apoyaba las hipótesis previas que apuntaban a la transferencia de materia, y por tanto de momento angular, desde la compañera a la estrella de neutrones como causa de la aceleración de su rotación hasta frecuencias del orden de los 1000 Hz.

Volviendo a la masa y a la ecuación de estado, estos sistemas binarios podrían albergar algunas de las estrellas de neutrones más masivas, sin duda una prueba de fuego para algunas ecuaciones de estado propuestas, que pueden ponerse en cuarentena o ser directamente descartadas (ver, p. ej., Linares, Shahbaz & Casares 2018).

EL SISTEMA ZTF J1406+1222

Hoy en día disfrutamos, y mucho, de la gran ventaja de tener a mano una variedad de mapeos del cielo (*surveys*) con un muestreo fotométrico temporal adecuado para descubrir sistemas binarios con periodos orbitales cortos en virtud de su variabilidad a lo largo de la órbita.

Con el objetivo de encontrar en el visible sistemas con órbitas menores de una hora, que bien podrían ser emisores de ondas gravitatorias por encima del umbral de detección de la *Laser Interferometer Space Antenna*



Figura 1. Representación artística del sistema binario formado por el púlsar PSR J2055+3829 y su estrella compañera, que está siendo vaporizada por la fuerte radiación de alta energía emitida por la estrella de neutrones (Michele Diodati/Universe Sandbox).

(LISA; Amaro-Seoane et al. 2017), nos sumergimos en las cientos —a veces miles, según la región— de épocas de datos del cielo del hemisferio norte facilitadas por la *Zwicky Transient Facility* (ZTF; Masci et al. 2019). Impusimos unos criterios de selección sensibles a objetos azules con luminosidades por debajo de la secuencia principal: se espera que los sistemas compuestos por dos enanas blancas con periodos orbitales lo suficientemente cortos para ser fuentes intensas para LISA posean temperaturas altas como consecuencia del calentamiento de marea (*tidal heating*; Fuller & Lai 2013). Como ejemplo de los resultados de este proyecto aún en marcha, en Burdge et al. (2020) presentamos quince sistemas con periodos orbitales comprendidos entre 6.91 y 56.35 minutos, medidos en las curvas de luz de ZTF usando el método de *conditional entropy* (Graham et al. 2013).

COMO EL DÍA Y LA NOCHE

Para nuestra sorpresa, ZTF J1406+1222 destacó entre el resto de los sistemas por mostrar una variabilidad casi sinusoidal de 62 minutos de periodo, cuya amplitud es mucho mayor en la banda *g* que en las bandas *r* o *i* de ZTF. La confirmación del periodo orbital vino en julio de 2020 con las curvas de luz obtenidas con la cámara CHIMERA (Harding et al. 2016) del Telescopio Hale de 200 pulgadas de diámetro en el Observatorio de Palomar. La de la banda *g* indicaba una amplitud del flujo de un factor cinco entre el mínimo y el máximo de luz. Este dato nos llevó a extender la fotometría a la banda *u* con ULTRACAM (Dhillon et al. 2007) en el *New Technology Telescope* (NTT; Observatorio de la Silla), que propor-

cionó una amplitud aún mayor. Finalmente, observamos ZTF J1406+1222 en el Gran Telescopio Canarias (GTC) de 10 metros con la cámara ultrarrápida HiPERCAM (Dhillon et al. 2021). La Fig. 2 ilustra la enorme amplitud de flujo que existe entre el mínimo (normalizado a uno en todas las bandas) y el máximo: un factor casi quince en la banda u_s de HiPERCAM. Ello implica un extraordinario contraste entre las caras “diurna” y “nocturna” de una estrella del sistema binario que está siendo intensamente irradiada por la otra componente. El máximo flujo nos llega cuando la primera está en la conjunción superior, es decir, cuando vemos de lleno su cara irradiada, mientras que el mínimo ocurre media órbita más tarde, en la conjunción inferior, cuando la estrella se dispone entre nosotros y el objeto que la está irradiando. Este efecto es típico de los sistemas de tipo viuda negra conocidos y, de hecho, se ha empleado como herramienta para encontrar algunos de ellos coincidentes con fuentes de rayos gamma (ver, p. ej., Li et al. 2021).

Si nos fijamos de nuevo en la Fig. 2, veremos claramente que el máximo de la modulación se alcanza antes en longitudes de onda más largas, lo que apunta a una distribución asimétrica de la temperatura en la superficie de la estrella irradiada. Estos desplazamientos del máximo dependientes del color no los vemos en sistemas binarios en los que el objeto que irradia es una enana blanca. Sin embargo, sí se han observado en “sistemas araña” como PSR J1959+2048 y PSR J2215+5135 (Kandel & Romani 2020), aunque el efecto es mucho más pronunciado en ZTF J1406+1222.

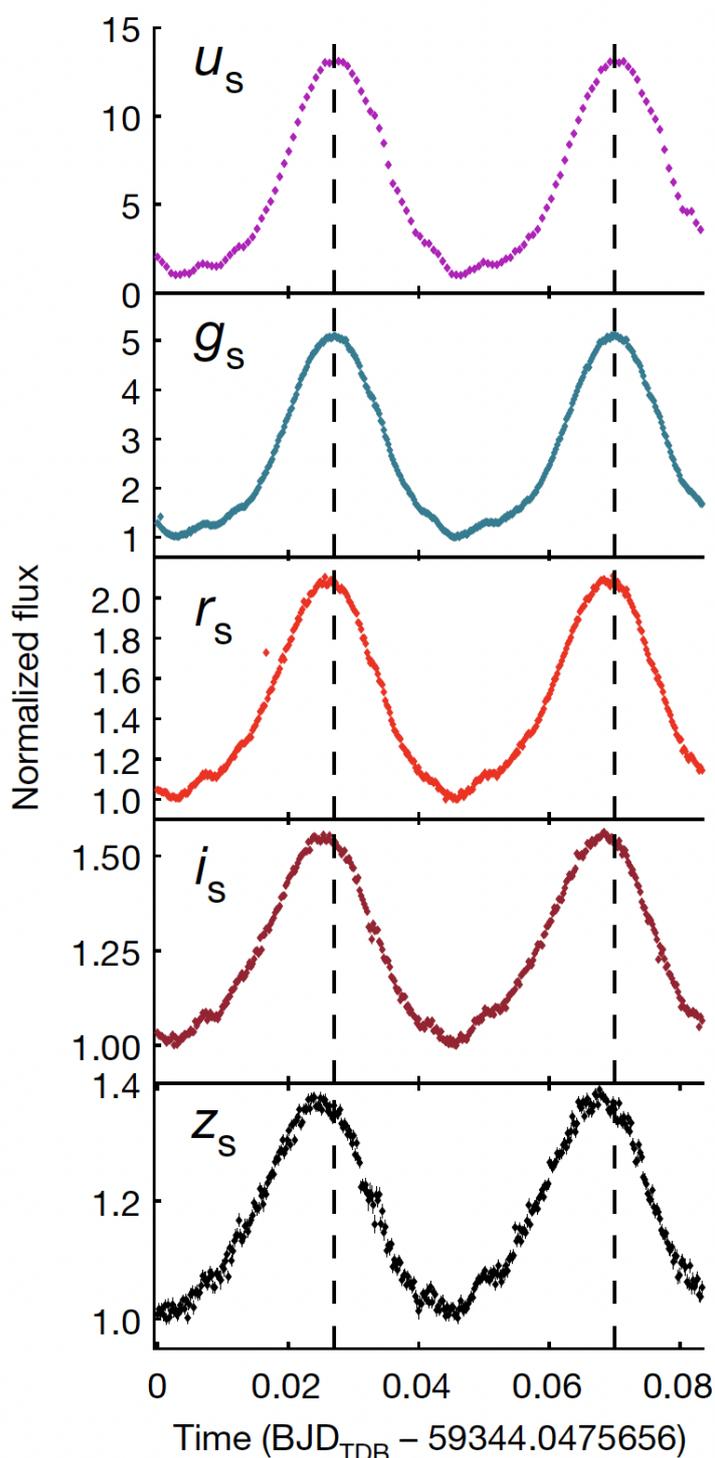


Figura 2. Curvas de luz de ZTF J1406+1222 en las cinco bandas de HiPERCAM. Las líneas verticales discontinuas marcan los máximos del brillo en la banda g_s . Se observa claramente cómo hacia longitudes de onda más largas el máximo se alcanza antes. Se ha usado el valor mínimo del flujo para la normalización en cada banda.

Una de las tandas de datos (observación número 00013598005) obtenidas con el filtro UVW2 del *Ultra-violet/Optical Telescope* (UVOT) a bordo del telescopio espacial *Neil Gehrels Swift Observatory*, de 1736 segundos de exposición en total, se obtuvo centrada en el mínimo de brillo, cubriendo la mitad de la órbita en que la fuente es más débil. La fotometría muestra que ZTF J1406+1222 no se detecta a un nivel de 3σ por encima del fondo, algo que impone un límite superior al brillo en esta banda de $> 22.9 \text{ mag}_{AB}$. Esta observación excluye aún más la posibilidad de que el objeto irradiador sea una enana blanca caliente ya que, de lo contrario, tendría que dominar el flujo en el ultravioleta lejano durante toda la órbita.

También usamos el *Low Resolution Imaging Spectrometer* (LRIS) en el Telescopio Keck I en Mauna Kea para conseguir espectros con resolución orbital (cinco minutos de exposición). En el panel de la derecha de la Fig. 3 se pueden observar los cambios drásticos que sufre el espectro visible de ZTF J1406+1222: en el mínimo de brillo (fase orbital 0) domina un continuo rojo que empieza a mostrar líneas de emisión estrechas de la serie de Balmer a medida que la órbita progresa (p. ej. fase 0.27 en la figura), que más tarde dan paso a una fase ópticamente gruesa con las líneas de Balmer en absorción sobre un continuo azul, que son visibles durante aproximadamente un tercio de la órbita y son más intensas cerca del máximo de brillo del sistema (alrededor de la fase 0.5). Nuestra interpretación es que las líneas de absorción se producen en la cara diurna de la estrella irradiada: la radiación de alta energía que recibe tiene el poder de penetrar lo suficiente en su fotosfera para que esta produzca líneas de absorción en el camino de vuelta de la energía reprocesada hacia la superficie (Romani et al. 2015). De nuevo, si el objeto irradiador fuera una enana blanca, su radiación, emitida principalmente en el ultravioleta, sería reprocesada muy cerca de la superficie de la estrella irradiada, lo que resultaría en un espectro ópticamente delgado de líneas de emisión estrechas, no de absorción.

Por otra parte, la curva de velocidad radial de las líneas de emisión estrechas indica que no tienen su origen en la cara diurna de la estrella irradiada, sino en un choque situado entre las dos componentes del sistema binario o en un viento arrancado de la estrella por el intenso bombardeo de radiación de alta energía al que está sometida, que podría disponerse en forma de una

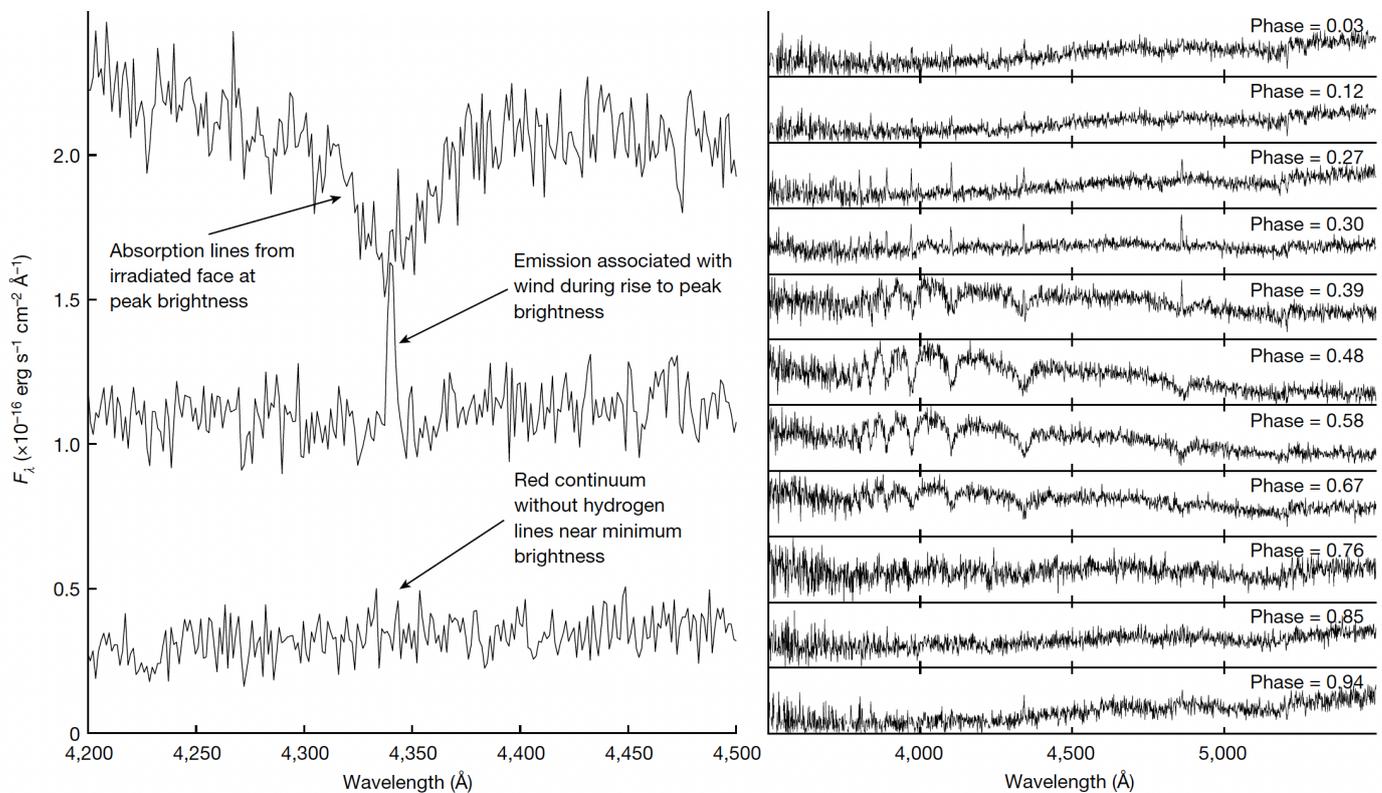


Figura 3. Izquierda: La línea espectral H γ en tres espectros diferentes obtenidos con el espectrógrafo LRIS del Telescopio Keck I. El superior, de mayor flujo, corresponde a una fase ópticamente gruesa que origina líneas de absorción de la serie de Balmer sobre un continuo azul. En una fase intermedia, H γ aparece como una emisión estrecha en un continuo rojo, mientras que en la fase más débil, abajo, el sistema no muestra las líneas espectrales de Balmer. Derecha: evolución del espectro de ZTF J1406+1222 a lo largo de la órbita del sistema binario. Cerca del mínimo del brillo se aprecia una línea de MgH en 5200 Å, que puede verse durante toda la órbita, típica de una estrella de tipo espectral K subenana.

cola similar a la de un cometa como la observada en el sistema de tipo viuda negra PSR J1311–343019 (ver fig. 7 en Romani et al. 2015). Todas estas evidencias juntas confirman que en ZTF J1406+1222 reside una viuda negra en la que la intensa radiación de alta energía de la estrella de neutrones está arrancando el material de su compañera (Burdge et al. 2022).

TRES SON COMPAÑÍA

El espectro tomado en la fase orbital 0.94 (el inferior en el panel derecho de la Fig. 3) no exhibe líneas de Balmer ni en absorción ni en emisión, sino una banda de absorción de MgH a una longitud de onda de unos 5200 Å que permanece durante toda la órbita. Esta característica espectral, junto con la detección de bandas de CaH más hacia el rojo, sugiere la presencia de una estrella subenana de tipo espectral K (Allard & Hauschildt 1995) con una temperatura efectiva medida de 3800–3900 K.

Tras inspeccionar las imágenes de archivo del *Sloan Digital Sky Survey* (SDSS) y el *Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System* (Pan-STARRS1) nos percatamos de que en la posición del objeto podría haber dos fuentes distintas separadas por una fracción de segundo de arco (Fig. 4). Sin embargo, el *Data Release 2* (DR2) de *Gaia* solo mostraba una fuente, pero el *Early Data Release 3* (DR3) sí distinguía dos fuentes en la posición medida por el DR2 separadas por 0.5555 ± 0.0045 segundos de arco, de modo que surgió la idea de que podíamos haber encontrado un sistema triple. La fuente de *Gaia* con una solución astrométrica completa es la estrella subenana, que tiene un movimiento propio de 74.486 ± 1.769 milisegundos de arco por año.

Suponiendo que ese fuera el caso, el sistema binario y la estrella subenana deberían compartir el mismo movimiento propio en el cielo, lo que demostramos

en la Fig. 5, confirmando así que ZTF J1406+1222 es un sistema triple compuesto por una binaria de tipo viuda negra y una estrella subenana de tipo K.

A una distancia estimada de 1.14 kilopársec, calculamos una separación proyectada entre la viuda negra y la estrella subenana de 600 unidades astronómicas, lo que implica un periodo orbital de aproximadamente 12000 años y una velocidad orbital proyectada de solo 1.5 km s^{-1} para la subenana.

ZTF J1406+1222 Y LOS MODELOS DE EVOLUCIÓN

Nuestro análisis cinemático de ZTF J1406+1222 (Burdge et al. 2022) revela que es muy probablemente un objeto del halo de nuestra Galaxia, de modo que su gran movimiento propio de 74.486 ± 1.769 milisegundos de arco por año refleja simplemente esa naturaleza, y no es un indicador de que la estrella de neutrones haya recibido un empujón en el momento de su nacimiento (*natal kick*). Esto implica que el sistema tiene varios miles de millones de años, por lo que la estrella de neutrones debe haberse formado hace mucho tiempo, dado que su estrella masiva progenitora tuvo que completar su evolución en un tiempo característico de unas decenas de millones de años. Es por lo tanto poco probable que el sistema

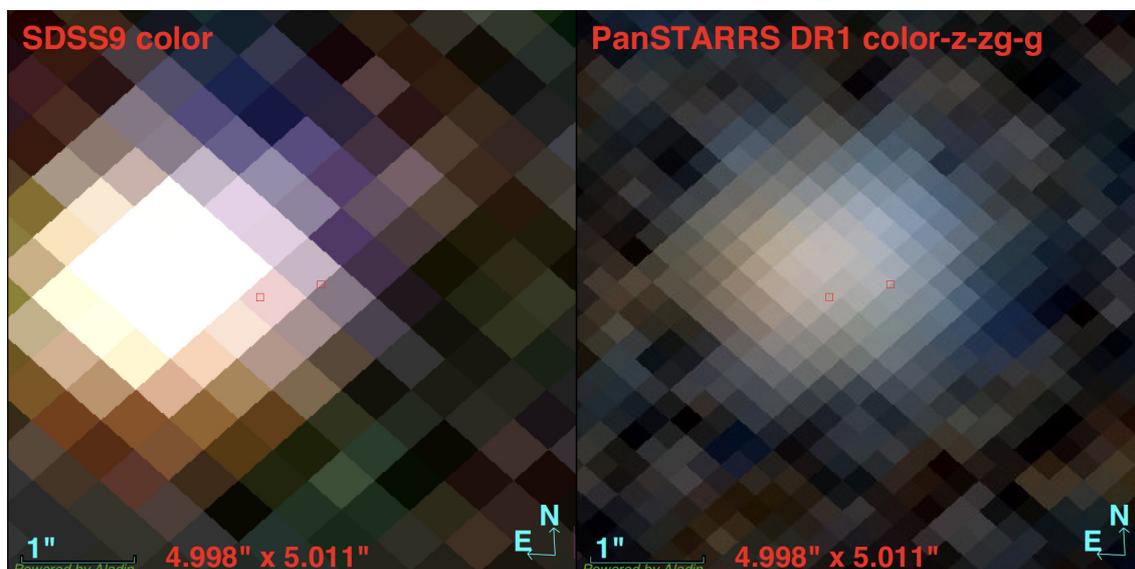
pueda haber sufrido un *kick* y haber mantenido la configuración que observamos ahora, ya que en tal caso el tercer cuerpo, con una velocidad de solo 1.5 km s^{-1} , habría sido expulsado del sistema fácilmente.

En resumen, la naturaleza triple y el periodo orbital tan corto de ZTF J1406+1222 somete los actuales modelos de evolución de las binarias de tipo araña (Chen et al. 2013) a una dura prueba. Además, es el único que se ha encontrado hasta ahora en el visible usando un método, ideado para el presente trabajo, de búsqueda de sistemas binarios con estrellas de neutrones basado en la modulación fotométrica que producen las estrellas compañeras fuertemente irradiadas. Ello posee el potencial de eliminar los efectos de selección de los métodos usados en trabajos anteriores, basados en la emisión en radio, rayos X o rayos γ .

BIBLIOGRAFÍA

- Wheeler, J. A. “[Superdense stars](#)”. Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 4, 393 (1966).
- Fruchter, A. S., Stinebring, D. R. & Taylor J. H. “[A millisecond pulsar in an eclipsing binary](#)”. Nature, 333, 237 (1988).

Figura 4. Izquierda: Imagen de ZTF J1406+1222 en el DR9 de SDSS, que muestra una clara asimetría amarillo-azul/violeta en el color, con la estrella subenana de tipo K a la izquierda. Los dos cuadrados rojos indican las posiciones J2016.0 de las dos fuentes en el eDR3 de *Gaia*. Derecha: Imagen de Pan-STARRS1, que exhibe la misma asimetría en el color, y cuyo centroide se encuentra más cerca de la posición en *Gaia* a causa del movimiento propio del sistema de 74.5 milisegundos de arco por año.



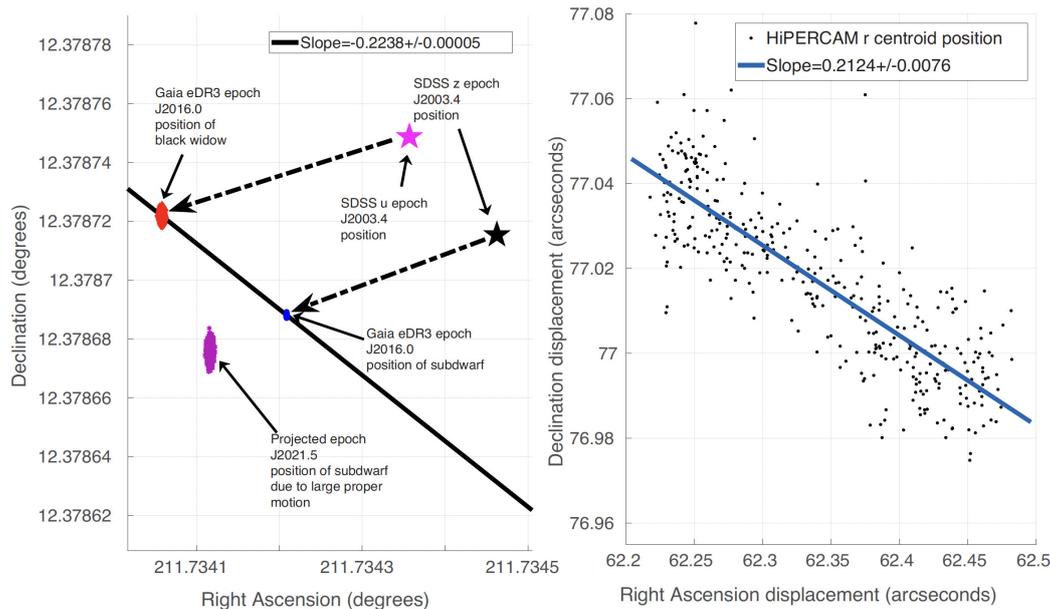


Figura 5. Izquierda: Las estrellas de color rosa y negro indican la posición en el cielo de la viuda negra (banda u) y la estrella subenana (banda z) en la época J2003.4 (SDSS DR9), respectivamente. Dado que la primera domina en la banda u y la segunda lo hace en la banda z , esas deberían ser las posiciones aproximadas de ambas fuentes en la época J2003.4. Por otro lado, los círculos azules marcan la posición de la estrella subenana en las imágenes de *Gaia* eDR3, mientras que los rombos rojos sitúan a la viuda negra (ambas en la época J2016.0). La línea negra continua ilustra el ángulo de posición entre esas dos posiciones. Las flechas discontinuas indican que ambos objetos comparten el mismo movimiento en el cielo. Las estrellas magenta reflejan la posición de la estrella subenana proyectada a la época J2021.5, cuando tomamos las imágenes con HiPERCAM, teniendo en cuenta su movimiento propio. Derecha: si ambos objetos comparten movimiento en el cielo, el ángulo de posición entre ellos debería mantenerse. Aprovechamos el hecho de que el sistema de tipo viuda negra se hace muy débil cada 62 minutos, lo que debería dejar a la vista solo la otra estrella del sistema triple: la estrella subenana. Así, medimos en las imágenes de HiPERCAM en la banda r el centroide del objeto tomando como referencia una estrella del campo, y comprobamos que saltaba entre dos posiciones, la de la viuda negra y la de la estrella subenana. Esto nos habilitó para medir el ángulo de posición de una respecto a la otra en la época en que tomamos las imágenes (J2021.5), comprobando que se mantenía respecto al medido usando *Gaia* eDR3, y confirmando así la naturaleza triple del sistema.

- Linares, M., Shahbaz, T. & Casares J. “Peering into the dark side: Magnesium lines establish a massive neutron star in PSR J2215+5135”. *ApJ*, 859, 54 (2018).
- Masci, F. J. et al. “The Zwicky Transient Facility: Data processing, products, and archive”. *PASP*, 131, 995 (2019).
- Amaro-Seoane, P. et al. “Laser Interferometer Space Antenna”. *arXiv:1702.00786* (2017).
- Burdge, K. B. et al. “A systematic search of Zwicky Transient Facility data for ultracompact binary LISA-detectable gravitational-wave sources”. *ApJ*, 905, 32 (2020).
- Fuller, J. & Lai, D. “Dynamical tides in compact white dwarf binaries: helium core white dwarfs, tidal heating and observational signatures”. *MNRAS*, 430, 274 (2013).
- Graham, M. J. et al. “Using conditional entropy to identify periodicity”. *MNRAS*, 434, 2629 (2013).
- Harding, L. K. et al. “CHIMERA: a wide-field, multi-colour, high-speed photometer at the prime focus of the Hale telescope”. *MNRAS*, 457, 3036 (2016).
- Dhillon, V. S. et al. “ULTRACAM: an ultrafast, triple-beam CCD camera for high-speed astrophysics”. *MNRAS*, 378, 825 (2007).
- Dhillon, V. S. et al. “HiPERCAM: a quintuple-beam, high-speed optical imager on the 10.4-m Gran Telescopio Canarias”. *MNRAS*, 507, 350 (2021).
- Li, K.-L. et al. “Revealing a new black widow binary 4FGL J0336.0+7502”. *ApJ*, 911, 92 (2021).
- Kandel, D. & Romani, R. W. “Atmospheric circulation on black widow companions”. *ApJ*, 892, 101 (2020).
- Romani, R. W., Filippenko, A. V. & Cenko, S. B. “A spectroscopic study of the extreme black widow PSR J1311–3430”. *ApJ*, 804, 115 (2015).
- Allard, F. & Hauschildt, P. H. “Model atmospheres for M (sub)dwarf stars. I. The base model grid”. *ApJ*, 445, 433 (1995).
- Chen, H.-L. et al. “Formation of black widows and redbacks—two distinct populations of eclipsing binary millisecond pulsars”. *ApJ*, 775, 27 (2013).
- Burdge, K. B. et al. “A 62-minute orbital period black widow binary in a wide hierarchical triple”. *Nature*, 605, 41 (Springer Nature 2022).