

Radioestrellas, vientos en colisión, y HD 93129A

por la Dra. Paula Benaglia

La radioastronomía se ha convertido en un arma muy útil y a la vez poderosa para estudiar cierto tipo de estrellas y fenómenos que ocurren en un entorno muy cercano a las mismas. Este tipo es el de las estrellas masivas ($\geq 8 M_{\text{sol}}^1$) y tempranas (ver más abajo). Las mismas no superan el 1% de la cantidad de estrellas en la Vía Láctea (total de estrellas: unos 200 mil millones), pero su importancia es enorme. Son las responsables de la existencia de los elementos pesados (Mg, Si, S, Cr, Ni, Fe, etc.), desparramados al medio interestelar en la etapa de supernova. Participan en la dinámica del universo, entregando grandes cantidades de momento y energía al medio interestelar (ver artículo de Arnal en el número próximo pasado del Boletín Radioastronómico), proporcionando además fotones ionizantes. Son las trazadoras de la estructura espiral de la Galaxia, pues se forman en los brazos espirales de ésta última. Su intenso brillo permite detectarlas en otras galaxias, y definir, a partir de ellas, una escala de distancias extragaláctica, entre otras cosas.

Las estrellas se clasifican de acuerdo a su temperatura superficial, que toma valores entre algunos miles de K, hasta unos 50000 K. Por razones históricas, y en un principio relacionadas con la presencia de líneas de H en el espectro, se ha definido una secuencia básica de 7 letras (O B A F G K M), donde la O representa las más calientes, y la M las más frías. Cada intervalo entre letras se subdivide a su vez de 0 a 9 (ej: A0 a A9). A este parámetro se lo conoce como tipo espectral, y puede determinarse tomando un espectro óptico de la radiación estelar.

Otra característica que describe a una estrella es su tipo de luminosidad, la cual da cuenta de una secuencia evolutiva y varía entre tipo V (quemadura de hidrógeno en su núcleo) y tipo I (núcleo de He, capas de H en combustión). A las más calientes y luminosas se las denomina *tempranas*, y a las de características opuestas, *tardías*. La estrella más temprana catalogada en nuestra galaxia se llama HD 93129A, y es una O2 I.

Una vez que han perdido las capas más externas de puro H, en su superficie aparece He, N, y posteriormente O, de acuerdo a lo comprobado vía espectros estelares. Estas estrellas O evolucionadas, más calientes y compactas, son llamadas Wolf-Rayet (WR).

La mayoría de las estrellas masivas, además de emitir radiación, pierden partículas (en una primera aproximación, radialmente hacia fuera), a través de fuertes vientos estelares. En las estrellas O, la tasa a la que pierden masa puede llegar a unas $10^{-5} M_{\text{sol}}$ por año. La estrella

¹ Masa solar, $1 M_{\text{sol}} = 2 \times 10^{33}$ g.

puede deshacerse así de hasta del orden de la mitad de su masa, antes de explotar como supernova.

Las dos variables más importantes al describir un viento estelar son (i) la velocidad máxima a la que llega el gas, o velocidad terminal v_w (≤ 3000 km/s), (ii) la tasa de pérdida de masa dM/dt . Observaciones de radio, con una resolución angular (= aumento) y sensibilidad suficientes, permiten, bajo ciertas condiciones, calcular dM/dt a partir de la intensidad (densidad de flujo) detectada de una región de viento estelar.

Más o menos para la época de las primeras observaciones de radio hacia estrellas OB (década del 70) se encontró que la radio-emisión podía explicarse como un exceso producido por el mecanismo free-free. En el plasma que es el viento, los electrones se aproximan a iones, desacelerándose, perdiendo energía y emitiendo radiación electromagnética de frecuencias en el rango de las radioondas. Puede demostrarse que la intensidad de radiación crece con la frecuencia. A este mecanismo se lo identifica como *radiación térmica*.

Sin embargo, si existen inestabilidades en el viento, o si hay un choque de vientos de dos estrellas próximas, las partículas que forman el viento pueden acelerarse a velocidades cercanas a la de la luz, y participar en otros procesos que producen radiación inversamente proporcional a la frecuencia (o *radiación no-térmica*; en este caso, sincrotrón). Este tipo de interacciones produce también emisión a altas energías. Se sabe que más de la mitad de las estrellas se agrupan en sistemas binarios o múltiples: la existencia de regiones de vientos en colisión (RVC) no es algo raro. La interacción de los vientos de dos estrellas tempranas masivas genera una RVC.

Los vientos se extienden hasta varios cientos de radios estelares ($1R_{\text{[estrellas OB]}} \sim 25 R_{\text{sol}}$, $1 R_{\text{sol}} = 7 \times 10^{10}$ cm). Las estrellas OB y WR más cercanas distan unos cientos de pcs³. Sus RVC pueden llegar a extenderse unas decenas de milisegundos de arco (mas) en el cielo. En el área de radio, los desarrollos tecnológicos más avanzados operando en la actualidad son arreglos de radiotelescopios o interferómetros⁴ (ejemplos: Very Large Baseline Array en EEUU, European VLBI Network, Merlin en GB), y permiten alcanzar una resolución angular de unos pocos mas, y un umbral de sensibilidad para detección de algunos μJy ($1 \text{ mJy} = 10^{-23}$ erg/cm²/s).

² Estrellas OB: se agrupan bajo este nombre las estrellas más tempranas: de tipos O y B0 a B2-3.

³ 1pc $\sim 3 \times 10^{18}$ cm.

⁴ Radio-interferómetro: arreglo de dos o más radiotelescopios que trabajan juntos, en forma equivalente a un único gran radiotelescopio.

Decenas de estrellas con vientos han sido detectadas como fuentes puntuales⁵ de radio, principalmente del cielo norte, donde se encuentra la mayor parte de los instrumentos (ej., Bieging y cols., *Astrophysical Journal* 340, 518, 1989). La detección a más de una frecuencia en algunos casos, ha permitido estudiar el comportamiento de la radiación y discriminar entre los procesos que contribuyen a la misma. La mayoría de las detecciones fue efectuada con el Very Large Array (VLA, EEUU), el famoso interferómetro de 27 antenas separadas hasta algunos km.

Si bien las RVC pueden generar radiación muy energética, es extremadamente difícil obtener un mapa de las mismas, tanto por su pequeño tamaño angular como por su gran distancia a nosotros (la densidad de flujo se escala con la inversa del cuadrado de la distancia). Son muy pocos los ejemplos de RVC detectadas como fuentes no puntuales. A este respecto, es quizás el sistema estelar WR 140 el que ha dejado revelar su RVC en forma más impresionante, mediante observaciones de radio. Está compuesto por dos estrellas masivas: una WR y una O, con una separación que varía entre unas pocas y unas 30 unidades astronómicas⁶, a lo largo del periodo orbital de 8 años. La RVC se ha podido seguir por un lapso de 2 años, registrando cambios en su posición y forma (Dougherty y cols., *Astrophysical Journal* 623, 447, 2005). Las observaciones fueron llevadas a cabo con el instrumento Very Long Baseline Array, compuesto por 10 radiotelescopios ubicados a lo largo de EEUU, desde Hawai hasta las Islas Vírgenes. La resolución angular alcanzada fue de 2 mas. La Figura 1 muestra la fuente identificada como la RVC, la posición de las componentes y la órbita que describen. El trabajo arrojó como resultados la determinación de parámetros orbitales, de una nueva y más precisa distancia, y de un modelo para explicar la emisión medida.

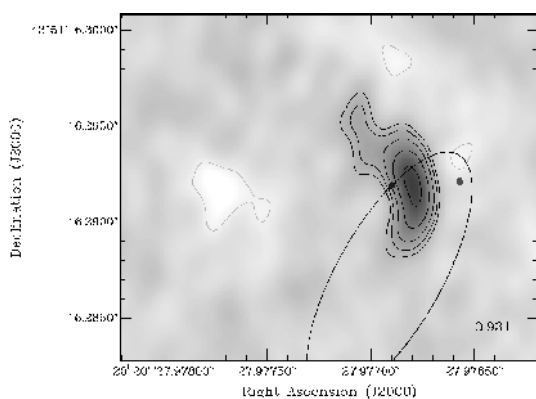


Figura 1: Imagen a 8.4 GHz tomada con el interferómetro VLBA. La fuente es interpretada como una región de colisión de vientos en el sistema binario WR 140 (WR + OB). La elipse representa la órbita, y los puntos, las estrellas.

⁵ Fuente puntual: presenta una extensión menor que la resolución angular del instrumento de medición.

⁶ Unidad astronómica: 1 AU = 150 millones de km (distancia Tierra-Sol).

Una de las regiones más ricas en estrellas tempranas masivas de la Galaxia es la de la Nebulosa de Carina, visible en radio únicamente desde el hemisferio sur. Contiene 5 de los objetos mas tempranos, incluyendo a HD 93129A (una imagen óptica de la región se muestra en la Figura 2). Esta estrella tiene un viento estelar con parámetros extremos ($v_w = 3200$ km/s, temperatura superficial ~ 50000 K).



Figura 2: Imagen óptica tomada con el telescopio del Observatorio Anglo-Australiano, hacia la región de la nebulosa de Carina.

Trabajando desde el IAR, hace una aproximadamente una década venimos observando estrellas tempranas con el radio interferómetro Australia Telescope Compact Array (ATCA), y objetos más débiles con el VLA, a más de una frecuencia.

Entre las fuentes detectadas con emisión no-térmica en el rango de 5 a 8 GHz, encontramos a HD 93129A, en enero de 2004. Observaciones recientes con el HST⁷ (Nelán y cols., *Astrophysical Journal* 128, 323, 2004) demostraron que es una binaria con compañera masiva (componentes: HD 93129Aa y HD 93129Ab), re-determinaron el tipo espectral y calcularon una separación de 55 mas entre las componentes (~ 150 AU a 2.5 kpc de nosotros).

La geometría del sistema que pudo derivarse de las observaciones ópticas, y el relativamente alto flujo en radioondas medido a pesar de la gran distancia a la fuente, nos llevaron a proponer que la fuente que detectamos en radio era una RVC (ver esquema en Fig. 3) (Benaglia & Koribalski, *Astronomy and Astrophysics* 416, 171, 2004). Las primeras observaciones, realizadas a las longitudes de onda de 3 y 6 cm (8.64 y 4.8 GHz) llegaron a

⁷ HST: Hubble Space Telescope.

una resolución angular del segundo de arco. Las imágenes obtenidas pueden apreciarse en la Figura 4.

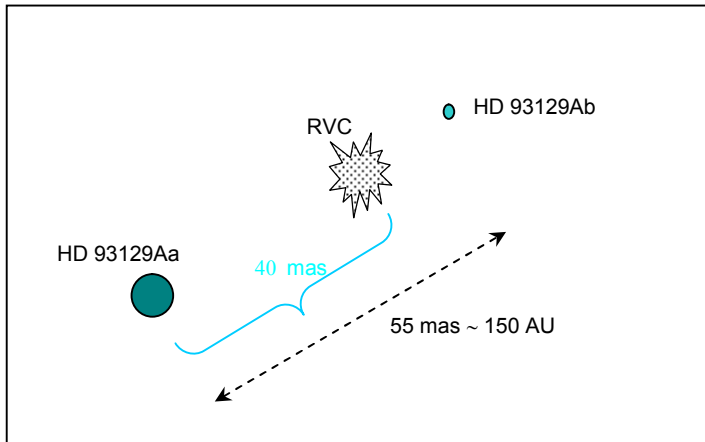


Figura 3: Geometría del sistema HD 93129A, formado por las estrellas HD 93129Aa y HD 93129Ab, a partir de los datos tomados con el telescopio espacial Hubble. La ubicación relativa de la región de colisión de vientos (RVC) está indicada.

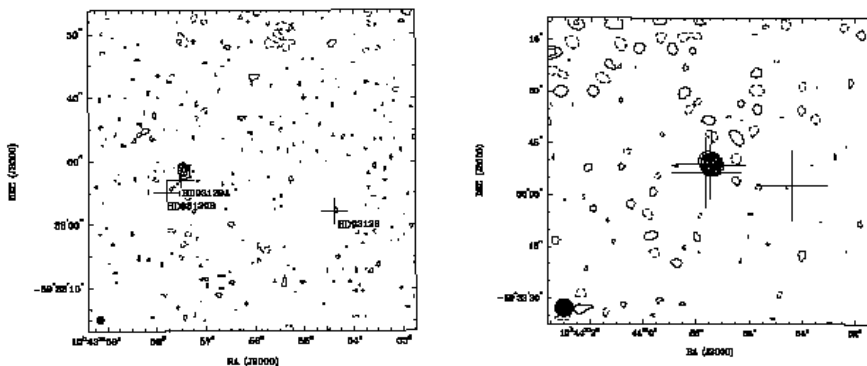


Figura 4: Imágenes hacia la región de HD 93129A tomadas con el interferómetro ATCA a 8.64 y 2.4 GHz. Las cruces indican la posición de las estrellas con sus correspondientes nombres.

Con el objetivo de estudiar qué procesos y en qué medida contribuían a la emisión, llevamos a cabo nuevas observaciones para cubrir todo el rango del espectro de radio posible con el ATCA: de 1 a 25 GHz. Las densidades de flujo medidas cayeron de casi 10 mJy, a 1.4 GHz, a 1.5 mJy, a 25 GHz. El espectro obtenido se muestra en la Figura 5. De la consideración de los procesos más relevantes a la emisión, y efectuando ciertas hipótesis simplificativas, puede construirse una función suma de las intensidades aportadas por cada proceso, y comparar esta suma total con la intensidad obtenida de los datos. El ajuste entre ambas permite acotar parámetros físicos del sistema.

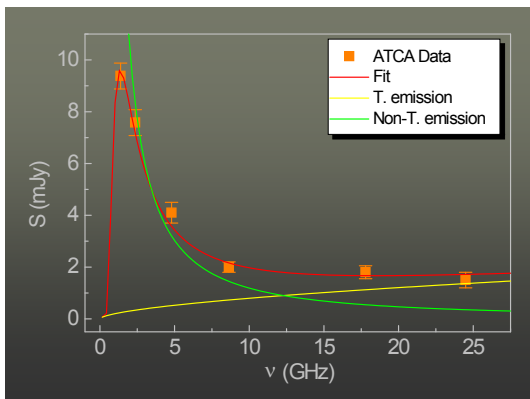


Figura 5: Densidad de flujo S en función de la frecuencia de observación ν .

En la figura se muestra la contribución modelada para emisión térmica (amarillo) y no-térmica (verde), emisión total (rojo) y densidad de flujo medida mediante las observaciones (cuadrados color naranja). El comportamiento a bajas frecuencias está modulado por efectos de absorción (térmica, auto-absorción sincrotrón y efecto Razin-Tsytoich, ver Benaglia y Koribalski 2004, astro-ph/0410547 para los detalles). De los resultados del ajuste pudo calcularse la tasa de pérdida de masa del sistema ($3.5 \times 10^{-5} M_{\text{sol}}/\text{yr}$), la potencia sincrotrón emitida (6×10^{33} erg/s) y un valor medio del campo magnético en la RVC de 20 mGauss. Vale aclarar aquí que los campos magnéticos estelares son cantidades muy difíciles de medir.

Los datos aportados del óptico sobre la estructura del sistema llevaron a estimar una extensión de la RVC de unas 40 AU. Es la detección de emisión sincrotrón la que evidencia la probable emisión a muy altas energías: electrones involucrados en procesos sincrotrón pueden ser dispersados por el mecanismo Compton inverso (un fotón UV interacciona con un electrón relativista, y a causa de esto es emitido otro fotón de más alta frecuencia: hasta rayos gamma). Luego de varios cálculos y suposiciones, es posible estimar la potencia emitida en rayos gamma por el proceso mencionado (L_{IC}).

Una forma de controlar estos resultados es comparar el número final con la potencia detectada por telescopios de rayos gamma en la región de HD 93129A. En la década del 90 el cielo fue relevado utilizando el telescopio EGRET, el cual no detectó fuentes por arriba de su umbral de ruido, que hubiera correspondido a una L_{IC} mayor a la estimada por nosotros.

En el futuro cercano podrán confrontarse nuestras predicciones en rayos gamma con las observaciones del telescopio por venir GLAST, de la NASA (lanzamiento proyectado para 2009).

Las observaciones en el óptico con el HST también han progresado. Maíz-Apellániz y colaboradores (2007, astro-ph/0702514) han compilado datos de tres épocas: 1996, 2002 y 2004. De la comparación de los resultados se ha deducido que las componentes del sistema

se estarían acercando. También se ha deducido que la masa total del sistema es de unas 200 M_{sol} , lo cual lo convierte en uno de los sistemas más masivos conocidos hasta el momento. Falta calcular cuál es la masa de cada componente del sistema, y precisar el tipo espectral de la estrella compañera.

En el rango de radio, el sistema de HD 93129A y su RVC puede ser observado con mayor resolución angular aún, con radio interferómetros de larga base (antenas separadas cientos de km). El instrumento Long Baseline Array está constituido por 8 radiotelescopios a lo largo de Australia (ver Figura 6), y alcanza una resolución angular de pocas decenas de mas, a unos 2 GHz: suficiente para detectar la RVC como una fuente individual, situada entre las dos estrellas.



Figura 6: Locación de los 8 radiotelescopios que forman el interferómetro australiano LBA.

Nuestro próximo paso es entonces observar la RCV con el máximo aumento posible, determinar su extensión, y afinar los números para los parámetros y predicciones anteriores. Hemos usado unas 4 h de observación del LBA para buscar fuentes calibradoras, y esperamos poder usar otras 12 hs para mirar hacia la RVC. La detección y el mapeo de la región de vientos se usarán para comparar con los resultados obtenidos de modelos recientemente desarrollados, y testear estos modelos.