



Atmósferas estelares Wolf-Rayet y la dinámica de las clasificaciones

Hernán Miguel*

Resumen

Las estrellas Wolf-Rayet (WR), desde su descubrimiento en 1867, han presentado características atípicas a los criterios de clasificación propuestos. Presentan líneas de emisión muy anchas en términos de velocidad, mostrando atmósferas con intensos vientos, indicando una tasa muy alta de pérdida de masa. Sus líneas de emisión muestran un alto grado de ionización correspondiente a una temperatura de emisión que no coincide con la temperatura de color del continuo. En este trabajo abordamos un caso de investigación histórico de la década de 1980 y analizamos en qué medida este caso es un ejemplo paradigmático de la tarea que se enfrenta en términos de objetos que presentan características atípicas y que llevan a la revisión de la propia colección de categorías que constituyen esa clasificación.

Palabras clave: estrellas Wolf-Rayet, envolturas estelares, clasificación, taxonomía, espectroscopía.

Abstract

Wolf-Rayet (WR) stars, since their discovery in 1867, have been a class resistant to classification. They exhibit very broad emission lines in terms of velocity, showing atmospheres with strong winds, indicating a very high rate of mass loss. Their emission lines show a high degree of ionization corresponding to an emission temperature that does not coincide with the color temperature of the continuum. In this paper we address a research case from the 1980s and analyze to what extent this case is a paradigmatic example of the task faced in terms of objects presenting

* UBA – CONICET

atypical characteristics that give rise to the revision of the very collection of categories that constitute that classification.

Keywords: Wolf-Rayet stars, stellar envelopes, classification, taxonomy, spectroscopy.

I. Introducción¹

Las estrellas Wolf-Rayet (WR), desde su descubrimiento en 1867, han constituido un tipo de estrellas cuyas características atípicas dieron lugar a un interesante proceso iterativo hasta alcanzar un sistema estable de clasificación.

En este trabajo presentamos una reseña de ese proceso, sobre la base del estado del arte para la década de 1980.

Estas estrellas presentan líneas de emisión muy anchas en términos de velocidad del orden de cientos o miles de km/s, mostrando atmósferas de actividad violenta con perfiles de emisión de tipo P-Cygni² lo que permite estimar la relación atmósfera-núcleo y estimar una tasa muy alta de pérdida de masas solares. A pesar de ello, el espectro de estas estrellas permanece estable a lo largo de varias décadas. Sus líneas de emisión muestran un grado de ionización correspondiente a una alta temperatura que no coincide con la temperatura electrónica capaz de explicar su estructura de ionización, y tampoco coincide con su temperatura de color.³Y así otras características⁴ que plantean un abanico de dificultades para establecer

1 Expreso mi agradecimiento por los excelentes comentarios y agudas sugerencias expresadas por quien ha realizado de manera anónima la evaluación de este trabajo en su versión inicial.

2 Absorción ubicada hacia menores longitudes de onda que el máximo de la emisión.

3 Véase Rublev (1975). La temperatura esperada para las líneas de radiación de He I y de He II es mayor que la temperatura electrónica de la envoltura (p. 267) y, por otra parte, ésta es inferior a la temperatura del núcleo, en un factor 0,4 en promedio (p. 266). Para otros detalles sobre la estructura de temperaturas véase también Hillier (1989).

4 Crowther (2007: 179) señala que, aunque la clasificación por líneas espectrales hace posible la distinción de subtipos, aparecen complicaciones para clasificar las estrellas WR de la secuencia del nitrógeno al comparar la intensidad de algunas de

una clasificación adecuada y abarcativa para la diversidad de estrellas que muestran este fenómeno, incluidas estrellas centrales de nebulosas planetarias. Tal diversidad ha llevado a la comunidad de astrónomos a pensar que quizás no se trate de un tipo de estrellas WR sino de un fenómeno que puede encontrarse en una gran diversidad de estrellas, con diferentes características físicas y estados evolutivos.⁵

En este trabajo tomaré como un caso de investigación histórico en el que se presenta una descripción del estado de arte para la década de 1980 respecto a este fenómeno, cuyos resultados se encuentran en Miguel (1984) y Méndez et al. (1985). La clasificación de la época tomaba como punto de partida la distinción entre estrellas de tipo WN con fuertes emisiones de nitrógeno ionizado por un lado, y de tipo WC a las que presentaban un espectro dominado por emisiones de carbono y oxígeno. Al interior de cada grupo se establecían subcategorías, en términos de las intensidades relativas de las emisiones correspondientes a las distintas líneas (He II, N III, N IV, N V para las WN y C III, C IV, O V para las WC). Toda esta clasificación no presentaba una consistencia aceptable para su utilización extendida.

A partir del estudio de este caso histórico en el que fue necesario revisar las categorías de la clasificación, analizamos en qué medida puede tomarse como ejemplo paradigmático de la tarea que se enfrenta en astronomía, y más en general en las ciencias experimentales, al tratarse de clasificaciones que parecen hacer proliferar casos anómalos en virtud de

sus líneas con las de estrellas de tipo Of. Adicionalmente, algunas de las estrellas de esta secuencia presentan ciertas líneas “inusualmente fuertes” mientras que por las demás características, se parecen al resto (p. 180). Ya Smith (1968: 137) se refería a las diferencias en la intensidad en las líneas de He I entre diferentes estrellas de este tipo, que por lo demás, son similares. Para los temas todavía pendientes de una acabada comprensión para esa década, consultar también Abbott y Conti (1987: 144), sección 7.3 Major Unsolved Issues.

5 Abbott y Conti (1987: 143) señalan que las estrellas WR parecen descender de estrellas de tipo OB masivas, que muestran intensos vientos y pérdida de masa, lo cual debe ser tenido en cuenta en la evolución estelar. “Otros procesos combinados, que no están todavía completamente comprendidos [para esa década], también juegan un papel en la evolución de estrellas masivas.” Describen lo que “identificamos con una fase WR”. “Posiblemente otros estados intermedios, representados por tipos S Doradus, o estrellas P Cygni, Hubble-Sandage variables, o Eta Car, o similares, [...] pueden jugar un papel en la separación que va de la fase OB a la fase WR.”

sus características atípicas, y de ese modo llevan a la comunidad científica pertinente a una revisión tanto en lo que respecta a entidades individuales que deben ser cambiadas de una categoría a otra, como de la revisión de la propia colección de categorías que constituye esa clasificación.

II. Las estrellas Wolf-Rayet en su primer siglo de estudio⁶

Desde su descubrimiento en 1867 y hasta casi finales del siglo XX, las estrellas Wolf-Rayet (WR) han constituido un enigma astrofísico. Más de un siglo después, habiéndose registrado un enorme progreso tanto en las técnicas observacionales como en la teoría sobre atmósferas e interiores estelares, todavía no se disponía de modelos satisfactorios que reprodujeran las propiedades y estados evolutivos de estas estrellas. Una de las pistas importantes que se habían podido establecer para la década de 1980, es que resulta más adecuado hablar de un “fenómeno WR” que de “estrellas WR”, porque este fenómeno puede encontrarse en estrellas con características físicas y estados evolutivos muy diferentes.⁷ Es decir, el trabajo infructuoso de identificar el tipo de estrellas al que pertenecían estas estrellas, dio paso a desacoplar un fenómeno bastante bien caracterizado, de un tipo de estrellas también suficientemente caracterizado, pero cuyas clases no se había logrado correlacionar.

Para esa década, se caracterizaba al espectro de una WR, típicamente por las siguientes propiedades:⁸

⁶ Véase Miguel (1984).

⁷ Rublev (1975: 259) señala: “A este tipo [WR] pertenecen estrellas con líneas (‘bandas’) brillantes y muy anchas de He I, He II, también nitrógeno, carbono y oxígeno en diferentes estados de ionización. Un número de núcleos de nebulosas planetarias muestran espectros similares, sin embargo, estos objetos difieren de las estrellas WR ‘clásicas’ por su baja luminosidad y masas pequeñas.” Por otra parte, Abbott y Conti (1987: 128) señalan que “La masa [de las estrellas WR] cubren un rango entre 6,4 a 50 masas solares.”

⁸ Véanse Miguel (1984: 96); Abbott y Conti (1987: 132) en la sección *Model Atmosphere*; Smith (1968: 138) en su sección *The spectra and the classification system*.

- Presentan un espectro de líneas de emisión superpuesto a un continuo de alta temperatura (típicamente mayor que 15.000 K)
- Las líneas de emisión tienen un ancho considerable expresado en unidades de velocidad, es decir que sus atmósferas tienen una actividad muy intensa en términos de viento estelar, del orden de cientos a miles de km/s. Esta característica muestra que, al ser las velocidades de expansión mucho mayores a la velocidad de escape, estas estrellas están perdiendo inmensas cantidades de masa.
- Algunas de sus líneas de emisión presentan perfiles P-Cygni, consistente en una absorción ubicada hacia menores longitudes de onda que el máximo de la emisión, dando cuenta de las velocidades del viento estelar [fig. 1].
- Las líneas de emisión presentan un amplio rango de ionización (llegando a nitrógeno y oxígeno cinco veces ionizados).
- Para tales niveles de ionización corresponde asignarles una temperatura muy alta que, sin embargo, supera a la que le corresponde como temperatura de color de acuerdo a su espectro continuo de radiación de cuerpo negro.⁹
- Estas características del espectro, a pesar de mostrar la presencia de una envoltura estelar de condiciones dinámicas extremas y alejadas del equilibrio termodinámico, permanecen estacionarias a lo largo de décadas.

Con respecto a los perfiles P-Cygni representados en la figura 1, el núcleo de la estrella provee la emisión que habrá de ser absorbida en el sector I, en dirección al observador. Los demás sectores proveen radiación corrida al rojo o al azul según sus velocidades radiales vistas por el observador, lo cual produce el ancho de las emisiones en virtud del efecto Doppler. La proporción de una envoltura con altas velocidades de material que está

⁹ Véase como ejemplo la relación entre la intensidad media de la radiación en el espectro y su correspondencia con la temperatura de cuerpo negro en el caso del sol (Stix, 2004, p. 10).

siendo soplado hacia el espacio (según los intensos vientos de acuerdo con el ancho de las emisiones producto del efecto Doppler) con una extensión muy grande respecto a un núcleo menor, como se muestra en el esquema de la figura 1, brinda la explicación del ancho de las emisiones y también de la zona de absorción en la región de longitudes corridas hacia el azul, es decir, una absorción corrida al violeta.¹⁰

Para la década de 1980 se conocían alrededor de 200 estrellas WR en nuestra galaxia y algunas en las Nubes de Magallanes y otras galaxias cercanas. El catálogo de Van Der Hucht et al. (1981: 229 y ss), a través de su reseña de catálogos anteriores, nos permite apreciar no solo el sucesivo relevamiento de estas estrellas, sino también la evolución en la caracterización de sus propiedades espectrales.

Los autores señalan que el primer catálogo es el de Campbell (1884) que identifica 55 estrellas WR, poniendo de relieve como características más salientes, la presencia de líneas muy anchas de emisión y fuertes líneas brillantes de emisión superpuestas a un fuerte espectro continuo. Menciona también la presencia de bandas de absorción de diferentes intensidades y anchura.

¹⁰ La aparición de estos perfiles en el visible está asociada a la densidad de la envoltura de la estrella. Un análisis detallado de este aspecto excede el alcance de este trabajo, pero baste decir que la sola existencia de esta característica en la zona visible, es una evidencia más de la masa que está en juego en esas envolturas en expansión.

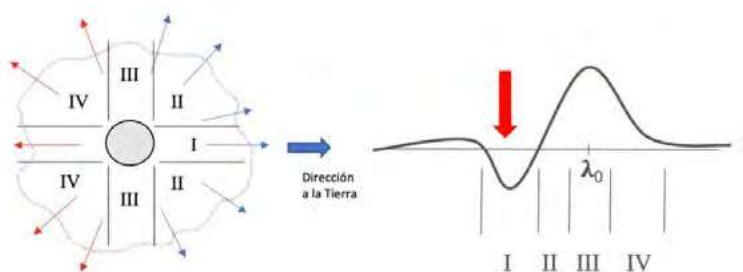


Figura 1. A la izquierda se representa la envoltura estelar con una atmósfera que está siendo soplada al espacio a grandes velocidades y con un núcleo relativamente pequeño respecto a esa envoltura. A derecha se muestra la distribución de la intensidad respecto a la longitud esperada para ese ión en particular. La absorción que se produce corresponde al sector I, en el que la atmósfera que se mueve en dirección al observador se interpone con la radiación que proviene del continuo y de emisiones que pudieron escapar de la atmósfera produciendo este perfil particular que llamamos “P-Cygni” (El Autor).

Le sigue el catálogo de Fleming (1912) abarcando 108 estrellas: 86 en la Vía Láctea, 21 en la Nube Grande de Magallanes (LMC) y solo una en la Pequeña Nube de Magallanes (SMC). Fleming destaca que la mayor luminosidad se concentra en dos brillantes líneas, una en la zona azul y la otra en la zona amarilla del espectro, cuyos centros se ubican en 4688 y 5813 Å, respectivamente.

El tercero lo debemos al trabajo de Cecilia Helena Payne-Gaposchkin, quien en 1925 había sugerido que las estrellas están principalmente compuestas de hidrógeno y logró en su tesis doctoral establecer que la clasificación de estrellas en tipos (actualmente O, B, A, F, G, K, M, L y T), indican principalmente una clasificación de temperaturas decrecientes. Su trabajo implicó poder correlacionar la intensidad de las líneas de emisión de las distintas clases espectrales de los diferentes tipos de estrellas y poder inferir de ello una escala para sus temperaturas.¹¹

Este tercer catálogo (Payne, 1930) incluye 92 estrellas, una de ellas en la SMC. Aparece en su trabajo la novedad de comparar la línea 4686 con

¹¹ Véase la reseña en *Nature*, October 10, 1925 y otra de P. W. Merrill (1926) para apreciar el impacto de la obra de Payne.

las líneas combinadas que aparecen cerca de $4340\text{\AA}$, de modo que describa el subtipo Wlen el que la primera es más fuerte que la combinación, y el subtipo WIII en el que la línea es más débil que esa combinación. Adicionalmente encuentra que, clasificándolas de este modo, las WIII se correlacionan con las estrellas de tipo Oa, mientras que las WI quedan relacionadas más cercanamente con las de tipo Ob, Oc y Od, sugiriendo que las WR más activas son aquellas con la emisión en 4686 más fuerte que la de $4633\text{\AA}$.¹²

De este modo da comienzo a una clasificación en términos de subtipos de estrellas WR en función de las intensidades relativas entre sus propias emisiones y no solamente por la presencia y magnitud de tales emisiones.

El cuarto catálogo (Roberts, 1962) y el quinto (Smith, 1968), abarcan alrededor de 120 estrellas WR. Cabe mencionar que, en cada catálogo, debido a la discusión sobre los criterios clasificatorios, a la vez que se iban sumando algunas estrellas WR recientemente descubiertas, se iban eliminando de los nuevos catálogos otras anteriormente clasificadas bajo ese rótulo.

En los años siguientes se fueron sumando unas 57 WR descubiertas principalmente en relevamientos del hemisferio Sur y en el brazo de Carina, aunque de ellas terminaron siendo descartadas 17, quedando identificadas en el sexto catálogo, el de Van Der Hucht et al. (1981) un total de 159 (p. 307) estrellas WR detectadas en nuestra galaxia.

Este pequeño recorrido entre 1867 en que se detectaron por primera vez, hasta que, a finales de la década de 1980, de acuerdo a Abbott y Conti (1987: 124) se agregan 101 estrellas WR en la Gran Nube de Magallanes, unas 5 en la Pequeña Nube de Magallanes.¹³

Tomando el catálogo de 1981 como marco a la investigación que estamos analizando, nos permite apreciar algo que, aunque es muy elemental, no suele ser puesto en primer plano en las descripciones de la tarea científica: no hay manera de detectar nuevos individuos que pertenezcan a una nueva clase sin poner en cuestión los criterios que definen esa nueva clase.

12 van der Hucht et al. (1981: 233).

13 Véase Abbott y Conti (1987: 125) para el estado más detallado del relevamiento de estrellas WR en diferentes galaxias para ese momento. Ver el estado actual del relevamiento en Galactic Wolf-Rayet Catalogue: <http://pacrowther.staff.shef.ac.uk/WRcat/history.php>

Por este motivo, proponerse salir al descubrimiento de nuevas estrellas WR una vez detectada las primeras, no pudo ser una tarea puramente observacional, sino que involucró una labor sistemática de intercambio de observaciones y consideraciones acerca de los procesos, características y dinámicas propias que se elegirían como sustantivas para considerar una estrella como perteneciente al tipo WR. Observar nunca ha sido una tarea sencilla.

Mientras que las primeras notas distintivas podían sugerir la existencia de un tipo particular de estrellas, las sucesivas observaciones ponían en cuestión que se tratara de un único tipo. A medida que se abordaba este panorama anómalo por las diferentes contradicciones en utilizar uno u otro criterio, se iban ingresando y eliminando estrellas de los sucesivos catálogos.

Este caso muestra la compleja tarea de clasificar el mundo. Mientras que ciertas características hacen que dos casos caigan dentro de un mismo casillero, otras características hacen que pertenezcan a casilleros distintos. El desafío es poder obtener una taxonomía útil para comprender, explicar y predecir, y esa taxonomía es obviamente intermedia entre los extremos más triviales: todas son estrellas y cada estrella es un mundo.

III. Nacimiento y muerte de los taxones

Un sistema de clasificación espectral tiene que permitir separar estrellas fácilmente en grupos bien definidos. En el caso de las estrellas “normales” (para distinguirlas de las WR) esa clasificación ya existía para la década de los 80. Su interpretación física es relativamente sencilla: el espectro visible depende fundamentalmente de tres parámetros, la temperatura efectiva, la composición química en la superficie y la aceleración de la gravedad en la superficie. A partir de ajustar estos tres parámetros es posible, ya para esa década, obtener modelos numéricos que reproducen bastante bien los espectros estelares. Estos modelos constituyen así una herramienta que nos permite algún grado de avance en una o más de las tres dimensiones señaladas anteriormente: comprender, explicar y predecir.

Para las estrellas WR también existe una clasificación, cuyos primeros pasos ya hemos señalado al reseñar los primeros catálogos. Pero en contraposición con el resto de las estrellas, esta clasificación no había

permitido generar modelos exitosos en reproducir las características que observamos en sus espectros para ese entonces.

Se distinguieron desde un principio dos tipos principales de estrellas WR, unas asociadas a una secuencia de nitrógeno y otras a una secuencia de carbono, en función de las emisiones de los iones de estos elementos. En 1935 C. S. Beals hizo esta sugerencia fundamentada en las observaciones y señalando que la discusión sobre la clasificación de las estrellas WR sería probablemente mucho más inteligible si estas dos secuencias fueran primero descritas separadamente.

En la comunicación de la IAU de 1939, se señala que Mrs. Gaposchkin (Cecilia Helena Payne-Gaposchkin citada anteriormente) en aquel momento (1935) había entregado un dictamen en minoría, ahora expresaba la opinión de que “Estaría bien adoptar la clasificación que él [Dr. Beals] había propuesto [el año anterior]”. Por tal motivo, sigue la comunicación, “esta recomendación parece ahora ser unánime.”¹⁴

La propuesta de Beals consistía en distinguir las WR en dos secuencias: WN y WC, como ya habíamos anticipado en la introducción. Los primeros subtipos propuestos por Beals consistieron en WN8, WN7, WN6, WN5 para la secuencia de nitrógeno y WC8, WC7, WC6 para la secuencia de carbono. Más tarde fueron extendidos por Smith (1968).

Las estrellas WR han sido consideradas peculiares por mostrar emisiones muy intensas de O VI. Sin embargo, como había ocurrido cuatro décadas atrás con la propuesta de Beals, Barlow y Hummer (1982) sugieren que estas estrellas tan peculiares podrían ser mejor comprendidas si agregamos otra secuencia, esta vez referida al oxígeno, dando lugar a las estrellas WO con sus subtipos WO1, WO2, WO3 y WO4. Esta secuencia se reserva para espectros que muestran simultáneamente un rango muy amplio de iones de oxígeno (O IV, O V, O VII y O VIII). Paralelamente Méndez y Niemela (1982) introdujeron los subtipos WC3 y WC2 para dar cuenta de espectros dominados por emisiones de C V, O VI y O VII.

El derrotero de la clasificación entonces, a lo largo de este período de poco más que un siglo, muestra el nacimiento y proliferación de taxones,

14 Beals and Russell (1939: 248): “The Sub-Committee repeats its recommendations of 1935 (see pp. 184-87 of Transactions of the International Astronomical Union, 5, 1935). Mrs. Gaposchkin, who at that time submitted a minority report, now expresses the opinion that: “It will be well to adopt the classification that he [DrBeals] has proposed”; so that this recommendation may now be regarded as unanimous.”

comenzando por el primer rótulo “WR” acuñado a partir de 1867. Más tarde, este rótulo parece no representar la diversidad de estrellas que deseamos estudiar bajo esa caracterización. Para subsanar esta situación y proveer una plataforma más adecuada para la comprensión, Beals (1939) sugiere que se distinga en primer lugar las estrellas de una secuencia asociada al nitrógeno “WN” y otra asociada al carbono “WC”. Cada uno de estos dos tipos de WR, a su vez, se desdobra en diferentes subtipos (Tabla I y Tabla II). Más de cuatro décadas después, en 1981, aparecen subtipos intermedios y otros subtipos que se extienden respecto de los iniciales, abarcando desde WN2 a WN8 y desde WC3 a WC9. Para esa misma época, se reconoce la ventaja de distinguir una tercera secuencia, asociada al oxígeno (Tabla III), abarcando desde WO1 a WO4. Más adelante se pondrán en duda la utilidad o adecuación de algunos de los subtipos propuestos.

En resumidas cuentas, para 1984 se contaba con la clasificación de espectros WR que figura en las tablas I, II y III.¹⁵

Tabla I. Subtipos de la secuencia WN

Clase	Intensidad de la emission	Otros criterios
WN8	N III >> N IV	He I fuerte, P-Cygni, N III I 4640 » He II I 4686
WN7	N III > N IV	He I débil, P-Cygni, N III I 4640 < He II I 4686
WN6	N III ≈ N IV	N V presente pero débil
WN5	N III ≈ N IV > N V	
WN4.5	N IV > N V	N III débil o ausente
WN4	N IV ≈ N V	N III débil o ausente
WN3	N IV << N V	N III débil o ausente
WN2	N V débil o ausente	He II fuerte

¹⁵ Miguel (1984:96).

Tabla II. Subtipos de la secuencia WC

Clase	Criterio carbono	Criterio oxígeno	Otros criterios	Carbono II
WC9	$C III > C IV$	O V débil o ausente	$He II < He I$	C II presente
WC8.5	$C III > C IV$	O V débil o ausente		C II ausente
WC8	$C III \approx C IV$	O V débil o ausente	$He II \gg He I$	C II presente *ver texto
WC7	$C III < C IV$	$C III >> O V$		
WC6	$C III << C IV$	$C III > O V$		
WC5	$C III << C IV$	$O V > C III > O VI$		
WC4	C IV fuerte, C III débil o ausente	$O V > O VI > C III$		
WC3	C IV fuerte, C III ausente	$O VI > O V > O VII$		
WC2	C IV fuerte, C III ausente	$O VI > O VII > O V$		

Tabla III. Subtipos de la secuencia WO

Clase	Criterio oxígeno	Otros criterios
WO4	$O VI \approx O IV$ muy fuertes	C IV fuerte y C III ausente
WO3	$O VI > O IV$	
WO2	O IV ausente, $O V < C IV$	
WO1	$O V > C IV$	

El subtipo WC8.5 había sido introducido en el catálogo de Van Der Hucht et al. (1981), diferenciando este subtipo del WC9 por la ausencia de C II, como figura en la Tabla II. Sin embargo, Lundstrom y Stenholm (1983) sugieren eliminar este subtipo del catálogo debido a que encuentran espectros de líneas de C II en espectros WC8, y distinguen WC8 de WC9 en los casos dudosos utilizando la relación entre He II λ 5411 y He I λ 5876.

En el estudio realizado (Miguel, 1984), se confirma la existencia de emisiones de C II en estrellas que corresponden al criterio principal del subtipo WC8, según el cual la presencia de C III es del mismo orden que la de C IV, mostrando que el subtipo WC8.5 no es consistente con la persistencia de C II en tipos de mayor temperatura, como se muestra en la figura 2 para el espectro de la estrella HD 117297 del tipo WC8.¹⁶

16 Se trata de la estrella HD 117297, o bien WR53, de tipo WC8, que muestra emisiones C II λ 4258 con un ancho equivalente de 22 Å, ausente en estrellas WC7, tal como se espera en la sucesión de subtipos para la temperatura de excitación. Miguel 1984, pp. 61 y 101. Actualmente categorizada como tipo WC8; WC9; WC8d en Galactic Wolf Rayet Catalogue.

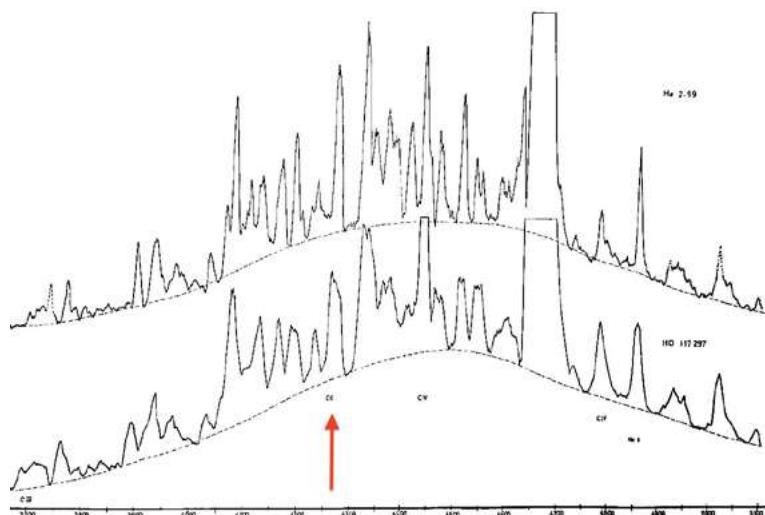


Figura 2. Espectro de dos estrellas WR. Superior: He 2-99 del subtipo WC9. Inferior: HD 117297 del subtipo WC8. Ambas muestran emisiones correspondientes a C II 14258 indicada por la flecha.

Como se puede apreciar por la caracterización de cada subtipo, un subtipo cuyo número es mayor, corresponde a una estrella de menor temperatura de excitación, es decir, indica una menor temperatura según la proporción de iones que parecen estar presentes en su atmósfera.

El subtipo WC9 presenta emisiones de C II, por ser un subtipo de menor temperatura. En cambio, ya en el subtipo WC8.5 de mayor temperatura, no hay emisiones de C II. En cambio las emisiones de C III son dominantes. Por un lado C III está presente mientras que C II, no. Por otra parte, C III está presente en mayor grado que C IV, lo cual muestra que su temperatura todavía no es tan alta como para que C IV sea dominante y comience a disminuir C III, como ocurrirá para los subtipos WC5 y WC4. Consistentemente, identificamos los subtipos WC3 y WC2 con la ausencia de emisiones de C III.

Notemos entonces que la reaparición de C II para el subtipo WC8, luego de haber desaparecido en WC8.5, y haber estado presente en WC9, funciona como una anomalía recalcitrante. Tengamos en cuenta que toda

clasificación es fruto de una combinación de criterios sugeridos por quien realiza la investigación, que los propone como útiles o promisorios y, en ese sentido, surgen de la subjetividad del observador. Posteriormente a ser sugeridos, el proceso habitual es que sean analizados y finalmente consensuados por la comunidad científica dedicada a esa parcela del mundo fenoménico. Aquí los criterios pasan a ser intersubjetivos. Hasta aquí, nos estamos refiriendo a la contribución del sujeto que investiga. Sin embargo, estos criterios se enuncian en términos de propiedades que las investigaciones previas de estos objetos y fenómenos han mostrado. Es decir, los criterios elegidos están apoyados en propiedades y relaciones que la investigación ha constado anteriormente, en términos de teorías y conocimientos previos que no están en duda, o al menos no totalmente, al momento de proponer tales criterios. Por ejemplo, se presupone que el ancho de las emisiones está asociado a las velocidades de las capas de la envoltura por medio del efecto Doppler, sin poner en duda que el corrimiento al rojo indica alejamiento y el corrimiento al azul, indica acercamiento al observador. De este modo, los criterios propuestos tienen dos componentes, por un lado la contribución subjetiva de su proponente y la aceptación intersubjetiva de la comunidad científica, y por otro lado las propiedades que muestra el objeto de estudio y las relaciones entre sus partes, lo cual constituye la contribución del objeto.¹⁷ Esta contribución del objeto, proveniente del conocimiento previo que tenemos sobre él, debe ser consistente. Por este motivo, dado que la clasificación está intentando representar estrellas de mayor temperatura acorde con la aparición de iones superiores, lo cual hace menos viable la estabilidad de emisiones de iones inferiores. Por ello se espera que la presencia de iones inferiores vaya disminuyendo a medida que analicemos estrellas de mayor temperatura. Una vez desaparecidas las líneas de cierto ion, no se espera que vuelvan a aparecer en estrellas de mayor temperatura que aquellas en las que ya no aparecía. En otras palabras, si la estrella tiene mayor temperatura de manera que los átomos de carbono sufren una ionización más profunda (C III, C IV) es dudoso que luego de un subtipo en el que han desaparecido las emisiones de C II, vuelvan a aparecer en un subtipo más caliente. Por este motivo la sugerencia de Lundstrom y Stenholm no es un detalle a ser desestimado.

17 Para más detalles sobre la distinción entre las contribuciones del sujeto que investiga y el objeto investigado, véase Hoyninguen-Huene (2023: 147).

Por otra parte, aún cuando esta sugerencia evita que la clasificación sobrelleve una inconsistencia importante, queda pendiente el problema de sostener el paso de WC9 a WC8, sin un paso intermedio.

Notemos que para WC9 la nota distintiva es la dominancia de C III por sobre C IV, que es consistente con la presencia todavía de emisiones de C II.

Pero para el subtipo WC8, la dominancia a desaparecido, C III ahora está en niveles comparables a C IV, con lo cual inferimos que esa estrella tiene una mayor temperatura que hace crecer la presencia de C IV. Sin embargo, esta situación no va a compañada de la desaparición de C II. La situación no es tan recalcitrante, pero no deja de ser otra peculiaridad de las estrellas WR.¹⁸

Lejos de haberse terminado con la tarea clasificatoria, en la actualidad siguen apareciendo objetos que fundamentan sugerencias para la creación de nuevos taxones. La aventura continúa.¹⁹

IV. Conclusiones

Hemos presentado un caso de estudio histórico, que data de la década de 1980, época en la que ya habían pasado más de cien años de conocer los espectros estelares WR.

A lo largo de ese período, se habían producido ya varios catálogos, siendo el sexto catálogo de 1981 reuniendo información de alrededor de casi 200 estrellas de este tipo.

Mientras que el relevamiento seguía su curso activamente, del mismo modo seguían las discusiones en torno a la mejor clasificación capaz de resultar eficaz frente a las desafiantes características de estos objetos celestes.

Sin poder contar con modelos matemáticos capaces de reproducir las características espectrales observadas, la discusión sobre la interpretación de esas características y la forma de lidiar con las inconsistencias aparentes

18 Para una perspectiva más detallada sobre este tipo de estrellas, véase Crowther, 2007.

19 Véase Zhang et al., 2020 en referencia al descubrimiento de la estrella galáctica WR 121-16 que puede ser clasificada como una transición WR del subtipo WN7o/WC.

para el estado del arte, hacía de la tarea clasificatoria una aventura del descubrimiento, tan atenta a los nuevos datos como a las nuevas propuestas de reforma de la taxonomía.

En ese recorrido, se pueden encontrar jalones en los que se proponían taxones capaces de distinguir un determinado grupo de estrellas bajo cierto rótulo. Sin embargo, no pasaba mucho tiempo sin que la inspección de esa colección de casos obligara a volver sobre las definiciones de cada taxón y revisar cuáles debían ser los criterios capaces de sostener una mejor partición que la ensayada anteriormente.

El ejemplo histórico permite apreciar la interrelación entre las decisiones convencionales y las expectativas de poder distinguir diferentes tipos de objetos por características intrínsecas asociadas a los procesos naturales que tienen lugar en su seno. Es sencillo clasificar objetos en función de contribuciones que provienen del sujeto que los observa, pero la aventura científica consiste en tratar de encontrar clasificaciones sobre la base de propiedades, procesos y dinámicas propias del objeto estudiado, aún cuando no sea posible hablar de ello sin que haya un sujeto que estudie e identifique tales aspectos. El arte de generar una clasificación útil para comprender, explicar y predecir es una dimensión exquisita de la práctica científica y sus dificultades y diferentes estadios suelen ser invisibilizados una vez que hemos dado con una clasificación estable. Solo cuando sobreviene un cambio revolucionario capaz de llamar la atención de historiadores y filósofos es que se vuelve a focalizar en la compleja trama que mantiene entrelazadas las tareas de observar objetos y a la vez construir clasificaciones capaces de generar conocimiento a partir del ordenamiento que se ha logrado.

Referencias

- Abbott, D. C., & Conti, P. S. (1987). *Wolf-rayet stars. IN: Annual review of astronomy and astrophysics*. Volume 25 (A88-13240 03-90). Palo Alto, CA, Annual Reviews, Inc., pp.113-150.
- Beals, C. S., & Russell, H. N. (1939). Report of Sub-Committee on the classification of Wolf-Rayet stars. *Transactions of the International Astronomical Union*, 6, pp. 248-253.

- Barlow, M. J., & Hummer, D. G. (1982). *The WO Wolf-Rayet stars*. In Symposium-International Astronomical Union (Vol. 99, pp. 387-392). Cambridge University Press.
- Campbell, W. W. (1884). The Wolf-Rayet stars. *Astronomy and Astro-Physics* (formerly *The Sidereal Messenger*), 13, pp. 448-476.
- Crowther, P. A. (2007). Physical properties of Wolf-Rayet stars. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 45, pp. 177-219.
- Fleming, W. P. (1912). *Galactic Wolf Rayet Catalogue*. Harvard College Obs. Ann. 56, p. 165. (último acceso: 23/06/2024) <http://www.pacrowther.staff.shef.ac.uk/WRcat/index.php>
- Galactic Wolf- Rayet Catalogue. [incluye la serie histórica de catálogos] (último acceso: 23/06/2024) <http://pacrowther.staff.shef.ac.uk/WRcat/history.php>
- Hillier, D. J. (1989). WC stars-Hot stars with cold winds. *Astrophysical Journal*, 347, pp. 392-408.
- Hoyningen-Huene, P. (2023). The Plausibility of Thomas Kuhn's Metaphysics. In *Perspectives on Kuhn: Contemporary Approaches to the Philosophy of Thomas Kuhn* (pp. 139-154). Cham: Springer International Publishing.
- Lundstrom, I. & Stenholm, B. (1983). En comunicación personal con Roberto Méndez.
- M., E. Stellar Atmospheres: a Contribution to the Observational Study of High Temperature in the Reversing Layers of Stars. *Nature* 116, pp. 530-532 (1925). <https://doi.org/10.1038/116530a0>
- Méndez, R. H., Miguel, C. H., Heber, U., & Kudritzki, R. P. (1985). Helium rich subdwarf O stars and central stars of planetary nebulae. In *Hydrogen Deficient Stars and Related Objects*. International Astronomical Union Colloquium (Vol. 87, pp. 322-343).

- Cambridge University Press. <https://www.cambridge.org/core/journals/international-astronomical-union-colloquium/article/helium-rich-subdwarf-o-stars-and-central-stars-of-planetary-nebulae/C5028EDF2FA80B40BF131DD7C9629FEB>
- Méndez, R. H., & Niemela, V. S. (1982). *A Reclassification of WC and "O VI" Central Stars of Planetary Nebulae, and Comparison with Population I WC Stars*. In *Symposium-International Astronomical Union* (Vol. 99, pp. 457-461). Cambridge University Press.
- Merrill, P. W. (1926). *Stellar Atmospheres. A Contribution to the Observational Study of High Temperature in the Reversing Layers of Stars*, Harvard Observatory Monographs No. 1.
- Miguel, H. (1984). *Comparación de estrellas Wolf-Rayet de distinta luminosidad. Tesis de Seminario. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires. (En hemeroteca de la Facultad)*.
- Payne, C. H. (1925). *Stellar Atmospheres; a Contribution to the Observational Study of High Temperature in the Reversing Layers of Stars*.
- Payne, C. H. (1930). Classification of the O Stars. *Harvard College Observatory Bulletin No. 878*, pp. 1-6, 878, pp. 1-6.
- Roberts, M. S. (1962). The galactic distribution of the Wolf-Rayet stars. *Astronomical Journal*, Vol. 67, p. 79-85 (1962), 67, pp. 79-85.
- Rublev, S. V. (1975). *The Wolf-Rayet Stars*. *Symposium - International Astronomical Union*, 67, 257-274.
- Schmutz, W., Hamann, W. R., & Wessolowski, U. (1989). Spectral analysis of 30 Wolf-Rayet stars. *Astronomy and Astrophysics*, vol. 210, no. 1-2, pp. 236-248.
- Smith, L. F. (1968). A revised spectral classification system and a new catalogue for galactic Wolf-Rayet stars. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 138(1), pp. 109-121.

- Stix, M. (2004). The sun: an introduction. Springer Science & Business Media.
- van der Hucht, K. A. (2006). New Galactic Wolf-Rayet stars, and candidates-An annex to The VIIth Catalogue of Galactic Wolf-Rayet Stars. *Astronomy & Astrophysics*, 458(2), pp. 453-459.
- van der Hucht, K. A., Conti, P. S., Lundström, I., & Stenholm, B. (1981). The Sixth Catalogue of galactic Wolf-Rayet stars, their past and present. *Space Science Reviews*, 28, pp. 227-306.
- Zhang, W., Todt, H., Wu, H., Shi, J., Hsia, C. H., Wu, Y.,... & Hou, Y. (2020). A New Transition Wolf-Rayet WN/C Star in the Milky Way. *The Astrophysical Journal*, 902(1), p. 62.